Axel Rossmann

Probleme der Maschinenelemente erkennen, verhüten und lösen

Unter besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus

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

Band 3 B: Typische verfahrensspezifische Probleme, Mechanismen, Ursachen der Fertigung: Spanende Bearbeitung, spanlose Bearbeitung (ECM, EDM), Schmelzschweißverfahren, Widerstandsschweißen, Elektronenstrahlschweißen, Reibschweißen, Diffusionsschweißen, Löten, Kleben, Verfestigungs- und Abrasionsstrahlen, Reinigen und Ätzen, Beschichtungen, Wärmebehandlung, Fasertechnik.

© Axel Rossmann - Turbo consult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

turbo consult
Axel Rossmann

1. Auflage
(Serie 1.0)

© Axel Rossmann - Turboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

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 978-3-00-034552-4

Vorwort

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Axel Rossmann

© Axel Rossmann - Tubconsult
alle Rechte vorbehalten - Urheberrechtlich geschützt

Was mit der besonderen Form dieses Buchs erreicht werden soll.

Motivation: Interessante und überraschende Überschriften zu den Bildern.
Interesse wecken: Schnell erfassbare Bilder typischer Maschinenelemente mit inhaltsbezogenen Merkmalen.
Sinnhaftigkeit und Notwendigkeit des theoretischen Unterbaus im Studium erkennen.
Praxisrelevanz mit dem Bezug zur allgemeinen eigenen technischen Erfahrung. Das sollte sollte bereits ohne den theoretischen Teil eines Studiums für die Industrie von Interesse sein.
Erklärungen möglichst einfach mit Hilfe der Vernetzung (Bildangaben) im Text zu finden.
Praxistauglichkeit. Auch nach dem Studium soll das Buch als ein Ratgeber dienen. Es unterstützt dafür insbesondere das Erkennen auslegungsrelevanter Einflüsse. Dabei soll ein umfangreiches Sachregister helfen..
Vertiefungsmöglichkeit mit Hilfe von Literaturhinweisen. Viele haben Angaben zum kostenlosen Down-Load im Internet.

ann - Turboconsult
erlage nur mit Lizenz

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 vom Gewinde („****C1****“) aus (Bild 6.1.1.2-9).*

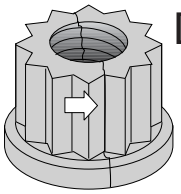
Versprödung durch ‘Einschießen’ von Fremdmetallschmelze *(Lötrissigkeit, engl. LME, Band 1 Bild 5.8.1-2 und Bild 5.8.1-3). Dabei dringt in einem schnellen Vorgang benetzende* ***Metallschmelze*** *in den unter ausreichender* ***Zugspannung*** *stehenden Werkstoff („****D1****“). Die Bruchfläche kann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

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

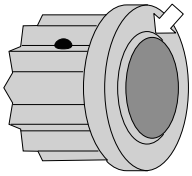
Bild zum Beispiel siehe folgende Seite.

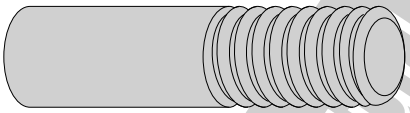
© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

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)

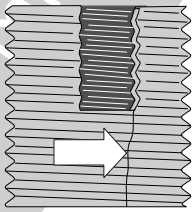




B1

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.

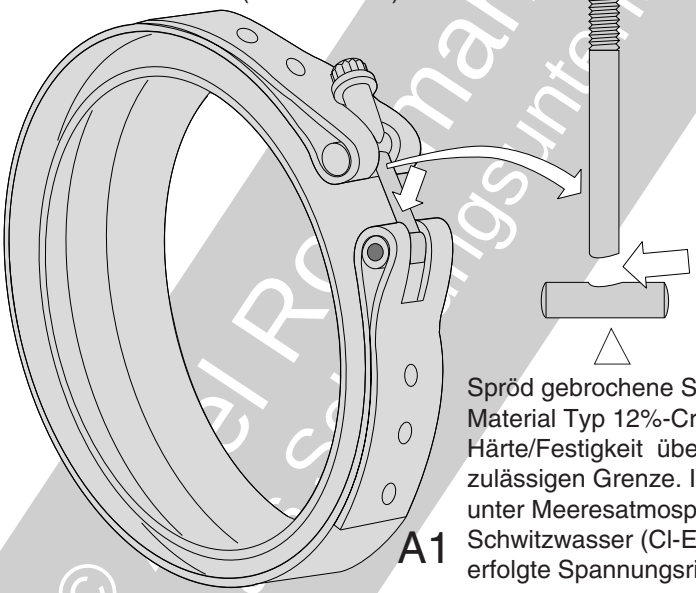
Schubstange (Vergütungsstahl verkadmet) mit Rissen durch Wasserstoff-versprödung B3



B2

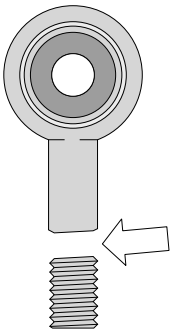
Gewindeeinsatz (Einsatzstahl verkadmet) mit Riss durch Wasserstoffversprödung

Spannschraube (12% Cr-Stahl)



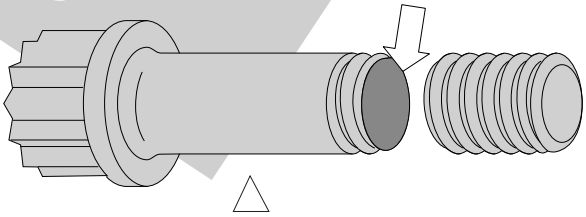
Schubstange (Vergütungsstahl) mit Bruch infolge Spannungsrisskorrosion wegen ungünstigem Gefüge (zu hart).

A2

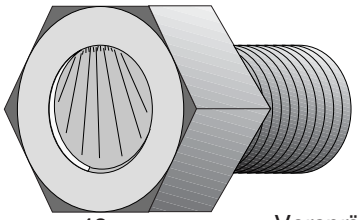


Spröd gebrochene Schrauben. Material Typ 12%-Cr-Stahl. Härte/Festigkeit über der max. zulässigen Grenze. Im Betrieb unter Meeresatmosphäre und/oder Schwitzwasser (Cl-Einwirkung) erfolgte Spannungsrisskorrosion.

A1



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



48 mm

E1 Versprödung durch 'Werkstoffalterung'

Bild zum Beispiel

© Prof. Rodermann, Turbocons
Lehrmaterialien, Seminarunterlage 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 Verhalten der Maschinenelemente.
Diese Korrektur ist noch in Arbeit und fließt in die endgültige Ausgabe ein.

Berater

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

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Inhalt

Vorwort

Konstruktionseinflüsse auf die Fertigung

10. Die fertigungsrelevanten Aufgaben des Konstrukteurs:
Gestaltung, Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Arbeitsfolgen, Reparatur

Halbzeug

11. Werkstofffehler - Probleme bei Rohteilen und Halbzeug
11.1 Ursachen für Probleme bei Rohteilen und Halbzeug
11.2 Schäden durch Probleme bei Rohteilen und Halbzeug
11.2.1 Gussteile
11.2.2 Schmiedeteil
11.2.2.1 Schadensbeispiele
11.2.3 Heißisostatpressen (HIP)
11.2.3.1 Regeneration von Heißteilen
11.3 Abhilfen gegen Schäden aus Problemen an Rohteilen und Halbzeug

Herstellung

12. Fertigungsverfahren
12.1 Faktoren die Fertigungsprobleme und Schäden begünstigen
12.2 Fertigung und Betriebsverhalten der Bauteile
12.2.1 Verfahrensspezifische Probleme und Schäden
12.2.1.1 Spanende Bearbeitung

© Axel Bossmann - Turboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

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

Handling

13. Verpackung, Transport und Lagerung

Reparatur

14. Reparatur gelaufener Bauteile
14.1 Grenzen der Reparierbarkeit
14.2 Entwicklung von Reparaturverfahren
14.3 Zulassung von Reparaturen
14.4 Reparaturerprobung

Sachregister

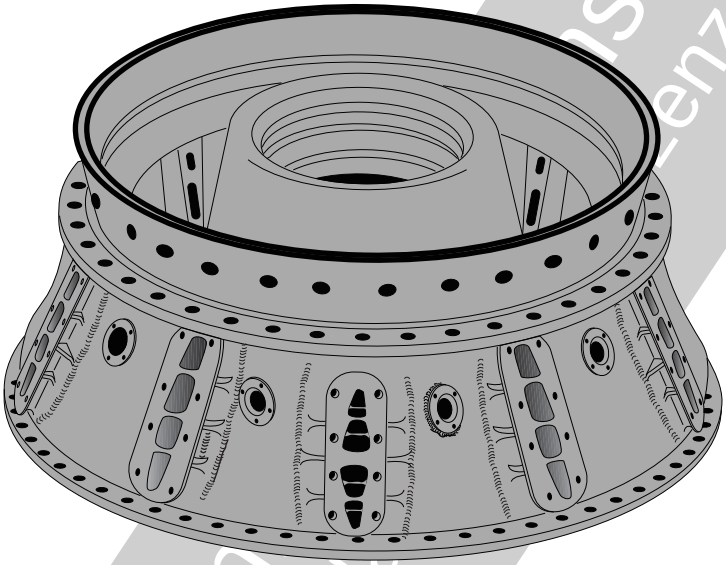
© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung von Maschinenelementen

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12. Fertigung



Der Fertigung werden hier Prozesse zugeordnet, welche sich an die in Kapitel 11 behandelte Rohteil- bzw. Halbzeugproduktion anschließen. Fertigungs- und Reparaturverfahren sind in umfangreicher Fachliteratur ausreichend beschrieben. Einige Literaturangaben sind dem Literaturverzeichnis am Ende des Kapitels und auf Seite 12.2.1.1-2 entnehmbar. Sie sind geeignet, Kenntnisse zu den Verfahrensabläufen zu vermitteln, um die **Ursachen und Mechanismen typischer Fertigungsfehler** zu verstehen. Dieser Themenkreis wird in der zugänglichen Literatur weit weniger umfassend und eingehend behandelt.

Das folgende Kapitel beschäftigt sich in erster Linie mit Problemen der Fertigung von Leichtbauteilen. Als Beispiele wurden Triebwerkskomponenten gewählt. Dabei geht es nicht nur um die Fertigungsverfahren selbst, sondern auch um das **Zusammenwirken mit Einflüssen aus Transport, Reinigung und Lagerung** sowie die **Arbeitsvorbereitung** (Kapitel 13). Eine Beschreibung der Auswirkungen auf das Betriebsverhalten soll die notwendige Einsicht für eine optimale **Schadensverhütung** vermitteln. Betrachtet man das Ermüdungsverhalten der Bauteile, erhalten Oberflächeneinflüsse eine besondere Bedeutung. Das Stichwort **„Surface Integrity“** überschreibt dieses Thema und wird in dem gesonderten Band 4, Kapitel 17.2 behandelt. Entscheidend für die Sicherheit ist der sog. **„Human Factor“** (Band 4, Kapitel 16 und Bild 17.1-2). Menschliche Fehler und Schwächen sind oft auch dann sicherheitsrelevant im Spiel, wenn es sich auf den ersten Blick lediglich um ein Verfahrensproblem zu handeln scheint. Man denke nur an Maßungenauigkeiten und Fehler in Zeichnungsangaben, Arbeitsplänen, Spezfikationen und Vorschriften.

Der Einfluss der „**Firmenkultur**“ auf den Fertigungsprozess ist nicht zu unterschätzen (Band 4,Kapitel 15 und Bild 17.5-2). Zu starker Gruppendruck und personenbezogene Maßnahmen bei „Ausschuss“ und Schäden können kontraproduktiv wirken. Die Erfahrung zeigt, dass ein glaubhaft objektives Handeln das primär auf die Analyse und Beseitigung des technischen Problems zielt (Band 4, Bild 17.5-1 und Bild 17.5-2) eine höhere Erfolgswahrscheinlichkeit hat.

© Axel Rossmann Consult als Schulungsunterlagen Lenz

Erfahrung, **Motivation und Ausbildung des Fertigungspersonals** (Band 4, Bild 17.1-5) dürfen gerade auch aus der Sicht der Kostenminimierung bei der geforderten Qualität nicht unterbewertet werden. Zur Motivation gehört ebenfalls das Arbeitsumfeld mit Raumangebot und Maschinenpark.

Steigende Anforderungen an die Aerodynamik sowie thermische und mechanische Belastungen der Bauteile verlangen eine immer stärkere Einengung von Schwachstellen. Die höhere Festigkeit und damit gewöhnlich auch eine größere Empfindlichkeit der Werkstoffe gegenüber der Einwirkung von Fertigungsprozessen verschärft das Sicherheitsproblem (Band 4 Bild 17.3.1-1).

Kommen Verfahren zur Anwendung, deren charakteristische Fehlstellen nicht mehr mit seriengeeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren ausreichend sicher gefunden werden (Band 4Bild 17.3.1-2), muss dieses Defizit eine **Verfahrensüberwachung** und die **Stabilität des Verfahrens** ausgleichen.

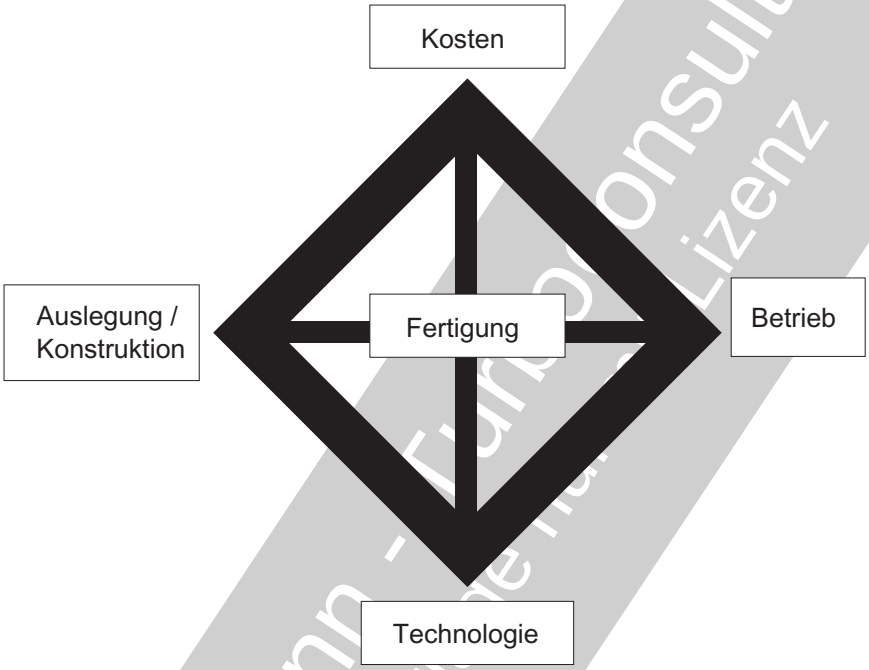
Ein weiteres Problem ist, wenn Verfahren die traditionell zur **Absicherung der Bauteileigenschaften** dienen (z.B. Kugelstrahlen oder Wärmedämmschichten) nun **Bestandteil der Lebensdauerauslegung** werden (Band 1, Bild 3.2-3). So können Fehler und Abweichungen im Verfahren die Sicherheit der Bauteile auf gefährliche Weise beeinflussen. Unter diesem Aspekt ist dieses Kapitel eng mit Band 4, Kapitel 17.1-1 über **Qualitätssicherung** verzahnt.

Die Fertigung von Triebwerksbauteilen, als wichtiger Bestandteil der Triebwerkssicherheit hat einen hohen Stand erreicht (Band 4, Bild 17.1-1). Die sich abzeichnende Steigerung der Triebwerkszahl als Folge des Wachstums der „globalen Industrie“ fordert jedoch weitere Anstrengungen zur Steigerung der Bauteilsicherheit. Weil die bisher angewandten Verfahren und Strategien zur Gewährleistung fehlerfreier Bauteile weitgehend ausgereizt sind, stellt sich die Frage nach einem neuen praktikablen Ansatz. Ein solcher Ansatz kann in der gezielten, aktiv qualitätssichernden Nutzung der **„Human Resources“** im Fertigungsbereich liegen. Hierzu gehört **Motivation, Erfahrung und Fachkunde** der Mitarbeiter (Band 4, Bild 17.1-2, bild 17.1-5 und Bild 17.5-2).

Die überwiegende Zahl der Probleme und Schäden die ihren Ursprung im Fertigungsbereich haben, lässt sich aus verschiedenen Blickwinkeln vorteilhaft betrachten. Jeder für sich kann neue Erkenntnisse vermitteln. Gemäß diesen Überlegungen und wegen des umfangreichen Stoffs wurde der zweiteilige Aufbau in Kapitel 12.2.1 und Band 4 Kapitel 18 gewählt. Zum einen werden die Probleme den verschiedenen Fertigungsverfahren zugeordnet (Kapitel 12.2.1). Zum anderen erfolgt in Band 4, Kapitel 18 eine Gliederung nach gleichen Einflüssen unterschiedlicher Fertigungsverfahren (z.B. Gratbildung, Band 4, Kapitel 18.2) unter dem Gesichtspunkt der Betriebssicherheit.

© Axel Rossmann - Kurbelgetriebe als Schulungsmaterial mit Lizenz

Fertigung: Schadensrelevante Probleme



© Axel Rossmann - Turbokonsult als Schulungsunterlage nach Lizenz

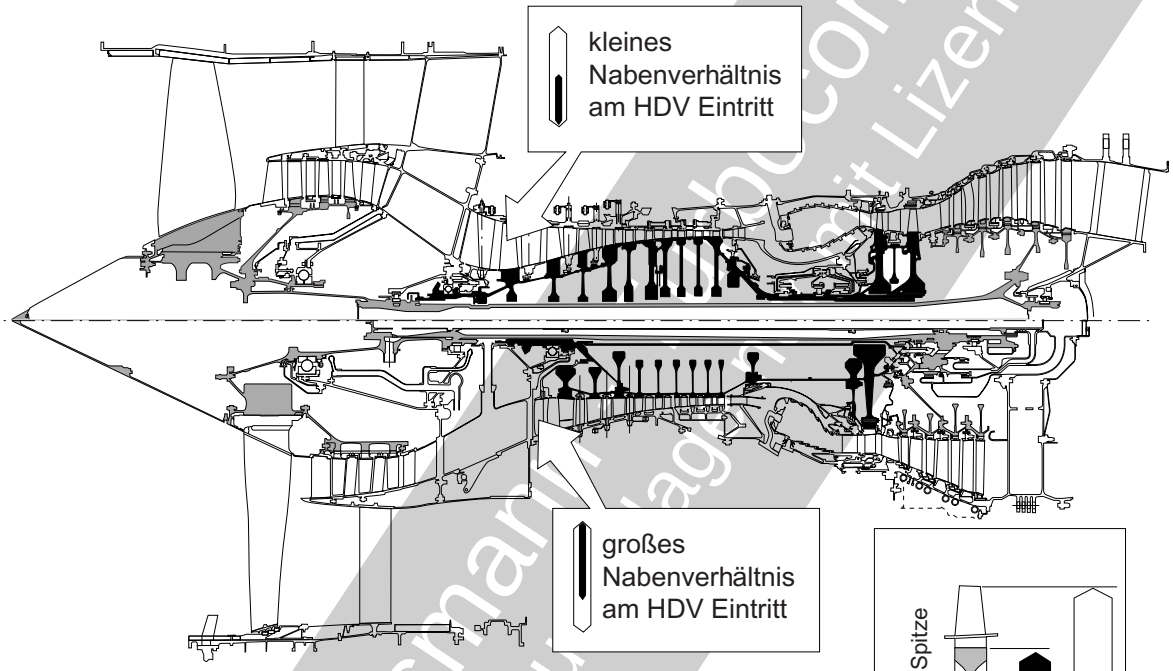
Die **Fertigung befindet sich in einem Spannungsfeld**. Für Auslegung/Konstruktion steht die Funktion und Sicherheit im Vordergrund. Der Betreiber ist besonders an **Verfügbarkeit und Lebensdauer** bei günstigsten **Betriebskosten** interessiert. Minimale **Herstellungskosten** müssen den geschäftlichen Erfolg der Fertigung garantieren. Dies erfordert optimale Herstellungstechnologien aber auch die Anpassung der Verfahren an Forderungen zur Realisierung neuer Technologien wie integrale Bauteile (z.B. von Blisks, Band 1 Bild 3-16). In integralen Gussvarianten (Bild 11.1-9) ist dieser Trend schon seit Langem zu erkennen.

Nachvollziehbare Analysen und Abschätzungen sollen aus den möglichen Kombinationen der Einflüsse und Forderungen auf die Fertigung das hohe **Kostenrisiko neuer Fertigungstechniken** in Entwicklung und Anlageninvestitionen zumindest überschaubar machen, nach Möglichkeit minimieren. Bild 12.1-1 zeigt einen solchen Versuch, Gesetzmäßigkeiten für einen Kompromiss zu formulieren. Natürlich spielt dabei die individuelle Gewichtung der Einflüsse eine entscheidende Rolle.

Stehen die **Kosten** der Bauteile bzw. der **neuen Maschine** im Vordergrund, wird man versuchen, die Zahl der aufwändig herzustellenden Bauteile zu minimieren. Hierzu gehört auch der Übergang zu neuen Konzepten wie zu Verbundbauweisen (Band 1 Bild 3-15). Auch der Einsatz gefügter (gelötet, geschweißt) Strukturen wie Leitapparate in Verdichtern und Turbinen passt hierzu. Damit entsteht die Forderung nach geeigneten Fertigungsprozessen. Diese können durchaus anspruchsvoller sein, als für die „gewohnten“ Bauteile.

Steigen die **Kraftstoffkosten** deutlich, relativieren sich dazu die Beschaffungskosten für die Triebwerke. Das kann zu deutlich anderen Produktionsprozessen führen. Man erkennt damit Langfristigkeit und Auswirkungen solcher strategischer Entscheidungen

Das Nabenverhältnis am HDV-Eintritt scheint ein Merkmal von Triebwerkskonstruktion und Fertigungskosten zu sein.



In Zusammenhang mit dem Nabenverhältnis stehen u.A.:

- Die Herstellungskosten des HD-Verdichters
- Der Wirkungsgrad des Kerntriebwerks (HDV und HDT)
- Das Triebwerksgewicht
- Die Triebwerkslänge
- Die mechanische Belastung der Triebwerksrotoren
- Die Konstruktion der HDT-Rotorschaufeln (mit oder ohne Deckband)

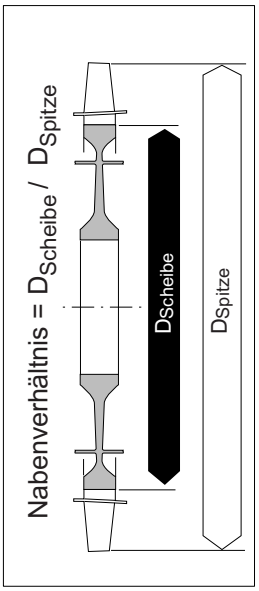


Bild 12.1-1

Bild 11.1-1: *Die* ***Beschaffungskosten einer Maschine*** *sind bei vergleichsweise* ***niedrigen Kraftstoff-/Energiekosten*** *das Hauptkriterium für den Kunden. Eine solche Strategie beeinflusst die Konstruktionsmerkmale und damit die Fertigung erheblich und kann für den Hersteller existenzbestimmend sein.*
Natürlich hat man versucht Algorithmen zu erarbeiten, die es mit Hilfe des Einsatzes von Computern ermöglichen Entscheidungen zu treffen.
Beispielhaft wird das Ergebnis eines solchen Ansatzes für Flugtriebwerke dargestellt.
Es zeigte sich, dass das sog. ***Nabenverhältnis*** *der Rotorkomponenten einen Parameter darstellt, der sich sowohl auf die* ***Herstellungskosten*** *als auch auf die wichtigsten Betriebseigenschaften des Triebwerks auswirkt. Den „Schlüsselbereich“ der Betrachtung bildet dabei der Eintritt des Hochdruckverdichters (Lit 12.1-4). Unter dem* ***Nabenverhältnis versteht man das Verhältnis des Scheibendurch-***

© Axel Rossmann Probeconsulting
als Schulungsunterlagen mit Lizenz

messers *(Nabe)* ***zum Durchmesser über den Schaufelspitzen***.
Steigen die Treibstoffkosten, können aufwändigere Triebwerkskonzepte mit einem deutlich höheren ***Fertigungsaufwand*** *für den Kunden von Vorteil sein. Stehen dagegen niedrige Gestehungskosten im Vordergrund, beeinflusst dies in erster Linie den Fertigungsaufwand für Beschaufelung und Scheiben. Herstellungskosten lassen sich offenbar mit einer möglichst geringen Zahl von Stufen und zugehörigen Schaufeln minimieren. Es gilt einen Kompromiss zwischen Herstellungskosten, Wirkungsgrad, Gewicht, Größe, mechanische Belastung und konstruktiven Notwendigkeiten zu finden. Die Spannweite möglicher Kompromisse zeigen die beiden Halbschnitte zweier konkurrierender erfolgreicher ziviler Triebwerke der unteren Schubklasse. Die Strategie niedriger Bauteilzahlen erfordert hochgenaue Schaufelprofile mit besonderen Massnahmen zur Minimierung des Spitzenspalts (z.B. Panzerung) und der Beherrschung hoher Schwingbeanspruchung. Darin ist höchste festigkeitsrelevante Oberflächengüte impliziert. Zur Minimierung der Kosten sind offenbar wenige Stufen mit wenigen breiten (wide chord) Schaufelblättern ins Auge zu fassen.Das gilt auch für die extrem belasteten Schaufelfüße. Die hohen Randlasten führen zu massiven, sehr hoch LCF-belasteten Scheiben. Um diese Problemzone zu minimieren, geht man zur* ***Bliskbauweise*** *über. Das erfordert einen hohen Fräsaufwand (mit besonderer Maßhaltigkeit (Band 4, Bild 18.9-3) und gegebenenfalls Schweißungen (z.B. lineares Reibschweißen, Bild 12.2.1.3.4-7) in dynamisch hoch beanspruchten Blattzonen. Die geringe Dämpfung dieser Bauweise verschärft das Problem der Schwingermüdung.*
Der Trend geht auch zu integralen, meist mittels Schweißen oder Löten (Bild 12.2.1.4-1) ***gefügten Leitapparaten****, insbesondere im Verdichter.*
Es ist also zu erkennen, dass eine Änderung des Triebwerkskonzepts auch die Änderung der Fertigungsverfahren verlangen kann. Eine Optimierung und Entwicklung von Fertigungsverfahren parallel zu Kostensenkungsstrategien ist somit unerlässlich. So dürften gewöhnlich, zumindest anfangs, die potenziellen Probleme in der Fertigung zunehmen.

Bild 12.1-2: *Unter* ***Fertigungsfehlern*** *werden im Folgenden Fehler bzw. Abweichungen außerhalb der Spezifikationen verstanden, welche auf die Bearbeitung des Rohteils zum Fertigteil zurückzuführen sind.* ***Schwachstellen*** *liegen dagegen innerhalb der Spezifikation und werden von den geeignet definierten, vorgeschriebenen Fertigungsprozessen begrenzt.*
Bei Fehlern und Schwachstellen kann es sich auch um Abweichungen wie ***Eigenspannungen*** *und* ***Entfestigungen*** *handeln.*
Die Fertigung beeinflusst überwiegend die ***Oberfläche eines Bauteils****. Diese ist gewöhnlich einer Kombination besonders intensiver Betriebsbeanspruchungen aus Schwingungen, Verschleiß, Oxidation und Korrosion unterworfen. Fertigungsfehler im Bauteilquerschnitt stehen in erster Linie im Zusammenhang mit Fügeverfahren wie Schweißen und Löten. Wärmebehandlungen können zu Fehlern wie Warmrissen (Bild 11.1-8 und Bild 11.1-13), ungünstigem Gefüge (Bild 11.2-19) und Eigenspannungen führen (Bild 11.1-13 und Bild 11.1-16).*

©Axel Pfeiffer - Turboconsult
Abschriftunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Schadensrelevante Probleme

Fertigungsfehler entstehen bei der Bearbeitung des Rohteils zum Fertigteil. Sie konzentrieren sich besonders auf die Bauteiloberfläche.

Fügen

- **Schweißen:** Rissbildung, Bindefehler, Eigenspannungen, Gefügefehler, Versprödung, Verzug, Festigkeitsmangel, Poren, Lunker, Kerben
- **Löten:** Bindefehler, Versprödung, schlechte Haftfestigkeit, Rissbildung, Diffusion, Anschmelzungen, zu niedrige Festigkeit
- **Kleben:** Bindefehler, schlechte Haftfestigkeit, Rissbildung,

Abtragende Formgebung

- **Zerspanung:** Eigenspannungen, Festigkeitsabfall, Verzug, Rissbildung,
- **Chemisch und elektrochemisch:** Rissbildung, Maßprobleme, Korrosion, Anschmelzungen, Versprödung
- **Laser, EB,Plasma:** Rissbildung, Versprödung, Auswirkungen von Spritzern, Bindefehler, Poren, Lunker, Anschmelzungen

Plastische Formgebung

- **Tiefziehen, Drücken Kriechumformen usw.** Eigenspannungen, Festigkeitsabfall, Verzug, Rissbildung, Maßprobleme
- **Wärmebehandlung:** Rissbildung, Gefügefehler, Festigkeitsabfall, Diffusionsschädigung, Abbau erwünschter Eigenspannungen

Beschichten

- **Thermisches Spritzen:** Festigkeitsabfall, Eigenspannungen, Gefüge, Haftfestigkeit,
- **Galvanische Schichten:** Eigenspannungen, Rissbildung Haftfestigkeit, Schichtfehler, Massprobleme, Anschmelzungen
- **Stromlose Abscheidung:** Anfressungen, Maßprobleme
- **Diffusionsschichten:** Zusammensetzung, Dicke, Rissbildung, unerwünschte Beschichtung
- **CVD:** Fehler im Schichtgefüge, Dicke, Haftfestigkeit
- **PVD:** Fehler im Schichtgefüge, Dicke, Haftfestigkeit

Nachbehandlung

- **Verfestigen:** Risse, Verzug, Gefügefehler (Korngröße, Kornorientierung), ungenügender Effekt
- **Glätten, Entgraten, Polieren:** Maßabweichungen, ungenügender Effekt, Schädigung
- **Reinigen:** Rissbildung, Verunreinigung, Korrosion/Angriff, Versprödung

- **Zerstörungsfreie Prüfung:** Durchschlupf, Schädigung
- **Handling, Verpackung Transport:** Deformation, Schädigung, Rissbildung, Verstopfung, Verunreinigung

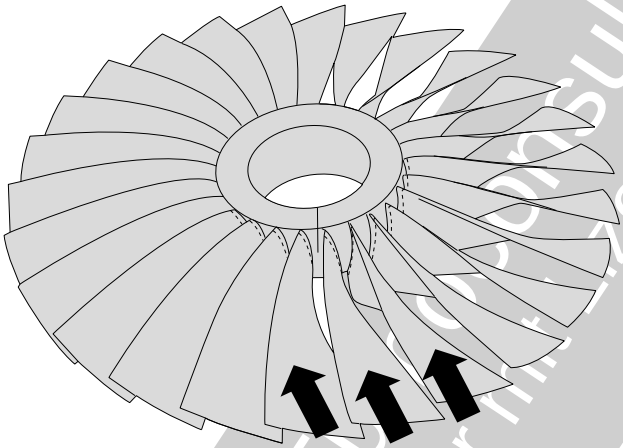
Fertigteil

Bild 12.1-2

© Axel Mannl, Technische Universität Ilmenau

Bildbeschreibung auf vorhergehender Seite

12.1 Faktoren die Fertigungsprobleme und Schäden begünstigen



Fertigungsprozesse können von zeitlich **vor- und nachgelagerten Einflüssen und Entscheidungen** (Bild 12.1-4) schadensrelevant betroffen sein. Erhöhte Betriebsbeanspruchungen erfordern hochfestere Werkstoffe. Deren erschwerte Bearbeitbarkeit moderner Maschinenkomponenten scheint die Schadensraten deutlich erhöhen zu können (Bild 12.1-3)

Die **Konstruktion** ist von erheblicher Bedeutung. Deren Auslegung muss sich nach **Werkstoffspezifikationen** (z.B. „design lines“) und **Vorschriften** richten. Die Verwendung immer festerer Werkstoffe für entsprechend hoch belastete Teile stellt gewaltige Anforderungen an den Grundwerkstoff und **ungeschädigte**, möglichst sogar **definiert beeinflusste Oberflächen**. Hierzu gehören Verfestigungen und Eigenspannungen einer spanenden Bearbeitung. Der Zustand einer ungeschädigten Oberfläche ist von dem Fachbegriff „**Surface Integrity**“ gekennzeichnet (Banjd 4). Der Aufgabe, „Surface Integrity“ zu gewährleisten, steht eine erschwerte spanende Bearbeitung und nicht selten eine erhöhte Empfindlichkeit (z.B. Kommarisse, Bild 12.2.1.1-2) hochfester Werkstoffe entgegen. Beispielsweise wird das Räumen (Band 4, Bild 18.2-6 und Bild 18.5-2) der gewöhnlich besonders dynamisch (HCF, LCF) belasteten Schaufelnuten in Scheiben von einer hohen Werkstofffestigkeit besonders erschwert (Bild 12.2.1.1.2-3.2). So kann die Entscheidung zwischen einer Guss- oder einer Schmiedeversion die Fertigung gravierend beeinflussen. Bereits bei der Bearbeitung der Oberfläche eines Gussteils wird die „Gusshaut“ (Bild 11.2-11), welche auch durchaus vorteilhafte Eigenschaften aufweisen kann (Bild 11.3-8), entfernt. Werden Lunker aus dem Gießprozess angeschnitten, erhebt sich die Frage nach dem Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften und damit der Zulässigkeit. Eine nachträgliche Qualitätsverbesserung durch Entfernen von Lunkern im HIP-Prozess (Bild 11.2.3-1 und Bild 11.2.3.1-1) ist bei offener Porosität nicht mehr möglich. Sind Schleifoperationen und/oder Schweißungen durchzuführen, hängt die Neigung zur Rissbildung nicht zuletzt vom Gefüge bzw. Eigenschaften wie Korngröße, Kornorientierung und dem Aushärtungszustand ab (Band 4, Bild 18.7-2).

Viele Bauteile bestehen aus Werkstoffkombinationen. Es kann sich um „verwandte“ Werkstoffe in Guss- und Schmiedevarianten handeln, die über Fügeprozesse verbunden werden. Aber auch sehr unterschiedliche Werkstoffkombinationen können im Bauteil vorliegen. Man denke nur an beschichtete Bauteile. So können nichtmetallische Werkstoffe das Spektrum merklich erweitern. Häufig werden metallische Grundwerkstoffe mit Keramik- oder Kunststoffschichten kombiniert. Derartige Kombinationen erschweren den Beschichtungsprozess (z.B. Temperaturführung bei thermischen Spritzschichten), Wärmebehandlungen, Ätzbehandlungen und Reinigungsverfahren, um nur einige zu nennen.

© Axel Rossmann - TU Wien Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Die Forderung nach niedrigen Kosten führt zur Minimierung der Bauteilzahl (Bild 12.1-1). Dies ist für den Konstrukteur eine große Herausforderung, wie das folgende Beispiel eines Verdichterrotors zeigt. Weniger Verdichterstufen verlangen breitere Schaufeln mit höheren Drehzahlen und somit höheren Belastungen. Damit wird z.B. eine typisch hochbelastete Zone wie der **Auflagebereich des Schaufelfußes**, zur besonderen Problemzone. Diese Zonen erfordern höchste **Fertigungspräzision** (Band 4, Bild 18.9-4) mit zusätzlichem Aufwand wie besonderer Geometrie der Auflagefläche (3D-gekrümmt) und eng spezifizierten Beschichtungen. Damit verschärfen sich die Forderungen an die Fertigungstechnik und so steigt die **Wahrscheinlichkeit potenzieller Fertigungsprobleme**.

Neue Konstruktionsprinzipien wie der Übergang von eingesetzten Schaufeln zu Blisks erfordern neue oder angepasste Fertigungsverfahren (z.B. lineares Reibschweißen, Bild 12.2.1.3.4-7). Nicht selten ergeben sich daraus neue Herausforderungen an den Fertigungsprozess mit **neuen typischen Schwachstellen**. „Klebestellen“ in Diffusions-, Laser-, EB-, und Reibschweißungen sind z.B. mit seriengeeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren kaum ausreichend sicher nachzuweisen (Bild 12.2.1.3.5-3). Der Trend zu **integralen Konstruktionen,** wie Blisks und Leitapparaten erhöht in der Tendenz das Fertigungsrisiko. Werden solche Bauteile **aus vielen Einzelteilen** zusammengeschweißt oder gelötet, ist die Wahrscheinlichkeit einzelner unzulässiger, im besten Fall nachzuarbeitender Fehlstellen immens. Die **geringe Eigendämpfung** solcher Bauteile begünstigt **höhere Schwingbelastungen** im Betrieb. Das erhöht die Anforderungen an die **Oberflächenqualität**. Winzige, oft innerhalb üblicher Toleranzen streuende Maß- bzw. Geometrieabweichungen (z.B. an Schaufelblättern) können über den Effekt des „**Mistuning**“ (Bild 18.9-3) die Schwingbelastung einzelner Bauteilzonen um ein Mehrfaches gegenüber dem Durchschnitt der Nachbarteile anheben. Das erhöht den Stellenwert der „**Surface Integrity**“ solcher Teile weiter.

Werkstoffkombinationen, die im gefügten Zustand einer Wärmebehandlung unterzogen werden, können sich als problematisch erweisen. Ein typischer Fall ist, wenn sich die Eigenschaften des einen Werkstoffs verschlechtern (z.B.Festigkeitsabfall durch Lösungsglühung oder Zähigkeitsabnahme) und die des anderen verbessern. Bei Hochtemperaturlötungen oder Diffusionsschweißungen können Temperaturen in der Nähe des Soliduspunktes notwendig werden. Geringste Abweichungen der Legierungszusammensetzung und/oder der Temperatur können zu Schädigungen führen. Etwas zu hohe Temperaturen lassen Anschmelzungen entstehen, zu niedrige können z.B. eine optimale Hochtemperaturlötung verhindern (Bindefehler, Versprödung).

Werden in Rohteilen **Eigenspannungen** induziert (Bild 12.2.1.1.2-2), können diese den anschließenden Fertigungsprozess sehr erschweren. So kann der Abtrag von Material zum Verzug, Ätzbehandlungen zur Rissbildung führen.

Ungünstige Konstruktionen können das **Spannen der Bauteile zur Bearbeitung** erschweren. Damit werden Spannverfahren wie „hartes“ (in Klemmvorrichtung) und „weiches“ Spannen (durch Eingießen) mit ihren spezifischen Risiken indirekt vorgegeben (Band 4, Bild 18.5-1).

Obwohl die **Arbeitsvorbereitung** zum Fertigungsprozess gehört, wird ihr Einfluss auf Fertigungsprobleme, Schäden und Qualität oft nicht so gewertet wie ihr das zusteht. Sie baut in besonderem Maß auf der Erfahrung aus der Serie und der Fertigungsentwicklung auf. Hier ist die **fachliche Erfahrung der Sachbearbeiter von entscheidender Bedeutung** für eine Risikominimierung. So ist z.B. die Kenntnis von Besonderheiten und dem individuellen Verhalten der Fertigungsanlagen Voraussetzung für eine geforderte höchste Qualität. Beispiele sind die Steifigkeit von Bearbeitungsmaschinen, die Temperaturverteilung und der mögliche zeitliche Temperaturverlauf in den zur Verfügung stehenden Öfen oder Konstruktionsmerkmale von Werkzeugen der ECM-Bearbeitung. Die Realisierung geeigneter **Vorrichtungen** muss Einflüsse wie Abrieb und Verunreinigungen des Bauteils (Band 4, Bild 18.3-1) sowieVerformungen (Band 4, Bild 18.5-1) minimieren. Bei

© AKI Ressourcen-Transconsult
Alle Rechte vorbehalten, Nutzung nur mit Lizenz

Zerspanungsvorgängen ist die Späneabfuhr (Band 4, Bild 18.5-3) zu garantieren und der benötigte Kühlmittelzustrom zu gewährleisten. In Beschichtungsprozessen sind Staubablagerungen, welche die Haftfestigkeit herabsetzen, zu vermeiden.

Zu den besonders problemrelevanten Einflüssen gehören **Arbeitsabläufe**. Eine geeignete zeitliche **Reihenfolge der Fertigungsschritte** minimiert die Schadenswahrscheinlichkeit. Hierzu zählt z.B. die zeitliche Reihenfolge von Lötungen, Diffusionsbeschichtungen und Wärmebehandlungen. Die Anordnung der **Qualitätsprüfungen in den Arbeitsfolgen** und deren Ausgestaltung hat einen großen Einfluss auf die Schadensrisiken und Fertigungskosten. Auch hier sind Kompromisse unvermeidlich. Eine eingehende Prüfung nach mehreren Fertigungsschritten minimiert möglicherweise den Prüfaufwand und beschleunigt den Durchlauf. Wenn aber in einem frühen Arbeitsschritt Fehler auftraten, werden diese erst nach umfangreichem Kostenanfall gefunden. Neben den hohen Kosten besteht in diesem Fall die Wahrscheinlichkeit, dass eine Vielzahl weiterer Teile, die sich im Fertigungsablauf vor der Prüfung befinden, ebenfalls betroffen sind.

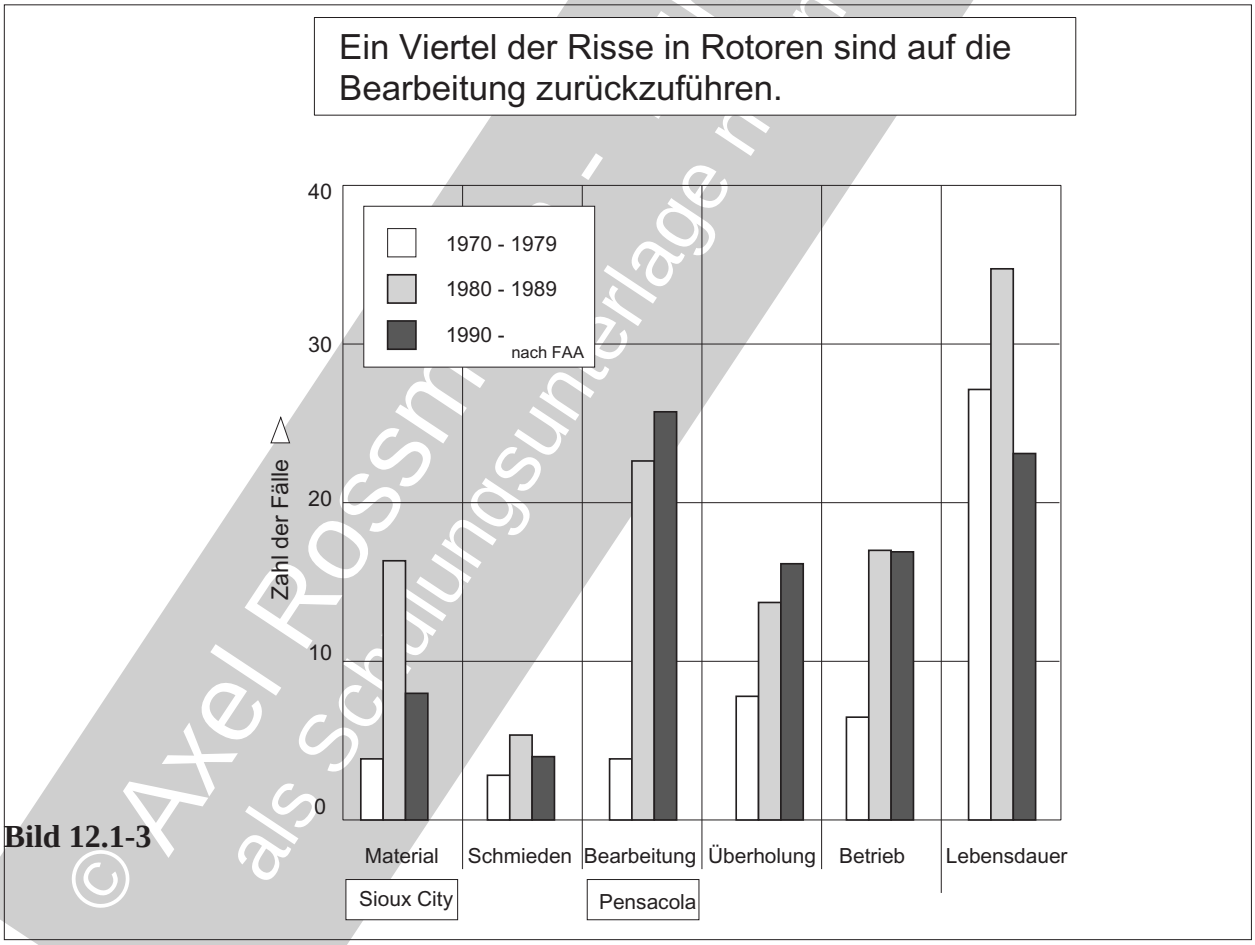


Bild 12.1-3

Bild 12.1-3 *(Lit. 12.1-5): Nach Angaben der amerikanischen Luftfahrtbehörde (FAA) von 1999, ließen sich in den Jahren 1990-1999* ***25 %*** *(26 Fälle von ca. 100)* ***der Risse und Brüche an Rotoren auf „Unnormalitäten“ aus dem Fertigungsprozess zurückführen****. Dagegen nur 9 % auf die Materialherstellung und 5 % auf den Schmiedeprozess. Erstaunlich ist, dass bei den Fertigungsfehlern seit 1970 ein deutlicher prozentualer Anstieg zu erkennen ist. Dies dürfte auf die hochfesten Werkstoffe mit einer entsprechend höheren Betriebsbelastung zurückzuführen sein. Höhere Betriebsbelastungen führen zur Wachstumsfähigkeit von Rissen an kleineren Fehlstellen. Gleichzeitig sind die hochfesten Werkstoffe erschwert zerspanbar zu bearbeiten, womit sich das Schädigungsrisiko im Fertigungsprozess erhöht.*

© Axel Rossmann - Urheberrechtsschutz als Schulungsunterlage mit Lizenz

Wo ist eine Fertigungserprobung organisatorisch und räumlich anzusiedeln?

Die **Erprobung der Serienfertigung** und die Arbeitsvorbereitung baut auf bereits bekannten eingeführten Fertigungsprozessen und/oder neuen Fertigungstechnologien aus der Fertigungsentwicklung auf. Sie dient besonders der Minimierung des Fertigungsaufwands bzw. der Fertigungskosten und des „**Ausschusses**“ (engl. **scrap**) der Serienteile. Bei großen Chargen geht es z.B. um Veränderungen der Maßhaltigkeit, die Abnutzung und den Tausch von Werkzeugen und optimierte Vorrichtungen.

Die **Fertigungsentwicklung** bestimmt bzw. minimiert in erheblichem Maß spätere Probleme in der Serie. Sie entwickelt neue Fertigungstechnologien und adaptiert vorhandene für neue Bauteile. Dies kann gleichzeitig im Zuge der Herstellung von Teilen im Rahmen der Entwicklung und Prototypenfertigung geschehen. Eine oft unterschätzte Aufgabe der Fertigungsentwicklung ist die Identifizierung verfahrensspezifischer Probleme und Fehlstellen und deren Auswirkung auf das Bauteilverhalten. Die Klärung des Entstehungsmechanismus ist Voraussetzung für gezielte Abhilfen und die Verifizierung seriengeeigneter, ausreichend sicherer, zerstörungsfreier Prüfungen. (Bild 12.1-3). Zunächst stellt sich die Frage, wo diese Fertigungserprobung stattfinden soll. Ist eine gesonderte eigenständige Entwicklung besser als die in der Serienfertigung integrierte? Beide Möglichkeiten haben Vor- und Nachteile:

Eine **eigenständige Fertigungsentwicklung** ermöglicht schnelles, von Serienprioritäten freies Handeln. Es können flexibler nutzbare Maschinen, deren Parameter sich in einem weiten Bereich einstellen lassen, verwendet werden. Sie müssen nicht auf serientypische Anforderungen wie geringe Produktionskosten und großen Durchsatz optimiert sein und erlauben so flexiblere Entwicklungsansätze. Das Personal kann besonders im Hinblick auf Anforderungen der Entwicklung ausgewählt worden sein. Ein entscheidendes Problem ist jedoch erfahrungsgemäß die **Übertragung der erarbeiteten Fertigungstechnologie in die Serie**. Es ist durchaus möglich, dass Entwicklungen auf Maschinen durchgeführt wurden die nicht ausreichend denen der Serie entsprechen. Das kann z.B. für die Kammergröße einer Elektronenstrahl-Schweißmaschine gelten. Damit wird das in akzeptabler Zeit erzielbare Vakuum beeinflusst. Es steht auch mit der Reinigung der Bauteile in Zusammenhang. So wird die Nahtqualität von der Qualität des Vakuums beeinflusst. Unterscheiden sich die „Strahlkanonen“ können Abweichungen in Strahlenergien und Fokussierungseigenschaften die Schweißgeschwindigkeit und so das Auftreten von Fehlstellen beeinflussen (Bild 12.2.1.3.3-4/-5/-6). Eine Umstellung auf Maschinen und Abläufe der Serienproduktion ist dann kaum zu vermeiden. Damit werden auch Schritte der Arbeitsvorbereitung und Arbeitsfolgen in der Anwendbarkeit relativiert. Anderes Personal das mit den entwickelten Verfahrensschritten nicht so vertraut ist, erhöht das Problempotenzial. Eine weitere Erprobung des Fertigungsprozesses wird so unvermeidlich. Hinzu kommt der erfahrungsgemäß oft zwanghafte **Wunsch des Technikers nach eigenständigen Lösungen** oder zumindest Verbesserungen und Optimierungen. Selten wird das bereits erarbeitete Verfahren auch unter diesen Gesichtspunkten ohne Korrekturen übernommen. Diese sind jedoch in besonderem Maß mit dem Risiko der **Verschlimmbesserung** (Band 1 Bild 3.2.2-2) behaftet.

Die **Fertigungsentwicklung in der Serie** hat den Vorteil, dass Arbeitsvorbereitung, Fertigungspersonal, Maschinen und Abläufe keine entscheidenden Umstellungen mit „Übertragungsverlusten“ erwarten lassen. Problematisch ist jedoch erfahrungsgemäß die **Entscheidung über Prioritäten** zwischen Serie und Entwicklung. Seriengeeignete Maschinen dürften eine weniger flexible Ein-

© Kaiser Seminar - Hubocsult
als Schulungsunterlage nur Lizenz

stellung von Verfahrensparametern ermöglichen. Für Personal in der Serienfertigung muss die Einhaltung vorgeschriebener Abläufe und Parameter Voraussetzung sein. Entwicklungsarbeiten erfordern dagegen Veränderungen. Ein Austausch dieses Personals wird also durch die jeweils notwendige „Geisteshaltung“ erschwert, die mit der Rücksicht auf optimale Arbeitsergebnisse nicht vereinbar sein sollte.

Nicht seriengerecht auffindbare, fertigungsbedingte Schwachstellen müssen von der Auslegung berücksichtigt werden

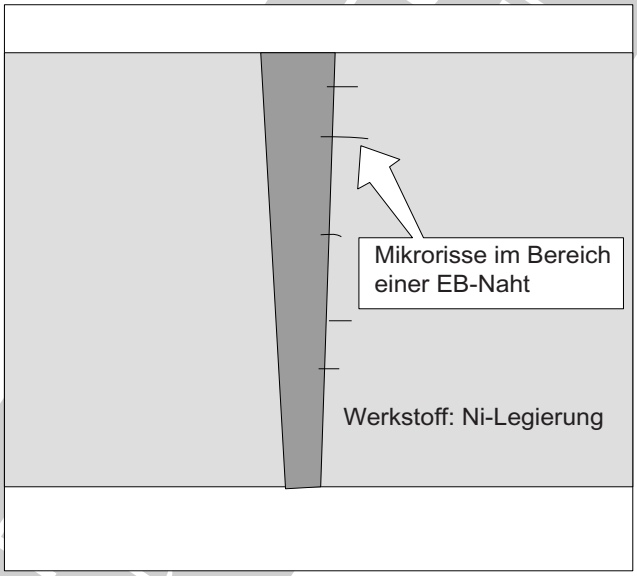


Bild 12.1-4

Bild 12.1-4: Fertigungsfehler *unterscheiden sich nach der hier verwendeten Definition von akzeptierten, weil in der Auslegung berücksichtigten,* ***Schwachstellen****. Von der* ***Empfindlichkeit seriengeeigneter zerstörungsfreier Prüfverfahren*** *(Band 4, Bild 17.3.1-2) hängt die Größe der Schwachstellen und damit die zulässigen Bau-teilbelastungen ab. Können bei einer neuen Technologie bzw. einer Verfahrensentwicklung neue Fehlerarten auftreten oder bekannte Fehler in einer neuen Ausprägung (z.B. Lage im Bauteil) auftreten, ist im Rahmen der Fertigungsentwicklung ein geeignetes* ***Prüfverfahren bereitzustellen****. Als Beispiel kann die in manchen Nickellegierungen typische Mikrorissbildung (Bild 12.2.1.3.1-13 und Bild 12.2.1.3.1-14) im Bereich von Elektronenstrahlschweißungen dienen (Lit. 12.1-3). Bei manchen Verfahren wurde kein für die Nutzung einer hohen Festigkeit notwendiges, ausreichend empfindliches und sicheres Prüfverfahren bekannt. Hierzu gehören Klebestellen in querbeanspruchten Diffusionsschweißungen (Bild 12.2.1.3.5-2).*

Eine eher „zweitklassige“ Alternative zu zerstörungsfreien Prüfverfahren ist die ***Gewährleistung der Fehlerfreiheit allein durch eine Verfahrensüberwachung****, trotz des Grundsatzes: Es ist besser Fehler zu vermeiden als später herauszuprüfen.*

Fertigung: Schadensrelevante Probleme

Fertigungsprobleme und -schäden "entstehen" in vielen Fällen weit vor dem eigentlichen Fertigungs-prozess.

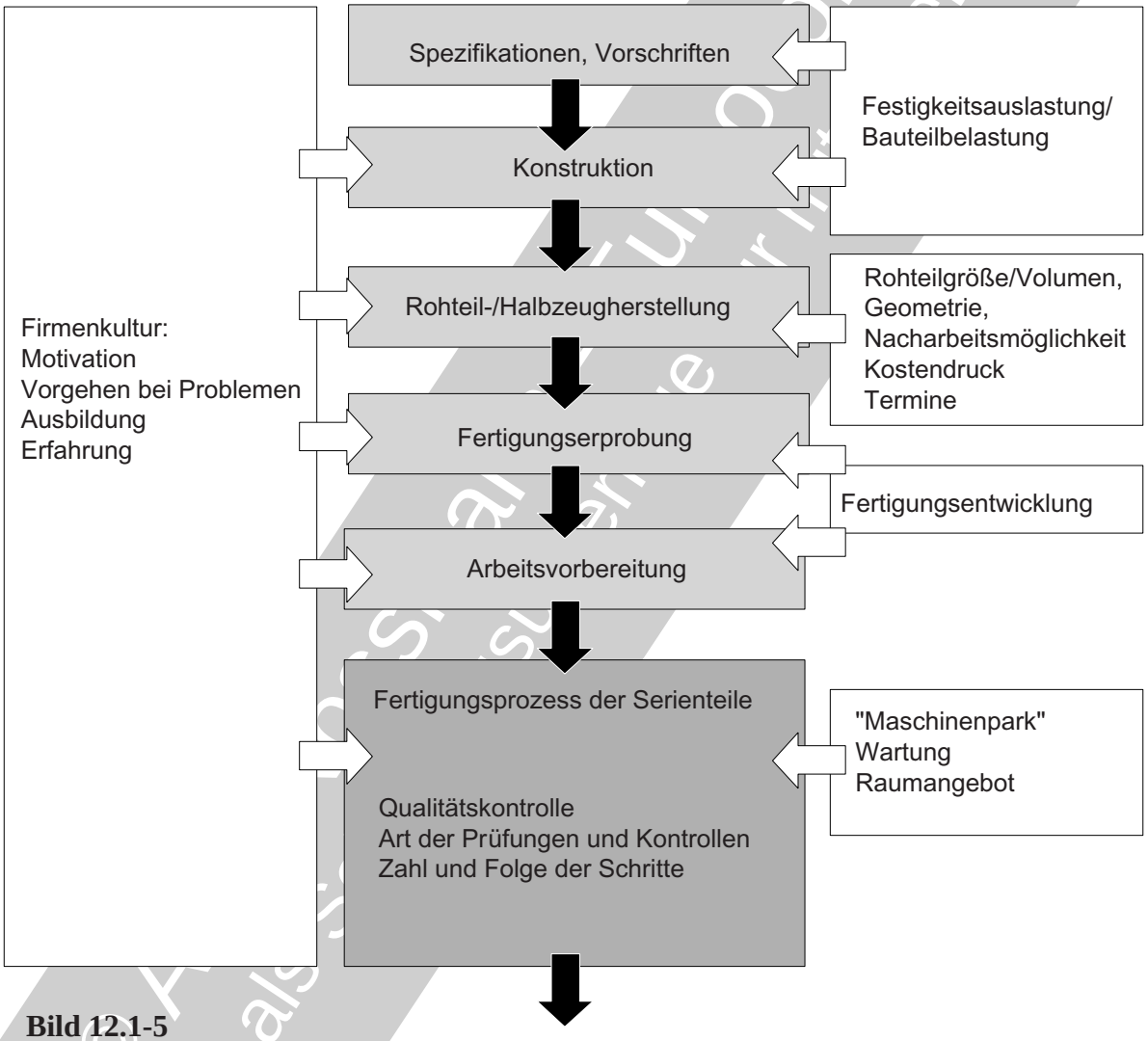


Bild 12.1-5

Fertigung: Schadensrelevante Probleme

Bild 12.1-5: *Wie bei allen Schäden wirken sich auch auf Fertigungsschäden meist* ***mehrere unterschiedlich zu gewichtende ursächliche Einflüsse*** *aus. Hierzu gehören auch solche, die nicht unbedingt dem Fertigungsprozess selbst anzulasten sind. Ein Beispiel sind* ***Konstruktionen,*** *die keine ausreichend sichere Fertigung zulassen, indem die Zugänglichkeit und* ***Prüfbarkeit*** *und/oder eine Nacharbeit durch eine ungünstige Gestaltung sehr erschwert ist (Band 4, Bild 17.3.1-9). Ein weiteres Beispiel sind Schweißprobleme, die auf einen nicht optimalen aber für die Fertigung nicht zu ändernden Werkstoffzustand zurückzuführen sind.*
Spezifikationen und Vorschriften, *die wegen den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht mit der gewünscht niedrigen Ausschussrate zu befriedigen sind, ist ebenfalls ein Anteil an eventuellen Schäden zuzuschreiben.*
Auch das ***Umfeld****, in dem sich der Fertigungsprozess vollzieht, kann einen erheblichen Einfluss auf die Entstehung von Schäden und deren Bewältigung haben. Beispielsweise ist erfahrungsgemäß die Erzwingung niedriger Ausschussraten durch personenbezogene „repressive Maßnahmen“ auf die Dauer weniger effektiv als ein objektives (Band 4, Bild 17.5-1), sach- und problembezogenes Vorgehen (Band 4, Bild 17.5-2). Unter dem Gesichtspunkt des „****Gruppendrucks****“sind z.B. auch Aushänge mit dem zeitlichen Ausschussanfall problematisch.*
Mit ***steigenden Betriebsanforderungen*** *wie in aerodynamischen Eigenschaften (Formtoleranzen der Schaufelprofile) oder Festigkeit (z.B. Rotorkomponenten) werden die Spielräume für Abweichungen immer geringer. Dies gilt auch für etwaige Nacharbeiten (Band 4).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsinterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 12.1

12.1-1 „ASM Handbook“, **-1.1,** Volume 4 („Heat treating“), **-1.2,** Volume 5 („Surface Cleaning, Finishing, and Coating“), **-1.3,** Volume 6 („Welding, Brazing, and Soldering“), **-1.4,** Volume 7 („Powder Metallurgy“), **-1.5,** Volume 14 (Forming and Forging“), **-1.6,** Volume 15 („Casting“), **-1.7,** Volume 16 („Machining“).

12.1-2 Peter Adam, „Fertigungsverfahren von Turbotriebwerken“ Birkhäuser Verlag,, 1998, ISBN 3-7643-5971-4.

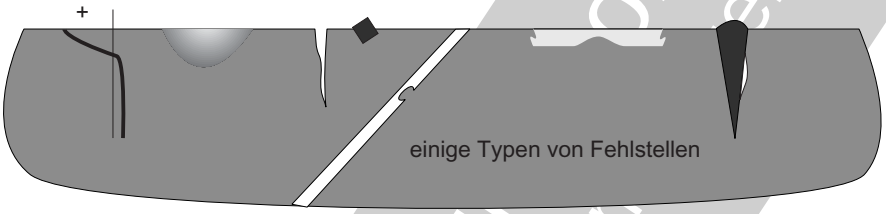
12.1-3 M. Field, J.F. Kahles, „Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheit bearbeiteter Werkstücke ‘Surface Integrity’“, Zeitschrift „Fertigung“ 5,72, Seite 145-156.

12.1-4 A. Schäffler, Vortrag an der TU München

12.1-5 AIAA Rotor Manufacturing Subcommittee, „Management Summary“, March 29, 1999.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2 Fertigung und Betriebsverhalten der Bauteile



Die **Fertigung muss im Verbund mit Auslegung/Konstruktion, Technologie und Betrieb** gesehen werden. Alle Bereiche beeinflussen sich gegenseitig. Sie müssen realisieren, dass letztendlich das vorgesehene Betriebsverhalten abzusichern ist. Dafür hat das Ergebnis, d.h. die Bauteile, innerhalb der Forderungen von Zeichnungen- und Vorschriften zu liegen. Darüber hinaus können nicht spezifizierte Eigenschaften, die auf Erfahrungen mit dem Betriebsverhalten beruhen, ohne dass dies bewusst ist, Bedeutung haben. Hierzu gehört die Beeinflussung einer Zerspanungsfläche durch Verfestigung und Eigenspannungen.

Der **Betrieb einer Maschine** muss ausreichend sicher über die zugesagte Lebensdauer mit den angegebenen Leistungsdaten gewährleistet sein. Voraussetzung ist z.B. bei Turbomaschinen die aerodynamische Güte der Schaufelprofile. Ein Faktor ist dabei die Rauigkeit der umströmten Flächen (Band 4, Bild 18.1-10). Die Schaufeln müssen darüber hinaus die mechanischen Belastungen, insbesondere die Schwingbelastungen sicher ertragen. Diese Forderung wird vom Begriff der **„Surface Integrity“** (ungeschädigte Oberfläche) charakterisiert (Band 4, Kapitel 17.1).

Eine Voraussetzung zur Realisierung der Bauteile ist, dass die erforderliche **Technologie seriengeeignet** zur Verfügung steht. Mit Technologie ist hier der Herstellungsprozess einschließlich Werkstofftechnik gemeint. Blisks erfordern z.B. gegenüber der getrennten Herstellung von Schaufeln und Scheiben angepasste und/oder neue Fertigungsverfahren. Lineares Reibschweißen (Bild 12.2.1.3.4-7) und/oder aufwändige Fräsarbeiten (Band 4, Bild 18.9-12.1 und Bild 18.9-12.2) werden zu Verfahren der Wahl. Der Trend zu steigenden Gastemperaturen fordert bei den Heißteilen komplexere Kühlkonfigurationen und isolierende Beschichtungen (Wärmedämmschichten) aus Keramiken. Damit stellen sie die Fertigung vor besondere Herausforderungen.

Kosten- und Gewichtsminimierung bei höchstmöglichen Wirkungsgraden führen erfahrungsgemäß zu entsprechend höheren mechanischen, aerodynamischen und thermischen Belastungen. Dies muss von **Konstruktion und Auslegung** berücksichtigt werden und führt zu immer höheren Ansprüchen an die Fertigungsqualität. Um das Gewicht zu minimieren, müssen das **Volumen** (siehe auch Bild 11.3-16) **und die Oberfläche des Bauteils von hohen Betriebsspannungen möglichst gut „genutzt“** werden. Dies gilt besonders für Rotorscheiben. Leistungsfähige **Computer und Berechnungsprogramme** unterstützen diesen Trend. Damit steigt der Einfluss der Bearbeitung auf die Bauteilsicherheit. So erhöht sich auch der Stellenwert der „**Surface Integrity**“ (Band 4,

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Kapitel 17.2). Steigen z.B. die dynamischen Belastungen (Drehzahl,Schwingungsanregung), müssen bisher tolerierbare Streuungen der Oberflächenqualität vermieden werden. Damit werden die Parameter der Fertigungsprozesse entsprechend eingeengt. Falls dies nicht mehr mit der erforderlichen Sicherheit möglich ist, sind seriengeeignete Verfahren zu entwickeln, die den Forderungen genügen.

Ein besonderer, nicht unbedingt auf den ersten Blick erkennbarer Effekt tritt ein,

wenn Serienverfahren die bisher zur Absicherung des garantierten Betriebsverhaltens dienten, Bestandteil der Auslegung werden (Band 1 Bild 3.2-3). Das kann die Sicherheit herabsetzen. Bisher scheint es nicht möglich, die Güte der Strahlbehandlung für alle lebensdauerrelevanten Zonen auch in Mikrobereichen (Bild 12.2.1.6-4 und Bild 12.2.1.6-11) mit ausreichender Sicherheit zu gewährleisten.

Typisches Beispiel ist das Kugelstrahlen. Es diente bisher dazu, die Auswirkung eventueller kleiner Schwachstellen im Oberflächenbereich auf die zyklische Festigkeit sicher zu beherrschen. Ein weiteres Beispiel ist die Ausrüstung von Heißteilen mit Wärmedämmschichten. Auf diese Weise sollte die garantierte Lebensdauer, trotz einer gewissen betreiberspezifischen Streuung der thermischen Betriebsbelastungen, gewährleistet bleiben. Man kann in solchen Fällen davon sprechen, dass zum Hosenträger ein Gürtel für Sicherheit sorgte. Wird das Verfahren jedoch Auslegungsbestandteil, muss davon ausgegangen werden, dass **bei Verfahrensproblemen das Bauteil plötzlich katastrophal versagt**. Um dies sicher ausschließen zu können, müssen nun diese bereits „konventionellen“ Verfahren einer deutlich anspruchsvolleren Qualitätssicherung unterzogen werden. Der gleichmäßige Bedeckungsgrad und die auf der gesamten hochbelasteten Bauteilfläche erforderliche Almenintensität (Bild 12.2.1.6-2 und Bild 12.2.1.6-3) beim Kugelstrahlen ist nun zwingend sicherzustellen. Dies ist natürlich nicht nur ein Fertigungsproblem, sondern auch eines der Qualitätssicherung.

© Axel Rossmann - Fu
als Schulungsunterlage

Fertigung: Beeinflussung des Betriebsverhaltens

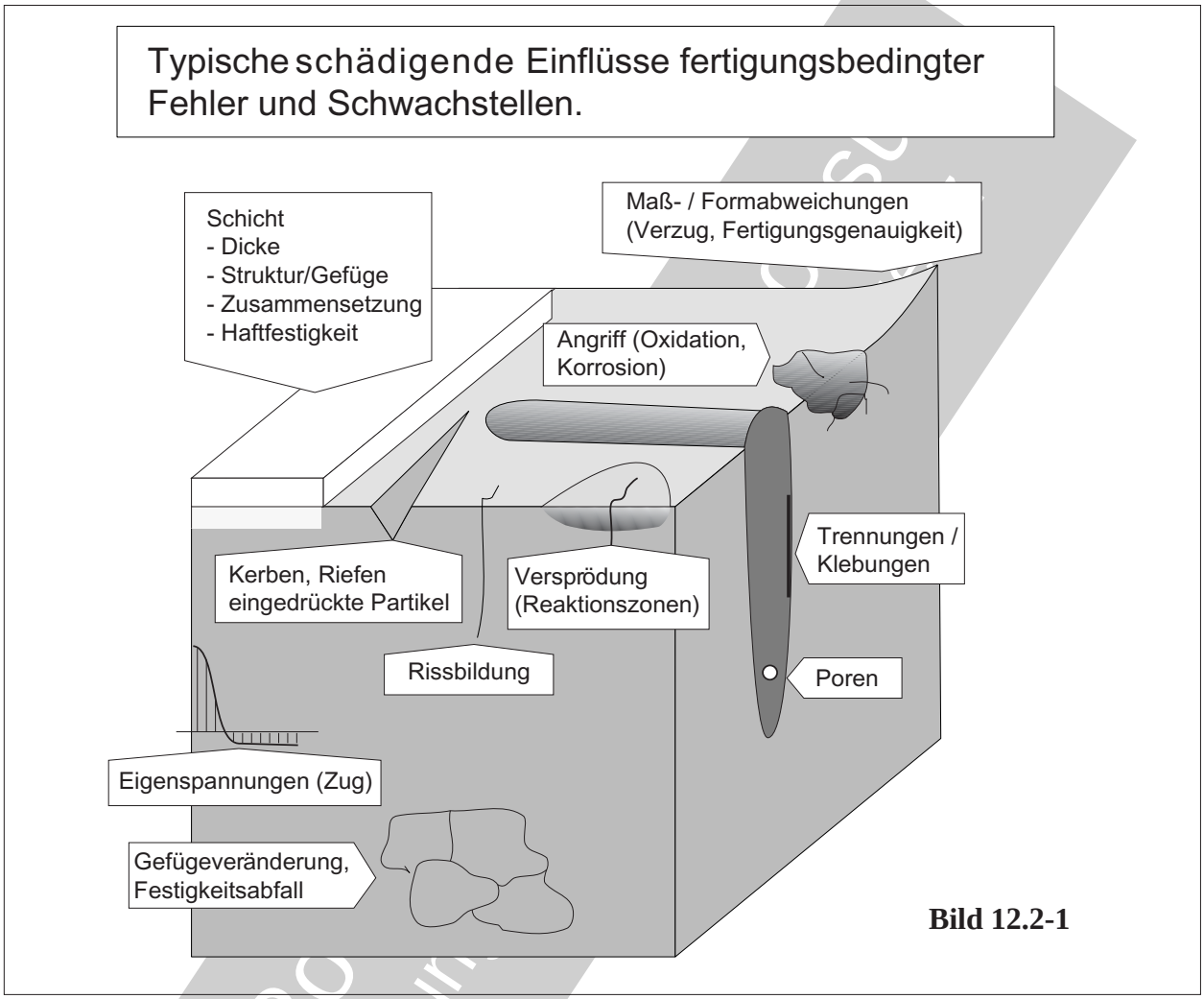


Bild 12.2-1

Bild 12.2-1: Fertigungsbedingte Fehler *wirken sich über die üblichen* ***Schadensmechanismen*** *auf das Bauteilverhalten im Betrieb aus. Sehr unterschiedlich entstandene Fehler können den gleichen Schadensmechanismus aktivieren. So können z.B. Risse beim Schweißen, unter Einwirkung von Verunreinigungen (z.B. Lötrissigkeit, Band 4, Bild 18.3-10.1) und Korrosion (z.B. SpRK, Band 4, Bild 18.4-12) entstehen. Letztendlich lässt sich fast jede Schädigung in der Hauptsache auf einen* ***Abfall der nutzbaren Bauteilfestigkeit*** *reduzieren.*

Hierzu gehören insbesondere:

- *ungünstige Gefüge*
- *Versprödung*
- *Fehlstellen die den tragenden Querschnitt beeinflussen (z.B. Schweißrisse, Bindefehler)*
- *Kerben (Riefen, Eindrücke, Fressspuren)*
- *Zugeigenspannungen*
- *Verengung von Kühlluftkanälen.*

Demgegenüber sind Auswirkungen auf die ***Bauteilfunktion****, z.B. durch eine* ***Geometrieveränderung*** *(z.B. Abweichung an Profilen von Schaufelblättern) untergeordnet.*

Ein Problem, insbesondere für den typischen Praktiker der Fertigung, ist es zu erkennen, welche potenziellen Mechanismen bei den von ihm angewandten Verfahren wirksam werden. Dies ist eine Voraussetzung um eventuelle Schäden rechtzeitig zu bemerken und gezielte Maßnahmen bzw. Abhilfen auf ihre Wirksamkeit ausreichend sicher zu beurteilen.

Auswirkung von Fertigungsfehlern auf das Betriebsverhalten.

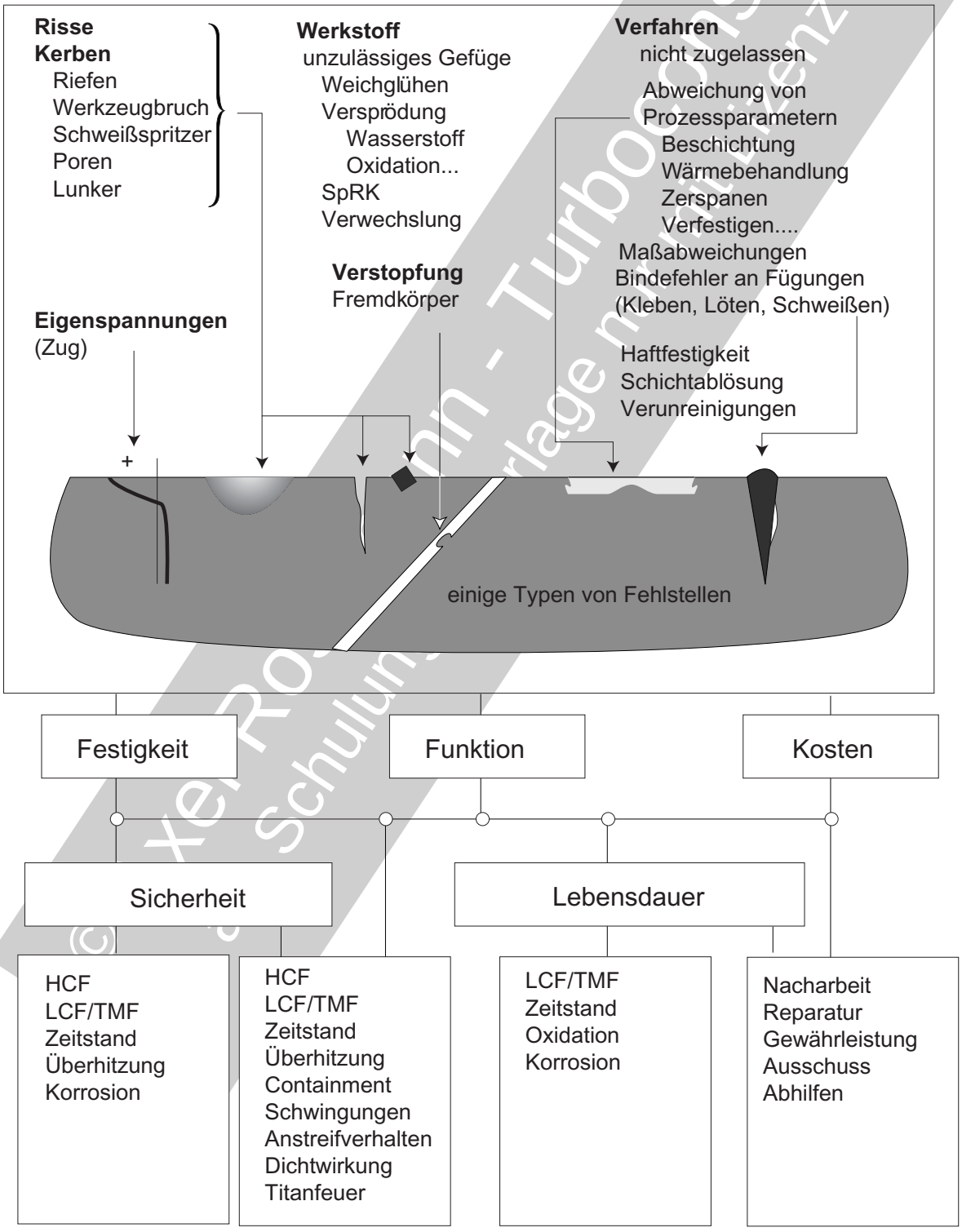


Bild 12.2-2

Fertigung: Beeinflussung des Betriebsverhaltens

Bild 12.2.1-2: *Dieses Bild soll, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, einen Überblick der* ***Einflüsse fertigungsbedingter Fehler*** *(Rahmen oben)* ***auf das Verhalten der Bauteile in den Triebwerken*** *geben. Grundsätzlich lassen sich die Auswirkungen den drei Hauptgruppen Festigkeit, Funktion und Kosten zuordnen. Diese Hauptgruppen beeinflussen sich über* ***Sicherheit*** *und* ***Lebensdauer*** *wiederum gegenseitig.*

Festigkeit: *Fertigungsfehler lassen sich in ihrer Auswirkung auf die Bauteilfestigkeit in zwei Gruppen einteilen: Fehler welche die* ***Werkstofffestigkeit*** *mindern und/oder Fehler welche die (örtliche)* ***Betriebsbeanspruchung*** *(meist Kerben) erhöhen.*
Derartige Fehler beeinflussen die Bauteil- bzw. Triebwerkssicherheit auf besonders gefährliche Weise. Ihre Auswirkung steht meist in engem Zusammenhang mit einer Verkürzung der Betriebslebensdauer.
Die ***Werkstofffestigkeit*** *wird von Fertigungseinflüssen verschlechtert, die das Gefüge unerwünscht bzw. unzulässig verändern. Dazu führen* ***Parameterabweichungen der Wärmebehandlung, Reaktionen mit Fremdstoffen wie Verunreinigungen*** *(z.B.* ***Lötrissigkeit,*** *Band 4, Bild 18.3-11),* ***unerwünschte spröde Schichten*** *(„Reste von Diffusionsschutzschichten“)* ***und Verarmung an Legierungsbestandteilen****. Solche Werkstoffbeeinflussungen wirken sich besonders auf Kriechfestigkeit und Thermoermüdung aus. In diesen Fällen besteht gegebenenfalls die Chance, die Restlebensdauer abzuschätzen und, bei tragbarem Risiko, innerhalb sicherer Zeitabstände Inspektionen und einen Austausch vorzunehmen.*
Typische Beispiele für die ***Auswirkung einer Parameterabweichung auf das Betriebsverhalten*** *sind* ***Korrosionsrisse*** *in Rohrleitungsverschraubungen und Einsätzen aus hochfesten Al-Legierungen. Hier können schon geringe Abweichungen der Wärmebehandlungstemperatur im Fertigungsprozess gefährliche Schäden auslösen (Band 1, Bild 5.6.3.1.2-1). Ähnlich begünstigt eine zu hohe Härte infolge einer ungenügenden* ***Wärmebehandlung*** *das Versagen von Stahlschrauben durch Risskorrosion.*
Die ***Betriebsbeanspruchung*** *wird besonders von Spannungskonzentrationen, die von* ***Kerben*** *(Band 1, Bild 5.4.4-1) erzeugt werden, erhöht. In erster Linie ist davon die dynamische Festigkeit (****Schwingfestigkeit****) des Bauteils beeinflusst. Kerben erhöhen örtlich die Beanspruchung über das zulässige Maß. Es kommt zu* ***Schwingbrüchen*** *(HCF, LCF). Damit besteht die Gefahr, dass das Bauteil nach Risswachstum spontan bricht und die Flugsicherheit beeinflusst. Spannungskonzentrationen liegen z.B. an* ***Rissen, Kratzern und eingedrückten Fremdkörpern*** *vor (Bild 12.2.1.1-2 und Band 4, Bild 18.5-5). Besteht die Gefahr hochfrequenter Schwingungen, ist im Gegensatz zu einer LCF-Beanspruchung der Rissfortschritt zu schnell, um den Zeitpunkt eines Schadens für Zwischeninspektionen oder spätere Maßnahmen ausreichend sicher vorherzusagen.*

Funktion: *Fertigungsschäden können auch die Bauteilfunktion unzulässig beeinträchtigen. Haben Fertigungsrückstände wie Schmelztropfen oder Strahlgut Kühlluftbohrungen verstopft, kann das zur Überhitzung eines Heißteils wie einer Turbinenschaufel, führen (Bild 12.2.1.6-18 und Band 4,Bild 18.3-9). Maßabweichungen an Verdichterschaufeln können das aerodynamische Verhalten so verschlechtern, dass ein Strömungsabriss mit gravierenden Folgen wahrscheinlich wird. Zu harte Anstreifschichten können zur Schädigung und letztendlich zum Bruch von Schaufeln führen. Ungünstige Gefüge keramischer Spritzschichten können die Wirkung eines Titanfeuerschutzes an Verdichtergehäusen gefährlich mindern.*

Kosten: *Auch die Kosten gehören zum Betriebsverhalten, denn sie stehen in engem Zusammenhang mit Sicherheit und Funktion der*

© Axel Bossmann - Tutorium Maschinenelemente - Unterlagen und Lehrgänge

Bauteile. Grundsätzlich gilt die Tendenz, je ***früher ein Fertigungsfehler gefunden wird, umso geringer sind die Kosten****. Unter diesem Aspekt sind Kosten als Folge zusätzlicher Qualitätssicherungsmaßnahmen, Nacharbeit oder Fertigungsausschuss noch ein geringeres Problem. Auch hier gilt natürlich, dass der Aufwand mit fortschreitender Fertigung zunimmt.*

Sind aber ***fehlerhafte Teile zum Einbau gelangt****, können die Kosten für eine Abhilfe gewaltig ansteigen. Besonders kostenträchtig wird eine Gewährleistung, wenn Triebwerke aus dem Betrieb genommen werden müssen.*
Indirekt ist ein ***Prestigeverlust****, wie er z.B. durch Veröffentlichungen oder Anweisungen der Behörden eintritt, auch kostenrelevant. Man denke nur an eine Minderung der Marktchancen gegenüber Mitbewerbern.*

© Axel Rossmann - Turbocursus
als Schulungsunterlage nur mit Erlaubnis

Zusammenstellung ausgewählter bauteilspezifischer Fertigungsprobleme und -schäden

In vielen Fällen ist mit **bauteilspezifischen Fragen** wie „Was sind die Probleme von Turbinenschaufeln im Fertigungsprozess?“ zu rechnen. Für zwei Hauptkomponenten einer Turbomaschine, **Schaufeln und Scheiben,** sind diese im Folgenden beispielhaft zusammengestellt. So soll die Verbindung zu den Kapiteln 12.2.1, das eine Übersicht aus dem Blickwinkel verfahrensspezifischer Probleme, und Band 4, Kapitel 18 das sich mit schadensrelevanten Effekten der Fertigungstechnik befasst, geschaffen werden. Deshalb werden die Probleme hier nicht einzeln ausführlich behandelt, sondern auf Kapitel verwiesen, die sich eingehender damit befassen.

© Axel Rossmann - Turbonsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Typische Fertigungsschäden am Beispiel einer Turbinenschaufel.

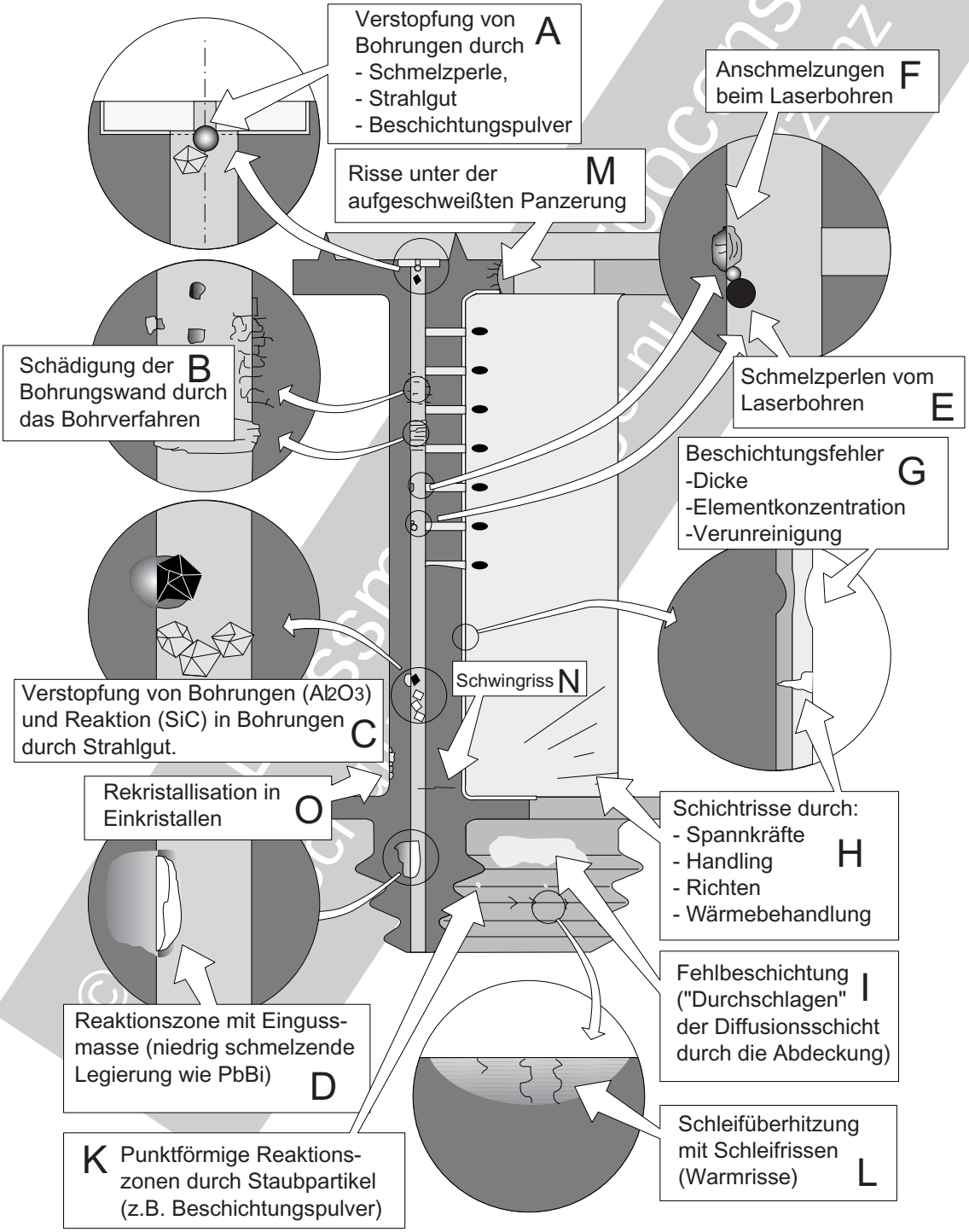


Bild 12.2-3

Fertigung: Beeinflussung des Betriebsverhaltens

Bild 12.2-3: *Dieses Bild zeigt eine Zusammenstellung von Fertigungsproblemen und -schäden an gekühlten* ***Turbinenschaufeln****. Diesen sind Querverweise auf Bilder, Seiten und Kapitel zugeordnet, in denen das Thema aus verschiedenen Perspektiven behandelt wird.*

Bild 12.2-4: *Dieses Bild zeigt eine Zusammenstellung von Fertigungsproblemen und -schäden an* ***Rotorscheiben****. Als Beispiel wurde eine* ***Turbinenscheibe*** *dargestellt. Diesen sind Querverweise auf Bilder, Seiten und Kapitel zugeordnet, in denen das Thema aus verschiedenen Perspektiven behandelt wird.*

	Problem/ Schaden	Einfluss	Querverweis
A E	Verstopfung von Kühlluftbohrungen Bild 16.2.2.3-8 Bild 16.2.2.3-9	Schmelzperlen	Bild 16.2.1.2-3, Bild 16.2.2.3-8, Bild 16.2.2.3-21
		Strahlgut	Bild 16.2.2.3-8, Bild 16.2.1.6-18. Bild 16.2.2.3-19
B F	Schädigung der Bohrungswand	ECM	Bild 16.2.1.2-3, Bild 16.2.1.2-4
		EDM	Bild 16.2.1.2-3, Bild 16.2.1.2-5
		Laser	Bild 16.2.1.2-3
C	Reaktionen mit SiC	Strahlgut	Bild 16.2.2.3-8, Band2, Bild 7.1.4-14
D	Reaktion mit Eingussmassen		Bild 16.2.2.3-8, Bild 16.2.2.3-9, Bild 16.2.2.3-11, Bild 16.2.2.3-14
G	Beschichtungsfehler	Diffusionsschicht	Bild 16.2.1.8-1, Bild 16.2.1.8.1-2, Bild 16.2.1.8.1-3
		Wärmedämmschicht	Bild 16.2.1.6-17, Bild 16.2.1.6-18, Bild 16.2.1.8.2-3, Bild 16.2.1.8.2-4, Bild 16.2.1.8.2-7
H	Schichtrisse	Spannkräfte, Richten	Bild 16.2.2.7-1.2, Bild 16.2.2.7-2, Bild 16.2.1.8.2-3, Bild 16.2.2.5-1, Bild 16.2.2.5-11
		Handling	Bild 18-5
I	Fehlbeschichtung	Kriechbeschichtung, "Durchschlagen"	Bild 16.2.1.8.1-3,
K	Punktförmige Reaktionszonen	Beschichtungspulver	Bild 16.2.1.4-14, Bild 16.2.2.3-8
L	Schleifrisse		Bild 16.2.1.1-4, Bild 16.2.1.1-5, 17.3.1-7
M	Schweißrisse/ Warmrisse		Bild 16.2.1.3-10, Bild 16.2.1.3-13
N	Schwingrisse		Bild 16.2.2.5-7, Bild 16.2.2.5-8, Bild 16.2.2.5-9
O	Rekristallisation bei Einkristallen		Bild 15.2-1, Bild 16.2.1.6-5

© Axel Rossmann - Turbocom
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigungsbedingte Fehler und Probleme an Scheiben.

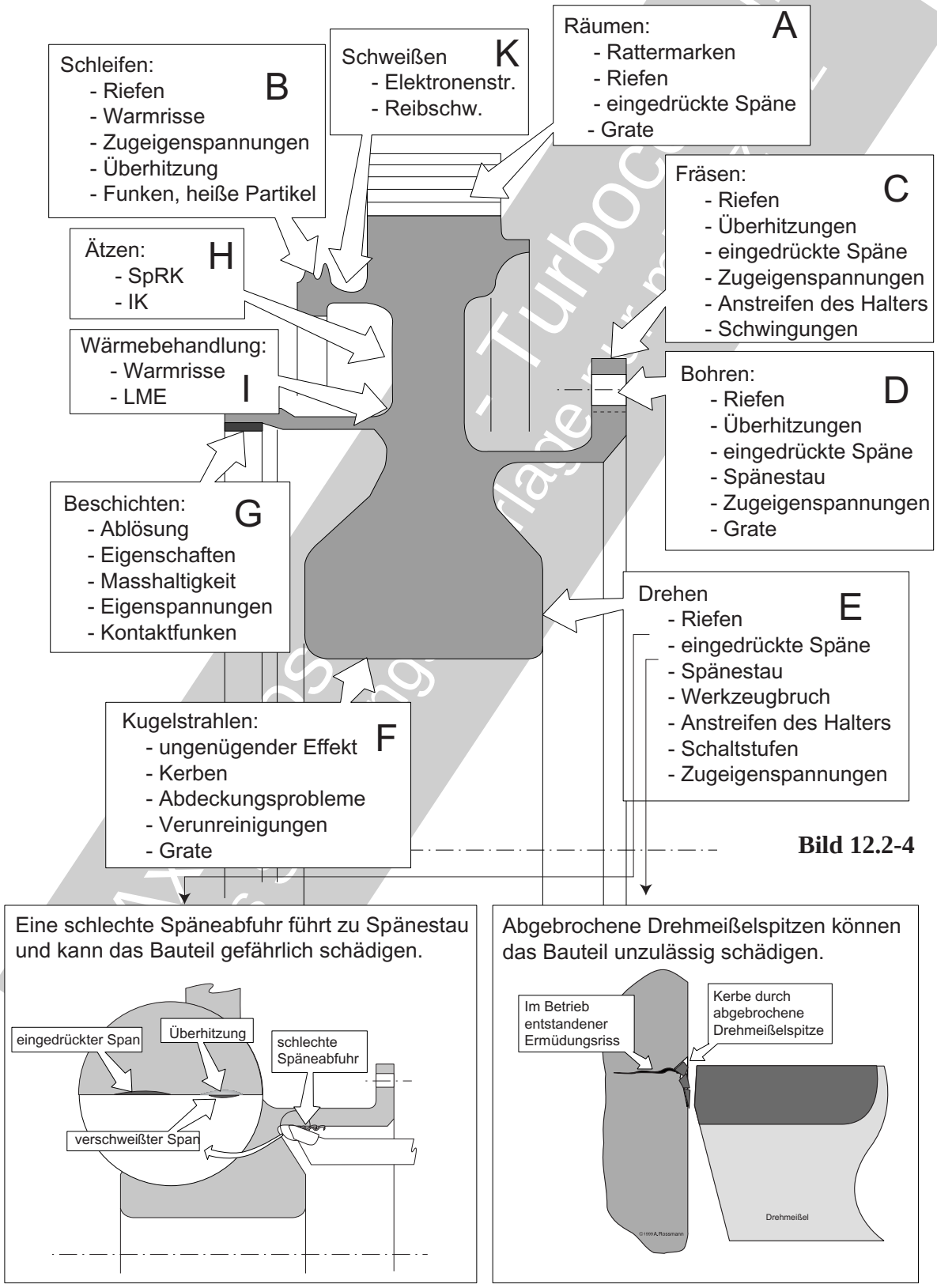


Bild 12.2-4

Eine schlechte Späneabfuhr führt zu Spänestau und kann das Bauteil gefährlich schädigen.

Abgebrochene Drehmeißelspitzen können das Bauteil unzulässig schädigen.

Fertigung: Beeinflussung des Betriebsverhaltens

*Querverweise zu **Bild 12.2-4.** Bildbeschreibung siehe Seite 12.2-9.*

	Verfahren	Problem/ Schaden	Querverweis Kapitel 17 und 18 siehe Band 4
A	Räumen	Rattermarken	Band 4: Bild 18.5-2
		Riefen,Grate	Band 4: Bild 18.1-4, Bild 18.2-2, Bild 8.2-6
		eingedrückte Späne	Band 4: Bild 18.5-3
B	Schleifen	Riefen	Bild 12.2.1.1.1-6, Bild 12.2.1.1.1-8.2, Bild 12.2.1.1.1-11, Band 4: Bild 18.1-4, Bild 18.1-7
		Überhitzung, Risse/Warmrisse	Bild 12.2.1.1-2, Bild 12.2.1.1.1-3, Band 4: 18.2-1
		Funken/heiße Partikel	Band 4: Bild 18.6-1, Bild 18.6-5, Bild 18.6-13
		SiC-Scheiben,Reaktion	Bild 12.2.1.1.1-4, Band 4: Bild 18.3-8
		Zugeigenspannungen	Bild 12.2.1.1.1-4, Bild 12.2.1.8-3, Band 4: Bild 18.4-13
C	Fräsen	Riefen	Bild 12.2.1.1.1-6.1, Bild 12.2.1.1.1-6.2.1, Band 4: Bild 18.1-4,
		Überhitzungen	Bild 12.2.1.1-8.1, Bild 12.2.1.1.1-8.2
		Anstreifen des Halters	Band 4 Bild 18.5-4
		Schwingungen	Bild 12.2.1.1.1-8.1, Bild 12.2.1.1.1-8.2, Band 4: Bild 18.5-7.1/ und Bild 18.5-7.2
D	Bohren	Riefen, Kerben	Bild 12.2.1.1.1-8, Bild 12.2.1.1.1-9.4, Bild 12.2.1.1-9.5, Bild 12.2.1.2-3, Band 4: Bild 18.1-8 und Bild 18.7-6
		Grate	Band 4: Bild 18.2-5, Bild 18.2-6, Bild 18.2-7
		Überhitzungen	Bild 12.2.1.1.1-9.1 bis Bild 12.2.1.1.1-9.5, Bild 18.5-3
		eingedrückte Späne Spänestau	Bild 12.2.1.1.1-9.2; Band 4: Bild 18.5-3
		Qualitätssicherung	Bild 12.2.1.1.1-9.4, Bild 12.2.1.1.1-9.5, Band 4: Kapitel 17
E	Drehen	Riefen	Band 4: Bild 18.1-6 und Bild 18.1-8
		Spänestau,eingedrückte Späne	Band 4: Bild 18.5-3
		Werkzeugbruch	Bild 4: Bild 18.5-5
		Anstreifen des Halters	Band 4: Bild 18.5-4
		Zugeigenspannungen	Band 4: Bild 18.4-3 und Bild 18.4-5.0
		Risse	Bild 12.2.1.1-2
F	Kugelstrahlen Bild 12.2.1.6-11	ungenügender Effekt	Bild 12.2.1.6-3, Bild 12.2.1.6-9, Bild 12.2.1.6-13
		Kerben	Bild 12.2.1.6-4, Bild 12.2.1.6-14
		Verunreinigungen	Band 4: Bild 18.3-1
		Grate	Bild 12.2.1.6-15
		Überstrahlen	Bild 12.2.1.6-11
		Korrosion	Bild 12.2.1.6-6,

© Axel Rossmann - Tutoconsult
als Schulungsunterlagennutzlizenz

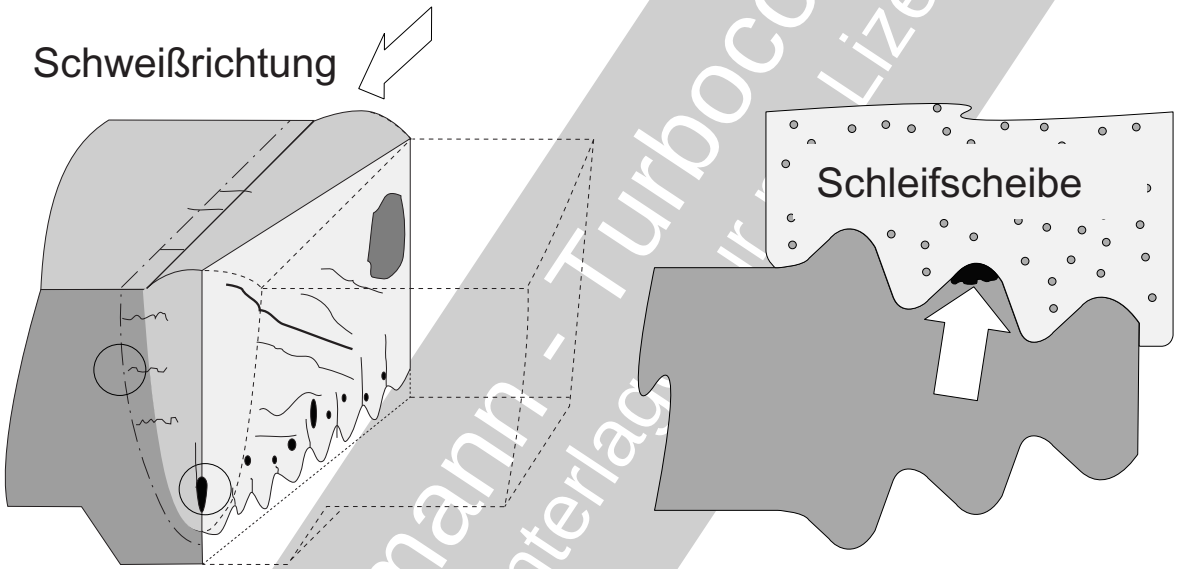
Fertigung: Beeinflussung des Betriebsverhaltens

Verfahren	Problem/ Schaden	Querverweis Kapitel 17 und 18 siehe Band 4
G Beschichten	Ablösung	Band 4: Kapitel 18.8
	Schwingfestigkeit	Bild 12.2.1.8.3-2, Bild 12.2.1.8.3-9, Bild 12.2.1.8.3-10
	Kontaktfunken	Bild 12.2.1.8.3-6, Band 4: Bild 18.6-1, Bild 18.6-3, Bild 18.6-7, Bild 18.6-8, Bild 18.6-10
	LME	Bild 12.2.1.8.3-8, Band 4 Bild 18.3-11
H Ätzen	Spannungsrisskorrosion, SpRK	Band 4: Bild 18.3-16, Bild 18.7-9
	Interkristalline Korrosion, IK	Band 4: Bild 18.3-20
I Wärmebehandlung	Warmrisse	Bild 11.2-13
	LME	Band 4: Bild 18.3-5, Bild 18.3-10.1, Bild 18.3-10.2, Bild 18.3-11
K Schweißprobleme	WIG	Bild 12.2.1.3.1-1 bis Bild 12.2.1.3.1-20
	Widerstandsschweißen: Punktschweißen, Rollnahtschweißen	Bild 12.2.1.3.1-21, Bild 12.2.1.3.1-22, Bild 12.2.1.3.1-23, Bild 12.2.1.3.1-24
	Elektronenstrahl	Bild 12.2.1.3.1-25, Bild 12.2.1.3.1-31, Band 4: Bild 18.6-6, Bild 18.6-12
	Reibschweißen	Bild 12.2.1.3.1-35, Bild 12.2.1.3.1-36
	Diffusionsschweißen	Bild 12.2.1.3.1-37, Bild 12.2.1.3.1-38

© Axel Rossmann - Turbocomsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

12.2.1 Verfahrensspezifische Probleme und Schäden



© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage für Lizenz

Dieses Kapitel hat **verfahrensspezifische Probleme** und Schäden sowie deren **Auswirkungen** und **Abhilfen** zum Schwerpunkt. Unter verfahrensspezifischen Problemen werden im Folgenden solche verstanden, die beim Verfahrensablauf auftreten. Für die Beschreibung der Verfahren und ihrer Varianten sowie deren Anwendung und Parameter wird eine ausreichende Zahl von Fachbüchern angeboten. Eine Auswahl ist auf der nächsten Seite zu finden. In dieser Literatur stehen gewöhnlich nicht Probleme und die daraus folgenden Betriebsschäden im Vordergrund. Auch Literatur die sich allgemein mit Schadenskunde befasst, lässt meist eine ausreichende Behandlung des Verfahrensablaufs unter dem Gesichtspunkt einer Schadensentstehung vermissen. Diese Einschätzung gilt auch für sogenannte Fallsammlungen (engl. case studies) einer Zusammenstellung und Beschreibung verschiedenster Schäden .

Der Schwerpunkt wird daher hier in der Beschreibung der **zu Schäden führenden Mechanismen** und Abläufe des jeweiligen Fertigungsprozesses mit den Auswirkungen auf das Betriebsverhalten der Bauteile gelegt. Dazu gehören Hinweise zu Abhilfemaßnahmen. Behandelt werden im Triebwerksbau häufig angewandte Fertigungsverfahren. Natürlich findet sich ein großer Teil der Fehler und ihre Entstehung auch an anderer Stelle dieses Buchs. In solchen Fällen sind Querverweise auf Bilder dieser Kapitel angebracht.

12.2.1 Empfohlene allgemeine Fachliteratur

ASM Handbook „Volume 5“, „Surface Engineering“, ASM,1999, ISBN 0-87170-377-7.

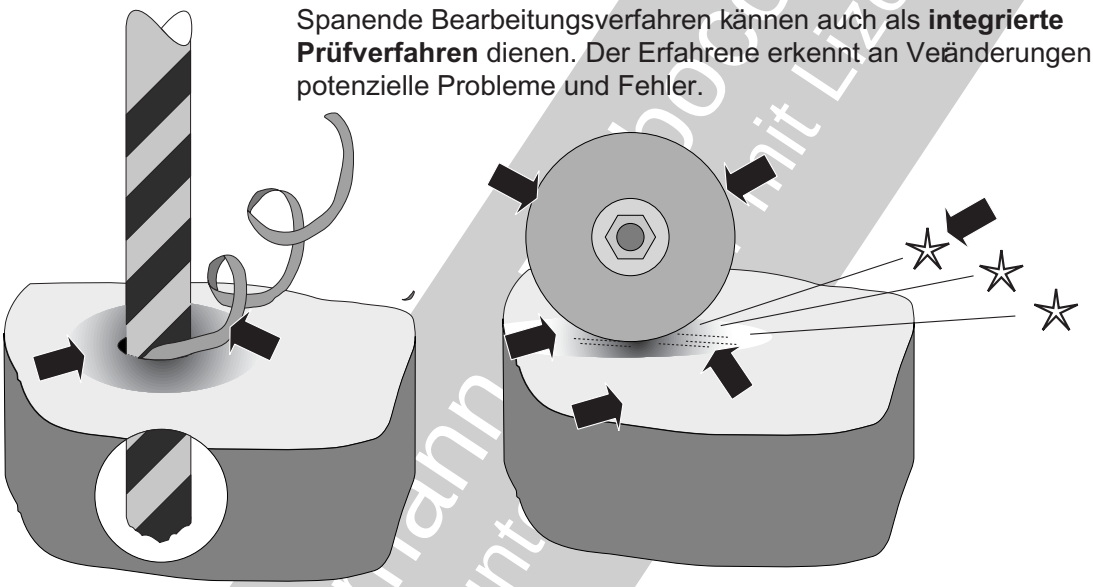
ASM Handbook „Volume 6“, „Welding, Brazing and Soldering“, ASM,1997, ISBN 0-87170-377-7.

ASM Handbook „Volume 16“, „Machining“, ASM,1999, ISBN 0-87170-007-7.

P.Adam, „**Fertigungsverfahren von Turbotriebwerken**“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.1 Spanende Bearbeitung
(Allgemeine Betrachtungen)


Spanende Bearbeitungsverfahren können auch als **integrierte Prüfverfahren** dienen. Der Erfahrene erkennt an Veränderungen potenzielle Probleme und Fehler.

Üblicherweise werden zwei Hauptgruppen **spanender Bearbeitung** unterschieden. Solche mit **definierter Schneide** wie Drehen, Fräsen, Räumen und Bohren und Verfahren mit **undefinierter Schneide.** Hier sind eine Vielzahl Schneidpartikel im Eingriff. Dies gilt für Verfahren wie Schleifen, Trennen, Bürsten, Polieren, Läppen. Darüber hinaus kommen Verfahren wie Druckfließläppen, Ultraschallbearbeitung oder Wasserstrahlschneiden zur Anwendung. Die schneidenden Hartstoffpartikel werden dazu in einem strömenden Medium wie Wasser oder einer viskosen Masse transportiert. Beim Vibrationsschleifen (Bild 12.2.1.1.1-7) werden abrasive Schleifkörper in schwingende „Schneidbewegung“ versetzt.

Weil viele Probleme und Schäden bereits in anderen Kapiteln im vorliegenden Band und in den Bänden 1, 2 und 3 unter besonderen Aspekten behandelt werden, enthält Bild 12.2.1.1-1 eine **Liste mit Querverweisen**.

Probleme und Schäden spanender Bearbeitung zeigen sich in erster Linie in der zerspanten Oberfläche (Bild 12.2.1.1-2). Es handelt sich um eine Vielfalt von Veränderungen gegenüber dem erwünschten bzw. spezifizierten Zustand. Besonders schädigend wirkt **Rissbildung** auf die zyklische Bauteillebensdauer. Aber auch festigkeitsmindernde **Gefügeveränderungen** und **Zugeigenspannungen** wirken sich in ähnlicher Weise aus.

Unzerspante Bauteilzonen können ebenfalls im Zusammenhang mit einem Zerspanungsvorgang geschädigt werden. Denkbar ist z.B. die örtliche Überlastung mit einer ungeeigneten Spannvorrichtung (Band 4, Bild 18.5-1).

Probleme der spanenden Bearbeitung stehen nicht zuletzt im Zusammenhang mit **Kühlschmierstoffen** (KSS, Bild 12.2.1.1.1-13). Die Aufheizung der Bearbeitungsfläche hängt von Eigenschaf-

© Axel Rossmann Probeconsult als Schulungsunterlage mit Lizenz

ten der KSS ab die den Schnittvorgang unterstützen und vom Zustrom des KSS zur Schnittfläche. Ungeeignete und/oder nicht ausreichend entfernte Prozessmedien können in nachfolgenden Fertigungsschritten unerwünschte Oberflächenreaktionen wie Oxidbildung (bei einer Wärmebehandlung) bis hin zu Rissen (Bild 12.2.1.7-8) auslösen. Wird die Benetzbarkeit der Bauteiloberfläche beeinträchtigt, besteht die Befürchtung einer verschlechterten Rissauffindbarkeit der Eindringprüfung.

Am Kapitelende werden typische Schadensfälle, bei denen es sich auch um **Scheibenbrüche in Zusammenhang mit Fertigungsmängeln** handelt, dargestellt. Sie werfen ein Licht auf die neben dem Zerspanungsprozess weiteren ursächlichen Einflüsse und zeigen die Auswirkungen von Fertigungsmängeln auf die Betriebssicherheit (Bilder 12.2.1.1.1-8.2, 12.2.1.1.2-5 bis -12.1 und Bild 12.2.1.7-8).

Bild 12.2.1.1-1.1 *und* ***Bild 12.2.1.1-1.2****: Diese Bilder enthalten Querverweise auf die Behandlung von* ***Zerspanungsproblemen*** *im vorliegenden Band 3 sowie den Bänden 1 und 2. Damit dienen sie als Wegweiser zu den Bildern in denen die Thematik eingehender behandelt wird. Im Folgenden sollen* ***Effekte*** *angesprochen werden. Ihre Auswirkungen beschreibt Bild 12.2.1.1-2.*

Spanbildung *geht mit plastischen Verformungen der Bearbeitungsfläche einher. Die hohe Werkstoffbeanspruchung im Mikrobereich kann diesen zu Mikrorissen aufreißen (z.B. Kommarisse bei IN 718 und Waspalloy).* ***Form, Länge*** *und Farbe (Oxidation) der Späne sowie* ***Rauigkeit/Aussehen*** *der* ***Späne*** *sind charakteristisch für die Zerspanungsparameter. Damit sind sie bei ausreichender Erfahrung ein Indiz für die Stabilität des Zerspanungsprozesses.*

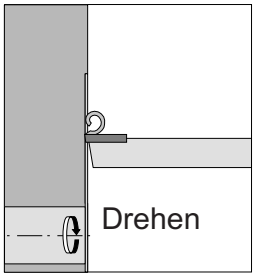
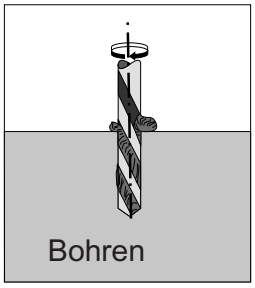
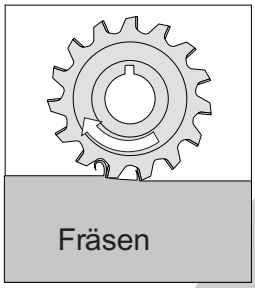
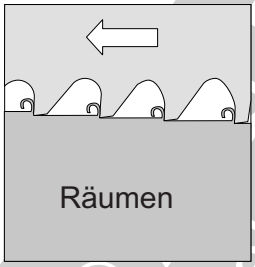
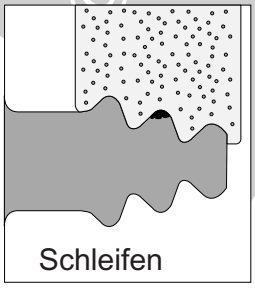
Eine besondere Gefahr besteht, wenn sich Späne zwischen das Werkzeug und das Werkstück verklemmen. Es kommt zu einem heftigen Reibvorgang mit plastischer Oberflächenverformung und Überhitzungs-gefahr.

Funken *treten bei Hochgeschwindigkeitsbearbeitung mit Hartstoffschneide (CBN) auf. Häufigkeit und Helligkeit sind ein Indiz für die Heftigkeit des Zerspanungsvorgangs. Farbe und Helligkeit sowie die Dauer bis zum Verlöschen sind auch werkstoffspezifisch (z.B. lang glühende weiße Funken sind typisch für Titanlegierungen).*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.1-6

© Axel Rossmann - Turbocamp
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

	Problem/Schaden	Bild Nr. (Kapitel 17 und 18 siehe Band 4)
 Drehen	Überhitzung	12.2.1.1.2-63; Band 4: 12.2.2.2-7
	Grate, Kanten	Band 4: 18.2-2
	Spänestau	Band 4: 18.5-3
	Zugeigenspannungen	Band 4: 18.4-3; 18.4-5.0
	Rissbildung, Kommarisse	12.2.1.1-2
	Rattern, Rupfen	12.2.1.1.2-3.2; Band 4: 18.5-2
	Überlastung durch Spannkräfte	Band 4: 18.5-1
	Werkzeugbruch	Band 4: 18.5-5
	Parametereinfluss	12.2.1.1.2-2, -3.1, -4
 Bohren	Überhitzung	12.2.1.1.2-5 bis -10; Band 4: 18.5-3, 12.2.2.7-6
	Grate, Kanten	Band 4: 18.2-5
	Spänestau	12.2.1.1-5 bis -10; 12.2.1.1-2
	Zugeigenspannungen	Band 4: 18.4-12
	Werkzeugbruch	12.2.1.1.2-6
	Parametereinfluss	
	Kühl- und Schmiermittel	12.2.1.1.2-13, 12.2.1.1.2-14
	Prüfbarkeit	12.2.1.1.2-5, 12.2.1.1.2-9
 Fräsen	Überhitzung	
	Grate, Kanten	
	Zugeigenspannungen	12.2.1.1.1-8.2; 12.2.1.1.1-3.1,
	Rattern, Rupfen	12.2.1.1.2-3.2, Band 4: 18.4-13, 18.5-2,
	Funkenbildung	
	Parametereinfluss	Offene Felder für Ergänzungen frei gelassen
 Räumen	Grate, Kanten	Band 4: 18.2-6; 18.2-8
	Zugeigenspannungen	
	Rattern, Rupfen	12.2.1.1.2-4, Band 4: 18.5-2
	Funkenbildung	12.2.1.1.1-8.2; Band 4: 18.6-2
	Parmetereinfluss	
 Schleifen	Überhitzung	12.2.1.1.1-5; 12.2.1.1.1-8.2
	Rissbildung	12.2.1.1.1-5; 12.2.1.1.1-8.2
	Grate, Kanten	Band 4: 18.2-1
	Zugeigenspannungen	12.2.1.1.1-4, Bd 4 18.2-3
	Rattern	12.2.1.1.1-3, 12.2.1.1.2-3.1
	Funkenbildung	Band 4: 18.6-1, 18.6-2;
	Parmetereinfluss	Bdand 4: 18.6-5
	Kühlmittel	12.2.1.1.2-13, 12.2.1.1.2-14

© Prof. Rossmann - Turbocontrolt
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 12.2.1.1-1.1

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

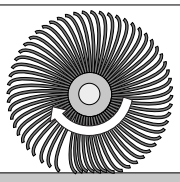
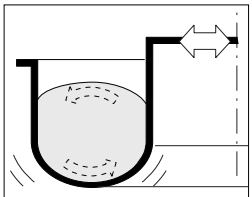
Kapitel 17 und 18 siehe Band 4	Problem/Schaden	Bild Nr.
 Bürsten, Bandschleifen	Überhitzung Grate, Kanten Zugeigenspannungen Parametereinfluss Schleifkorneinfluss/Reaktionen Funken	12.2.1.1.1-8.2 Band 4: 18.2-8 12.2.1.1.1-8.2 12.2.1.1.1-6; Bd 3.2 12.2.2.3-8 Band 4: 18.6-5
 Vibrations-schleifen	Beschädigungen Schleifflüssigkeit Parametereinflüsse	12.2.1.1.1-7

Bild 12.2.1.1-1.2

Offene Felder für Ergänzungen frei gelassen

Fortsetzung von Seite 12.2.1.1-4

Gratbildung *kann sowohl an Kanten am Werkzeugeintritt des Werkstücks als auch am Austritt (Bohrer, Fräser) auftreten. Grate sind gefährliche Schwachstellen (Band 4, Kapitel 18.2).*

Vibrationen von Werkzeug und Werkstück wie Rattern und Rupfen (Band 4, Kapitel 18.5).

Das ***Abstumpfen*** *von* ***Werkzeugschneiden*** *ist für jeden Zerspanungsvorgang ein Thema. Es gilt sowohl für definierte Schneiden als auch für undefinierte. Hier werden die notwendigen Kanten des (Schneid-) Korns abgeflacht. Bei Schleifvorgängen kommt noch ein Zusetzen der für den Spanabtransport notwendigen Porosität dazu. Das führt wegen der verschlechterten Kühlung und der Schneidwirkung zum „Schmieren“ mit großer Reibungswärme und ‘Oberflächenstress’.*

Eine Besonderheit ist der Einfluss des ***Schneidenwerkstoffs****. Es ist damit zu rechnen, dass ausbrechende Partikel, zB. Siliziumkarbid (SiC) in der Bearbeitungsfläche stecken bleiben. Damit reagieren Ni-Legierungen bei ausreichend hohen Temperaturen (z.B. nachfolgende* ***Wärmebehandlung****,* ***Hochtemperaturlöten****,* ***Elektronenstrahlschweißen****) oder der entsprechenden Betriebstemperatur. Es entstehen spröde Phasen als Anrissstellen bei Schwingbeanspruchung.*

Dem ***Kühlschmierstoff*** *(KSS) ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die Auswahl muss schädigende* ***Reaktionen mit dem Werkstoff des Werkstücks*** *(Bild 12.2.1.1.2-14) berücksichtigen. Das gilt z.B. für Titanlegierungen bei denen durch Cl-haltige Medien Spannungsrisskorrosion auftreten kann.*

© Prof. Rossmann - Turboconsult
Ausbildungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 12.2.1.1-2: *Es handelt sich um eine* ***Zusammenstellung typischer Effekte in einer spanend hergestellten Bearbeitungsoberfläche*** *(Lit. 12.2.1.1-14).*

„A“ Eigenspannungen: *Bei jeder Zerspanung ist mit plastischen Verformungen, zumindest im Mikrobereich und deshalb mit der Entstehung von Eigenspannungen zu rechnen (Kapitel 12.2.2.4). Deren Größe und Art (Zug oder Druck) und damit der Einfluss auf die Bauteileigenschaften hängen sehr sensibel von den Zerspanungsparametern, der Geometrie und dem Zustand der Werkzeugschneide ab. Grundsätzlich gilt: Zugspannnungen mindern die Schwingfestigkeit und erhöhen das Risiko einer Risskorrosion (Band 4, Bild 18.3-15) und von Lötrissigkeit (Band 4, Bild 18.3-12).*

„B“ Festigkeits- und Härteänderung als folgen einer Gefügeveränderung *(Bild 12.2.1.1-3.1): Die Wärme aus dem Zerspanungsvorgang kann die Oberfläche schädigend aufheizen. Wenn z.B. ein Bohrer „blau“ wird (Band 4, Bild 18.5-3 und Band 4) ist dies ein deutlicher Hinweis, dass auch die Bearbeitungsfläche, d.h. die Bohrungswand gefährlich überhitzt wurde. Die Aufheizung wird von vielen Prozessparametern und den physikalischen Eigenschaften des Werkstücks beeinflusst. Darüber hinaus hängt der „Wärmehaushalt“ des Schneidvorgangs entscheidend von der Zuführung und den Eigenschaften des Schneid- und Kühlmittels ab. Gehärtete bzw. vergütete Stähle erleiden beim Überschreiten der Anlasstemperatur einen Härteabfall. Wird bei aushärtbaren Legierungen wie Nickellegierungen die Lösungsglühtemperatur überschritten, geht die, die Warmfestigkeit bestimmende, Aushärtungsphase (γ'-Phase) mit zunehmender Temperatur und Zeit in Lösung.*

„C“ Rissbildung: *Diese entsteht, wenn die Schnittkräfte den Werkstoff mechanisch überlasten. Ni-Basis Schmiedelegierungen wie Waspaloy kennen sog. „**Kommarisse**“. Es handelt sich um transkristalline Gewaltrisse die auf ein Korn beschränkt sind. Ähnliche Risse können im Zusammenhang mit Rattermarken entstehen (Band 4, Bild 18.5-2). Besonders gefährliche Gewaltanrisse können beim Anstreifen von Werkzeughaltern entstehen (Bild 12.2.1.1-3.1)*
Eine andere Form der Rissbildung sind sog. Warm- oder Heißrisse (Bild 11.1-8 und Band 4, Bild 18.7-6). Diese entstehen bei hohen Temperaturen die bereits eine ausreichende Erweichung der Korngrenzen auslösen, sodass Wärmespannungen und/oder Schnittkräfte zu interkristallinen Rissen führen. Typisches Beispiel sind Schleifrisse in Superlegierungen.

„D“ Nachweisverschlechterung infolge mechanischem Schließen von Fehlstellen und Rissen: *Fehlstellen wie Risse und Poren können durch den Zerspanungsvorgang im Oberflächenbereich zugedrückt werden (Band 4, Bild 17.3.1-4). Diesen Effekt kann man besonders ausgeprägt beim Schleifen beobachten. Hier werden zuvor entstandene Schleifrisse so geschlossen, dass eine Eindringprüfung kein befriedigendes Ergebnis ermöglicht. Zur Öffnung der Risse wird dann ein Wärmebehandlungszyklus notwendig (Band 4, Bild 17.3.1-7).*

„E“ Gefügeveränderung, ausgelöst von plastischer Verformung und Erwärmung *(Lit 12.2.3-5, Bild 12.2.1.1-3.1): Extreme plastische Verformung führt zu schlecht anätzbaren, bei martensitischen Stählen meist spröden Gefügezuständen, sog. „**White-etching Layer**“.* ***Man spricht auch von „White Etching Areas“ (weiße Schichten) wobei Effekte wie „Butter Fly-Bildung“*** *(Lit. 12.2.1.1-17) gemeint sein können.* ***Dagegen sind dünnste (µm-Bereich), schlecht anätzbare, weiche Schichten auf Zerspanungsflächen meist unvermeidbar und nicht zwangsläufig schädigend****. Die Schnittrichtung lässt sich bei stark drückenden Werkzeugschneiden an einer ausgeprägten „**Faserkrümmung**“ in Oberflächennähe er-*

© Axel Bossmann - Turbomaschinen - Lehrunterlagen nur zum Lehrgebrauch

*kennen. Ob diese negativ zu beurteilen ist, hängt von den beim Verformungsvorgang eingebrachten Eigenspannungen ab. Zugspannungen senken die Schwingfestigkeit. Hohe Temperaturen beim Bearbeitungsvorgang können, wie bereits unter „**H**“ beschrieben, das Gefüge unerwünscht verändern.*

***„F“ Kerben:** Eine Zerspanung kann Kerben in Form von Bearbeitungsriefen (Band 4, Bild 18.1-5 und Bild 18.1-6, Lit 12.2.3.1.1-15 und Lit 12.2.3.1.1-16) und Rattermarken (Band 4, Bild 18.5-2) erzeugen, die als Schwingbruchausgänge dienen. Eine weitere Schädigung von Ni-Basis- Werkstoffen ist das Ausbrechen ausgeprägter Karbide beim Zerspanungsvorgang. Damit entstehen merkliche Kerben.*

***„G“ Werkzeugbruch** kann eine gefährliche Schädigung darstellen (Band 4, Bild 18.5-5). Das gilt auch, wenn Reste der ausgebrochenen Werkzeugschneide in der Oberfläche verbleiben.*

***„H“ Eingedrückte Späne** können als Kerben wirken. Dazu verwandt sind Aufschmierungen, die eine extreme Oberflächenverfestigung („**E**“) und Überhitzung mit Festigkeitsabfall („**B**“) erzeugen (Band 4, Bild 18.5-3).*

***„I“ Aufschmieren von Fremdmetall** kann auf unterschiedliche Weise beim Zerspanungsvorgang erfolgen. Denkbar ist Abrieb von Vorrichtungen (Bild 12.2.1.1-3.1, Band 4, Bild 18.3-1) oder niedrig schmelzenden metallischen Eingussmassen (Band 4, Bild 18.5-1). Solche Verunreinigungen können auf unterschiedliche Weise schadenswirksam werden, z.B. durch Elementbildung oder Lötrissigkeit (Band 4, Kapitel 18.3 und Bild 18.7-3 und Band 1 Bild 5.3-6).*

***„K“ Verunreinigungen** die im Ablauf des Fertigungsprozesses zwangsläufig auf die zerspante Bauteiloberfläche gelangen, sind Kühl- und Schneidstoffe. Silikonöle, die zur Unterdrückung der Schaumbildung dienen, können die Benetzbarkeit der zerspanten Bauteile und durch Verschleppung (Band 4), anderer Bauteile bedenklich verschlechtern. Dadurch wird die Wirksamkeit der Eindringprüfung in Frage gestellt. Die Folge ist eine Verunsicherung die erfahrungsgemäß einen umfangreichen Reinigungsaufwand mit hohen Kosten auslöst.*
*Aggressive Verunreinigungen durch **Ätz- und Reinigungsbäder** können bei nachfolgenden **Wärmebehandlungen** unzulässig starke Oxidation und/oder selektive Korrosion (z.B. interkristalliner Angriff) entstehen lassen (Bild 12.2.1.7-3).*

© Axel Bossmann - Turbocoach
Lehrmaterialunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

Einflüsse zerspanender Bearbeitung auf die Bauteiloberfläche.

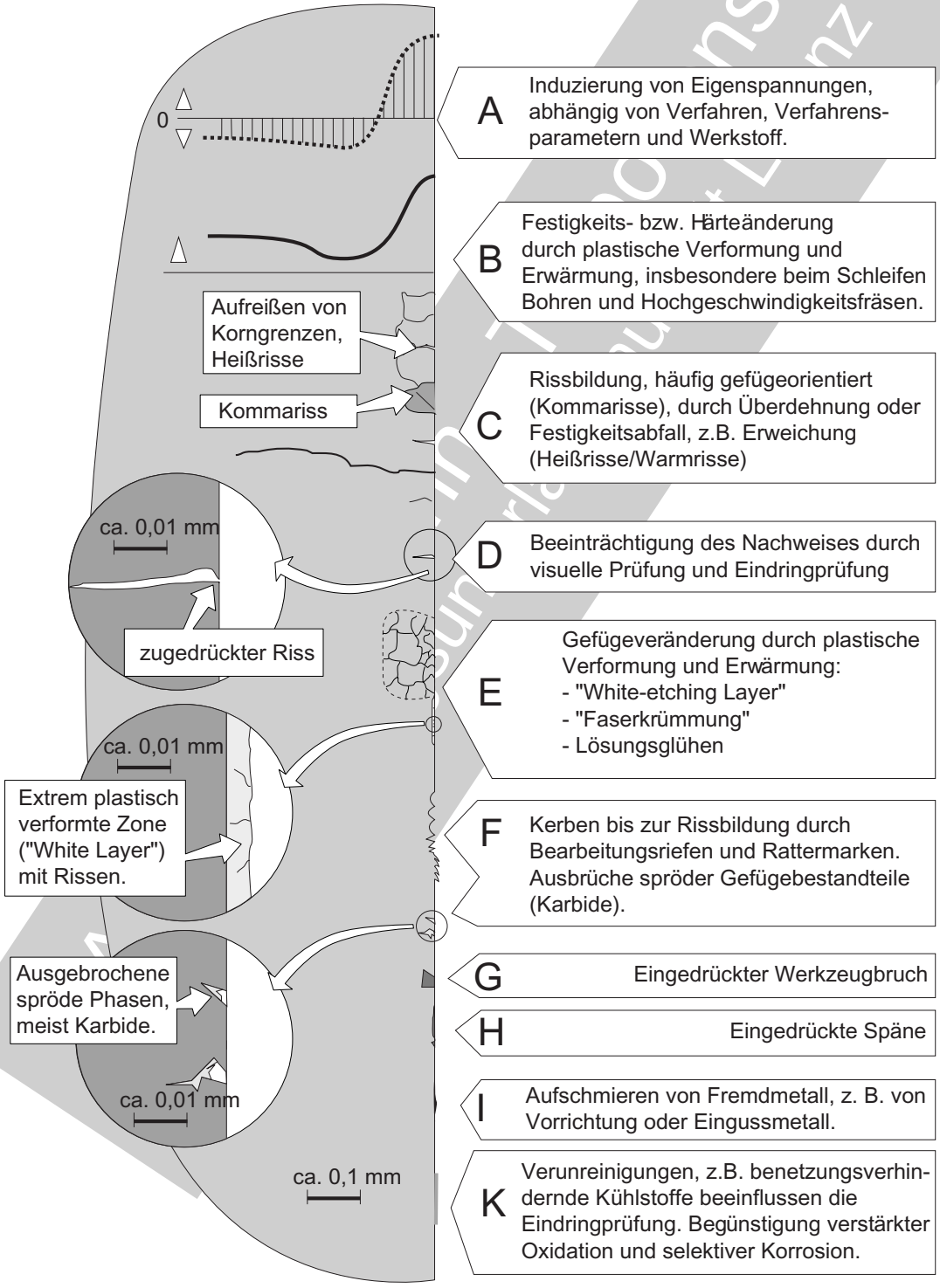


Bild 12.2.1.1-2

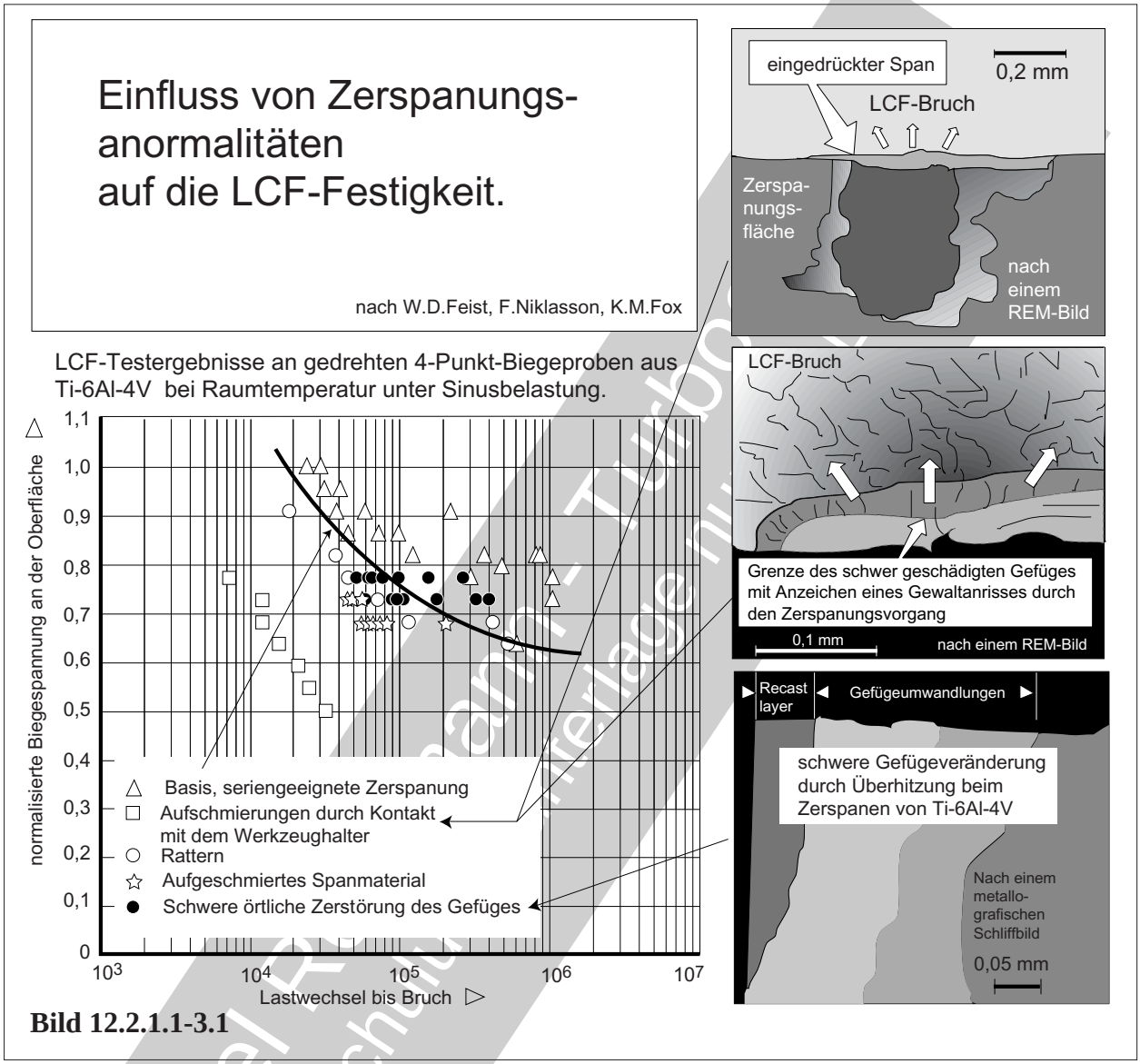


Bild 12.2.1.1-3.1

Bild 12.2.1.1-3.1 *(Lit. 12.2.1.1-29): Während der Zerspanung kann die Oberfläche auf unterschiedliche Weise geschädigt werden. Die Auswirkungen der wichtigsten Schädigungsarten (Bild 12.2.1.1-2) auf die LCF-Festigkeit und damit auf die zyklische Lebensdauer von Rotorkomponenten (Scheiben und Ringe) zeigt das Diagramm. Den gravierendsten Einfluss haben offenbar* ***Aufschmierungen und rissartige Schädigungen*** *durch örtliche mechanische Überlastung (mittlere Skizze) beim* ***Kontakt mit dem Werkzeughalter*** *(Band 4, Bild 18.5-4). Hierzu gehören auch Aufheizungen mit örtlichen Anschmelzungen (recast layer, Skizze unten) die sich bei dem Anstreifvorgang bilden. Danach folgen eingedrückte Späne (Skizze oben, Band 4, Bild 18.5-3) und der Einfluss deutlicher Gefügeveränderungen.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

Beeinflussung einer spanend bearbeiteten Oberfläche im metallografischen Schliff.

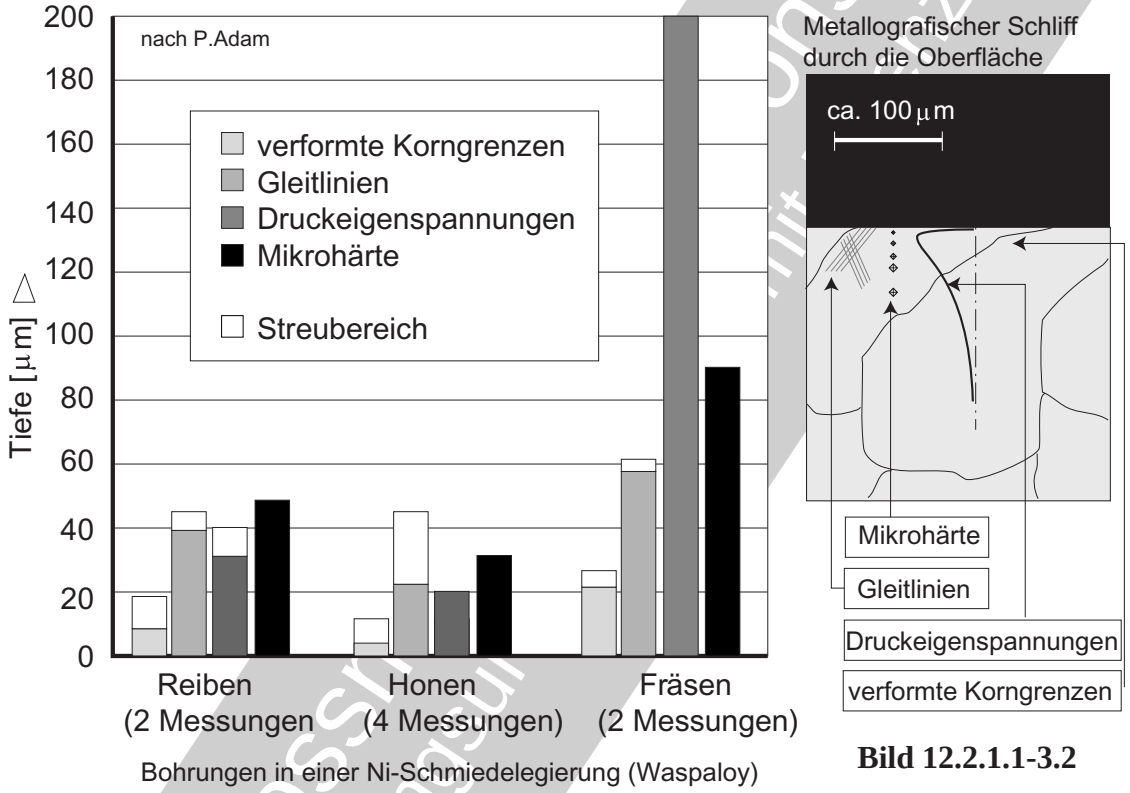


Bild 12.2.1.1-3.2

Bild 12.2.1.1-3.2 *(Lit. 12.2.1.1-1): Das Beispiel von* ***Bohrungen in einem Scheibenwerkstoff*** *aus einer Ni-Schmiedelegierung gibt ein Gefühl für die Beeinflussung der bearbeiteten Oberfläche. Natürlich hängen diese Veränderungen außer von den Zerspanungsparametern auch entscheidend von den Werkstoffeigenschaften ab. Dabei spielen z.B. die Verfestigungsneigung, das Gefüge und die Kristallstruktur eine wichtige Rolle.*

In erster Linie handelt es sich um vier Effekte. Die ***Korngrenzenverformung*** *zeichnet sich durch eine Verbiegung in Bearbeitungsrichtung auf Grund einer merklichen plastischen Verformung aus (Detail rechts).*

Gleitlinien *werden von eng benachbarten parallel orientierten Linienfeldern gekennzeichnet. Sie entstehen durch das Abgleiten des Werkstoffs auf den Gleitebenen der Kristalle bei einer plastischen Verformung.*

Druckeigenspannungen *bilden sich auf Grund der unterschiedlichen plastischen Verformung im Abstand von der Oberfläche. Sie fallen verständlicherweise nach innen schnell ab. Man erkennt, dass beim (Zirkular-) Fräsen die Druckeigenspannungen unter den angewandten Zerspanungsparametern besonders tief wirken. Sie reichen deutlich über die Gefügemerkmale hinaus.*

Die ***Veränderung der Mikrohärte*** *ist auf eine Kaltverfestigung infolge der plastischen Verformung zurückzuführen. Entsprechend dem Verformungsverlauf ist mit dem Anstieg der Mikrohärte in Richtung zur Oberfläche zu rechnen.*

Es lässt sich also über die erkennbaren Gefügeveränderungen im ***metallografischen Schliff*** *und umgekehrt nicht unbedingt auf die Tiefe der Druckspannungen und einer Härteänderung rückschließen.*

Literatur zu Kapitel 12.2.1.1

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.1-1 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 61, 63, 104, 240.

12.2.1.1-2 „Machining Titanium & Its Alloys“, ASM international, www.supraalloys.com/Machining_titanium.htm, 1.04.2004.

12.2.1.1-3 ASM Handbook Vol.5 „Surface Engineering“ , ASM International, ISBN 0-871170-377-7, 1999, Seite 120, 144.

12.2.1.1-4 H.Kloos, „Eigenspannungen, Definition und Entstehungsursachen“, Zeitschrift „Werkstofftechnik“, 10.Jahrgang, September 1979, Heft 9, Seite 293-332.

12.2.1.1-5 ASM Handbook Vol.16 „Machining“ , ASM International, ISBN 0-871170-007-7, 1999, Seite 29-32, „Cutting Fluids“, Seite 40, 159, 327.

12.2.1.1-6 E.Schreiber, „Die Eigenspannungsausbildung beim Schleifen gehärteten Stahls“, Zeitschrift „Härtereitechnische Mitteilungen“, 28 (1973), Heft 3.

12.2.1.1-7 E.Schreiber, „Härterisse und Schleifrisse -Ursachen und Auswirkungen von Eigenspannungen (Teil 1)“, Zeitschrift „ZwF“ 71 10 (1976),Seite 460-465.

12.2.1.1-8 E.Schreiber, „Härterisse und Schleifrisse -Ursachen und Auswirkungen von Eigenspannungen (Teil 2)“, Zeitschrift „ZwF“ 71 12 (1976),Seite 565-570.

12.2.1.1-9 „GE Inspecting CF6-50 Disk Fragments“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, April 5, 1982, Seite 33.

12.2.1.1-10 „A300 Damaged by Engine Fire“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, March 29, 1982, Seite 33.

12.2.1.1-11 „Cracked disc caused CF6 turbine failure“, Zeitschrift „Flight International“, 17 April, 1982, Seite 1005.

12.2.1.1-12 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 Failures“, Seite 299 und 300.

12.2.1.1-13 Investigation Report B/921/1032, „Boeing 727-277 VH-ANA...“, 4. July 1992, Seite 1-20.

12.2.1.1-14 M. Field, J.F. Kahles, „Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheit bearbeiteter Werkstücke, ‘Surface Integrity’ “, Zeitschrift „Fertigung“, Ausgabe 5/72, Seite 145-156.

12.2.1.1-15 „JT8D Inspection Ordered by FAA“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, July 21, 1980, Seite 23. “ .

12.2.1.1-16 Airworthiness Directive AD/JT8D/17„Eighth Stage Rear Compressor Front Hub“, 9 /80, Civil Aviation Authority, Australia, 1998 .

12.2.1.1-17 Metals Handbook Ninth Edition „Vol.9 Metallography and Microstructures“ , ASM International, ISBN 0-871170-007-7, 1988, Seite 19.

12.2.1.1-18 „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.

12.2.1.1-19 Airworthiness Directive AD/CFM56/9, „HPTR Fan Disk Inspection“, 2/98, Civil Aviation Authority, Australia, 1998 .

12.2.1.1-20 „Titanium Design and Fabrication Handbook for Industrial Applications“ Titanium Metals Corporation (TIMET), www.timet.com/fab-p34.htm.

12.2.1.1-21 W.Klose, „Kühlschmiermittel auf Metalloberflächen“, Zeitschrift „Oberflächentechnik“, 86 (1995) Nr. 6, Seite 1876-1882.

12.2.1.1-22 W.Lehmann, „Wassermischbare Flüssigkeiten für das Bearbeiten von Metallen“, Zeitschrift „Technische Rundschau“ Nr. 23, 1. Juni 1976, Seite 112.

12.2.1.1-23 R.Völler, „Einflüsse des Kühlschmierstoffs beim Normal- und Hochgeschwindigkeitsschleifen“, Zeitschrift „Schmiertechnik und Tribologie“ 21. Jahrgang Nr. 4, 1974, Seite 75-79.

12.2.1.1-24 J.Maranchik Jr. „Machining Data for Titanium Alloys“,

12.2.1.1-25 ASM Handbook Vol. 4 „Heat Treatment“ , ASM International, ISBN 0-871170-379-3, 2001, Seite 919, 920.

12.2.1.1-26 K.Schjold, S.Schmid, „Fabrikation und Qualitätssicherung bei Schaufeln axialer Turbomaschinen“, Zeitschrift „Technische Rundschau Sulzer“, 2/1977, Seite 61-68.

12.2.1.1-27 H.Bonk, „Brand- und Explosionsschutzkonzepte bei der Magnesiumbearbeitung“, www-isf.maschinenbau.uni-dortmund.de, 28. Juli 2005. Seite 1-9.

© Axel Kossmann - Turboconsult
Alle Schutzrechte nur mit Lizenz

12.2.1.1-28 T.Giglio, „Titan in der Prothesentechnik“, Zeitschrift „Orthopädie-Technik“ 5/96, Seite 372-375.

12.2.1.1-29 W.D.Feist, F.Nillasson, K.M.Fox „The Influence of Manufacturing Anomalies on Fatigue Performance of Critical Rotating Parts in Aero-engine“, MANHIRP-Project, EC-Contract G4RD-CT2000-00400 5 GROWTH, 2002.

12.2.1.1-30 H.Schlicht, „Über die Entstehung von White Etching Areas (WEA) in Wälzelementen“, Zeitschrift „HTM (Härtereitechnische Mitteilungen)“ Nr. 29 (1973) Heft 2, Seite 112-123.

12.2.1.1-31 E.Just, „Mikrobielle Gefährdung von Kühlschmierstoffen“, Zeitschrift „Tribologie + Schmierungstechnik“, 30. Jahrgang, Heft 4/1983, Seite 202-204.

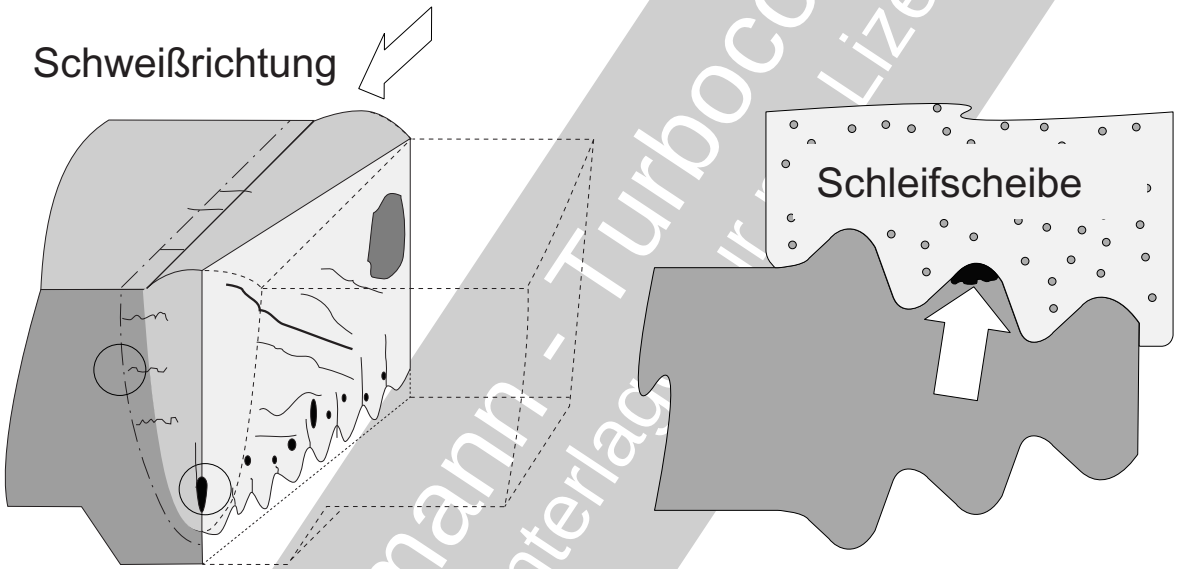
12.2.1.1-32 National Transportation Safety Board (NTSB), Report number MIA99FA252 „Uncontained engine failure, Boeing 737-300, September 12, 1999“, Seite 1-6.

12.2.1.1-33 J. Hall, National Transportation Safety Board (NTSB), Safety Recommendation February 25, 1998, „Reply refer to: A-98-25 and -26“, Seite 1-4.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

12.2.1 Verfahrensspezifische Probleme und Schäden



© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage für Lizenz

Dieses Kapitel hat **verfahrensspezifische Probleme** und Schäden sowie deren **Auswirkungen** und **Abhilfen** zum Schwerpunkt. Unter verfahrensspezifischen Problemen werden im Folgenden solche verstanden, die beim Verfahrensablauf auftreten. Für die Beschreibung der Verfahren und ihrer Varianten sowie deren Anwendung und Parameter wird eine ausreichende Zahl von Fachbüchern angeboten. Eine Auswahl ist auf der nächsten Seite zu finden. In dieser Literatur stehen gewöhnlich nicht Probleme und die daraus folgenden Betriebsschäden im Vordergrund. Auch Literatur die sich allgemein mit Schadenskunde befasst, lässt meist eine ausreichende Behandlung des Verfahrensablaufs unter dem Gesichtspunkt einer Schadensentstehung vermissen. Diese Einschätzung gilt auch für sogenannte Fallsammlungen (engl. case studies) einer Zusammenstellung und Beschreibung verschiedenster Schäden .

Der Schwerpunkt wird daher hier in der Beschreibung der **zu Schäden führenden Mechanismen** und Abläufe des jeweiligen Fertigungsprozesses mit den Auswirkungen auf das Betriebsverhalten der Bauteile gelegt. Dazu gehören Hinweise zu Abhilfemaßnahmen. Behandelt werden im Triebwerksbau häufig angewandte Fertigungsverfahren. Natürlich findet sich ein großer Teil der Fehler und ihre Entstehung auch an anderer Stelle dieses Buchs. In solchen Fällen sind Querverweise auf Bilder dieser Kapitel angebracht.

12.2.1 Empfohlene allgemeine Fachliteratur

ASM Handbook „Volume 5“, „Surface Engineering“, ASM,1999, ISBN 0-87170-377-7.

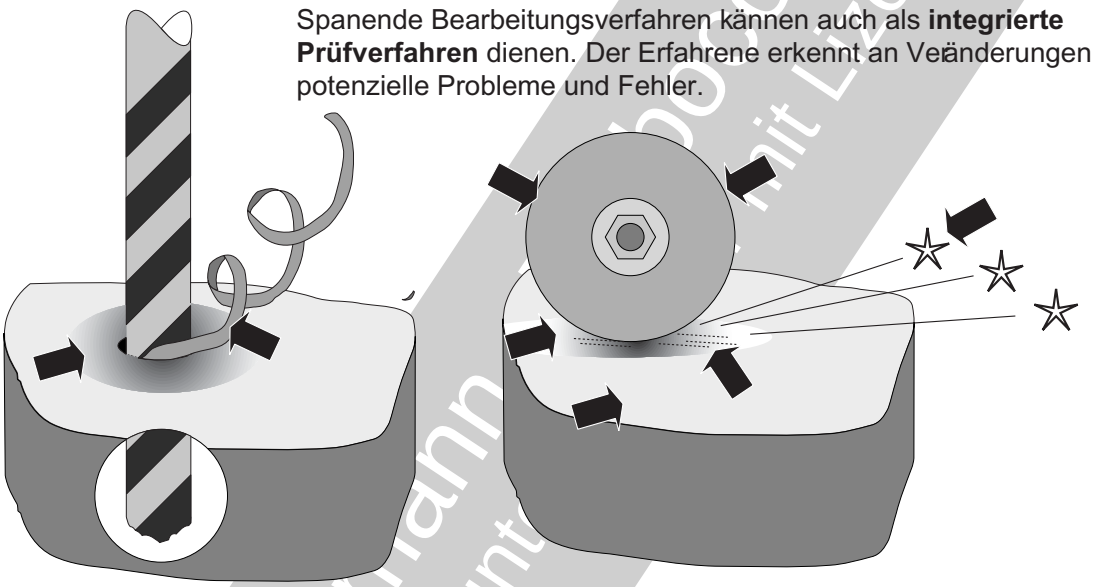
ASM Handbook „Volume 6“, „Welding, Brazing and Soldering“, ASM,1997, ISBN 0-87170-377-7.

ASM Handbook „Volume 16“, „Machining“, ASM,1999, ISBN 0-87170-007-7.

P.Adam, „**Fertigungsverfahren von Turbotriebwerken**“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.1 Spanende Bearbeitung
(Allgemeine Betrachtungen)


Spanende Bearbeitungsverfahren können auch als **integrierte Prüfverfahren** dienen. Der Erfahrene erkennt an Veränderungen potenzielle Probleme und Fehler.

Üblicherweise werden zwei Hauptgruppen **spanender Bearbeitung** unterschieden. Solche mit **definierter Schneide** wie Drehen, Fräsen, Räumen und Bohren und Verfahren mit **undefinierter Schneide.** Hier sind eine Vielzahl Schneidpartikel im Eingriff. Dies gilt für Verfahren wie Schleifen, Trennen, Bürsten, Polieren, Läppen. Darüber hinaus kommen Verfahren wie Druckfließläppen, Ultraschallbearbeitung oder Wasserstrahlschneiden zur Anwendung. Die schneidenden Hartstoffpartikel werden dazu in einem strömenden Medium wie Wasser oder einer viskosen Masse transportiert. Beim Vibrationsschleifen (Bild 12.2.1.1.1-7) werden abrasive Schleifkörper in schwingende „Schneidbewegung“ versetzt.

Weil viele Probleme und Schäden bereits in anderen Kapiteln im vorliegenden Band und in den Bänden 1, 2 und 3 unter besonderen Aspekten behandelt werden, enthält Bild 12.2.1.1-1 eine **Liste mit Querverweisen**.

Probleme und Schäden spanender Bearbeitung zeigen sich in erster Linie in der zerspanten Oberfläche (Bild 12.2.1.1-2). Es handelt sich um eine Vielfalt von Veränderungen gegenüber dem erwünschten bzw. spezifizierten Zustand. Besonders schädigend wirkt **Rissbildung** auf die zyklische Bauteillebensdauer. Aber auch festigkeitsmindernde **Gefügeveränderungen** und **Zugeigenspannungen** wirken sich in ähnlicher Weise aus.

Unzerspante Bauteilzonen können ebenfalls im Zusammenhang mit einem Zerspanungsvorgang geschädigt werden. Denkbar ist z.B. die örtliche Überlastung mit einer ungeeigneten Spannvorrichtung (Band 4, Bild 18.5-1).

Probleme der spanenden Bearbeitung stehen nicht zuletzt im Zusammenhang mit **Kühlschmierstoffen** (KSS, Bild 12.2.1.1.1-13). Die Aufheizung der Bearbeitungsfläche hängt von Eigenschaf-

© Axel Rossmann Probeconsult als Schulungsunterlage mit Lizenz

ten der KSS ab die den Schnittvorgang unterstützen und vom Zustrom des KSS zur Schnittfläche. Ungeeignete und/oder nicht ausreichend entfernte Prozessmedien können in nachfolgenden Fertigungsschritten unerwünschte Oberflächenreaktionen wie Oxidbildung (bei einer Wärmebehandlung) bis hin zu Rissen (Bild 12.2.1.7-8) auslösen. Wird die Benetzbarkeit der Bauteiloberfläche beeinträchtigt, besteht die Befürchtung einer verschlechterten Rissauffindbarkeit der Eindringprüfung.

Am Kapitelende werden typische Schadensfälle, bei denen es sich auch um **Scheibenbrüche in Zusammenhang mit Fertigungsmängeln** handelt, dargestellt. Sie werfen ein Licht auf die neben dem Zerspanungsprozess weiteren ursächlichen Einflüsse und zeigen die Auswirkungen von Fertigungsmängeln auf die Betriebssicherheit (Bilder 12.2.1.1.1-8.2, 12.2.1.1.2-5 bis -12.1 und Bild 12.2.1.7-8).

Bild 12.2.1.1-1.1 *und* ***Bild 12.2.1.1-1.2****: Diese Bilder enthalten Querverweise auf die Behandlung von* ***Zerspanungsproblemen*** *im vorliegenden Band 3 sowie den Bänden 1 und 2. Damit dienen sie als Wegweiser zu den Bildern in denen die Thematik eingehender behandelt wird. Im Folgenden sollen* ***Effekte*** *angesprochen werden. Ihre Auswirkungen beschreibt Bild 12.2.1.1-2.*

Spanbildung *geht mit plastischen Verformungen der Bearbeitungsfläche einher. Die hohe Werkstoffbeanspruchung im Mikrobereich kann diesen zu Mikrorissen aufreißen (z.B. Kommarisse bei IN 718 und Waspalloy).* ***Form, Länge*** *und Farbe (Oxidation) der Späne sowie* ***Rauigkeit/Aussehen*** *der* ***Späne*** *sind charakteristisch für die Zerspanungsparameter. Damit sind sie bei ausreichender Erfahrung ein Indiz für die Stabilität des Zerspanungsprozesses.*

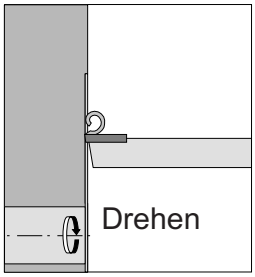
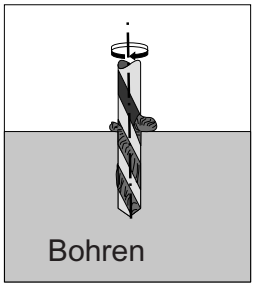
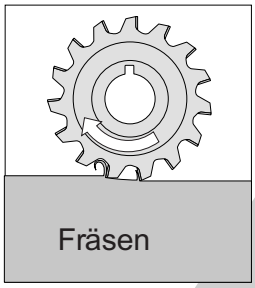
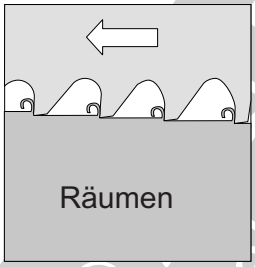
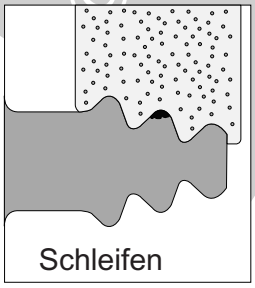
Eine besondere Gefahr besteht, wenn sich Späne zwischen das Werkzeug und das Werkstück verklemmen. Es kommt zu einem heftigen Reibvorgang mit plastischer Oberflächenverformung und Überhitzungs-gefahr.

Funken *treten bei Hochgeschwindigkeitsbearbeitung mit Hartstoffschneide (CBN) auf. Häufigkeit und Helligkeit sind ein Indiz für die Heftigkeit des Zerspanungsvorgangs. Farbe und Helligkeit sowie die Dauer bis zum Verlöschen sind auch werkstoffspezifisch (z.B. lang glühende weiße Funken sind typisch für Titanlegierungen).*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.1-6

© Axel Rossmann - Turbocamp
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

	Problem/Schaden	Bild Nr. (Kapitel 17 und 18 siehe Band 4)
 Drehen	Überhitzung	12.2.1.1.2-63; Band 4: 12.2.2.2-7
	Grate, Kanten	Band 4: 18.2-2
	Spänestau	Band 4: 18.5-3
	Zugeigenspannungen	Band 4: 18.4-3; 18.4-5.0
	Rissbildung, Kommarisse	12.2.1.1-2
	Rattern, Rupfen	12.2.1.1.2-3.2; Band 4: 18.5-2
	Überlastung durch Spannkräfte	Band 4: 18.5-1
	Werkzeugbruch	Band 4: 18.5-5
	Parametereinfluss	12.2.1.1.2-2, -3.1, -4
 Bohren	Überhitzung	12.2.1.1.2-5 bis -10; Band 4: 18.5-3, 12.2.2.7-6
	Grate, Kanten	Band 4: 18.2-5
	Spänestau	12.2.1.1-5 bis -10; 12.2.1.1-2
	Zugeigenspannungen	Band 4: 18.4-12
	Werkzeugbruch	12.2.1.1.2-6
	Parametereinfluss	
	Kühl- und Schmiermittel	12.2.1.1.2-13, 12.2.1.1.2-14
	Prüfbarkeit	12.2.1.1.2-5, 12.2.1.1.2-9
 Fräsen	Überhitzung	
	Grate, Kanten	
	Zugeigenspannungen	12.2.1.1.1-8.2; 12.2.1.1.1-3.1,
	Rattern, Rupfen	12.2.1.1.2-3.2, Band 4: 18.4-13, 18.5-2,
	Funkenbildung	
	Parametereinfluss	Offene Felder für Ergänzungen frei gelassen
 Räumen	Grate, Kanten	Band 4: 18.2-6; 18.2-8
	Zugeigenspannungen	
	Rattern, Rupfen	12.2.1.1.2-4, Band 4: 18.5-2
	Funkenbildung	12.2.1.1.1-8.2; Band 4: 18.6-2
	Parmetereinfluss	
 Schleifen	Überhitzung	12.2.1.1.1-5; 12.2.1.1.1-8.2
	Rissbildung	12.2.1.1.1-5; 12.2.1.1.1-8.2
	Grate, Kanten	Band 4: 18.2-1
	Zugeigenspannungen	12.2.1.1.1-4, Bd 4 18.2-3
	Rattern	12.2.1.1.1-3, 12.2.1.1.2-3.1
	Funkenbildung	Band 4: 18.6-1, 18.6-2;
	Parmetereinfluss	Bdand 4: 18.6-5
	Kühlmittel	12.2.1.1.2-13, 12.2.1.1.2-14

© Prof. Rossmann - Turbocontrolt
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 12.2.1.1-1.1

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

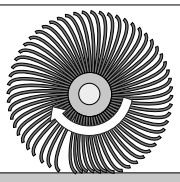
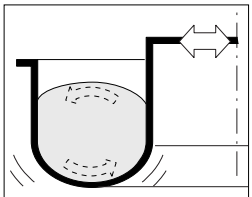
Kapitel 17 und 18 siehe Band 4	Problem/Schaden	Bild Nr.
 Bürsten, Bandschleifen	Überhitzung Grate, Kanten Zugeigenspannungen Parametereinfluss Schleifkorneinfluss/Reaktionen Funken	12.2.1.1.1-8.2 Band 4: 18.2-8 12.2.1.1.1-8.2 12.2.1.1.1-6; Bd 3.2 12.2.2.3-8 Band 4: 18.6-5
 Vibrations-schleifen	Beschädigungen Schleifflüssigkeit Parametereinflüsse	12.2.1.1.1-7

Bild 12.2.1.1-1.2

Offene Felder für Ergänzungen frei gelassen

Fortsetzung von Seite 12.2.1.1-4

Gratbildung *kann sowohl an Kanten am Werkzeugeintritt des Werkstücks als auch am Austritt (Bohrer, Fräser) auftreten. Grate sind gefährliche Schwachstellen (Band 4, Kapitel 18.2).*

Vibrationen von Werkzeug und Werkstück wie Rattern und Rupfen (Band 4, Kapitel 18.5).

Das ***Abstumpfen*** *von* ***Werkzeugschneiden*** *ist für jeden Zerspanungsvorgang ein Thema. Es gilt sowohl für definierte Schneiden als auch für undefinierte. Hier werden die notwendigen Kanten des (Schneid-) Korns abgeflacht. Bei Schleifvorgängen kommt noch ein Zusetzen der für den Spanabtransport notwendigen Porosität dazu. Das führt wegen der verschlechterten Kühlung und der Schneidwirkung zum „Schmieren“ mit großer Reibungswärme und ‘Oberflächenstress’.*

Eine Besonderheit ist der Einfluss des ***Schneidenwerkstoffs****. Es ist damit zu rechnen, dass ausbrechende Partikel, zB. Siliziumkarbid (SiC) in der Bearbeitungsfläche stecken bleiben. Damit reagieren Ni-Legierungen bei ausreichend hohen Temperaturen (z.B. nachfolgende* ***Wärmebehandlung****,* ***Hochtemperaturlöten****,* ***Elektronenstrahlschweißen****) oder der entsprechenden Betriebstemperatur. Es entstehen spröde Phasen als Anrissstellen bei Schwingbeanspruchung.*

Dem ***Kühlschmierstoff*** *(KSS) ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die Auswahl muss schädigende* ***Reaktionen mit dem Werkstoff des Werkstücks*** *(Bild 12.2.1.1.2-14) berücksichtigen. Das gilt z.B. für Titanlegierungen bei denen durch Cl-haltige Medien Spannungsrisskorrosion auftreten kann.*

© Prof. Rossmann - Turboconsult
Ausbildungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 12.2.1.1-2: *Es handelt sich um eine* ***Zusammenstellung typischer Effekte in einer spanend hergestellten Bearbeitungsoberfläche*** *(Lit. 12.2.1.1-14).*

„A“ Eigenspannungen: *Bei jeder Zerspanung ist mit plastischen Verformungen, zumindest im Mikrobereich und deshalb mit der Entstehung von Eigenspannungen zu rechnen (Kapitel 12.2.2.4). Deren Größe und Art (Zug oder Druck) und damit der Einfluss auf die Bauteileigenschaften hängen sehr sensibel von den Zerspanungsparametern, der Geometrie und dem Zustand der Werkzeugschneide ab. Grundsätzlich gilt: Zugspannnungen mindern die Schwingfestigkeit und erhöhen das Risiko einer Risskorrosion (Band 4, Bild 18.3-15) und von Lötrissigkeit (Band 4, Bild 18.3-12).*

„B“ Festigkeits- und Härteänderung als folgen einer Gefügeveränderung *(Bild 12.2.1.1-3.1): Die Wärme aus dem Zerspanungsvorgang kann die Oberfläche schädigend aufheizen. Wenn z.B. ein Bohrer „blau“ wird (Band 4, Bild 18.5-3 und Band 4) ist dies ein deutlicher Hinweis, dass auch die Bearbeitungsfläche, d.h. die Bohrungswand gefährlich überhitzt wurde. Die Aufheizung wird von vielen Prozessparametern und den physikalischen Eigenschaften des Werkstücks beeinflusst. Darüber hinaus hängt der „Wärmehaushalt“ des Schneidvorgangs entscheidend von der Zuführung und den Eigenschaften des Schneid- und Kühlmittels ab. Gehärtete bzw. vergütete Stähle erleiden beim Überschreiten der Anlasstemperatur einen Härteabfall. Wird bei aushärtbaren Legierungen wie Nickellegierungen die Lösungsglühtemperatur überschritten, geht die, die Warmfestigkeit bestimmende, Aushärtungsphase (γ'-Phase) mit zunehmender Temperatur und Zeit in Lösung.*

„C“ Rissbildung: *Diese entsteht, wenn die Schnittkräfte den Werkstoff mechanisch überlasten. Ni-Basis Schmiedelegierungen wie Waspaloy kennen sog. „**Kommarisse**“. Es handelt sich um transkristalline Gewaltrisse die auf ein Korn beschränkt sind. Ähnliche Risse können im Zusammenhang mit Rattermarken entstehen (Band 4, Bild 18.5-2). Besonders gefährliche Gewaltanrisse können beim Anstreifen von Werkzeughaltern entstehen (Bild 12.2.1.1-3.1)*
Eine andere Form der Rissbildung sind sog. Warm- oder Heißrisse (Bild 11.1-8 und Band 4, Bild 18.7-6). Diese entstehen bei hohen Temperaturen die bereits eine ausreichende Erweichung der Korngrenzen auslösen, sodass Wärmespannungen und/oder Schnittkräfte zu interkristallinen Rissen führen. Typisches Beispiel sind Schleifrisse in Superlegierungen.

„D“ Nachweisverschlechterung infolge mechanischem Schließen von Fehlstellen und Rissen: *Fehlstellen wie Risse und Poren können durch den Zerspanungsvorgang im Oberflächenbereich zugedrückt werden (Band 4, Bild 17.3.1-4). Diesen Effekt kann man besonders ausgeprägt beim Schleifen beobachten. Hier werden zuvor entstandene Schleifrisse so geschlossen, dass eine Eindringprüfung kein befriedigendes Ergebnis ermöglicht. Zur Öffnung der Risse wird dann ein Wärmebehandlungszyklus notwendig (Band 4, Bild 17.3.1-7).*

„E“ Gefügeveränderung, ausgelöst von plastischer Verformung und Erwärmung *(Lit 12.2.3-5, Bild 12.2.1.1-3.1): Extreme plastische Verformung führt zu schlecht anätzbaren, bei martensitischen Stählen meist spröden Gefügezuständen, sog. „**White-etching Layer**“.* ***Man spricht auch von „White Etching Areas“ (weiße Schichten) wobei Effekte wie „Butter Fly-Bildung“*** *(Lit. 12.2.1.1-17) gemeint sein können.* ***Dagegen sind dünnste (µm-Bereich), schlecht anätzbare, weiche Schichten auf Zerspanungsflächen meist unvermeidbar und nicht zwangsläufig schädigend****. Die Schnittrichtung lässt sich bei stark drückenden Werkzeugschneiden an einer ausgeprägten „**Faserkrümmung**“ in Oberflächennähe er-*

© Axel Bossmann - Turbomaschinen - Lehrunterlagen nur zum Lehrgebrauch

*kennen. Ob diese negativ zu beurteilen ist, hängt von den beim Verformungsvorgang eingebrachten Eigenspannungen ab. Zugspannungen senken die Schwingfestigkeit. Hohe Temperaturen beim Bearbeitungsvorgang können, wie bereits unter „**H**“ beschrieben, das Gefüge unerwünscht verändern.*

***„F“ Kerben:** Eine Zerspanung kann Kerben in Form von Bearbeitungsriefen (Band 4, Bild 18.1-5 und Bild 18.1-6, Lit 12.2.3.1.1-15 und Lit 12.2.3.1.1-16) und Rattermarken (Band 4, Bild 18.5-2) erzeugen, die als Schwingbruchausgänge dienen. Eine weitere Schädigung von Ni-Basis- Werkstoffen ist das Ausbrechen ausgeprägter Karbide beim Zerspanungsvorgang. Damit entstehen merkliche Kerben.*

***„G“ Werkzeugbruch** kann eine gefährliche Schädigung darstellen (Band 4, Bild 18.5-5). Das gilt auch, wenn Reste der ausgebrochenen Werkzeugschneide in der Oberfläche verbleiben.*

***„H“ Eingedrückte Späne** können als Kerben wirken. Dazu verwandt sind Aufschmierungen, die eine extreme Oberflächenverfestigung („**E**“) und Überhitzung mit Festigkeitsabfall („**B**“) erzeugen (Band 4, Bild 18.5-3).*

***„I“ Aufschmieren von Fremdmetall** kann auf unterschiedliche Weise beim Zerspanungsvorgang erfolgen. Denkbar ist Abrieb von Vorrichtungen (Bild 12.2.1.1-3.1, Band 4, Bild 18.3-1) oder niedrig schmelzenden metallischen Eingussmassen (Band 4, Bild 18.5-1). Solche Verunreinigungen können auf unterschiedliche Weise schadenswirksam werden, z.B. durch Elementbildung oder Lötrissigkeit (Band 4, Kapitel 18.3 und Bild 18.7-3 und Band 1 Bild 5.3-6).*

***„K“ Verunreinigungen** die im Ablauf des Fertigungsprozesses zwangsläufig auf die zerspante Bauteiloberfläche gelangen, sind Kühl- und Schneidstoffe. Silikonöle, die zur Unterdrückung der Schaumbildung dienen, können die Benetzbarkeit der zerspanten Bauteile und durch Verschleppung (Band 4), anderer Bauteile bedenklich verschlechtern. Dadurch wird die Wirksamkeit der Eindringprüfung in Frage gestellt. Die Folge ist eine Verunsicherung die erfahrungsgemäß einen umfangreichen Reinigungsaufwand mit hohen Kosten auslöst.*
*Aggressive Verunreinigungen durch **Ätz- und Reinigungsbäder** können bei nachfolgenden **Wärmebehandlungen** unzulässig starke Oxidation und/oder selektive Korrosion (z.B. interkristalliner Angriff) entstehen lassen (Bild 12.2.1.7-3).*

© Axel Bossmann - Turbocoach
Lehrmaterialunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

Einflüsse zerspanender Bearbeitung auf die Bauteiloberfläche.

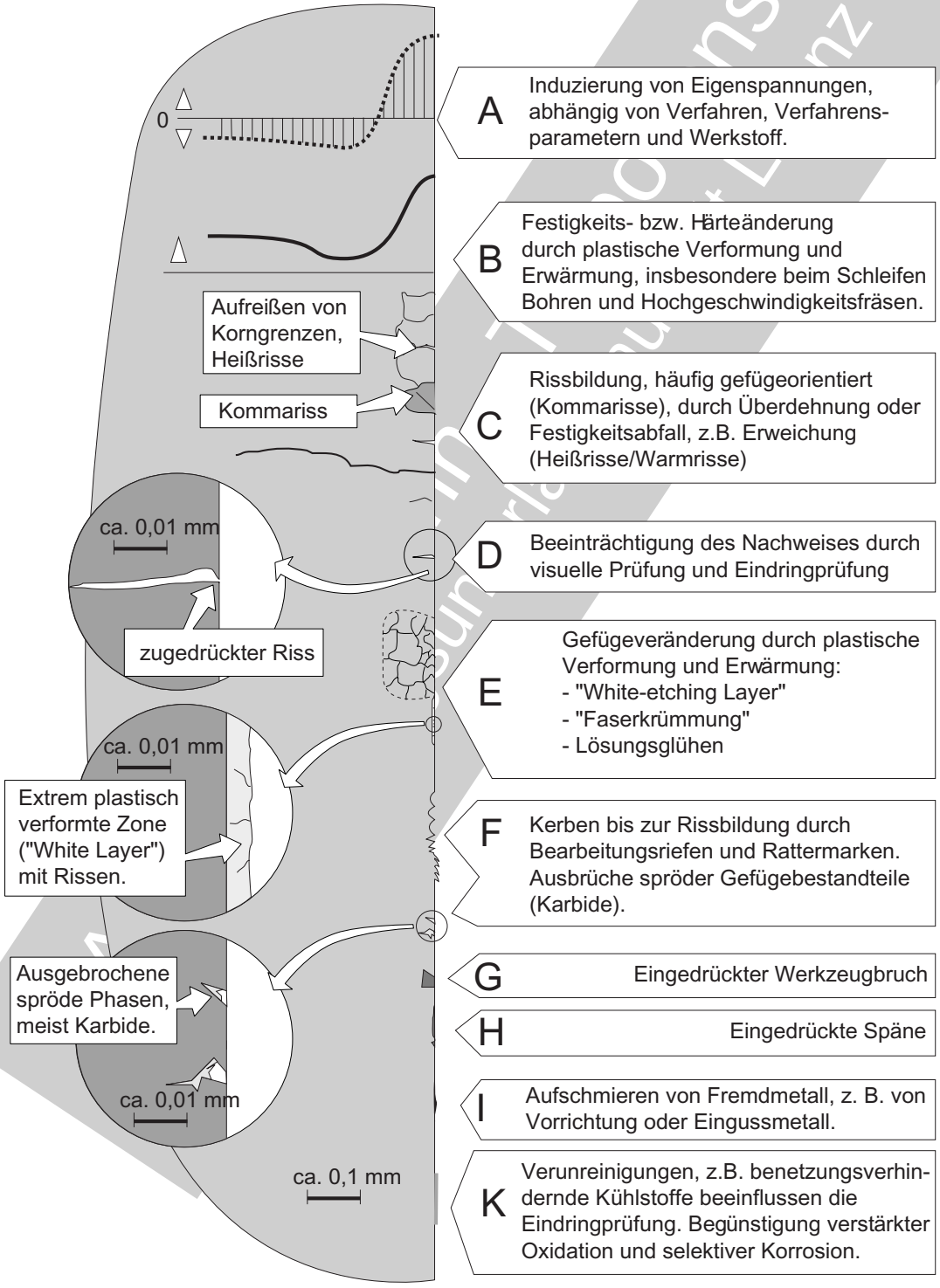


Bild 12.2.1.1-2

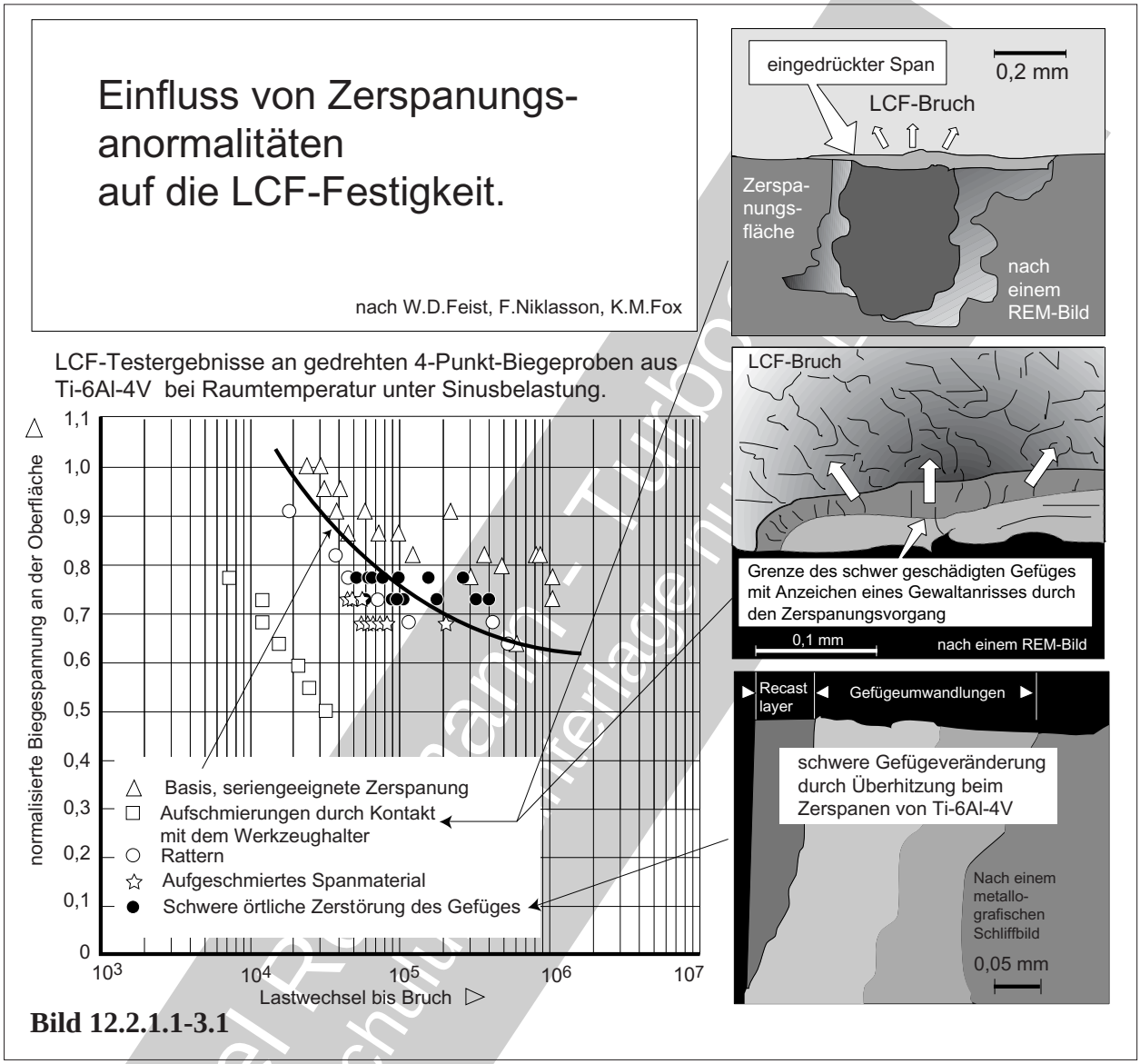


Bild 12.2.1.1-3.1

Bild 12.2.1.1-3.1 *(Lit. 12.2.1.1-29): Während der Zerspanung kann die Oberfläche auf unterschiedliche Weise geschädigt werden. Die Auswirkungen der wichtigsten Schädigungsarten (Bild 12.2.1.1-2) auf die LCF-Festigkeit und damit auf die zyklische Lebensdauer von Rotorkomponenten (Scheiben und Ringe) zeigt das Diagramm. Den gravierendsten Einfluss haben offenbar* ***Aufschmierungen und rissartige Schädigungen*** *durch örtliche mechanische Überlastung (mittlere Skizze) beim* ***Kontakt mit dem Werkzeughalter*** *(Band 4, Bild 18.5-4). Hierzu gehören auch Aufheizungen mit örtlichen Anschmelzungen (recast layer, Skizze unten) die sich bei dem Anstreifvorgang bilden. Danach folgen eingedrückte Späne (Skizze oben, Band 4, Bild 18.5-3) und der Einfluss deutlicher Gefügeveränderungen.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

Beeinflussung einer spanend bearbeiteten Oberfläche im metallografischen Schliff.

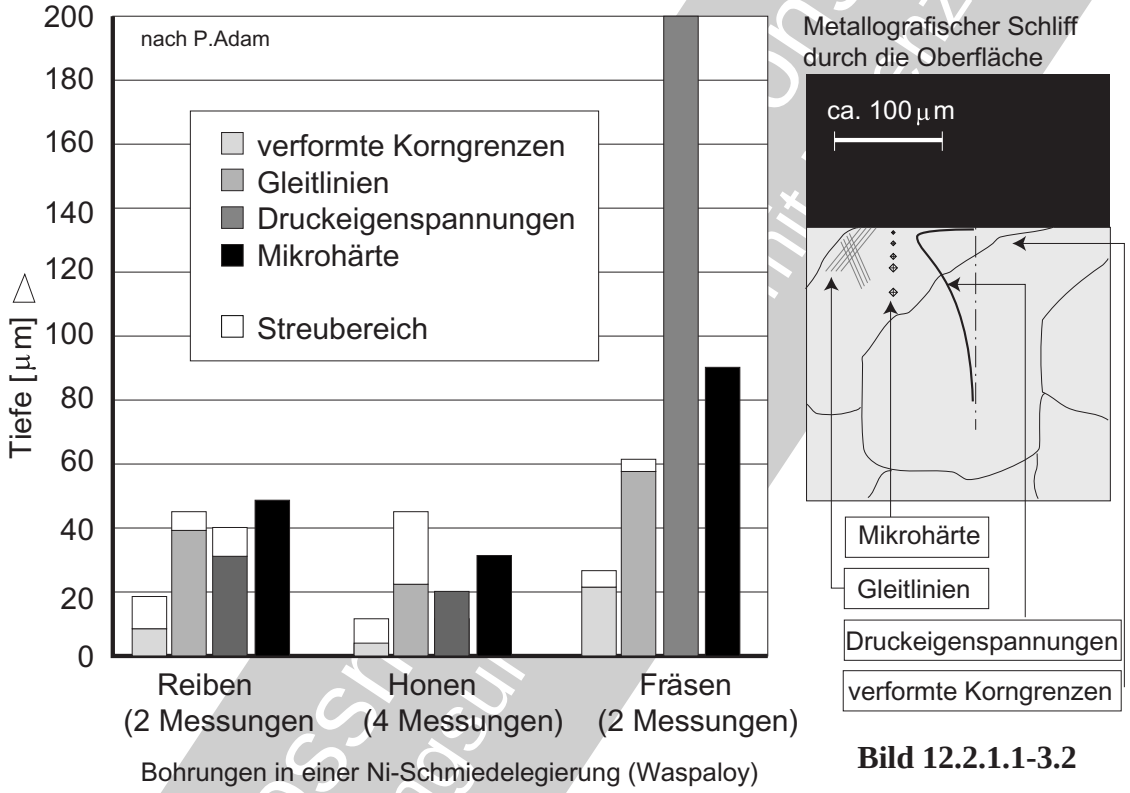


Bild 12.2.1.1-3.2

Bild 12.2.1.1-3.2 *(Lit. 12.2.1.1-1): Das Beispiel von* ***Bohrungen in einem Scheibenwerkstoff*** *aus einer Ni-Schmiedelegierung gibt ein Gefühl für die Beeinflussung der bearbeiteten Oberfläche. Natürlich hängen diese Veränderungen außer von den Zerspanungsparametern auch entscheidend von den Werkstoffeigenschaften ab. Dabei spielen z.B. die Verfestigungsneigung, das Gefüge und die Kristallstruktur eine wichtige Rolle.*

In erster Linie handelt es sich um vier Effekte. Die ***Korngrenzenverformung*** *zeichnet sich durch eine Verbiegung in Bearbeitungsrichtung auf Grund einer merklichen plastischen Verformung aus (Detail rechts).*

Gleitlinien *werden von eng benachbarten parallel orientierten Linienfeldern gekennzeichnet. Sie entstehen durch das Abgleiten des Werkstoffs auf den Gleitebenen der Kristalle bei einer plastischen Verformung.*

Druckeigenspannungen *bilden sich auf Grund der unterschiedlichen plastischen Verformung im Abstand von der Oberfläche. Sie fallen verständlicherweise nach innen schnell ab. Man erkennt, dass beim (Zirkular-) Fräsen die Druckeigenspannungen unter den angewandten Zerspanungsparametern besonders tief wirken. Sie reichen deutlich über die Gefügemerkmale hinaus.*

Die ***Veränderung der Mikrohärte*** *ist auf eine Kaltverfestigung infolge der plastischen Verformung zurückzuführen. Entsprechend dem Verformungsverlauf ist mit dem Anstieg der Mikrohärte in Richtung zur Oberfläche zu rechnen.*

Es lässt sich also über die erkennbaren Gefügeveränderungen im ***metallografischen Schliff*** *und umgekehrt nicht unbedingt auf die Tiefe der Druckspannungen und einer Härteänderung rückschließen.*

Literatur zu Kapitel 12.2.1.1

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.1-1 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 61, 63, 104, 240.

12.2.1.1-2 „Machining Titanium & Its Alloys“, ASM international, www.supraalloys.com/Machining_titanium.htm, 1.04.2004.

12.2.1.1-3 ASM Handbook Vol.5 „Surface Engineering“ , ASM International, ISBN 0-871170-377-7, 1999, Seite 120, 144.

12.2.1.1-4 H.Kloos, „Eigenspannungen, Definition und Entstehungsursachen“, Zeitschrift „Werkstofftechnik“, 10.Jahrgang, September 1979, Heft 9, Seite 293-332.

12.2.1.1-5 ASM Handbook Vol.16 „Machining“ , ASM International, ISBN 0-871170-007-7, 1999, Seite 29-32, „Cutting Fluids“, Seite 40, 159, 327.

12.2.1.1-6 E.Schreiber, „Die Eigenspannungsausbildung beim Schleifen gehärteten Stahls“, Zeitschrift „Härtereitechnische Mitteilungen“, 28 (1973), Heft 3.

12.2.1.1-7 E.Schreiber, „Härterisse und Schleifrisse -Ursachen und Auswirkungen von Eigenspannungen (Teil 1)“, Zeitschrift „ZwF“ 71 10 (1976),Seite 460-465.

12.2.1.1-8 E.Schreiber, „Härterisse und Schleifrisse -Ursachen und Auswirkungen von Eigenspannungen (Teil 2)“, Zeitschrift „ZwF“ 71 12 (1976),Seite 565-570.

12.2.1.1-9 „GE Inspecting CF6-50 Disk Fragments“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, April 5, 1982, Seite 33.

12.2.1.1-10 „A300 Damaged by Engine Fire“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, March 29, 1982, Seite 33.

12.2.1.1-11 „Cracked disc caused CF6 turbine failure“, Zeitschrift „Flight International“, 17 April, 1982, Seite 1005.

12.2.1.1-12 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 Failures“, Seite 299 und 300.

12.2.1.1-13 Investigation Report B/921/1032, „Boeing 727-277 VH-ANA...“, 4. July 1992, Seite 1-20.

12.2.1.1-14 M. Field, J.F. Kahles, „Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheit bearbeiteter Werkstücke, ‘Surface Integrity’ “, Zeitschrift „Fertigung“, Ausgabe 5/72, Seite 145-156.

12.2.1.1-15 „JT8D Inspection Ordered by FAA“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, July 21, 1980, Seite 23. “ .

12.2.1.1-16 Airworthiness Directive AD/JT8D/17„Eighth Stage Rear Compressor Front Hub“, 9 /80, Civil Aviation Authority, Australia, 1998 .

12.2.1.1-17 Metals Handbook Ninth Edition „Vol.9 Metallography and Microstructures“ , ASM International, ISBN 0-871170-007-7, 1988, Seite 19.

12.2.1.1-18 „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.

12.2.1.1-19 Airworthiness Directive AD/CFM56/9, „HPTR Fan Disk Inspection“, 2/98, Civil Aviation Authority, Australia, 1998 .

12.2.1.1-20 „Titanium Design and Fabrication Handbook for Industrial Applications“ Titanium Metals Corporation (TIMET), www.timet.com/fab-p34.htm.

12.2.1.1-21 W.Klose, „Kühlschmiermittel auf Metalloberflächen“, Zeitschrift „Oberflächentechnik“, 86 (1995) Nr. 6, Seite 1876-1882.

12.2.1.1-22 W.Lehmann, „Wassermischbare Flüssigkeiten für das Bearbeiten von Metallen“, Zeitschrift „Technische Rundschau“ Nr. 23, 1. Juni 1976, Seite 112.

12.2.1.1-23 R.Völler, „Einflüsse des Kühlschmierstoffs beim Normal- und Hochgeschwindigkeitsschleifen“, Zeitschrift „Schmiertechnik und Tribologie“ 21. Jahrgang Nr. 4, 1974, Seite 75-79.

12.2.1.1-24 J.Maranchik Jr. „Machining Data for Titanium Alloys“,

12.2.1.1-25 ASM Handbook Vol. 4 „Heat Treatment“ , ASM International, ISBN 0-871170-379-3, 2001, Seite 919, 920.

12.2.1.1-26 K.Schjold, S.Schmid, „Fabrikation und Qualitätssicherung bei Schaufeln axialer Turbomaschinen“, Zeitschrift „Technische Rundschau Sulzer“, 2/1977, Seite 61-68.

12.2.1.1-27 H.Bonk, „Brand- und Explosionsschutzkonzepte bei der Magnesiumbearbeitung“, www-isf.maschinenbau.uni-dortmund.de, 28. Juli 2005. Seite 1-9.

© Axel Kossmann - Turboconsult
Alle Schutzrechte nur mit Lizenz

12.2.1.1-28 T.Giglio, „Titan in der Prothesentechnik“, Zeitschrift „Orthopädie-Technik“ 5/96, Seite 372-375.

12.2.1.1-29 W.D.Feist, F.Nillasson, K.M.Fox „The Influence of Manufacturing Anomalies on Fatigue Performance of Critical Rotating Parts in Aero-engine“, MANHIRP-Project, EC-Contract G4RD-CT2000-00400 5 GROWTH, 2002.

12.2.1.1-30 H.Schlicht, „Über die Entstehung von White Etching Areas (WEA) in Wälzelementen“, Zeitschrift „HTM (Härtereitechnische Mitteilungen)“ Nr. 29 (1973) Heft 2, Seite 112-123.

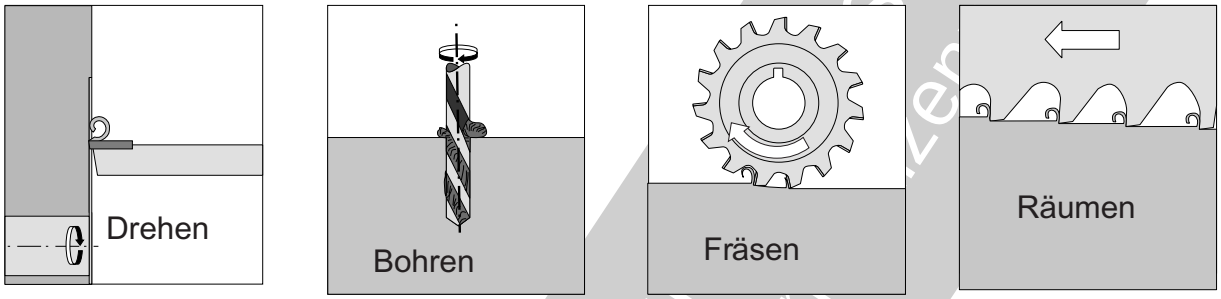
12.2.1.1-31 E.Just, „Mikrobielle Gefährdung von Kühlschmierstoffen“, Zeitschrift „Tribologie + Schmierungstechnik“, 30. Jahrgang, Heft 4/1983, Seite 202-204.

12.2.1.1-32 National Transportation Safety Board (NTSB), Report number MIA99FA252 „Uncontained engine failure, Boeing 737-300, September 12, 1999“, Seite 1-6.

12.2.1.1-33 J. Hall, National Transportation Safety Board (NTSB), Safety Recommendation February 25, 1998, „Reply refer to: A-98-25 and -26“, Seite 1-4.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.1.2 Drehen, Fräsen, Bohren und Räumen.



Drehen, Fräsen, Bohren und Räumen werden im Gegensatz zum Schleifen **Zerspanungsverfahren mit definierter Schneide** zugeordnet. Sie haben verfahrenstypische **Probleme** und **Schäden**.

Abgesehen von **Maßabweichungen** durch **elastische Verformungen** des Werkstücks und/oder von Werkzeug/Maschine sowie **Werkzeugverschleiß** gibt es eine Vielzahl Effekte (Bild 12.2.1.1.2-1, Bild 12.2.1.1.2-2 und Bild 12.2.1.1.2-3.2 und 12.2.1.1.2-4), die häufig sowohl dem **Konstrukteur** als auch der '**Fertigung**' und der **Qualitätskontrolle nicht bewusst** sind. Auch wird man in Standardwerken der Maschinenelemente und Fertigungstechnik danach vergebens suchen. Sind doch die Probleme erfahrungsbasiert, bauteilspezifisch und damit auch **Know How** bzw. **Know Why** und damit ein **Wettbewerbsvorteil**. Dieses Kapitel soll den Informationsmangel beheben.

Ein besonderes, maschinenspezifisches Problem sind **Vibrationen/Schwingungen** ('Rattern') welche die **Oberflächenrauigkeit/Topografie** der Zerspanungsfläche unzulässig beeinflussen. Sie können so heftig sein, dass der Zerspanungsvorgang **Maschine, Werkzeug** und **Werkstück** überbeansprucht (Bild 12.2.1.1.2-4).

In einem Beispiel werden die Folgen eines Zerspanungsproblems (Bohren, Bild 12.2.1.1.2-5 bis Bild 12.2.1.1.2-10) dargestellt. Es zeigt eindringlich den Stellenwert eines **stabilen Zerspanungsprozesses**. Dieser gilt für die Zerspanungsparameter genauso wie für die Verwendung erprobter Maschinen, Werkzeuge und Hilfsstoffe die für die **Bauteile der Betriebserprobung** verwendet wurden.

Einen leicht zu unterschätzenden Einfluss haben **Kühlschmierstoffe** (KSS, Kapitel 12.2.1.1.2.1). Sie bestimmen nicht zuletzt die optimalen Zerspanungsparameter der **Fertigungserprobung**. Ändert sich der KSS, unbewusst (Produktänderung ohne Info) oder bewusst (Kostenminimierung), kann dies unzulässige **Eigenschaftsänderungen** des Werkstücks/Bauteils zur Folge haben. Neben dem Einfluss auf die Zerspanung ist beim KSS auch auf **nachfolgende Fertigungsschritte** zu achten. So ist für hochfeste Titanlegierungen bei chlorhaltigem KSS mit SpRK während einer Erwärmung (Wärmebehandlung, Schweißen, Bild 12.2.1.7-18 und Band 1 Bild 5.6.1.1-5 und Bild 5.6.3.1.1-7) zu rechnen. Unbemerkte Abweichungen sind in der **Serienproduktion** besonders gefährlich, wenn sie sich erst in **Betriebsschäden** zeigen (z.B. Schwingermüdung). Auf ein eher unangenehmes Problem der KSS sei noch verwiesen. Es handelt sich um die Gefahr einer **Veränderung durch Bakterien** und **Pilze** (Beispiel 12.2.1.1.2-1). Dies ist nicht nur ein **Gesundheitsthema** (Bild 12.2.1.1.2-17). Es kann den Tausch großer KSS-Mengen mit entsprechenden Kosten erzwingen. Hier sind auch geeignete hygienische Vorkehrungen zu treffen.

© Axel Rossmann - Tum Consult als Sammelurteilsgutachten nur mit Zustimmung

Abschließend sei noch die **Brandgefahr ölbasierter KSS** für schwer zerspanbare Werkstoffe wie Ti- und Ni-Legierungen erwähnt. Die feine Zerstäubung beim Zerspanungsprozess kann, ausgelöst von Funken oder Aufheizung der Werkzeugschneide, zur explosionsartigen Entzündung des KSS-Nebels führen (Bild 12.2.1.1.2-15). Dagegen sind Vorkehrungen mit einer **Löschanlage** zu treffen.

Gerade bei der Zerspanung kann der **erfahrene Werker an der Maschine** einen wichtigen Beitrag zur **Qualitätssicherung** leisten (Bild 12.2.1.1.2-13). **Beobachtungen während der Zerspanung** können auf Abweichungen von der erprobten Technik schließen lassen (z.B. Spanbildung). Solche Veränderungen sind später mit seriengeeigneten zerstörungsfreien Prüfmethoden in der Qualitätskontrolle nicht mehr mit ausreichender Sicherheit nachweisbar.

Bild 12.2.1.1.2-1 *(Fortsetzung in Bild 12.2.1.1.2-2 und Bild 12.2.1.1.2-3.1, - 3.2): Die in den Bildern zusammengestellten* ***Schäden und Probleme des Zerspanens*** *mit definierter Schneide sollen* ***Konstruktion***, ***Fertigung*** *und* ***Qualitätssicherung*** *die* ***Herausforderungen*** *bewusst machen. In vielen Fällen können in der Konstruktion bereits vor der Fertigung durch Gestaltung des Bauteils, Auswahl der Verfahren und Abläufe sowie Zeichnungsangaben* ***Risiken minimiert werden****. Das gilt auch für den späteren Betrieb. Die Reihenfolge der Betrachtungen spiegelt hier nicht Wichtigkeit und Sicherheitsrelevanz wieder.*

*„**A**“* ***Schwingermüdung*** *(Band 4, Bild 18.5-7.1, Band 1 Bild 5.4-7.1): Ist sicher im Zusammenhang mit* ***‘Rattern’*** *(Bild 12.2.1.1.2- 3„**L**“ und Bild 12.2.1.1.2-4) zu sehen. Es bedarf für diese hochfrequente, fremderregte Schwingung jedoch vergleichsweise* ***geringer Kräfte****. Die* ***Anregung*** *kann an einem* ***anderen Ort*** *des Werkstücks erfolgen, als dort wo die Schwingermüdung erfolgt. Ein Beispiel ist die integral beschaufelte Scheibe (Blisk) einer Turbomaschine. Sie bildet mit den filigranen Schaufeln ein nahezu ungedämpftes Gebilde. So können* ***hochfrequente Schwingungen*** *auch höherer Ordnung* ***in Sekunden*** *einzelne Schaufeln (Einfluss der Verstimmung, engl. mistuning, Band 4, Bild 18.9-3 und Bild 18.9-13)* ***geschädigt*** *werden. Das ist bei* ***Makrorissen*** *zerstörungsfrei nachweisbar. Nicht nachweisbar und damit eher gefährlicher ist eine* ***Ermüdung ohne Makroriss*** *(Band 1 Bild 5.4-2).*

*„**B**“* ***Kontakt mit dem Werkzeughalter*** *(Band 4, Bild 18.5-4): Dabei kann das Werkstück auf zweifache Weise geschädigt werden. Einmal durch eine heftige Schwingbeanspruchung, jedoch* ***nicht unmittelbar an der Kontaktstelle****. So ist denkbar, dass bei der Berührung der Spitze eines auskragenden Ansatzes des Werkstücks (z.B. eines Schaufelblattes) dessen* ***Grundbiegeschwingung*** *angeregt wird. Damit wird der* ***Übergang in den massiveren Querschnitt*** *besonders schwingbelastet. Zum anderen kann die* ***Reibstelle*** *selbst durch* ***Überhitzung*** *geschädigt werden.*

*„**C**“* ***Spänestau*** *(Band 4, Bild 18.5-3) hat das Potenzial einer kaum nachweisbaren Bauteilschädigung, insbesondere wenn ein feiner ‘Schlichtspan’ folgte. Es bedarf des* ***Hinweises des Werkers*** *vor Ort* ***der den Zerspanungsvorgang beobachtet*** *(Bild 12.2.1.1.2-13).* ***Eingedrückte*** *oder* ***reibverschweißte Späne*** *(Fressen, Band 1 Kapitel 5.9.2) wirken als Gefügekerben (Band 1 Bild 5.4.4-1). Die örtliche Erwärmung und plastischen Verformungen können mit Zugeigenspannungen die* ***Schwingfestigkeit*** *unzulässig herabsetzen. Ein Nachweis ist bei ausreichend Erfahrung mit Hilfe einer* ***Makroätzung*** *(ähnlich einer Seigerung) und/ oder der* ***Wirbelstromprüfung*** *(Band 4, Bild 17.3.1-3.1 und Bild 17.3.1-4) möglich.*

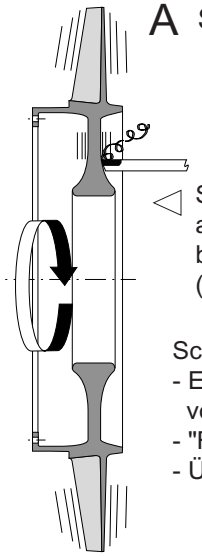
*„**D**“* ***Werkzeugverschleiß****: Damit muss immer gerechnet werden. Bei der Erprobung der Zerspanung bzw. deren Parameter steht die*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.1.2-4

© Axel Bossmann - Turbocoach
Abbildungsunterlagen nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

Direkte und indirekte Probleme und Schäden durch Zerspanung mit definierter Schneide (Drehen, Fräsen, Bohren).



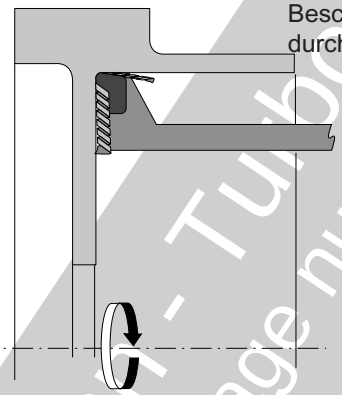
A Schwingermüdung

Schwingungs-anregung beim Drehen. ("Rattern")

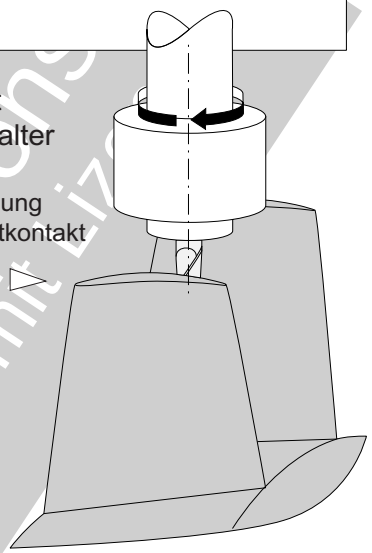
Schädigung:
- Eindrücken von Spänen,
- "Fressen",
- Überhitzung.

B 'Kontakt mit Werkzeughalter

C Spänestau (Reibung)

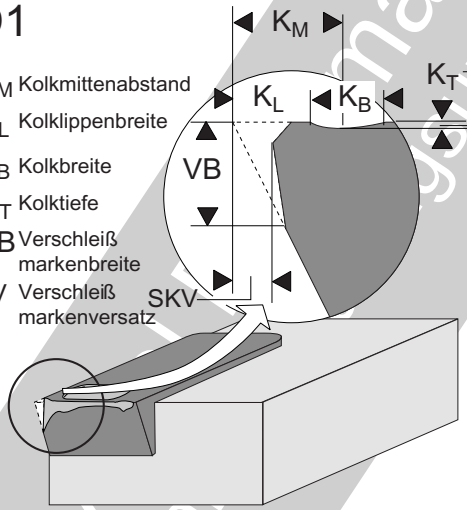


Beschädigung durch Gleitkontakt



D Werkzeug-verschleiß

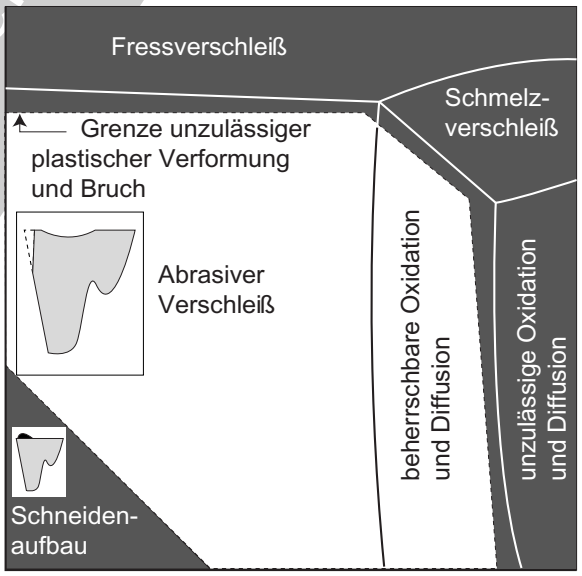
D1



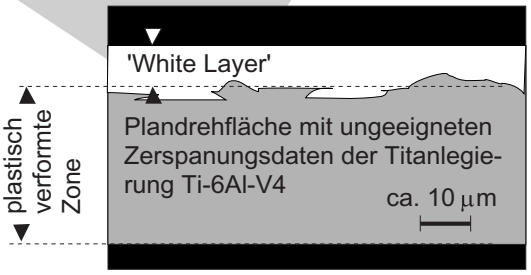
K_M Kolkmittenabstand
K_L Kolklippenbreite
K_B Kolkbreite
K_T Kolktiefe
VB Verschleißmarkenbreite
SKV Verschleißmarkenversatz

Verschleiß- und Betriebskarte nach Lit. 12.2.1.1.2-3 für Zerspanungswerkzeuge.

D2



E 'Weiße Randschicht' (engl. 'White Layer')



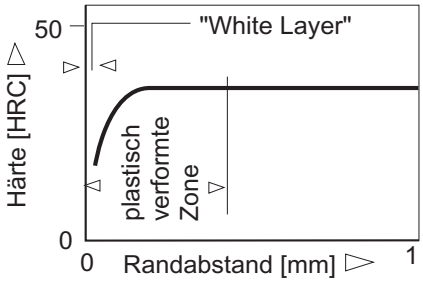


Bild 12.2.1.1.2-1

© Hanser - Turbocons
gültige Lizenz nur mit

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen Fräsen, Bohren

Fortsetzung von Seite 12.2.1.1.2-2

*Standzeit des Werkzeugs im Vordergrund. Sie bemisst sich am tolerierbaren Verschleiß. Dazu werden **Verschleißmaße** („**D1**“) festgelegt, die als Basis eines stabilen Prozesses strikt einzuhalten sind.*
*Der Werkzeugverschleiß (siehe auch „**F**“) hängt von einer Reihe Parameter der ‘**Betriebskarte**’ („**D2**“) ab. Nicht nur **von Schnittgeschwindigkeit** und **Zustellung**. Beispielsweise können diese nur für folgende Bedingungen gelten wie:*
- ***Werkstoff** des Werkstücks.*
- ***Steifigkeit der Werkzeugmaschine und des Werkstücks**: Schwingungen, Auslenkung.*
- ***Kühlschmierstoff** (KSS) in Art und Zuführung.*
- *Art des **Schneidstoffs** (Hartmetall, Hartstoff, Schnellstahl).*

*Wie aus der Betriebskarte erkennbar, wird der geeignete Betrieb mit dem **zulässigen Verschleiß** (weißes Feld) von unterschiedlichen, nicht tolerierbaren Veränderungen der Schnittkanten des Werkzeugs begrenzt. Dabei handelt es sich nicht nur um abrasiven Abtrag. Auch mit Veränderungen wie **Schneidenaufbau** (Kaltverschweißen), **Diffusion** und **Oxidation** ist zu rechnen.*

*„**E**“ ‘**Weiße Randschicht**’ findet man nahezu bei allen metallischen Konstruktionswerkstoffen, sowohl Schmiedematerial als auch Guss. Neben Stählen gehören dazu auch Titan- und Nickellegierungen. Dieser, im engl. als „White layer“ bezeichnete Effekt tritt sowohl bei spanender als auch nicht zerspanender Bearbeitung (Lit. 12.2.1.1.2-2) wie elektrochemischer (ECM) und Funkenerosion (EDM) auf. Die Bezeichnung beruht auf der schlechten Anätzbarkeit im metallografischen Schliff. Diese kann jedoch wie auch der ‘White layer’ auf unterschiedlichen Eigenschaften und Veränderungen beruhen:*
- *Starke **Kaltverformung** und **Verfestigung** mit Härteanstieg. Hierzu gehört das Phänomen des ‘**Reibmartensit**’ der sich bei intensiven Reibvorgängen an Stählen bildet.*
- ***Aufschmierungen** (Kaltverschweißen) von Spänen.*
- ***Gefügeveränderung** durch intensive Aufheizung. Sie kann durch **Neuhärtung** die Härte steigern oder durch **Anlassen** zumindest unter der Schicht die Härte abfallen lassen (‘Weichhaut’, Bild 12.2.1.1.1-1).*
- ***Wiedererstarrte** Zone (engl. ‘recast layer’, Bild 12.2.1.2-1 und Bild 12.2.1.2-4) durch **extreme Zerspanungsparameter** oder **elektrische Funken** (ECM). Diese Schichten zeichnet eine **extrem hohe Härte** aus. Es handelt sich um Karbide als Folge der Kohlenstoffaufnahme der Schmelze aus dem Dielektrikum. Eine Folge sind **Risse** durch die Erstarrungs- Zugeigenspannungen. All das führt zu einer intensiven Kerbwirkung mit entsprechend **katastrophalem Schwingfestigkeitsabfall**.*

*Um die **Art einer ‘Weißen Schicht’ zu identifizieren,** ist eine **metallografische Untersuchung** mit der Bestimmung der **Mikrohärte** erforderlich.*

***Bild 12.2.1.1.2-2** (Fortsetzung in Bild 12.2.1.1.2-1 und Bild 12.2.1.1.2-3.1, - 3.2).*

*„**F**“ **Schäden an Werkzeugschneiden**: In erster Linie handelt es sich um zwei Schadensarten. **Verschleiß** („**F1**“) und **Werkzeugbruch** („**F2**“).*
*Es lassen sich bestimmte **Verschleißmerkmale** erkennen. Sie treten in anwendungsspezifischer Ausprägung abhängig von der Werkzeugschneide, dem Kühlschneidmittel (KSS) und den Zerspanungsparametern auf. Die **Fachbezeichnungen** entsprechen sinngemäß der ‘USA- Literatur’ (Lit. 12.2.1.1.2-3). Die Definition der **Verschleißgrenzen** zeigt „**D1**“.*
***Werkzeugbruch** (Band 4,. Bild 18.5-5) ist ein Schaden der immer die **Verwendbarkeit des Werkstücks** in Frage stellt. Grundsätzlich sollte unmittelbar nach dem Auftreten von einem erfahrenen Fachmann die **Schädigung** und gegebenenfalls die Möglichkeit einer **Nacharbeit bewertet** werden (Band 4, Bild 17.5-1 und Bild 18.5-14).*

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

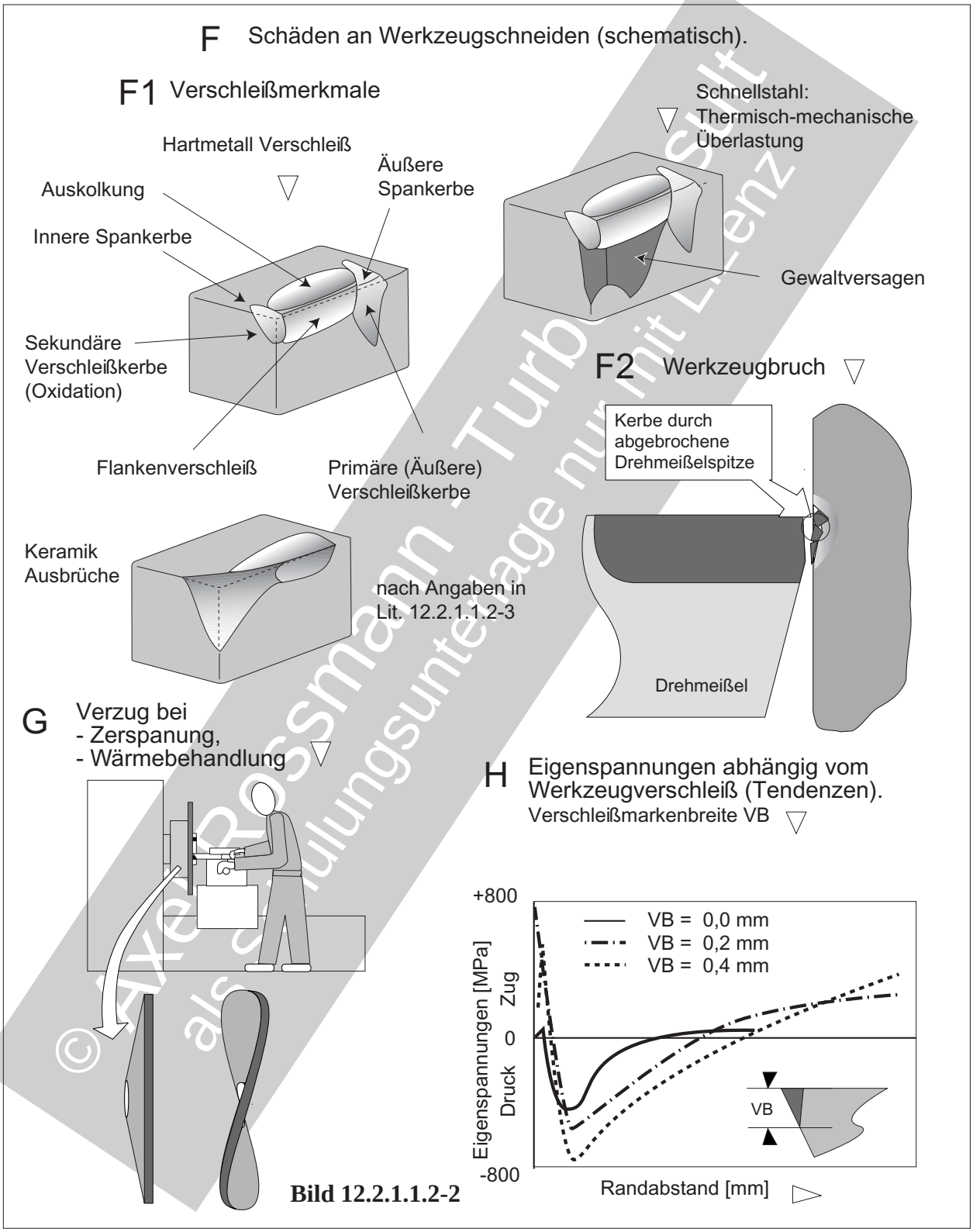


Bild 12.2.1.1.2-2

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Vorlesungsunterlage nur mit Lizenz

*„**G“ Verzug des Werkstücks** (Band 4, Bild 18.4-1): Gerade an Werkstücken aus härteren/ festeren Werkstoffen können durch die **Zerspanung induzierte Eigenspannugen** unzulässigen Verzug hervorrufen. Davon sind besonders **dünnwandige**, **einseitig bearbeitete Planflächen** betroffen („**H**“)..*

*„**H“ Eigenspannungen**: Durch plastische Verformungen der Bearbeitungsfläche als Folge*

*des Zerspanvorgangs der Werkzeugschneide werden **Eigenspannungen induziert**. Deren Verlauf **unterscheidet** sich deutlich von Eigenspannungen eines **Schleifprozesses** (Bild 12.2.1.1.1-1). Bei einer optimalen Zerspanung mit definierter Schneide handelt es sich um **Druckeigenspannungen,** welche im Betrieb die **Schwingfestigkeit** (Mittelspannungseinfluss) **erhöhen**. In dieselbe erwünschte Richtung geht eine gleichzeitige **Verfestigung der Oberfläche**. Nicht optimale Zerspanung mit **verschlissener Werkzeugschneide** erzeugt dagegen dicht an der Oberfläche erhebliche **Zugeigenspannungen** die kleine Ermüdungsanrisse im Betrieb begünstigen. Es ist also von großer Wichtigkeit, den Werkzeugverschleiß auf ein zulässiges Maß zu spezifizieren und zu überwachen. Problematisch wird es, wenn aus **Kostengründen** oder wegen mangelnder **Aufmerksamkeit** mit verschlissenem Werkzeug gearbeitet wird. Dies ist der Fall, wenn der Verschleiß über dem mit der Verfahrenserprobung **festgelegten Grenzverschleiß** liegt. Dann besteht kein stabiler Fertigungsprozess. Als Folge ist bei hochbeanspruchten Bauteilen, wie sie im **Leichtbau** typisch sind, mit einer erhöhten Ausfallrate im Betrieb zu rechnen. In diesem Fall können die Werkstücke **mangels einer sicheren Nacharbeit**, auch aus Maßgründen, nicht verwendet werden. Diese Situation verschärft sich, wenn Teile bereits verbaut sind und eine Identifikation nicht mehr möglich ist.*

***Bild 12.2.1.1.2-3.1** (Lit. 12.2.1.1.2-7 und Lit. 12.2.1.1.2-8): Diese schematische Darstellung der **Spanarten** (nicht zu verwechseln mit **Spanformen**) werden von der Geometrie bestimmt. Typisch sind Wirrspan, Bandspan, Wendelspan und Spiralspan (Lit. 12.2.1.1.2-11). Das Bild soll in erster Linie der Anschauung dienen. Die Spanart ist von vielen **Einflüssen** abhängig, die komplex zusammenwirken.*

- Art/Steifigkeit von Maschine und Werkzeug.
- Schnittgeschwindigkeit und Schnitttiefe.
- Material und Geometrie der Werkzeugschneide.

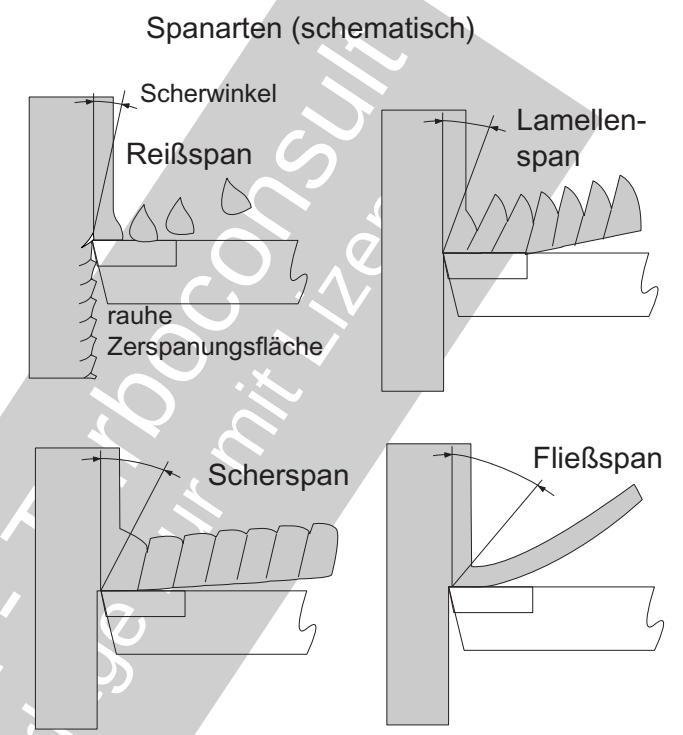


Bild 12.2.1.1.2-3.1

- Art der KSS-Zufuhr.
- Geometrie und Material des Werkstücks.
- Gegebenenfalls Beschichtungen.
- Gefüge und Eigenspannungen im Werkstück.

*Es bedarf also der **Erfahrung eines Praktikers** vor Ort, um signifikante **Veränderungen zu erkennen und zu bewerten**.*

***Bild 12.2.1.1.2-3.2** (Fortsetzung in Bild 12.2.1.1.2-1, Bild 12.2.1.1.2-2)*

*„**I**“ ‘**Mechanische**’ **Gefügeschädigungen**: Der Zerspanungsvorgang kann die Werkstückoberfläche mechanisch schädigen. Typisch sind transkristalline, auf ein Korn beschränkte, zur Oberfläche abgebogene Risse. Solche ‘**Kommarisse**’ (Bild 12.2.1.1-2) findet man an hochfesten austenitischen Legierungen.*
*Ein weiteres Problem bei Werkstoffen mit **ausgeprägten Karbiden** kann auftreten, wenn diese ganz oder teilweise **aus der Oberfläche gebrochen** werden.*

© Axel Bossmann - Turboconsult
nur als Sammelnutzungsrecht mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

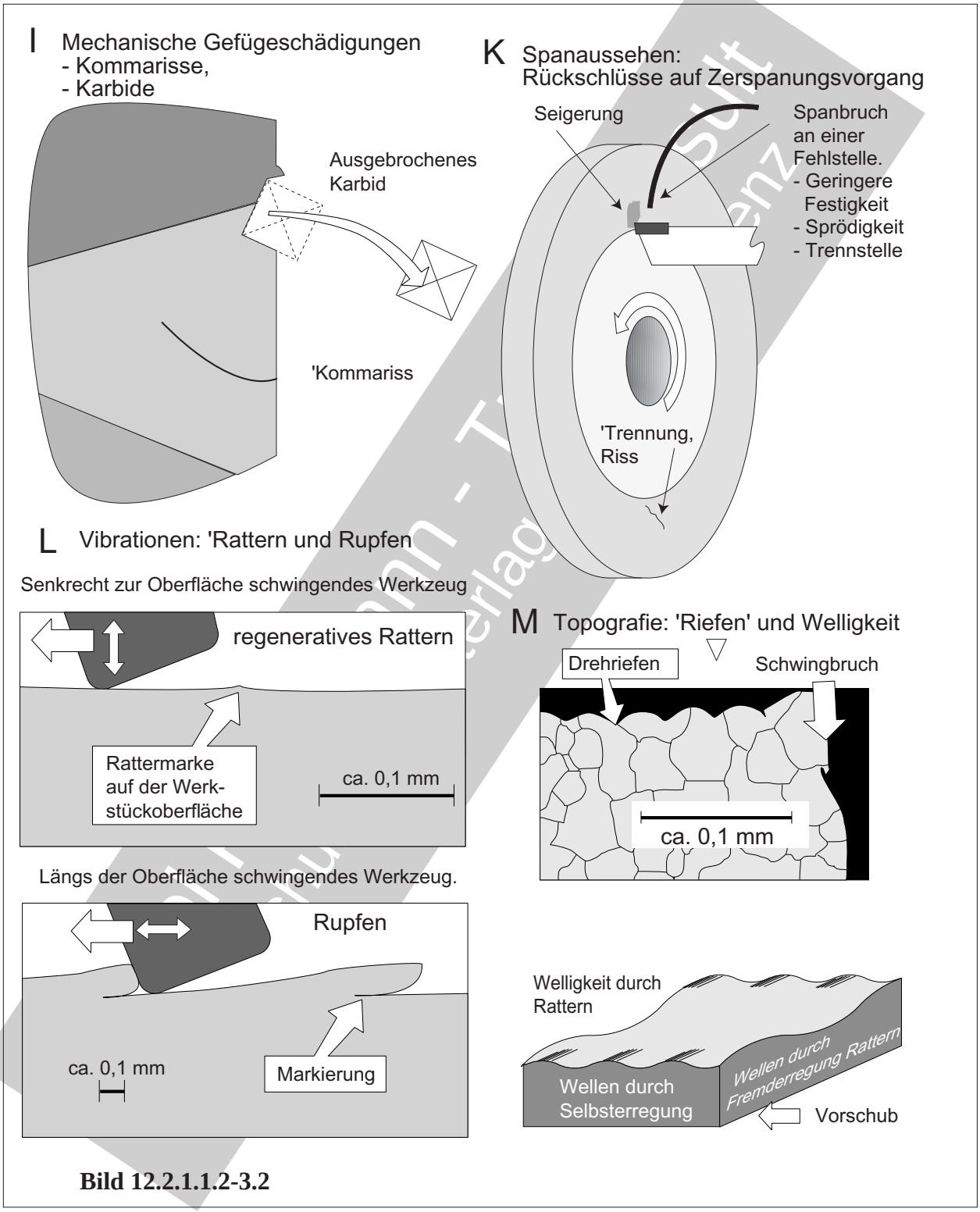


Bild 12.2.1.1.2-3.2

Diese sehr kleinen Kerben oder die bereits angesprochenen Kommarisse dürften erfahrungsgemäß bei rein mechanischer Beanspruchung ***unter der Wachstumsgröße*** *(engl. threshold, Band 1 Bild 4.3-12) liegen. Einflüsse wie* ***Korrosion*** *können sie jedoch* ***gefährlich*** *werden lassen (Band 1 Bild 4.3-13). Sie sollten deshalb an hochbelasteten Bauteilen* ***unzulässig*** *sein. Es ist Aufgabe der* ***Zerspanungserprobung,*** *diese Problematik zu berücksichtigen und die* ***Prozessparameter*** *entsprechend zu* ***optimieren****.*

*„**K**“ **Spanaussehen**: Man unterscheidet zwischen **Spanform** und **Spanart**. Das Spanaussehen (Bild 12.2.1.1.2-3.1) kann dem erfahrenen Fachmann (Werker) einiges über die Stabilität des Zerspanungsprozesses sagen. Das Spanbild ist geprägt vom Zerspanungsvorgang an der Schneide und der Schneidengeometrie am Spanablauf. Sie beeinflussen das Einrollen und damit auch den Bruch des Spans. Während der Zerspanung ist für eine Qualitätsüberwachung in Bezug auf einen stabilen Prozess besonders auf **Veränderungen** und **Ungewöhnlichkeiten** zu achten. Das gilt neben dem eigentlichen Aussehen wie Fließspan oder Reißspan (Rupfspan) und der **Spanfarbe** (Anlauffarben) auch für **Spanbruch**. Dabei spielt **Häufigkeit und eine sich wiederholende Position am Werkstück** eine Rolle. Sie weist auf **Schwachstellen/Fehler** wie Gefügebesonderheiten (z.B. Seigerungen) und Risse/Trennungen hin.*

*„**L**“ **Vibrationen, Rattern, Rupfen** (Bild 12.2.1.1.2-4, Lit. 12.2.1.1.2-4 und Lit. 12.2.1.1.2-5): Schwingungen sind beim Zerspanungsprozess unvermeidlich. Sie dürfen jedoch die Verwendbarkeit des Werkstücks und die Integrität von Maschine und Werkzeug nicht unzulässig beeinflussen. Man unterscheidet in der Literatur zwischen ‘**Rattern**’ und ‘**Rupfen**’ (Band 4, Bild 18.5-2). Bei **Rattermarken** handelt es sich gewöhnlich eher um einen Schönheitsfehler. Anders beim Rupfen. Hier ist mit Mikrorissbildung und Oberflächenkerben (Reißspan Bild 12.2.1.1.2-3.1) zu rechnen. Diese können die Schwingfestigkeit gefährlich absenken.*

*„**M**“ **Topografie, ‘Riefen’ und Welligkeit**: Riefen können sich bei gleicher Rauigkeit einer Fläche sehr unterschiedlich auf die **Schwingfestigkeit** auswirken. Dies ist von der Form der Riefe abhängig (Band 4, Bild 18.1-1). Das muss der Arbeitsvorbereitung bewusst sein und ist Bestandteil eines stabilen Prozesses. Riefen mit **scharfem Grund und steifer ‘Spitze’** sind besonders ungünstig (Band 4, Bild 18.1-8).*
***Welligkeit** tritt bei **Vibrationen** zwischen Werkzeug und Werkstück auf. Diese zeichnen sich auf der Oberfläche als modulierte Schwingungen (flache Wellen mit überlagerten feinen Spitzen) ab. Der Vorgang ähnelt einer Tonaufzeichnung auf einer Tonwalze oder Schallplatte. Neben einer unerwünschten Topografie ist Welligkeit dem Praktiker ein **Zeichen für hochfrequente Schwingungen**. Dabei sind gefährliche **Ermüdungsschäden an anderen Stellen des Werkstücks** die nicht zerspant werden möglich (siehe „**A**“ und Bild 12.2.1.1.2-4).*

***Bild 12.2.1.1.2-4** (Lit. 12.2.1.1.2-4 und Lit. 12.2.1.1.2-5): An Werkzeugmaschinen treten zwei Schwingarten in der Eigenfrequenz auf: **Freie Schwingungen** nach einer kurzen einmaligen Anregung. Die Schwingung klingt durch Dämpfung ab.*
***Fremderregte/Erzwungene Schwingungen** unterliegen der **Anregungsfrequenz.** Die **Amplitude** dagegen wird vom Eigenverhalten der Werkzeugmaschine bestimmt. Typische Ursachen sind Zahnfrequenzen aus Getrieben, Hydraulikpumpen oder Unwuchten. Auch der Zerspanungsprozess selbst kann mit einem unterbrochenen Schnitt beim Drehen oder dem Schneideneingriff beim Fräsen Ursache sein. Eine Besonderheit sind gerade bei Werkzeugmaschinen **selbsterregte Schwingungen.** Diese werden als ‘**Ratterschwingungen**’ bezeichnet (Bild 12.2.1.1.2-3.2 „**L**“). Der Vorgang entspricht dem ‘Flattern’ (Band 1 Bild 3-9.1 und Bild 3-9.2). Es handelt sich um einen selbststeuernden Vorgang mit einer spezifischen Frequenz. Auch hier ist eine andauernde **Erregerquelle** (aus dem Maschinenantrieb) **erforderlich,** um Dämpfungsverluste auszugleichen. Neben einer unerwünschten Qualität der Bearbeitungsfläche besteht eine besondere Gefahr in **Überlastungsschäden** an der **Werkzeugmaschine** und dem **Werkzeug**. Rattern erfolgt als Instabilität maschinenspezifisch ab einer sog. **Grenzschnittiefe** (Skizze oben links). Hier geht die Fremderregung in Selbsterregung*

© Vogel Business Media – Technische Universität Ilmenau – Bibliothek – Nur zum nichtkommerziellen Gebrauch bestimmt

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

Die Entstehung und Formen von Ratterschwingungen beim Zerspanungsprozess, insbesondere beim Drehen.

nach Angaben in Lit. 12.2.1.1.2-5

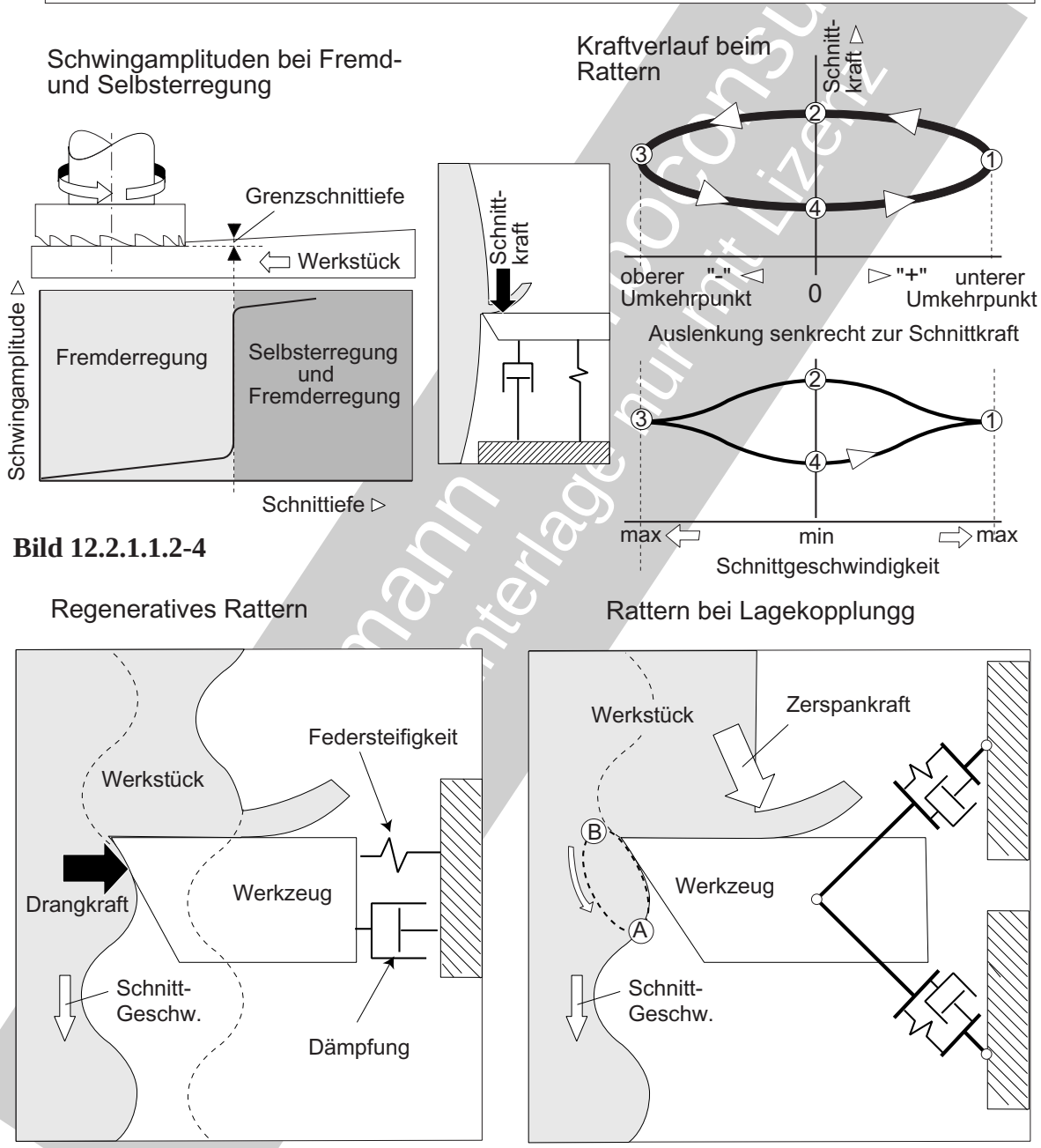


Bild 12.2.1.1.2-4

über. Dieser Grenzwert lässt sich mit dem dargestellten Versuch unter den Anwendungsbedingungen ermitteln.

***Formen von Ratterschwingungen**:*

***Fallende Schnittkraftcharakteristik** in Schnittrichtung (Skizze oben rechts). **Abhängig von der Schnittgeschwindigkeit** verändert sich die Schnittkraft (Pos. 1 und 4) im **Schnittkraftdiagramm** und die Auslenkung von Werkzeug senkrecht zur Zerspanungsebene (Positionen 1 bis 3) im **Auslenkungsdiagramm**.*

***Regeneratives Rattern** (Band 4, Bild 18.5-2) entsteht durch umdrehungsperiodische (selbst-) erregte Schwingungen in Vorschubrichtung. Dadurch ist die Spandicke jeweils von der zeitabhängigen Werkzeuglage abhängig (Skizze unten links).*

Rattern durch Lagekopplung *(Skizze unten rechts). Hier beschreibt die Schneide eine Ellipse zwischen „**A**“ und „**B**“. Dabei führen die unterschiedlichen Spandicken/Kräfte Energie zu.*

Bild 12.2.1.1.2-5, -6, -7.1, -7.2, -8, -9, -10: *Dieser Schaden ist äußerst lehrreich. Er wird deshalb in mehreren Bildern entsprechend Angaben aus dem „Aircraft Accident Report“ NTSB/AAR-98/01 (Lit. 12.2.1.1-13) möglichst anschaulich dargestellt.*

Ablauf des Flugunfalls *(Bild 12.2.1.1.2-5): Der Triebwerksschaden entstand an einer kleineren Verkehrsmaschine mit zwei hinten montierten Triebwerken (Skizze oben). Das Ereignis trat zu Beginn des Starts ein. Bruchstücke der **Fanscheibe** (Skizze unten links) und Schaufeln traten aus dem linken Triebwerk und durchschlugen die benachbarte Seite der Flugzeugzelle. Daraufhin wurde der Start abgebrochen und das Flugzeug kam auf der Startbahn zum Stehen. Zwei Passagiere verloren durch die Bruchstücke das Leben, zwei wurden schwer verletzt.*

Die Schadensuntersuchung ergab, dass die Schadensursache in einem LCF-Schwingbruch der Fanscheibe, die aus einer hochfesten Titanlegierung gefertigt ist, zu suchen war. Der Bruch ging von einer der Bohrungen der Verschraubung zum Flansch der Niederdruckwelle aus. Es zeigte sich, dass sie im Anrissbereich einer, offenbar beim Fertigungsprozess geschädigten, Bohrungswand lag (Skizze oben links, Bild 12.2.1.2.1-6).

Schadensuntersuchung und Befund *(Bild 12.2.1.1.2-7.1 /-7.2): Zuerst war die Art der Schädigung am Anriss zu klären (Bild 12.2.1.1.2-6 und Bild 13.5-1). Eine weitere Frage ist, warum diese Schädigung nicht im Rahmen der Neuteilfertigung erkannt wurde.*
Die Scheibe wurde aus der hochfesten Titanlegierung Ti-6Al-4V gefertigt.

Im Bereich der Fehlstelle weist die Bohrungswand auf ca. 23 mm Länge Bearbeitungsriefen und Verfärbungen auf (Detail oben rechts).
*Ein metallografischer Schliff ließ im Anrissbereich eine ca. 0,25 mm tiefe Gefügeveränderung mit Mikrorissen (engl. **„ladder cracking“**) erkennen. Im Schädigungsbereich lag die Härte mit 52 HRC deutlich höher als die maximal zulässigen 39 HRC. Makrorisse lagen nicht vor. Es ließen sich drei Gefügezonen unterscheiden (Detail Mitte rechts).*
Zone 1: *Rekristallisierte Körner aus α-Phase entstehen bei Temperaturen oberhalb 650°C. Weil eine solche Gefügeveränderung mit zeitabhängigen Diffusionsprozessen verbunden ist gilt: je kürzer die Temperatur einwirkte, umso höher muss sie gewesen sein. Es ist also für die relativ kurzen Aufheizzeiten eines Bohrprozesses zu erwarten, dass die Temperaturen deutlich höher als der Grenzwert für die beobachtete Gefügeveränderung lagen. Zusätzlich wurde eine **Eisenanreicherung** in der Bohrungsoberfläche nachgewiesen. Es darf auf Grund dieser Befunde spekuliert werden, dass der Bohrer zumindest Anlauffarben zeigte, möglicherweise glühte (siehe Reproduktionsversuche, Seite 12.2.1.1.2-15).*
Bei solchen Temperaturen nehmen Titanlegierungen Sauerstoff aus der Luft auf. Das stabilisiert die α-Phase. Eine solche Temperatur ist bei schneidendem Bohrer und ausreichender Kühlung, wie sie der vorgeschriebene Bohrvorgang gewährleisten müsste, nicht zu erwarten.
Zone 2: *Dieser unterhalb Zone 1 liegende Bereich weist stark parallel zur Oberfläche verformte Körner auf. Die darunter liegende*
Zone 3 *zeigt Gefüge mit einer in Umfangsrichtung „verbogenen“ Mikrostruktur.*
Eine elektronenmikroskopische Auswertung (Band 1 Bild 2.2.2.4-3) der Bruchfläche (Bild 12.2.1.1-9.3) ergab, dass beim Schadenseintritt nach 16545 Betriebsstunden mit 13 835 Start/Abstellzyklen der LCF-Riss eine kritische Län-

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.1-14

© Axel Rossmann - TU Braunschweig
Vorlesungsunterlagen Maschinenelemente

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

Fanscheibenbruch als Folge von Fertigungsproblemen bei der Herstellung der Bohrungen für die Befestigungsbolzen.

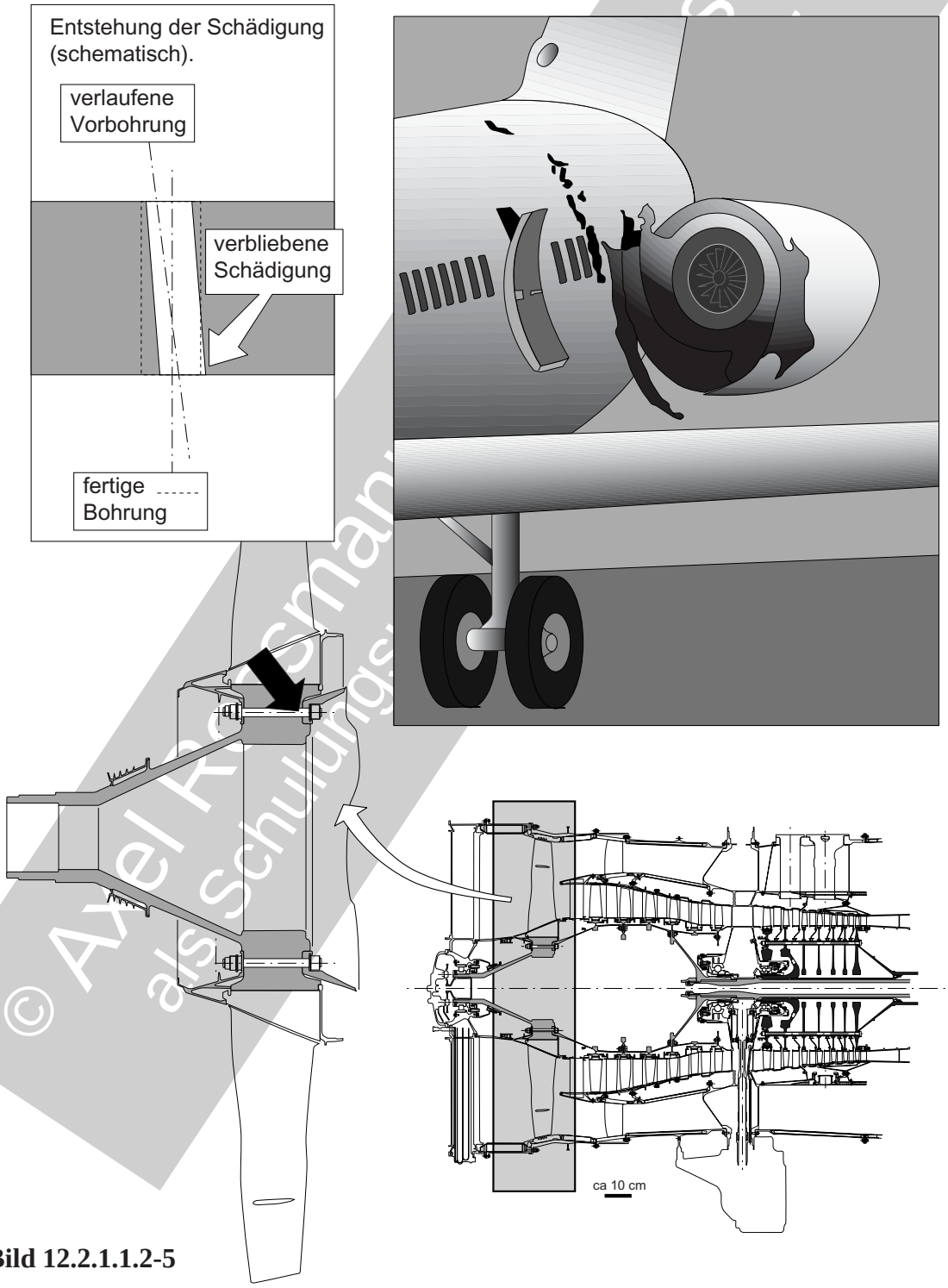
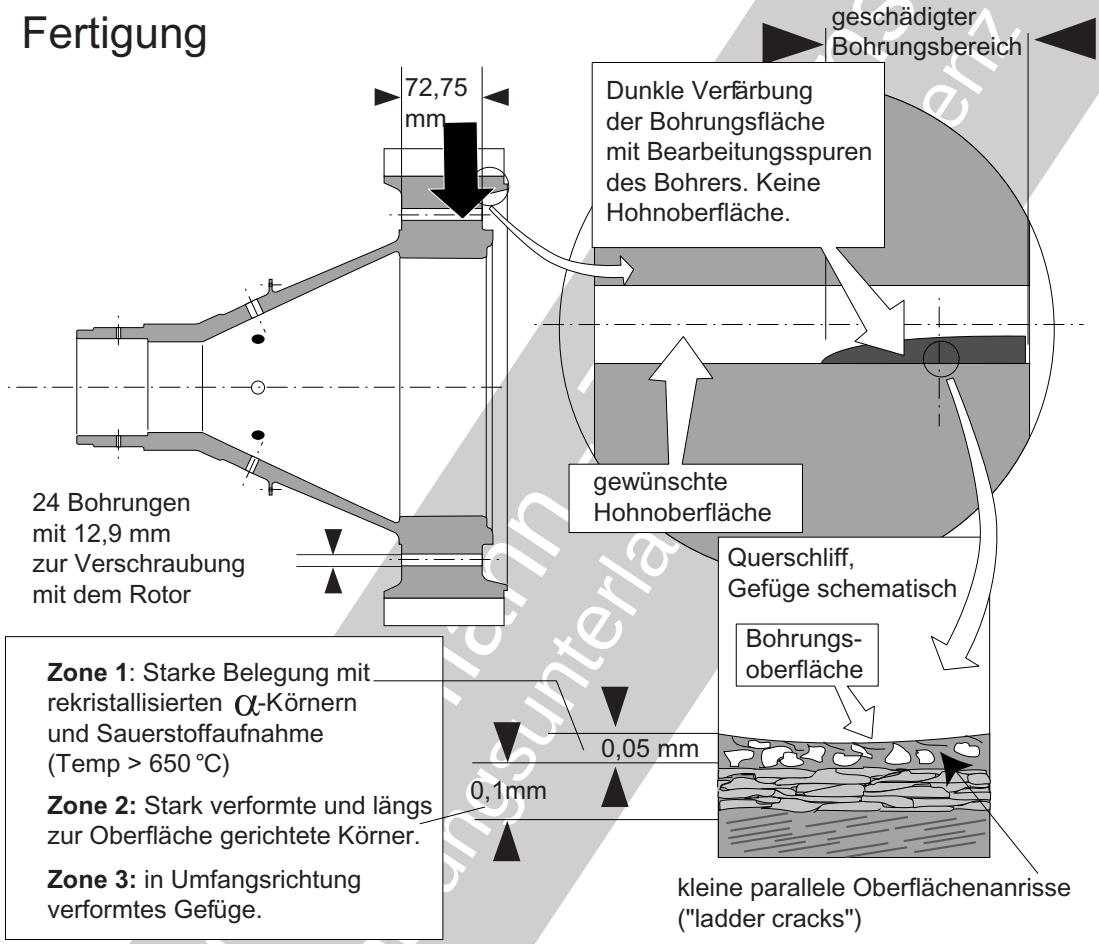


Bild 12.2.1.1.2-5

© Axel Rossmann
als Schulungsmaterial

Schadensrelevante Besonderheiten des Pensacolaunfalls.

Fertigung



Zone 1: Starke Belegung mit rekristallisierten α-Körnern und Sauerstoffaufnahme (Temp > 650 °C)

Zone 2: Stark verformte und längs zur Oberfläche gerichtete Körner.

Zone 3: in Umfangsrichtung verformtes Gefüge.

Inspektionsvorgang:
- Nach dem Bohren Blue Etch anodize (BEA) und visuell.
- Fertiges Teil: visuell, Eindringprüfung (Fluorescent Penetrant Inspection = FPI).

Problem der visuellen Prüfung: Siehe Bild 13.3.1-9
- Zu geringer Brennpunktabstand
- Spiegelung in der Bohrung verhindert das Erkennen von Details.

Problem der FPI : Siehe Bild 13.3.1-4 und Bild 13.3.1-7
Trocknung, Verteilung des Entwicklers, Zeitablauf, Human factors (monoton, Frust), Verschmutzung von Oberfläche und Reinigungsflüssigkeit, Hintergrundfluoreszenz.

Fehlstelle: Bearbeitungsriefen und Verfärbung ca. 23 mm , Gefügeveränderung (unter 0,25 mm), Mikrorisse, erhöhte Härte (52 HRC statt max zul. 39 HRC). **Kein makroskopischer Riss**

Bild 12.2.1.1.2-6

Bildbeschreibung auf Seite 12.2.1.1.2-9, - 13, und - 14

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

Rissgrößen und Lebensdauer bei Scheibenbruch

Schaden bei 16 545 Betriebsstunden mit 13 835 Start/Abstellzyklen.
Die zulässige Betriebszeit bis zum Austausch liegt bei 20 000 Zyklen

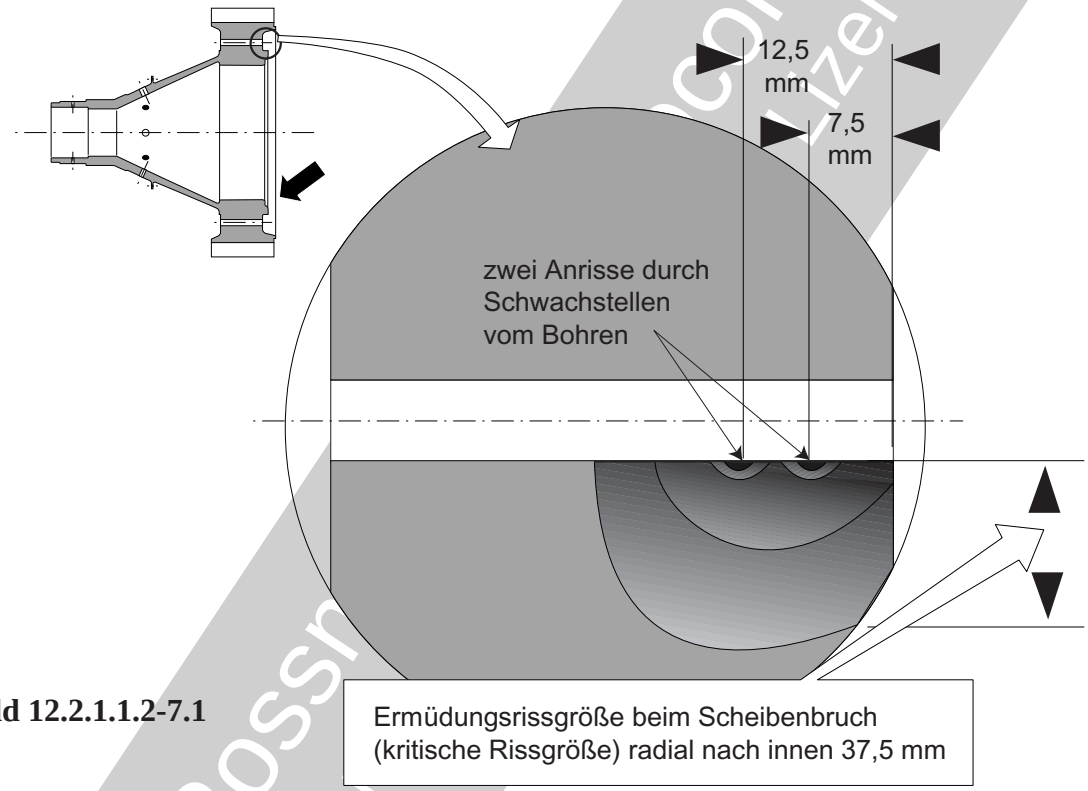


Bild 12.2.1.1.2-7.1

Schlussfolgerungen zur Schadensentstehung:

- Eine Form von Bohrerbruch oder Versagen des Bohrvorgangs in Kombination mit örtlichem Kühlflüssigkeitsmangel und Späneansammlung führte beim Schadensteil während des Bohrvorgangs zur Veränderung der Gefügestruktur und Mikrorissbildung ("ladder cracking").

- Von den Mikrorissen in den Bohrungen wuchsen sofort nach der Inbetriebnahme Ermüdungsbrüche.

- Obwohl das veränderte Gefüge in der Bohrung des Unfallteils durch "Blue Etch Anodizing" (BEA) auffindbar war, wurde es nicht als unzulässiger Fehler erkannt, weil die Mustertafel keinen entsprechenden Fehler zeigte.

- Weitere unzulässige BEA-Anzeigen können vorhanden gewesen sein, wurden jedoch nicht erkannt.

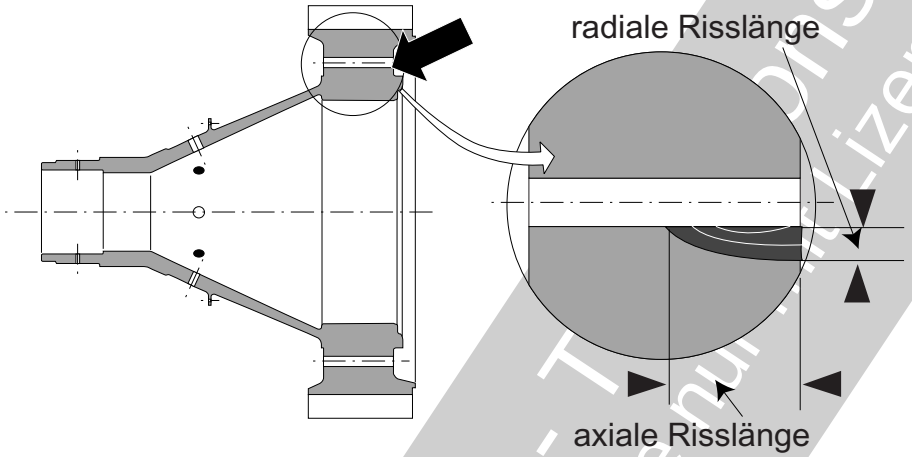
- Die Schädigung vom Bohren verlief viel tiefer in die Bohrungswand als vom OEM für das Verfahren angenommen worden war.

Bild 12.2.1.1.2-7.2

Bildbeschreibung auf Seite 12.2.1.1.2-9, - 13, und - 14

Inspektion bei den Überholungen

nach 4 456 Zyklen erfolgte eine visuelle Inspektion beim Betreiber im Rahmen eines "Shop visit" für einen Wartungsvorgang an der Beschaufelung.



Inspektionsvorgang: Bohrungen von beiden Seiten bei weißem fluoreszierenden Licht mit 3 x Vergrößerung auf Kratzer, Eindrücke und Korrosionsnarben.

Ergebnis/Entscheidung: Keine Nacharbeit

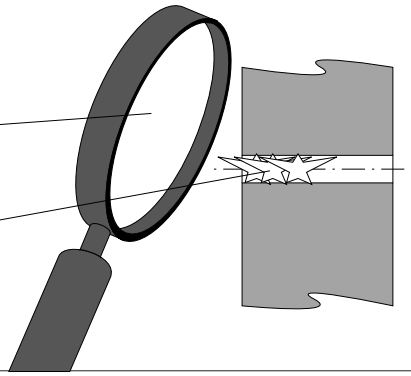
Problem: - Zu geringe Tiefenschärfe der Lupe,
- Spiegelung in der Bohrung verhindert das Erkennen von Details.

Bild 12.2.1.2-8

Fehlstelle: Wahrscheinliche **Ermüdungsrissgröße axial 0,5 mm, radial 0,25 mm**

Problem der visuellen Prüfung:

- Zu geringe Brennweite
- Spiegelung in der Bohrung verhindert das Erkennen von Details.



Fortsetzung von Seite 12.2.1.1-10

ge von 37,5 mm erreicht haben musste. Er ging von zwei, dem Bohrvorgang zuordenbaren Fehlstellen in ca. 7,5 und 12,5 mm Abstand von der Scheibenoberfläche aus.

Die Untersuchungsergebnisse ließen folgende ***Rückschlüsse auf die Schadensentstehung*** *zu: Die Schädigungen im Anrissbereich sind auf ein Versagen des* ***Bohrvorgangs*** *zurückzuführen (Bild 12.2.1.1.2-6). Als Rissstarter wirkten Mikrorisse. Die Tiefe der Schädigung ging deutlich über die Erwartung für einen unbemerkten Ausfall des Bohrverfahrens hinaus.*

Weiter war zu klären, wie es möglich sein konnte, dass eine so gefährliche Schädigung nicht

während oder nach dem Fertigungsprozess erkannt wurde.
*Das Neuteil wurde beim Hersteller vermessen und einer visuellen Prüfung sowie einer Eindringprüfung und einer Makroätzung (**elektrochemisches Anodizierverfahren, engl. „Blue Etch Anodizing“ = BEA**) unterzogen. In diesem Ablauf werden die Bohrungen auf Verlauf, Zentrierung und Durchmesser überprüft. BEA reagiert auf Gefügeveränderungen (z.B. α - und β - Ansammlungen, ungewöhnliches Kornwachstum, Schmiedefalten) und zeigt diese als Verfärbungen (ähnlich Anlauffarben) an. Das Verfahren ist auf alle Titanlegierungen anwendbar. Beim Vorbohren wurden vom **Werker an zwei Löchern Rattermarken beobachtet**. Nach dem folgenden Bohren und Honen auf Maß, waren diese Bearbeitungsspuren offenbar nicht mehr zu erkennen. Darauf wurde das Bauteil freigegeben. Bei der folgenden BEA-Prüfung wurden in einer Bohrung „Herstellungsmarkierungen“ festgestellt. Die Anzeige entsprach keinem der zu dieser Zeit vorliegenden **Vergleichsbilder** für fertigungsbedingte Schädigungen und wurde **nicht als BEA-Anzeige eingestuft**. Die Fertigungsunterlagen zum Schadensteil enthielten somit keinen Hinweis auf eine Schädigung.*
*Beim Versuch die **Schädigung der Bohrung zu reproduzieren,** gelang dies nur mit vollkommenem Abschalten der Kühlflüssigkeit, unvorschriftsmäßig hoher Bohrerdrehzahl und großem Vorschub. Der Versuch führte zum **Bohrerbruch** oder zum Versagen des Bohrers und zum **Spänestau** (Band 4, Bild 18.5-3). Neben typischen Gefügeveränderungen wurde auch eine hohe Eisenkonzentration (Bohrermaterial), entsprechend dem Schadensfall, an der Bohrungswand gefunden. Mit den nachfolgenden „maßgebenden“ Verfahren (Honen) ließen sich vergleichbare Schädigungen nicht erzeugen.*

*Die Kontrolle der Bohrungen mit Eindringprüfung und BEA erfolgt sowohl an den Neuteilen als auch bei Überholungen (Bild 12.2.1.1.2-9). Beide Prüfungsanzeigen der Bohrungen wurden beidseitig visuell unter Verwendung einer Lupe ausgewertet. Das Problem der verwendeten **Lupe war die geringe Tiefenschärfe**. Dadurch war eine ausreichende Übersicht nicht gegeben. Erschwert wurde die Bewertung von der spiegelnden Bohrungsoberfläche, was Details nicht erkennen ließ.*

*Der **Schadensablauf** dürfte sich entsprechend den Untersuchungsergebnissen wie folgt abgespielt haben:*

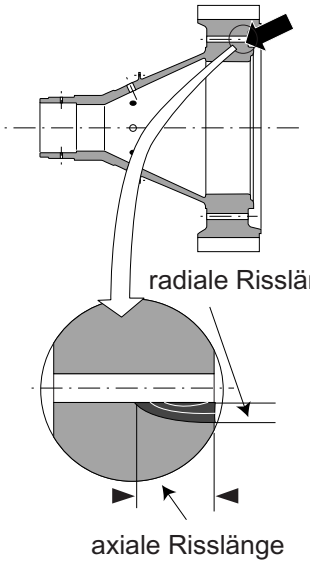
Bei ersten Überholungen kann man von ca. 0,5 x 0,25 mm großen LCF-Rissen ausgehen. Die letzte Überholung („Heavy Maintenance“) erfolgte vor dem Schadenseintritt bei 12 693 Zyklen (Bild 12.2.1.1.2-7.1/ -7.2/ -8). Entsprechend der Bruchflächenauswertung dürfte bei der letzten Überholung bereits ein Riss von axial 20 mm und radial 10 mm Länge vorhanden gewesen sein.
***Wie ist zu erklären, dass ein Riss solcher Größe nicht erkannt wurde**? Man kann in diesem Zusammenhang wohl von **„Human Factors“** sprechen (Band 4, Bild 17.3.1-9). Dazu gehören erfahrungsgemäß ein Überschreiten des „Erwartungshorizonts“ und fehlende Erfolgserlebnisse (Frust), weil nur sehr selten ein solcher Fehler auftritt. Weitere Probleme sind ein nicht optimaler Ablauf der Vorbehandlung (Verschmutzung) und des Prüfprozesses wie Zeitabläufe, Verteilung des Entwicklers und Trocknung.*

*Ein **Audit der Eindringprüfung** (FPI) beim Hersteller und den Überholwerkstätten ließ potenzielle Mängel erkennen (Bild 12.2.1.1-9.5). Es existiert eine erstaunliche Zahl an **Möglichkeiten, ein scheinbar einfaches zerstörungsfreies Prüfverfahren wie das Eindringverfahren in seiner Effektivität zu beeinträchtigen** (Bild 12.2.1.1-9.6). Damit ist beispielhaft die **notwendige erfahrungsbasierte Expertise und die Einhaltung von Vorschriften sowie die kritische Beobachtung eines Prüfprozesses** aufgezeigt.*

© Xe Possenhofer - Turbocopter Ausbildungsunterlagen nur zur Information

Eindringprüfung im Rahmen der "Heavy Maintenance"

nach 12 693 Zyklen "Heavy maintenance" beim Betreiber.



Inspektionsvorgang: Eindringprüfung (FPI)

Problem: FPI Durchführung: Trocknung, Verteilung des Entwicklers. Zeitablauf, Human factors (monoton, Frust), Verschmutzung von Oberfläche und Reinigungsflüssigkeit, Hintergrundfluoreszenz,

Fehlstelle: Wahrscheinliche **Ermüdungsrissgröße axial, ca. 20 mm, radial ca. 10 mm**

Ein Audit des Eindringprüfungsprozesses (FPI) ergab die folgenden Mängel:

1. Es gibt keine Gewähr, dass die **Sauberkeit des Bauteils** für eine befriedigende FPI ausreichte.

2. Kein formales **"on-the-job-Training"** des Prüfpersonals. Keine **Sensibilisierung** für die Kritikalität des Bauteils im Rahmen der Schulungen.

3. Die beim Audit vorhandenen **Reinigungsmittel** waren mit fluoreszierenden Stoffen stark verunreinigt.

4. Erkennbare Asche und **Verunreinigungen** unter den **Transportrollen** der FPI-Linie. Weil keine schützenden Abdeckungen über den Behältern der FPI- **Hilfsstoffe** vorhanden waren, sind entsprechende Verunreinigungen auch in den FPI-Stoffen zu erwarten.

5. Die **Transportringe** der Teile beim FPI-Prozess konnten leicht durch fluoreszierende Stoffe verunreinigt werden. Die Bohrung war schlecht inspizierbar weil der dahinter sichtbare Transportring starke **Hintergrundfluoreszenz** aufwies. Der Versuch des Prüfers, den Ring mit den Handschuhen abzuschirmen, führte zu deren Fluoreszenz.

6. Ein Prüfer **verschmierte** vor der Prüfung den zu prüfenden Bereich durch Berühren.

7. Es scheint keine **gleichbleibende Vorgehensweise** zu geben, mit der die Teile im Prüfraum bei der **Auswertung** gehandhabt und markiert werden.

Bild 12.2.1.1.2-9

Bildbeschreibungen auf Seite 12.2.1.1.2-10, - 13, und - 15

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

- Der **Riss war groß genug** um ihn bei der letzten FPI des Betreibers vor dem Flugunfall zu erkennen.

- Es bestehen ernste Fragen zur Zuverlässigkeit des **Trocknungsvorgangs** ("flash drying") der dazu dient, das Spülwasser aus den Rissen zu entfernen. Im Riss verbliebenes Wasser verhindert das Eindringen des Prüföls und damit die Risserkennung.

- Bessere Techniken sind erforderlich, um die volle **Bedeckung der Bohrungswand mit Entwicklerpulver** zu garantieren.

- Es war kein System zur **zeitlichen Kontrolle des FPI-Prozessdurchlaufs** vorhanden. Dies ist ein deutlicher Mangel.

- Die FPI - Anzeigen und deren Erkennbarkeit reagieren empfindlich auf **Handling, Befestigungen und Abstützungen** der Teile. Dies kann die Aufmerksamkeit des Prüfers von bestimmten Bereichen des Prüfteils behindern.

- Ein oder mehrere Mängel der **Reinigung und Trocknung** im Ablauf des FPI-Prozesses beim Betreiber können das Erkennen des Risses verhindert haben.

- Diese Mängel können auch bei anderen Überholbetrieben vorhanden und teilweise Ursache dafür sein, dass auch in **anderen Fällen** Risse nicht festgestellt wurden.

- Es gibt **keine menschlichen und physikalischen Faktoren,** welche den FPI-Prüfer daran gehindert haben, den Riss festzustellen.

- Der versehentliche Fehler des Prüfers, **systematisch absichernde Nachprüfungen** zu suchen und wenn notwendig an allen Flächen der Scheibe durchzuführen, kann zum Übersehen des Risses geführt haben.

- Eine **niedrige Erwartung** in diesem Bauteiltyp Risse zu finden, könnte den FPI-Prüfer daran gehindert haben, die Rissanzeige zu registrieren oder richtig einzuschätzen.

- Die **Dauer der Prüfung und der Zeitaufwand** der Folgeschritte kann die Effektivität des Prüfers beeinflusst haben.

- Die hohe potenzielle Gefahr eines übersehenen Risses in einem kritischen Bauteil erfordert es, **FPI-Prüfer auf Ihre Fähigkeiten** Fehler zu erkennen und diese zu dokumentieren zu prüfen.

- Das Übersehen des Risses beim Betreiber ist entweder auf einen Fehler bei der **Reinigung** und dem **FPI-Prozess**, einen Fehler des Prüfers den **Riss zu erkennen** oder einer Kombination dieser Einflüsse zurückzuführen.

- **Die bisherige Fertigung und der Prüfprozess beim Betreiber, garantieren kein fehlerfreies Rotorbauteil aus einer Titanlegierung über die gesamte Lebensdauer. Alle kritischen Rotorteile aus Titan sind für Fertigungsrisse empfindlich. Der folgende Rissfortschritt im Betrieb kann zu einem katastrophalen Unfall führen.**

Bild 12.2.1.1.2-10

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bildbeschreibungen auf Seite 12.2.1.1.2-10, - 13, und - 15

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen Fräsen, Bohren

Bohrerbruch als Ursache für LCF-Rissbildung im Zusatzverdichter ("Inducer") der Hochdruckturbine.

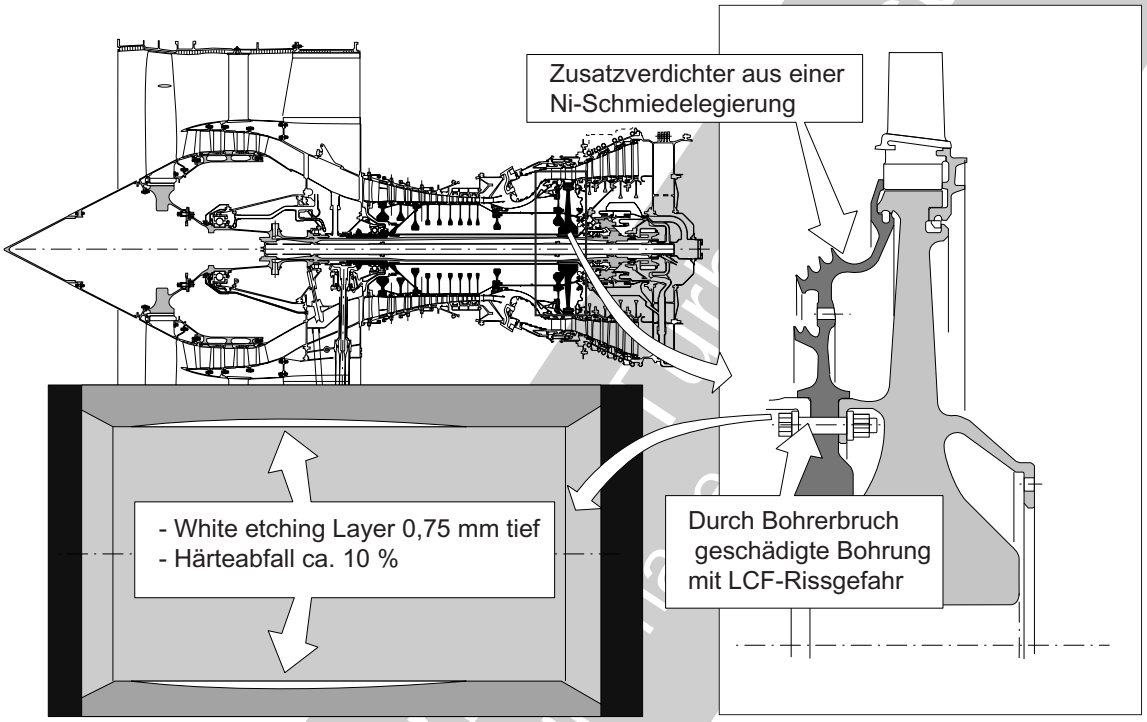


Bild 12.2.1.1.2-11

Bild 12.2.1.1.2-11 *(Lit. 12.2.1.1-19): Beim Steigflug nach dem Start kam es an einem Triebwerk der zweistrahligen Verkehrsmaschine zu einem Rotorschaden mit Bruchstückaustritt. Die „HPTR fan disk“ vor der Hochdruckturbine für die Schaufelkühlluft war gebrochen. Es handelt sich um einen* ***Zusatzverdichter*** *(engl.* ***inducer, cover plate,*** *Skizze rechts), der von vorne mit der Hochdruckturbinenscheibe verschraubt ist.*

Dieses Beispiel zeigt, dass nicht nur für Titanlegierungen (Bild 12.2.1.1.2-6) die Gefahr gefährlicher ***Schädigungen beim Bohren*** *besteht. Bruchausgang ist eine der Befestigungsbohrungen („rim bolt holes“). Das Schadensteil ist aus einer* ***Nickellegierung*** *(IN718) gefertigt.*

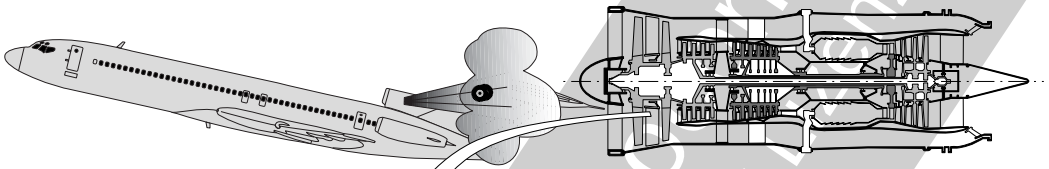
In einem Querschliff (Detail) wurde eine ***schwer anätzbare Zone*** *(white etching layer) von ca. 0,75 (!) mm gefunden. Dies ist extrem dick (Bild 12.2.1.1-2) und als* ***Merkmal einer gefährlichen Bearbeitungsschädigung*** *anzusehen. Zusätzlich liegt eine* ***Wärmeeinflusszone von ca. 0,3 mm*** *vor. Hier liegt die Härte von HRC mit ca. 40 deutlich unter der Mindesthärte von HRC 44. Auch* ***Kaltverformungen*** *(wahrscheinlich ‘Faserkrümmung’, Bild 12.2.1.1-3.2) von ca. 0,3 mm Tiefe und* ***Mikrorisse*** *unter 0,01 mm Tiefe wurden gefunden. Sie können als zusätzliche Indizien für abweichende Zerspanungsbedingungen gelten.*

Offenbar wurde in einem weiteren Fall mit ***Wirbelstromprüfung*** *ein Riss bei einer Routineüberholung gefunden. Die Untersuchung ergab, dass dieser von einer* ***Druckstelle in der Bohrungswand*** *ausging. Sie entstand beim* ***Bruch des Bohrers*** *während der Neuteilherstellung (siehe auchn Bild 12.2.1.1.2-6).*

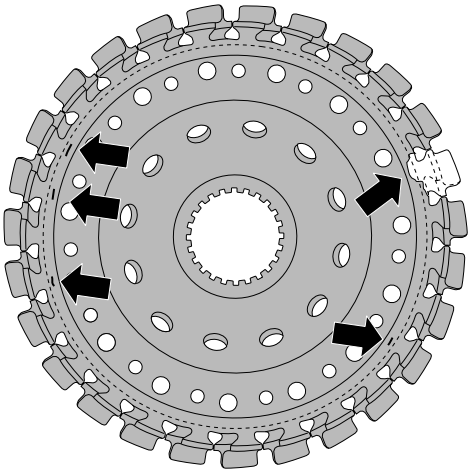
Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

Ein Glättungsvorgang führte zu umlaufenden Riefen in einem hochbeanspruchten Übergangsradius. Folge: LCF-Anrisse und Scheibenbruch.

In ca. 30 Meter Höhe über Grund nach dem Start trat ein lauter Knall auf und das mittlere Triebwerk fiel aus. Ein Feuer konnte mit der bordeigenen Löschanlage gelöscht werden. die anschließende Landung erfolgte sicher.

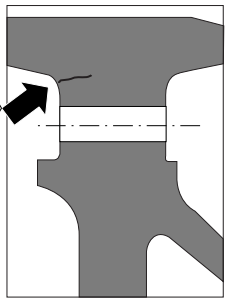


Fanscheibe aus einer Titanlegierung. Sicht von der Rückseite



Ausgebrochener Scheibenhöcker lässt 2 Fanschaufeln abfliegen und als Folge das Abschleudern weiterer Fanschaufeln und der nachfolgenden Fanstufe.

Im mit der Hand nachgearbeiteten Übergangsradius entstanden LCF-Risse



! Bei der Handnacharbeit eines Radius in einer hoch beanspruchten cheibenzone dürfen keine bedenklichen, quer zur Beanspruchung verlaufenden Riefen entstehen.

Bild 12.2.1.1.2-12.1

Bild 12.2.1.1.2-12.1 *(Lit. 12.2.1.1-13 und Lit. 12.2.1.1-32): Im dargestellten Fall handelt es sich um die* ***Scheibe der ersten Fanstufe aus der hochfesten Titanlegierung*** *Ti-6Al-4V (Skizze oben, entsprechend Bild 12.2.1.1-9.1). Ein Scheibenhöcker war gebrochen und hatte drei Fanschaufeln frei gegeben. Als Folgeschaden brachen weitere drei Höcker und weitere vier Blätter flogen ab. Offenbar hatte die entstandene starke Unwucht dann zum Abschleudern der nächsten Fanstufe geführt. Das Flugzeug wurde daraufhin stark beschädigt. Der Bruch des ersten Höckers zeigte einen LCF-Riss auf der Scheibenvorderseite am Übergangsradius in den Kranz (Detail unten rechts). Der Riss benötigte ca. 800 Lastwechsel für das Wachstum bis zur kritischen Länge. Auch die als Folgeschaden gebrochenen Höcker wiesen im entsprechenden Bereich bereits kleinere Anrisse auf. Weitere drei Risse wurden mit einer zerstörungsfreien Prüfung gefunden (Scheibenskizze). Eine eingehende Untersuchung der Anrisszonen ergab, dass die* ***LCF-Rissbildung im Zusammenhang mit einer Oberflächenschädigung*** *steht. Diese wurde beim Versuch erzeugt, den* ***Radius mit der Hand nachzupolieren****. Scharfe Kratzer durchfurchten die Oberfläche und rissen auf. Am Ende jedes Kratzers ist ein SiC-Partikel eingebettet. Von Ihnen gingen die Schwingermüdungsrisse aus. Der suspekte Bearbeitungsvorgang ließ sich der* ***Neuteilfertigung*** *zuordnen. Verblüffenderweise wurde die vorgeschriebene* ***arithmetische*** *(mittlere)* ***Rauig-***

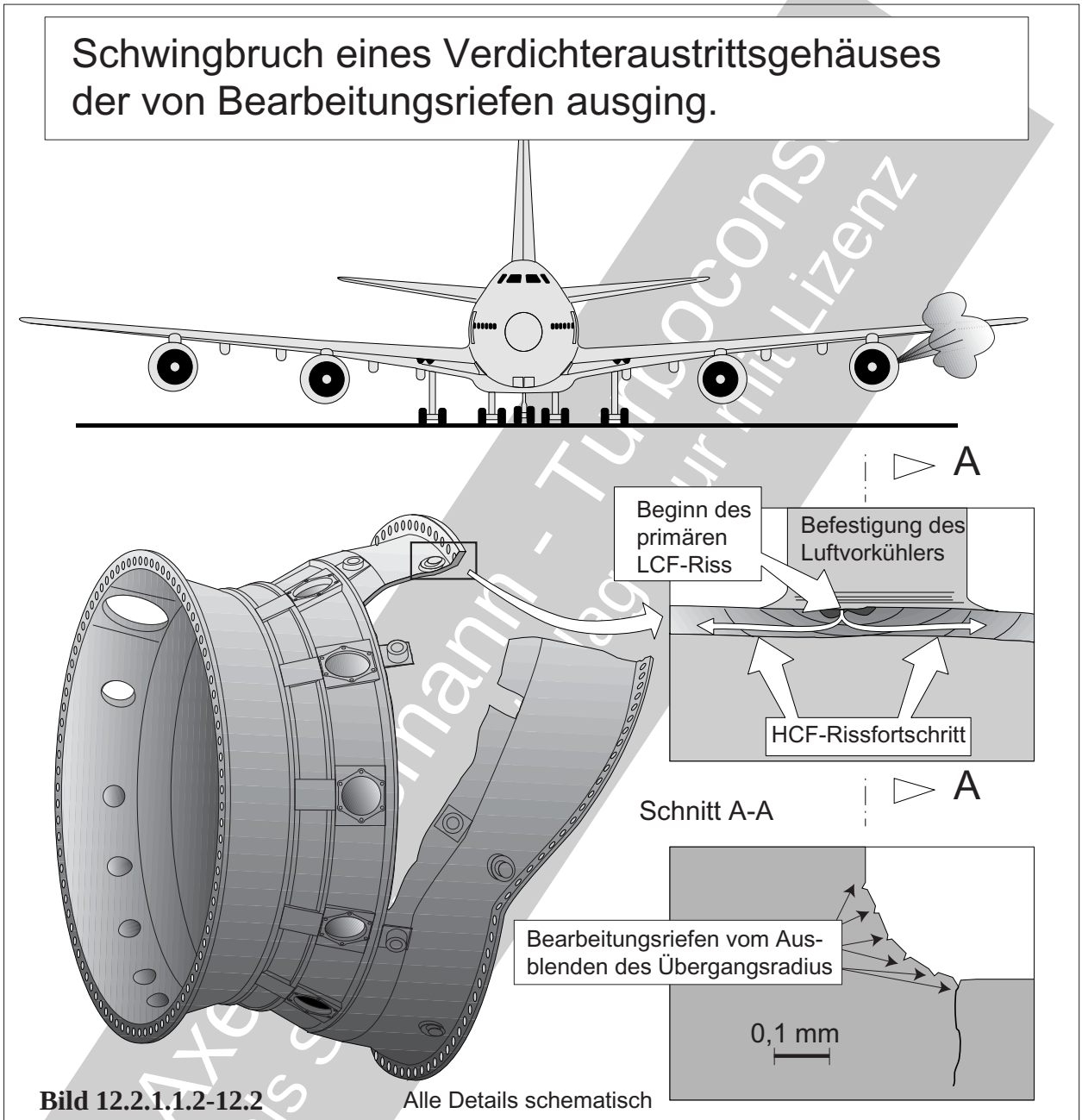


Bild 12.2.1.1.2-12.2

***keit** von 32 microinches (0,0008 µm) mit 40 microinches (0,001 µm) nur leicht überschritten. Dies zeigt die **beschränkte Aussagefähigkeit einer Rauigkeitsmessung,** wenn es sich um die Beeinflussung der Schwingfestigkeit handelt (Band 4, Bild 18.1-1). Bemerkenswert ist, dass zwei zumindest äußerlich ähnliche Schäden offenbar bereits bekannt waren. Deren Rissausgang wich jedoch vom dargestellten Fall ab. Trotzdem spricht das für eine unterschätzte, sehr hohe Belastung der fraglichen Bauteilzone.*

Bild 12.2.1.1.2-12.2** (Lit. 12.2.1.1-33): Während des Starts trat beim Rollen ein Knall auf. An einem äußeren Triebwerk (Skizze oben) waren auf beiden Seiten die Gondeltüren, ein Luftvorkühler (precooler, Wärmetauscher der Zapfluft aus dem Hochdruckverdichter mit Fanluft kühlt) und andere **Teile abgeschleudert** worden. Das kombinierte **Verdichteraustritts-Brennkammergehäuse** (engine diffusor case, Skizze unten links) war **aufgeplatzt**. An einem Befestigungsansatz wurde in der Gehäusewand ein ca. **12,5 cm langer verfärbter Schwingriss

mit ca. 90 000 Fortschrittslinien (Band 1 Bild 4.4-3) gefunden und als HCF-Riss bewertet (Band 1 Bild 5.4.1.1-2). Der Bruchausgang mit zwei dunkel verfärbten halbmondförmigen Zonen lag am Übergang einer Kühlerbefestigung (Detailskizze oben rechts). Es handelte sich um Schwingrisse im LCF-Bereich, die von 0,01-0,02 mm tiefen Bearbeitungsriefen ausgingen (Detailskizze unten rechts). Diese entstanden bei der ***Neuteilherstellung im Zuge einer mechanischen Nacharbeit des Übergangsradius*** *(Bild 12.2.1.1.1-8.1 und -8.2). Der LCF-Riss ist auf Druck- und Temperaturänderungen im Gehäuse zurückzuführen. Der anschließende HCF-Riss auf hochfrequente Schwingungen des Ölkühlers. Dafür spricht, dass bereits* ***zwei vergleichbare Schäden*** *an anderen Triebwerken aufgetreten waren. Am Schadenstriebwerk wurden sieben Starts vor dem Schaden eine gebrochene Befestigungsklemme einer Zapfluftleitung und eine gebrochene Drucksonde gefunden. Sie wurden offenbar* ***ersetzt, ohne die Ursache zu ermitteln****.*

Die ***Bearbeitungsriefen, zusammen mit hohen Zugeigenspannungen*** *wurden als Anrissursache identifiziert. Wie Laborversuche zeigten, ist mit einer* ***Verkürzung der Ermüdungslebensdauer um den Faktor 4*** *zu rechnen.*

12.2.1.1.2.1 Der Einfluss von Kühlschmierstoffen (KSS)

Kühlschmierstoffe (**KSS**) werden bei Zerspanungs- und Umformprozessen angewendet, um eine möglichst hohe Produktionsleistung bei günstigen Kosten und optimale Integrität der Bearbeitungsfläche zu gewährleisten. Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf **Kühlschmierstoffen für die Zerspanung.** Für Umformprozesse gelten ähnliche Bedingungen, die jedoch in einigen Aspekten (z.B. Wärmeleitfähigkeit) abweichen.

Kühlschmierstoffe lassen sich wie folgt einteilen (Lit 12.2.1.1-23, Lit 12.2.1.1-5):

- Mineralölhaltige mit mehr als 60% Mineralöl im Konzentrat,
- teilsynthetische mit 5-60% Mineralöl im Konzentrat,
- mineralölfreie, synthetische,
- Salzlösungen,
- Schleiföle.

Der Kühlschmierstoff hat **auf den Zerspanungsprozess und sein Umfeld entscheidende Auswirkungen** (Bild 12.2.1.1.2-13 und Bild 12.2.1.1.2-14). Nachfolgend werden besonders die positiven Eigenschaften dargestellt. Werden diese nicht genutzt oder bestehen werkstofftypische Empfindlichkeiten, ist mit Problemen zu rechnen (Bild 12.2.1.1.2-14).

Schmierwirkung: Es gilt, die Mischreibung zwischen Werkzeug, Werkstück und Span zu minimieren. Damit wird der Schnittvorgang erleichtert und die Reibungsenergie bzw. die Aufheizung minimiert. Um einen niedrigen Reibbeiwert zu erzielen, werden den KSS-Konzentraten **Hochdruckzusätze** (EP-Zusätze) zulegiert. Diese reagieren unter Bedingungen der Mischreibung mit den metallischen Kontaktflächen. Hier wirken Einflüsse der frischen, hoch reaktiven, möglicherweise katalytisch wirkenden Oberflächen. Unterstützt werden deren chemische Reaktionen von hohen Temperaturen und der Scherbelastung der Flüssigkeit. So bilden sich **Reaktionsschichten mit Trockenschmierwirkung**. Gebräuchliche EP-Zusätze sind **organische Schwefel-, Chlor- und Phosphorverbindungen** (Lit 12.2.1.1-22 und Lit. 12.2.1.1-28). Aus ihnen können Metallsulfide, -chloride oder -phosphate entstehen. Die Reaktion erfolgt mit den Spänen, auf Grund des kleinen Volumens bei großer reaktiver Oberfläche besonders intensiv. So werden die EP-Zusätze aus dem KSS getragen und ihre Konzentration sinkt. Andererseits führt ein Verdampfen der KSS zum gegenteiligen Effekt.

© Axel Rossmann – Turbocon Gulf als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Deshalb hat in geeigneten, von Zerspanungsprozess und Zerspanungsleistung abhängigen **Zeitabständen, eine Überprüfung der EP-Konzentration** zu erfolgen.

Weniger Reibung bedeutet für den Zerspanungsvorgang weniger Reibungskräfte und Reibungswärme mit mehrfachen Vorteilen:

- Geringere Aufheizung des Werkstücks und Werkzeugs.
- Weniger Werkzeugverschleiß bzw. längere Standzeiten bei gleichbleibender Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität (Rauigkeit, Eigenspannungen, Verfestigung).
- Weniger Verformung durch Wärmedehnung und Schnittkräfte.
- Weniger Maschinenleistung.
- Weniger abzuführende Wärme.

Kühlung bzw. Abführung der Zerspanungswärme: Die Kühlwirkung des KSS hängt von seiner **Wärmekapazität**, dem **Wärmeleitvermögen** und der **Verdampfungswärme** ab. Die relativ niedrige Verdampfungstemperatur des Wassers bei ca. 100°C wirkt sich auf die Kühlung zusätzlich positiv aus. Wegen dieser Eigenschaften **kühlt Wasser am intensivsten**. Mineralöle, Mineralölmischungen mit Zusätzen und Emulgatoren liegen aus dieser Sicht deutlich ungünstiger. Einen Vorteil kann bei Ölen /Schleiföl eine bessere **Benetzung** bringen. Gewöhnlich gilt: kleine Oberflächenspannung = gute Benetzbarkeit = gute Kühlung (Lit. 12.2.1.1-23). Bei wässrigen Emulsionen wirkt also das Wasser am intensivsten. Sein Anteil sollte deshalb im KSS unter dem Aspekt der Kühlung möglichst hoch sein. Wenn es jedoch gelingt, die Wärmeentstehung mit einer guten Schmierwirkung deutlich herabzusetzen, kann z.B. Schleifen mit Öl und EP-Zusätzen trotz ungünstigerer physikalischer Eigenschaften, Vorteile gegenüber wässrigen Emulsionen haben.

Verminderte Schaumbildung: Die Schaumbildung ist von der Wasserqualität stark beeinflusst. Weiches Wasser fördert die Schaumbildung. Ist die Schaumbildung zu stark, kommen in manchen Fällen **Entschäumer** („**Schaumbremse**“) auf Silikonbasis (**Silikonöl**) zum Einsatz. Der Einsatz solcher Entschäumer kann jedoch im Hinblick auf die Eindringprüfung äußerst problematisch sein (Bild 12.2.1.1.2-13, Band 4, Bild 17.3.1-8 und Bild 18.3-3).

Bild 12.2.1.1.2-13: *Der Fließtext auf Seite 12.2.1.1.2-21 und -22 beschreibt bereits wichtige positive* ***Eigenschaften des KSS****. Der nachfolgende Text konzentriert sich deshalb auf die problematischen Aspekte.*
Im Vordergrund steht die Sicherheit des Bauteils. So gesehen sind die Einflüsse auf die ***Festigkeitseigenschaften, insbesondere die Schwingfestigkeit*** *von besonderem Interesse. Temperaturen und plastische Verformungen beim Schnittvorgang hängen außer vom Werkstoff besonders von den Schmier- und Kühleigenschaften des KSS ab. Das hat u.a. Auswirkungen auf die Temperatur, die das Werkstück beim Schnittvorgang erreicht und den Verschleiß des Werkzeugs. Davon sind im Bauteil zurückbleibende unerwünschte Zugeigenspannungen, ein eventueller Festigkeitsverlust (z.B. Lösungsglühen bei Ni-Legierungen, Anlassen bei Vergütungsstählen) und eine* ***Versprödung*** *(z.B. durch* ***Sauerstoffaufnahme bei Titanlegierungen****), beeinflusst. Spanende Verfahren mit definierter Schneide können die Oberfläche überbeanspruchen und aufreißen lassen. Dies ist z.B. im Bereich von* ***Rattermarken*** *(Band 4, Bild 18.5-2) und als* ***Kommarisse*** *(Bild 12.2.1.1-2) in Nickellegierungen zu beobachten. Insbesondere* ***Schleifprozesse*** *können bei ungenügender KSS-Wirkung mit unzulässiger Werkstückerwärmung, Zugeigenspannungen und Rissbildung (Warmrisse, Bild 12.2.1.1.1-4) ablaufen.*

© Axel Poessnecker Turbocoursult Abschnittsintegral mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

Technische Probleme und Effekte im Zusammenhang mit Kühlschmierstoffen (KSS).

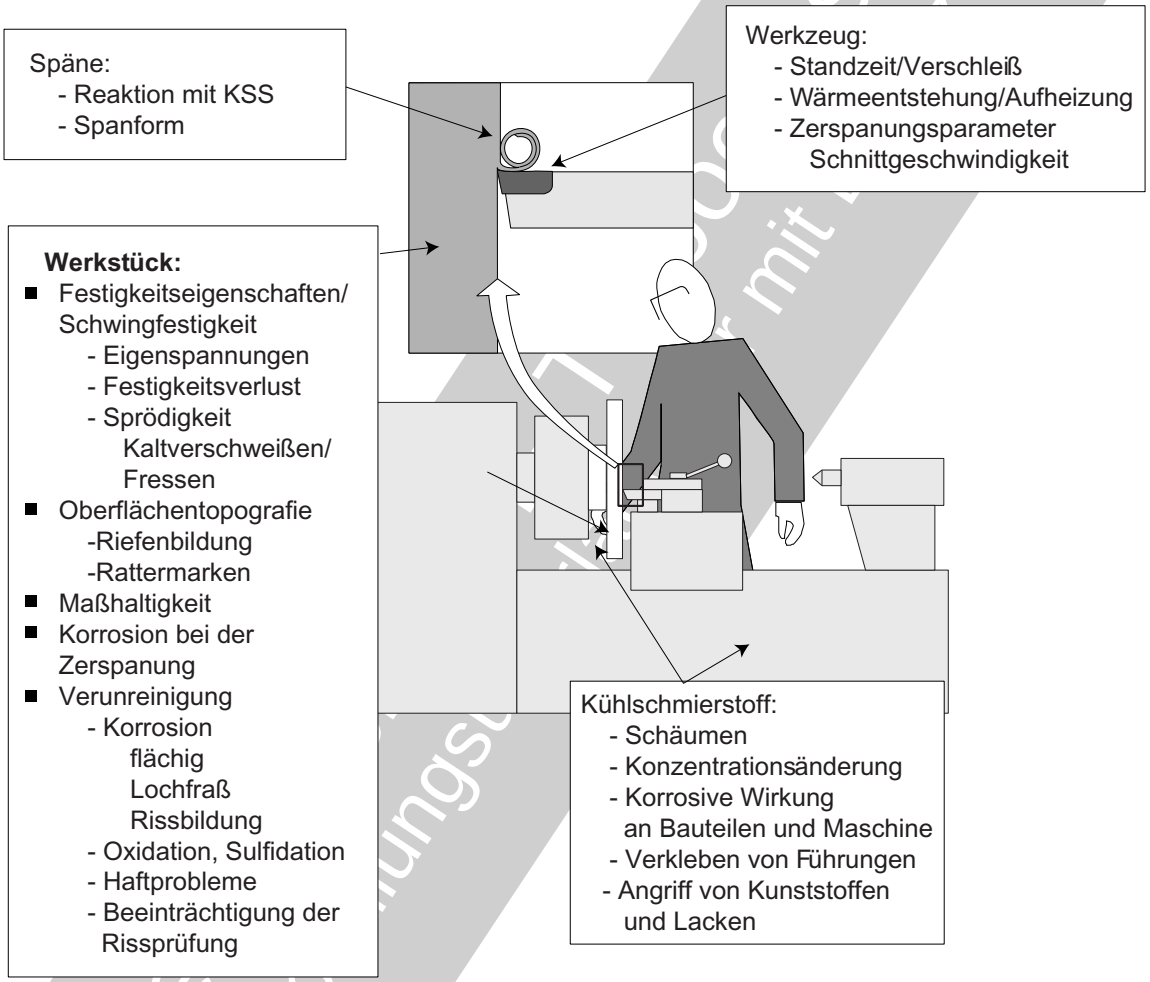


Bild 12.2.1.1.2-13

*Die **Oberflächentopografie** des Werkstücks als Rauigkeit, insbesondere aber Riefenbildung und Rattermarken (Band 4, Bild 18.5-2) wirken sich auf die Schwingfestigkeit aus. Sie sind vom KSS deutlich beeinflusst. Bei einer Zerspanung mit undefinierter Schneide, in erster Linie Schleifen, wird Rautiefe und Riefenform (Band 4, Bild 18.1-1 und Bild 18.1-7) und damit die **Schwingfestigkeit in der Hauptsache von der Schleifscheibenkörnung und der Werkstoffhärte** bestimmt. Auch die Reinheit des KSS bzw. die Abscheidung der Späne ist von Bedeutung. Verbliebene Schleifkörner im auftreffenden KSS-Strahl können kleine Marken einschlagen **(Kommabildung,** nicht zu verwechseln mit Kommarissen**;** Lit. 12.2.1.1-23**;** engl: **Peppering).** Um dies zu vermeiden, ist der KSS beim Umlauf in der Maschine kontinuierlich geeignet zu reinigen. Dies ist umso effektiver, je dünnflüssiger der KSS ist. Unter diesem Gesichtspunkt hat ein relativ zähes Schleiföl eher Nachteile.*

*Werkzeugverschleiß beeinflusst die **Maßhaltigkeit** und nicht zuletzt über die Standzeit auch die **Zerspanungskosten** (siehe auch Bild 12.2.1.1.2-1 und Bild 12.2.1.1.2-2).*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen Fräsen, Bohren

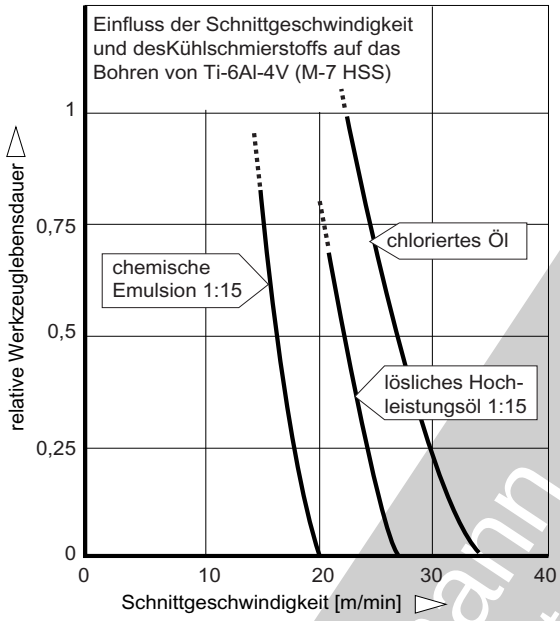
Während des Bearbeitungsprozesses kann es bereits zu ***korrosivem Angriff*** *am Werkstück kommen (Lit. 12.2.1.1-23). Korrosion kann durch KSS auf unterschiedliche Weise ausgelöst oder begünstigt werden.*
Zunächst besteht die Gefahr eines Angriffs des Bauteils, insbesondere wenn es über längere Zeit mit aggressiven KSS-Resten gelagert wird. Dabei kann es je nach Werkstoff bzw. Werkstoffzustand (z.B. Sensibilisierung), möglicher Elementbildung und Eigenspannungen vom flächigen Angriff über einen selektiven Angriff (Korngrenzen) bis zum Lochfraß und zur Spannungsrisskorrosion kommen (Band 1, Bild 5.6.1.1-1, Bild 5.6.1.1-4 und Kapitel 5.6.3.1.2). Insbesondere synthetische und teilsynthetische KSS können gegebenenfalls ***Lackierungen*** *auf unbearbeiteten Werkstückoberflächen schädigen. Eine* ***Konzentrationssteigerung als Folge des Ausdampfens*** *kann diesen Effekt verstärken.*
Schädigungsgefahr besteht auch für Kunststoffe sowie Isolations- und Dichtungswerkstoffe *der Bearbeitungsmaschine und/oder des Werkstücks. Für* ***Bauteile mit organischen Komponenten*** *(Einlaufschichten, Lacke, Dichtstoffe, Klebeverbindungen) dürfte im Rahmen von* ***Reparatur- bzw. Nacharbeitsprozessen*** *auf Grund der genannten Effekte ein erhöhtes Schadensrisiko bestehen. Wirkt KSS als* ***Elektrolyt, womit oberhalb einem pH-Wert von 8*** *unbedingt zu rechnen ist, kann sich* ***Elementbildung*** *korrosiv bemerkbar machen. Denkbar ist ein Angriff von Leichtmetallen mit (Gewinde-) Einsätzen aus Stahl (z.B.* ***Gehäuse aus Al- und Mg-Legierungen****). Korrosion im Bereich von* ***Messingteilen*** *an Bearbeitungsmaschinen gehört zu dieser Problematik. Schäden können auch von* ***Verunreinigungen durch anhaftende Reste*** *des KSS sowie von* ***Reaktionsschichten*** *ausgehen.*
Solche Verunreinigungen sind von großer, häufig unterschätzter, Bedeutung für das Werkstückverhalten im nachfolgenden Produktions- und Qualitätssicherungsprozess sowie im späteren Betrieb.

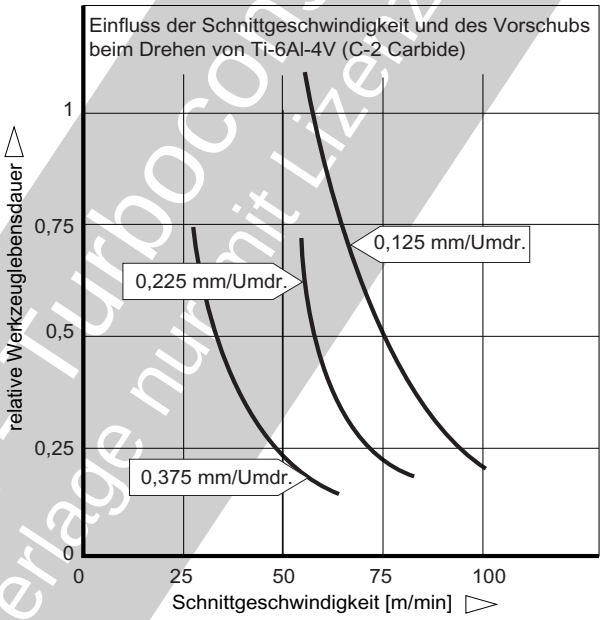
Folgt dem Zerspanungsvorgang eine Aufheizung, z.B. im Rahmen einer Wärmebehandlung oder Schweißung, können KSS-Rückstände und/oder Reaktionsschichten insbesondere mit Schwefel und Chlor ***interkristallinen Angriff und/oder Spannungsrisskorrosion*** *auslösen (Band 4, Bild 18.3-16).* ***Bei Ni-Legierungen kann eine Schwefelanreicherung zu Sulfidation führen. Diese können weitere Verfahren*** *(z.B. Beschichtungen)* ***beeinträchtigen und/oder als Vorschädigung die Betriebslebensdauer verkürzen****.*
Besonders gefährlich sind Cl-haltige Rückstände auf Titanlegierungen. Bei Temperaturen oberhalb 450°C und ausreichend hohen Zugeigenspannungen, die man nicht immer ausschließen kann, ist mit Spannungsrisskorrosion zu rechnen *(siehe auch Band 4, Bild 18.3-16).*
Schwefelhaltige KSS lassen auf Buntmetallen und Bronzen (z.B. Gleitlagerwerkstoffe) sowie auf Silber dunkle Beläge entstehen. In engen Spielen kann das bis zum Klemmen führen (Lit. 12.2.1.1-23). ***Silbersulfid hat, anders als metallisches Silber keine Schmierwirkung.*** *Damit wird das Anzugsmoment von Verschraubungen und das Verhalten von Gleitflächen im Betrieb verschlechtert. Ungenügende Vorspannung von Schrauben, Fressen und katastrophales Versagen von Bewegungsflächen (z.B. in Kraftstoffpumpen nach dem Axialkolbenprinzip) ist die Folge.*
Ein Sonderproblem entsteht in der Anwendung von ***Silikonen als Schaumbremse****. Verbleiben Rückstände auf den Werkstücken, kann erfahrungsgemäß die* ***Benetzbarkeit merklich verschlechtert*** *werden. Das macht* ***die Eindringprüfung*** *zumindest fragwürdig. Derartige Rückstände können von Reinigungsbädern, auf denen sie als Film schwimmen, auf andere Bauteile übertragen werden (Band 4, Bild 17.3.1-8 und Bild 18.3-3). Das kann große Auswirkungen auf Zusatzkosten einer intensiven Reinigung und den Produktionsablauf haben.*

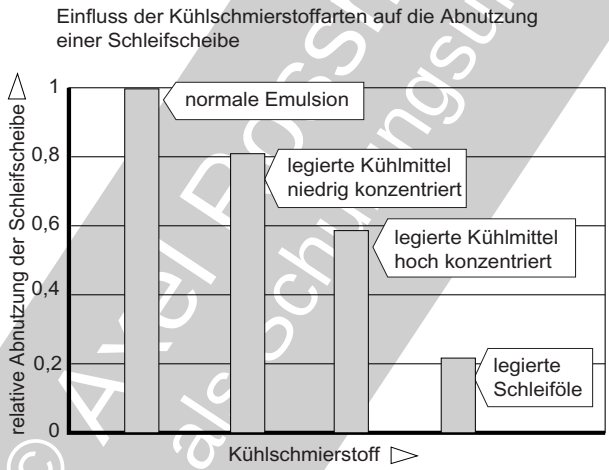
© Alle Rechte bei Autor - Tu Bosch - Nur zur Nutzung als Lehrmaterial

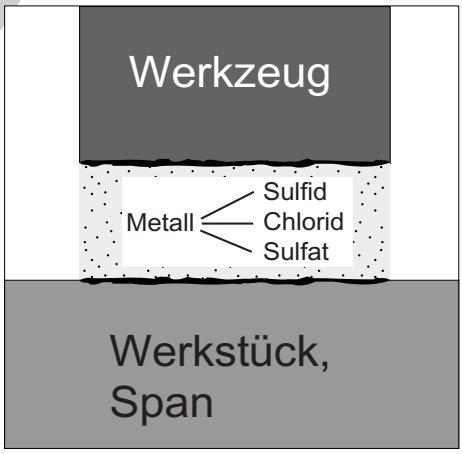
Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

Kühlschmierstoffe können die Werkzeuglebensdauer deutlich verlängern. Das ist aber kein Argument für Risiken.









Wirkmechanismus von Kühlschmierstoffen: chemische Reaktionen; Reaktionsschicht

Bild 12.2.1.1.2-14

© Axel Bossmann - Turbocons
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 12.2.1.1.2-14: *Die* ***Werkzeuglebensdauer*** *ist von der Verschleißwirkung durch Werkstück und Späne auf die metallische Werkzeugschneide bestimmt. Nickellegierungen und insbesondere Titanlegierungen neigen zum Kaltverschweißen (Fressen, Lit. 12.2.1.1-24) und sind damit sehr verschleißintensiv. Der Verschleiß ist u.a. abhängig von der Schnittgeschwindigkeit und dem Vorschub (Diagramm oben rechts, Lit. 12.2.1.1-2). Dabei scheint ein optimaler Zwischenwert für die Zustellung zu existieren. Um eine möglichst hohe Schnittge-*

schwindigkeit mit entsprechend hoher Zerspanungsleistung bei akzeptabler Werkzeuglebensdauer zu erreichen, liest man immer wieder in der Fachliteratur von der Anwendung eines ***KSS mit chlorhaltigen Zusätzen*** *(Diagramm oben links, Lit.12.2.1.1-2 und Lit 12.2.1.1-24). Solche Zusätze bilden unter Schnittbedingungen, wie bereits beschrieben, Reaktionsschichten (Skizze unten rechts, Lit. 12.2.1.1-21, Bild 12.2.1.1.2-14), die als Trockenschmierstoff wirken und den Verschleiß mindern. Wegen der* ***Spannungsrisskorrosionsgefahr*** *bei nachfolgender Wärmeeinwirkung (Lit 12.2.1.1-25, Band 4, Bild 18.3-16 und Bild 12.2.1.7-8) und/oder im Betrieb ist von solchen KSS jedoch* ***für die Bearbeitung von Titanlegierungen unbedingt abzusehen****. Im Gegenteil ist auf eine sehr niedrige Grenzkonzentration zu achten (Lit. 12.2.1.1-1, siehe Merksatz). Vorsicht ist auch* ***bei schwefelhaltigen KSS*** *geboten. Es steht zu befürchten, dass schwefelhaltige Reaktionsschichten z.B. bei Nickellegierungen, möglicherweise im Zusammenhang mit nachfolgenden Wärmebehandlungen, im späteren Betrieb Sulfidation auslösen. Mit einer Verkürzung der Inkubationszeit nimmt die Betriebslebensdauer entsprechend ab.*

Beim ***Schleifen*** *lässt sich mit legierten KSS, insbesondere* ***Schleifölen****, die Abnutzung der Schleifscheibe entscheidend vermindern (Schaubild unten links, Lit. 12.2.1.1-23). Auch hier gilt die Vermeidung von Cl, S und anderen reaktiven Zusätzen die das Betriebsverhalten des Bauteils beeinträchtigen können.*

Merksatz:

Nur zugelassene Kühlschmierstoffe verwenden. Produktwechsel muss die zuständige Fachabteilung zulassen.

Besondere Vorsicht bei

- chlorhaltigem Anteil: Der Cl-Gehalt muss unter 0,01 % liegen,
- schwefelhaltigem Anteil,
- Silikonzusätzen (Entschäumungsmittel)

Bild 12.2.1.1.2-15: *Im Triebwerksbau werden brand- und explosionsgefährliche Werkstoffe wie Titan- oder Magnesiumlegierungen spanend bearbeitet. Sie sind in Form von Spänen an Luft entzündlich und als Staub explosiv. Ansammlungen trockener Magnesiumspäne (****Spänenester,*** *Zündtemperatur ab 480°C) können sich bei Zerspanungstemperatur entzünden. Mit* ***CO_2, oder Stickstoff kann Titan- oder Magnesiumstaub*** *in einer stark exothermen Reaktion explosionsartig Karbide oderNitride bilden (Lit. 12.2.1.1-27). Damit sind auch diese Gase als etwaige Schutzgase in Werkzeugmaschinen problematisch. Auch* ***Feuchtigkeit*** *verhindert Brände nicht.* ***Löschversuche mit Wasser sind gefährlich****. Es bildet sich* ***Wasserstoff*** *und mit Luft ein äußerst explosives* ***Knallgasgemisch****.*

Eine weitere Möglichkeit für Brände und Verpuffungen ist die ***Zündung des KSS.*** *Das gilt besonders für* ***KSS-Nebel*** *(Schneidöl). Es kommt zu* ***Verpuffungen*** *mit Druckanstieg. Die*

© Axel Bertram - Technische Universität Clausthal - Institut für Maschinenkonstruktion und Konstruktionslehre

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

Soweit darf es nicht kommen. Austretendes Feuer nach der Entzündung des KSS-Ölnebels beim Schleifen eines Werkstücks aus einer Titanlegierung.

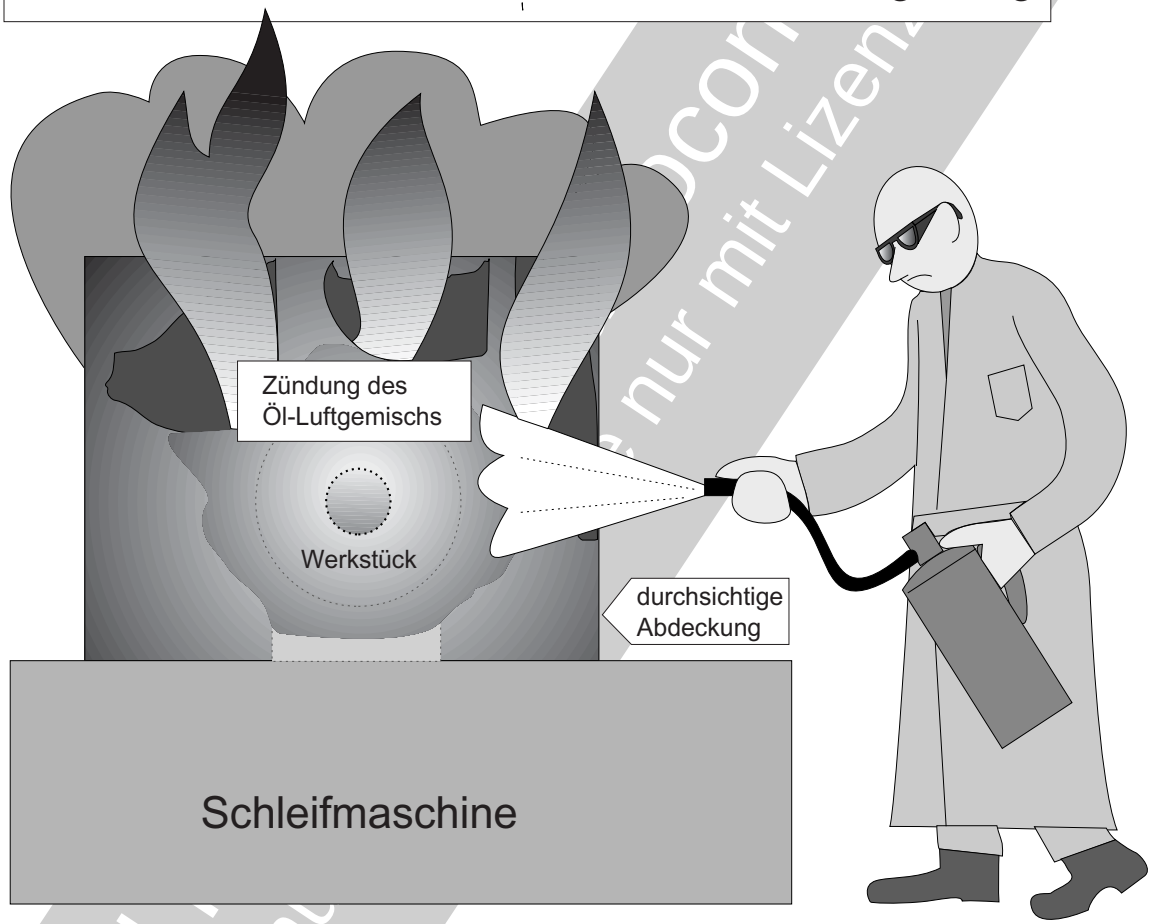


Bild 12.2.1.1.2-15

*Brandgefahr beruht auf der **Verteilung des Ölnebels** und auf der **Zündtemperatur**. Sie ist vom zerspanten Werkstoff unabhängig. Es darf jedoch angenommen werden, dass speziell Titanfunken wegen ihrer großen Hitzeentwicklung im Flug, ein hohes Zündrisiko darstellen.*

*Je niedriger der **Flammpunkt des KSS** (häufig unter 150°C) umso leichter ist es zu zünden. Flammpunkte unter 100 °C gelten für brennbare Flüssigkeiten mit besonderen Sicherheitsauflagen. Der Flammpunkt kann von einem **Alterungsprozess** bei der Zerspanung weiter abgesenkt werden. Ist eine Entzündung erfolgt, brennen auch KSS mit deutlich höheren Flammpunkten (>200°C).*

Wasser-KSS-Gemische sind erst ab zweistelligen Zumischraten des KSS ein Brandrisiko.

*Die häufigsten **Zündquellen** sind **Werkzeugbruch, Ausfall der KSS-Zufuhr oder Programmierfehler der Werkzeugmaschine**.*

Gegen Explosionen und Brände in Werkzeugmaschinen gibt es erfolgreiche Strategien (Bild 12.2.1.1.2-15, Lit. 12.2.1.1-27).

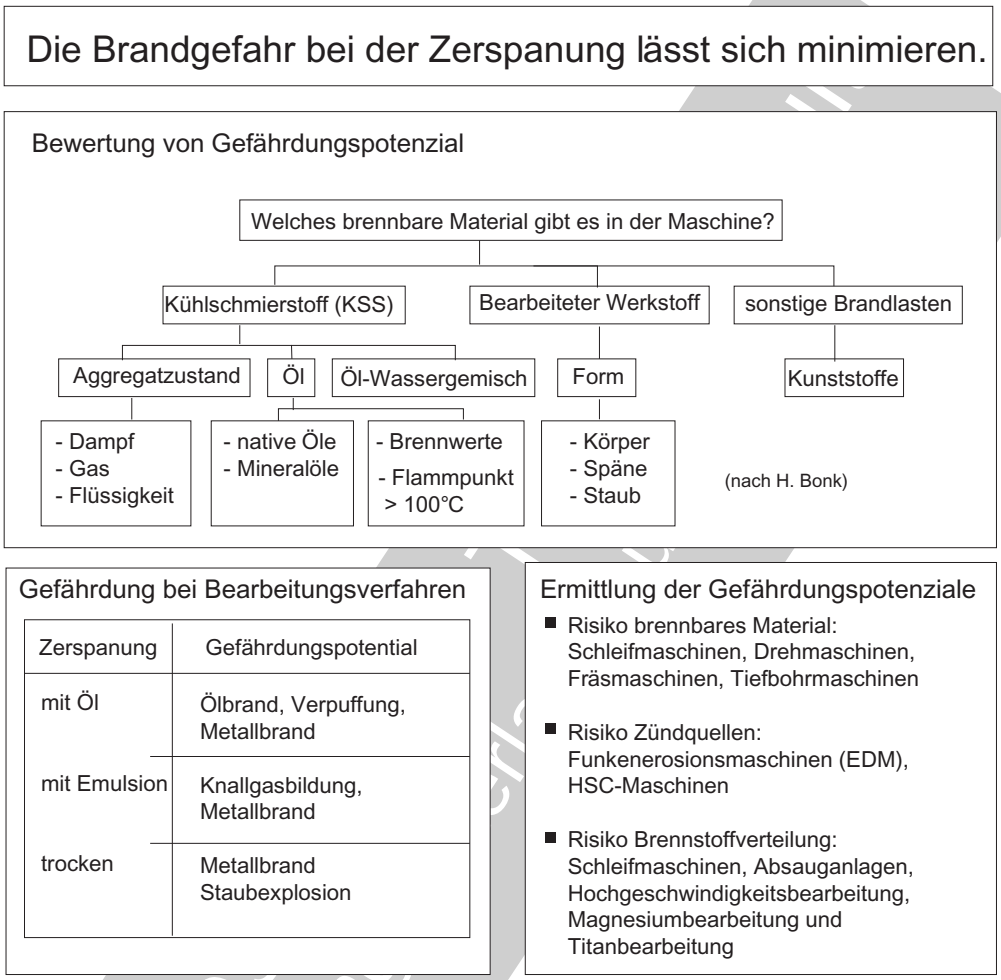


Bild 12.2.1.1.2-16

Bild 12.2.1.1.2-16 *(Lit. 12.2.1.1-27): Das* ***Gefährdungspotenzial*** *eines Zerspanungsvorgangs durch Brand und/oder Explosion ist von mehreren Einflüssen abhängig (Rahmen oben). Neben Risiken des* ***zerspanten Werkstoffs*** *(Bild 12.2.1.1.2-13), der* ***Zündquelle*** *und der* ***Brennstoffverteilung*** *(Rahmen unten rechts) spielt das* ***Bearbeitungsverfahren*** *(Rahmen unten links) eine Rolle. Am gefährlichsten sind* ***brennbare Kühlschmierstoffe*** *wie Mineralöl oder native Öle.*

Das ***CE-Zeichen*** *auf der Maschine sagt aus: „Die Maschine muss so konzipiert sein, dass jegliche von der Maschine selbst oder durch Gase, Flüsigkeiten, Dämpfe, Stäube oder anderen von der Maschine freigesetzten oder verwendeten Substanzen verursachte Brand-Überhitzungs- oder Explosionsgefahr vermieden wird.“*

Die Einhaltung dieser Richtlinie garantiert nur die Mindestsicherheitsstandards, ein Restrisiko wird toleriert.

Das Risiko von ***Explosionen wird mit vorbeugenden Maßnahmen*** *begrenzt. Darüber hinaus sind* ***konstruktive Maßnahmen*** *möglich.*

Gegen Brände werden in die Werkzeugmaschinen ***kleine Löschsysteme integriert****. Sie reagieren so schnell (Millisekunden bis Sekunden), dass Schäden minimiert werden. Flutzeiten von* ***Gaslöschanlagen****, um Rückzündungen zu vermeiden, liegen bei 30 Sekunden.*

Für kürzeste Reaktions- bzw. Löschzeiten ist ein im Löschsystem ***integriertes automatisches Detektionssystem*** *wichtig.*

Die Erfahrung zeigt, dass ***Modellbetrachtungen im Labormaßstab nicht ausreichend*** *realistisch sind.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

Industrielle Züchtung von Mikroorganismen der unerwünschten Art. Deren Herkunft ist vielfältig.

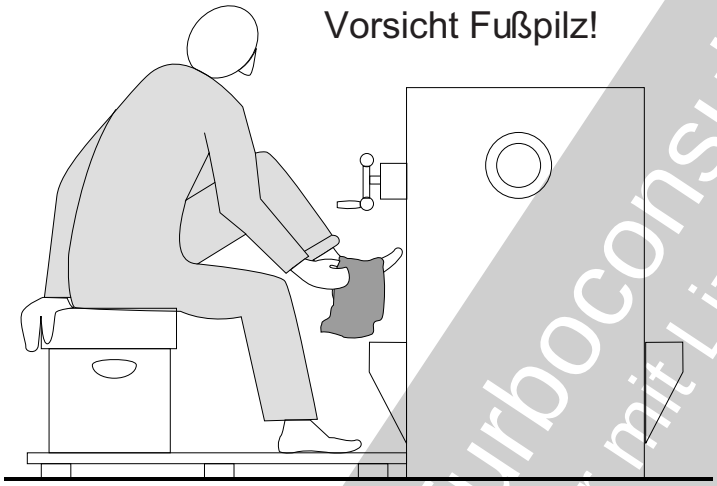
Bild 12.2.1.1.2-17

Bild 12.2.1.1.2-17 *(Lit. 12.2.1.1-31): Für die spanende Bearbeitung spielen* ***Öl-Wasser-Emulsionen*** *als KSS (Bild 12.2.1.1.2-14) eine bedeutende Rolle. Sie sind jedoch mehr als reine Öle für die Bildung von Mikroorganismen empfindlich. Sie zersetzen den KSS chemisch. So beeinträchtigen sie entscheidend die erwünschten Eigenschaften, insbesondere die* ***Schmierwirkung****. Äußerlich macht sich dies durch eine ausgeprägte Trübung und ungewöhnlich unangenehmen Geruch bemerkbar.*

*Man spricht von einem '****Zusammenbruch****' der Emulsion. Dabei wachsen die Öltröpfchen und es kommt zur* ***Entmischung des Öls vom Wasser****. Sinkt der* ***pH-Wert*** *vom leicht basischen in den sauren Bereich entsteht* ***Korrosionsgefahr****. Es kommt zum* ***Rosten*** *der Bearbeitungsmaschinen und Werkstücke sowie erhöhtem* ***Verschleiß*** *wegen der ungenügenden Schmierwirkung.*

Eine Verunreinigung des KSS mit schädigenden Keimen kann auf vielfältige Weise geschehen (Beispiel 12.2.1.1-1). Dabei bedeutet Trinkwasserqualität bei der Anmischung jedoch kein Risiko. Besonders übel sind nach einem Wechsel im System verbliebene Reste infizierten KSS. Das kann in wenigen Wochen als Folge eines sofort eintretenden exponentiellen Wachstums wieder zur Unbrauchbarkeit führen. Schon die KSS-Kosten verbieten aber einen häufigen Wechsel. Dieser Effekt wird von einem ***Nachfüllen*** *der verbrauchten KSS noch unterstützt.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen Fräsen, Bohren



***Beispiel 12.2.1.1.2-1**: In einer spanenden Herstellung von Triebwerksteilen kam es trotz modernster Werkzeugmaschinen und Anlagen wiederholt zu extremer Bildung von Mikroorganismen im KSS. Weil die Zerspanungsmaschinen an einer großen **Zentralversorgung** des KSS angeschlossen waren, war von dem Ausfall ein großer Teil der Maschinen betroffen. Dabei veränderte sich der KSS und Geruchsbelästigung trat auf. Örtlich traten im System massive **gallertige Ablagerungen** auf. Das ging bis zur **Verstopfung.**.*

*Die Probleme entstanden in den **Sommermonaten bei großer Hitze**. Eine Recherche ergab, dass das Phänomen offenbar im Zusammenhang mit der nicht bekannten Angewohnheit mancher Werker bestand, sich die **Füße in dem KSS zu waschen**. Damit lag die Vermutung nahe, dass **Fußpilz** in die Anlage geriet und sich dort vermehrte (Bild 12.2.1.1-15).*

*Im Betrieb werden bei Sauerstoffzufuhr (Schaumbildung) andere, weniger problematische Mikroorganismen (aerobe) unterstützt als im **Stillstand** (anaerobe). Diese wirken sich sehr negativ auf die Eigenschaften des KSS aus. Sie bilden Schwefelwasserstoff mit dem typischen unangenehmen **Geruch fauler Eier**.*

***Typische Keime in KSS** sind:*

*Am häufigsten sind Keime die beim Herstellen der Emulsion während des **Mischens des Öls mit Wasser** eingebracht werden.*
*Sog. **Sporenbilder** sind besonders widerstandsfähig und können deshalb **mit der Luft** zugeführt werden.*
*Mit der Luft werden auch **Hefen und Schimmelpilze direkt oder an Staub** haftend transportiert.*

*Selbst das Auftreten von **Salmonellen** wird nicht ausgeschlossen.*
*Solange Sauerstoff im KSS vorhanden ist entsteht durch die aeroben Mikroorganismen lediglich eine braune Verfärbung und ein Ölfilm an der Oberfläche. Der Zusammenbruch des KSS mit Bildung von **Schwefelwasserstoff** (Geruch) , **Versäuerung und Schwarzfärbung** (Eisensulfid) erfolgt erst durch Schwefelbakterien unter Sauerstoffmangel. Sie werden erst aktiv, nachdem der Sauerstoff von den anderen Mikroorganismen verbraucht wurde.*
*Die **Überwachung des KSS** erfolgt deshalb bereits in der aeroben Phase durch ständige Kontrollen. Dabei ist die Zahl der Keime wegen ihrer exponentiellen Vermehrung das Kriterium.*
*Weil die Keime im KSS auch für die Mitarbeiter **gesundheitsbedenklich** sind, muss dieses auch auf solche '**Problemkeime**' untersucht werden.*

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Drehen, Fräsen, Bohren

Untersuchungen zeigten, dass das größte ***Infektionsrisiko*** *(eiternde Entzündungen) bei Hautverletzungen, insbesondere Schnitte an den Händen, von kontaminierten Bohrölemulsionen ausgeht.*
Bei unzureichender Hygiene können über die Hände oder Kleidung Hefen und Pilze aufgenommen werden. Auch von Hautallergien können gesundheitsschädliche Keime z.B. in das Essen gelangen.
Werden Keime aus stark infizierten ***KSS-Nebeln eingeatmet,*** *sind allergische Reaktionen und Fieber möglich.*

Der ***Nachweis von problematischen Keimen*** *in Ölemulsionen erfolgt wie bei Lebensmitteln. Dabei bringt man einen geeigneten Nährboden, vorzugsweise ein sog. Universalnährboden, mit der Emulsion in Kontakt. Dies kann verfahrensabhängig auf unterschiedliche Weise geschehen. Für eine grobe Schätzung genügt das „dip slide"-Verfahren, bei dem ein nährbodentragender Objektträger in das KSS getaucht wird. Die Auswertung erfolgt nach einiger Zeit in einem Brutschrank. Hefe- und Schimmelpilzbefall weisen auf die Möglichkeit einer Hautbeeinflussung hin.*

Mikrobielle Verunreinigungen sind in Kühlschmierstoffen ***nicht vollkommen vermeidbar****. Ihr Konzentration ist jedoch möglichst gering zu halten. Dafür nutzt man geeignete* ***Desinfektionsmittel*** *(Biozide). Ihre Konzentration im KSS ist auf den jeweiligen Fall abzustimmen. Bei einer Unterdosierung besteht die Gefahr resistenter Keime, aber auch eine Überdosierung ist zu vermeiden.*

Für die gründliche ***Reinigung und Neufüllung*** *eines betroffenen KSS-Systems (Leitungen und Behälter) verwendet man mechanische Verfahren. Alle* ***Schmutzkrusten und Beläge*** *sind als Keimnester sicher zu entfernen. Danach ist ausgiebig zu* ***spülen****, bevor eine Desinfektion vor der frisch angesetzten Neubefüllung erfolgt. Bei einer Anmischung auf* ***Vorrat besteht die Gefahr****, dass sich bereits zu viele Keime während der Lagerung gebildet haben.*
Bei ***Stillstand der Maschinen*** *muss im System ausreichend Sauerstoff vorhanden sein (****Belüftung****), um die besonders schädlichen Schwefelorganismen zu verhindern.*

© Axel Rossmann - Turbocon sult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 12.2.1.1.2

12.2.1.1.2-1 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 61, 63, 104, 240.

12.2.1.1.2-2 M.Field, J.F.Kohles, W.P.Koster, „Surface Finish and Surface Integrity“, ASM Handbook Vol.16 „Machining“ , ASM International, ISBN 0-871170-377-7, 1989, Seite 19-36.

12.2.1.1.2-3 A.A.Kendall, „Tool Wear and Tool Life“, ASM Handbook Vol.16 „Machining“ ASM International, ISBN 0-871170-377-7, 1989, Seite 37-48.

12.2.1.1.2-4 „Regenerativeffekt“, Ahrrp://de.wikipedia.org/wiki/Regenerativeffekt, Stand Sept. 2011, 1 Seite.

12.2.1.1.2-5 J.Lil, „Versuch - Ratterschwingungen an Werkzeugmaschinen“, April 2006, www.ifwe.uni-hannover.de/.../AML-Skript_Ratterschwingungen.pdf, Seite 1-17.

12.2.1.1.2-6 „Standzeit“, Ahrrp://de.wikipedia.org/wiki/Standzeit, Stand Juli. 2012, 1 Seite.

12.2.1.1.2-7 H.Fritz, G.Schulte, „Fertigungstechnik“, 9. unbearbeitete Auflage 2010, Springer Verlag Heidelberg Dordrecht, London New York, ISBN 978-3-642-12879-0, Seite 271.

12.2.1.1.2-8 S.Nachtmann, „Metal Cutting and Grinding Fluids“, ASM Handbook Vol.16 „Machining“ ASM International, ISBN 0-871170-377-7, 1989, Seite 121-132.

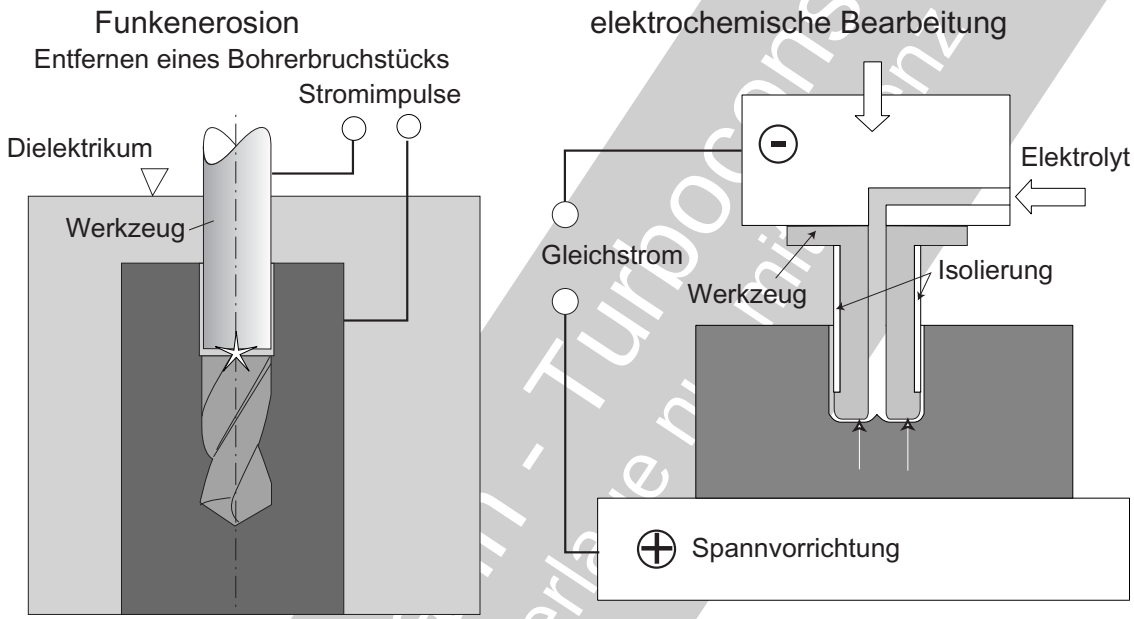
12.2.1.1.2-9 „Entwicklung leicht bearbeitbarer Titanlegierungen - Automatentitan“, Institut für Werkstoffe (IfW) der TU-Braunschweig, 2009, www.tu-braunschweig.de/ifw/forschung/neuewerkstoffe/automatentitan, Seite 1-3.

12.2.1.1.2-10 „Metallspan“, http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/2506917, Stand 2012, Seite 1-5.

12.2.1.1.2-11 A.Geiss, „Spanbildung - Spanvolumen, Spanraumzahl“, SFT 02,2002, FH - Deggendorf, fhmaschinenbau.fh.funpic.de/2.../SFT%2002%20Spanbildung.pdf, Seite 1-9.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.2 Funkenerosiver (EDM) und elektrochemischer (ECM) Abtrag



ECM und **EDM** sind Bearbeitungsverfahren unter direkter Einwirkung elektrischen Stroms auf die abzutragende Werkstückoberfläche ohne mechanische Spanbildung. Sie werden in einem gesonderten Kapitel behandelt, weil sie unter den vielfältigen, heute zur Verfügung stehenden „nichttraditionellen“ Bearbeitungsverfahren im Triebwerksbau besonders häufig zur Anwendung kommen. ECM und EDM unterscheiden sich im Wirkprinzip und in der Festigkeitsbeeinflussung der Werkstückoberfläche, wie Schädigung durch Gefügeveränderungen und Eigenspannungen, fundamental. Gemeinsam haben beide Verfahren den fertigungstechnischen Vorteil, auf relativ einfache und preiswerte Weise komplexe Oberflächen und Bohrungsquerschnitte auch in schwer spanend bearbeitbare Werkstoffe wie Ni-Legierungen und hochfeste Titanlegierungen einzubringen.

Funkenerosion (engl. Electrical Discharge Machining = EDM) ist ein Abtragungsverfahren das sich der Erosionswirkung elektrischer Funken bedient (Lit. 12.2.1.2-1 und Lit. 12.2.1.2-3). Dabei wird eine elektrisch leitende Formelektrode, die auch als durchlaufender Draht gestaltet sein kann (Drahterodieren), in einem geringen Abstand über der abzutragenden Fläche positioniert. Elektrode und Werkstück befinden sich in einer nichtleitenden Flüssigkeit (Dielektrikum, meist Petroleum). Ein Stromstoß erzeugt zwischen Werkstück und Elektrode einen **Mikrolichtbogen** bzw. **Funken**. Um diesen bildet sich eine Dampfblase des verdampfenden **Dielektrikums**. Im Lichtbogen schmilzt und verdampft Material von Werkstück und Werkzeug. Damit verändert sich auch die Form des Werkzeugs, was in der Verfahrensanpassung zu berücksichtigen ist. Der kondensierte Metalldampf und die Mikroschmelztropfen werden vom Dielektrikum mit den Druckschwankungen beim Entstehen und Zusammenbrechen der Dampfblase ausgeschwemmt. Die Mikrokrater bestimmen neben anhaftenden erstarrten Schmelztröpfchen die meist nicht zu vernachlässigende Rauigkeit der EDM-Fläche.

Die dünnen Schmelzzonen nehmen Kohlenstoff aus dem Dielektrikum auf. Das führt zu einer extremen Aufhärtung, Versprödung, hohen Zugeigenspannungen und Rissbildung in der

Erstarrungsschicht (engl. „**Recast Layer**“). Diese Effekte beeinflussen die Bearbeitungsfläche in mehrfacher Hinsicht (Bild 12.2.1.2-1). Insbesondere wird die **Schwingfestigkeit in hohem Maß beeinträchtigt**. Damit kann die Sicherheit dynamisch nennenswert beanspruchter Bauteile betroffen sein (Bilder 12.2.1.2-2 bis 12.2.1.2- 6).

Die Eigenschaft auch komplexe unsymmetrische Querschnitte kleiner Bohrungen auf einfache Weise herzustellen, motiviert zur Anwendung des Verfahrens auch an dynamisch hochbelasteten Bauteilen wie Rotorscheiben und Schaufeln. Leider sind aber gerade Bohrungen wegen der Kerbwirkung oft besonders hoch belastet und deshalb von Schädigungen gefährdet. Typische Beispiele sind in Bild 12.2.1.2-5 dargestellt. Natürlich wird man durch eine abtragende Nacharbeit, abhängig von der Zugänglichkeit, die geschädigte Zone entfernen. Verfahren der Wahl sind wegen der extremen Härte und damit großem Verschleiß von Schneidkanten, Schleifen, abrasives Strahlen oder Druckfließläppen. Wie problematisch trotzdem eine Nacharbeit sein kann zeigt das Beispiel in Bild 12.2.1.2-6.

Elektrochemische Bearbeitung (engl. Electrochemical Machining = ECM) ist der kontrollierte Materialabtrag durch anodische Auflösung in einem elektrolytischen System. Das Bauteil dient dabei als Anode, das Werkzeug als Kathode (Lit. 12.2.1.2-1 und Lit. 12.2.1.2-3, Bild 12.2.1.2-8). Das gelöste Material wird vom Elektrolytstrom aus dem Spalt zwischen Werkzeug und Werkstück transportiert (Lit.12.2.1.2-3). Ein nennenswerter Verschleiß der Werkzeugelektrode findet nicht statt.

Eine rein chemische Auflösung ohne angelegte Spannung wird als **chemisches Fräsen** (engl. chemical milling = CHM) bezeichnet.

ECM-Bearbeitungsflächen weisen prinzipbedingt keine Verfestigung auf, somit sind auch keine Eigenspannungen induziert worden (Bild 12.2.1.2-7). Mit der richtigen Wahl der Prozessparameter und des Elektrolyten lässt sich schädlicher selektiver (korrosiver) Angriff vermeiden. Damit ist eine Beeinträchtigung der Schwingfestigkeit, bis auf den möglichen **Abbau bereits vorhandener Druckeigenspannungen bzw. Verfestigungszonen** von einem vorhergehenden Zerspanungs- oder Verfestigungsvorgang, nicht zu erwarten.

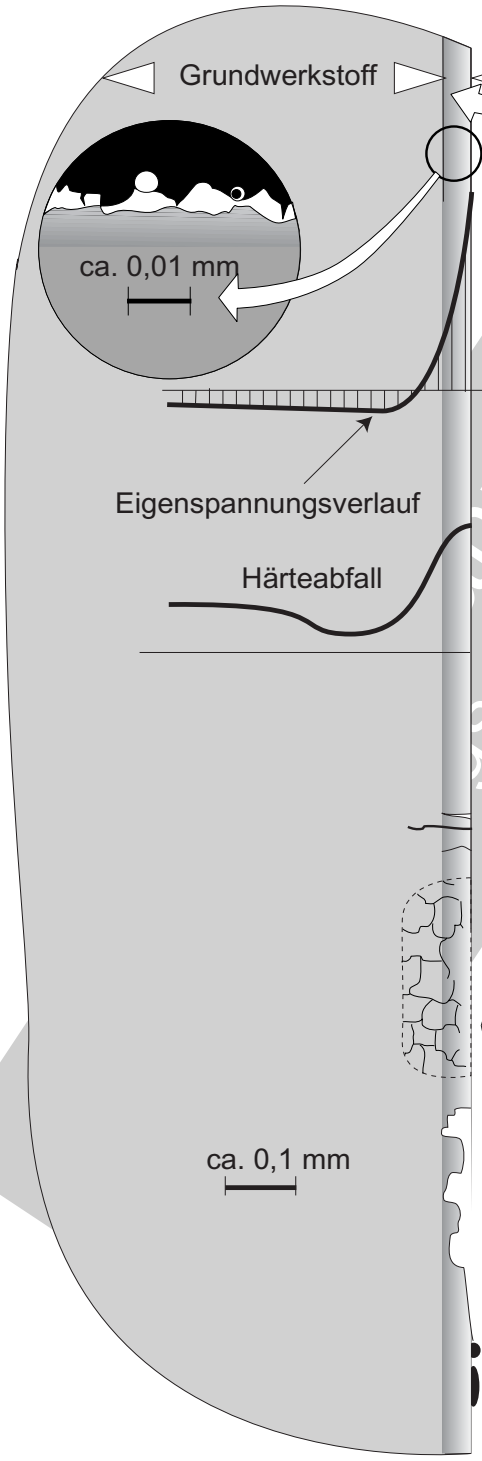
© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 12.2.1.2-1: *Es ist davon auszugehen, dass beim EDM-Verfahren die Eigenschaften der Bearbeitungsfläche vom Mikrolichtbogen deutlich schädigend verändert werden. Potenziell ist bei* ***EDM-Bearbeitung immer mit einem Abfall der Schwingfestigkeit zu rechnen.*** *Das ist in der Auslegung/Konstruktion zu berücksichtigen. Auch von einer Nacharbeit ist erfahrungsgemäß keine vollständige Wiederherstellung der „surface integrity“ zu erwarten (Bild 12.2.1.2-6)*
Grundsätzlich treten zwei Haupteffekte auf:
Eine kurzzeitig aufgeschmolzene und ***wiedererstarrte Zone (engl. „Recast Layer“)****, die bei üblichen Prozessdaten dünner als 0,01 mm ist (Detail oben). Die Metallschmelze nimmt aus dem gecrackten Dielektrikum Kohlenstoff auf. Das führt zur Aufhärtung, in Stählen infolge Martensitbildung, in Ni-und Ti-Legierungen durch Karbidbildung. Mit der Aufhärtung geht auch eine Versprödung einher. Als Folge der Schrumpfung bei Erstarrung und Abkühlung wirken im „Recast Layer“ hohe Zugspannungen die Mikrorisse auslösen können. Diese Risse können auch in das nicht aufgeschmolzene Grundmaterial verlaufen (Lit. 12.2.1.2-6).*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.2-4

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - ECM und EDM

Einflüsse funkenerosiver Bearbeitung (EDM) auf die Bauteiloberfläche.



Beeinflusste Tiefe =
Wiedererstarrte Zone ("Recast Layer")
+ **wärmebeeinflusste Zone**:
Dicke je nach Bearbeitungsintensität
bis 0,2 mm bei "Schruppvorgang",
ca. 0,01 mm bei Endbearbeitung.

Induzierung hoher **Zugeigenspannungen** beim Erstarren des "Recast Layers" und bei plastischer Stauchung der wärmebeeinflussten Zone während der Aufheizung.

Im **"Recast Layer" Aufhärtung**: Bei Vergütungsstählen in erster Linie durch Martensitbildung und/oder **Aufkohlung.** Bei austenitischen Stählen und Ni-Legierungen durch **Karbidbildung.**
In der **wärmebeeinflussten Zone Härteabfall**: Bei Vergütungsstählen Härteabfall durch Anlasseffekt

Rissbildung: Spröde klaffende Risse im "Recast Layer", Risse in den Grundwerkstoff, häufig gefügeorientiert

Gefügeveränderung durch Temperatureinwirkung. Veränderung von Eigenschaften wie Zähigkeit und Korrosionsverhalten, gegebenfalls im Zusammenhang mit dem Recast Layer.
Der Recastlayer dürfte auch das Korrosions- und das Oxidationsverhalten beeinflussen.

Rauigkeit und Kerben durch Schmelzkrater: Einfluss auf eine Strömung, Kerbwirkung mit Abnahme der Schwingfestigkeit.

Spritzer: Verunreinigungsgefahr im Betrieb, z.B. in Lagern oder in Öl- und Kraftstoffsystemen.
Rauigkeit: Auswirkung auf sensible Strömungsverhältnisse im Betrieb, z.B. in Kühlluftbohrungen.

Bild 12.2.1.2-1

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - ECM und EDM

Fortsetzung von Seite 12.2.1.2-2

Unterhalb des „Recast Layers“ befindet sich eine ***wärmebeeinflusste Zone*** *von etwa gleicher Dicke.*

Die Temperatureinwirkung kann in dieser wärmebeeinflussten Zone zu Gefügeveränderungen wie Anlasseffekte bei Stählen und Lösungsglühen bei Ni-Legierungen, führen. Mit einem solchen Härteabfall dürfte auch ein Festigkeitsabfall einhergehen. Andererseits ist mit einem Anstieg der Zähigkeit zu rechnen.

Eine Gefügeveränderung in der wärmebeeinflussten Zone kann im Zusammenspiel mit einem stark abweichenden ***Korrosionsverhalten*** *des „Recast Layers“ auch den Korrosionsangriff im Grundmaterial beeinflussen. Auch das Oxidationsverhalten kann sich im Bereich des oxidationsempfindlichen „Recast Layer“ verschlechtern oder wenn der Aufbau einer optimalen Al-Diffusionsschicht behindert wird. Auch in galvanischen Beschichtungen dürften Reste von „Recast Layer“ Schichtfehler auslösen.*

Mikrokrater und Ausbrüche des „Recast Layers“ können sich als Kerben bemerkbar machen.

Die ausgeprägte Rauigkeit von EDM-Flächen kann die Strömung in „funktionssensiblen“ ***Kühlluftbohrungen*** *unzulässig beeinflussen. Beispiel sind Bohrungen für den äußerst sensiblen Luftschleier in Brennkammern (Band 4, Bild 18.2-7). Dieser kann einen Teil seiner schützenden und den Verbrennungsvorgang günstig beeinflussenden Wirkung verlieren.*

Platzen im Betrieb Partikel des „Recast Layers“ ab und geraten diese in das Öl- oder Kraftstoffsystem, kann es zum ***Blockieren eng tolerierter Gleitsysteme****, z.B. in* ***Reglern*** *und* ***Axialkolbenpumpen****, kommen. Dass* ***Lagerschäden*** *ausgelöst werden, ist bei den zu erwartenden sehr feinen Partikeln eher weniger wahrscheinlich.*

Bild 12.2.1.2-2 *(Lit. 12.2.1.2-2): Bearbeitungsverfahren haben einen erheblichen Einfluss auf die* ***Schwingfestigkeit*** *eines Bauteils. Dies liegt zum einen an positiv oder negativ wirkenden Effekten. Zum anderen an den, an der Oberfläche besonders hohen, häufig auftretenden Biegespannungen. Das Diagramm zeigt für die hochfeste Titanlegierung Ti-6Al-4V einige typische verfahrensabhängige Schwingfestigkeiten.*

Die Schwingfestigkeit ist von der Dauerfestigkeit (HCF-Bereich) charakterisiert. Diese reagiert auf eventuelle Schädigungen empfindlicher als Belastungen im LCF-Bereich. Mit einem vorsichtigen ***Schleifprozess*** *(Bearbeitungsrichtung quer zur Schwingspannung), ausreichender Kühlung und sehr moderaten Schleifparametern wie Umfangsgeschwindigkeit der Scheibe und Zustellung bzw. Schnittleistung (Bild 12.2.1.1.1-5) lässt sich eine vergleichsweise gute Dauerfestigkeit erzielen. Sobald aber etwas intensiver geschliffen wird, kommt es zu einem dramatischen Abfall der Schwingfestigkeit. Dabei ist es offenbar, im Gegensatz zu anderen Abtragungsverfahren, nicht mehr relevant, ob der Prozess darüber hinaus ungewöhnlich intensiver erfolgt.*

Die ***Zerspanungsverfahren*** *mit definierter Schneide, Fräsen und Drehen zeigen ein ähnliches Verhalten. Ganz allgemein werden auch bei hohen Zerspanungsdaten gute Schwingfestikeiten erzielt. Dabei kann sich sogar eine hohe Zerspanungsleistung positiv auswirken. Dies dürfte mit einem Anstieg schwingfestigkeitssteigernder Effekte wie Druckeigenspannungen und Verfestigung zu erklären sein. Bei EDM sorgt offenbar der verfahrenstypische Aufschmelzvorgang generell, auch bei vorsichtigem Abtrag für eine gravierende Schädigung. Nur von einer ausreichend abtragenden Nacharbeit lässt sich die Schwingfestigkeit wieder anheben. Dies ist jedoch problematisch (Bild 12.2.1.2-5). Lediglich bei vorsichtigem Drahterodieren scheint sich die Schädigung in Grenzen zu halten, sodass dieses Verfahren für die Herstellung von deutlich lebensdauer-*

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - ECM und EDM

Der Einfluss des Bearbeitungsverfahrens auf die Schwingfestigkeit ist ein entscheidendes Kriterium für den Einsatz an dynamisch hochbeanspruchten Bauteilen wie Scheiben und Schaufeln.

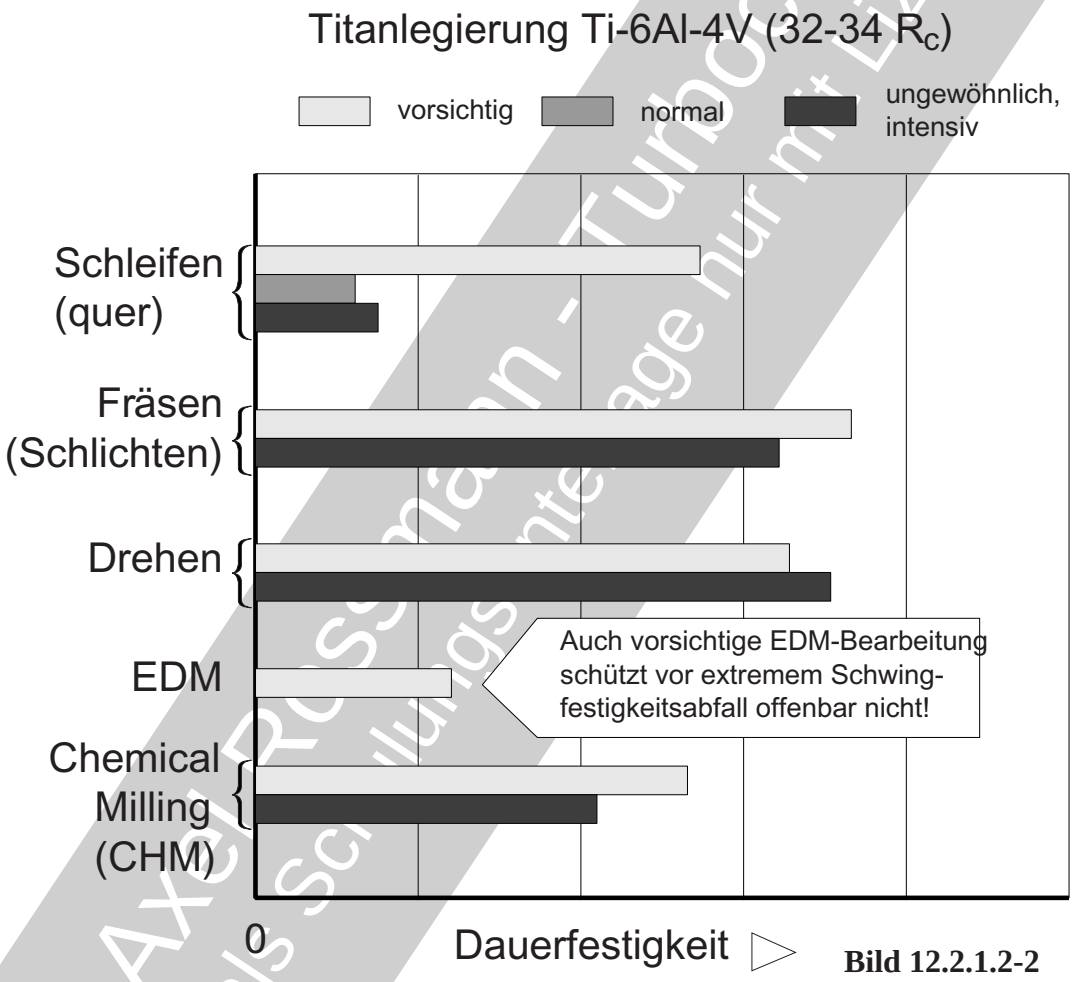


Bild 12.2.1.2-2

begrenzten Versuchs- und Prototypen zu finden ist.

***Chemical Milling** (CHM) ist wohl im Ergebnis einer elektrochemischen Bearbeitung ähnlich. Zwar ist mit einer niedrigeren Schwingfestigkeit im Vergleich zum Drehen und Fräsen zu rechnen. Dieser Effekt ist aber nicht ausgeprägt von den Prozessparametern abhängig. Die etwas niedrigere Schwingfestigkeit lässt sich mit fehlender Verfestigung und fehlenden Druckeigenspannungen erklären. Die erzielbare Schwingfestigkeit entspricht also der des ungeschädigten Grundwerkstoffs.*

© Axel Rossmann - Turbocad als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bohrungen sind häufig besonders hoch belastet, beste Qualität muss hier selbstverständlich sein.

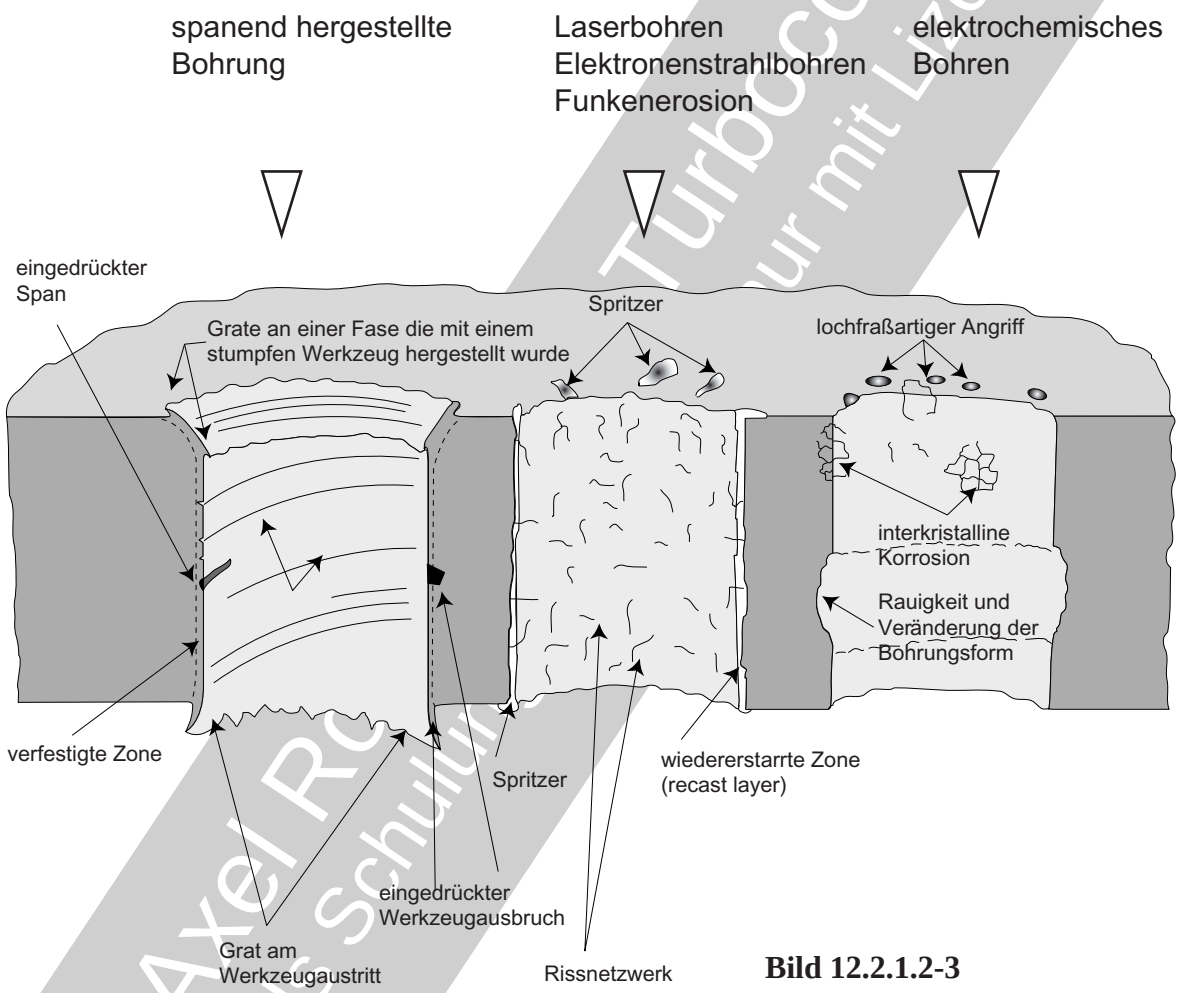


Bild 12.2.1.2-3

Bild 12.2.1.2-3 und Bild 12.2.1.2-4: *Bohrungen sind* ***Bauteilzonen mit Spannungskonzentrationen****. Sie sind somit potenziell hochbeansprucht. Zusätzlich ist gewöhnlich die Zugänglichkeit für zerstörungsfreie Prüfungen erschwert (Bild 12.2.1..1.2-8). Die Qualität, insbesondere kleiner Bohrungen, ist daher in besonderem Maß von optimalen Fertigungsparametern und deren Einhaltung abhängig. Weichen Bohrungsquerschnitte von der Kreisform ab (Bild 12.2.1.2-5) und/oder handelt es sich um eine Vielzahl kleiner Bohrungen in schwer zerspanbaren Werkstoffen, kommen von den „aufschmelzenden" Verfahren EDM, Elektronenstrahl und Laser zum Einsatz (Mitte). Eine Alternative sind elektrochemische Verfahren (rechts).*

Typische Beispiele mit einer großen Zahl kleiner Bohrungen sind luftgekühlte Heißteile wie die Brennkammer oder Schaufelblätter.

Spanend hergestellte Bohrungen *(links in der Skizze von Bild 12.2.1.2-3)****:*** *Besondere, unerwünschte Merkmale sind Grate am Ein-*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - ECM und EDM

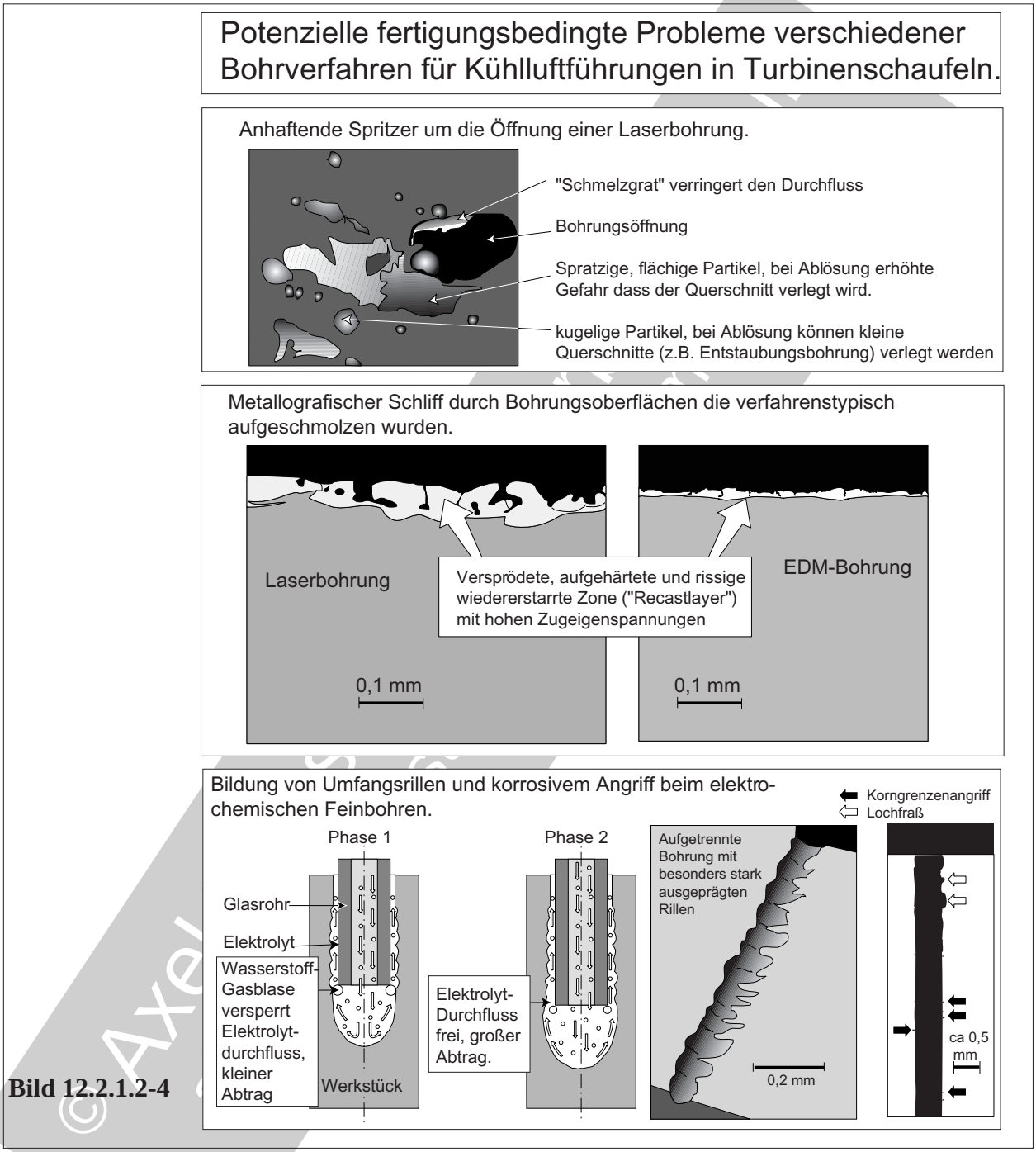


Bild 12.2.1.2-4

und Austritt. Ihr Einfluss auf Schwingfestigkeit und Durchströmung wird in Band 4, Bild 18.2-6 und Bild 18.2-7 behandelt. Die Folgen der Schädigung einer Bohrungswand für ein hoch LCF-beanspruchtes Bauteil, im Zusammenhang mit ungeeigneten Bohrparametern, zeigen die Bilder 12.2.1.1.2-5 bis -10).

Laserbohren, Elektronenstrahlbohren, Funkenerosion *(Mitte in der Skizze von Bild 12.2.1.2-3): Diese Verfahren beeinflussen die Bearbeitungsfläche auf mehrfache Weise. Bild 12.2.1.2-1 zeigt das am Beispiel der Funkenerosion. Schwingfestigkeit und Durchfluss werden bei diesen Verfahren negativ beeinflusst.* ***Anhaftende Spritzer*** *(oberster Rahmen in Bild 12.2.1.2-4) beeinträchtigen eine Durchströmung, indem sie die* ***Rauigkeit*** *erhöhen und/ oder* ***den Strömungsquerschnitt verkleinern****.* ***Lösen sich Spritzer ab****, können diese Kühlluft-*

bohrungen, z.B. von gekühlten Turbinenschaufeln, verstopfen (Band 4, Bild 18.3-13 und Bild 18.3-19). Die folgende Überhitzung verkürzt die Lebensdauer deutlich .
*Es ist davon auszugehen, dass die **Schmelzspritzer** die Werkstückoberfläche schädigen (Band 4, Bild 18.6-2 bis Bild 18.6-5). Das kann die **Schwingfestigkeit gefährlich absenken**.*
*Ähnlich wirkt eine **wiedererstarrte Zone (engl. recast layer**, mittlerer Rahmen in Bild 12.2.1.2-4). Solche Schichten sind meist extrem aufgehärtet, spröd und stehen unter hohen Zugspannungen (Band 4, Bild 18.4-1) die Mikrorissbildung auslösen (Bild 12.2.1.2-1).*

***Elektrochemisches Bohren** (EC, links in der Skizze von Bild 12.2.1.2-3): Mehrere Bohrverfahren fallen unter diesen Begriff (Lit. 12.2.1.2-1):*
*- **Electro-Stream Drilling** = **ESD**,*
*- **Shaped Tube Electrochemical Machining** = **STEM***
*- **Elektrochemisches Feinbohren** = **ECF**,*
*- **Electro-Jet-Bohren** = **EJ**.*
*Bild 12.2.1.2-7 und Bild 12.2.1.2-8 zeigen die **Beeinflussung der Bearbeitungsfläche**. Ungünstige Verfahrensparameter können **interkristallinen Angriff** auslösen und damit die Schwingfestigkeit beeinträchtigen. In Heißteilen werden angefressene **Korngrenzen von Oxidation** angegriffen. Diese Fehlstellen dienen als Rissstarter bei Thermoermüdung.*
*Sind die Bohrungswände auf Grund ungünstiger Verfahrensbedingungen von **Querrillen** profiliert (unterer Rahmen in Bild 12.2.1.2-4) beeinflusst dies die Durchströmung. Einerseits ist von einer kleineren Durchflussmenge auszugehen. Andererseits kann die starke Verwirbelung einer Kühlluft zu einer besseren Wärmeabfuhr beitragen.*
*Wurde also eine Kühlkonfiguration im **Prototypenstadium mit solchen Bohrungen entwickelt** und später in der Serienfertigung das Bohrverfahren so umgestellt, dass nunmehr die Bohrungswände glatt sind, kann sich das **Verhalten gegenüber der Erprobung merklich verändern**.*
*Anfressungen auf der Fläche um eine **dynamisch hoch belastete Bohrungsöffnung** (Bild 12.2.1.2-8) wie in einer Rotorscheibe, können ohne Nacharbeit (Band 4, Bild 17.5-1) die Verwendung des Bauteils ausschließen.*

© Axel Bossmann - Turboconsult
Arbeitsunterlage nur mit Lizenz

***Bild 12.2.1.2-5:** Für die kostengünstige Herstellung besonderer Bohrungsquerschnitte bietet sich das **EDM-Verfahren** an. Die Öldrainagebohrung (**Ölablaufbohrung**) in einem Zwischenring des Rotors wurde für einen günstigen Spannungsverlauf optimiert und erhielt eine ovale Form. Die Lage der Bohrung berücksichtigt den Verlauf der hohen Tangentialspannungen (Skizze oben links).*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - ECM und EDM

Die Erfahrung zeigt, dass man sich auf die Nacharbeit einer EDM-Bohrung zur Entfernung des schädlichen Recast Layers nicht unbedingt verlassen kann.

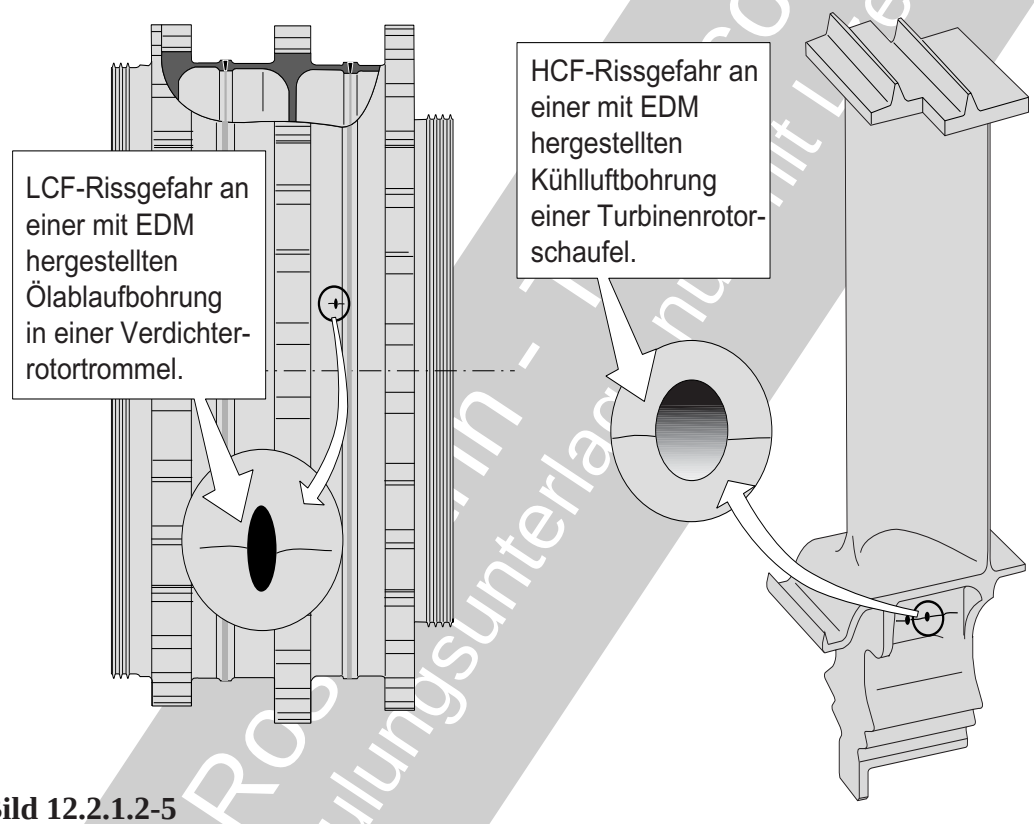


Bild 12.2.1.2-5

Im Fall der ***Kühlluftbohrungen*** *einer Turbinenschaufel steht der ungünstige Ansatz des Bohrers und die schlechte Bearbeitbarkeit der Ni-Gusslegierung für die Wahl des EDM-Verfahrens im Vordergrund (Skizze rechts).*

In beiden Fällen liegen die Bohrungen in dynamisch hoch belasteten Zonen. Um eine ausreichende Schwingfestigkeit zu sichern, wurden die Bohrungswände mit abrasiven Verfahren wie Druckfließläppen oder Oxidstrahlen nachbearbeitet. So wurde versucht, die im ***„Recast Layer"-Bereich potenziell geschädigte Zone abzutragen****.*

In der Erprobungsphase traten bei beiden Nacharbeitsvarianten, ausgehend von den Bohrungen Schwingrisse auf. Es zeigte sich, dass die Nacharbeit nicht ausreichend zuverlässig EDM-Schädigungen (Bild 12.2.1.2-2) beseitigt hatte. Einen ähnlichen Fall zeigt Bild 12.2.1.2-6.

Aus diesen Erfahrungen lässt sich die Lehre ziehen, dass ***in dynamisch hochbeanspruchten Bauteilzonen das EDM-Verfahren auch mit einer Nacharbeit nicht anzuwenden ist****. Hier dürfen Kosten teurerer Verfahren nicht gescheut werden.*

Bild 12.2.1.2-6 *(Lit. 12.2.1.2-5): Der hier beschriebene* ***Schadensfall*** *ist ein Beispiel für die Gefahren im Zusammenhang mit einer problematischen Anwendung des EDM-Verfahrens.*
Wie es der typische zeitliche Spannungsverlauf einer Turbinenscheibe erwarten lässt, machte sich der Schaden ca. zwei Minuten nach dem Start mit einem dumpfen Knall bemerkbar. Im Cockpit ging das Übertemperaturwarnlicht des rechten Triebwerks an, obwohl die anderen Überwachungsinstrumente im normalen Bereich blieben. Erst nach ca. 10 Sekunden verlor das Triebwerk an Leistung und fiel aus. Das Flugzeug kehrte zurück und landete sicher.
Eine erste Untersuchung des Triebwerks ergab typische Anzeichen für einen Bruchstückaustritt in Form eines ca 25 x 12 mm großen Lochs im Bereich der Gaserzeugerturbine. Am Flügel und an der Zelle waren kleinere Beschädigungen erkennbar.
Nach der Zerlegung des Triebwerks zeigte sich, dass die rückwärtige kühlluftführende ***Abdeckplatte*** *(Aft Cooling Plate = ACP, siehe auch* ***Cover Plate****) am zweiten Gaserzeuger-Turbinenrad (Skizze unten rechts) an einer der drei Kühlluftbohrungen durchgebrochen war. Ein Segment mit ca. 15 cm Kranzumfang fehlte. Diese Rotorscheibe hatte ca. 11 450 Start/Abstellzyklen und war als Neuteil eingebaut worden. Unterlagen der* ***Neuteilfertigung und Wartung ließen keine Besonderheiten*** *erkennen. Ein solcher* ***Schaden ist insofern alarmierend, weil er den Verdacht nahelegt, dass noch eine größere Zahl weiterer Teile von dem Problem betroffen*** *sein könnten.*
Die anschließende Laboruntersuchung der Bruchfläche ergab, dass radial von der Bohrung nach innen und außen laufende LCF-Risse den Bruch auslösten. Sowohl in der Bohrungswand als auch an den Bohrungskanten zur Scheibenoberfläche lagen Anrisszonen (Skizze unten links). In allen Bohrungswänden, auch den beiden anderen außerhalb des Bruchs, verliefen über die volle Länge bis 0,5 mm tiefe Axialkerben. Im Kerbgrund waren Anzeichen für Mikrorisse zu erkennen. An zwei benachbarten Anrissen wurden Reste eines „Recast Layers“ gefunden. Das Grundmaterial zeigte keine, als schadensursächlich zu bewertende Abweichung.
*Weitere Recherchen beim Neuteilhersteller ergaben, dass die drei Luftbohrungen in der Abdeckplatte zeichnungsgerecht mit Funkenerosion (EDM) hergestellt werden. Danach erfolgt eine abrasive Behandlung („****abrasive flow process****“), wahrscheinlich ein* ***Druckfließläppen,*** *dessen abrasive Partikel in einem hochviskosen Medium durch die Bohrungen gepresst werden (Lit. 12.2.1.2-1). Wie es trotzdem zu den verbliebenen Axialkerben in den Bohrungen kam, konnte nicht geklärt werden. Wahrscheinlich handelte es sich um eine* ***unbemerkte Abweichung des EDM-Prozesses,*** *die sich nicht entfernen ließ. Eine Untersuchung zeigte: Offenbar waren bereits im Neuteil kleine Anrisse in den Axialkerben vorhanden. Von diesen Fehlstellen gingen unter den zyklischen Betriebslasten LCF-Risse aus. Bauteile aus früheren Fertigungslosen wurden mit ECM hergestellt. Dieses Verfahren wurde jedoch mit EDM ersetzt.*
Aus diesem Fall lassen sich die folgenden Lehren ziehen:

Die Umstellung auf EDM bei der Herstellung von Bohrungen erfordert zumindest eine eingehende Risikoabschätzung. Gegebenenfalls ist ein ausreichend betriebsnaher Nachweis zu führen.

Es ist zumindest problematisch, die EDM-typische Schädigung (Schwingfestigkeitsabfall) mit einer Nacharbeit so sicher zu beseitigen, dass die für Rotorteile notwendige Sicherheit gewährleistet ist.

Daraus ergibt sich: An dynamisch hochbelasteten Bauteilen, insbesondere Rotorteilen sollte das EDM-Verfahren auch mit Nacharbeit nicht verwendet werden.

© Aachmann - Turbotech GmbH Assistenzsysteme

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - ECM und EDM

Nicht ausreichend nachgearbeitete Funkenerosion (EDM) kann die Schwingfestigkeit eines Bauteils gefährlich herabsetzen. Deshalb sicherheitshalber EDM an hoch schwingbeanspruchten Bauteilen nicht anwenden.

Zwei Minuten nach dem Abheben zerplatzte die Kühlluft führende Abdeckplatte (cooling-plate) und 20 Sekunden später versagte das rechte Triebwerk mit Bruchstückaustritt. Das Flugzeug kehrte zum Flugplatz zurück und landete. Niemand wurde verletzt.

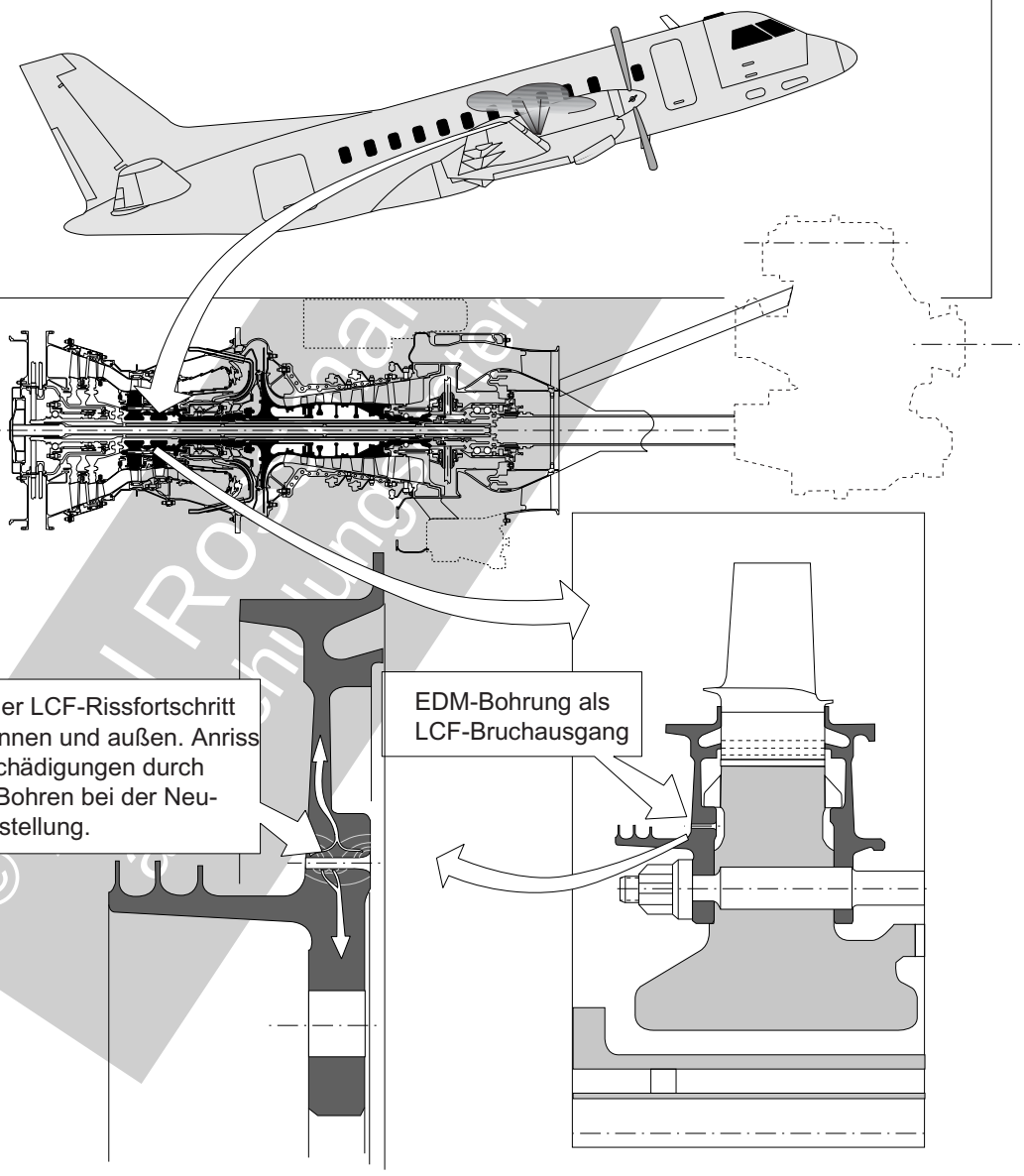


Bild 12.2.1.2-6

***Bild 12.2.1.2-7 und Bild 12.2.1.2-8**: Die **elektrochemische Bearbeitung** (engl. Electrochemical Machining = ECM) löst den Werkstoff auf. Unter optimierten (vorschriftsmäßigen) Bedingungen geschieht dies **ohne mechanische oder thermische Einwirkung**. Damit entfallen viele für Zerspanung und EDM typische Schädigungen. Eine von Verfestigung und Eigenspannungen unbeeinflusste ECM-Bearbeitungsfläche kann im Vergleich zu spanend bearbeiteten Flächen Vorteile oder Nachteile haben (Bild 12.2.1.2-2). Das hängt davon ab, ob schädigende Effekte (Zugspannungen) oder günstige Bedingungen (Verfestigung, Druckspannungen) entfernt wurden. In vielen Fällen wird deshalb dem ECM-Prozess noch ein **Verfestigungsprozess nachgeschaltet**. Üblicherweise handelt es sich dabei um **Kugelstrahlen** (engl. **shot peening**).*

*Trotzdem verbleiben unter ungünstigen Bedingungen verfahrensspezifisch **potenzielle Schädigungen** (Lit. 12.2.1.2-5).*

*Eine gewisse Verunsicherung ergibt sich daraus, dass ECM bis heute für viele Hersteller ein eher **exotisches Verfahren** darstellt. Zusätzlich beeinflussen sich viele Prozessparameter und die auf den Abtragungsmechanismus wirkenden Energieformen (elektrisch, mechanisch, chemisch, hydraulisch) nichtlinear gegenseitig. Es können im Spalt zwischen Werkzeug und Werkstück **mehrere 10^1 Atmosphären Druck des Elektrolyten mit Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 100 m/s** wirken. Wird eine solche Elektrolytströmung schnell verzögert bzw. unterbrochen, kann auf Grund der hohen Strömungsgeschwindigkeit ein sog. **Wasserschlag (engl. Water Hammer)** auftreten. Dabei entstehen extreme Kräfte auf Werkzeug und Werkstück, deren Auslenkung den Arbeitsspalt überbrückt und einen gefürchteten Kurzschluss auslöst.*

*Die hohe Strömungsgeschwindigkeit und erhöhte Elektrolyttemperaturen können zum örtlichen Verdampfen des Elektrolyten und zur **Kavitation** führen. Damit werden **ungleichmäßiger Abtrag und Schwingungen** des Werkzeugs und/oder des Werkstücks begünstigt. Die **wirkenden Stromstärken erreichen je nach Maschinengröße bis zu 10^5 A**. Damit werden **Kurzschlüsse** zu gefährlichen Schädigungsmechanismen. Der Elektrolyt wird sowohl vom direkten Stromdurchgang als auch von der elektrischen Aufheizung des Werkstücks beeinflusst. **Die so entstehenden Wärmedehnungsunterschiede können den Arbeitsspalt und damit das Herstellungsmaß verändern.** Sie sind deshalb in der Auslegung des Werkzeugs zu berücksichtigen.*

*Im Gegensatz zur üblichen Klassifizierung der Abtragintensität bei spanenden Verfahren wie Schlichten (engl. finishing, gentle) oder Schruppen (rau, schädigend, engl. abusive) werden für ECM die Begriffe **Standard** und **außerhalb des Standards** (engl. **off standard**) empfohlen. Wird zu weit von Standard Prozessparametern abgewichen, werden **Kurzschlüsse und Funkenbildung** wahrscheinlicher. Dabei entstehen gefährliche, tiefgehende Schädigungen durch Überhitzung und Anschmelzungen (Band 4, Bild 18.6-7).*

Bei nicht optimalen Prozessbedingungen („off standard“) ist mit folgenden Problemen zu rechnen:

Interkristalliner** (Korngrenzen-) **Angriff** (engl. intergranular attack = IGA). Eine falsche **Elektrolytkonzentration** oder eine **zu niedrige Stromdichte** kann die Ursache für Korngrenzenangriff sein. Solche Bedingungen liegen an **Oberflächen außerhalb des eigentlichen Abtrags** auf. Bevorzugt ist die Nähe der isolierten Werkzeugoberfläche oder bereits hergestellter Seitenflächen die das Werkzeug bereits passiert hat. Zu einem gefährlich tiefen Korngrenzenangriff kommt es meist erst, wenn zusätzlich ein **Werkstoffzustand mit empfindlichen Korngrenzen** vorhanden ist. Die Schädigungstiefe liegt werkstoffabhängig im Bereich von einigen hundertstel Millimetern. Ein solcher Zustand (**Sensibilisierung**) kann z.B. im Zusammenhang mit einer ungünstigen **Wärmebehandlung, einer Schweißnaht oder

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.2-14

© Axel Rossmann - Technische Universität Ilmenau

Einflüsse elektrochemischer Bearbeitung (ECM) auf die Bauteiloberfläche.

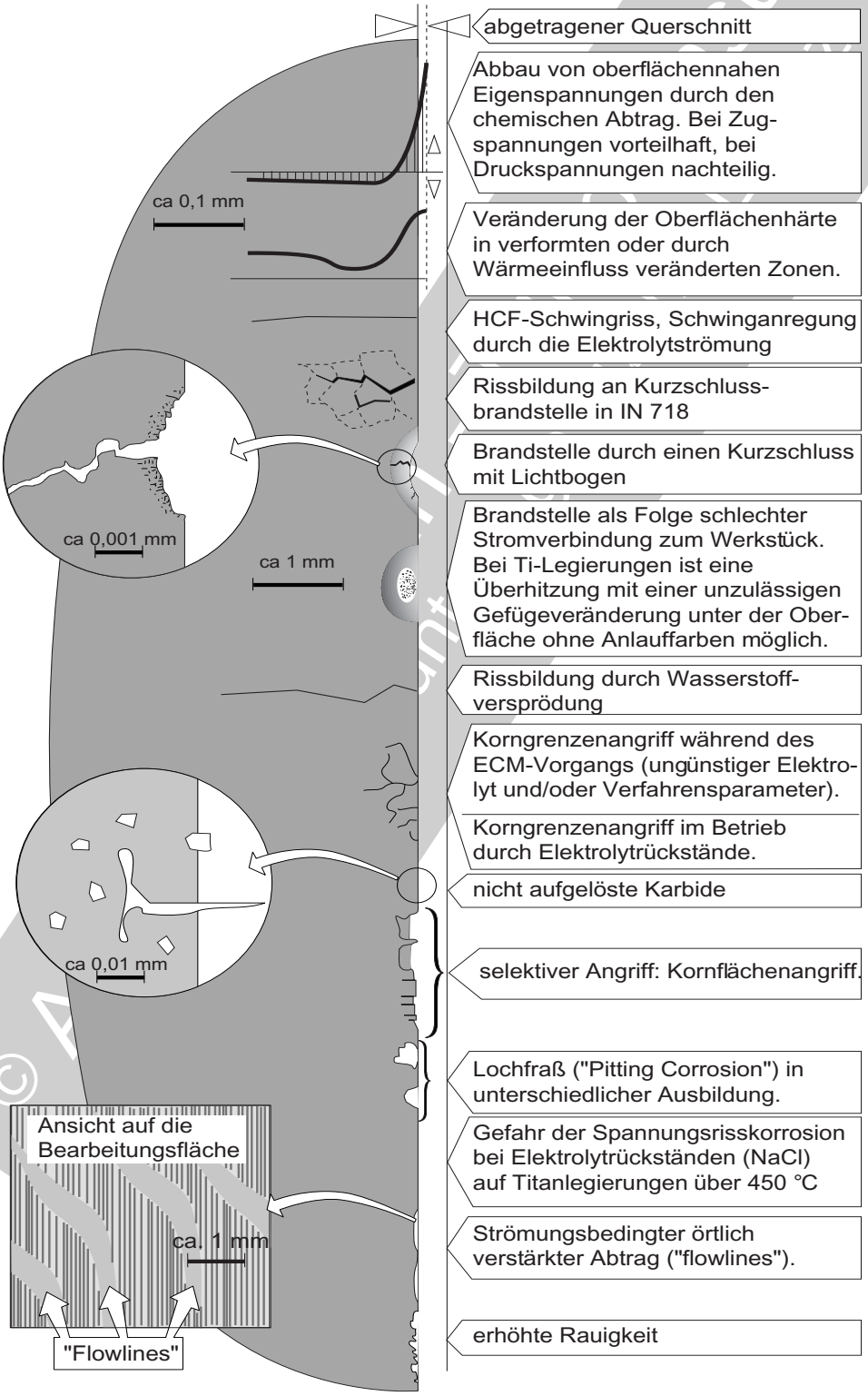


Bild 12.2.1.2-7

Fortsetzung von Seite 12.2.1.2-12

auch einer Temperaturführung beim Schmiedeprozess *stehen. Es ist also wichtig, den geeigneten Werkstoffzustand für eine optimale ECM-Bearbeitung zu ermitteln und zu gewährleisten.*

Der elektrochemische Angriff kann sich örtlich konzentrieren und ***Grübchenbildung (engl. pitting),*** *im Extremfall* ***Lochfraß*** *hervorrufen. Lösen sich bestimmte Gefügebestandteile schneller auf, kommt es zum* ***selektiven Angriff****. Solche Kerben lassen sich mit einer höheren Stromdichte und größerer Abtragsgeschwindigkeit vermeiden. Die hohe Stromdichte gleicht die geringen chemischen Unterschiede zwischen benachbarten Körnern oder von Inhomogenitäten wie Mikroseigerungen aus. Umgekehrt* ***begünstigen niedrige Stromstärken und in diesem Zusammenhang niedrige Spannungen selektiven Angriff****. Damit erhält die Weite des Spalts im aktiven Bereich (Stirnseite des Werkzeugs, Wirkfläche) eine besondere Bedeutung. In Werkstückbereichen, die von der Wirkfläche des Werkzeugs weiter entfernt sind, können so Grübchen entstehen. Mit wachsendem Abstand zur Wirkfläche des Werkzeugs können unterschiedlichste* ***Rauigkeiten,*** *vom polierten Zustand bis hoher Rauigkeit auftreten. Inwieweit die Schwingfestigkeit von kleinen Grübchen beeinflusst wird, ist unklar. Wahrscheinlich dürften sie sich weniger schädigend auswirken als ein rissartig verlaufender Korngrenzenangriff.*

Im Zusammenhang mit Korrosion sei noch auf die potenzielle Gefahr einer ***Spannungsrisskorrosion an Titanlegierungen*** *hingewiesen. Verbleiben* ***kochsalzhaltige Elektrolytreste*** *auf einer Bauteilzone, die unter ausreichend hohen Zugspannungen steht, ist bei Temperaturen über 450°C eine Rissbildung nicht auszuschließen (Band 4, Bild 18.3-16). Deshalb ist auf eine ausreichende Reinigung der Bauteile nach dem ECM-Prozess vor einer Wärmebehandlung oder Schweißung zu achten.*

Der ECM Prozess reagiert sehr empfindlich auf ***Streuungen der Werkstoffeigenschaften des Werkstücks*** *die den Auflösungsprozess beeinflussen. Bereits Unterschiede in der* ***Kornorientierung*** *(Lage des Gitters) oder eine* ***Verformung bzw. Verfestigung*** *können sich, wenn auch nicht unzulässig, als Änderungen der Rauigkeit bemerkbar machen.*

Es gibt Gefügebestandteile die als Nichtleiter und/oder auf Grund ihrer hohen chemischen Beständigkeit vom ECM-Prozess nicht aufgelöst werden. Hierzu gehören ***Karbide und intermetallische Phasen*** *in Nickellegierungen. Solche, häufig sehr scharfkantigen Karbide (engl. spike) können dann aus der ECM-Fläche herausragen. Diese Fehlstellen sind jedoch so klein, dass sie weder einen Kurzschluss mit dem Werkzeug auslösen noch das Betriebsverhalten des Bauteils deutlich verändern dürften. Denkbar ist jedoch ein Einfluss auf eine eventuelle* ***Diffusionsbeschichtung****, z.B. als Oxidationsschutz von Ni-Legierungen in Heißteilen. So könnten die Diffusionsschicht durchdringende Karbide, sog. „Oxidnägel“, entstehen und damit die Oxidationslebensdauer beeinträchtigen.*

Bei ***Gusslegierungen*** *mit ihren typischen Makro- und* ***Mikroseigerungen*** *(z.B. im Bereich der Dendriten, Bild 11.1-7) ist das Problem selektiven Angriffs ausgeprägter. Hier können Bereiche mit geringerer Auflösungsrate zur Berührung mit dem Werkzeug und zu Kurzschluss führen.*

Besonders schädigend für die Sicherheit eines zyklisch hochbeanspruchten Bauteils sind die Folgen von ***Kurzschlüssen*** *zwischen Werkzeug und Werkstück. Örtliche Überhitzungen führen zu Schmelzkratern, „Recast Layer“, Zugeigenspannungen und Festigkeitsabfall (Band 4, Bild 18.6-2). Ein extremer Abfall der Schwingfestigkeit ist die Folge. Eine solche Situation kann auf zu elastische Werkzeuge, fehlerhaften Vorschub und/oder ungenügenden örtlichen Abtrag zurückgeführt werden. Die so entstehenden intensiven Lichtbögen sind wohl auch von elektronischen Schnellabschaltungen nicht so sicher beherrschbar, dass eine unzulässige Schädigung auszuschließen ist.*

© Lyer, Rosemann - Turbomaschinen
aus Schulungsunterlagen Siemens

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - ECM und EDM

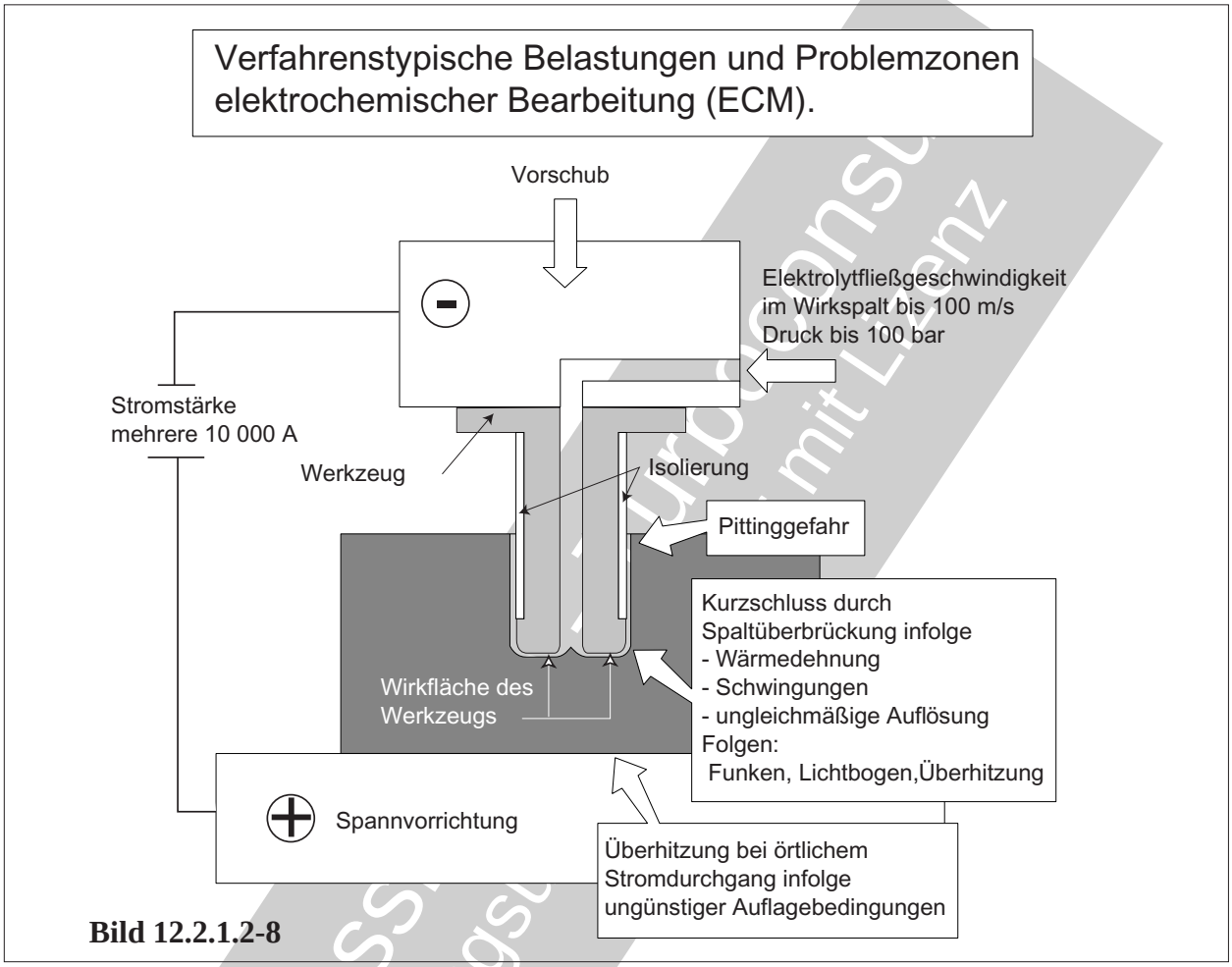


Bild 12.2.1.2-8

Eine andere Form eines schädigenden Kurzschlusses tritt an ***Stromanschlüssen zum Werkstück*** *auf.*
Wird die ***Kontaktfläche*** *verformt und so der Stromfluss örtlich konzentriert, kann es zu tiefer, in die Oberfläche eindringender Aufheizung kommen. Wegen dem behinderten Sauerstoffzutritt zeigen sich* ***gefährliche Aufheizungen nicht unbedingt mit Anlauffarben****. Solche Aufheizzonen können eine* ***„Überhitzungslinse“ unter der Werkstückoberfläche*** *bilden. Abhilfe ist eine* ***gute, ausreichend massive Gestaltung der Kontakte, saubere und ebene Kontaktflächen*** *und gegebenfalls die Anwendung eines geeigneten Kontaktfetts.*
Mit der Gefahr einer ***Wasserstoffversprödung*** *ist bei ECM-Bearbeitung* ***erfahrungsgemäß nicht*** *zu rechnen, obwohl beim Abtragprozess Wasserstoff entsteht. Diese Erfahrung lässt sich mit dem Abtransport des Wasserstoffs in der sehr schnellen Elektrolytströmung erklären.*

Spannungsrisskorrosion *ist insbesondere bei hochfesten Titanlegierungen, eine echte Gefahr. Verbleiben* ***chlorhaltige Elektrolytrückstände auch nach einer Spülung*** *auf dem Bauteil, können sie bei ausreichenden Zug(eigen)-spannungen und Temperaturen oberhalb 450°C (Wärmebehandlung, Schweißen) Risse auslösen (Band 4, Bild 18.7-7).*
Flache (wenige µm tief), ***orientierte Oberflächenstrukturen*** *(engl. flowlines, Bild 12.2.1.2-7) können das Bild der ECM-Fläche prägen. Ihre Ausbildung hängt mit den Prozessparametern zusammen. Die wellenartigen weichen Übergänge und die geringe Tiefe lassen keine merkliche Auswirkung auf die Schwingfestigkeit erwarten, was jedoch im jeweiligen Fall mit einem geeigneten Nachweis zu bestätigen ist.*

© Axel Rossmann Maschinenbau Turbomaschinen mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 12.2.1.2

12.2.1.2-1 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 65-78, 80,90.

12.2.1.2-2 „Machining Titanium & Its Alloys“, ASM international, www.supraalloy.com/Machining_titanium.htm, 1.04.2004.

12.2.1.2-3 ASM Handbook Vol.16 „Machining“ , ASM International, ISBN 0-871170-007-7, 1999, Kapitel J.E.Fuller, „Electrical Discharge Machining“, Seite533-542, 557-567.

12.2.1.2-4 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.

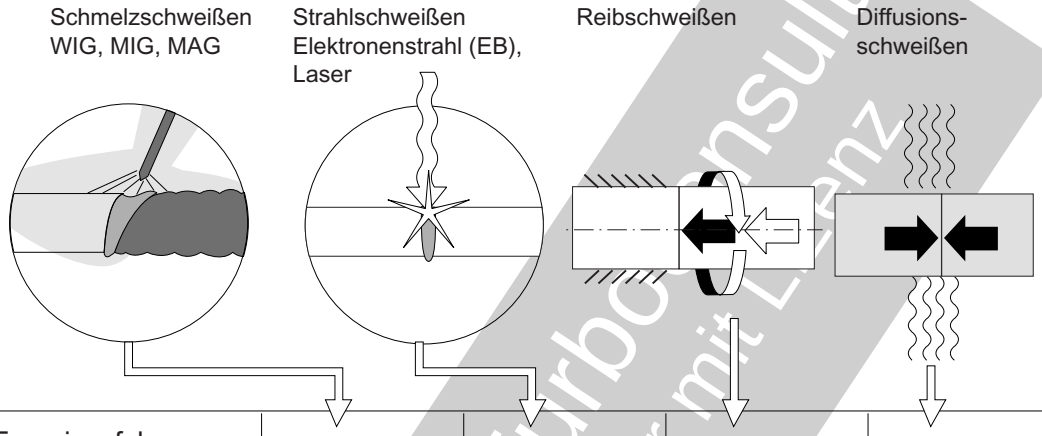
12.2.1.2-5 AAIB Bulletin No. 10/2000 Ref: EW/C99/7/4, 2000.

12.2.1.2-6 L.Engel, H.Klingele, „Rasterelektronische Untersuchungen von Metallschäden“, Carl Hanser Verlag, ISBN 3-446-13416-6, 1982, Seite 240.

© Axel Rossmann, Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.3 Schweißen

Prinzipien moderner Schweißverfahren.



Energiezufuhr	Lichtbogen	Strahlenergie	Reibung	Wärmestrahlung
Zusatzwerkstoff	Ja	nein	nein	nein
Schweißatmosphäre	Vakuum, Schutzgas, Aktivgas	Vakuum (EB), Schutzgas (Laser)	Luft, Schutzgas	Vakuum
Verbindungsprinzip	Schmelze	Schmelze	Fester, teigiger Zustand	Diffusion im festen Zustand

Die große Zahl an Schweißverfahren lässt es nicht zu, umfassend deren Probleme zu behandeln. Deshalb soll die Literatur am Ende des Kapitels eine tiefere Einarbeitung ermöglichen. Im Folgenden werden nur typische Probleme der im Triebwerkbau häufig angewendeten Schweißtechniken betrachtet.

Schmelzschweißungen (engl. Begriffe und Abkürzungen nach Lit. 12.2.1.3-5):

- **Schutzgasschweißen** (**WIG**, engl.**Tungsten Inert Gas welding** = **TIG**)
- **Plasmaschweißen** (engl. **Plasma Arc Welding** = **PAW**)
- **Widerstandsschweißen** (engl. **Resistance Welding** = **RW**); **Punktschweißen** (engl. **Resistance butt welding**) und **Rollnahtschweißen** (engl. **Resistance seam welding** = **RSEW**).
- **Elektronenstrahlschweißen** (**ES-Schweißen**, engl. **Electron beam welding** = **EBW**).
- **Laserschweißen** (engl. **Laser beam welding** = **LBW**)

Schweißungen ohne flüssige Phase:

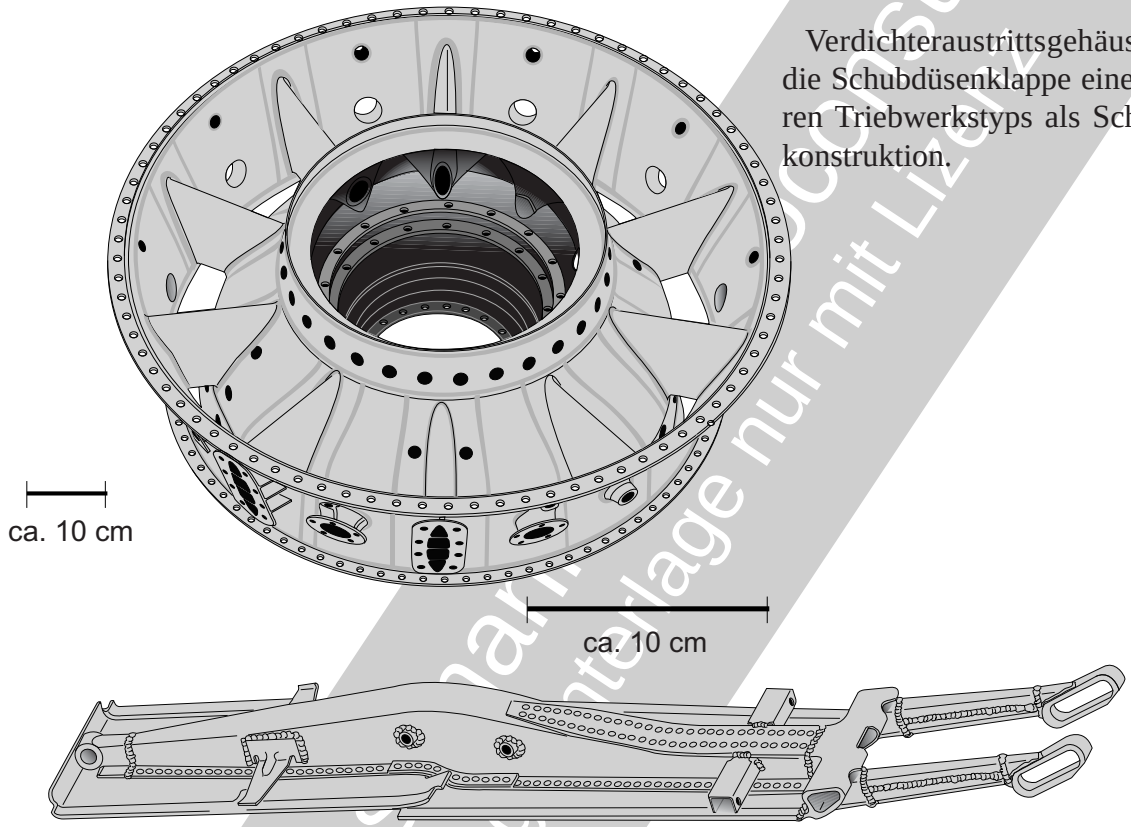
- **Reibschweißen** (engl. **Friction welding** = **FRW**)
- **Diffusionsschweißen** (engl. **Diffusion welding** = **DFW**)

Probleme mit denen sich dieses Kapitel auseinandersetzt entstehen in erster Linie beim Schweißen selbst, den nachfolgenden Fertigungsschritten und, in seltenen Fällen, wenn fehlerhafte Schweißungen zum Einbau kamen, im Betrieb. Verständlicherweise können hier nicht alle Probleme der Schweißtechnik erschöpfend behandelt werden.

Der Einsatz von **Schweißungen in hochbeanspruchten Bauteilzonen** wie an Rotoren (Umfangsnähte, Axialnähte an Schaufelblättern von Blisks) stellt immer höhere Ansprüche an die Nahtqualität und engt die Schwachstellen mit der Forderung auf eine Nichtwachstumsfähigkeit sehr ein.

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Die Schwerpunkte der Schweißtechnik im Triebwerksbau haben sich über die Jahre deutlich verlagert. Gehäuse und Gasführungen **älterer**, bis in die 60er-Jahre des letzten Jahrhunderts entwickelter Triebwerkstypen sind **Schweißkonstruktionen aus Blechen, Schmiede- und Gussteilen**



Verdichteraustrittsgehäuse und die Schubdüsenklappe eines älteren Triebwerkstyps als Schweißkonstruktion.

© AVM Poschmann Consult
Lehrgangsunterlage nur mit Lizenz

(Skizzen). Das **WIG-Schweißen komplexer dünnwandiger Strukturen** erreichte damals einen Höhepunkt. Anforderungen an Festigkeit und Maßhaltigkeit (wenig Aufmaß für die Fertigbearbeitung) konnten nur mit optimalen **Schweißfolgen** befriedigt werden. Zur Anwendung kamen neben Ni-Basis (z.B. C 263) und Co-Basis Legierungen (z.B. L 605) in erster Linie hochlegierte Eisenwerkstoffe wie A-286 (temperaturbeanspruchte Gehäuse und Rotorscheiben) oder 13%-Cr-Stähle (Scheiben und Schaufeln im Verdichter) sowie niedriglegierte Vergütungsstähle („Kesselstähle“, für Gehäuse). Besonders Stähle zeigten beim Verschweißen spezifische Probleme. **Niedriglegierte Vergütungsstähle** (Bild 12.2.1.3.1-22) waren sehr empfindlich gegenüber **Wasserstoffversprödung, wenn Feuchtigkeit zum Schweißgut** Zutritt hatte (Bild 12.2.1.3.1-18 und Bild 12.2.1.3.1-21). Hochlegierte Stähle, besonders der aushärtbare A-286, neigten dagegen bereits bei kleinen Legierungsabweichungen (insbesondere ‘**Verunreinigungsspuren**’) innerhalb der Spezifikationen und nicht optimalem **Gefügezustand** (Korngröße, Korngrenzenbelegung, Aushärtung) zur **Heißrissbildung**. In allen Fällen musste auf ausreichenden **Schutzgasschleier**, gerade auch an der **Schweißwurzel,** geachtet werden.

Die nachfolgend entwickelten Triebwerkstypen setzten in immer stärkerem Maß möglichst integrale Gussteile ein. Damit entfielen ein großer Teil der Schweißungen. Neu kam die Anwendung der **Schweißtechnik an Rotoren** hinzu. So wurden die Scheiben und Ringe der einzelnen Rotorstufen anfangs mit **Elektronenstrahl**-Umfangsnähten verschweißt. Hier traten aber bei Ni-Legierungen verstärkt **Mikrorisse** (Heißrisse, Bild 12.2.1.3.1-14) und **Poren** auf, deren Auffindbarkeit nicht voll befriedigend war. Mit den weiter steigenden Drehzahlen und Fliehkraftbeanspruchungen

(LCF) war ein Risswachstum immer schwerer auszuschließen. So setzte sich das **Reibschweißen** durch, das im teigigen Zustand erfolgt und eine Heißrissbildung mit ausreichender Sicherheit vermeidet.

Ein weiteres Schweißverfahren im festen Zustand ist das **Diffusionsschweißen**. Es hat in der Fertigung von **hohlen Fanschaufeln aus hochfesten Titanlegierungen** Einzug gehalten. Die Möglichkeit von „**Klebungen**“ ist bei diesem Verfahren eine besondere Herausforderung (Bild 12.2.1.3.5-3) und **vermindert die Sicherheit bei Querbelastung** (Bild 12.2.1.3.5-2).

Der verstärkte Einsatz von **Titanlegierungen** führte anfangs, als sich noch keine komplexen großen Gussteile mit akzeptabler Qualität herstellen ließen, zu Konstruktionen mit Schmelzschweißungen. Ähnlich wie früher bei Gehäusen aus Stählen, wurden kleine Guss- und Schmiedeteile mit Blechen verbunden. Der Fortschritt in der Gusstechnik hat heute dazu geführt, dass auch große komplexe Gussgehäuse wie Verdichteraustrittsgehäuse (Bild 11.3-4), von **Ausbesserungen am Rohteil** abgesehen, kaum mehr Schmelzschweißungen aufweisen. Die elektronisch gesteuerten Mehrachsen-Bearbeitungsmaschinen ermöglichten die Herstellung großer, komplexer, filigraner Schmiedeteile durch Zerspanung. So entfällt das Schweißen auch hier weitgehend.

Eine besondere Anwendung des Schmelzschweißens besteht im Aufbringen von **Panzerungen** (Bild 12.2.1.3.1-13) für Anstreifflächen (Schaufelspitzen, Labyrinthdichtungen) und als Schutz gegen Schwingverschleiß (Fretting).

© Axel Rossmann - Turboresult
als Schulungsunterlage nutzbar

Literatur zu Kapitel 12.2.1.3

12.2.1.3-1 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 69-78, 162, 163, 170-175,,180-188

12.2.1.3-2 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. (1103)

12.2.1.3-3 ASM „Metals Handbook Ninth Edition“, „Volume 11- Failure Analysis and Prevention“, ISBN 0-8710-007-7, 1989, Seite 411-455.

12.2.1.3-4 J.Grosch et.al., Schweißproblem1, „Schadenskunde im Maschinenbau“, Expert Verlag ISBN 3-8169-1202-8, 1995, L.Issler, R.Sinz „Schadenskunde der Schweißverbindungen“. Seite 188, 206, 210, 228.

12.2.1.3-5 ASM „Metals Handbook“, „Volume 6- Welding, Brazing and Soldering“, ISBN 0-87170-377-7, 1997, Seite 64-69, 88-94, 150-159, 226-238, 1094-1096, 1222-1224.

12.2.1.3-6 S.Klingauf, „Theorie zum Entstehen von Heißrissen in hocherwärmten Werkstoffbereichen“, Zeitschrift „Schweißen und Schneiden“, Jahrgang 32 (1980), Heft 7, Seite 258-263.

12.2.1.3-7 H.Petershagen, „Einfluss von Einbrandkerben auf die Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen - ein Überblick“, Zeitschrift „Schweißen und Schneiden“, Jahrgang 37 (1985), Heft 6, Seite 270-274.

12.2.1.3-8 „Weld Defects in Austenitic Stainless Steels; Cause and Cure“, Angaben der Fa. „Allegheny-Ludlum Steel Corp.,“ Pittsburgh, 1960.

12.2.1.3-9 G.Stocker, „Reparaturschweißen mit Elektronenstrahl“, DVS-Bericht Nr. 38, Seite 36-42.

12.2.1.3-10 H.-J.Schüller, P.Löbert, H. Christian, „Beurteilung von im Betrieb nachgewiesenen Rissen im Schweißnahtbereich“, Zeitschrift „Der Maschinenschaden“, 53 (1980) Heft 4, Seite 141-151.

12.2.1.3-11 F.Pierquin, J.Lesgourgues, „Étude de la soubabilité par faisceau d’electrons de souperalliages par analyse morphologique des zones fondues“, Proceedings AGARD-CP-398 der Konferenz „Advanced Joining of Aerospace Metallic Materials“ des 61st Meeting of the Structures and Materials Panel of AGARD in Oberammergau, Germany, 11-13 September 1985. Seite2-1 bis 2-22.

12.2.1.3-12 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.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.3-13 H.Christian, F.-X.Elfinger, „Eigenspannungen in Schweißnähten“, Zeitschrift „Der Maschinenschaden“ 51 (1976) Heft 3, Seite 124-130.

12.2.1.3-14 W.Schütz, W.Oberparleiter, „Influence of Welding Flaws on the Fatigue Strength of Electron Beam Weldments in Ti-6Al-4V“, Proceedings AGARD-CP-398 der Konferenz „Advanced Joining of Aerospace Materials“ des 61st Meeting of the Structures and Materials Panel of AGARD in Oberammergau, Germany, 11-13 September 1985, Seite 15-1 bis 15-11.

12.2.1.3-15 G.Norris „F-16 problems prompt rethink on update“, Zeitschrift „Flight International“. 21-27 April 1999, Seite 5.

12.2.1.3-16 J.W.Sawyer, „Sawyer´s Turbomachinery Maintenance Handbook I“, Turbomachinery International Publications USA, 1980.

12.2.1.3-17 H.B.Cary, „Modern Welding Technology“, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, Seite 600-610.

12.2.1.3-18 H.Thielsch, „The Sense and Nonsense of Weld Defects“, Monticello Books, Lake Zurich, Illinois, 1967, Seite 5-48.

12.2.1.3-19 Australian Transport Safety Bureau (ATSB), „Fractured Fuel Line“, Safety Brief 200006273, Accident & Incident Report, 2002, Seite 1 und 2.

12.2.1.3-20 B.Jahnke, „High-Temperature Electron Beam Welding of the Nickel-Base Superalloy IN-738 LC“, Zeitschrift „Welding Journal“, 61 (1982) 11 Seite 343s - 347s.

12.2.1.3-21 L.Engel, H.Klingele, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden“, 2. neubearbeitete Auflage, Herausgeber Gerling Institut für Schadensforschung GmbH, Köln, Carl Hanser Verlag, 1982, ISBN 3-446-13416-6, Seite 55, 118, 124.

12.2.1.3-22 T.Khaled, „An Investigation of Pore Cracking in Titanium Welds“, Zeitschrift „Journal of Materials Engineering and Performance“, Volume 3 (3) June 1994, Seite 419 - 433.

12.2.1.3-23 E.Ehmig, „The Application of Colour Etching to the Detection and Evaluation of Hot-Cracking in Weld Joints“, Zeitschrift „Praktische Metallografie“, 31 (1994) 10, Seite 502 - 510.

12.2.1.3-24 DIN 8524, „Fehler an Schmelzschweißverbindungen aus metallischen Werkstoffen“, November 1971, Seite 1-14, auch veröffentlicht in der Zeitschrift „Welding in the World“, 7 (1969),H4, Seite 200/10.

12.2.1.3-25 Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V., Merkblatt DVS 2704, „Richtlinien für das Konstruieren elektronenstrahlgeschweißter metallischer Bauteile“, (Oktober 1976), Seite 1-9.

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.3-26 Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V., Merkblatt DVS 2909 **Teil 1**, „Reibschweißen von metallischen Werkstoffen. Verfahren und Grundlagen“, (März 1980), Seite 1-3. und **Teil 2**, „Reibschweißen von metallischen Werkstoffen. Reibschweißeignung und Werkstoffauswahl“,(März 1980), Seite 1 und 2.

12.2.1.3-27 K.Rüdinger, „Grundlagen der TITAN-Schweißung im Behälter- und Apparatebau“,
Zeitschrift „Industrie Anzeiger“, Verlag W.Girardet, Jahrgang 83, Heft 41, Seite 701-705.

12.2.1.3-28 L.Smith, P.Threagrill, M.Gittos , „Welding Titanium, A Designers and Users Handbook“ TWI, Granta Park, Great Abington, Cambridge, TIG the Titanium Information Group, 1999, Seite 1-34.

12.2.1.3-29 „Properties and Processing of Timet Al 6-4“ Titanium Metals Corporation (Timet), (www.timet.com/6-4fabchar.html) Seite 1-6.

12.2.1.3-30 Hinweise zum Schweißen von Titan und Titanlegierungen“, Fa. Deutsche Titan, www.deutschetitan.de, 2005, Seite 1-4.

12.2.1.3-31 „Job Knowledge for Welders, Weldability of Materials, Titanium and Titanium Alloys“, TWI, Feb. 1999, Seite 1-4.

12.2.1.3-32 P.Adam, L.Steinhauser, „Bonding of Superalloys by Diffusion Welding and Diffusion Brazing“, Proceedings AGARD-CP-398 der Konferenz „Advanced Joining of Aerospace Metallic Materials“ des 61st Meeting of the Structures and Materials Panel of AGARD in Oberammergau, Germany, 11-13 September 1985. Seite 9-1 bis 9-6.

12.2.1.3-33 G.Tober, S.Elze, „Ultrasonic Testing Techniques for Diffusion-Bonded Titanium Components“, Proceedings AGARD-CP-398 der Konferenz „Advanced Joining of Aerospace Metallic Materials“ des 61st Meeting of the Structures and Materials Panel of AGARD in Oberammergau, Germany, 11-13 September 1985. Seite 11-1 bis 11-10.

12.2.1.3-34 ATSB, Accident & Incident Report, Occurrence No: 200200646 March 2002, Seite 1-10.

12.2.1.3-35 R.A.Leyes II, W.A.Fleming, „The History of North American Small Gas Turbine Aircraft Engines“, AIAA Smithsonian Institution, ISBN 1-56347-332-1, 1999, Seite 569.

12.2.1.3-36 „ASM Handbook - Volume 6 - Welding, Brazing and Soldering“,ASM International 1993, ISBN 0-87170-382-3, Seite 150-199.

12.2.1.3-37 J.Ruge, „Untersuchungen zum wasserstoffinduzierten Bruch“, Proceeding der Diskussionstagung „Bruchuntersuchung und Schadenklärung - Probleme bei Eisenwerkstoffen“, 20/21. November 1975, Ismaning bei München, Allianz Versicherungs-AG München und Berlin 1976, Seite 206 - 210.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.3-38 G.Lange, „Schäden durch Wasserstoff“, aus Buch „Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle“, 5. Auflage 2001, WILEY-VCH Verlag GmbH, ISBN 978-3-527-30417-2, Seite 255 - 276.

12.2.1.3-39 M.Möser, „Bruch durch Wasserstoff - Kaltrissigkeit, Mechanismus des Wasserstoffbruchs: Fischaugen(- Effekt)“, Zeitschrift „Schweißtechnik (Berlin) 34 (1985) S. 521-523, www.martin-moeser.de/.../Bruch_Wasser_Kaltrissigkeit_2bearb.pdf, Seite 1-11.

12.2.1.3-40 M.Möser, „Bruch durch Wasserstoff - Kaltrissigkeit, Nebennahtrisse“, Zeitschrift „Schweißtechnik (Berlin) 35 (1985) S. 140-143, www.martin-moeser.de/.../Bruch_durch_Wasserstoff_Kaltrissigkeit_, Seite 1-11.

12.2.1.3-41 B.Rentschler, „Wasserstoffinduzierte Sprödbrüche“, www.dgm.de/past/2004/metallographie/download/686_11.pdf, Seite1-4.

12.2.1.3-42 M.Möser, „Bruch durch Wasserstoff - Kaltrissigkeit, Unternahtrisse“, Zeitschrift „Schweißtechnik (Berlin) 35 (1985) S. 45-47, www.martin-moeser.de/.../Bruch_durch_Wasserstoff_Kaltrissigkeit_, Seite 1-10.

12.2.1.3-43 G.G.Juilfs, „Das Dissoziationsverhalten von Wasserstoff in einem niedrig legierten Stahl unter Berücksichtigung des Verformungsgrades und der Deckschichtbildung in alkalischen Medien“, 2000, images.energieportal24.de/dateien/downloads/dissertation_julifs.pdf, Seite 1-20.

12.2.1.3-44 „Widerstandsschweißen“, http://de.wikipedia.org/Widerstandsschwei%C3%9Fen, Stand 20.05.2012, Seite 1-10.

12.2.1.3-45 M.Uran, „Qualitätssicherung beim Widerstandsschweißen mittels mehrparametrischer Analyse“, Promotion Berlin 2004 D 83, Seite 1-38.

12.2.1.3-46 K.-H.Fischer, S.Schreiber, H.Wüstenberg, „Möglichkeiten der zerstörungsfreien Prüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen“, http://www.ndt.net/article/v05n01/wuesten/wuesten.htm, Seite 1-6.

12.2.1.3-47 „Empfehlungen für das Elektronenstrahlschweißen“, Herausgeber „ebnet“, www.ebnet-burg.de, Stand 2012, Seite 1-21.

12.2.1.3-48 Beispiele für die Anwendung des Elektronenstrahlschweißens im Maschinenbau, Stand 2012, www.pro-beam.com/de/referenz/automotive/....

12.2.1.3-49 „Elektronenstrahlschweißen von Rollenkörpern aus Mono- und Bimetallverbundguss für die Hüttenindustrie“, 12.06.2012, IHK Braunschweig, www.braunschweig.ihk.de/geschaeftsfelder/innovation-umwelt/technologietransferpreis/Chronik..., 1 Seite.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.3-50 „Lohnbearbeitung im Bereich Elektronenstrahlschweißen“, 2012, www.ellinger-schweisstechnik.de/elektronenstrahlschweißen, Seite 1 und 2.

12.2.1.3-51 „Substitution / Fertigungsverbesserung“, 2012, Fa. PHM Industrieanlagen GmbH, www.phm-burg.de, Seite 1 - 20.

12.2.1.3-52 „Neues aus der Bronzezeit“, Tagungsveröffenlichung „Innovationen“ 1/99, AiF Otto von Guericke, www.aif.de, 2 Seiten.

12.2.1.3-53 „Baugruppenfertigung“, Stand 2012, Fa. Servometer, www.servometer.de/assets/images/, 1 Seite.

12.2.1.3-54 M.Lotz, J.JLöhe, „Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reibschweißen“, www.raiser.de/download/innovationspreis/.../marc_lotz.pdf., Seite.1-4.

12.2.1.3-55 „Werkstoffkombinationen“, Fa. SCHNABEL GmbH, www.lohnreibschweißen.de/index.php?id=13&type=1, 1 Seite.

12.2.1.3-56 „(Multi-) Orbitales Reibschweißen Unterschiede Orbital- zum Rotationsreibschweißen“, Fa. Multi Orbital Welding Systems GmbH, www.dyconn.de/de/index.php?page=395, 2 Seiten.

12.2.1.3-57 „Reibschweißen im Fahrzeugbau“, www.raiser.de/Homepage/tmplate/archived-articles/92-website-content/leistungsspektru..., 2 Seiten.

12.2.1.3-58 G.Lütjering, J.C.Williams, „Titanium- Engineering Materials and Processes“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003, ISBN 3-540-42990-5, Seite 97-102.

12.2.1.3-59 „Entwicklung und Optimierung von diffusionsgeschweißten Verbindungen für die Fusionstechnologie“, Institut für Angewandte Materialien (IAM), www.iam.kit.edu/wbm/664.php, Stand 2012, Seite 1 und 2.

12.2.1.3-60 S.Seidel, „Technologieintegration zur Herstellung von Serienwerkzeugen mittels Metallfolien-LOM“, 2007, www.rtejournal.de/ausgabe4/1206, Seite 1-6.

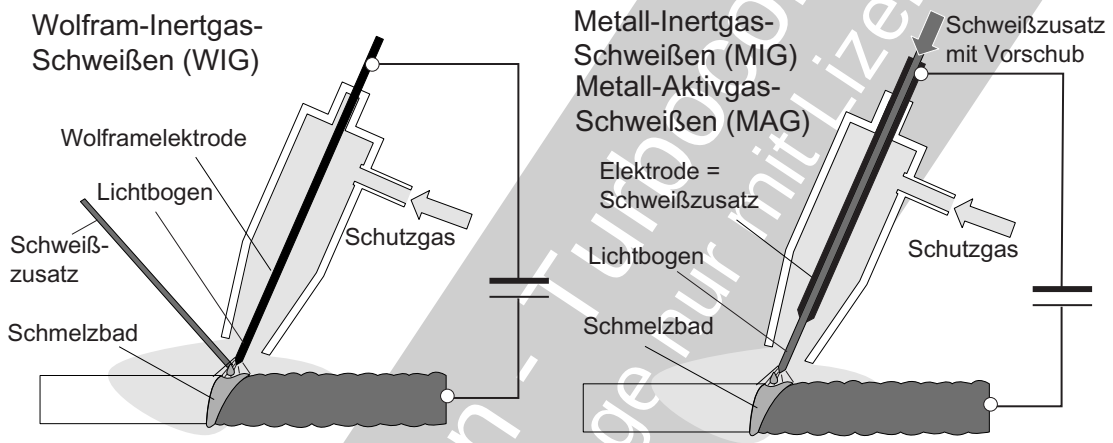
12.2.1.3-61 G.A.Fitzpatrick, T.Broughton, „Diffusion bonding Aeroengine Components“, 09. 05. 1988, Def.Sci., Vol 38, No. 4, October 1988, Seiten 477 - 485.

12.2.1.3-62 G.A.Fitzpatrick, A.D.LLoyd „Establishing Best Price in the Design and Manufacture of Hollow Titanium Fan Blades“, Paper des „RTO AVT Workshop“ on „Intelligent Proceeding of High Performance Materials“, Brussels, Belgium, 13-14 May 1998, Seite 4-1 bis 4-3.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden
Konventionelles Schmelzschweißen

12.2.1.3.1 ‘Konventionelle’ elektrische Schmelzschweißverfahren



In diesem Kapitel werden ausgewählte **Schmelzschweißverfahren** behandelt.

- Schweißen in **Umgebungsluft** mit **umhüllter Elektrode aus Zusatzwerkstoff** die den Lichtbogen erzeugt.
- Schweißen unter **Schutzgas** (MIG) oder **Aktivgas** (MAG) und ebenfalls der **Elektrode aus Zusatzwerkstoff** für den Lichtbogen.
- Schweißen unter **Schutzgas**, wobei die aus einem Wolframwerkstoff bestehende Elektrode **nur dem Lichtbogen** dient (WIG). Der **Zusatzwerkstoff** wird **separat** zugeführt.

Schutzgasschweißungen kommen in erster Linie für martensitische, höher- und hochfeste Stähle sowie austenitische Stähle (z.B. Cr-Ni-Stähle) und Nichteisenmetalle (Al-Legierungen, Ti-Legierungen) in Betracht. Diese sind besonders für **Anwendungen im Leichtbau** geeignet. Hier kommt es auf hohe Festigkeit und/oder niedriges Gewicht der Struktur an.

Dem **Konstrukteur** sollte bewusst sein, dass eine Schweißung mit **auslegungsgemäßen Eigenschaften Voraussetzungen** hat, für die nicht zuletzt auch er sorgen muss. Das beginnt mit der Auswahl des **Verfahrens** und der **Durchführung** (z.B. Vorrichtungen, Zugänglichkeit, Prüfbarkeit). Häufig unterliegt eine Schweißung (z.B. bei Sicherheitsrelevanz) **Vorschriften** bzw. **Spezifikationen**. Sie sollen die **Schweißungsqualität** gewährleisten und beschreiben die optimale **Durchführung** sowie die zerstörende und/oder zerstörungsfreie Prüfung im Rahmen der Qualitätssicherung. Dazu gehören das Schweißpersonal, Verfahrensparameter und äußere Einflüsse (z.B. Reinheit und Verteilung des Schutzgasschleiers, Bild 12.2.1.3.1-18). Von besonderer Bedeutung ist die **Qualitätssicherung**. Sie nutzt anwendungsspezifische Verfahren (Anlagen und Prüfpersonal). Eine Voraussetzung ist die Kenntnis der potenziellen **Schwachstellen** bzw. Fehler sowie deren Beurteilung und **Grenzen**. Hierzu sind besonders für sicherheitsrelevante bzw. abnahmepflichtige Schweißungen umfangreiche Vorschriften zu beachten.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

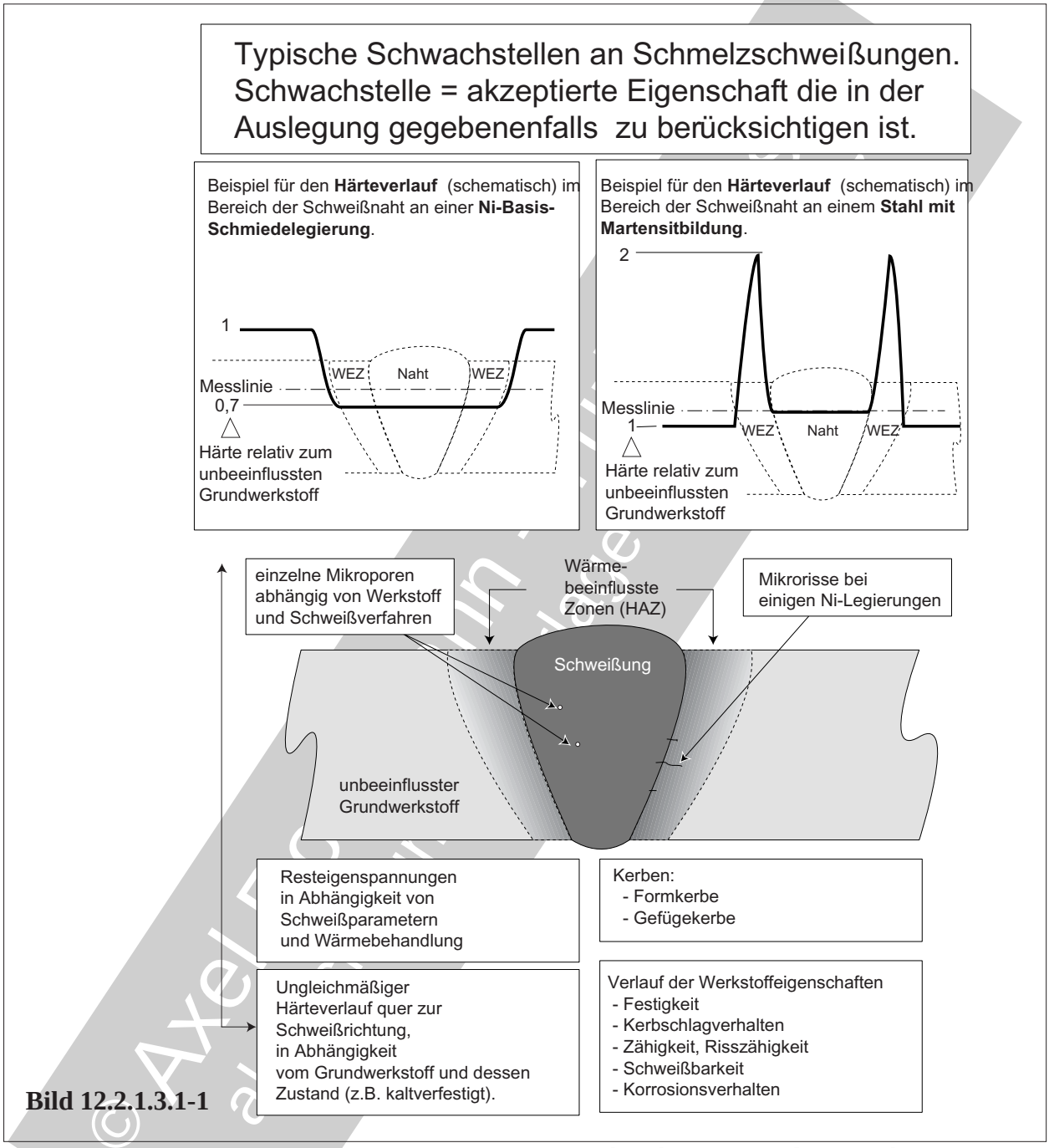


Bild 12.2.1.3.1-1

Bild 12.2.1.3.1-1: *Bei Schmelzschweißungen ist mit* ***verfahrenstypischen*** *(unvermeidlichen)* ***Schwachstellen*** *(oft auch als Ungänzen bezeichnet, Lit. 12.2.1.3-7) zu rechnen. Bereits die Festigkeitseigenschaften des Gussgefüges der* ***Schweißnaht*** *(engl.* ***weld bead****) liegen meist, insbesondere was die Schwingfestigkeit anbetrifft, unterhalb denen des Grundmaterials. Zusätzlich beeinflusst die Schweißwärme auch das angrenzende, nicht aufgeschmolzene Grundmaterial (****Wärmeeinflusszone*** *= WEZ, engl. Heat Affected Zone = HAZ). Die oberen Diagramme zeigen zwei Beispiele für den (schematischen) Härteverlauf quer zur Naht als Merkmal für deren Festigkeit. Der linke Härteverlauf mit einem Abfall in der Schweißung und in der WEZ lässt sich bei aushärtbaren Werkstoffen wie Ni-Legierungen (z.B.Waspaloy, Lit. 12.2.1.3-12), hochlegierten Stählen (z.B. A-286) und Aluminium-*

legierungen (z.B. AlMg-Legierungen, Lit. 12.2.1.3-4) beobachten.
Das rechte Diagramm stellt den Härteverlauf in einem Martensit bildenden Stahl dar (z.B. St-52, Lit. 12.2.1.3-4). Hier treten deutliche Härtespitzen im Grobkornbereich (rekristallisierte Zone, Bild 12.2.1.3.1-10) der WEZ auf. Bei ausreichend schneller Abkühlung ist ein unerwünscht großer Härteanstieg in der Schweißnaht zu erwarten. Ein solcher Härteverlauf lässt sich mit geeigneter Temperaturführung beim Schweißen vermeiden und/oder mit einer nachfolgenden Wärmebehandlung beseitigen.
Neben einer werkstoffspezifischen Gefügebeeinflussung kann die Festigkeit einer vorschriftsgerechten Schweißung noch von einer Vielzahl weiterer verfahrenstypischer Faktoren abhängen, die nachfolgend kurz behandelt werden.

***Trennungen und Hohlstellen**: Größe und Art vermeidbarer Fehlstellen (z.B. Gasporen, Lunker, Risse, Klebestellen) hängt nicht zuletzt von den zur Verfügung stehenden seriengeeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren und der Zugänglichkeit der Schweißnaht ab. Daran hat sich auch die nutzbare, einer Auslegung zu Grunde liegende Mindestfestigkeit zu orientieren.*

***Kerben:** Im Bereich einer Schweißnaht sind alle Arten von Kerben (siehe auch Band 1, Bild 5.4.4-1) möglich (Bild 12.2.1.3.1-2 und Bild 12.2.1.3.1-7). Hierzu gehören **Formkerben** wie Poren, Risse, Einbrandkerben, Nahtüberhöhung und Schweißversatz. Die andere Hauptgruppe bilden **Gefügekerben.** Sie sind auf unterschiedliche Gefüge von Schweißnaht (Guss), WEZ (wärmebeeinflusstes Grundmaterial) und unbeeinflusstes Grundmaterial zurückzuführen.*

***Eigenspannungen** (Bild 12.2.1.3.1-16) sind von vielen Einflüssen wie Bauteilgeometrie, Verfahren, Prozessparametern, Temperaturführung und einer nachfolgenden Wärmebehandlung abhängig. Selbst nach einem Spannungsarmglühen (Band 4, Bild 18.4-5.1) ist mit Resteigenspannungen zu rechnen.*

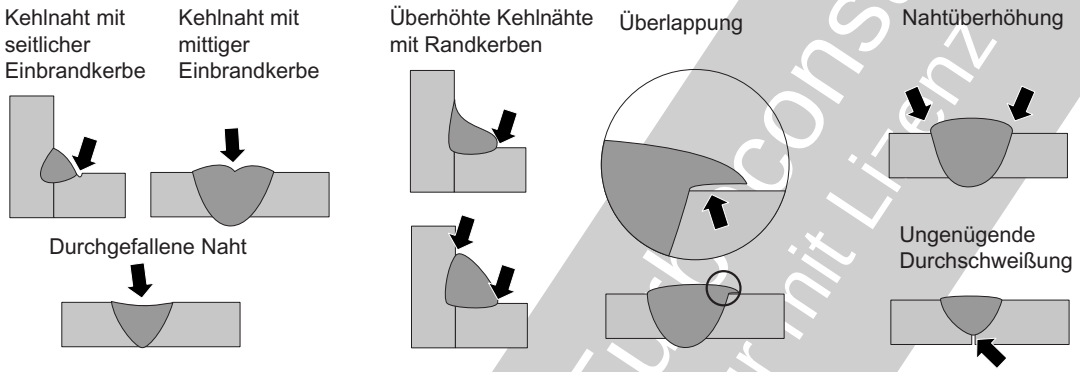
***Ungünstige Werkstoffeigenschaften** können sich in einer erhöhten Anfälligkeit für Korrosion zeigen. An unstabilisierten Cr-Ni-Stählen tritt eine **Sensibilisierung** der WEZ ein. Sie entsteht durch Karbidbildung (Cr-Karbid) und macht die Korngrenzen korrosionsanfällig. So wird **interkristalline Korrosion** (IK) begünstigt (Band 1, Bild 5.6.1.1-4 und Bild 5.6.1.1.-6). Auch die Empfindlichkeit gegenüber **Spannungsrisskorrosion,** gemeinsam mit einem **Abfall der Risszähigkeit**, kann von einer Gefügeveränderung begünstigt sein.*
*Das Gussgefüge der Schweißnaht weist häufig eine gegenüber dem Grundmaterial **verschlechterte Zähigkeit** auf. Das kann sich sowohl in der **Schlagzähigkeit** (Kerbschlagzähigkeit) als auch in einer niedrigeren **Risszähigkeit** bemerkbar machen. Damit können kürzere Risse kritisch werden und zu einem spontanen Versagen führen. Auch bei Schlagbeanspruchung, etwa im Zuge eines **Containmentfalles,** kann sich eine verminderte Risszähigkeit sicherheitsrelevant auswirken. Das in der Erstarrung gerichtete Gefüge der Schweißnaht und/oder ein Festigkeitsabfall in der **WEZ** kann die **Rissfortschrittsgeschwindigkeit erhöhen und deren Richtung bestimmen**.*
*Ist ein **Nachschweißen** bzw. **Reparieren** der Naht erforderlich, kann das im Vergleich zum unbeeinflussten Grundwerkstoff ungünstigere Nahtgefüge die Bildung von **Heißrissen** unterstützen.*

*Es lässt sich also sagen: **generell ist auch bei vorschriftsgerechten Schmelzschweißungen mit einem merklichen Schwingfestigkeitsabfall im Vergleich zum Grundmaterial zu rechnen. Aus diesem Grund sollten Schweißungen nach Möglichkeit nicht in dynamisch hoch beanspruchte Bauteilzonen gelegt werden** (Bild 12.2.1.3.1-3)*

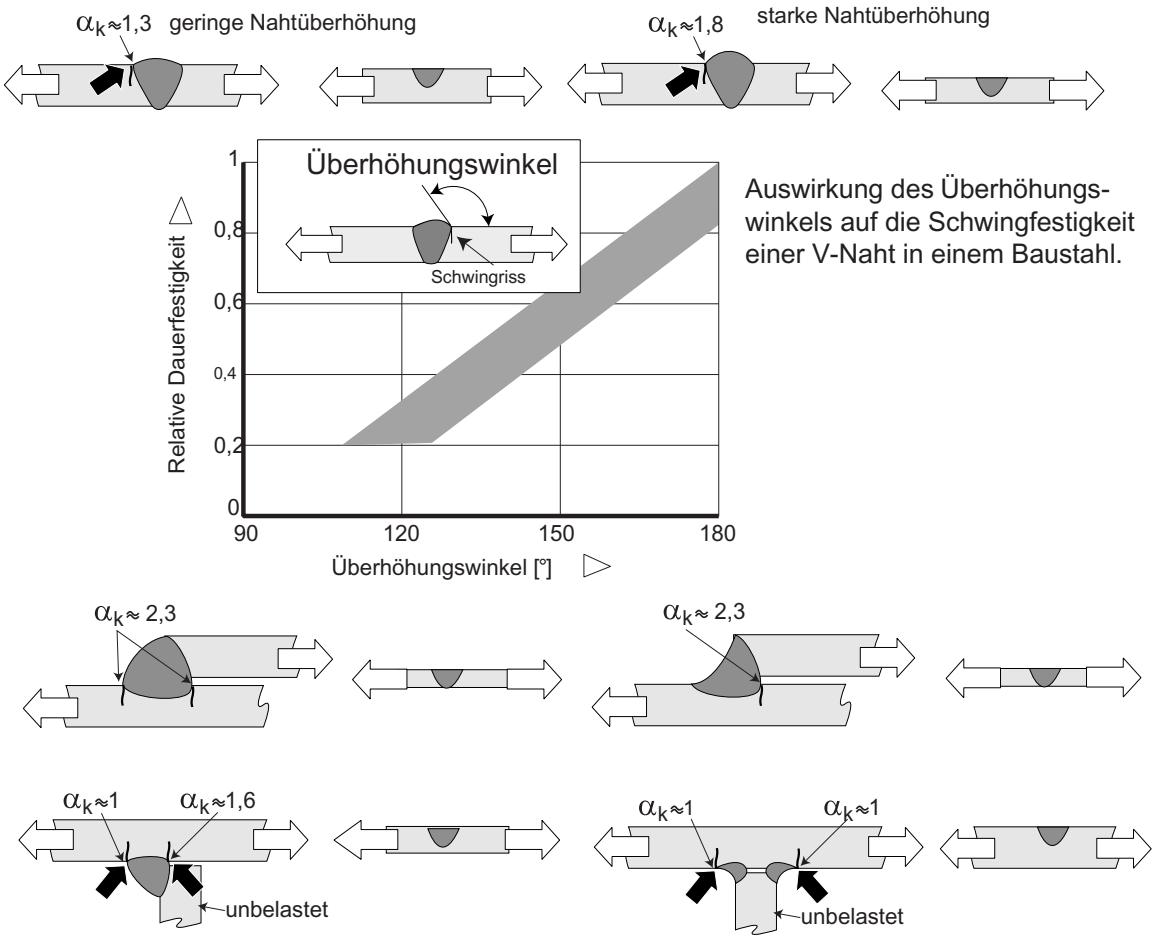
© Axel Bossmann - Turbomaschinenlaboratorium

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

Formkerben an Schweißungen.



Kerbwirkung von typischen Schmelzschweißungen



Auswirkung des Überhöhungswinkels auf die Schwingfestigkeit einer V-Naht in einem Baustahl.

Bild 12.2.1.3.1-2

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

Bild 12.2.1.3.1-2: *Unbearbeitete* ***Schweißungen*** *beeinflussen gewöhnlich die Bauteilkontur und wirken somit als Formkerbe. Es lassen sich die folgenden Probleme unterscheiden:*

Zeichnungsgerechte Schweißnahtausbildung: *Bereits eine vorschriftsmäßige nicht nachgearbeitete Schweißnaht kann bereits wegen ihrer Form die Schwingfestigkeit deutlich absenken. Im Rahmen ist die Kerbwirkung von verschiedenen typischen Schweißnähten bzw. Schweißkonfigurationen angegeben. Zur Veranschaulichung ist jeweils neben einer Skizze der Schweißung der Querschnitt einer nachgearbeiteten glatten geschweißten Platte (um andere Effekte wie Gefügeeinflüsse unberücksichtigt zu lassen) mit gleicher Schwingfestigkeit dargestellt. Selbstverständlich wächst der Unterschied mit der Kerbwirkung.*
Es ist festzustellen, dass ***auch bei zeichnungsgerechten, nicht nachgearbeiteten Schweißungen mit einem formbedingten Schwingfestigkeitsabfall zu rechnen*** *ist.*

Einbrandkerben *(engl.* ***undercut,*** *Skizzen oben links): Es handelt sich um längs zur Naht verlaufende Rinnen die beim Schweißvorgang entstehen. Diese sind meist die Folge eines zu hohen Schweißstroms und/oder ungünstiger Elektrodenführung (Lit. 12.2.1.3.1-17). Einbrandkerben können sowohl am Nahtkopf als auch im Bereich der Nahtwurzel auftreten. Ihr Verlauf ist bevorzugt im Grundmaterial. Der Schwingfestigkeitsabfall wenig ausgeprägter Einbrandkerben ist gewöhnlich tolerierbar (Bild 12.2.1.3.1-4, Lit. 12.2.1.3-12). In ausgeprägter Form sind sie aber als Fehler anzusehen (Lit. 12.2.1.3-7).*

Nahtüberlappung *(engl.* ***overlap****, Skizze oben zweite von rechts): Der Nahtkopf überlappt am Nahtrand das Grundmaterial ohne eine Verbindung einzugehen.*

Nahtüberhöhung *(engl.* ***weld reinforcement,*** *Skizze oben rechts): Es handelt sich um einen Materialauftrag am Nahtkopf, sodass eine Überwölbung eintritt, die in steilem Winkel (Überhöhungswinkel) in das Grundmaterial verläuft. Der Einfluss der Nahtüberhöhung auf die Schwingfestigkeit hängt vom Überhöhungswinkel ab (Diagramm, Lit. 12.2.1.3-18 und obere Skizzen im Rahmen). Für einige übliche Nahtformen ist die Kerbwirkungszahl* α_k *angegeben. Sie erreicht bei deutlicher Nahtüberhöhung 1,8. Das entspricht einer erheblichen Reduzierung der Schwingfestigkeit auf Grund der Nahtkopfform.*

© Axel Possmann - Turbocomput
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

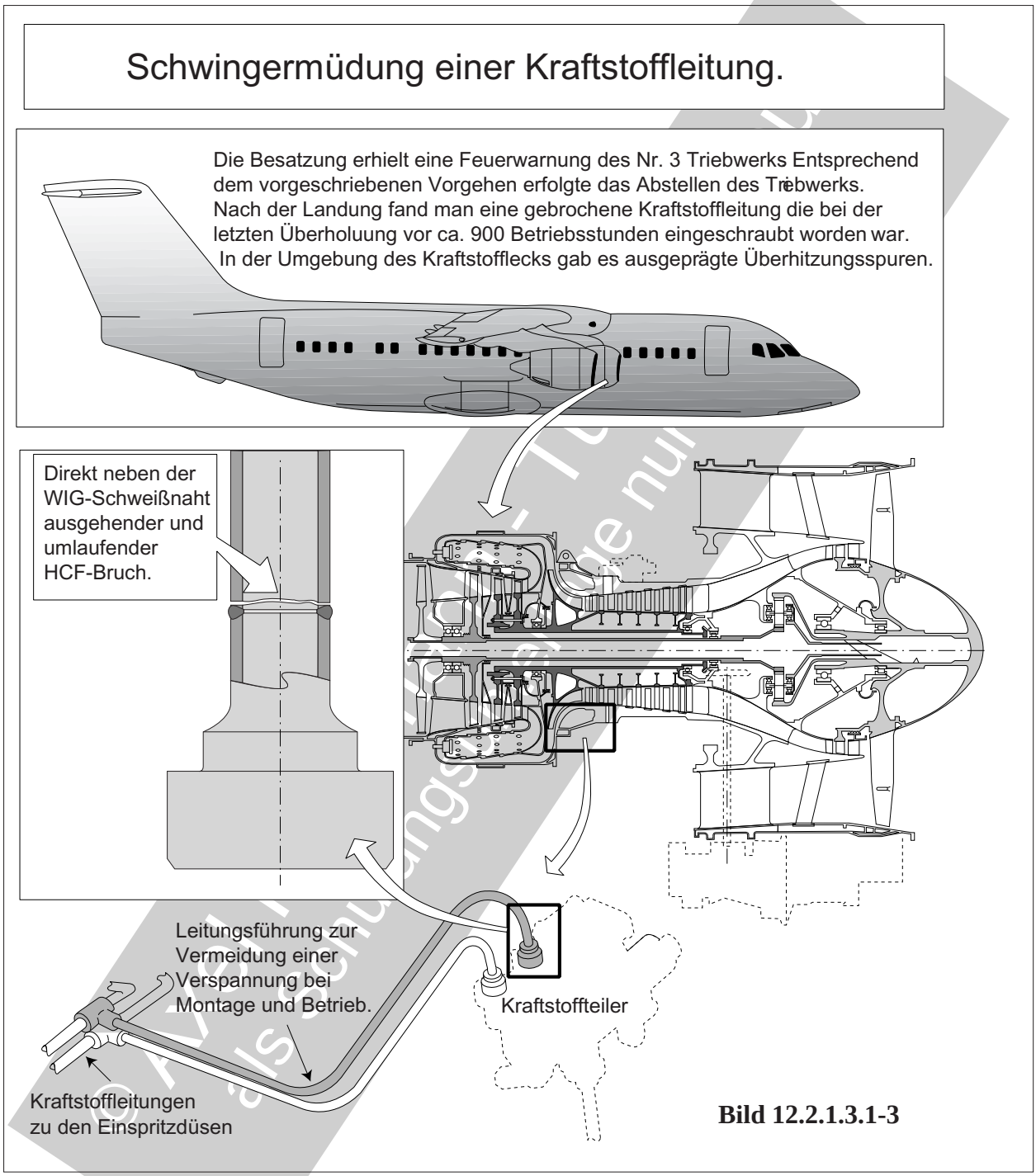


Bild 12.2.1.3.1-3

Bild 12.2.1.3.1-3 *(Lit. 12.2.1.3-19): In diesem Fall lag offenbar die Schweißung in einem, bei der Schwingung der* ***Kraftstoffleitung*** *hochbeanspruchten Bereich. Der Riss lief direkt neben der Schweißnaht. Fehlstellen oder eine ungewöhnliche Nahtausbildung waren nicht erkennbar. Dies lässt auf eine ungewöhnlich hohe Schwingbelastung und/oder eine montagebedingte Verspannung schließen. Der Rissverlauf weist auf die bei einer solchen Schweißung normalerweise zu erwartende Kerbwirkung am Schweißnahtübergang (Formkerbe, Gefügekerbe, Bild 12.2.1.3.1-2 und Band 1 Bild 5.4.4-1) hin.*

Dieses Beispiel unterstreicht die Forderung, Schmelzschweißungen generell ***außerhalb dynamisch hoch beanspruchter Bauteilzonen*** *zu legen.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

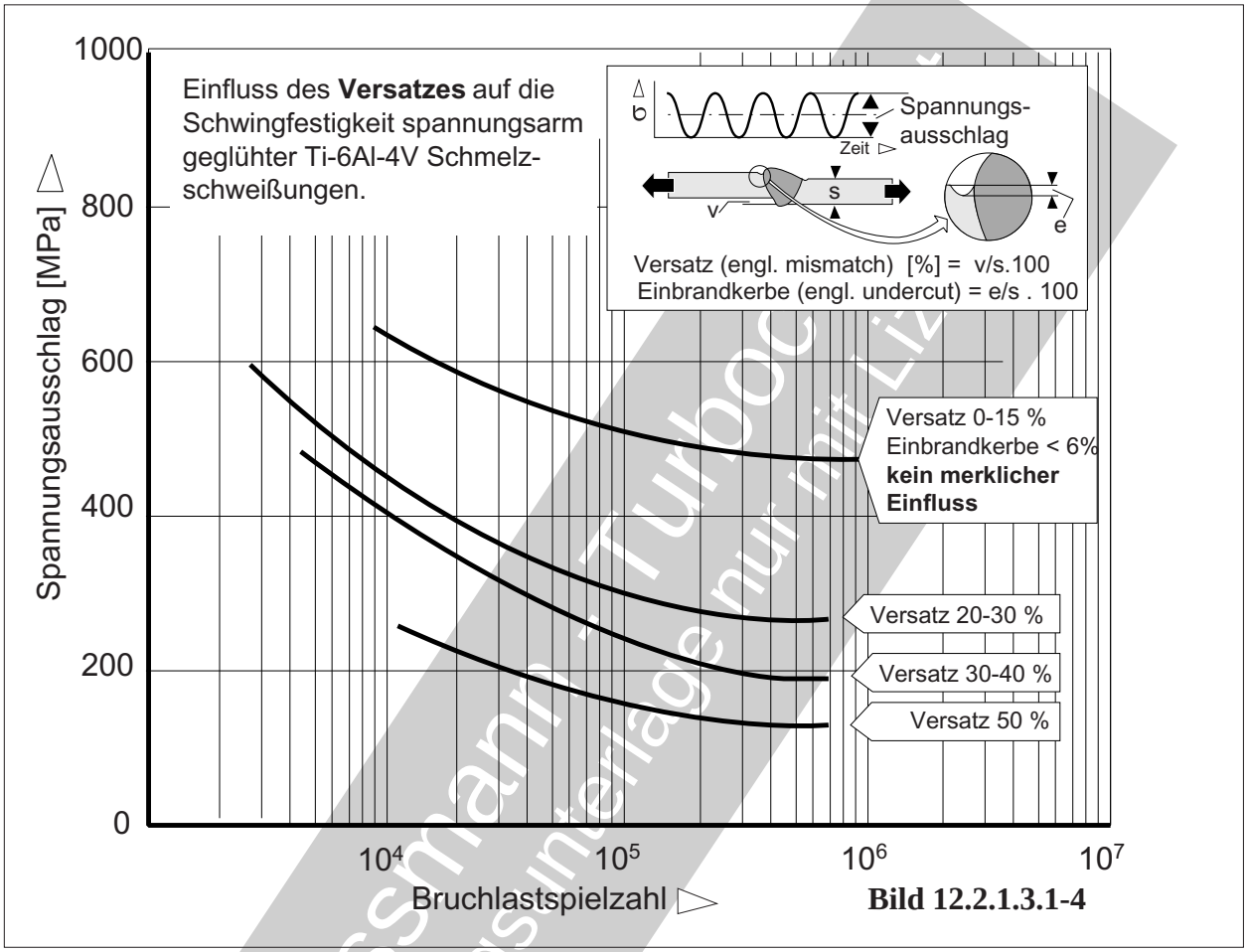


Bild 12.2.1.3.1-4

Bild 12.2.1.3-4 *(Lit. 12.2.1.3.1-12): Dieses Diagramm zeigt beispielhaft den Einfluss eines* ***Schweißstoßversatzes*** *auf die Schwingfestigkeit. Obwohl es sich um eine hochfeste Titanlegierung handelt, dürften für Ni-Legierungen und Stähle ähnliche Bedingungen gelten. Erst ein Versatz über 15% der Blechdicke zeigt einen deutlichen Abfall der Schwingfestigkeit außerhalb der typischen Streuwerte von Schweißungen. Für einen Schweißversatz von 20 % muss bereits mit einem* ***Schwingfestigkeitsabfall um 50 %*** *gerechnet werden. Neben der eigentlichen Rissbildung wirkt sich ein Schweißversatz noch in anderer Weise negativ aus. Die vom Versatz gebildete querbelastete Längskerbe gibt die Richtung des Rissfortschritts vor und beschleunigt diesen. Ein sehr schneller, nicht abfangbarer zyklischer Rissfortschritt mit einem frühzeitigen plötzlichen Gewaltbruch wird auf diese Weise begünstigt. Derartige Schweißfehler sind deshalb an hochbelasteten Bauteilen, wie unter Innendruck stehende Gehäuse (z.B.* ***Brennkammermäntel****, Bild 12.2.1.3.1-5), ein nicht tolerierbares Sicherheitsrisiko.*

© Axel Rossmann - Turbo
als Schulungsunterlage nur mit Liz

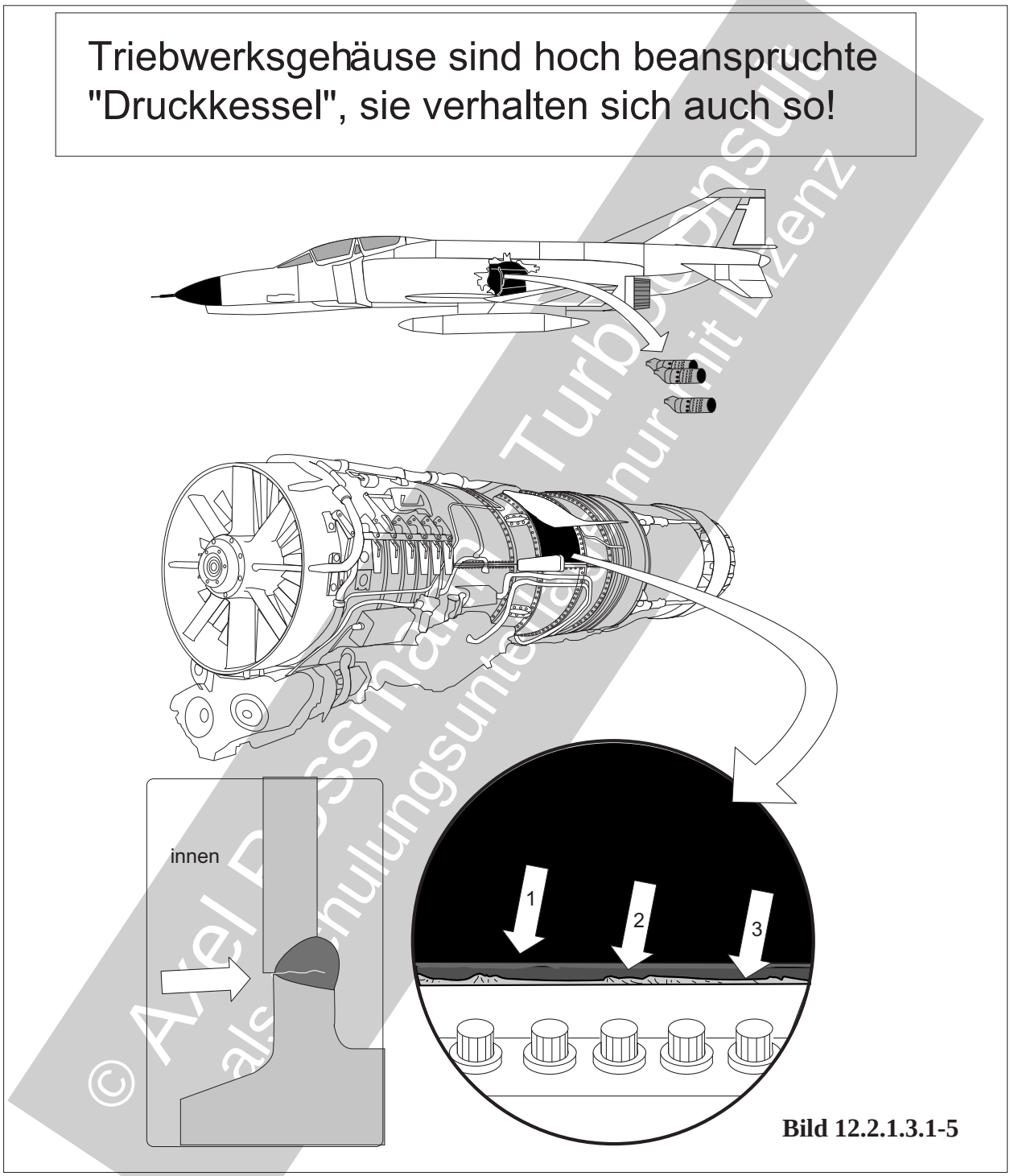


Bild 12.2.1.3.1-5

© Axel Dossmann, Turbopensuit
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

***Bild 12.2.1.3.1-5**: Im Fall eines zweistrahligen Kampfflugzeugs älterer Bauart, führte ein **Schweißversatz** der Längsnaht am Horizontalflansch (Skizze unten links) des **Brennkammermantels** zur Entstehung eines LCF-Risses. Weil sich der Riss zuerst in der Kerbe auf der Wandinnenseite ausbreitete und erst sehr spät nach außen drang, wurde er nicht rechtzeitig erkannt. Es kam zum explosionsartigen Aufreißen des Gehäuses mit einem Austritt mehrerer Rohrbrennkammern. Da glücklicherweise die Explosion zur Außenseite des Rumpfs gerichtet war (Skizze oben), konnte das Flugzeug mit dem unbeschädigten Paralleltriebwerk sicher landen.*

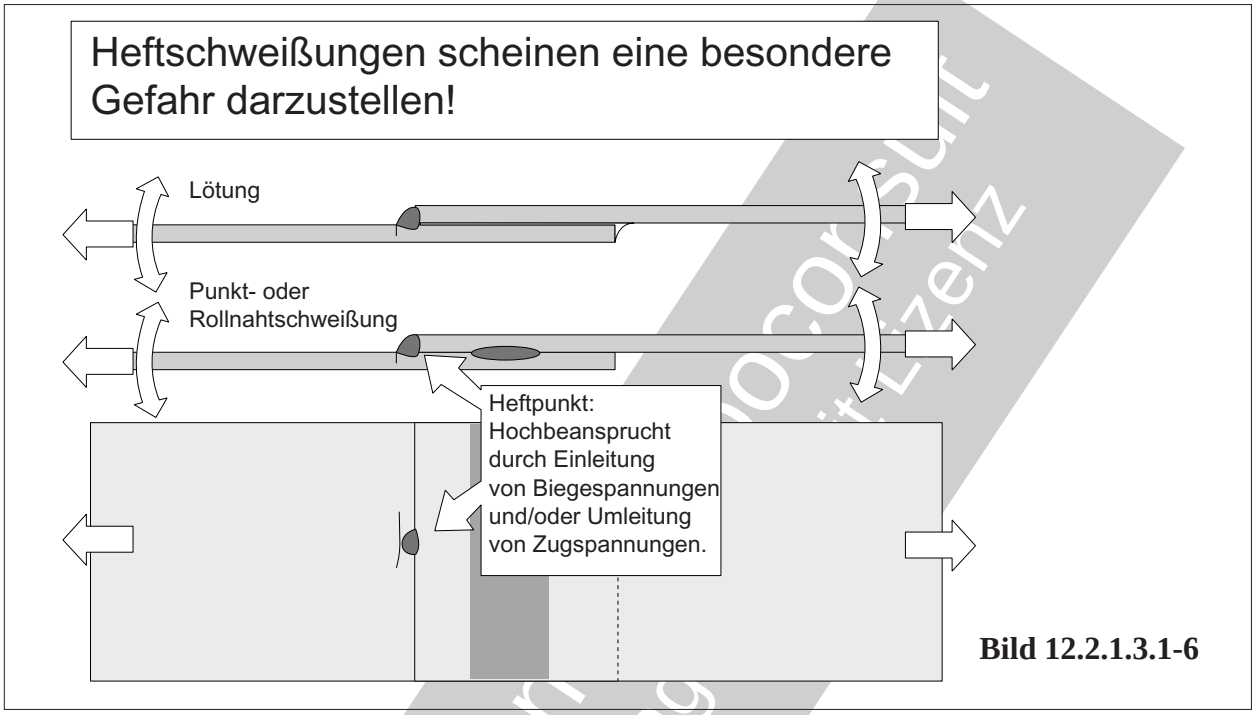


Bild 12.2.1.3.1-6

Bild 12.2.1.3.1-6 *und* ***Bild 12.2.1.3.1-7:*** *Ein besonderes Problem sind sog.* ***Heftschweißungen****. Gewöhnlich handelt es sich um kurze oder punktförmige Schmelzschweißnähte. Sie dienen zur Positionierung von zu verschweißenden oder verlötenden Blechen. Die Erfahrung lässt darauf schließen, dass solchen Schweißungen häufiger nicht die notwendige Aufmerksamkeit zukommt. Eine Heftschweißung unterliegt auf mehrfache Weise hohen Betriebsbeanspruchungen und ist deshalb ein prädestinierter Ausgangsort für Schwingrisse (mittlere Skizze in Bild 12.2.1.3.1-7, Lit. 12.2.1.3-15).*

Ein kleiner „Schmelzschweißpunkt“ kann wegen schwer zu definierender Prozessparameter (z.B. Temperaturführung, Brennerposition) und der geringen Größe eher unentdeckt bleiben, als eine relativ ausgeprägte ***Einbrandkerbe und/oder Nahtüberhöhung*** *wie sie Verbindungsnähte aufweisen.*

Werden Heftschweißungen überschweißt, kann sich in diesem Bereich bereits der Einfluss der Heftschweißung negativ bemerkbar machen. Ein weniger gut schweißbares Gefüge und Zugeigenspannungen unterstützen eine Warmrissbildung in der darüber laufenden Verbindungsnaht.

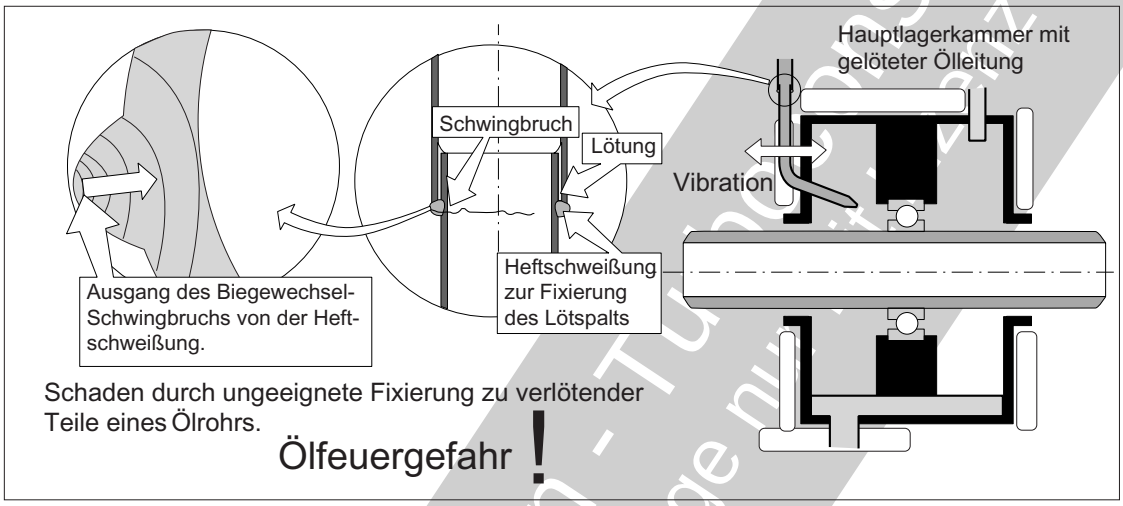
Liegen Heftschweißungen außerhalb der eigentlichen Verbindungsnaht, z.B. bei einer Rollnaht (Bild 12.2.1.3.1-6, mittlere Skizze), wirken sie als besondere ***Spannungskonzentration*** *(Bild 12.2.1.3.1-6 Skizze unten). Dieser Effekt dürfte bei Lötverbindungen, deren E-Modul merklich unterhalb der Schweißung und dem Grundmaterial liegt, besonders ausgeprägt sein (Bild 12.2.1.3.1-7, Skizze unten). Bei Biegung (z.B. Biegeschwingungen) von verlöteten oder punktgeschweißten Blechstrukturen, ist die Heftschweißung besonders gegenüber Schwingspannungen exponiert.*

Ein besonderes Problem ist die ***Fixierung von Lötspalten*** *an Vergütungsstählen. Diese können aufhärten und/oder in der wärmebeeinflussten Zone einen deutlichen Festigkeitsabfall erleiden. Einen Extremfall zeigt die untere Skizze in Bild 12.2.1.3.1-7. Im Zuge einer Reparaturentwicklung wurde vorübergehend versucht, eine einzulötende Verschleißbüchse mit Heftschweißungen in einer Stahl-Rotorscheibe zu fixieren. Das hätte zu einem gefährlichen Festigkeitsabfall durch Einflüsse wie Anlassen, Aufhärten, Verspröden und Zugeigenspannungen, mit dem Risiko eines Scheibenbruchs bedeutet.*

© Axel Rosemann
nur als Sonderdruck mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

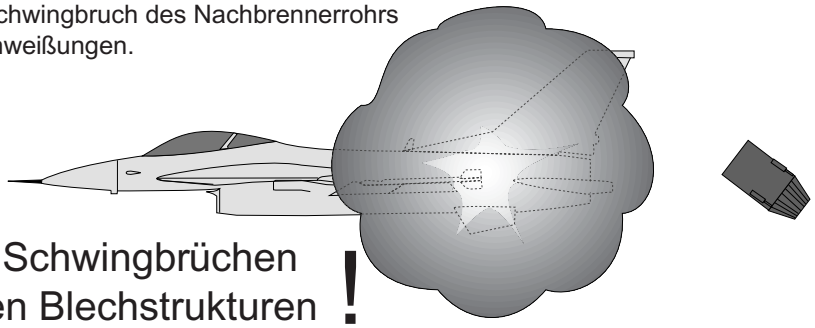
Vorsicht bei Heftschweißungen zur Schweißspalt- und Lötspaltfixierung an dynamisch belasteten Bauteilen!



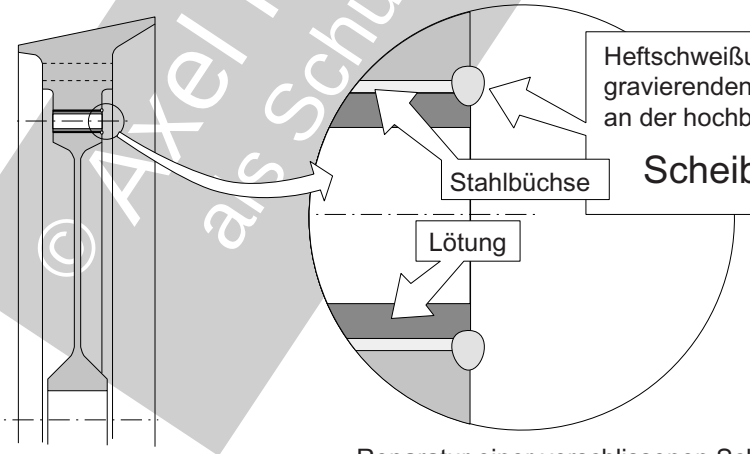
Schaden durch ungeeignete Fixierung zu verlötender Teile eines Ölrohrs.

Ölfeuergefahr !

Flugunfall nach dem Schwingbruch des Nachbrennerrohrs im Bereich von Heftschweißungen.



Auslösung von Schwingbrüchen an großflächigen Blechstrukturen !



Heftschweißung (!) führt zum gravierenden Schwingfestigkeitsabfall an der hochbelasteten Bohrung.

Scheibenbruchgefahr !

Verdichterscheibe aus niedrig legiertem Stahl

Reparatur einer verschlissenen Scheibenbohrung durch Einlöten einer Büchse

Bild 12.2.1.3.1-7

Bildbeschreibung vorhergehende Seite

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

Bild 12.2.1.3.1-8

Bild 12.2.1.3.1-8: *Im Gegensatz zu Schwachstellen (**Ungänzen**, Bild 12.2.1.3.1-1 und Bild 12.2.1.3.1-2) müssen **Schweißfehler**, d.h. Abweichungen außerhalb der Spezifikationen bzw. der Auslegungsdaten, mit ausreichender Sicherheit vermieden werden. Dieses Bild zeigt eine Zusammenstellung typischer Schweißfehler (Lit. 12.2.1.3-4, Lit. 12.2.1.3-24) die u.a. an anderer Stelle (z.B. Warmrisse, Bild 12.2.1.3.1-10) eingehender behandelt werden. Einige Fehler sind werkstoffspezifisch. Hierzu gehört die **Versprödung von Titan durch Sauerstoffaufnahme** bzw. Oxidbildung. Das erfordert den Zutritt von Luft auf Grund eines unzureichenden Schutzgasschleiers bei Materialtemperaturen oberhalb von 600 °C. Werkstoffspezifisch ist auch die **Sensibilisierung** von Cr-Ni-Stählen mit der Gefahr späterer interkristalliner Korrosion (Bild 12.2.1.3.1-1). Martensitbildende Stähle unterliegen einer erhöhten Versprödungsgefahr durch Aufnahme von Wasserstoff aus Feuchtigkeit durch das Schweißbad. Das Detail oben zeigt eine REM-Aufnahme (Band 1 Bild 5.7.1-2) mit typischen Merkmalen einer Wasserstoffversprödung in Stählen (Lit. 12.2.1.3-21). Auch Titanlegierungen lassen spröde Rissbildung um Poren (Lit. 12.2.1.3-22, Bild 12.2.1.3.1-9) bei gelösten Gasen wie Wasserstoff erkennen(siehe auch Bild 12.2.1.3.1-21).*

Nicht zu unterschätzen sind schädigende Einflüsse von Schweißspritzern oder Zündstellen (Band 4, Kapitel 18.6) die außerhalb der Schweißung liegen. Unglücklicherweise nicht selten in einer höher beanspruchten Bauteilzone.

*Die **Schweißwurzel stellt eine besondere Problemzone** dar. Dies liegt einmal an einer zugangsbedingten höheren Fehleranfälligkeit. Hierzu gehört auch eine eingeschränkte Schutzgasversorgung. Zum anderen ist nicht selten eine visuelle Prüfbarkeit zumindest behindert.*

Schweißfehlereinfluss im LCF-Bereich in Abhängigkeit von der Spannungskonzentration. Auswirkung der Fehlergröße auf die zyklische Lebensdauer einer hochfesten Titanlegierung.

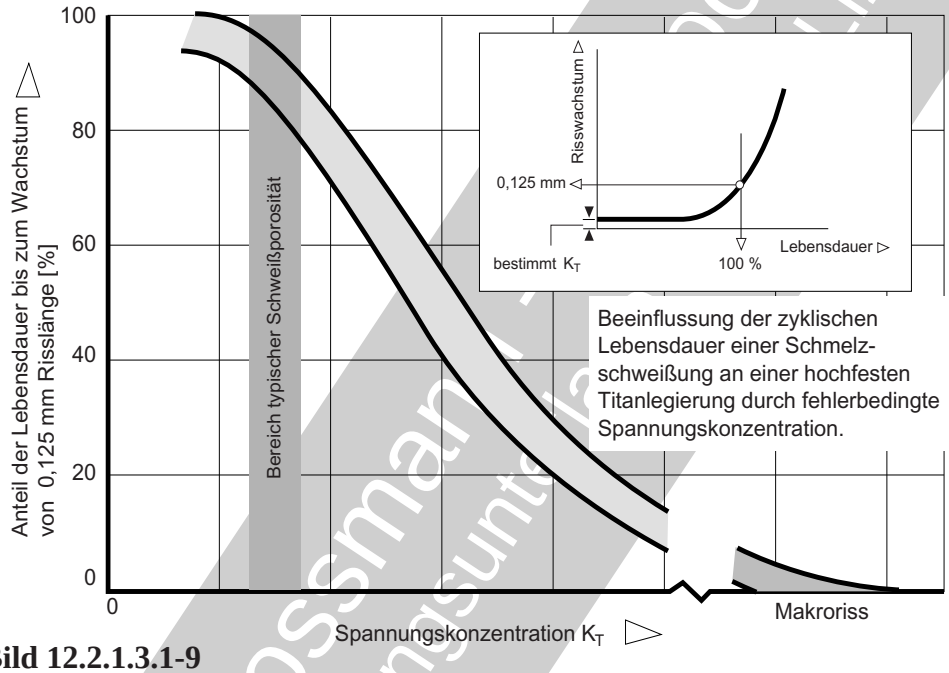


Bild 12.2.1.3.1-9

Bild 12.2.1.3.1-9 *(Lit. 12.2.1.3-12): Aufgetragen ist die zyklische Lebensdauer über der Spannungskonzentration von Fehlern in Proben mit einer Schmelzschweißung. Die Belastung ist eine Sinus-Zugschwellbeanspruchung (Bild 12.2.1.3.1-15). Das Streuband gilt für hochfeste Titanlegierungen und begrenzt die Inkubationszeit bis zu einem merklichen Risswachstum (Detail). Die Betriebsbelastungen befinden sich im LCF-Bereich. Man erkennt, dass die* ***werkstofftypische Schweißporosität*** *(Bild 12.2.1.3.1-15, Bild 12.2.1.3.1-17 und Bild 12.2.1.3.1-18) die* ***LCF-Lebensdauer*** *lediglich um bis zu 20 % verkürzt. In vielen Fällen ist eine Spannungskonzentration im angegebenen Streubereich tolerierbar.*

*Zu berücksichtigen ist, dass ein Haltezeiteffekt (****„Dwell Time Fatigue“ =DTF****) die Rissbildung stark beschleunigen kann (Band 1, Bild 5.4-12 und Bild 5.4-13). Für die Lebensdauer bei Rissfortschritt spielt eine Überlagerung von Eigenspannungen und zyklischer Betriebsbelastung eine Rolle.*

Eine spontane, spröde Mikrorissbildung durch sog. ***„Pore Cracking“*** *(Lit. 12.2.1.3-22, Bild 12.2.1.3.1-22) infolge Gasaufnahme und ungünstiger Gefüge dürfte dabei nicht berücksichtigt sein. Sie kann von Eigenspannungen (statische Belastung) als* ***„Sustained Load Cracking“*** *(SLC) ausgelöst werden (Bild 11.2-20).*

In Fällen von DTF und SLC beobachtet man keinen ausgeprägten Zusammenhang zwischen Porengröße und Rissbildung (Lit. 12.2.1.3.1-22), d.h. die Anwendbarkeit des Diagramms ist deutlich eingeschränkt.

© Axel Rossmann - Procoder Lizenz als Schulungsunterlage

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

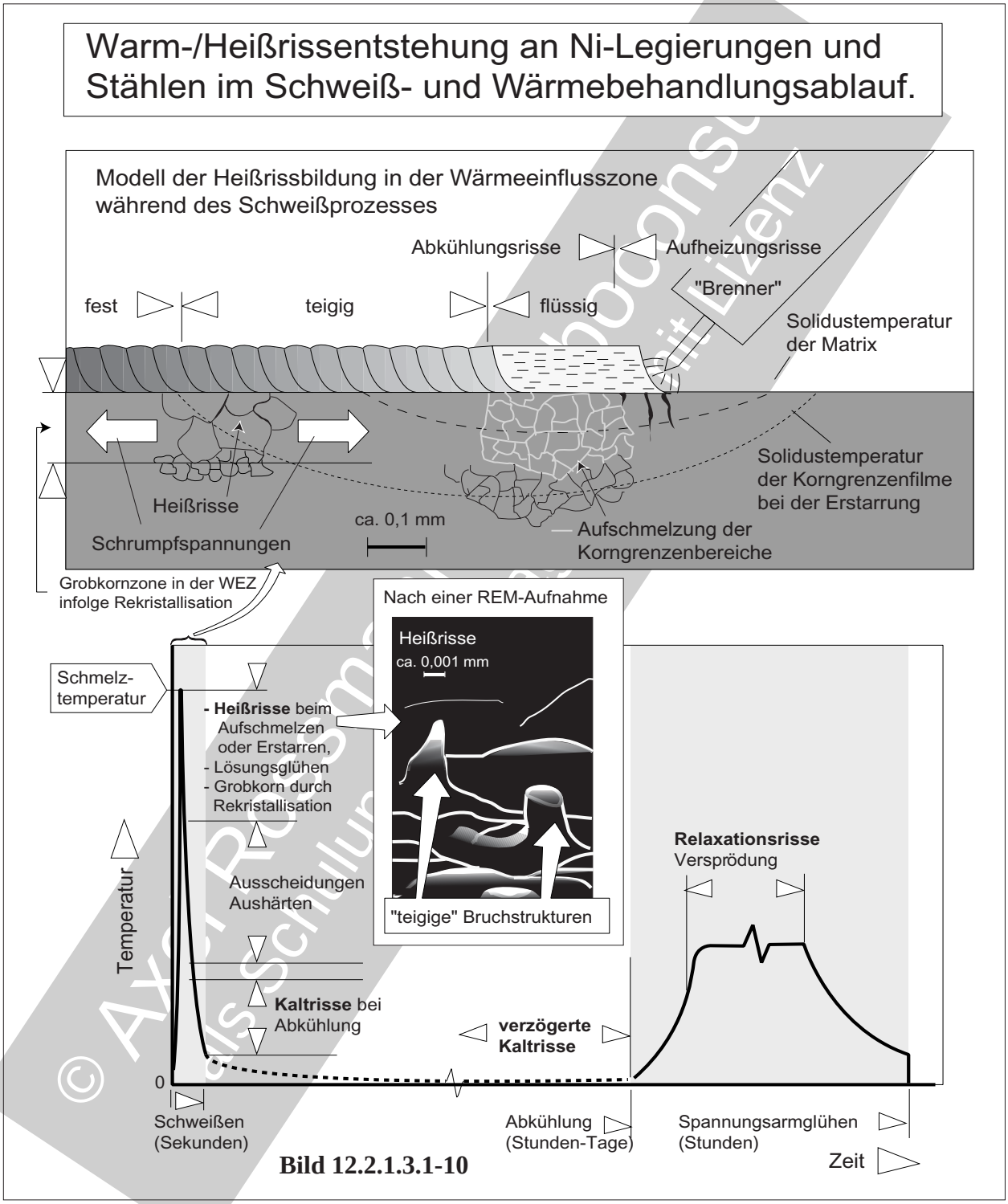


Bild 12.2.1.3.1-10

Bild 12.2.1.3.1-10: *Zu den typischen Schweißfehlern, insbesondere bei aushärtbaren hochlegierten Stählen und Ni-Legierungen gehören Risse. Es handelt sich in erster Linie um* ***Heiß- oder Warmrisse*** *(Lit. 12.2.1.3-10, Bild 12.2.1.3.1-11 und Bild 11.1-8),* ***Kaltrisse*** *und* ***Relaxationsrisse*** *(Bild 12.2.1.3.1-12 und Tabelle 12.2.1.3.1-1).*

Heißrisse sind häufig das Schweißbarkeitskriterium eines Werkstoffs (Bild 12.2.1.3.1-11). Sie können sowohl in der Aufheiz- als auch in der Abkühlungsphase entstehen (Skizze oben, Bild 12.2.1.3.1-12 und Bild 12.2.1.3.3-3). Ei-

nigkeit besteht zum Schadensmechanismus. Erweichte bzw. angeschmolzene Phasen auf Korngrenzen (WEZ) und/oder zwischen Dendriten (Schmelze/Schweißgut) setzen die Festigkeit örtlich derart herab, dass in einer Zugspannungsphase Risse entstehen. Das Detail links zeigt die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (Band 1, Bild 2.2.2.4-3) einer aufgerissenen Korngrenze. Deutlich sind die den Schadensmechanismus erklärenden (REM-Aufnahme, Bildmitte) typischen „teigigen" Merkmale (Lit. 12.2.1.3-21) zu erkennen. Um gezielte Gegenmaßnahmen erarbeiten zu können ist es notwendig, die unterschiedlichen Aspekte der Heißrissbildung zu kennen. Man unterscheidet in der Literatur (Lit. 12.2.1.3-4) ***Erstarrungsrisse*** *zwischen den Dendriten im Schweißgut und* ***Wiederaufschmelzrisse*** *in der* ***Grobkornzone der WEZ****. Ein Kornwachstum infolge einer* ***Rekristallisation*** *kann dabei eine wichtige Rolle spielen, wenn sich die* ***Korngrenzen beim Wachstum mit niedriger schmelzenden Phasen anreichern****. Der Schmelzpunkt dieser Korngrenzen fällt während des Abkühlens ab, obwohl die Schmelze bereits erstarrt ist. In beiden beschriebenen Fällen erfolgt die Rissbildung in der Abkühlungsphase und lässt sich unter dem Begriff der* ***Abkühlungsrisse*** *zusammenfassen.*

Dass Risse nicht nur in der Abkühlungsphase auftreten, sondern auch ***beim Aufheizen*** *scheinen auch Bild 12.2.1.3.1-14 und Bild 12.2.1.3.3-2 zu zeigen. Hier geht es jedoch um die EB-Schweißung einer Ni-Schmiedelegierung. Die Schmelze ist eindeutig in die aufgerissene Korngrenze der WEZ eingedrungen. Denkbar ist, dass die erweichten Korngrenzen in der WEZ, also neben der Schweißung, beim schnellen Aufheizen des Nahtbereichs unter dem Lichtbogen oder Energiestrahl (Elektronenstrahl, Laserstrahl), Zugspannungen ausgesetzt sind. Diese müssen sich im Gleichgewicht zu den Druckspannungen in der Aufheizzone bilden. Besonders die intensive schnelle Wärmeeinbringung von EB- und Laserstrahlen dürften einen solchen Vorgang begünstigen. Man beobachtet in solchen Fällen, dass die eingedrungene Schmelze den Riss ausheilt. Verbleiben jedoch Risse (Lit. 12.2.1.3-1), kann von* ***Aufheizungsrissen*** *gesprochen werden.*

Maßnahmen gegen Warmrisse:

- ***Optimierung des Schweißprozesses,*** *insbesondere der Temperaturführung über die Wärmeeinbringung (Schweißgeschwindigkeit, Bild 12.2.1.3.1-14) und Wärmeabfuhr (Querschnitt, Vorrichtung).*
- ***Optimierung des Werkstoffs****: Schweißbaren Werkstoff auswählen (Bild 12.2.1.3.1-11).*

Möglichst feinkörniges Halbzeug *(Bild 12.2.1.3.1-14) erfordert möglichst günstige Prozessbedingungen bei der Halbzeugherstellung (Bauteilgröße, Temperaturführung usw.). Auch der Einfluss der Lage des Bauteils im Rohteil steht damit in Zusammenhang. Der Lageeinfluss wird in erheblichem Maß von Umformung und Temperaturverlauf und damit dem Gefüge bestimmt (Abhängigkeit vom Schmiedeprozess siehe Bild 11.1-14).*

Optimierter Wärmebehandlungszustand *(z.B. lösungsgeglüht, Bild 12.2.1.3.1-14)****.*** *Spezifikationseinengung bezüglich zulässiger Verunreinigungen bzw. Spuren von Legierungselementen*

> *Grundsätzlich ist anzumerken:* ***Es ist dafür zu sorgen, dass der Gefügezustand welcher der Verfahrenserprobung und den Zulassungen zu Grunde lag, sich von dem der Serienproduktion, insbesonders vor einem Schweißprozess nicht unterscheidet.***

Bild 12.2.1.3.1-11*: Es gilt der Trend, je höher die Warmfestigkeit des Werkstoffs in Zusammenhang mit dem Al- und Ti-Anteil (Lit 12.2.1.3-16), umso problematischer ist die Schweißbarkeit. Kriterium ist in erster Linie die* ***Warmrissbildung*** *(Bild 12.2.1.3.1-10). Un-*

© Axel Pesschann - Turbosonsult
alle Rechte vorbehalten

! Die Schweißbarkeit der Bauteile bestimmt auch deren Reparierbarkeit.

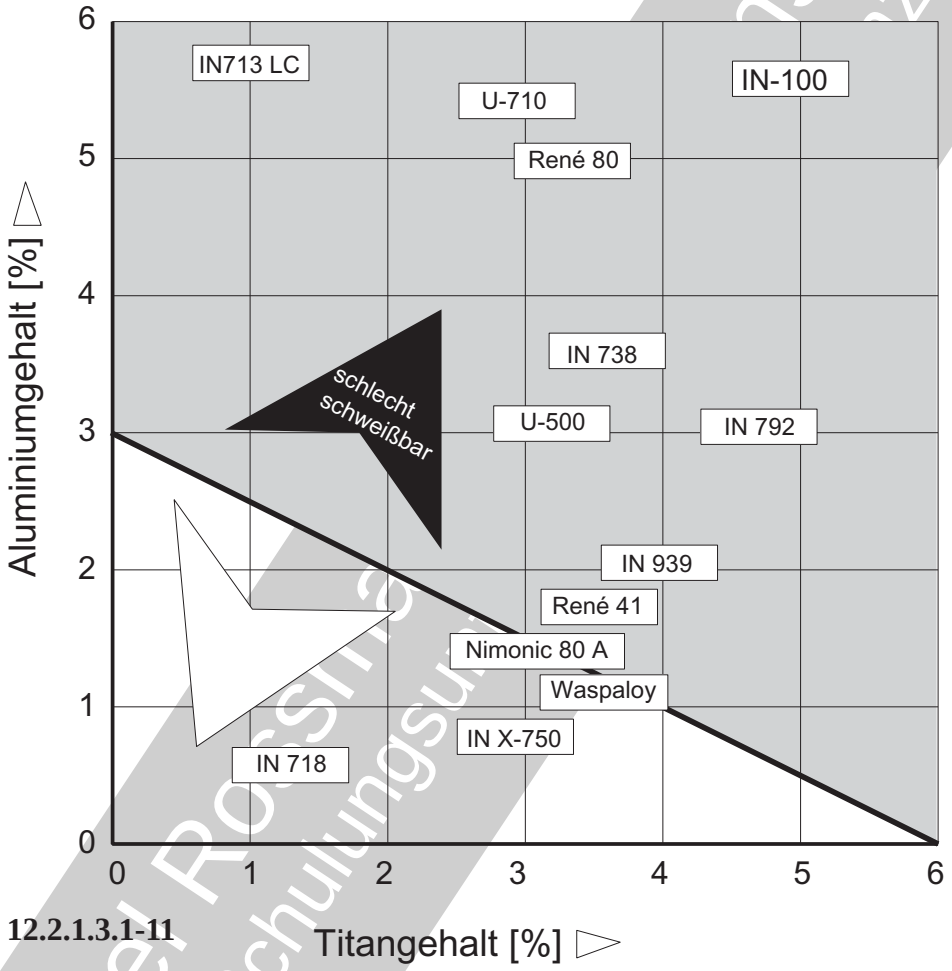


Bild 12.2.1.3.1-11

ter diesem Gesichtspunkt sind höchstfeste ***pulvermetallurgische Werkstoffe*** *mit besonderer Skepsis zu betrachten. So kann die fehlende Möglichkeit einer Schweißpanzerung der integrierten Labyrinthspitzen einen Labyrinthzwischenring aus besonders warmfestem PM-Werkstoff verhindern. Das ist besonders unangenehm, wenn sich erst bei einer* ***Reparatur*** *herausstellt, dass die Aufschweißung verschlissener Labyrinthspitzen nicht möglich ist. Üblicherweise werden hochfeste Werkstoffe im Betrieb auch entsprechend hoch belastet. An solchen Teilen können bereits kleine schweißbedingte Fehler zu Risswachstum führen. Je schlechter die Schweißbarkeit infolge Mikro- und Makrorissbildung, Festigkeitsabfall, Eigenspannungen und Verzug, umso aufwändiger und ausschussträchtiger sind Schweißarbeiten, falls sie überhaupt entsprechend den Qualitätsanforderungen ausgeführt werden können. Nicht nur das Schweißverfahren selbst, auch die nachträgliche Qualitätssicherung und die Prüfung auf innere Mikrorisse (Warmrisse) sind Voraussetzungen für eine spezifikationsgerechte Schweißung. Das* ***Betriebsverhalten von Schweißreparaturen*** *kann, als Folge einer Absenkung der Festigkeit in Schweiß- und Übergangszone, gegenüber dem Originalzustand beeinträchtigt sein.*

© Axel Rossmann Ingenieurschulungszentrum

Fertigungsrisse im Schweißnahtbereich und deren bevorzugte Lagen.

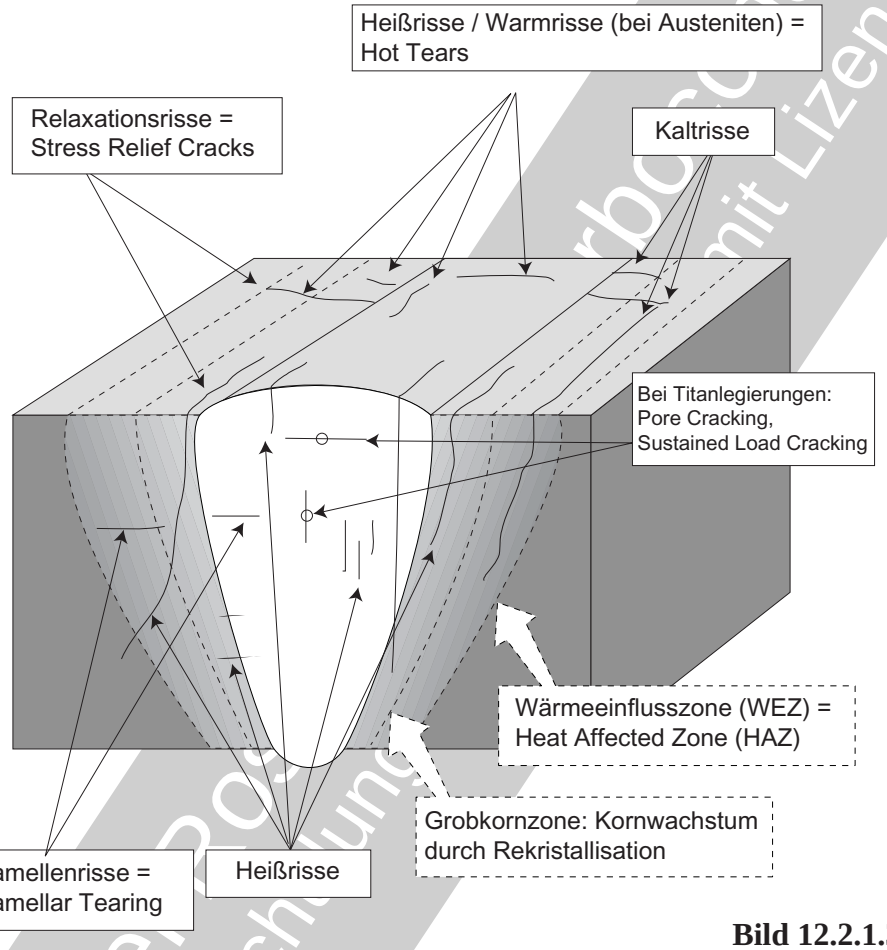


Bild 12.2.1.3.1-12

Bild 12.2.1.3.1-12 *und Tabelle 12.2.1.3.1-1 (Lit. 12.2.1.3-4, Lit. 12.2.1.3-5, Lit. 12.2.1.3-10, Lit. 12.2.1.3-24): Neben Heißrissen gibt es noch mehrere andere* ***Rissbildungsmechanismen*** *(Bild 12.2.1.3.1-10). Dieses Bild in Kombination mit der Tabelle soll eine Übersicht zu Art, Lage und Ursache von Rissen geben. Damit soll im Schadensfall die Identifikation des Schadensmechanismus als Voraussetzung für gezielte Abhilfemaßnahmen erleichtert werden.*

Neben den bei Werkstoffen des modernen Triebwerksbaus, insbesondere Ni-Legierungen, wohl am häufigsten auftretenden ***Heißrissen,*** *findet man Risse die sich erst nach dem Schweißprozess bilden und unter* ***Kaltrissen*** *(verzögerte Rissbildung) zusammengefasst sind. Wichtige Auslöser von Kaltrissen sind Wasserstoffaufnahme, Gefügebesonderheiten, Zugeigenspannungen und Korrosion.*

Zur verzögerten Rissbildung werden auch ***Relaxationsrisse*** *gezählt. Diese gehen nicht von flüssigen oder teigigen Korngrenzen aus, sondern bilden sich im festen Zustand bei erhöhter Temperatur (Wärmebehandlung) über Kriechvorgänge (Bild 12.2..1.3.1-10 und Band 4, 18.4-5.1).*

©Verlag Schweißtechnik Erbacher Straße 5 63741 Aschaffenburg mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

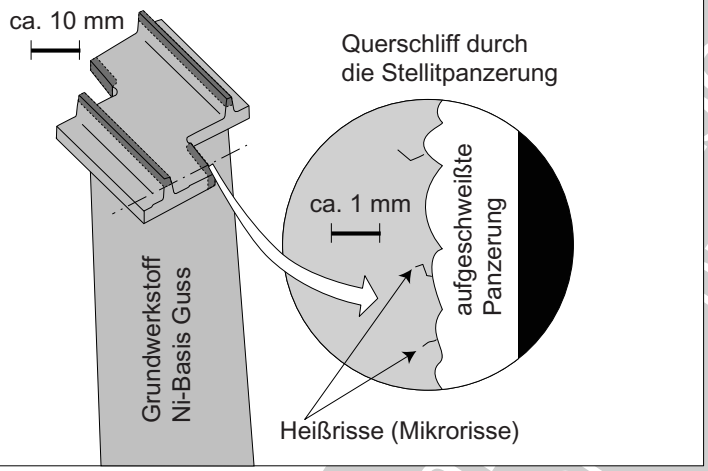
Begriffsbestimmung der Rissbildung beim Schweißen und nachfolgender Wärmebehandlung (Spannungsarmglühen).

Rissart, Begriffe		Temp. [°C]	Bemerkungen
deutsch	englisch		
Heißrisse	Hot cracking	>1200	Ursache: Korngrenzenerweichung + Zug-Schrumpfspannungen.
- Erstarrungsrisse - Wiederaufschmelz-risse	- Solidification Cracking - Heat-Affected-Zone Cracks		Mikrorisse in der Wärmeeinflusszone (Heat-Affected-Zone = HAZ). Besonders bei Ni-Basis-Legierungen und deren Gussvarianten. Ausgeprägt auch bei EB-Schweißungen Bild 12.2.1.3.1-13).
Kaltrisse	Cold-Cracking	meist <300	Rissbildung nach der Abkühlung, oft deutlich verzögert.
- Härterisse	- Quench Cracks		Bei Stählen unter zu hohen Eigenspannungen aus Umwandlungs- und Wärmespannungen sowie eingeschränkter Festigkeit und Duktilität. In der Grobkornzone der WEZ.
- Kerb- und Wurzelrisse			Spannungsspitzen an Form- und Materialkerben bei oft eingeschränkter Zähigkeit.
- Spannungsrisse			Bei zu hohen Schweißspannungen, eingeschränkter Festigkeit und Duktilität
- Wasserstoff induzierte Risse, Flockenrisse	- Hydrogen-Induced-Cracking - Hydrogen flakes	RT	Besonders bei martensitischen Stählen. Das Risiko steigt mit der Härte bzw. Festigkeit. Ursache ist die Aufnahme von Wasserstoff durch die Schmelze. Meist Wasserdampfzutritt beim Schweißen (Bild 12.2.1.3.1-21, - 23). Verzögerte Rissbildung (Tage bis Monate).
- Porenrisse	- Pore Cracking - Sustained Load Cracking (SLC)	RT	Bei hochfesten Titanlegierungen die Gas aufgenommen haben. Spröde Rissbildung die durch Poren verläuft (Bild 12.2.1.3.1-22 Bild 11.2.2.1-4.1)
- Spannugsrisskorrosion	- Stress Corrosion Cracking (SCC)	>450	Bei Titanlegierungen in der wärmebeeinflussten Zone, wenn die Oberfläche beim Schweißen Cl-haltige Verunreinigungen aufweist (Band 4, Bild 18.3.1-16).
- Lamellenrisse	- Lamellar Tearing		Rissbildung in einer Parallelebene unterhalb von, meist mehrlagigen, Schweißungen in Faserrichtung des Grundwerkstoffs.
- Relaxationsrisse	- Stress-Relief-Cracking	meist >550	Kriechrisse weil die Kriechdehnung des Werkstoffs nicht zum Abbau der Dehnungen aus den Spannungen ausreicht (Band 4, Bild 18.4-15.1).
Tabelle 12.2.1.3.1-1			(unter Verwendung von Angaben von L.Issler und R. Sinz)

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

Beispiele kaum vermeidlicher Mikroheißrisse an Schmelzschweißungen von Ni-Legierungen.

WIG-Panzerungen an Dichtungsspitzen (Anstreifen) und Auflageflächen (Fretting) einer Turbinenschaufel.



Mikroheißrisse in der Umfangsnaht einer Turbinenwelle aus einer Ni-Basis Schmiedelegierung

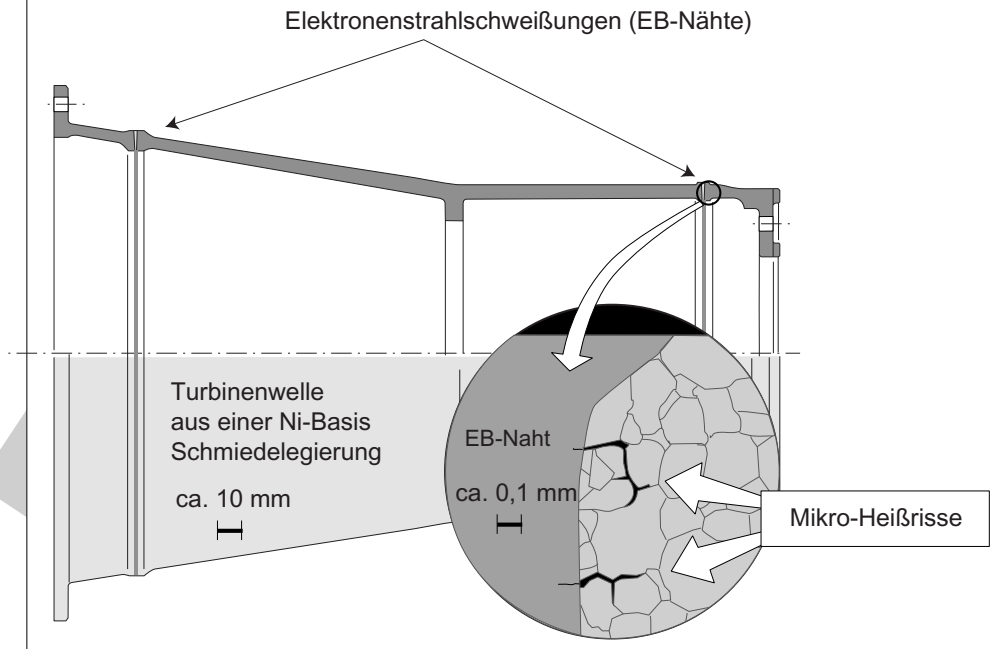


Bild 12.2.1.3.1-13

nur mit Lizenz

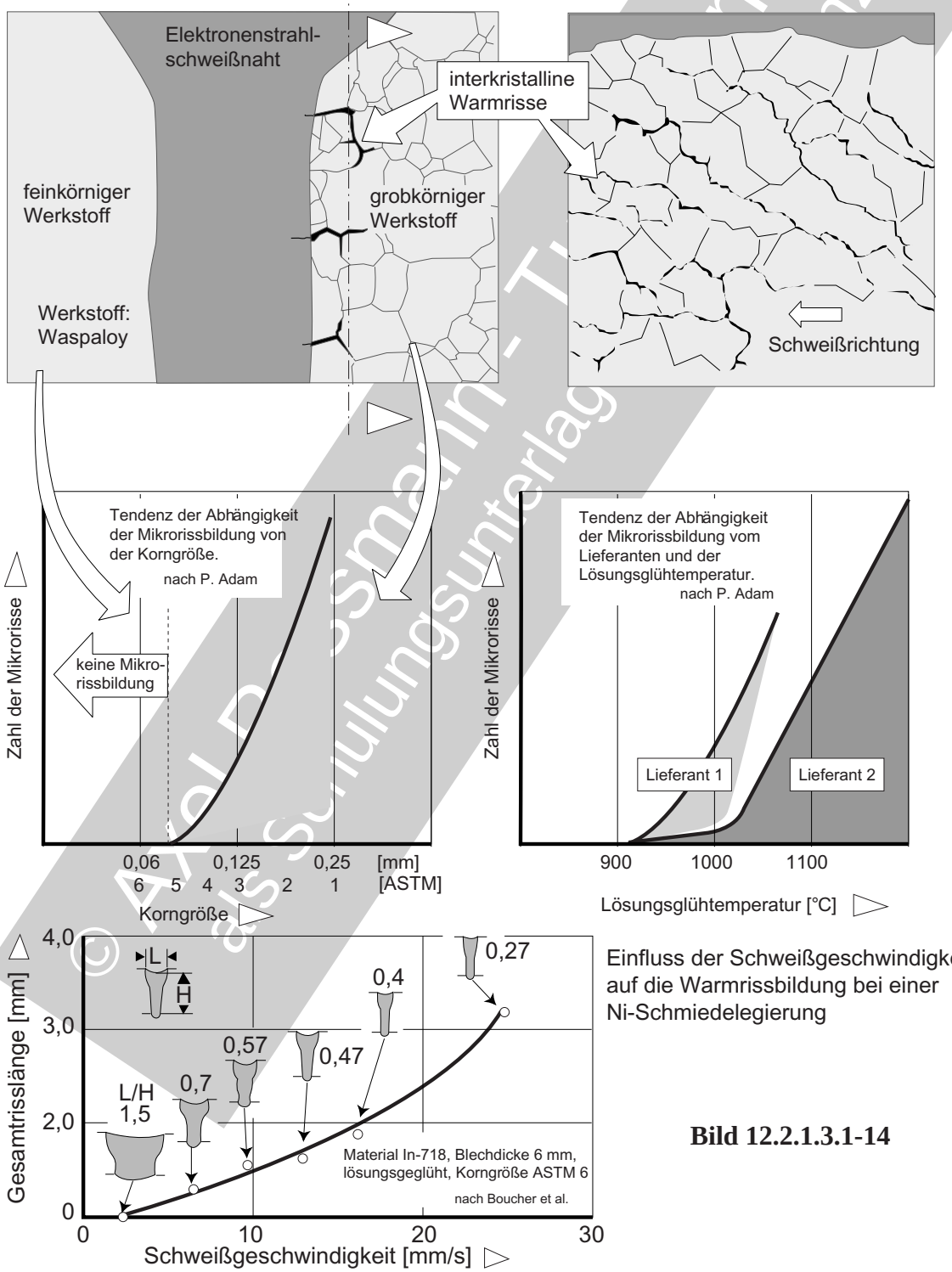
Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

Bild 12.2.1.3.1-13: *Dargestellt sind zwei typische Beispiele für* ***Mikro-Heißrisse*** *in Ni-Basis Legierungen:*
Verschleißzonen (Fretting) *werden von aufgeschweißten Panzerungen (meist Stellite) geschützt. Typische Bereiche befinden sich an den Deckbändern von Rotorschaufeln der Niederdruckturbinen. Hier müssen die* ***Anlageflächen*** *der verspannten Deckbänder aufgeschweißt werden (Skizze oben). Zusätzlich kann es notwendig sein (z.B. bei einer Reparatur) beim Anstreifen verschlissene* ***Labyrinthspitzen*** *aufzuschweißen. Besonders erschwerend in Bezug auf Heißrissbildung ist, dass es sich beim Grundwerkstoff um eine Gusslegierung mit dem, für die Kriechfestigkeit notwendigen, hohen Ti- und Al-Gehalt handelt. Die Neigung zur Heißrissbildung dieser Werkstoffe ist daher sehr hoch, was sich in einer als schlecht zu beurteilenden Schweißbarkeit äußert (Bild 12.2.1.3.1-11). Aus diesem Grund wird gewöhnlich eine gewisse Zahl und Größe von Heißrissen in Spezifikationen toleriert. Dieser Schwächung muss konstruktiv durch die Lage der Schweißung und deren geometrische Begrenzung, sowie ausreichend niedrigen Betriebsspannungen, Rechnung getragen werden.*
Die untere Skizze zeigt die Hohlwelle eines Hochdruckteils. Dieses Schmiedeteil besteht aus einer Ni-Legierung (Lit 12.2.1.3-4) und wurde aus drei Teilen durch ***Elektronenstrahlschweißen*** *gefügt. An einer der Umfangsnähte trat bevorzugt in der* ***WEZ starke Mikroheißrissbildung*** *auf (Detail). Diese konzentrierte sich auf die Nahtseite des grobkörnigen Schmiederings für den Flansch (Bild 12.2.1.3.1-14). Die relativ niedrige Betriebslast im Nahtbereich ermöglichte die Zulassung eng begrenzter Risskonzentrationen und Risslängen. Die Risse zeigen sich beim* ***Röntgen*** *lediglich als Schatten, was einer besonders erfahrenen Interpretation bedarf.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

Die Mikrorissanfälligkeit hängt in besonderem Maß von der Schweißgeschwindigkeit, der Korngröße und der Wärmebehandlung ab.



Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Warmrissbildung bei einer Ni-Schmiedelegierung

Bild 12.2.1.3.1-14

© Axel Bossmann - Technische Universität Berlin
als Schulungsunterlage

Bild 12.2.1.3-14 *(Lit. 12.2.1.3-4): Die* ***Warmrissbildung in Schmelzschweißungen*** *lässt sich besonders gut an Elektronenstrahlschweissungen in Ni-Schmiedelegierungen beobachten (Skizzen oben). Rissbildung erfolgt vorzugsweise in der WEZ, kann aber von dieser auch in die Schweißung verlaufen. Gewöhnlich gilt, je* ***feinkörniger der Werkstoff****, umso weniger ausgeprägt ist die Warmrissbildung (Diagramm Mitte links). Dieses Verhalten dürfte im Zusammenhang mit einer geringeren Korngrenzenbelegung und mit schmelzpunktabsenkenden Legierungsbestandteilen stehen. Je feinkörniger der Werkstoff, umso größer ist die Korngrenzenoberfläche auf die sich die Belegung verteilen kann. Damit sinkt die Konzentration dieser Elemente auf den Korngrenzen. Unterhalb einer bestimmten Korngröße scheinen keine Mikrorisse mehr aufzutreten.*

Gerade Elektronenstrahlschweißnähte scheinen von Mikrowarmrissigkeit betroffen zu sein. Mehrere Einflüsse scheinen sich auszuwirken. Zumindest bis das Reibschweißverfahren eingeführt war, wurden hochbelastete Rotorbauteile, die im Bereich höherer Betriebstemperaturen zum Einsatz kamen, mit Elektronenstrahl verschweißt. Solche Bauteile erforderten hochfeste Ni-Schmiedelegierungen. Auf Grund ihrer besonderen Zusammensetzung (hoher Al-Gehalt) zeichnen sie sich durch Warmrissanfälligkeit aus (Bild 12.2.1.3.1-10). Auf einen weiteren Einfluss scheint das unterste Diagramm hinzuweisen. Erstaunlicherweise ***steigt die Warmrissbildung bei einer schmäleren Naht*** *(hier WIG-Schweißungen) an. Eine schmälere Naht erfordert eine höhere Schweißgeschwindigkeit mit entsprechend intensiver Wärmeeinbringung. Diese ist bei einer EB-Schweißung besonders hoch, was die typisch schmale Nahtform dieses Verfahrens erkennen lässt. Hier mag die Spekulation zulässig sein, dass diese Risse in der Aufheizphase entstehen (siehe auch Bild 12.2.1.3.1-10 und Bild 12.2.1.3.3-2). Das gegenüber dem umliegenden Werkstoff sehr* ***schnell aufgeheizte Material*** *im Nahtbereich dehnt sich aus und es entstehen, solange es noch nicht geschmolzen ist, Druckspannungen. Im umgebenden kälteren Werkstoff bauen sich zum Ausgleich hohe Zugspannungen auf. Reissen die teigigen Korngrenzen auf, entstehen die Mikrorisse, die sich zumindest teilweise offenbar wieder mit Schmelze füllen und ausheilen (Bild 12.2.1.3.3-2).*

Die Bedeutung eines ***optimalen Werkstoffzustands*** *bzw. einer* ***werkstoffangepassten Wärmebehandlung*** *zeigt das Diagramm in der Mitte rechts.*

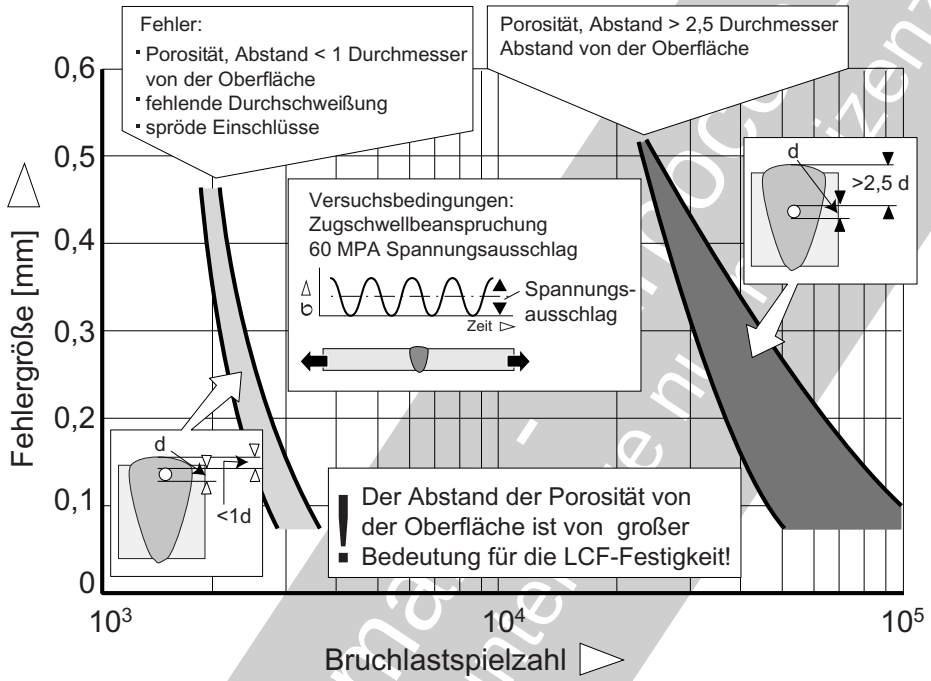
Der Anstieg der Warmrissbildung mit der Lösungsglühtemperatur dürfte keine Allgemeingültigkeit haben. Andere Werkstoffe, wie hochlegierte Stähle, scheinen erfahrungsgemäß von diesem Trend abzuweichen.

Im dargestellten Fall einer aushärtbaren Ni-Knetlegierung steigt die Mikrorissbildung wider Erwarten mit der Lösungsglühtemperatur an. Liegt der Effekt daran, dass die Lösungsglühung die Festigkeit herabsetzt? So könnten die Zugspannungen beim Aufheizen den Werkstoff leichter überlasten. Denkbar ist auch, dass z.B. Kornwachstum eine stärkere Korngrenzenbelegung mit einer entsprechenden Schmelzpunktabsenkung unterstützt. Ein solcher Effekt wird in der WEZ von Kornwachstum infolge Rekristallisation angenommen (Bild 12.2.1.3.1-10). Dazu passt die negative Auswirkung einer höheren Glühtemperatur und so einer verstärkten Rekristallisation.

Interessant ist der ***Lieferanteneinfluss****. Er dokumentiert die* ***Bedeutung der Rohteilherstellung*** *(Schmieden, Bild 11.1-14). Eine Erklärung könnte sein, dass die Rohteile unterschiedliche Umformgrade und Verfestigungen aufweisen, was sich auf das Bauteil überträgt. Damit wäre die Rekristallisationsgeschwindigkeit bzw. das Kornwachstum entscheidend beeinflusst (Bild 11.2.2.1-1).*

© Axel Gesmann - Turbomaschinen Gesamtunterlage - Lizenz

Einfluss der Fehlerarten, Fehlerlage und Fehlergröße auf die Schwingfestigkeit von Schmelzschweißungen an Ti-6Al-4V



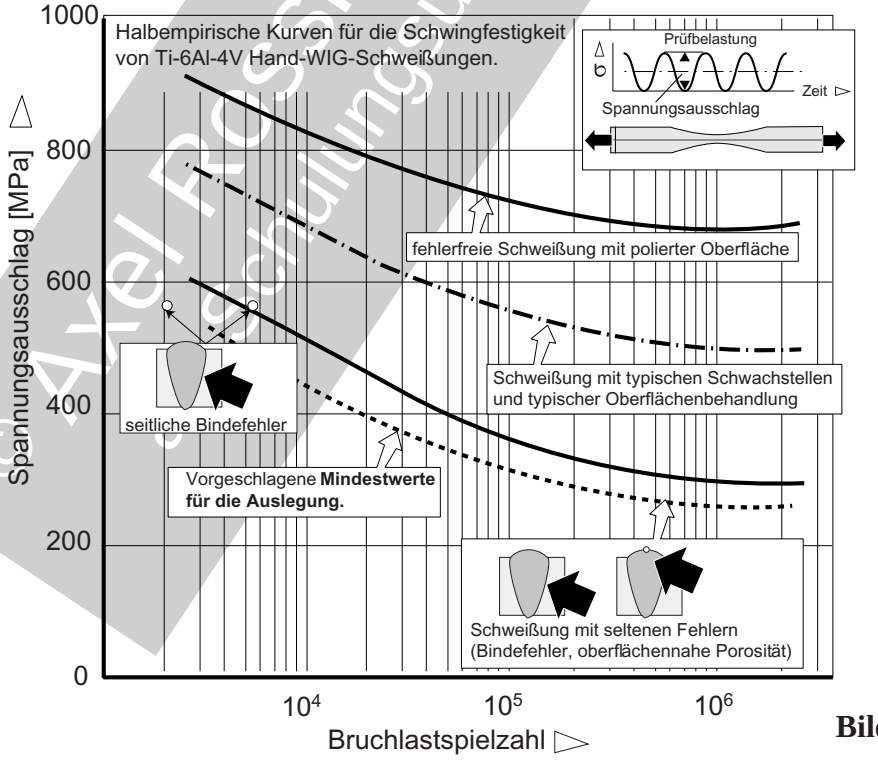


Bild 12.2.1.3-15

© Axel Rossmann - Prozessu
Schulungsunterlage nur Lizenz

Bild 12.2.1.3-14 *(Lit. 12.2.1.3-12): Anders als in Ni-Basis-Legierungen und Stählen ist die häufigste Fehlerart in Schweißungen an* ***Titanlegierungen*** *Porosität.* ***Schweißporosität*** *kann verschiedene Gründe haben:*

- Qualitätsmängel des Grund- oder Füllwerkstoffs.
- Feuchtigkeitszutritt zum Schmelzbad und
- Oberflächenverunreinigungen .
*- Bei Elektronenstrahlschweißungen die Bildung von „****Spikes****“ (Bild 12.2.1.3.3-2 und Bild 12.2.1.3.3-3).*

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Beeinflussung der ***Schwingfestigkeit*** *(LCF-Festigkeit siehe oberes Diagramm) entscheidend vom* ***Abstand der Porenlage zur Schweißnahtoberfläche*** *abhängt. Je näher die Pore, abhängig von ihrem Durchmesser, an der Oberfläche liegt, umso mehr wird die Schwingfestigkeit bzw. die Bruchlastspielzahl abgesenkt.*

Deutlich seltener als Poren sind Risse oder Metalleinschlüsse. Insbesondere ***Hartmetalleinschlüsse*** *(WC) können von* ***wiedereingeschmolzenen Spänen*** *herrühren, die* ***abgebrochene Werkzeugschneiden*** *enthalten. Aus diesem Grund wird die Verwendung von Bearbeitungsspänen für die Rohteilproduktion von Rotorteilen untersagt. Die Häufigkeit werkstoffunabhängiger Fehler wie Stoßversatz, Einbrandkerben und ungenügende Durchschweißung dürfte im üblichen Rahmen von Schmelzschweißungen liegen.*

Das untere Diagramm zeigt den Einfluss einer nachträglichen Oberflächenbearbeitung und rissartige Fehlstellen wie Bindefehler (Bild 12.2.1.3.3-2 und Bild 12.2.1.3.3-3) auf die Schwingfestigkeit. Die Schwingfestigkeit ***normal zerspanter Oberflächen liegt im Bereich von Schweißungen mit den üblichen Schwachstellen****. Hierzu gehören kleine Poren mit ausreichendem Oberflächenabstand. Umgekehrt kann gefolgert werden, dass solche* ***Schwachstellen vom Einfluss der üblichen Oberflächenbearbeitung überdeckt*** *werden. Anders dagegen* ***Oberflächenporosität****. Diese kann offenbar die Schwingfestigkeit auf 30 % absenken. Ähnlich schädigend wirken sich* ***Bindefehler*** *auf die Schwingfestigkeit aus. Solche Fehlstellen sind deswegen für die Bauteilsicherheit besonders gefährlich.*

© Axel Bossmann - Turbocourse
Lizenzsunterlage nur mit Lizenz

Schweißeigenspannungen sind in Größe und Verteilung komplexer als es auf den ersten Blick erscheinen mag.

Verteilung der über den Querschnitt gemittelten Eigenspannungen nach dem Schweißen und Abkühlen als ebener Spannungszustand in einer dünnen Platte.

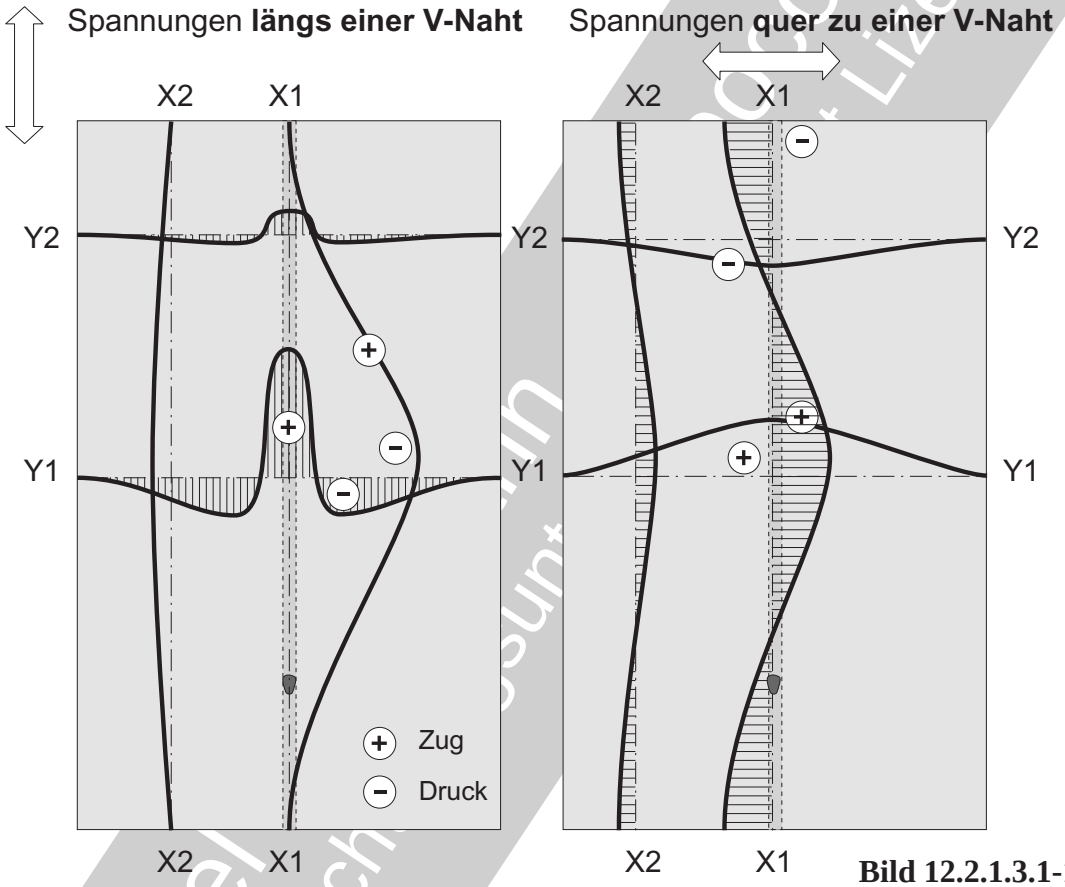


Bild 12.2.1.3.1-16

Bild 12.2.1.3.1-16: *Die* ***Eigenspannungen in einer Schmelzschweißung*** *überlagern sich den späteren Betriebsspannungen. Da es sich teilweise um hohe Zugspannungen handelt, senken sie über die Mittelspannung die Schwingfestigkeit dynamisch merklich belasteter Bauteile deutlich ab (Bild 12.2.1.3.1-17). Deshalb ist eine geeignete Wärmebehandlung (Spannungsarmglühen, Band 4, Bild 18.4-14 und Bild 18.4-15.1), zusätzlich oder alternativ eine Oberflächenbehandlung (z.B. Kugelstrahlen, Band 4, Bild 18.4-4), empfehlenswert um Zugspannungen abzubauen oder Druckspannungen in die Oberfläche zu induzieren.*

Schematisch ist der typische gemittelte ebene ***Eigenspannungzustand einer V-Schweißnaht*** *dargestellt. Gezeigt ist die Eigenspannungsverteilung in Längs- („X“) und Querrichtung („Y“) zur Schweißnaht, in ihr und in größerem Abstand dargestellt. Die Ausbildung dieses Zustands während des Schweiß- und Abkühlprozesses ist komplex, weil er sich während der Schweißung mit der Nahtlänge verändert (Band 4, Bild 18.4-5.2). Das Niveau der Eigenspannungen hängt auch von der Geometrie des Bauteils (Nachgiebigkeit bzw. Steifigkeit) und den Prozessparametern ab (Bild 12.2.1.3.1-17) und kann durch deren Optimierung minimiert werden.*

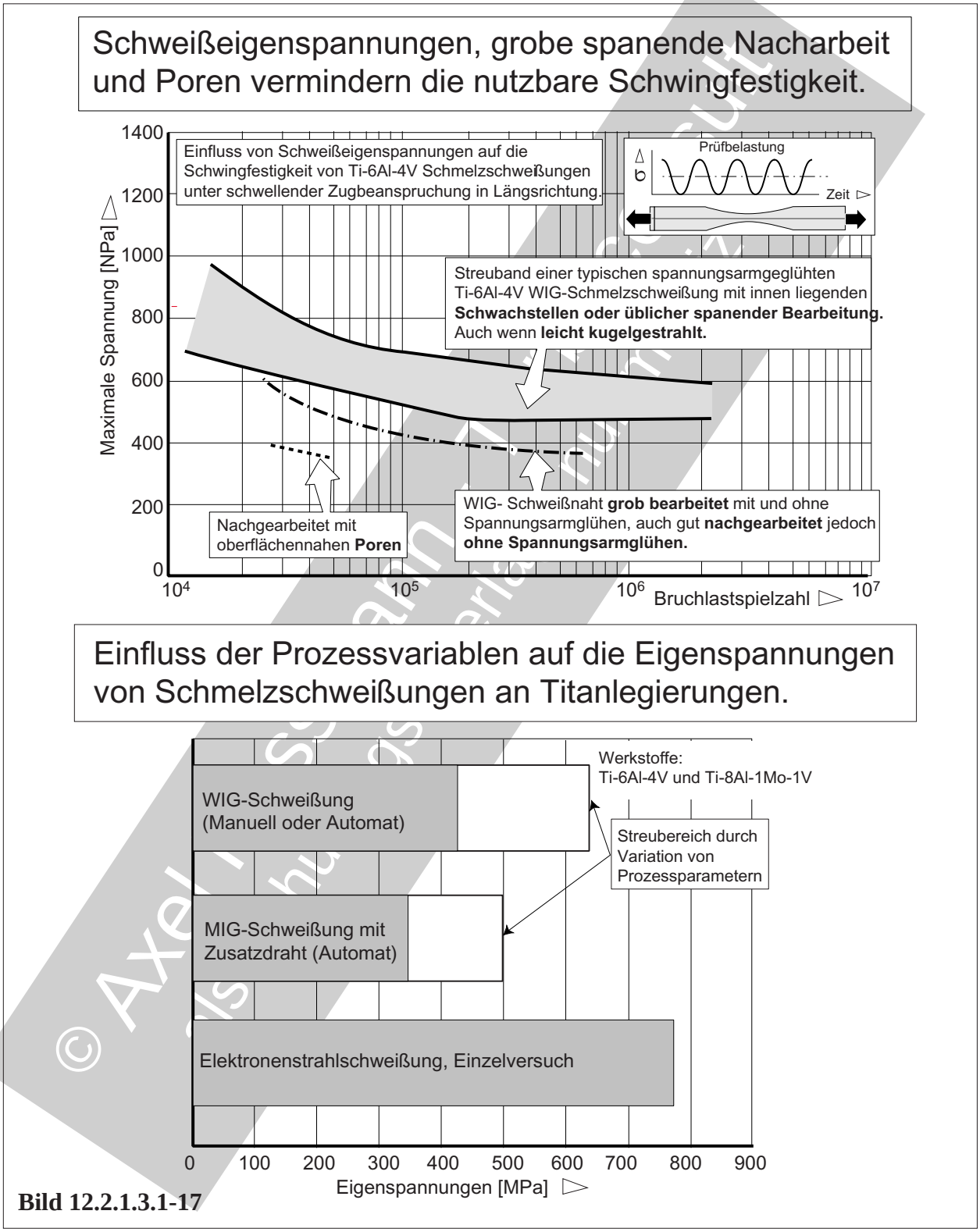


Bild 12.2.1.3.1-17

Bild 12.2.1.3-17: *Das obere Diagramm (Lit. 12.2.1.3-12) zeigt indirekt den* ***Einfluss von Schweißeigenspannungen*** *(Bild 12.2.1.3.1-16)* ***auf die nutzbare Schwingfestigkeit einer hochfesten Titanlegierung****. Ein vergleichbarer Effekt lässt sich auch an Stählen beobachten (Lit. 12.2.1.3, Bild 12.2.1.3.1.-4). Die Wirkung der Schweißeigenspannungen auf die Schwingfestigkeit lässt sich mit einer groben Zerspanung vergleichen. Ein Spannungsarm-*

glühen hebt die Schwingfestigkeit in den üblichen Bereich von Schweißungen mit typischen Schwachstellen.

Makroeigenspannungen erfordern eine verformungsbehinderte Struktur. Deshalb ist kritisch nachzufragen, ob die verwendeten schmalen Proben trotz der Längsnaht wirklich in der Lage sind Schweißspannungen aufzubauen, die Auswirkungen auf die Schwingfestigkeit realistisch aufzeigen. Die höchsten Eigenspannungen sind quer zur Schweißnaht zu erwarten (Bild 12.2.1.3.1-16). Diese werden jedoch mit einer ***Prüfrichtung*** *längs zur Naht nicht berücksichtigt. Ohne Spannungsarmglühung ist sicherheitshalber grundsätzlich von Schweißeigenspannungen im Fließgrenzenbereich auszugehen.*

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen ist anzunehmen, dass sich ***Schweißeigenspannungen im Bauteil deutlich negativer als im dargestellten Diagramm auswirken****. Entsprechende Vorsicht ist bei Schweißkonstruktionen geboten.*

Das Schaubild unten gibt einen Eindruck vom Einfluss des Schweißprozesses auf die Eigenspannungen, hier einer hochfesten Titanlegierung (Lit. 12.2.1.3-12). ***WIG- und MIG-Schweißungen liegen etwa im selben Streuband****. Interessant ist jedoch, dass die* ***Elektronenstrahlschweißnaht****, auch wenn es sich um einen Einzelversuch handelt, deutlich höhere Eigenspannungen aufweist. Dies wäre eigentlich von der typischerweise schmalen Schweißnaht mit vergleichsweise geringerer Wärmeeinbringung nicht zu erwarten. Das spricht dafür, dass wie vermutet die schmalen Proben problematisch sind.*

Bild 12.2.1.3.1-18: Metallschmelzen nehmen begierig Gase auf*. Diese gehen beim Erstarren teilweise aus der Lösung und bilden* ***Poren****. Im Metallgitter verbleibende gelöste Gase können sich versprödend auswirken. Damit werden zwei unterschiedliche Schädigungen ausgelöst (Bild 12.2.1.3.1-21 bis -24):*

-(Gas-) ***Porenbildung*** *(Bild 12.2.1.3.1-15)*

- Versprödung und verzögert auftretende ***Kaltrissbildung*** *(Bild 12.2.1.3-12). In erster Linie handelt es sich bei martensitischen Stählen um* ***Wasserstoffversprödung*** *.*

*Kaltrissbildung in Titanlegierungen ist im Zusammenhang mit Poren gefährlich (****Pore Cracking****, Bild 12.2.1.3.1-8, Bild 11.2.2.1-4.1 und Bild 11.2.2.1-10).*

- ***Oxidation****, wirkt sich insbesondere an* ***Titanlegierungen*** *versprödend aus und führt zu Gefügeveränderungen (α-****Anreicherung****).*

Hauptursache für gefährliche Oxidationsbedingungen an Schweißungen ist ein ungenügender Schutzgasschleier (mittlere Skizze).

Im Folgenden sollen nur die im Triebwerksbau gebräuchlichen Schweißverfahren betrachtet werden. Nicht betrachtet werden in der Technik häufig angewendete Verfahren an Luft mit ummantelten Schweißelektroden.

Das am häufigsten aufgenommene und schädigend wirkende Gas ist, ***zumindest in Stählen, Wasserstoff****. Dieser kann aus unterschiedlichen Quellen stammen:*

- ***Feuchtigkeit aus Luft*** *infolge eines ungenügenden Schutzgasschleiers (mittlere Skizze, Bild 12.2.1.3.1-21),* ***Schwitzwasser*** *auf den Bauteilen oder* ***Feuchtigkeit im Schutzgas****. Auch ungeeignete Gasführungen können Feuchtigkeit in das Schutzgas eintreten lassen (Lit 12.2.1.3-5). In einem bekannt gewordenen Fall (Skizze oben) wurde ein dicker* ***Kunststoffschlauch*** *verwendet, der* ***für Luftfeuchtigkeit als semipermeable Membrane*** *wirkte. So gelangte Luftfeuchtigkeit sogar verstärkt in das Argon zum Schutz der WIG-Schweißung. Das führte zu umfangreicher Kaltrissbildung an Gehäusen aus niedrig legierten Stählen.*

- ***Verunreinigungen des Schweißstoßes*** *oder eines Zusatzwerkstoffs, z.B. mit Schmiermitteln (Lit 12.2.1.3-18).*

Nickellegierungen *bilden in erster Linie unter* ***CO- und N-Einfluss Poren****. Erhöhte Gehalte von Oxidatoren wie Al, Ti und Nb verringern die Neigung zur Porenbildung, begünstigen aber möglicherweise die Warmrissbildung (Bild 12.2.1.3.1-8).*

© Axel Rossmann - Turbomaschinen - Vorlesungsunterlagen Stuttgart

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

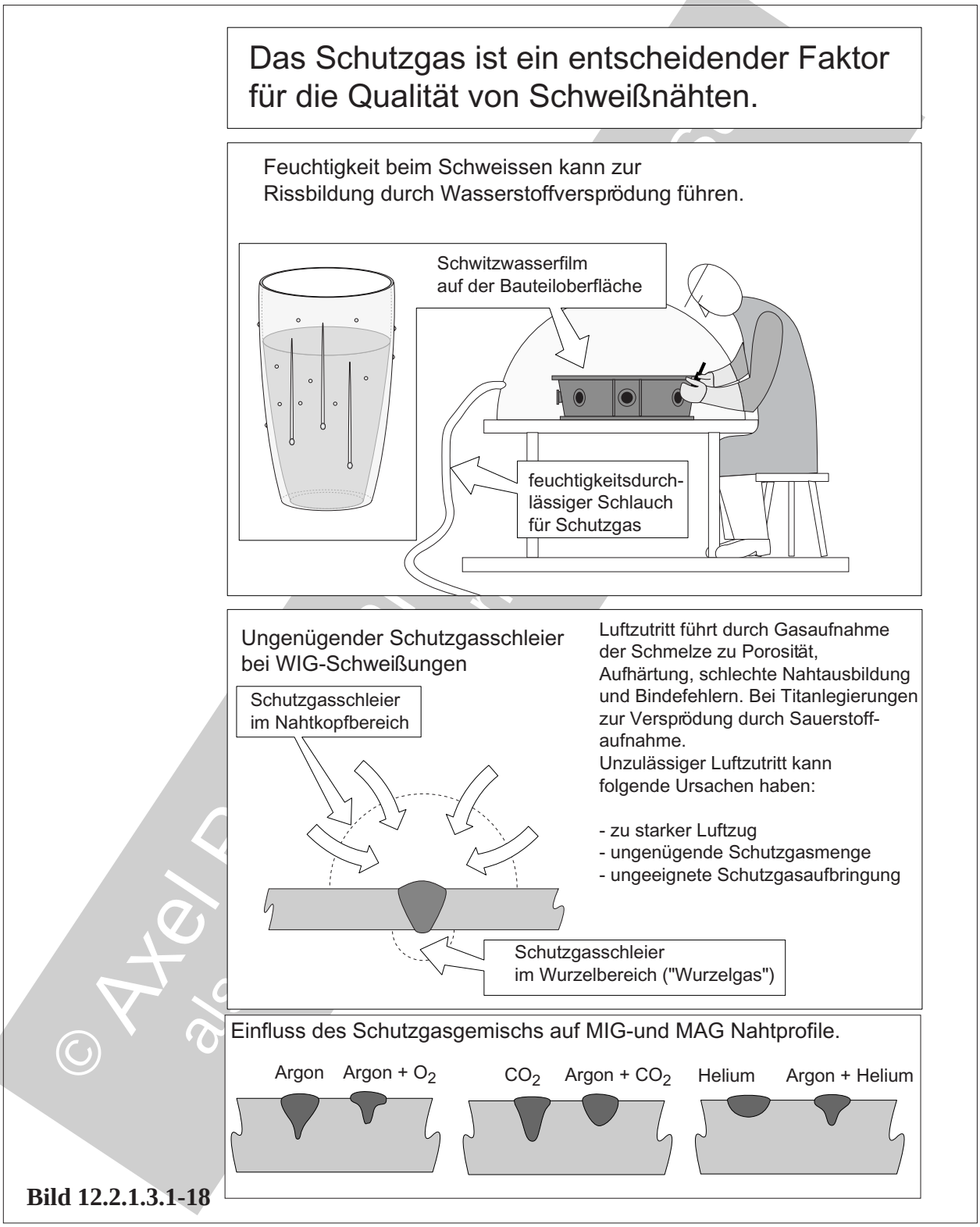
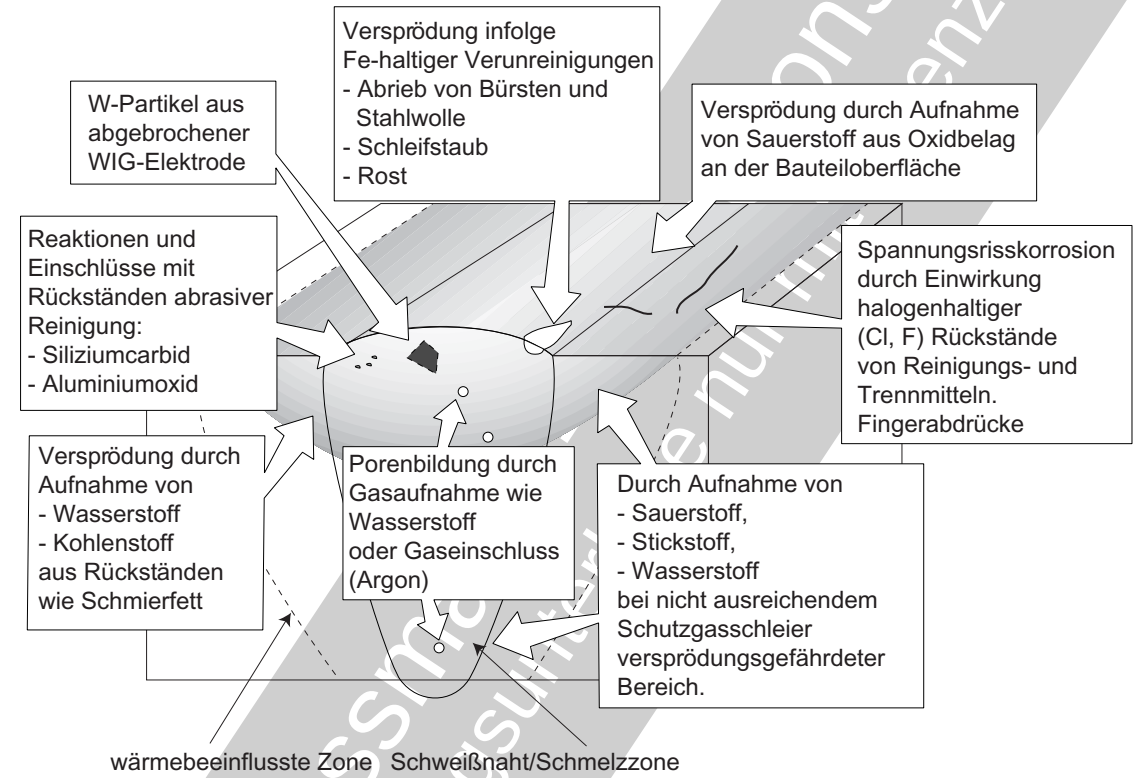
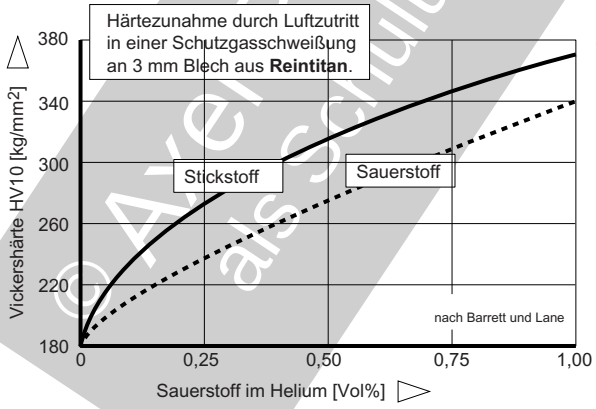


Bild 12.2.1.3.1-18

Schutzgas beeinflusst auch die Nahtgeometrie *(Skizze unten, Lit 12.2.1.3-5) bzw. Prozessparameter wie die mögliche Schweißgeschwindigkeit. So werden* ***Porosität und wahrscheinlich auch die Mikrorissbildung*** *von den* ***Erstarrungsbedingungen*** *(Bild 12.2.1.3.1-14) beeinflusst. Insbesondere* ***Titanlegierungen*** *reagieren bereits auf geringe* ***Verunreinigungen des Schutzgases extrem empfindlich****.*

Äußere Verunreinigungen und ihre Auswirkung auf Schmelzschweißungen an Ti-Legierungen.





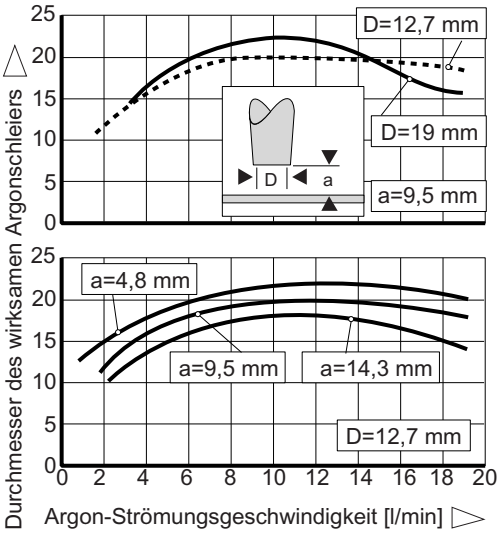


Bild 12.2.1.3.1-19

Bild 12.2.1.3.1-19 *(Lit 12.2.1.3-27 und Lit. 12.2.1.3-31):* ***Schädigungen als Folge äußerer Einflüsse auf den Schweißprozess*** *sind Versprödung, Gasporen und Rissbildung. Sie können sowohl durch Reaktion mit Gasen (Oxidation, Nitridbildung) als auch durch Lösung von Gasen entstehen. Die Gasaufnahme kann in der Schmelze und somit in der Schweißung (besonders Wasserstoff), als auch bei Reaktionen mit festen und flüssigen Medien entstehen.*

Grundsätzlich gilt besonders für Titanlegierungen, dass jede Verunreinigung der Werkstückoberfläche im Schweißbereich eine potenzielle Gefahr für die Bauteilsicherheit darstellt. Im Folgenden werden typische Einflüsse ohne Anspruch auf Vollständigkeit behandelt:

Aufnahme von Gasen: *Diese Gase stammen in erster Linie aus der* ***Umgebungsluft die in den Schutzgasschleier*** *eingedrungen ist. Ein ungenügender Schutzgasschleier kann durch die Einhaltung von optimierten Prozessparametern (Schutzgasdurchfluss, Brennerabstand, Diagramm unten rechts, Lit. 12.2.1.3-27) vermieden werden. Die potenziell schädigenden Gase in der Luft sind Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff (aus Luftfeuchtigkeit). Sauerstoff führt zur Oxidation (Versprödung) und beeinflusst das Gefüge (z.B. Stabilisierung von α- Gefüge). Versprödung kann sowohl in der Schweißnaht als auch in der Oberfläche der WEZ in Form einer spröden Schicht auftreten. Sie zeigt sich in einer deutlichen Reduzierung der plastischen Verformbarkeit, charakterisiert den bis zum Bruch erreichten Biegewinkel von Proben. Eine Härtesteigerung gegenüber dem unbeeinflussten Grundmaterial ist ein Indiz für Versprödung. Interessant ist, dass die Aufnahme von Stickstoff eine deutlich größere Härtesteigerung bewirkt als Sauerstoff (Diagramm unten links für Reintitan).*
Auch ***Schutzgas*** *selbst kann unter ungünstigen Bedingungen (z.B. zu starke Strömung), von der Schmelze bevorzugt im Wurzelbereich eingeschlossen werden und dort Poren bilden.*

Vor der Schweißung vorhandene Oberflächenoxidation: *Diese kann von einer vorgeschalteten Wärmebehandlung oder einer zu heißen spanenden Bearbeitung herrühren. Wenn sie nicht mechanisch entfernt oder abgeätzt (engl. „****Pickling****“, meist HF-HNO_3 Lösung) werden. Erstaunlich ist, dass von diesem Fluor bisher keine dem Chlor vergleichbare Spannungsrisskorrosion auf Grund einer Reaktionsschicht (Bild 12.2.1.7-8) bekannt wurden.*

Fette und organische Rückstände *sind z.B.* ***Tiefziehfette*** *und* ***Kühlschmierstoffe*** *(Bild 12.2.1.1.2-13 und Bild 12.2.1.1.2-14). Der Kohlenstoff in diesen Medien führt zur Karbidbildung. Der Wasserstoff aus diesen Kohlenwasserstoffen wird in der Schmelze und nachfolgend in der Schweißnaht gelöst und führt zur* ***Porosität****. Hier liegt eine erhöhte Rissgefahr durch Wasserstoff vor („Pore Cracking“, Bild 11.2..2.1-4.1,und Bild 11.2.2.1-10 und „Sustained Load Cracking“, Bild 12.2.1.3.1-22 und Bild 12.2.1.3.1-23). Enthalten die Medien Sauerstoff, besteht Oxidationsgefahr.*

Cl-haltige Reinigungsmittel wie „Tri“ und Per“*: Diese Fettlöser müssen nicht als Flüssigkeitsreste vorliegen, um Spannungsrisskorrosion an Titanlegierungen auszulösen (Bild 12.2.1.7-8). Sie bilden an der Oberfläche des Werkstücks dünnste Cl-haltige Reaktionszonen (Band 1 Bild 5.6.3.1.2-3) die unter Zugeigenspannungen beim Schweißen und bei Temperaturen oberhalb 450 °C Risse auslösen können.*

Fingerabdrücke: *Das im Kochsalz enthaltene Chlor wirkt oberhalb 450°C und ausreichenden Zugspannungen SpRK-auslösend (Band 4, Bild 18.3-16).*

W-Partikel: *Beim Schweißen könnnen Partikel der* ***Wolframelektrode*** *aus Unachtsamkeit in die Schmelze abfallen oder bei Berührung der erstarrenden Schmelze abbrechen.*

Eisen- und nickelhaltige Partikel: *Es kann sich um* ***Flugrost, Schleifstaub, aufgeschmiertes Material von Schleifprozessen oder Abrieb aus Drahtbürsten, Stahlwolle und Vorrichtungen*** *handeln. Diese Partikel können von der Schmelze gelöst werden. Ausreichend hohe Fe-Konzentration in der Schmelze kann*

© Axel Bossmann - Turbocosult
abschnittsweise Unterlagen mit Verz.

Titanverarbeitung und die Fertigung von Stahlteilen sollten streng getrennt sein!

versprödend wirken (Lit. 12.2.1.3-31). In der WEZ bilden sich Anreicherungen von Titan-Eisen-Eutektikum das Mikrorissbildung auslösen kann. Solche Anreicherungen sind zusätzlich korrosionsempfindlich.
Ähnliche Effekte sind von Ni-Legierungen zu erwarten, die mit Titan niedrig schmelzende Eutektika bilden.

Rückstände aus spanender Bearbeitung: *Es handelt sich in erster Linie um in der Oberfläche steckendes* ***Schleifkorn*** *oder* ***Strahlgut*** *(****Beladungseffekt****, Band 1, Bild 5.5.1.1-5). Insbesondere* ***SiC*** *reagiert mit Ti- und Ni-Legierungen bei hohen Temperaturen.* Al_2O_3 *Partikel können als harte Verunreinigungen wirken.*

Bild 12.2.1.3-20: *Äußere* ***Hinweise*** *(Lit. 12.2.1.3-27) auf eine* ***Versprödung geschweißter Titanlegierungen*** *als Folge eines Luftzutritts sind ein wichtiges Hilfsmittel der zerstörungsfreien Qualitätssicherung.*

Verfärbungen und im Extremfall topografische Veränderungen *sind das wichtigste Beurteilungsmerkmal.* ***Anlauffarben*** *entstehen auf Grund dünnster Oxidschichten. Die Dicke der Oxidschicht bestimmt die Anlauffarbe und ist somit ein Indiz für die Intensität des Sauerstoffzutritts. Die Bewertung des Versprödungsrisikos nach den Anlauffarben erfordert Erfahrung und Fachkenntnis. Auch wenn die Werkstückoberfläche im Schweißnahtbereich metallisch silbern ist, kann die Schweißung doch Sauerstoff aufgenommen haben. Das ist dann der Fall, wenn die Schutzgasschleppe zwar hinter dem Schmelzbad ausreichend Schutz bietet, das Schmelzbad selbst aber nicht ausreichend von dem Schleier um den Brenner abgedeckt wurde. In solchen Fällen hilft die* ***Beobachtung der Elektrode während des Schweißens****. Die Elektrode wird von der Oxidation als Folge* ***vom Schutzgas „angesaugter“ Luft*** *(Injektorwirkung) für den Fachmann (Schweißer) erkennbar verändert. Die Anlauffarben bilden Streifen von gelb (wenig Oxidation) über Blau bis zu mattgrauem Aussehen. Das ist ein deutliches Zeichen für eine gefährliche Sauerstoffeinwirkung. Besonders gravierend ist, wenn es bereits zu kleinen flächigen Abplatzungen der Oxidschicht, und damit zu einer rauen Oberfläche kam. Verwirrend kann sein, dass sich zwischen den Farbstreifen matte silberne Felder befinden (engl.* ***„silvery hiatus“****) die sich fälschlicherweise als Merkmal der Oxidationsfreiheit interpretieren lassen.*
Anlauffarben außerhalb des Schweißnahtbereichs *sind nicht unbedingt ein Anzeichen für einen schlechten Schutzgasschleier. Im Gegenteil,* ***gelbe und intensiv blaue Parallelstreifen*** *zur Schweißnaht (engl. „****tramlines****“) sind bei WIG- und MIG-Schweißungen üblich.*

Mit Sauerstoff- und Stickstoffaufnahme steigt die Härte von Titanlegierungen *(Bild 12.2.1.3.1-19)****. Damit lässt eine Härteprüfung*** *die Beurteilung zu, ob eine Schädigung vorliegt. Mit Hilfe eines tragbaren oder stationären Vickershärteprüfgeräts lässt sich, bei Zugänglichkeit, der notwendige Härteverlauf an der Nahtoberfläche ermitteln. Ein Härteanstieg über HV = 50 gegenüber der Härte des rekristallisierten Grundwerkstoffs (d.h. ohne Verfestigungen) lässt auf unzulässig schlechte Festigkeitswerte schließen und ist nicht akzeptabel. Die Naht muss dann restlos entfernt werden (Lit 12.2.1.3-30). Aussagekräftiger sind Mikrohärteverläufe in einem metallografischen Querschliff (Band 1 Bild 2.2.2.4-1). Dies erfordert aber eine zerstörende Probenentnahme.*

Leitfähigkeits- bzw. Wirbelstromprüfung: *Diese Prüfungen sind möglich, weil die Oxidation die elektrische Leitfähigkeit im Oberflächenbereich vermindert. So lassen sich Rückschlüsse auf eine mögliche Schädigung ziehen.*

© Axel Bossmann - Turbodesign
Ausbildungsunterlagen

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

Wie erkennt man die Versprödung einer Ti-Schweißnaht als Folge eines ungenügenden Schutzgasschleiers?

Äußere Merkmale an der Bauteiloberfläche an Nahtkopf und Wurzel im Bereich der WEZ und Schweißung:

- Metallisch silbern ohne Zwischenzonen mit intensiven Anlauffarben: keine Versprödung
- Gelb und Blau glänzend: keine bedenkliche Festigkeitsschädigung
- Grau, matt: bedenklich, Versprödungshinweis, absichernde Untersuchung notwendig (Härteprüfung, Wirbelstromprüfung)
- Zunder, rau, Abplatzungen: gefährliche Versprödung

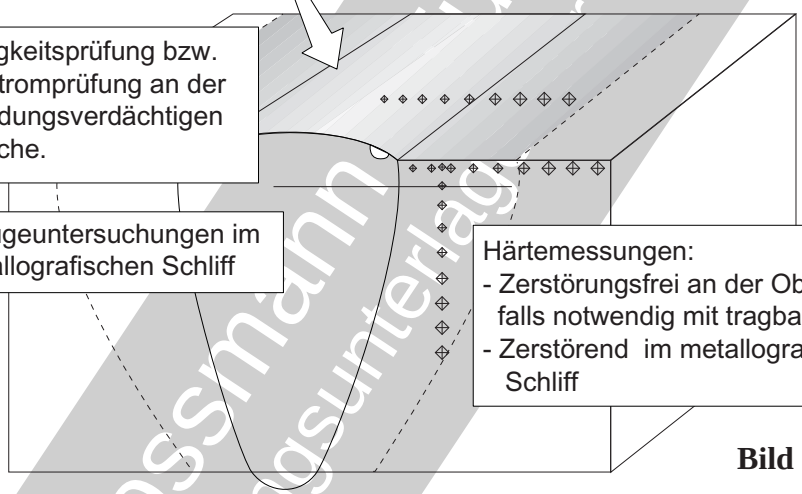


Bild 12.2.1.3.1-20

Gefügeuntersuchung: *Im metallografischen Schliff (Band 1 Bild 2.2.2.4-1) lassen sich ausreichend ausgeprägte Oxidschichten und sauerstoffstabilisierte Gefügebestandteile (α-Gefüge) erkennen.*

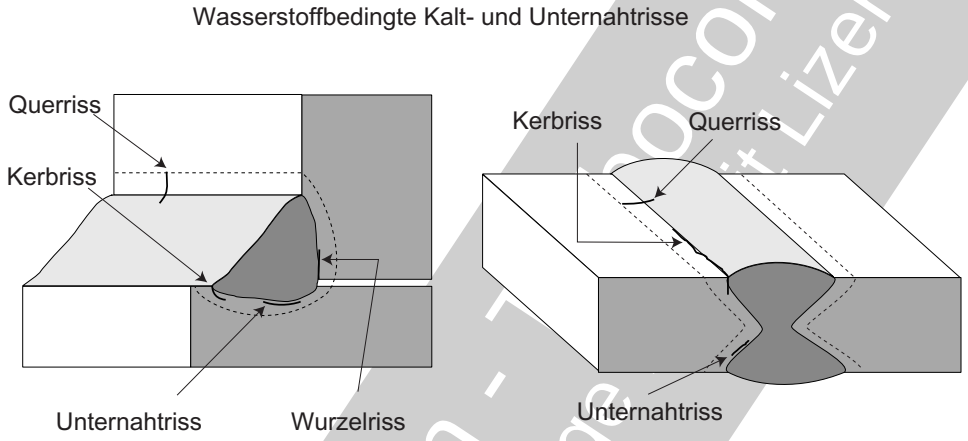
Zerstörende Festigkeitsprüfung: *Aussagekräftig ist eine Querbiegeprüfung die den erreichbaren Biegewinkel ermittelt. Eine Versprödung zeigt sich in einem zu kleinen Biegewinkel. Solche Nachweise erfordern aber geeignete Flachproben, die wohl nur in seltenen Fällen aus einem Bauteil entnehmbar sind. Ein Querzugversuch ist unbrauchbar weil der Bruch gewöhnlich außerhalb der Schweißnaht erfolgt und dabei keine merkliche plastische Verformung in der Schweißnaht entsteht.*
Die mikroskopische ***Nachuntersuchung eines Laborbruchs*** *(**REM**, Band 1 Bild 2.2.2.4-3) ist in der Lage, an typischen* ***Bruchstrukturen Versprödungen zu erkennen*** *und von* ***charakteristischen Merkmalen auf Art und Ursache*** *(z.B. Wasserstoffversprödung) rückzuschließen.*

Eine Qualitätsprüfung mit einem Querzugversuch ist nicht aussagefähig. Die unbehandelte Schweißnaht weist gewöhnlich eine höhere Festigkeit als geglühtes Grundmaterial auf. Der Bruch ist deshalb im Grundwerkstoff, ohne merkliche plastische Verformung der Schweißung zu erwarten (Lit. 12.2.1.3-29). D.h.:

Der Bruch in einer Querzugprobe außerhalb der Schweißung ist kein Qualitätsmerkmal für die Schweißung.

© Axel Rossmann als Schulungsunterlage

Wasserstoffschädigungen im Schweißungen mit besonderer Berücksichtigung des „Fischaugeneffekts“.



©Ayel Rossmann - Tecconsult
Nur als Schulungsunterlage mit Lizenz

Von Wasserstoff verursachte Versprödung und Rissbildung ist ein besonderes Problem der Schmelzschweißungen. Die ‘Anfälligkeit’ steigt mit der Festigkeit des Werkstoffs (Band 1 Bild 4.1-1). Die Schädigung kann in unterschiedlicher Form auftreten (Lit. 12.2.1.3-37, Lit. 12.2.1.3-39 und Lit. 12.2.1.3-40). Die **Risslagen** am Bauteil bzw. zur Schweißnaht findet man auch bei Rissen mit anderen Ursachen wie Heißrisse oder Relaxationsrisse (Bild 12.2.1.3.1-10 und Bild 12.2.1.3.1-12). Diese Begriffe stammen aus der Praxis. Sie entsprechen häufig der Anschauung. Die wissenschaftliche Klärung scheint bis heute nicht abgeschlossen (Lit. 12.2.1.3-44). Es handelt sich bei den Schäden in erster Linie um

- Rissbildung **im Grundwerkstoff** am Nahtübergang (Wärmeeinflusszone). Die Risse treten als Nebennahtrisse und Unternahtrisse auf.
- Rissbildung **in der Schweißnaht**.
  „Fischaugen“ als Trennung mit konzentrischer Orientierung (Bild 12.2.1.3.1-22).
  „Kaltrisse“, ausgehend von Heißrissen und Schrumpflunkern.
- „**Verzögerte Rissbildung**“ unter Zugspannungen im Zusammenhang mit Mikroporen. (Band 1 Bild 5.7.1-2) die sich über Mikrosrisse verbinden.
  „Mikrorisse“ („Mikroflecke“) an einzelnen Mikroporen („mikroskopische Fischaugen“, „Minifischaugen“).

Wasserstoffbedingte/-unterstützte Rissbildung tritt an Schmelzschweißnähten bevorzugt in besonderen Positionen auf (Lit. 12.2.1.3-40).

Unternahtrisse an **Kehlnähten** (Skizze oben links) in Stählen. Hier ist der Wasserstoff aus der Schweißnaht eindiffundiert. An **Stumpfstößen** (Skizze oben rechts) findet man bevorzugt **Nebennahtrisse** als Längsriss. Das gilt besonders für hochfeste Baustähle (>600 MPA). Bei niedrigeren Festigkeiten dominieren dagegen offenbar Unternahtrisse.

Ursachen für den Zutritt von Wasserdampf und die Diffusion von atomarem Wasserstoff in Metalle.

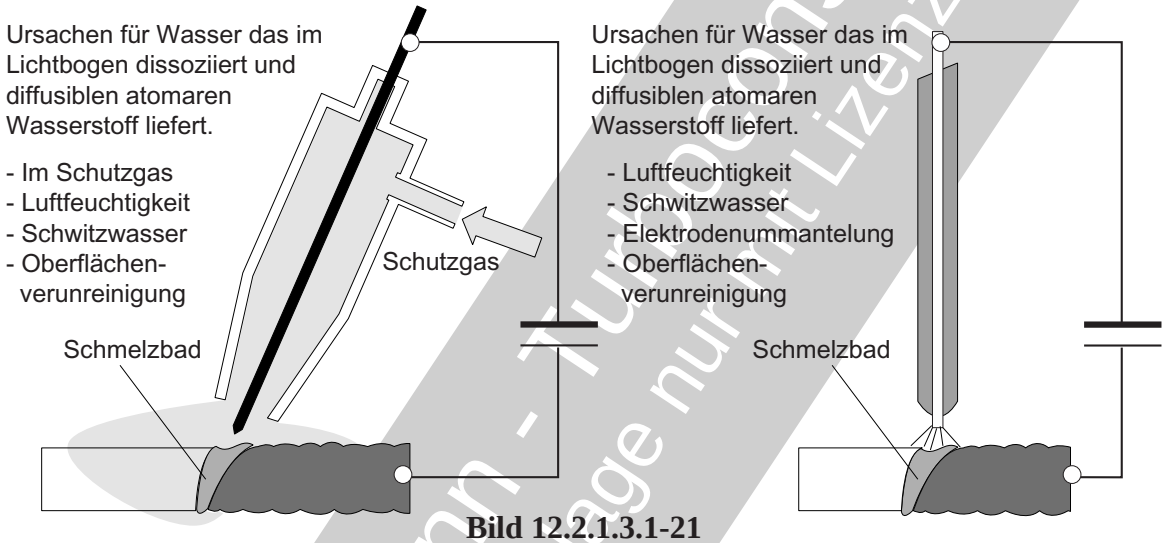


Bild 12.2.1.3.1-21

Bild 12.2.1.3.1-21 *(Lit. 12.2.1.3-37 und Lit. 12.2.1.3-38): Wasserstoff kann auf sehr unterschiedliche Art in Schweißgut gelangen.*
*Feuchtes **Schutzgas**: Hier handelt es sich gewöhnlich um in die Versorgung **eindiffundierte Luftfeuchtigkeit**. Typisches Beispiel ist die Verwendung von **Schlauchmaterial** das Eigenschaften einer semipermeablen Membrane hat (Bild 12.2.1.31-18, Band 1 Bild 5.7.1-3, Bild 5.7.2-3).*
*Ebenfalls ist es möglich wenn **Schwitzwasser** vorhanden ist, weil die Teile vor dem Schweißen nicht ausreichend getrocknet wurden.*
*Feuchte **Umhüllungen** von Stabelektroden oder feuchtes **Pulver** (Unterpulverschweißen). Nicht ausreichend ausgeheizte Elektrodenumhüllungen können in der Porosität (Kapillarwirkung) Adhäsionswasser enthalten. Weitere Möglichkeiten sind Restwasser aus Bindemitteln und Kristallwasser.*
*Deckschichten der Schweißfläche die mit **Kohlenwasserstoffen** verschmutzt sind.*
***Verrostete** Oberflächen.*

Bild 12.2.1.3.1-22 *(Lit. 12.2.1.3-38 und Lit. 12.2.1.3-39): "**Fischaugen**" in einer Bruchfläche zeigen als typisches Merkmal **konzentrische Zonen** (Skizze links). Im Folgenden wird aus den Literaturangaben ein Schema der **Bruchflächenerscheinungen** versucht. Sie müssen nicht zwangsläufig alle gleichzeitig auftreten.*
*Im Zentrum befindet sich eine **Hohlstelle/Pore** oder eine Trennung (Heißriss, Bindefehler) "**C**" (Bild 12.2.1.3.1-23), häufig mit metallischer Oberfläche. Es ist aber auch eine Oxidbelegung möglich (Bild 12.2.1.3.1-24). Die Pore enthält einen **Einschluss**. Dieser ist, falls nicht ausgebrochen oder in der Gegenbruchfläche steckend, häufig noch vorhanden (REM-Befund). Oft handelt es sich um ein Sulfid. Bei beruhigten Stählen findet man Mangansilikate oder Al-Oxide (Lit. 12.2.1.3-39 und Lit. 12.2.1.3-41).*
*An die Pore schließt sich die wasserstoff-**versprödete Zone „D"** an. Sie kann anfangs, abhängig vom Versprödungsvorgang (Pumpeffekt durch Gleitvorgänge, Bild 12.2.1.3.1-23)*

© Axel Rossmann - Nur zum persönlichen Gebrauch und Lizenz

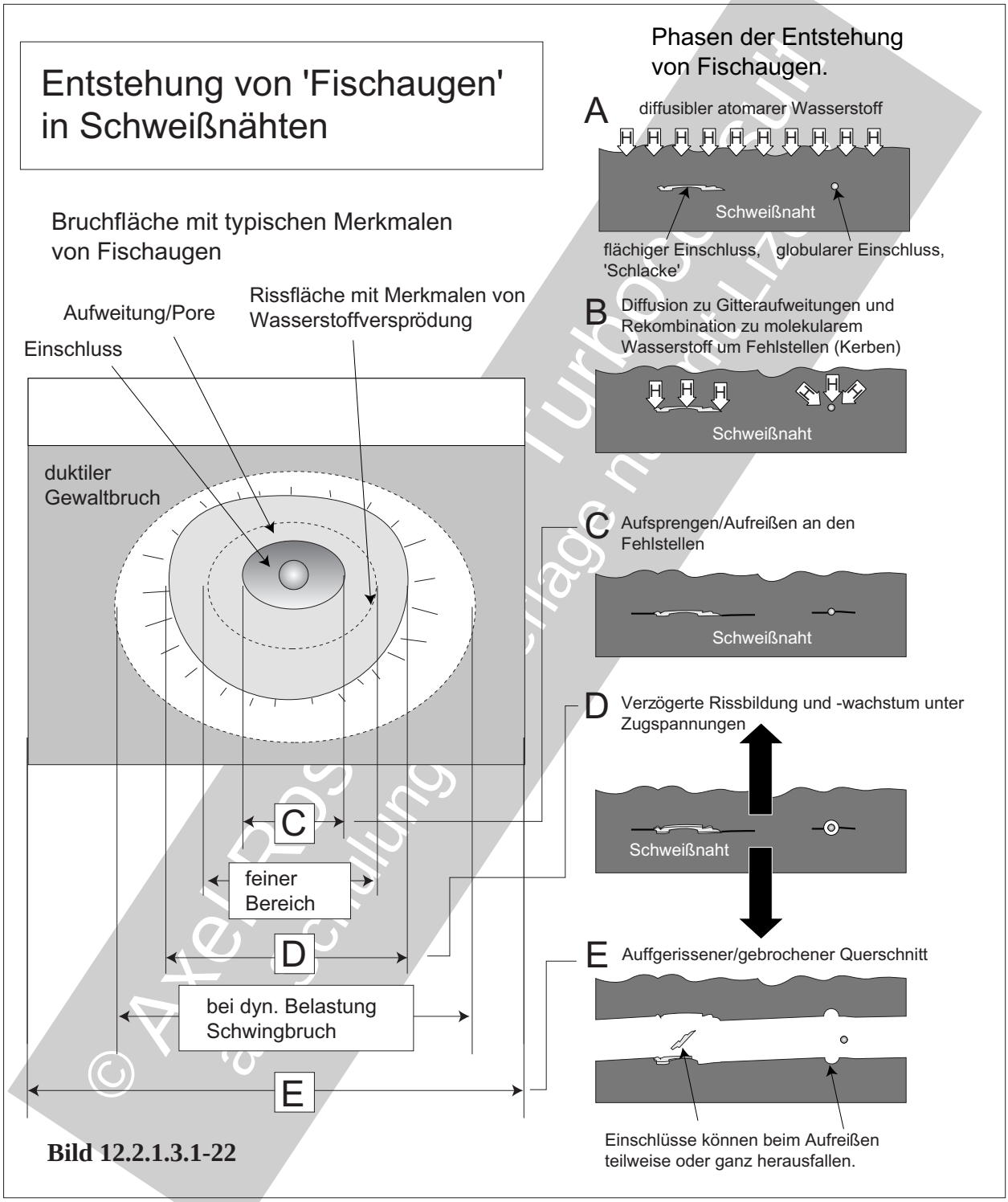


Bild 12.2.1.3.1-22

charakteristisch feinstrukturiert sein (Lit. 12.2.1.3-39).
Gegebenenfalls hat die anschließende ***Ringfläche*** *eine gröbere Struktur mit typischen Merkmalen der Wasserstoffversprödung (Band 1 Bild 5.7.1-2).*

Diese geht je nach Duktilität des Grundwerkstoffs in einen spröden oder zähen ***Gewaltbruch*** *(Fließbruch, Verformungsbruch) „****F****“ über.*
Kam es vor dem Restgewaltbruch zu einem ***zyklischen Rissfortschritt*** *(Schwingriss) ist eine weitere Ringzone zum Gewaltbruch vorhanden.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Konventionelles Schmelzschweißen

Mechanismen der Bewegung von Wasserstoff in Stählen.

(Lit. 12.2.1.3-39)

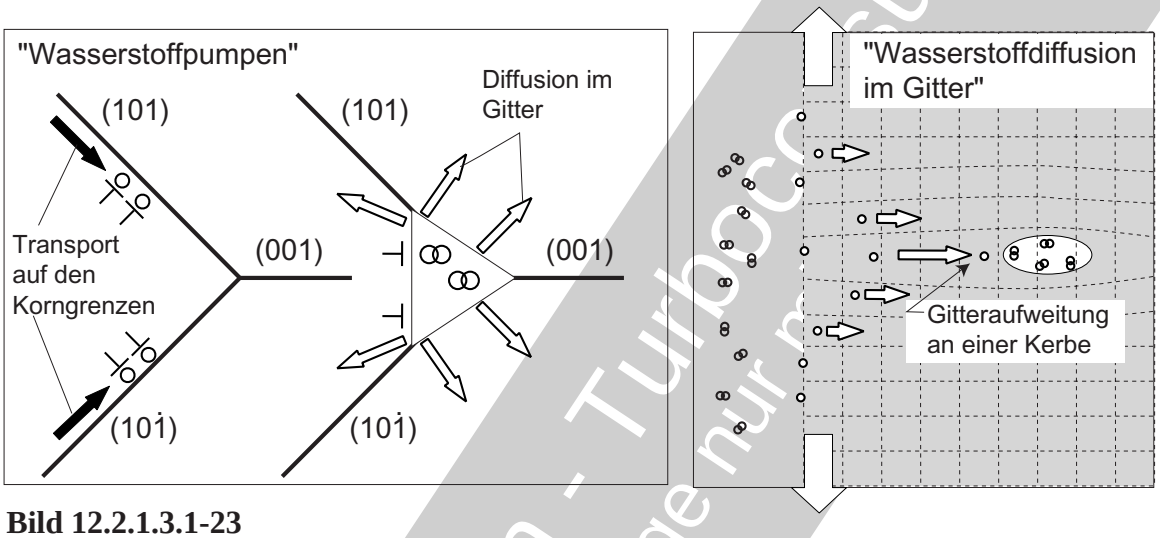


Bild 12.2.1.3.1-23

Diese kann Merkmale einer Schwingungsrisskorrosion (Korngrenzenrisse) haben (Band 1 Kapitel 5.6.3.2).

*Die **Entstehung von „Fischaugen“** lässt sich in **Phasen** unterteilen (Skizzen rechts):*

***Phase „A“**: Bildung diffusiblen atomaren Wasserstoffs (Seite 12.2.1.3.1-32) der in die Schmelze bzw. die Schweißnaht eindringt.*

***Phase „B“**: Der Wasserstoff diffundiert in das von Zugspannungen aufgeweitete Gitter an Kerben (Einschlüsse, Trennungen). Dort rekombiniert er (Bild 12.2.1.3.1-23). So entsteht ein sehr hoher Gasdruck.*

***Phase „C“**: Der Gasdruck ‘sprengt’ Anrisse auf.*

***Phase „D“**: Verzögerte Makrorissbildung in der Risswachstumsphase unter Zugspannungen (Eigenspannungen/Schweißspannungen, Bild 12.2.1.3.1-16) .*

***Phase „E“**: Bruch des überlasteten Restquerschnitts.*

Die nun vorliegende Gesamtbruchfläche zeigt die charakteristischen, identifikationsgeeigneten Bruchmerkmale (Band 1 Bild 5.7.1-2).

***Bild 12.2.1.3.1-23** (Lit 12.2.1.3-39): **Wasserstoff** kann sich auf verschiedene Weise **im Metall bewegen bzw. transportiert** werden. Das Verständnis ist praxisrelevant, denn es dient der Erklärung in der Praxis beobachteter Effekte. Dazu gehört der Einfluss der **Belastungsgeschwindigkeit** und der **äußeren Last**. So beobachtet man bei plastischer Stauchung, dass **Wasserstoff aus dem Metall ‘gequetscht’** werden kann. Dies ist für Effekte bei Fertigungsverfahren wie Hämmern von Schweißnähten, Zerspanung mit merklicher Oberflächenverformung oder Kugelstrahlen von Bedeutung.*

*„**Wasserstoffpumpen**“(auch Tribosorption, Skizze links) erfolgt an **Speicherwänden** unter **plastischer Verformung** (Recken und Stauchen). Der **Wasserstoff dissoziiert an** diesen **frischen Metalloberflächen** und wird auf den **Gleitflächen** des Metallgitters transportiert. An Versetzungen und Hindernissen kann sich der Wasserstoff wieder in winzigen **Hochdruckbläschen** rekombinieren. Sie blockieren die Gleitvorgänge und es kommt zur **Mikrorissbildung**. Benachbarte Risse können sich unter Zugspannungen vereinigen (Band 1 Bild 5.7.1-2). Das ist der Grund für eine besonders **feine***

© Axel Rossmann - Turbocoach
als Schulungsunterlage nur m

Der Einfluss von inneren Fehlstellen auf Wasserstoffversprödung

(Lit. 12.2.1.3-39)

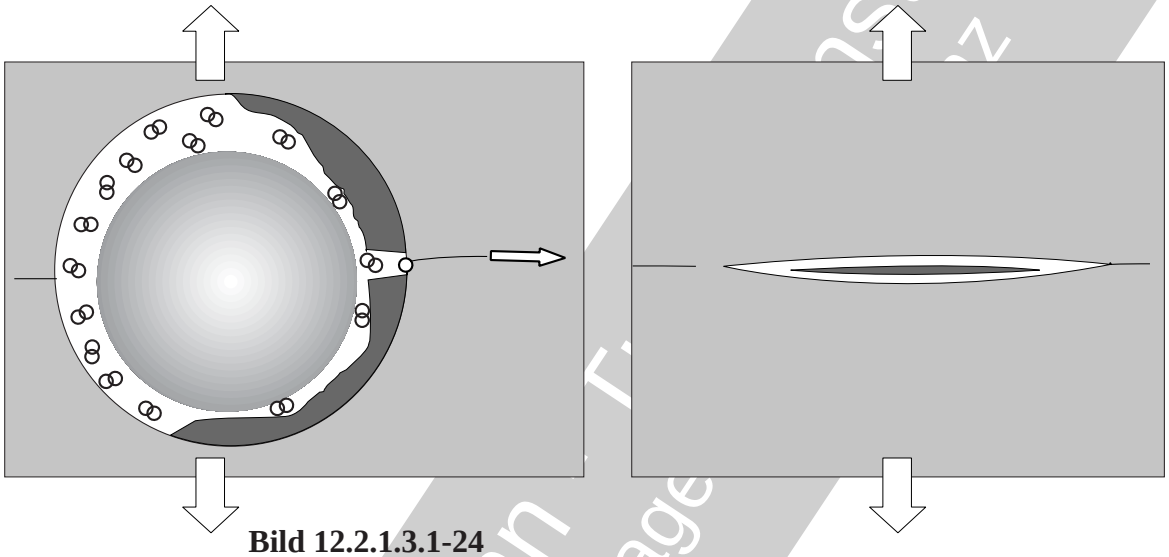


Bild 12.2.1.3.1-24

Bruchstruktur *um Poren (Wasserstoffspeicher, Bild 12.2.1.3.1-22).*
Von Bedeutung ist der im Vergleich zur Diffusion schnelle Wasserstofftransport. So lassen sich auch Anzeichen für Sprödverhalten nicht nur im langsamen Zugversuch sondern auch ***bei schnelleren Belastungen*** *erklären. Das gilt z.B. für den* ***Schlagversuch, nicht jedoch den Kerbschlagversuch****.*
Diffusion im Metallgitter *(Skizze rechts): Die Wasserstoffatome bewegen sich im Gitter über Leerstellen und Zwischengitterplätze. Es kommt zu einer relativ* ***langsamen Bewegung des Wasserstoffs*** *in Richtung einer Gitteraufweitung (Band 1 Bild 5.7.1-1).*
Damit wird verständlich, dass für die ***Porengröße*** *offenbar in erster Linie das* ***Einzugsgebiet*** *und nicht die Keimgröße entscheidend ist.*

Bild 12.2.1.3.1-24 *(Lit 12.2.1.3-39): Die Ausgangsfehlstelle hat einen entscheidenden Einfluss auf wasserstoffinduzierte Sprödrisse.*
Form*: Rissähnliche Fehlstellen wie ausgewalzte Einschlüsse, Heißrisse oder Kaltstellen sind sehr viel gefährlicher als sphärische. Solche „Kugelspeicher“ sind Poren oder globulare Einschlüsse. Grund ist die unterschiedliche Spannungskonzentration/Kerbwirkung (Band 1 Bild 5.7.1-1).*
Porenwände*: In der Literatur wird die Oxidation einer Porenwand mit einer* ***Reaktion des Wassers*** *erklärt. Damit ist der Wasserdampf Ursache für solche Poren.* ***Molekularer Wasserstoff*** *in der Pore kann* ***durch die Oxidschicht*** *(porös, spröde Rissbildung bei Dehnung) zur metallischen Probenwand dringen und dort in diffusiblen atomaren Wasserstoff* ***dissoziieren*** *(Bild 12.2.1.3.1-23). Es gibt jedoch auch ‘stabile’, für Wasserstoff undurchdringliche Oxidschichten (Sorptionsschichten). Dazu genügt der übliche Sauerstoffrestgehalt < 0,0001 %. Das erklärt, warum z.B. Druckflaschen für Wasserstoff mit üblicherweise oxidierter Innenfläche gegen Versprödung unempfindlich sind.*

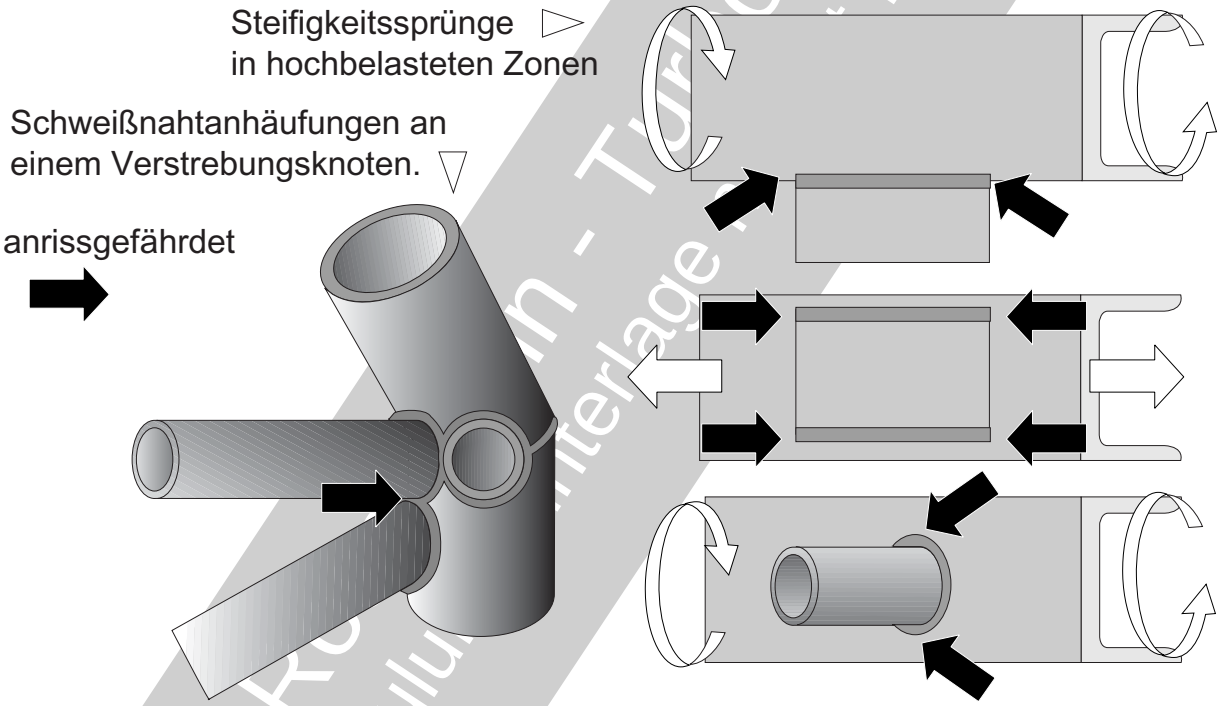
© Axel Rossmann Transportnetz
Lehrmaterialien und Schulungsunterlagen

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden -Schweißen: Abhilfen

12.2.1.3.1.1 Abhilfen bei Problemen an WIG und MIG Schweißungen

Allgemeine Empfehlungen

Solche Schweißkonstruktionen sollten vermieden werden.



Voraussetzung für eine gute Schweißqualität und ein optimales Betriebsverhalten ist ein vom Konstrukteur schweißgerecht gestaltetes Bauteil. Weil die konventionelle Schweißtechnik von Frästeilen und Gussteilen stark in den Hintergrund gedrängt wurde, besteht die Gefahr, dass wichtige Erfahrungen verloren gehen. Deshalb werden hier **Grundregeln für die Konstruktion von Schweißteilen** (Lit. 12.2.1.3.1.1-1), insbesondere für Schweißverfahren, zusammengefasst.

- Vermeide nach Möglichkeit Schweißnähte in **statisch oder dynamisch hochbelasteten Bauteilzonen** (Lit. 12.2.1.3.1.1-1 und Lit. 12.1.3.1.1-2). Dies gilt auch unter dem Gesichtspunkt des **Containmentverhaltens** (Schlagbeanspruchung).
- Beachte beim Konstruieren die Eigenarten der Schweißtechnik und schweiße **nicht nachgeahmte Gusskonstruktionen**.
- Lasse nicht Nietung, Lötung und Schweißung zur Kraftübertragung an einem Anschluß gemeinsam wirken.
- Verwende als wichtigstes Konstruktionselement für Schweißkonstruktionen **Bleche und-Schmiedeteile**. Gussteile aus Ni-Legierungen sind bei einer Neigung zu **Warmrissen** weniger

© Axel Rotmann - Turboconsult als Schulunterlage mit Lizenz

geeignet. Dünnwandige, blechähnliche Gussteile (z.B. als Gehäusewand) sind nur sehr schwer in der erforderlichen Qualität lieferbar.

- Verbinde einzelne Konstruktionsteile am **zweckmäßigsten durch Stumpfstoß**.
- Wähle die **Schweißnähte so kurz und so dünn wie möglich** und vermeide dadurch unnötige Wärmeeinwirkung.
- **Dünne durchlaufende Nähte** sind dicken, unterbrochenen Nähten vorzuziehen.
- Konstruiere insbesondere dynamisch beanspruchte Teile nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Festigkeit, sondern auch nach **Elastizität/Steifigkeit und Schwingverhalten**.
- Vermeide Schweißnähte in **kerbbeanspruchten Zonen**.Dazu zählen in erster Linie **Steifigkeitssprünge**. Unter diesem Gesichtspunkt ist auf eine möglichst **symmetrische Gestaltung der Schweißstöße** zu achten (Bild 12.2.1.3.1-2, Bild 12.2.1.3.1-4, Bild 12.2.1.3.1-5, Bild 12.2.1.3.1-8 und Bild 12.2.1.3.3-10).
- An dickwandigen Bauteilen und beim Einsatz hochfester Werkstoffe sowie für Druckgefäße sind wegen der **Mehrachsigkeit der Spannungen** und der höheren **Kerbempfindlichkeit** die Konstruktionsregeln für die dynamisch beanspruchte Konstruktion anzuwenden.
- Achte in allen Konstruktionen auf einen günstigen **Verlauf des Kraftflusses**, dieser sollte möglichst **ungestört** sein.
- Lege an Stellen mit einer Kraftumlenkung möglichst keine Schweißnähte.
- Vermeide Schweißnähte an Stellen mit einer großen **Kaltverformung**.
- Vermeide Schweißnähte die eventuelle **Seigerungszonen aufschmelzen** (z.B. an Gussteilen).
- Vermeide Schweißungen die **“dopplungsverdächtige“ Werkstückzonen** (Bild 11.2.2.1-14) quer beanspruchen.
- Verhindere Nahtkreuzungen und Anhäufungen von Schweißnähten.
- Keine Schweißstöße an Stellen höchster Beanspruchung. **Vermeide Laschenstöße** (Angstlaschen).
- Berücksichtige bei allen Schweißkonstruktionen die **Schrumpfwirkung der Schweißnähte** mit ausreichend Aufmaß an zu zerspanenden Flächen. Mit einer optimierten **Schweißfolge** lassen sich Verzüge und Eigenspannungen minimieren.
- Gewährleiste **gute Zugänglichkeit** beim **Schweißprozess** und **Prüfen** (EB-Schweißungen siehe Bild 12.2.1.3.3-10). Das gilt auch für eine sichere Wurzelschweißung. Bevorzuge als **Schweißlage** immer die Waagerechte oder die Wannenlage und achte auf die Zugänglichkeit der Nähte beim Schweißen. Von Nähten mit erschwerter Zugänglichkeit sind keine maximalen Festigkeiten zu erwarten.
- Nimm beim Konstruieren Rücksicht auf die **vorhandenen Fertigungseinrichtungen** und gib an, welche **Vorrichtungen** für die Ausführung erforderlich sind.
- Vermeide die Anordnung von Nähten die **Hohlräume und Spalte** entstehen lassen und so **Korrosion** begünstigen (Band 1, Bild 5.6.1.2-1).
- Wende **Lochschweißungen nur in Ausnahmefällen** an.
- Kenntnisse der Schweißzeichen und Symbole, insbesondere beim Fertigungspersonal, der Arbeitsvorbereitung und der Kontrolle. Die **Spezifizierung und Festschreibung der Schweißung** in Verfahren und Eigenschaften kann eine besondere Bedeutung in multinationalen Projekten oder bei Lizenzfertigung erhalten, wenn unmissverständliche Angaben für alle Partner zu gewährleisten sind. Hier einige Grundsätze:
  Achte an den Schweißnähten in der Konstruktionszeichnung auf die richtigen **Symbole** wie zur Fugenform, Nahtdicke (und -länge), Bearbeitung des Spalts an der Wurzel, besondere Bearbeitung der Stoßkanten, Nachbearbeitung der Nähte, Durchführung von Prüfungen.

© Wolfgang Roßmann - Turbocomsult
Vorlesungsunterlage nur mit Lizenz

Vermerke außerdem schweißtechnische Angaben wie Ausführungsklasse der Schweißung, Verfahren, Zusatzwerkstoff, Verweis auf den Schweißfolgeplan (oder Zusammenbaufolgeplan), Wärmebehandlung.

· Optimierung und Festschreibung von Verfahrensparametern und Vorrichtungen.

· Gute Nahtvorbereitung, insbesondere bei Reparaturschweißungen.

· **Dokumentarische Kontrolle der wichtigsten Verfahrensparameter**. Insbesondere bei Verfahren (z. B. EB-Schweißen, Bild 12.2.1.3.3-4 und Bild 12.2.1.3.3-5); Reibschweißen, Bild 12.2.1.3.4-4), die nach der Schweißung wegen Fehlergröße und Fehlerart (Mikrorisse, Bild 12.2.1.3.1-3 und Bild 12.2.1.3.3-3; Klebestellen/ Kaltschweißen, Bild 12.2.1.3.3-2, Bild 12.2.1.3.3-9 und Bild 12.2.1.3.5-2) nicht mehr ausreichend sicher zerstörungsfrei zu prüfen sind.

· Geeignete **Nachbehandlung** geschweißter Teile (Spannungsglühen, Nachvergüten, Aushärten usw.). Dabei ist auf **Einschränkungen** wie sie Beschichtungen, Lötungen oder Gefügebesonderheiten erfordern, zu achten.

· Untersuchung jeder **ungewöhnlichen Veränderung** am Bauteilverhalten oder -aussehen. Dies gilt auch für scheinbar „harmlose“ Erscheinungen, wie z. B. besondere Anlauffarben.

· Zuverlässiges, geschultes und motiviertes Personal (Band 4, Bild 17.1-2). Bei wichtigen Bauteilen keine „Akkordpsychose“ erzeugen, die z. B. zur Veränderung der Verfahrensparameter während der Nachtschicht führen kann.

· Stärkung des (selbst-) kritischen Beobachtungsvermögens des **Personals**, in dem keine "Bestrafung“ bei der Meldung von Fehlern vorgenommen, sondern das Problem objektiv gemeinsam gelöst wird (Band 4). Damit reduziert sich die Gefahr unsachgemäßer Reparaturen oder Veränderungen am Bauteil, die eine erfolgreiche Schadensuntersuchung nicht mehr zulassen (Band 4, Bild 17.5-1).

· **Schwachstellen** (z. B. Mikrorisse) dürfen nur dann zugelassen werden, wenn diese **ausreichend dokumentiert** wurden und genügend Erfahrung (z. B. betriebsnahe Erprobung und anschließende Rissfortschrittsuntersuchung) zum Betriebsverhalten vorliegt. In jedem Fall von Bedeutung, ist eine dokumentierte **Risikoabschätzung** durchzuführen (Band 1 Kapitel 2.3).

· Optimierte, dem jeweiligen Fall, wenn notwendig, angepasste ZfP-Verfahren (Band 4). Gewährleiste **gute Zugänglichkeit für die Prüfungen**. Eine besondere Aufmerksamkeit fordert die von Fehlern bevorzugte **Nahtwurzel**. In diesem Zusammenhang ist ein geeigneter **Schweißfolgenplan** von Bedeutung.

· **Änderungen oder Besonderheiten beim Fertigungsablauf in den Begleitpapieren vermerken** und den betroffenen Teilen rekonstruierbar zuordnen. Gegebenenfalls rechtzeitig Fachabteilungen hinzuziehen.

· Prompte, **engagierte, unbürokratische, objektive und neutrale Betreuung** durch die betreuenden Fachabteilungen (z. B. Labor) ohne „erhobenen Zeigefinger“.

· Werkstücke nach Reinigungsvorgängen nicht längere Zeit ungeschützt liegen lassen. **Einhalten der vorgeschriebenen Zeitspanne** bis zur Anwendung einer Wärmebehandlung zur **Entsprödung** bei Gefahr von Wasserstoffversprödung (Bild 12.2.1.7-14; Band 1, Bild 5.7.1-7). Überwachung der Reinigungsbäder auf Verunreinigungen, die auf die zu reinigenden Teile übertragen werden.

Es ist zu gewährleisten, dass der **Werkstoffzustand in der Fertigungsentwicklung auch in der Serienfertigung** vorliegt. Das gilt besonders bei **neuen Rohteillieferanten** und **Verfahrensänderungen** im Zuge einer Kostenminimierung.

© Axel Bossmann, Turbosonsult
Abbildungsunterlagen nur mit Erlaubnis

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden -Schweißen: Abhilfen

· Verwendung möglichst **gut schweißbarer Werkstoffe bzw. optimaler Gefüge.** Bei aushärtbaren Legierungen ist häufig die Schweißbarkeit im lösungsgeglühten Zustand besser als im ausgehärteten (Bild 12.2.1.3.1-14). Überprüfung, ob die Voraussetzungen auch vorhanden sind Werkzeigmaschninen mit Patch-Test oder Gleeble-Test, im Bewußtsein, dass diese technologischen Tests nur grobe Anhaltswerte liefern und das Werkstückverhalten nicht voll abbilden können.

· **Verbesserung der (EB-) Schweißbarkeit** von Superlegierungen durch Herstellung einer **Feinkornzone** im zu schweißenden Bereich. Dies kann unter Erzeugung einer plastischen Kaltverformung (z.B. Rollen) mit anschließendem Rekristallisationsglühen versucht werden.

· Erarbeitung **praktisch anwendbarer Beurteilungskriterien** für Schweißfehler (z. B. für Poren oder Mikrorisse in EB-Nähten.

· Von **Nachschweißungen** kann nicht mehr erwartet werden als von der Originalnaht.

· Die erforderliche **Schweißnahtgüte** ist von Beanspruchung, **Normen, Vorschriften und Erfahrungen** abhängig.

· Wichtige Kriterien bei der Auswahl von Schweißverfahren sind Wirtschaftlichkeit, vorhandene Anlagen, Eignung, Machbarkeit (Qualität, Sicherheit, Festigkeit).

· **Vorrichtungen**. Diese sind **von der Fertigungsentwicklung und -erprobung auf die Serie zu übertragen**, oder es kann ein Nachweis unter Serienbedingungen erforderlich werden.

Die Ergebnisse der Planungsarbeit, soweit sie das Schweißen mittelbar oder unmittelbar betreffen, werden üblicherweise folgenden schweißtechnischen Fertigungsunterlagen aktenkundig gemacht bzw. festgeschrieben:

- Schweißplan
- Zuschnitt- und Schneidplan Heftplan (Heftfolgeplan) Schweißfolgeplan
- Schweißanweisung
- Prüfplan (Prüfblatt)
- Schweißfolgeplan
- Verantwortung und Grundlage in Spezifikationen, Zeichnungen, Arbeitsplänen usw.

Für das vorschriftsmäßige Vorgehen ist gewöhnlich die Schweißaufsichtsperson verantwortlich. Grundlage ist die Konstruktionszeichnung. Besteht die Schweißkonstruktion aus mehreren Baugruppen, sollten für deren **Untergruppen einzelne Folgepläne** aufgestellt werden.

Der **Schweißfolgeplan** enthält Angaben über

- Grundwerkstoff
- Nahtart und Vorbereitung
- Schweißverfahren
- Schweißzusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe
- Notwendige Qualifikation der Schweißer
- Schweißvorrichtung/Schutzgaszuführung
- Wärmebehandlung vor, während und nach dem Schweißen (Wärmeführung)
- Reihenfolge des Zusammenbaus
- Schweißfolge und -richtung (Beachtung des Bauteilverzugs)
- Schweißposition
- Schweißnahtprüfung
- Hauptabmessung und Gesamtgewicht.

© Axel Possmann - Turbocensult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden -Schweißen: Abhilfen

Grundregeln für die Schweißfolge:

· Einzelteile sind so einzubauen, dass sie möglichst **ungehindert schrumpfen** können. Schweißnähte die zu **starren Verbindungen** führen sind daher **zuletzt zu schweißen**.
· An dünnwandigen Konstruktionen, die zum Ausbeulen neigen, sind **Aussteifungen zuerst** anzuschweißen, andernfalls **Wärmeableitung** mit Kupfer- oder Stahlunterlagen.
· Einzelteile, Schweißgruppen und Schweißuntergruppen sind **vor dem weiteren Zusammenbau fertig zu schweißen und zu richten**.
· Wenn Längs- und Querstumpfnähte zusammentreffen, ist die **in Kraftrichtung liegende als Durchlaufnaht zuletzt zu schweißen**. Die Durchlaufstöße sind wegen der freien Schrumpfung der Einzelteile erst nach dem Schweißen der anderen Nähte zu heften.
· Beim Kreuzen von Stumpf- und Kehlnähten wird **erst die Stumpf-, dann die Kehlnaht** geschweißt, um die Querschrumpfung der Stumpfnähte nicht zu behindern.
· **Heftstellen** müssen kräftig ausgeführt werden. Auf sie wirkt die indirekte Schrumpfung quer zur Naht besonders stark, bevor die Naht an dieser Stelle geschweißt wird. Dünne Bleche bis etwa 4 mm Dicke möglichst **nicht heften**, sondern **Spann- und Schweißvorrichtungen** einsetzen.
· Die Wurzellage von langen **Stumpfnähten** wird im Pilgerschritt geschweißt. **Kehlnähte** schweißt man durchgehend oder bei längeren Nähten von der Mitte beginnend nach außen.
· Bei räumlichen Bauteilen sind die **Schrumpfmomente zu beachten**. Um Verwerfungen zu vermeiden, sollen **Schweißnähte symmetrisch zur Schwerachse** liegen und einander entsprechende **Nähte gleichzeitig geschweißt** werden.
· Ungleiche Spaltbreite erfordert eine wechselseitige, abschnittsweise Schweißung.
· **Walzprofile** werden zuerst **am dünnsten Querschnitt** (Steg) , dann **zum freien Flansch** hin geschweißt.

Empfehlungen für das Schweißen von Titanlegierungen.

Das Schmelzschweißen von Titanlegierungen erfordert wegen der hohen Reaktivität, die sich in Oxidation und Gasaufnahme zeigt, besondere Vorkehrungen. Sie sind notwendig, um die Schweißqualität für Triebwerksbauteile zu gewährleisten. Nachfolgende **Empfehlungen** sind aus Angaben der Fachliteratur zusammengestellt (Lit. 12.2.1.3-27 und Lit. 12.2.1.3-29) und der jeweiligen Fertigungssituation anzupassen. Ein erfahrener Fachmann sollte sie in geeigneter Weise berücksichtigen.

· Die **Schweißumgebung**, einschließlich von Vorrichtungen und Spannwerkzeugen muss vor dem Schweißen **sauber** sein.
· Die Schweißzone, einschließlich der in ihrer Ausdehnung abzuschätzenden wärmebeeinflussten Zone (WEZ), darf **keine Verunreinigungen mit Hilfsstoffen** aufweisen. Dazu zählen insbesondere **Fette** (z.B. von einem Tiefziehvorgang), **Kühl- und Schneidmedien** (Kühlschmierstoff = KSS, Kapitel 12.2.1.1.2.1) und **Gleitmittel/Trennmittel** (Bornitrid, MoS_2, Silikone, Fluorverbindungen) und **Reinigungsmittel** aufweisen.
· **Grate** sind mit einer scharfen Feile zu **entfernen**.
· Der Arbeitsplatz muss **absolut trocken** sein (auch auf **Schwitzwasser** achten). Wasser ist die Hauptquelle von Sauerstoff und Wasserstoff. Diese Forderung gilt sowohl für das Werkstück als auch für Vorrichtungen und Ausrüstung.

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

. Bearbeitete Schweißflächen dürfen **keine Oxidschicht,** wie sie in überhitzten Zonen (**Anlauffarben**) entstehen, aufweisen.

· **Keine Aufschmierungen von Eisen**, d.h. keine **Stahlbürsten** zum Reinigen verwenden. Auf keinen Fall **Stahlwolle** oder **Schmirgelpapier** zur Reinigung anwenden, das vorher an einem Stahlteil verwendet wurde.

· **Niemals zur Reinigung Cl-haltige Medien wie „Tri“ und „Per“** verwenden, stattdessen einen geeigneten Alkohol oder Aceton.

· Nicht im Schweiß- und WEZ-Bereich die Oberfläche mit **bloßen Händen** berühren. Selbst der geringe Cl-Gehalt von Fingerabdrücken kann Spannungsrisskorrosion auslösen (Band 4, Bild 18.4-12). Deshalb **Baumwollhandschuhe tragen**.

· Der gesamte Aufheizungsbereich um die Schweißung (Krone und Wurzelbereich) ist mit einem ausreichenden **Schutzgasschleier** (Helium oder Argon) abzudecken. Die **Gasströmung** ist auf das notwendige Minimum zu begrenzen. Sonst besteht die **Gefahr von Wirbelbildung** und **Injektionseffekten** (Bild 12.2.1.3.1-18), die Luft in den Schutzgasschleier einsaugen. Der **Sauerstoffanteil in der Umgebungsatmosphäre** sollte vor dem Zünden an einem Hilfsstück auf 40 ppm abgesenkt sein und beim Schweißen des Werkstücks unter 20 ppm liegen (Lit. 12.2.1.3-31). Diese **Grenzwerte** sind mit einem Sauerstoffmessgerät sicherzustellen.

· Vor jedem neuen **Ansetzen des Brenners** ist Oxidation zu entfernen.

· Verwende die **beste Schutzgasqualität** um einen **Taupunkt unter -50°C** zu gewährleisten (Lit. 12.2.1.3-30).

· Die Intensität der **Lüftung des Arbeitsplatzes** darf die Wirkung des Schutzgasschleiers nicht beeinträchtigen. Gegebenenfalls sind **Abschirmungen** vorzusehen.

. Vor Produktionsbeginn sollte grundsätzlich eine aussagekräftige Probe bzw. ein **Versuchsteil** geschweißt werden.

· **Zusatzwerkstoff** ist ebenso sorgsam wie das Werkstück zu behandeln, hierzu gehören saubere **Handschuhe** und eine **Entfettung**.

· **Das Bauteil darf nicht mit der Elektrode (WIG) berührt** werden. In der Schweißung besteht die Gefahr der **Verunreinigung mit WC**. Ein Kontakt außerhalb der Schweißung erzeugt **Zündstellen** mit einem gefährlichen Schwingfestigkeitsabfall (Band 4, Kapitel 18.6).

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

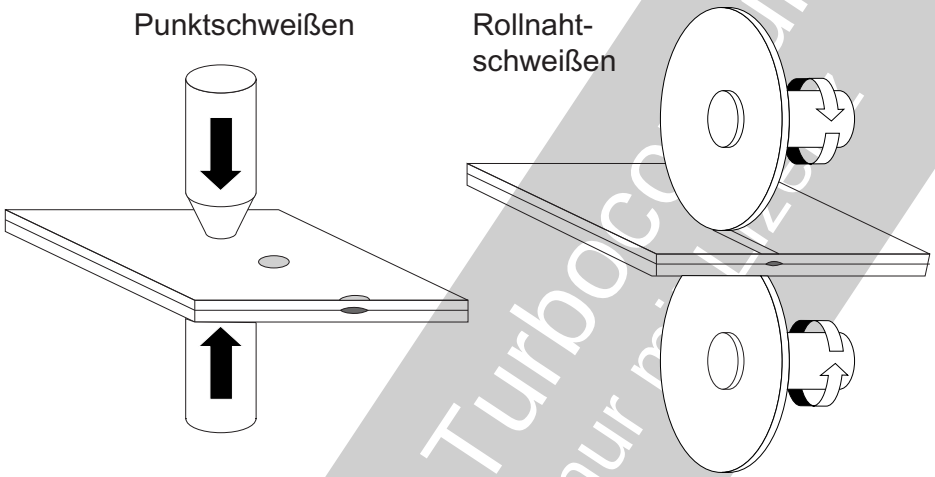
Literatur zu Kapitel 12.2.1.3.1.1

12.2.1.3.1.1-1 G.Niemann, H.Winter, B.-R.Höhn, „Maschinenelemente, Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern und Wellen“, 4. Auflage, 2005, ISBN 3-540-25125-1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, Seite 305-308.

12.2.1.3.1.1-2 „Allianz - Handbuch der Schadenverhütung“, Allianz Versicherungs-AG München und Berlin 1972, Seite 275-279.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden
Punkt - und Rollnahtschweißen.

12.2.1.3.2 Widerstandsschweißen: Punkt- und Rollnahtschweißen



Widerstandsschweißen umfasst **Verfahren ohne Zusatzwerkstoff**, bei denen der Schweißspalt unter einer Anpresskraft mit Hilfe eines Stromflusses aufgeschmolzen wird. So lässt sich mit Hilfe des Übergangswiderstands in einer kleinen Fläche eine hohe thermische Energie konzentrieren. Dieses Kapitel beschränkt sich auf die für den Leichtbau besonders wichtigen Verfahren (Widerstands-) **Punktschweißen** und (Widerstands-) **Rollnahtschweißen** (Sonderform 'Steppnahtschweißen'). Verbunden werden in erster Linie unlegierte oder niedrig legierte Stahlbleche mit und ohne Beschichtung (verzinkt). Weniger häufig, aber durchaus möglich, ist die Verbindung von Blechen aus austenitischem Stahl (Typ Cr-Ni-Stähle). Beispiele sind Abgasführungen und Auspuffanlagen (Band 1 Bild 5.6.1.2-4). Eher selten handelt es sich um warmfeste Legierungen (z.B. Flugtriebwerke, Bild 12.2.1.3.2-3) und Aluminiumbleche (z.B. Luftfahrt und Leichtbaukarosserien). Bei solchen Werkstoffen sind Besonderheiten gegenüber den üblichen Stählen wie Wärme- und Stromleitung zu beachten. Damit wird eine ausreichende **Parameteroptimierung**, gegebenenfalls bei Sondermaßnahmen wie Schutzgas erforderlich

An verzinkten Blechen sind zu beachten:
- Einfluss auf den Stromübergang.
- Reaktion/Kleben mit den Elektroden. Dies verkürzt die Anwendung.
- Zn-Dämpfe müssen abgesaugt werden.
- Erhalten des Korrosionsschutzes.

Es gibt eine Vielzahl von Schweißfehlern (Bild 12.2.1.3.2-1.1) .Wichtige sind äußerlich an einem **zu kleinen Schweißpunkt** oder **Schweißspritzern** zu erkennen. Generell hat die **Fehlerverhütung** zwei dominierende Herausforderungen:

- Serientauglicher Nachweis innen liegender Fehler mit Hilfe einer **zerstörungsfreien Prüfung**. Eine lückenlose sichere Prüfung ist nicht möglich (Lit. 12.2.1.3-46). Aus diesem Grund muss eine Verfahrensüberwachung (Lit. 12.2.1.3-45) eingesetzt werden.
- **Qualitätssicherung** durch Optimierung und **Überwachung der Verfahrensparameter**. Dies ist eine Herausforderung, wegen der vielen auch zeitabhängigen (Elektrodenveränderung, Widerstand des Bauteils) zusammenwirkenden Verfahrensparameter und Einflüssen der zu verbindenden Bleche.

© Axel Rossmann - Turbocoupt
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Punkt - und Rollnahtschweißen.

Punkt- und Rollnähte zeigen besonderes Verhalten bzw. **Versagen/Schäden** unter Betriebsbedingungen. Hierzu ist die vorliegende Literatur unbefriedigend. Die Probleme müssen jedoch vom **Konstrukteur** bereits bei **Gestaltung** und **Auslegung** berücksichtigt werden.

- Eine zugbelastete Verbindung erfährt neben Scherung auf Grund der Verformung auch Querkräfte und Biegung (Bild 12.2.1.3.2-2).Typische Versagensform ist '**Ausknöpfen**' wie sie beim Standardzugversuch auftritt.
- Die Schweißung hat eine ausgeprägte **Kerbwirkung**. Das macht sie für dynamische Beanspruchungen empfindlich. Es kann anfangs zu äußerlich nicht erkennbaren Anrissen kommen, die ein überraschendes katastrophales Versagen auslösen.
- Ein wichtiger 'indirekter' Effekt muss berücksichtigt werden. Es handelt sich um die **Positionierung** von Blechen vor der eigentlichen Schweißung durch kleine **Schmelzschweißpunkte** an den Kanten. (Heftschweißung, Bild 12.2.1.3.1-6). Diese sind im Betrieb gewöhnlich extrem belastet und damit anrissgefährdet, bevor die eigentliche Widerstandsschweißung zum Tragen kommt.
- **Korrosion** (Spaltkorrosion, Band 1 Bild 5.6.1.1-1 und Bild 5.6.1.1-2.1) durch Kapillarwirkung. Eindringen eines Elektrolyten in den Spalt. Gewöhnlich handelt es sich um Feuchtigkeit aus der Atmosphäre (Luftfeuchtigkeit, Schwitzwasser) und direkte Einwirkung von Wasser (Regen, Spritzwasser). Bei austenitischen Stählen ist zu berücksichtigen, dass der Schweißprozess eine Sensibilisierung auslösen kann. Dann besteht die Gefahr interkristalliner Korrosion (Band 1 Bild 5.6.1.1-4).

© Axel Rossmann-Turbconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Punkt - und Rollnahtschweißen.

Bild 12.2.1.3.2-1.1 *(Lit. 12.2.1.3-8): Auch* ***Punkt-, Stepp- und Rollnahtschweißungen*** *sind eine Form der Schmelzschweißung. Sie weisen typische Schwach- und Fehlstellen auf. Diesen sind tabellarisch mögliche Ursachen in drei Hauptgruppen zugeordnet:*

- Schweißenergie
- Elektroden
- Bleche.

Nach ***Identifikation der Fehlerart*** *lassen sich so* ***gezielte Abhilfemaßnahmen*** *einengen.*

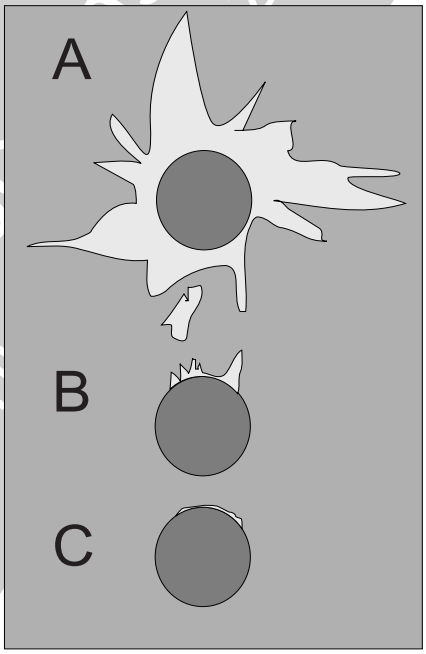
Die notwendige anwendungsspezifische ***Verfahrenserprobung*** *und* ***Parameteroptimierung*** *erfolgt wegen der Komplexität des Zusammenwirkens der vielen Einflussgrößen nach dem „****Trial and Error Prinzip****“.*
Dabei wird zunächst versucht, die wahrscheinlichste Ursache gezielt zu vermeiden. Tritt der Fehler wieder auf, wird entsprechend weiteren Möglichkeiten vorgegangen. Hier ist möglichst viel ***Erfahrung*** *wichtig.*
Ist der Fehler beseitigt, jedoch ein neuer entstanden mit was durchaus gerechnet werden muss, ist entsprechend der bisherigen Vorgehensweise weiter zu verfahren.
Diese anspruchsvolle Verfahrensoptimierung verlangt natürlich einen entsprechenden ***stabilen Serienprozess in der Fertigung*** *(Bild 10-0 und Bild 10-1). Das setzt ausreichend detaillierte Arbeitsanweisungen und Vorschriften sowie intensive Schulung des Schweißpersonals voraus.*

Bild 12.2.1.3.2-1.2 *(Lit. 12.2.1.3-8): Es gibt nur wenige deutliche* ***äußeren Merkmale für Schweißfehler****.*

- Zu kleiner Schweißpunkt bzw. zu schmale Rollnaht.
- Schweißspritzer als Folge herausgedrückter Schmelze.

Spritzer entstehen, wenn auf Grund des Innendrucks durch die Ausdehnung die Schmelze der Schweißlinse nicht im Spalt gehalten werden kann.
Besonders bei verunreinigten, unebenen oder oxidierten Flächen, wie sie bei Reparaturen durchaus zu erwarten sind, ist mit einem deutlichen Effekt zu rechnen. Dieser ist das Zeichen für eine äußerst schlechte Nahtqualität.
Bei Neuteilen muss man schon genauer hinsehen, um erste bedenkliche Anzeichen von Spritzern zu erkennen.

Spritzer sind ein deutliches Zeichen, dass mit der Schweißung etwas 'faul' ist.



A Extremes Spritzen an einer Reparaturschweißung.

B Deutliche Spritzer an einer Neuteilschweißung.

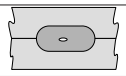
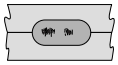
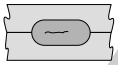
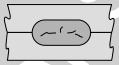
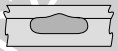
C Spritzer als Anzeichen für eine nicht optimale Schweißung.

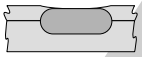
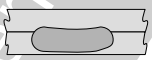
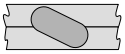
Bild 12.2.1.3.2-1.2

© AxelBossmann - Turbo Pascal als Schulungsunterlage nur zum

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Punkt - und Rollnahtschweißen.

Schweißfehler, Ursachen und Abhilfen in Punkt- und Rollnahtschweißungen.

Fehler	Poren in der Schweißlinse	Riss in der Schweißlinse vertikale mit Poren	Riss in der Schweißlinse horizontal in der Mitte		Schmelzzone im dickeren Blech
					
Schweißenergie:	zu hoch	zu hoch			
Stromstärke	zu hoch	zu hoch	zu hoch	zu hoch	
Einschaltzeit	zu lang	zu lang		zu lang	
Ausschaltzeit	zu kurz	zu kurz	zu kurz	zu kurz	
Elektroden:					
Kraft		zu niedrig	zu niedrig	zu niedrig	zu hoch
Form	zu flach	zu flach		zu flach	zu flach
Rollgeschw.	zu hoch		zu hoch	zu hoch	
Temperatur					
Leitfähigkeit therm.					zu niedrig
elektrisch					zu niedrig
Bleche:					
Dicken				rissempfindlich	
Werkstoff					

Fehler	zu große Schmelzzone	zu starker Eindruck	ungleiche Verteilung der Schmelzzone	zu kleine Schmelzzone	schräg liegende Schweißlinse
					
Schweißenergie:	zu hoch				
Stromstärke	zu hoch			zu gering	
Einschaltzeit	zu lang	zu lang		zu gering	
Ausschaltzeit	zu kurz				
Elektroden:			ungleich		nicht fluchtend außermittig
Kraft	zu niedrig	zu hoch		zu hoch	
Form	zu scharf	zu klein, zu scharf		zu flach	
Rollgeschw.	zu hoch				
Temperatur	Kühlung zu gering	Kühlung zu gering	ungleiche Kühlung		
Leitfähigkeit therm.	zu niedrig		ungleich		
elektrisch	zu niedrig		ungleich		
Bleche:					

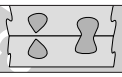
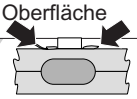
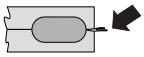
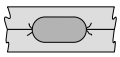
Fehler	Schweißlinse mit konkaven Seiten	Spritzer an der Oberfläche	Spritzer zwischen Blechen	Risse im Grundwerkstoff
				
Schweißenergie:				
Stromstärke			zu hoch	zu gering
Einschaltzeit	zu kurz	zu lang	zu hoch	zu gering
Ausschaltzeit				
Elektroden:	zu klein			
Kraft		zu hoch	zu klein	zu hoch
Form		zu klein, zu scharf		zu flach
Rollgeschw.				
Temperatur		Kühlung zu gering	ungleiche Kühlung	
Leitfähigkeit therm.			ungleich	
elektrisch			ungleich	
Bleche:		verschmutzt		

Bild 12.2.1.3.2-1.1

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Punkt - und Rollnahtschweißen.

Die besondere Empfindlichkeit von Punkt-, Stepp- und Rollnahtschweißungen beruht auf der Kombination mehrerer Einflüsse.

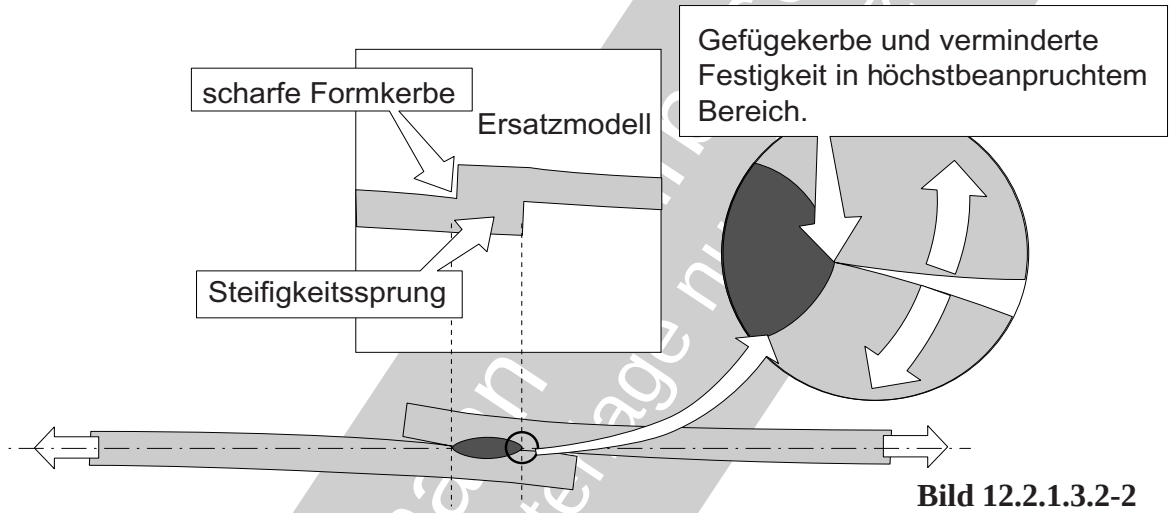


Bild 12.2.1.3.2-2

Bild 12.2.1.3.2-2: Punkt- und Rollnahtschweißungen *haben sich in typischen* ***Blechkonstruktionen*** *älterer Triebwerksmuster (Seite 12.2.1.3-2) hervorragend bewährt. Voraussetzung ist, dass sich die Schweißung in einer dynamisch niedrig beanspruchten Bauteilzone befindet. Schweißungen bilden, auch im vorschriftsgerechten Zustand,* ***für Schwingbeanspruchungen*** *eine ausgeprägte* ***Schwachstelle****. Besonders bei Biegebeanspruchung, wie sie für Schwingungen dünner Bleche typisch sind (Bild 12.2.1.3.2-3), ist mit einem frühen Versagen zu rechnen. Die vergleichsweise niedrige Schwingfestigkeit liegt an* ***verfahrenstypischen Besonderheiten****:*

Die ***Schweißlinse wirkt als scharfe Formkerbe*** *(Ausschnitt oben). Das überstehende freie Ende darf nicht als sanfter Übergang missinterpretiert werden. Die Kerbwirkung wird durch den gleichzeitigen* ***Steifigkeitssprung*** *auf eine meist doppelte Dicke verstärkt.*

Gleichzeitig wirkt im Bereich dieser Spannungskonzentration das ***Gussgefüge der Schweißnaht*** *gegenüber dem Schmiedegefüge des Grundwerkstoffs als* ***Gefügekerbe*** *(Detail rechts, siehe auch Band 1 Bild 5.4.4-1).*

Die Situation wird durch den verfahrensbedingten ***Versatz der verbundenen Querschnitte*** *verschärft. Bei Zugbeanspruchung wird der Überlappungsspalt vom entstehenden* ***Biegemoment*** *aufgezogen und extrem belastet. Diese Belastung steigt mit der Steifigkeit, d.h. mit der* ***Blechdicke*** *überproportional an.*

© Wellmann Verlag
Abbildungen nur zur Unterrichtsvorbereitung

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Punkt - und Rollnahtschweißen.

Widerstandsschweißungen wie Punktschweißungen, Steppnähte und Rollnähte sind besonders kerbwirksam und damit schwingempfindlich. Sie sollten möglichst nicht an schwingbeanspruchten Bereichen zum Einsatz kommen.

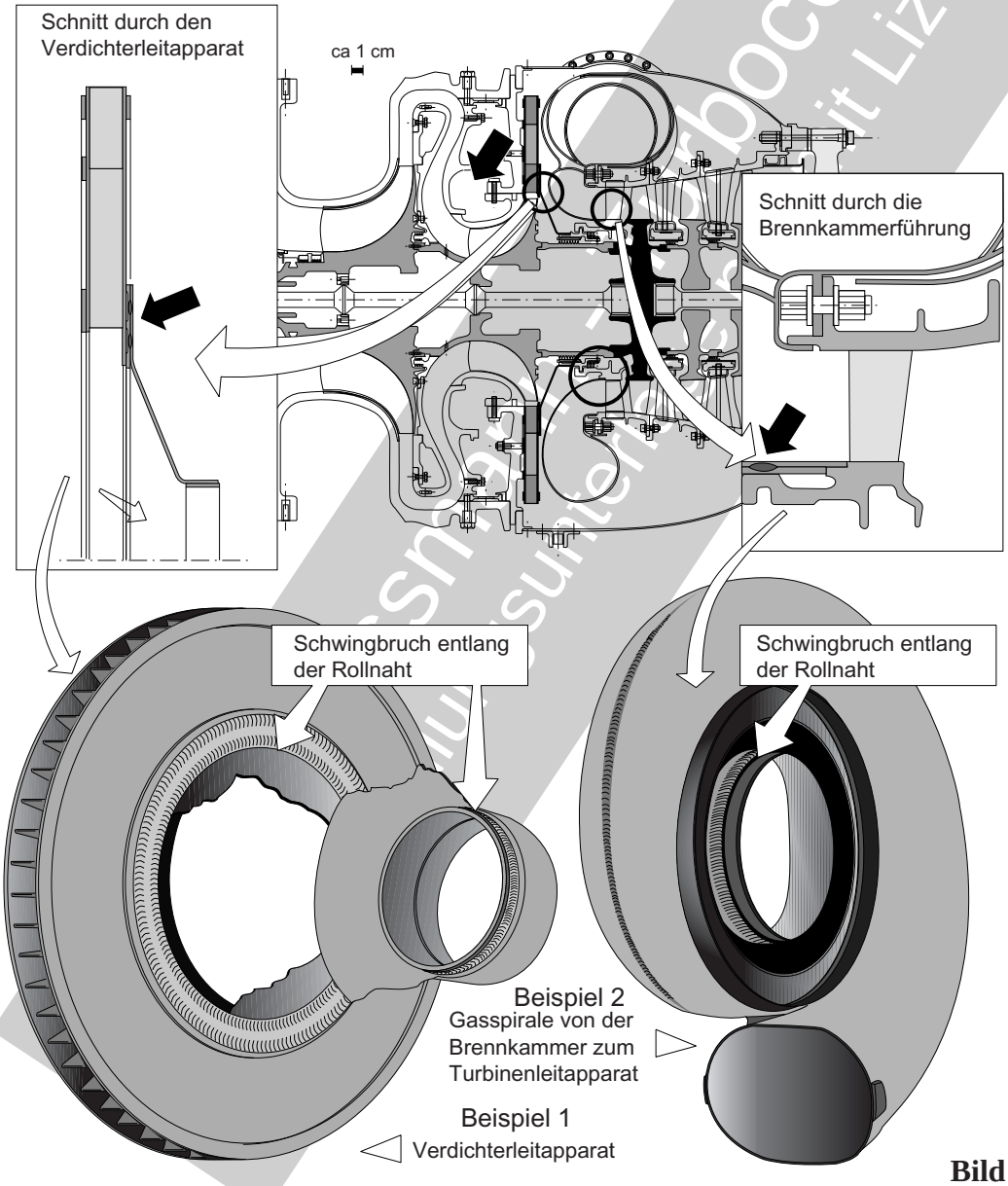
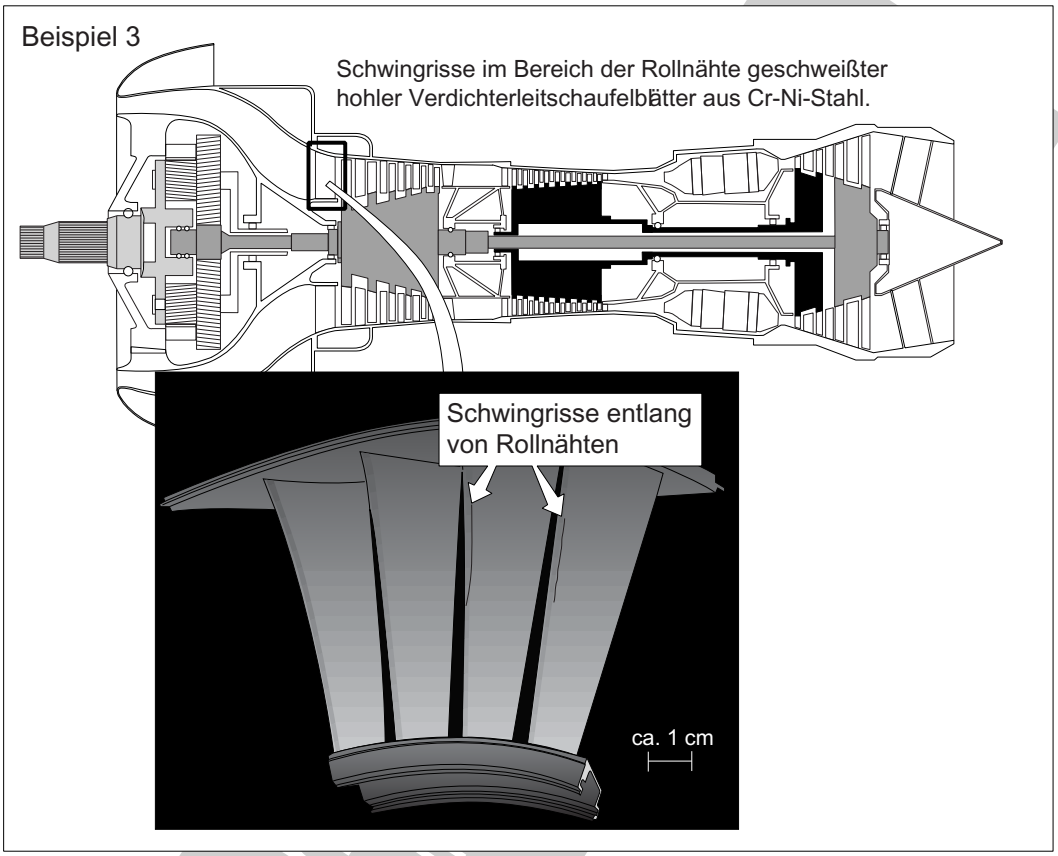


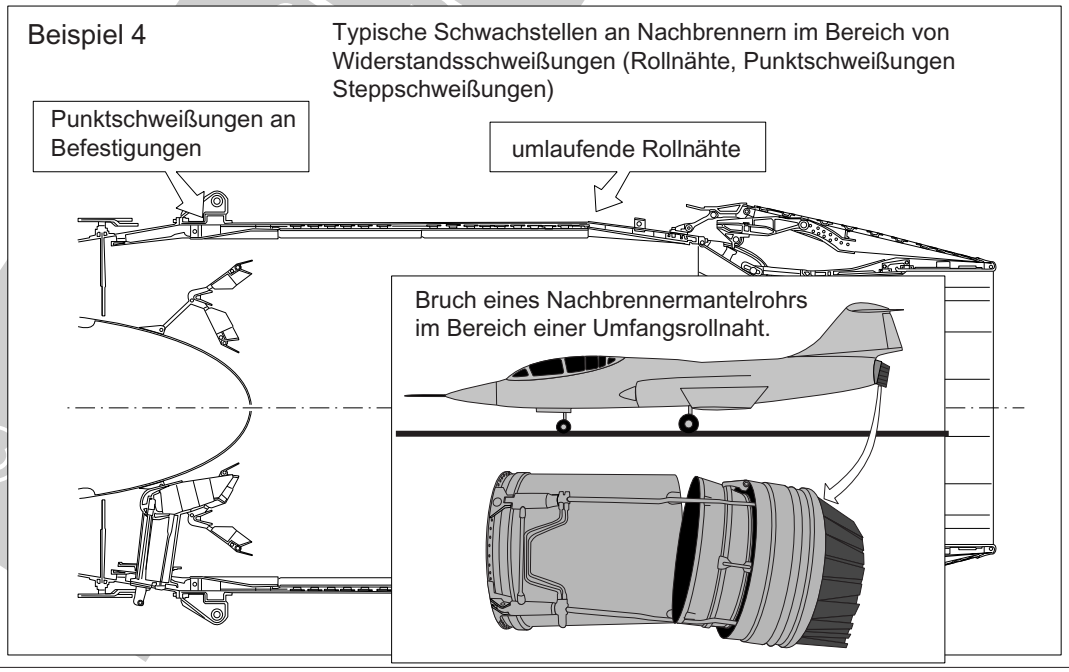
Bild 12.2.1.3.2-3

Bild 12.2.1.3.2-3: *In diesem Bild sind mehrere typische* ***Schadensfälle*** *dargestellt, bei denen unvorhergesehene oder ungewöhnliche, hochfrequente* ***Biegeschwingungen zum Bruch am Übergang von Rollnahtschweißungen*** *führten.*

Beispiel 1: *An der Verbindungsnaht eines Verdichterleitapparats zu einem Labyrinthkegel erfolgte der Schwingbruch. Wahrscheinlich entstanden die* ***Schwingungen im Labyrinth*** *(Band 2, Bild 6.10.3.1.2-21 und Bild 6.10.3.1.2-22).*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Punkt - und Rollnahtschweißen.





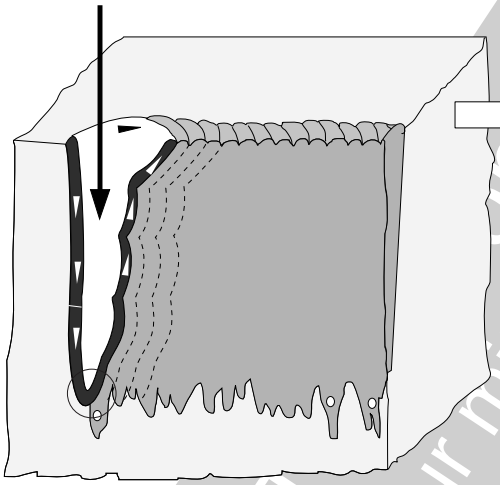
Beispiel 2: *In diesem Fall brach der innere Führungsring einer* ***Gasleitspirale.*** *Er zentriert die Brennkammer zur Turbine. Der Schwingbruch breitete sich entlang einer umlaufenden Rollnaht aus. Schwingursache dürften unterschätzte* ***Verbrennungsschwingungen*** *in der Brennkammer gewesen sein (Band 1, Bild 5.4.-7.2).*

Beispiel 3: *Infolge einer ungewöhnlich hohen Schwingbelastung, zeigten diese aus Blech gefügten hohlen* ***Verdichterleitschaufeln*** *Risse entlang der* ***Rollnaht an der Austrittskante****. Ein derartiger Rissverlauf ist für* ***Schwingungen einer hohen Ordnung*** *deren Knotenlinie parallel zur Blattkante verläuft (****Trailing Mode****, parallel zur dünneren Austrittkante) typisch.*

Beispiel 4: *Der Bruch eines* ***Nachbrennermantelrohrs*** *entstand auf Grund nicht ausreichend berücksichtigter Biegeschwingbelastungen im Betrieb. Er verlief entlang einer Umfangsrollnaht . Diese Schäden machten umfangreiche Nachbesserungen notwendig.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.3.3 Elektronenstrahlschweißen



©Alle Rechte bei Prof. Dr. Jürgen Schultz nur mit Lizenz

Elektronenstrahlschweißen (ES-Schweißen, EB-Schweißen) erfolgt überwiegend **ohne Zusatzwerkstoff** (Bild 12.2.1.3.3-3). Es ermöglicht besonders den **Leichtbau von Maschinenelementen.** Bei Einführung des Verfahrens war man in dem Irrglauben, damit nahezu alle Metallwerkstoffe schweißen zu können. Es zeigte sich jedoch, dass das zwar für einige als schwer schweißbar (Heißrissbildung, Bild 12.2.1.3.1-10 und Bild 12.2.1.3.1-11) eingestufte Werkstoffe bei optimalen Gefügebedingungen (Feinkorn, geeigneter Wärmebehandlungszustand, Bild 12.2.1.3.3-2 und Bild 12.2.1.3.3-4) galt. Bei nicht mit Verfahren wie WIG oder Plasmaschweißen schweißbaren Werkstoffen ist jedoch mit deutlich festigkeitsmindernder Heißrissbildung zu rechnen. Obwohl EB-Schweißen eine aufwändige Anlage zur Strahlerzeugung und den Vakuum-Schweißraum erfordert, wird es heute **in Großserie** angewendet (Bild 12.2.1.3.3-0. Dabei nutzt man zur Kostensenkung die Möglichkeit einer **gleichzeitigen Oberflächen-** (z.B. Aufschmelzen) und/oder **Wärmebehandlung**. Große langgestreckte Hohlkörper wie Rohre die axial verschweißt werden, lassen sich mit geeigneten Dichtungen im Durchlauf durch die evakuierte Schweißkammer führen.

Verständlicherweise wird das aufwändige Schweißverfahren besonders bei **hochfesten, hochbelasteten, eng tolerierten und leichten Bauteilen,** die auch höhere Kosten rechtfertigen, angewendet. Der besondere Vorteil ist, dass auf Endmaß gefertigte hochgenaue Teile eines Bauteils separat unter günstigen Fertigungsbedingungen hergestellt und dann durch Schweißen zum Bauteil verbunden werden. Typisches Beispiel ist der **Flugtriebwerksbau** (Band 2 Bild 6.4.1-3). Hier werden große dünnwandige Gehäuse mit komplizierter Bearbeitungskontur auf der Innenseite, einstückige Verdichterleitapparate, Trommelläufer (Rotoren) und komplexe Zahnradwellen (Bild 12.2.1.3.3-0, Lit. 12.2.1.3-2) realisiert. Ähnliches gilt für Leichtbauteile des **Motorsports**. Doch auch in Serien des Maschinenbaus wird Elektronenstrahlschweißen vorteilhaft angewendet (Bild 12.2.1.3.3-0).

Der Schweißprozess, bei dem ein dünner Strahl den Schweißstoß genau treffen muss, ist für die Fertigungstechnik eine große Herausforderung. Dies und die hohe Genauigkeit die **Fertigteile nahezu ohne Verzug** bzw. ohne Nacharbeit zu verbinden, erfordert sehr **genaue, steife und verzugsarme Vorrichtungen,** die das Bauteil unter dem Schweißstrahl vorbeibewegen. Dazu sind erfahrene Vorrichtungskonstrukteure und ausreichende Fertigungserprobung/Optimierung bis zum stabilen Prozess erforderlich.

Typische Serienanwendungen sind **Getriebekomponenten wie Zahnradwellen** die sich in **Hohlbauweise** realisieren lassen. Darüber hinaus lässt sich das Gewicht mit einer **kurzen** und damit

biegesteifen Gestaltung weiter reduzieren. Das wird mit der Verschweißung separat **auf Maß gefertigter Elemente** realisiert. Diese lassen sich wegen zu geringem Auslauf des Werkzeugs bei Zerspanungsvorgängen wie Fräsen und Schleifen von Verzahnungen nicht einstückig herstellen. Auch große leichte und steife Walzen bzw. Transportrollen (z.B. für Walzwerke!) sind realisierbar. Hier kommt der Vorteil der Gewichtseinsparung auch schnellen Drehzahlwechseln zugute. Dabei nutzt man die Möglichkeit der Durchschweißung von Wandstärken bis 200 mm. Darüber hinaus bietet sich das Verfahren für Hohlkörper in denen sich ein **Vakuum** befindet an. Typisches Beispiel sind Druckmessdosen, bei denen filigrane, sehr dünnwandige Blechstrukturen unter funktionsbedingten elastischen Verformungen dauerhaft dicht sein müssen.

Gerade weil es sich um hochbelastete Bauteile handelt, gilt potenziellen **Problemen und Fehlern** an Elektronenstrahlschweißungen besondere Aufmerksamkeit. Leider sind hierzu die verfügbaren Literaturangaben eher unbefriedigend. Dieses Kapitel beschäftigt sich damit im Schwerpunkt mit dem Konstrukteur. Es verucht ihm für **Auslegung** (Bild 12.2.1.3.3-9), **Gestaltung** (Bild 12.2.1.3.3-10) und **Qualitätssicherung** notwendige Hintergrundinformationen zu geben.

Bild 12.2.1.3.3-0 *: Die Beispiele sind mit Hilfe verfahrensspezifischer Erfahrung Literaturangaben nachempfunden.*

*„**A**“ Hydraulische Innenspannhülse“ (Lit. 12.2.1.3-50): Schlanke Bauweise mit dünnen Wandstärken. Erforderlich ist eine Verbindung der axialen Anlageflächen von Innen- und Außenwand.*
***Verfahrensvorteil**: Schmale Tiefschweißung bei geringstem Verzug. Niedrige Aufheizung vermeidet Härte-/Festigkeitsabfall.*

*„**B**“ Zahnradwelle mit minimaler Axiallänge (Lit. 12.2.1.3-48 und Lit. 12.2.1.3-50). Eine einstückige Zerspanung der Verzahnung (Fräsen, Schleifen) ist aus Platzgründen nicht möglich.*
***Verfahrensvorteil**: Getrennte Fertigung der Zahnräder auf Fertigmaß. Die geringe Wärmeeinbringung (Wärmeableitung durch die Schweißvorrichtung möglich) verändert die Härte/Festigkeit der Verzahnung nicht unzulässig. Der nur minimale Verzug vermeidet eine Nachbearbeitung.*

*„**C**“ Motorteil als Hohlkörper (Lit. 12.2.1.3-50): Filigranes Hohlteil mit Innenstruktur.*
***Verfahrensvorteil**: Maßgenaue Realisierung der dünnwandigen Innenstruktur aus einem Vergütungs-Schmiedewerkstoff.*

*„**D**“ Hohle Zahnradwelle (Lit. 12.2.1.3-1): Leichtbau mit kurzer Axiallänge ermöglicht die vor dem Verschweißen hergestellte Verzahnung (siehe auch „B“). Hohe Biege- und Torsionssteifigkeit bei niedrigem Gewicht. Dazu trägt auch der integrierte Wälzlagerinnenring bei. Forderungen an Festigkeit/Härte der Vergütungswerkstoffe sowie Maßhaltigkeit der anspruchsvollen Verzahnung werden erreicht.*
***Verfahrensvorteil**: Geringster Verzug, Verschweißung ‘kritischer Werkstoffe’*

*„**E**“ Druckmessdose (Lit. 12.2.1.3-53). Realisierung einer bei zyklischer Betriebsbelastung langzeitdichten, elastischen, dünnwandigen, hohlen evakuierten Struktur. Bei geeigneter Schweißvorrichtung ist es möglich, den Faltenbalg selbst aus Einzelstücken im gleichen Schweißprozess herzustellen.*
***Verfahrensvorteil**: Hochvakuum im Hohlkörper entsteht während des Schweißprozesses. Verbindung sehr unterschiedlich dicker Querschnitte.*

*„**F**“ Schneckenrad (Lit. 12.2.1.3-52) mit minimierten Werkstoffkosten bei optimalen tribologischen Eigenschaften.*
***Verfahrensvorteil:** Verbindung eines dünnen Bronzezahnkranzes mit der Nabe aus Stahl.*

© Axel Rossmann - Turbocon sult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

Beispiele für die Anwendung der Elektronenstrahlschweißung im Maschinenbau.

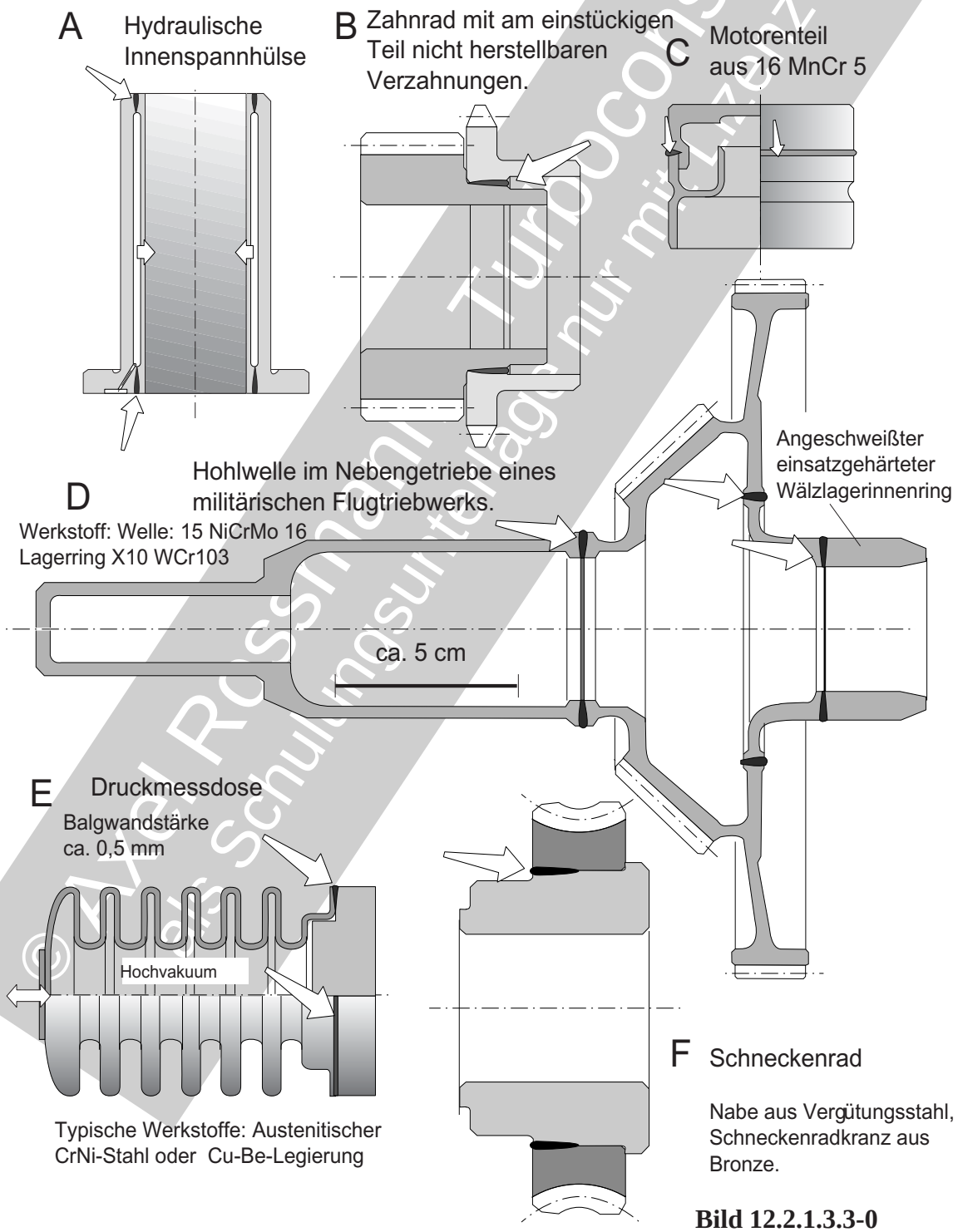


Bild 12.2.1.3.3-0

© Axel Rossmann Turboconsult
Nur Schulungsunterlagen mit Lizenz

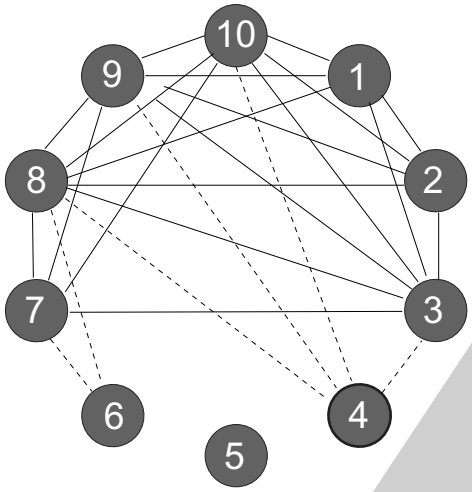
Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

EB-Schweißbarkeit von Werkstoffkombinationen

nach Lit.12.2.1.3-51

—— gut schweißbar

------ bedingt schweißbar



"1" un- und niedriglegierte Stähle mit niedrigem C-Gehalt.

"2" hochlegierte Stähle mit hohem C-Gehalt.

"3" hochlegierte Stähle mit sehr niedrigem C-Gehalt.

"4" Gusseisen

"5" Titanlegierung

"6" Aluminiumlegierung

"7" Reinkupfer

"8" Kupferlegierung

"9" Ni und Ni-Legierung

"10" Co-Legierung

Bild 12.2.1.3.3-1

Bild 12.2.1.3.3-1 *(Lit. 12.2.1.3-51)**:** Hier handelt es sich um Angaben der **potenziellen** Schweißbarkeit von Werkstoff**kombinationen**. Die Probleme liegen in*

- ***Heißrissen**,*
- ***spröden Phasen** beim Schweißen oder einer nachfolgenden notwendigen Wärmebehandlung (z.B . Titanlegierungen mit Stählen).*
- ***Risse** durch hohe Eigenspannungen auf Grund großer Wärmedehnungsunterschiede.*
- ***niedrige** statische und/oder dynamische **Festigkeit** wegen Härtesprüngen und/oder ungünstiger Gefüge.*

*Legierungen, die im Schaubild als nicht verschweißbar mit anderen Werkstoffen angegeben sind (z.B. Titanlegierungen), können wahrscheinlich **mit sich selbst oder artgleichen Werkstoffen** problemlos verschweißt werden.*

*Eine Möglichkeit die Schweißbarkeit zu verbessern sind **Zwischenlagen aus Zusatzwerkstoffen,** die dem Schmelzbad die notwendigen Eigenschaften geben.*

*Grundsätzlich muss man sich von der **Schweißbarkeit in Vorversuchen** an bauteilrelevanten Proben, am besten **am Bauteil** selbst überzeugen. Selbst in der Literatur als schweißbar angegebene Kombinationen und auch artgleiche Verschweißungen können sich durch **Vorgaben des Halbzeugs** (Wärmebehandlung-/Aushärtungszustand, Korngröße und -orientierung) als nicht schweißbar erweisen. Ein solches Kriterium ist z.B. Mikroheißrissbildung in der Wärmeeinflusszone, Bild 12.2.1.3.1-14 und Bild 12.2.1.3.3-3.*

***Bild 12.2.1.3.3-2:** Bei **Elektronenstrahlschweißungen** wird die Energie nicht wie bei WIG und MIG mit einem Lichtbogen erzeugt und eingebracht, sondern von einem Strahl schneller Elektronen. Gewöhnlich ist ein Zusatzwerkstoff nicht notwendig. Die Schweißung muss, um die Energieeinbringung über das Auftreffen des Strahls auf Metall zu ermöglichen, **ohne Schweißspalt** erfolgen. Der besondere Schweißvorgang begünstigt **verfahrensspezifische Fehler,** z.B. die besondere Ausbildung einer Porosität, sog. **Spikes** und von **Heißrissfeldern** in der WEZ (Bild 12.2.1.3.3-3). Fehler die auch bei anderen Schmelzschweißverfahren zu beobachten sind wie Gasporosität, Lunker und einzelne Heißrisse können ebenfalls auftreten (Lit. 12.2.1.3-11).*

*Das Verfahren erfolgt im **Hochvakuum,** um die Ausbreitung des Elektronenstrahls nicht zu be-*

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

Vorgänge beim Elektronenstrahlschweißen (EB-Welding)

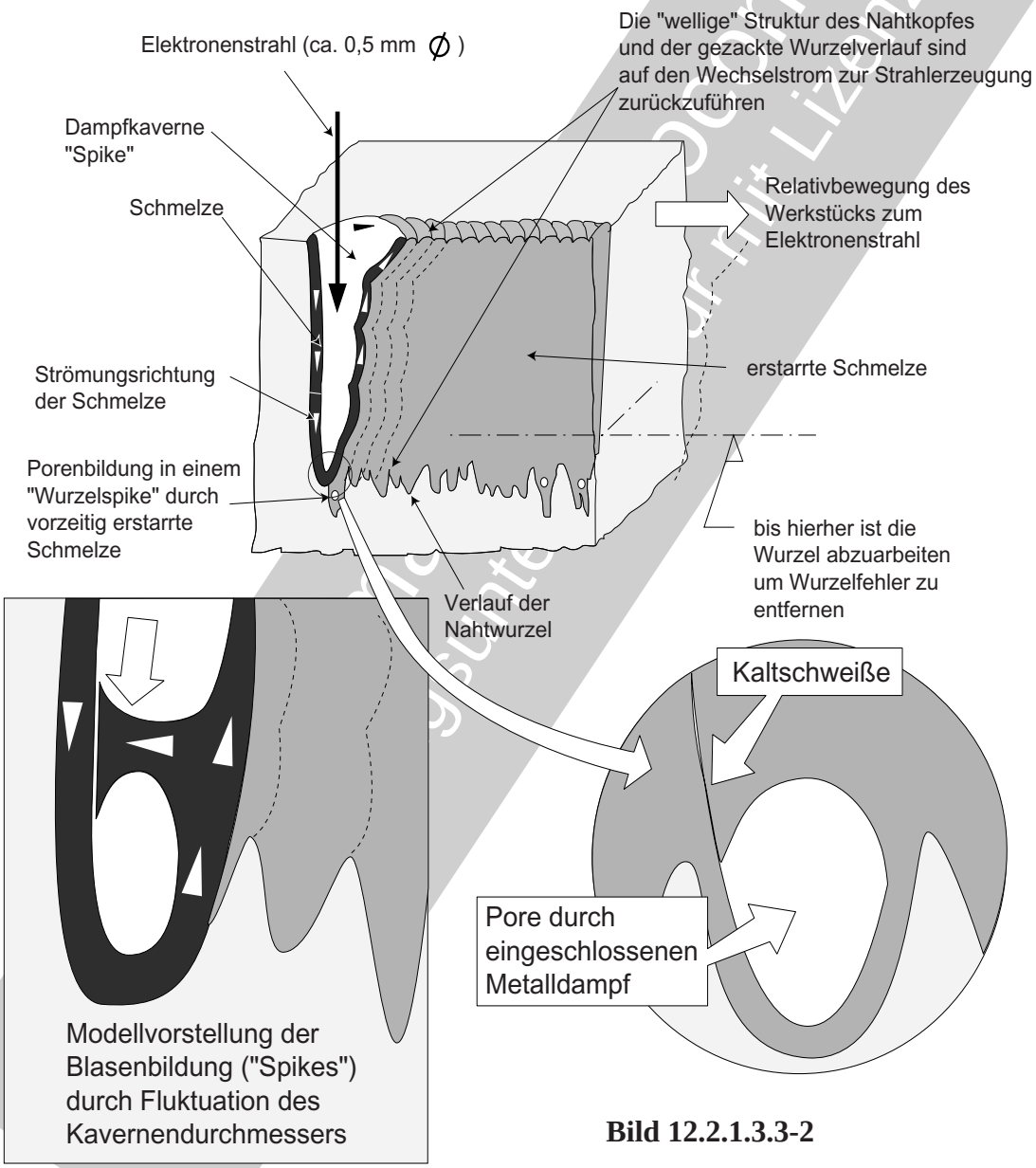


Bild 12.2.1.3.3-2

*hindern. Ein **Zusammenbruch des Vakuums** durch Leckagen, das Verdampfen von Verunreinigungen auf den Werkstücken oder von Legierungskomponenten ist daher eine potenzielle Fehlerquelle. Die Schweißung läuft üblicherweise nach der Einrichtung und Einstellung optimaler Prozessparameter **vollautomatisch** ab. Das gilt gerade auch für die Relativbewegung des Bauteils zum Strahl. Eine exakte **Strahlführung entlang dem Schweißstoß** ist von größter Bedeutung. So sind Bindefehler und besonders schwer nachweisbare „**Klebestellen**“ (engl. “**Kissing Bond**“) vermeidbar. Nicht zuletzt erhält damit der **Vorrichtungsbau** eine anspruchsvolle Aufgabe (Bild 12.2.1.3.3-6). Auch die Geometrie (**Brenn-***

Typische Fehlstellen im Bereich einer EB-Schweißnaht.

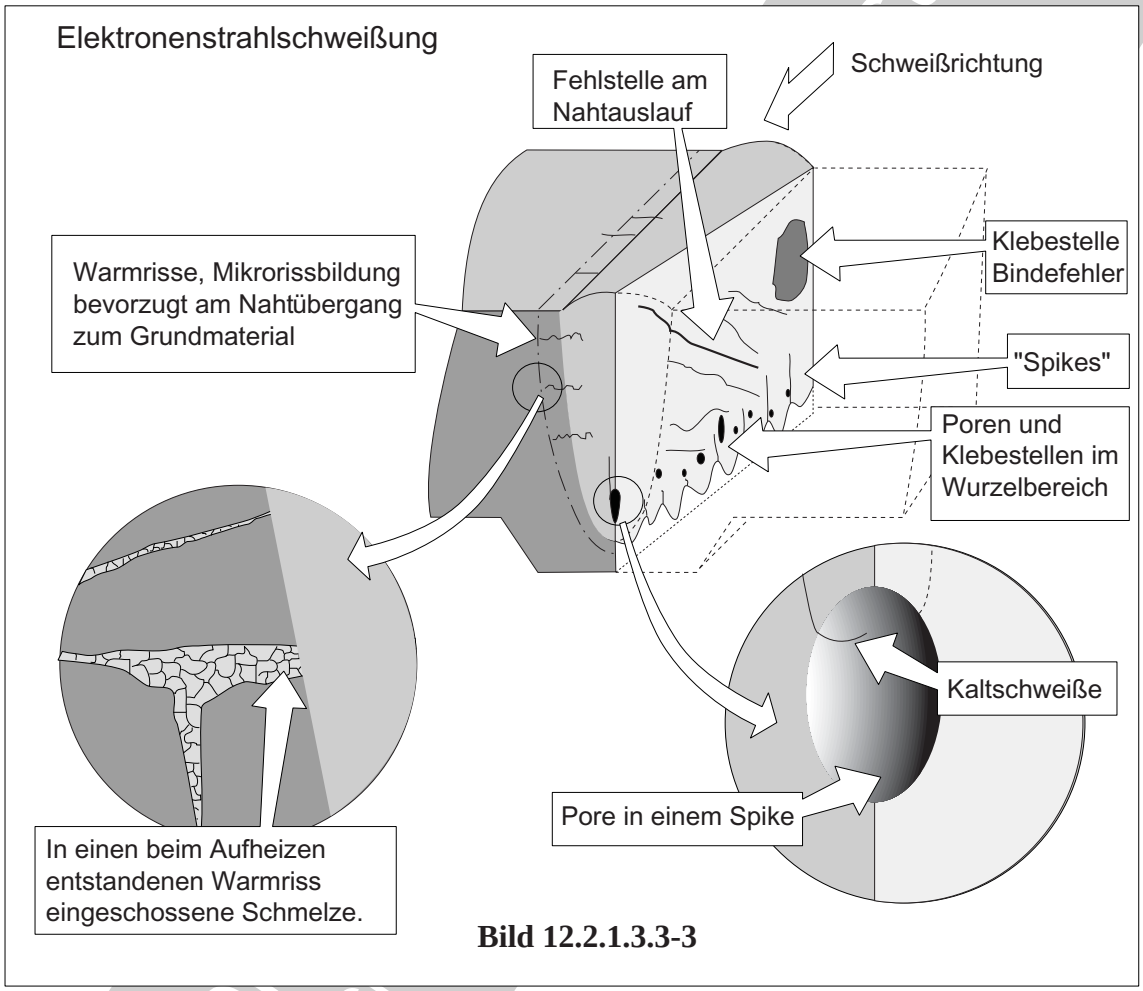


Bild 12.2.1.3.3-3

punkt) *und die Position des Strahls zur Bauteiloberfläche müssen genau eingehalten werden, um die gewünschte* ***Schweißnahtform*** *und Durchschweißung zu gewährleisten. Der* ***Elektronenstrahl mit einer Dicke von ca. 0,5 mm*** *verdampft beim Auftreffen die Oberfläche und bohrt eine* ***Kaverne*** *in den Schweißstoß (Skizze oben, Lit. 12.2.1.3-1 und Lit. 12.2.1.3-11). Das schlauchförmige Gebilde wird vom Druck des* ***Metalldampfes*** *offen gehalten und folgt der Schweißbewegung. In der aufgeschmolzenen Wand bildet sich eine Strömung gegen die Schweißrichtung aus. Diese Strömung unterstützt bei* ***nicht voller Durchschweißung*** *im Wurzelbereich den Einschluss von Metalldampf. Es bilden sich* ***Poren (engl. „Spikes“,*** *Details unten) bevor der Metalldampf kondensiert. Dadurch können sowohl Poren als auch* ***Bindefehler*** *an unverbundenen Porenwänden (Detail rechts unten, Bild 12.2.1.3.3-9) entstehen. Weil die Kavernenbildung Voraussetzung des Schweißvorgangs ist, ist leicht verständlich, warum abdampfende* ***Verunreinigungen im Schweißstoß*** *oder von* ***nicht ausreichend reinen Werkstoffen*** *zu Fehlern führen. Die hohe Schweißgeschwindigkeit und der dünne Elektronenstrahl sind für den verfahrenstypisch schmalen, unterhalb des Nahtkopfes nahezu parallelen Nahtquerschnitt verantwortlich.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

Bild 12.2.1.3.3-3: Verfahrensspezifische Besonderheiten *sind für* ***Fehlstellen*** *von* ***Elektronenstrahlschweißungen*** *(EB-Schweißungen, Lit. 12.2.1.3 -3, -5, - 9, -11) wie sie in dieser Form in WIG-Schweißnähten nicht auftreten, verantwortlich (Bild 12.2.1.3.1-12, Bild 12.2.1.3.1-13 und Bild 12.2.1.3.1-14). Weil der Elektronenstrahl einen sehr kleinen Durchmesser aufweist (Bild 12.2.1.3.3-2) und nur die erforderliche Schweißenergie übertragen kann wenn er auf das zu schweißende Metall trifft, muss der Strahl sehr genau zum Schweißstoß ausgerichtet sein (Bild 12.2.1.3.3-6) und es darf kein Schweißspalt vorhanden sein. Sind diese Bedingungen nicht ausreichend erfüllt, besteht die Gefahr von* ***Bindefehlern*** *(****Kaltschweißen****, siehe auch Bild 12.2.1.3.3-2). Diese sind kaum zerstörungsfrei nachweisbar wenn lediglich eine teilweise Verbindung vorliegt (****Klebung****,, engl. „Kissing Bond“).*

Gerade an EB-Schweißungen lässt sich in metallografischen Schliffen beobachten, dass offenbar Schmelze in vorher entstandene Korngrenzenrisse der WEZ eindringt (Detail unten links, Lit. 12.2.1.3-23). Dieses Phänomen lässt sich plausibel mit einer Rissbildung in der Aufheizphase erklären. Es kann somit als ***Aufheizrissbildung*** *bezeichnet werden. Besonders beim EB-Schweißen treten wegen der hohen Energiekonzentration extreme Temperaturgradienten auf. Somit sind auch entsprechend* ***hohe Wärmespannungen*** *im Grundmaterial zu erwarten. Dies könnte die Bildung von zur Schweißrichtung orientierten* ***Feldern*** *aus* ***Mikroheißrissen*** *auslösen.*
Folgender ***Mechanismus der Rissentstehung*** *liegt nahe: Solange der Schweißbereich noch nicht geschmolzen ist, bilden sich beim Aufheizvorgang, als Folge der behinderten Wärmedehnung, hohe Druckspannungen. Diese stehen mit Zugspannungen an den Nahträndern (WEZ) im Gleichgewicht. Wird hier die Korngrenzenfestigkeit überschritten, reißen diese als Warmrisse auf. Der* ***Rissverlauf schräg zur Schweißrichtung*** *kann als ein Indiz für den beschriebenen Entstehungsmechanismus gewertet werden. Diese Orientierung ist verständlich, wenn sich die Risse zuerst an der Oberfläche bilden, wo der Strahlauftreffpunkt der Kaverne (Bild 12.2.1.3.3-2 und Bild 12.2.1.3.3-6) vorläuft. Das häufig beobachtete schräg orientierte Rissfeld (Bild 12.2.1.3.1-14) ist im Zusammenhang mit einem „Mitziehen“ der Risse (Kerbwirkung) durch den Verlauf des Temperaturfelds beim Schweißvorgang zu sehen.*
Zu diesem Schadensmodell scheint auch ein bei WIG-Schweißungen zu beobachtendes Verhalten zu passen. Je intensiver die Wärmeeinbringung, d.h. je höher die Schweißgeschwindigkeit, umso stärker wird die Mikrorissbildung (Bild 12.2.1.3.1-14).
Die in der WEZ aufgerissenen, erweichten Korngrenzen füllen sich teilweise mit der dann vorhandenen Schmelze und heilen auf diese Weise aus.

Weitere typische verfahrensbedingte Fehlstellen sind ***längliche Poren im Wurzelbereich*** *(engl. „****Spikes****“). Von der Schmelze eingeschlossener Metalldampf am Kavernenende (Bild 12.2.1.3.3-2) lässt sie entstehen. In diesem Zusammenhang können sich auch Bindefehler bilden. Wenn die Pore bei Kondensation des Metalldampfs kollabiert, eine Bindung an der Porenwand jedoch nicht mehr eintritt (Bild 12.2.1.3.3-1 und Bild 12.2.1.3.3-9), entsteht eine Art* ***Kaltschweiße*** *(Bild 12.2.1.3.3-2).*

© Axel Rossmann - Turbopost
Lesezugangsunterlagen für Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

Einflüsse auf und Ursachen für typische Probleme von Elektronenstrahlschweißungen.

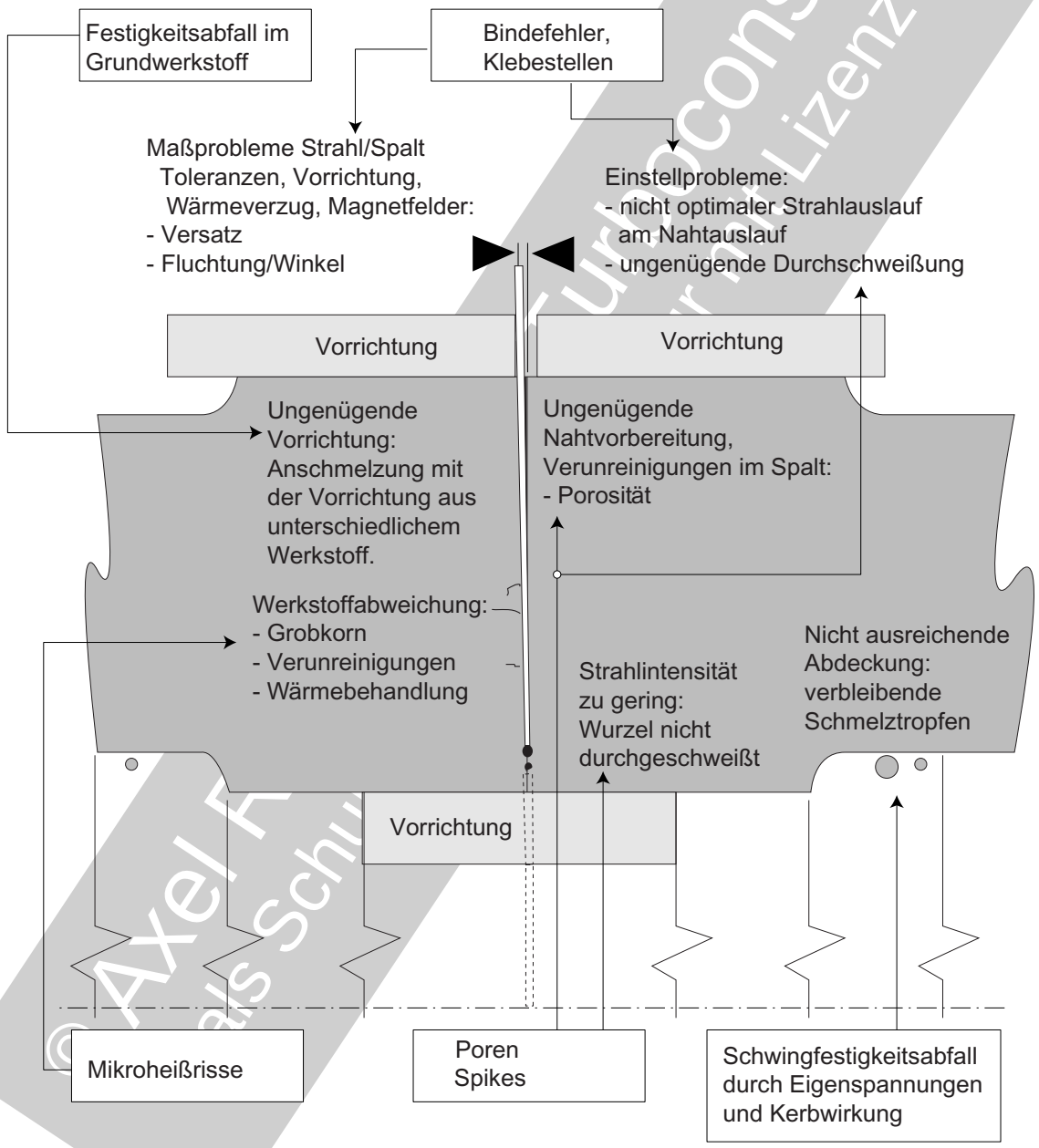


Bild 12.2.1.3.3-4

© Axel R... als Schu... Turbocons... mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

Bild 12.2.1.3.3-4 und Bild 12..2.1.3.3-5: *Die Bilder geben eine Zusammenfassung der Ursachen für typische* ***Probleme und Fehlstellen an Elektronenstrahlschweißungen****, vorbeugender Abhilfen sowie eventueller Nacharbeiten (Reparaturen).*

Vorrichtungen*: Selbst wenn diese ausreichend genau sind, kann sie ein ungünstiges* ***Wärmedehnverhalten*** *während der Schweißung (Bild 12.2.1.3.3-6)* ***verziehen****. Die* ***Schweißstoßflächen*** *können* ***abheben*** *oder* ***aus der Strahlebene*** *laufen. Damit besteht die Gefahr von Bindefehlern und Klebestellen (Bild 12.2.1.3.3-3, „Kissing bond“, Lit. 12.2.1.3-27). Solche Fehlstellen entstehen auch bei* ***ungewollter Strahlablenkung****. Diese oder eine Fokusveränderung kann auf* ***Magnetismus einer Vorrichtung*** *beruhen. Besteht die Vorrichtung aus einemanderen Werkstoff als das Werkstück, ist ein Anschmelzen durch den Strahl unbedingt zu vermeiden. Vermischt sich Werkstückschmelze mit der Vorrichtungsschmelze ist mit einem unzulässigen Festigkeitsverhalten zu rechnen.*
Eine nicht ausreichende Abdeckung der Wurzel kann intensive Schmelzspritzer versprühen. Treffen diese auf nicht abgedeckte Bauteilzonen wirken sie schädigend (Bild 12.2.2.6-5 und Bild 12.2.2.6-6). Es kommt zu Schwingfestigkeitsabfall infolge örtlichen Zugeigenspannungen, Rissbildung und Gefügeveränderungen (Bild 12.2.2.6-5).

Nahtvorbereitung: *Zu große* ***Rauigkeit, Umfangsriefen*** *und nicht ausreichende* ***Planizität*** *(konkave Ringfläche) können einen schädlichen* ***Spalt*** *zwischen den Anlageflächen zumindest örtlich hervorrufen. So entsteht wiederum die Gefahr von Bindefehlern.*
Sind die Schweißstöße nicht ausreichend sauber und/oder Luft ist eingeschlossen, können diese Verunreinigungen trotz des Vakuums, Porosität und Rissbildung auslösen (Bild 12.2.1.3.3-5).

Grundwerkstoff: *Ein schweißgünstiger* ***Werkstoffzustand*** *(Kriterium ist gewöhnlich die Neigung zur Heißrissbildung), insbesondere eine geeignete* ***Korngröße*** *(bei Ni-Legierungen meist Feinkorn, Bild 12.2.1.3.1-14) sind Vorbedingung für eine gute Schweißnahtqualität.*

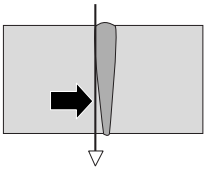
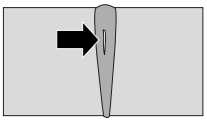
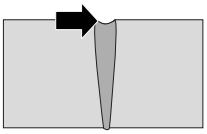
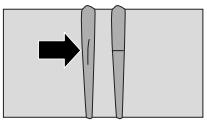
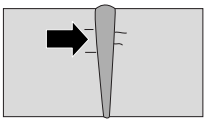
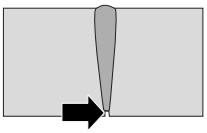
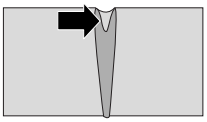
Prozessparameter*: Zum Schweißquerschnitt und dem Werkstoff nicht optimierte Prozessparameter wie Strahlintensität, Fokussierung und Schweißgeschwindigkeit können sowohl die* ***Nahtgeometrie*** *(Durchhängen, Einbrand, schlechte Durchschweißung) beeinträchtigen, als auch Fehler wie* ***Rissbildung und Porosität*** *begünstigen. Besonders im* ***Strahlauslauf*** *treten solche Fehler bevorzugt auf.*

Werden nach dem Schweißen Fehler, insbesondere im Kopfbereich erkannt, lassen sich diese in vielen Fällen durch ***Überschweißen*** *reparieren. Diese bewährte Möglichkeit besteht, weil das Vakuum eine Oxidation der Schweißnaht verhindert hat. In der rechten Spalte des Bilds 12.2.1.3.3-5 sind besonderen* ***Schweißfehlern Reparaturschweißungen zugeordnet****. Natürlich müssen solche sicherheitsrelevanten Reparaturen erprobt, festgeschrieben und zugelassen werden (Kapitel 14.3,Kapitel 14.4 und Band 4, Bild 17.5-1).*

© Ayer Bossmann - Turbocorsell
als Schulungsunterlage nur zum

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

EB-Schweissfehler und potenzielle Reparaturen.

Fehlerart	mögliche Ursache	Potenzielle Reparatur (erfordert Erprobung und Zulassung!)
 Eine Stirnfläche nicht- oder teilweise ange-schmolzen ("Klebestellen")	Verfehlte Naht; - Maßungenauigkeiten an Werkstück und/oder Vorrichtung - Verzug beim Schweißen - Strahleinstellung	Erneutes Überschweißen mit gleichen Parametern, jedoch versetzt.
 Poren, Lunker, Einschlüsse	- Verunreinigungen im Schweißstoß - Werkstoffunreinheiten - Spikes in der Auslauf-zone - Schweißparameter	Erneutes Überschweißen, gegebenenfalls mit dynamischer Strahlablenkung oder geänderten Schweißparametern.
 Zu stark eingefallene Oberraupe	- Strahlfokussierung - Schweißparameter	Überschweißen mit defokussiertem Strahl (wenn erforderlich mit Zusatz-draht) oder mit Strahloszillation (Aufschmelzung nur oberflächlich). Abhilfe: Aufdickung im Kopfbereich.
 Risse in der Schmelz-zone	- Schweißparameter - zu schmale Naht - zu geringe Wärmeein-bringung	Bei Spannungsrissen Überschweißen mit geänderten Parametern, breitere Naht durch defokussierten Strahl oder Strahloszillation. Vor- und Nachwärmen. Kleinere Schweißgeschwindigkeit.
 Risse in der Wärme-einflusszone	- Heißrissempfindlicher Werkstoff: - ungeeignet - Wärmebehandlungs-zustand - Grobkorn - Schweißparameter	Bei Spannungsrissen versetzt Überschweißen mit geänderten Parametern, breitere Naht durch defokussierten Strahl oder Strahl-oszillation. Vor- und Nachwärmen. Kleinere Schweißgeschwindigkeit.
 Wurzel zu stark ausgespritzt	- ungünstige Abstimmung der Schweißparameter zur Nahttiefe.	Überschweißen mit gleichen Parametern bei einer artgleichen Blechlage am Strahlaustritt. Aufdickung im Wurzelbereich.
 Tiefer Endkrater oder teilweise verbliebene Kaverne	- Schweißparameter im Nahtauslauf	Zweimaliges Überschweißen mit gleichen Parametern jeweils versetzt zur ur-sprünglichen Nahtmitte. Zugabe von Füllmaterial.

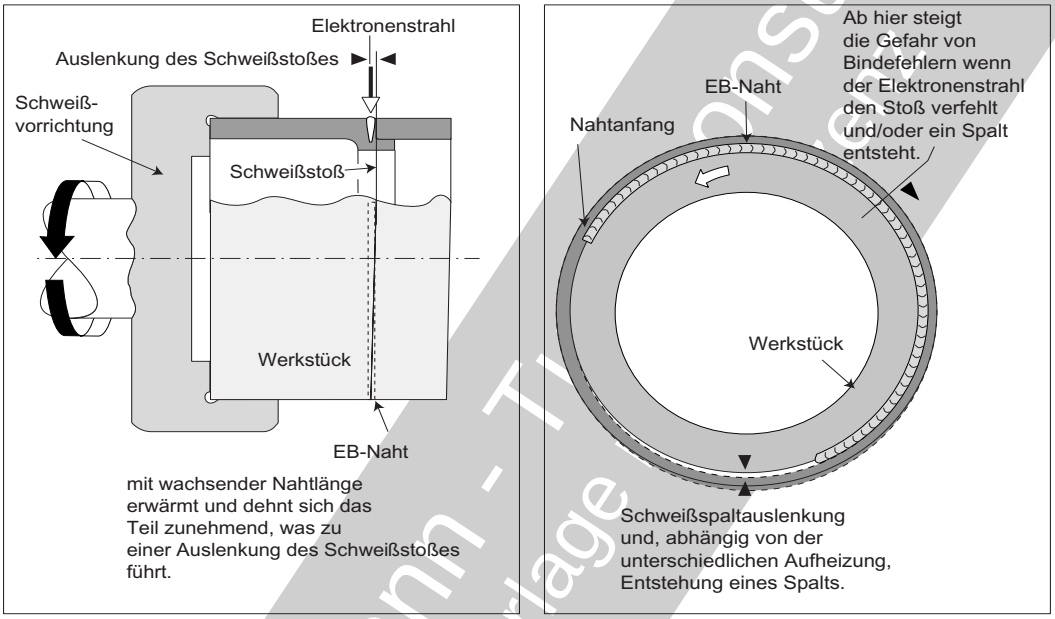
(unter Verwendung von Angaben von G. Stocker)

Bild 12.2.1.3.3-5

Siehe Bildbeschreibung auf vorhergehender Seite

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

EB-Schweißfehler als Folge thermisch bedingter Schweißstoß-auslenkung.



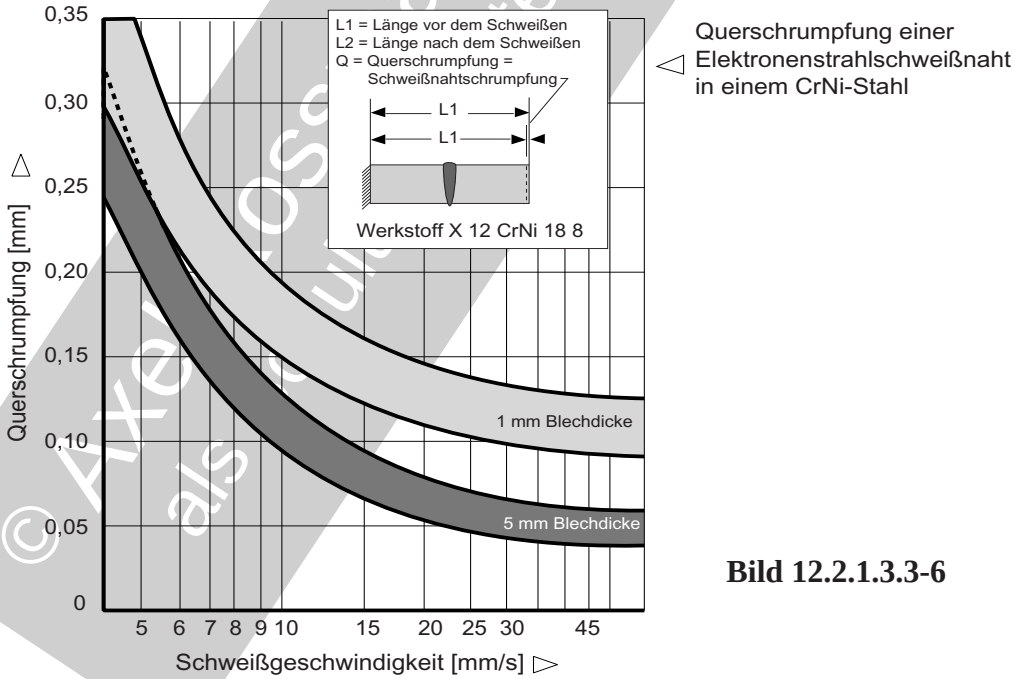
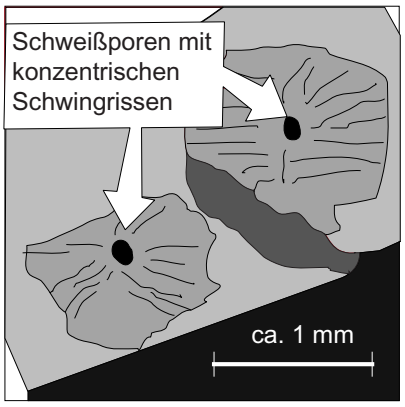
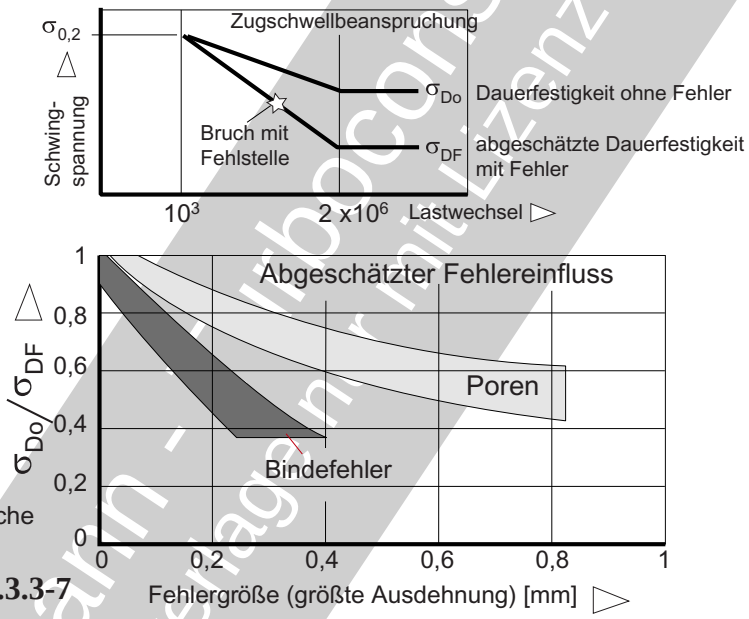


Bild 12.2.1.3.3-6

Bild 12.2.1.3.3-6: *Voraussetzung für die Einbringung der Schweißenergie beim EB-Schweißen ist, dass der* ***Elektronenstrahl auf die metallische Oberfläche trifft****. Der Schweißstoss muss also exakt zum sehr dünnen, ca. 0,5 mm (Bild 12.2.1.3.3-2) dicken Elektronenstrahl positioniert sein. So ist eine ganzflächige Bindung gewährleistet. Diese Bedingungen können durch Wärmeverzug während des Schweißvorgangs verloren gehen. Das Diagramm (Lit. 12.2.1.3-25) zeigt beispielhaft den* ***Wärmeverzug bzw. die Querschrumpfung*** *einer EB-Schweißnaht in Blechen aus CrNi-*

Abgeschätzter Fehlereinfluss auf die Dauerfestigkeit von elektronenstrahlgeschweißtem Vergütungsstahl.





An Flachproben unter Zugschwellbeanspruchung erzeugte Schwingbrüche gehen konzentrisch von Poren im Probeninneren aus.

Bild 12.2.1.3.3-7

*Stahl. Die **Querschrumpfung** nach der Abkühlung entspricht natürlich nur einem Teil des während der Schweißung auftretenden Wärmeverzugs. Es handelt sich also lediglich um die Größenordnung. Der Verzug nimmt verständlicherweise mit der Schweißgeschwindigkeit bzw. schmälerer Naht (geringere Wärmeeinbringung) ab. Das Gleiche gilt für die Querschnittsdicke, d.h. Steifigkeit und Wärmekapazität. Bei niedrigen Schweißgeschwindigkeiten liegt der Verzug im Bereich von Zehntelmillimetern. In den Skizzen wird am Beispiel einer Rundschweißnaht die Auswirkung der Nahtlänge auf den **Schweißstoß** gezeigt. Die ansteigende Aufheizung und damit die Wärmedehnung können bei einer nicht optimalen Vorrichtung den **Stoß zur Strahlebene ausweichen** lassen, was die Nahtqualität beeinträchtigt. Verzüge im Zehntelmillimeterbereich reichen für Fehlstellen aus.*

***Bild 12.2.1.3.3-7:** Nicht immer lassen sich **Poren an EB-Schweißnähten** verhindern. Grund können ungünstige Bedingungen für eine zerstörungsfreie Prüfung sein. Werkstoffbesonderheiten und Schweißbedingungen können Poren unvermeidlich machen. Es ist auch durchaus denkbar, dass Poren erst zu späterer Zeit, z.B. bei einer Überholung entdeckt werden, ohne dass es zu einem Schaden kam. In solchen Fällen ist es notwendig, den **Fehlereinfluss** abzuschätzen. So lässt sich gegebenenfalls für die Bauteilbelastung im Betrieb eine Zulässigkeitsgrenze angeben. Das untere Diagramm zeigt Ergebnisse von Zugschwellversuchen an Flachproben EB-geschweißter Vergütungsstähle (Zahnradwellen) mit Schweißporen (Bild links) und Bindefehlern. Zu den unterschiedlichen Bruchlastwechselzahlen wurden entsprechend dem oberen Diagramm **Dauerfestigkeitswerte abgeschätzt**. Diese wurden mit der Dauerfestigkeit porenfreier Proben normiert (unteres Diagramm). Man erkennt Streubänder, wobei erwartungsgemäß die **Schwächung durch Bindefehler deutlich größer als die von Poren ist**. Dieses Ergebnis zeigt, dass bei bekannter dynamischer Belastung die Angabe der Größe zulässiger Schweißporen durchaus sinnvoll ist (Bild 12.2.1.3.3-8.2 und Bild 12.2.1.3.3-9).*

© Axel Rossmann - Turbocon s.r.l. als Schulungsunterlagen mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

Einfluss von Poren auf Festigkeitseigenschaften von EB-Schweißungen in Ti-6Al-4V.

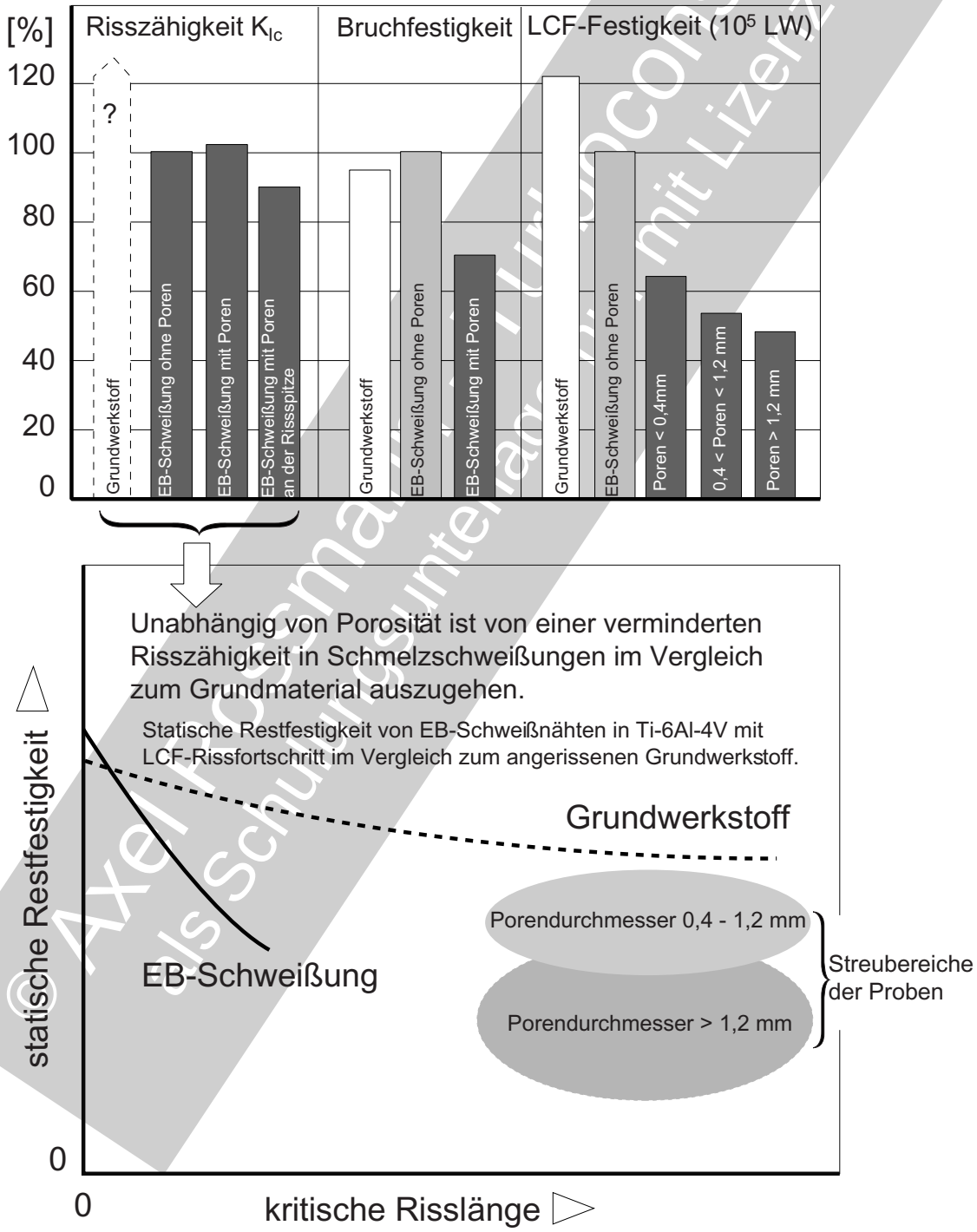


Bild 12.2.1.3.3-8.1

© Axel Rossmann Hurdconsult als Schulungsunterlagen mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

Einfluss der Porengröße auf die Kerbwirkung und LCF-Lebensdauer von EB-Schweißungen in Ti-6Al-4V.

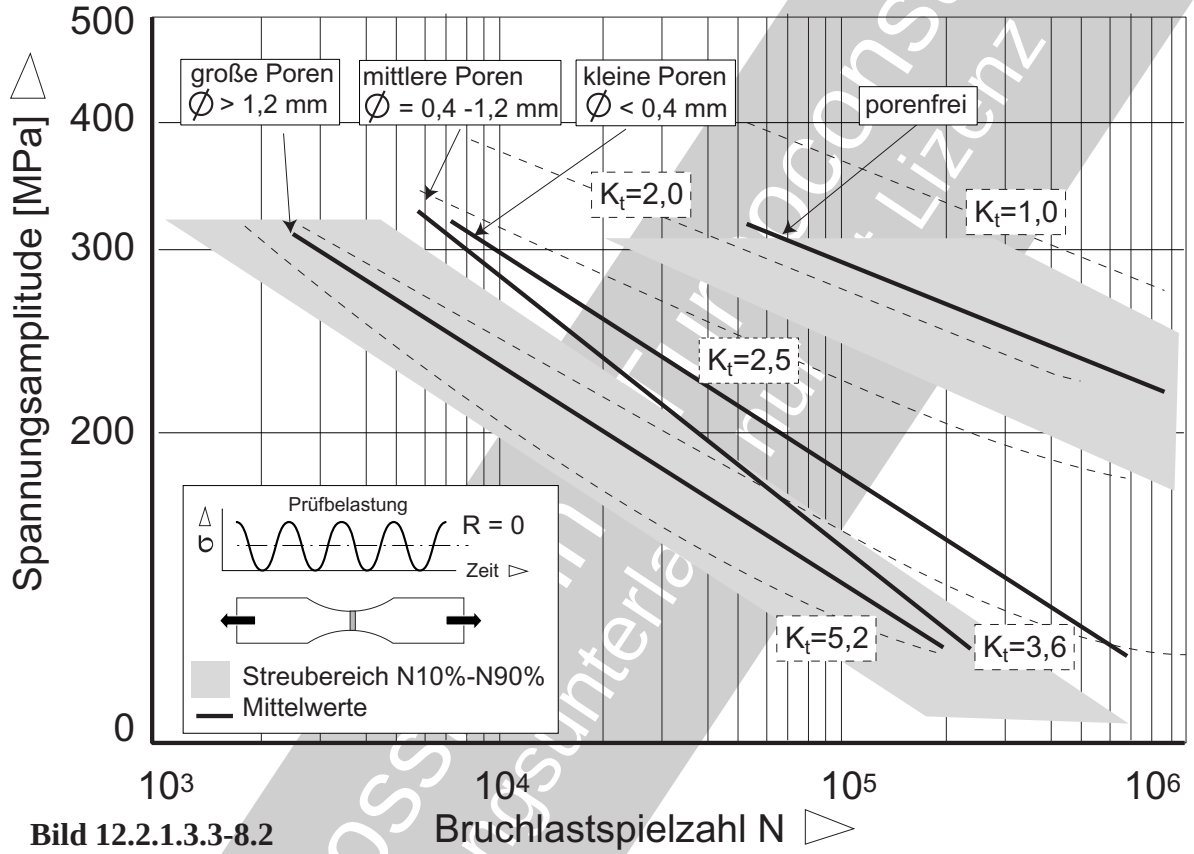


Bild 12.2.1.3.3-8.2

Bild 12.2.1.3.3-8.1 *(Lit. 12.2.1.3-14): Die Auswirkung von* ***Schweißporen*** *auf die dynamische und statische Festigkeit hängt nicht nur von der Porengröße ab. Die Risszähigkeit, d.h. der Widerstand den der Werkstoff einem Rissfortschritt entgegensetzt, spielt ebenfalls eine Rolle. Sie ist im Gussgefüge der Schweißnaht gewöhnlich niedriger als in unbeeinflusstem Grundmaterial (Diagramm unten). Damit reagieren Bruchfestigkeit und LCF-Festigkeit stärker auf Fehler wie Poren (dunkle Balken Schaubild oben) im Schweißgefüge. Bei der* ***Abschätzung zulässiger Porengrößen*** *ist also das ungünstigere* ***bruchmechanische Verhalten der Schweißnaht*** *gegenüber dem Grundmaterial zu berücksichtigen. Am besten, aber auch am zeit- und kostenaufwändigsten sind bauteilrelevante Probenversuche (Bild 12.2.1.3.3-8.2 und Bild 12.2.1.3.3-9).*

Bild 12.2.1.3.3-8.2 *(Lit. 12.2.1.3-14):Dieses Dia-gramm zeigt den Poreneinfluss auf das* ***LCF-Verhalten von EB-Nähten einer hochfesten Titanlegierung****. Neben den grau angelegten Streubändern aus Probenergebnissen sind zur besseren Einschätzung der Auswirkung berechnete Linien (gestrichelt) konstanter* ***Spannungskonzentration*** *eingetragen. Diese entspricht der* ***Risszähigkeit*** *in den Proben zum passenden Streuband. Auch hier erkennt man anhand der von der Porengröße abhängigen Streubänder die Möglichkeit der* ***Definition einer anwendungsspezifischen, maximal zulässigen Porengröße****.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

Elektronenstrahlschweißungen werden für dynamisch hochbeanspruchte Bauteile verwendet. Sie haben verfahrensspezifische Schwachstellen, die bereits bei der Konstruktion zu vermeiden sind.

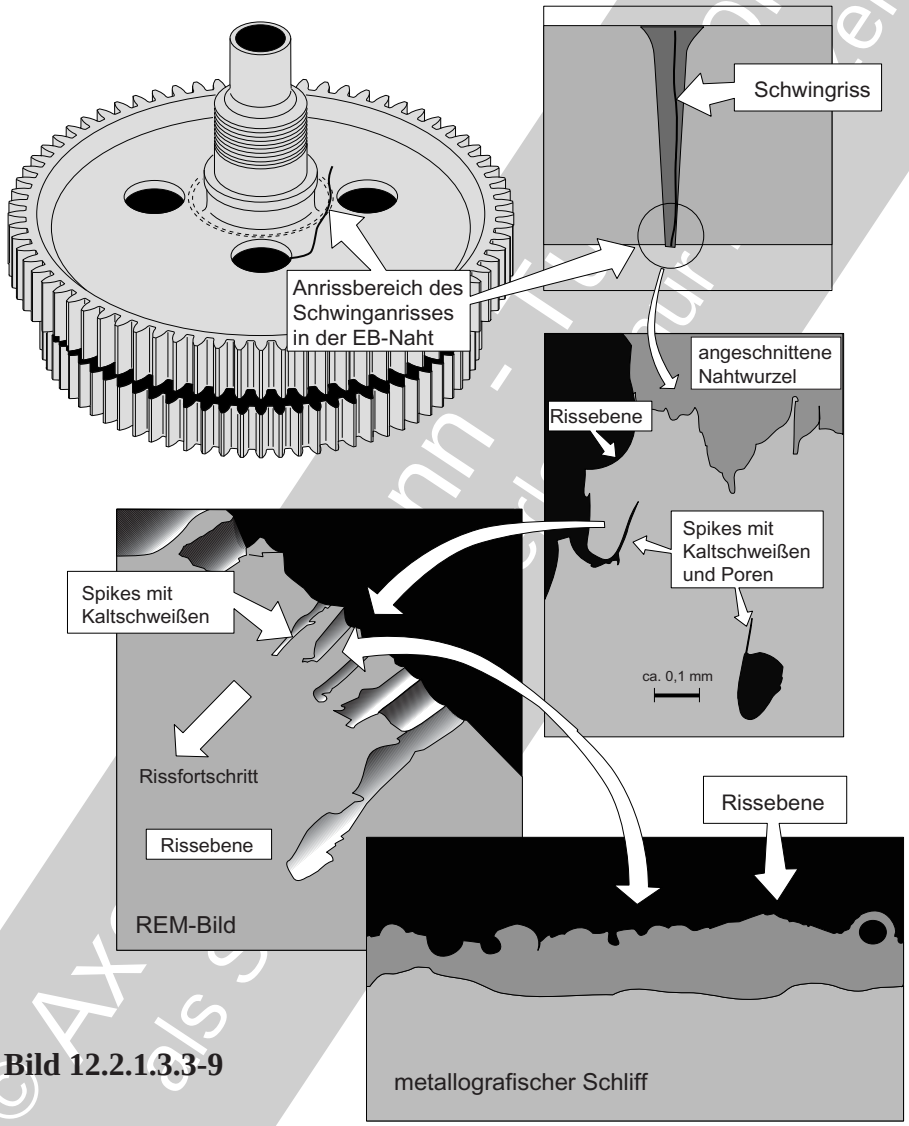


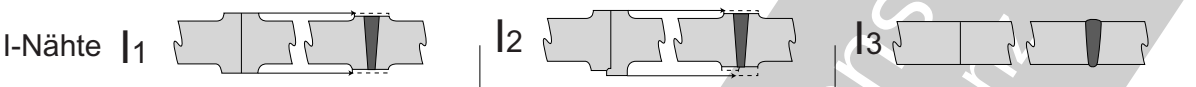
Bild 12.2.1.3.3-9

Bild 12.2.1.3.3-9: *Dieses Bild zeigt einen* ***Schwingriss*** *an einer fehlerhaft EB-geschweißten* ***Zahnradwelle****. Der Riss verläuft tangential an der Umfangsnaht in der Radscheibe (Skizze oben links). Er geht von* ***Poren*** *(engl. Spikes) und* ***Kaltschweißen im Wurzelbereich*** *aus (Details). Die Wurzel der Schweißnaht war wegen dem dicht dahinter liegenden zweiten Zahnrad* ***visuell nicht zu prüfen und die Röntgenprüfung stark behindert****. Auch wenn derartige Fehler von seriengeeigneten ZfP-Verfahren (Röntgen) ausreichend sicher zu finden wären, sollten generell* ***Schweißnähte außerhalb dynamisch hochbeanspruchter Bauteilzonen in guter Prüflage*** *positioniert werden.*

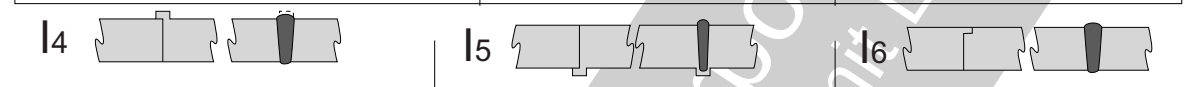
Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Elektronenstrahlschweißen.

Konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten von EB-Nähten mit Vor- und Nachteilen.

I-Nähte

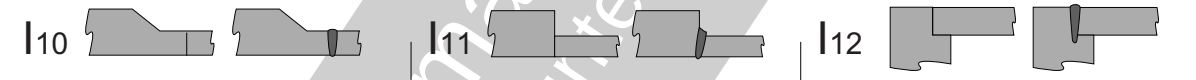


	I1	I2	I3
Vorteile:	metallurgische Kerbe entschärft. Nahtkopf abarbeitbar	einfachere Vorrichtungen sonst wie I1	Geringer Aufwand
Nachteile:	Aufwand	Aufwand	Kerbwirkung der Naht enge Schweißparameter



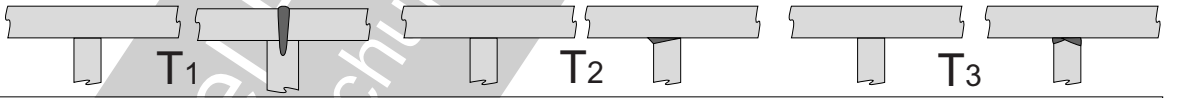
	I4	I5	I6
Vorteile:	einfachere Vorrichtungen Nahtkopf abarbeitbar	einfachere Vorrichtungen Keine Wurzelspritzer	einfachere Vorrichtungen
Nachteile:	Aufwand Spalt nicht erkennbar	Aufwand Festigkeitsverlust	Aufwand, Doppelpassung Reinigungsprobleme sonst wie I3

	I7	I8	I9
Vorteile:	keine Wurzelspritzer erweiterte Schweißparameter	geringere Strahlleistung	Schweißbarkeit
Nachteile:	Aufwand	Wenden des Werkstücks, Poren und Bindefehler, Fugenspalt bei 2.Naht	doppelte Stirnflanken,erhöhte Fehlergefahr, sonst wie I3



	I10	I11	I12
Vorteile:	Verbinden ungleicher Wandstärken, sonst wie I3	einfachere Vorrichtungen	einfachere Vorrichtungen keine Wurzelspritzer
Nachteile:	wie I3	rissanfällig	Kerbwirkung der Naht enge Schweißparameter

T-Nähte



	T1	T2	T3
Vorteile:	Geringer Aufwand		
Nachteile:	Neigung zu Poren im Wurzelbereich, Festigkeitseinbuße, Bindefehlergefahr		

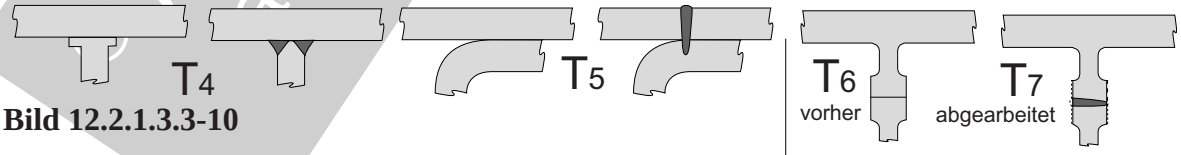


Bild 12.2.1.3.3-10

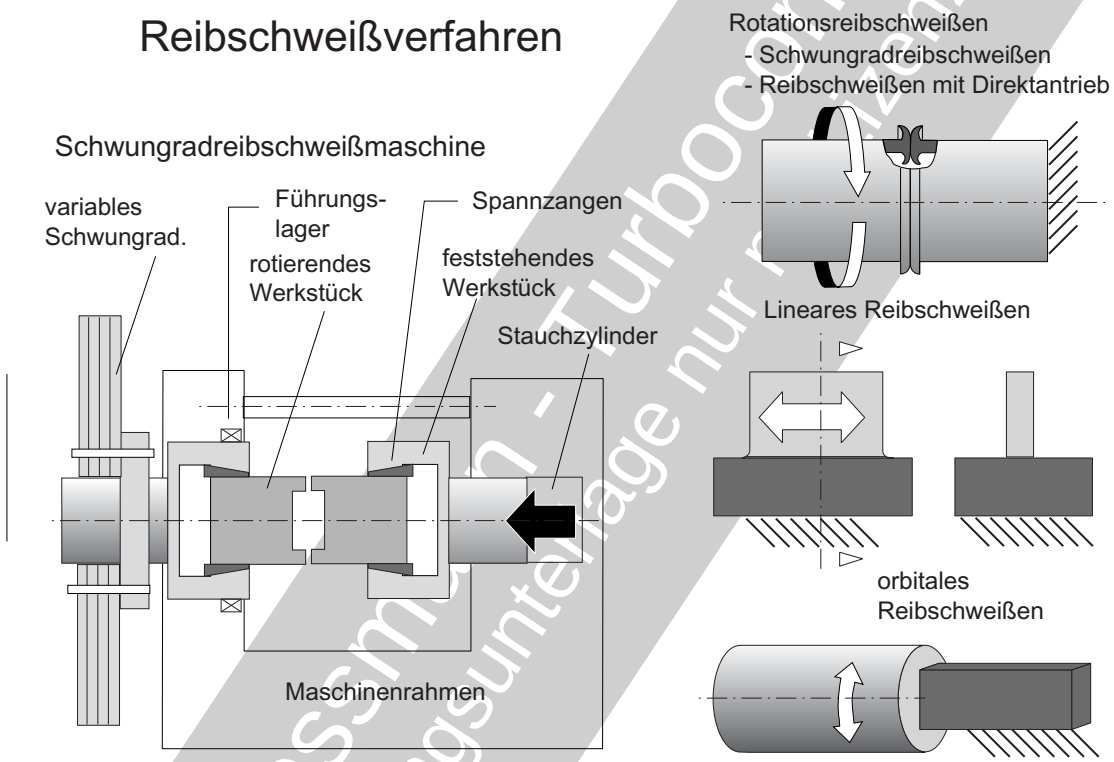
	T4	T5	T6	T7
Vorteile:	Geringer Aufwand		gute Festigkeit	
Nachteile:	Neigung zu Poren im Wurzelbereich, Festigkeitseinbuße, Bindefehlergefahr		Aufwand	

Bild 12.2.1.3.3-10 *(Lit. 12.2.1.3-25): Diese Zusammenstellung soll dem Konstrukteur Hinweise zur* ***Gestaltung*** *von EB-Schweißungen geben. Kriterien sind* ***Fehleranfälligkeit und Fertigungsaufwand****. Jeweils links ist in jeder Skizze der Zustand vor dem Schweißen dargestellt.*

Axel Rossmann Turbocons als Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Schweißungen ohne flüssige Phase, Reibschweißen und Diffusionsschweißen

12.2.1.3.4 Reibschweißen



© Axel Rossmann - Turboconsult
Abbildungsunterlage nur mit Lizenz

Reibschweißen (engl. „**Friction Welding**“) dient sowohl dem Fügen metallischer Werkstoffe als auch von Kunststoffen und Metallen mit Keramiken. Dies kann mit unterschiedlichen Verfahren realisiert werden (Lit. 12.2.1.3-1). In allen Fällen werden die Schweißflächen unter Relativbewegung zusammengedrückt. Die dabei auftretende **Reibungswärme** dient dem Schweißvorgang. Der Reibvorgang erzeugt frische, reaktive Flächen, die sich ohne schmelzflüssige Phase im festen bzw. teigigen Zustand als eine Art Diffusionsschweißen verbinden. Der Abrieb führt zu einer exakten Anformung und spaltfreien Anlage der Schweißflächen. Bearbeitungsrauigkeiten werden vom Verschleiß abgetragen. Der innige Kontakt der Schweißflächen verhindert den Zutritt schädigender Umgebungsatmosphäre. Trotzdem kann bei reaktiven Werkstoffen wie Titanlegierungen und besonderen Verfahren (**lineares Reibschweißen**) ein **Schutzgasschleier** zwingend erforderlich werden. So lassen sich Gasaufnahme und damit spröde Phasen im Oberflächenbereich vermeiden. Die besonderen Merkmale des Schweißprozesses, insbesondere die Verbindung im festen bzw. teigigen Zustand ist Voraussetzung für das, bis auf die Kriechfestigkeit (Feinkornbildung durch den Verformungsprozess), grundwerkstoffnahe Festigkeitsverhalten. Weil der Werkstoff beim Reibschweißen gewöhnlich nicht aufgeschmolzen wird, ist **Heißrissbildung minimiert**. In besonderen Fällen, insbesondere bei merklichen Unterschieden in der Schmelztemperatur, wie beim Verschweißen von Ni-Gusslegierungen mit Stählen wie der Stahlwelle an ein Turbinenrad bei kleinen Maschinen und Turboladern (Bild 12.2.1.3.4-5), kann es jedoch (im Gussteil) zur **Heißrissbildung** kommen.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

Die hohen Reib- und Stauchkräfte (Bild 12.2.1.3-34) können bei nicht ausreichend steifen **Spannvorrichtungen** zu Formabweichungen wie Achsversatz, Abkippen und Stauchwegschwankungen führen, die mit ausreichend Aufmaß aufzufangen sind.

Der **Reibvorgang** regt 'empfindliche' Bauteile wie **Blisks** (Band 4, Bild 18.9-12.1, Bild 18.9-12.2 und Bild 18.9-13) zu **gefährlichen Schwingungen** an. Selbst wenn keine Ermüdungsrisse entstanden sind, kann die Schwingfestigkeit nicht zerstörungsfrei nachweisbar unzulässig abgefallen sein. Damit besteht im Betrieb ein erhöhtes Ausfallrisiko.

Schweißungen ohne flüssige Phase wie Reibschweißen (Lit. 12.2.1.3-28) und ganz besonders Diffusionsschweißen sind besonders von **Klebestellen** (engl. „**Kissing Bonds**", Bild 12.2.1.3.5-1) bedroht. Diese, wenn auch seltenen, Fehler machen eine Qualitätssicherung schwer. Es handelt sich um nur teilweise materialschlüssig gebundene flächige Fehlstellen. Sie sind von seriengeeigneten ZfP-Verfahren wie Eindringprüfung, Ultraschall und Röntgen nicht oder nicht ausreichend sicher auffindbar. Somit bleibt für die Qualitätssicherung nur die „zweite Wahl" einer genau **dokumentierten Prozessüberwachung** (Bild 12.1.2.3.4-5) und eine visuelle Inspektion. Merkmale zu denen in erster Linie der sich aufwerfende Schweißwulst gehört (Bild 12.2.1.3.1-3), zeigen in Form, Rissbildung, und Größe einen gleichbleibenden (stabilen) Schweißprozess an.

Bild 12.2.1.3.4-1 *(Lit. 12.2.1.3-1, Lit. 12.2.1.3-57)**:** Reibschweißen wird in **Groß- und Kleinserien** auf vielen Gebieten des Maschinenbaus, insbesondere des **Leichtbaus** genutzt. In einigen Fällen lassen sich auch für das Schmelzschweißen kaum geeignete artgleiche Werkstoffe (z.B. Ni-Legierungen,Bild 12.2.1.3.1-11) verbinden (Bild 12.2.1.3.4-2). Festigkeit und Duktilität einer optimierten Reibschweißung übertreffen oft den Grundwerkstoff. Das gilt auch für viele mit einer Schmelzschweißung nicht verbindbare Werkstoffkombinationen.*

*„**A**" **Verdichterrotortrommel** (Skizze links) eines großen Fantriebwerks (Skizze rechts). Das Teil wurde aus **mehreren Einzelringen** der hochfesten Ti-Legierung TiAl6V4 **schwungradreibgeschweißt**. Dies wurde notwendig, weil die Werkstoffqualität früherer aus zwei großen Teilen verschweißter Rotoren nicht ausreichte und es zu katastrophalen Schäden mit Bruchstückaustritt kam (Bild 11.2.2.1-6).*

*„**B**" **Schaft eines Hüftgelenks** aus hochfesten Titanlegierungen. Trotz der **unterschiedlichen Querschnittsgeometrien im Nahtbereich** ist die Verbindung mit einer **Orbitalen Reibschweißung** möglich (Seite 12.2.1.3.4-1).*

*Die Literatur erwähnt auch die Möglichkeit einer Verschweißung des Titanschafts mit einem Kobaltwerkstoff (Implantatwerkstoff CoCrMo). Das ist jedoch eher skeptisch zu sehen (Bild 12.2.1.3.4-2). Eine solche **Werkstoffkombination** dürfte notwendig sein, wenn die Gefahr besteht, dass die Ermüdungsfestigkeit der Titanlegierung bei oszillierender Reibbewegung (engl. fretting) der Gelenkkugel auf dem Konus zum Schwingbruch führt (Band 1 Bild 5.9.3-4). Das größte Problem bei der Schweißung einer **Ti-Legierung mit einem Fremdwerkstoff** besteht erfahrungsgemäß in der Bildung **spröder Phasen**. Sie entstehen während des Schweißvorgangs und/oder bei einer nachfolgenden, z.B. zum Schweißspannungsabbau notwendigen Wärmebehandlung. Erschwerend kann die vergleichsweise **schlechte Wärmeleitfähigkeit von Titanlegierungen und die unterschiedliche Wärmedehnung** zu vielen anderen Werkstoffen sein.*

*„**C**" **Integrales Verdichterrad** (Blisk, Lit. 12.2.1.3-1, Bild 12.2.1.3.4-7): Der Durchmesser beträgt ca. 80 cm. Werkstoff ist eine hochfeste Titanlegierung (TiAl6V4). Die Schaufelblätter sind auf Endkontur vorgefertigt. Als separate Präzisionsschmiedestücke lässt sich z.B. die **Orientierung und Ausbildung des Ge-***

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.3.4-4

© Eyer Presenter Turbosolut
alle Schulungsunterlagen und Präsenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

Beispiele für die Anwendung verschiedener Reibschweißverfahren.

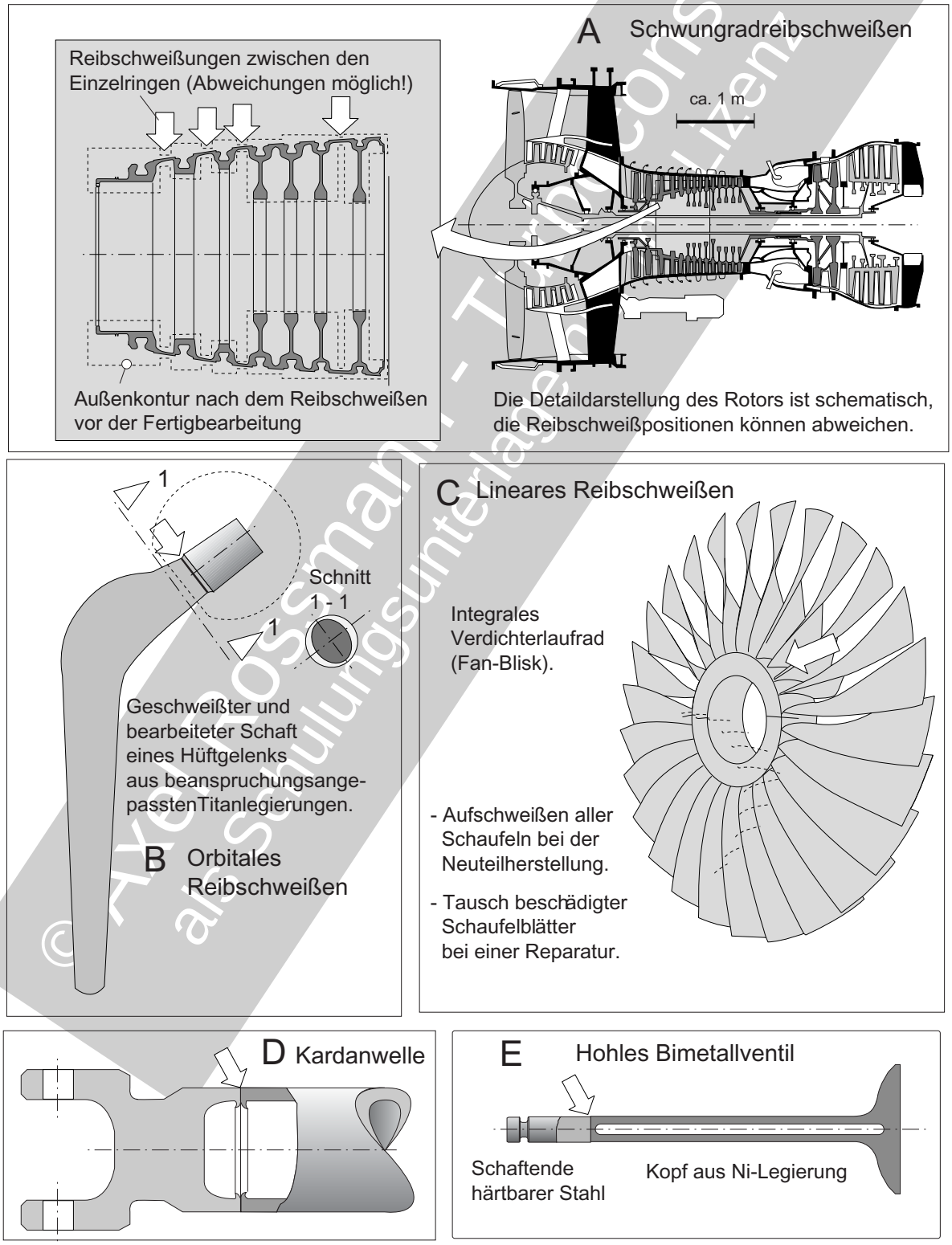


Bild 12.2.1.3.4-1

© Axel Rossmann - Turbocons als Schulungsunterlage

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

Beurteilung der Eignung von Werkstoffkombinationen für eine Reibschweißung.

Lit. 12.2.1.3-55
Lit. 12.2.1.3-1
Lit. 12.2.1.3-36

Bild 12.2.1.3.4-2

© Axel Grossmann - Turbotechnsult
Lehrschulungsunterlagen mit Lizenz

Fortsetzung von Seite 12.2.1.3.4-2

füges *(in radialer Richtung) optimieren. Dies ermöglicht eine maximale Schwingfestigkeit der Schaufelblätter. Sie haben eine verdickte Fügezone, die einem Ansatz an der Scheibe entspricht. Die Schweißung wird nur noch spanend bearbeitet. Als Verfahren dient das* ***lineare Reibschweißen*** *(Seite 12.2.1.3.4-1). Bei* ***Neuteilen*** *wird die gesamte Beschaufelung hergestellt. Das Verfahren dient auch der* ***Reparatur*** *mit dem Tausch beschädigter Einzelblätter. Diese Technologie hat sich nach einer langen Entwicklungs- und Erprobungsphase in der Praxis bewährt.*

*„**D**“* ***Hohlwelle****/Kardanwelle: Durch* ***Rotations-Reibschweißen*** *werden die kraft-/moment-einleitenden Endstücke mit dem rohrförmigen Übertragungsschaft verbunden. Damit entsteht ein torsions- und biegesteifes Leichtbauteil das insbesondere Schwingungen minimiert. Solche Teile findet man seit Jahren in Großserien des Fahrzeugbaus.*

*„**E**“* ***Ventile*** *von Kolbenmotoren: Durch die Verschweißung eines warmfesten abgasbeaufschlagten Ventiltellers, gegebenenfalls mit hohlem Schaft mit einem verschleißfesten Schaftende/Kopf sind* ***leichte, temperaturbeständige Auslassventile*** *realisierbar. Solche* ***Bimetall-***

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

Das Aussehen einer unbearbeiteten Reibschweißnaht kann etwas über die Prozessstabiliät verraten.

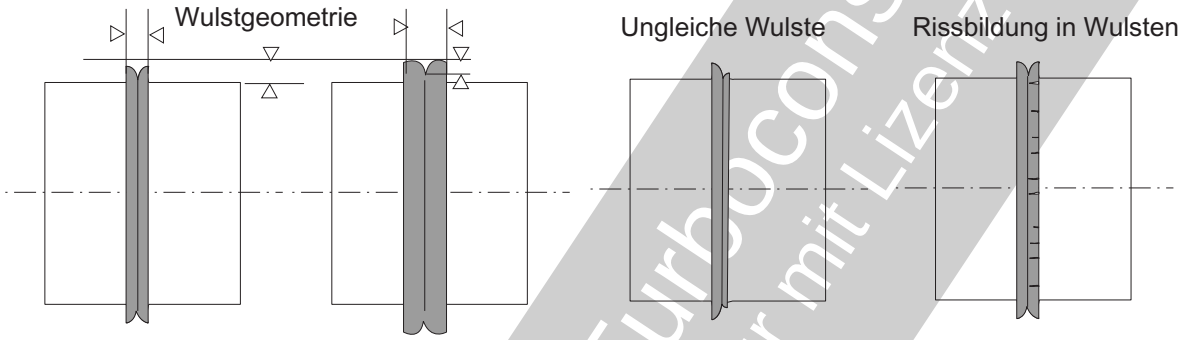


Bild 12.2.1.3.4-3

konzepte *ermöglichen dem Konstrukteur in vielen Fällen (z.B. Turboladerrotoren, (Bild 12.2.1.3.4-5) neben einem angepassten Betriebsverhalten Material- und Gewichtseinsparungen.*

Bild 12.2.1.3.4-2 *(Lit. 12.2.1.3-55, Lit. 12.2.1.3-1, Lit. 12.2.1.3-36)**:** Das Funktionsprinzip der Reibschweißung ohne Schmelze ermöglicht eine **Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe**. Das Schaubild soll dem Konstrukteur eine erste Auswahl erleichtern. Er muss sich jedoch bewusst sein, dass ihm eine **ausreichende Verfahrens- und Betriebserprobung nicht erspart** bleibt. Dabei kommt es auch auf den **Zustand des Halbzeugs** in der Kontaktfläche an. Eine Optimierung der Gefüge beim Schmiede- oder Gießprozess und/ oder mit reiner Wärmebehandlung kann notwendig werden.*

Bild 12.2.1.3.4-3 *(Lit. 12.2.1.3-36)**:** Beim Reibschweißen muss die **zerstörungsfreie Qualitätssicherung durch die Parameterüberwachung** und -dokumentation (Bild 12.2.1.3.4-4) des Schweißprozesses erfolgen. Dies hat sich in der Praxis bewährt. Eine sichere zerstörungsfreie, seriengeeignete Identifikation verfahrenstypischer, auch innenliegender **Klebestellen** (engl. kissing bonds, Bild 12.2.1.3.4-5 und Bild 12.2.1.3.5-1) ist nicht möglich.*

*Dem erfahrenen Fachmann ist es jedoch möglich, am **Erscheinungsbild des Schweißwulsts** auf grobe **Abweichungen der Verfahrensparameter** oder Veränderungen der Reibflächen aufmerksam zu werden. Dazu gehört eine die Reibung bzw. den Energieeintrag verändernde Verschmutzung. Ein Beispiel sind **Hochtemperaturgleitmittel** wie über Reinigungsbäder verschlepptes hexagonales Bornitrid. Denkbar ist auch, dass Abweichungen im Werkstoff bzw. des Gefüges einer Schweißkomponente die gewohnte Wulstausbildung verändern. Eine visuelle **Einschätzung des Nahtwulsts ersetzt natürlich nicht die Parameterüberwachung!***

© Axel Rossmann - Turboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

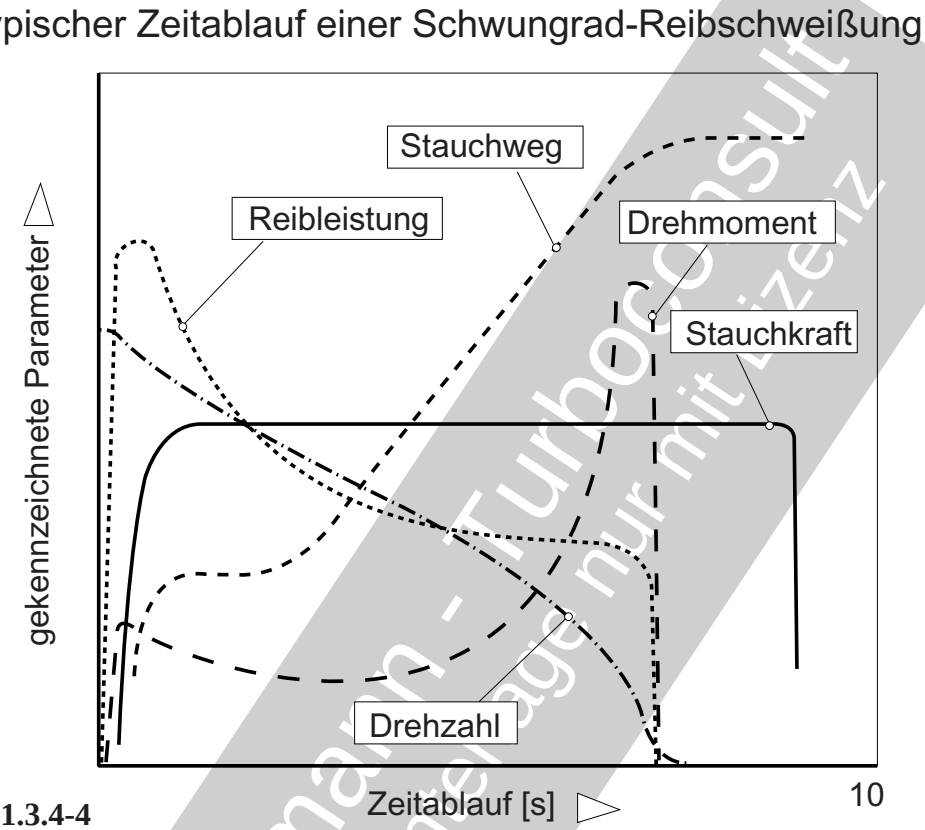


Bild 12.2.1.3.4-4

Bild 12.2.1.3.4-4 *(Lit. 12.2.1.3-1): Als das für* ***Triebwerksrotoren*** *gebräuchlichste Reibschweißverfahren soll hier das* ***Schwungradreibschweißen*** *(engl. „****Inertia Welding****“) behandelt werden. Die* ***Schweißqualität wird mit der kontinuierlichen Dokumentation der Maschinenparameter*** *sichergestellt. Dies ist erforderlich, weil wenn auch seltene, so doch mögliche* ***Klebestellen*** *(„****Kissing Bonds****“, Bild 12.2.1.3.4-7, Bild 12.2.1.3.5-1 und Bild 12.2.1.3.5-3) mit den seriengeeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren nicht ausreichend sicher zu detektieren sind. Der Verlauf der Prozessparameter die sich gegenseitig beeinflussen, streut in einem engen Rahmen. Bereits kleine Abweichungen von den erprobten und festgeschriebenen Maschinendaten lassen sich deshalb erkennen, bevor es zu Schweißfehlern kommt. Mit dem Schwungradschweißen können nur Rohrquerschnitte und, weniger günstig, auch Vollquerschnitte verbunden werden (Bild 12.2.1.3.4-5). Zuerst wird in eine Schwungscheibe eine Seite des Werkstückes eingespannt und auf die notwendige Drehzahl bzw. kinetische Energie des Schwungrads gebracht. Dann wird das stehende, fest eingespannte Gegenstück mit einer schnell ansteigenden und anschließend konstanten Stauchkraft angedrückt. Stauchweg, Drehmoment und Reibleistung ergeben sich aus den selbsteinstellenden Reibbedingungen. Aus diesem Grund müssen die* ***Maschinendaten*** *(Prozessdaten)* ***einer Reibschweißung vorher in ausreichend bauteilrelevanten Versuchen ermittelt und optimiert*** *werden. Es sei hier erwähnt, dass auch die Überwachung wichtiger weiterer Einflüsse notwendig werden kann. Ein Beispiel sind Titanlegierungen für die ein ausreichender Schutzgasschleier garantiert werden muss.*

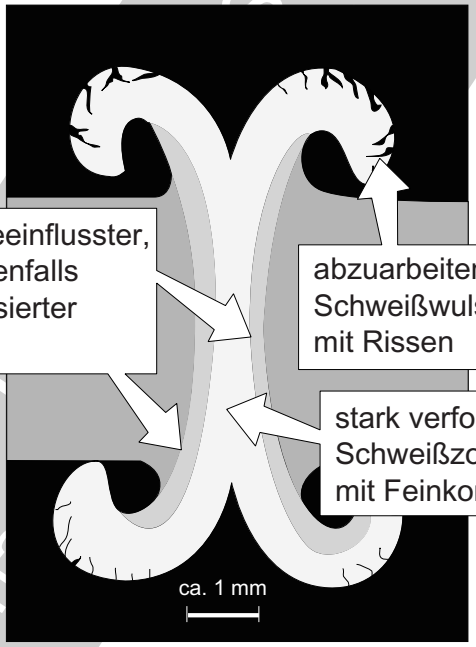
Weiter empfiehlt sich bei ***schwingempfindlichen Bauteilen wie Blisks*** *(Band 4, Bild 18.6-13) eine Überwachung auf Resonanzschwingen beim Reibvorgang. Gegebenenfalls ist eine geeignete* ***Dämpfung*** *(z.B. Elastomerbeilagen) vorzusehen.*

©Aymanssmann - Turbocosult
Nur mit Lizenz

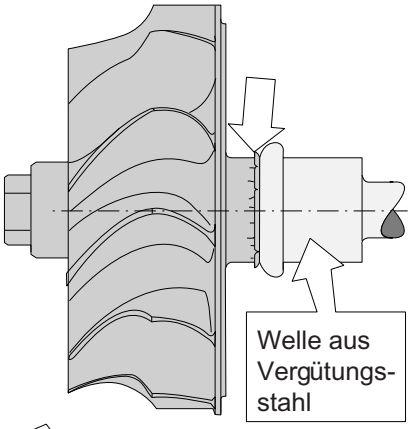
Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

Auch Reibschweißungen können trotz vieler Vorteile Fehlstellen aufweisen.

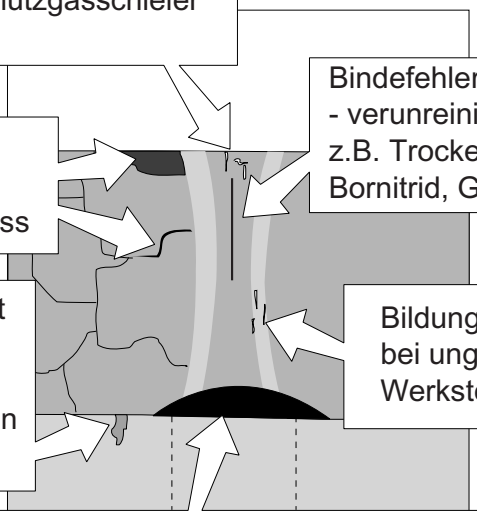
Metallografischer Querschliff durch eine Reibschweißung mit typischen Merkmalen.



Warmrissbildung neben der Reibschweißung eines Turbinenrads aus einer Ni-GussLegierung.



Zusammenstellung von möglichen Fehlstellen in Reibschweißungen



Spröde Phasen bei Titanlegierungen durch schlechten Schutzgasschleier bzw. Luftzutritt.

Bindefehler/Klebestellen durch - verunreinigte Schweißflächen z.B. Trockenschmierstoffe wie Bornitrid, Grafit oder MoS_2

Heißrissbildung in grobkörnigem Ni-Legierungsguss

Abfall der Schwingfestigkeit an Auftreffstellen von Schweißspritzern oder angeklebten nicht entfernten Schweißspritzern.

Bildung spröder Phasen bei ungünstiger Werkstoffkombination

Axiale Rissbildung, ausgehend von Rissen im Schweißwulst.SpRK-Einfluss von Hand-schweiß oder Cl-haltigen Reinigungsmitteln.

Bild 12.2.1.3.4-5

Bild 12.2.1.3.4-5: *Werden die erprobten* ***Verfahrensparameter beim Reibschweißen*** *eingehalten, zeigt die Erfahrung, dass gefährliche Fehlstellen äußerst selten sind. Trotzdem sind verschiedene Schweißfehler an Reibschweißungen möglich. Diese können besonders umfangreiche Aktionen auslösen, wenn sie von der Prozessüberwachung, welche die Qualitätsgarantie darstellt, nicht erkannt wurden.*

Das Detail oben rechts zeigt den Querschliff durch die Reibschweißung eines Ringquerschnitts mit typischen Merkmalen. Was an der nicht nachgearbeiteten Schweißung im Unterschied zu Schweißnähten anderer Verfahren zuerst auffällt, ist der üblicherweise ausgeprägte, mehr oder weniger ***eingerollte, Schweißwulst****. Dieser bildet sich bei Werkstoff- und Geometriesymmetrie in gleicher Form beidseitig des Schweißstoßes aus. Der Wulst kann auf Grund der extremen plastischen Verformung ausgeprägte* ***Axialrissbildung (Warmrisse)*** *aufweisen. Wenn die Risse mit den Wülsten abgearbeitet werden, ist die Güte der Schweißung nicht beeinträchtigt. Die wiederholbare Ausbildung der Wulste ist ein Merkmal für die* ***Stabilität des Prozesses****. Falls unterschiedliche Werkstoffe oder unterschiedlich steife Querschnitte verbunden werden, sind nicht stoßsymmetrische Wulste zu erwarten.*

In Nahtebene befindet sich ein stark verformtes, nach außen gerichtetes feinkörniges Gefüge. Die beidseitig anschließende Wärmeeinflusszone (WEZ) kann bereits, im Vergleich zum unbeeinflussten Grundmaterial, grobkörnigeres rekristallisiertes Gefüge aufweisen. Anzeichen einer erstarrten Schmelze sollten verfahrensbedingt nicht vorliegen.

In der unteren Skizze sind potenzielle Probleme, Schwachstellen und Fehler zusammengefasst.

Warmrissbildung: *Obwohl sich keine Schmelzzone im Stoß ausbildet, können bei ungünstigen Materialeigenschaften Warmrisse entstehen. Teigige Korngrenzen werden ohne Aufschmelzung von den hohen Schweißkräften und/oder Wärmespannungen aufgerissen (Bild 12.2.1.3.1-10).* ***Warmrissanfällig*** *sind erfahrungsgemäß grobkörnige Ni-Gusslegierungen. Das Problem tritt bei* ***kleinen Turbinenrädern und Turboladern*** *auf, die mit einer Welle aus Stahl verschweißt werden (Skizze). Die Rissbildung ist besonders intensiv, wenn sich in zuletzt erstarrenden Materialanhäufungen wie typischerweise dem Nabenansatz auf der Rückseite, Seigerungen und Mikroporen angereichert haben. Bei solchen unvermeidlichen Rissen muss entweder das Fügeverfahren gewechselt werden (z.B. Löten) oder die Schweißung in eine unproblematische Zone gelegt werden. Ist das nicht möglich, bedarf es* ***Versuche und ausreichende Kenntnis der zu erwartenden Betriebsbelastungen,*** *um mit einer* ***bruchmechanischen Abschätzung*** *den sicheren Betrieb trotz der Risse nachzuweisen.*

Bindefehler/Klebestellen: *Diese gefährlichen teilweise großflächigen und zum Aufreißen neigenden Fehlstellen (Bild 12.2.1.3.4-6) sind schwer zerstörungsfrei nachweisbar. Ob eine Prozessüberwachung ausreichend sicher die Entstehung solcher Fehlstellen nachweist ist zweifelhaft. Denkbare Ursachen sind Einflüsse die örtlich den Schweißprozess mit einer Änderung der Reibbedingungen beeinflussen. Zu potenziell gefährlichen Medien gehören* ***Hochtemperatur-Trockenschmiermittel wie hexagonales Bornitrid, Molybdändisulfid und mit Grafit verunreinigte Stoßflächen****.*

Spröde Phasen: *Mit Reibschweißen kann man sehr* ***unterschiedliche Werkstoffe*** *verbinden. Wichtig ist, dass die erforderliche plastische Verformbarkeit (Fließverhalten) beider Werkstoffe während des Schweißprozesses etwa im gleichen Temperaturfenster liegt. Eine ungünstige Kombination verschiedener Werkstoffe kann während des Schweißens zur* ***Bildung spröder Phasen*** *führen. Auch eine nachfolgende* ***Wärmebehandlung*** *und/oder ausreichend hohe Betriebstemperaturen können auf diese Weise versprödend wirken.* ***Ein Beispiel sind***

© Yal Rossmann - Turbomaschinen - Lehrstuhl für Energiesystemtechnik

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

***Ti-Legierungen in Kombination mit Ni-Legierungen oder Stählen**. So kann die Schweißnaht selbst zur Schwachstelle werden. Bei **Schlagbeanspruchung** (z.B. als Folgeschaden) kann es zum **spontanen Bruch** kommen.*
Versprödung mit spröden Phasen kann bei Titanlegierungen auch unter Luftzutritt entstehen (Bild 12.2.1.3.1-18). Dies ist besonders beim linearen Reibschweißen zu beachten, weil die oszillierende Schweißbewegung und ein Kippen der Reibflächen die Gefahr der Sauerstoffaufnahme auf der Schweißfläche erhöht (Lit. 12.2.1.3-1).

***Spontane Rissbildung/Spannungsrisskorrosion** (SpRK): Hochfeste **Titanlegierungen** sind im Bereich von **Kerben** und verstärkt beim Einwirken von Halogenen wie **Chlor**, sehr empfindlich für diese Risskorrosion (Bild 12.2.2.3 -16). Solche axial verlaufende Risse (Bild 12.2.1.3.4-6) gehen bevorzugt von den üblichen und akzeptierten Rissen im Schweißwulst aus. Anscheinend genügen **minimale Rückstände von Handschweiß (Fingerabdrücke)** im Schweißstoßbereich um die Risse auszulösen. Denkbar ist auch der Einfluss dünnster Cl-Reaktionszonen an der Bauteiloberfläche. Solche extrem dünnen Lagen können sich beim Reinigen der Titanteile vor dem Schweißen in **Cl-haltigen Bädern („Tri“, „Per“)** bilden (Bild 12.2.1.7-8).*

***Schweißspritzer:** Ähnlich wie bei Schmelzschweißungen können auch beim Reibschweißen „Schweißspritzer“ entstehen. Es dürfte sich hier jedoch nicht um Schmelztropfen handeln. Wahrscheinlich sind es glühende Abriebpartikel. Ausreichend heiße **Partikel von Titanlegierungen brennen** während des Flugs durch die Luft. Diese zusätzliche Wärme macht sogar ein Schmelzen denkbar. Treffen solche **Partikel auf später im Betrieb hochbelastete Bauteilzonen** (z.B. Innenflächen eines Rotors wie Nabe und **Scheibenmembrane**, Band 4, Bild 18.6-6) kann die gefährlich abgefallene Schwingfestigkeit (Band 4, Bild 18.6-12) zum **LCF-Bruch** führen. Aus diesem Grund sollten auch bei Reibschweißungen, ähnlich wie beim Elektronenstrahlschweißen, solche Zonen geeignet abgedeckt werden (Band 4, Bild 18.6-11).*

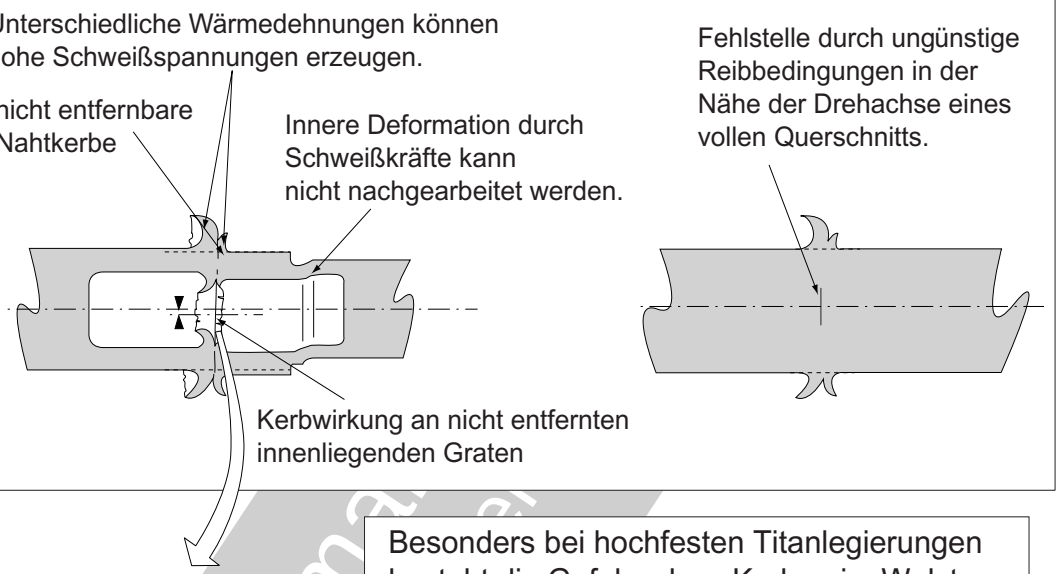
***Bild 12.2.1.3.4-6:** Beim **Reibschweißen** können verfahrensbedingt beachtliche **Formkerben** entstehen. Diese können sich sowohl auf die **Betriebssicherheit** als auch auf Folgeschäden im **Fertigungsprozess** auswirken.*
*Von besonderem Interesse ist die **Innenseite einer Hohlwelle,** deren Schweißwulst nicht nachgearbeitet werden kann. Diese Kerbe wird im Fall eines Bindefehlers zwischen den Wulstseiten gefährlich verstärkt (Skizze oben links). Spannungserhöhend kann sich auch ein nicht nacharbeitbarer Wellenversatz auf der Innenseite auswirken.*
*Handelt es sich um eine Vollwelle (Skizze oben rechts) werden zur Mitte hin die Reibverhältnisse immer ungünstiger (niedrige Relativbewegung, Abfluss des Wulstes behindert). So wird ein **zentral liegender Fehler in der Schweißebene** begünstigt. Solange sich dieser in einer sehr niedrig beanspruchten Zone befindet, mag die Betriebssicherheit des Bauteils nicht betroffen sein. Reicht oder wächst dieser Fehler aber in höher belastete Zonen, ist mit einem plötzlichen Wellenbruch zu rechnen.*
*Die Beanspruchung der Rohrinnenseite ist bei Biegespannung relativ niedrig. Treten jedoch merkliche Fliehkräfte und /oder Wärmespannungen auf, ist durchaus mit einem **LCF-Risswachstum von einer inneren, ausreichend großen Fehlstelle** zu rechnen. Das kann der Fall sein, wenn Werkstoffe mit **unterschiedlichem Wärmedehnungskoeffizienten** gefügt werden. Beispielsweise ein Turbinenrad aus einer Ni-Legierung mit einer Stahlwelle (Skizze unten links, Bild 12.2.1.3.4-6). Die Spannungen können bei zu großer Nähe der Schweißung zur Radrückwand besonders hoch sein. Ein solcher Riss wird erst außen, z.B. mit Eindringprüfung erkennbar, wenn bereits der Querschnitt gefährlich geschwächt ist. Aus diesem Grund sind solche Risse nicht vor einem Wellenbruch oder Radbruch abfangbar.*

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

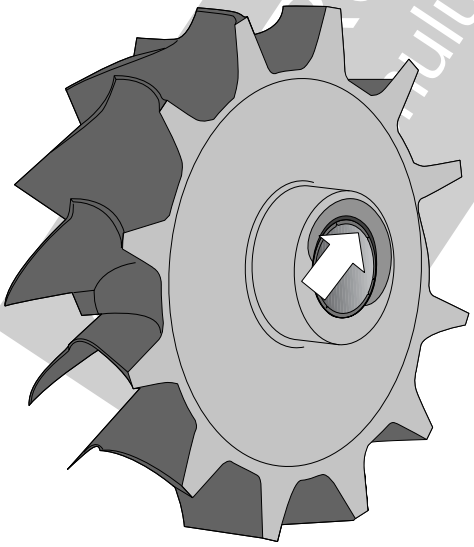
Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

Formkerben in Reibschweißungen können im Fertigungsprozess oder im Betrieb Risse auslösen.

Mögliche prinzipbedingte Formkerben in Reibschweißungen können bereits im Fertigungsprozess Risse auslösen.



Von innen ausgehender LCF-Riss und Bruch in der Welle eines kleinen Turbinenrotors im Bereich der Reibschweißung.



Besonders bei hochfesten Titanlegierungen besteht die Gefahr, dass Kerben im Wulst während des Schweißens oder verzögert Risse auslösen.

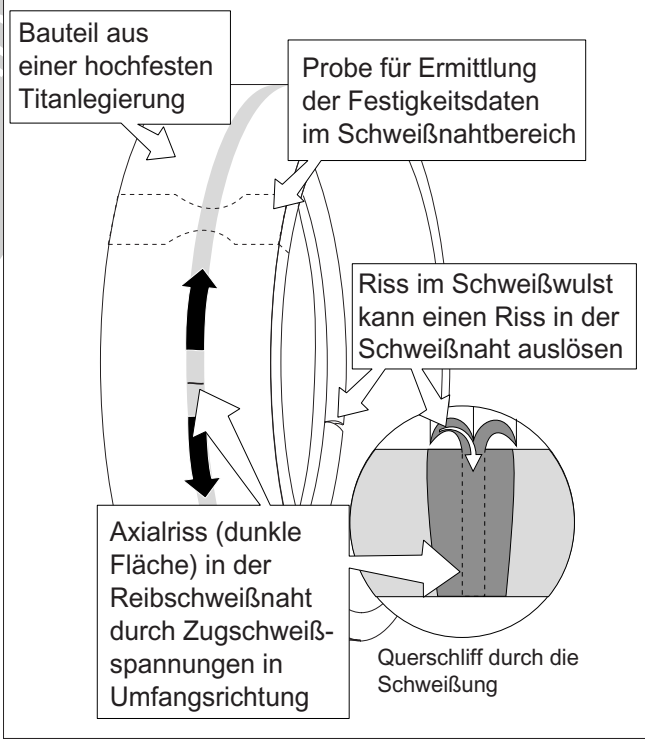


Bild 12.2.1.3.4-6

Bildbeschreibung siehe Seite vorher

Bild 12.2.1.3.4-7: *Besondere Bedingungen gelten für das* ***Lineare Reibschweißen*** *(Seite 12.2.1.3.4-1, Lit. 12.2.1.3-1). Dieses Verfahren bietet sich für die Neuteilfertigung und die Schaufelreparatur gelaufener* ***Blisks*** *an (Skizze oben). Es befindet sich bereits im Serieneinsatz und bewährt sich hier trotz potenzieller verfahrensspezifischer Probleme hervorragend.*
Das Lineare Reibschweißen unterscheidet sich vom normalen Reibschweißen (Bild 12.2.1.3.4-1 durch eine ***oszillierende Schweißbewegung****. Das stellt die Schweißtechnik vor besondere Herausforderungen und Probleme (Rahmen unten) mit Fehlstellen als Folge.*

Sauerstoffaufnahme*: Die oszillierende Schweißbewegung begünstigt Luft-/ Sauerstoffzutritt. Diese Gefahr besteht bei* ***ungenügendem Schutzgasschleier*** *und besonders bei einem* ***Kippen*** *der Kontaktflächen. Ursache für dieses Kippen kann eine nicht ausreichende Steifigkeit der Spannvorrichtungen und/oder der Maschine sein. So gelangt der Sauerstoff mit einer Pumpwirkung (?) zwischen die Kontaktflächen. Das gilt besonders bei* ***Titanlegierungen****, die in erster Linie bei geschweißten Blisks zum Einsatz kommen. In der Schweißnaht besteht dann* ***Versprödungsgefahr*** *(Bild 12.2.1.3.1-18 und Bild 12.2.1.3.1-20).*

Maßgenauigkeit*: Die notwendigen hohen* ***Klemmkräfte*** *und die oszillierende Bewegung mit ihren typischen* ***wechselnden Kraftrichtungen*** *erfordern eine hohe* ***Steifigkeit von Vorrichtungen und Maschine****. Sie beeinflussen das Kippen der Kontaktflächen und die Konstanz der Schweißparameter. Diese sind aber gerade beim Reibschweißen von besonderer Wichtigkeit. Dient doch die* ***Verfahrensstabilität als Qualitätssicherung****.*

Zugänglichkeit des Schweißbereichs*: Für die Neuteilfertigung, noch mehr aber für* ***Bliskreparaturen*** *muss die Schweißnaht* ***nachgearbeitet*** *werden. Dabei ist eine zerspanende Angleichung des Übergangs vom Schaufelprofil in die Scheibe herzustellen. Das erfordert Platz für die Fräser. Zusätzlich ist ein optimales* ***Verfestigungsstrahlen*** *zu gewährleisten.*

Aufmaße im Schweißbereich*: Diese sind erforderlich, um verfahrensbedingte* ***Stauchvorgänge*** *und* ***Materialverschiebungen*** *auszugleichen. Auch die nötige Steifigkeit sowie der Kontakt der Schweißflächen ist sicherzustellen. Die Nacharbeit der Übergänge ist ohne Überstände nicht gewährleistet. Ein besonderes Problem stellen Reparaturen von Blisks dar. Hier wird das scheibenseitige Aufmaß vom Querschnitt des abgetrennten Schaufelblatts bestimmt. Deshalb ist auch die Anzahl von Reparaturen für dieselbe Schaufel eng begrenzt.*

Störender Abrieb*: Die oszillierende Bewegung ermöglicht bei ungenügenden Schweißparametern wie Andruck und Relativbewegung die Bildung von Abriebröllchen ('Abriebwuzzeln' ähnlich einem Radiergummi) auf der Kontaktfläche. Oxideren diese, ist mit Bindefehlern in der Schweißung zu rechnen.*

Betriebsbeanspruchung*: Die Schaufeln gehen im Bereich der Schweißung in die Scheibe des Blisk über. Hier ist von den* ***höchsten dynamischen Belastungen*** *im Betrieb durch eine Grundbiegeschwingung auszugehen. Außerdem wirkt eine relativ hohe Mittelspannung als Folge des Blattgewichts. Aus diesem Grund sind verfahrensbedingte Schwachstellen (zulässige Fehler) sehr klein festzulegen. Das erhöht die Wahrscheinlichkeit des Fehlerdurchschlupfs bei zerstörungsfreien Prüfungen (Band 4, Bild 17.3.1-3.1).*

© Fvt Essen - Turbosoft als Schulungsunterlage nutzbar

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

Herstellung der Beschaufelung eines 'Blisk' durch Lineares Reibschweißen (schematisch).

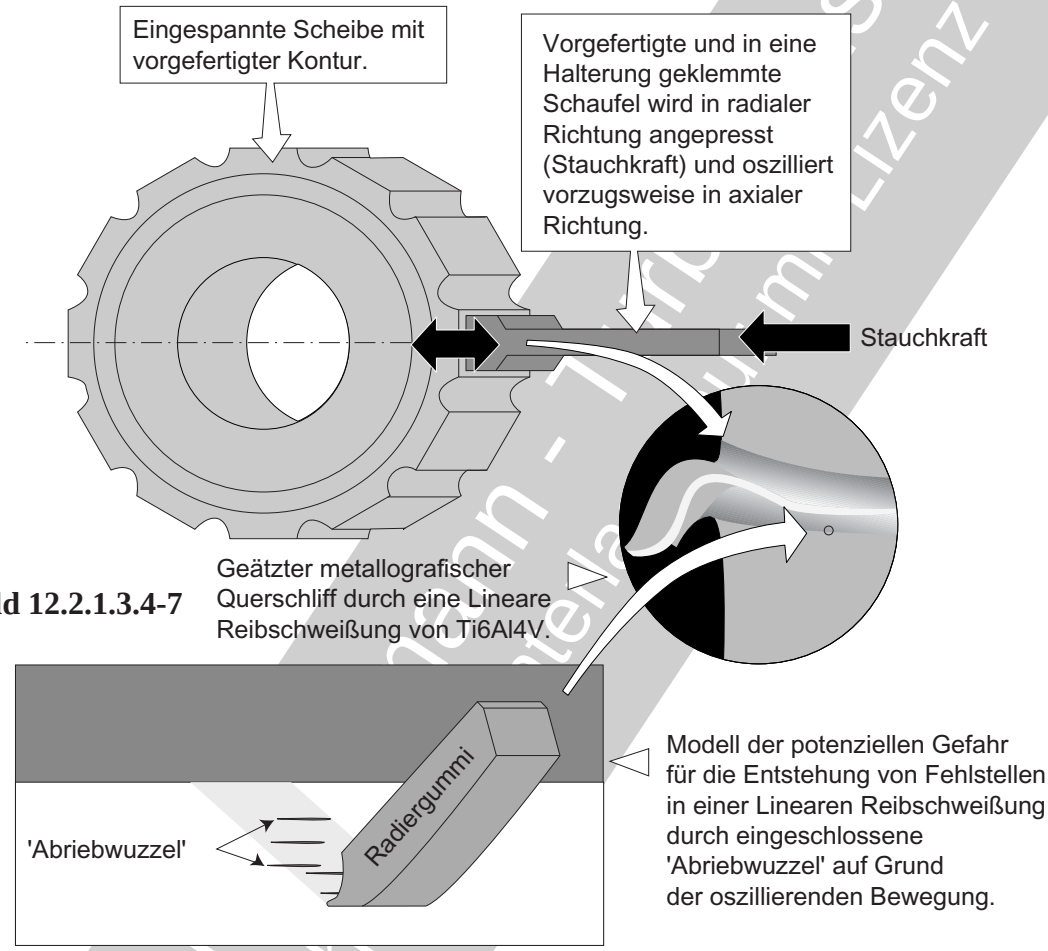


Bild 12.2.1.3.4-7

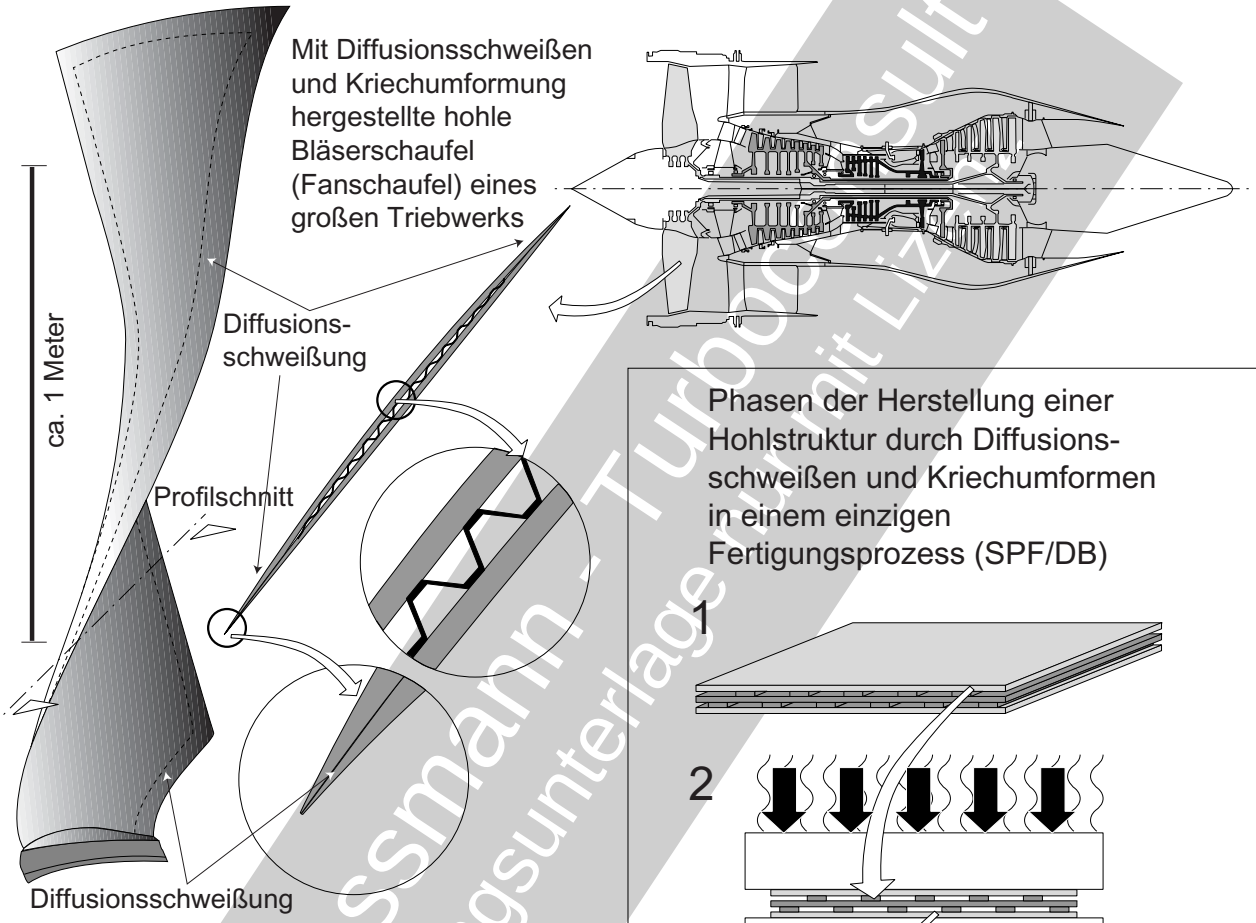
Probleme des Linearen Reibschweißens:

- Sauerstoffaufnahme im Nahtbereich, besonders bei einem eventuellen Kippen der vorgearbeiteten Schaufel.
- Ungenügende Maßgenauigkeit (Fluchten) der Bauteile und Vorrichtungen unter den hohen Schweiß- und Spannkräften und verfahrensbedingten plastischen Verformungen.
- Zugänglichkeit für die Nacharbeit.
- Ausreichende Aufmaße, besonders im Randbereich.
- Fehlstellen durch 'Abriebwuzel' (siehe Modell oben).
- Lage in der im Betrieb dynamisch hochbeanspruchten Bauteilzone stellt höchste Anforderungen an die Qualität.

Bildbeschreibung siehe Seite vorher

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Diffusionsschweißen.

12.2.1.3.5 Diffusionsschweißen



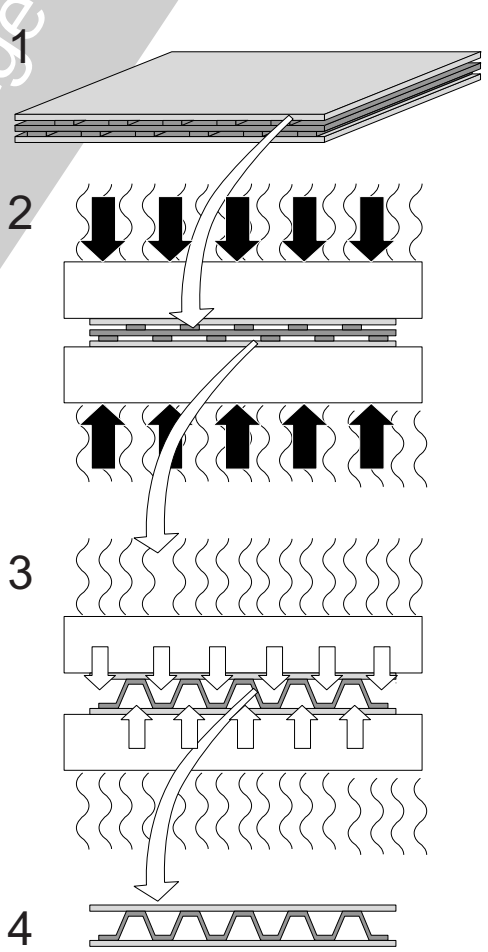


Bild 12.2.1.3.5-0.1

Diffusionsschweißen hat das Potenzial der Herstellung von Leichtbauteilen insbesondere **komplexer Hohlstrukturen** wie **Sandwichbauweisen**. In der Technik wird es für die Serienherstellung großer Fanschaufeln (Lit. 12.2.1.3-61 und Lit. 12.2.1.3-62) aus einer hochfesten Titanlegierung verwendet.

Der Fertigungsprozess erfolgt durch **statischen Kontakt aufgeheizter Oberflächen**. Die Verbindung läuft dabei über die Diffusion der Metallatome ab. Dabei bleibt die Gefügeorientierung erhalten (Lit. 12.2.1.3-58). Das ist z.B. für Schmiedeteile wichtig, deren '**Faserverlauf**' für die Betriebsbelastungen optimiert wurde (Bild 11.2.2.1-1). Die Bedingung einer absolut sichern Anlage der Fügeflächen ohne den geringsten Spalt und ohne die Diffusion behindernde Schichten (z.B. bei Oxidschichten können wenige Atomlagen genügen) ist die Schwäche des Verfahrens. Zumindest bei **Ni-Legierungen** führen hohe

© Axel Rossmann - Turbodesult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Warmfestigkeit und stabile **Oxide** (**Trennschicht**) leicht zu **Bindefehlern** (Bild 12.2.1.3.5-2). Dies ist der Grund, warum bisher eine Serienanwendung des Diffusionsschweißens außer bei Titanlegierungen an hochbelasteten Leichtbauteilen nicht bekannt wurde.

Titanlegierungen gewährleisten wegen ihrer **Kriechverformung** die notwendige innige Anlage der Schweißflächen. Ein zusätzlicher Vorteil ist ihre Eigenschaft Oxide bei Temperaturen oberhalb 550°C im Vakuum oder hochreiner Schutzgasatmosphäre zu lösen (Bild 12.2.1.3.5-1, Lit. 12.2.1.3-1 und Lit. 12.2.1.3-58). Das gewährleistet diffusible Schweißflächen. Bei Hohlstrukturen ermöglicht eine gezielt aufgebrachte Gasdruckdifferenz während des Schweißens die Kriechanformung. Trotz der vorteilhaften Besonderheiten von Titanlegierungen bleibt eine Restunsicherheit (Lit. 12.2.1.3-58). Das zeigt der Bruch einer Fanschaufel der von einem Bindefehler ausging (Bild 12.2.1.3.5-3).

Bild 12.2.1.3-5-0.1 zeigt den **Fertigungsprozess** (Lit. 12.2.1.3-58). In **Phase 1** werden die Anlageflächen der Einzellagen strukturiert. Dies kann zerspanend oder mit Hilfe eines chemischen Abtrags (Ätzen, engl. chemical milling) erfolgen. In **Phase 2** werden die aufgeheizten Lagen in einem Gesenk das die Außenkontur bestimmt in der gleichen Kammer diffusionsverschweißt. Danach in **Phase 3** pumpt man die Hohlräume zwischen den nicht verschweißten Bereichen mit einem hochreinen Schutzgas auf. Dabei bildet sich durch Kriechverformung die Außenform entsprechend dem Gesenk und gleichzeitig die innere versteifende Struktur.

Das Beispiel zeigt, dass sich trotz der Gefahr von Kaltschweißen (Klebestellen) hochbelastete **Bauteile mit anspruchsvollen Sicherheitsanforderungen realisieren** lassen. Hier ist jedoch die **Gestaltungsvirtuosität des Konstrukteurs** gefordert. So müssen die Diffusionsschweißungen **in statisch und/oder dynamisch niedriger belastete Bauteilbereiche gelegt** werden. Weiter ist anzustreben, dass die **Schweißebenen nicht quer belastet** werden. Sie sind möglichst **parallel zur Hauptbelastung zu orientieren**. Dazu ist sicher eine computergestützte Spannungsberechnung eine hervorragende Hilfe.

Anmerkungen: In der Literatur findet man den Begriff **Diffusionslöten** (Bild 12.2.1.3.5-0.1)**.** Dies erfolgt mit **teigiger/flüssiger Phase**. Dabei handelt es sich um **Oberflächen die schmelzpunktsenkend behandelt** wurden. Geeignet sind galvanisch oder mit Sputtern erzeugte dünnste Beschichtungen. In diesem Fall steigt der Schmelzpunkt während des Verbindungsprozesses, indem die Zusätze in den Grundwerkstoff diffundieren.

Zum Diffusionsschweißen lässt sich auch **Abbrennstumpfschweißen** und **Pressschweißen** zählen. Ein typisches Beispiel sind **pressgeschweißte Gliederketten**. Dazu werden Probleme in Band 2 Bild 6.7.2-4 und Bild 6.7.2-5 behandelt.

© Axel Bossmann - Tübingen
ausschließlich zum Unterricht

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Diffusionsschweißen.

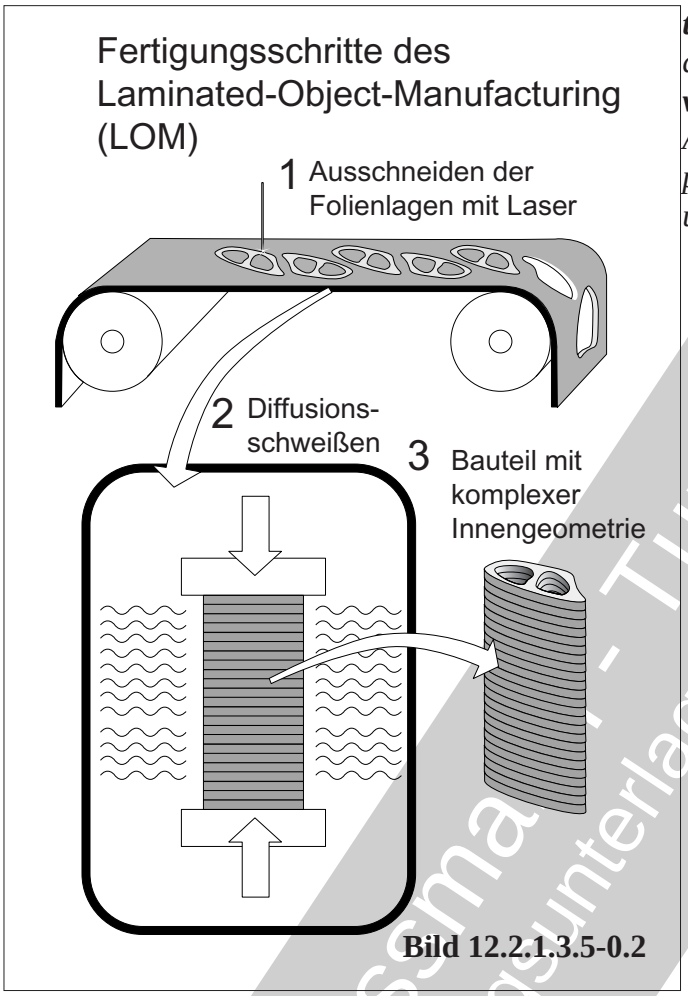


Bild 12.2.1.3.5-0.2

Bild 12.2.1.3.5-0.2 *(Lit. 12.2.1.3-60)*: ***Computergesteuerte Formgebung*** *wird in einer Art* ***Rapid Prototyping****, dem Laminated Object Manufacturing (LOM) genutzt. Damit scheint der Konstrukteur neue Gestaltungsmöglichkeiten zu erhalten. Es ist anzumerken, dass sich das Verfahren offenbar noch in der Entwicklung befindet. Die Anwendung betrifft besonders* ***dünnwandige, hohle Bauteile*** *mit* ***komplexer innerer Geometrie****. Sie bieten Vorteile bei innerer* ***Kühlung von Heißteilen*** *und* ***Werkzeugen****. Ein Beispiel sind* ***Spritzgusswerkzeuge*** *(Lit. 12.2.1.3-60). Bedarf besteht sicher auch für* ***gekühlte Wände in Produktionsanlagen*** *(chemische Prozesse) sowie Anlagen der* ***Energieerzeugung*** *(Fusionsreaktoren, Lit. 12.2.1.3-59).*

Man nutzt zur Fertigung zwei ***Verfahrensschritte****. Zunächst werden mit einem computergesteuerten* ***Schneidgerät*** *(z.B. Laser) die* ***Einzellagen aus einem dünnen Blech geschnitten*** *(„**1**“). In einem weiteren Schritt werden diese* ***Lagen gestapelt*** *und dann* ***diffusionsverschweißt****.*

*Anschließend („**3**“) kann der verschweißte Stapel nachbearbeitet werden, etwa zur Einebnung und Glättung der Außenflächen.*

© Walkossma - Turboconsult
Abbildungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 12.2.1.3.5-1: *Voraussetzung für eine* ***Diffusionsverbindung*** *ist ein ungehinderter intensiver Kontakt der Metallgitter an den Schweißstößen. Das ist auch der Grund für verfahrensspezifische Probleme und Fehler. Jede noch so kleine Trennung zwischen den Stoßflächen löst eine Fehlstelle aus (Skizze oben). Ursache solcher Trennungen sind Spalte durch Maßungenauigkeiten, Wärmeverzug oder Oxidhäute. Typische Folge sind „****Klebestellen****“ (engl.* ***Kissing Bonds****), die als eine durch die Ansammlung winziger Poren im Bereich von 10 µm (Lit. 12.2.1.3-1) geschwächte Verbindung (Lit. 12.2.1.3-33) auftreten. Diese teilweise Bindung lässt einen ausreichend sicheren, zerstörungsfreien Nachweis kaum zu (Lit. 12.2.1.3-32, Bild 12.2.1.3-39). Diffusionsschweißen lässt eine* ***Qualitätssicherung*** *durch Prozessüberwachung, ähnlich dem Reibschweißen (Bild 12.2.1.3.4-4) nicht zu. Der Grund ist, dass die Bildung der Fehlstellen nicht wechselseitig mit den Prozessparametern in Zusammenhang steht. Es ist deshalb nicht ratsam, derartige Schweißungen in Bauteilbereiche zu legen, die nennenswerte* ***Querbeanspruchungen*** *erwarten lassen.*

Für Titanlegierungen haben sich, im Gegensatz zu Ni-Legierungen, Diffusionsschweissungen wegen dem sicheren Kontakt der Fügeflächen, durchgesetzt. Beispiel sind hohle Fanschaufeln (Bild 12.2.1.3.5-3). Die Gefahr von Bindefehlern nach Lit. 12.2.1.3-1 ist weiter ...„minimiert,weil die Lösungsgeschwindigkeit (Diffusionsgeschwindigkeit) von Sauerstoff und Stickstoff in Titan so hoch ist (Getter-Effekt), dass ***selbst die unvermeidlichen ‘Oxidhäute’ im Anfangszustand nicht stören und aufgelöst werden****“.*

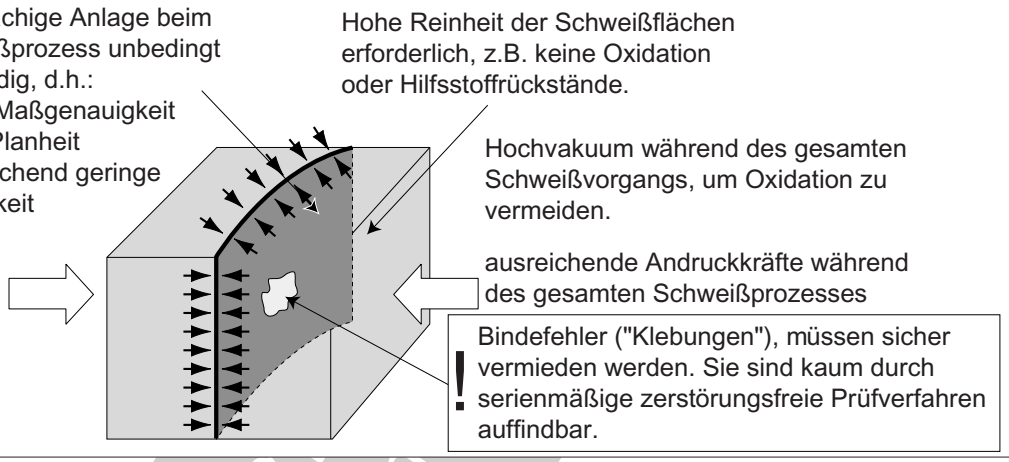
Hilfreich für den notwendigen innigen Kontakt der Fügeflächen ist das superplastische Verhalten der Titanlegierungen bei den Schweißtemperaturen (ca. 950°C). Bereits ein geringer ***Differenzdruck*** *genügt, um die evakuierte und abgedichtete Stoßfläche zum sicheren Anliegen zu zwingen. Diese Maßnahmen reichen aber offenbar nicht aus, um Fehler ganz zu vermeiden (Bild 12.2.1.3.5.-3). Ni-Legierungen erfordern auf Grund der Warmfestigkeit einen sehr viel höheren Andruck. Deshalb kommen auch Anordnungen wie axial belastete Kegelflächen (Bild 12.2.1.3.5-2) und die hohen Drücke einer* ***HIP-Presse*** *zum Einsatz. Trotzdem war die Sicherheit der Schweißungen bei Ni-Legierungen nicht befriedigend zu gewährleisten.*

© Weißpfennig - Turbocopsult
Ausbildungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Diffusionsschweißen.

Ein besonderes Problem sind kaum nachweisbare "Klebungen" (Kissing Bonds). Schweißverfahren ohne Schmelze wie das Diffusionsschweißen erscheinen dafür besonders anfällig.

Diffusionsschweißen: Voraussetzungen um Klebestellen zu vermeiden.



Einige Ursachen für Klebungen und Bindefehler bei verschiedenen Schweißverfahren:

	Diffusionsschweißen	EB-Schweißen	Reibschweißen	WIG-Schweißen
Verunreinigung der Stoßflächen	jede Art Oxidation und Verunreinigungen	Verunreinigungen wie Rückstände aus Reinigungsbädern	Trockenschmiermittel BN, Grafit, MoS2	Oxidation
ungenügende Schweißparameter	Andruck zu gering, Temperatur zu niedrig Vakuum schlecht	Bildung von Spikes durch Abweichung des Strahls von der Stoßebene	ungünstige Material-kombination, unge-eignete Parameter.	ungenügende Energieeinbringung, besonders an der Nahtwurzel.
ungenügende Maßhaltigkeit	ungleichmäßige Anlage	Schweißspalt zu breit, läuft aus dem Strahl		
Topografie der Stoßflächen	zu große Rauigkeit			

Bild 12.2.1.3.5-1

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Diffusionsschweißen.

LCF-Versagen der Diffusionsschweißung eines "Dual Property" Turbinenrads infolge eines Bindefehlers.

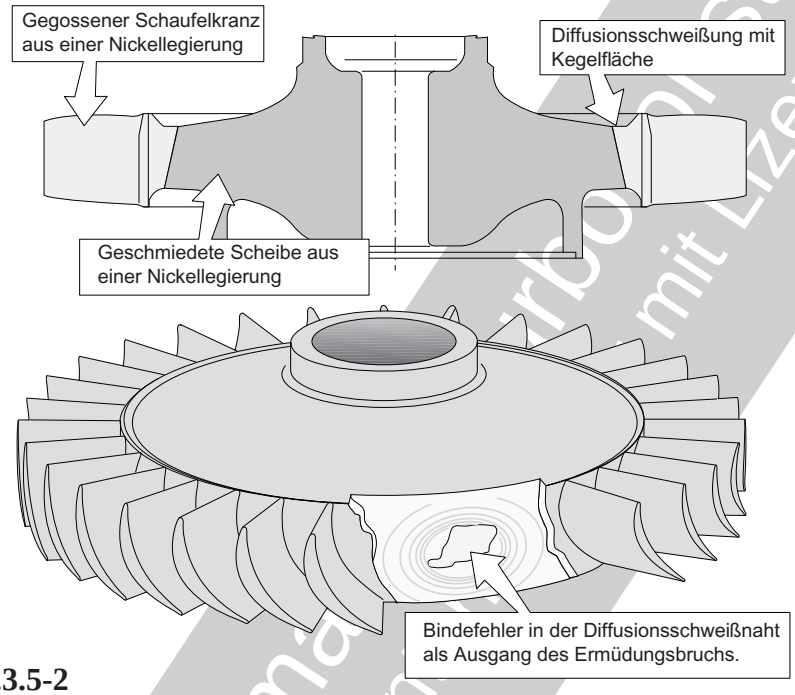


Bild 12.2.1.3.5-2

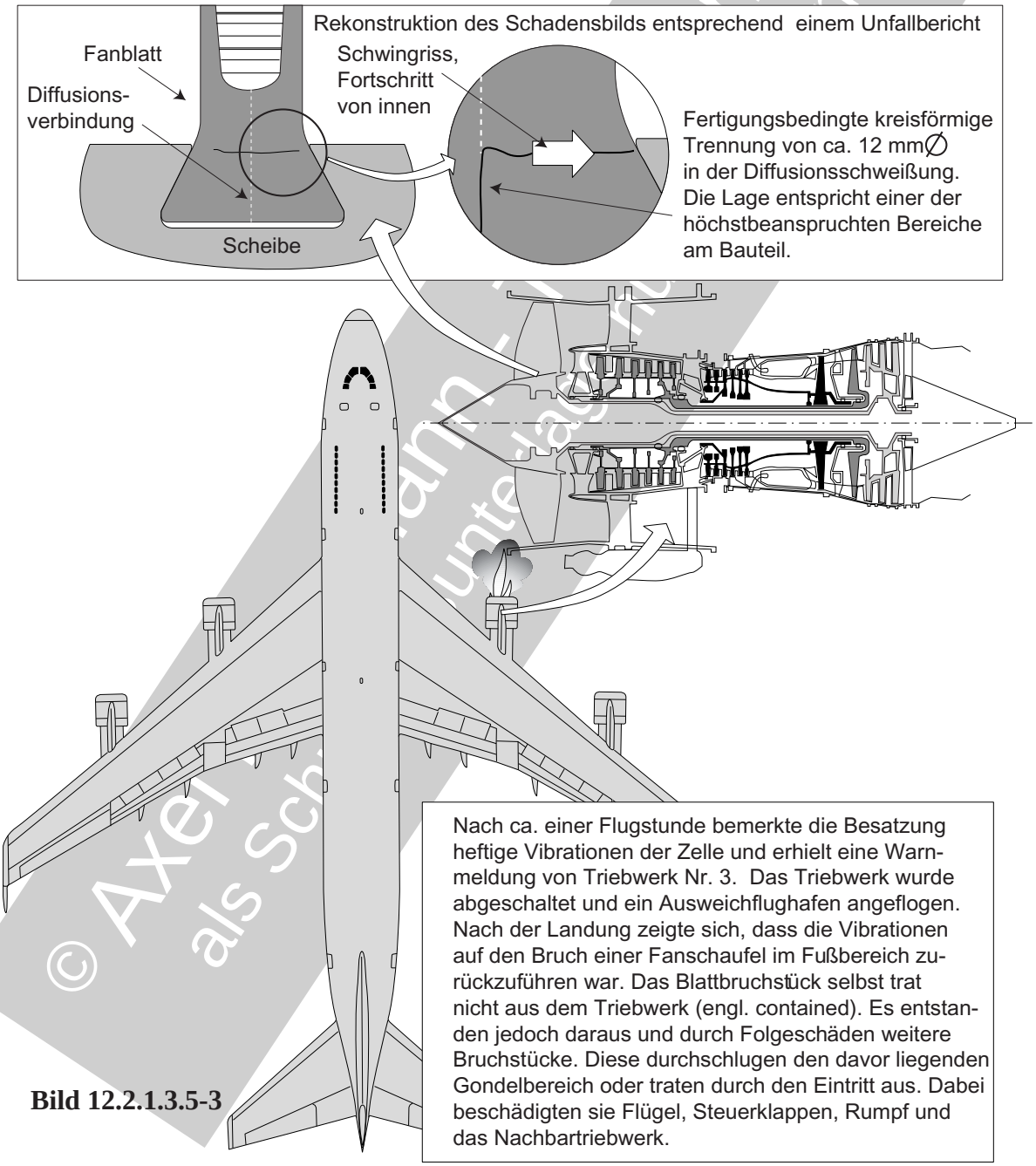
Bild 12.2.1.3.5-2 *(Lit. 12.2.1.3-1): Nach dem sog. „**Dual Property**“ - oder auch „**Hybrid Turbine Wheel**“-**Konzept** (Skizze oben, Lit. 12.2.1.3-35) versucht man bei Turbinenrädern einen integral gegossenen Kranz (hohe Warmfestigkeit aber geringe Zähigkeit) und eine geschmiedete Nabe (hohe LCF-Festigkeit und Zähigkeit bei niedrigeren Temperaturen) zu verbinden. Beide Teile bestehen aus Ni-Legierungen die zu den spezifischen Betriebsbelastungen dieser Bauteilzonen optimal passen. Offenbar wurde sogar versucht, einen Ring mit gekühlten Turbinenschaufeln aufzuschweißen (Lit. 12.2.1.3-35).*

*Zumindest in einem Fall **scheiterten Versuche** den Schaufelkranz mit der Nabe durch eine **kegelige Diffusionsschweißung** zu verbinden (Lit. 12.2.1.3-1), wegen der nicht ausreichend sicher auffindbaren Bindefehler (Lit. 12.2.1.3-32). Für eine Ultraschallprüfung wirkt u.a. das grobe Gussgefüge des Kranzes erschwerend. Die Zyklen bis zum Versagen in Schleuderversuchen streuten deshalb inakzeptabel. Bereits beim Hochfahren traten Brüche auf (Skizze unten). Aber auch Lebensdauern von mehreren tausend Zyklen wurden ohne Schaden erreicht. Bauteile mit kurzer Lebensdauer ließen sich nicht von solchen mit langer Lebensdauer in qualitätssichernden Prüfbefunden unterscheiden.*

© Axel Rossmann Turbomaschinen mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Diffusionsschweißen.

Bindefehler in Diffusionsschweißnähten sind prozesstypische Schwachstellen und beeinflussen die Betriebssicherheit der Bauteile.



Nach ca. einer Flugstunde bemerkte die Besatzung heftige Vibrationen der Zelle und erhielt eine Warnmeldung von Triebwerk Nr. 3. Das Triebwerk wurde abgeschaltet und ein Ausweichflughafen angeflogen. Nach der Landung zeigte sich, dass die Vibrationen auf den Bruch einer Fanschaufel im Fußbereich zurückzuführen war. Das Blattbruchstück selbst trat nicht aus dem Triebwerk (engl. contained). Es entstanden jedoch daraus und durch Folgeschäden weitere Bruchstücke. Diese durchschlugen den davor liegenden Gondelbereich oder traten durch den Eintritt aus. Dabei beschädigten sie Flügel, Steuerklappen, Rumpf und das Nachbartriebwerk.

Bild 12.2.1.3.5-3

Bild 12.2.1.3.5-3 *(Lit. 12.2.1.3-34): Dass auch bei* ***Titanlegierungen Probleme mit Bindefehlern an Diffusionsschweißungen*** *auftreten können zeigt dieses Beispiel. Der Triebwerksschaden war die Folge eines* ***Fanschaufelbruchs*** *im Bereich des Schwalbenschwanzfußes. Ein* ***Schwingriss*** *der von einem* ***Herstellungsfehler*** *(entstanden über 10 Jahre vor dem Schaden!) in der Schaufelfußmitte ausging, führte zum Bruch (Skizze oben, aus den Lite-*

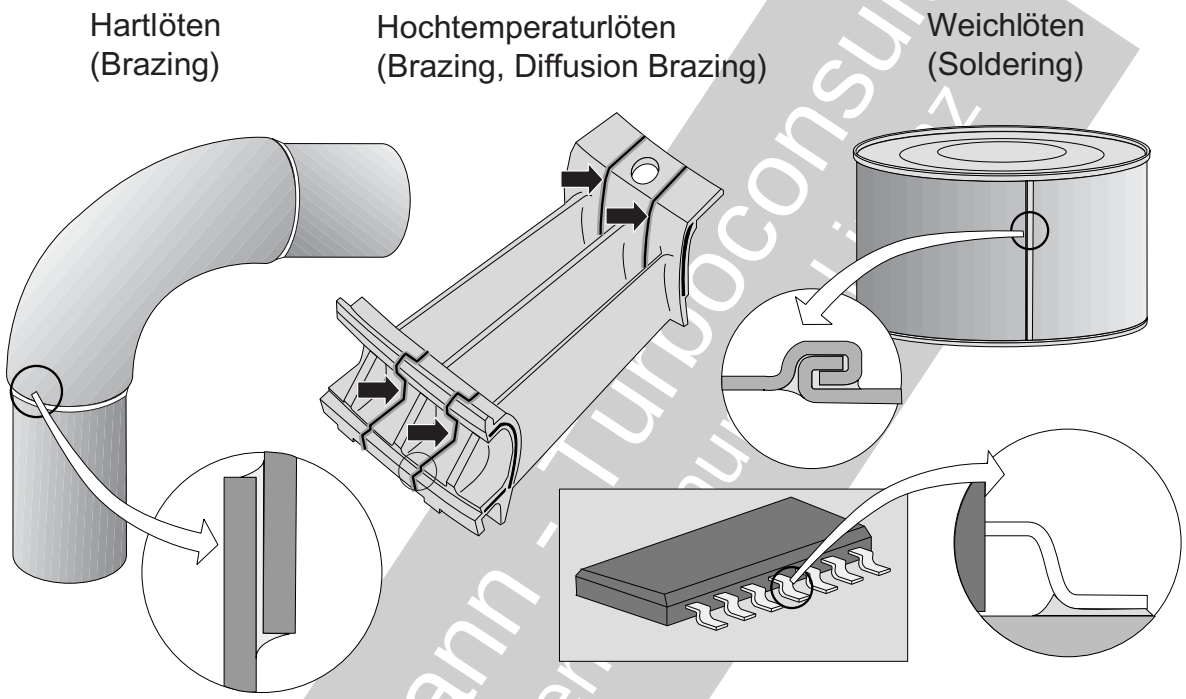
raturangaben rekonstruiert). Der ***Bindefehler*** *(„lack of bond“, Bild 12.2.1.3.5-2) lag am Übergang der zwei Blattseiten. Diese Ebene, in der die Fliehkräfte wirken, ist von keinen erkennbaren, nennenswerten Querkräften belastet. Eventuelle Biegeschwingungen dürften hier, in der neutralen Achse, wenig wirksam sein. Der* ***Schwingbruch*** *hat sich offenbar, entsprechend der hohen Belastungen* ***quer zur Schweißebene und damit quer zum Fehler*** *ausgebreitet.*

Es handelt sich um ein aus zwei hochfesten Titanblechen diffusionsgeschweißtes hohles Fanblatt. Wegen der verfahrenstypischen Schwierigkeit fehlerfreie Bindungen im Blattfußbereich zu erhalten, waren ***Kriterien für die Zulässigkeit*** *gewisser Fehlstellen (Schwachstellen) erarbeitet worden. Eine Schwachstelle von maximal 6 mm erschien als zulässig. Zwar wurde diese im Schadensteil mit Röntgen während des Herstellungsprozesses bemerkt. Auf Grund des* ***Bewertungskriteriums*** *wurde sie jedoch nicht als unzulässig eingestuft. Leider lag diese Schwachstelle in einer der zwei höchstbeanspruchten Zonen des Bauteils und war damit trotz der Längslage offenbar von zyklischem Risswachstum gefährdet. Auf Grund dieser Erkenntnis wurde die Bewertungsvorschrift verschärft. Die Schwachstelle wurde so zur Fehlstelle und damit unzulässig.*

Der ursprüngliche ***Bindefehler*** *(bond-line defect) hatte die Form einer Ellipse mit ca. 12 mm Ausdehnung in Blattsehnenrichtung. Ein Wachstum auf 22 mm war die Folge eines weiteren Bindungsverlusts und zeigt die niedrige Festigkeit in diesem Bereich.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.4 Löten



© Axel Rossmann - Turboconsult
alle Rechte vorbehalten

Löten ist ein stoffschlüssiges Verbindungs- oder Beschichtungsverfahren, bei dem ein metallischer Zusatzwerkstoff (das Lot) auf den Bindungsflächen einen niedrigeren Schmelzpunkt als die zu verbindenden Werkstoffe aufweist. Das Lot schmilzt unter Erwärmung. Anlegierung bzw. Diffusionsvorgänge stellen eine metallische Verbindung her. Es gibt mehrere Lötverfahren (**Weichlöten**, engl. **Soldering**) mit niedrig schmelzenden Loten wie Blei- und Zinnlote. Sie werden wegen ihrer niedrigen Festigkeit, besonders der bereits bei Raumtemperatur schlechten Schwing- und Kriechfestigkeit, für Verbindungen an Triebwerksteilen nicht verwendet. Sie kommen nur als Verbindung für einen elektrischen Kontakt zum Einsatz. Damit erhalten sie für das Betriebsverhalten digitaler Regler Bedeutung. Sie zeigen spezifische Schadensmechanismen wie Materialtransport durch den fließenden Strom (Lit. 12.2.1.4-17).

Die im Triebwerksbau am häufigsten angewendeten, mechanisch nennenswert belastbaren **Lötverfahren** (engl. **Brazing**) lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen. Das **Hartlöten** arbeitet mit **artfremden Loten**, wie **Silber- oder Kupferlot** und arbeitet gewöhnlich oberhalb von 450°C (Löttemperatur/Arbeitstemperatur, Bild 12.2.1.4-4), jedoch deutlich unterhalb der Solidustemperatur des Grundwerkstoffs. Es benötigt gewöhnlich Hilfsstoffe (**Flussmittel**, gasförmig oder flüssig) zur Entfernung der Oxidhäute auf den Verbindungsflächen. So wird eine Benetzung mit Lot gewährleistet und die zum Eindringen des Lots in Spalten benötigte **Kapillarwirkung** (Bild 12.2.1.4-4). Hartlöten findet eine Vielzahl von Anwendungen bei Triebwerken (Bild 12.2.1.4-1).

Das **Hochtemperaturlöten** ist nach DIN 8505 ein Hartlöten, das bei Arbeitstemperaturen oberhalb von 900 °C erfolgt. Üblicherweise befindet sich das Lot im Bereich von ca. 10 °C unterhalb, bis in der **Nähe des Erweichungspunktes der zu verbindenden Grundwerkstoffe**. Gearbeitet wird mit artgleichen oder artähnlichen Loten. Deren Schmelzpunkt liegt nur wenig unter der Solidustemperatur des Grundwerkstoffs. Flussmittel kommen nicht zum Einsatz. Die Voraussetzung für die **Benetzung schafft statt dessen die Prozessatmosphäre** (Hoch- und Teilvakuum, Schutzgas, Wasserstoff). Das Lot enthält **schmelzpunktabsenkende Zusätze** wie Silizium, Bor und Phos-

phor. Sie verschlechtern in der Ausgangskonzentration die Festigkeitseigenschaften der Lötverbindung indem **spröde Phasen** gebildet werden. Diese sind weniger warmfest als der Grundwerkstoff. Deshalb nutzt man das **Abdiffundieren der Zusätze während der Lötung**. Auf diese Weise verbessern sich die Loteigenschaften und der **Lotschmelzpunkt nähert sich dem des Grundwerkstoffs**. Hochtemperaturlöten wird in erster Linie an Heißteilen angewendet (Bild 12.2.1.4-2).

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

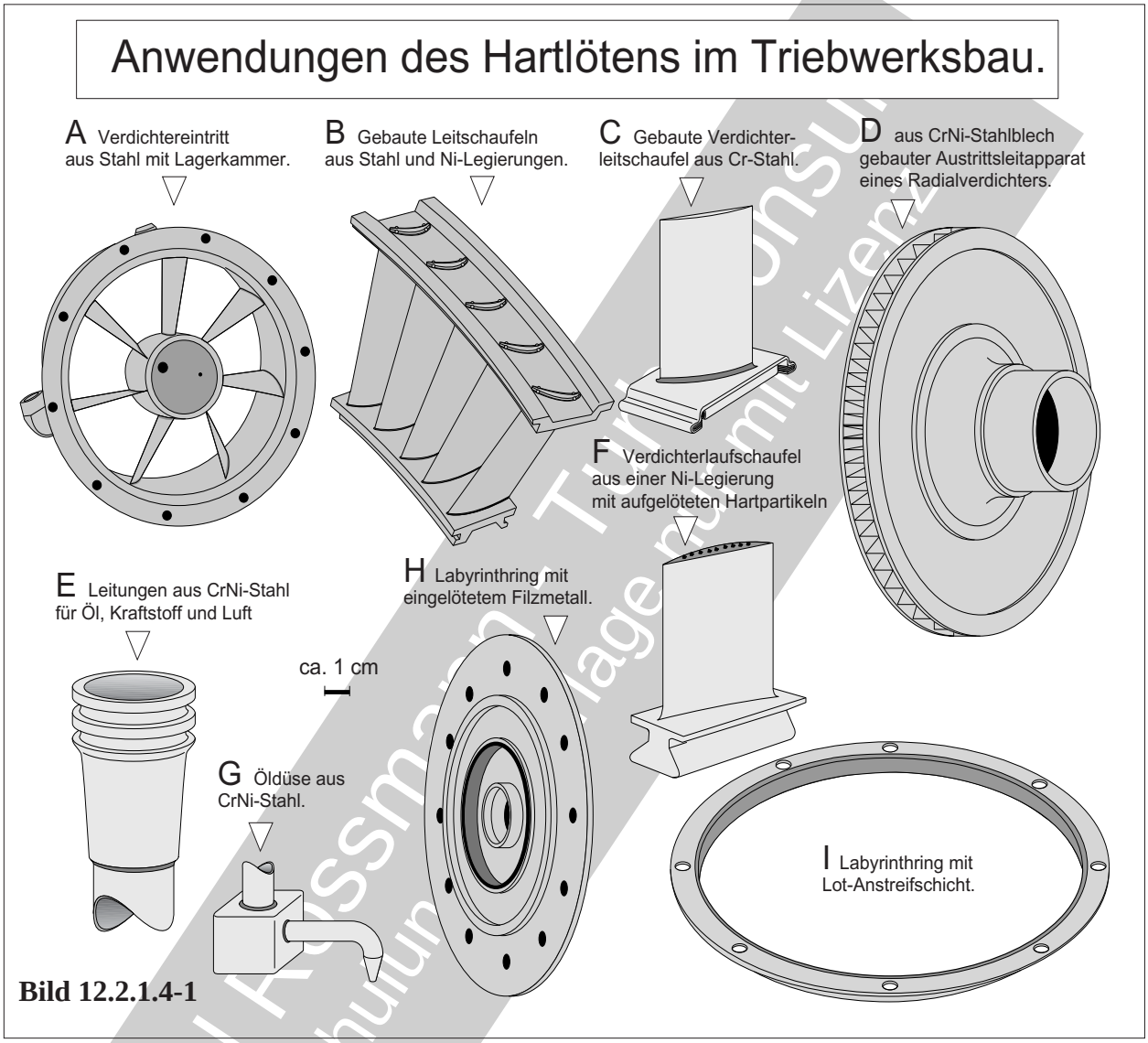


Bild 12.2.1.4-1

Bild 12.2.1.4-1: *Besonders in älteren Triebwerkstypen kamen* ***Hartlötungen mit nicht artgleichem Lot*** *zur Anwendung. Die Motivation zum Einsatz dieser Löttechnologie dürften in erster Linie Kostenvorteile gegenüber integralen Fräskonstruktionen und deren Machbarkeit gewesen sein. Moderne digital gesteuerte Zerspanungsmaschinen und die gestiegenen Festigkeitsforderungen begünstigen heute integrale Konstruktionen wie Guss und spanend bearbeitete Schmiedeteile. Das gilt auch für den umfangreichen Einsatz gut schweißbarer Titanlegierungen. Die Lote zeigen zwar gute Benetzbarkeit, sind jedoch spröd (Lit 12.2.1.4-13).*

Wegen der relativ zum Grundmaterial niedrigen Warmfestigkeit artfremder Hartlote, erfolgte der Einsatz in erster Linie im Verdichterbereich und den Anbauten. Hierzu gehören Rohrleitungen der Öl-, Luft- und Kraftstoffsysteme. Verbunden werden niedrig- und hochlegierte Stähle. In neueren Triebwerkstypen kommen an gebauten ***Verdichterleitapparaten*** *wieder Lötkonstruktionen zum Einsatz.*

Nachfolgend werden einige ***typische Anwendungen von Hartlötungen*** *im Einzelnen vorgestellt:*

„A“: *Aus Stahlblech, Guss- und Schmiedeteilen mit Kupfer- oder Silberlot gefügter* ***vorderer Lagerstern im Eintrittsgehäuse*** *einer Kleingasturbine. Die Lagerstreben bzw. Eintrittsleitschaufeln sind hohl und führen bei Bedarf*

© Axel Rossmann - Turbinensuche
Abschnuum, Auflage nur mit Lizenz

Enteisungsluft, die aus Öffnungsschlitzen in den Hinterkanten tritt.

„B“: Verdichterleitapparat *(Lit 12.2.1.4-9), wurde bei älteren Triebwerkstypen meist aus Stahlblech mit Kupferlot gefügt. Die hohen Betriebstemperaturen moderner Triebwerkstypen erfordern jedoch entweder sehr teure Lote auf Goldbasis (Lit. 12.2.1.4-16) oder artähnliche Ni-Hochtemperaturlote (Bild 12.2.1.4-2). Hochtemperaturlote weisen aber eine vergleichsweise schlechte Spaltfüllung und die Neigung zur Versprödung auf, wenn die Löttemperatur möglichst niedrig gehalten werden muss. Das kann notwendig sein, um eine Schädigungsgrenze der Schmiedewerkstoffe (Schwingfestigkeit) nicht zu überschreiten (Bild 12.2.1.4-7).*

„C“: Verdichterleitschaufel *aus Cr-Stahl (Typ 13% Cr-Stahl) mit Kupfer- oder Silberlot gefügt. Dieser Schaufeltyp hat sich, im Verdichter eines älteren, in großer Zahl gebauten Kampfflugzeugtriebwerks, hervorragend bewährt. Ein Problem war die* ***Neigung zur Elementbildung*** *und damit verstärkter Korrosion am Lotübergang zu Grundwerkstoff (Bild 12.2.1.4-17). Abhilfe brachte ein kathodischer Korrosionsschutz mit einer anorganischen Beschichtung (Al-Pulver gefüllter „Lack“ mit keramischer Bindung). Ein weiteres Problem war das Versagen von Lötungen des Fußkastens unter Schwingbeanspruchung. In der „weich“ gewordenen Struktur konnten sich Schwingrisse im Grundmaterial bilden.*

„D“: Verdichterleitapparat des Radialverdichters *einer Kleingasturbine aus CrNi-Stahl, gefügt mit Silberlot. Die flächige Gestaltung begünstigte Schwingbrüche an den Lötungen der Leitschaufeln zu den Seitenwänden (Konstruktion ersichtlich aus Bild 12.2.1.3.2-3) und im Bereich von aufgelöteten Befestigungsbolzen.*

„E“: Luftleitung *aus CrNi-Stahl, gefügt mit Silberlot. Hier lag eine Problematik in Nachweis und Herstellung der geforderten Lötungsqualität (Mindestbindungsanteil, Bild 12.2.1.4-4).*

„F“: *Aufgelötete* ***Spitzenpanzerung mit Hartstoffpartikeln*** *einer Verdichterrotorschaufel. Problematisch ist die gewünschte Verteilung der Hartstoffpartikel und des Lotes um eine optimale Schwingfestigkeit im Bereich der hoch schwingbeanspruchten Schaufelspitze zu gewährleisten (Band 1, Bild 5.4.3.3-10).*

„G“: Verteiler für eine Öldüse*, CrNi-Stahl (Typ CrNi 18/9) mit Silberlot gelötet. Diese konstruktive Gestaltung ist von einem großen* ***Steifigkeitssprung an der Lötung*** *gekennzeichnet und neigt deshalb bei erhöhter Schwingbeanspruchung zum Bruch (Bild 12.2.1.4-17 und Bild 12.2.1.4-18).*

„H“: *Träger (niedrig legierter Stahl) der* ***Anstreifschicht für ein Labyrinth*** *einer Kleingasturbine. Filzmetall, eingelötet mit Silberlot. Hier muss die Fertigung das Problem der sicheren Lötung eines porösen Werkstoffs lösen (Bild 12.2.1.4-12). Auch die zerstörungsfreie Prüfung der Lötungsqualität ist problematisch (Band 4, Bild 18.8-6).*

„I“: *Träger (niedrig legierter Stahl) einer* ***Anstreifschicht aus Silberlot****. Häufig verwendet in Triebwerken aller Leistungsklassen älterer Bauart. Sie werden heute kaum mehr angewendet, wahrscheinlich auch weil die potenzielle Gefahr einer* ***Lötrissigkeit*** *(LME, Bild 12.2.1.4-14) besteht. An den Labyrinthspitzen im Zusammenhang mit einem* ***Anstreifvorgang*** *und an Heißteilen als Folge einer* ***Ablagerung des Schichtabriebs****. Ein weiteres Problem ist die* ***Abstimmung der Wärmedehnungen*** *zwischen Lotschicht und Grundmaterial. Gelingt dies nicht befriedigend, kann es zur Schichtablösung mit umfangreichen sicherheitsrelevanten Folgeschäden kommen (Bild 12.2.1.4-22).*

© Axel Poss-Grahn - TU Dortmund
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

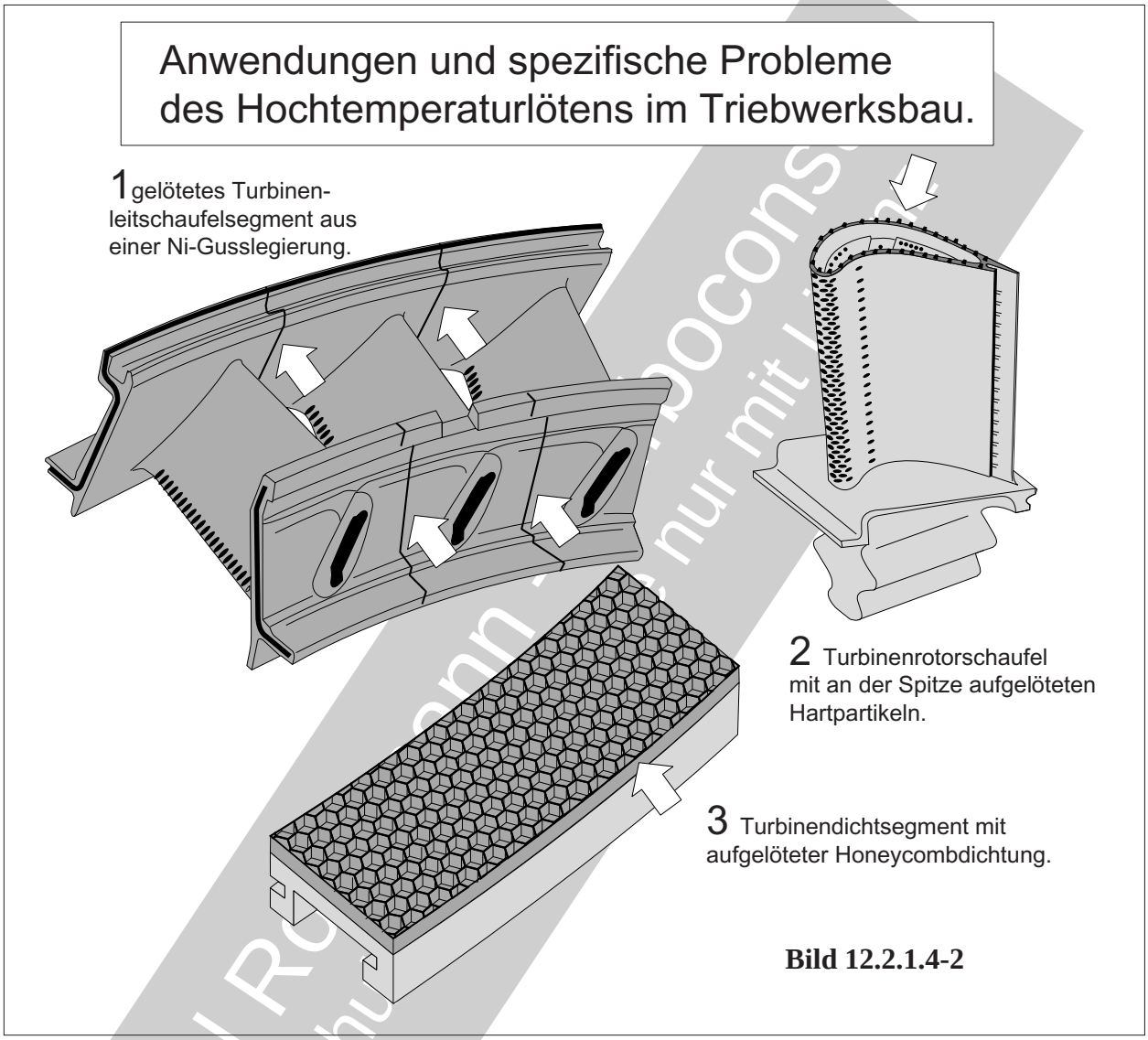


Bild 12.2.1.4-2

Bild 12.2.1.4-2: Hochtemperaturlötungen *mit artgleichem Lot sind aus dem Heißteilbereich, auch moderner Triebwerke nicht wegzudenken. Sie kommen dort zum Einsatz, wo Schweißen zu große Probleme aufwirft. Dies ist z.B. der Fall, wenn die Werkstoffe sehr schlecht schweißbar (z. B. Ni-Basis Guss), die Querschnitte zu filigran oder Beschichtungen (z.B. Panzerungen mit Hartpartikeln) aufzubringen sind. Nachfolgend werden typische Beispiele für Hochtemperaturlötungen vorgestellt:*

„1“ Turbinenschaufelsegmente: *Um Steifigkeit und Montierbarkeit zu verbessern, sowie die einfachere Herstellung einzelner Schaufeln (Gießen, Bohren von Kühlluftöffnungen) zu nutzen, werden Schaufeln, besonders solche mit komplexer innerer Kühlluftführung, zu Segmenten an den Deckbändern verlötet. Ein Problem kann dabei die Reaktion des Lots mit einer nachfolgenden Diffusionsbeschichtung sein (Bild 12.2.1.4-8 und Bild 12.2.1.4-16). Lötungen sind so auszulegen und zu positionieren, dass ein Versagen, z.B. als Folge einer Überhitzung oder Thermoermüdung nicht zum Ausfall des Bauteils führt.*

„2“ Spitzenpanzerung an Turbinenrotorschaufeln: *Um Spitzenspaltverluste, insbesondere an Schaufeln der Hochdruckstufen, zu minimieren, werden für den ersten Anstreifvorgang* ***Hartstoffpartikel*** *(kubisches Bornitrid,*

Siliziumkarbid) aufgelötet. Sie tragen die gegenüberliegende harte keramische Anstreifschicht (Zirkonoxid) ab (Band 1, Bild 3-22). Ein besonderes Problem ist dabei eine ***unzulässige Reaktion der Partikel mit dem Lot*** *bei den hohen Betriebstemperaturen.*

„3“ Turbinendichtsegment mit Wabendichtung (Honeycomb): *Diese statischen Bauteile befinden sich gegenüber den Turbinenschaufelspitzen oder den Labyrinthspitzen von Schaufeldeckbändern. Die Dichtungsstruktur besteht aus dünnen Blechen (****Honigwaben****, engl. Honeycomb) und wird ganzflächig aufgelötet. Dabei treten spezifische Probleme wie eine ungenügende Bindung durch Verzug, die Gefahr einer* ***Versprödung infolge Lotdiffusion*** *und die Schwächung der Stegquerschnitte durch* ***Loterosion*** *auf (Bild 12.2.1.4-10)*

Bild 12.2.1.4-3: *Festigkeit und* ***Qualität einer Lötung*** *werden von* ***werkstoff- und prozessabhängigen Einflüssen*** *bestimmt. Eine besondere Stellung nehmen der Lötspalt (Lit. 12.2.1.4-10, siehe auch Bild 12.2.1.4-4) und die Topografie der Verbindungsflächen (Lit. 12.2.1.4-11, Bild 12.2.1.4-6) ein.*

Ausbildung des Lötspalts:

Von besonderer Bedeutung für die ***Fehlerfreiheit*** *einer Lötverbindung ist die* ***Spaltbreite****. Diese beeinflusst neben der* ***Festigkeit des Grundwerkstoffs und der Größe der Lötfläche*** *die* ***Zug- und Scherfestigkeit*** *der Lötverbindung (Diagramme oben). Für optimale Festigkeiten ist eine bestimmte* ***Mindestspaltbreite*** *erforderlich die gewöhnlich um 0,1 mm liegt.* ***Spaltbreiten von wenigen hundertstel Millimetern*** *sind meist zu eng, sodass Lötfehler entstehen. Spaltweiten von mehreren zehntel Millimetern bringen keine Verbesserung der Festigkeit sondern meist einen (leichten) Abfall. Es kommt also darauf an, die* ***optimale Spaltbreite*** *zu finden und beim Lötprozess einzuhalten.*

Der Lötspalt kann sich trotz richtiger Einstellung vor der Lötung während des Lötvorgangs unzulässig verändern. Ursachen für die Veränderung können Wärmedehnungen sein. Sie entstehen infolge ungleichmäßiger Erwärmung oder unterschiedlichen ***Wärmedehnungseigenschaften.*** *Das kann an den verschiedenen zu verlötenden Grundwerkstoffen oder an Unterschieden zwischen Bauteil und* ***Lötvorrichtung*** *liegen. Auch Verzug, wenn sich der* ***Eigenspannungszustand*** *verändert, kann den Lötspalt unzulässig beeinflussen.* ***Ungleichmäßige Erwärmung oder Abkühlung*** *kann zusätzlich* ***in der Lötung hohe Eigenspannungen*** *erzeugen. So „eingefrorene“ Wärmedehnungsunterschiede sind in der Lage, die (Schwing-)Festigkeit der Verbindung stark abzusenken oder unzulässigen Verzug in der Fertigung und/oder im Betrieb auszulösen.*

Zu kleine Lötspalte:

Diese können sich auf mehrfache Weise negativ auswirken.
Wird ***nicht genügend Flussmittel*** *an die Verbindungsflächen gelassen, sind die Folge* ***Bindefehler,*** *weil Oxide nicht restlos gelöst werden (Lit. 12.2.1.4-18). Die gelösten Oxide verunreinigen das Flussmittel. Damit steigt dessen Zähigkeit und die Oberflächenspannung. So werden* ***Flussmitteleinschlüsse*** *begünstigt. Deshalb sollte bei engeren Lötspalten auch die* ***Lötspaltlänge*** *kürzer sein (Bild 12.2.1.4-4). Erfolgt das Löten in* ***reduzierenden Gasen,*** *reicht bei* ***sehr engen Spalten*** *der Gasaustausch nicht aus, um die Oxide zu reduzieren und zu entfernen. Veränderungen der Lotzusammensetzung infolge von* ***Diffusionsvorgängen*** *mit dem Grundwerkstoff werden umso merklicher je kleiner die Spaltbreiten sind. So kommt es zum* ***Anstieg der Lotviskosität.*** *Das führt* ***zum Spaltende hin verstärkt zu Bindefehlern****.*

© Axel Rosemann - Turbomaschinen - Lehrschulmeisterlaboratorium

Lötspalt, Rauigkeit und Festigkeit des Grundwerkstoffs beeinflussen entscheidend die Festigkeit einer Lötverbindung. Eine Vergrößerung der Lötfläche kann sogar die Belastbarkeit einer Lötung absenken.

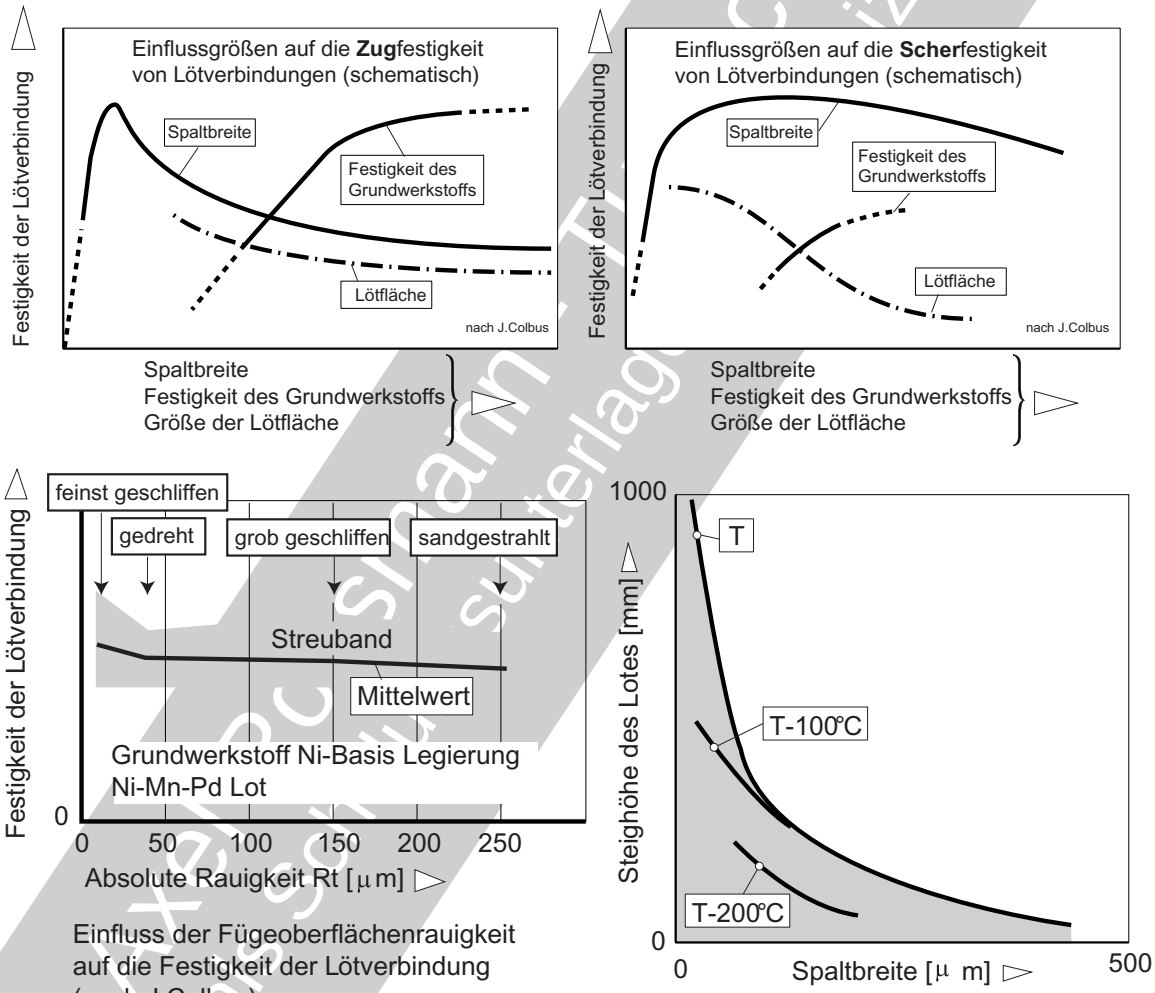


Bild 12.2.1.4-3

Zu weite Lötspalte:

Mit steigender Spaltbreite fällt die Kapillarwirkung stark ab (Diagramm unten rechts, Bild 12.2.1.4-4). Zu weite Lötspalte verhindern die Ausbildung der zum Löttransport ***notwendigen Kapillarkräfte****, insbesondere wenn das Lot entgegen der Schwerkraft steigen muss. Der nichtausgefüllte Lötspalt bildet* ***Hohlräume****. Anzustreben ist eine gleichmäßige Spaltbreite ohne örtliche Erweiterungen. Schießt das Lot in den Engstellen vor und umgibt die Erweiterung, kommt es zu* ***Bindefehlern und/oder Gas- bzw. Flussmitteleinschlüssen*** *(Bild 12.2.1.4-4). Mit Hochtemperaturloten auf Ni-Basis können Steighöhen über 900 mm bei Spaltbreiten unter 50 µm und Löttemperaturen um 1200°C erreicht werden (Diagramm unten rechts, Lit. 12.2.1.4-6).*

Topographie der Lötflächen:

Die erzielbare Verbindungsfestigkeit einer Lötung hängt u.a. von der Oberflächenstruktur der Lötflächen ab. So steigt interessanterweise die Festigkeit mit der Glätte der Oberfläche. Die ***Oberflächenrauigkeit*** *soll also* ***möglichst niedrig*** *liegen (Diagramm unten links, Lit. 12.2.1.4-11). Die Vorstellung einer Verzahnung wie bei thermischen Spritzschichten ist also irreführend.* ***Riefen*** *(z.B. von der spanenden Bearbeitung)* ***quer zur Lotausbreitungsrichtung*** *und bewusst strukturierte Oberflächen (Lit. 12.2.1.4-10), quer gerändelt oder ungerichtet, behindern den Lotfluss und sollten vermieden werden.*

Bild 12.2.1.4-4: *Für die Qualität einer Lötung in Abhängigkeit von der* ***Spaltfüllung*** *sind neben der Spaltbreite (Skizze oben rechts) und Bindeflächentopografie (Bild 12.2.1.4-3)* ***Vorgänge zwischen Lot und Grundwerkstoff*** *von entscheidender Bedeutung. Dabei ist anzumerken, dass die Benetzung des Grundwerkstoffs vom Lot nicht mit der Kapillarwirkung des Lötspalts gleichzusetzen ist.*

Die benetzende Wirkung des Lots ist vom Benetzungswinkel (Bild 12.2.1.4-5) und der Steighöhe (Diagramm unten links) charakterisiert. Sie wird insbesondere von ***Oxiden auf den Lötflächen*** *bestimmt und ist für die Bindung des Lots verantwortlich. Aus diesem Grund sind* ***oxidentfernende Vorbehandlungen*** *und das* ***Verhüten von Oxidation*** *vor und während des Lötens besonders wichtig. Für die Oxidentfernung werden, besonders* ***beim Löten an Luft, Flussmittel*** *angewandt. Sie enthalten Kombinationen von Bor-, Fluor- und Chlorverbindungen. Diese aggressiven Zusätze können sich als Rückstände in nachfolgenden Fertigungsschritten und/oder im Betrieb für die Bauteilfestigkeit als äußerst gefährlich erweisen (Bild 12.2.1.4-17).* ***Ofenlötungen*** *erfolgen dagegen häufig in reduzierender Atmosphäre, im Vakuum oder Schutzgas.*

Das Flussmittel wird von den gelösten Oxiden verändert. Gewöhnlich tritt eine ***Viskositätserhöhung und ein Anstieg der Oberflächenspannung ein****. Im ungünstigen Fall wird das Flussmittel von der Lotfront nicht mehr verdrängt. Zwangsläufig entstehen so Bindefehler in Form von* ***Flussmittelnestern*** *(Skizze Mitte rechts).*

Ein ähnlicher Effekt wird auch beim Lot beobachtet. Die ***Reaktion des Lots mit dem höherschmelzenden Grundwerkstoff*** *erfolgt in Flussrichtung des Lotes mit einer zunehmenden Veränderung der Lotzusammensetzung (Skizze oben rechts). Dies hat eine Viskositätserhöhung mit* ***Verschlechterung der Fließfähigkeit und Benetzungsfähigkeit*** *zur Folge. Längere Lötspalte können dann nicht mehr ganz ausgefüllt werden. Insbesondere am „Lötnahtende“ (in Lotflussrichtung gesehen) treten dann Bindefehler auf.* ***Veränderungen der Loteigenschaften*** *mit steigender Kontaktzeit zum Grundwerkstoff sind auch ein Grund für schlechte Lötergebnisse bei* ***wiederholten*** *(Reparatur-)* ***Lötungen****.*

Häufig müssen die Arbeitstemperaturen mit jedem Lötzyklus deutlich gesteigert werden. So kommt es bei Hochtemperaturlötungen nicht selten zu ***Anschmelzungen*** *des Grundwerkstoffes. Die Folge sind „****Auswaschungen****“, sog.* ***Loterosion*** *(Bild 12.2.1.4-10). Das kann dünne Querschnitte gefährlich schwächen. Die Gefahr einer* ***Anschmelzung kann auch an zur Lötnaht entfernten Bauteilbereichen*** *auftreten. Ursache sind aus dem Lot abdampfende, schmelzpunktabsenkende Bestandteile.*

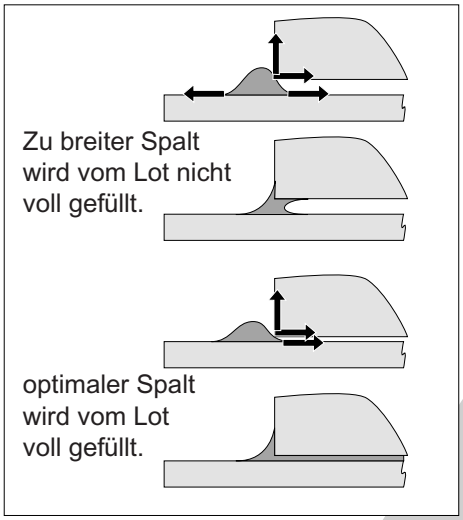
Eine besondere Art werkstoffbedingter Lötfehler tritt bei ***Lötverbindungen zweier verschiedener Grundwerkstoffe*** *auf. Diese Gefahr besteht selbst dann, wenn jeder dieser Werkstoffe mit sich selbst gut verlötbar ist. Zu solchen,* ***schwer lötbaren Werkstoffkombinationen*** *gehören Stähle die mit Al, B, oder Zr-haltigen Werkstoffen (z.B. Al-Bronzen) ver-*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.4-10

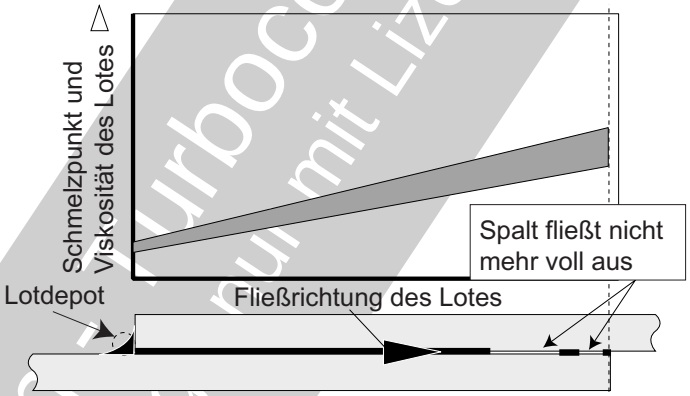
© Axel Rossmann - Turbocoast
Abschlussarbeiten mit Lizenz

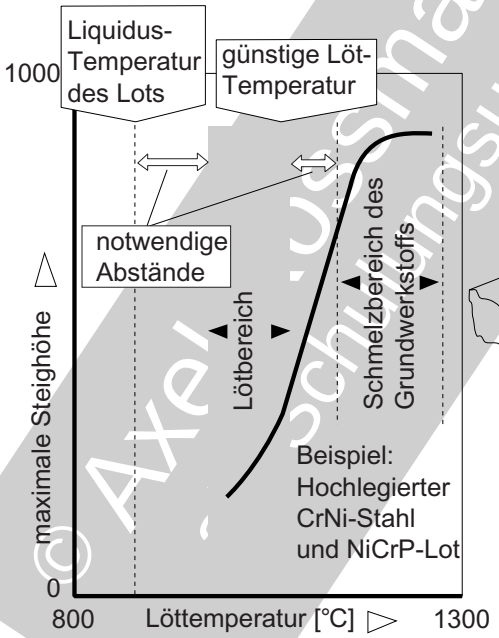
Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

Die Annahme, dass Lötungen ganzflächig binden wird sich meist als falsch erweisen.

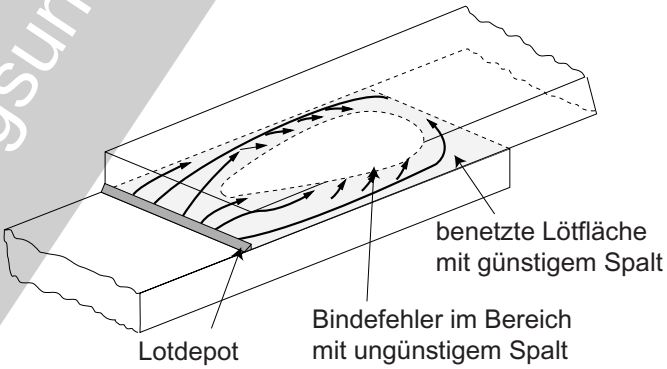


Schmelzpunkt, Viskosität und Oberflächenspannung steigen beim Anlegieren des Lotes mit dem höher schmelzenden Grundwerkstoff.





Nicht ausreichende Planizität der Auflageflächen bedingt Bindefehler in der Lötung.



Röntgenaufnahme einer gelöteten Rohrmuffe
(Grundmaterial: Stahltyp Cr Ni 18/10, Lot: Ag)

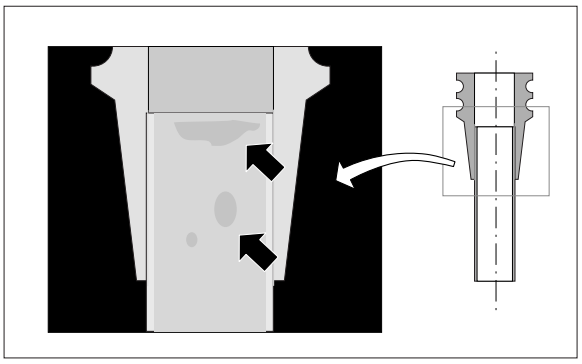


Bild 12.2.1.4-4

© Axel Hussmann - Turbocons
Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

Fortsetzung von Seite 12.2.1.4-8

bunden werden. Von diesen Lötverbindungen sind nur sehr geringe Festigkeiten zu erwarten. Das Lot nimmt über Diffusionsvorgänge Aluminium aus dem Werkstoff auf. Aluminium wird so zur Stahlfläche transportiert. Hier bildet sich ein Aluminiumoxidbelag der die Bindung verhindert. Abhilfe können ***Beschichtungen des Stahlteils*** *(z.B. galvanisch, aufgedampft) oder Diffusionsbarrieren in Folienform die eingelötet werden, bringen. Für bestimmte Werkstoffe wie* ***Titanlegierungen*** *unterliegt die Verbindungsfestigkeit Kompromissen. Eine große* ***Sprödigkeit von Lötungen an Titan*** *ist in erster Linie auf die Bildung* ***spröder Phasen*** *zurückzuführen.*

Einfluss der Arbeitstemperatur auf die Qualität einer Lötung: *Im Diagramm unten links ist das typische Verhalten einer Lotschmelze, mit der Steighöhe als ein Benetzungsmaß, über der Temperatur aufgetragen.* ***Die Benetzung darf nicht mit der Kapillarwirkung des Lötspalts verwechselt*** *werden (Bild 12.2.1.4-5). Die Steighöhe wächst mit der Löttemperatur. Löttemperaturen an der oberen Grenze ermöglichen gewöhnlich höchstmögliche Fließwege. Sowohl Lot als auch Grundwerkstoff weisen, soweit es sich nicht um eutektische Legierungen handelt, einen* ***Schmelzbereich*** *auf. Dieser wird nach unten von der* ***Solidustemperatur****, bei der erste Phasen schmelzen, begrenzt. Die* ***Liquidustemperatur*** *zeigt das Erreichen des vollkommenen Schmelzzustands an. Die* ***Löttemperatur (Arbeitstemperatur)*** *sollte etwa in der Mitte des Schmelzbereichs (Schmelzintervall) von Lot liegen. Dies kann jedoch zu Problemen führen, wenn sich, wie bei vielen Hochtemperaturlötungen, die Schmelzbereiche von Grundwerkstoff und Lot überschneiden (Bild 12.2.1.4-8).*

Zu niedrige Arbeitstemperatur:

Die Bauteiltemperatur muss die Arbeitstemperatur des Lots erreichen. Diese befindet sich im Lötbereich (Arbeitsbereich) oberhalb der Liquidustemperatur, d.h. der Temperatur des voll aufgeschmolzenen Lots (Diagramm unten links). Liegt die Löttemperatur unter dem Lötbereich, kommt es wegen zu hoher Viskosität, Oberflächenspannung und schlechter Benetzung zu Lötfehlern Bild 12.2.1.4-7). Obwohl diese Forderung selbstverständlich sein sollte, ist sie in manchen Fällen nur sehr schwer einzuhalten. Unterliegt z.B. ein Bauteil aus einer Ni-Schmiedelegierung hohen Betriebstemperaturen (z.B. ein gelöteter Verdichterleitapparat der hinteren Stufen) kann es notwendig werden, ein artgleiches Hochtemperaturlot zu verwenden. Dessen ***Löttemperatur kann den Grundwerkstoff z.B. durch Rekristallisation und Kornwachstum mit einem Schwingfestigkeitsabfall*** *unzulässig schädigen. Weil die Warmfestigkeit alternativer, nicht artgleicher Werkstoffe unzureichend ist, muss gegebenenfalls an der unteren Löttemperaturgrenze gearbeitet werden. Damit hat das Lot keine optimalen Fließeigenschaften und kleinste Temperaturschwankungen führen zu Ausschuss. Im Zweifelsfall muss die* ***Arbeitstemperatur vor dem Einsatz im Fertigungsprozess mit bauteilrelevanten Versuchsbedingungen ermittelt*** *werden. Bei* ***Nachlötungen*** *von fehlerhaften Lötverbindungen muss meist die Arbeitstemperatur angehoben werden, weil das Lot auf Grund von Diffusionsvorgängen und Abdampfung seinen Schmelzpunkt bereits beim ersten Lötvorgang erhöht hat.*

Zu hohe Arbeitstemperaturen (Überhitzen) und/oder zu lange Lötzeiten („Überzeiten“):

Bei Lötungen mit Flussmittel an korrosionsbeständigen Stählen reagiert das Flussmittel einerseits mit dem Luftsauerstoff und anderseits mit dem in Oxiden gebundenen Sauerstoff an der Werkstückoberfläche. Bei zu langer oder zu hoher Temperatureinwirkung können auf dem Grundmaterial unlösliche Oxide entstehen, welche die Benetzung mit Lot verhindern (Bild 12.2.1.4-5). Das Lot ballt sich zusammen.

© Axel Rossmann - Turbocontrol
als Schulumsunterlage nur mit Lizenz

Die Zugabe frischen Flussmittels bringt dann keine Abhilfe.
Spezielle Flussmittel können den beschriebenen Effekt weitgehend verhindern.
Die maximal mögliche Arbeitstemperatur bzw. die Glühtemperatur einer anschließenden Diffusionsglühung ist vom Grundwerkstoff vorgegeben. Die Glühung dient dem Abbau spröder Phasen und einem Ausgleich von Legierungsbestandteilen in der Lötung und zum Grundmaterial. Dieses darf keine unzulässigen Gefüge- und Festigkeitsveränderungen erfahren.
Ein weiteres Problem sind Schädigungen im Lötnahtbereich in Form zu tiefer Diffusion und „Loterosion". Zu hohe Temperaturen führen zu merklichen Veränderungen an Lot und Grundwerkstoff. Die im Lot gelösten Legierungsbestandteile des höher schmelzenden Grundwerkstoffes ***heben den Lotschmelzpunkt*** *an. Der Grundwerkstoff kann infolge breiter Diffusionszonen verspröden (Bild 12.2.1.4-9). Dieses Problem verstärkt sich mit der Breite des Schmelzintervalls. Hier erhält die Aufheizgeschwindigkeit eine besondere Bedeutung, denn die Lotschmelze wirkt länger auf den Grundwerkstoff ein. Bei Loterosion führen Anschmelzvorgänge zum Abtrag und damit einer Schwächung der Querschnitte des Grundmaterials. Eine solche Schädigung macht sich besonders bei dünnwandigen Bauteilen wie z.B. Kühlluftröhrchen aus Blech und Wabendichtungen bemerkbar (Bild 12.2.1.4-10). Ein Abtrag im Zehntelmillimeterbereich ist für Bleche an Honeycombdichtungen und an Einsätzen in Turbinenleitschaufeln bereits gefährlich. Brüche der Einsätze können im Betrieb eine Überhitzung mit umfangreichen Folgeschäden auslösen.*
Werden ***hohe Duktilitäten*** *gefordert, bleiben häufig nur noch Lote auf Gold- oder Palladiumbasis als Alternative.*

*Wenn die Arbeitstemperatur im Bereich der Erweichungstemperatur des Grundwerkstoffes liegt, kommt es zu erosionsartigen Auswaschungen am Grundwerkstoff (***Loterosion***). An dünnwandigen Bauteilen führt das zu unzulässiger Schwächung (Bild 12.2.1.4-10). Ein weiterer Schaden sind größere* ***Anschmelzungen*** *des Bauteils auf Grund örtlich zu hoher Temperaturen oder abgesenktem Schmelzpunkt. Deformationen o. Rissbildung sind die Folgen (Bild 12.2.1.4-11). Diese Gefahr besteht besonders bei den hochwarmfesten Ni-Basis-Gusslegierungen, die typischerweise einen relativ niedrigen Schmelzpunkt aufweisen.*

Zu langsame Erwärmung:

In einem Lot mit mehreren Gefügekomponenten wird zuerst die niedrigstschmelzende verflüssigt. Dieser Bestandteil kann dann vor Erreichen der Arbeitstemperatur bereits in den Lötspalt eindringen. Damit ***erhöht sich die Schmelztemperatur bzw. die Viskosität des verbleibenden Lotrests****. Das kann dazu führen, dass die Arbeitstemperatur nicht mehr ausreicht, um ein Ausfüllen des Lötspalts zu gewährleisten (Skizze oben rechts).*

Merksatz:

Wenn eine **Zeichnung Angaben** über die Mindestbindefläche enthält, ist diese an allen gelöteten Teilen zu überprüfen, d.h.

- Die **Bindefläche** muss messbar und dokumentierbar sein.
- Es muss ein **seriengeeignetes Prüfverfahren** zur Verfügung stehen.

Sind diese Voraussetzungen nicht gewährleistet, können solche Forderungen nicht gestellt werden. Ein Auftragnehmer sollte derartige Forderungen ablehnen.

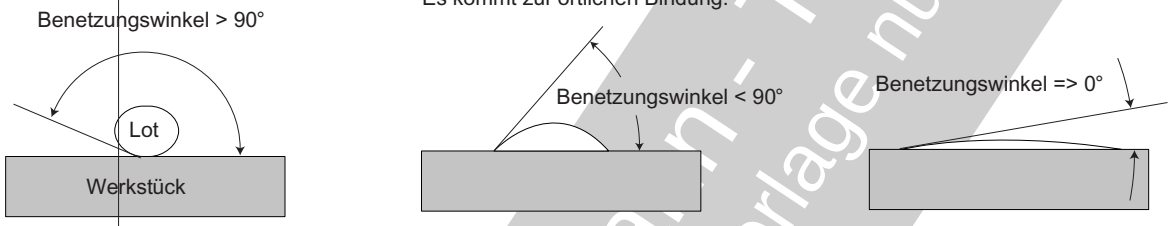
© Axel Poeschmann - Turbocam Verlag - Auszugsweise nur mit Genehmigung

Zwischen Lotnahtkontur und Lötbedingungen besteht ein Zusammenhang. Umgekehrt lassen sich ebenfalls Schlüsse ziehen.

Werkstücktemperatur deutlich unter der Solidustemperatur des Lots. Ein Lottropfen bleibt als lose Kugel liegen, d.h. es erfolgt keine Bindung.

Auftragslöten (Beschichten): Werkstücktemperatur dicht unter der Solidustemperatur des Lots. Ein Lottropfen heizt den benachbarten Grundwerkstoff über die Solidustemperatur des Lotes auf. Es kommt zur örtlichen Bindung.

Spaltlöten (Lötnaht im Spalt): Werkstücktemperatur mindestens Solidustemperatur des Lotes oder darüber (Arbeitstemperatur). Das Lot breitet sich aus und bindet großflächig.



Einfluss der Lötatmosphäre auf den Benetzungswinkel

Grundwerkstoff 10% Cr-Stahl, Lot BNi-2 (Ni-Lot mit B und Si), Arbeitstemp 1115°C 10 min.

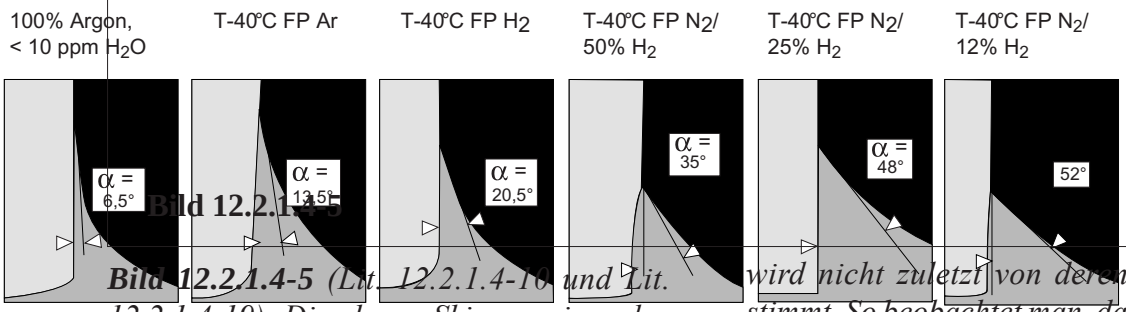


Bild 12.2.1.4-5

Bild 12.2.1.4-5 *(Lit. 12.2.1.4-10 und Lit. 12.2.1.4-19): Die oberen Skizzen zeigen den Zusammenhang von Benetzung und Bindung. Kennzeichnend ist der Benetzungswinkel in Abhängigkeit von der Bauteiltemperatur. Im Fall oben links erstarrt der Lottropfen bevor eine Bindung einsetzen kann. In der Mitte ist der Fall dargestellt, bei dem das Lot die benachbarte Bauteiloberfläche über die Solidustemperatur des Lots aufheizt. Dabei erfolgt eine Bindung. Die Benetzung reicht jedoch für das Ausbreiten des Tropfens nicht, weil die umgebende Oberfläche noch zu kalt ist. Also ist die Benetzung der Flächen durch das Lot Voraussetzung für eine metallische Bindung. Die Benetzung einer Oberfläche wird nicht zuletzt von deren Behandlung bestimmt. So beobachtet man, dass* ***mit SiC abrasiv gestrahlte Oberflächen*** *eine deutlich bessere Benetzung und Fließfähigkeit von Ni-Loten zeigen als im Vergleich mit Al_2O_3 gestrahlte. Dies lässt sich mit der Beladung, d.h. verbliebenen* ***Strahlpartikelresten in der Oberfläche****, erklären. SiC reagiert bekannterweise heftig mit Ni-Schmelzen (Band 1, Bild 3-22). Verständlich ist auch, dass Oxidation oder Verunreinigungen die Benetzung merklich beeinflussen, ja verhindern können. Um diesen Effekt zu minimieren, werden* ***Flussmittel oder eine abgestimmte Lötatmosphäre*** *genutzt (Bild 12.2.1.4-4). Die Schliffbilder (Bildreihe unten) lassen den Einfluss der Lötatmosphäre auf den Benetzungs-*

winkel und damit auf den Lötprozess erahnen. Mit ***gezielter Beeinflussung der Atmosphäre lässt sich ein Lötprozess, dessen Arbeitstemperatur in engen Grenzen vorgegeben ist, optimieren****.*
Damit erhält auch die ***Reinheit des Schutzgases*** *eine besondere Bedeutung. Sie kann an der Bauteiloberfläche zu wünschen übrig lassen, obwohl das Gas beim Eintritt in den Ofen die vorgeschriebenen Werte aufwies. Ein scheinbar gutes Vakuum kann bei starken Vakuumpumpen auch bei unzulässiger Leckage erhalten bleiben. In diesem Fall steht genügend Sauerstoff für eine unzulässige Oxidation zur Verfügung.* ***Entstehungsmöglichkeiten für Verunreinigungen*** *und die Beeinträchtigung der Reinigungswirkung einer Schutzgasglühung:*

- ***Eindringen von Außenluft****, auch während des Abkühlvorgangs.*
- *Einsatz des Lötofens für unterschiedliche Zwecke. Dazu gehören Wärmebehandlungsverfahren (Nitrieren, Einsatzhärten, Diffusionsbeschichten) mit unterschiedlichen Hilfsstoffen (z.B. Abdeckmitteln) und Atmosphären (Stickstoff, aufkohlende Atmosphäre).*

*Die „****Benetzungstemperatur****“ ist* ***auf den Grundwerkstoff bezogen*** *und wird erreicht, wenn ein Lottropfen eine Bindung erfährt. Sie kann unter der Arbeitstemperatur liegen, wenn das Lot den Grundwerkstoff noch örtlich ausreichend aufheizt. Dieses Löten wird auch als* ***Schweißlöten*** *oder* ***Fugenlöten*** *bezeichnet und ist im Triebwerksbau lediglich für den* ***Auftrag von Lotschichten*** *(z.B.* ***Anstreifschichten*** *für Labyrinthe) und thermische Spritzverfahren von Relevanz. Verständlicherweise hängt die Benetzungstemperatur von Wärmeleitung und Wärmekapazität der Fügeflächen ab. Unter „****Bindetemperatur****“ versteht man die untere Grenze der „Benetzungstemperatur“. Sie wird von der Werkstückoberfläche benötigt, um einen auftreffenden Tropfen gerade noch zu binden. Die mittlere Skizze oben zeigt diesen Fall.*

Der Tropfen erhitzt den Grundwerkstoff über die Solidustemperatur des Lots, benetzt und bindet. Er kann sich jedoch nicht ausbreiten, weil die umgebende Werkstückoberfläche noch zu kalt ist.
*Das Löten als Verbindungsverfahren wird als „****Spaltlöten****“ bezeichnet. Das Lot schießt in ausreichender Intensität in den Spalt wenn die Voraussetzung erfüllt ist, dass der Grundwerkstoff die Arbeitstemperatur erreicht hat (Skizze oben rechts).*

Es sei noch darauf hingewiesen, dass die ***kapillare Wirkung des Spalts nicht mit der Benetzung gleichzusetzen*** *ist. Sie hängt außer von der Benetzung (****Adhäsionseinfluss****) auch von der* ***Oberflächenspannung (Kohäsionseinfluss****) der Lotschmelze ab. Für eine Kapillarwirkung müssen also die Adhäsionskräfte der Benetzung des Lots zur Wand größer sein als die Oberflächenspannung im Lot infolge der Kohäsionskräfte. „****Kapillarer Fülldruck****“ bezeichnet die Kraft, mit der das Lot in den Spalt gesaugt wird. Dieser ist außer von der Spaltform besonders von der* ***Spaltweite*** *beeinflusst. Mit wachsender Spaltweite fällt der Fülldruck stark ab. Damit begünstigen zu weite Spalte Lötfehler (Bild 12.2.1.4-4).*

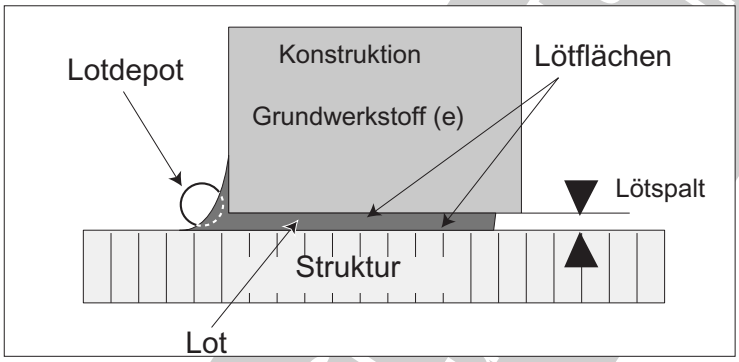
© Axel Rosemann - Turboconsult
als Schulungsinterlage nur mit Lizenz

Gesichtspunkte für die Auswahl eines Lots.

- Fertigung:
  - Kosten des Lots
  - notwendige Anlagen
    - Schutzgas
    - Vakuum
  - Spaltbreitentoleranzen
  - Qualitätsforderungen an die Fügeflächen
    - Vorbehandlung

- Grundwerkstoff (e):
  - Schädigung
    - unzul. Gefügeänderung
    - Rekristallisation
  - Schmelzintervall
  - eventuelle Beschichtungen außerhalb der Lötung
  - Benetzbarkeit

- Konstruktion:
  - Lotform
    - Pulver
    - Paste
    - Folie
    - Haftstreifen
  - Lotdepot
    - Anordnung
    - zu verbindende
  - Struktur
  - Verzug, Steifigkeit
  - Lötspalt
    - Kontur
    - Breite
    - Länge
    - Fläche



- Loteigenschaften
  - Benetzungseigenschaften
    - Steighöhe
  - notwendige Umgebung:
    - Flussmittel,
    - Vakuum,
    - Wasserstoff
  - Zähigkeit /Versprödung Bildung spröder Phasen
  - Erstarrungsintervall
  - Arbeitstemperatur
  - Abdampfung
  - Diffusion
  - Loterosion

- Eigenschaften der Lötung:
  - vorgesehene Betriebs-temperatur
  - Festigkeit
    - Warmfestigkeit
    - Kriechfestigkeit
    - Schälfestigkeit
    - Schwingfestigkeit
  - Zähigkeit
  - Korrosionseigenschaften
    - Elementbildung
    - Spannungsrisskorrosion
  - Neigung zu Lötrissigkeit (LME)

- Lötflächen:
  - Topografie
    - Rauigkeit
    - Orientierung
    - Behandlung (z.B. Strahlen)
  - Struktur (z.B. Waben)

! Bemerkung: Die Einflüsse bzw. Gesichtspunkte wirken sich wechselseitig aufeinander aus!

Bild 12.2.1.4-6

© Axel Rossmann Turboconsulting
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Bild 12.2.1.4-6: *Die* ***Auswahl eines Lots*** *hat eine Vielzahl Kriterien zu berücksichtigen. Diese ergeben sich aus den Anforderungen und sind den folgenden Hauptgruppen zuordenbar:*

- *Fertigung bzw. Lötprozess,*
- *Lötflächen,*
- *Konstruktion bzw. Gestaltung der Lötung und des Umfelds.*
- *Zu verbindende Grundwerkstoffe,*
- *Lote, Eigenschaften und Betriebsverhalten.*

Diese Einflüsse und Anforderungen wirken untereinander wechselseitig. Damit wird die ***Lotauswahl zur komplexen Aufgabe*** *und erfordert ausreichend Erfahrung.*
Auf einige Anforderungen soll nun genauer eingegangen werden.

Fertigung und Lötflächen: *Kosten des Lots sind nicht zu unterschätzen. Ein Beispiel sind* ***Gold- oder Palladiumlote,*** *die sich mit ihrer Zähigkeit bei hoher Warmfestigkeit und niedrigerer Arbeitstemperatur gegenüber Ni-Loten auszeichnen. So wird die Gefahr einer unzulässigen Gefügeveränderung des Grundwerkstoffs minimiert. Deshalb kommen diese Lote bei aus Schmiedewerkstoffen gefügten Leitapparaten (Bild 12.2.1.4-1) hinterer Verdichterstufen zum Einsatz. Auch die Ansprüche an notwendige Öfen, gegebenenfalls mit Vakuumanlagen, sind ein Kostenfaktor. Kostenwirksam sind auch enge Spalttoleranzen und hohe Fügeflächenqualität die mit der Fließfähigkeit, Spaltfüllung und Spaltüberbrückung des Lots zusammenhängen. Diese Eigenschaften (Bild 12.2.1.4-4) verlangen besondere Sauberkeit und Oxidfreiheit und eine günstige Topografie. Für eine optimale Festigkeit darf eine zulässige Rauigkeit nicht überschritten werden.*

Konstruktion bzw. Gestaltung der Lötung und des Umfelds: *Die Anordnung des Lotdepots (Bild 12.2.1.4-20 und Bild 12.2.1.4-21) bestimmt nicht zuletzt die Gestalt in der das Lot zum Einsatz kommt. Darüber hinaus muss das Lot für die vorgesehene Lötfläche und die Form des Lötspalts geeignet sein (Bild 12.2.1.4-20).* ***Bei Folien die einen Binder enthalten,*** *muss der Austritt des flüchtigen Anteils aus dem Lötspalt gewährleistet werden (Lit 12.2.1.4-1). Der Volumenausgleich für den Binder ist mit einer* ***Lotnachspeisung*** *von außen auszugleichen.* ***Ganzmetallfolien*** *lassen ebenfalls Lotmangel entstehen, weil sie Rauigkeiten, anders als zähe Pasten, nicht ausgleichen können. Ein zusätzlicher Mangel ist die auf Grund der blechartigen Steifigkeit* ***schlechte Anformbarkeit****, besonders an sphärisch gekrümmte Flächen. In dieser Beziehung verhalten sich* ***Folien aus amorph erstarrtem Lotmaterial*** *günstiger. Dabei unterstützt ein* ***Vakuum*** *die restlose Verdampfung des Binders besser als eine* ***Schutzgasatmosphäre****.*
Steife Konstruktionen können bei spröden Loten mit Eigenspannungen während und nach dem Lötprozess Rissbildung auslösen. Das gilt auch für den späteren Betrieb. ***Wärmespannungen*** *(****Thermoermüdung****) können an spröden Loten leicht Risse auslösen (Bild 12.2.1.4-19).*
Die Festigkeitsauslegung im Rahmen der Konstruktion bestimmt über die angenommenen Betriebsbelastungen die erforderliche Mindestfestigkeit der Lötverbindung. Damit wird über den Lottyp, die Gestaltung der Lötflächen sowie die Lage der Lötung am Bauteil entschieden. Natürlich ist auf eine möglichst niedrige Beanspruchung und die Vermeidung einer ***Schälbelastung*** *zu achten (Bild 12.2.1.3.4-18 und Bild 12.2.1.3.5-7).*
Wenn eine Lötnaht ***nicht diffusionsbeschichtet*** *werden darf, kann ihre* ***Lage am Bauteil*** *von dieser Forderung (****Abdeckungsmöglichkeit****) bestimmt sein (Bild 12.2.1.4-16).*

Zu verbindende Grundwerkstoffe: *Der Arbeitsbereich des Lots richtet sich nicht zuletzt nach den Löttemperaturen die der* ***Grundwerkstoff ohne Schädigung*** *wie Rekristallisation, Kornwachstum oder Festigkeitsverlust er-*

© Verlag Dashofer - Tutorium - Lehrgangsunterlagen - Nur zum Unterricht

trägt. Die Legierungszusammensetzung gibt den Lottyp unter den Gesichtspunkten möglichst hoher Festigkeit unter Betriebsbedingungen (z.B. Thermoermüdung, Kriechen) von Diffusion und Loterosion vor. Eine ***hohe Grundwerkstofffestigkeit bietet auch das Potenzial einer hohen Festigkeit der Lötverbindung*** *(Bild 12.2.1.4-3).*
Wärmedehnung und ***Elastizitätsmodul*** *der Lötflächen bestimmen die* ***Eigenspannungen*** *in der Lötung während des Lötvorgangs und im Betrieb. Ungünstige Verhältnisse können bei der Bildung spröder Phasen in zu dicken Lotnähten eine Rissbildung unterstützen(Bild 12.2.1.4-9). Die Lotwahl hat sich gegebenfalls nach der* ***Duktilität*** *zu richten.*
Wo der Grundwerkstoff mit einer Beschichtung geschützt werden muss die auch das Lot umfasst, ist Kompatibilität mit dem Lot zu gewährleisten (Bild 12.2.1.4-16).

Loteigenschaften und Betriebsverhalten: *Lote des Triebwerksbaus müssen wie andere Werkstoffe* ***zugelassen*** *sein. Damit ist die Zahl der* ***verfügbaren Lote*** *bereits eingeschränkt.*
Allgemein sind gute Fließ- und Benetzungseigenschaften auf möglichst vielen Werkstoffen erwünscht. Ein Grund für diese Universalität ist die ***Lagerhaltung, Zulassung und Logistik****. Damit liegt eine Beschränkung auf möglichst wenig Lottypen nahe. Die Anwendung von Flussmitteln bei nicht artgleichen Loten birgt Risiken wie* ***Korrosionsgefahr*** *in Anwesenheit von* ***Flussmittelrückständen*** *(Bild 12.2.1.4-17). Ein weiteres Handicap sind* ***Bindefehler an eingeschlossenem Flussmittel*** *(Bild 12.2.1.4-4). Artgleiche Hochtemperaturlote werden dagegen im Vakuum, unter Schutzgas (z.B. Argon) oder Aktivgasen (z.B. Wasserstoff) verarbeitet.*
Nach Möglichkeit sollte das Korrosionsverhalten des Bauteils von der Lötung nicht verschlechtert werden. Eine Elementbildung zwischen Lot und Grundwerkstoff ist nach Möglichkeit zu vermeiden (Bild 12.2.1.4-17).
Das Oxidations- und Sulfidationsverhalten des Lotes und/oder benachbarter Zonen ist zu berücksichtigen, um die vorgesehenen ***Betriebslebensdauern von Heißteilen*** *zu gewährleisten.*
*Von einem guten Lot bzw. dessen Lötverbindung erwartet man eine möglichst gute Duktilität und hohe Festigkeit. Besonders bei „****Schälbeanspruchung****“(Bild 12.2.1.4-18) und Thermoermüdung sind diese Eigenschaften von Vorteil. Deshalb sollte gerade bei Hochtemperaturlötungen die* ***Duktilität*** *über einen möglichst weiten Temperaturbereich (insbesondere der Betriebstemperatur) und eine ausreichende Betriebszeit (Bildung spröder Phasen?) erhalten bleiben. Die Lötung muss weitgehend unabhängig von Reaktionen (Diffusionsvorgänge) zwischen dem Lot und dem Grundmaterial oder Gefügeveränderungen im Lot sein. Eine weitere Forderung ist eine* ***möglichst geringe Reaktion zwischen Lot und Grundwerkstoff****. Dies gilt für den Lötvorgang und eine Langzeitbeanspruchung unter Betriebstemperatur. Dazu gehört das* ***Eindringen des Lotes in Korngrenzen*** *(****Lötrissigkeit, LME****, Bild 12.2.1.4-14). Möglichst wenig Auflösung des Grundwerkstoffs, d.h. keine* ***Loterosion*** *und keine schädigenden Gefügeveränderungen wie die Bildung spröder Phasen.*
Weitere Forderungen an ein Lot sind gutes Spaltfüllungsvermögen, auch bei großen Spaltlängen und geringe Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen auf den Lötflächen. Beim Verbinden von porösen Metallen (z.B. Metallfilze) ist eine ausreichende Viskosität (Zähigkeit) der Schmelze erwünscht, um ein zu starkes Aufsaugen des Lots vom Metallfilz zu vermeiden (Bild 12.2.1.4-12).
Hochtemperaturlote:
Die Warmfestigkeit des Lotes muss sich in erster Linie nach den zu erwartenden Betriebstemperaturen richten.
Lote auf Nickelbasis und Kobaltbasis:
Zusätze von Metalloiden *wie Bor, Silizium und Phosphor ermöglichen technisch sinnvolle*

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

Löttemperaturen zwischen 1000 °C und 1200 °C (Lit. 12.2.1.4-6) von Loten auf Ni- und Co-Basis. Diese schmelzpunktabsenkenden Zusätze beeinflussen das Benetzungs- und Fließverhalten (Bild 12.2.1.4-4) positiv. Sie sind aber infolge von Hartstoffphasen für die Sprödigkeit dieser Lötverbindungen verantwortlich (Bild 12.2.1.4-7 und Bild 12.2.1.4-9).
Die ***Bruchdehnung*** *dieser Lote liegt gewöhnlich* ***unter 1 %*** *. Diese Sprödigkeit ist auf lotcharakteristische Hartstoffphasen zurückzuführen. Eine Duktilitätsverbesserung und damit auch eine Verbesserung der Verbindungsfestigkeit läßt sich bei konventionellen Hochtemperaturloten mit langen Lötzeiten oder nachfolgender Wärmebehandlung zum Abbau der Hartstoffphasen erzielen. Dieser Effekt ist umso deutlicher,* ***je kleiner die Lötspaltweite*** *ist (< 50 µm) und damit die Diffusionswege innerhalb der Lotschicht sind.*

Merksatz:

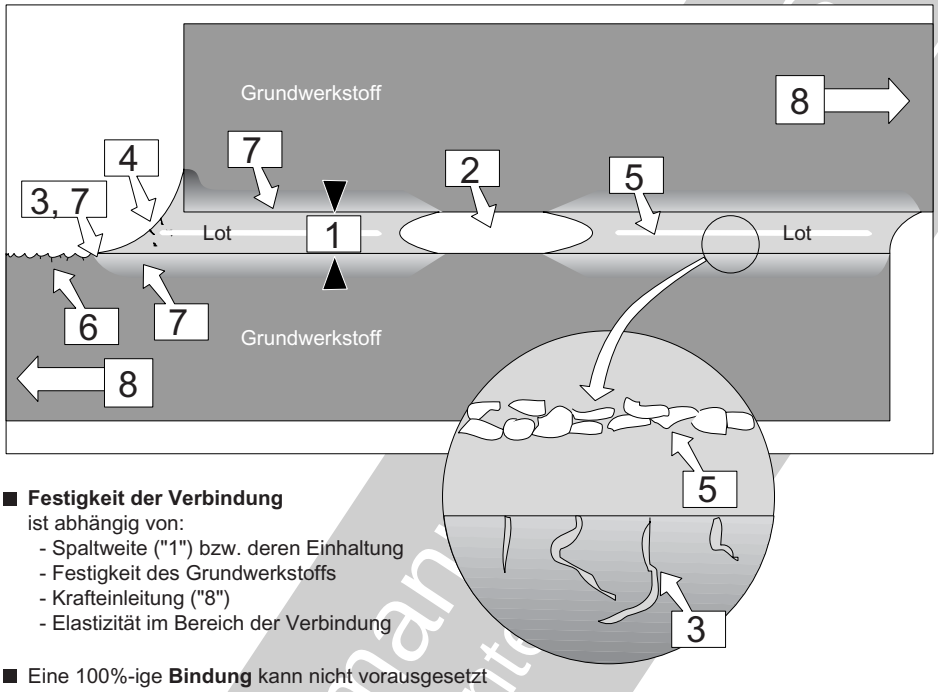
Lötfehler, die nicht mit ausreichender **Sicherheit zerstörungsfrei nachweisbar** sind, müssen als **Schwachstellen** (Band 1 Bild 3.2.2-1.1 und Bild 3.2.2-1.2) **in der Auslegung berücksichtigt** werden.

Verfahren die keine, an jedem Teil ausreichend sichere, zerstörungsfreie Prüfung zulassen, sind für die **Serienanwendung ungeeignet.** Sie dürfen nicht als Garantie einer nicht überschrittenen Fehlergröße herangezogen werden.

Hierzu gehört z.B. die stichprobenartige Untersuchung mit einem Elektronenmikroskop (REM) an einem Abdruck oder am Bauteil selbst.

© Axel Rossmann - T
als Schulungsunterl

Typische Schwachstellen an Lötungen, insbesondere Hochtemperaturlötungen.



- **Festigkeit der Verbindung** ist abhängig von:
  - Spaltweite ("1") bzw. deren Einhaltung
  - Festigkeit des Grundwerkstoffs
  - Krafteinleitung ("8")
  - Elastizität im Bereich der Verbindung
- Eine 100%-ige **Bindung** kann nicht vorausgesetzt werden. Die ungebundenen Bereiche ("2") hängen von vielen Einflüssen ab, und sind realistisch einzuschätzen. Ein seriengeeigneter Nachweis ist Voraussetzung.
- Lot dringt in **Korngrenzen** des Grundwerkstoffs ein ("5")und kann so dessen Schwingfestigkeit, insbesondere am Nahtende ("3") beeinflussen.
- Unvermeidliche **Mikrolunker und Mikrorisse** ("4") insbesondere an den Enden einer Lötnaht hängen von Lotart und Lötparametern ab. Die Zulässigkeit hängt von den seriengeeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren ab.
- Abhängig von Lötspalt, Lot und Lötparametern ist in Lötnahtmitte mit **spröden Phasen** ("5") zu rechnen. Diese beeinflussen die Festigkeitseigenschaften der Lötverbindung
- **Lotvorbereitung** kann die Festigkeit beeinflussen: Korngrenzenangriff ("6") durch Ätzen oder Flussmitteleinwirkung
- Diffusionszonen ("7") in den Grundwerkstoff beeinflussen dessen Festigkeit und Zähigkeit, insbesondere auch an den Nahtenden.

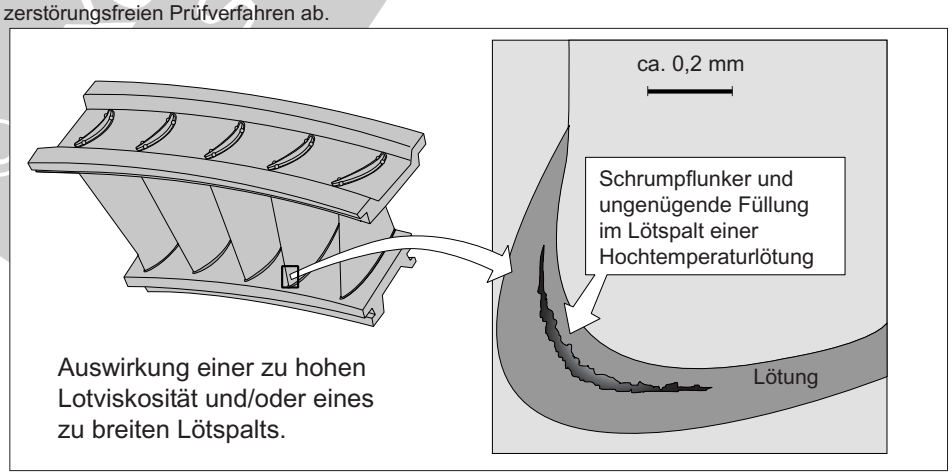


Bild 12.2.1.4-7

Bild 12.2.1.4-7: *Schwachstellen werden hier als auf Grund der technischen Machbarkeit akzeptierte Eigenschaften verstanden, die* ***in der Auslegung berücksichtigt*** *sind.*
Auch Lötungen weisen wie andere Technologien ***charakteristische Schwachstellen*** *auf. Diese lassen sich nicht mit ausreichender Sicherheit während des Fertigungsprozesses und/ oder durch eine zerstörungsfreie Prüfung vermeiden.*

„1“*: Unvermeidliche Wärmedehnungen, Verzüge und* ***Maßtoleranzen*** *können Variationen des Lötspalts bedingen. Davon kann auch die vom Spalt abhängige Mindestnahtfestigkeit betroffen sein (Bild 12.2.1.4-3).*

„2“*: Abhängig vom Einsatz eines Flussmittels oder einer Gasatmosphäre ist mit* ***Poren oder Flussmitteleinschlüssen*** *zu rechnen. Dies ist in den Zeichnungsforderungen und eventuell einem zerstörungsfreien Nachweis zu berücksichtigen (Bild 12.2.1.4-4).*

„3“ und „7“*: Eine bei Hochtemperaturlötungen verfahrensbedingt auftretende* ***Lotdiffusion*** *und* ***Loterosion*** *kann die Schwingfestigkeit gegenüber dem Grundwerkstoff deutlich vermindern. Besonders das Thermoermüdungsverhalten von Heißteilen kann davon betroffen sein. Deshalb sind solche Lötungen außerhalb merklich beanspruchter Bauteilbereiche zu legen.*

„4“*: Wenn man eine Lötnaht bei ausreichend starker Vergrößerung betrachtet, z.B. im REM, findet man nicht selten* ***Schrumpflunker,*** *die vorzugsweise eine längliche Erstreckung in Lötspaltrichtung haben. Man findet solche Schwachstellen in Lotanhäufungen, dort wo sich z.B. der Spalt nicht einhalten ließ. Ein Beispiel sind Kanten von eingelöteten Schaufelblättern in Verdichterleitapparaten (Rahmen unten). Sind solche „mikroskopischen“ Ungänzen* ***unterhalb der Erkennbarkeit mit einem Binokolar*** *üblicher Vergrößerung (10 x - 20 x) unvermeidbar, müssen sie als Schwachstellen definiert sein (siehe Merksatz auf Seite 12.2.1.4-17).*

„5“*: Abhängig von der Spaltweite ist bei Hochtemperaturloten wegen dem Anteil schmelzpunktabsenkender Elemente wie Bor und Silizium mit der* ***Bildung spröder Phasen****, bevorzug in Nahtmitte, zu rechnen (Bild 12.2.1.4-9). Damit kann sich die Lötnaht deutlich spröder als der Grundwerkstoff verhalten. Das begünstigt eine* ***Rissbildung*** *bei Belastungen im plastischen Bereich wie unter* ***Thermoermüdung****. Lässt der Grundwerkstoff eine Diffusionsglühung zu (Rekristallisation? Festigkeitsabfall?) kann die Versprödung abgebaut werden.*

„6“*: Bei der Verwendung von* ***Flussmittel*** *kann es prinzipbedingt während des Lötens auch zu einem* ***Ätzangriff benachbarter Oberflächen*** *kommen.*

„8“*: Wenn die Lötung in kritisch hoch beanspruchte Bauteilzonen gelegt werden muss, ist auf* ***Fail Safe Verhalten*** *und eine* ***einfache Inspektionsmöglichkeit*** *im Betrieb zu achten. Bei unvermeidlicher Rissbildung sollte dieser in eine niedrig beanspruchte Bauteilzone laufen und dort über ausreichend lange Zeit stehen bleiben. Diese Eigenschaften sind gegebenenfalls in* ***betriebsnahen Versuchen nachzuweisen****.*

Bild 12.2.1.4-8: *Für* ***Lötfehler*** *gilt wie für den Begriff „Fehler“ allgemein, dass sie im Gegensatz zu Schwachstellen (Bild 12.2.1.4-7) nicht zulässig sind. Sie liegen außerhalb von Spezifikationen und Zeichnungsforderungen.*
Es handelt sich damit um ähnliche, jedoch ausgeprägtere Mechanismen und Typen (Skizze oben) wie bei den in Bild 12.2.1.4-7 behandelten Schwachstellen. Zu Lötfehlern gehören, mit dem seriengeeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren nicht ausreichend sicher erkennbare ***rissartige Längsanzeigen****. Insbe-*

© Axel Bossmann - Turbocoursult
als Saunosunterlage nur mit Lizenz

sondere ***unter einem Binokular bei normaler Vergrößerung identifizierbare Risse*** *sind unzulässig.*
Die Nahtausbildung (Benetzungswinkel, Bild 12.2.1.4-5) kann ***Hinweise auf abweichende bedenkliche Lötbedingungen*** *wie eine zu niedrige Arbeitstemperatur oder Benetzungsprobleme geben.*
Bindefehler, *die den Anteil der Bindung auf unter 70 % der Fläche verringern, sollten nicht akzeptabel sein. Das gilt auch für mechanisch kaum belastete Dichtflächen von Rohrleitungen (Bild 12.2.1.4-4) die Flussmitteleinschlüsse aufweisen. Lötungen mit merklicher mechanischer Belastung sind entsprechend anspruchsvoller zu spezifizieren.*
Um auch bei ***Vakuumlötungen*** *Bindefehler zu vermeiden, ist es erforderlich, den* ***Austritt von Luft und Bindemitteln*** *aus dem Lötspalt über den benötigten Zeitraum zu ermöglichen (Lit. 12.2.1.4-1).*

Die untere Skizze zeigt Probleme die im Zusammenhang mit einer Lötung stehen, jedoch nicht notwendigerweise unmittelbar im Bereich der Lötung auftreten. Hierzu gehören:

Überhitzungsanzeichen am Grundwerkstoff: *Diese Probleme treten auf, wenn bei Hochtemperaturlötungen die Arbeitstemperatur nah an der Solidustemperatur eines gegossenen Grundwerkstoffs mit Seigerungen liegt. Es kommt dann zu örtlichen* ***Anschmelzungen****, auch in Form von „****Ausschwitzungen****" (Bild 12.2.1.4-11) mit einer erkennbaren Veränderung der Bauteiloberfläche.*

Gefügeveränderungen am Grundwerkstoff: *Es handelt sich an Schmiedelegierungen meist um* ***Kornwachstum*** *oder* ***Rekristallisation*** *bei hohen Löttemperaturen über längere Zeit.*
Treten an ausgehärteten Werkstoffen ***Lösungsglüheffekte mit Festigkeitsabfall*** *auf, die mit einer anschließenden Wärmebehandlung nicht wieder rückgängig gemacht werden, lässt sich das Festigkeitspotenzial des Grundwerkstoffs nicht voll nutzen. Das ist* ***bei der Auslegung zu berücksichtigen****.*

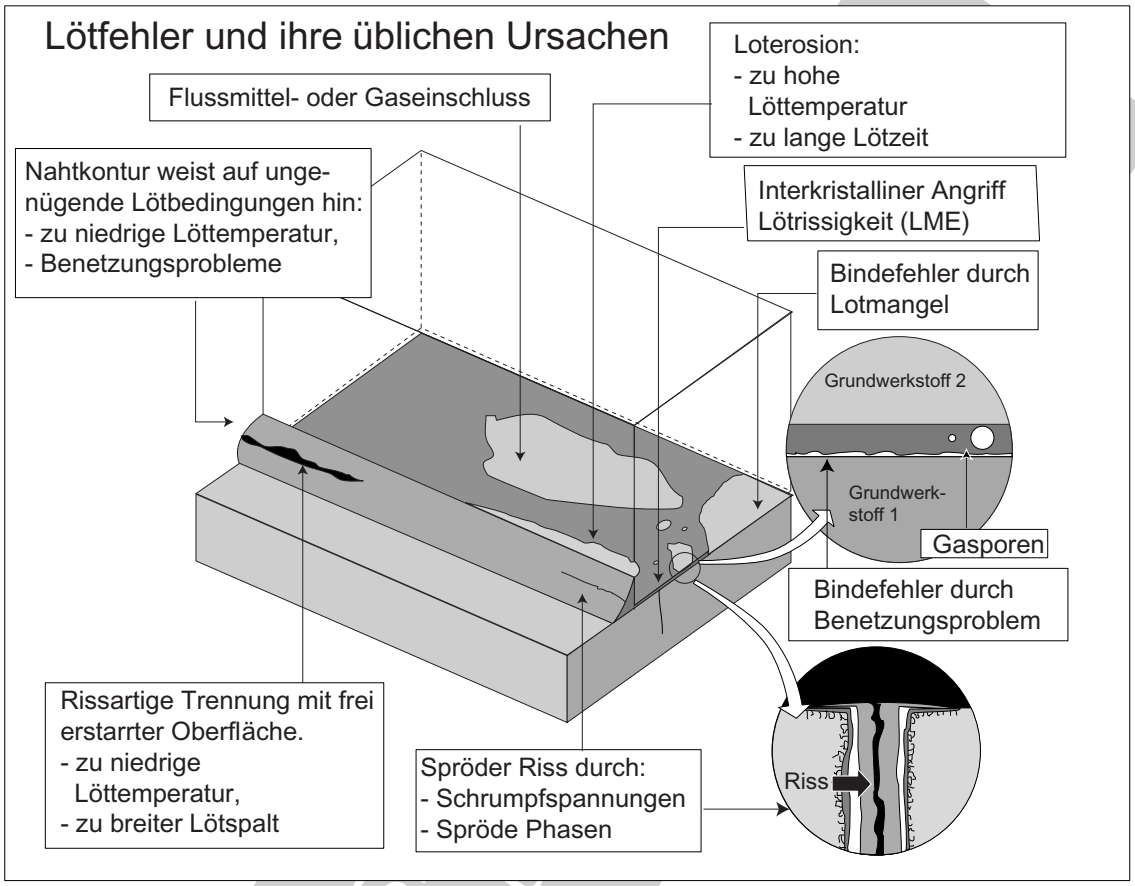
Lotablagerungen und Verunreinigungen der Bauteiloberfläche mit Lot *(Lotpulver, Lotspritzer). Die Folge können örtliche* ***Anschmelzungen*** *mit deutlichem Festigkeitsabfall sein. In hochbeanspruchten Bauteilzonen wie Tannenbaumfüßen von Turbinenrotorschaufeln sind solche Fehlstellen besonders gefährlich (Band 4, Bild 18.3-1 / -1.1 und Bild 18.3-2.1).*
Tropft Lot auf den Grundwerkstoff *wenn dieser unter hohen Zugspannungen steht, kann es zur* ***Lötrissigkeit*** *(LME) kommen (Bild 12.2.1.4-13, Bild 12.2.1.4-14 und Band 4, Bild 18.3-5,).*

Flussmittelrückstände *enthalten zur Entfernung von Oxiden auf der Bauteiloberfläche meist* ***aggressive Halogenverbindungen*** *(Chlor, Fluor). Verbleiben Reste des Flussmittels, können diese werkstoffabhängig* ***interkristalline Korrosion*** *und/oder bei ausreichenden Zugspannungen* ***Spannungsrisskorrosion*** *auslösen (Bild 12.2.1.4-17).*

Schädigung im Zusammenhang mit Beschichtungen und dünnwandigen Strukturen: *Manche Lote können bei einer Diffusionsbeschichtung „blumenkohlartig* ***aufschäumen****" (Bild 12.2.1.4-16). Diese Situation kann bei einer* ***Nachbesserung*** *oder einer ungünstigen Prozessfolge vorliegen. Sind bereits Lötungen am Bauteil vorhanden (z.B. Metallfilzbeläge), können diese* ***erneut aufgeschmolzen*** *werden und Fehlstellen ausbilden.*
Längere Glühzeiten bei den hohen Löttemperaturen *können dünnwandige Strukturen wie Wabendichtungen mit verstärkter* ***Lotdiffusion*** *schädigen.*

© Axel Bossmann - Turbopeult
Abschnittsnummer

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten



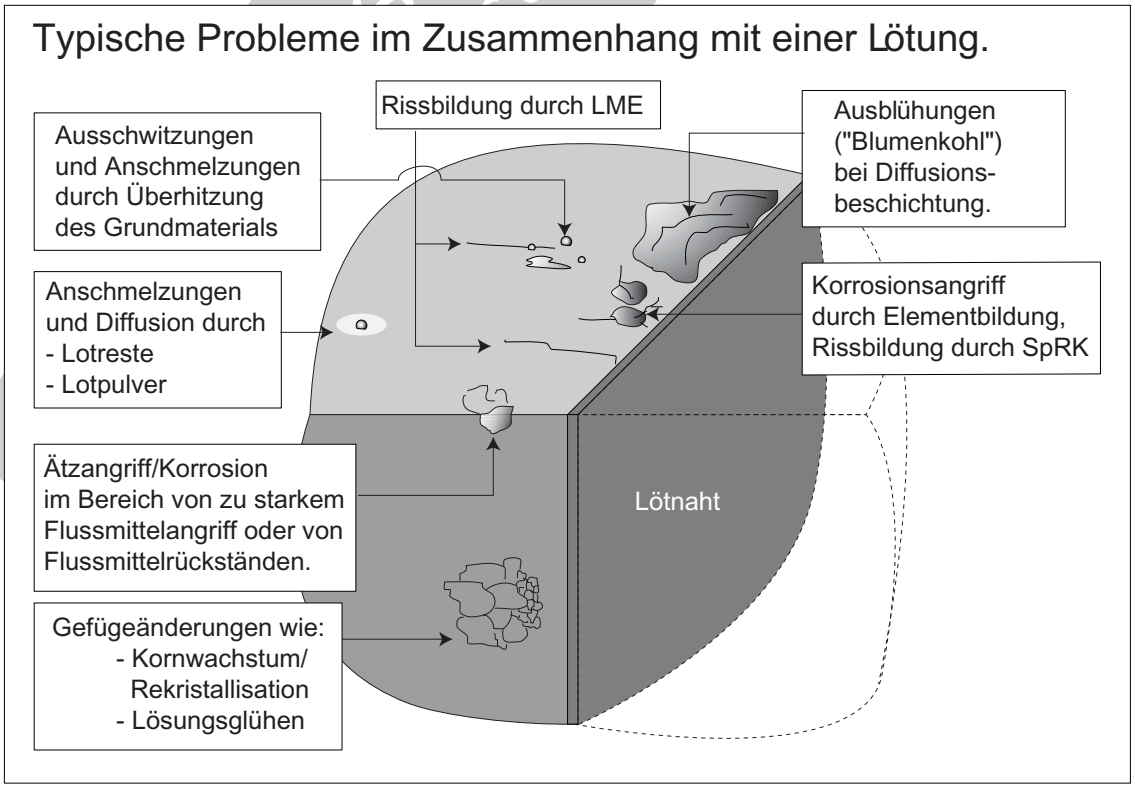


Bild 12.2.1.4-8

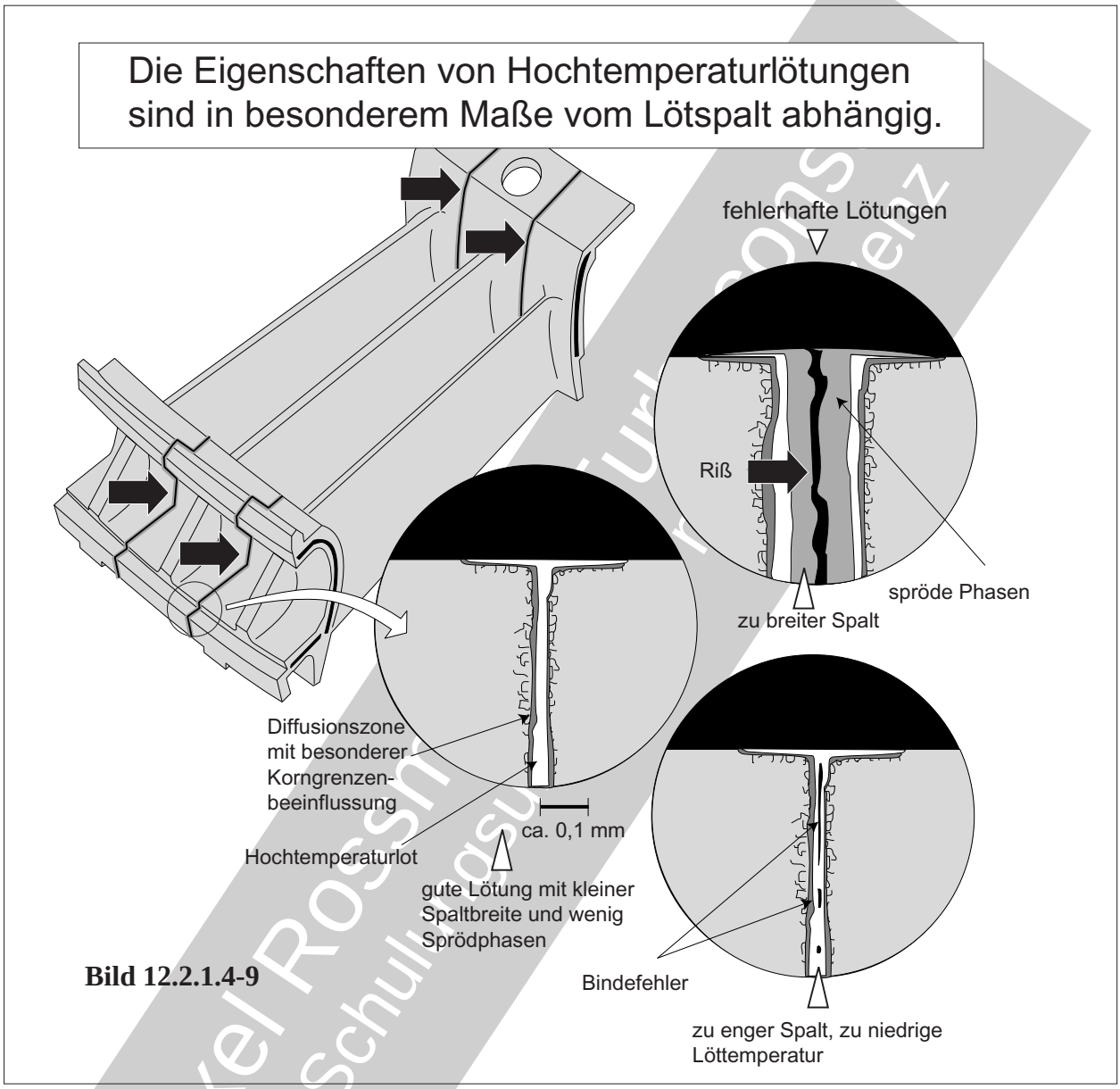


Bild 12.2.1.4-9

Bild 12.2.1.4-9: *Im dargestellten Fall dienen die Lötungen der* ***Verbindung von einzelnen Turbinenleitschaufeln zu einem Segment*** *(Skizze oben). Von einer optimalen Spaltbreite hängt die Nahtqualität mit möglichst wenig Hartstoffphasen ab (Detail links). Ein zu breiter Spalt lässt spröde Phasen entstehen, die im Betrieb vorzeitige Rissbildung auslösen können (Detail oben). Ein zu enger Spalt begünstigt dagegen Bindefehler (Detail unten).*

Nickelbasislote bilden bei Spaltbreiten über 25 µm Hartstoffphasen *(Lit 12.2.1.4-20) die sich auf Duktilität und Festigkeit der Verbindung negativ auswirken. Die Bruchzähigkeit dieser Lote liegt im Bereich von 1 bis 2 % (Lit. 12.2.1.4-6). Die Hartstoffphasen im Lötspalt können Ursache für* ***große Schwankungen von Elastizitätsmodul und Festigkeit*** *sein. Ihre Verteilung in der Lötnaht beeinflusst entscheidend die* ***Schwingfestigkeit****, besonders die* ***Thermoermüdung****.*

Eine anschließende Diffusionsglühung kann die Versprödung abbauen. Beim Glühen kommt es zu einem Konzentrationsausgleich mit dem Grundwerkstoff. Schmelzpunktabsenkende Zusätze wie B, Si und P verteilen sich. Der ***Lötspalt sollte unter 50 µm*** *liegen, um die Diffusionswege ausreichend kurz zu halten. Es entsteht in Nahtmitte eine weichere, duktile, ausscheidungsfreie Zone. In ihr verlaufen*

© Axel Rossmann Fachhochschule Schulungsunterlagen Kreuzberg

mikroduktile Gewaltrisse. Eine vollkommene Auflösung der Hartstoffphasen ist jedoch nicht zu erwarten. Es ist also immer mit einem gewissen Schwingfestigkeitsabfall in der Lötung zu rechnen. Weil sich diese Schwachstellen im gesamten Lotquerschnitt befinden, gehen Schwingrisse an Lötungen auch von innen aus (Lit. 12.2.1.4-4).
Die Abdiffusion der Lotzusätze lässt auch den Schmelzpunkt der Lötung ansteigen(Bild 12.2.1.4-4). Das macht sich bei eventuellen Nachlötungen bemerkbar.

Festigkeitsverhalten von Lotverbindungen unter Temperatur:

Verhalten von Loten bei Langzeiterwärmung ohne nennenswerte mechanische Belastungen:

Die Hochtemperatur-Lötverbindungen lassen im Allgemeinen ***Betriebstemperaturen bis ca. 800 °C und kurzzeitige Übertemperaturen bis 1100 °C*** *zu. Der Cr-Gehalt des Lotes ist für Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit von besonderer Bedeutung. Phosphor-und Manganlote weisen dagegen bei besonders hohen Festigkeiten nur eine sehr mäßige Oxidationsbeständigkeit auf.*

Wegen der unterschiedlichen Zusammensetzung von Lot und Grundwerkstoff bestehen ***Konzentrationsgradienten der Legierungskomponenten****, was die Diffusion einzelner Elemente begünstigt.*

Vorzugsweise geht die Diffusion in Richtung niedrigerer Konzentration, in Ausnahmefällen kann die Diffusion jedoch auch umgekehrt („up hill") verlaufen. Die Diffusion ändert sowohl das Gefüge des Grundwerkstoffes im Kontaktbereich zum Lot, als auch dessen Festigkeitseigenschaften (Versprödung, Abnahme der Kriechfestigkeit). ***Nach längeren Erwärmungszeiten liegen dann gänzlich veränderte Verbindungseigenschaften vor****.*

Warmfestigkeit von Lötverbindungen *(Kurzzeitbelastung bei Temperatur): Üblicherweise wird mit steigender Temperatur ein weitgehend stetiger Festigkeitsabfall beobachtet.*

Dieser Abfall beginnt üblicherweise früher als beim Grundwerkstoff, obwohl die Verbindungsfestigkeit mit der Festigkeit des Grundwerkstoffes in Zusammenhang steht. Je höher die Grundwerkstofffestigkeit umso besser die Verbindungsfestigkeit bei gleichem Lot (Bild 12.2.1.4-3). Manchmal kann aber auch in einem begrenzten Bereich erhöhter Temperatur ein Festigkeitsmaximum beobachtet werden. Das ist einem entsprechenden Härteanstieg des Lotes im Zusammenhang mit einer besonderen Gefügeausbildung zuzuordnen. Bei Hochtemperaturlötungen mit nahezu artgleichem Lot, das lediglich geringe Mengen schmelzpunktabsenkender Zusätze enthält, ist sogar mit steigender Betriebszeit ***mit der Diffusion dieser Zusätze ein Festigkeitsanstieg der Verbindung*** *denkbar. Das Zeitstandverhalten von Lötverbindungen ähnelt dem der Grundwerkstoffe (Band 1, Bild 5.3.2-2 und Bild 5.3.2-3): Anfangs erfolgt ein relativ schnelles Kriechen mit abnehmender Geschwindigkeit. Dann ein Kriechen mit relativ niedriger, gleichförmiger Geschwindigkeit, das sich zum Lebensdauerende hin wieder beschleunigt. Das Zeitstandverhalten von Lötverbindungen ist ebenso wie das Kurzzeitverhalten nicht nur vom Lot, sondern in besonderem Maße auch von der Festigkeit der verbundenen Grundwerkstoffe abhängig. Häufig tritt über einer bestimmten Temperatur die Diffusion eines Legierungsbestandteils aus dem Lot zur Grundwerkstoff/Lotgrenzfläche ein. Bei diesem Vorgang entstehen bevorzugt an dieser Grenzfläche Poren. Inwieweit der Kirkendalleffekt neben der Kriechporenbildung von Bedeutung ist, ist unklar. Das Wachstum der Poren kann zu Rissbildung und Bruch führen.* ***Oberhalb von ca. 700°C*** *weisen die meisten Hochtemperaturlote wegen der Diffusionsvorgänge* ***nur noch geringe Zeitstandfestigkeit*** *auf.*

© Axel Rossmann - Turbocad und ausschließlich Unterlagen nur für Kurs

Lotdiffusion kann dünne Querschnitte so verspröden, dass bei nachfolgender Bearbeitung Bruchgefahr besteht.

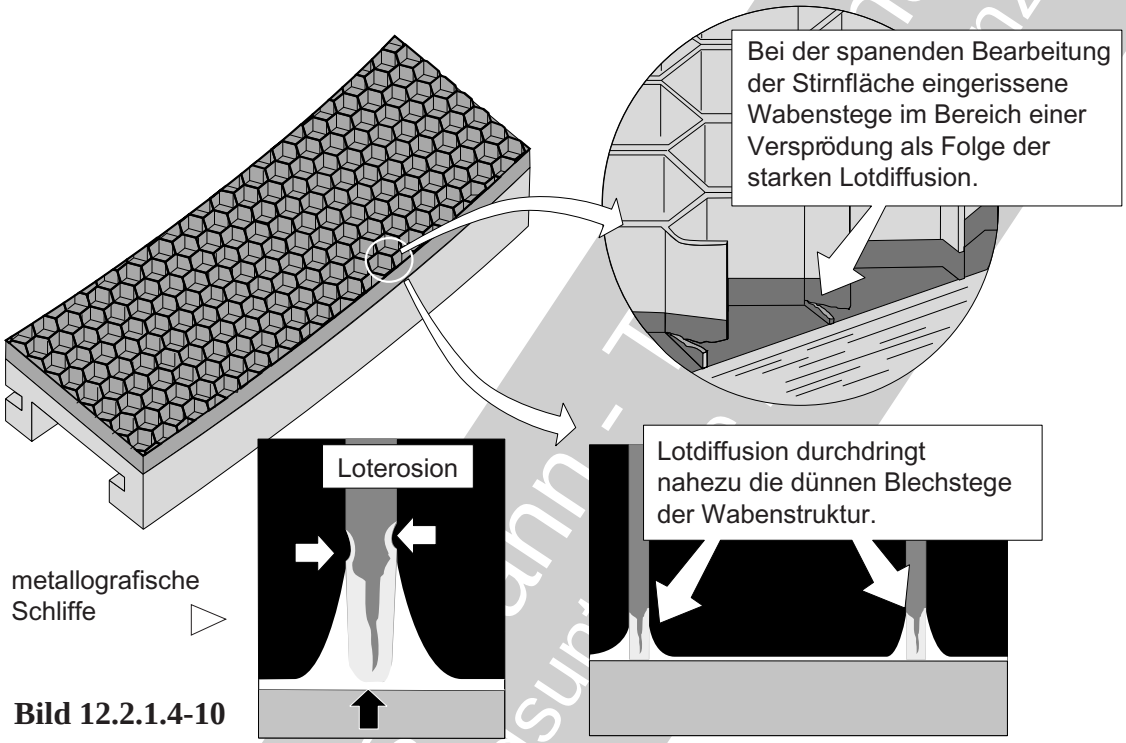


Bild 12.2.1.4-10

Bild 12.2.1.4-10: *Die* ***Lötung von Honigwaben*** *als Anstreiffläche für Labyrinthe (Skizze oben rechts, Turbinendichtsegment) und Spaltdichtungen gegenüber Schaufelspitzen nutzt üblicherweise Lotfolien (Lit. 12.2.1.4-1). Die Wabenstreifen werden entweder mit der vorher aufgelegten* ***Lotfolie*** *mittels Schweißen angeheftet oder in die angehefteten Wabenstreifen wird* ***Lotpulver*** *eingestreut. Ein besonderes Problem ist die Einhaltung optimaler Lötspalte mit Hilfe einer* ***Heftung****. Reicht die Kapillarwirkung an den Wabenstirnseiten nicht aus, steigt das Lot an den Wabenwänden zu hoch. Das erhöht die* ***Gefahr breiterer Diffusionszonen und einer Loterosion*** *(Detail rechts unten). Werden solche Teile nachfolgend* ***spanend bearbeitet, kann es zum Ausbrechen und zur Rissbildung*** *an den Wabenstegen kommen (Detail rechts oben). So ist der Querschnitt der Wabenstege auf mehrfache Weise geschwächt. Ein weiteres Problem ist eine verstärkte* ***Oxidation am Übergang Lot/ Grundwerkstoff*** *im Heißgas.*

Eine Versprödung infolge Diffusion und Bildung spröder Phasen kann auch später im Betrieb auftreten. Die Schädigung hängt in erster Linie von der ***Werkstofftemperatur*** *ab. Die dünnen Querschnitte der Wabenstruktur sind verständlicherweise besonders gefährdet .*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

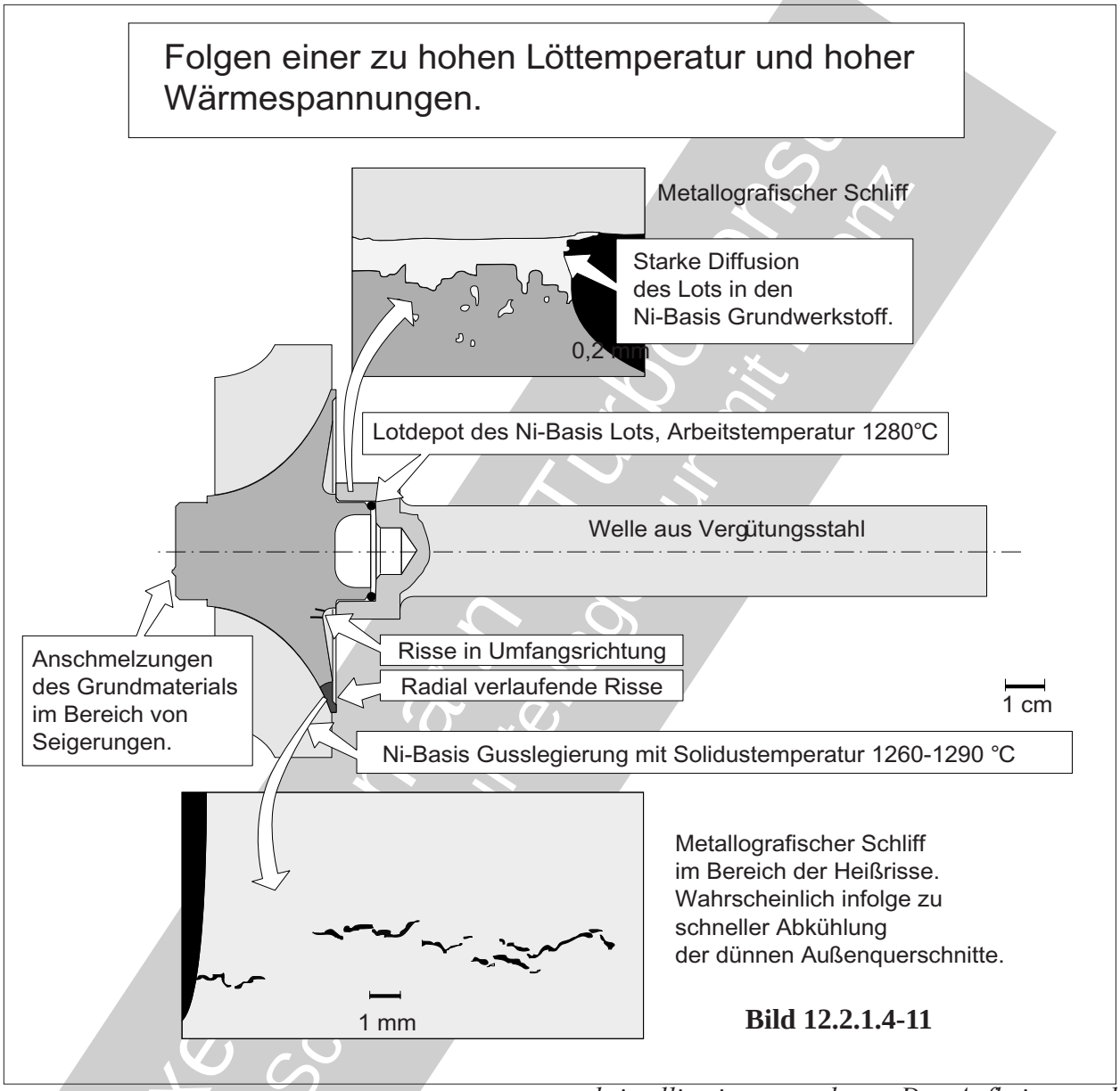


Bild 12.2.1.4-11

Bild 12.2.1.4-11: *Die hohe* ***Arbeitstemperatur der Hochtemperaturlötungen*** *birgt die Gefahr einer Überhitzung des Grundwerkstoffs. Die Folge von Temperaturen dicht unter dem Schmelzintervall des Grundwerkstoffs sind* ***Anschmelzungen*** *im Bereich etwaiger Seigerungen oder es sind unzulässige* ***Gefügeveränderungen*** *und* ***Heißrisse*** *zu erwarten. Im Schmelzintervall des Grundmaterials kann das gesamte Bauteil anschmelzen. Eine schnelle Abkühlung kann die Rissbildung noch verstärken.*

Eine ungewöhnliche Diffusion in der Lötzone (Detail oben) kann versprödend wirken. Bei Schmiedeteilen ist mit Kornwachstum und Rekristallisation zu rechnen. Das Aufheizen und Abkühlen sowie unterschiedliche Wärmedehnungen verschiedener zu verbindender Werkstoffe kann gefährliche Wärmespannungen mit der Gefahr von Rissen induzieren (Detail unten). Das dargestellte Beispiel zeigt die Verbindung einer Welle aus niedrig legiertem Stahl mit einem Turbinenrad aus Ni-Basis Guss.

Wärmedehnungsunterschiede können den ***Lötspalt*** *so verändern, dass keine ganzflächige Bindung mehr möglich ist. Die* ***Erwärmungsgeschwindigkeit*** *kann vom Reflexionsverhalten der Werkstoffe (Absorption und Abstrahlung) merklich beeinflusst sein. Relativ geringe Un-*

terschiede in der ***Rauigkeit*** *oder* ***Anlauffarben*** *können für den Lötprozess ungünstige Temperaturveränderungen bewirken.*

Bild 12.2.1.4-12: Metallfilze *neigen auf Grund ihrer Porosität zu einem* ***Löschblatteffekt****, indem sie das Lot einsaugen. Eine gute Lötung mit ganzflächiger Bindung zwischen Metallfasern und dem Grundwerkstoff, ohne den Metallfilz unzulässig stark zu durchdringen (Skizze oben links) erfordert die folgenden Maßnahmen:*

- ***Ganzflächigen Andruck des Metallfilzes an das Grundmaterial während des Lötvorgangs****. Dies ist nicht einfach zu gewährleisten, wenn der Metallfilz bei der Arbeitstemperatur durch Kriechen nachgibt und/oder Wärmedehnungsunterschiede zwischen Filz und Grundmaterial oder Verzug durch Wärmespannungen zum Abheben des Belags führt. Hierzu sind besondere, dem jeweiligen Fall angepasste Vorrichtungen mit ausreichender Elastizität bei guter Masshaltigkeit und abgestimmten Wärmedehnungen (Werkstoffe, Querschnitte) notwendig. Verteilt sich das Lot lediglich auf dem Grundwerkstoff und kommt mit dem Metallfilz nicht in Kontakt, entsteht ein* ***Bindefehler*** *(Skizze unten rechts).*

- ***Richtige Menge eines Lots mit angepasster Viskosität und Benetzungseigenschaften****. Eine zu starke Infiltration des Metallfilzes kann dessen Einlaufeigenschaften unzulässig verschlechtern. In diesem Fall besteht beim Anstreifen eines* ***Labyrinths*** *erhöhte Gefahr der* ***Heißrissbildung*** *in den Spitzen (Band 2, Bild 6.10.3.1.2-9.2) bis zum* ***katastrophalen Versagen*** *durch Aufheizen und Aufschmieren (Band 2, Bild 6.10.3.1.2-4).*

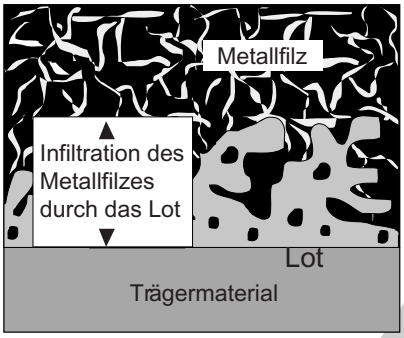
- ***Geeignete Temperaturführung in Metallfilz und Grundwerkstoff****. Nachteilig ist, wenn der Filz, z.B. durch Strahlung, gegenüber dem Grundwerkstoff zu schnell aufgeheizt wird und zu früh die Benetzungstemperatur erreicht. So besteht die Gefahr, dass der* ***Filz das Lot aufsaugt*** *und eine Bindung mit dem Grundmaterial verhindert (Skizze unten links).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

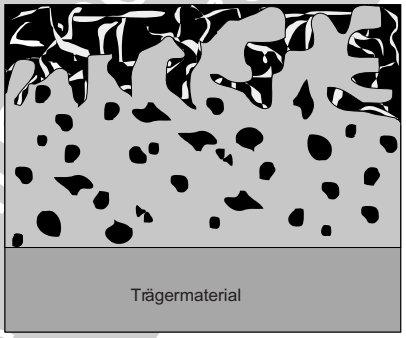
Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

Das Einlöten poröser Beläge wie Metallfilze ist eine anspruchsvolle Aufgabe und erfordert viel Erfahrung.

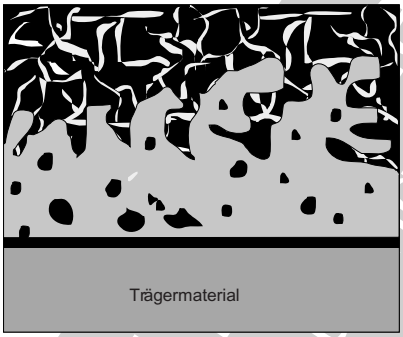
Aufgelöteter Metallfilz mit guter Lötverbindung



Zu starke Infiltration verschlechtert das Anstreifverhalten.



Zu einseitige Infiltration des Metallfilzes verhindert die Bindung zum Grundmaterial.



Beim Löten nicht anliegender Metallfilz wird nicht infiltriert und bindet nicht.

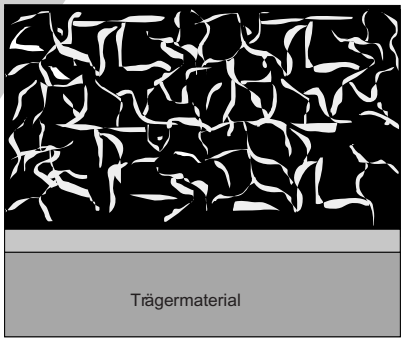
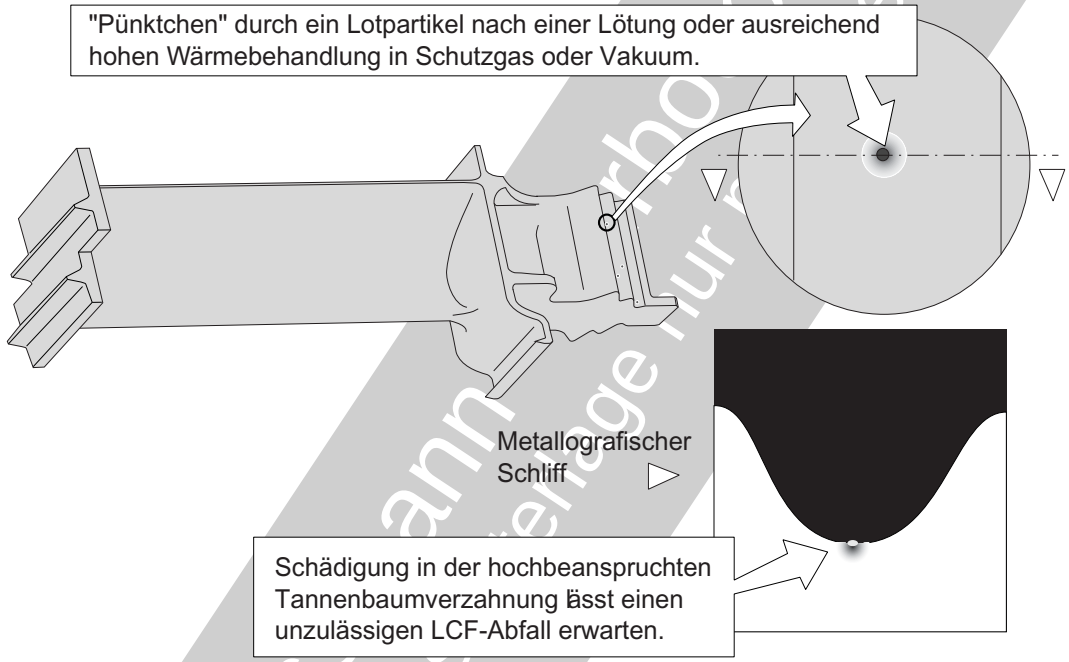
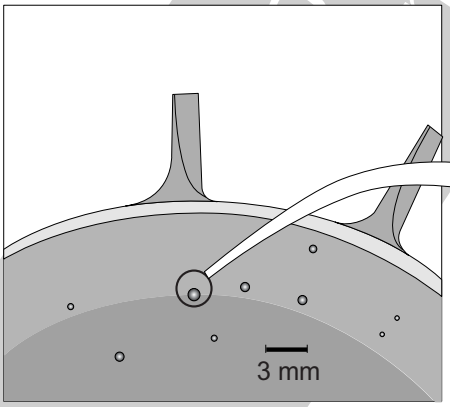


Bild 12.2.1.4-12

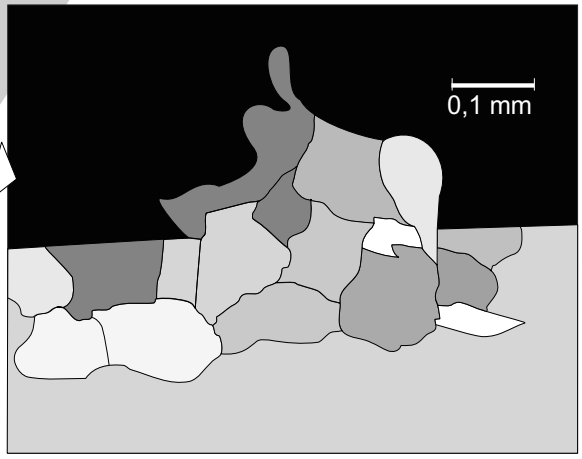
© Axel Hartmann - Turbomaschinen als Schulungsunterlage

Oberflächenverunreinigungen wie Lotpaste, Lötpulver oder Bearbeitungsspäne können gefährliche Schädigungen auslösen.





Rückseite eines Turbinenrades aus Ni-Basis Guss mit Fehlstellen vom Lötprozess. Wahrscheinlich handelt es sich um **verbliebene Bearbeitungsspäne**. Ähnliche Effekte sind durch Anschmelzung von Seigerungen des Grundwerkstoffs zu erwarten. Schmelzbereich des Grundwerkstoffs 1260-1290 °C, Löttemperatur 1280 °C (!)



Metallografischer Schliff durch eine Fehlstelle mit typischen Merkmalen einer Diffusionsverbindung und Rekristallisation.

Bild 12.2.1.4-13

Bild 12.2.1.4-13: *Eigenschaften eines Lots wie Benetzung, und Diffusion führen dazu, dass* ***Lotreste, wie Lötpulver oder Lötpaste, außerhalb des eigentlichen Lötbereichs*** *werkstoffverändernd einwirken. Lotreste können bei der unachtsamen Aufbringung des Lots entstehen. Lötpulver kann als Staub von einer Luftströmung, einer ungeeigneten Absaugung oder vom Staubsauger auf andere Bauteile verteilt werden (Bild 12.2.2.3-2.1).*

Die Gefahr einer örtlichen Werkstoffveränderung durch Lot lässt Festigkeitsabfall und Versprödung befürchten. Zusätzlich kann sich um solche Aufschmelzungen Loterosion mit Formkerben bilden (Bild 12.2.1.4-14). Das Aufschmelzen der Lotreste kann während des Lötens selbst oder zu einem späteren Zeitpunkt, z.B. bei einem Diffusionsglühen, erfolgen.

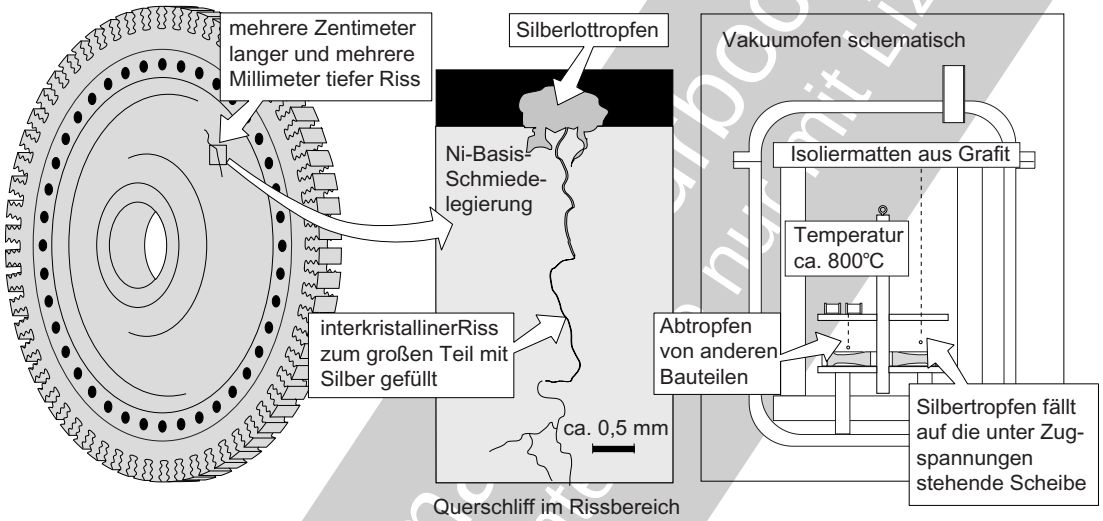
Eine besondere Gefahr besteht dann, wenn Schädigungen an hochbelasteten, lebensdauerbestimmenden Bauteilzonen auftreten. Ein typisches Beispiel zeigt die obere Skizze. Hier erfolgte die ***Schädigung im Tannenbaumfuß*** *einer Turbinenrotorschaufel (Bild 12.2.2.3-13). Eine* ***Nacharbeit*** *(Band 4, Bild 17.5-1) solcher Fehlstellen ist bei den engen Masstoleranzen der geschliffenen Tannenbaumfüße gewöhnlich nicht möglich. Die potenzielle Tiefenwirkung ist schwer abzuschätzen. Wird eine unkontrollierte Nacharbeit versucht, entsteht eine zerstörungsfrei nur sehr schwer nachweisbare Fehlstelle.*

Die Skizze unten links zeigt die Rückseite eines ***Radialturbinenrades*** *mit erhabenen, stecknadelkopfgroßen Fehlstellen sowohl auf der spanend bearbeiteten Fläche als auch auf Gussoberflächen. Ein metallografischer Schliff (Skizze rechts unten) lässt eine* ***Rekristallisation*** *im Fehlstellenbereich erkennen, die deutlich in den Grundwerkstoff dringt. Es ist zu vermuten, dass hocherhitzte, artgleiche Bearbeitungsspäne, die auf der Bauteilfläche während einer Hochtemperaturlötung (Bild 12.2.1.4-11) verblieben waren, diesen Effekt verursachten. Möglicherweise hatten abgedampfte schmelzpunktabsenkende Lotzusätze den Schmelzpunkt dünner rauer Späne herabgesetzt. Das Feinkorn lässt eine verschlechterte Warmfestigkeit (Kriechfestigkeit) erwarten. Die Einwirktiefe zeigt die begrenzte Nacharbeitsmöglichkeit. Wird hier unkontrolliert nachgearbeitet, dürften in jedem Fall schwer zerstörungsfrei erkennbare Fehlstellen verbleiben.*

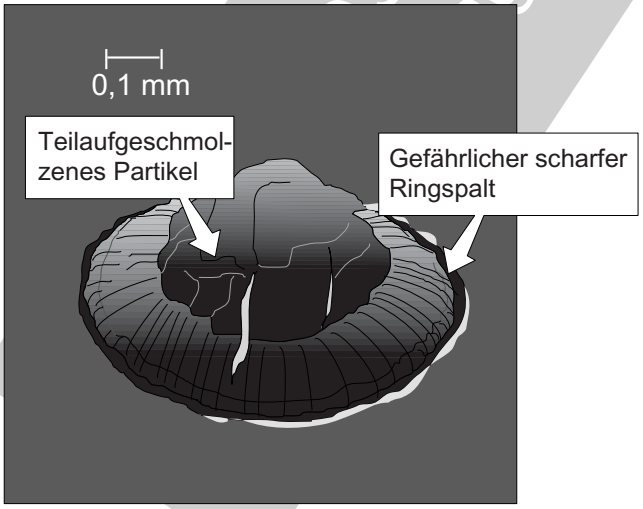
Ähnliche Effekte, jedoch eher flächig, lassen sich auch im Bereich von angeschmolzenen Seigerungen an Ni-Gussteilen, wie diesem Bauteil, beobachten.

© Axel Rossmann - Turbocomput
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

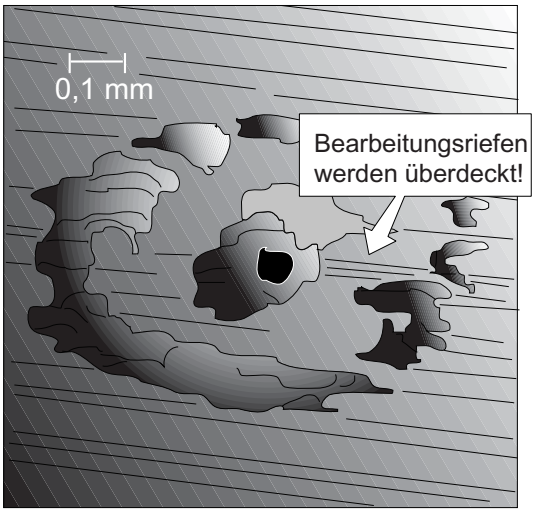
Metallschmelzen auf Bauteilen die unter hohen Zugspannungen stehen (Eigenspannungen bzw. Wärmespannungen) können gefährliche Risse auslösen.



Erscheinungen von Verunreinigungen auf Bauteilflächen von Ni-Basis Schmiedewerkstoff nach einem Vakuumglühen bei 800 °C weisen auf den Kontaktmechanismus hin.



Angeschmolzenes aufgelegenes Partikel hat eine ringförmige scharfe Kerbe im Grundmaterial erzeugt.



Angeschmolzene konzentrische Ringkontur weist auf einen aufgespritzten Tropfen oder ein sehr weiches Partikel hin.

Bild 12.2.1.4-14

Bild 12.2.1.4-14: Tropfen und Oberflächenverunreinigungen durch Lot *stellen ein nicht zu unterschätzendes* ***Gefährdungspotenzial*** *dar.*

Eine besondere Schadensform im Zusammenhang mit Löt- und Schweißvorgängen ist die ***Lötrissigkeit*** *(Lötbrüchigkeit, engl. LME). Es handelt sich um eine Werkstoffschädigung, bei der eine benetzende Metallschmelze in den festen („geeigneten") Kontaktwerkstoff eindringt. Das erfolgt sehr schnell („Einschießen") entlang der Korngrenzen, bei Stählen entlang der ehemaligen Austenitkorngrenzen (Bild 12.2.1.4-15 und Band 4, Bild 18.3-5).*

*Auf diese Weise kommt es über eine Art "****Sprengwirkung****" zu* ***Versprödung, Festigkeitsabfall und Rissbildung****, auch in erstaunlich dicken Querschnitten (Skizzen oben). Besonders bekannt ist das Eindringen von* ***Kupfer*** *als reines Metall oder Legierung* ***in Stahl*** *bei Temperaturen oberhalb der γ - α - Umwandlung. Dass jedoch nicht unbedingt hohe Temperaturen für eine Lötrissigkeit notwendig sind, zeigt die Einwirkung von* ***Kadmium auf Stahl*** *(Sp. 350°C) und von Quecksilber auf Messing (bei Raumtemperatur).*

Lötrissigkeit kann ***nur unter bestimmten Voraussetzungen*** *entstehen:*

Die ***mit schmelzflüssigen Metallen benetzten Werkstoffe müssen unter Zugspannungen*** *einer, von der Werkstoffkombination abhängigen Mindesthöhe stehen. Für Cu/Stahl-Kombination sind anscheinend Zugspannungen über 150 N/mm² erforderlich.*

Das benetzte Metall muss ***für eine Lötrissempfindlichkeit****, wenn auch nur zu geringem Teil,* ***im Grundwerkstoff löslich*** *sein.*

Beispielsweise wurde bei folgenden Metallkombinationen Lötrissigkeit beobachtet (Band 4, Bild 18.3-11):

- Ni-Legierungen: Silber, Gold (Bild 12.2.1.4-15)

-Stähle (ferritisch): Bronze, Cu, Messing, Pb, Cd, Ag, Sn, Zn.

-Hochlegierte austenitische Stähle: Pb, Zn, Cu, Ag, Cd-haltige Legierungen.

Es genügen bereits ***sehr geringe Metallmengen,*** *z.B. in Form von Lotspritzern, Metallpigmenten in Beschichtungen, aufgeschmierten Metallfilmen (Werkzeuge, Bürsten) und Metallstaub.*

Weitgehend unbekannt ist die extreme Lötrissempfindlichkeit von Schmiedesuperlegierungen wie Waspaloy. Bei Einwirkung von Cu-, Gold- und Ag-Loten kommt es bereits bei ***minimalen Makrospannungen zur katastrophalen Rissbildung*** *(Bild 12.2.1.4-15). Möglicherweise muss diese Erscheinung auch mit Mikroeigenspannungen im Kornbereich (Eigenspannung 2. Art)* ***aus dem thermomechanischen Umformungsprozess*** *gesehen werden (Bild 11.1-13, Bild 11.2.2.1-1, Bild 11.2.2.1-1 und Bild 11.3-11).*

Abhilfe bei Lötrissigkeit bieten ***Pufferwerkstoffe*** *in Form von Schichten. Eine Möglichkeit sind galvanisch aufgebrachte Nickelschichten. Die sichere Vermeidung der Zugeigenspannungen ist meist nicht möglich. Ein Effekt, der mit Lötrissigkeit wahrscheinlich nichts zu tun hat, jedoch auf den ersten Blick Ähnlichkeiten aufweist, ist die* ***Rissbildung hochfester Ti- Legierungen*** *(z.B. Ti6A14V) an der Grenzfläche* ***zu einer angedrückten kadmiumbeschichteten Oberfläche*** *oberhalb 150°C. Auch hier scheint eine relativ hohe Mindestzugspannung um 1000 N/mm² erforderlich zu sein. Möglicherweise wirkt dabei auch Wasserstoffversprödung mit.*

Eine weitere Werkstoffschädigung im Zusammenhang mit Loten ist die ***interkristalline Versprödung*** *(Lit. 12.2.1.4-21) von Nickellegierungen bei Verwendung von* ***Flussmittel****. Es bildet sich ein* ***spröder Korngrenzenbelag****, der mit wachsender Temperatur und Zeit an Tiefe zunimmt. Silberlote dringen in 5 Minuten bei 700 °C nicht mehr als 0,05 mm ein. Trotzdem kann es in dieser dünnen Schicht auf Grund der* ***extremen Sprödigkeit*** *bereits beim Abkühlen zur* ***Mikrorissbildung*** *kommen. Die*

© Axel Rossmann - Turbocorrect
abschnittsunterlagen nur für Lehrzwecke

Folge ist ein deutlicher ***Schwingfestigkeitsabfall****. Abhilfe können Beschichtungen (z.B. galvanisches Verkupfern) oder spezielle Flussmittel bringen. Diese Flussmittel enthalten Spuren eines geeigneten Metalles, das bei Arbeitstemperatur einen bindenden Schutzfilm auf der Lötfläche erzeugt.*

Die unteren Skizzen zeigen Beispiele für das mikroskopische Aussehen (nachempfundene REM-Bilder) von aufgespritzten oder aufgelegenen Tropfen bzw. Partikeln. Man erkennt, dass bereits Loterosion zu ***scharfen Kerben am Rand der Aufschmelzzone*** *führen kann (Skizze unten links). Eine* ***mikroskopische Untersuchung*** *(REM, Band 4, Bild 17.3.2-7)* ***des Aussehens und der Zusammensetzung der Aufschmelzzone kann wichtige Hinweise zur Identifikation des Ursprungs der Partikel und/ oder zur Auftragung*** *liefern. Um diese Chance, als Voraussetzung für eine gezielte Abhilfe und Risikoabschätzung (z.B. Zahl der betroffenen Teile, Entstehungszeitraum und Entstehungsort, Bild 11.2-20, Bild 11.2.2.1-12 und Bild 11.3-1) zu wahren, sollte also eine* ***voreilige Nacharbeit*** *(Band 4, Bild 17.5-1)* ***unbedingt vermieden werden****.*

Selbst ohne Merkmale einer aggressiven Anschmelzung kann es zu einer merklichen Diffusion der Verunreinigung in den Grundwerkstoff gekommen sein (Bild 12.2.1.4-10).

Abschätzung der potenziellen Beeinflussungstiefe*:*

Beeinflussungstiefe ***entspricht etwa dem Durchmesser der Anschmelzung an der erkennbaren (unveränderten) Kontaktfläche****. Sind Partikel nicht angeschmolzen, d.h. nicht flächig, kann die Einwirkzone durchaus größer sein (Bild 12.2.1.4-13) Letztendlich erfordert der Nachweis einer restlosen Entfernung der Einflusszone zumindest einen* ***metallografischen Nachweis*** *(direkt am Bauteil oder mit Hilfe eines Abdrucks, Band 1 Bild 2.2.2.4-4).*

© Axel Rosemann - Turboconsult
als Grundlagenunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

Lötrissigkeit als Ursache für den Betriebsbruch einer Gold- Hartlötung.

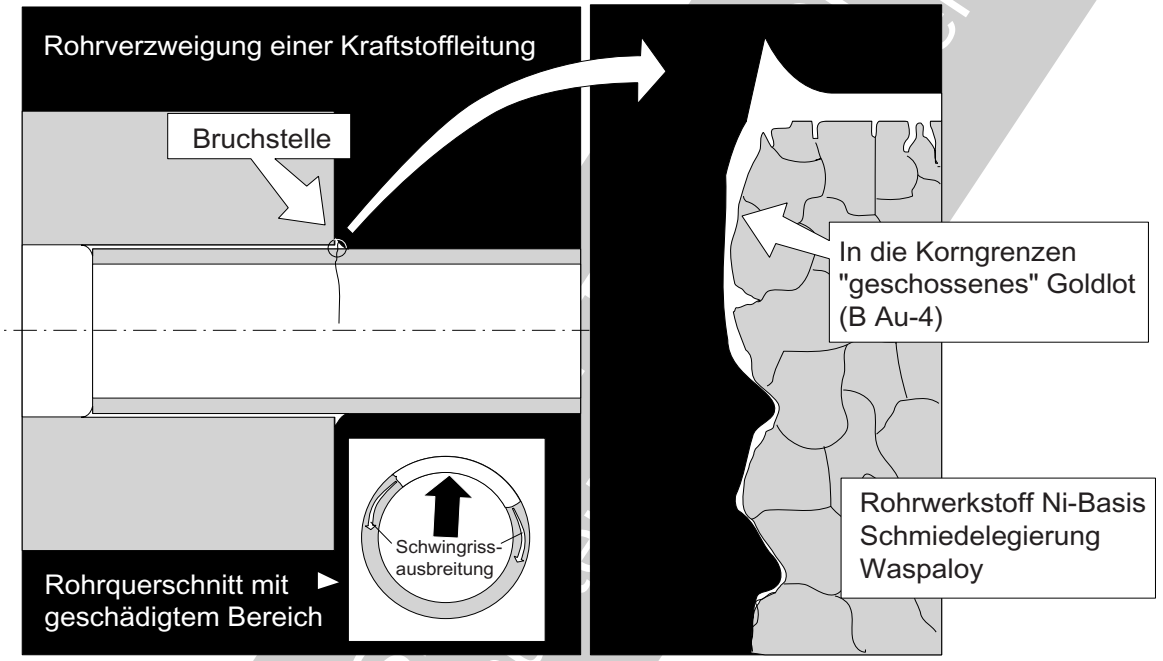


Bild 12.2.1.4-15

Bild 12.2.1.4-15 *(Lit. 12.2.1.4-18): Es handelt sich um den Anschluss einer* ***Kraftstoffleitung*** *der im Betrieb als Folge eine* ***Schwingrisses*** *brach (Detail unten). Dieser Schwingriss ging von einem golden verfärbten, fertigungsbedingten Riss aus. Ein metallografischer Schliff (Skizze rechts) ergab, dass die Verfärbung auf* ***Goldlot*** *zürückzuführen ist, das offenbar beim Löten* ***in die Korngrenzen*** *des Rohrwerkstoffs (****Waspaloy****) „eingeschossen" war. Der Schadensmechanismus ist offensichtlich* ***Lötrissigkeit (LME****, Bild 12.2.1.4-14).*
Auch ***Silberlot*** *kann erfahrungsgemäß an Waspalloy derartige Schäden auslösen (Band 4, Bild 18.3-5 und Bild 18.3-10.1). Für ein derartig tiefes Eindringen des Lotes auf die Korngrenzen ist neben der lötrissanfälligen Lot/ Grundwerkstoffkombination eine ausreichend* ***hohe Zugspannung*** *erforderlich. Diese lässt sich auf unterschiedliche Möglichkeiten zurückführen.*

- ***Verspannung der Rohrleitungen*** *im Fügebereich infolge von Maßproblemen in der Fertigung.*

- ***Zugeigenspannungen*** *aus einem* ***Kaltbiegeprozess*** *an der Rohrleitung.*

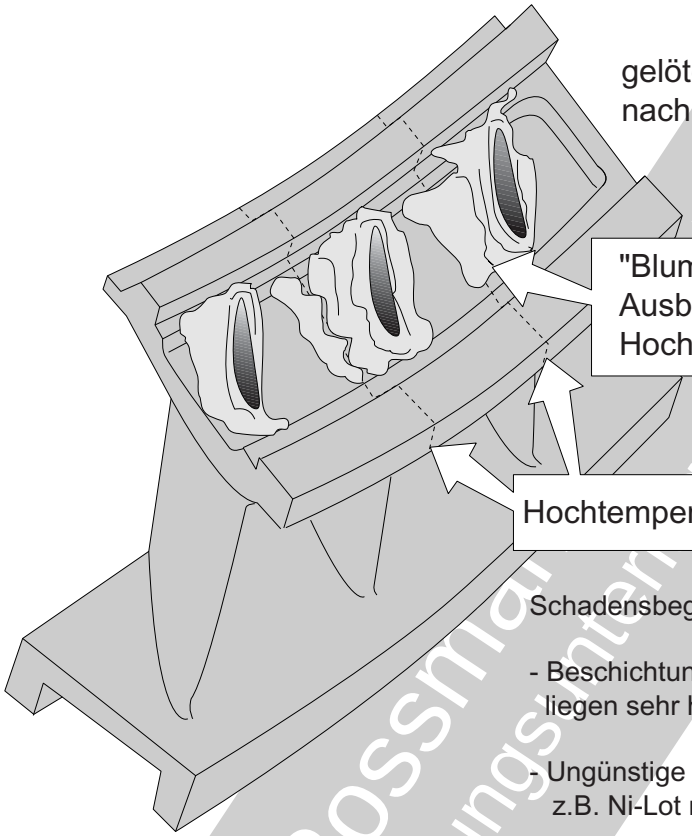
- ***Kalt nachgerichteter*** *Rohrbereich, in dem sich beim Zurückfedern Zugeigenspannungen ausbildeten.*

Merksatz:

Bauteile sollten beim Hartlöten auf keinen Fall unter **Zugspannungen** stehen.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

Diffusionsbeschichtung kann Hochtemperaturlötungen schädigen.



Schadensbegünstigende Bedingungen:

- Beschichtungstemperatur und Löttemperatur liegen sehr hoch und dicht zusammen.
- Ungünstige Lotzusammensetzung: z.B. Ni-Lot mit hohem Si-Anteil.
- Beschichtung in Wasserstoffatmosphäre

Bild 12.2.1.4-16

Bild 12.2.1.4-16: *Dargestellt ist ein Turbinenleitsegment aus Ni-Gusslegierung mit einer Al-Diffusionsschicht auf den Schaufelblättern. Nach einer Hochtemperaturlötung erfolgte die Diffusionsbeschichtung. Diese erforderte über längere Zeit Temperaturen in der Nähe der Löttemperatur. An gewissen Loten (Si-reich?) kam es zu merklichen* ***„blumenkohlartigen" Ausblühungen****. Neben dem befremdlichen äußeren Eindruck musste von einer unzulässigen Beeinflussung der Lötung ausgegangen werden. Nacharbeit oder Nachlöten war bei dem Umfang des Einflussbereichs der Schädigung nicht möglich.*
Im Zusammenhang mit einer Diffusionsbeschichtung nach dem Löten stehen auch ***Anschmelzen und „Verkleben"*** *von Bauteilzonen. Ursache für solche Probleme ist wahrscheinlich eine* ***Schmelztemperaturabsenkung des Lots in der Beschichtungsatmosphäre*** *(Al-Aufnahme durch das Lot).*

© Axel Rossmann Bildungsconsulting als Schulungsunterlage nicht mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

Bild 12.2.1.4-17: *Kommen* ***Flussmittel*** *zum Einsatz, ist peinlich genau darauf zu achten, dass nach dem Löten keine Flussmittelreste auf dem Bauteil verbleiben. Andernfalls ist in anschließenden Fertigungsschritten, der Lagerung und im Betrieb mit Schäden zu rechnen.*

Korrosion an Loten und gelöteten Bauteilen:

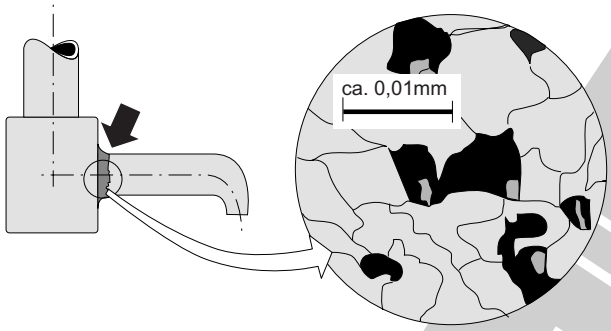
Ähnliche Erscheinungen wie bei der Entzinkung von Messing, d.h. einer ***selektiven Korrosion****, können an Silberloten mit Zn oder Cd-Anteilen (z.B. AgCuZn, AgCuZnCd) in saurem Wasser auftreten. Das* ***Lot wird zu einer schwammartigen Masse*** *ohne Zn- oder Zn/Cd-Bestandteile. Damit liegt keine nennenswerte mechanische Festigkeit mehr vor. Abhilfe bieten Zn- und Cd-freie Cu-, Ag- oder Phosphorlote. Ein selektiver Korrosionsangriff tritt auch an* ***Phosphorbronzen*** *(Cu/Sn-Legierungen mit P-Zusatz) in schwefelhaltigen Korrosionsmedien auf (z.B. Kondensate in Industrieatmosphäre). Die phosphorhaltigen Gefügebestandteile werden verstärkt angegriffen, und die Festigkeit der Lötverbindung entscheidend geschwächt. Abhilfe gegen diesen Schadensmechanismus sind Schutzschichten (z.B. Lackierungen).*
Eingetrocknete Flussmittelreste *können mit Schwitzwasser einen sehr aggressiven Elektrolyt bilden. Auch „rostfreie" Cr-Ni-Stähle, besonders in einem vom Lötvorgang* ***sensibilisierten Zustand****, können dem nicht standhalten. Solche interkristalline Anfressungen am Lötnahtübergang einer Öldüse zum Verteilerstück, wahrscheinlich durch verbliebene Flussmittelreste, zeigt die oberste Skizze. Es kam bereits zum sog.* ***Kornzerfall****, bei dem die gesamten Korngrenzen um einzelne Körner aufgelöst sind, dass einzelne Körner herausfallen (Detail oben). Die Folge war ein* ***Schwingbruch****, der wohl von der* ***Steifigkeitskerbe an der Lötnaht*** *begünstigt wurde. Wenn das freie Öldüsenteil zwischen die Zahnräder eines Getriebes fällt, oder es zur Überhitzung eines Lagers wegen fehlender Ölversorgung kommt, ist mit umfangreichen sicherheitsrelevanten Folgeschäden zu rechnen.*
An hartgelöteten ***Stählen ohne Nickelanteil*** *(z.B. Cr-Stähle) tritt als Folge der Elementbildung mit dem Lot, verstärkt* ***lochfraßartiger Korrosionsangriff*** *(engl. Pitting Corrosion)* ***am Grundmaterial in Lotnähe*** *auf. Eine weitere typische Korrosionserscheinung ist eine intensive Korrosion* ***in der Kontaktzone von Lot und Grundwerkstoff****, die zur* ***Ablösung des Lotes*** *führt. Dieses korrosionsbedingte Ablösen bzw. Herauslösen von Loten wird z.B. an Verdichterschaufeln aus Cr-Stählen im Betrieb beobachtet (Skizzen unten). Werden auf diese Weise Lötungen zerstört, kann das Bauteil neben der generellen Festigkeitseinbuße auch das* ***Schwingverhalten verändern****. Als Folge der* ***verminderten Steifigkeit können Resonanzen*** *wegen eines Abfalls der Schwingfrequenz auftreten. Auch die* ***Umlagerung der Beanspruchungen*** *im Bauteil kann zu einer Überlastung führen. Typisches Beispiel sind durch Löten gebaute Verdichterleitschaufeln älterer Triebwerkstypen. Bricht eine solche Schaufel, ist mit umfangreichen Folgeschäden zu rechnen. Diese Schäden sehen* ***Bindefehlern (!) zum verwechseln ähnlich*** *und können bereits in kürzester Zeit (Tage) in* ***Schwitzwasser*** *oder* ***feuchter Luft*** *auftreten. Auch in diesem Fall können lackartige Schutzschichten Abhilfe schaffen. In manchen Fällen bietet sich eine nachträgliche Verzinnung oder Verbleiung an.*
Weitgehend unempfindlich gegen diese Korrosionsart sind nickelhaltige Lote. Es besteht jedoch eine besondere Gefahr im ***Anlegieren des Lots mit dem Grundwerkstoff****. Ändert sich dabei die Zusammensetzung des Lots im Lötspalt nimmt die* ***Korrosionsempfindlichkeit in Fließrichtung*** *zu. Eine Abhilfe bringt ein* ***Vernickeln der Bauteile vor dem Löten****. In diesem Fall bestimmt aber die Bindung zwischen Nickelschicht und Grundmaterial die Verbindungsfestigkeit. Deshalb muss diese gegebenenfalls mit Hilfe besonderer Maßnahmen (z.B.*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.4-37

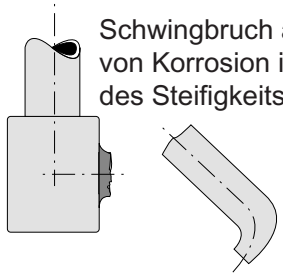
© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

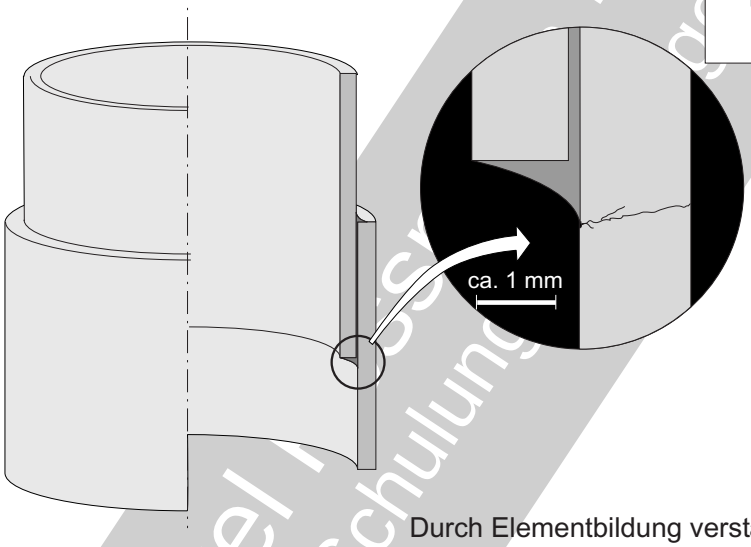
Elementbildung mit dem Grundwerkstoff kann an Lötungen zu Korrosionsangriff und Schwingfestigkeitsabfall führen. Flussmittelreste sind eine besondere Gefahr.



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



Schwingbruch als Folge von Korrosion im Bereich des Steifigkeitssprungs



Transkristalline Spannungsrisskorrosion an einem Druckrohr aus Stahl vom Typ CrNi 18/10.
Bruchausgang an der Lotgrenze.
Bruchursache:
- Hohe Zugeigenspannungen
- Fluoridreste des Flussmittels

Durch Elementbildung verstärkter Lochfraß im Betrieb unter Einwirkung von Meeresatmosphäre an einer mit Silberlot gelöteten Verdichterschaufel aus 13% Cr-Stahl.

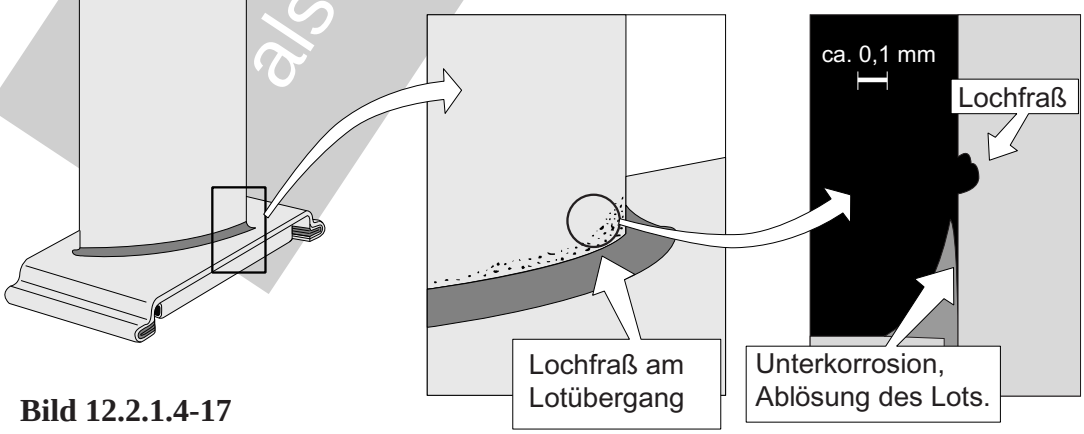


Bild 12.2.1.4-17

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

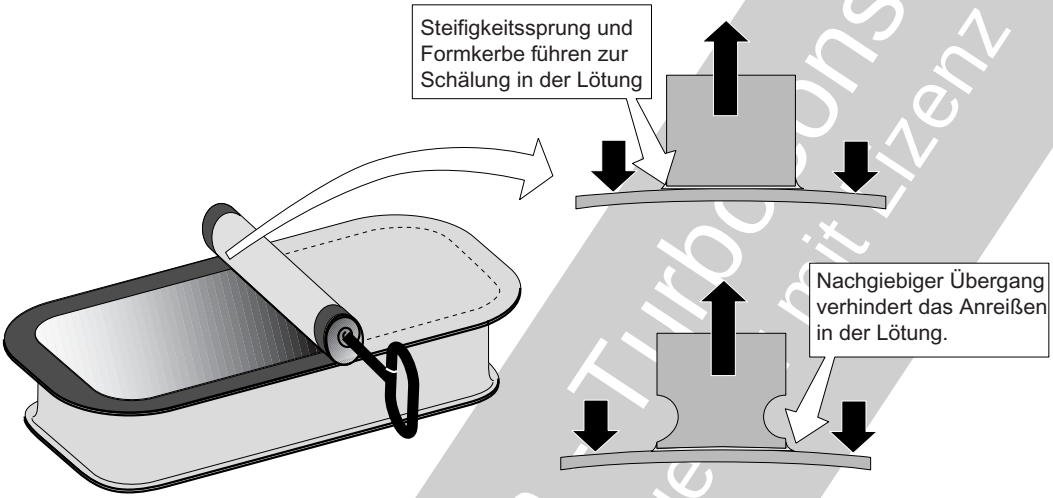
Fortsetzung von Seite 12.2.1.4-35

***Diffusionsglühen**) verbessert bzw. gewährleistet werden. Korrosionsschäden an Lot und Grundwerkstoff werden häufig auch in **ungeeigneten Reinigungsbädern** im Rahmen einer Überholung der Teile beobachtet.*
***Pittingkorrosion** (**Lochfraß**) in der Nähe von Lötungen gefügter Verdichterschaufeln aus Cr-Stählen im Betrieb auf Grund der Elementbildung mit dem Lot, tritt auch ohne Flussmittelreste auf (Skizzen unten). Diese Korrosion kann auch während **ungeeigneter Zwischenlagerung** im Fertigungs- oder Reparaturprozess auftreten, wenn eine Schutzlackierung fehlt. Die Korrosionsgrübchen wirken als gefährliche Kerben und erhöhen die Gefahr von Schwinganrissen. Als Abhilfe für derartige Betriebsschäden hat sich seit langer Zeit der Einsatz anorganischer, Al-Pulver gefüllter, kathodisch wirkender Lacke bewährt.*

*Dass **Flussmittelreste** auch **Spannungsrisskorrosion** (SpRK) auslösen können, zeigt die mittlere Skizze (Lit. 12.2.1.4-18). In diesem Fall ist ein Rohr aus CrNi-Stahl betroffen. Transkristalline SpRK (Band 1, Bild 5.6.3.1.1-6) durchdringt die Rohrwand (Detail Mitte). Der Schaden wurde als Leckage bei einer Druckprüfung entdeckt. Eine Mikroanalyse wies **Fluoranreicherungen** nach. Diese stammten aus verbliebenen Resten des verwendeten **Flussmittels**.*

© Axel Bossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Das Schlimmste was man einer Lötung oder Klebverbindung antun kann ist Schälung ("Fischbüchseneffekt").



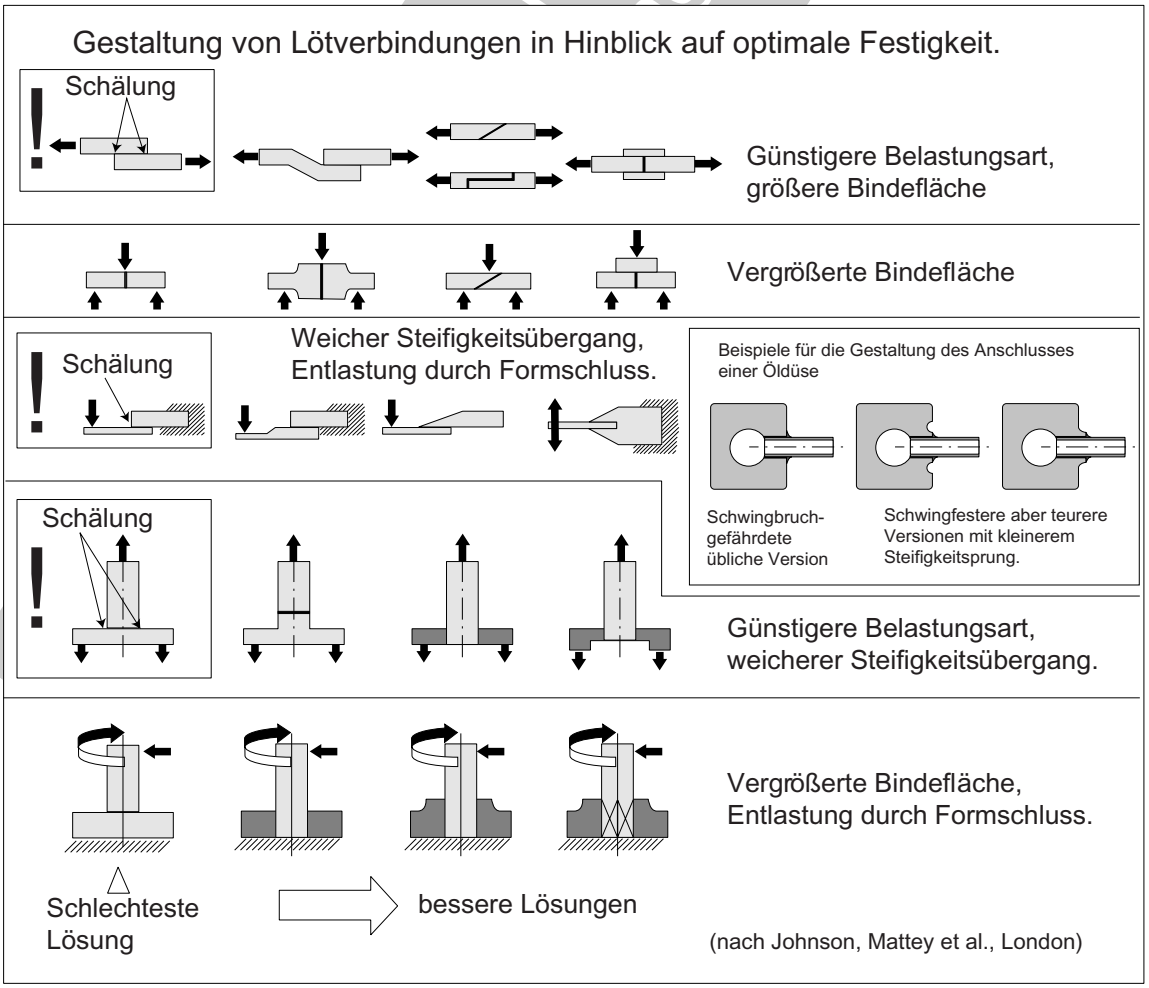


Bild 12.2.1.4-18

Turbo Consult mit Lizenz

Bild 12.2.1.4-18 *(Lit. 12.2.1.4-9, Lit. 12.2.1.4-10 und Lit 12.2.1.4-12): Das spezifische* ***Festigkeitsverhalten einer Lötung muss vom Konstrukteur berücksichtigt werden****.*
Grundsätzlich sollten Lötungen ***nicht in statisch und dynamisch hochbeanspruchte Bauteilzonen gelegt*** *werden. Es ist davon auszugehen, dass Lötverbindungen im Allgemeinen nicht die Kriechfestigkeit (Warmfestigkeit) und die Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffs erreichen. Das gilt insbesondere auch für die LCF-Festigkeit bzw. das Thermoermüdungsverhalten.* ***Ein Bruch im Grundwerkstoff in einem Zerreißversuch (meist bei Raumtemperatur!) ist kein Nachweis für die Sicherheit einer Lötung****.*
Die ***günstige lötspezifische Gestaltung*** *ist eine Voraussetzung für ein befriedigend sicheres Betriebsverhalten:*
Lötgerechte Konstruktionen *sind besonders bei schwingbeanspruchten Bauteilen von größter Wichtigkeit. Beispiele sind Schwingbrüche an* ***Rohrleitungen und Öldüsen*** *(Rahmen Mitte rechts, Bild 12.2.1.4-17) aufgrund konstruktiv bedingter Spannungskonzentrationen im Lötnahtbereich.*
Die Schwingermüdung von Lötungen an ***V-Leitschaufeln und Leitapparaten****.*
Rissbildung an Steifigkeitssprüngen im Bereich ***aufgelöteter Befestigungselemente*** *für Blechstrukturen (z.B.* ***Gasführungen****).*

Einflüsse die an mechanisch belasteten Teilen zu vermeiden sind:

*- **Schälbeanspruchung** („Konservendosenefekt“, „**Fischbüchseneffekt**“) eine Kombination aus Biegung und Scherung. (Skizze oben).*
*- **Stumpfstöße** quer zur Beanspruchungsrichtung.*
*- **Querschnittssprünge** (Steifigkeitskerben) im Lötnahtbereich.*

Selbstverständlich muss die Lötnaht einen ausreichend höheren Schmelzpunkt oberhalb der maximal zu erwartenden Betriebstemperaturen aufweisen. Dafür kann der Schmelzpunktanstieg durch die Abdiffusion von schmelzpunktabsenkenden Zusätzen wie B, Si oder P während des Lötvorgangs genutzt werden. Versagen einer Lötung als Folge einer Überhitzung kann an Turbinenleitschaufeln beobachtet werden. Empfindlich sind z.B. Lötverbindungen, mit denen mehrere Leitschaufeln zu Segmenten zusammengefaßt werden (Bild 12.2.1.4-2). Auch Heißteile mit angelöteten ***Blechkonfigurationen*** *(Bild 12.2.1.4-20,* ***Labyrinthträger****,* ***Gasführungsteile****) sind in diesem Zusammenhang zu nennen. Hier müssen gegebenenfalls* ***„fail safe“-Konstruktionen*** *angewandt werden. Das kann eine zusätzliche mechanische Sicherung sein. Denkbar ist ein Formschluss als* ***Umbördelung*** *des Bleches um eine Kante oder an rotationssymmetrischen Teilen eine* ***konische Lötfläche*** *(Bild 12.2.1.4-20). Wichtig ist, dass diese Sicherung derart wirksam wird (Richtung!), dass sie einen unzulässigen Versatz vermeidet. Gleichzeitig sollte ein Versagen äußerlich leicht (z.B. bei einer Boroskopinspektion) erkennbar sein.*

Gestaltungsbeispiele für Lötverbindungen:

Anzustreben sind möglichst ***große Lötflächen die auf Schub beansprucht*** *werden (Rahmen, oberste Reihe). Schub ist auch einer Zugbelastung vorzuziehen (vierte Reihe). Ist die Schubfläche trotz eines optimierten Steifigkeitsübergangs bedenklich hoch belastet, kann ein* ***zusätzlicher Formschluss*** *vorgesehen werden. (unterste Reihe, Bild 12.2.1.4-20).*
Müssen Lötungen auf Zug beansprucht werden, ist die Lötfläche zu vergrößern und darauf zu achten, dass keine Spannungserhöhungen durch ***Steifigkeitssprünge*** *einwirken (zweite Reihe). Auch* ***elastische Verformungen*** *während einer Zugbelastung dürfen* ***keinen Schäleffekt*** *auslösen.*
Falls nicht vermeidbar, sind Schäleffekte mit einer ***elastischen Gestaltung*** *zu minimieren (dritte Reihe).*

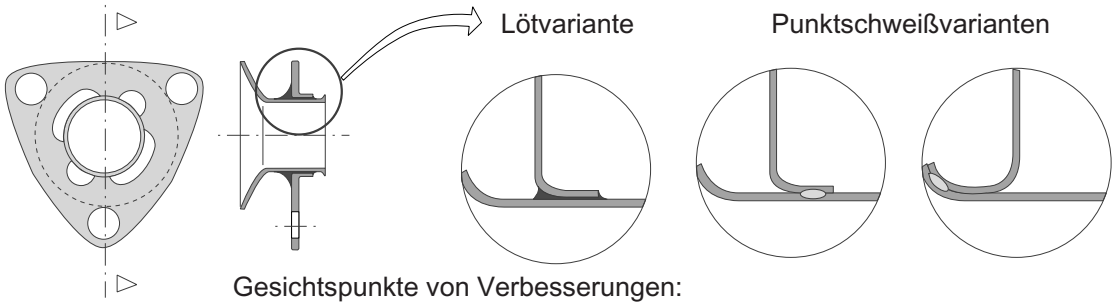
© Axel Bossmann - TU Berlin
Als Schulungsunterlage verwenden

Beispiel für die Gestaltung der Lötung eines Bauteils mit großen behinderten Wärmedehnungen.

In der Hochtemperaturlötung gebrochenes Luftführungsteil einer Brennkammer

Verbindungen an einem dünnwandigen thermisch hochbelasteten Brennkammerteil im Bereich der Kraftstoffdüse.

Verbesserungsvarianten mit verbesserter Nachgiebigkeit um Wärmedehnungen aufzunehmen..



Gesichtspunkte von Verbesserungen:

- erhöhte Nachgiebigkeit
- Vermeidung des schädigenden Loteinflusses durch Versprödung infolge Diffusion. Lötung aus hochbeanspruchter Zone verlegt.
- Schweißen statt löten.

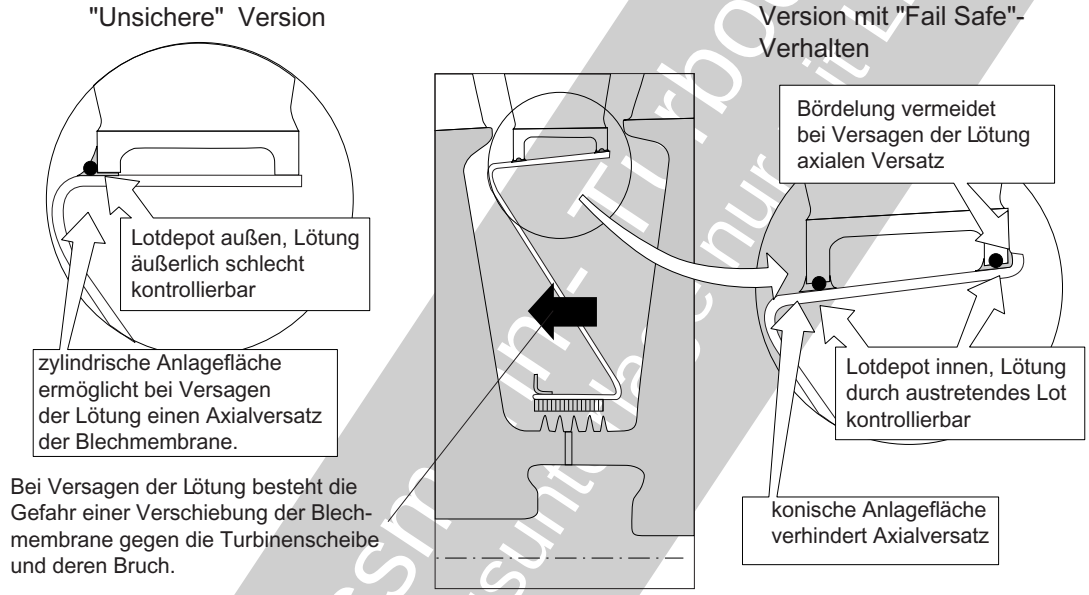
Bild 12.2.1.4-19

Bild 12.2.1.4-19: *Das Beispiel zeigt die Optimierung der* ***Gestaltung einer Lötverbindung****. Es handelt sich um ein Luftführungsteil im Bereich der Einspritzdüse einer Brennkammer. Das Bauteil besteht aus sehr dünnem warmfesten Blech und ist hohen Wärmespannungen, hochfrequenten Schwingungen und Gaskräften ausgesetzt.*
Die ursprüngliche Variante (unten links) wies nach wenigen Stunden Versuchsbetrieb Risse in den drei Stegen zwischen Rohr und dreieckigem Befestigungsflansch auf (Skizze oben links). Es handelte sich offenbar in erster Linie um Thermoermüdung. Die Rissbildung wurde von spröden Phasen in der Diffusionszone der Lötung begünstigt (Detail oben rechts). Um die Belastung abzubauen, musste der ***Lötnahtbereich elastischer gestaltet*** *werden. Vorgeschlagene Varianten zeigen die drei Details (im Rahmen).*
- Erster Schritt war ein ***dünnerer Dreiecksflansch*** *mit einer* ***Umbördelung*** *zur Lötung.*
- Daneben wurden zwei ***Punktschweißvarianten*** *konzipiert.*
Einmal, indem lediglich die Lötung von einer Punktschweißung ersetzt wurde.
In einer weiteren Lösung wurde die Bördelung deutlich verlängert und die Punktschweißung so angebracht, dass ein deutlich ***verlängerter Bördelsteg Dehnungen aufnehmen und ausgleichen*** *konnte.*

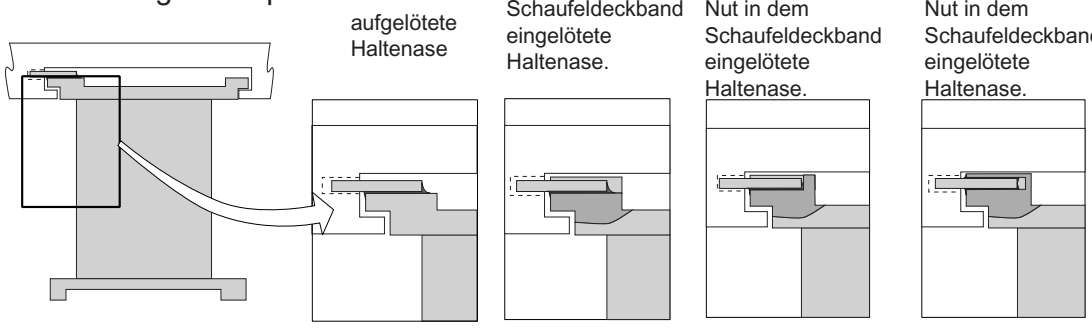
© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Formschluss sollte Lötungen redundant gegen Versagen machen. Lotdepots sind so anzubringen, dass Rückschlüsse auf die Füllung des Lotspalts möglich sind.

Möglichkeiten, die Sicherheit der Lötverbindung für die Befestigung der Membrane für die Zwischenstufendichtung in einer Turbine zu verbessern.



Gestaltung einer Fixierung unter Sicherheitsgesichtspunkten



Aus dem Gesichtspunkt der Sicherheit der Verbindung der Haltenase am Bauteil, günstigere Anordnungen.

Kostengünstigere Fertigung

Bild 12.2.1.4-20

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

Bild 12.2.1.4-20: *In diesem Fall handelt es sich um ein* ***Zwischenstufenlabyrinth*** *der Gaserzeugerturbine einer Kleingasturbine (mittleres Detail oben links). Die Außenkontur der Blechnabe war als* ***Zylinder*** *ausgeführt, das* ***Lotdepot außen an den Spalten angebracht****. So war an Hand der Lötnaht nicht festzustellen, ob die gesamte für die Verbindung vorgesehene Fläche benetzt wurde. Nach einem Versagen der Lötung im Betrieb zwischen Blechmembrane und Innenband des Leitapparates, konnte sich die Membrane gegen das hintere Turbinenrad schieben und im Nabenbereich einfräsen. Die Folge war ein Radbruch. Die deutlich erkennbar unbenetzte Drehfläche auf der Deckbandseite ließ erkennen, dass hier keine Lötverbindung stattgefunden hatte, obwohl äußerlich eine Lothohlkehle vorhanden war.*

Eine verbesserte Konstruktion mit ***Fail Safe Potenzial*** *zeigt das Detail oben rechts. Hier verhindert die* ***konische Außenkontur*** *von Membrane und Deckband mit der* ***Umbördelung****, selbst bei vollkommenem Versagen der Lötverbindung, ein gefährliches axiales Verschieben der Membrane. Wird das Lotdepot in den Radialstegen des Deckbands als Ringnut angebracht, zeigt das nach außen tretende Lot bei einer visuellen Prüfung die Benetzung der vorgesehenen Bindeflächen an.*

In den Skizzen unten sind Turbinenleitschaufeln mit ***aufgelöteter Haltenase*** *dargestellt, die eine Rotation gegenüber dem Gehäuse verhindern soll. Versagt diese Fixierung, kann es zu einem* ***katastrophalen Turbinenschaden*** *kommen, wenn sich der rotierende Leitapparat durch die Gehäusewand fräst.*

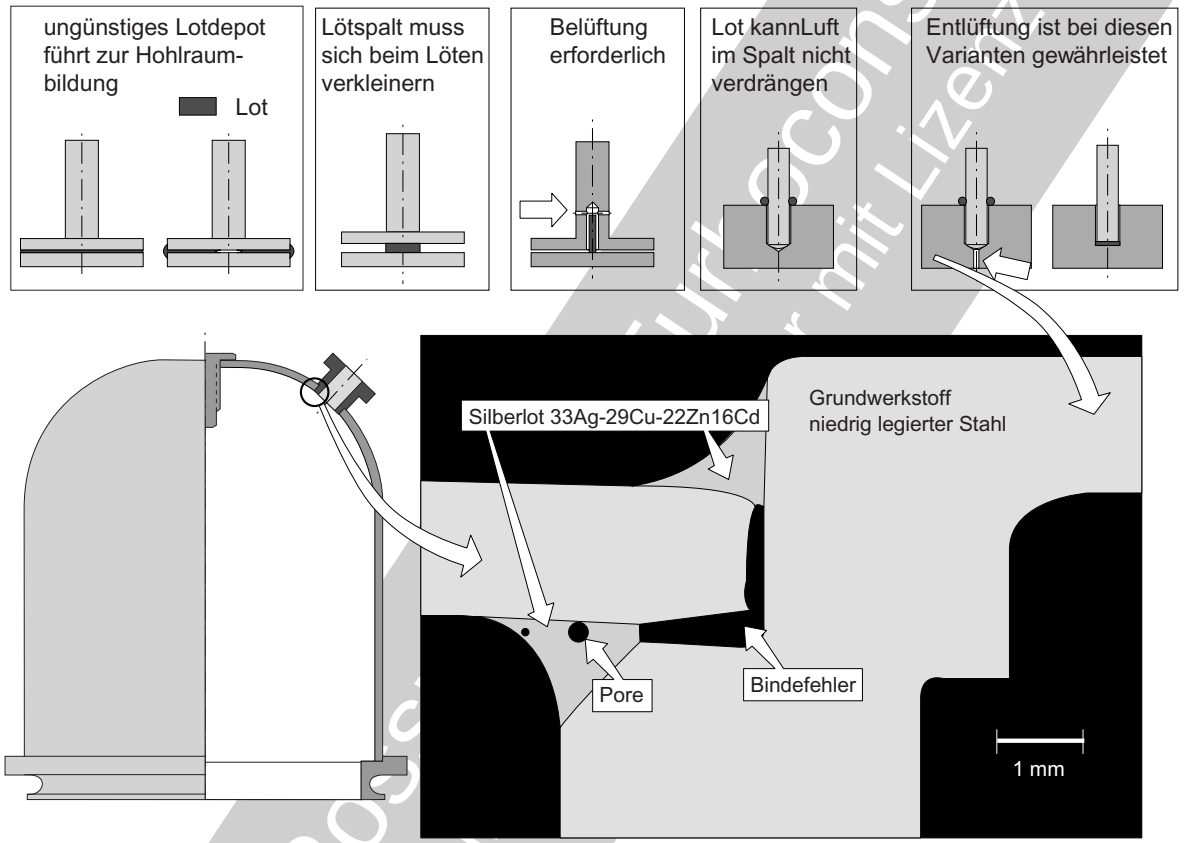
In der links dargestellten Variante ist das Halteplättchen lediglich ***auf das Außendeckband*** *gelötet. Eine Kontrolle des flächigen Bindeanteils von außen ist unbefriedigend. Bei schrittweisem Versagen der Lötung kann sich die Nase nicht abstützen und so den Rest der Lötung entlasten. Die Schaufel ist nach dem beschleunigten Versagen der Lötung sofort frei.*

In der rechts folgenden Variante, ist die Nase in eine ***axial durchgehende Nut eingelötet****. So kann dieser* ***Formschluss*** *die Lötung entlasten und verhindert selbst nach einem Versagen der Lötung ein spontanes Freiwerden der Schaufel. Es ist jedoch nicht gewährleistet, dass sich die Nase nicht axial nach hinten verschiebt und so die Fixierung verloren geht.*

Wird die ***Axialnut nach hinten geschlossen,*** *ist auch die Möglichkeit einer Längsverschiebung der Haltenase nach einem Lötnahtversagen ausgeschlossen. Natürlich ist dies eine vergleichsweise* ***aufwändige Variante****. Falls noch die Gefahr besteht, dass eine frei gewordene Haltenase radial nach außen außer Eingriff gerät, wäre die rechts außen dargestellte Variante möglich. Es handelt sich um einen* ***Schlitz in den die Haltnase eingeschoben und eingelötet*** *wird. In diesem Fall dürfte das Lotdepot am Stirnende der Nase positioniert werden. Das aus dem Spalt nach vorne tretende Lot würde dann eine Spaltfüllung kontrollierbar anzeigen.*

© Axel Possmann - Turbocon Suit
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Mit der Gestaltung der Lötung und der Anordnung des Lotdepots hat der Konstrukteur entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Lötung.



Lötfehler auf Grund ungünstigen Lotdepots am Einsatz eines Ölfiltergehäuses.

Bild 12.2.1.4-21

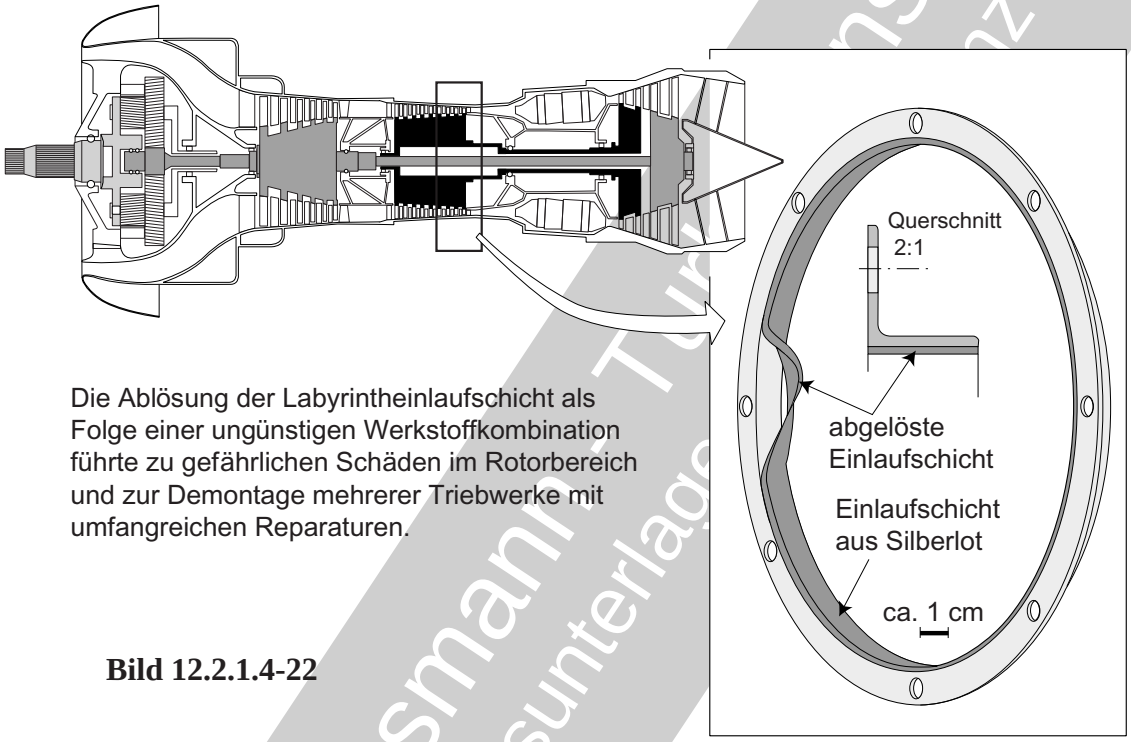
Bild 12.2.1.4-21: *Die* ***Positionierung und Ausbildung des Lotdepots*** *beeinflusst die Zuverlässigkeit der Nahtfestigkeit. Damit wird die Voraussetzung für eine Füllung des gesamten Lötspalts gegeben. Zusätzlich lässt sich mit einer* ***visuellen Inspektion der Lötnahtkehle*** *eine einfache zerstörungsfreie Prüfung durchführen. Voraussetzung ist, dass das Lot von einem* ***innenliegenden Depot*** *nach außen treten muss. Grundsätzlich ist deshalb das Lot zu zwingen, von einem Ende der Verbindungsfläche zum anderen zu fließen. Bei kreisförmigen Flächen sollte der Fluss vom Zentrum nach außen erfolgen. An Lötungen mit ganzflächigen Lötfolien besteht die erhöhte Gefahr von Bindefehlern auf Grund nicht ausgefüllter Hohlstellen. Diese werden von Rauigkeitsspitzen, Gasblasen oder Flussmitteleinschlüssen begünstigt. Abhilfe ist in diesem Fall die Positionierung des Lotes in Querschnittsmitte (Skizzen oben). So kann sich eine gleichmäßige Ausbreitungsfront bilden. Bei Zapfen-/Sacklochverbindungen ist das Lot im Bohrungsgrund anzubringen. Das Lot lässt sich als Ring an der Bohrungsöffnung um den Bolzen anordnen. In diesem Fall muss am Bohrungsgrund ein* ***Entlüftungsloch*** *angebracht sein. Dieses muss während des Lötvorgangs frei liegen und darf nicht an der Standfläche des Teils abgedichtet sein.*

Bild 12.2.1.4-23 *zeigt einen Fall, in dem diese Grundregel nicht beherzigt wurde, was letztendlich zu einer erzwungenen Landung führte.*
Nach Möglichkeit soll das ***Lot in Schwerkraftrichtung fließen****.*
Das lässt sich mit einem Lotdepot am Bohrungsgrund erreichen, wenn die Bohrung nach unten weist. Ein Herauswandern durch atmosphärische Druckunterschiede oder die Schwerkraft ist geeignet zu begrenzen.
Eine besondere Problematik stellt die ***zerstörungsfreie Prüfung von Lötverbindungen*** *dar. Dünnwandige Teile lassen sich in vielen Fällen durch Röntgen prüfen (Bild 12.2.1.4-4). Qualitätskriterium ist der bindende Lötflächenanteil.*
Eine Prüfung mit ***Ultraschall ist bei günstiger Lötstellenanordnung*** *und Bauteilgeometrie möglich.*
In vielen Fällen ist jedoch die Gestaltung der Lötung und verlöteten Teile so, dass sich keines dieser Verfahren ausreichend sicher anwenden lässt. Hier muss bereits ***bei der Konstruktion der Lötung durch geeignete Wahl von Lotdepotlage*** *und -form eine Inspektion der Lötnahtqualität nach dem Lötvorgang gewährleistet sein. Bei innenliegenden Lotdepots kann z.B. das* ***gleichmäßige Austreten des Lotes auf der gesamten Nahtlänge*** *ein brauchbares äußeres Merkmal für die akzeptable Qualität der Lötung sein (Bild 12.2.1.4-20).*
Die Skizze unten zeigt ein Ölfiltergehäuse aus niedrig legiertem Stahl. In seltenen Fällen versagte die Lötung des Einsatzes. Offenbar wurde ein außen liegendes Lotdepot verwendet, das eine Nahtkehle erzeugt. Diese ließ jedoch keine Beurteilung der Füllung des darunter liegenden Spalts zu. Eine solche Situation begünstigt Lötfehler, wie sie das nebenstehende Detail exemplarisch zeigt.

© Axel Bossmann - Turboconsult
Arbeitsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

Das Ablösen eines Lot-Anstreifbelags kann zu umfangreichen Folgeschäden führen.



Die Ablösung der Labyrintheinlaufschicht als Folge einer ungünstigen Werkstoffkombination führte zu gefährlichen Schäden im Rotorbereich und zur Demontage mehrerer Triebwerke mit umfangreichen Reparaturen.

Bild 12.2.1.4-22

Bild 12.2.1.4-22: Anstreifbeläge *von Labyrinthen können mit Hilfe einer Lötung auf einen Tragring aufgebracht werden (Bild 12.2.1.4-12). Aber auch das* ***Lot selbst kann als Anstreifschicht*** *dienen (Skizze rechts).*

Die ***Ablösung eines solchen Lotbelags*** *kann zu katastrophalen Schäden führen. Sie wird an aufgelöteten Anstreifschichten in erster Linie von einer* ***schlechten Bindung zum Grundmaterial*** *begünstigt. Dafür gibt es unterschiedliche Ursachen:*

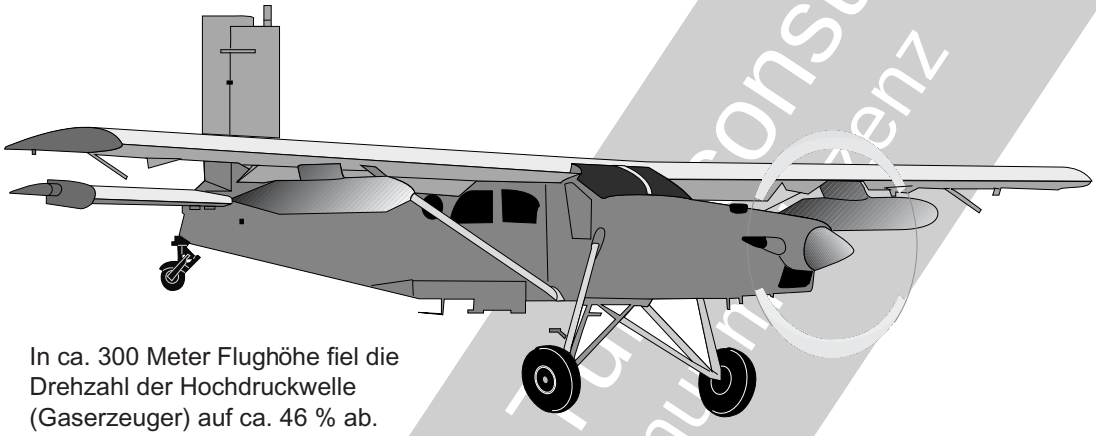
Problematik einer Lötung poröser Beläge ist das Aufsaugen des Lots vom Belag bevor es zu einer Bindung mit dem Grundmaterial kommt (Bild 12.2.1.4-12). Ähnliches gilt auch für Verbindungen mit Klebstoff (Bild 12.2.1.5-5 und Bild 12.2.1.5-8).

Bindefehler als Folge von Oxidation der Grundmaterialoberfläche, Flussmitteleinschlüssen oder ungünstigen, vom erprobten Lötverfahren abweichenden Prozessparametern. Eine weitere Möglichkeit für die Ablösung eines aufgelöteten Lotbelags ist im Bild dargestellt. Hier war der Grund für die Ablösung im Betrieb die Auswahl eines ungünstigen Lots und nicht optimierte Fertigungsparameter. Auf Grund eines sehr ***unterschiedlichen Wärmedehnungsverhaltens zwischen Lotschicht (Typ Silberlot) und dem Grundmaterial (Vergütungsstahl)*** *traten im Betrieb extreme Druckspannungen in der Lotschicht auf. Diese führten nach längeren Betriebszeiten und etlichen Betriebszyklen zum Ablösen des Belags. Möglicherweise in Kombination mit einem intensiven Anstreifvorgang (Aufheizen) mit schlechter Wärmeabfuhr zum Grundmaterial. Im Bereich der Ablösung kam es zu dem in der Skizze rechts dargestellten Schaden. Eine aufwändige Demontage und Reparatur mit hohen Kosten waren die Folge.*

© Axel Rossmann - Turbomaschinen als Schulungsunterlagen

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Löten

Bei Lötungen ist darauf zu achten, dass keine eingeschlossene Luft die Ausbreitung des Lots behindert.



In ca. 300 Meter Flughöhe fiel die Drehzahl der Hochdruckwelle (Gaserzeuger) auf ca. 46 % ab.
Damit lag die Triebwerksleistung unter der Leerlaufleistung. Obwohl das Triebwerk nicht mehr auf den Gashebel reagierte, gelang die Landung auf einer Heuwiese ohne Schaden und Verletzte.
Ursache des Triebwerksausfalls war der Zusammenbruch des Vakuums in einer schlecht gelöteten doppelwandigen Druckdose des Reglers (siehe Rahmen unten).

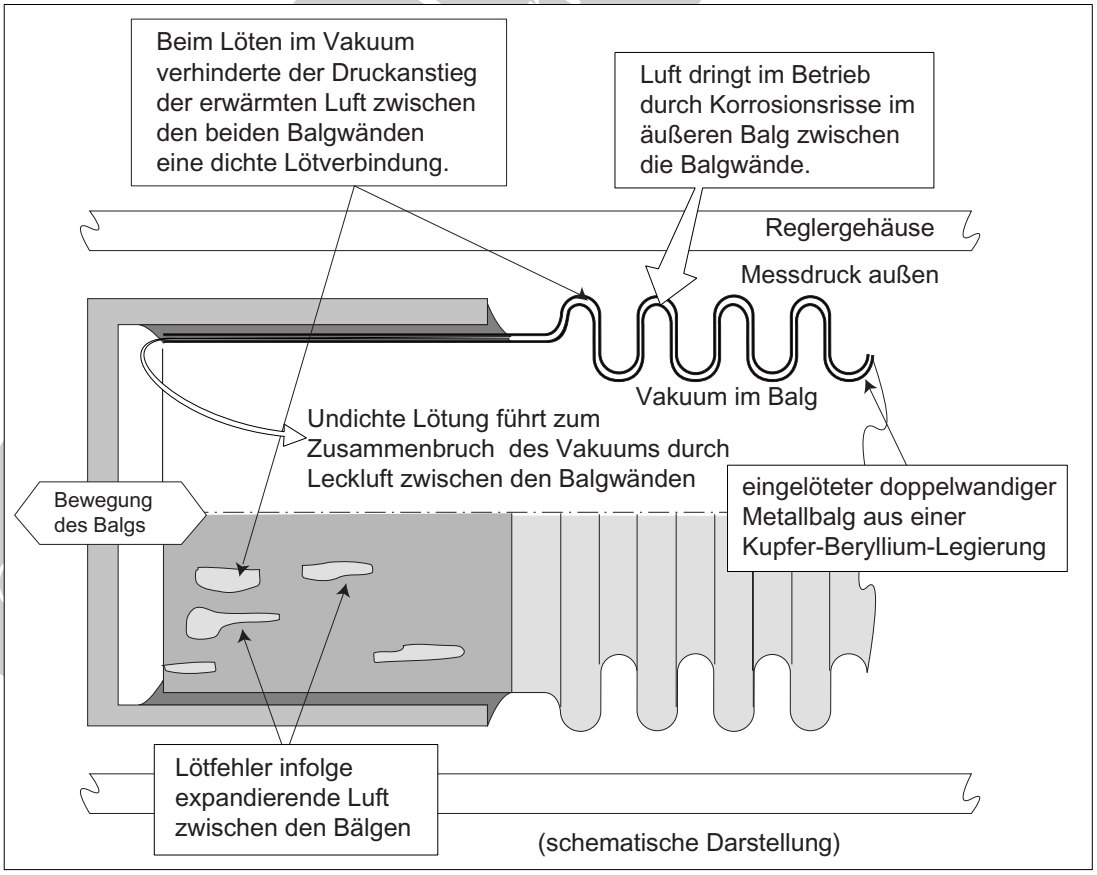


Bild 12.2.1.4-23

Bildbeschreibung nächste Seite

Bild 12.2.1.4-23 *(Lit 12.2.1.4-22): Der* ***Kraftstoffregler*** *des Triebwerks nutzte im dargestellten Fall einen evakuierten* ***metallischen Faltenbalg*** *(acceleration bellow) der auf den Umgebungsdruck mit einer Längsdehnung reagiert. Diese Axialbewegung dient als Regelgröße. Als das Vakuum im Balg zusammenbrach, wurde die Kraftstoffzufuhr so eingeschränkt, dass die verbliebene Triebwerksleistung nicht mehr ausreichte. Das Flugzeug musste auf einer Wiese notlanden.*

Der Balg besteht aus Blechen einer ***Kupfer-Beryllium-Legierung****. Die doppelwandige Ausführung (Rahmen unten) ermöglichte ein* ***Fail-Safe-Verhalten*** *bei Leckage der äußeren Wand. Eine solche Schädigung trat im Betrieb in Form interkristalliner Korrosion und Grübchenbildung auf. Ursache waren* ***aggressive Schwefel- und Chlorverbindungen*** *wie sie für Meeres- oder Industrieatmosphäre typisch sind. Der innere Balg konnte seine absichernde Funktion nicht wahrnehmen, weil die abdichtende Lötung an den Balgenden Fehlstellen aufwies und Leckluft in das Vakuum eindrang.*

Ausbildung und Form der Fehlstellen zeigen, dass sich ***beim Verlöten der Balgenden Luft im Spalt zwischen den Bälgen befand,*** *die nicht entweichen konnte (Bild 12.2.1.4-21). Die Löttemperatur ließ den Luftdruck ansteigen und verhinderte eine fehlerfreie Füllung des Lötspalts. Im Betrieb führten die Fehlstellen zur Leckage in das Vakuum.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Abhilfen gegen Probleme und Schäden an Lötungen

© Axel Pressmann Turboconsult
alle Rechte mit Lizenz

In dieser Aufstellung werden einige Abhilfen für Triebwerksschäden im ursächlichen Zusammenhang mit Lötungen angesprochen.

Lötgerechte Konstruktion:

- Vermeidung einer **Schälbeanspruchung** der Lötung (Bild 12.2.1.4-18) .
- Vermeidung von **Spannungskonzentrationen** im Lötnahtbereich (Bild 12.2.1.4-19).
- Vermeiden von Loten an **überhitzungsgefährdeten Bauteilbereichen**.
- „**Fail Safe**“ - Konstruktion durch zusätzliche **formschlüssige Sicherung** gegen unzulässiges Verschieben der Bauteile bei aufgegangener Lötung (Bild 12.2.1.4-20).
- In der Auslegung mechanisch merklich belasteter Lötverbindungen ist der technisch **sicher erreichbare Bindeflächenanteil** zu berücksichtigen. Dieses Qualitätsmerkmal ist mit einer seriengeeigneten zerstörungsfreien Prüfmethode zu gewährleisten.
- **Vernickeln** der Lötflächen bei Bauteilen aus Superlegierungen, die mit artgleichem Lotwerkstoff gelötet werden, ist zu prüfen. Eine solche Maßnahme hat das Ziel einer Verbesserung des Lotflusses, der Benetzung und damit des Spaltfüllungsvermögens sowie schmälere Diffusionszonen zu gewährleisten.

Auswahl eines geeigneten Lots:

- Hat nach Kriterien aus dem zu erwartenden Betrieb zu erfolgen. Hierzu gehören mechanische Belastungen, Temperaturen, Zeiten und korrosive Einflüsse. Sind diese nicht ausreichend bekannt, muss versucht werden diese zu **Betriebsdaten zu ermitteln**. Ist das nicht befriedigend möglich, ist eine **geeignete Erprobung vorzusehen**.
- Die Lötung muss bei den bauteiltypischen, **maximal möglichen Betriebstemperaturen** (z.B. von Turbinenleitschaufeln) noch ausreichende **Festigkeitsreserven** aufweisen, wenn ein Fail Safe-Verhalten nicht zu erwarten ist.
- **Sonderbelastungen** wie im **Containmentfall** oder beim **Abbremsen des Rotors** als Folge eines Wellenversagens (**Intermeshprinzip**) sind zu berücksichtigen.

Der Lötprozess:

- Voraussetzung für einen Lötprozesses der den Sicherheits- bzw. Qualitätsanforderungen des Triebwerkbaus entspricht, insbesondere bei einer eingeschränkten zerstörungsfreien Prüfmöglichkeit, ist die **möglichst kontinuierliche Überwachung und Dokumentation der wichtigsten Prozessparameter**. Hierzu gehören in erster Linie Arbeitstemperatur, Lötzeit, Ofen, Schutzgas.
- Besteht die Gefahr von **Anschmelzungen** und „**Verkleben**“ während einer Diffusionsbeschichtung, ist dies in einer geeigneten Prozessefolge zu berücksichtigen. Das gilt auch um **Ausblühungen des Lots** zu vermeiden.
- Verwendung geeigneter **Lötvorrichtungen,** um optimale Spaltbreiten zu gewährleisten. Hierzu gehört die Abstimmung der Wärmedehnungen.

Reparaturlötungen an Heißteilen:

Obwohl sich dieses Kapitel im Schwerpunkt mit der Neuteilherstellung beschäftigt, sei kurz auf die **Reparatur von Heißteilen** durch Hochtemperaturlöten eingegangen. In zunehmendem Maße werden Triebwerksheißteile wie Turbinenleit- und Laufschaufeln, Schubdüsenklappen und Brennkammern durch Löten repariert. Es handelt sich gewöhnlich um Risse, Hochtemperaturkorrosion, Verbrennungen und Verschleiß als Folge von Anstreifvorgängen oder Fretting. Dabei werden entweder Risse nach entsprechender Vorbereitung zugelötet oder geschädigte Bauteilpartien entfernt und neue aufgelötet. Selbstverständlich kann von einem zugelöteten Riss nicht die Festigkeit des Neuteils erwartet werden. Es handelt sich deshalb häufig um „**kosmetische Lötungen**“.Beispiele sind das Schließen von Schleifrissen auf niedrig belasteten Flächen (z.B. Anlageflächen), Abdichtungen von Rissen zu Kühlluftkanälen an Turbinenleitschaufeln oder Auftragungen an Labyrinthspitzen. Für mechanisch merklich belastete Reparaturlötungen muss mit einer deutlich **begrenzten Lebensdauer gegenüber dem Neuteil** gerechnet werden. Dies liegt sowohl an der Sprödigkeit der Hochtemperaturlote auf Ni- und Co-Basis als auch an der gewöhnlich, wegen der **nicht optimalen Lötbedingungen**, minderen Qualität von Reparaturlötungen. Die Bindung der Lötung hängt entscheidend von einer geeigneten **Vorbehandlung** des zu reparierenden Bauteils ab. Risse sollten möglichst bis zum Grund metallisch sauber, d.h. oxidfrei sein. Dies wird üblicherweise mit Glühen in geeigneter Atmosphäre nach einer intensiven mechanischen und/oder chemischen Oberflächenreinigung angestrebt. Das Glühen erfolgt in reduzierender Atmosphäre (Wasserstoff), im Vakuum oder in Halogenen (Chlor, Fluor). Erfolgsversprechend ist die Kombination einer Lötung mit einer **HIP-Behandlung** (engl. Hot Isostatic Pressing, Bild 11.3-8) wobei das Lot den Riss vorher schließen muss, um als „Container“ zu wirken. Die Rissufer sollen dann vom hohen Außendruck zusammengepresst werden, wobei sie über Diffusion verschweißen. Oft ist bei Rissbildung jedoch eine vollwertige Reparatur nur in Verbindung mit anderen belastungsabbauenden Maßnahmen möglich (Band 1, Bild 5.4.2.2-4). Hierzu gehört z.B. das Aufbringen von Thermobarrieren bei Thermoermüdung oder konstruktive Entlastung. Werden ganze Bauteilpartien ausgetauscht, ist es einleuchtend, dass die Reparaturlötnaht nicht von den zu erwartenden Betriebskräften überbeansprucht werden darf. Der Konstrukteur hat damit eine geeignete Lage der Schnitte und damit der Lötung zu wählen. Generell sollten solche Lötnähte nicht parallel und in der Nähe zu einer bekannten Rissbildung verlaufen.

Unerlässlich ist die ausreichende **bauteilspezifische Erprobung der Vorbehandlungs- und Löttechnologie** sowie eine **betriebsnahe Erprobung reparierter Bauteile,** bevor eine Reparaturlötung ins Auge gefasst werden kann.

© Axel Bossmann, Dipl.-Ing. (FH) als Schutzmaßnahme nur für Verwendung

Literatur zu Kapitel 12.2.1.4

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.4-1 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 69-78.

12.2.1.4-2 ASM „Metals Handbook“, „Volume 6- Welding, Brazing and Soldering“, ISBN 0-87170-377-7, 1997, Seite 900-940.

12.2.1.4-3 R.Lison, „Durch die Verbindungsgeometrie bedingte Grenzen der Lötbarkeit von metallischen Werkstoffkombinationen mit zylindrischem Lötspalt“, Zeitschrift „Metall“, 38. Jahrgang, Heft 1, Januar 1984, Seite 37-40.

12.2.1.4-4 U.Draugelatis, „Ursachen des Bruchverhaltens schwingend beanspruchter Hochtemperatur-Lötverbindungen“, Zeitschrift „Metall“, 36. Jahrgang, Heft 9, September 1982, Seite 964-968.

12.2.1.4-5 R.L.Peaslee, P.F.Walter, „How Oxygen Affects Nickel Brazing Filler Metals“, Zeitschrift „Welding Journal“, December1994, Seite 61-66.

12.2.1.4-6 E.Lugscheider, „Hochtemperaturlöten, Stand und Entwicklungstendenzen - Lote“, Zeitschrift „Schweißen und Schneiden“, Jahrgang 32, Heft 5, 1980, Seite 171-175.

12.2.1.4-7 „Adhesives“, Zeitschrift „Machine Design“, November 19, 1981, Seite150-151.

12.2.1.4-8 „Brazing Processes“, Zeitschrift „Machine Design“, November 15, 1979, Seite164-166. und „Adhesives“, Seite172-177.

12.2.1.4-9 „Hartlöten von Stahl“, Merkblätter, Beratungsstelle für Stahlverwendung, Best. Nr. 237, 2. Auflage 1961. Seite 1-8.

12.2.1.4-10 J.Colbus, „Das Löten, Überblick und Anwendungsstand“, Mitteilungen der BEFA, Nr. 11, 14. Jahrgang, 1963, Seite 1-16.

12.2.1.4-11 J.Colbus, W.Hauch „Beitrag zum Verhalten von Lötverbindungen aus Hochtemperaturloten auf Edelmetallbasis an hochwarmfesten Werkstoffen bei Zeitstandsbelastungen bis zu 1000 Stunden und Temperaturen bis zu 800°C“, Zeitschrift „Metall“, 23. Jahrgang. Oktober 1969, Heft 10. Seite 995-1002.

12.2.1.4-12 Zeitschrift „Metals Engineering Quarterly“, der American Society for Metals (ASME), November 1969, Seite 9-11.

12.2.1.4-13 D.G.Howden, R.W. Monroe, „Suitable Alloys for Brazing Titanium Heat Exchangers“, Zeitschrift „Welding Journal“, January 1972 , Seite 31-36.

12.2.1.4-14 W.Wuich, „Rationalisieren, Zeitschrift „Metall“, 24. Jahrgang, April 1970 , Heft 4, Seite 371-374.

12.2.1.4-15 W.Wuich, „Ermittlung der ertragbaren Beanspruchung beim Hartlöten“, Zeitschrift „Metall“, 25. Jahrgang, August 1971 , Heft 8, Seite 888-891.

12.2.1.4-16 H.Lange, „Anwendung des Hochtemperaturlötens im Vakuum zum stoffschlüssigen Verbinden warmfester Legierungen“, Zeitschrift „Metall“, 26. Jahrgang, August 1972 , Heft 8, Seite 814-820.

12.2.1.4-17 „New Generation Avionics Add Reliability“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“,October 6, 1980, Seite 76-81.

12.2.1.4-18 ASM „Metals Handbook Ninth Edition“, „Volume 11- Failure Analysis and Prevention“, ISBN 0-8710-007-7, 1989, Seite 450-455.

12.2.1.4-19 A.Rabinkin, „Overview Brazing With (NiCoCr)-B-Si Amorphous Brazing Filler Metals: Alloys, Processing,Joint, Structure, Properties, Applications“, Appendix, , Honeywell Int. Metglas-Solutions, Internet, Jan. 2005.

12.2.1.4-20 H.D.Kunze, „Zähigkeit von HT-Lötungen“, Fraunhofer Institut für angewandte Materialforschung, Bremen.

12.2.1.4-21 L.Engel, H.Klingele, „An Atlas of Metal Damage“, Carl Hanser Verlag 1981, München, ISBN 0 7234 0750 9, Page 72,73.

12.2.1.4-22 Transportation Safety Board of Canada, „Aviation Investigation Report A01H0003 „Engine Power Loss - Forced Landing“, 22. July, 2001, Seite 1-10.

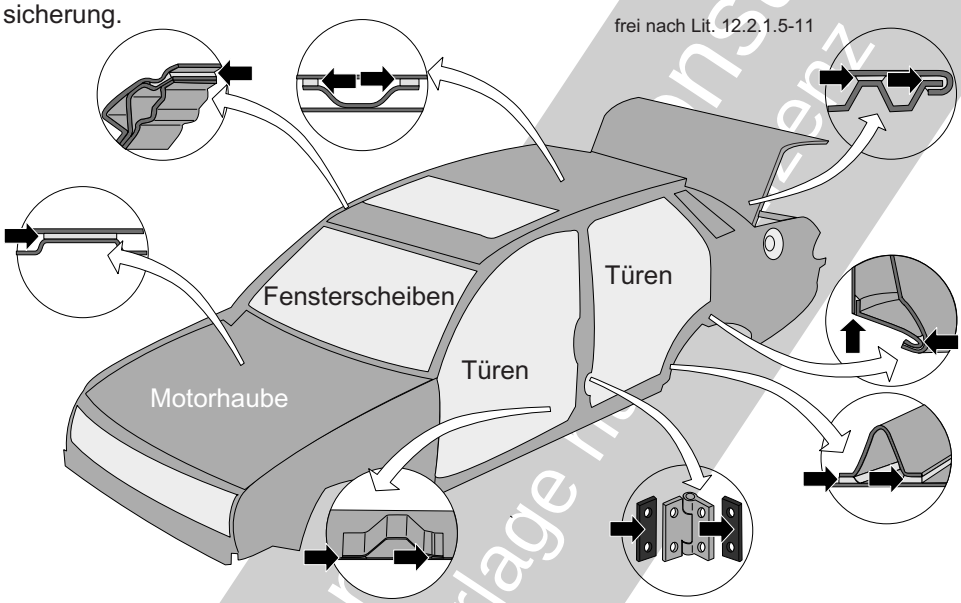
12.2.1.4-23 S.J.Wahlen, J.J.Kozelski, T.Hikido, „Failures of Brazed Joints“, ASM, „Failure Analysis and Prevention Volume 11“, 1986, ISBN 0-87170-007-7 (v.1) Seite 450 - 455.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.5 Klebeverbindungen

Eine PKW-Karosserie als Beispiel für die vielfältige Anwendung des Klebers für Strukturverbindungen, Dämpfung, Dichtung, Korrosionsschutz und Schraubensicherung.

frei nach Lit. 12.2.1.5-11



© Axel Rosemann Ingenieurbüro Beratung und Lehrmaterialien

Unter **Klebeverbindungen** werden hier Verbindungen verstanden, bei denen ein nichtmetallisches, adhäsives, chemisch reagierendes Bindemedium (Kleber) zum Einsatz kommt. Die chemische Wirkungsweise macht einen auf die zu verklebenden Werkstoffe abgestimmten Klebstoff notwendig. In Triebwerken kommen erstaunlich häufig Klebeverbindungen zum Einsatz. Dieser verstärkt sich mit der Einführung von Kunststoffen in ausreichend kühlen Zonen, insbesondere im Fan- und vorderen Verdichterbereich (Bild 12.2.1.5-2). Zu solchen Anwendungen werden im Folgenden auch Elastomere für Abdichtungen und zur Schwingungsdämpfung gezählt. Gewöhnlich sind die Klebstoffsysteme (Bild 12.2.1.5-3) auf die speziellen Betriebsanforderungen und Verarbeitungsbesonderheiten abgestimmt. Neben Temperatur und **Umgebungsatmosphäre** (Feuchtigkeit, Dämpfe, Salze, Aerosole) spielen der Einfluss von **Kraftstoff**, heißem und kaltem **Öl** sowie etwaiger **Wasch- und Reinigungsmittel** für das Betriebsverhalten eine wichtige Rolle. Dies gilt auch, wenn es sich um **reversible Einflüsse** wie eine **Feuchtigkeitsaufnahme** oder ein **Quellen** unter **Kraftstoffeinfluss** handelt.

Der Klebeprozess und damit die Eigenschaften der Klebeverbindung sind von vielen, auf den ersten Blick oft unerwarteten Einflüssen, betroffen (Bild 12.2.1.5-4). Selbst minimale Abweichungen des Prozesses bei der Vorbehandlung der Klebeflächen, der Umgebungsatmosphäre und dem Temperaturverlauf können zu einem Versagen der Verbindung im Betrieb führen. Deshalb ist **fachkundiges Personal** und **geeignete, separate (Raum) Verarbeitung** Voraussetzung für triebwerksgeeignete Klebeverbindungen.

Erwähnt werden muss, dass im Triebwerk auch Hochtemperaturkleber zum Einsatz kommen. So werden z.B. Sonden wie Dehnungsmessstreifen oder Thermoelemente für relativ kurzzeitige Versuchsläufe mit **keramischen Klebstoffen** auf Heißteile appliziert. Diese Klebstoffe beruhen auf einer Basis von Oxiden wie Al_2O_3 oder SiO_2. Manche können kurzzeitig Temperaturen deutlich über 1000°C ertragen. Bis Betriebstemperaturen von über 500 °C werden auch für eine Langzeitanwendung im Serieneinsatz geeignete anorganische Klebstoffe verwendet. Der häufigste dieser Klebstoffe ist von einem, seit langem bewährten, anorganischen Lacksystem auf Wasserbasis ab-

geleitet. Seine keramische Matrix (saure Phosphate-H_3PO_4) ist mit Al-Pulver gefüllt. Er wird zum **Einkleben von porösen Einlaufschichten** (**Filzmetall**, Bild 12.2.1.5- 6 und Bild 12.2.1.5-9) genutzt.

Die Grundregeln der Gestaltung von Klebeverbindungen können sich eng an die von Lötungen anlehnen (Bild 12.2.1.4-18). Auch Klebeverbindungen sind äußerst empfindlich gegen **Schälbeanspruchung**. Aus diesem Grund ist das Ergebnis eines Schältests ein wichtiges Eigenschaftsmerkmal. Auf möglichst große Bindungsflächen ist wegen der vergleichsweise niedrigen Klebstofffestigkeit und gegebenenfalls einer niedrigen Grundmaterialfestigkeit (Kunststoffe) zu achten. Deshalb kommen unterschiedliche Schäftungen zum Einsatz.

© Axelssmann - Turbocoaster
Ausbildungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 12.2.1.5-1 *(Lit. 12.2.1.511, Lit. 12.2.1.5-12, Lit. 12.2.1.5-13): Klebstoffe werden neben dem Fügen bzw. Verbinden in der Technik in unterschiedlichster Weise genutzt. Auf Seite 12.2.1.5-1 sind beispielhaft Verklebungen einer Pkw-Karosserie (**Strukturverbindungen**) aufgezeigt. Viele weitere **Anwendungen** sind jedoch durchaus nicht allgemein bewusst und sollen hier behandelt werden.*

*„**A**“ **Verdrehsicherung** von **Schrauben**. Hierzu werden bevorzugt anaerobische Klebstoffe verwendet Sie härten unter Luftabschluss, d.h. ohne Sauerstoffzutritt aus (Bild 12.2.1.5-2).*

*„**A**“ und „**B**“ **Dichtung** von **Flanschen**, **Gewinden** (z.B. an Rohrverbindungen und Armaturen) und **Schraubenköpfen**. Solche Klebstoffdichtungen gibt es für flüssige und gasförmige Medien wie in Kühl-, Hydraulik- und Druckluftsystemen. Mit ihnen lassen sich verstopfende Verunreinigungen durch andere Dichtmittel wie Hanf, Dichtbänder oder Pasten vermeiden.*

*„**C**“ **Fügen/Fixieren von Sitzen** (Auflagen) wie **Wälzlagerringen und Nabenverbindungen**. Sie dienen der Vermeidung von Verschleiß (Fretting, Passungsrost, Band 1 Kapitel 5.9.3) und Lockerung zylindrischer Kontaktflächen. Darüber hinaus lässt sich eine Montage vereinfachen.*

*„**D**“ **Abdichten** durchgehend **poröser Gussteile** (Leichtmetallguss aus Al- und Mg-Legierungen) durch Infiltrieren. Hier ist darauf zu achten, dass Überholvorgänge mit Entlackungen, Entfettungsflüssigkeiten, Lösungsmitteln und Beizmedien die Versiegelung schädigen bzw. wieder auslösen können. Sie sind also auf die Infiltration abzustimmen und vorzuschreiben.*

*„**E**“ **Verbinden und Abdichten unterschiedlich steifer Bauteile/Strukturen**. Hierfür bieten sich **elastische Klebstoffe** auf Polyurethan oder Silikonbasis an (Bild 12.2.1.5-2). Die Kleberschicht dient dem **Ausgleich von Dehnungen** durch Unterschiede in E-Modul, Wärmedehnung und Belastung. Typisches Bei-*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Klebeverbindungen

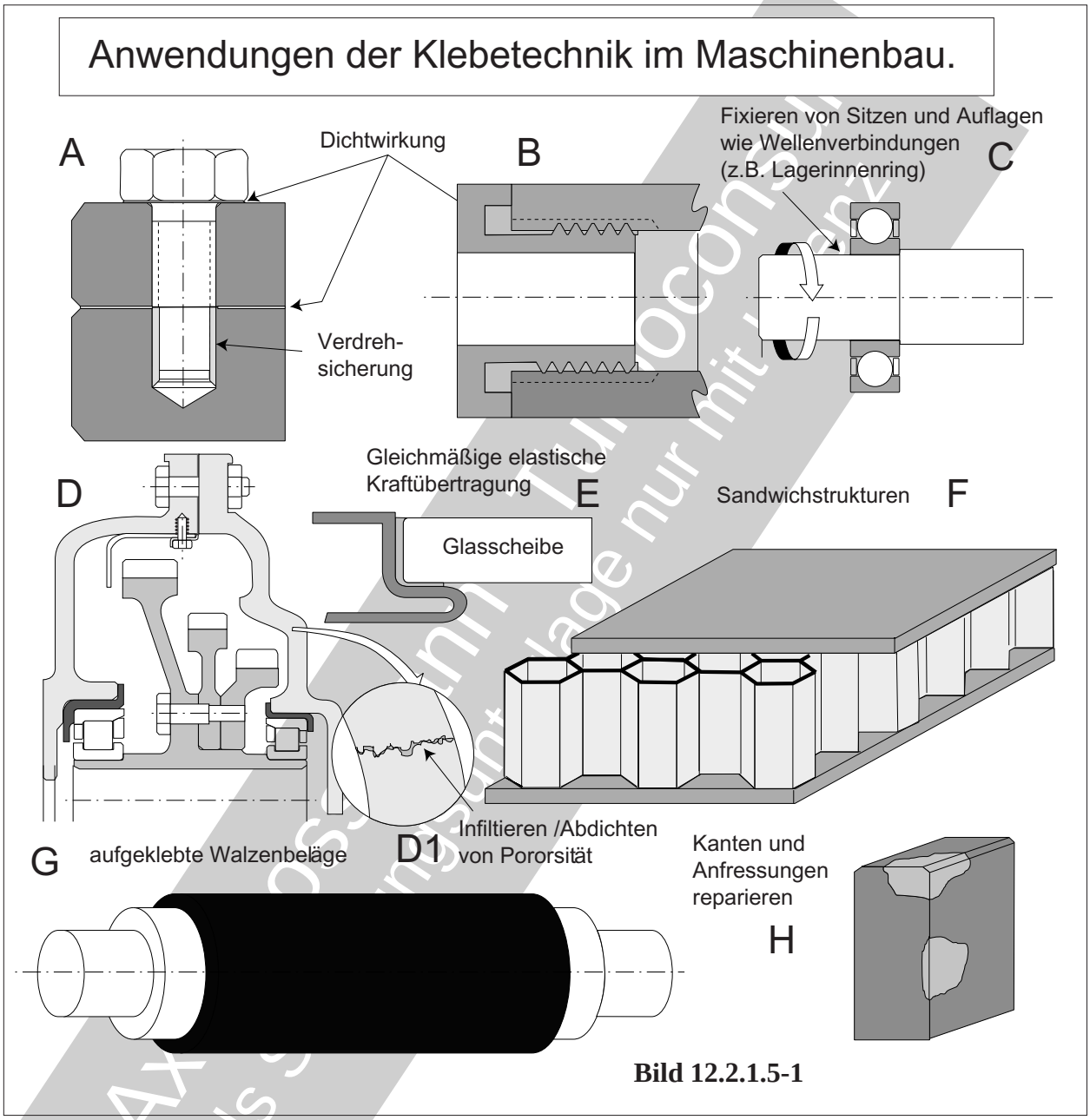


Bild 12.2.1.5-1

*spiel ist das **Einkleben von Glasscheiben** in tragende Metallstrukturen. So lassen sich örtliche Spannungsspitzen vermeiden und Dichtigkeit gegen Flüssigkeiten und Gase gewährleisten. Diese Vorteile werden auch bei Strukturverbindungen wie im Pkw-Bau wegen der Klebefestigkeit genutzt.*

*„**F**“ Herstellung von **Sandwichstrukturen**. Hier ist eine Verklebung meist die einzige Möglichkeit der Realisierung. Das gilt besonders für **nichtmetallische Werkstoffe,** die sich dem Schweißen und Löten entziehen.*

*„**G**“ Verbinden von **Belägen** mit Bauteiloberflächen. Typisches Beispiel sind **Elastomerauflagen** auf **Anpress- und Transportwalzen**.*

*„H“ **Reparatur** durch **Aufbau beschädigter Kanten und Oberflächen**. Hierfür bieten sich pastenförmige Zweikomponentensysteme auf Basis gefüllter Kunstharze (Polyester, Epoxid) an. Sie ermöglichen bei hoher Haftfestigkeit eine nachträgliche Konturanpassung und Glättung sowie die Lackierung.*

Bild 12.2.1.5-2: *Um den vielfältigen* ***Einsatz von Klebstoffen*** *im Triebwerksbau bewusst zu machen, ist der Fan- und vordere Verdichterbereich eines modernen Ziviltriebwerks mit möglichen Anwendungen dargestellt. Wahrscheinlich kommen nicht alle in diesem speziellen Fall zum Einsatz. Die Anwendungen sind mit einem Buchstaben gekennzeichnet, der in Bild 12.2.1.5-3 einem Klebstoffsystem zugeordnet ist. Die wichtigsten Anwendungen sind:*

Schalldämmung *befindet sich in der Hauptsache im Bypasskanal. Häufig handelt es sich um Wabenstrukturen aus Metall (Aluminium) oder Kunststoff (z.B. phenolharzgebunden), die gefüllt und/oder in* ***Sandwichbauweise*** *mit Epoxidkleber auf einer tragenden Struktur verklebt werden. Auch die* ***Füllung der Wabenstrukturen*** *kann mit einem pastösen Gemisch von* ***Klebstoff*** *(Epoxidharz) und* ***Füllstoff*** *(z.B. hohle Glasperlen, hohle Phenolharzkugeln) erfolgen.*

Einlaufschichten *dienen dem sanften Einfräsen der Schaufelspitze bei einer Spaltüberbrückung. Gewöhnlich handelt es sich um eine eingeklebte, gefüllte Wabenstruktur ähnlich der Schalldämmung. Diese Wabenstruktur kann auch im* ***Containmentfall*** *für ein sog.* ***Nestingverhalten*** *genutzt werden (Lit. 12.2.1.5-10).*

Schwingungsdämpfung: *Häufigste Anwendung ist das Einkleben der Deckbänder von Verdichterleitschaufeln mit Elastomeren wie Silikonklebern. In einigen Fällen wird der* ***Schaufelfuß von Rotorschaufeln mit Silikongummi eingeklebt*** *(Band 1, Bild 5.4.3.3-5). Besonders bei alten Triebwerkstypen, deren* ***Leit- und/oder Laufschaufeln aus Al-Legierungen*** *bestehen, konnte nur so ein befriedigendes Betriebsverhalten, ohne ein zu hohes Risiko von Schwingbrüchen, hergestellt werden.*
Eine andere Form der Schwingungsdämpfung ist das ***Aufkleben von Metallfolien*** *(Band 1, Bild 5.4.3.3-5) auf schwinggefährdete Leitschaufelblätter. Die Kleberschicht nimmt mit innerer Dämpfung Schwingenergie beim Ausgleich und der Übertragung des Dehnungsunterschieds von Bauteiloberfläche und Blech bei der Schwingbelastung auf (Band 1, Bild 5.4.3.3-14).*

Abdichtung: *An Verdichterrotorschaufeln wird der Schaufelfuß und eventuelle Schlitze unter der Fußplattform, die eine Verbindung vor und hinter der Stufe schaffen, mit Elastomeren (Silikongummi) abgedichtet.*

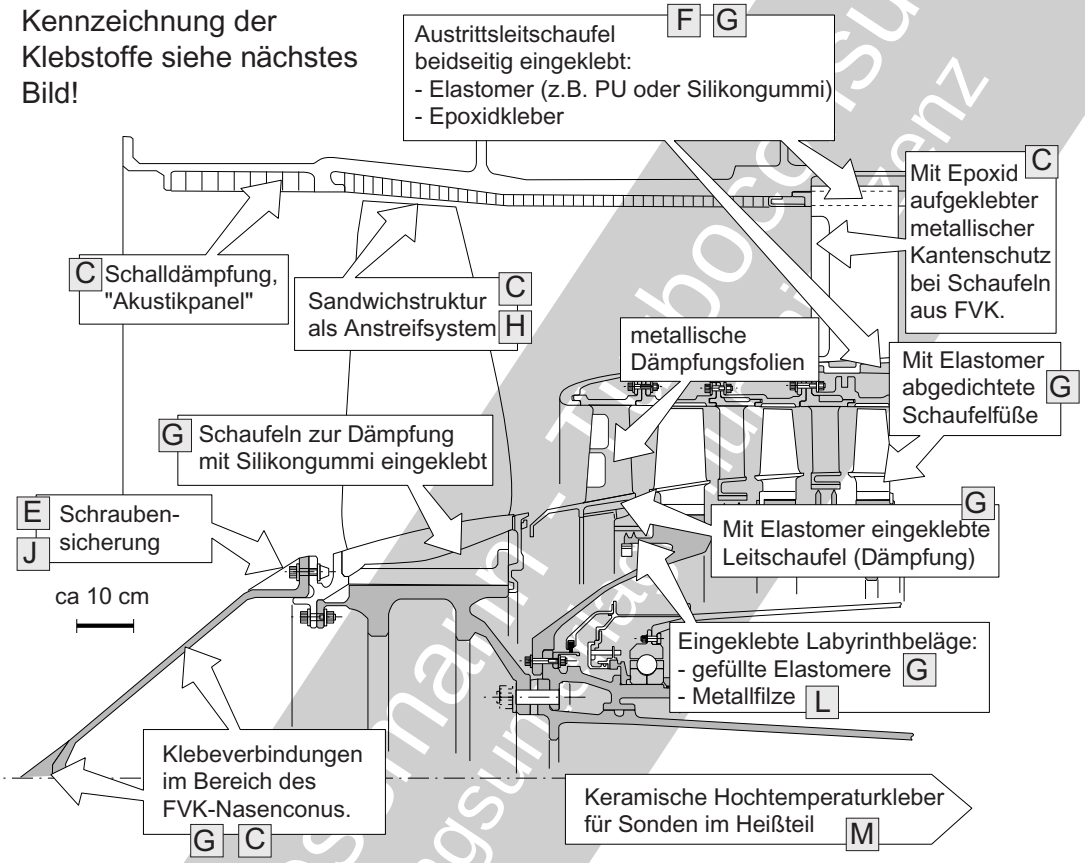
Verdrehsicherung und Fixierung dient in erster Linie *der* ***Sicherung von Muttern und Schrauben****. Eine weitere Anwendung ist die* ***Fixierung von Passsitzen*** *zwischen Naben und Wellen. Dafür werden* ***anaerobische Klebstoffe*** *verwendet, die* ***unter Luftabschluss im Kontakt mit Metalloberflächen aushärten****. Eine solche Klebeverbindung lässt sich beim Öffnen der Mutter unter leicht erhöhtem Losbrechmoment wieder lösen. Das erfordert jedoch gegebenenfalls eine erneute Klebeverbindung.*

Anstreifschichten für Labyrinthe und Schaufelspitzen: *Solche Schichten in den vorderen Stufen des Verdichters und in Labyrinthen bestehen meist aus* ***Metallfilzen*** *und sind für Betriebstemperaturen bis 450°C (Bild 12.2.1.5-8) geeignet. Als Kleber kommt, alternativ zu einer Lötung, ein mit Al-Pulver gefülltes anorganisches System zum Einsatz.*
Für den Einsatz bei niedrigeren Temperaturen werden ***gefüllte*** *(z.B. mit Glasperlen)* ***Silikongummibeläge*** *als Labyrinthanstreifschicht in einen tragenden Metallring geklebt.*

© Axel Bossmann - Turbosoft
Lehrgangsunterlagen nur Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Klebeverbindungen

Anwendungen von Klebeverbindungen im Triebwerksbau.



Nicht alle Klebeverbindungen sind notwendigerweise gleichzeitig im dargestellten Fall realisiert!

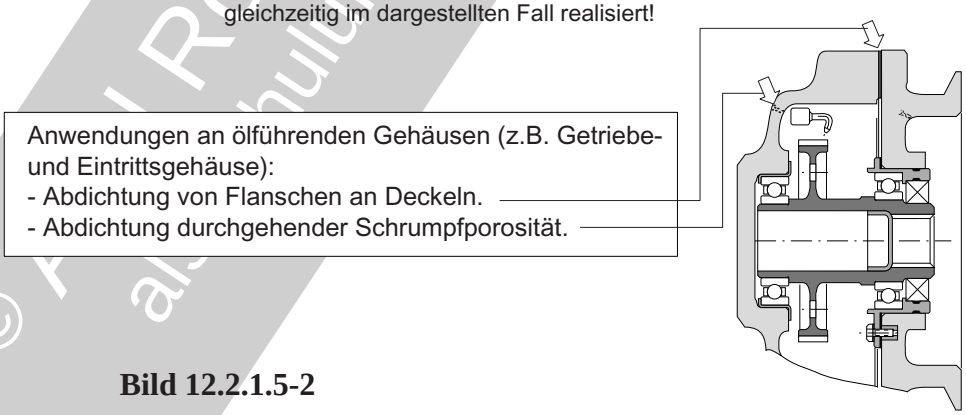


Bild 12.2.1.5-2

© Arl Rosemann - Turbosensur als Schulungsunterlagen für Lehrkonzernenz

Potenzielle Klebstoffsysteme im Maschinenbau, Eigenschaften und Probleme.

Schmelzkleber (Hot-Melt Adhesives) A

- Thermoplaste, 100 % Festanteil
- Schnelle Aufbringung, schnelle Bindung
- Steife bis flexible Verbindungen
- Bindet auf durchlässigen und undurchlässigen Oberflächen
- Preiswerter Werkstoff und Applikation
- benötigt besondere Aufbringeinrichtung
- Unempfindlich gegen Feuchtigkeit und Lösungsmittel
- Niedrige Temperaturbeständigkeit, Zersetzt sich bei höheren Temperaturen
- Niedrige Kriechfestigkeit (3,5 MPa, 50 °C)

Cyanoacrylat Klebstoffe B

- Aushärtend, flüssige Form - 100%Festanteil
- Am leichtesten aufzubringen und auszuhärten (30 s - 5 min)
- niedrige Viskosität, zueinander passende Klebeflächen erforderlich
- Gute Zugfestigkeit
- Schlechte Schlagzähigkeit
- Keine spezielle Anlage notwendig
- Bindet nicht mit durchlässigen Oberflächen
- Hohe Kleberkosten, kurze Verarbeitungszeit
- Schlechte Lösungsmittelbeständigkeit
- Gefährliche Handhabung, verklebt Haut.

Epoxid Kleber C

- Aushärtend, flüssige Form - 100% Festanteil
- Einstellbare Topfzeit und Aushärtungszeit
- Lange Lagerzeit
- Ein bis zwei Komponenten
- Steife oder flexible Verbindungen
- Niedrige Kriechfestigkeit
- Wenig Schrumpfung
- Beständig gegen die meisten Chemikalien und Lösungsmittel
- Viele unterschiedliche Varianten erhältlich
- Benötigt kontrollierte Verarbeitung, saubere Klebeflächen und Anpressdruck
- Einrichtungen zum Abwiegen, Mischen, Aufbringen und Fixieren erforderlich.

Dispersionskleber oder gelöste Kleber D

- Thermoplaste, 20 - 50 % Festanteil
- Sehr einfach aufzubringen
- Schnell oder langsam durch Abdampfen fest werdend
- Niedrige Materialkosten
- Verlust an Lösungsmittel
- Hervorragende Benetzung und Durchdringung
- benötigt keine besonderen Vorrichtungen
- Mittlerer Anpressdruck erforderlich
- Niedrige Kriechfestigkeit
- Beide Klebeflächen durchlässig
- Empfindlich gegen Wärme, Lösungsmittel und Feuchtigkeit

Cyanoacrylat Klebstoffe der "zweiten Generation" E

- Aushärtend, 100% reaktiv, flüssige Form, Pasten
- Schnelle Aushärtung bei RT (3 s - 1 min)
- Ein, oder zwei Gebinde
- Hohe Festigkeit mit Metall und Kunststoffen Gute Schäl- und Schubfestigkeit
- Verunreinigte Oberflächen werden toleriert
- Gute Spaltfüllung
- Begrenzte Zeit von Luftzutritt
- Anpassbare Aufbringungsarten
- Variable Aushärtungszeit und Topfzeit
- Hervorragend geeignet für Ingenieuranwendungen und Kunststoffe.

Polyurethankleber F

- Aushärtend, flüssige Form - 100% Festanteil
- Elastomerdichtungen, Kleber
- Niedrige Kriechfestigkeit
- Durchlässige und undurchlässige Klebeflächen
- Eine oder zwei Komponenten
- RT- oder Ofenaushärtung
- Gute Flexibilität bei niedrigen Temperaturen
- Gemischt oder ungemischt empfindlich gegen Feuchtigkeit
- kann bei Hitze und Feuchtigkeit wieder weich werden (reversibel)
- erträgliche Klebstoffkosten
- Manche Kleber sind toxisch
- Spezielle Einrichtung zum Mischen und Auftragen erforderlich

Silikonkleber G

- Aushärtend, flüssige Form - 100% Festanteil
- Gummiartig, hohe Schlagzähigkeit und Schälfestigkeit
- Behält die mechanischen Eigenschaften von 40°C bis 200 °C
- Hervorragendes Dichtungsmaterial bei niedriger mechanischer Beanspruchung
- Einkomponentensystem, kurze Lagerzeit
- Leichte Aufbringung, Aushärtung 1-5 Tage
- Widersteht den meisten Chemikalien und Lösungsmitteln
- Einfache Verarbeitungseinrichtung genügt
- Wiedererweichung möglich (reversibel)
- Hohe Klebstoffkosten

Kleber auf Phenol- oder Harnstoffbasis H

- Aushärtende Harze 100% reaktiv, flüssige Form, Pasten
- Gast beim Aushärten, Lösungsmittel dampft ab
- Hohe Zugfestigkeit, niedrige Schlagzähigkeit
- Ausgezeichnete Haftfestigkeit
- Lange Lagerzeit
- Einfache Aufbringung
- Benötigt hohen Anpressdruck
- Aushärtung im Ofen
- Niedrige Klebstoffkosten
- Hervorragende Benetzung und Infiltration
- Große Schrumpfung und hohe Schrumpfspannungen
- Spröd

Anaerobische Klebstoffe J

- Aushärtend, flüssige Form - 100% Festanteil
- Einkomponentensystem
- günstige Kosten
- Einfachste Aufbringung
- Einfache Aushärtung
- RT- oder Ofenaushärtung
- Varianten für Maschinenbau und Strukturanwendung verfügbar
- Gute Kohäsion aber schlechte Adhäsion
- Hervorragend für Schrauben, Muttern und statische Verbindungen (Passungen)
- Viele Werkstoffe benötigen einen Primer
- Ungeeignet für durchlässige Klebeflächen
- Härtet unter Luftzutritt nicht aus
- Erzeugt in manchen Kunststoffen Risse (Crazes)

Acrylkleber K

- Aushärtend, dünnflüssig
- Unempfindlich gegen Verschmutzungen
- Festigkeit vergleichbar mit Epoxidklebern, hohe Scherfestigkeit
- Primer kann empfohlen sein
- Topfzeit 60 s, Aushärtung 10 min bei RT
- Klebespaltbreiten 0,7-6 mm
- Anwendungstemperatur bis 150°C

Anorganischer Kleber, (Wasserbasis mit Al-Pulver) L

- Aushärtend, pastöse Form
- Korrosionsschützend
- Behält die mechanischen Eigenschaften über 500°C auch über Langzeit
- Problematisch verarbeitbar, toxisch
- Zweikomponentensystem
- Hohe Einbrenntemperatur

Keramische Hochtemperaturkleber (Wasserbasis mit Oxiden) M

- Aushärtend, flüssige oder pastöse Form
- Spröd
- Hohe Temperaturbeständigkeit bis 1500°C
- Kurzzeitanwendung (Versuchsläufe)
- Komplizierte mehrfache Aufbringung
- Aushärtung im Ofen

Bild 12.2.1.5-3

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Klebeverbindungen

Bild 12.2.1.5-3 *(Lit 12.2.1.5-1 und Lit. 12.2.1.5-2): In dieser Übersicht sind für den Triebwerksbau potenziell anwendbare* ***Klebstoffsysteme*** *zusammengestellt. Jedes dieser Systeme beinhaltet meist viele Variationen, sodass die angegebenen Eigenschaften möglicherweise nur für ein bestimmtes Fabrikat oder eine bestimmte Sorte voll zutrifft. So ist denkbar, dass die Beständigkeit gegen Chemikalien oder Alterung unter den Varianten innerhalb eines Klebstofftyps sehr unterschiedlich ist. Es bleibt also dem Leser nicht erspart, gegebenenfalls die Klebstoffspezifikationen zu überprüfen. Voraussetzung für den Einsatz eines Klebersystems im Triebwerksbau ist die* ***Zulassung für den vorgesehenen Anwendungsfall*** *durch die zuständigen Behörden und OEMs.*
Im Folgenden sind einige, soweit in der verfügbaren Literatur angegeben, ***spezifische Eigenschaften und Probleme der verschiedenen Klebstoffsysteme*** *angegeben:*

„A“, Schmelzklebstoffe: *Die Verarbeitungstemperatur liegt gewöhnlich bei 150°C. Die Bindung erfolgt in Sekunden. Diese kurze Zeit hat zwar Vorteile, weil keine Fixierungen erforderlich sind, andererseits erlaubt sie keine Nachrichtung. Beim Verkleben gut wärmeleitender Werkstoffe darf der Klebstoff nicht zu schnell erstarren, um die Oberfläche gut benetzen zu können. Der größte Nachteil der Schmelzkleber ist die niedrige Festigkeit, insbesondere die geringe Warmfestigkeit.*

„B“ und „E“, Cyanoacrylat Klebstoffe: *Diese Systeme härten in Kontakt mit minimalen Wassermengen sehr schnell aus („****Sekundenkleber****“, siehe auch „****K****“) was ihren Einsatz deutlich begrenzen kann. Die* ***niedrige Viskosität*** *erfordert* ***sehr kleine Spaltweiten*** *im Bereich von einigen hundertstel Millimetern. Poröse Klebeflächen wie thermische Spritzbeschichtungen können einen Primer erfordern. Die Einsatztemperatur liegt gewöhnlich unterhalb 100°C, für spezielle Systeme bis über 200 °C. Die Verbindungen können sehr hohe Festigkeiten erreichen, sind jedoch* ***schlagempfindlich*** *und* ***verlieren an Festigkeit bei Wasserzutritt****. Die Schlagempfindlichkeit ist bei Anwendungen die Stoßbelastungen ausgesetzt sind zu berücksichtigen.*

„C“, Epoxid Klebstoffe: *Es handelt sich um die am häufigsten verwendeten Systeme. Ihre* ***zwei Komponenten verlangen eine genaue Dosierung und intensive Mischung****. Ungenauigkeiten führen zu Festigkeitsverlust. Epoxidklebeverbindungen erreichen* ***höchste Festigkeiten*** *(bis 70 MPa). Besondere Systeme lassen bei niedrigen Belastungen eine* ***Betriebstemperatur um 200 °C*** *zu. Sie sind aber* ***kostenintensiv*** *auf Grund des erforderlichen Zeitaufwands für* ***Reinigung*** *und* ***Fixierung der Klebeflächen*** *während der Aushärtung. Diese ist spezifikationsgerecht einzuhalten, um die optimalen Festigkeitswerte zu gewährleisten.*
Ganz allgemein besteht bei hoch reaktiven Klebstoffen die Notwendigkeit, um die vorgesehene ***Lagerzeit zu erreichen, bei tiefen Minustemperaturen*** *zu lagern. Auch der* ***Transport kann eine andauernde Kühlung*** *(mit Trockeneis) erforderlich machen. Fällt diese Kühlung auch nur relativ kurzzeitig (Stunden) aus, können die Eigenschaften einer späteren Klebeverbindung unzulässig verändert sein. Die Forderung nach einer Kühlung gilt natürlich auch für das* ***Handling von übrigem Klebstoff und dessen Aufbewahrung****. Hier besteht verständlicherweise die Möglichkeit gravierender Probleme.*

„D“, Dispersionsklebstoffe *enthalten im Wasser fein verteiltes Kunstharz in fester oder flüssiger Form. Das Wasser dient dem Transport der Partikel bevor es verdunstet. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass die zu* ***verklebenden Werkstoffe durch offene Porosität*** *Wasser aufnehmen können. Damit ist die Voraussetzung für eine Bindung der Kunstharzpartikel gegeben. Das Eindringen des Klebstoffs in die offenen Poren, möglichst unter* ***Anpressdruck*** *der Fügeflächen, verbessert die*

© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Haftfestigkeit. Dispersionsklebstoffe sind ***wasserdampfdurchlässig*** *(Lit. 12.2.1.5-7). Die Aushärtung erfolgt über das Abdampfen der flüssigen Phase. Dies erfordert Zeit. Die Verbindungen haben im Vergleich zu den zu verklebenden porösen Werkstoffen meist eine ausreichende Festigkeit. Bei erhöhter Temperatur ist die* ***Kriechfestigkeit jedoch sehr gering****. Die Klebstoffe können* ***von Lösungsmittel oder Feuchtigkeit geschädigt*** *werden.*

„F“ Polyurethanklebstoffe *erreichen ähnlich hohe Festigkeiten wie Epoxide und werden in zwei Komponenten geliefert. Beim Anmischen ist darauf zu achten, dass möglichst wenig Luft eingemengt wird. Blasen wirken als Schwachstelle (Lit. 12.2.1.5-9). Der* ***Temperaturanstieg beim Härten verdünnflüssigt den Klebstoff und täuscht über den Ablauf der Topfzeit****. Ihre hohe Zähigkeit lässt sich in* ***Dichtungen*** *und als* ***Erosionsschutz*** *(z.B. Beschichtung von „Spinnern“ und Fanschaufeln aus FVK) nutzen. Einige Urethane sind gegenüber* ***Feuchtigkeit empfindlich*** *und für einen* ***Langzeiteinsatz problematisch****. Die Einsatztemperatur liegt gewöhnlich unterhalb von 200 °C.*

„G“ Silikonklebstoffe: *Bei der Aushärtung können Oxide, Amine oder* ***Essigsäure als Spaltprodukte*** *frei werden. Diese können die* ***Funktion der Bauteile beeinträchtigen****, z.B.* ***Korrosion*** *an nicht ausreichend vorbehandelten Leichtmetalllegierungen (Aluminium, Magnesium) auslösen. Aus diesem Grund ist die* ***Eignung gegebenenfalls mit Versuchen abzuklären****. Silikonelastomere und Kleber* ***können in Kraftstoff und Triebwerksöl quellen****. Dieser Vorgang kann reversibel sein, aber zu hohen Druckspannungen und zum* ***Abheben*** *von dickeren Schichten (Einlaufbeläge) führen. Silikonklebstoffe erfordern eine spezifikationsgerechte Klebeflächenvorbereitung und Verarbeitungsatmosphäre. Auch* ***scheinbar geringe Abweichungen können zu großflächigen Ablösungen*** *führen.*

Die Verarbeitung der Silikonklebstoffe ist kritisch, weil sie mit der Luftfeuchtigkeit aushärten und ***innerhalb von ca. 5 Minuten eine der Milch ähnliche Haut bilden*** *(Lit. 12.2.1.5-6). Diese kann die Benetzung und damit die Verbindung beeinträchtigen. Deshalb hat eine Verarbeitung (Auftragen und Fügen) innerhalb von 5 Minuten zu erfolgen. Bis zur vollständigen Aushärtung können je nach Schichtdicke, infolge der Wasserdiffusion, 2-24 Stunden notwendig sein. Die Aushärtung erfolgt wegen der Diffusion des Luftsauerstoffs* ***von außen nach innen****. Die Aushärtung mit Luftfeuchtigkeit* ***verbietet eine Lagerung in angebrochenen Gebinden*** *in denen die Gefahr eines Kontakts mit einem Luftpolster besteht.*

„H“ Kleber auf Phenol- oder Harnstoffbasis: *Bei der Aushärtung unter Temperatur* ***spalten Phenolkleber Wasser oder Formaldehyd ab*** *(Lit. 12.2.3.5-8). Aus diesem Grund besteht die Gefahr von* ***Porosität****. Phenolharzklebstoffe zeichnen sich durch eine große Temperaturstabilität aus, sind jedoch spröd und damit besonders empfindlich auf Schlag und Schälung.*

Harnstoffkleber *(Aminoplaste) reagieren mit Formaldehyd. Die Aushärtung benötigt Temperatur und* ***spaltet Wasser ab****. Beim Zumischen latenter Härter lässt sich das Temperatur-Zeitverhalten der Aushärtung beeinflussen. Dabei bilden sich* ***Säuren die an Leichtmetalllegierungen Korrosion*** *hervorrufen können.*

„J“, Anaerobische Klebstoffe *sind dünnflüssige schnellhärtende Einkomponentensysteme. Sie härten unter* ***Abwesenheit von Sauerstoff*** *aus. Damit sind sie für sehr enge Spalte geeignet und werden deshalb u.A. zum* ***Sichern von Muttern und Nabensitzen*** *verwendet. Heutige Varianten sind* ***schlagzäh mit hoher Scherfestigkeit****. Die maximalen Einsatztemperaturen liegen zwischen 150 °C und 230°C. Die Festigkeit der Klebeverbindung reagiert stark auf* ***Verunreinigungen der Klebe-***

© Aufbossmann - Turbosoft
Ausschnittansicht nur mit Lizenz

***flächen**. Manche Werkstoffe erfordern einen **Primer um Reaktionen** mit dem Klebstoff zu verhindern.*
*Die Klebstoffe lassen sich mit PTFE mischen und werden so als kombiniertes **Gleit und Dichtmittel** für Rohrleitungsverschraubungen verwendet.*
Eine weitere Anwendung ist die Abdichtung poröser Werkstoffe wie Sintermaterialien und Leichtmetallguss.

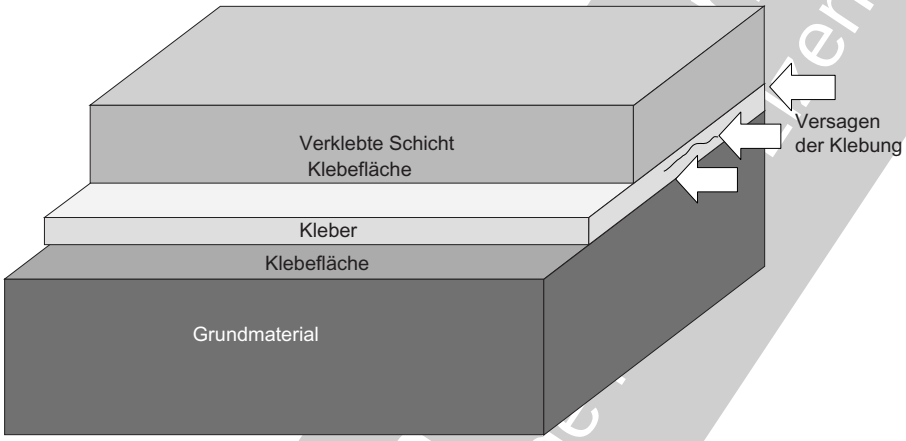
***„K“ Acrylklebstoffe** nutzen in Wasser aufgeschwemmte Kunstharzpartikel, die nachdem das Wasser abgedampft ist, wasserfest aushärten. Sie zeichnen sich durch eine besonders große **Toleranz gegenüber Verschmutzungen der Klebeflächen** aus. Diese Eigenschaft beruht auf Zusätzen im Klebstoff oder einem vorher anzuwendenden Primer. Diese durchdringen die Oberflächenverunreinigungen oder reagieren mit ihnen (z.B. mit Ölen). Die erzielbare **Festigkeit**, insbesondere die **Scherfestigkeit**, ist mit denen von Epoxidklebern vergleichbar. **Verarbeitungszeiten sind kurz**, ca. 60 Sekunden bei RT („Sekundenkleber“, siehe auch „B“ und „**E**“). Die Spaltfüllung ist erstaunlich gut und reicht für Spaltweiten zwischen 0,7 und 6 mm (Lit. 12.2.1.4-1 und Lit. 12.2.1.4-4). Akrylkleber können **auf Feuchtigkeit empfindlich reagieren.** Sie strömen einen **markanten Geruch** aus.*

***„L“ Anorganische Klebstoffe:** Es handelt sich um pastöse Zweikomponentenklebstoffe auf Wasserbasis mit Al-Pulver-Füllung und einem sauren Phosphatbinder. Verschiedene Varianten unterscheiden sich im **umweltschädlichen Cr-Gehalt**. Mehrere Produkte sind im Triebwerksbau zugelassen und haben sich seit Jahren bewährt. Die Lagerzeit liegt bei einem halben Jahr. Zwischen Anmischen und Verarbeitung ist eine **ausreichende Reaktionszeit** von ca. 20 Stunden einzuhalten. Die Aushärtung erfolgt nach dem Trocknen in mehreren Schritten bei steigenden Temperaturen, abhängig vom Grundwerkstoff bis ca. 325 °C. Je höher die **Aushärtungstemperatur, umso besser ist die Wasserbeständigkeit** der Verbindung. Das System verträgt eine maximale Dauertemperatur von ca 500 °C (Lit. 12.2.1.5-4).*
*Die **Klebeoberfläche muss wie bei den meisten Klebeverbindungen fettfrei** sein. Es ist deshalb besonders darauf zu achten, dass kein **verschmutztes Entfettungsbad** verwendet wird. Nur so wird das Bauteil beim Herausnehmen nicht wieder von aufschwimmenden Fetten verschmutzt (Band 4, Bild 17.3.1-8).*
*Ein **abrasives Strahlen** mit Al_2O_3 wird empfohlen. Hier ist darauf zu achten, dass die Druckluft bei diesem Strahlprozess absolut fett- und wasserfrei ist.*

***„M“ Keramische Hochtemperaturkleber** sind Systeme auf Wasserbasis mit unterschiedlichen Oxiden (Al_2O_3, SiO_2, ZrO_2, MgO) gefüllt. Sie ergeben nach der Aushärtung hochtemperaturbeständige Verbindungen. Es werden viele unterschiedliche Klebstoffe angeboten, deren Auswahl auf den Anwendungsfall abzustimmen ist. Trocknung und Härtung spielen für die Qualität der Verbindung eine große Rolle (Lit. 12.2.1.5-6). Die Temperaturbeständigkeit der Verbindung reicht je nach Füllstoff bis 1800°C. Bei der Anwendung auf Heißteilen in Triebwerken, wie dem Fixieren von Dehnmessstreifen oder Thermoelementen, kann **Thermoermüdung, Erosion oder Schlagbeanspruchung** zum Versagen führen. Die Anwendung ist deshalb gewöhnlich auf relativ kurze Versuchsläufe beschränkt.*

© Axel Rossmann - Turbomotor
Vorlesungsunterlagen nur intern

Klebeverbindungen erfordern viel Erfahrung und Fachkenntnis. Einflüsse vor und bei der Verarbeitung auf die Eigenschaften einer Klebeverbindung.



Äußere Einflüsse:
- Temperatur
- Zeitablauf der einzelnen Arbeitsschritte
- Luftfeuchtigkeit,
- Zusammensetzung der umgebenden Atmosphäre: z.B. CO2-Gehalt
- Andruck: Höhe, Zeit

Kleber: Mehrkomponenten, Trocknen, Aushärten
- Öffnung, "angebrochene" Lagerung,
- Lagerbedingungen: Zeit, Temperatur, Kontakt zu Gasen
- Anmischung: Intensität, Lufteinschlüsse, Topfzeit
- Verwendete Werkstoffe (Reaktion mit Kleber)
- Mischungsverhältnisse
- Temperatur
- Dicke der Schicht/Klebespalt: Gleichmäßigkeit
- Viskosität, Tixotropie
- Aushärtung: Zeit, Verlauf
- Schrumpfung
- Abgabe von Stoffen beim Aushärtevorgang (z.B. Wasser bei Polykondensat)

Grundmaterial/Klebefläche:
- Werkstoff: Metalle, Kunststoff...
- Vorbereitung: Reinigung, Reaktivität (z.B. Strahlen, Ätzen)
- Verunreinigungen Art und Form (Staub, Schicht, Film - lose, festhaftend)
- Oxidation
- Rauigkeit, Topografie
- Porosität
- Temperatur
- Wärmeleitfähigkeit, Wärmedehnung
- Klebespalt: Form, Breite, Fläche,
- Nachgiebigkeit
- Wärmeleitfähigkeit, Wärmedehnung

Bild 12.2.1.5-4

Bild 12.2.1.5-4: *Ein besonderes Problem ist die* ***zerstörungsfreie Qualitätssicherung*** *einer Klebeverbindung. In manchen Fällen besteht die Möglichkeit, Bindefehler auf Metallen mit Hilfe der* ***Thermografie*** *zu erkennen. Diese zeigt jedoch eine* ***schlechte Haftfestigkeit nicht an****. So muss die Qualitätssicherung über die* ***Einhaltung der Spezifikationen und eine möglichst umfassende Dokumentation*** *aller Prozessschritte erfolgen. Das wird vom komplexen Zusammenwirken der verschiedenen Einflüsse, die teilweise nicht erfasst werden können, erschwert. Voraussetzung für eine optimale Verklebung ist die geeignete* ***konstruktive Gestaltung*** *(Bild 12.2.1.5-7). Die* ***Betriebsanforderungen*** *sind das Hauptkriterium für die Auswahl des Klebstoffystems. Darüber hinaus muss die Klebetechnologie Forderungen wie* ***Zugänglichkeit*** *und* ***Klebespalt*** *berücksichtigen. Belastung bzw.* ***Größe der Klebeflächen*** *und* ***elastische Verformungen*** *bzw.* ***Steifigkeiten*** *sind weitere wichtige Gesichtspunkte. Die Qualität einer Klebeverbindung ist in hohem Maß von den einzelnen* ***Prozessschritten*** *abhängig. Diese haben in spezifizierten Zeitabläufen zu erfolgen.*

© Axel Rossmann Fachschulunterlagen Konstruktion

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Klebeverbindungen

Die Verunreinigung von Klebeflächen ist ein großes Problem guter Haftfestigkeit. Eine echte Gefahr sind unerwartete Einflüsse wie Kosmetikartikel.

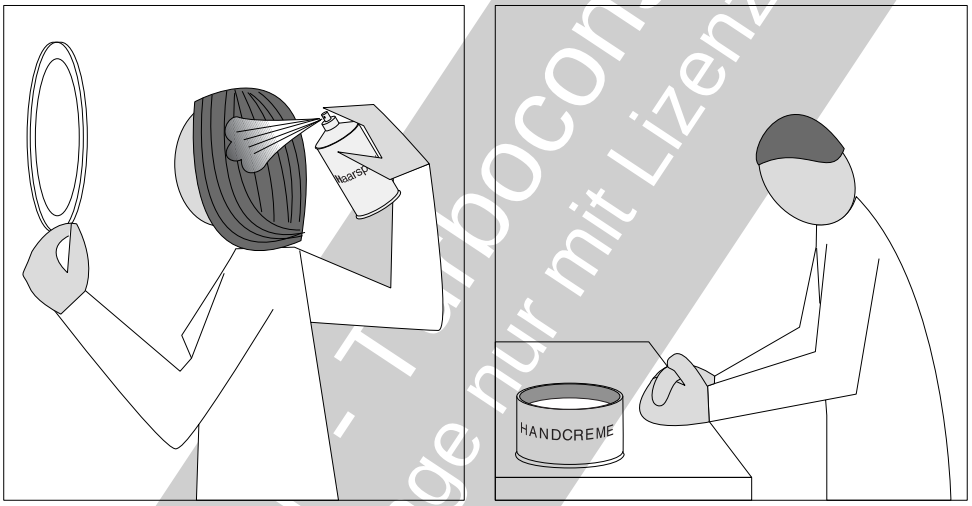


Bild 12.2.1.5-5

- Vorbereitung der Klebeflächen (Strahlen),
- Reinigung der Klebeflächen,
- Eventuell Aufbringen eines Primers,
- Aufbringen des Klebstoffs,
- Trocknung und/oder Aushärtung .

Auch zwischen den Prozessschritten sind Zeiten einzuhalten, die sich z.B. nach der ***Topfzeit*** *oder der* ***Bildung einer störenden Oberflächenhaut*** *(Bild 12.2.1.5-6) zu richten haben.*

Die ***äußeren Einflüsse beim Verarbeiten*** *des Klebstoffs können die Qualität der Verbindung entscheidend beeinflussen. Klebeverbindungen können* ***eigene Räume mit überwachter Atmosphäre*** *(Feuchtigkeit, Temperatur, Dämpfe, Aerosole) erfordern.*

Die Funktion der Klebstoffe selbst ist entscheidend von der richtigen ***anwendungsspezifischen Auswahl*** *und einem sachgemäßen Handling abhängig. Hierzu gehören* ***Lagerung*** *(Zeit, Temperatur) sowie die* ***Behandlung von Resten und offenen Gebinden****. Die richtige Aufbringung, der sichere Kontakt mit den Klebeflächen und eventuell erforderliche Anpressdrücke sind zu gewährleisten.*

Der Einfluss der zu verklebenden (Grund-) Materialien sowie der Klebeflächenstruktur *ist von großer Bedeutung und ist damit wichtiges Kriterium der* ***Klebstoffauswahl****. Dieser darf z.B. nicht unerwünscht mit den zu verklebenden Werkstoffen reagieren. Eine* ***ungünstige Struktur*** *(z.B. offene Porosität für manche Systeme) ist zu berücksichtigen.*
Die ***Vorbehandlung der Klebeflächen*** *wie Aufrauung und/oder Reinigung bzw. Entfettung ist für das Ergebnis entscheidend.*

Bild 12.2.1.5-5: *Voraussetzung für das Erreichen der* ***optimalen Haftfestigkeit*** *einer Klebeverbindung sind* ***saubere Klebeflächen****. Besonders* ***schädlich sind Trennmittel wie Silikone und PTFE****. Leider sind derartige Medien unerwartet verbreitet.*
Silikone *befinden sich in Ölen die als „****Schaumbremsen****“* ***Kühlschmierstoffen*** *(KSS, Kapitel 12.2.1.1.2) zugegeben werden. Eine besonders „tückische“ Anwendung tritt in Gestalt von* ***Handcremes*** *auf (Siehe Beispiel 12.2.1.5-1).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

__PTFE__ wird als __Spraytrennmittel__ und als flüssige Lösung an Formen für FVK-Bauteile angewendet. Die Anwendung erfordert hohe Aushärtungstemperaturen. Auch in der Kosmetik, z.B. als Bestandteil in __Haarsprays__ zu finden, ist mit derartigen Stoffen zu rechnen. Solche __Medien aus dem Privatgebrauch__ dürfen in keinem Fall in „sensiblen“ Umgebungen des Fertigungsbereichs genutzt werden.
Das besondere Problem liegt erfahrungsgemäß in der Eigenschaft dieser Mittel, in Reinigungsbädern an der Badoberfläche zu schwimmen und bei der Entnahme des Werkstücks und anderer wieder als Film haften zu bleiben (Bild 12.2.1.7-3). Auf diese Weise können derartige Stoffe auf viele Bauteile verschleppt werden und damit einen großen Schadensumfang verursachen.

Beispiel 12.2.1.5-1: Es handelt sich um ein tatsächliches Vorkommnis. In einer Produktion kam es abrupt zum Versagen von Klebverbindungen an faserverstärkten Kunststoffteilen. Nach einer intensiven Suche stellte sich Folgendes heraus:

Die mit der Vorbereitung der zu verklebenden Bauteile beschäftigte Mitarbeiterin war seit einigen Wochen nebenberuflich mit dem Vertrieb von Kosmetik beschäftigt. Dabei verwendete Sie selbst eines dieser Produkte, eine **Handcreme**. Diese enthielt **Silikonverbindungen,** die offenbar als **Verunreinigungen** beim Handling auf die Bauteile gelangten. Der Schadensumfang war erheblich, weil über den Zeitraum bis der Schaden erkannt wurde, eine größere Zahl von Teilen potenziell betroffen war.

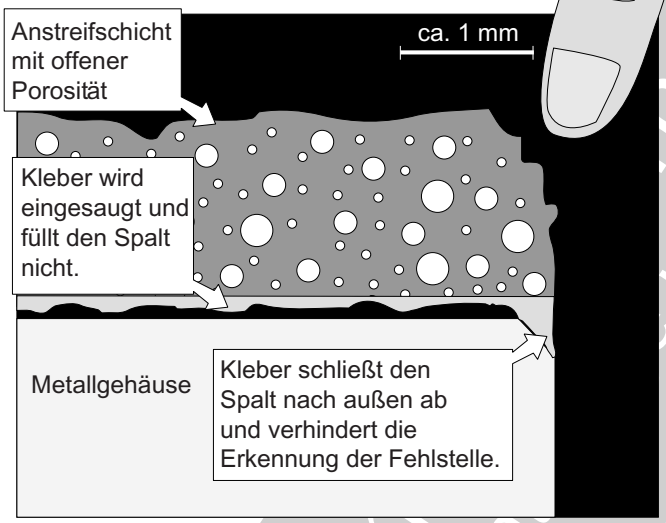
Bild 12.2.1.5-6: *Das __Einkleben von Einlaufbelägen aus porösen Metallfilzen__ auf die Innenfläche von Ringen bzw. in Bohrungen muss ähnlich wie das Löten (Bild 12.2.1.4-12) besondere Schwierigkeiten überwinden. Zur Anwendung kommt für diesen Zweck gewöhnlich ein __anorganischer Klebstoff__ („__L__“ in Bild 12.2.1.5-3). Dieser muss, um optimale Betriebseigenschaften aufzuweisen, bei Temperaturen bis ca. 450°C ausgehärtet werden.*
Die Skizze oben zeigt den Fall, wenn der Klebstoff von dem porösen Metallfilz eingesaugt wird und sich so ein Spalt zum Grundmaterial bildet. Gegebenenfalls erfolgt auch nach einem Andrücken keine Bindung mehr, wenn sich eine __„Haut“ auf der freien Oberfläche des Klebstoffs__ gebildet hat. Die Problematik eines solchen Bindefehlers ist __schlechte Erkennbarkeit__ von außen. Erfahrungsgemäß kann sich der Klebespalt an der Außenkante schließen und eine scheinbar einwandfreie Bindung vortäuschen.
Die Skizze im Rahmen unten zeigt Situationen, bei denen sich zwischen dem porösen Einlaufbelag und der Haftfläche des Grundwerkstoffs ein nicht überbrückter Spalt bildet. Dies kann eintreten, wenn sich ein Gehäuse (z.B. aus Leichtmetall) mehr als der Anstreifbelag dehnt.
Begünstigend wirken die typisch hohen Temperaturen bei der Aushärtung. __Schrumpft die Anstreifschicht, z.B. beim Trocknen und Aushärten__ des eingedrungenen Klebstoffs, kann ein vergleichbarer Effekt auftreten. Weitere Möglichkeiten sind die „__Ansaugung des Klebstoffs__“ von dem porösen Belag wie oben dargestellt und/oder eine __Schrumpfung des Klebers__ auf der Gegenfläche bei der Aushärtung.

mann - Turbocon sult
nterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Klebeverbindungen

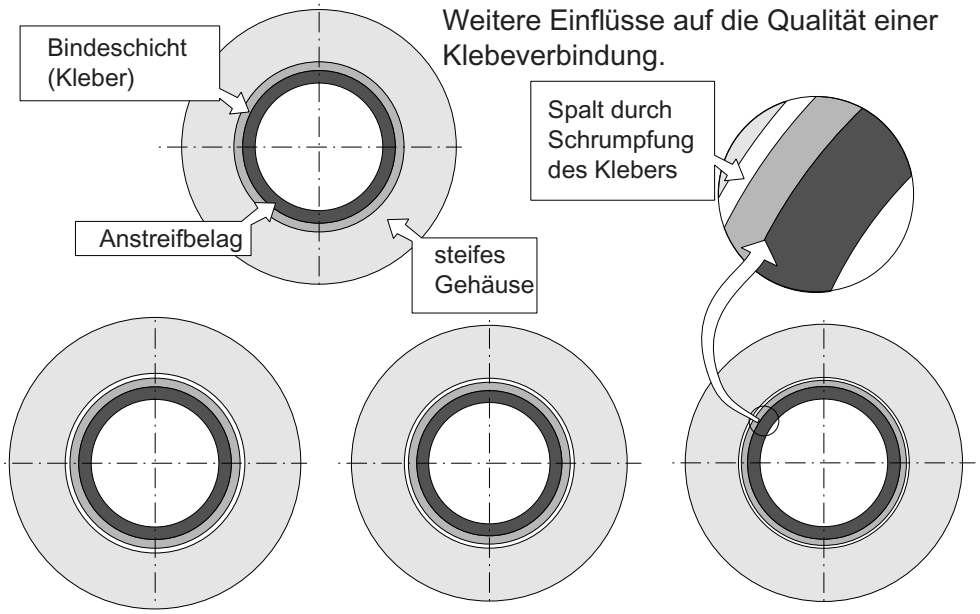
Kleben ist eine Aufgabe für Experten, das Resultat kann von scheinbaren Nebensächlichkeiten abhängen.

Wenn zwischen Auftrag und Kontakt zur Gegenfläche ein zu langer Zeitraum liegt, bilden manche Klebstoffe ähnlich wie die Milch eine Haut, welche Benetzung und Haftfähigkeit entscheidend verschlechtert.



Kantenbereich der Klebung im metallografischen Schliff (schematisch)

Weitere Einflüsse auf die Qualität einer Klebeverbindung.



Gehäuse dehnt sich mehr als Anstreifbelag und Kleber

Anstreifschicht schrumpft

Kleber schrumpft

Bild 12.2.1.5-6

Bild 12.2.1.5-7: *Der* ***Konstrukteur*** *hat es in der Hand, ob die Voraussetzungen für eine ausreichend* ***zuverlässige Klebeverbindung*** *mit den erwarteten Festigkeitseigenschaften gegeben sind. In dem Bild sind wichtige Kriterien für dieses Ziel zusammengestellt.*

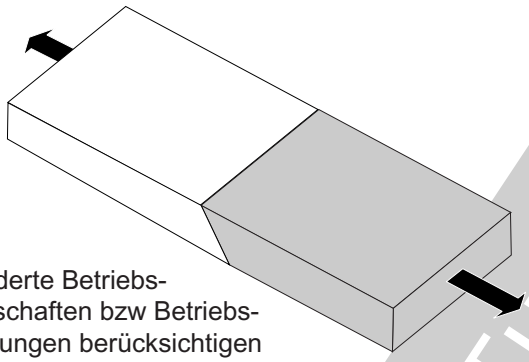
Betriebseigenschaften *werden von den zu erwartenden Betriebsbelastungen gefordert. Für Klebstoffe auf Kunststoffbasis ist die Temperaturbeständigkeit entscheidend. Die* ***Kurzzeitfestigkeit fällt mit steigender Temperatur schnell*** *ab. Anders als von Metallen gewöhnt,* ***entscheiden*** *bereits* ***wenige °C über den Einsatz*** *eines Klebstoffs. Die Langzeitfestigkeit (Kriechfestigkeit) ist entsprechend temperatursensibel. Zusätzliche Einflüsse wie* ***Alterung, Schädigungen durch Flüssigkeiten wie Öl, Kraftstoff oder Waschmittel*** *machen sich deutlich bemerkbar.*
Zu bedenken ist, dass sich unter ***hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten Klebeverbindungen deutlich spröder*** *verhalten können als bei einer langsamen Belastung. Dies kann z.B. bei der* ***Schlagbeanspruchung im Containmentfall*** *oder bei einem* ***Vogelschlag*** *(z.B. auf einen FVK-Spinner) wichtig sein.*

Eigenschaften der Klebeflächen: *Voraussetzung ist die ausreichende Fläche mit einem Mindestanteil an Bindung. Die* ***Bindefläche*** *lässt sich mit einer* ***Schäftung*** *vergrößern. Damit steigen jedoch die Kosten und es können Probleme beim* ***Zusammenschieben der Klebeflächen*** *auftreten. Ein weiterer Gesichtspunkt ist, dass der Klebeprozess nicht andere, bereits vorhandene Kunststoffe oder Klebeverbindungen schädigt (Aushärtungstemperatur, Lösungsmittel). Der Konstrukteur muss deshalb den* ***Prozessablauf bzw. die Arbeitsvorbereitung*** *entsprechend vorsehen. Von den Oberflächeneigenschaften hängt die Haltbarkeit der Verbindung entscheidend ab. Zu klären ist, ob eine bestimmte* ***klebstoffspezifische Oberflächenrauigkeit*** *erforderlich ist. Gegebenenfalls ist ein* ***abrasiver Strahlprozess*** *erforderlich. Auch eine eventuelle Porosität kann die Auswahl des Klebstoffs bestimmen.* ***Dünnflüssigkeit bzw. Zähigkeit*** *sind unter diesem Gesichtspunkt ein wichtiges Kriterium. Eine größere Rauigkeit garantiert nicht in jedem Fall eine bessere Haftfestigkeit. Grundsätzlich sollte sich der* ***Konstrukteur mit den Fachleuten abstimmen****, die später die Klebeverbindung herstellen müssen. So ist z.B. vorab eine ungünstige Gestaltung die keine sichere Aufbringung des Klebstoffs ermöglicht vermeidbar. Muss die Klebeverbindung während dem Aushärten unter* ***Anpressdruck*** *stehen, ist dies konstruktiv zu gewährleisten. Die Möglichkeit eines* ***Abstreifens des Klebstoffs beim Fügen der Klebeflächen*** *muss berücksichtigt werden. Fügeflächen sollten nicht in* ***einseitig geschlossene Hohlräume*** *eingeschoben werden. Die gefangene Luft muss austreten können, sonst ist eine ausreichende Füllung des Spalts nicht möglich. Falls Unsicherheit über die Machbarkeit einer Klebeverbindung besteht, sind bauteilrelevante* ***Klebeversuche*** *durchzuführen. Die Verbindungen sind dann* ***bauteilrelevant betriebsnah zu prüfen****. Nicht zuletzt ist auch der Aspekt der Qualitätssicherung zu beachten.*
Grundsätzlich sollten ***Spannungsspitzen*** *in der Klebeverbindung, z.B. an Kanten,vermieden werden. Die Skizze unten links veranschaulicht die, wie auch bei Lötverbindungen (Bild 12.2.1.4-18) unbedingt zu* ***vermeidende Belastungsform der Schälung****. Daneben sind günstigere Varianten dargestellt. Der Schäleffekt lässt sich mit einer* ***elastischen Gestaltung*** *des Bereichs der Klebeverbindung minimieren. In manchen Fällen gelingt es, die Schälbelastung mit einer einfachen Veränderung der Lage gegenüber der einwirkenden Kraft zu vermeiden.*
Ein besonderes Augenmerk ist späteren ***Reparaturen bei Überholungen*** *zu widmen. Die Verbindung muss ohne unzulässige Schädigungen des gesamten Bauteils und mit einem akzeptablen Aufwand erneuerbar sein.*

© Axel Rossmann - TU Dresden als Schulungsunterlage im Internet

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Klebeverbindungen

Nicht zuletzt entscheidet die konstruktive Gestaltung über den Erfolg einer Klebeverbindung.



- Geforderte Betriebs-eigenschaften bzw Betriebs-belastungen berücksichtigen (Temperatur, Zeit, Atmosphäre, Medien)
- Erforderliche Eigenschaften der Klebeflächen vorsehen und gewährleisten. Aufrauung nur wenn der Klebstoff es erfordert.
- Nach Möglichkeit keine Nacharbeit der Verklebung
- Klebeflächen ausreichend groß
- Zug- oder Scherverbindung anstreben. Schälbeanspruchung vermeiden.
- Spannungsspitzen vermeiden
- Möglichst nur eine Klebeschicht
- Geeignetes Spaltmaß wählen und gewährleisten
- Abstreifen des Klebers bei Schiebesitzen vermeiden
- Bei Hohlräumen Entlüftung ermöglichen.
- Klebeversuche rechtzeitig unter fertigungs- und bauteilrelevanten Bedingungen durchführen.
- Eventuell notwendige Anpresskräfte und die elastische Verformung des Bauteils berücksichtigen.

Schälung vermeiden!

Schlecht! Ausgeprägte Schälung

Schälung etwas entschärft

Schälung durch günstige Anordnung vermieden.

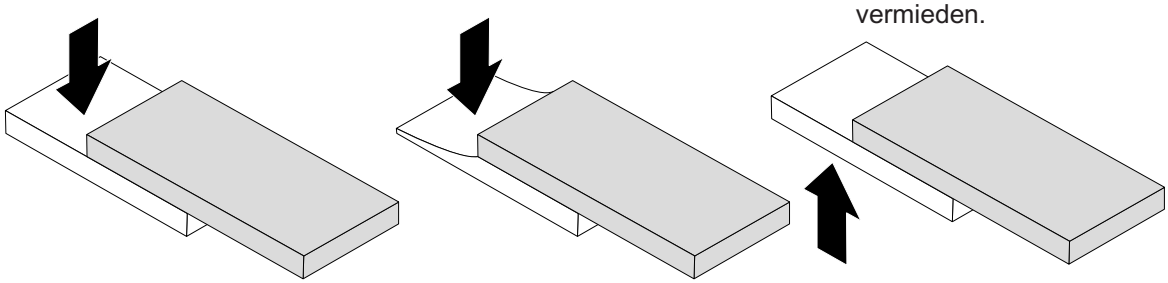


Bild 12.2.1.5-7

smann - Turbocons
sunterlage nur mit Lizenz

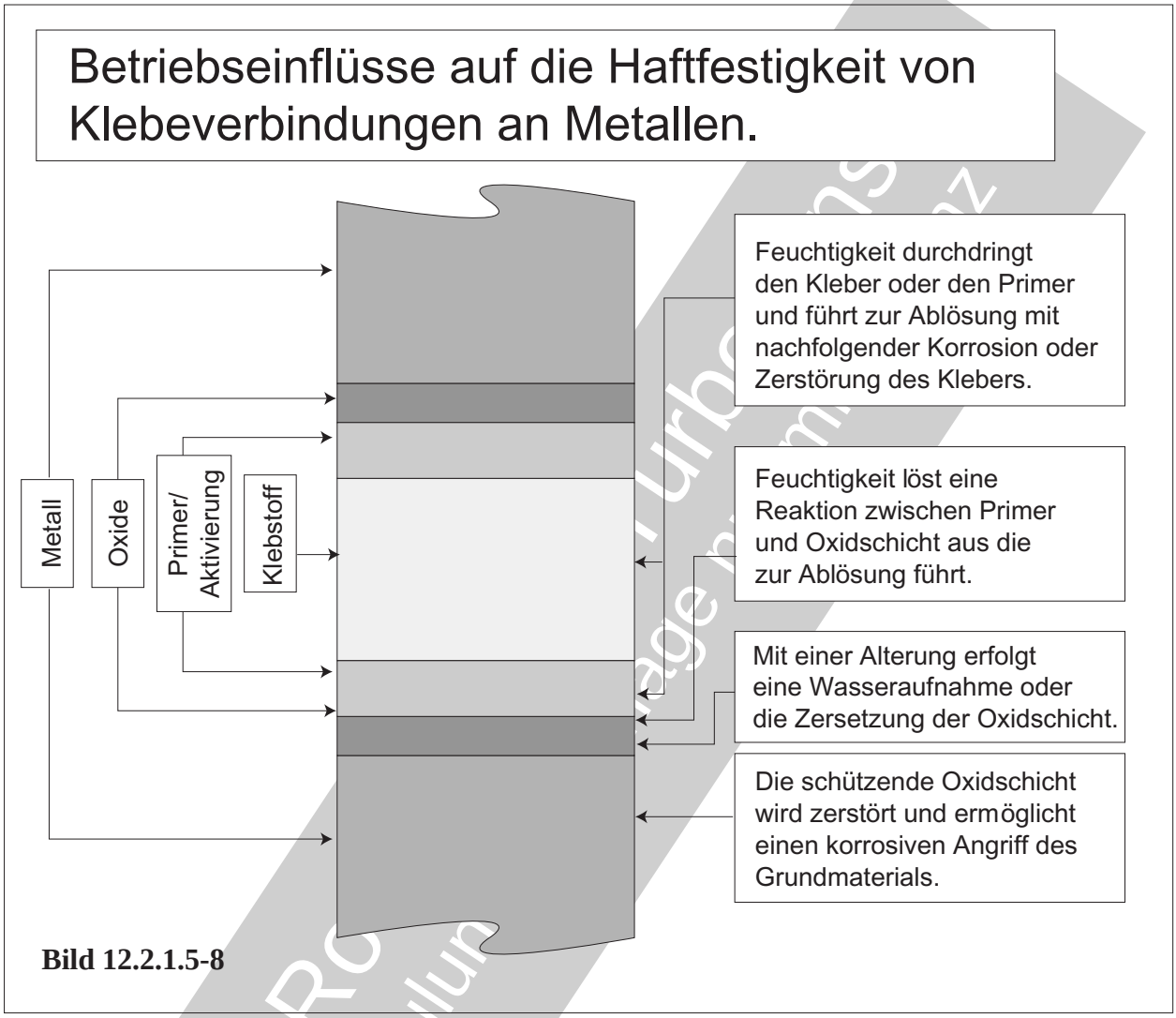


Bild 12.2.1.5-8

Bild 12.2.1.5-8: *Die Haftfestigkeit einer Klebeverbindung wird von* ***Betriebseinflüssen*** *verändert, gewöhnlich verschlechtert.* ***Temperatur führt zeitabhängig zu Alterungsprozessen mit Versprödung und Festigkeitseinbuße****.* ***Feuchtigkeit, Öle, Fette, Reinigungs- und Lösungsmittel*** *können ein Quellen (möglicherweise reversibel) bewirken. Mit bleibenden Schädigungen, wie einer chemischen Veränderung, Rissbildung und Versprödung ist zu rechnen. Die Skizze zeigt die* ***Einwirkung äußerer Medien auf eine Klebeverbindung*** *mit einer* ***Primer-Zwischenschicht*** *(Lit. 12.2.1.5-2).*

Feuchtigkeit als Folge von Diffusion und/oder Alterung kann eine ***Reaktion zwischen Primer und einer schützenden Oxidschicht*** *auf dem Grundmaterial (z.B. bei Leichtmetallen) auslösen. Die Zerstörung der Oxidschicht leitet die Ablösung ein.* ***Korrosionsempfindliche Grundwerkstoffe wie Leichtmetalle*** *und Vergütungsstähle können angegriffen werden, was mit einem deutlichen* ***Schwingfestigkeitsabfall*** *einhergeht. Ein typischer Fall ist die* ***Korrosion von Al-Legierungen*** *in Verbindung mit ungeeigneten* ***Epoxidklebstoffen****.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Klebeverbindungen

Folgeschaden nach dem Versagen der Klebeverbindung eines Metallfilz-Anstreifbelags.

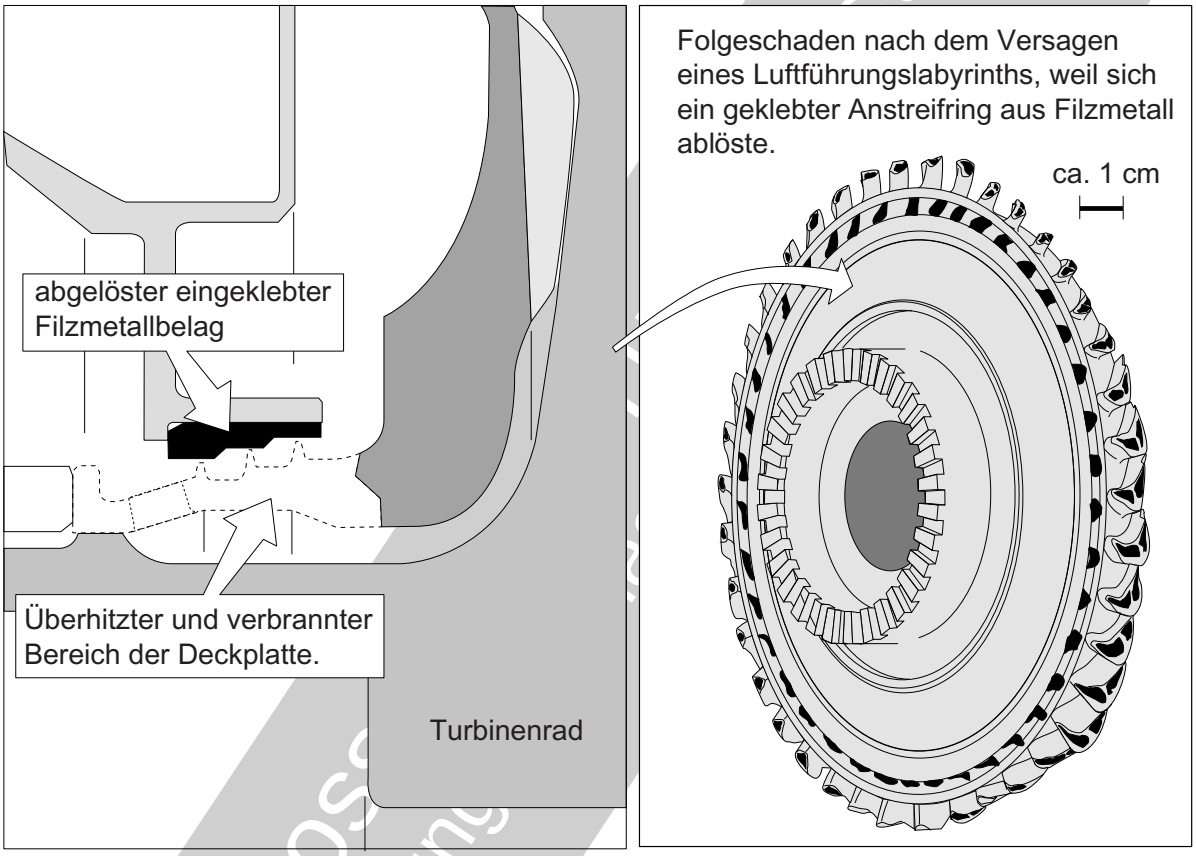


Bild 12.2.1.5-9

Bild 12.2.1.5-9: *Die Zerstörung des Turbinenrads einer kleinen Gasturbine (Skizze rechts) ist die Folge einer extremen Überhitzung nach dem Versagen einer Labyrinthdichtung (Skizze links) der Kühlluftführung. Der mit einem anorganischen Klebstoff fixierte Metallfilzring löste sich auf Grund unentdeckter Bindefehler (Bild 12.2.1.5-6). Der* ***Belag verfing sich im Labyrinth und leitete einen katastrophalen Anstreifvorgang ein*** *(Band 2, Bild 6.10.3.1.2-32). Dabei wurde der rotierende Labyrinthteil aufgeschmolzen und abgeschleudert.*

© Axel Ross Ausbildung

Literatur zu Kapitel 12.2.1.5

© Axel Rossmann - Turboconsult
abschulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.5-1 „Adhesives“, Zeitschrift „Machine Design“, November 19, 1981, Seite150-151.

12.2.1.5-2 „Brazing Processes“, Zeitschrift „Machine Design“, November 15, 1979, Seite 164-166 und „Adhesives“, Seite172-177.

12.2.1.5-3 ASM „Metals Handbook“, „Volume 6- Welding, Brazing and Soldering“, ISBN 0-87170-377-7, 1997, Seite 1041-1056.

12.2.1.5-4 „Sermabond, Technical Data Sheet“, der Fa. Sermatech, Materials Division, Limerick, PA 19468 USA, www.sermatech.com., Seite 1-3.

12.2.1.5-5 „Hochtemperatur-Keramikkleber“, Produktangaben der Fa. Polytec, Cotronics Corp. Seite 1-30.

12.2.1.5-6 „Silikonklebstoffe und Dichtungsmassen“, Technische Informationen der Fa.Delo Industrie Klebstoffe, Landsberg, www.Delo.de, Seite 1.

12.2.3.5-7 „Dispersionskleber“, Baulexikon Glossar, www.encyclopedia-wiki.org, 3.Feb. 2005, Seite 1.

12.2.1.5-8 D.Timmermann, „Klebstoffe“, Referat, 1996, http://otto-hahn.hfo.fh-mannheim.de, Seite 1-7.

12.2.1.5-9 „Konstruktionsatlas, Kapitel Kleben“, www.konstruktionsatlas.de, 2005.

12.2.1.5-10 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 2“, 2001, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 8.2

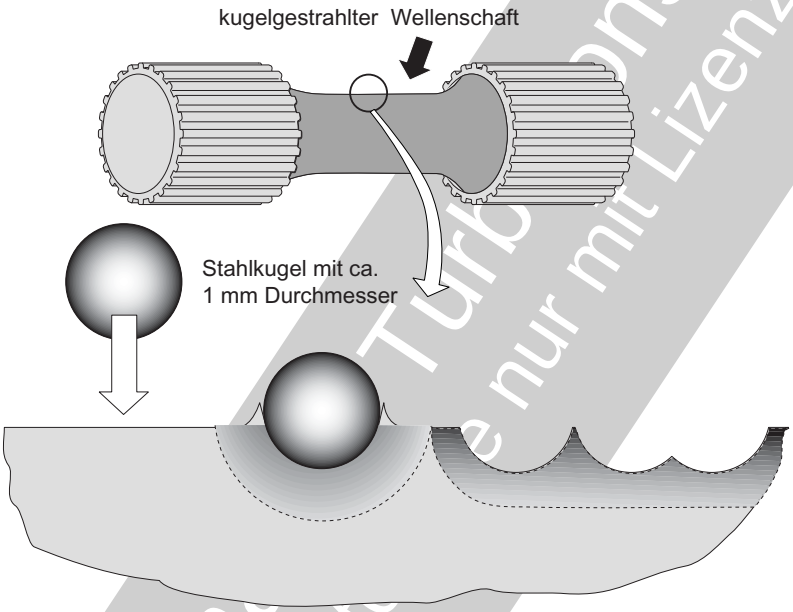
12.2.1.5-11 H.Onusseit, „Kleben - das Fügeverfahren des 21. Jahrhunderts“, www.Klebstoffe.com/Kleben.../IVK_Kleben_das Fuegeverfahren_..., 14 Seiten.

12.2.1.5-12 „Klebetechnik: Das Handbuch zur Lösung technischer Probleme“, Stand 2012, Fa. Henkel, www.loctite-users-choice.com, 55 Seiten.

12.2.1.5-13 „Automobil-Klebstoffe“, http://.wikipedia.org/wiki/Automobil-Klebstoffe, Stand Sept. 2012, Seite 1-3.

12.2.1.6 Verfestigungs- und Abrasionsstrahlen

12.2.1.6.1 Verfestigungsstrahlen



Unter **Kugelstrahlen** (Verfestigungsstrahlen, engl. **„Shot Peening“**) wird ein definiertes und reproduzierbares (nahezu) nicht abtragendes Bearbeitungsverfahren verstanden. Die zu bearbeitende Oberfläche wird von den auftreffenden, vorzugsweise sphärischen Partikeln plastisch verformt. Man spricht von **Nassstrahlen (engl. vapor blasting) oder Trockenstrahlen** je nachdem, ob Wasser oder Luft zur Erzeugung des Partikelstrahls dient. Das Kugelstrahlen ist nicht mit **abrasiven Strahlverfahren wie Sandstrahlen oder Oxidstrahlen** (Strahlgut Al_2O_3) zu verwechseln. Diese dienen zur Reinigung und dem erosiven Abtrag der Werkstückoberfläche.

Kugelstrahlen ist meist die einzige Möglichkeit, **ohne unzulässige Veränderung des Bauteils eine merkliche Schwingfestigkeitserhöhung** zu erzielen. Es bietet sich deshalb besonders für eine Nachbehandlung bei Schwingermüdung von Serienteilen an. Der Effekt des Kugelstrahlens ist gewöhnlich **nicht Bestandteil einer Festigkeitsauslegung**. Neben dem günstigen Einfluss auf die Schwingfestigkeit wird eine Art **Immunisierung der Oberfläche** gegenüber kleinen Beschädigungen, welche nicht die Druckspannungszone durchdringen, erzielt. Unter diesem Gesichtspunkt war Kugelstrahlen bisher ein **absicherndes Verfahren**. In Zukunft ist jedoch damit zu rechnen, dass der Kugelstrahleffekt **in die Auslegung des Bauteils** eingeht. Die Lebensdauer und in vielen Fällen damit die Gesamtsicherheit des Triebwerks ist dann vom Kugelstrahlergebnis abhängig. Leider lässt sich das Kugelstrahlverfahren nur über eine **Prozesskontrolle** absichern. Unbemerkte Abweichungen erhalten so eine neue sicherheitsrelevante Dimension. Die Prüfung kugelgestrahlter Oberflächen und die Überwachung des Strahlprozesses dürfte damit sehr viel anspruchsvoller werden.

Kugelstrahlen hat sich bei einer großen Zahl von Maschinenbauteilen bewährt. Häufig wird der Kugelstrahlprozess erst eingesetzt, wenn bei der Erprobung oder in der Serie Schwingschäden auftreten und andere Maßnahmen mit akzeptablem Aufwand nicht mehr möglich sind. Beispiele für Anwendungen zeigt Bild 12.2.1.6-0 und Band 4, Bild 18.4-11.

© Axel Bossmann Turbinenservice
Abbildungen nur mit Lizenz

Bild 12.2.1.6-0 *(Lit. 12.2.1.6-11 und Lit. 12.2.1.6-12)**:** Oft sind dem Maschinenbauer die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten des Kugelstrahlens nicht geläufig. Diese Zusammenstellung gibt einen Überblick ohne Anspruch auf Vollständigkeit.*

*„**A“ Schwingfestigkeitsabfall bei Schwingverschleiß** (Fretting, Band 1, Kapitel 5.9.3) vermeiden. Besonders empfindlich sind **Titanlegierungen**, deren nutzbare Schwingfestigkeit auf bis zu 30% abfällt. Beispiele sind der Auflagebereich von Lagerschalen in einem **Pleuel** und Füße von **Verdichterschaufeln**. Gerade im Motorsport kam es früher zu Pleuelbrüchen bevor das Kugelstrahlen eingeführt wurde.*

*Neben der Schwingfestigkeit lässt sich die verfestigungsbedingte **Härtesteigerung,** um beispielsweise **Verschleiß** (Erosion, Fretting) **zu reduzieren,** nutzen.*

*„**B“ Abdichten offener Gussporosität**. Das gilt besonders für Al- und Mg-Gussteile wie Getriebe und Pumpengehäuse. Vorher kann eine Abdichtung durch Infiltration mit Klebstoff erfolgen (Bild 12.2.1.5-1). Mit dem Kugelstrahlen werden die **Poren an der Bauteiloberfläche zugedrückt**. Dazu verwendet man Kugeln aus zumindest artähnlichem Werkstoff um Korrosion durch Elementbildung (Abrieb der Strahlkugeln) im Betrieb zu vermeiden. Ein Beispiel sind Kugeln aus einer Aluminiumlegierung mit ca. 5 mm Durchmesser. Werden die Gehäuse bei einer späteren Überholung geätzt oder entlackt, kann ein erneutes Strahlen notwendig werden.*

*„**C“ Elastische Federn**: Mit dem Kugelstrahlen wird die Schwingfestigkeit metallischer Federn wie **Schrauben- und Blattfedern von Fahrzeugen** angehoben. Auch Oberflächenfehlstellen in Form **mechanischer Beschädigungen oder Korrosionsnarben** lassen sich ‘entschärfen’. Besonders wirkungsvoll ist eine Strahlbehandlung **vorgespannter Federn** (engl. prestressed). So lässt sich die Druckspannung an der Oberfläche der nachfolgend entlasteten Feder steigern. Im Betrieb führt dies zur Absenkung der Mittelspannung und damit zu einer höheren nutzbaren Schwingfestigkeit (Band 1 Bild 5.4-11 und Bild 5.4.3.2-4)*

*„**D“ Schwingfestigkeitssteigerung** bzw. Gewährleistung. **Dies gilt insbesondere für Motorenteile** wie Wellen/Kurbelwellen, Pleuel, Kolben und Ventile. Sie werden zur Gewährleistung einer hohen Schwingfestigkeit gestrahlt (Bild 12.2.1.6-5). Bei einer gestrahlten Sollbruchstelle (Überlastungsschutz, Band 1 Bild 5.4.4-7) wird das sicherheitsrelevante Versagen bei statischer oder Stoßbeanspruchung nicht unzulässig beeinflusst.*

*„**E“ Schweißungen.** Generell ist bei hoher dynamischer Beanspruchung ein Kugelstrahlen zu empfehlen, um Zug-Schweißspannungen (Bild 12.2.1.3.1-16 und Band 4, Bild 18.4-5.2) abzubauen.*

*„**F“ Beschichtungen**: Insbesondere in galvanischen Schichten wie Cr- und Ni-Schichten wirken hohe Zugeigenspannungen (Bild 12.2.1.8.3-2 und Bild 12.2.1.8.3-3). Sie sind der Grund für einen signifikanten Abfall der Schwingfestigkeit des Bauteils. Dagegen wirkt Kugelstrahlen. Dies kann vor der Beschichtung erfolgen. Ein größerer Effekt ist jedoch erfahrungsgemäß vom Strahlen der beschichteten (!) Fläche zu erwarten.*

Die Haftfestigkeitsprüfung duktiler Schichten (z.B. Silber) lässt sich an einer Blasenbildung (siehe auch „G“) auf Fehlstellen überprüfen (Bild 12.2.1.6-10).

*„**G“ Oberflächenstrukturierung** dient zum einen der technischen Verbesserung von Oberflächeneigenschaften. Dazu gehören ein niedriger **Reibwert** und günstige **Mikrokontaktbedingungen** im Vergleich zu einer glatten Fläche (Bild 12.2.1.6-8). Hierzu trägt auch der **Reservoireffekt der Kalottenstruktur** für Schmiermittel bei (Bild 12.2.1.6-8). Bei **Gleitflächen** können auch für **spanende Bearbeitung** (Schleifen, Drehen) **orientierte Topografie**, Festigkeit und Eigenspannungen nachteilig sein. Das gilt z.B. für **gleitende Dichtungen** (Band 2, Bild 6.10.2.1-4). An kugel-*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.6-4

© Axel Bossmann - Tribocosm als Schulungsunterlage nutzbar

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Anwendungen des Verfestigungsstrahlens (Kugelstrahlens) in der Technik:

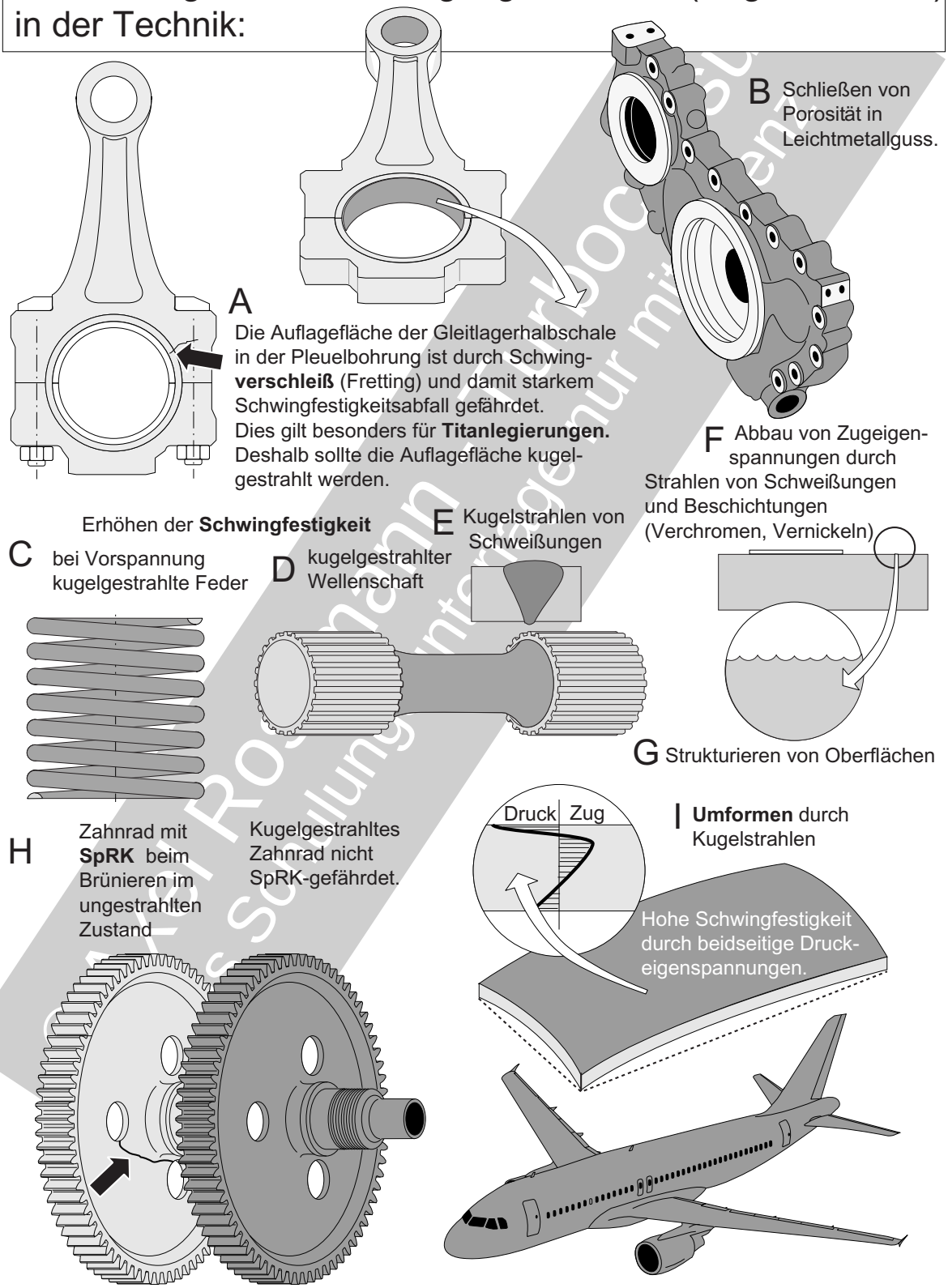


Bild 12.2.1.6-0

Axel Rosmann - Turbocoach
Das Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Fortsetzung von Seite 12.2.1.6-2

gestrahlten Flächen beobachtet man einen ***Trenneffekt****. Leichtere* ***Entnahme von Werkstücken,*** *die sich sonst wegen des 'Ansaugeffekts' einer glatten Werkzeugoberfläche schlecht abheben lassen (z.B. bei Spritzguss von Kunststoffteilen). An Geräten der* ***Lebensmittelindustrie*** *beobachtet man eine bessere* ***Gleit- bzw. Ablösungsfähigkeit****, beispielsweise von Käse. Man stellt sogar fest, dass die* ***bakterielle Belastung*** *der Oberfläche abnimmt.*

Einen eher ***optischen****, dabei jedoch durchaus wichtigen Effekt hat das* ***Aussehen*** *gestrahlter Oberflächen. Da nicht eine Oberflächenverfestigung im Vordergrund steht und bei metallischen Kugeln, besonders Stahlkugeln, wegen* ***Mikroaufschmierungen Korrosionsgefahr*** *besteht, werden neben Kugeln aus artgleichem Material (z.B.Edelstahlkugeln) bevorzugt Glasperlen oder keramische Kugeln angewendet. Die* ***matte, nicht orientierte Struktur*** *ist in der Architektur bei unlackierten Oberflächen (z.B. aus 'rostfreiem Stahl') erwünscht. Hier sind zusätzlich* ***Beschädigungen wie Kratzer*** *im Vergleich zu einer polierten Oberfläche weniger störend.*

Die ***Innenseite von Rohren*** *aus Aluminiumlegierungen oder rostfreien Stählen für* ***Transportaufgaben*** *wie für 'Kunststoffpellets' unterliegen lebensdauerbegrenzendem abrasivem* ***Verschleiß****. Dagegen werden sie innen mit einem speziellen Strahlverfahren behandelt. Das erzeugt eine* ***orientierte Strahlstruktur****. Diese und die Härtesteigerung auf Grund der Verfestigung vermindert den Abrieb/Verschleiß signifikant*

*„****H****“* ***Schutz vor Risskorrosion****: Typisches Beispiel sind* ***SpRK-Risse*** *(Laugensprödigkeit, Band 1 Bild 5.6.3.1.2-3). Hier schützen die induzierten Druckeigenspannungen.*

Kugelstrahlen bietet auch einen Schutz gegen ***interkristalline Korrosion*** *(IK, Band 1 Bild 5.6-2 und Bild 5.6.1.1-4). Dabei nutzt man die plastische Verformung der Strahlzone.*

Einen indirekten Schutz ermöglicht eine ***Prüfung*** *(engl. surch peening) mit Hilfe des Kugelstrahlens. So können Korrosionsschäden (****Schichtkorrosion****) an Beplankungsblechen aus Aluminiumlegierungen* ***gefunden*** *werden. Diese parallel zur Oberfläche verlaufenden interkristallinen Trennungen werden von den Druckspannungen* ***erkennbar*** *bis zu Abblätterungen* ***aufgeworfen****.*

In diesem Zusammenhang sei auf die ***Haftfestigkeitsprüfung duktiler Schichten*** *(z.B. Silber) hingewiesen. Dabei zeigt* ***Blasenbildung*** *Fehlstellen an (Bild 12.2.1.6-10).*

*„****I****“* ***Formgebung*** *und* ***Formkorrektur.*** *Durch gezielt verteiltes* ***örtliches Strahlen*** *lassen sich* ***verzogene Bauteile richten****. Typische Anwendungen sind Antriebs- und Kurbelwellen, Schweißteile und Ringe.*

Eine besondere Bedeutung hat die Formgebung der ***Blechstrukturen*** *von Flugzeugzellen (Flügel, Rumpf, Steuerflächen). Dabei werden Bleche* ***einseitig gestrahlt****. Sie wölben sich gegen die Strahlrichtung bis die gewünschte Kontur erreicht ist. Vorteilhaft ist, dass dabei sowohl auf der Strahlseite (Strahleffekt) als auch auf der Gegenseite (durchbiegungsbedingt) Druckeigenspannungen induziert werden. Sie heben mit einer Absenkung der Zugmittelspannung im Betrieb die nutzbare Schwingfestigkeit an.*

© Axel Rossmann - Tutorium Werkstoffe und Fertigungstechnik

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Aus den Kugelstrahleffekten können sich Vorteile aber auch Probleme für Fertigung und Betrieb ergeben.

Effekte:

- Druckspannungen
- Verfestigung
- plastische Deformation der Oberfläche
- besondere Oberflächentopografie
- Verzug
- Gratbildung
- Aufschmierungen oder Beladung mit Strahlgut
- Strahlmittelbruch
- Strahlmittelverschmutzung und Übertragung auf das Bauteil
- Rekristallisation nach Wärmebehandlung

Einflüsse auf den Fertigungsprozess:

positiv:

- Schutz gegen SprK und IK
- Entschärfung von kleinen Oberflächenbeschädigungen wie Riefen
- Kann zum Richten dienen
- Haftfestigkeitsprüfung
- Anzeige örtlicher Härteunterschiede

negativ:

- Verschlechterte Eindringprüfung
- Nacharbeit
- Korrosion bei Lagerung und Oberflächenbehandlungen
- Beschichtungsprobleme
- Schweißfehler
- Schädigung spröder Schichten
- Deformation dünnwandiger Teile

Einflüsse auf das Betriebsverhalten:

positiv:

- Schwingfestigkeitserhöhung bzw. Absicherung
- Verringert Frettingeinfluss
- Verhindert SpRK
- Entschärfung kleiner Beschädigungen
- verbesserter Korrosionsschutz bestimmter Lacksysteme

negativ:

- Korrosion
- Auslösen von Lagerschäden
- Schwingrisse von innenliegenden Fehlstellen
- Beeinträchtigung der Schwingfestigkeit

© Axel F
als Schul

Bild 12.2.1.6-1

Bild 12.2.1.6-1: *Die vielen mit dem* ***Kugelstrahlen verbundenen Effekte*** *(siehe Beschreibungen in Bild 12.2.1.6-2) können sich auf sehr unterschiedliche Weise auf den* ***Fertigungsprozess und das spätere Betriebsverhalten*** *auswirken. Wie man erkennt, entsteht ein komplexes Netzwerk zwischen Effekten und Einflüssen. Die gegenseitige Beeinflussung wirkt sich durchaus nicht nur positiv aus.*

Beeinflussung des Fertigungsprozesses:

Positiv*:* ***Immunisierung gegen Spannungsrisskorrosion*** *(SpRK, Band 1, Bild 5.6.3.1.2-3 und Band 4) und* ***interkristalline Korrosion*** *(IK, Bild 12.2.1.6-6, Lit. 12.2.1.6-5) bedeutet für den Fertigungsprozess eine deutliche* ***Risikominimierung****. So werden gefährliche, rissbildende Korrosionsangriffe, die von werkstoffspezifisch wirkenden Ätzbädern, Beschichtungsbädern und aggressiven Verunreinigungen ausgelöst werden können, vermieden.*
Die ***Anhebung und Absicherung der Schwingfestigkeit*** *ist eine besonders herausragende Eigenschaft des Kugelstrahlens. Abweichungen im Rahmen der spezifizierten* ***Prozessparameter*** *bei Bearbeitungsverfahren wie* ***Schleifen*** *(Bild 12.2.1.3.3-4),* ***Fräsen und Drehen*** *lassen sich mit Kugelstrahlen ausgleichen. Es entsteht eine Schutzwirkung für Kratzer und Beschädigungen, deren Einfluss die Druckspannungszone nicht durchdringt.*
Druckspannungen lassen sich auch gezielt anwenden, z.B. zum ***Richten dünnwandiger Bauteile****. Beispiel ist die* ***Unterdrückung des Verzugs eines längsgeteilten Verdichtergehäuses*** *aus einer Titanlegierung in den ersten Betriebsstunden (Lit. 12.2.1.6-9). Den vom Fräsen eingebrachten Eigenspannungen wirken dabei Druckeigenspannungen aus einer optimierten Kugelstrahlbehandlung entgegen.*
Druckspannungen lassen sich auch zur ***Haftfestigkeitsprüfung*** *nutzen. In Zonen schlechter Haftfestigkeit von dünnen zähen Schichten wie galvanischen Silberschichten, kommt es zur Blasenbildung (Bild 12.2.1.6-10).*
Örtlich unterschiedliche ***Oberflächenhärten*** *zeichnen sich nach dem Kugelstrahlen auf Grund der unterschiedlichen Verformung gegenüber dem angrenzenden Werkstoff ab (Bild 12.2.1.6-10).*

negativ: *Das Kugelstrahlen kann* ***Risse plastisch schließen*** *(Band 4) und so die* ***Eindringprüfung beeinträchtigen****.*
Kommt es bei eng tolerierten Bauteilen während des Kugelstrahlens zum Verzug, ist ein ***Bearbeiten der Kugelstrahlfläche*** *nicht möglich, wenn dabei Druckspannungen und Verfestigung merklich abgebaut werden.*
Frisch kugelgestrahlte *Metallflächen können sehr reaktiv sein. Kam es zusätzlich zum Aufschmieren des metallischen Kugelwerkstoffs (Stahl), können auch sonst* ***unempfindliche Werkstoffe*** *(rostfreie Stähle, Titanlegierungen)* ***korrodieren****.*
*Abrieb von Strahlpartikeln und steckengebliebener Strahlgutbruch (****Beladungseffekt****, z.B. von Glasperlen, Bild 12.2.1.6-4) können* ***Beschichtungsprozesse*** *wie die Diffusionsbeschichtung von Heißteilen beeinträchtigen (Bild 12.2.1.8.1-3).* ***Fe-Abrieb*** *wird auch für* ***Fehlstellen beim Schweißen von Titanlegierungen*** *verantwortlich gemacht (siehe Bild 12.2.1.3.3-4) Eine plastische Verformung der Oberfläche kann natürlich* ***dünne spröde Schichten*** *(z.B. Al-Diffusionsschicht, keramische Schichten) zum* ***Abplatzen*** *bringen. Metallische Beschichtungen wie galvanische Ni- und Cr-Schichten sind dagegen nicht gefährdet (Bild 12.2.1.6-5).*
Dünnwandige Bauteile können beim Kugelstrahlen unzulässig plastisch verformt werden (Bild 12.2.1.6-11). Hierzu gehört auch die ***Bildung von Graten*** *(„****Elephant Tail****“), was die Schwingfestigkeit gefährlich herabsetzen kann (Bild 12.2.1.6-11 und Band 4).*

Einflüsse auf das Betriebsverhalten:
Positiv: *Wirken* ***Fehlstellen nicht so tief wie die Druckspannungszone*** *des Kugelstrahlens*

© Kyel Bossmann - Turbosonst das Bestätigungsunterlagen-Konferenz

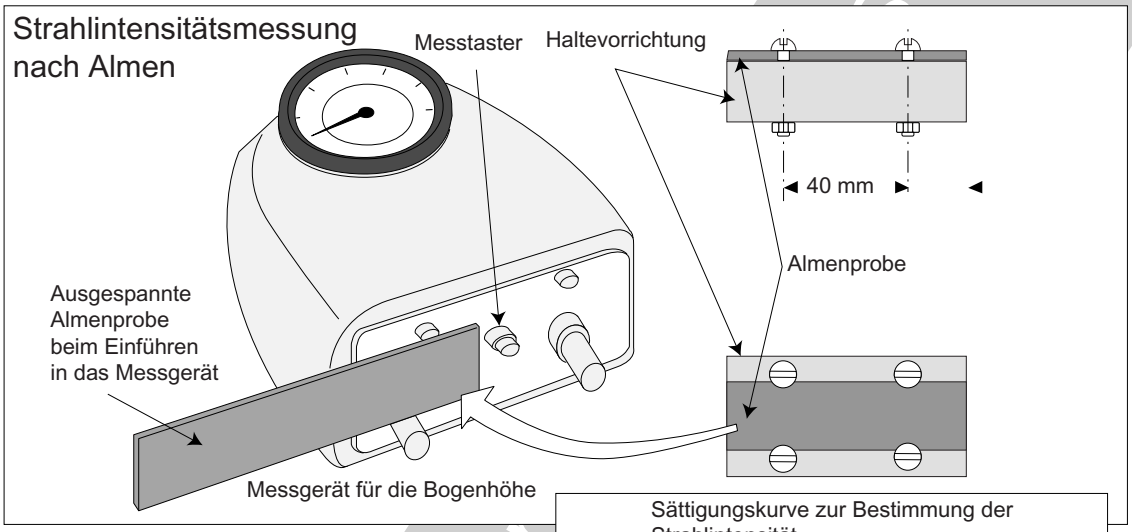
*(Bild 12.2.1.6-2), werden sie „**entschärft**“ und eine Schwingrissbildung behindert. Bauteile, insbesondere Rotorkomponenten heutiger Triebwerke, sind extrem hoch zyklisch belastet. Deshalb können bereits unbemerkte, kleine Kerben wie **Kratzer** (vom „Handling“ z.B. bei Montage und Wartung) und ungewöhnliche **Bearbeitungsriefen** (Band 4) sowie **Funken** (Band 4) im Betrieb zum katastrophalen Versagen des Bauteils führen.*
*Druckspannungen, Verfestigung und, werkstoffspezifisch (z.B. Titanlegierungen), wahrscheinlich auch die typische **Kalottenstruktur** (Topografie) einer kugelgestrahlten Oberfläche, verhindern ein extremes Absinken der Schwingfestigkeit (Bild 12.2.1.6-8). Das gilt besonders für **Titanlegierungen** unter Verschleiß durch Mikrobewegungen (**Fretting**, Band 1 Bild 5.9.3-3 und Bild 5.9.3-4).*
*Druckspannungen sind ein **Schutz gegen Spannungsrisskorrosion**. Sie können Bauteile mit empfindlichen Gefügezuständen (Band 1 Kapitel 5.6.3.1.1 und Band 4) vor dem Versagen im Betrieb schützen.*
*Mit Aluminium pigmentierte **anorganische Lacksysteme** auf Stählen, wie den 13%-Cr-Stählen der Verdichterbeschaufelung älterer Triebwerkstypen, werden durch Kugelstrahlen elektrisch leitfähig. Das **verbessert die kathodische Schutzwirkung** erheblich.*

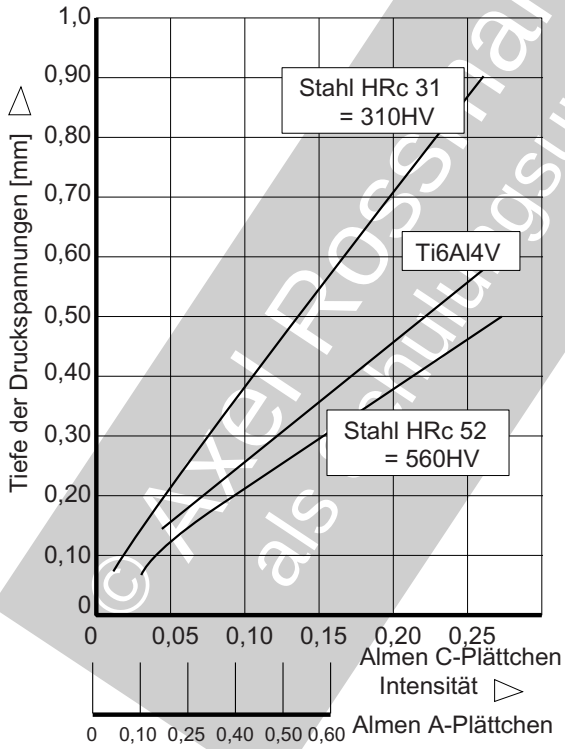
***negativ:** Kugelstrahlen kann sich unter besonders ungünstigen Umständen auch negativ auf das Betriebsverhalten von Bauteilen auswirken. **Abrieb der Stahlkugeln** auf korrosionsfesten Werkstoffen, wie Titanlegierungen und hochlegierten Stählen, kann Korrosion auslösen (Band 4). Bei dicken biegebeanspruchten Querschnitten verlieren Druckspannungen wegen dem flacheren Spannungsgradienten an Schutzwirkung gegenüber dicht unter der Oberfläche liegenden Fehlern (Bild 12.2.1.6-7) . Steht der Querschnitt gleichmäßig unter Zugspannungen, wie rotierende Ringstege unter Tangentialspannungen (Band 4), ist sogar ein Abfall der Schwingfestigkeit (LCF) nicht auszuschließen.*

***Bild 12.2.1.6-2:** Die Wirkung des Kugelstrahlens wird indirekt mit der sog. **Almenintensität** spezifiziert (Bild 12.2.1.6-16) und überwacht (Lit. 12.2.1.6-1 und Lit. 12.2.1.6-5). Die Almenintensität dient in erster Linie der **Verfahrensüberwachung** (Bild 12.2.1.6-3). Sie ist ein Kennwert für den gesamten Kugelstrahleffekt und von vielen Einflüssen abhängig (Bild 12.2.1.6-3). Im Diagramm unten links erkennt man einen weitgehend linearen Zusammenhang zwischen Almenintensität und Tiefe der induzierten Druckspannungen. Dagegen steht die Höhe der induzierten Druckspannung offenbar nicht in einem einfachen Zusammenhang mit der Almenintensität (Bild 12.2.1.6-3). Zu deren Bestimmung wird, wie im Rahmen oben dargestellt, ein definiertes **Blechplättchen** einseitig gestrahlt. Die induzierten Druckspannungen führen nach dem Lösen aus dem „Prüfblock“ zur **Durchbiegung,** die mit einem Messgerät bestimmt wird. Dieses Prinzip wird sowohl bei der Ermittlung optimaler Verfahrensparameter in der Entwicklung, als auch während der Serienfertigung angewendet. Bestechend ist die Einfachheit des Prüfverfahrens, jedoch ist auch mit Schwächen zu rechnen. Insbesondere kann die Almenmessung nur eine Aussage für die auf das Blechplättchen wirkende Strahlintensität machen, nicht aber für die gesamte Bauteiloberfläche. Beispiele sind Schaufelnuten in Scheiben oder Tannenbaumfüße von Turbinenschaufeln.*
*Die Strahlzeit reicht gewöhnlich bis zur **Sättigung**. Diese ist dann gegeben, wenn die Intensität auch bei beliebig langem Strahlen, um nicht mehr als 10 % des Gesamtwertes ansteigt (oberes Diagramm im rechten Rahmen). In diesem Bereich flacht sich die Intensitätskurve über der Strahlzeit deutlich ab. Bei Sättigung ist auch ein **Bedeckungsgrad** um 100 % erreicht. Oft werden, um die benötigte Intensität*

© Axel Bossmann - Turboconsult
ausschließlich Unterlagen zur Lehrzwecken

Die Strahl- (Almen-) intensität ist ein Überwachungsverfahren für den Strahlprozess.





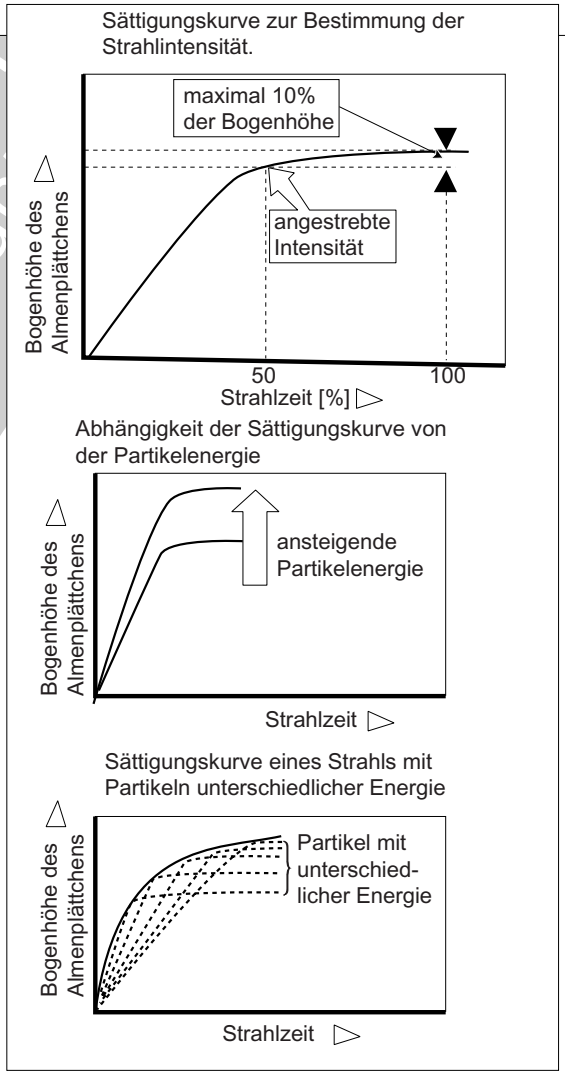


Bild 12.2.1.6-2

© Axel Rossmann als Schulungsunterlage

in jedem Fall zu gewährleisten, ***Bedeckungsgrade über 100 % vorgeschrieben****. Das erfordert ein entsprechendes* ***Vielfaches der zur Sättigung notwendigen Strahlzeit****. Der Anstieg der Intensität, d. h. die Durchbiegung eines dünnen Blechplättchens mit der Strahlzeit, verläuft häufig anders als die Zunahme der Tiefe und der Höhe der induzierten Druckeigenspannungen (Diagramm links). Der* ***Verlauf der Druckeigenspannungen*** *in das Bauteil zeigt ein besonders ausgeprägtes Sättigungsverhalten. Abhängig von Strahlmittel und Grundwerkstoff können bei gleicher Tiefe der Druckeigenspannungen und gleicher Almenintensität deutlich unterschiedliche mittlere Druckeigenspannungen bei Sättigung erzielt werden.*

Wichtig ist anzumerken, dass die Strahlintensität auf keinen Fall zu Überlappungen *(PSEF, Bild 12.2.1.6-15)* ***führen darf. Diese können als Merkmale einer Überstrahlung gelten und die Schwingfestigkeit beeinträchtigen.***

Der in Spezifikationen angegebene ***Durchmesser der Strahlpartikel*** *(Korndurchmesser) ist gewöhnlich ein* ***Mittelwert****. Davon weicht je nach Qualität ein gewisser Prozentsatz der Strahlpartikel nach oben und unten ab. Deshalb wird die* ***Korngrößenverteilung in einer Siebanalyse*** *festgelegt. Wünschenswert ist eine möglichst geringe Streuung der Durchmesser. Der Korndurchmesser beeinflusst die erzielbare* ***Sättigungsintensität****, die im aauf bis zu 30% Allgemeinen mit diesem und damit der Partikelenergie ansteigt (Rahmen unten). Interessanterweise ist es möglich, dass Kugeln mit größerem Durchmesser geringere Eigenspannungen induzieren, als kleine. Es scheint, dass bei weicheren Werkstoffen der Einfluss des Korndurchmessers zunimmt.*

Die Streuung der Korndurchmesser hat einen wichtigen ***Einfluss auf den Anstieg der Intensität mit der Strahlzeit*** *(Rahmen unten). Bei geringer Streuung ergibt sich bis nahe zur Sättigung ein nahezu linearer Anstieg der Intensität mit der Strahlzeit. Ein Strahlmittel* ***mit sehr unterschiedlichen Korndurchmessern*** *lässt dagegen einen flachen bogenförmigen Anstieg der Sättigungskurve erkennen. Erst nach relativ langer Zeit wird die* ***Sättigungsgrenze*** *erreicht. Das bedeutet, dass die* ***Strahlmaschine mit dem verwendeten Strahlgut nicht optimal genutzt*** *wird.*

Bild 12.2.1.6-3: *Beim* ***Kugelstrahlen****, auch „****Shot Peening****“, werden pro Zeiteinheit eine bestimmte Menge vorzugsweise sphärisch geformte Partikel auf die zu behandelnde Oberfläche geschossen. Dies geschieht mit Hilfe einer* ***Strahlanlage****. Die Förderung des Strahlguts erfolgt mechanisch mit einem Schleuderrad oder mit einem Druckluftstrom (Lit. 12.2.1.6-1). Der Partikelstrahl trifft die Bauteiloberfläche unter einem* ***Winkel*** *bei einem bestimmten* ***Düsenabstand****. Im Einschlagbereich eines Strahlpartikels wird die Oberfläche plastisch verformt. Das führt zu den folgenden gewünschten Effekten (Bild 12.2.1.6-1):*

· ***Verfestigung einer Oberflächenzone*** *von mehreren zehntel Millimetern Dicke.*

· ***Erzeugung eines Eigenspannungszustands*** *mit* ***Druckspannungen*** *im Oberflächenbereich. Diese übertreffen die Zug- und Schubspannungen darunter liegender Schichten um ein Vielfaches .*

·***Vermeidung gefährlicher Zugspannungsspitzen in Kerben*** *(z. B. an Schaufelnuten und Tannenbaumfüßen).*

· ***Vergleichmäßigung des Oberflächenzustandes. Das gilt*** *sowohl für die* ***mechanischen Eigenschaften*** *als auch die* ***Rauigkeit*** *und deren Profil.*

· *Herstellung einer besonderen, meist* ***kalottenartigen Oberflächentopographie*** *(Bild 12.2.1.6-8).*

Die ***Verfestigung*** *und induzierte* ***Druckeigenspannungen*** *(Bild 12.2.1.6-5), heben die*

© Axel Bossmann - Turbocomsult
Abschnittslizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Die optimalen Kugelstrahlparameter sind für den jeweiligen Anwendungsfall spezifisch.

Einflüsse auf die Wirkung des Kugelstrahlens

Kugeleigenschaften
Kinetische Energie:
- Geschwindigkeit
- Auftreffwinkel (Strahlwinkel)
- Masse

Kontaktfläche
- Geometrie: Größe, Form

Werkstoff:
- Festigkeit/ Fließgrenze
- E-Modul,
- Zähigkeit,
- Verschleiß-verhalten

Wirkungen der Kugel:
- Energieübertragung/ Abprallen
- Beschädigung/Bruch
- Abrieb/Aufschmie-rungen

Grundwerkstoff-eigenschaften:
- Festigkeit, Fließgrenze
- E-Modul
- Zähigkeit
- Verschleißverhalten

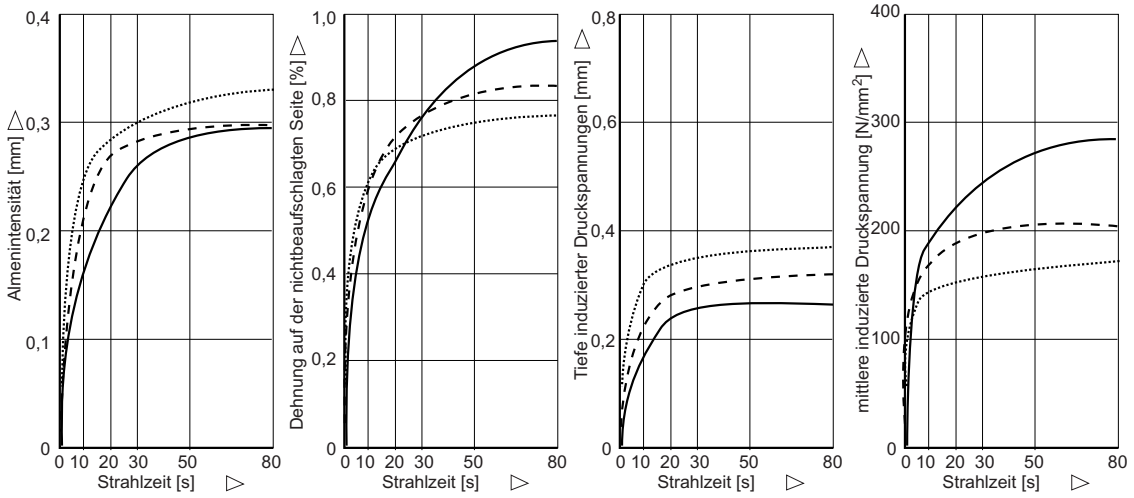
Bauteil:
- Querschnitt/Steifigkeit
- Deformation/Verzug

Wirkung im Grundwerkstoff:
- Druckeigenspannungen
- Kaltverfestigung
- plastische Verformung
- Abrieb/Aufschmierungen

Prozessparameter:
- Strahlzeit (Bedeckungsgrad)
- Durchläufe
- Strahlmitteldurchsatz
- Maschinenbesonder-heiten/ Kugelgeschw.

Die Almenintensität dient der Verfahrensüberwachung, sie sagt nur eingeschränkt etwas über Höhe und Eindringtiefe der induzierten Druckspannungen aus.

Strahldaten: Düsen ∅ 15 mm, Düsenabstand 120 mm, Strahldruck 7 at, Strahlgutdurchsatz 0,025 kg/s



Almenplättchen MK 75 A2. Strahlgut: Hartguss 2mm∅ (ca. 46 HRc)
Almenplättchen MK 75 A2. Strahlgut: Drahtkorn gerundet 0,3mm∅ (ca. 46 HRc)
Almenplättchen CK 45 A2. Strahlgut: Hartguss 0,3mm∅ (Brinellhärte ca. 200)

Bild 12.2.1.6-3

Schwingfestigkeit *gewöhnlich merklich an. Dabei kann bei verschiedenen Werkstoffen der Anteil durchaus unterschiedlich auf Verfestigung und Druckspannung verteilt sein (Lit. 12.2.1.6-3).* ***Druckeigenspannungen*** *wirken schwingfestigkeitserhöhend, indem sie sich dynamischen Betriebsspannungen mittelspannungsvermindernd überlagern (Bild 12.2.1.6-5 und Band 4, Bild 18.4-4).*

Wie weit sich die Schwingfestigkeit mit Kugelstrahlen erhöhen läßt, hängt u.a. vom ***Spannungsgradienten*** *in Oberflächennähe des Bauteils bei dynamischer Beanspruchung ab (Band 4, Bild 18.4-2 und 18.4-8).*

Interessanterweise wird ***die höchste Schwingfestigkeit bei den meisten Werkstoffen mit einer moderaten Strahlungsintensität erreich****t. Diese muss ausreichend unter den Werten einer* ***Überstrahlung*** *liegen, die von* ***Überlappungen*** *(****PSEF****, Bild 12.2.1.6-15) angezeigt wird.*

Die ***kalottenartige Oberflächengestalt*** *wirkt sich anscheinend in manchen Fällen günstig auf die Schwingfestigkeit bei gleichzeitigem* ***Fretting*** *aus (Bild 12.2.1.6-8). Diesen Schluss legt zumindest die Erfahrung nahe.*

Neben der Schwingfestigkeitssteigerung lassen sich Druckeigenspannungen auch auf andere Weise nutzen:

· ***Schutz gegen Spannungsrisskorrosion*** *(Bild Band 4, Bild 18.4-11).*

· ***Schutz gegen interkristalline Korrosion*** *(Bild 12.2.1.6-6) .*

· Verbesserung des ***Korrosionsschutzes*** *mit der* ***Schließung von Poren in Gussteilen. Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit von Al-Keramiklack*** *und damit der* ***kathodischen Schutzwirkung.***

· ***Vermeidung des Risswachstums*** *von* ***rissigen Oberflächenschichten*** *(z. B. Cr-Schicht) in das Grundmaterial.*

Das Kugelstrahlen erfordert als definiertes Bearbeitungsverfahren eine ***intensive Optimierung und Überwachung des Verfahrensablaufs****. Wichtigste Kenngröße ist die* ***Strahlintensität (Almenintensität)****. Diese ist für die bauteilindividuelle Optimierung des Verfahrens bestimmend. Die Konstanz der ermittelten Verfahrensparameter ist während des Strahlvorgangs zu überwachen. Dies geschieht gewöhnlich auf einfache Weise mit der Messung der Intensität unter Verwendung eines Almenplättchens (Bild 12.2.1.6-2).*

Ein Gefühl für die Komplexität des Zusammenhangs zwischen Almenintensität und dem Druckspannungsverlauf zeigen die Diagramme im unteren Rahmen (Lit. 12.2.1.6-4). Die Reihenfolge der ***Sättigungsintensitäten entspricht der Tiefe der induzierten Druckspannungen****, nicht aber deren Höhe. Dieser Unterschied dürfte sich in Bauteilen werkstoffbedingt (Titanlegierungen, Ni-Legierungen, Leichtmetalle und Stähle) noch verstärken.*

Die Strahlintensität (Almenintensität) ist von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig:

· ***Kugelstrahlanlage****: Art des Strahlverfahrens (Injektor, Schleuderrad, trocken, nass).*

· ***Prozessdaten****: Arbeitsdruck, Düsenanzahl*

· Düsendurchmesser (Durchsatz), Strahlwinkel (Bild 12.2.1.6-13), Abstand zwischen Düse und Werkstück, Strahlzeit, in der das Werkstück dem Strahlmittelstrom ausgesetzt ist,

· Geschwindigkeit des Werkstücks bei geradliniger Bewegung oder Drehung.

· Bedeckung (Bild 12.2.1.6-4)

Strahlgut*: Werkstoffeigenschaften (Härte, Zähigkeit/Sprödigkeit), Korngröße und Kornform.·*

*·****Qualitätssicherung****: Anordnung der Almen-Proben zum Werkstück, Intensität, Bedeckung, Sättigung*

Gängige Almenintensitäten (Lit 12.2.1.6-1) sind in Bild 12.2.1.6-16 enthalten. Im Folgenden werden zu wichtigen Einflussgrößen nähere Angaben gemacht.

Strahlpartikel

Strahlpartikel können aus verschiedenen Materialien bestehen, die aus unterschiedlichen Herstellungsprozessen stammen.

© Axel Rossmann - Tumpenstift als Schulungsunterlage für Anwender

· *Vorgerundeter Stahldrahtschnitt meist unter 1 mm Größe mit einer Härte von ca. 50 HRC.*
· ***Stahlhartgusskugeln***
· ***Glas- und Keramikperlen*** *von mehreren Zehntelmillimetern Durchmesser.*

Die Strahlpartikel sollten alle möglichst gleiche Größe aufweisen, ohne scharfe Kanten, um dauerfestigkeitsmindernde Kerben zu vermeiden (Bild 12.2.1.6-4).

Diese Forderungen verlangen bei der Strahlgutherstellung hohe Qualität. So sind z.B. ***Gusskugeln mit Hohlräumen*** *sehr empfindlich für Bruch mit scharfen Kanten. Deshalb ist auch während des Strahlvorganges eine* ***ständige Überwachung und Aussortierung des Strahlguts*** *notwendig. Ein Strahlgut mit dem mittleren Korndurchmesser von 0,3 mm enthält pro Kilogramm ca. 10^7 Partikel und erzeugt pro Quadratzentimeter ca. 100 000 Einschläge während eines üblichen Strahlvorgangs.*

Strahlwinkel *(Einfallwinkel) siehe Bild 12.2.1.6-13.*

Strahlabstand

Der übliche Strahlabstand (Abstand zwischen Strahldüse und Strahlfläche) liegt gewöhnlich unter 0,5 m, eher bei 10 cm. Der Strahlabstand ***beeinflusst die Strahlintensität*** *weil der Strahl* ***kegelig aus der Düse*** *tritt und damit die Zahl der auftreffenden Strahlpartikel pro Flächeneinheit und Zeit sich mit größer werdendem Abstand verringert.*

Strahldüse

Häufig werden nicht nur eine Düse, sondern mehrere Düsen gleichzeitig verwendet, um die Strahlanlage möglichst effektiv auszunutzen. Der ***Strahldüsendurchmesser*** *beeinflusst den* ***Strahlmitteldurchsatz****. Für jede Korngröße und jedes Strahlgut gibt es eine* ***optimale Einstellung der Durchsatzmenge****. Beim Überschreiten dieser Einstellung fängt die Düse an zu „****stottern****“, d. h. das Strahlgut tritt infolge eines Staus ungleichmäßig aus.*

Strahlpartikelgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit der Strahlpartikel liegt je nach Strahlverfahren oder Auftreffbedingungen zwischen 30 und 200 m/sec. Sie beeinflusst die kinetische Teilchenenergie und damit den ***Strahleffekt quadratisch****. Die Partikelgeschwindigkeit wird im Allgemeinen nicht direkt während des Strahlvorgangs gemessen. Es handelt sich somit auch um keine gebräuchliche Kenngröße des Verfahrens.*

Strahlpartikel *siehe Bild 12.2.1.6-2.*

Strahlzeit *siehe Bild 12.2.1.6-2*

Strahlbewegung zur Bauteiloberfläche *siehe Bild 12.2.1.6-4.*

Vorbehandlung der Werkstücke

Die zu strahlenden Teile sollten ***vor dem Strahlvorgang sauber und fettfrei*** *sein. Beschichtungen wie Lacke, galvanische Schichten oder eine Brünierung müssen vorher entfernt werden. Es sei denn, sie werden bewusst gestrahlt. Dies ist z.B. bei Cr- und Ni-Schichten üblicherweise der Fall (Bild 12.2.1.8.3-2). Eine* ***möglichst geringe Oberflächenrauigkeit*** *(Ra = 1,6 mm) der Bauteile* ***vor dem Strahlen*** *ist anzustreben, um einen optimalen Strahleffekt zu erzielen. Das gilt auch dann, wenn das Strahlen die Rauigkeit erhöht.* ***Bohrungen (Verunreinigungsgefahr)*** *und* ***empfindliche Bereiche dünnwandiger Bauteilpartien*** *wie Labyrinthspitzen oder feine Gewinde sind mit geeigneten Vorrichtungen oder Hilfsstoffen* ***abzudecken****.* ***Bleiband ist wegen der Gefahr der Strahlmittelverunreinigung*** *und der Übertragung von Blei auf andere Bauteile nicht zu verwenden.*

Es ist davon auszugehen, dass in den zu strahlenden Teilen, insbesondere Verdichter-

© Axel Rossmann - Turbosnsgut abschaltungsunterlage nur mit Lizenz

schaufeln, auf Grund der Fertigung (Zerspanung) ***örtlich unterschiedlich Eigenspannungen*** *induziert sind. Sie können die Schwingfestigkeit in Bereichen von Zugspannungen bedenklich absenken. Diese stehen häufig im Gleichgewicht mit undefinierten Druckeigenspannungen an der Oberfläche. Der Einfluss dieser, dicht unter der Oberfläche liegenden Zugeigenspannungen auf die Schwingfestigkeit hängt bei überlagerter dynamischer Biegebelastung von der Querschnittsdicke ab (Bild 12.2.1.6-5). Die* ***Parameterentwicklung des Kugelstrahlens*** *sollte dem Rechnung tragen (Lit. 12.2.1.5-8).*
Aus diesem Grund sollten ***vor dem Kugelstrahlen*** *Verdichter- und Fanschaufeln bei 10-15°C über der jeweiligen Betriebstemperatur* ***„thermisch stabilisiert“*** *werden. So lassen sich die Eigenspannungen abbauen und vergleichmäßigen. Für die Optimierung der Strahlparameter sind* ***relevante Bauteile*** *(Verdichterschaufeln) unter* ***typischer Betriebsbeanspruchung*** *(Biegewechselschwingungen, Fliehkraftzyklen) zu verwenden. Nur so ist die* ***bauteilspezifische Eigenspannungsverteilung*** *und die* ***individuelle Querschnittsverteilung*** *ausreichend berücksichtigt.*

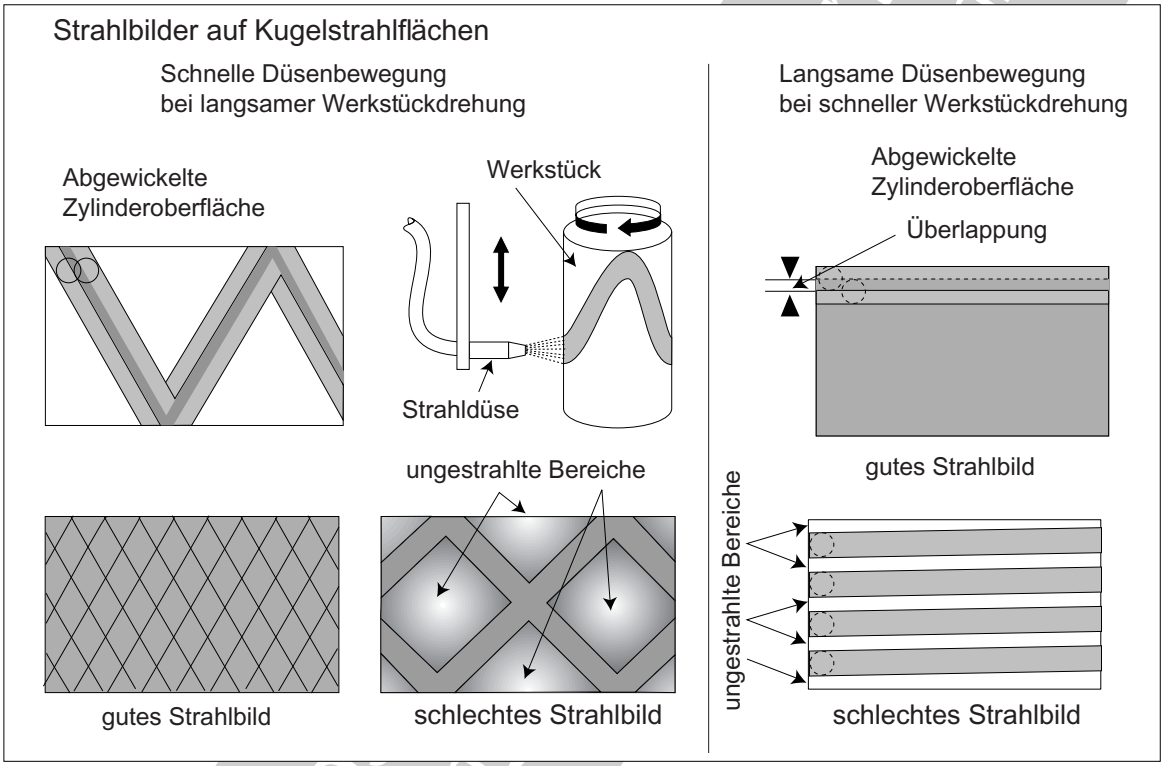
Nachbehandlung der Werkstücke

Das Kugelstrahlen sollte immer ***der letzte Arbeitsgang an der zu verfestigenden Oberfläche*** *sein. Diese Forderung beruht auf der Erkenntnis, dass jede abtragende Nacharbeit die relativ dünne Druckspannungszone (Bild 12.2.1.6-2 und Bild 12.2.1.6-3) nachteilig beeinflusst. Wird diese dünne Zone teilweise oder gar ganz entfernt, fallen die erwünschten induzierten Druckspannungen entsprechend dem Spannungsverlauf im Querschnitt (Bild 12.2.1.6-5) schnell ab. Zusätzlich besteht bei* ***Nacharbeit die Gefahr, dass Wärmeeinwirkung*** *(z. B. beim mechanischen Polieren oder Schleifen) eine* ***Relaxation*** *auslöst. Oberflächenbeschädigungen wie Feilenkratzer und Reißnadelstriche sind trotz eines gewissen Schutzeffekts des Kugelstrahlens unbedingt zu vermeiden. Eine Wärmebehandlung nach dem Strahlvorgang, die oberhalb der maximalen Betriebstemperatur gestrahlter Bauteile liegt, hat zu unterbleiben. Andernfalls baut sich der Kugelstrahleffekt durch Relaxieren (Band 4) unnötig stark ab. Die* ***maximal zulässige bzw. sinnvolle Betriebstemperatur*** *(Bild 12.2.1.6-9) hängt von der Warm- bzw. Kriechfestigkeit des Grundmaterials ab. Sie liegt für Stähle etwa bei 250 °C, für Al- und Mg-Legierungen bei ca. 130 °C. Superlegierungen können bis zu mehreren hundert ^{0}C (einige bis max. 750 °C) erwärmt werden. Dies ist der Grund, warum ein Kugelstrahlen auch für* ***Tannenbaumfüße gekühlter Hochdruckturbinenrotorschaufeln*** *sinnvoll ist.*
Eine besondere Form der ***Nacharbeit,*** *das sogenannte* ***Zweistufenverfahren,*** *wird häufig angewendet. Darunter versteht man* ***zwei aufeinanderfolgende Strahlbehandlungen****. Zuerst wird mit Stahlkugeln und anschließend mit Glasperlen gestrahlt. Dieses Verfahren findet besonders dann Anwendung, wenn zu befürchten ist, dass Rückstände des Strahlguts Korrosion oder andere Reaktionen an der Bauteiloberfläche auslösen. Hierzu gehören die* ***Elementbildung*** *bei Al-Legierungen, oder Cr/Ni-Stählen,* ***Lötrissigkeit*** *an Ni-Legierungen und Schweißprobleme mit* ***Titanlegierungen****.*
Unmittelbar nach dem Strahlen sind alle Abdeckungen zu entfernen*. Das Werkstück ist einwandfrei vom Strahlmittel zu reinigen. Ein besonderes Augenmerk gilt* ***Hohlräumen für die Kühlluftführung*** *in Heißteilen und Bohrungen für Öl. Nach dem Nassstrahlen sind die Teile unverzüglich zu trocknen (z. B. Abblasen mit Druckluft). Die* ***chemisch sehr aktive frische Strahlfläche*** *ist bei korrosionsempfindlichen Werkstoffen mit einer geeigneten* ***Konservierung*** *zu versehen.*

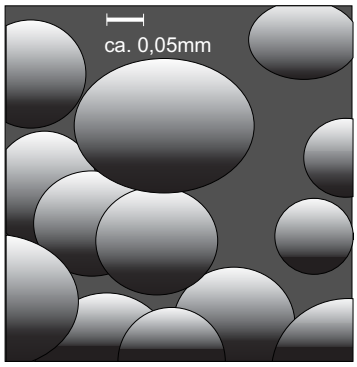
Einfluss des Werkstückmaterials *siehe Bild 12.2.1.6-9.*

© Axel Rossmann - Turbomaschinen Abschaufelungsunterlagen Institut Fazz

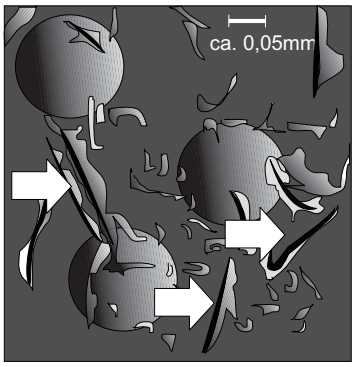
Der Kugelstrahlprozess bedarf einer, zerspanenden Verfahren vergleichbaren, Optimierung und Überwachung der Verfahrensparameter.



Die mikroskopische Untersuchung (REM) der Strahloberfläche lässt Rückschlüsse auf Bedeckungsgrad, Strahlwinkel, Intensität und Strahlmittelqualität zu.



Mit guten Glasperlen gestrahlte Oberfläche, (Bedeckungsgrad ungenügend)



Mit Bruchglas gestrahlte Oberfläche mit scharfen schnittartigen Kerben, (Bedeckungsgrad sehr schlecht)

Bild 12.2.1.6-4

Bild 12.2.1.6-4: *Zur Erzielung eines gleichmäßigen Strahleffekts über eine große Bauteiloberfläche ist eine* ***Bewegung des Partikelstrahls über die Bauteiloberfläche*** *notwendig. So wird die Oberfläche einmal oder mehrmals unter dem Strahlmittelstrahl hindurchgeführt.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Häufig werden dabei Strahldüse und Bauteil bewegt. Beispielsweise über zylindrische Flächen mit einer axialen Bewegung der Strahldüse und einer Drehbewegung des Bauteils. In diesem Fall besteht besonders bei ***hoher Geschwindigkeit der Düsenbewegung*** *die Gefahr, dass* ***periodisch gestrahlte und ungestrahlte Zonen*** *auftreten. Schnelle oszillierende Bewegungen der Düse im Vergleich zu einer langsamen Werkstückbewegung führen eher zu* ***einem „Fliesenbild“****. Ist die Düsenbewegung vergleichsweise zur Werkstückdrehung langsam, muss mit* ***Streifen*** *gerechnet werden (Skizzen oben). Diese Unregelmäßigkeiten im* ***Strahlbild*** *müssen mit einer optimalen Abstimmung der Bewegungsabläufe verhindert werden. Ein gutes Strahlbild weist überall eine gleichmäßige, vollkommene (100%) Bedeckung auf. Diese lässt sich mit einem Planimeter am Bauteil oder, bei schlechter Zugänglichkeit, an einem* ***Oberflächenabdruck*** *(Bilder unten, Lit. 12.2.1.6-7) mit einem Mikroskop (Lit. 12.2.1.6-3) bestimmen. Eine vollautomatische Auswertung unter Zuhilfenahme eines Computerprogramms ist möglich.*

Bild 12.2.1.6-5: *Der wohl am meisten genutzte* ***Effekt des Kugelstrahlens*** *ist die* ***Erhöhung und/oder die Absicherung der Schwingfestigkeit****. Siehe hierzu das Verhalten von Flachproben eines Vergütungsstahls (Härte 45 HRC) unter Biegewechselbeanspruchung in Diagramm unten rechts (Lit. 12.2.1.6-5). Dieser Effekt beruht auf induzierten oberflächennahen* ***Druckeigenspannungen*** *(Skizzen rechts oben und Mitte) die im Betrieb Zugspannungen reduzieren. Damit* ***sinkt die Mittelspannung*** *und der ertragbare Spannungsausschlag steigt (Band 1 Bild 5.4.3.2-3 und Bild 5.4.3.2-8 und Band 4, Bild 18.4-4). Ein weiterer schwingfestigkeitssteigernder Einfluss ist eine* ***Verfestigung*** *des Werkstoffs.*

Die Vorteile des Kugelstrahlens ***sind unter den folgenden Betriebsbedingungen besonders ausgeprägt und langzeitstabil****.*

· Hohe Ermüdungs-Lastwechselzahl, d.h. eine Lebensdauer möglichst weit im HCF-Bereich bzw. eine Schwingbelastung in der Nähe der Dauerfestigkeit.

· Niedrige Bauteil-Betriebstemperatur.

· Weniger stark verfestigte Oberfläche (Bild 12.2.1.6-9).

Die Schwingfestigkeitserhöhung wird bei vielen Bauteilen genutzt:

An ***galvanisch beschichteten Bauteilen*** *(Bild 12.2.1.8-3). Ein Strahlen vor der Beschichtung verhindert offenbar ein Risswachstum in das Grundmaterial (Bild 12.2.1.8-3)*

·Das Kugelstrahlen kann vor oder nach dem Aufbringen von Cr-oder Ni-Schichten erfolgen. Wider Erwarten ist ein ***Kugelstrahlen nach dem Beschichten der spröd wirkenden Schichten, sogar effektiver****.*

· Abbau schwingfestigkeitsabsenkender Zugeigenspannungen an ***Schweißungen*** *(Bild 12.2.1.3.1-16).*

*·****Wellen****: Verbesserung der Verschleißfestigkeit (****Fretting****) und der* ***Dauerfestigkeit von Keilverzahnungen*** *(Band 2, Bild 6.6.1-1). Man nutzt die* ***Reservoirwirkung der besonderen Topografie einer Kugelstrahlfläche*** *für Dauerschmiermittel.*

An ***Sollbruchstellen*** *hat sich Kugelstrahlen besonders bewährt. Bei relativ niedriger statischer Festigkeit (formgeschwächte Zonen) wird eine möglichst hohe dynamische Festigkeit benötigt (Band 1 Bild 5.4.4-7).*

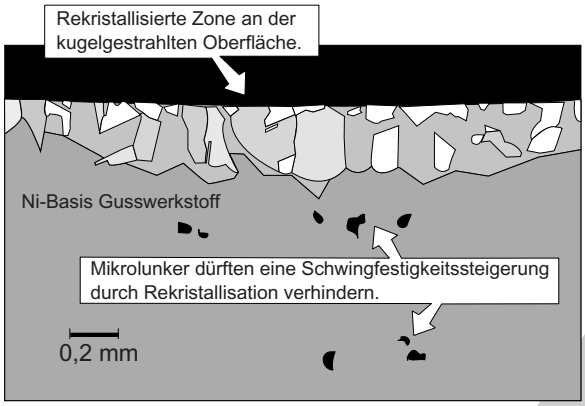
· ***Formkerben*** *an Bauteilen wie Scheiben (Aufnahmenuten für Schaufeln) und Turbinenschaufeln (Tannenbaumfüße) lassen sich mit Kugelstrahlen* ***entschärfen****. Notwendig ist natürlich eine ausreichende Zugänglichkeit und die Bedeckung des Nutgrunds.*

· Teile wie Verdichterrotorschaufeln mit hohen Zugeigenspannungen im Oberflächenbereich (Fußauflagen), bei gleichzeitiger dynamischer Beanspruchung und Frettingeinfluss (Bild 12.2.1.6-8).

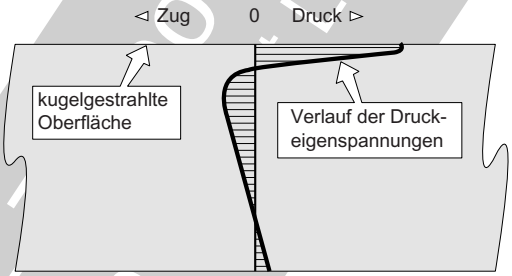
Fortsetzung auf Seite 12.2.1.6-17

©Ayers Sanden - Turbosoft
abschnittsunterlagen nur mit Lizenz

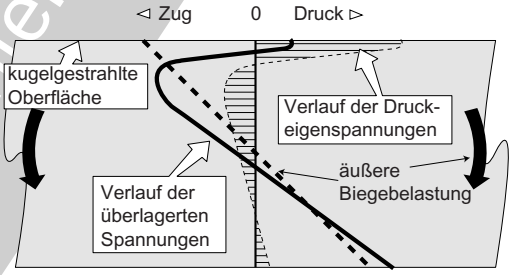
Erhöhung der Schwingfestigkeit durch Kugelstrahlen



Versuch der gezielten Rekristallisation einer Gussoberfläche zur Steigerung der Schwingfestigkeit.

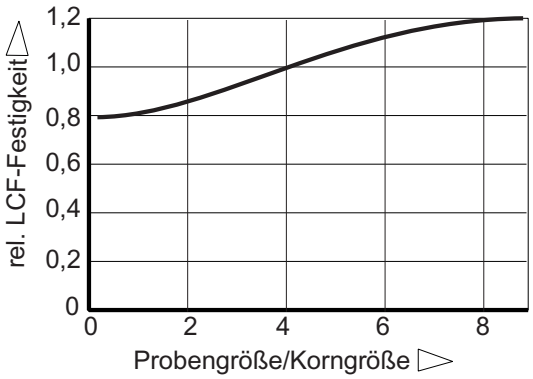


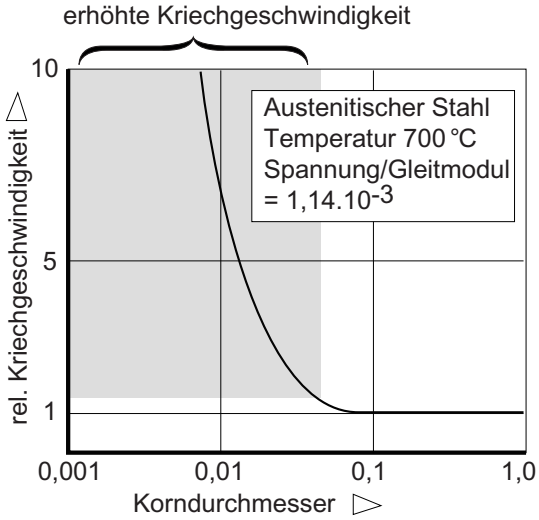
Eigenspannungsverteilung in einem einseitig kugelgestrahlten Blech ohne äußere Belastung.



Eigenspannungsverteilung in einem einseitig kugelgestrahlten Blech mit äußerer Biegebelastung.

Korngrößeneinfluss auf die dynamische Festigkeit





Flachproben unter Biegewechselbeanspruchung eines Vergütungsstahls mit 45 HRC (Lit. 12.2.1.6-5)

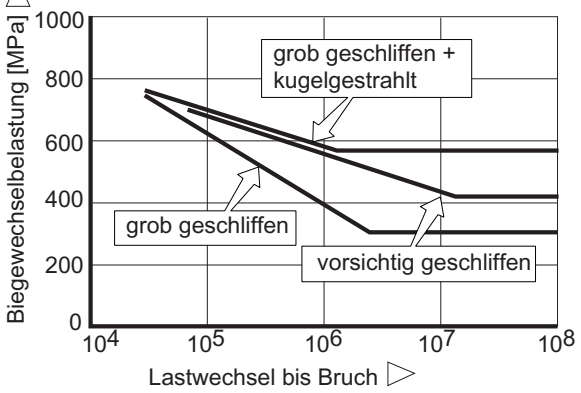


Bild 12.2.1.6-5

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Fortsetzung von Seite 12.2.1.6-15

· ***Entschärfen fertigungsbedingter Schwachstellen*** *(z.B. Kratzer, Bild 12.2.1.6-1)* ***und Zugeigenspannungen*** *(z.B. vom Schleifen, Bild 12.2.1.8-3; Diagramm unten rechts).*
Im Inneren einer gegossenen Turbinenschaufel ist die hohe Kriechfestigkeit des Grobkorns (Rahmen, Diagramm unten) erwünscht.
Im Oberflächenbereich wäre dagegen ein möglichst feines Korn mit hoher Schwingfestigkeit (Rahmen, Diagramm oben) von Vorteil. Es liegt nahe, diese Kornverteilung mit einer ***Rekristallisation der Oberfläche*** *zu erhalten (Bild oben links). Dafür lässt sich eine „kritische“ plastische Verformung der Kugelstrahlfläche in Kombination mit einer ausreichend hohen Glühtemperatur nutzen. Ein potenziell möglicher Anstieg der Schwingfestigkeit wird jedoch von werkstofftypischen Schwachstellen (Porosität, Bild 11.1-7), deutlich begrenzt (Bild 11.3-7). Voraussetzung wäre also zumindest eine erfolgreiche HIP-Behandlung und die Abarbeitung einer eventuell vorhandenen porösen Oberflächenzone. In jedem Fall müssen einer Einführung* ***Versuche und eine ausreichende Erprobung*** *vorausgehen.*

Bild 12.2.1.6-6: *Spannungsrisskorrosion (SpRK) kann ohne ausreichend hohe Zugspannungen nicht entstehen. Die vom Kugelstrahlen induzierten Druckspannungen* ***schützen deshalb vor SpRK****. Typische Fälle im Fertigungsbereich, die mit Kugelstrahlen vermeidbar sind, zeigen die oberen Skizzen (Bild 12.2.1.8-3). An Titanlegierungen tritt SpRK unter Einwirkung* ***Chlor abgebender Medien wie Handschweiß****, dünnsten* ***Reaktionsschichten mit Fettlösern*** *(„Tri“, „Per“) bei Temperaturen über 450°C auf (Bild 12.2.1.7-8 und Band 4, Bild 18.3-15). Zahnräder aus Einsatzstahl können im Brünierbad SpRK erleiden (Bild 12.2.1.8.3-11).*
Im unteren Rahmen ist der Fall eines nicht stabilisierten Cr-Ni-Stahls dargestellt, bei dem der Bereich der Wärmeeinflusszone einer Schweißnaht ***sensibilisiert*** *ist. Es handelt sich um eine Verarmung des schützenden Cr-Gehalts als Folge einer* ***Karbidbildung auf den Korngrenzen****. Damit werden die Korngrenzenbereiche für interkristalline Korrosion (IK) unter Einwirkung von Säuren empfindlich (Detail rechts).*
Erfolgt ***vor dem Schweißen ein Kugelstrahlen,*** *werden die Korngrenzen in Oberflächennähe von der Kaltverformung (Gleitungen, Zwillingsbildung) unterbrochen und* ***im Korn*** *Keime für eine Karbidbildung geschaffen. Somit stehen an der Oberfläche keine durchgehenden Korngrenzen für eine Cr-Verarmung zur Verfügung (Detail links, Lit. 12.2.1.6-5).*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.6-18

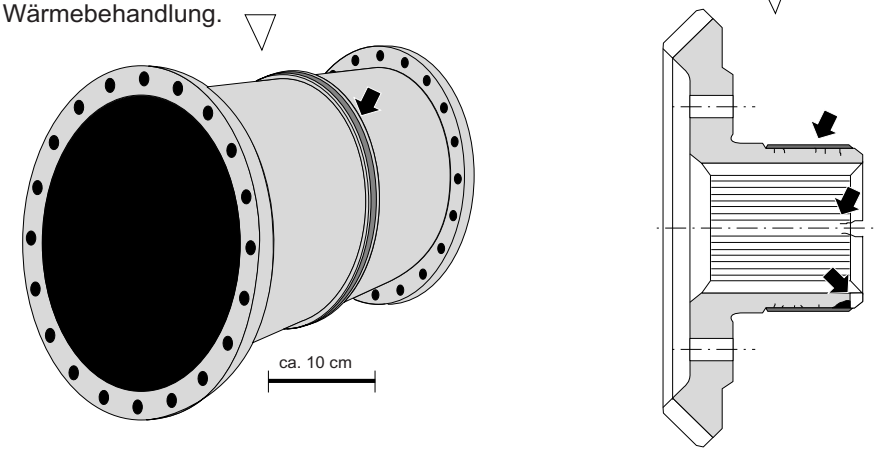
© Axel Rossmann - Tuboconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Die Gefahr einer Risskorrosion unter Einwirkung von Prozessbädern lässt sich mit Kugelstrahlen vermeiden.

Durch Kugelstrahlen vermeidbare Spannungsrisskorrosion in der Fertigung

Spannungsrisskorrosion im Bereich der Schweißung einer Welle aus einer hochfesten **Ti-Legierung:** Nach einer **Entfettung in einem Cl-haltigen Bad** ohne Inhibitor und einer folgenden Wärmebehandlung.

Spannungsrisskorrosion (Laugenrissigkeit) an **Einsatzstählen in Brünierbädern** NaOH + $NaNO_3$(Lauge!)



Auch Interkristalline Korrosion lässt sich durch Kugelstrahlen vermeiden.

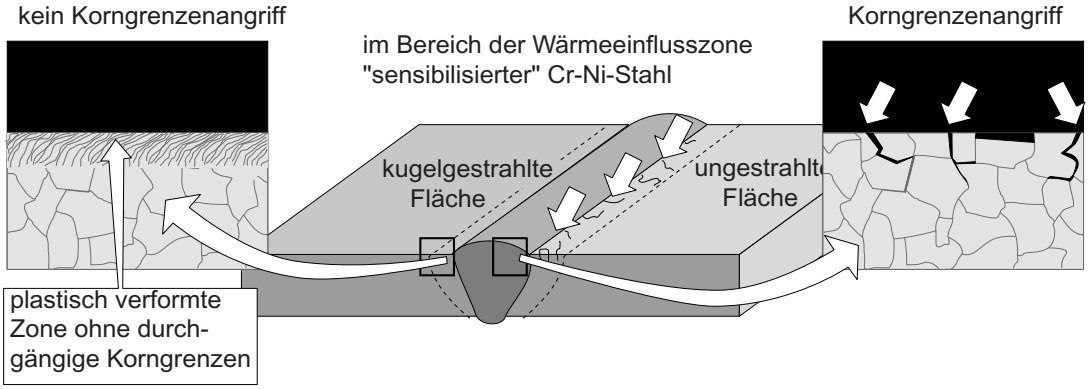


Bild 12.2.1.6-6

Inwieweit dieser Schutzeffekt auch an Schweißungen, die nachträglich kugelgestrahlt wurden, allein infolge einer Unterbrechung bereits sensibilisierter Korngrenzen auftritt, ist der vorliegenden Literatur nicht zu entnehmen.

Bild 12.2.1.6-7: *Der positive Einfluss des Kugelstrahlens auf die* ***Schwingfestigkeit*** *ist bei* ***dünnen biegebeanspruchten Querschnitten*** *deutlich ausgeprägter als an dicken oder zugbeanspruchten. Dabei wird von gleicher Randspannung ausgegengen. Die entsprechende Belastung ist natürlich querschnittsabhängig (Widerstandsmoment) sehr unterschiedlich.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Der vom Kugelstrahlen erzeugte Schwingfestigkeitsanstieg hängt von Dicke und Belastungsart des Querschnitts ab.

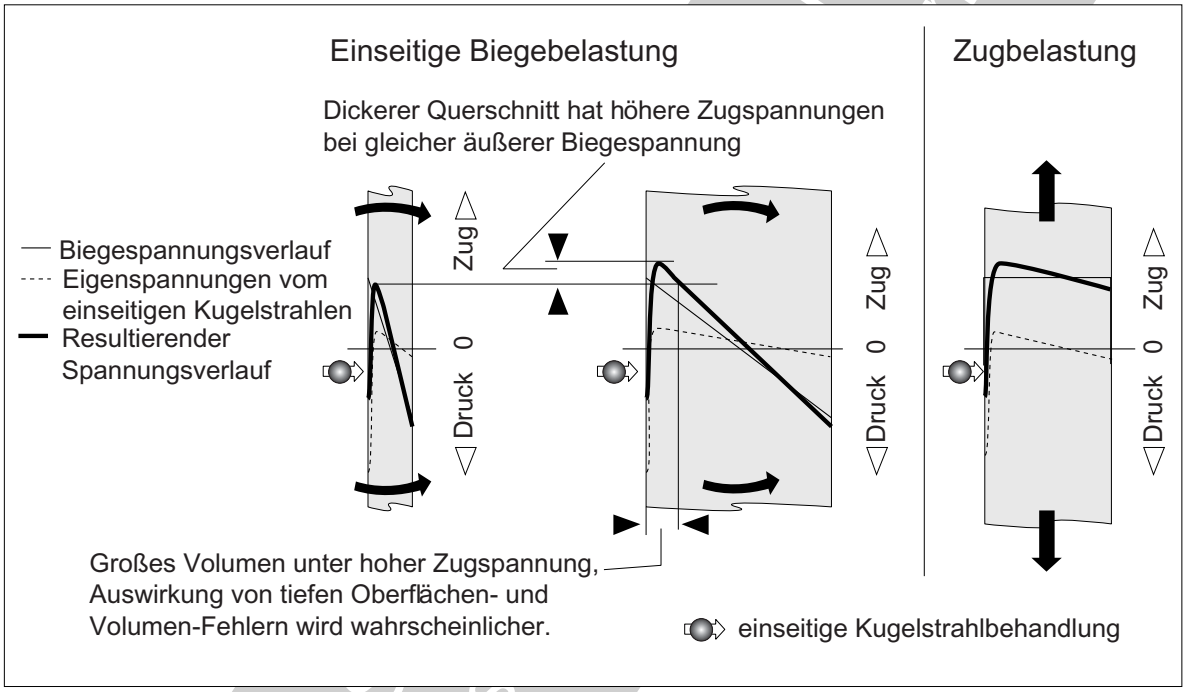


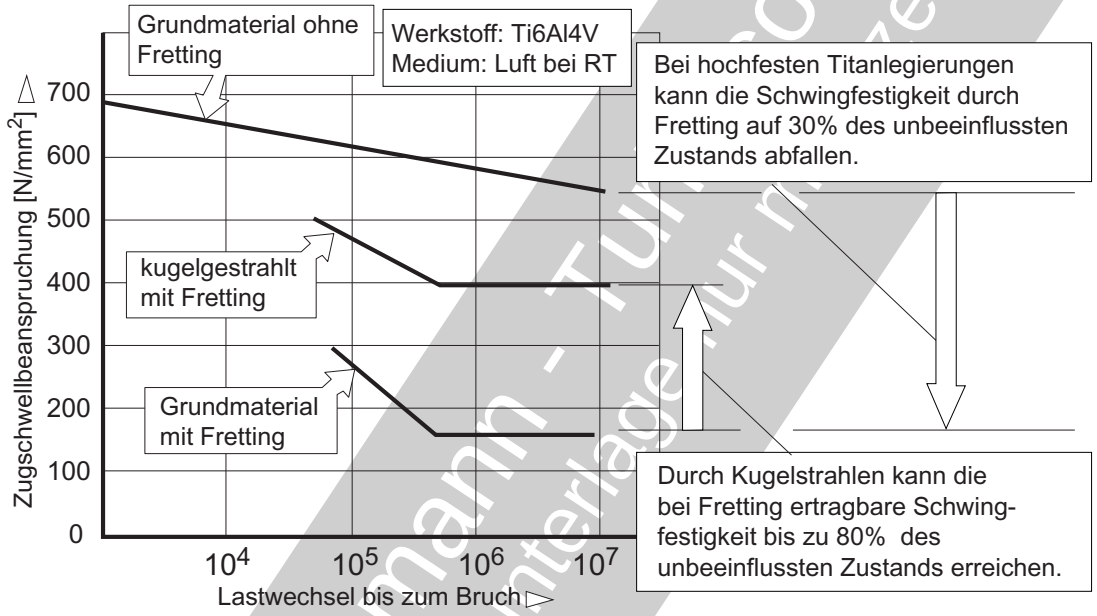
Bild 12.2.1.6-7

Je kleiner der Spannungsgradient (flacher Verlauf), umso größer ist das ***belastete Volumen*** *im Verhältnis zur Oberfläche. Damit liegen bei dicken Querschnitten unter der Oberfläche noch relativ höhere Zugspannungen vor als in dünneren. In diesem Fall besteht die Gefahr von Ermüdungsanrissen unterhalb der Oberfläche.* ***Dickwandige und/oder gleichmäßig zugbeanspruchte*** *Bauteile aus Werkstoffen mit Volumenfehlern (Guss) lassen deshalb* ***kaum eine Steigerung der Schwingfestigkeit durch Kugelstrahlen*** *erwarten.*

Diese Betrachtung schließt eine Stützwirkung niedriger belasteter inner Bereiche dünnerer Querschnitte nicht ein.

Bild 12.2.1.6-8: *Mikrorelativbewegungen führen zu* ***Schwingverschleiß (Fretting)*** *und damit auch zu einer werkstoffspezifischen Schädigung der Oberfläche, die sich in einem* ***Schwingfestigkeitsabfall*** *ausdrückt. Dieser Effekt ist bei hochfesten Titanlegierungen besonders ausgeprägt (Diagramm oben). Mit einem Schwingfestigkeitsabfall auf ca. 30 % des unbeeinflussten Grundwerkstoffs ist zu rechnen.* ***Kugelgestrahlte Kontaktflächen*** *zeigen dagegen unter Frettingbeanspruchung eine Schwingfestigkeit von ca. 80% des Grundwerkstoffs. Aus diesem Grund werden Schaufelfüße in Turbine und Verdichter, insbesondere von Verdichterschaufeln aus Titanlegierungen (Lit. 12.2.1.6-9) kugelgestrahlt. Diese* ***Strahlbehandlung muss in regelmäßigen Abständen****, abhängig von Bauteiltemperatur und Werkstoff wiederholt werden, um den Nachlas-*

Kugelstrahlen schwächt den schädigenden Einfluss des Frettings auf die Schwingfestigkeit. Wahrscheinlich spielt neben Druckspannungen und Verfestigung auch die Oberflächentopografie eine wichtige Rolle.



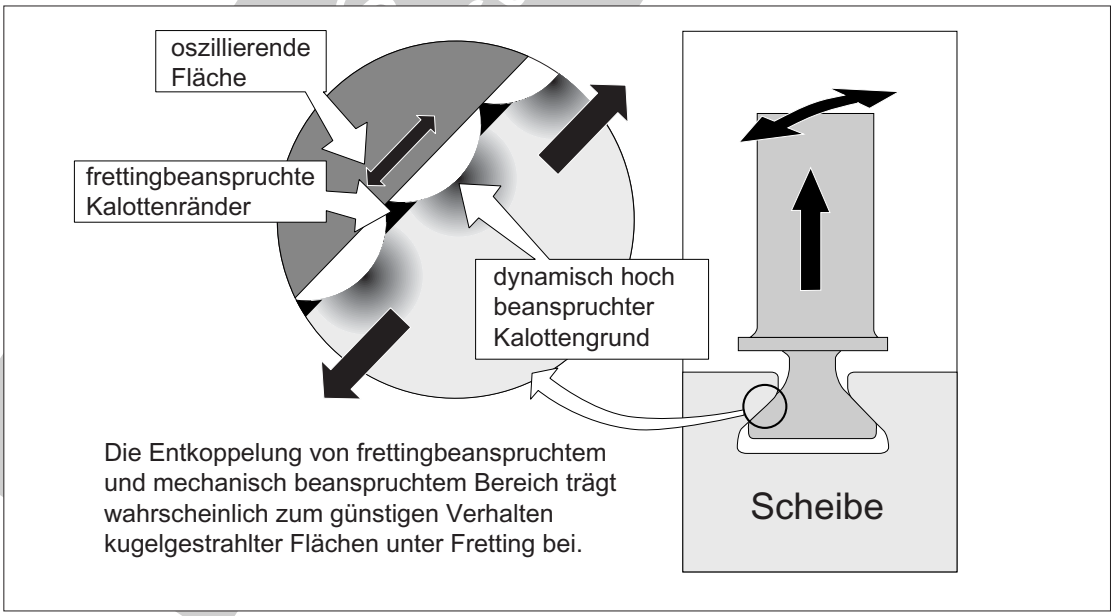


Bild 12.2.1.6-8

senden Schutzeffekt (Kriechen, Bild 12.2.1.6-9 und Verschleiß) zu regenerieren.

Die günstige Beeinflussung der Schwingfestigkeit frettingbeanspruchter Oberflächen mit Kugelstrahlen wird zum überwiegenden Teil auf die induzierten ***Druckeigenspannungen*** *und die* ***Verfestigung*** *zurückgeführt. Dabei kann der Anteil beider Einflüsse werkstoffabhängig sehr unterschiedlich sein. So lassen sich jedoch nicht alle beobachteten Effekte fretting-*

beanspruchter Kontaktflächen befriedigend erklären.

*Offenbar ist auch die **Topografie der Kontaktflächen für das Frettingverhalten von Bedeutung**. Zum einen können sich in den kalottenartigen Vertiefungen **Gleitlacke** gut halten, zum anderen auch reibungserhöhende **Abriebprodukte** (Oxide), die aus den Berührungszonen transportiert werden.*

*Ein weiterer Effekt dürfte mit der Trennung örtlicher Kontaktflächen an den Kalottenrändern vom mechanisch höher beanspruchten Kalottengrund in Zusammenhang stehen (Skizzen unten). So wirkt eine Frettingschädigung nicht an höchstbeanspruchten Mikrobereichen (Detail). Von der Elastizität der dünnen Kalottenränder ist darüber hinaus eine gleichmäßigere Verteilung und Übertragung der Reibungskräfte zu erwarten. Je nach Einfluss der Topografie ist davon auszugehen, dass es bei frettingbeanspruchten Kontaktflächen auch auf eine **Optimierung der Kugeldurchmesser und Strahlwinkel** ankommt und nicht nur auf die Almenintensität. Die Nutzung eines solchen Verhaltens dürfte jedoch Grundlagenarbeit und gegebenenfalls betriebsrelevante Versuche voraussetzen.*

***Bild 12.2.1.6-9:** Kugelstrahlen läßt sich bei allen metallischen Werkstoffen in Verdichter und Turbine anwenden. Die **Wirksamkeit des Verfahrens** ist jedoch von der **Werkstofffestigkeit** und dem **Verfestigungsverhalten** abhängig. Dies gilt für die erzielbare Verfestigung, die Größe der Druckspannungen und deren Tiefe. Sie wirken sich besonders auf eine Schwingfestigkeitserhöhung und deren Nutzung aus. Diese Eigenschaften müssen natürlich auch bei **erhöhten Betriebstemperaturen** in ausreichendem Maß erhalten bleiben. Wenn Betriebstemperaturen ein merklich spannungsabbauendes Kriechen ermöglichen, ist eine dauerhafte Verbesserung der Schwingfestigkeit mit Kugelstrahlen nicht zu erwarten. Die Grenztemperaturen für die häufigsten Werkstofffamilien zeigt das Schaubild oben. Kriechen führt zur Relaxation (Band 4, Bild 18.4-15.1) der Druckeigenspannungen und so zu einem Abbau des Strahleffektes (vergleiche hierzu den Abschnitt „Nachbehandlung“ in der Beschreibung zu Bild 12.2.1.6-3). Aus diesem Grund muss der Strahlprozess im **Rahmen einer Überholung in bauteilspezifischen regelmäßigen Abständen wiederholt** werden (**Regeneration**). Ab welchen Betriebstemperaturen mit einem solchen Kriecheffekt zu rechnen ist, zeigt das Schaubild oben (Lit. 12.2.1.6-5).*

*Besonders an Ti-Legierungen ist eine merkliche **Relaxation während mehrerer Tage bei Umgebungstemperatur** im Anschluss an die Strahlbehandlung beobachtet worden (Diagramm unten rechts). Dies erfolgte damit bereits unter den möglichen Betriebstemperaturen von ca. 450 °C.*

Bei 400 °C ist ein deutlicher Abfall der Durchbiegung bzw. der Eigenspannungen zu beobachten. Ein Ende dieser Relaxation zeigt das Diagramm für die kurze Prüfzeit noch nicht. Bereits bei Raumtemperatur wird ein Zurückgehen der Durchbiegung von Blechplättchen aus der Ti-Legierung Ti6Al4V festgestellt. Dieser Abfall stabilisierte sich jedoch nach ca. einem Tag auf hohem Niveau, sodass ausreichende Druckspannungen verbleiben.

Einen ähnlichen Effekt zeigen auch Ni-Basis-Schmiedelegierungen (Diagramm unten links). Inwieweit dieser Effekt bereits die Schwingfestigkeit beeinflusst, ist nicht klar.

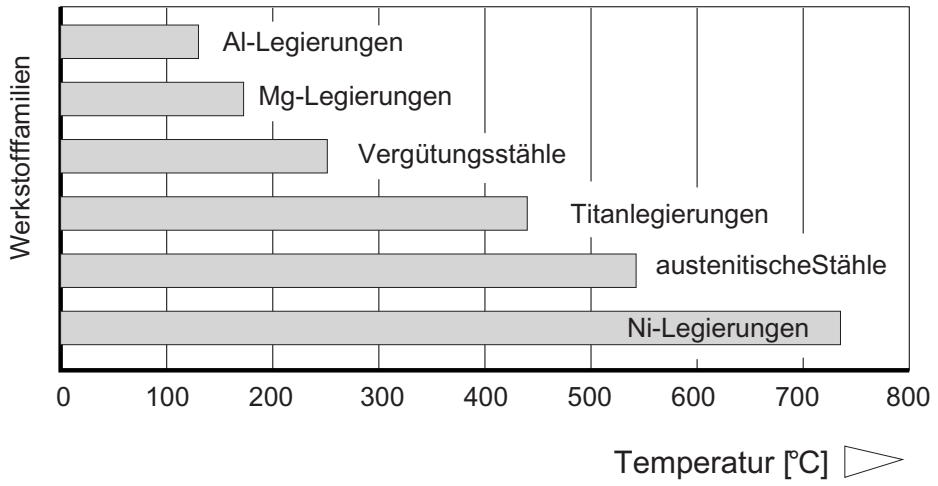
*Die maximal erzielbaren Druckeigenspannungen und entsprechende Schwingfestigkeitssteigerungen sind für **Stähle** sehr ausgeprägt von deren Festigkeit bzw. Härte abhängig. Das **Verbesserungspotenzial steigt mit der Härte des Grundwerkstoffs**. Eine geringere Zähigkeit härterer Werkstoffe macht sich hier offenbar nicht negativ bemerkbar. So lassen sich z.B. an **Stahlfedern** oder **einsatzgehärteten Bauteilen** (Zahnrädern) besonders große Verbesserungen der Schwingfestigkeit erzielen.*

© Dr. Rossmann - Turbosoft Abschulungsunterlagen nur intern

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Bei erhöhten Temperaturen führt Kriechen zu Relaxation der Eigenspannungen und schränkt die Anwendung des Kugelstrahlens ein.

Temperaturbereich der sinnvollen Anwendung von Verfestigungsverfahren wie Kugelstrahlen für verschiedene Werkstoffgruppen.



Rückgang der Durchbiegung mit Glasperlen gestrahlter Blechstreifen als Indiz für die Relaxation gestrahlter Verdichterschaufeln.

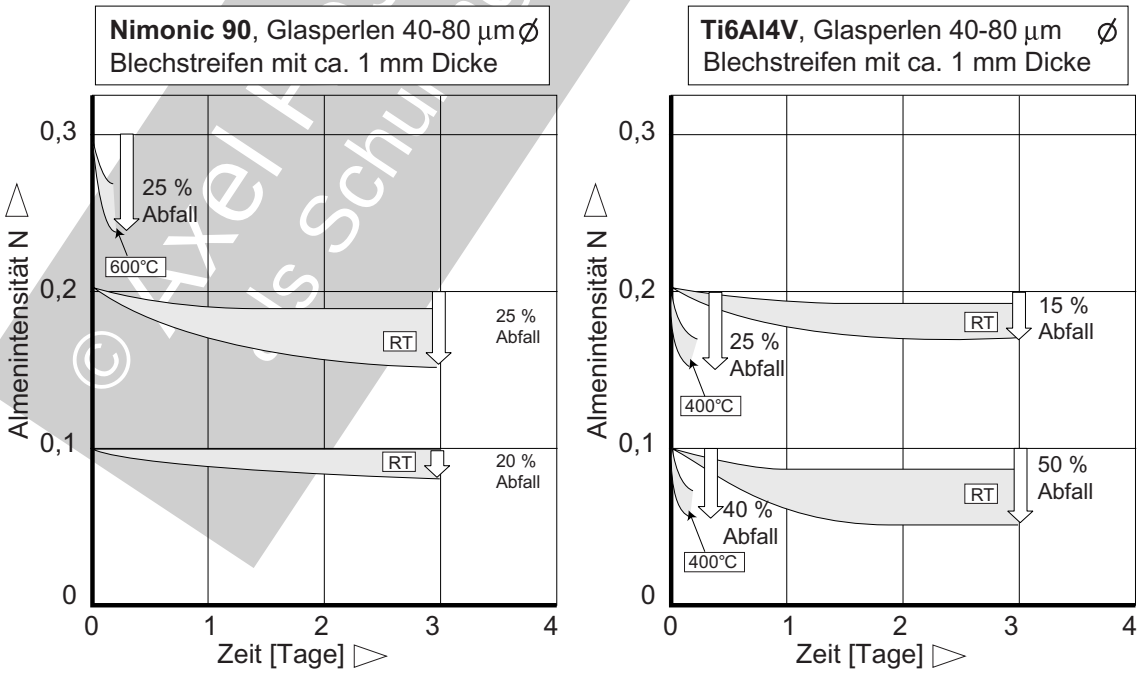


Bild 12.2.1.6-9

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Kugelstrahlen lässt sich auch als Prüfverfahren nutzen.

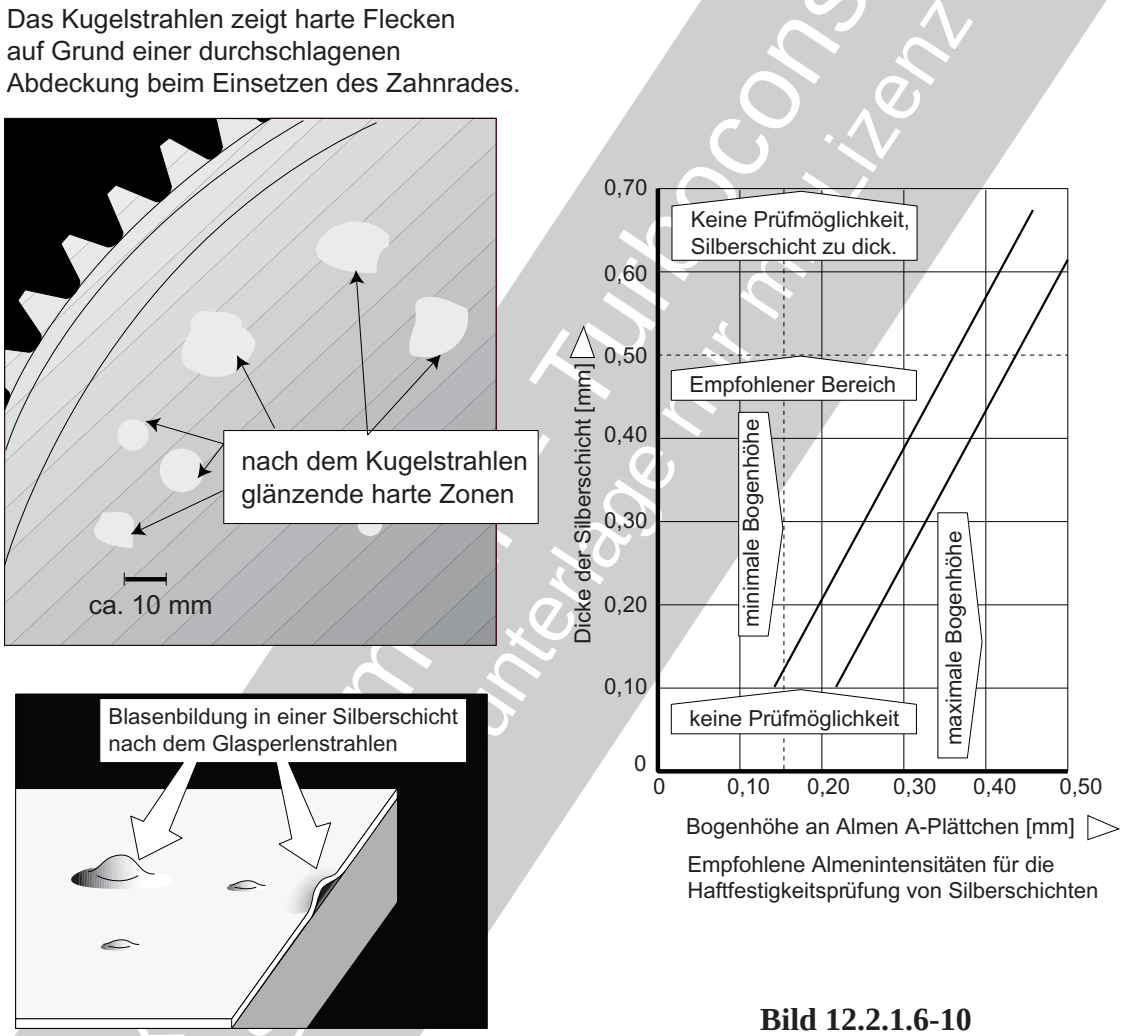


Bild 12.2.1.6-10

Bild 12.2.1.6-10: *Kugelstrahlen lässt sich auch zur* ***Qualitätsprüfung*** *nutzen. Diese Möglichkeit besteht als Nebeneffekt einer ohnedies vorgesehenen Kugelstrahlbehandlung. Hierzu gehört die zerstörungsfreie Prüfung von Bauteilen auf* ***örtliche Härteunterschiede****. Das Bild oben links zeigt ein Zahnrad mit einer Einsatzhärtung der Verzahnung, nicht aber der Radmembrane. Im dargestellten Fall schlug die Schicht örtlich durch die Abdeckung und es kam zu* ***Aufhärtungen****. Diese zeichneten sich nach der aus Festigkeitsgründen und zum Schutz vor Brünierrissen (Bild 12.2.1.6-6) vorgesehenen Kugelstrahlbehandlung, deutlich als* ***hell glänzende Flecken*** *ab (Bild oben).*

Die ***Haftfestigkeit*** *relativ weicher und zäher* ***Silberschichten*** *lässt sich mit* ***Glasperlenstrahlen*** *(Diagramm) prüfen. Induzierte Druckspannungen führen in* ***Zonen schlechter Haftung zu einem blasenartigen Abheben*** *(Bild unten). Dieses Verfahren ist deshalb besonders interessant, weil es kaum ein seriengeeignetes Verfahren gibt, derartige „Klebestellen“ sicher nachzuweisen.*

Bild 12.2.1.6-11.1 und Bild 12.2.1.6-11.2: *Das Kugelstrahlen ist ein Verfahren zur* ***Schadensverhütung und Fehlerbeseitigung****. Bei unsachgemäßer Anwendung und schlechter Durchführung gibt es aber eine größere Zahl typischer* ***Fehler und Schäden*** *an Bauteilen als Folge des Kugelstrahlens.*

· ***Zu niedrige Intensität:*** *Typische Ursachen sind falsche Strahldaten, fehlerhaft arbeitende Anlagen und Strahlmittel die sich während der Strahlzeit verändern.*

Eine ***ungünstige Plättchenposition*** *kann bei der versuchstechnischen Ermittlung der optimalen Strahldaten für* ***Abweichungen der Strahlintensität gegenüber dem Bauteil*** *verantwortlich sein. Weiter besteht die Gefahr, dass Intensitätsabweichungen im Serienprozess nicht (rechtzeitig) erkannt werden und betroffene Teile verbaut werden.*

Zu scharfkantiges Strahlmittel: *Die Ursache für scharfkantiges Strahlmittel kann bereits beim Lieferanten liegen. Hierzu gehören spitze Gusskugeln oder zum Bruch neigende Hohlkugeln aus Stahlguss. Beim Strahlvorgang kann Bruch scharfe Strahlgutkanten entstehen lassen die Kerben erzeugen, von denen im Betrieb Schwingrisse ausgehen.*

· ***Strahlbehandlung ungeeigneter Werkstoffe oder Werkstoffzustände.*** *Hierzu gehört das Strahlen spröder Schichten die zum Ausbrechen neigen. Werden* ***Einkristalle*** *kugelgestrahlt oder sehr intensiv abrasiv gestrahlt, kann die plastische Verformung bei ausreichend hohen Glühtemperaturen eine Rekristallisation auslösen (Bild 12.2.1.6-5).*

· ***Bauteil überstrahlt.*** *Es entstehen rissartige Überlappungen, sog.* ***„Peened Surface Extrusion Folds“*** *(=****PSEF****, Bild 12.2.1.6-14 und Bild 12.2.1.6-15), mögliche Ursache für einen merklichen Schwingfestigkeitsabfall.*

· ***Grate an Ecken und Kanten*** *des Bauteils durch ungünstige Strahlbedingungen an scharfen Kanten (Band 4, Bild 18.2-6). Hierzu gehört eine Besonderheit die mit* ***„Elephant Tail“*** *bildhaft gekennzeichnet ist. Besonders häufig tritt die Gratbildung an Teilen auf, die an winkelig zulaufenden Flächen gestrahlt werden müssen. Erfahrungsgemäß treten solche, besonders gefährliche Schäden an Kanten des Kranzbereichs am Übergang der Schaufelaufnahmenuten von Rotorscheiben auf (mittlerer Rahmen).*

· *Überlappungen und Risse durch* ***„Schrägstrahlen“*** *(Bild 12.2.1.6-14 und Bild 12.2.1.4-15).*

· *Eine* ***ungünstige Oberflächenstruktur des Bauteils vor dem Strahlen*** *kann Ursache für Überlappungen (Umbiegen großer Rauigkeitsspitzen) und ungestrahlte Kerbbereiche zwischen Rauigkeitspitzen sein.*

· ***Ungleichmäßiges Strahlbild*** *durch schlechte Abstimmung von Bauteil und Strahldüsenbewegung (Bild 12.2.1.6-4),*

· ***Ungenügender Bedeckungsgrad*** *(Bild 12.2.1.6-4) bietet keinen ausreichenden Schutz gegen Spannungsrisskorrosion (Band 1, Bild 5.6.3.1.1-2, Band 4, Bild 18.4-12),*

· ***Verzug*** *von Bauteilen, insbesondere* ***Schaufelprofilen*** *und* ***dünnwandigen Gehäusen*** *beim Strahlvorgang oder durch Relaxation nach dem Strahlen. Deformation filigraner Bauteilzonen wie Kanten von Verdichterschaufeln („****Rollover****“, Skizze oben rechts, Bild 12.2.1.6-20)*

· ***Büchsendeckeleffekt****: „Schnappen“ flächiger Teile, z. B. dünnwandiger Verdichterscheiben,Band 4, Bild 18.4-12),*

· ***Zugspannungserhöhung in Querschnitten unterhalb der Strahlzone*** *(Bild 12.2.1.6-7) kann sich besonders ungünstig bei reiner dynamischer Zugbeanspruchung auswirken (kleiner Spannungsgradient). Es erhöht sich die Gefahr der Entstehung von* ***Ermüdungsanrissen unter der Oberfläche****.*

· ***Fremdmaterial durch Abrieb*** *(z. B. Blei)* ***im Strahlgut*** *kann auf Strahloberflächen gelangen und dort bei nachfolgenden Fertigungsprozessen (Band 4) oder im Betrieb zu Rissbildung (LME) führen (Band 4, Band 1 Bild 5.3-6, Bild 5.3-7 und Bild 5.3-8).*

© Prof. Rossmann - Turbosoft Ausbildungsunterlagen Turbinenrotoren

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

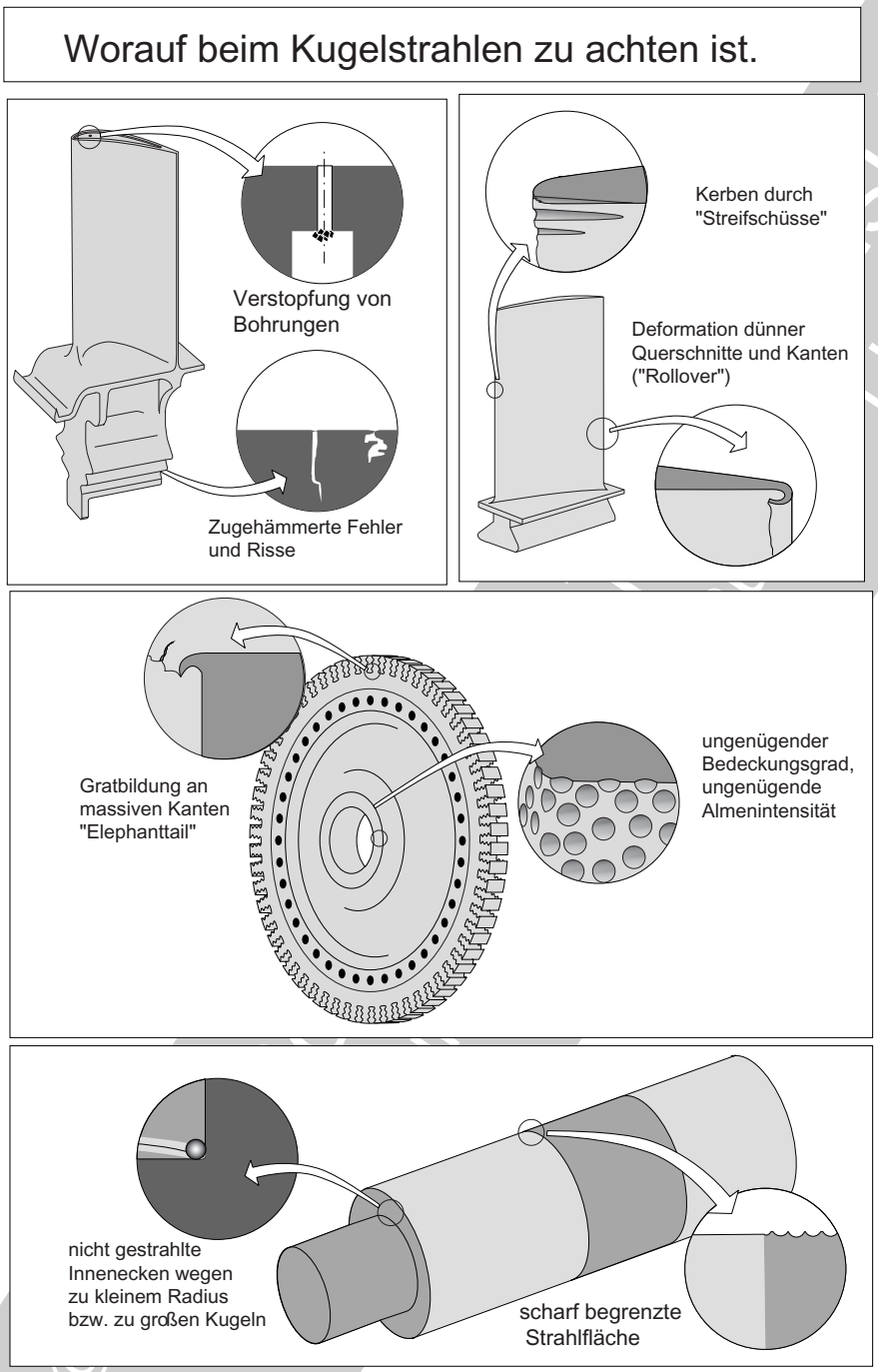


Bild 12.2.1.6-11.1

*Aufgeschmiertes Fremdmaterial kann auch infolge Elementbildung direkt oder über anlegierte Gefügebestandteile Korrosion auslösen. Ein Beispiel ist Fe-**Abrieb des Strahlgutes auf Cr-Ni-Stählen**.*

*Ein weiteres Beispiel sind **Titanlegierungen**, die im Bereich von Schweißnähten **mit Fe-Abrieb korrosionsempfindliche Legierungen** bilden (Bild 12.2.1.3.1-19). Solche Gefügeveränderungen können auch **Warmrisse** begünstigen.*

*· Verschmutzungen durch **Öl oder Kondenswasser im fördernden Luftstrahl**. Das Wasser kann während einer Zwischenlagerung bis zum nächsten Prozessschritt Korrosion auslösen. Verbliebene Ölrückstände können nachfolgende Prozesse (z. B. Beschichtungen) behindern.*

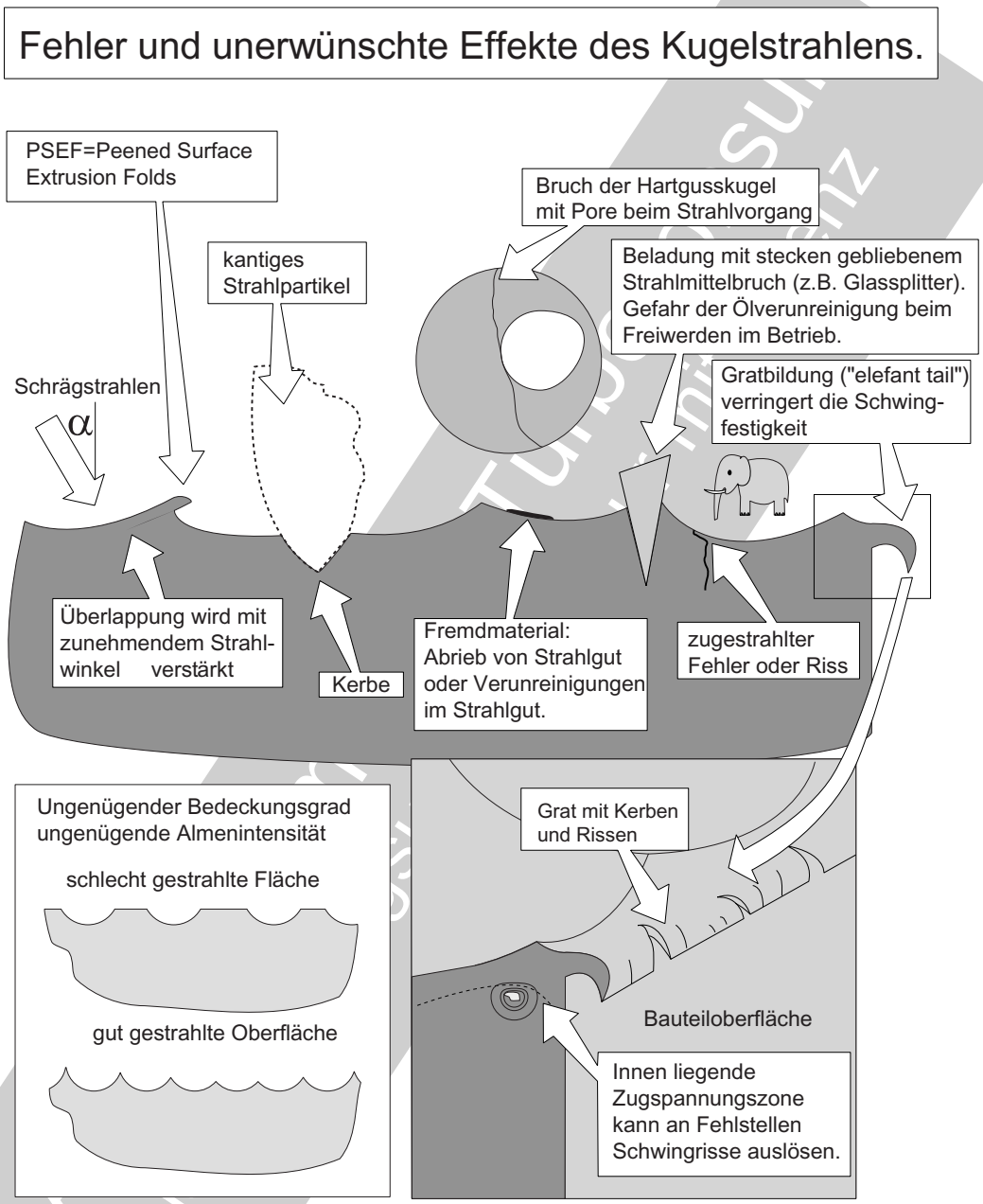


Bild 12.2.1.6-11.2

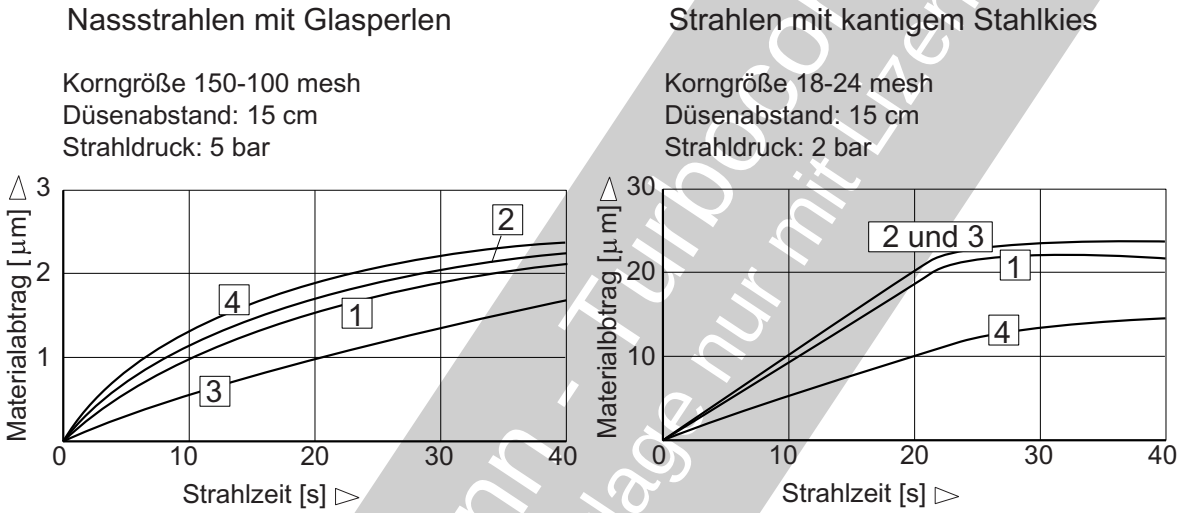
· ***Unzulässige große Rauigkeiten*** *an umströmten Flächen, z. B. bei gebrochenem Strahlgut.*
· ***Beschädigung von Gewinden*** *und ähnlichen profilierten bzw. filigranen Bauteilbereichen als Folge* ***ungeeigneter Abdeckvorrichtungen****.*
· ***Strahlmittelrückstände*** *aus Bruchkugeln (aus dem Beladungseffekt, Bild 12.2.1.6-17) als Ursache von* ***Schäden im Ölkreislauf*** *(z. B. Lager, Ventile).*
· ***Zustrahlen von Rissen und Fehlern*** *(Skizze oben). Bei anschließender* ***Eindringprüfung sind solche Fehlstellen schlecht auffindbar****.*
· ***Staubexplosion in Strahlkabinen*** *(ohne Nassabsaugung)* ***durch Metallabrieb*** *(Mg, Ti),*
· *Unzulässig großer* ***Abtrag an Passflächen*** *(Bild 12.2.1.6-12).*

Ein Problem im Zusammenhang mit allen Strahlverfahren ist die ***Verstopfung bzw. der***

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Auch Verfestigungsstrahlverfahren können messbar abtragen.

Materialabtrag bei verschiedenen Strahlverfahren:



Werkstoffe: "1" (A 286) hochlegierter aushärtbarer Stahl
"2" 13% Cr-Stahl weichgeglüht
"3" Vergütungsstahl normalgeglüht
"4" CrNi18 9 Stahl

Bild 12.2.1.6-12

Verbleib von Strahlgut in Hohlräumen*. Dies kann bei Heißteilen zur* ***Überhitzung*** *führen (siehe auch Bild 12.2.1.6-18).* ***Reaktives Strahlgut*** *kann bei hohen Temperaturen den Grundwerkstoff oder Beschichtungen schädigen oder* ***Hochtemperaturkorrosion*** *begünstigen. Gelangt Strahlgut in den Öl- oder Kraftstoffkreislauf besteht die Gefahr umfangreicher Betriebsschäden.*

Bild 12.2.1.6-12: *Auch* ***Verfestigungsstrahlen****, insbesondere mit kantigem* ***Stahlkies*** *(Diagramm rechts), bewirkt einen merklichen* ***Materialabtrag****. Der Abtrag beim Glasperlenstrahlen liegt dagegen im µ-Bereich und dürfte selbst bei engen Toleranzen akzeptabel sein. Es ist denkbar, dass eine deutlich* ***erhöhte Rauigkeit*** *der Strahlfläche zu einem* ***scheinbaren Wachstum*** *führt. Ein gewisses Setzen ist dann unter Kontaktkräften von Montage oder Betrieb nicht auszuschließen.*

© Axel Possmann - Turbocons
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Schrägstrahlen kann den gewünschten Strahleffekt deutlich abschwächen, es kann sogar schädigen.

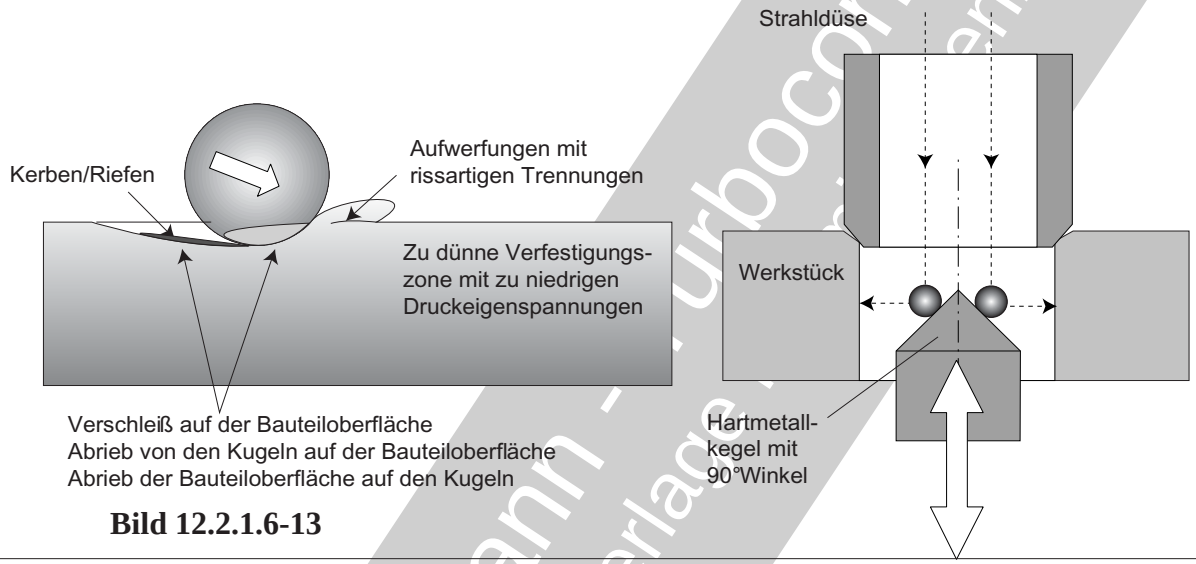


Bild 12.2.1.6-13

Bild 12.2.1.6-13: *Für eine* ***maximale Strahlintensität ist der 90 º Strahlwinkel****, d. h. senkrechtes Auftreffen der Strahlpartikel optimal. So wirkt der größte Impuls. Diese Bedingung ist jedoch nicht immer erreichbar. Besonders wenn die geometrischen Bauteilgegebenheiten eine entsprechende Düsenstellung verhindern.* ***Je schräger das Strahlmittel auftrifft, umso größer ist ein beim Kugelstrahlen unerwünschter Abtrag****. Zusätzlich muss mit* ***Überlappungen im Mikrobereich*** *gerechnet werden (Skizze links). Diese können sich rissartig auswirken und die Bauteilsicherheit gefährden (siehe auch Bild 12.2.1.6-14 und Bild 12.2.1.6-15).*

Die Intensität nimmt mit dem Sinus des Einfallwinkels ab*. Ein nahezu senkrechtes Auftreffen des Strahlmittels läßt sich an schlecht zugänglichen Bauteilflächen in vielen Fällen dadurch erreichen, dass man* ***Prallkörper aus Hartmetall*** *geeignet anordnet (Lit. 12.2.3.6-1). Die Strahlpartikel werden von einer schräg zur Düsenachse verlaufenden Prallfläche auf die Strahlfläche gelenkt (Skizze rechts). Ein typisches Beispiel hierfür ist die Verwendung eines kegeligen Stifts aus Wolframkarbid (WC) um Bohrungswände zu strahlen. Wird die Ablenkfläche gleich in die Strahldüse integriert, erhält man eine* ***Winkeldüse*** *mit ähnlicher Wirkung.*

© Aachmann - Turbocons
Lehrstuhlunterlage

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Auch für das Kugelstrahlen gilt: "Zuviel des Guten kann schädlich sein."

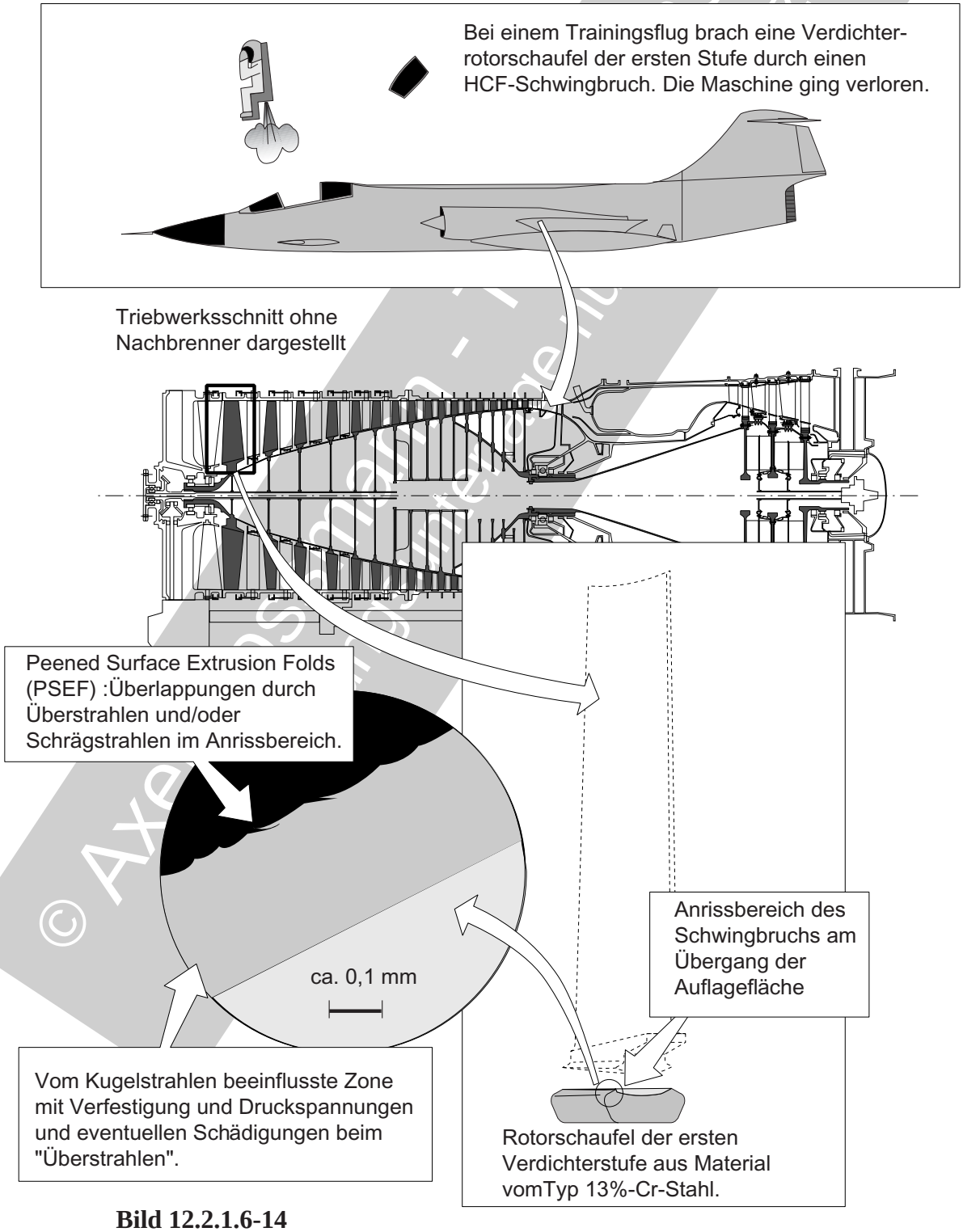


Bild 12.2.1.6-14

Bild 12.2.1.6-14: *Dieses Beispiel zeigt den Fall des* ***Bruchs einer vorderen Verdichterrotorschaufel****, was zum Absturz führte. Der den Bruch auslösende* ***Schwingriss in der Auflagefläche des Schaufelfußes*** *(Skizze unten rechts) wurde offenbar von einer* ***unzureichenden Kugelstrahlbehandlung*** *begünstigt. Ein metallografischer Schliff (Detail) ließ Anzeichen für „****Peened Surface Extrusion Folds****“ (=* ***PSEF****, Lit. 12.2.1.6-6) erkennen. Derartige Fehlstellen sind ein Merkmal ungünstiger Strahlbedingungen und können die Schwingfestigkeit beeinträchtigen (Bild 12.2.1.6-15).*

Bild 12.2.1.6-15 *(Lit. 12.2.1.6-6): Wenige Minuten nach dem Start kam es zu dem dargestellten Triebwerksschaden mit* ***austretenden Bruchstücken*** *(Skizze oben).*
Die nachträgliche Untersuchung des betroffenen Triebwerks zeigte, dass, neben umfangreichen Durchschlagsschäden an den Turbinengehäusen, die Niederdruckwelle gebrochen war und die Gehäuse sich axial um Zentimeter getrennt hatten. Die erste Stufe des ***Hochdruckturbinenrotors*** *(HPT1, mittlere Skizze) zeigte einen Haircut. Ein großes Kranzsegment der Scheibe das ca. 14 Schaufelnuten enthielt, fehlte (Skizze unten links). Die temperaturbedingten Verfärbungen zeigten, dass es sich offenbar nicht um einen Folgeschaden handelte. Zwei weitere Schaufelnuten am verbliebenen Kranz wiesen im Grund radiale Risse auf. Einer war bereits ca. 25 mm bis zwischen die Verstärkungen um die Bohrungen fortgeschritten. Die Oxidation der Bruchfläche zeigte, dass der zum Bruch führende Anriss ebenfalls an der Kante einer Scheibennut lag.*
Die Oberfläche im Bruchausgang wies das typische Kugelstrahlaussehen auf. Um die gesamte Kante herum waren ***flache überlappungsartige ca. 25 µm tiefe Fehlstellen*** *zu erkennen (siehe auch Bild 12.2.1.6-14). Diese sind in Fachkreisen als* ***„Peened Surface Extrusion Folds“*** *(= PSEF) bekannt. Solche Fehlstellen weisen auf eine* ***sehr hohe Strahlintensität und zu flachen Strahlwinkel*** *hin. Die Erfahrung zeigt, dass die* ***höchsten Schwingfestigkeiten an den meisten Werkstoffen mit moderaten Strahlintensitäten erzielt werden, die keine Überlappungen entstehen lassen****. Von den PSEF ging ein, für den Scheibenwerkstoff (Ni-Basis Schmiedelegierung IN 718) typischer interkristalliner LCF-Riss aus, der von Zonen mit Gewaltbruchmerkmalen unterbrochen war. PSEFs wurden auch im Ausgangsbereich der anderen Risse gefunden. Der unerwartet gravierende Einfluss der PSE kann auch im Zusammenhang mit einem flachen* ***Gradienten*** *der Tangentialspannung gesehen werden (Band 4, Bild 18.4-9.3. Eine hohe Strahlintensität, d.h. eine ausgeprägte Druckspannungszone um die* ***Kante****, dürfte entsprechende Zugeigenspannungen unter der Oberfläche induzieren. Diese überlagern sich den Zugspannungen aus den Betriebslasten. Steigt so die Mittelspannung deutlich an, ist mit einer Abnahme der LCF-Festigkeit zu rechnen. Frühere Scheibenschäden, die auf andere Ur-*

© Axel Rossmann - Turbocon sult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Es gibt Hinweise, dass auch Kugelstrahlen gefährlich schädigen kann: "Peened Surface Extrusion Folds".

Etwa 6 Minuten nach dem Start hörte die Besatzung während des Steigflugs einen lauten Knall auf der linken Flugzeugseite. Nach der Überprüfung der Anzeigen der Cockpitinstrumente wurde das linke Triebwerk abgestellt. Die Besatzung stellte bereits im Flug schwere Schäden an Zelle und Flügel fest. Das Flugzeug kehrte um und landete, von Rettungskräften und Feuerlöschmannschaft erwartet.

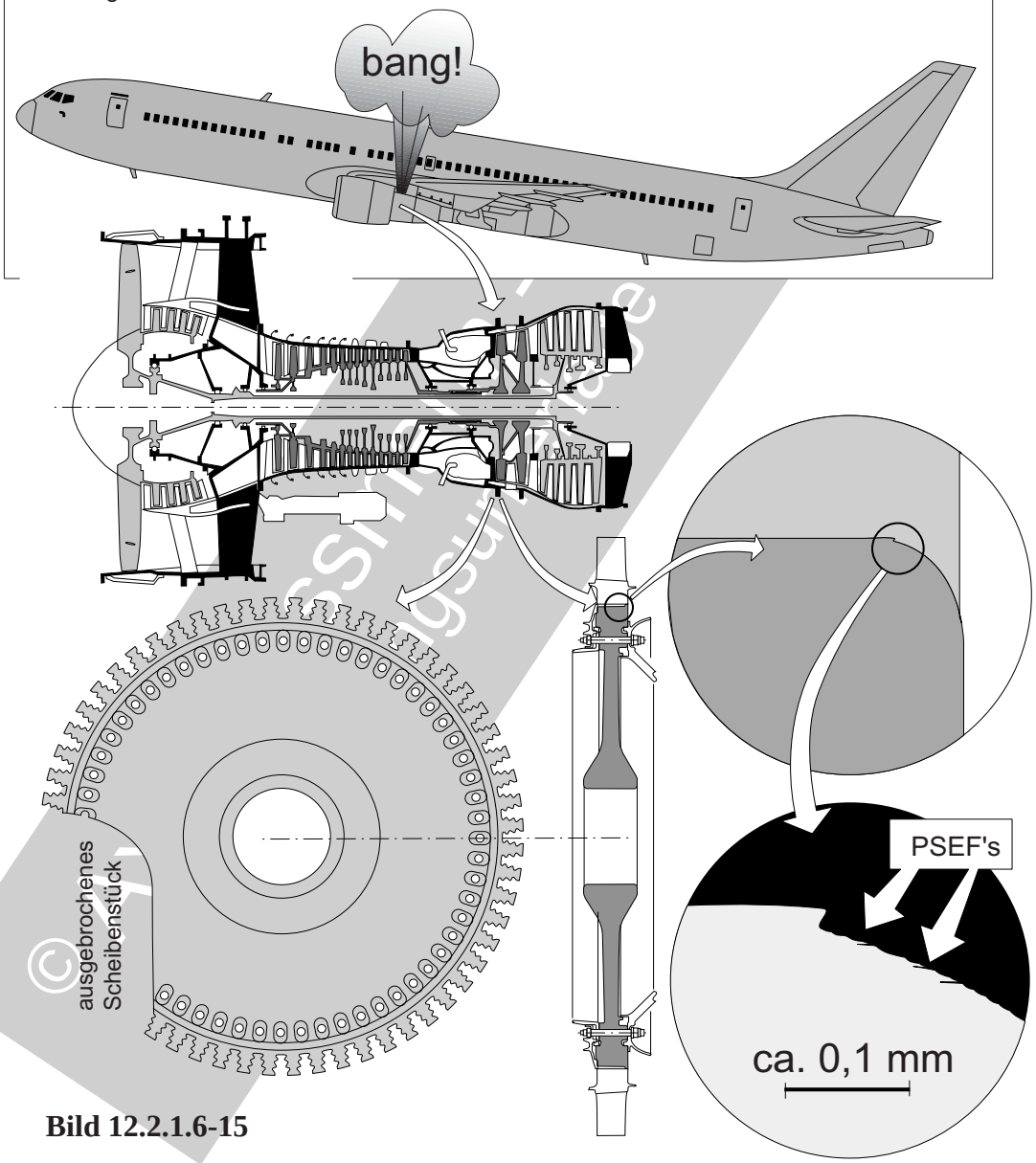


Bild 12.2.1.6-15

sachen zurückgeführt wurden zeigen, dass die Scheibenzone im Anrissbereich besonders hohen Betriebsbelastungen unterliegt. Damit wäre auch die katastrophale Auswirkung der relativ kleinen Fehlstellen erklärlich.

Abhilfen gegen Probleme und Schäden beim Kugelstrahlen

Die Gewährleistung einer **reproduzierbaren spezifikationsgerechten Kugelstrahlbehandlung** erfordert die sichere Einhaltung der optimierten Prozessparameter (Prozessstabilität) sowie die Anwendung vorgeschriebener Vorrichtungen und Hilfsmittel (z.B. Abdeckungen). Dies ist umso wichtiger, als das Ergebnis eines Kugelstrahlverfahrens am Bauteil kaum mehr befriedigend sicher zerstörungsfrei überprüfbar ist. Das gilt zumindest für alle, die **LCF lebensdauerbeeinflussenden Oberflächen und hoch HCF beanspruchte Zonen**. Die Strahlqualität muss also mit Hilfe einer Überwachung und Dokumentation des Strahlvorgangs nachprüfbar gewährleistet werden. Diese Forderungen werden deutlich schärfer, sollte die **Schwingfestigkeit in die Auslegung** der Bauteile eingehen und nicht nur der zusätzlichen Absicherung dienen. Voraussetzung für eine optimal wirksame Strahlbehandlung ist eine **geeignete konstruktive Gestaltung** der Bauteile.

Nachfolgend sind einige Grundregeln, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, angegeben.

Konstruktion:

· Kugelstrahlen als **absicherndes Verfahren** einsetzen, möglichst nicht in die Festigkeitsauslegung aufnehmen.
· **Optimale Strahlintensität** wählen (Bild 12.2.1.6-16). Im Zweifelsfall mit **bauteilrelevanten Versuchen** ermitteln. Eine **moderate Strahlintensität** gewährleistet bei den meisten Werkstoffen erfahrungsgemäß die **höchste Schwingfestigkeitssteigerung**.
· Vorsicht beim **Strahlen von Kanten**. **PSEF** (Bild 12.2.1.6-14 und Bild 12.2.1.6-15) und **Elefant Tails** (Bild 12.2.1.6-11) sind unbedingt zu vermeiden. Sie entstehen beim **Überstrahlen** und zu **flachen Strahlwinkeln**.
. **Zugänglichkeit** zu **schrägen Flächen** (Schaufelnuten in Scheiben), Bohrungen (Bild 12.2.1.6--13), engen Radien gewährleisten. Gegebenenfalls den Strahlkorndurchmesser geeignet wählen.
· Die Arbeitsfolgen so wählen, dass die gestrahlten Flächen nicht **auf zu hohe Temperaturen erwärmt** werden. Das kann z.B. beim Schweißen, einer Wärmebehandlung oder einer Beschichtung (Bild 12.2.1.6-9) auftreten.
· Keine beschichteten Flächen strahlen, die von Effekten wie **Ausplatzen oder geringstem Abtrag** geschädigt werden können.
· Falls im Betrieb/Überholung eine Regeneration mit **erneutem Kugelstrahlen** notwendig ist, muss diese gewährleistet sein.

Strahlverfahren:

· Prüfung des Strahlmittels **beim Eingang** und ständige **Kontrolle beim Strahlprozess** (z.B. Rundheit, Bruchanteil).
· Kontinuierliches **Aussortieren von Strahlgutbruch**.
· Prüfung des Strahlmittels auf Verunreinigungen mit einem Korrosionstest an einem gestrahlten Testblech.
· Optimierung und Erprobung des Strahlprozesses.
· Überwachung des Strahlvorganges während des Strahlprozesses. **Anbringung des Almenplättchens** an aussagekräftiger, bauteilrelevanter Position.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

· **Kontrolle der gestrahlten Fläche** durch mikroskopische Untersuchung (REM) von Kunststoffabdrücken.
· Serienrelevante Erprobung der Strahlvorrichtungen und Abdeckungen.
· **Nachweis des Kugelstrahleffektes** in betriebsnahen **Bauteilversuchen** und im **Maschinenbetrieb**. Hierbei sind besonders die **Bauteiltemperaturen** im Hinblick auf einen möglichen **Abbau des Strahleffekts** durch Relaxation zu berücksichtigen,
· **Glättung gestrahlter Flächen** auch durch „**geeignete**“ **abrasive Verfahren** nach Möglichkeit **vermeiden**.
· **Keine scharfe Begrenzung der Strahlfläche** sondern gleichmäßiger Übergang (Bild 12.2.1.6-11).
· **Keine scharfen Kanten strahlen**. Kanten gut anfasen oder abrunden. Überprüfung der gestrahlten Werkstücke auf PSEF und Elephant Tails.
· **Abdecken empfindlicher Bereiche** und **verstopfungsgefährdeter Hohlräume** mit geeigneten Abdeckvorrichtungen oder Abdeckmaterial. Verunreinigung des Strahlgutes mit Abrieb der Abdeckungen vermeiden. **Ungeeignet ist z. B. Bleiband**, da Bleirückstände auf Heißteilen katastrophale Schädigungen erzeugen können (Band 4, Bild 18.3-10.2).
· **Optimaler Oberflächenzustand** vor dem Strahlen (z.B. keine Korrosion oder tiefe Bearbeitungsriefen).
· **Nicht verschiedene Werkstofftypen** (z.B. Ni-Legierungen und Stähle) in der gleichen Maschine mit der gleichen Strahlgutfüllung bearbeiten. Es besteht die Gefahr der Materialübertragung (Korrosion).
· **Kugelstrahlen als letzten Verfahrensschritt** bei der Fertigung anstreben.
· Nach dem Strahlen **Teile trocknen**, **nicht unkonserviert** lagern.
· Vorsicht bei der Möglichkeit, dass **brennbare bzw. explosive Stäube** (Band 1 Kapitel 5.11.1) entstehen. (Al, Mg, Ti). Diese Gefahr besteht eher beim abrasiven Strahlen. Gegebenenfalls Nassstrahlen.

Bild 12.2.1.6-16 *(Lit. 12.2.1.6-1):* ***Kugelstrahlen als kontrolliertes Bearbeitungsverfahren*** *erfordert* ***Angaben*** *(Zeichnung, Spezifikationen, Arbeitsplan) zur* ***Almenintensität****.*
Dies ist eine Voraussetzung um ein gewünschtes Betriebsverhalten des Bauteils zu gewährleisten.
Eine Strahlbehandlung sollte zumindest durch folgende Angaben festgeschrieben sein:
· *Eindeutige Bezeichnung der zu strahlenden Flächen,*
· *Almenintensität,*
· *Strahlmittel,*
· *Kugelgröße,*
· *Bedeckung in %.*
· *gegebenenfalls Vorrichtungen und Abdeckungen*
Es ist zu prüfen, inwieweit diese Angaben bei sicherheitsrelevanten Teilen vom OEM und/

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Üblicherweise angewandte Almenintensitäten

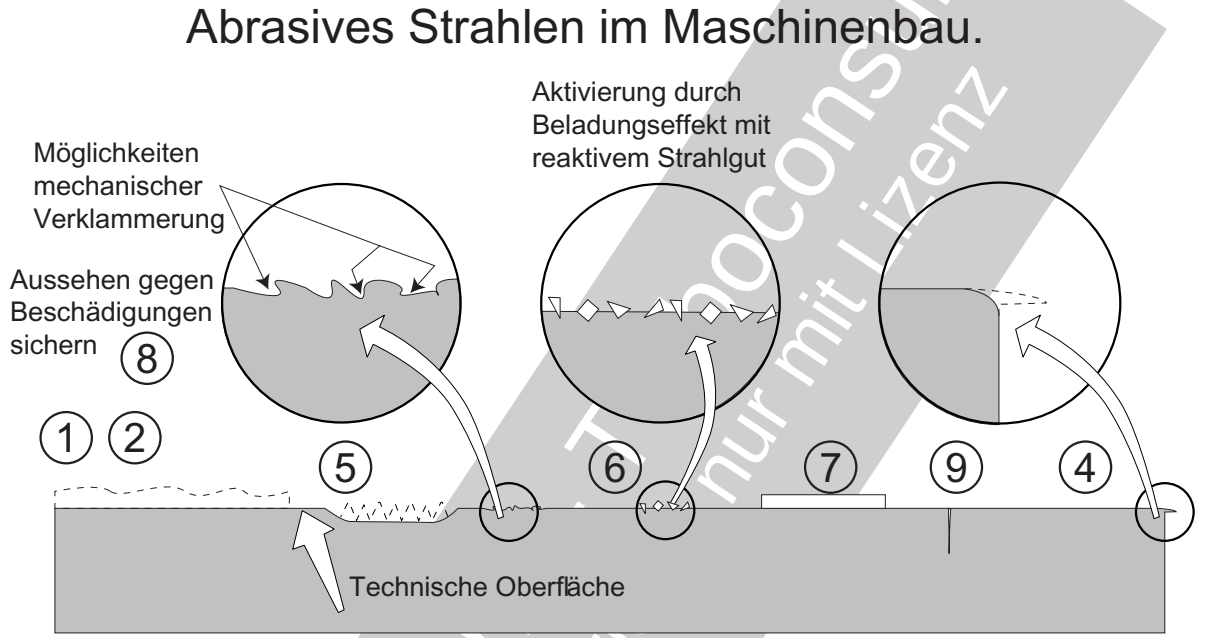
Werkstoff	Strahlmittel	Materialdicke [mm]	Almenintensität
Stahl mit > 1400 MPa	Stahlkugeln	< 2 2 bis 10 > 10	- 0,15 bis 0,25 A 0,15 bis 0,25 A
Stahl mit < 1400 MPa	Stahlkugeln	2 bis 10 > 10	0,2 bis 0,3 A 0,3 bis 0,4 A
Titanlegierungen Scheibennuten, Rotoren	Stahlkugeln	< 2 2 bis 10 > 10	- 0,15 bis 0,25 A 0,15 bis 0,25 A
Titanlegierungen Schaufelblätter	Glasperlen		0,1 bis 0,15 N
Ni-Legierungen	Stahlkugeln	entsprechend Stahl	entsprechend Stahl
Al-Legierungen	Glasperlen	< 2,3 2,3 bis 9,5 > 9,5	0,1 bis 0,2 N 0,2 bis 0,3 N 0,3 bis 0,4 N
Mg-Legierungen	Al-Kugeln	entsprechend Al-Leg.	entsprechend Al-Leg.

Bild 12.2.1.6-16

oder zuständigen Behörden, zugelassen werden müssen.
Ein möglichst guter Strahleffekt erfordert eine ***auf das Bauteil abgestimmte Strahlintensität****. Diese darf nicht zu niedrig, aber auch nicht zu hoch sein (Bild 12.2.1.6-14 und Bild 12.2.1.6-15).*
Die Ermittlung der optimalen Strahlparameter erfolgt in einem ***iterativen Prozess*** *zwischen bauteilrelevanten Strahlversuchen und Probenauswertung.*
- Auswertung der ***Strahlversuche*** *mit Untersuchungen der Strahlproben. Zur Anwendung kommen* ***metallografische Schliffe,*** *mit denen sich die* ***Verformung*** *beurteilen und der* ***Härteverlauf*** *ermitteln lässt.*
- ***Eigenspannungsmessungen*** *zur Bestimmung des Verlaufs in den Werkstoff und des Maximums (Lit. 12.2.1.6-1, Bild 12.2.1.6-2 und Band 4, Bild 18.4-5.3).*
- ***Mikroskopische Oberflächenbewertung*** *(REM) des Bedeckungsgrades (Lit. 12.2.1.6-3, Bild 12.2.1.6-4) und der Oberflächenstruktur (z.B. Beschädigungen durch Bruchkorn oder Überstrahlen).*
Wird bereits bei der ***Neukonstruktion*** *eines Bauteils eine Kugelstrahlbehandlung vorgesehen, sind für den Strahlprozess* ***geeignete geometrische Verhältnisse*** *vorzusehen, um die Strahlbehandlung optimal wirksam werden zu lassen. Gegebenenfalls ist eine entsprechende Gestaltung des Bauteils oder eine geeignete* ***Strahlvorrichtung*** *erforderlich.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.6.2 Abrasives Strahlen



"**1**" Reinigen im Rahmen von Reparatur und Überholung.
"**2**" Entoxidieren von Heißteilen und Halbzeug (Wärmebehandlung, Walzen, Schmieden)
"**3**" Glätten von Bearbeitungsflächen (z.B. Egalisieren von Bearbeitungsriefen)
"**4**" Gezielter Abtrag zum Runden von Kanten, Entfernung von Graten.
"**5**" Aufrauung von Haftflächen für Beläge und Schichten: Thermisch Spritzen, Galvanische Schichten, Lackierungen
"**6**" Aktivieren von Oberflächen (z.B. Löten)
"**7**" Optimierung von Abscheidungsbedingen (z.B. Galvanische Schichten)
"**8**" Aussehen von Sichtflächen aus 'korrosionsfesten' Stählen weniger empfindlich.
"**9**" Verbesserung der Prüfeigenschaften (Eindringprüfung) durch Strahlen vor dem Ätzen.

Bild 12.2.1.6-17

Abrasive Strahlverfahren (engl. **Blasting**) verwenden gewöhnlich nichtmetallische (keramische) Hartpartikel. Im Triebwerksbau handelt es sich in erster Linie um Al_2O_3 (Korund) oder SiC, die mit einer Luftströmung („**dry blasting**“) und/oder mit Wasser (nasses Strahlverfahren, „**wet blasting**“, „**vapour blasting**“) auf die Oberfläche transportiert werden. Nasse Strahlverfahren werden verwendet, wenn ein **schonender Abtrag** im Vordergrund steht. Sie sind notwendig, wenn die **Gefahr explosiver Metallstäube** (z.B. Leichtmetalle wie Ti-, Al-, Mg-Legierungen) besteht. Der Abtragungsmechanismus beruht auf einem erosiven Abtrag (Band 1, Bild 5.5.1.1-1) der in erster Linie durch die Schneidwirkung der Strahlpartikel entsteht.

Abrasive Strahlverfahren werden zu unterschiedlichen Zwecken angewendet und beruhen auf besonderen Eigenschaften der Strahlfläche (Bild 12.2.1.6-17):

· Kostengünstig,
· Abtrag von Verunreinigungen und Reaktionsschichten (meist chemisch sehr stabile Oxide) vor Ätzverfahren und/oder Eindringprüfung (Band 4, Bild 17.3.1-7).

© Ayelbeshir Technoconsult
Nur mit Lizenz

· Entfernen von Beschichtungen bei Nacharbeit und Wiederbeschichten.
· Entgratung, Kantenrundung (Band 4, Bild 18.2-8).
. Aufrauung für eine bessere Haftung von Beschichtungen, insbesondere thermischen Spritzschichten (Band 4, Bild 18-3.1) und von Klebeverbindungen (Bild 12.2.1.5-6).
. Aktivierung der Oberfläche für Diffusionsschweißungen und Lötverfahren. Dabei kann der Beladungseffekt (Bild 12.2.1.6-17) für bestimmte Reaktionen genutzt werden. Hierzu gehört die Verbesserung der Benetzung von Hochtemperaturloten (Bild 12.2.1.4-5) auf Ni-Legierungen im Zusammenwirken mit verbliebenen SiC-Partikeln.
· Aktivierung von Oberflächen vor Diffusionsprozessen .

Natürlich sind **mit abrasiven Strahlverfahren auch Gefahren** verbunden (siehe Merksatz). Diese lassen sich mit geeigneten Vorsichtsmaßnahmen vermeiden.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Der Beladungseffekt kann sich durchaus auf nachfolgende Fertigungsprozesse und den späteren Betrieb auswirken.

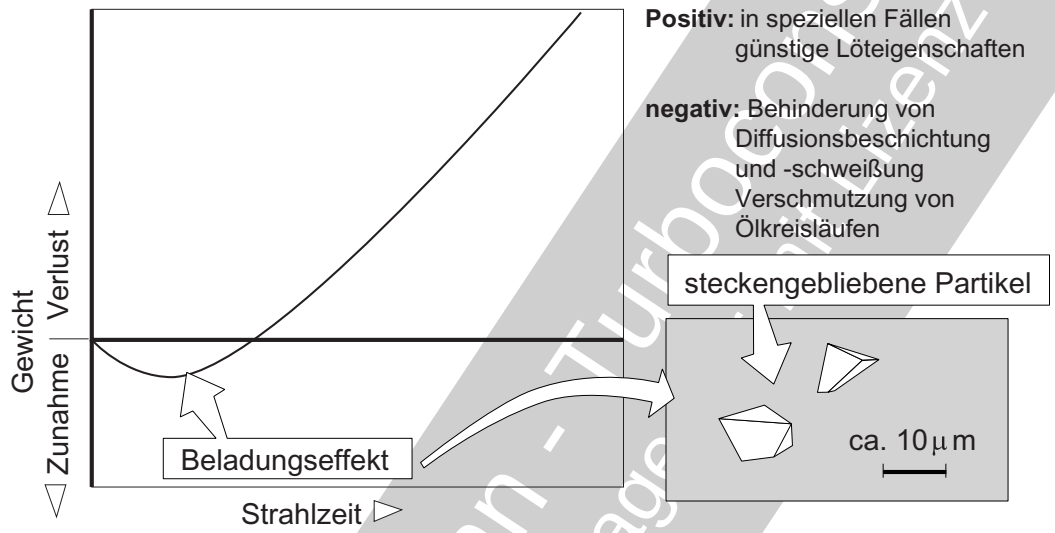


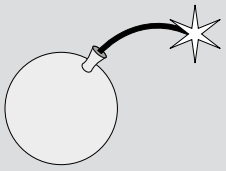
Bild 12.2.1.6-18

Bild 12.2.1.6-18: *Bei Erosionsvorgängen kennt man den* ***Beladungseffekt*** *(Band 1, Bild 5.5.1.1-5). Es handelt sich um das scheinbar paradoxe Phänomen, dass am Beginn eines Erosionsversuchs nicht eine Gewichtsabnahme als Folge des Abtrags, sondern eine Zunahme beobachtet wird. Das lässt sich darauf zurückführen, dass das Gewicht* ***steckengebliebener Strahlpartikel*** *(Detail) überwiegt. Erst bei fortschreitendem Abtrag macht sich der Beladungseffekt nicht mehr bemerkbar (Diagramm). Der Beladungseffekt kann sich auf die nachfolgenden Fertigungsschritte und im Triebwerk auswirken.*

Positive Auswirkung: *Bekannt ist die bessere* ***Benetzung von Ni-Basislegierungen*** *durch artgleiche Hochtemperaturlote (Lit. 12.2.1.6-2). Die intensive Reaktion zwischen SiC und Ni-Loten bei hohen Temperaturen dürfte sich in diesem Fall bemerkbar machen.*

Negative Auswirkungen: *Nachfolgende Fertigungsschritte wie* ***Diffusionsschweißen*** *oder* ***Diffusionsbeschichten*** *können von den verbliebenen Strahlpartikeln beeinträchtigt werden (Bild 12.2.1.8.1-3). So können in Diffusionsschutzschichten Fehlstellen entstehen, die eine örtliche Oxidation begünstigen. Der Schichtaufbau von* ***Bedampfungsschichten, wie PVD-Wärmedämmschichten,*** *kann gestört werden.*
Sich lösende Partikel können im Triebwerk in den Ölkreislauf gelangen und auf den ***Lagerlaufflächen Ermüdungsschäden*** *auslösen.*

Merksatz:



Beim Trockenstrahlen können trockene Metallstäube entstehen. Wenn sie sich entzünden, ist mit einer gefährlichen Staubexplosion zu rechnen. **!**

© Axel Rossmann - Turbocon
als Schulungsunterlage

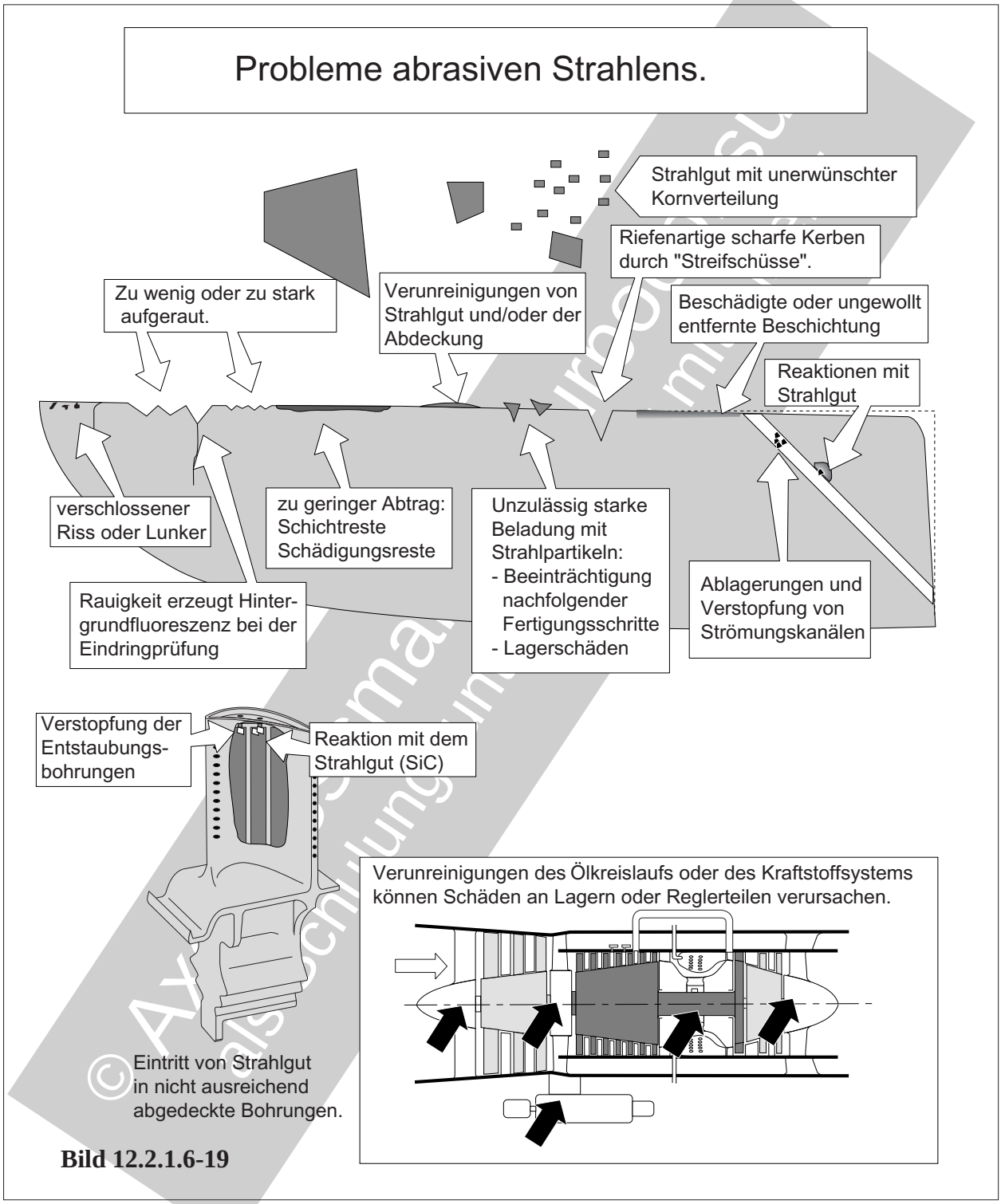


Bild 12.2.1.6-19

Bild 12.2.1.6-19: Abrasive Strahlverfahren *können durchaus problematisch sein. Sie sind häufig eine Voraussetzung für nachfolgende Fertigungsschritte und beeinflussen diese. Eine besondere Bedeutung kommt dem Strahlgut und den spezifizierten Prozessparametern zu. Werden* ***vom Strahlgut Abrieb und Verunreinigungen verschleppt,*** *können diese auf mehrfache Weise schädigend wirken (Band 4, Kapitel 18.3). Erhöhte* ***Temperaturen*** *können die Schädigung auslösen und/oder verstärken. Sprödes keramisches Strahlgut zersplittert beim Aufschlag. Damit wird die Korngrößenverteilung verschoben. Die Spezifikation muss*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

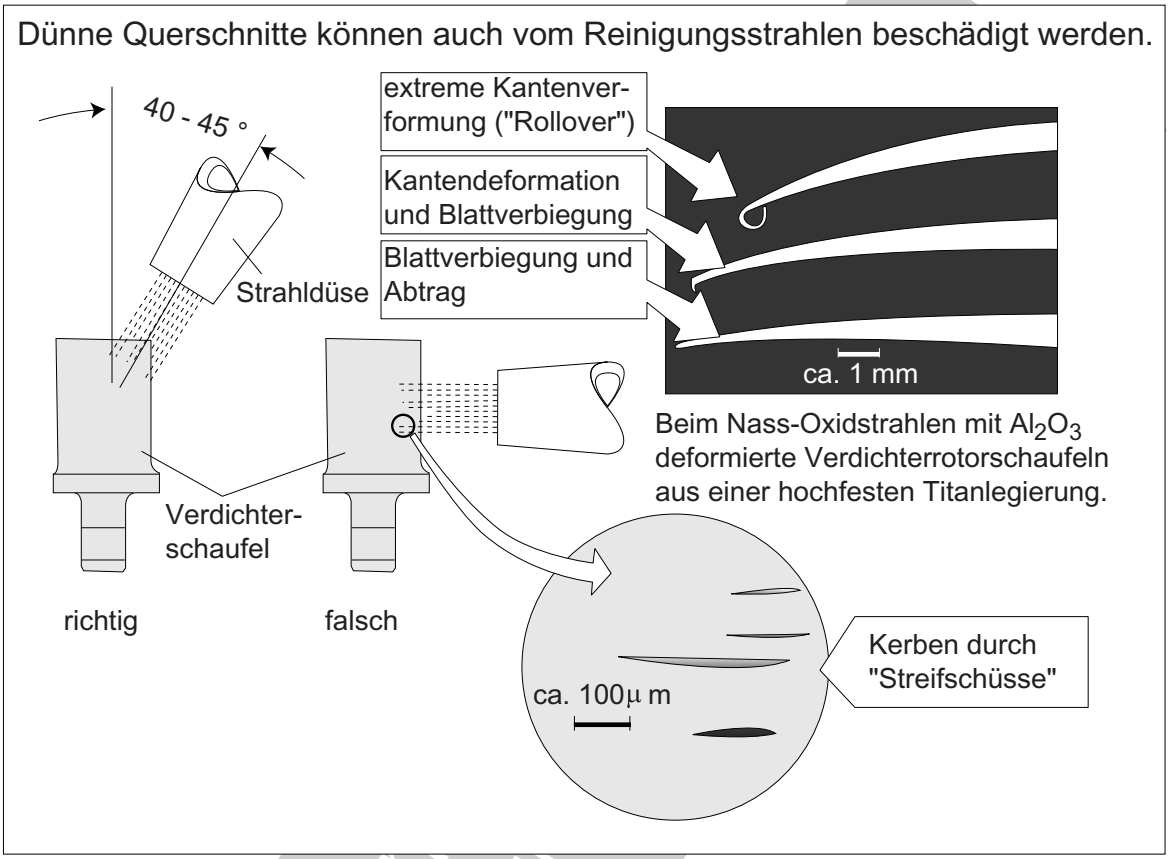


Bild 12.2.1.6-20

also mit einer kontinuierlichen Sortierung und Überwachung gewährleistet werden.
*Die Aufrauung der Oberfläche kann die Eindringprüfung mit einer „**Hintergrundfluoreszenz**“ erschweren. Zur gleichen Problematik gehört auch, wenn Fehler wie Risse und Lunker geschlossen oder verstopft werden (Band 4, Bild 17.3.1-7).*
*Die **Schwingfestigkeit** kann mit gefährlichen riefenartigen Kerben von „**Streifschüssen**“ beeinträchtigt werden.*
*Steckengebliebenes Strahlgut („**Beladungseffekt**“, Bild 12.2.1.6-17) kann sich ebenfalls störend auswirken.*
***Verstopft Strahlgut Strömungskanäle** (Skizze unten links) sind Betriebsschäden wie **Überhitzungen von Heißteilen** oder **Lagerschäden** (Skizze unten rechts) typische Folgen.*
*Mit **Titan- und Ni-Legierungen reaktives Strahlgut wie SiC kann bei Wärmebehandlungen schädigend** wirken. Dieser Effekt ist bei Strahlmittelrückständen im Inneren von Turbinenrotorschaufeln besonders problematisch.*

***Bild 12.2.1.6-20:** Auch das **abrasive Strahlen** kann ähnlich wie Kugelstrahlen (Bild 12.2.1.6-11) oder extreme Erosionsvorgänge im Triebwerk (Lit. 12.2.1.6-10) zum Einrollen scharfer dünnwandiger Blattprofile („**Rollover**“, Skizze oben rechts) führen. Dieser Schaden lässt sich mit einer schrägen Düsenrichtung vermeiden (Skizze links). Eine axiale Düsenausrichtung parallel zum Blattprofil erhöht die Wahrscheinlichkeit gefährlicher axialer Kerben durch **„Streifschüsse“** (Detail unten). Diese können bei Blattbiegeschwingungen **Ermüdungsrisse** auslösen. Andererseits ist eine axiale **Orientierung der Rauigkeit** aus aerodynamischer Sicht günstig (Band 4, Bild 18.1-10).*

Literatur zu Kapitel 12.2.1.6

12.2.1.6-1 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite105-112, 245.

12.2.1.6-2 ASM „Metals Handbook“, „Volume 5- Surface engineering“, ISBN 0-87170-377-7, 1999, „Shot Peening“ Seite 126-135, „Abrasive Cleaning“ Seite 55-66, 781.

12.2.1.6-3 J.Horowitz, „Das ‘Shot-peening’-Verfahren“, Zeitschrift „Metalloberfläche“ 32 (1978) 7, Seite 285-292.

12.2.1.6-4 Ch.W.Fabry, „Kugelstrahlen, Theorie-Versuche-Praxis“, Zeitschrift „Konstruktion“ 17 (1965) Heft 4, Seite 141-153.

12.2.1.6-5 Veröffentlichung der Fa. Metals Improvement Company, „Shot Peening“, Seite 3-47

12.2.1.6-6 ATSB, Aviation Safety Investigation Report 200205780, „In-flight uncontained engine failure and air turn-back...“, 8. December 2002, ISBN 1877071 83 8, Seite 1-43.

12.2.1.6-7 L.Engel, H.Klingele, „ Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden“, Carl Hanser Verlag, 1982, ISBN 3-446-13416-6, Seite 179, 180.

12.2.1.6-8 V.T. Kozyrev, „ Estimating the strength oft turbine rotor blades taking into account operational damage“, Zeitschrift „Strength of Materials“, Verlag „Springer New York“, Heft: Volume 9, Number 3/März 1977, Seite 250-258.

12.2.1.6-9 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 2“, 2001, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 6.1, Kapitel 7.1.3

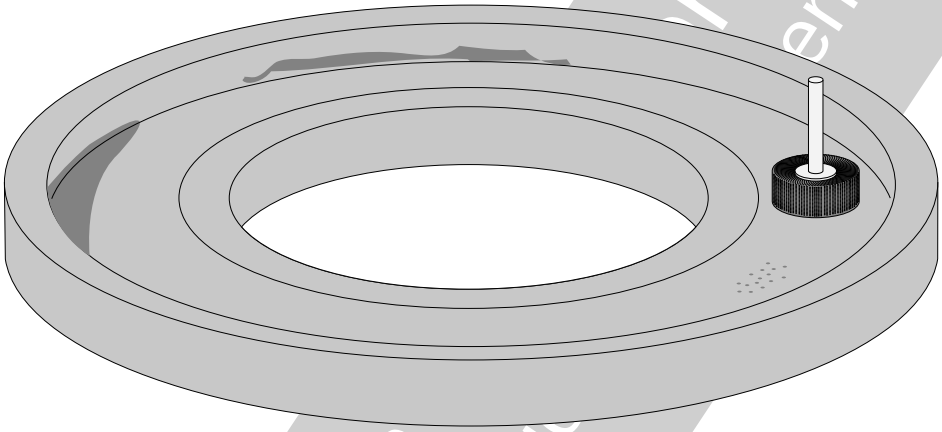
12.2.1.6-10 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 1“, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 5.3.2.

12.2.1.6-11 „Shot Peening in der Praxis“, Fa. „Wheelabrator“, www.shkg.de/files/WG%20ShotPeening.pdf, Seite 1-18.

12.2.1.6-12 „Weitere Anwendungen - Kugelstrahlumformen, Technische Oberflächen, Schichtkorrosion, Schließen von Porosität“, Fa. „Metal Improvement“, 2005 www.metalimprovement.com/...ZehntesKapitel-Weitere Anwendungen..., 5 Seiten.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.7 Bäder zum Reinigen, Ätzen und Spülen



© Axel Bossmann Ingenieurbüro Sicherheitsconsult Luftfahrtsachverständiger

In der Fertigung kommen unterschiedlichste **Prozessbäder** zum Einsatz (Lit. 12.2.1.7-15). Hilfsstoffe aus Prozessschritten wie Zerspanung (z.B. Schneidöle) oder der Umformtechnik (z.B. Gleitfette) müssen entfernt werden, um eine Störung des weiteren Fertigungsablaufs (z.B. Beschichtung) und von Prüfverfahren (Eindringprüfung) zu vermeiden. Erprobte und zugelassene Reinigungsbäder (engl. cleaning fluid, cleaning bath) lösen Verunreinigungen ab, ohne das Bauteil unerwünscht zu beeinflussen. In erster Linie werden **wässrige Reinigungsbäder**, deren pH-Wert auf die Anwendung abgestimmt ist (sauer, neutral, alkalisch), angewendet. Diese Reiniger erhalten Zusätze (z.B. Waschmittel) mit **Tensiden** (z.B. **Entschäumer**) und **Inhibitoren** (zur Vermeidung von Korrosion). Nur in Sonderfällen greift man auf **organische Reiniger** zurück, deren Kosten, nicht zuletzt wegen aufwändiger Anlagen und Umweltauflagen hoch sind (Lit. 12.2.1.7-2). Eine besondere Problematik der Spül- und Reinigungsbäder liegt in der Anwendung am Ende eines Fertigungsprozesses, wenn bereits alle Herstellungskosten angefallen sind. In diesem Fall ist das Schadenspotenzial besonders hoch.

Ätzbäder in der Neuteilfertigung dienen in erster Linie den folgenden Zwecken:

- Schaffung **metallischer, reaktiver, bindungsfreudiger Oberflächen**, z.B. für Beschichtungen und Lötungen.
- **Öffnen** von oberflächennahen, vom Bearbeitungsprozess oder einer Strahlbehandlung **zugedrückter Fehlstellen** wie Risse (z.B. Schleifrisse) und Lunkern in Gussteilen. Dies ist Voraussetzung für eine Eindringprüfung mit ausreichender Fehlererkennung (Band 4, Bild 17.3.1-7).
- **Abtrag von Beschichtungen** für eine Neubeschichtung im Rahmen einer Nacharbeit.
- **Abtrag von spröden Oxidschichten**, z.B. vor plastischer Verformung wie Tiefziehen.
- **Abziehen von Lacken.**

Um die korrosionsfesten Ni-Legierungen und/oder deren chemisch sehr stabilen Oxide aufzulösen, sind **sehr aggressive Ätzbäder** erforderlich. Als Folge einer Verwechslung, Verschleppung oder Verunreinigung führen diese Medien zu Schädigungen. Um Badrückstände zu vermeiden, sind anschließende Spülvorgänge besonders wichtig.

Wird zur Spülung (engl. **rinsing**) heißes Wasser verwendet, trocknet das entnommene erwärmte Bauteil schneller vollständig. Für Spülbäder besteht ähnlich den Reinigungsbädern die Gefahr selbst verunreinigt zu werden und damit auch andere Bauteile (Bild 12.2.1.7- 3).

Abschließend sei erwähnt, dass Bäder in denen abrasive Vorgänge (z.B. Vibrationsschleifen bzw. Gleitschleifen oder Ultraschallbäder) kontinuierlich metallische Oberflächen erzeugen, Effekte wie Korrosion bzw. chemischer Angriff besonders aggressiv wirken. Solche Schädigungen treten in derartigen Fällen besonders ausgeprägt auf.

Bild 12.2.1.7-1: *Es sind wichtige Aufgaben und besondere* ***Probleme im Zusammenhang mit Prozessbädern*** *zum Reinigen, Ätzen und Spülen in Entwicklung, Produktion und Reparatur zusammengestellt.*

Die Behandlung von Bauteilen in Prozessbädern ist in Bezug auf ***Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit*** *durchaus mit Bearbeitungsverfahren wie Zerspanung zu vergleichen.*

Die typisch ***große Zahl*** *an Bauteilen die ein solches Prozessbad durchlaufen bedeutet bei einer* ***spät erkannten Schädigung*** *im* ***fortgeschrittenen Fertigungszustand*** *ein* ***besonderes Sicherheits- und Kostenrisiko****.*

Abweichungen von erprobten, optimierten Prozessparametern und Bauteileigenschaften *können Schäden wie Rissbildung, Versprödung und Korrosionskerben auslösen.*

Prozessbäder zum ***Entfetten*** *(Benetzung) und/oder* ***Ätzen*** *(Rissöffnung) wirken sich als Vorbereitung der* ***Eindringprüfung*** *(Band 4, Bild 13.3.1-7) auf die Bauteilsicherheit aus. Das gilt natürlich besonders für Bäder, die selbst das Prüfverfahren in Form einer* ***Seigerungsätzung*** *darstellen. Ganz allgemein wirken sich Badbehandlungen auf nachfolgende Fertigungsschritte aus und können so indirekt zu Schäden (z.B. Haftfestigkeitsprobleme an Beschichtungen) beitragen.*

Fachpersonal mit ausreichender Erfahrung *ist eine Voraussetzung, um die Qualität der Bauteile in Reinigungs-, Spül- und Ätzfolgen zu gewährleisten und kostspielige Schäden zu vermeiden.*

Entwicklung: *Hier geht es besonders um die Auswahl des Bads und die Ermittlung optimaler Prozessparameter. Dabei sind, neben Kosten und* ***Verfügbarkeit des Prozessbads,*** *bauteilbezogene Einflüsse wie* ***Grundwerkstoff****, eventuelle* ***Beschichtungen*** *oder* ***nachfolgende Fertigungsabläufe****, zu berücksichtigen.*

Die Bauteile dürfen selbstverständlich nicht geschädigt werden (Bild 12.2.1.7-6 und Bild 12.2.1.7-7). Auswirkungen auf das spätere ***Betriebsverhalten*** *sind besonders zu beachten.*

Ein besonderes Problem ist die ***Übertragung des Prozesses von der Entwicklung*** *in die Serie. Dabei können sich wichtige Einflüsse wie Anlagen, Vorrichtungen und Bauteilzustand unterscheiden.*

Die große Teilezahl in der Serie ist eher in der Lage, die Prozesseigenschaften schneller zu verändern (z.B. Alterung des Bades) oder Verunreinigungen einzubringen als die geringe Zahl an Entwicklungsteilen.

Bestehen Unsicherheiten in der Anwendung von Prozessbädern, dürfen absichernde, geeignete, ***betriebsrelevante Nachweise*** *nicht gescheut werden.*

Produktionsprozess: Die Serie erfordert einen stabilen Prozess, *der mit ausreichender Sicherheit nicht aus den Spezifikationsgrenzen drif-*

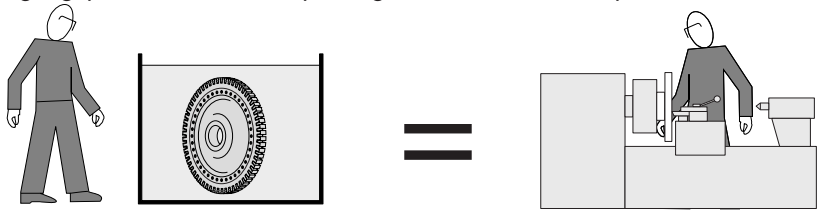
Fortsetzung auf Seite 12.2.1.7-4

©AeroSpace - Turbocoursu
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Chemische, galvanische und Reinigungsprozesse werden häufig am Fertigteil durchgeführt. Schädigungen die dabei auftreten sind deshalb besonders kostenintensiv und gefährlich.

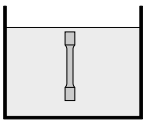
! Prozessbäder sind als äußerst anspruchsvolles "Werkzeug" bzw. als Bearbeitungsmaschine anzusehen. Das Bedienungspersonal sollte entsprechend dem Risikopotenzial geschult, qualifiziert und motiviert sein! Die Expertise bei Einsatz und Kontrolle der Bäder und der Bauteile steht in keinem Fall anderen Fertigungsprozessen wie Zerspanung oder thermischem Spritzen nach.



Entwicklung:

Aufgaben:

- ○ Ermittlung der optimalen Prozessparameter
- ○ Nachweis der Betriebssicherheit und -eigenschaften



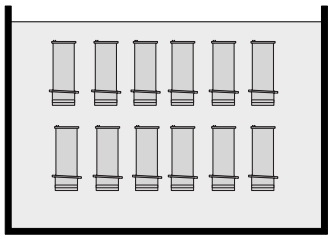
besondere Probleme:

- ● Übertragung in die Serie
- ● kleine Teilezahl
- ● Teile weichen von der Serie ab

Produktionsprozess:

Aufgaben:

- ○ Stabiler Prozess
- ○ Überwachung der Bäder und Hilfsstoffe



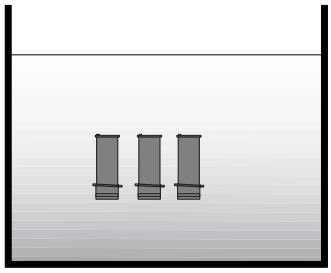
besondere Probleme:

- ● Große Teilezahl (z.B. schnelle Badalterung)
- ● Einschleppen von Fremdmaterial (z.B. Silikon)
- ● Beeinflussung nachfolgender Fertigungsschritte

Reparatur:

Aufgaben:

- ○ Einsatz der richtigen Prozesse
- ○ Stabiler Prozess
- ○ Überwachung der Bäder und Hilfsstoffe



besondere Probleme:

- ● verschmutzte Teile (z.B. Ablagerungen aus dem Betrieb)
- ● veränderte Bauteiloberflächen (z.B. Oxidation)
- ● relativ wenig Teile die sporadisch anfallen
- ● Veränderte Werkstoffe (Alterung)
- ● Lange Austauschzeit der Bäder

Bild 12.2.1.7-1

Fortsetzung von Seite 12.2.1.7-2

*tet. Dazu gehört die **Überwachung der Bäder und Hilfsstoffe**.*

***Ändern sich die Badeigenschaften,** kann das z.B. bei Ätzbädern zu weniger Abtrag oder selektivem Angriff (z.B. der Korngrenzen) führen.*

***Hilfsstoffe vorhergehender Fertigungsprozesse** (z.B. **Schneidöle** oder **Trennmittel**) können in das Bad eingeschleppt werden. Damit entsteht das Risiko, dass solche Verunreinigungen **auf andere Teile übertragen** werden (Bild 12.2.1.7-3 und Bild 12.2.1.7-4).*

*Diese unerwünschte Beeinflussung nachfolgender Verfahren wie **Eindringprüfung**, **Seigerungsätzen** oder **Beschichtung,** muss mit Badüberwachungen und Inspektion der Werkstücke ausgeschlossen werden.*

***Reparatur: Erprobung und Auswahl geeigneter Prozessbäder** und deren sichere Anwendung gestaltet sich im Rahmen der Reparatur besonders anspruchsvoll. Dies hat mehrere Gründe.*

*Kleine, sporadisch eintreffende Werkstückzahlen, erhöhen das Risiko **zeitabhängiger Badveränderungen**. Betriebsbedingte Veränderungen und Verschmutzungen des Bauteils können Ursache für ein unerwartetes Verhalten sein. Ein Beispiel ist die interkristalline Rissbildung an sensibilisierten Werkstoffen. Starke Oxidation lang gelaufener Heißteile erfordert besonders intensive Ätzprozesse, meist in Kombination mit abrasiven Strahlverfahren. Der unterschiedliche Oxidationszustand der verschiedenen Bauteilzonen kann zu einem starken lokalen Angriff führen. Dieser kann sich auch in seinem Erscheinungsbild unterscheiden, z.B. als Korngrenzenangriff oder als flächiger Abtrag.*

*Verunreinigungen auf den Bauteilen wie **Aufgespritztes oder aufgeschmiertes Eisen oder Nickel** im Bereich von **Anstreifvorgängen** im Betrieb (Schaufelspitzen, Labyrinthspitzen) können einen Ätzangriff entscheidend verändern. Mit Eisen verunreinigte Titanlegierungen neigen in Ätzbädern zu ungewöhnlich starker **Aufnahme von Wasserstoff mit Hydridbildung**. Die Folge ist eine deutliche **Versprödung** (Bild 12.2.1.7-9, Lit. 12.2.1.7-11). Ähnliche **Verschmutzungen, die auch im Fertigungsablauf** (Aufschmieren von Stahlbürsten, Festkleben von Bearbeitungsfunken) entstehen können, sind unbedingt zu vermeiden.*

***Bild 12.2.1.7-2:** Eine Gefahr besteht in der **unbemerkten Veränderung der Bäder** über längere Gebrauchs- und/oder Stillstandszeiten. Die möglichen Ursachen für solche „**Alterungen**“ können sehr unterschiedlich sein (Rahmen oben) und sich gegenseitig beeinflussen. Diese schleichenden Veränderungen eines Bades können dazu führen, dass erwünschte Bauteileigenschaften nicht erreicht werden und/or das Bauteil geschädigt wird (Rahmen oben, Bild 12.2.1.7-3). Aus diesem Grund ist die geeignete **Überwachung der Prozessbäder** unerlässlich. Dafür sind eindeutige, überprüfbare Grenzen der Veränderungen festzulegen. Entsprechend dieser Befunde ist die Regeneration bzw. der Tausch der Bäder sicherzustellen.*

*Eine wichtige Möglichkeit der Veränderung von Bädern ist die **Verschleppung** (Rahmen unten). Diese kann über mehrere aufeinanderfolgende Bäder erfolgen. Das macht die möglichen Veränderungen sehr komplex und ihre Auswirkungen vielfältig. Bei Bauteilen mit Hohlräumen und Bohrungen ist die Gefahr einer Badverschleppung besonders hoch. Typisch sind gekühlte Turbinenschaufeln (Bild 12.2.1.7-10) oder komplexe Schweißteile wie Gehäuse (Seite 12.2.1.3-2).*

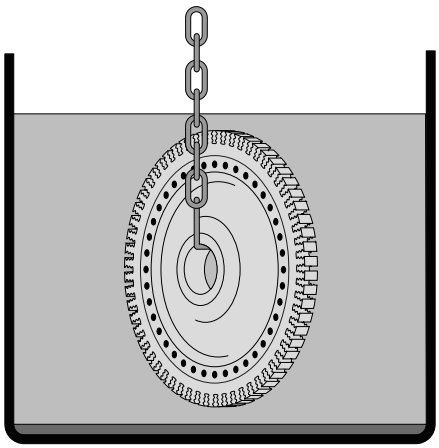
© Axel Bossmann - Turbocoursh
Ausschnittsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Veränderung von Bädern bei längerem Gebrauch

Alterung von Bädern

Mögliche Ursachen:
- Verbrauch duch zu behandelnde Teile
- Verunreinigungen von Werkstücken
- Verschleppung von Verunreinigungen über Flüssigkeit und Gase
- Reaktionen mit Umgebung (z.B. Luft, Schwitzwasser)
- Reaktionen innerhalb der Badflüssigkeit
- Verdünnung durch Spülbäder (z.B. pH-Wert Änderung)
- Ablagerung :"Schlamm"



Gefahren für das Bauteil:
- Erwünschte Eigenschaft wird nicht erreicht:
  - Beeinflussung von Beschichtungen
  - Beeinflussung des Oxidationsverhaltens
  - Beeinflussung von Fügungen wie Kleben und Löten
  - Verschlechterte Rissprüfbarkeit (Eindringprüfung)
  - Unerwünschte tribologische Eigenschaften (z.B. bei nachfolgendem Verformungsprozess)
  - Ablagerungen
- Schädigung:
  - unerwünschter Abtrag von Grundmaterial und/oder Beschichtungen
  - Korrosiver Angriff wie IK und SpRK
  - Versprödung

Verschleppung von Bädern

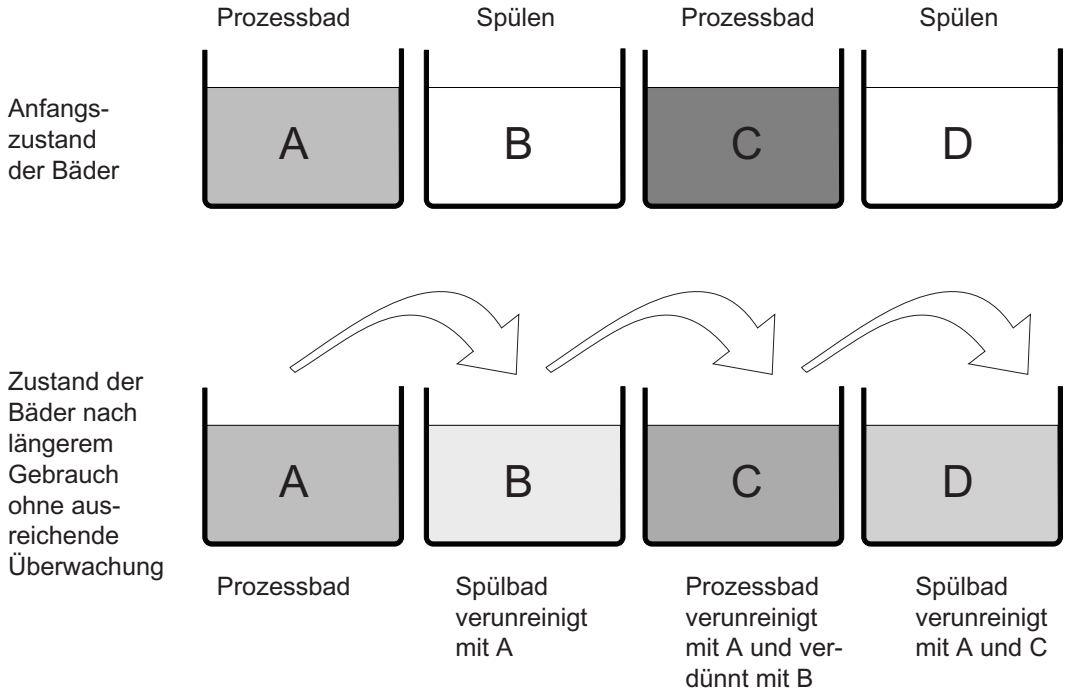


Bild 12.2.1.7-2

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Bild 12.2.1.7-3: *Gerade die, auf den ersten Blick scheinbar harmlosen,* ***Spül- und Reinigungsbäder*** *können Ursache für die Verschleppung gefährlicher Medien sein. Diese Verunreinigungen können sowohl aus Prozessbädern stammen, als auch von den eingebrachten Bauteilen (Bild 12.2.1.7-4).*
Typische ***Badverunreinigungen*** *können auf spezifische Weise schädigend wirken (siehe auch Bild 12.2.1.7-2). Nachfolgend werden Schädigungsmechanismen genauer beschrieben. In der zur Verfügung stehenden Literatur sind nicht alle angeführten Effekte in konkreten Schadensfällen dokumentiert. Bekannte Eigenschaften der Verunreinigungen und Schadensmechanismen lassen jedoch auf potenzielle Gefahren schließen.*

Ätzende Substanzen: *Es handelt sich in erster Linie um* ***Cl-Verbindungen*** *aus*

- Ätzbädern,
- Schneidölen,
- Elektrolyten (z.B. von elektrochemischen Verfahren, Lit. 12.2.1.7-2). Für die ECM-Bearbeitung von Titanlegierungen wird z.B. Kochsalzlösung verwendet.

Fluorverbindungen können in Gleitschichten und Trennmitteln *enthalten sein. Sie können im Bad selbst, aber auch in nachfolgenden Fertigungsschritten (z.B. Wärmebehandlung) schädigend wirken.*
Stehen ***Titanlegierungen*** *unter ausreichend hohen* ***Zugspannungen,*** *ist bei erhöhten Temperaturen, z.B. im Bereich von Schweißungen, mit* ***Spannungsrisskorrosion*** *zu rechnen (Band 1, Bild 5.6.3.1.2-3 und Band 4, Bild 18.3-16).*
Spannungsrisskorrosion an Titanlegierungen in ***Alkoholbädern mit geringen Halogenverunreinigungen*** *ist eher unerwartet (Lit. 12.2.1.7-3). Am stärksten wirken* ***Verunreinigungen in Methanol- und Äthanol****. Geringe Mengen an Wasser unterdrücken diesen Effekt.*
An CrNi-Stählen tritt bei ***Sensibilisierung*** *interkristalline Korrosion auf. Bei Elementbildung mit anderen Oberflächenverunreinigungen wie* ***Metallspritzern*** *kann Lochfraß (****Nadelstichkorrosion****) auslösen.*
Trocknen Cl-haltige Rückstände in Kühlluftbohrungen ein, besteht im Betrieb die Gefahr, dass sich dicke Oxidbeläge bilden. So verengen sich Querschnitte. Zusammen mit einer isolierenden Wirkung sind diese Oxide in der Lage, ***Überhitzung*** *und umfangreiche Folgeschäden auszulösen (Band 4, Bild 18.3-8 und Bild 18.3-9). Lösen Chlorrückstände Korngrenzenangriff aus, unterstützt dieser* ***TMF-Rissbildung*** *in den Kühlluftbohrungen.*

Die Benetzung beeinflussende Substanzen wie Silikonverbindungen und PTFE: *Es handelt sich bei Silikon in erster Linie um* ***Entschäumungsmittel*** *aus Schneidflüssigkeiten. Auch* ***Handcremes*** *können Silikone in den Prozess einbringen. PTFE dürfte aus* ***Trennmitteln*** *in flüssiger Form oder als Spray stammen. Verschlechtern Rückstände dieser Verbindungen die Benetzbarkeit merklich, kann dies gravierende Auswirkungen haben.*

- Die Funktion bzw. die Empfindlichkeit der ***Eindringprüfung*** *wird in Frage gestellt.*

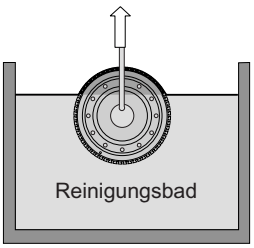
- Die ***Haftfestigkeit von Lacken*** *und organischen Beschichtungen sowie von* ***Klebeverbindungen*** *kann betroffen sein.*

- ***Beeinträchtigung der Bindung zwischen Lagen faserverstärkter Kunststoffteile*** *(FVK).*

Schwefelhaltige Substanzen: *Solche Verbindungen treten in* ***Schmierfetten und Gleitlacken*** *mit MoS_2 auf. Schwefelverbindungen sind auch in* ***Schneidölen*** *vorhanden (Lit. 12.2.1.7-6). Schwefel kann* ***Sulfidation*** *sowohl bei nachfolgenden Wärmebehandlungen als auch bei Betriebstemperaturen im hinteren Verdichterbereich und von Heißteilen an Ni-Basis-Grundwerkstoffen auslösen. An* ***Buntmetallen und Silber*** *können sich Sulfide bilden. Das schlechte Gleitverhalten von Silbersulfid beeinflusst das Anzugsmoment von Schraub-*

© Axel Rossmann - Turbo consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen



Auf der Badoberfläche schwimmende Verunreinigungen haften beim Herausnehmen des Bauteils wieder an.

Über Reinigungsbäder verschleppte Medien können den weiteren Fertigungsablauf oder das Betriebsverhalten negativ beeinflussen.

Verschlepptes Medium	Potenziell schädigende Wirkung
Ätzbadrückstände: Cl-Verbindungen (z.B. $FeCl_3$)	- Spannungsrisskorrosion bei Titanleg. - Oxidation in Kühlluftbohrungen (Überhitzungsgefahr bei Heißteilen)
Schneidöl: Schwefelverbindungen Chlorverbindungen	Sulfidation - Spannungsrisskorrosion bei Titanleg. - Sulfidbildung auf Silber (schlechtes Gleitverhalten)
Trennmittel: Silikonverbindungen Fluorverbindungen	- Haftfestigkeit von Beschichtungen und Klebeverbindungen, - Fehlstellen in FVK-Teilen - Eindringprüfung (Benetzung).
Entschäumer: Silikonöl	Eindringprüfung (Benetzung)
Trockenschmiermitel: Bornitrid	Beeinflussung von Reibschweißungen
MoS_2	Rissbildung und Sulfidation bei Wärmebehandlung
Öle	- EB-Schweißungen (Porosität) - Beschichtungsverfahren (Haftfestigkeit, Schichtausbildung)
Fe-haltige Rückstände Schleifstaub, Späne, Abrieb	- Korrosion, auch an Heißteilen - Wasserstoffaufn. von Titanlegierungen - Schweißrissbildung in Titanlegierungen
Rückstände von Entlackungsbädern: Ameisensäure	Wasserstoffversprödung in -hochfeste Stähle -Titanlegierungen
Geringe Mengen an Wasser und Halogenen (Cl, Br, J) in Methyl- und Äthylalkohol	Rissbildung (SpRK) in Titanlegierungen bei Umgebungstemperatur

Bild 12.2.1.7-3

Diese Aufstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit

verbindungen und kann schwere Schäden an Gleitsystemen (z.B. Axialkolbenpumpen) auslösen.

Eisenhaltige Verunreinigungen *wie Späne, Schleifstaub oder Rostpartikel können das Korrosionsverhalten (z.B. von Titanlegierungen) und die Schweißbarkeit verschlechtern (Rissbildung, Bild 12.2.1.3.1-19).* ***Eisen- und Ni-Partikel auf Titanlegierungen*** *können in Bädern zu* ***intensiver Wasserstoffaufnahme mit Bildung von Hydriden*** *führen. Die Folge ist eine eklatante Versprödung (Bild 12.2.1.7-9, Lit. 12.2.1.7-3 und Lit.12.2.1.7-11). Um diese Gefahr zu umgehen, werden den Bädern* ***oxidierende Additive*** *zugesetzt.*

© Axel Rossmann - Turbo
als Schulungsunterlage nur mit Liz

Es gibt viele Möglichkeiten wie auf korrosionsfeste Werkstoffe korrosionsempfindliche und/oder -auslösende metallische Verunreinigungen gelangen können.

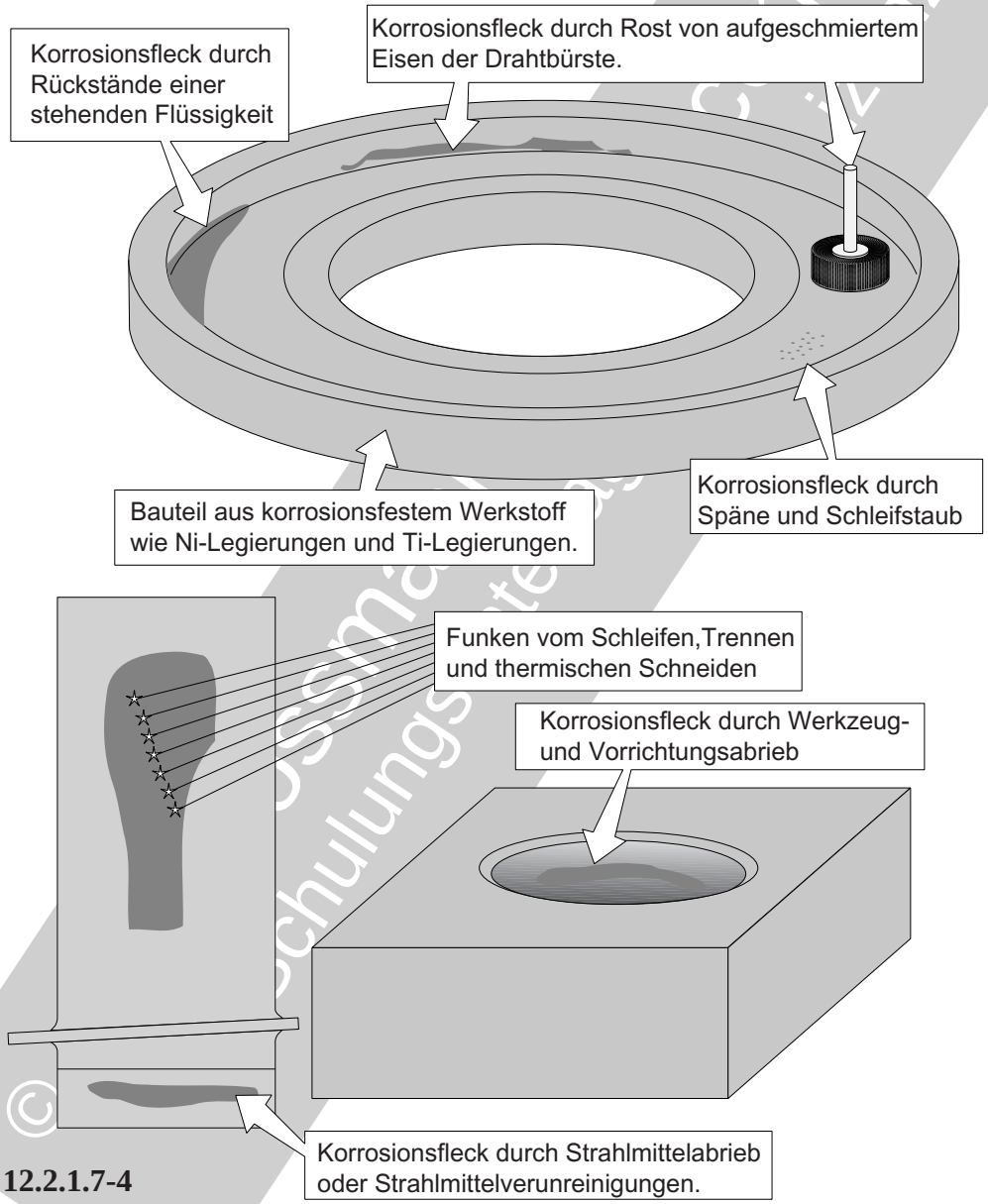


Bild 12.2.1.7-4

Bild 12.2.1.7-4: *Typische Beispiele* ***sind metallische Verunreinigungen auf Bauteilen*** *die in Bäder eingebracht werden. So* ***verschmutzte Bäder*** *können dann Verunreinigungen auf andere Bauteile übertragen. Die Folgen werden in Bild 12.2.1.7-3 behandelt. Auch die Wirksamkeit des Bads kann beeinträchtigt werden.*

*Im Bad sind Reaktionen zwischen Grundwerkstoff und Verunreinigung möglich (Bild 12.2.1.7-6). Diese Verunreinigungen können auf vielfältige Weise auf die Bauteile gelangen. Die obere Skizze zeigt eine Rotorscheibe als Beispiel eines „****schöpfenden Bauteils****“. Mit* ***Spänen oder Schleifstaub*** *verschmutzte Flüssigkeiten können sich ansammeln und, nach-*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

dem die Flüssigkeit verdampft ist, fest haftend zurückbleiben.
Abrieb von zerspanenden Werkzeugen *wie Bohrern oder Drehmeißeln.*
Eindrücken und Aufschmieren von Spänen *(Skizze unten rechts, Band 4).*
Aufschmieren vom Werkstoff des ***Bearbeitungswerkzeugs*** *selbst (z.B. Drahtbürste oder Stahlwolle) oder dem Abrieb anderer Werkstücke auf Werkzeugen bzw. abrasiven Medien (z.B. Schleifbänder, Bild 12.2.1.1-6, Band 4, Bild 18.3-3).*
Vorrichtungen *(z.B. Messing, Kupfer)* ***und Eingussmassen*** *(z.B. Blei, Wismut) können potenziell schädigenden Abrieb auf der Werkstückoberfläche hinterlassen.*
Festhaftende Rückstände der „Funken“ *(Skizze unten rechts, Band 4, Kapitel 18.3) von Fertigungsprozessen wie Schleif- und Trennarbeiten.*
Spritzer thermischer Schneid- und Schweißverfahren*, die während eines Aufschmelzvorgangs entstehen (z.B. Laserbohren und -schneiden, Brennschneiden, Laserschweißen, Elektronenstrahlschweißen).*

Merksatz:

Grundsätzlich sollte eine **Reinigung gleich nach der Verschmutzung** erfolgen. Bei längeren Zeiträumen ist damit zu rechnen, dass sich die Verschmutzung (z.B. Öle) durch Oxidieren, Aushärten/Verharzen/Polymerisieren oder Eintrocknen verändert. Damit kann eine Reinigung nicht oder nur noch sehr schwer wirken. **Eine Eindringprüfung kann dann nicht mehr funktionieren**.

Bild 12.2.1.7-5: *Die Gefahr einer Schädigung besteht, wenn die* ***Oberfläche eines Werkstücks*** *von derjenigen* ***abweicht****, für die ein Prozessbad* ***erprobt und optimiert*** *wurde, bzw. den Proben die dafür verwendet wurden. In solchen Fällen kann es zu störenden Effekten (Aussehen) bis zu gefährlichen Schädigungen (Rissbildung) kommen. Typische Abweichungen und deren Auswirkungen sind:*

Verbliebene Schichtreste: *Es kann sich um nicht ausreichend entfernte Beschichtungen, oder Reaktionsschichten wie Oxide handeln. Diese verändern den Ätzangriff, dass z.B. um einen solchen Schichtrest der Abtrag verstärkt sein kann und/oder der Schichtrest verbleibt. Nachfolgende Prozesse wie Lötungen oder Diffusionsbeschichtungen werden so erschwert.*

Zugspannungen: *Weichen Bearbeitungsprozesse (Band 4, Kapitel 18.4) von erprobten Parametern ab, können ungewöhnlich hohe Zugeigenspannungen in die Oberfläche eingebracht werden. Solche Spannungen genügen, um in geeigneten Medien* ***Spannungsrisskorrosion*** *auszulösen (Bild 12.2.1.6-6 und Bild 12.2.1.7-8). Eine plastische Verformung der Oberfläche durch einen Bearbeitungsvorgang, kann die Empfindlichkeit gegenüber interkristallinem Angriff verringern (Bild 12.2.1.6-6). Wurde dieser Effekt unbewusst genutzt, können* ***Veränderungen des Bearbeitungsprozesses Bauteile überraschend korrosionsempfindlich*** *werden lassen.*

Rauigkeitsunterschiede: *Die an einer Reaktion mit dem Bad teilnehmende Oberfläche steht im Zusammenhang mit Rauigkeit und Topografie. Dient eine Ätzfläche beim Seigerungsätzen zur Bewertung der Qualität, können nicht werkstoffursächliche Veränderungen des* ***Ätzbildes*** *auch die Bauteilsicherheit tangieren. Das gilt auch für Veränderungen eines Zerspanungsprozesses gegenüber der Verfahrenserprobung.*

Rossmann - Turbosatz Vorlesungsunterlagen mit Lizenz

Scheinbar kleine Abweichungen des Gefüges und Oberflächenzustands können das Ergebnis einer Badbehandlung unzulässig verändern.

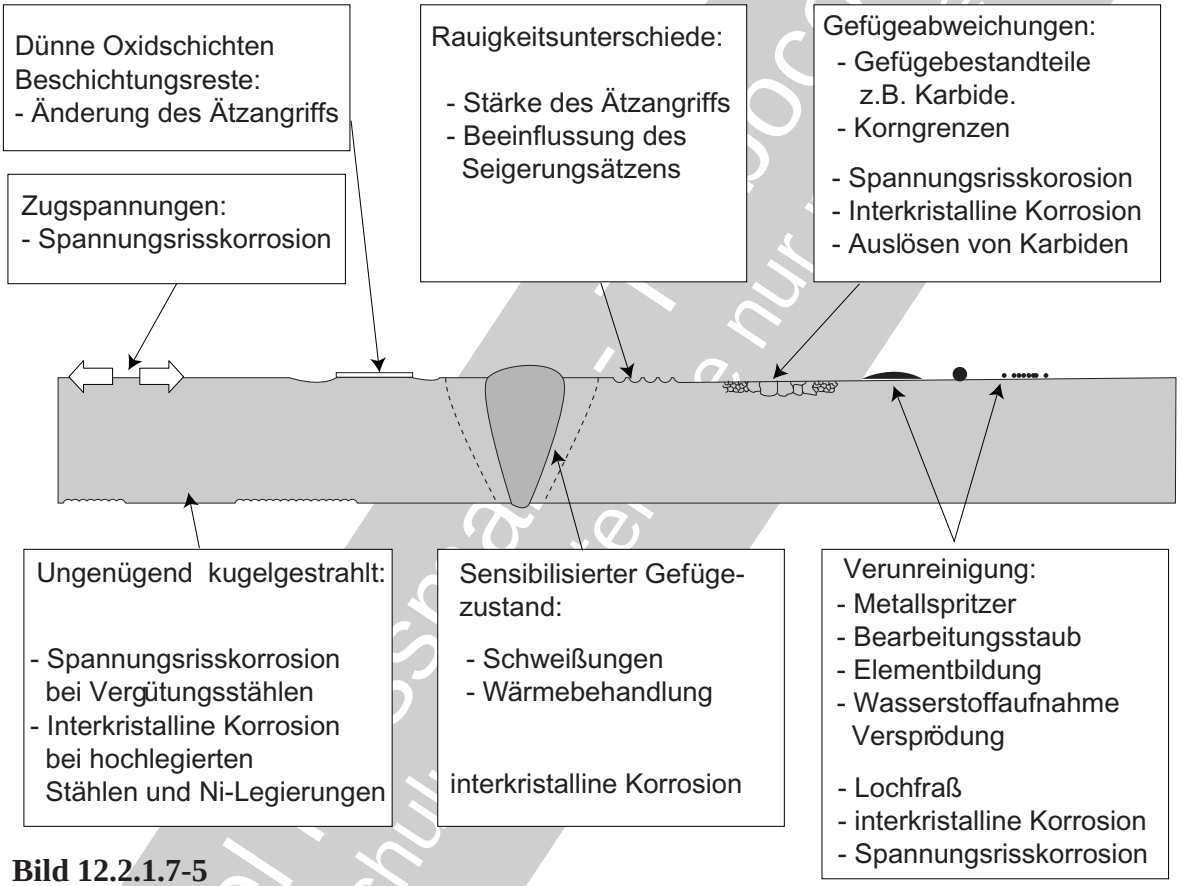


Bild 12.2.1.7-5

Gefügeabweichungen *können auf einen unterschiedlichen Wärmebehandlungszustand, wie* ***lösungsgeglüht statt ausgehärtet****, zurückzuführen sein.*

Eine örtliche ***Gefügeveränderung im Bereich von Schweißungen*** *kann einen verstärkten Korngrenzenangriff zur Folge haben (Sensibilisierung, Bild 12.2.1.3.1-1, Band 1 Bild 5.6.1.1-4, Lit. 12.2.1.7-12).*

Kommen bei einem Lieferantenwechsel Rohteile mit einer, gegenüber dem bisherigen Zustand, geänderten Korngröße zum Einsatz, kann das den Ätzprozess beeinflussen. Eine solche Situation entsteht im Fall der Kombination von ***grob- und feinkörnigem Material in einer Schweißverbindung*** *(Bild 12.2.1.3-14).*

Werden ***Karbide oder andere Phasen*** *von einem Ätzmittel* ***selektiv angegriffen,*** *wird sich deren Größe und Verteilung, möglicherweise in Abhängigkeit vom Rohteillieferanten, in einer eventuellen Schädigung bemerkbar machen.*

Oberflächenverunreinigungen *können, abhängig von der Art der Verunreinigung, verschiedene Schadensmechanismen auslösen (Bild 12.2.1.7-4 und Band 4, Kapitel 18.3).*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Bild 12.2.1.7-6: *Prozessbäder wie Ätzbäder und Entschichtungs- bzw. Entlackungsbäder können bei* ***unsachgemäßer Anwendung und ungeeigneten Prozessparametern*** *an Werkstücken schwere Schäden hervorrufen. Im Folgenden werden an Hand von Beispielen typische Schadensmechanismen dargestellt:*

„1“, „5“, „6“ und „8“: Rückstände von Ätzbädern *wie $FeCl_3 + H_2O$ auf „schöpfenden“ Bauteilen (Bild 12.2.1.7-4) können interkristalline Korrosion um Lochfraß erzeugen.*
Solche Rückstände können während einer ***Zwischenlagerung*** *infolge Verdampfung eine erhöhte Konzentration aufweisen und unerwartet aggressiv wirken.*
Im Bad stehen solche Schädigungen mit Abweichungen wie ***Überzeiten und Alterung*** *bzw. Verunreinigung des Bads in Zusammenhang. Entsprechendes gilt für den Oberflächen- und Werkstoffzustand des Bauteils (Bild 12.2.1.7-5, Lit. 12.2.1.7-7).*
Scheinbar harmlose Bäder wie ***Glykolsäure,*** *die zum Abziehen keramischer Schichten dienen, können Karbide aus der Grundwerkstoffoberfläche herauslösen. Bedenkliche Mikrokerben sind die Folge.*
Verbleiben auf Grund unzureichender Spülung Ätzmittelreste in ***Kühlluftführungen von Heißteilen****, ist im späteren Betrieb eine verstärkte Oxidation zu erwarten. Eine so verschlechterte Kühlung führt zu einer gefährlichen Verkürzung der Bauteillebensdauer (Bild 12.2.1.7-3 und Band 4, Bild 18.3-9).*
Bäder die ***selektiv auf Lotwerkstoffe*** *reagieren, können zur Schwächung bis zur vollkommenen Auflösung einer Lötverbindung führen (Skizze „8“).*

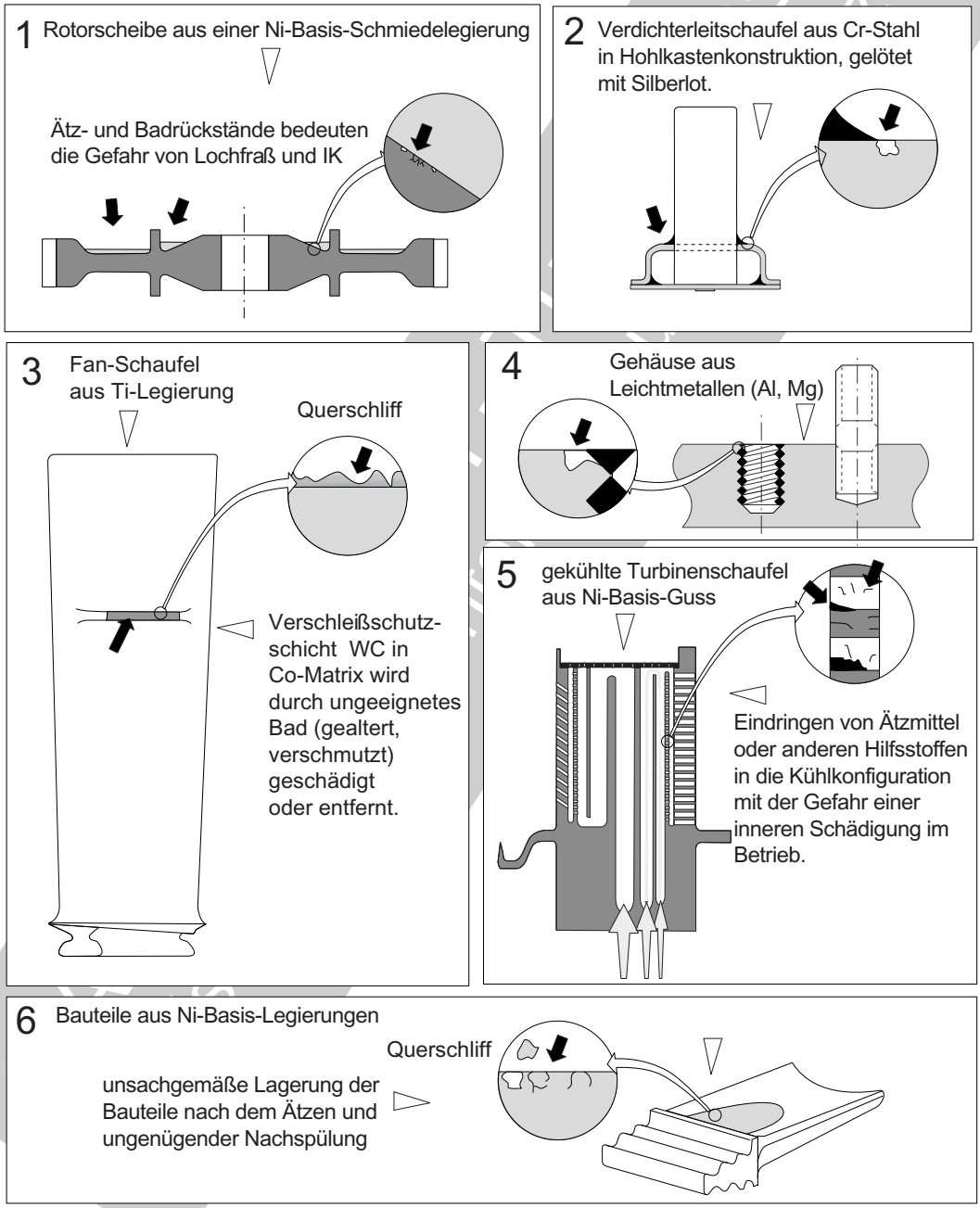
„2“ und „4“: Elementbildung an Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen*(Bild 12.2.1.7-11) wie Lötungen mit artfremdem, d.h. vom Grundwerkstoff deutlich abweichenden Lot, kann auch in Spül- und Reinigungsbädern Korrosion auslösen. Korrosionsgefahr besteht insbesondere dann, wenn von abgesicherten Prozessparametern abgewichen wird. Typisches Beispiel für eine Elementbildung sind mit Silber- oder Kupferlot hart gelötete Verdichterleitschaufeln aus Stahl, wie sie bei älteren Triebwerkstypen zum Einsatz kamen (Bild 12.2.1.4-1). Hier besteht die Gefahr von* ***„Lochfraß“*** *am Übergang der Lötung zum Grundmaterial (Band 1, Bild 5.6-2 und Bild 5.6.1.1-1). Ähnliche Korrosion kann am* ***Übergang von Schichten,*** *die sich edler als der Grundwerkstoff verhalten, auftreten. Ein Beispiel sind WC-Panzerungen an Schaufelblättern.*
Getriebegehäuse und Verdichtereintrittsgehäuse älterer Triebwerkstypen bestehen häufig aus ***Leichtmetallguss*** *und werden mit Gewindeeinsätzen aus gehärtetem Stahl ausgerüstet (Lit. 12.2.1.7-7). Diese Einsätze können wegen der Anzugsmomente versilbert sein. Auch Stehbolzen (martensitischer Werkstoff) oder Einsätze für eine Ölführung (CrNi-Stahl) können in den Gehäusen bei einer Entlackung oder zur Oberflächenvorbereitung vor einer Lackierung verbleiben. Gewöhnlich ist das kaum in der Neuteilfertigung sondern bei einer Überholung der Fall. Eine ungenügende Abdeckung und/oder ein aggressives Bad kann zwischen Gehäuse und Einsatz ein Korrosionselement entstehen lassen. Das gilt auch für Badreste in Gewindebohrungen und Sacklöchern.*

„3“: Schädigungen an Schichten *im Zusammenhang mit Prozessbädern werden immer wieder beobachtet. Solche Probleme sind zuerst auf Badverwechslungen oder ungenügend vorerprobte Bäder zurückzuführen. Ein Beispiel ist der* ***teilweise oder totale Abtrag von Panzerungen aus****, in einer Co-Matrix gebundenem,* ***Wolframcarbid*** *(WC). Solche Schichten sind in Triebwerken weit verbreitet. Besonders an Kontaktflächen die Schwingverschleiß unterworfen sind. Es hat sich gerade in diesen Fällen gezeigt, wie schwer es ist, nachträglich den Prozessfehler eindeutig zu ermitteln. Im*

© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Bäder zum Reinigen, Ätzen und Entlacken können bei unsachgemäßer Handhabung oder Verwechslung schwere Schäden verursachen.



*Verdacht steht ein **mit Cu verunreinigtes** Prozessbad.*

***„7“, „9“, „10“: Anstreifschichten** können von Bädern und Badrückständen werkstoffspezifisch geschädigt werden. **Klebeverbindungen** können, je nachdem ob es sich um organische oder anorganische Klebstoffe handelt, abgelöst werden. So sind z.B. **anorganische Klebstoffe mit Al-Pulverfüllung** (Bild 12.2.1.5-6) in kürzester Zeit von **Laugen** auflösbar. Saugt sich eine **poröse Schicht** mit Badresten die*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

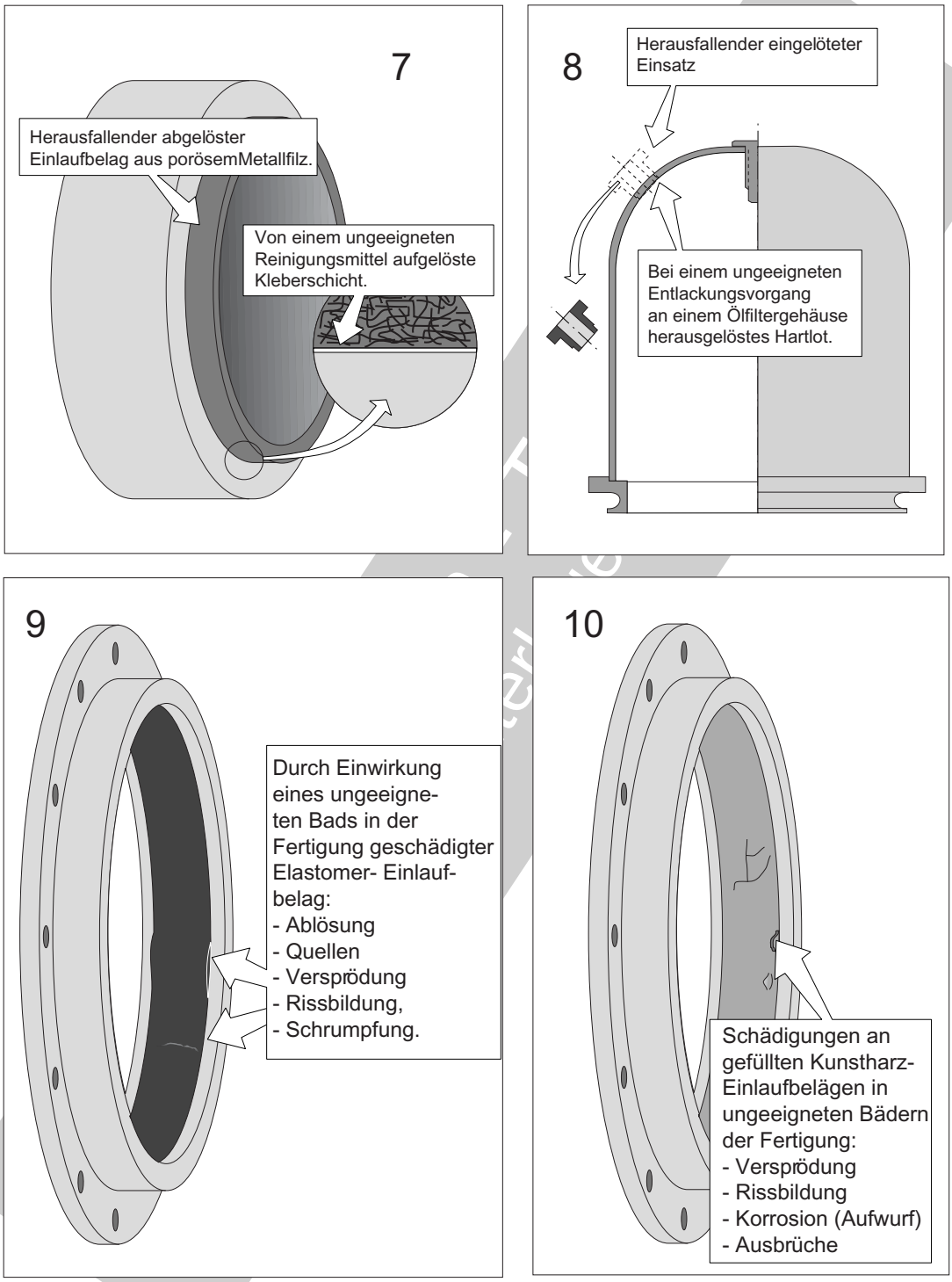


Bild 12.2.1.7-6

darin verbleiben voll, können diese auch über längere Zeiten einwirken.
Organische Kleber und Schichtwerkstoffe wie gefüllte Elastomere oder Kunstharze können durch ungeeignete Bäder und Badreste verspröden, schrumpfen, erweichen und reißen.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Bild 12.2.1.7-7: *Diese Zusammenstellung potenziell schädigender* ***Einflüsse von Ätzbädern*** *soll bei aktuellen Problemen die* ***Identifikation des wahrscheinlichen Schadensmechanismus*** *erleichtern. Charakteristische Merkmale werden bereits in den Bildern 12.2.1.7-2 bis 12.2.1.7-6 behandelt.*
Darüber hinaus wird auf Band 1 verwiesen:
Band 1, Kapitel 5.6 beschäftigt sich mit Korrosion und damit wichtigen Effekten die auch bei der Einwirkung von Ätzbädern wirksam werden.
Band 1 Kapitel 5.6.1.1 Korrosion ohne Belastung: Elementbildung, Sensibilisierung, interkristalline Korrosion (IK).
Band 1 Kapitel 5.6.3.1 Spannungsrisskorrosion (SpRK)
Band 1 Kapitel 5.7 Wasserstoffinduzierte Rissbildung („Wasserstoffversprödung“, Bild 12.2.1.7-9).
Im rechten Rahmen sind Schäden im Zusammenhang mit Ätzbädern entsprechend dem üblichen Ablauf der Prozessfolgen dargestellt.

Halbzeug und Rohteile: *Oberflächenveränderungen an diesen Teilen können das Ergebnis in Prozessbädern der Fertigung, insbesondere beim Ätzen, unerwünscht verändern. Betroffen sind* ***Bauteile die bereits Fertigkonturen aufweisen****. Dazu gehören präzisionsgeschmiedete Verdichterschaufeln (Ti-Legierung, Ni-Schmiedelegierung), gegossene Turbinenschaufeln (Ni-Legierungen) und gegossene Gehäuse von Anbaugeräten (Al- oder Mg-Legierungen). Gefügeabweichungen gegenüber den Erprobungsteilen können eine Folge unterschiedlicher Gieß- oder Schmiedeparameter sein. Abweichungen in der Oberflächenbehandlung, z.B. einem Strahlprozess, können die Reaktivität der Oberfläche oder deren Sauberkeit verändern (****Beladungseffekt****, Bild 12.2.1.6-17). Änderungen der Wärmebehandlung, z.B. im Zusammenhang mit der Ofenatmosphäre, können den Oxidationszustand beeinflussen oder zur Verarmung von Legierungsbestandteilen über Diffusionsvorgänge führen.*

Vorbehandlung: *Die Fertigungsverfahren vor der Ätzbehandlung wirken sich auf die Oberflächeneigenschaften und damit deren Verhalten gegenüber Ätzbädern aus. Zu solchen Einflüssen gehören* ***plastische Verformungen und Eigenspannungen*** *infolge einer Zerspanung und/oder einer Strahlbehandlung (Bild 12.2.1.6-6). Natürlich wirken sich auch Werkstoffkombinationen mit unterschiedlichem Verhalten im Ätzbad aus (Lot/Grundwerkstoff). Es ist wichtig, dass keine Fertigungsschritte wie Beschichtungen, Klebverbindungen oder Lötungen vorgesehen sind, die von Ätzverfahren geschädigt werden können (Bild 12.2.1.7-6). Es ist dafür zu sorgen, dass das Bauteil nicht von unvermeidlicher Elementbildung oder von Gefügeveränderungen gefährdet wird. Gegebenenfalls ist die Folge der Fertigungsschritte darauf abzustimmen. Diese Aufgabe ist in erster Linie dem Konstrukteur und der Arbeitsvorbereitung gestellt.*

Ätzen: ***Baderprobung und Prozessoptimierung*** *sind eine Voraussetzung der schadensfreien Ätzbehandlung. Abweichungen zwischen Proben und Bauteil oder den Laborbedingungen gegenüber der Serie können zu bösen Überraschungen führen.*
Auch scheinbar „harmlose“ Ätzbäder können Schädigungen hervorrufen. So kann ***Ameisensäure*** *(engl. formic acid) in hochfesten Stählen und Titanlegierungen* ***Wasserstoffversprödung*** *auslösen (Lit. 12.2.1.7-8). Ätzen mit* ***Glykolsäure*** *dient zum Abtragen keramischer Beschichtungen. Es kann aber auch werkstofftypische* ***Karbide aus der Oberfläche lösen****, sodass Mikrokerben entstehen.*
Zu kritischen Prozessparametern gehören Badvolumen, auf die Ätzfläche bezogener Durchsatz, Verunreinigungsmöglichkeiten und Vorrichtungen wie Abdeckungen oder Körbe. Die ***Badüberwachung*** *zur Vermeidung unzulässiger Veränderungen wie Alterung und Verunreinigung muss die* ***Stabilität des Prozesses*** *gewährleisten. Natürlich ist sicherzustellen, dass geeignete Spülbäder gefährliche Ätzmittelrückstände entfernen (Bild 12.2.1.7-6).*

©Aymanns - Tupodynamics Lehrunterlagen nur für LZ

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

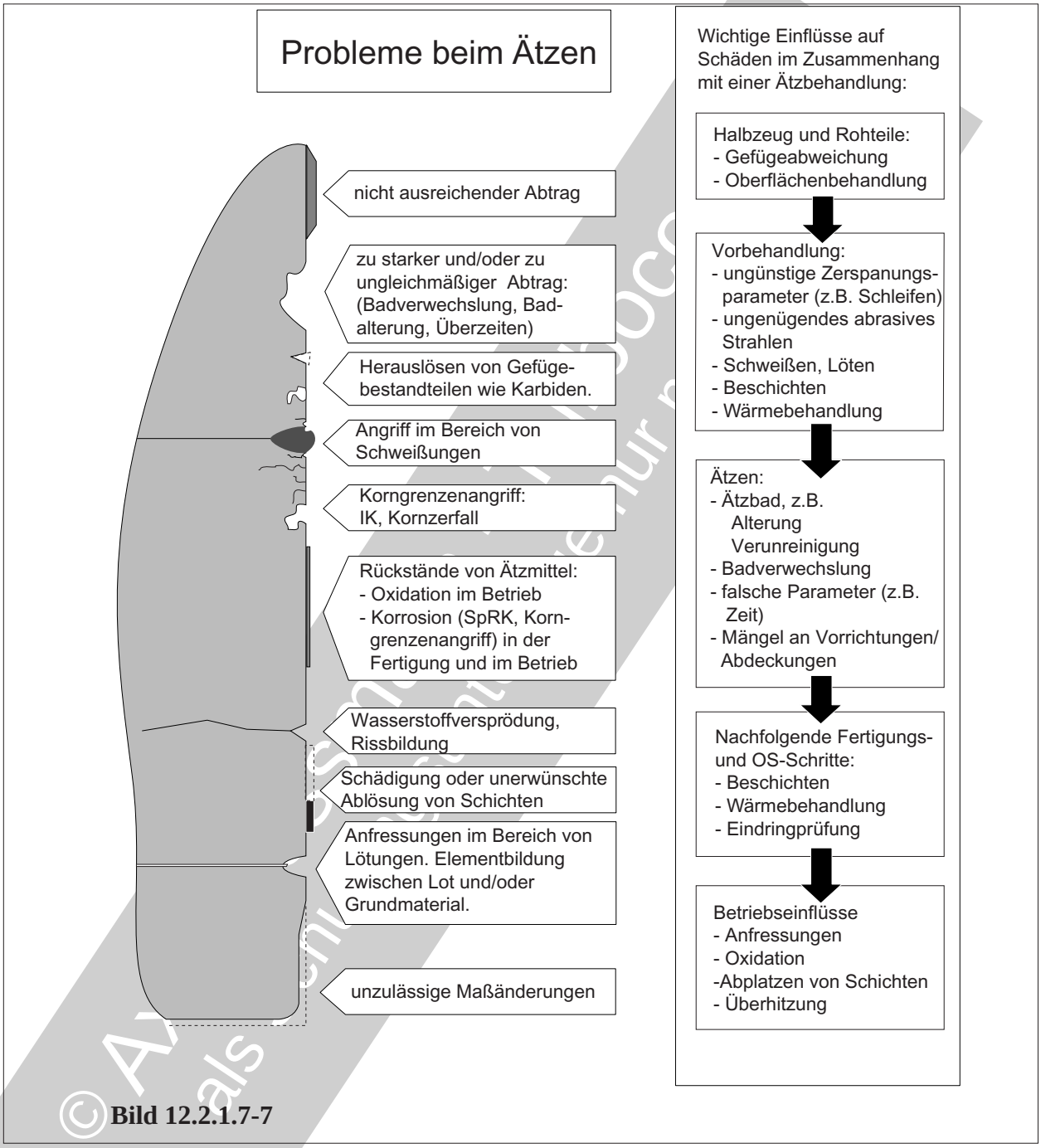


Bild 12.2.1.7-7

Fertigungsschritte nach dem Ätzprozess: *Probleme beim Ätzen können sich später im Fertigungsprozess auswirken. Lässt sich die erwünschte reaktive Oberfläche für eine Beschichtung oder eine Lötung nicht herstellen, ist ein stabiles Ergebnis nicht zu erwarten. Werden Oberflächenfehler wie Risse und Lunker nicht geöffnet, ist eine befriedigend sichere* ***Eindringprüfung*** *(Band 4, Bild 17.3.1-7) in Frage gestellt.*

Betriebseinflüsse: *Das sichere Betriebsverhalten kann von Ätzprozessen in der Fertigung merklich beeinflusst werden.* ***Ätzmittelrückstände in Kühlluftkanälen*** *kann eine* ***Überhitzung von Heißteilen*** *auslösen (Bild 12.2.1.7-6). Eine ungenügende* ***Haftflächenvorbereitung*** *kann im Betrieb zur* ***Ablösung von Beschichtungen und Belägen*** *führen.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Chlorhaltige Prozessbäder und Reinigungsmedien können bei Titanlegierungen im Laufe nachfolgender Fertigungsschritte Spannungsrisskorrosion auslösen.

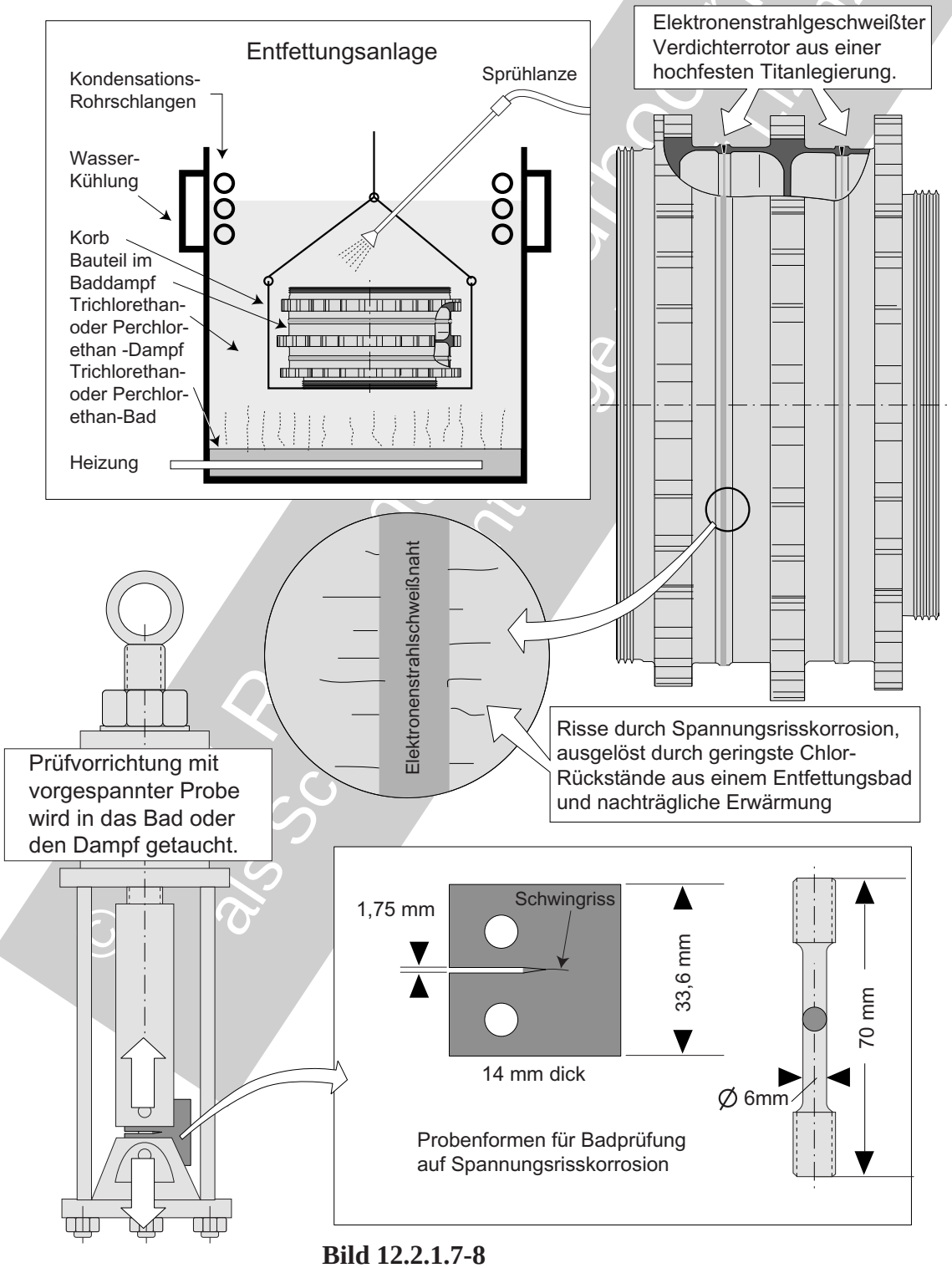


Bild 12.2.1.7-8

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

***Bild 12.2.1.7-8**: **Titanwerkstoffe** können unter der Einwirkung von Chlorverbindungen bei ausreichend hohen Zugspannungen bereits ab 150°C **Spannungsrisskorrosion** erleiden. Entfettungsbäder (Rahmen oben links) wie **Trichlorethen** („Tri"), **Tetrachlorethan oder Perchlorethan** („Per") können unter ungünstigen Bedingungen Chlor abspalten. Auch im Zusammenhang mit **Cl in Wasser oder Methanol** wurde Spannungsrisskorrosion an Titanlegierungen beobachtet (Lit. 12.2.1.7-14). Mehrere Reaktionen, die sich auch gegenseitig beeinflussen können, führen zu einer Cl-Ionen abspaltenden Zersetzung.*

*- **Abscheiden von Salzsäure** (HCl) geschieht durch Photolyse (Lichteinwirkung), Thermolyse (Temperatureinwirkung), Hydrolyse (Reaktion mit Wasser) oder Oxidation (Reaktion mit der Luft).*

***Metallchloride** wie Aluminiumchlorid, Eisenchloride oder Zinkchloride können die Zersetzung unterstützen. Diese Chloride können sich **an den Werkstücken oder der Anlage** selbst (Vorrichtungen, Wände) bilden.*

*Erreicht die Per- oder Tri-Lösung einen **Verunreinigungsgrad von über 50 %** (Wasser, Fette und Öle) wirkt die **Temperatur des Bades** im „Sumpf" unter dem Entfettungsdampf (Skizze oben links, Lit. 12.2.1.7-1) zersetzend und Cl wird frei. Um dies zu verhindern, werden neutralisierende und oxidierende **Inhibitoren** zugesetzt. Deren Effektivität ist jedoch begrenzt. Deshalb sind zusätzliche Vorkehrungen zu treffen (Lit. 12.2.1.7-11):*

*- **Verwendung hochlegierter Stähle in Anlage und Vorrichtungen**.*

*- **Indirekte Heizung,** um eine Überhitzung des Sumpfs zu verhindern.*

*- **Analytische Überwachung** des Gehalts an Ölverunreinigungen, um diese sicher unterhalb 20 Gewichtsprozent zu halten.*

*- Überwachung und Einstellung des **pH-Werts oberhalb 7**. Damit ist eine ausreichende Menge an Inhibitoren gewährleistet.*

Im Folgenden werden die äußerst interessanten Ergebnisse aus Literatur 12.2.1.7-10 verkürzt dargestellt:

*Die im Folgenden beschriebenen Versuche untersuchten eine **Rissbildung während der Einwirkung der Badmedien**. Für die SpRK-Prüfung wurde eine **Zugvorrichtung** (Skizze unten links) eingesetzt. Die Proben (Rahmen unten rechts) aus Ti6Al4V wurden in frische, und künstlich gealterte Entfettungsbäder (pH<7) getaucht. Verwendet wurden **gekerbte und mit Schwingrissen** versehene (bruchmechanische) Proben. Im Per-**Dampf** trat **SpRK-Risswachstum bis in den Zentimeterbereich** auf. Im Tri-**Dampf** lag das Risswachstum lediglich im Millimeterbereich. Es wird vermutet, dass der höhere Siedepunkt des Per (121 °C) im Vergleich zu Tri (87 °C) für die Unterschiede im Risswachstum von Bedeutung ist.*

Wie erwartet zeigten glatte Zugproben keine Rissbildung.

*Diese Ergebnisse lassen sich so interpretieren, dass, im Gegensatz zum Dampf, in **Bädern** von Tri und Per keine SpRK zu erwarten ist. Für Bauteile **ohne scharfe Kerben** besteht auch in Tri- und Per-Dämpfen keine Gefahr der SpRK.*

Zusammenfassend lässst sich sagen:

***Im Falle hoher Zugeigenspannungen und scharfen Kerben (z.B. kleine Schleifrisse oder Warmrisse an Schweißungen) ist ein gefährliches Risswachstum nicht auszuschließen**, wobei Per-Bäder als besonders gefährlich einzuschätzen sind.*

*Das Risiko einer **Rissbildung scheint auch nach der Entfettung** bei ausreichend hohen Zugspannungen und Temperaturen über 450°C zu bestehen. Auf Bauteilen in Entfettungsbädern können sich **dünne, Cl-haltige Reaktionsschichten** bilden. Die **Dicke solcher Chloridfilme,** die in einem **ungenügend stabilisierten Entfettungsbad** entstehen, wurden mit 100 Angström gemessen (Lit. 12.2.1.7-11). Das ist ein Mehrfaches gegenüber einer optimalen Badzusammensetzung. Bei Temperaturen um 450°C kann Chlor frei werden und rissbildend einwirken. Einen ähnlichen Effekt kennt man bei **Kochsalzverunreinigungen** (Handschweiß, Meeresatmosphäre) auf Zugproben aus Titanlegierungen (Band 4, Bild 18.3-16).*

© Aufrecht - Tuppenbrot
Abschnittsunterlage

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Die Eindringprüfung dünner entfetteter Blechproben von Schweißversuchen mit WIG (TIG) und Elektronenstrahl (EB) ließ keine Rissbildung erkennen. Dabei ist jedoch zu bemerken, dass die flachen Bleche nur eine Dicke von 1 mm aufwiesen (Lit. 12.2.1.8.3-11) . Damit ist es zweifelhaft, ob sich für eine SpRK ausreichend hohe Zugspannungen aufbauen konnten.

Die Erfahrung scheint jedoch zu zeigen, dass ***SpRK-Bedingungen*** *offenbar in Fertigungsprozessen wie* ***Wärmebehandlungen*** *oder* ***Schweißungen*** *auftreten können. So gilt auch die Regel,* ***keine chlorierten Lösungsmittel für eine Entfettung des Schweißbereichs*** *zu verwenden (Lit. 12.2.1.7-13). Im rechts oben dargestellten Fall handelt es sich um eine* ***Elektronenstrahlschweißung*** *an einem Verdichterrotor aus Ti6Al4V. Neben der Schweißung wurden axial orientierte SpRK-Rissfelder beobachtet. Deren Entstehung während des Schweißvorgangs war plausibel mit einer Cl-haltigen Reaktionsschicht erklärbar. Aus diesem Grund wurden von vielen Firmen bereits früh die Anwendung von Entfettungsbädern für Bauteile aus Titanlegierungen untersagt (Lit 12.2.1.7-11).*

Merksatz:

Bäder mit Chlorbestandteilen oder **chlorhaltigen Verunreinigungen** bedeuten für **Titanlegierungen** eine potenzielle Rissbildungsgefahr. Auch in nachfolgenden Fertigungsschritten können Risse ausgelöst werden, wenn **Temperaturen oberhalb 450°C** erreicht werden und ausreichend hohe Zugspannungen vorliegen.

Bild 12.2.1.7-9: *Nach der* ***Reinigung (Oxidaufbereitung****, engl.* ***Scale Conditioning****, Lit. 12.2.3.7-15) mit 70% NaOH + 30 % Na_2CrO_4 bei 130°C wurde an Bauteilen aus verschiedenen hochfesten* ***Titanlegierungen*** *eine* ***extreme Versprödung*** *festgestellt. Es zeigte sich, dass diese auf* ***Hydridbildung infolge Wasserstoffaufnahme*** *im Reinigungsbad zurückzuführen war (Lit. 12.2.1.7-3, Lit. 12.2.1.7-11). In beiden Fällen hafteten an den Oberflächen der versprödeten Bereiche* ***Ni-Partikel****. Sie sind mit* ***Anstreifvorgängen*** *an* ***Ni/Grafit-Einlaufbelägen*** *im Betrieb zu erklären. Zusätzlich waren in allen Fällen* ***Spuren von Eisen*** *vorhanden.*

Es ist durchaus denkbar, dass derartige ***Aufspritzungen*** *auch bei Fertigungsprozessen auf Bauteile aus Titanlegierungen gelangen.* ***Schleif- oder Fräsoperationen*** *erzeugen geeignete* ***Funken bzw. Staub****. Auch die Entstehung solcher Verunreinigungen durch* ***Schneidwerkzeuge, Spannvorrichtungen und verunreinigtes Strahlgut*** *ist denkbar. Selbst* ***Badverunreinigungen****, die sich auf der Bauteiloberfläche absetzen, können unter dem Gesichtspunkt einer Wasserstoffaufnahme problematisch sein.*

Die linke Skizze zeigt eine gelaufene ***Verdichterrotorschaufel, deren Hinterkante Aufspritzungen von einem Anstreifvorgang aufwies. Diese war nach der Badbehandlung derart versprödet****, dass sie sich leicht mit dem Fingernagel glasartig ausbrechen ließ.*

In der rechten Skizze sind die ***spröd ausgebrochenen Labyrinthspitzen*** *einer Verdichterscheibe dargestellt.*

Der Versprödungsmechanismus lässt sich wie folgt erklären: Bekannt ist, dass TiFe-Legierungen begierig Wasserstoff aufnehmen und diesen als Metallhydride speichern. Deshalb ist es naheliegend, dass TiFe- oder TiNi-Partikel, die sich beim Anstreifvorgang im Betrieb bilden, eine Schwachstelle in der schützenden Oxidschicht darstellen. Durch diese kann Wasserstoff zum Grundmaterial vordringen und eindiffundieren. Dies geschieht besonders schnell in das β *-* ***Gefüge des***

Rossmann - Turbomaschinenlehrgang mit Erlaubnis

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Aufnahme von Wasserstoff bei Ätzvorgängen als Ursache von Versprödung und Rissbildung.

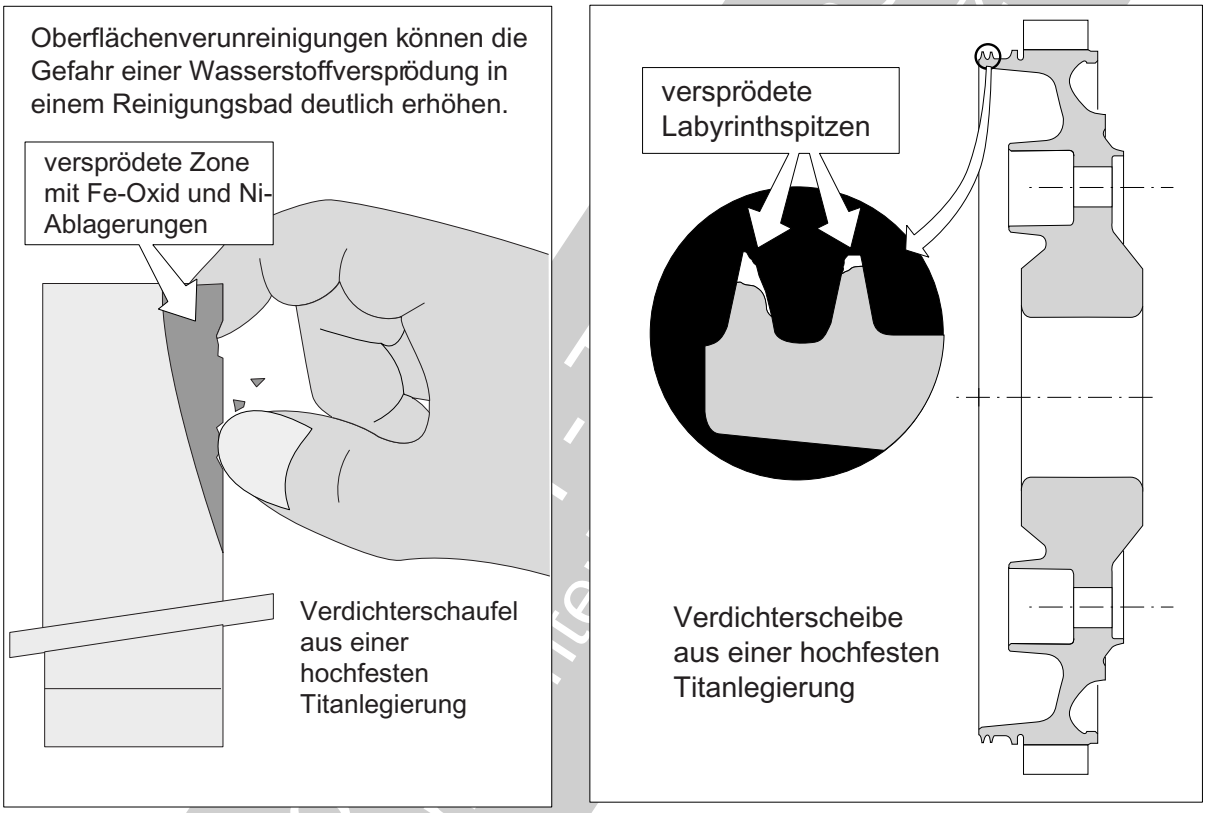


Bild 12.2.1.7-9

Titanwerkstoffs *bei der relativ hohen Badtemperatur von 130°C. Versuche haben gezeigt: Werden die anhaftenden Partikel in einem Salpetersäurebad (HNO_3) abgelöst, wirkt das nachfolgende Reinigungsbad nicht versprödend.*

Bild 12.2.1.7-10: *Für das Ätzen von* ***Superlegierungen*** *sind* ***äußerst aggressive Mittel*** *notwendig.* ***Abweichende Prozessparameter*** *wie Überzeiten oder Verunreinigung des Bades können einen gefährlichen* ***rissartigen Angriff (interkristalline Korrosion = IK)*** *auslösen. Damit fällt die Schwingfestigkeit gefährlich ab.*

Im oberen Rahmen ist ein Fall dargestellt, bei dem auffiel, dass die Teile beim Anklopfen ***nicht metallisch klangen, sondern nur ein dumpfes Geräusch*** *abgaben. Die metallografische Untersuchung ließ einen extremen Korngrenzenangriff erkennen, der dämpfend wirkte.*

Der mittlere Rahmen zeigt einen Fall an neuen Turbinenrotorschaufeln, die ***im Inneren*** *einen starken Korrosionsangriff erkennen ließen. Besonders betroffen war der* ***Bereich um Risse*** *zwischen den Prallluftbohrungen. Möglicherweise entstanden die Risse bei einer Wärmebehandlung und haben die schützende Oxidschicht zerstört. So konnte das Ätzmittel unerwartet stark angreifen.*

Der untere Rahmen zeigt eine Turbinenschaufel die nach einem Ätzprozess eine ***ungewohnt raue Oberfläche*** *aufwies. Es handelte sich um* ***herausgefallene Körner („Kornzerfall“)****, deren Korngrenzen vom Ätzbad aufgelöst wurden.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

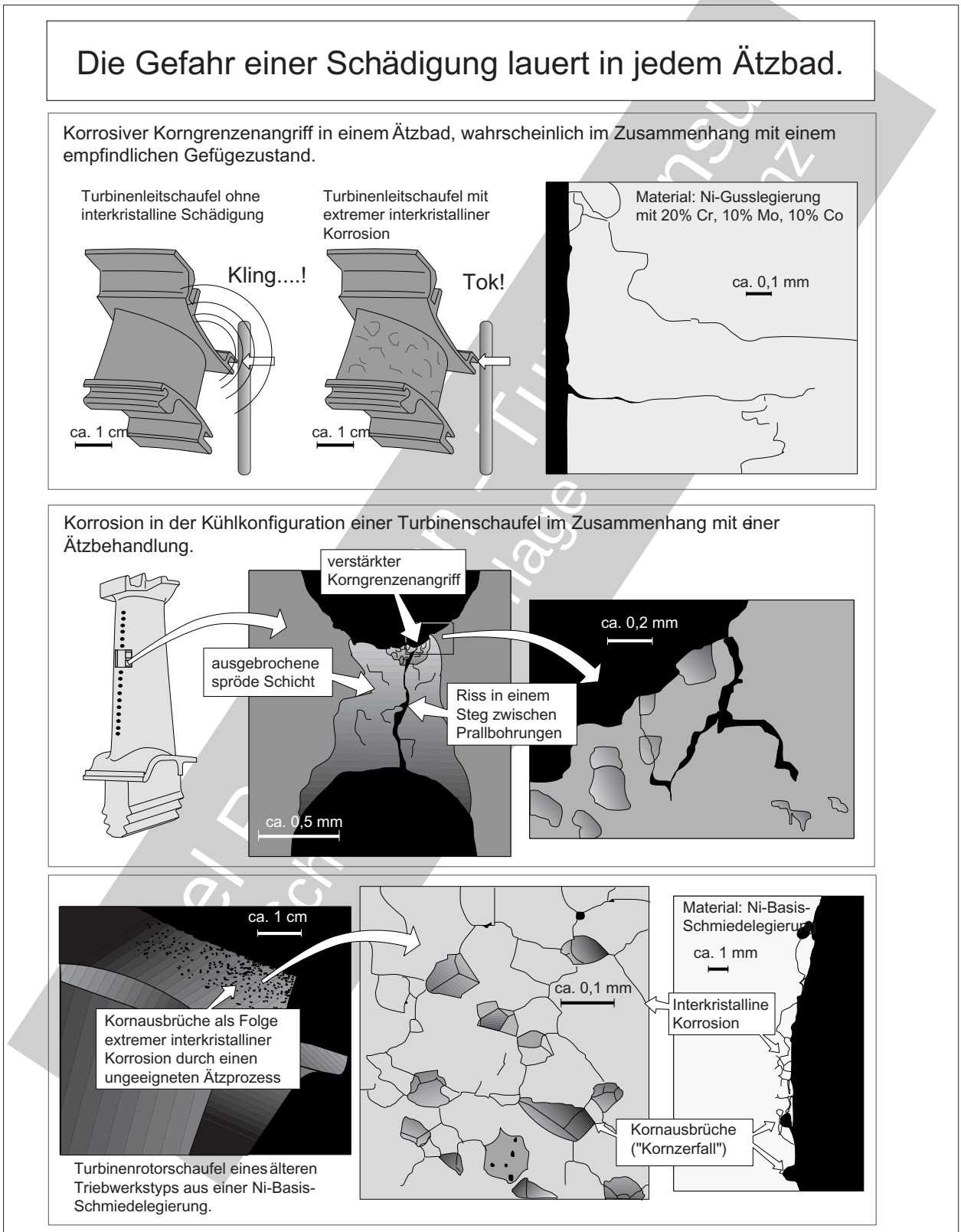


Bild 12.2.1.7-10

Bildbeschreibung siehe vorhergehende Seite

Abhilfen gegen Probleme und Schäden in Bädern zum Reinigen, Ätzen und Spülen

© Verlag Flugbuchconsult
alle Rechte vorbehalten mit Lizenz

Grundsätzlich gilt, wie auch bei anderen Fertigungsprozessen, dass dem Einsatz von Prozessbädern, soweit sie nicht vom Lizenzgeber vorgegeben und genau spezifiziert sind, eine ausreichend bauteilrelevante Erprobung vorauszugehen hat. Dabei sind z.B. zu erwartende Abweichungen im Oberflächenzustand und im Werkstoff (Bild 12.2.1.7-7) sowie Serienbedingungen (Anlagen, Zahl der Bauteile usw.) zu berücksichtigen. Werden diese optimalen, festgeschriebenen Prozessdaten während der gesamten Badlebensdauer eingehalten, lassen sich die hohen Sicherheitsanforderungen des Flugtriebwerksbaus erfüllen.

Hierzu gehört, dass Alterungsveränderungen und Verschmutzungen im Bad in den zulässigen Grenzen gehalten werden.

Einer möglichen **Verschleppung von Verunreinigungen** (Bild 12.2.1.7-2 und Bild 12.2.1.7-3) über die Bäder ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Solche Verunreinigungen können in nachfolgenden Fertigungsschritten Schäden und Probleme auslösen.

Von großer Bedeutung für die schadensfreie Badbehandlung ist die Erfahrung und Fachkunde des Personals. Dazu gehört das Registrieren eines ungewöhnlichen Aussehens der Teile oder Veränderungen des Bads als Indizien für Probleme (Bild 12.2.1.7-12). So wird eine wichtige Voraussetzung geschaffen, um frühzeitig Schäden zu verhindern und Maßnahmen einzuleiten.

Nicht zuletzt hängt die Sicherheit einer Badbehandlung vom Konstrukteur und der Arbeitsvorbereitung ab. Dazu sollten die wichtigsten Probleme der Verfahren bekannt sein.

Bestehen Bauteile aus **mehreren Werkstoffen**, z.B. auf Grund einer Beschichtung oder Lötung, erhöhen sich die Schädigungsmöglichkeiten auf Grund einer **Elementbildung** oder unterschiedlichem Werkstoffverhalten (Bild 12.2.1.7-11). Die Anwendung potenziell schädigender Verfahren (Bild 12.2.1.7-8), insbesondere an ungünstig zu schützenden und/oder zu prüfenden Bauteilzonen wie im Inneren von Turbinenschaufeln (Bild 12.2.1.7-10), ist nach Möglichkeit zu vermeiden.

Bäder die mit Stromdurchgang arbeiten erfordern an der **Kontaktierung der Werkstücke** besondere Aufmerksamkeit. Die Art der Kontaktierung muss in jedem Detail den Forderungen der Vorschriften entsprechen (siehe auch Bild 12.2.1.8.3-6). Veränderungen wie **Verschleiß oder die Beschädigung** von Isolierungen sind unzulässig. Andernfalls besteht an hochbeanspruchten Bauteilzonen die Gefahr einer gefährlichen Werkstoffschädigung durch Funkenbildung (Band 4, Bild 18.6-10). Aufhängungen und/oder Kontakte sind gegebenenfalls zu entwickeln und ihre Unbedenklichkeit in bauteil- und serienrelevanten Versuchen nachzuweisen.

Natürlich sind die **erschwerten Bedingungen späterer Reparaturprozesse** zu berücksichtigen. Ein teures Bauteil, das mit akzeptablem Aufwand nicht reparierbar ist, stellt für den Betreiber ein hohes Kostenrisiko dar. Das kann in die Entscheidung für die Beschaffung eines Triebwerks eingehen.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Das Ätzen von Werkstoffkombinationen birgt erhöhte Risiken und sollte nach Möglichkeit vermieden werden.

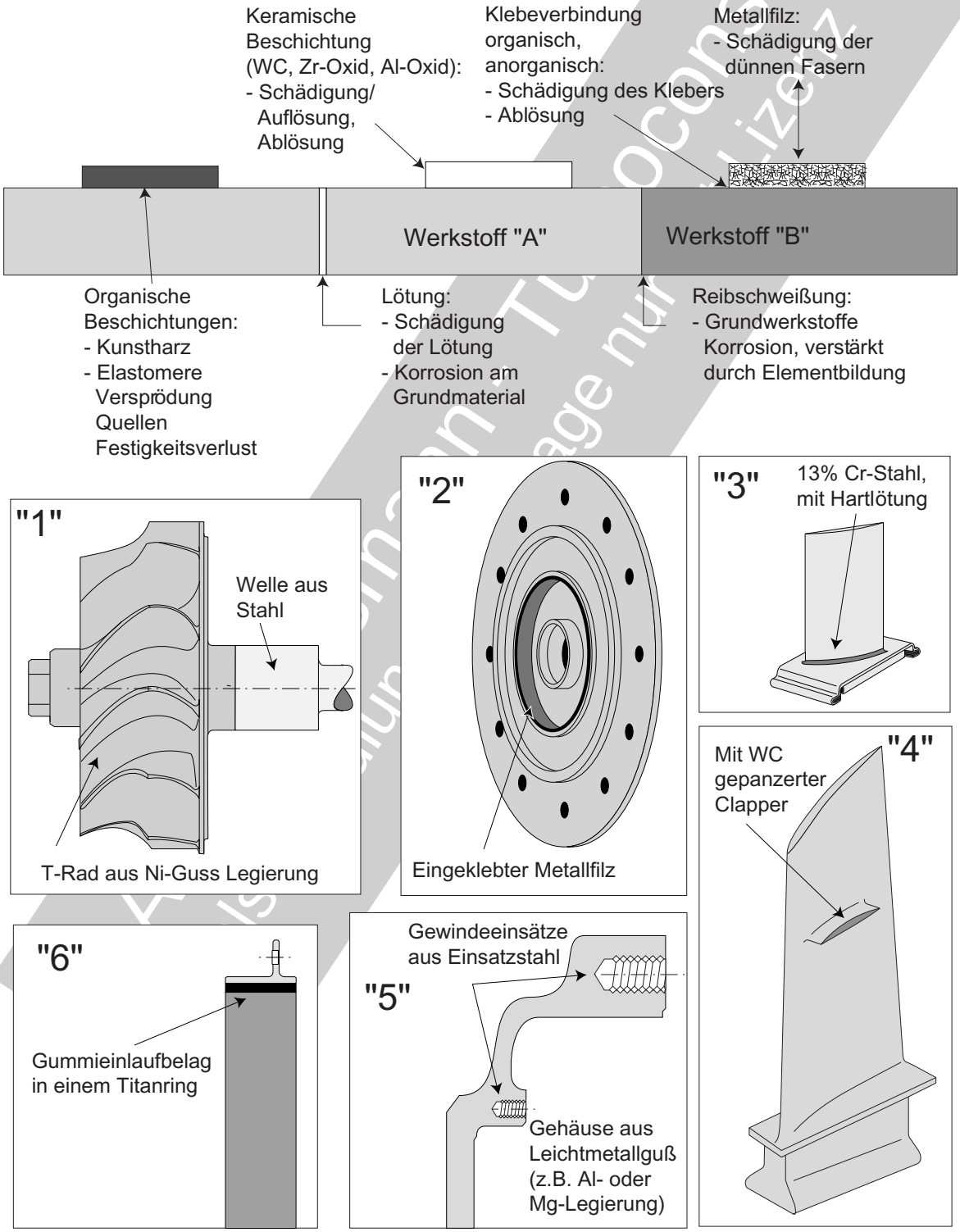


Bild 12.2.1.7-11

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Bild 12.2.1.7-11: *Bauteile mit* ***Werkstoffkombinationen*** *stellen erhöhte Anforderungen an Entwicklung und Einsatz von Prozessbädern. Solche Kombinationen können sehr unterschiedlicher Art sein und auf verschiedene Weise entstehen (Skizze oben).*

Unterschiedliche verschweißte Werkstoffe („1“)*: Wird z.B. ein Turbinenrad aus einer* ***Ni-Gusslegierung mit einer Welle aus Vergütungsstahl*** *verschweißt, dürfte auf Grund der unterschiedlichen chemischen Beständigkeit und einer Elementbildung die Anwendung von Ätzbädern eingeschränkt sein. Gegebenenfalls sind Abdeckungen vorzusehen. Auch bei Zwischenlagerungen im Fertigungsprozess ist auf Korrosionseinflüsse (Badspritzer, Schwitzwasser) besonders zu achten (z.B. durch geeignete Transportbehälter und Abdeckungen).*

Klebeverbindungen („2“) *unterscheiden sich gravierend vom metallischen Grundwerkstoff. Wird die Klebeverbindung eines porösen Metallfilzes beim Kontakt mit einem Bad geschädigt, ist mit einer Ablösung, spätestens unter Betriebsbedingungen, zu rechnen. Eine solche Schädigung ist ohne deutliche Ablösung zerstörungsfrei unter Serienbedingungen kaum nachzuweisen. Die Folge sind umfangreiche Schäden (Bild 12.2.1.5-7).*

Hartlötung an Verdichterleitschaufeln aus 13% Cr-Stahl („3“)*: Die verwendeten Hartlote auf Kupfer- oder Silber-Basis bilden mit dem Grundwerkstoff ein galvanisches Element. Ungeeignete Bäder oder Wasser- und Badspritzer können zum verstärkten Korrosionsangriff am Lotübergang führen. (Bild 12.2.1.4-17)*

Verschleißschutzschichten aus Wolframkarbid *in einer Kobaltmatrix (****„4“****) wie sie für Anlageflächen von Titanbauteilen angewendet werden, können erfahrungsgemäß von ungeeigneten Bädern bis zum vollständigen Abtrag geschädigt werden. Leider ist der genaue Schadensablauf offenbar noch nicht verstanden und ursächliche Bäder nicht bekannt geworden.*

Gehäuse aus Leichtmetalllegierungen *(Al, Mg) werden mit Einsätzen aus Stahl versehen. Es handelt sich um Vergütungsstähle für Gewindeeinsätze, Stehbolzen und Lagerträger sowie Cr-Ni-Stähle für eingegossene Ölleitungen. Gewindeeinsätze können zusätzlich eine Silberbeschichtung für ein besseres Gleitverhalten aufweisen. Solche Kombinationen neigen zur Elementbildung. In erster Linie sind die Leichtmetalle (meist Gussteile) und martensitischen Stähle gefährdet. Die* ***Entfernung der lösbaren Einsätze*** *und/oder eine geeignete* ***Abdeckung bzw. Abdichtung*** *sind übliche Abhilfen. Natürlich ist bei eng tolerierten Maßen besonders auf den Abtrag zu achten.*

Elastomere („6“) *sowie* ***gefüllte Einlaufbeläge aus Gummi*** *können von* ***ungeeigneten Bädern*** *und/oder bei zu* ***hohen Prozesstemperaturen*** *geschädigt werden. Je nach Belag und Bad kann* ***Quellen, Schrumpfen, Versprödern/Rissbildung oder Ablösen*** *auftreten. Manche Schädigungen sind nicht immer zerstörungsfrei erkennbar. Im* ***Zweifelsfall ist eine Erprobung der Bäder, vor der Serienanwendung*** *notwendig.*

Kugelgestrahlte Oberflächen *sollten nicht geätzt werden. Ein merklicher Abtrag kann die für eine hohe Schwingfestigkeit notwendigen Effekte (Verfestigung, Druckeigenspannungen) gefährlich abbauen (Bild 12.2.1.7-15).*

© Axel Bossmann - Turbosoft
Lehrgangsunterlagen Triebwerk

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Bild 12.2.1.7-12: *Weil etliche Schädigungsarten in Prozessbädern wie* ***Ätz- oder Spülbädern*** *unter Serienbedingungen nicht oder nur schwer zu erkennen sind (Versprödungen durch Alterung oder Wasserstoffaufnahme, Korngrenzenangriff, Schädigung von Klebeverbindungen) ist* ***erfahrenes Personal*** *für Bedienung und Überwachung der Prozessbäder von besonderer Bedeutung. Aber selbst wenn eine Schädigung erkannt wird, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass der Schaden an dem meist weitgehend fertig gestellten Bauteil hohe Kosten verursacht.*
Ein wichtiger Hinweis auf eine möglicherweise unzulässige Auswirkung des Bades auf das Bauteil können Veränderungen am Werkstück/ Bauteil selbst und/oder am Bad sein. Es handelt sich um ***Abweichungen vom üblichen, „normalen" Aussehen*** *des Bauteils oder des Bades. Sie zu erkennen erfordert ausreichend* ***Erfahrung****. Voraussetzung ist die* ***Kenntnis des „normalen" Zustands****. Derartige Merkmale müssen selbst keinen negativen Einfluss auf das Bauteil haben. Sind die Veränderungen nicht bereits in ihren Auswirkungen als unbedenklich eingestuft und die Entstehungsursache bekannt, sind* ***zuständige Fachabteilungen zu konsultieren****.*

Typische Veränderungen am Bauteil:

Zunächst ist darauf zu achten wie die ***Oberfläche des Bauteils beschaffen ist, bevor es in ein Bad getaucht wird****. Hinweise auf Verunreinigungen wie* ***Verfärbungen, Schlieren oder anhaftende Partikel*** *sind ernst zu nehmen. Für die jeweilige Badbehandlung muss das Bauteil gegebenenfalls den* ***optimalen (spezifizierten) Oberflächenzustand*** *aufweisen als Voraussetzung für die Reproduzierbarkeit bzw. die Stabilität des Prozesses.*
Zeigt ein Bauteil ein ***ungewöhnliches Benetzungsverhalten*** *ist davon auszugehen, dass die Wirkung eines Ätzbades beeinträchtigt werden kann. Treten* ***Benetzungsprobleme in Reinigungs- und Spülbädern*** *auf, kann es sich um einen Hinweis auf Verunreinigungen wie* ***Silikonverbindungen*** *handeln. In diesem Fall besteht die Gefahr der* ***Verschleppung auf andere Bauteile*** *über das betroffene Bad. Umfangreiche Nacharbeiten, z.B. vor* ***Eindringprüfungen****, können so ausgelöst werden.*

- ***Verfärbungen****: Solange es sich an* ***Titanbauteilen*** *um metallisch glänzende Blau- und Gelbtöne handelt, sind* ***Anlauffarben*** *lediglich als eine optische Veränderung einzuschätzen. Sie sind kein Beweis für hohe Bauteiltemperaturen wie man sie z.B. von Stählen kennt. Ursache sind chemisch bedingte, dünnste, selbst unschädliche Oberflächenschichten. Sie können jedoch auf eine* ***veränderte Reaktivität der Oberfläche oder bestimmte Verunreinigungen*** *hinweisen.*
Ungewöhnliche Anlauffarben, die bereits bei leichter Erwärmung nach einer Badbehandlung auffallen, können ein Hinweis auf Stabilitätsmängel der Badbehandlung sein.

- Wahrscheinlich ist im Bereich einer ***Schliere*** *die Wirkung des Bads gegenüber der Umgebung verändert. Diese kann je nach Art der* ***Verunreinigung*** *verstärkt oder vermindert sein. Beispielsweise dürften bereits vorhandene flüssige Verunreinigungen (z.B. Fette oder Öle) die Badwirkung behindern. Schlieren können auch Oberflächenbereiche anzeigen, an denen im Bad* ***unterschiedliche Strömungsbedingungen*** *vorliegen. Solche Veränderungen sind besonders beim* ***Seigerungsätzen*** *störend, weil sie den Prüfbefund verändern.*
Blasenspuren *können ähnliche Effekte wie Schlieren hervorrufen. Auch sie verändern örtlich den Kontakt des Bads zur Oberfläche.*

Oberflächenglanz*: Verändert sich der Glanz der Oberfläche eines Bauteils, z.B. in Form eines* ***ungewöhnlich matten Aussehens,*** *ist dies ein Indiz für eine veränderte Badwirkung. Eine matte Oberfläche weist eher auf einen Angriff hin, der aber nicht zwangsläufig schädigend sein muss. Umgekehrt ist ein* ***blankes Ausse-***

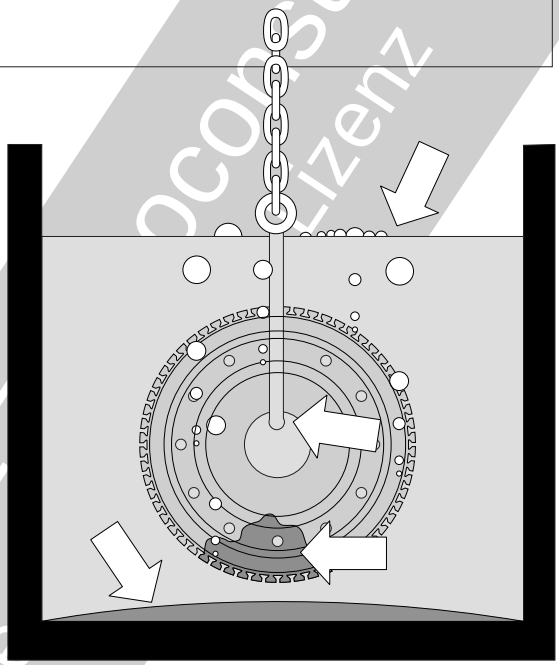
© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Nicht jedes Bad ist "gesund". Ungewöhnliche Veränderungen charakteristischer Merkmale sind Alarmzeichen.

charakteristische Bauteilmerkmale:

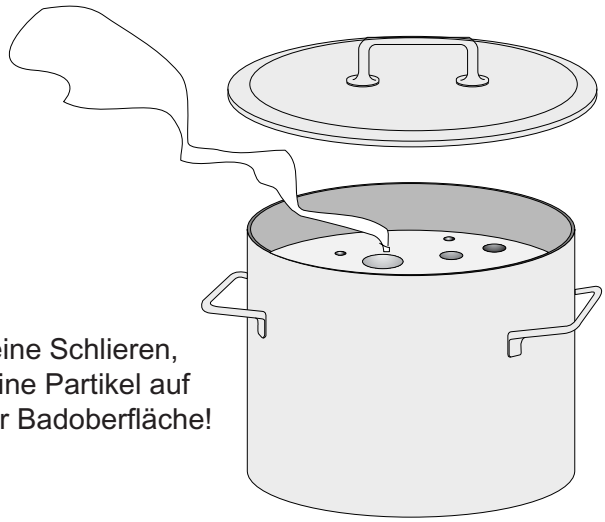
- Verfärbungen, Schlieren
- Oberflächenaussehen z.B. matt oder glänzend
- anhaftende Beläge
- Überhitzungsanzeichen und Verschleiß an elektrischen Kontaktstellen und Auflagen.



charakteristische Badmerkmale:

- Blasenbildung, Schaum
- Verfärbung, Trübung
- Reaktionszeiten/Abtrag
- Ablagerungen/Schlamm
- Auf der Oberfläche schwimmende Fremdstoffe

Das Aussehen eines Reinigungsbads sollte sich deutlich von dem einer fetten Suppe unterscheiden!



Keine Schlieren, keine Partikel auf der Badoberfläche!

Bild 12.2.1.7-12

***hen**, wenn ein mattes erwartet wird, ein Hinweis auf ungenügende Badwirkung.*
*Ein ungewöhnliches Aussehen der Oberfläche kann mit einer Alterung oder Verschmutzung des Bades in Zusammenhang stehen. Es kann sich aber auch um einen Hinweis auf einen **veränderten Grundwerkstoff** bis hin zu einer **Werkstoffverwechslung** handeln. In jedem Fall ist zu prüfen, ob sich hinter solchen Veränderungen nicht Schädigungen, z.B. eine **interkristalline Korrosion** (IK, Bild 12.2.1.7-*

© Axel Rothmann - Technoconsult als Schutzmarke Lizenz

5, Band 1, Bild 5.6-2 und Bild 5.6.1.1-4), verbergen.

*Veränderungen an **Auflagen von Befestigungen und Stromkontakten**: Zeigen sich hier kleinste ungewöhnliche Veränderungen ist die **zuständige Fachabteilung für eine Bewertung** hinzuzuziehen. Ein besonderes Augenmerk ist auf die **Innenseite von Bohrungen** zu richten. Diese Flächen repräsentieren hoch belastete Kerbstellen, die auf kleine Fehlstellen sehr empfindlich reagieren (Band 4, Bild 18.6-10). Kleinste Anzeichen von **Überhitzung und/oder Funkenbildung** sind bereits alarmierend (Band 4, Bild 18.6-10). Ihre äußeren Merkmale sind **Anlauffarben**, kleine **Krater** (Band 4, Bild 18.6-7) und sich abzeichnende **Gefügeveränderungen** (in einem Ätzbad).*

*An Bauteilen aus Bädern mit **Ultraschallanregung** ist auf mögliche **Schädigungen an Berührungsflächen** zwischen den Bauteilen oder Bauteilen und Vorrichtungen (z.B. Körben) zu achten. Natürlich sind diese Vorrichtungen gegebenenfalls vor einer Serieneinführung für den jeweiligen Fall zu konzipieren und geeignet versuchstechnisch zu prüfen.*

Charakteristische Badmerkmale:

***Blasenbildung und/oder Schaum:** Stärke, zeitlicher Ablauf und Verteilung am Bauteil sind erkennbare Merkmale.*
*Lässt sich eine **Badverwechslung oder Teileverwechslung** (Werkstoffverwechslung) ausschließen, dürften ungewöhnliche Erscheinungen auf eine **veränderte Aktivität der Bauteiloberfläche und/oder des Bades** hinweisen. Teileverwechslungen werden von Situationen wie Bauteilserien mit geänderten Werkstoffen/ Beschichtungen aber gleichem Aussehen begünstigt.*
*Die erhöhte Aggressivität eines Ätzbads kann zu unerwartet starkem Abtrag und selektiven Anfressungen (Kornflächen, Korngrenzen) führen. **Gealterte Ätzbäder, insbesondere wenn eine nachlassende Wirkung durch längere Verweilzeiten ausgeglichen werden soll,** können ihren Abtrag auf leichter auflösbare Korngrenzen (z.B. bei Ni-Schmiedelegierungen) konzentrieren und damit ebenfalls **interkristalline Korrosion** hervorrufen. **Anhaftende Blasen (Reaktionsgas, Luft)** decken die Bauteiloberfläche ab und können so die erwünschte Wirkung verhindern.*

***Verfärbungen und/oder Trübungen der Badflüssigkeit** sind ein Indiz für **Verunreinigungen oder Alterung** und damit einer Änderung der Badeigenschaften. Ist das Badaussehen ungewöhnlich, ist eine geeignete Badanalyse durchzuführen, um ein Abdriften außerhalb der Spezifikationsgrenzen zu verhindern.*

***Reaktionszeiten und -intensität** können gegebenenfalls am **Einsetzen einer Blasenbildung** abgeschätzt werden. Veränderungen kann ein eventuell **kontinuierlich überwachter Strom- und/oder Spannungsverlauf** bei Bädern aufzeigen. Auch die Tendenz des Abtrags über mehrere Serien ist ebenfalls eine Chance, Veränderungen rechtzeitig zu erkennen.*

***Ablagerungen (Schlamm)** am Wannenboden sind ein Hinweis auf mögliche Badalterung.*

***Schwimmen auf der Badoberfläche Fremdstoffe,** besteht die Gefahr der Verschleppung auf weitere Bauteile (Bild 12.2.1.7-2 und Bild 12.2.1.7-3). Solche Verunreinigungen zeigen sich gelegentlich in Form von **Schlieren** auf der Badoberfläche (Skizze unten) die auch schillern können. Bis zu „Fettaugen“ sollte es sowieso nicht kommen. Damit können nachfolgende Fertigungsschritte und die Qualitätssicherung empfindlich betroffen sein.*

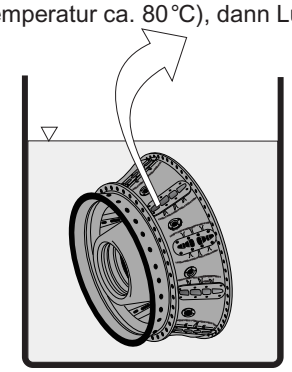
© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Die Trocknung von Bauteilen ist ein wichtiger, oft unterschätzter Fertigungsprozess.

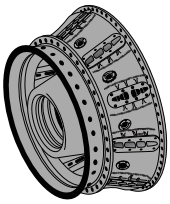
Trocknungsprozesse und ihre Probleme

Aufheizung im heißen Spülbad, (Temperatur ca. 80 °C), dann Luft



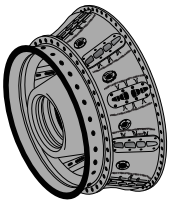
Verunreinigung des Wassers: "Wasserflecken".
Zu kurze Verweilzeit,
Zu niedrige Temperatur
Wasser bleibt in Hohlräumen, Spalten, Poren und Rissen

Im Ofen
Temperatur ca. 130 °C
Zeit > 30 Min



Zu kurze Verweilzeit
Zu niedrige Temperatur

Im Vakuum,
Temperatur ca. 110 °C
Vakuum ca. 15 mb



Während des Druckabfalls Gefahr der Vereisung dünner Querschnitte bei zu kurzer Verweilzeit.
Grund: keine Konvektion, kaum Strahlung.

Zu lange Zeit und/oder ungeeignete Lagerung zwischen Trocknung und anschließendem Folgeprozess.
- Schwitzwasserbildung
- Erneute Befeuchtung, z.B. bei Lagerung im Regen

Beispiele für den schädigenden Einfluss der unzureichenden Trocknung auf den nachfolgenden Fertigungsprozess.
- Schweißen
  Wasserstoffversprödung
  Fehlstellen beim EB-Schweißen (Vakuum)
- Eindringprüfung weniger empfindlich
- Beschichtung
  Haftfestigkeit und Festigkeitseigenschaften von Elastomeren und Kunstharzen
  Beeinflussung von Beschichtungen im Vakuum (Oxidation) oder reaktiven Gasen

Bild 12.2.1.7-13

Bild 12.2.1.7-13: *Die* ***Trocknung nach Reinigungs- und/oder Spülbädern kann großen Einfluss auf nachfolgende Fertigungsschritte haben*** *(siehe später folgende Ausführungen). Sie ist deshalb von nicht zu unterschätzender Bedeutung. Für die Trocknung eines Bauteils kommen in der Fertigung gewöhnlich drei Verfahren alternativ zur Anwendung (Rahmen oben):*

Erwärmung des Bauteils in einem heißen Spülbad und Trocknung nach dem Entnehmen*. Hier ist eine* ***ausreichende Trocknungs-***

zeit *zu gewährleisten, die auch für eventuelle* ***Wasseransammlungen in Spalten und Hohlräumen*** *(z.B. Bohrungen, Überlappungen an Schweißteilen) ausreicht.*
Die ***Verweilzeit zur Aufheizung*** *ist entsprechend der* ***Werkstückmasse*** *und den* ***Materialquerschnitten*** *einzustellen.* ***Mindestbadtemperatur*** *bzw.* ***Bauteiltemperatur*** *sind zu gewährleisten.*

Trocknungsvorgänge im Ofen *benötigen bauteilabhängig ebenfalls eine* ***Mindestverweilzeit und Mindesttemperatur****. Diese muss natürlich auch nach oben begrenzt sein, um Schädigungen, z.B. von Elastomeren (Einlaufbelägen) oder Klebeverbindungen auszuschließen .*

Erfolgt ein ***Trocknungsprozess im Vakuum,*** *ist mit einer ausreichenden Verweilzeit* ***eine Vereisung der Feuchtigkeit*** *zu vermeiden. Dieser auf den ersten Blick unerwartete Effekt beruht auf der Abkühlung beim Druckabfall, fehlender Konvektion und (bei der relativ niedrigen Temperatur) einer vernachlässigbaren Wärmestrahlung.*

Die ***Trocknung muss kurz vor dem Fertigungsschritt stattfinden*** *(mittlerer Rahmen) der das trockene Bauteil erfordert. Eine erneute Ablagerung von Feuchtigkeit (z.B. Schwitzwasser) sollte so mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen sein. Wie trocken ein Werkstück ist, hängt nicht zuletzt von den* ***Umgebungsbedingungen*** *wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und der Vermeidung von Spritzern ab.*

Wasserreste können bereits in sehr kleinen Mengen, wie in einem ***Schwitzwasserfilm,*** *Fertigungsprozesse beeinflussen und gefährliche Schädigungen der Bauteile hervorrufen. In erster Linie besteht die Gefahr einer* ***Wasserstoffversprödung beim Schweißen martensitischer Stähle.*** *Beispiele sind* ***Verdichtergehäuse*** *älterer Triebwerkstypen und* ***Turbinenaustrittsgehäuse*** *moderner Fantriebwerke (Bild 12.2.1.3-18).*

Wasser in Rissen *kann die Empfindlichkeit einer* ***Eindringprüfung beeinträchtigen****.*
Ein Wasserfilm kann den ***Aushärtungsprozess von Kunstharzen und Elastomeren*** *(Klebeverbindungen, Einlaufschichten) und damit deren Festigkeitseigenschaften und Haftfestigkeit beeinflussen.*
Feuchte Bauteile können einen Fertigungsprozess, der in einer abgeschlossenen Kammer stattfindet, empfindlich beeinträchtigen. Das gilt für Prozesse die eine hohe ***Vakuumqualität*** *(z.B. Elektronenstrahlschweißen, Wärmebehandlung) oder* ***Gasqualität*** *(Wärmebehandlung, Aufdampfverfahren) benötigen. Wird diese Forderung nicht erreicht, wozu bereits kleinste Wassermengen ausreichen, kann es zu verschiedensten verfahrensspezifischen Fehlern kommen (siehe hierzu auch Bild 12.2.1.3.1-18).*

Bild 12.2.1.7-14: *Martensitische Stähle (Einsatz-/Vergütungsstähle) und Titanlegierungen (Bild 12.2.1.7-9) können* ***in Ätzbädern*** *(Lit. 12.2.1.7-16) und* ***galvanischen Bädern*** *(z.B. Cr- und Ni-Beschichtungen)* ***Wasserstoff aufnehmen*** *der zu einer Versprödung führt. Bei* ***Titanlegierungen*** *handelt es sich um die Bildung spröder* ***Hydride****. Die gezeigten Diagramme gelten für Stähle. Diese Versprödung ist von Diffusionsvorgängen abhängig (Band 1, Kapitel 5.7). Sie zeigt sich* ***an gekerbten Proben unter statischer Last*** *in einer* ***deutlich verkürzten Lebensdauer****. Für den* ***Nachweis der Wasserstoffversprödung*** *bei Stählen ist eine Kurzzeitbelastung wie ein* ***Kerbschlagversuch ungeeignet****. Die Gefahr der Wasserstoffversprödung lässt sich mit einer Wärmebehandlung nach der suspekten Badbehandlung vermeiden. Diese Behandlung wird als* ***Entsprödung*** *bezeichnet, obwohl sie vorbeugend, also vor dem Auftreten der Versprödung durchgeführt werden muss. In der Literatur kann man auch den* ***missverständlichen Begriff Entgasung*** *finden. Ein solcher Vorgang ist, zumindest in Fällen bei denen eine gasdichte Schicht (z.B.*

© Axel Rossmann - Turbocon sult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Die Aufnahme von Wasserstoff bei Ätzvorgängen führt zu gefährlichen Veränderungen der Werkstoffeigenschaften. Das lässt sich mit geeigneten Maßnahmen vermeiden.

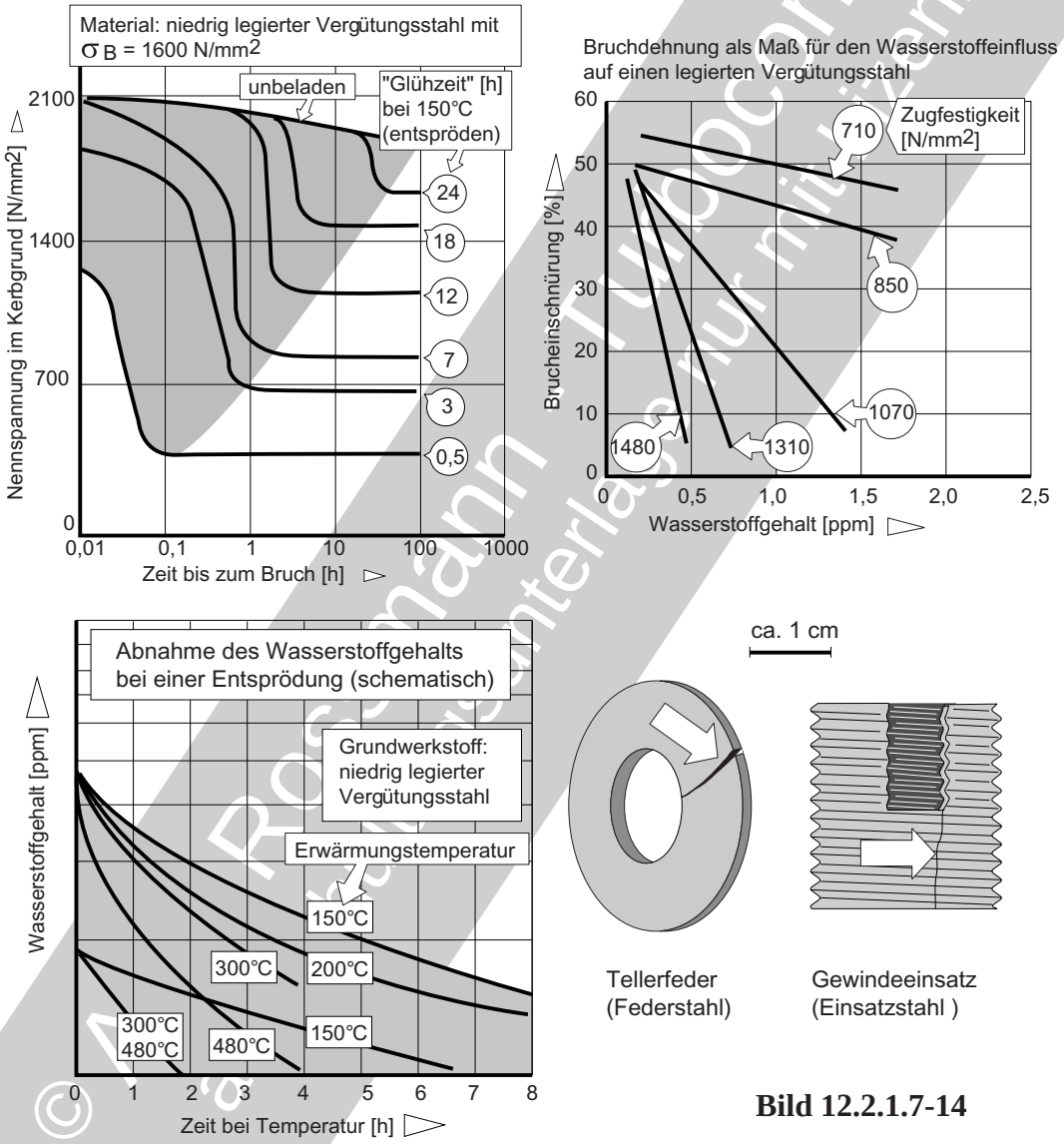


Bild 12.2.1.7-14

Cd) den Gasaustritt aus dem Grundmaterial verhindert, wenig plausibel. Dass beim Erwärmen trotzdem ein Entsprödungseffekt auftritt, wird mit einer günstigen Verteilung des Wasserstoffs und sog. irreversiblen Wasserstofffallen (engl. traps, Lit. 12.2.1.7-16) im Metallgitter erklärt. Diese verhindern die Beweglichkeit des Wasserstoffs im Gitter. So kann der Wasserstoff nicht zu Fehlstellen diffundieren und rekombinieren.

*Die **Mindesttemperatur** für eine wirksame Entsprödung ist 170°C (Diagramm unten). **Höhere Temperaturen sind sicherer** und anzustreben, wenn dies der **Vergütungszustand des Bauteils** zulässt. Die Zeiten sollten je nach Temperatur **mehrere Stunden betragen.***
*Auch die **Zeitspanne zwischen der Badbehandlung und der Entsprödung ist äußerst wichtig**. Sie sollte nur wenige Stunden dauern. Sonst besteht die Gefahr einer **irreversiblen***

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Schädigung *durch im Atomgitter gefangenen (engl. trapped) und/oder rekombinierten Wasserstoff. Ist also bereits eine Versprödung eingetreten, lässt sie sich mit der Wärmebehandlung nicht mehr „entschärfen“.*
Das Diagramm oben links zeigt die Wirkung der Zeit bei einer Temperatur von 150°C in Abhängigkeit von der Belastung auf die Lebensdauer von Kerbzugproben eines sehr hoch gehärteten, d.h. besonders empfindlichen Stahls. Selbst nach einer Zeit von 24 Stunden ist noch ein Versprödungseffekt erkennbar. Das bestätigt die Erfahrung, dass wirksame Temperaturen deutlich höher liegen sollten. Die Effektivität einer Entsprödung ist auch stark von der ***Beladung****, d.h. der Menge eindiffundierten Wasserstoffs abhängig. Dies zeigen die Kurven für 150°C und 480°C (Lit. 12.2.1.7-17).*
Das Diagramm links lässt erkennen, dass mit steigender Härte bzw. Festigkeit und Wasserstoffgehalt die Sprödigkeit größer wird. Die Erfahrung, mit hoch vergüteten bzw. gehärteten Bauteilen wie Schrauben (Lit. 12.2.1.7-16), Gewindeeinsätzen oder Federn bestätigt dieses Verhalten (Skizzen; siehe auch Band 1, Bild 5.7.2-1). Gerade ***hochfeste Stahlteile,*** *die sinnvollerweise im Betrieb entsprechend hoch belastet werden,* ***reagieren auf eine Wasserstoffversprödung besonders sensibel*** *.*

Merksatz:

Der Erfolg einer **Entsprödung** ist entscheidend von einem möglichst **kurzen Zeitraum** zwischen Wasserstoffaufnahme und Entsprödung abhängig. Der spezifizierte Zeitraum ist unbedingt einzuhalten.

Bild 12.2.1.7-15 *(Lit. 12.2.1.7-18 und Lit. 12.2.1-19): Das Triebwerk eines neuen zweimotorigen Verkehrsflugzeugtyps musste in drei Fällen* ***im Flug abgestellt*** *werden. Bereits ein Jahr früher traten ähnliche* ***Getriebeprobleme*** *auch an anderen Flugzeugvarianten und -typen auf. Eine AD-Note (Lufttüchtigkeitsanweisung) legt nahe, dass auch viermotorige Flugzeuge betroffen sind.*
Darauf fordert die US-Luftfahrtbehörde FAA in der AD-Note Inspektionen des Anbaugetriebes (Accessory Gearbox = AGB) an betroffenen Triebwerken. In einem Fall trat das Problem beim Abstieg zum Bestimmungsflughafen, in einem anderen während des Reiseflugs auf.
In beiden Fällen ***versagte die konische Welle vom Getriebe zum Starter-Generator****. Als Ursache werden Eigenspannungen auf Grund eines unzureichenden Kugelstrahleffekts angegeben. Sie werden auf die* ***Neuteilfertigung*** *zurückgeführt. Eine* ***Reinigungsätzung*** *mit einer* ***zu konzentrierten Säure*** *soll den erwünschten Kugelstrahleffekt gefährlich beeinflusst haben. Dadurch konnten Schwingbrüche entstehen.*
Als Abhilfe optimierte der Triebwerkshersteller den Fertigungsprozess.
Die Betreiber wurden angewiesen, jeden zweiten Tag die Magnetchipdetektoren auf Späneanfall zu kontrollieren. Bei ***abnormalem Späneanfall ist die Welle zum Starter-Generator zu tauschen****. Dazu müssen die Flugzeuge am Boden bleiben. Für jeden Tausch sind 12 Arbeitsstunden und Kosten in der Größenordnung eines kleineren PKW erforderlich. Auch ohne Späneanfall ist an den betroffenen 47 Flugzeugen ein Wellenaustausch vorzunehmen. Zuerst jeweils am linken und dann im Abstand von einem Monat am rechten Triebwerk.*

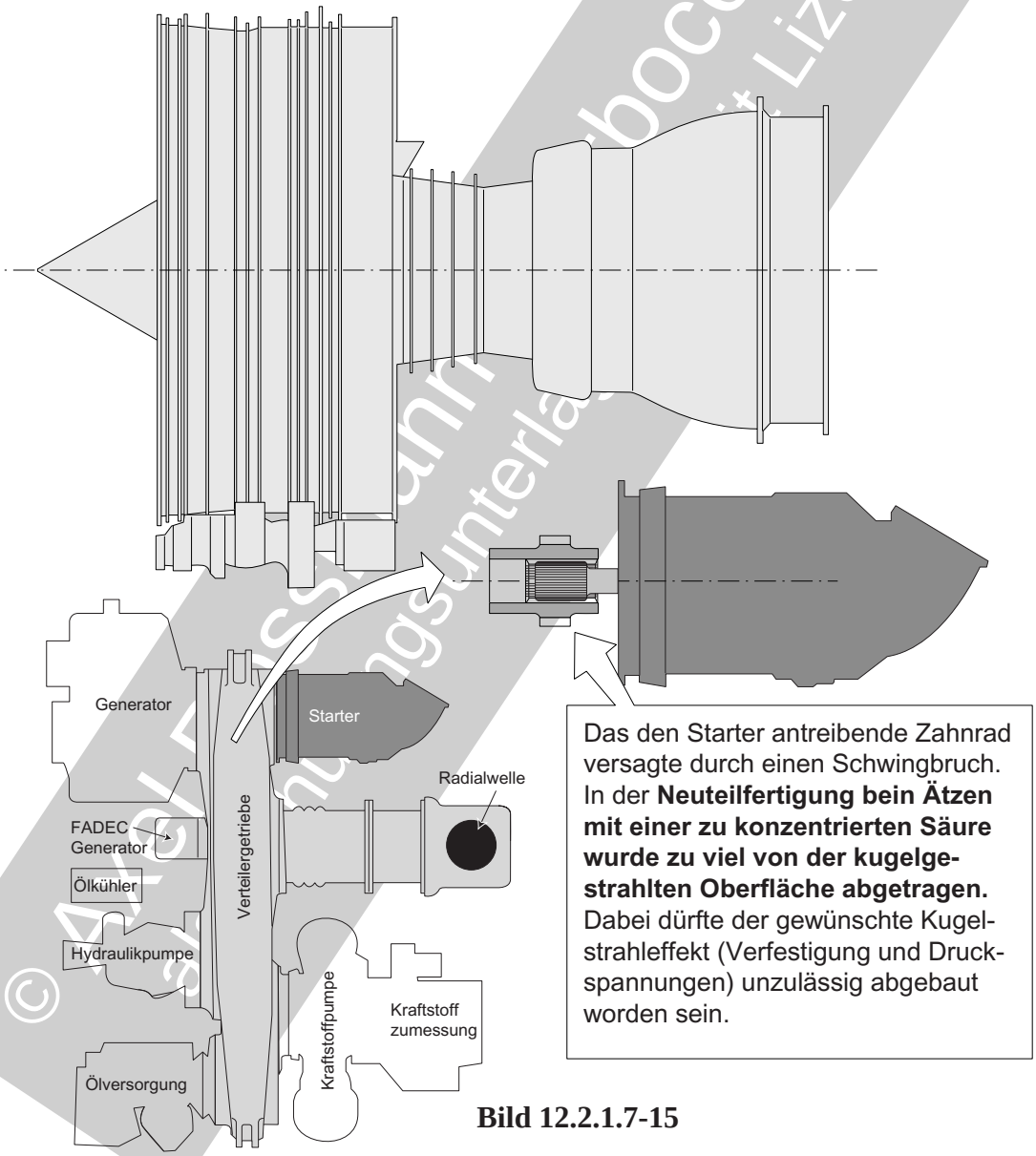
Kommentar*: Bei der Darstellung des Falls in der Presse stößt der Fachmann auf einige* ***Unstimmigkeiten****.*
Zunächst scheinen auch andere, ältere Flugzeugtypen und damit ***andere Triebwerksvarianten*** *betroffen zu sein. So stellt sich die*

el Rossmann - Turboconsult
chulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Bäder: Reinigen, Ätzen, Spülen

Zu starkes Ätzen kugelgestrahlter Oberflächen kann den erwünschten Strahleffekt gefährlich abbauen.

Nach zwei Triebwerksabschaltungen im Flug wegen eines Schadens im Verteilergetriebe müssen diese bei Späneanfall am Magnetchipdetektor getauscht werden. Dies erfordert einen erheblichem Aufwand (pro Stück entsprechend einem kleineren PKW),



Das den Starter antreibende Zahnrad versagte durch einen Schwingbruch. In der **Neuteilfertigung bein Ätzen mit einer zu konzentrierten Säure wurde zu viel von der kugelgestrahlten Oberfläche abgetragen.** Dabei dürfte der gewünschte Kugelstrahleffekt (Verfestigung und Druckspannungen) unzulässig abgebaut worden sein.

Bild 12.2.1.7-15

Frage ob es sich tatsächlich nur um die 47 Flugzeuge handelt. Aus den AD-Notes scheint hervorzugehen, dass es sich offenbar um Wellen mit unterschiedlichen Zähnezahlen handelt. Das spricht nicht für lediglich eine Variante des betroffenen Triebwerkstyps.

Auch bei der richtigen Säurekonzentration scheint derartig intensives Reinigungsätzen äußerst riskant. Um den ***Kugelstrahleffekt*** *(Druckspannungen, Verfestigung)* ***durch einen Ätzabtrag gefährlich abzubauen,*** *müsste die Oberfläche eigentlich auffällig verändert wor*

Literatur zu Kapitel 12.2.1.7

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

12.2.1.7-1 ASM „Metals Handbook“, „Volume 5- Surface engineering“, ISBN 0-87170-377-7, 1999, „Alkaline Cleaning“, „Solvent Cold Cleaning and Vapor Degreasing“, „Ultrasonic Cleaning“, „Acid Cleaning“, „Pickling and Descaling“, Seite 3-54, 707, 753-757, 835-838.

12.2.1.7-2 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 149,150, 242, 244, 254-260.

12.2.1.7-3 ASM „Metals Handbook Ninth Edition“, „Volume 11- Failure Analysis and Prevention“, ISBN 0-87170-007-7, 1986; B.E.Wilde„Stress-Corrosion Cracking“, Seite 203-224; C.D.Kim, „Hydrogen-Damage Failures“, Seite 223,224, 245-251.

12.2.1.7-4 W.N.Schmitz, „Selecting the ‘Best Buy’ Coating Removal Process“, Seite 1-11. (3558)

12.2.1.7-5 S.W.Kandebo, „GE Win Signals Entree Into F-15 Business“ , Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, April 29, 2002, Seite 27 und 30.

12.2.1.7-6 R.Völler, „Einflüsse des Kühlschmierstoffs beim Normal- und Hochgeschwindigkeitsschleifen“, Zeitschrift „Schmiertechnik und Tribologie“ 21. Jahrgang Nr 4, 1974, Seite 75-79.

12.2.1.7-7 A.Rossmann, „Rissbildung an galvanotechnisch behandelten Bauteilen, Teil A. Entstehung und Vermeidung von Rissen“, Zeitschrift „Metalloberfläche“ 35 (1981), 10 Seite 390 - 396.

12.2.1.7-8 W.N.Schmitz, „Selecting the ‘Best Buy’ Coatings Removal Process“, w.schmitz@flashtech-inc.com, 1997, Seite 1-11.

12.2.1.7-9 H.Simon, M.Thoma, K.Maier, „Dampfentfetten von Bauteilen aus Titanwerkstoffen mittels Trichloräthylen und Perchloräthylen“ Zeitschrift „Metalloberfläche“ 33-1979, 3 Seite 95-98.

12.2.1.7-10 H.Simon, „Oberflächenreaktionen an Titanwerkstoffen“, Zeitschrift „Metalloberfläche“ 5-1982, 10 Seite 211 - 217.

12.2.1.7-11 M.Thoma, „Hydrogen embrittlement and Stress Corrosion Cracking of Titanium Alloys Caused by Cleaning Processes“, SAE Technical Paper 850709, Proceedings des „21st Annual Airline Plating and Metal Finishing Forum“, Atlanta, Georgia, February 18-21, 1985.

12.2.1.7-12 H.Speckhardt, „Beitrag zur interkristallinen Korrosion rost- und säurebeständiger Stähle“, Zeitschrift „Metalloberfläche, Angewandte Elektrochemie“ 26-1972, Heft 8, Seite 851 - 290.

12.2.1.7-13 Titanium Metals Corporation (Timet), „Properties and Processing of TIMET Al6-4“, www.timet.com, Seite 1-6.

12.2.1.7-14 J.B. Cotton, „Stress Corrosion of Titanium Alloys“, Proceedings AGARD No. 1 der Konferenz „Stress Corrosion Cracking in Aircraft Structural Materials“, 1967, Seite VI-3 bis VI-17.

12.2.1.7-15 H.Simon, „Oberflächenbehandlung im Flugtriebwerkbau“, Zeitschrift „Metalloberfläche“ 30 (1976) 12, Seite 557-565.

12.2.1.7-16 K.H.Kloos, St.Beyer,, R.Landgrebe „Wasserstoffinduzierte Sprödbrüche bei Schraubenverbindungen- Ursachen, Einflüsse, Abhilfemaßnahmen“,“VDI Berichte Nr. 766“ (1989), Seite 211-242.

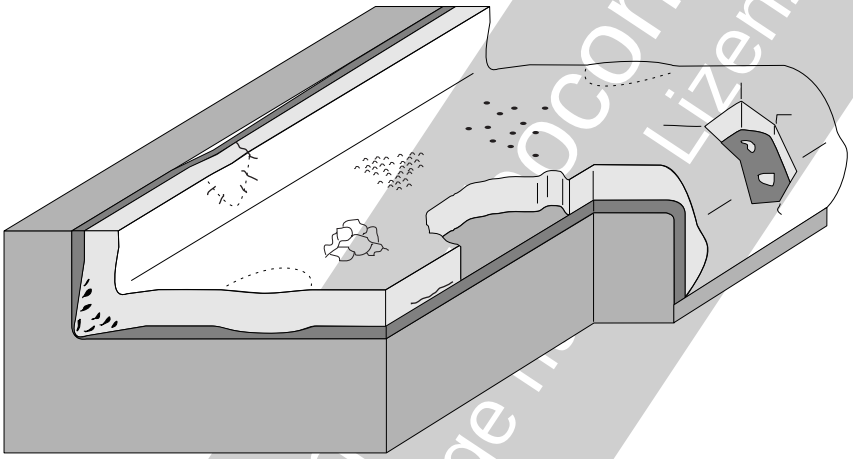
12.2.1.7-17 P.Bünger, H.Simon, „Elektroplattieren und stromlos Plattieren von Stählen hoher Festigkeit unter dem Aspekt ihrer Wasserstoffversprödung“, (1979).

12.2.1.7-18 „CFM-56-7 failures spark FAA action“, Zeitschrift „Flight International“, 8.-14. July, 1998, Seite 8.

12.2.1.7-19 Airworthiness Directive, AD/CFM56/11, 6/98 TX „Accessory and Transfer Gearbox Replacement“, 1998.

© Axel Rossmann - Turbocoursu
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.8 Beschichtungen



© Axel Rossmann Proconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Entsprechend den komplexen und hohen Betriebsbeanspruchungen kommen im Triebwerkbau eine Vielzahl **Beschichtungsverfahren bzw. Beschichtungen** zum Einsatz (siehe Erklärungen zur Anwendung auf den folgenden Seiten). Genügen Eigenschaften wie Korrosionsfestigkeit, Verschleißfestigkeit oder tribologisches Verhalten des Grundwerkstoffs den Betriebsanforderungen nicht zufriedenstellend, können Beschichtungen diesen Mangel beseitigen. Auch die Betriebsbelastung kann für bestimmte Bauteilzonen mit einer Beschichtung verringert werden. Ein typisches Beispiel sind Wärmedämmschichten, die statische und zyklische Temperaturen und Wärmespannungen absenken. Diese Eigenschaft lässt sich in einer Lebensdauerverlängerung oder bei erhöhten Gastemperaturen nutzen. In vielen Fällen wird nicht die gesamte Bauteiloberfläche beschichtet, sondern nur die in ihren Eigenschaften zu optimierende Bauteilzone. Ebenso geht man vor, wenn die Maximierung einer erwünschten Eigenschaft zulasten anderer geht. Beispielsweise ist eine Al-Diffusionsschicht als Oxidationsschutz für Turbinenrotorschaufeln unbedingt erforderlich. Wegen ihrer Sprödigkeit und damit einer Beeinträchtigung der LCF-Lebensdauer ist sie dagegen auf den Tannenbaumfüßen nicht zulässig. Deshalb müssen diese beim Beschichtungsprozess aufwändig abgedeckt werden.

Schichten und Anwendung im Maschinenbau.

kein Anspruch auf Vollständigkeit

Verfahren	Anwendungen											
	Gleitfläche	Reibfläche	Haftfläche	Oxidations-schutz	Korrosions-schutz	Verschleiß-schutz	Wärmeisolation	Reflexion Strahlungsschutz	Schwingungs-dämpfung	Anstreifen, Einlauf	Auflagefläche Transportfläche	Elektrische Isolation
Thermische Spritzschichten		■	■	■		■	■			■	■	
Lackierung				■								■
Aufkleben (Elastomere)									■		■	
Galvanisch und chemisch	■	■		■		■		■				
Aufschweißen, Panzern				■		■						
Emaillieren				■			■	■				
Aufdampfen (PVD), Sputtern						■						
Diffusion (Einsatz, Nitrieren, Al,Cr)	■	■		■	■	■						
Chemisch in Gasphase (CVD)				■								

Bild 12.2.1.8-0

© Axel Rossmann - Turbosonsu
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Häufig im Maschinenbau serienmäßig angewandten Beschichtungsverfahren (Lit. 16.2.1.8-6, Bild 12.2.1.8-0) sind:

Diffusionsschichten (Kapitel 12.2.1.8.1): Dringen in den Grundwerkstoff ein und erzeugen, wenn überhaupt, nur einen kleinen Auftrag. Zu dieser Schichtart gehört **Aufkohlen (Einsatzschichten)** bei Stählen, **Nitrieren**, **Alitieren** und **Inchromieren**. Die eindiffundierenden Elemente werden als **Gas** (CVD) oder in einer **Pulverschüttung,** bei der CVD-Prozesse über kurze Distanzen ablaufen können, der Werkstückoberfläche angeboten. Beim CVD zersetzt sich ein Gas an der Werkstückoberfläche. Eine Komponente diffundiert ein und/oder wird abgelagert, die andere ist gasförmig und wird abgezogen (Lit. 12.2.1.8-2).

Galvanische und chemische Verfahren: Siehe Kapitel 12.2.1.8.3.

Zu diesen Verfahren gehört auch das **Elektrische Oxidieren** (engl. **anodizing**). Es nutzt die Reaktion des Grundwerkstoffs mit einem Elektrolyten. Ein typischer Vertreter dieser Gattung sind sog. „**Eloxalschichten**“ auf Al-Legierungen und vergleichbare Schichten auf Mg-Legierungen. Sie dienen dem **Korrosionsschutz**. Auf Ti-Legierungen nutzt man solche Schichten zur Verbesserung des **Gleitverhaltens** (z.B. bei Schrauben). Ähnliche Oxidschichten lassen sich auch auf chemischem Weg herstellen.

Aufbringen von Kunstharzen, Lacken, Elastomeren: Siehe Kapitel 12.2.1.8.4.

CVD (Chemical Vapor Deposition) -Beschichten:
Dies ist ein Abscheiden von Feststoffen durch chemische Reaktionen in der Gasphase an der Bauteiloberfläche unter Bildung von konturgetreuen Diffusionszonen und Aufwachsschichten (heterogene Reaktion). Mit diesen Verfahren lassen sich sowohl metallische als auch nichtmetallische Schichten herstellen.

Diffusionsbeschichten: Siehe Kapitel 12.2.1.8.1.

Thermisches Spritzen: Siehe Kapitel 12.2.1.8.2

PVD (Physical Vapor Deposition)-Beschichten:
Es handelt sich um eine Erzeugung von Schichten durch Aufdampfen. Dabei kondensiert das verdampfte Beschichtungsmaterial (z. B. Al oder eine Keramik) an der kälteren Bauteiloberfläche. Es lassen sich je nach Art des Dampfes sowohl metallische als auch nichtmetallische Schichten (Lit.12.2.1.8-25) erzeugen.

Ionenplattieren:
Es handelt sich um ein ionengestütztes Beschichtungsverfahren, das sich aus der Bedampfungstechnik entwickelt hat. Die Beschichtung erfolgt über die Kondensation des Dampfes auf dem Substrat unter Einwirkung eines elektrischen Feldes auf Ionen eines Gases oder Dampfes. So lassen sich dichte, fest haftende Schichten erzeugen. Weitere Verfahren sind Bias-Zerstäuben, Plasmaplattieren und plasmagestützte, chemische Dampfabscheidung.Das Verfahren bietet sich für Verschleißschutzschichten an.

Sputtern:
Ionen schlagen aus dem elektrisch geladenen Target (Material für die Beschichtung) Atome heraus. Diese scheiden sich mit relativ hoher Energie auf dem Substrat ab. Dadurch erhält man eine gute Haftfestigkeit mit dem Substrat. Das Verfahren eignet sich besonders zur Abscheidung von nichtmetallischen Werkstoffen. Die Anwendung liegt bei Verschleißschutzschichten an Kontaktflächen wie den Auflageflächen der Schwalbenschwanzfüße von Verdichterschaufeln.

Emaillieren:
Durch Aufschmelzen von Glaspulver (Fritte) auf der erwärmten Bauteiloberfläche werden meist glatte dichte Schichten erzeugt. Das Glaspulver kann auf unterschiedliche Weise, z. B. in lackähnlicher Form, mit einem Binder mittels Tauchen oder Spritzen aufgebracht werden. Emaillieren kam an statischen Heißteilen wie Brennkammer- und Nachbrennerinnenwänden von Triebwerken der ersten Generation als Oxidationsschutz zur Anwendung. Diese Beschichtungen wurden von den höher thermisch belastbaren und besser isolierenden keramischen Wärmedämmschichten verdrängt. Damit das Email an oxidationsfesten Ni-Legierungen haftet, ist eine Oxidbildung notwendig. Diese Eigenschaft weisen besondere Hochtemperaturemails auf, die sich von Schmuckemail unterscheiden und auf Grund von Cr-Oxiden eine typische grüne Farbe zeigen.

©Axel Bossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 12.2.1.8-1: *Schichten beeinflussen das* ***Betriebsverhalten*** *und damit die Sicherheit eines Bauteils auf vielfältige Weise. Hierzu gehören:*
- Schwingfestigkeit
- Verschleiß,
- Oxidation
- Korrosion
- Wärmefluss
- zerstörungsfreie Prüfbarkeit

Vom Fertigungsprozess herrührende Abweichungen und Fehlstellen sind deshalb von großer Bedeutung. Im Bild sind Eigenschaften (Lit. 12.2.1.8-6), Probleme und Fehler, die das Betriebsverhalten von Schichten bestimmen, zusammengestellt. Jeder Schichttyp hat auch spezifische Probleme, Einflüsse und Fehler die zusammenwirken und die Schichteigenschaften bestimmen.

Schwingfestigkeit: *Zum einen geht es um die Schwingfestigkeit der Schicht selbst, und zum anderen um deren Einfluss auf die Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffs (Bild 12.2.1.8.2-5). Beschränkt sich die Betrachtung auf die Schwingfestigkeit der Schicht, handelt es sich bei* ***Ablösungen*** *in vielen Fällen um eine* ***LCF-Beanspruchung****. Diese kann in Form* ***zyklischer Flieh-*** *und/oder* ***Gaskräfte*** *auftreten, bei Heißteilen überwiegt häufig die* ***Thermoermüdung*** *(Band 1, Kapitel 5.4.2). Bei Wärmedämmschichten kommt als ein besonderer Einfluss die* ***Oxidbildung zwischen Schicht und Grundwerkstoff*** *hinzu (Lit. 12.2.1.8-25).*

Beispiele für LCF-beanspruchte Schichten sind Anstreifschichten auf ***Zwischenstufenringen*** *(Spacern), keramische* ***Panzerungen*** *auf* ***Labyrinth- und Schaufelspitzen*** *sowie* ***Wärmedämmschichten*** *auf Heißteilen. Diese Ablösung unter zyklischer Beanspruchung ist in hohem Maß von den im Beschichtungsprozess induzierten* ***Eigenspannungen der Schicht*** *abhängig. Kleine Abweichungen von den optimierten und erprobten Prozessparametern, insbesondere der Temperaturführung, können die* ***von einer Ablösung definierte Lebensdauer*** *der Schicht entscheidend verkürzen. Eigenspannungen sind auch von der Schichtstruktur, z.B. der Porosität oder erwünschten Rissen abhängig. Es handelt sich bei Wärmedämmschichten um sog.* ***Segmentierungsrisse*** *(Bild 12.2.1.8.2-3) oder in galvanisch abgeschiedenen Cr-Schichten um ein typisches* ***Rissnetzwerk*** *(Bild 12.2.1.8-3 und Bild 12.2.1.8.3-3). Diese Merkmale werden von den Prozessparametern bestimmt. Auch die Schichtdicke wirkt sich auf das Eigenspannungsniveau aus (Bild 12.2.1.8.3-3). Ungleichmäßige Schichtdicken können örtlich zu hohen Eigenspannungen und Abplatzungen führen. Ein weiterer wichtiger Einfluss ist die Haftfestigkeit die wiederum mit der Haftflächenvorbereitung, z.B. der Rauigkeit und Reaktivität eng zusammenhängt.*

Ist die ***Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffs*** *betroffen, können Schichten sehr unterschiedlich wirken.*

Bei ***LCF-Beanspruchung****, d.h. definitionsgemäß merklicher plastischer Verformung, ist in spröden Schichten mit Rissbildung zu rechnen. Ein Risswachstum von diesen Anrissen in den* ***Grundwerkstoff*** *lässt einen deutlichen Abfall der LCF-Festigkeit erwarten (Bild 12.2.1.8.3-9). Dieser Effekt wird mit der* ***Schichthärte*** *und der* ***Haftung*** *zum Grundwerkstoff ausgeprägter.*

Bei ***HCF-Beanspruchung****, d.h. nur wenig oberhalb der Dauerfestigkeit, können Schichten mit hohen* ***Druckeigenspannungen*** *und hoher Festigkeit (Härte) wie Einsatz- und Nitrierschichten die Schwingfestigkeit des Bauteils deutlich steigern. Schichten mit hohen* ***Zugeigenspannungen****, wie galvanische Cr-Schichten (Lit. 12.2.1.8-5) und Ni-Schichten (Bild 12.2.1.8.3-10) können dagegen die HCF-Festigkeit entscheidend absenken (Bild 12.2.1.8.3-2).*

Indirekt wird die Schwingfestigkeit von der ***FOD-Resistenz einer Schicht*** *beeinflusst. So kommt es auf Grund von Fertigungsabweichungen leichter zu Schichtrissen oder Abplatzern als Rissstartern in das Grundmaterial.*

© Axel Bossmann - Tutorenteil als Sammlung unterlagen zur Nutzung

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Verschleiß, tribologisches Verhalten: *Die Verschleißeigenschaften sind für Gleitflächen wie Anstreif- und Einlaufbeläge, Frettingschutz und Panzerungen von entscheidender Bedeutung. Sie stehen mit fertigungsbedingten Schichteigenschaften wie* ***Rauigkeit****,* ***„Reservoirwirkung“*** *(z.B. Risse in Cr-Schichten),* ***Schichtdicke*** *und* ***Porosität*** *(Größe, offen, geschlossen),* ***Zusammensetzung*** *(z.B. Ni/Grafit Einlaufschichten) in engem Zusammenhang. So können Abweichungen dieser Eigenschaften von den Spezifikationsforderungen die Betriebseigenschaften unzulässig verändern.*

Oxidation *an Heißteilen lässt sich mit* ***Diffusions- oder Auflageschichten*** *beherrschen. Die* ***Konzentration*** *und* ***Verteilung*** *der für die Schutzwirkung einer Diffusionsschicht wichtigen Elemente (meist Aluminium) spielen neben der* ***Schichtdicke*** *eine entscheidende Rolle (Bild 12.2.1.8.1-1).*
Auch die Eigenschaften thermischer Spritzschichten vom Typ MCrAlY sind entscheidend von den Prozessparametern abhängig. Handelt es sich um eine ***Haftschicht*** *(Zwischenschicht), richtet sich das Interesse auch auf eine geeignet hohe Rauigkeit.*
Bildet eine Schicht dagegen die Oberfläche eines umströmten Bauteils, ist eine möglichst niedrige Rauigkeit anzustreben.

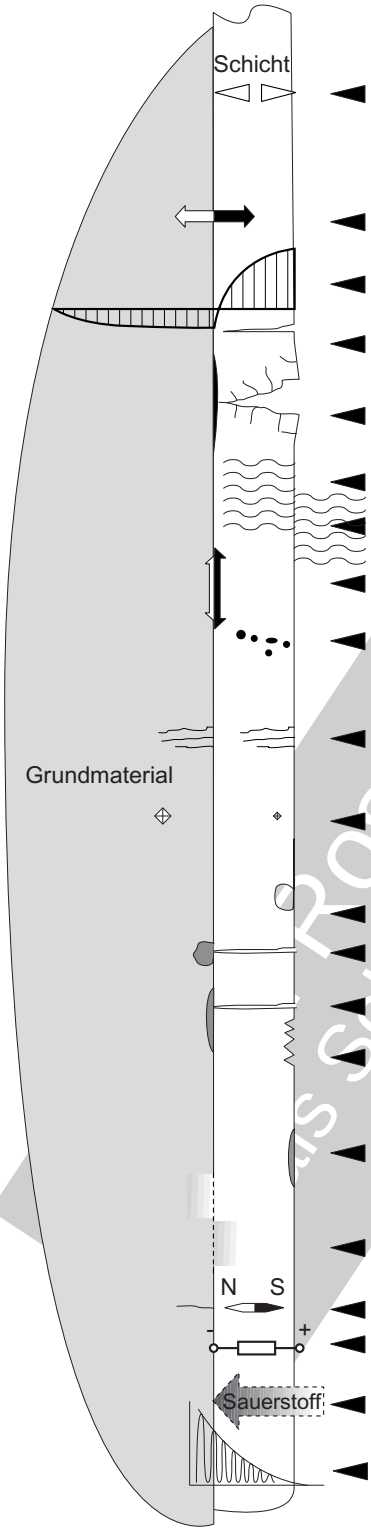
Korrosion: *Prozessbedingte Schichtbesonderheiten wie Porosität und Rissbildung spielen für das Korrosionsverhalten, besonders im Zusammenwirken mit dem Grundmaterial, eine wichtige Rolle (Bild 12.2.1.8-3).*

Wärmefluss: *Thermobarrieren (Wärmedämmschichten) ermöglichen mit ihrer Isolationswirkung ausreichende Heißteillebensdauern bei minimalem Kühllufteinsatz. Fertigungsbedingte Schichtfehler und Eigenschaftsabweichungen wie unerwünschte Porosität, Abplatzungen wegen fehlender Segmentierungsrisse (Lit. 12.2.1.8-25) und Eigenspannungen sowie Abweichungen in der Struktur können mit einer verschlechterten Isolierwirkung die Bauteilsicherheit entscheidend beeinträchtigen.*
In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass auch die Resistenz keramischer Beschichtungen gegen ***Titanfeuer eine optimale Porosität*** *erfordert.*

Zerstörungsfreie Prüfbarkeit: *Die Prüfbarkeit einer Schicht und des darunter liegenden Grundmaterials ist in hohem Maß von Schichteigenschaften abhängig. Der Einsatz magnetischer Rissprüfung hängt von den magnetischen Eigenschaften der Beschichtung ab. Die* ***unmagnetischen Cr-Schichten*** *(Bild 12.2.1.8-3) erfordern z.B. eine* ***Eindringprüfung****. Ausreichend dünne Cr-Schichten ermöglichen es, dass Risse in einem darunter liegenden magnetischen Stahl, von einer magnetischen Prüfung angezeigt werden.*
Viele Schichten sind nur sehr begrenzt zur Absicherung ausreichender Betriebseigenschaften zerstörungsfrei prüfbar. Hier bleibt nur die ***Qualitätssicherung über eine geeignete und ausreichend dokumentierte Prozesskontrolle****.*
Poröse Schichten *wie Einlaufschichten lassen eine Prüfung mit Ultraschall nicht zu.* ***Eindringprüfung*** *ist in wenigen Fällen sinnvoll. Speziell zum Auffinden von Schichtablösungen kommt die* ***Thermografie*** *zum Einsatz (Band 4, Bild 18.8-6).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
abschnittserlaeuterungen.de - Lizenz

Schichten beeinflussen auf vielfältige Weise das Bauteilverhalten.



	Auswirkungen auf das Bauteilverhalten (kein Anspruch auf Vollständigkeit!)
Schichtdicke,	Verschleißlebensdauer, Sprödigkeit, Eigenspannungen, Wärmedurchgang, FOD-Erosionsverhalten, Profile, Toleranzen
Haftfestigkeit	Abblättern, Risseinleitung in das Grundmaterial
Eigenspannungen	Schwingfestigkeit, Verzug, Haftfestigkeit
Festigkeit, Duktilität, Elastizität	Schwingfestigkeit, insbesondere LCF, Rissbildung bei statischer Überlastung FOD-Eigenschaften
Wärmeleitfähigkeit, Wärmedämmung Reflexion und Absorption von Strahlen Wärmedehnungsunterschiede	Heißteillebensdauer: Zeitstand/Kriechen, Thermoermüdung
Porosität	Reinigung, Rissprüfung, Reparatur, Verschleiß, Anstreif-/Einlaufeigenschaft Rissprüfung: Anwendbare Verfahren, Bewertung des Befunds, Korrosion des Grundwerkstoffs
Rissbildung Wasserstoffversprödung/SpRK Lötrissigkeit (LME)	Schwingfestigkeit, statische Festigkeit Schmierwirkung
Härte Härteunterschiede	Verhalten bei örtlicher Überlastung Neigung der Schicht zum Einbrechen bei FOD, Erosionsverhalten
Korrosionsverhalten	Verschleißeigenschaften, Erosion, Abrieb Tribologische Eigenschaften
Rauigkeit	Korrosionsempfindlichkeit, Elementbildung, Passivierung, Reparaturaufwand
Oxidation, thermische Beständigkeit	Reflexion, Wärmeübergang Strömungswiderstand, Haftfestigkeit bei weiterer Beschichtung Betriebslebensdauer der Heißteile
Diffusion und Elementverteilung	beeinflusst Oxidationsverhalten, Sprödigkeit
Magnetische Eigenschaften	Zerstörungsfreie Prüfung: magnetisch, Wirbelstrom
Elektrische Eigenschaften	
Diffusion von Sauerstoff	bei Wärmedämmschichten Haftflächenoxidation
Innere Dämpfung	Schwingungen

Bild 12.2.1.8-1

Bildbeschreibung siehe Seiten vorher

Rossmann - Turbo Consult
Das Schulungsunterlagen

© Axel Rossmann - Turbocoach
als Schulungsunterlage zur Nutzung

Bild 12.2.1.8-2. *(siehe auch Bild 12.2.1.8.2-8): In vielen Fällen ist die* ***Nachbehandlung einer Schicht*** *erforderlich, um gewünschte Eigenschaften zu erhalten. Solche Nachbehandlungen sind schichtspezifischer Bestandteil der spezifizierten Zeichnungsangaben. Diese werden von optimierten, nachgewiesenen bzw. erprobten Prozessparametern gewährleistet. Dabei verlässt man sich auf die Einhaltung dieser Vorgaben im Beschichtungsprozess.*

Glätten von Schichten: *Um minimale Rauigkeiten (z.B. an aerodynamisch wirksamen Flächen) oder bestimmte Oberflächenstrukturen zu erhalten (z.B. Ölfilmbildung an Gleitflächen) kann generell eine Nacharbeit notwendig werden. Eine solche Nacharbeit darf keine erwünschten Eigenschaften der Beschichtung beeinträchtigen. Ist z.B. eine ausreichende Rauigkeit der Panzerung einer Labyrinthspitze für einen Anstreifvorgang erforderlich, um einen guten Zerspanungseffekt zu erreichen (wenig Reibungswärme), darf die Schicht nicht mit einer Diamantfeile nachgearbeitet werden. Die Glättung einer weichen porösen Einlaufschicht (z.B. Metallfilz) in einem Gehäuse durch Verfestigung (z.B. Walzen) kann beim Anstreifen eine Schaufelspitze gefährlich überlasten (Überhitzung, Biegung, Schwingungen). Deshalb dürfen* ***Schichten geringer Festigkeit nur mit ausdrücklicher Genehmigung spanend (nach-) bearbeitet*** *werden. Zusätzlich besteht die Gefahr einer Überlastung mit* ***Rissbildung*** *(bei spröden Schichten) und/oder örtlicher* ***Ablösung****.*

Überschleifen von galvanischen Cr-Schichten *kann erfahrungsgemäß zur Rissbildung unter der Schicht im Grundmaterial führen (Bild 12.2.1.8-3).*

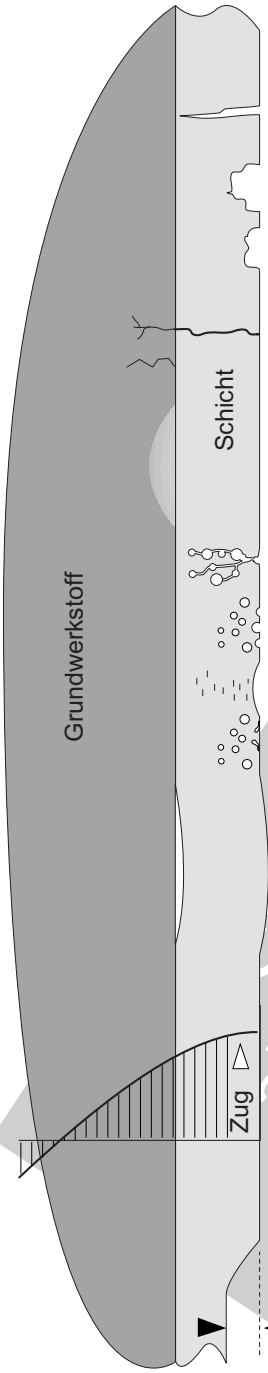
Als Nacharbeit bei spezifizierten Abweichungen wie anhaftenden Pulverpartikeln an

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.8-9

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Die Nachbehandlung einer Schicht kann sich positiv auswirken aber auch problematisch sein.

Glätten, Strahlen (abrasiv, verdichtend), Zerspanend bearbeiten (auf Maß bringen),



	Auswirkungen auf das Bauteilverhalten (kein Anspruch auf Vollständigkeit)
Rissbildung in der Schicht: - Bearbeiten - Wärmebehandlung	Erhöhung der Schwingfestigkeit durch Abbau von Zugeigenspannungen (in Cr-Schichten), Senkung der Schwingfestigkeit infolge Kerbwirkung. Steigerung der Erosionsempfindlichkeit. Schmierstoffreservoir (verbesserte Gleiteigenschaften von Cr-Schichten)
Ausbröckelung: - Schleifen (Kanten) - Strahlen - Spanen	Schwingfestigkeitsverminderung, Reibungserhöhung (Strömung, Gleitbewegung), Verbesserter Wärmeübergang, verschlechterte Reflexion. Erosive Wirkung auf andere Bauteile
Rissbildung im Grundwerkstoff: - Schleifen - Ätzen, Brünieren	Senkung der Schwingfestigkeit (Bild 12.2.1.8-3)
Beeinflussung des Grundwerkstoffs (z.B. Härte, Gefüge) - Schleifen	Senkung der Schwingfestigkeit
Öffnen von Porosität: - Zerspanung - Ätzen - abrasives Strahlen	Eindringen von Medien, Rauigkeit, Verschleißverhalten, Erosionsverhalten, Wärmeübergang
Zudrücken von Porosität: - Zerspanung - Kugelstrahlen - Vorrichtung (Spannen)	Größere "Schichthärte", kann das Einlaufverhalten beim Anstreifen verschlechtern. Verhindert den Austausch von Medien: negativ: bei Wirkung als Schmierstoffreservoir positiv: bei Oxidation und Korrosion (?) Verbesserung der Erosionsfestigkeit
Schichtablösungen: z.B.durch zu hohe Zerspanungskräfte oder Druckeigenspannungen (z.B. Kugelstrahlen)	Gefahr von Schichtausbrüchen, FOD und Erosion an anderen Bauteilen, Überhitzungsgefahr bei Wärmedämmschichten. Verschlechterte Wärmeleitung.
Veränderung von Eigenspannungen: - Schleifen (Zug) - Kugelstrahlen (Druck) - Wärmebehandlung Abbau durch Kriechen. Erhöhung infolge Gefügeänderung (Ni-Schichten).	Schwingfestigkeitsbeeinflussung: Positiv wirkt Druck, negativ wirkt Zug oder der Abbau von Druckspannungen. Abheben der Schicht bei Druckeigenspannungen. Rissbildung bei Zugeigenspannungen.
unzulässiger Schichtabtrag: - Abrasives Strahlen - Ätzen - Schleifen	Lebensdauerverkürzung - Verschleiß (z.B. Erosion, Gleitreibung). - Oxidation (bei Diffusions-Oxidationsschutzschichten) - Maßprobleme

Bild 12.2.1.8-2

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Fortsetzung von Seite 12.2.1.8-7

diffusionsbeschichteten Bauteilen kann eine Glättung erfolgen. Müssen ***anhaftende Partikel entfernt*** *werden, ist insbesondere bei spröden Schichten darauf zu achten, dass* ***kein Ausbrechen der Oberfläche und/oder eine Mikrorissbildung*** *erfolgt. Solche Kerben können die Schwingfestigkeit unzulässig absenken oder die Schichtfunktion beeinträchtigen. Ein Beispiel ist die örtliche Schädigung einer Oxidationsschutzschicht. Im Betrieb kann es hier zu einem frühzeitigen Angriff des Grundwerkstoffs mit Unterwanderung der umliegenden gesunden Beschichtung kommen.*

Verfestigen von Beschichtungen: Kugelstrahlen der Schicht hebt erstaunlicherweise die Schwingfestigkeit in einigen Fällen deutlicher an als eine Strahlbehandlung des Grundwerkstoffs vor der Beschichtung *(Bild 12.2.1.8.3-2). Wider Erwarten zeigen relativ spröde galvanische Cr-Schichten ein solches Verhalten. Der Effekt beruht in erster Linie auf dem Abbau hoher Zugeigenspannungen in der Schicht, und einem Aufbau von Druckeigenspannungen.*
In duktile (plastisch verformbare) Schichten (z.B. Silberschicht) lassen sich mit Kugelstrahlen (Glasperlen) ohne Schädigung ausreichend hohe Druckspannungen einbringen die in Zonen geringer Haftfestigkeit zum Abheben mit Blasenbildung führen (Bild 12.2.1.8-4). Damit ist wenigstens in manchen Fällen eine zerstörungsfreie Haftfestigkeitsprüfung möglich.

Beeinflussung einer schichttypischen Porosität: *Spanende Bearbeitung (Drehen, Schleifen), Verfestigung (z.B. Strahlen) oder abrasive Behandlung können die Porosität in einer Schicht und so ihre Eigenschaften verändern. Wird offene Porosität verschmiert bzw. zugedrückt, kann sich dies auf das Gleitverhalten auswirken. Verantwortlich kann die verschlechterte Aufnahme von Schmiermittel sein.* ***Bearbeitungsstaub*** *der in den Poren hängen blieb, kann sich später im Betrieb lösen und durchströmte Systeme verunreinigen.*
Wird geschlossene Porosität zur Oberfläche mit einem Abtrag geöffnet, können sich eindringende Umgebungsmedien auf das Oxidations- oder Korrosionsverhalten auswirken.
Porosität im Inneren der Schicht, die mit plastischer Verformung (Spanen, Strahlen) ganz oder teilweise ***zugedrückt*** *wurde, kann Eigenschaften wie* ***Elastizität, Einlaufverhalten oder Wärmedurchgang*** *unerwünscht verändern.*

Eine ***Wärmebehandlung*** *kann die Eigenschaften* ***einer Schicht*** *entscheidend verändern. So lässt sich die* ***Härte bestimmter Ni-Schichten deutlich steigern****. Al-Diffusionsschichten erhalten erst mit einer Glühung die optimale Elementverteilung, die das erwünschte Betriebsverhalten (Oxidationsbeständigkeit bei ausreichender Zähigkeit) ermöglicht.*
Die Erhitzung einer Schicht kann sich natürlich auch negativ auswirken. Eine Überhitzung beim Schleifen von Cr-Schichten kann offenbar sogar Risse im Grundwerkstoff auslösen (Bild 12.2.1.8-3). Organische Beschichtungen wie Elastomere und Kunstharze, können bereits bei scheinbar harmlos erhöhten Temperaturen ihre Eigenschaften unzulässig verändern. Das zeigt sich in Versprödung, Festigkeitsverlust und Schrumpfung, gegebenenfalls mit Rissbildung.

© Ausschnitt - Turbocasch als Unterlage zum Unterricht

Unerwartete Effekte der Nachbehandlung einer Beschichtung im Fertigungsprozess.

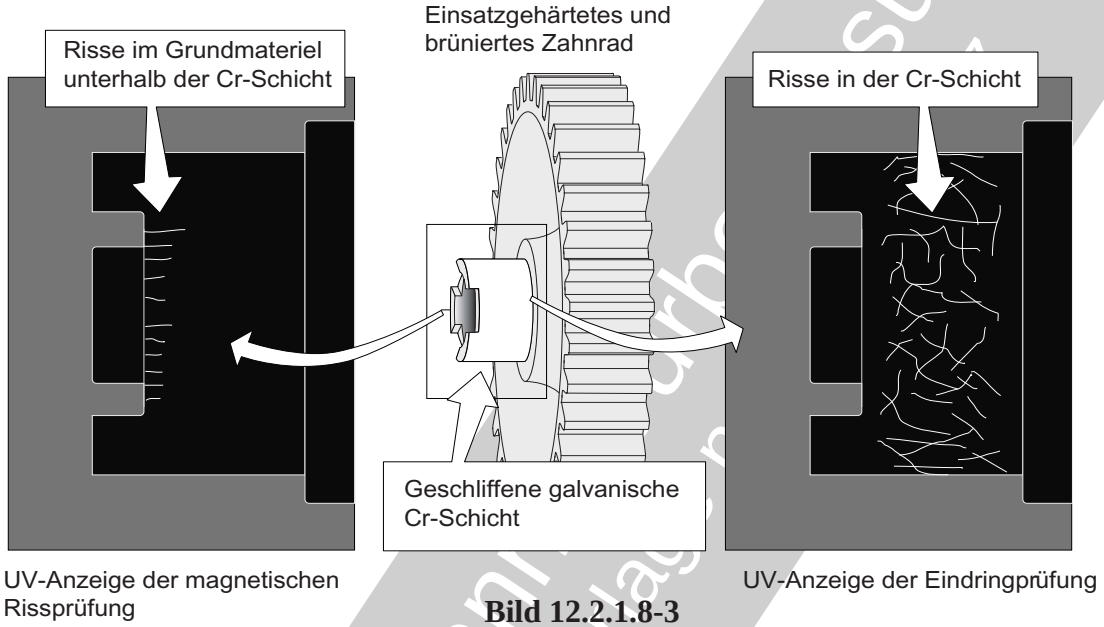


Bild 12.2.1.8-3

Bild 12.2.1.8-3: Zahnradwellen *(mittlere Skizze) aus Einsatzstahl mit galvanischen Cr-Schichten auf Gleitringlaufflächen und Lagersitzen zeigten nach dem Maßschleifen bei der magnetischen Rissprüfung ausgeprägte Rissfelder. Diese sind vorzugsweise axial, quer zur Schleifrichtung orientiert (Skizze links). Eine metallografische Untersuchung ließ einen für Schleifrisse typischen, interkristallinen Rissverlauf erkennen.*

Anfangs wurde die magnetische Rissanzeige als verfahrensbedingte, akzeptable Risse in der Chromschicht fehlinterpretiert. Eine magnetische Rissprüfung reagiert jedoch nicht auf Risse in der unmagnetischen Cr-Schicht. Dafür bedarf es einer Eindringprüfung (Skizze rechts). Diese zeigte ein von der magnetischen Prüfung unterschiedliches, netzartiges Rissbild auf.

Wenn Risse im Grundwerkstoff bei der Magnetprüfung durch eine mehrere Zehntelmillimeter dicke Cr-Schicht angezeigt werden, müssen sie tief sein.

Verblüffend war, dass die Rissbildung sich offenbar mit einer intensiveren Kühlung verstärk-

© Axel Rossmann
als Schulungsunterlage

te. Dieses Verhalten wurde mit einer schockartigen Abkühlung der stark aufgeheizten Schleiffläche erklärt. Der Schleifprozess hatte anscheinend hohe Zugeigenspannungen im Grundmaterial induziert, die eine spontane Rissbildung auslösten. In diesem Zusammenhang scheint die ***Brünierung in einer Lauge*** *nach dem Schleifvorgang von Bedeutung. Diese Behandlung erzeugt bekannterweise im ungestrahlten Grundwerkstoff bei ausreichend hohen Zugspannungen* ***SpRK-Risse (Laugensprödigkeit****, Bild 12.2.1.8.3-11). Auch diese hat einen interkristallinen Rissverlauf zur Folge. Damit war ein zusätzlicher Einfluss der Brünierung auf die Rissbildung, in Fällen bei denen die Rissprüfung nach der Brünierung erfolgte, nicht auszuschließen. Das rissauslösende Bad konnte durch die üblichen, mit der Eindringprüfung auch nachgewiesenen Risse in der Cr-Schicht, zum Grundmaterial vordringen.*
Abhilfe schaffte das Stahlkugelstrahlen des Grundwerkstoffs *(einbringen schützender Druckspannungen) vor der Beschichtung und eine weniger intensive Kühlung (!) beim Schleifen.*

Bild 12.2.1.8-4: *Die seriengeeignete zerstörungsfreie* ***Prüfung der Haftfestigkeit einer Beschichtung ist äußerst problematisch****. Zwar lassen sich Proben die an einer geeigneten Position zum Bauteil angebracht sind mitspritzen und können anschließend in einem Belastungsversuch geprüft werden (Band 4, Bild 18.8-5). So lässt sich die* ***Haftfestigkeit an der Probe*** *quantifizieren. Zusätzlich ist der* ***Bruchverlauf*** *durch die Schicht und/oder entlang der Haftfläche ein qualitatives Kriterium. Verständlicherweise ist die Aussagekraft dieser Proben für die* ***Haftfestigkeit an der beschichteten Bauteiloberfläche*** *zumindest eingeschränkt. Deshalb dienen solche Prüfungen eher zur Bestätigung der Prozesssicherheit.*

In einigen Fällen ist eine ***qualitative Haftfestigkeitsprüfung*** *möglich. An zähen metallischen Schichten wie Silber lässt sich ein auf deren Eigenschaften abgestimmtes Strahlen mit Glasperlen anwenden. Natürlich ist darauf zu achten, dass keine Schädigung wie ein unzulässig großer Abtrag auftritt. Der Strahlprozess erzeugt in der Schicht Druckspannungen, die an Orten mit niedriger Haftfestigkeit zur Ablösung und Blasenbildung der Schicht führen (zweite Skizze von oben). Es werden nur Schwachstellen angezeigt, die abhängig von der Strahlintensität und den Schichteigenschaften eine ausreichend niedrige Haftfestigkeit aufweisen.*

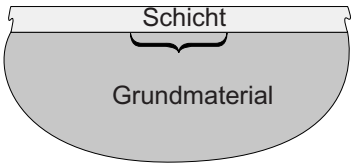
Hat der Grundwerkstoff beim Beschichten ***Wasserstoff aufgenommen****, lässt sich mit einer anschließenden* ***Wärmebehandlung****, die als Entsprödung meist vorgeschrieben ist, eine Versprödung vermeiden. Weist die Schicht geeignete Eigenschaften wie ausreichende Dichtigkeit auf, kommt es in Zonen geringer Haftfestigkeit bei austretendem Wasserstoff zur* ***Blasenbildung*** *(„****Beizblasen****“, dritte Skizze von oben). Abzuschätzen ist, ob die Blasenbildung Ursache einer ungewöhnlich starken Gasaufnahme oder einer zu niedrigen Haftfestigkeit der Beschichtung ist.*

Ist die ***Wärmedehnung*** *einer Schicht deutlich größer als die des Grundmaterials, entstehen beim Aufheizen in der Schicht Druckspannungen. Spröde Schichten wie keramische Wärmedämmschichten oder anorganische Anstreif- und Einlaufschichten bei niedriger Haftfestigkeit neigen zum Abheben (vierte Skizze von oben). In diesen Fällen ist die Spaltbildung zwischen Schicht und Grundwerkstoff minimal. Mit Augenschein, wie bei den vorher beschriebenen Verfahren, ist sie als Blase nicht erkennbar. Die Erkennung einer Ablösung erfordert deshalb ein geeignetes zerstörungsfreies Prüfverfahren. Die* ***Thermografie*** *hat sich in vergleichbaren Aufgaben bewährt (Lit. 12.2.1.8-1). Sie beruht auf dem schlechteren Wärmedurchgang im Spaltbereich der sich bei äußerer Wärmeeinbringung (Wärmeimpuls) deutlich bemerkbar macht.*

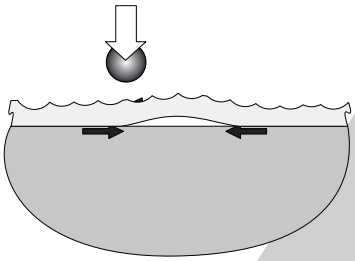
Fortsetzung auf Seite 12.2.1.8-13

© Akademie Turbomaschinen
Abbildungsunterlagen nur mit Lizenz

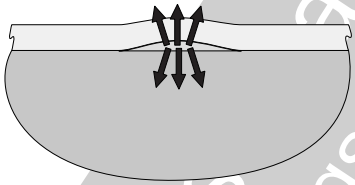
Die zerstörungsfreie Prüfung der Haftfestigkeit einer Schicht ist auf einem Bauteil in bestimmten Fällen qualitativ möglich.



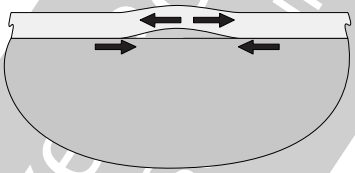
Schicht mit örtlich verminderter Haftfestigkeit bzw. Bindefehler, jedoch mit einer Restbindung, keinem Abheben.



Kugelstrahlen einer duktilen Schicht (z.B. Silber) erzeugt Druckeigenspannungen in der Schicht und führt zum Abheben, erkennbar durch Blasenbildung.

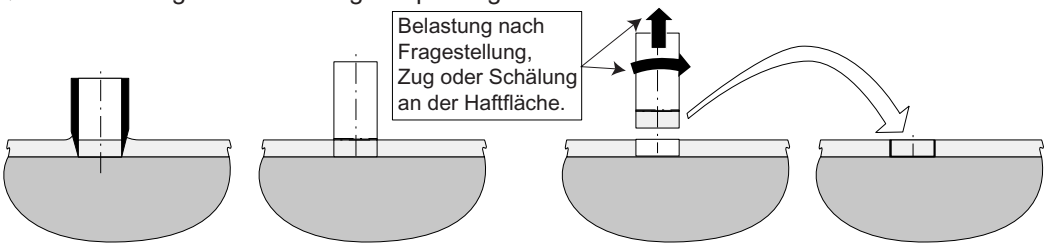


Sind Gas oder flüchtige Stoffe in Schicht oder Grundmaterial gelöst, kann eine **Erwärmung** zum Druckaufbau an der Haftfläche und damit zu erkennbarer Blasenbildung (Beizblasen) führen.



Mit einer geeigneten **Erwärmung** kann sich durch den Aufbau von Druck-Wärmespannungen die Schicht im Bereich geringer Haftfestigkeit erkennbar abheben. Nachweis mit **Thermografie.**

Quasi zerstörungsfreie Haftfestigkeitsprüfung von Elastomerschichten auf Bauteilen.



Stanzen der Schicht | Aufkleben eines Zugankers | Abreißen der ausgestanzten Schicht | Wieder einkleben der ausgestanzten Schicht

Kriterium ist der Bruchverlauf in der Schicht oder entlang der Haftfläche.

Bild 12.2.1.8-4

Vexel Bosmann - Turbocons
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Fortsetzung von Seite 12.2.1.8-11

Die Haftfestigkeit bzw. das Haftverhalten ausreichend elastischer ***Elastomerschichten*** *wie* ***Einlaufbeläge aus gefülltem Silikongummi****, lässt sich mit Hilfe einer als zerstörungsfrei zu bezeichnenden technologischen Prüfung abschätzen (Rahmen unten). Zuerst wird mit einem Locheisen ein Ringspalt bis zum Grundmaterial in die Schicht eingebracht. Dann wird ein passender Belastungskopf aufgeklebt. Dieser kann mit einer Zug- oder einer Biegebeanspruchung soweit belastet werden, bis die ausgestanzte Schicht ausbricht. Im Falle der Biegung wird der zugseitige Schichtrand auf* ***Schälung*** *beansprucht, auf die eventuelle Haftfestigkeitsmängel besonders sensibel reagieren (Bild 12.2.1.4-18 und Bild 12.2.1.5-6). Hauptbeurteilungskriterien sind der Bruchverlauf innerhalb der Schicht oder die Ablösung an der Haftfläche. Nach der Prüfung kann die ausgestochene Schicht wieder von der Probe abgelöst und auf das Bauteil geklebt werden.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

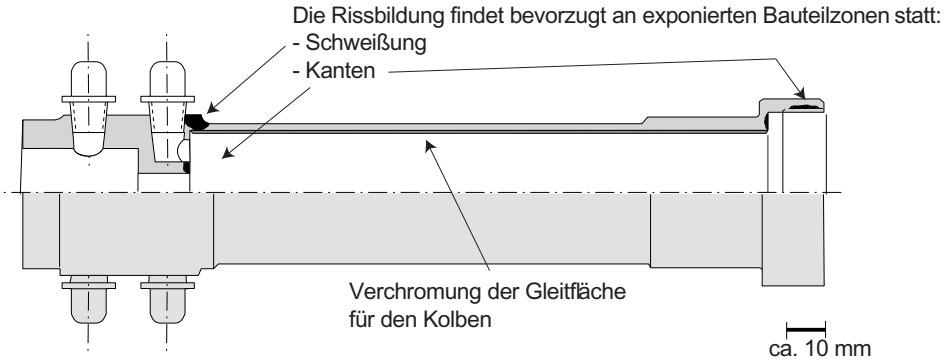
Bild 12.2.1.8-5: Wasserstoffversprödung *kann von unterschiedlichen Beschichtungsprozessen ausgelöst werden (Band 1, Kapitel 5.7). Die Skizze oben zeigt einen Hydraulikkolben einer Schubdüsenverstellung, der nach einer* ***Verchromung der Gleitfläche*** *an mehreren Stellen spröde Rissbildung aufwies. Es handelte sich in erster Linie um Kanten und Schweißungen. Es ist anzunehmen, dass merkliche Zugspannungen an den Kanten eine besonders intensive Wasserstoffbildung unterstützte.*

Als besonders gefährlich haben sich Bäder zur ***Beschichtung mit Cadmium*** *erwiesen. Diese kam insbesondere bei älteren Triebwerkstypen zur Anwendung, wird aber heute wegen Giftigkeit bzw. aus Umweltschutzgründen von weniger bedenklichen Korrosionsschutzschichten ersetzt. Eine Vielzahl Schadensfälle durch Wasserstoffversprödung, besonders an Schrauben und Muttern, wurden bekannt.*

Im Betrieb kam es in mehreren Fällen an in der Gasphase ***einsatzgehärteten Zahnrädern*** *(Skizze unten) nach langen Laufzeiten zum*

Sowohl Diffusionsbeschichtungen als auch galvanische Beschichtungen sind in der Lage Wasserstoffversprödung auszulösen.

Wasserstoffinduzierte Rissbildung an einem Hydraulikkolben aus einem hochfesten Vergütungsstahl während einer galvanischen Verchromung



Rissbildung in einem Zahnrad durch Wasserstoffaufnahme beim Einsatzhärten.

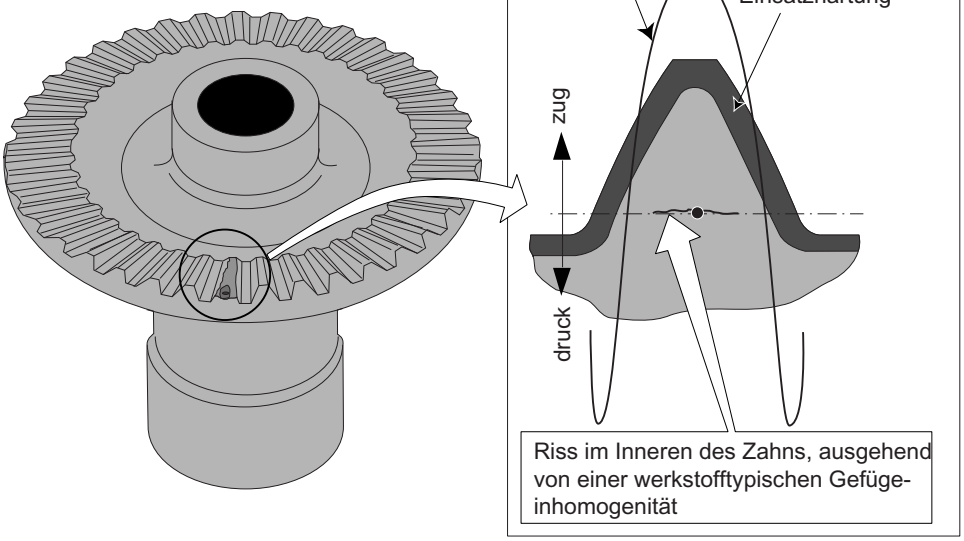


Bild 12.2.1.8-5

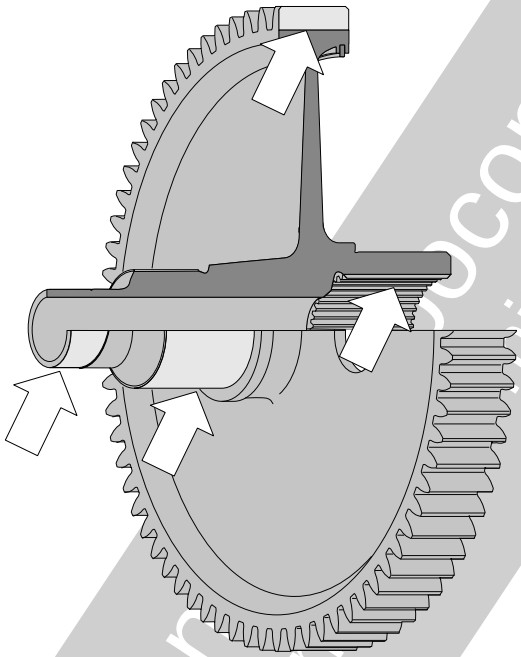
Zahnbruch. Es handelte sich um Schwingbrüche, die von innenliegenden wasserstoffinduzierten Rissen ausgingen (Detail unten rechts).

Um das Risiko einer Wasserstoffversprödung auf ein akzeptables Mass zu reduzieren, ist eine ***Entsprödung*** *mit Hilfe einer mehrstündigen Erwärmung auf ca. 200 °C möglichst unmittelbar nach der Beschichtung (siehe jeweilige Vorschriften) notwendig (Bild 12.2.1.7-14).*

Merksatz:

Innerhalb des vorgeschriebenen Zeitraums muss der Entsprödungsvorgang (Erwärmung) durchgeführt werden, sonst ist die Wirksamkeit zur Vermeidung einer Wasserstoffversprödung nicht gewährleistet.

12.2.1.8.1 Diffusionsschichten



Es handelt sich um Verfahren, mit denen Oberflächenschichten durch **Diffusion** von Fremdatomen in das Atomgitter des Bauteilwerkstoffes erzeugt werden. Diese Schichten weisen besondere spezifische Eigenschaften wie hohe Schwingfestigkeit, hohe Härte, gute Oxidationsbeständigkeit und gute Verschleißeigenschaften auf, wobei eine Schicht nicht alle genannten Eigenschaften gleichzeitig aufweisen muss. Um die Diffusion zu ermöglichen und zu beschleunigen, werden die Bauteile auf eine erhöhte, werkstoffspezifische Temperatur gebracht.

Im Triebwerksbau kommen verschiedenste Arten von Diffusionsschichten bzw. -verfahren zum Einsatz:

- **Nitrieren**, eindiffundieren von Stickstoff: über die Gasphase (Gasnitrieren oder in einem Salzbad (Badnitrieren)).
- **Einsatzhärten**, eindiffundieren von Kohlenstoff: über die Gasphase.
- **Inchromieren**, eindiffundieren über die Gasphase oder in einer Pulverschüttung im CVD-Prozess.
- **Alitieren**, eindiffundieren über die Gasphase oder in einer Pulverschüttung im CVD-Prozess.
- **Borieren**, eindiffundieren von Bor aus der Gasphase in einem CVD-Prozess.

Natürlich ist eine saubere aktive Oberfläche für die Diffusion Voraussetzung. Diese wird von vorgeschalteten Prozessschritten und Reaktionen während des Diffusionsprozesses gewährleistet.

Besondere Eigenschaften mancher Diffusionsschichten wie Sprödigkeit und große Härte erfordern in vielen Fällen an bestimmten Bauteilflächen eine Abdeckung, die später wieder entfernt wird. Es handelt sich beispielsweise um Flächen die im Betrieb hohen LCF-Beanspruchungen (plastische zyklische Verformung) ausgesetzt sind. Beim Einsetzen oder Nitrieren nutzt man galvanische Cu-Schichten und lackartige **Abdeckschichten**. Al-Diffusionsschichten benötigen wegen der hohen Prozesstemperatur komplexe, verlorene Abdeckungen, die Kombinationen aus Formblechen und gefüllten keramischen Schlickern verwenden.

© Axel Rossmann Lehrbuchconsult als Schulungsunterlage mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Im Triebwerksbau kommen unterschiedliche Diffusionsschichten zur Anwendung, nicht nur zum Oxidationsschutz.

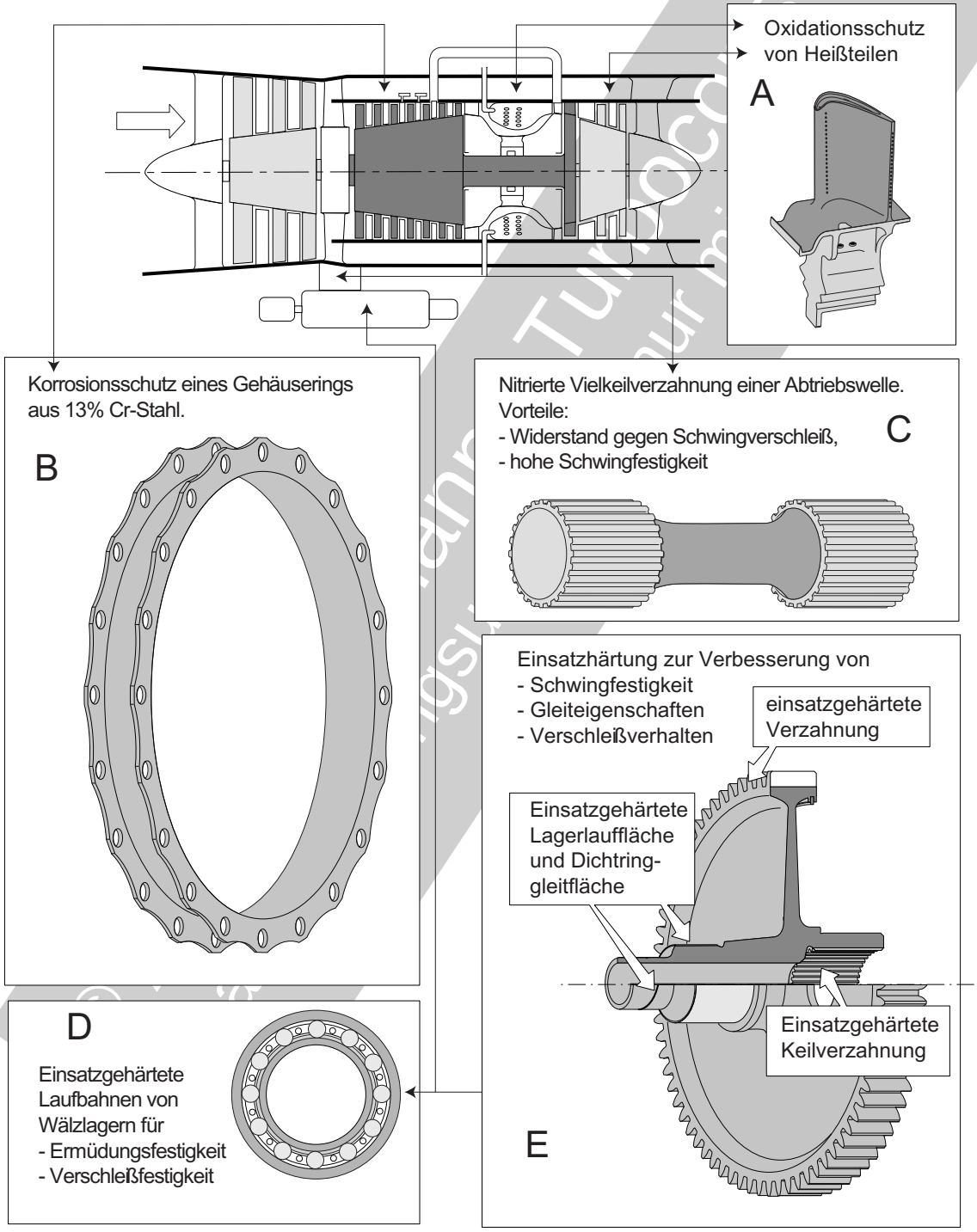


Bild 12.2.1.8.1-1

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

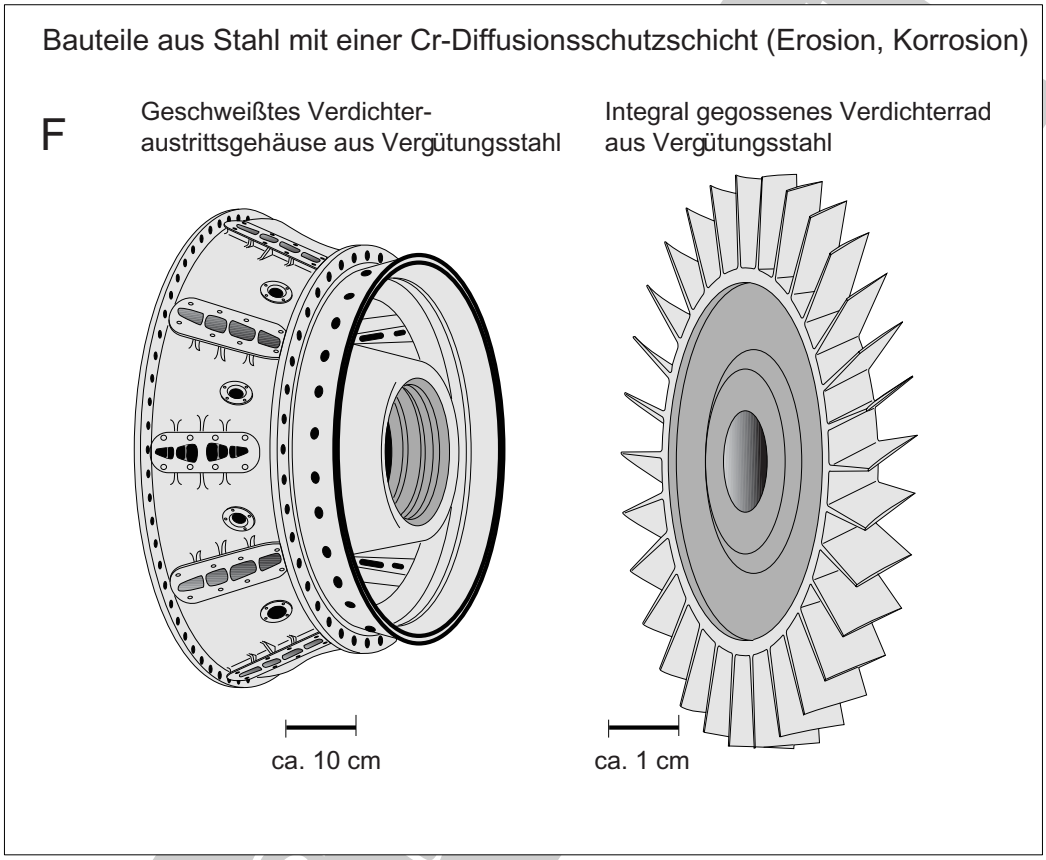


Bild 12.2.1.8.1-1: *In Triebwerken kommen sehr unterschiedliche* ***Diffusionsschichten mit spezifischen Eigenschaften*** *zur Anwendung.*

Korrosionsschutz: *Bauteile aus Vergütungsstahl wie integrale Gehäuse (**„F“**) und Ringe (**„B“**), findet man häufig in älteren Triebwerkstypen. Ringe aus* ***korrosionsempfindlichen Stählen*** *(Typ 13% Cr-Stähle) werden noch verwendet, weil sie bei guter Warmfestigkeit eine* ***niedrige Wärmedehnung*** *aufweisen. Damit bieten sie sich zwischen Bauteilen aus Titanlegierungen und Ni-Legierungen als Übergang an. Ein gutes Containmentverhalten gegenüber Titanfeuer in Verdichtern ist zusätzlich vorteilhaft. Problematisch ist jedoch die Neigung zu Korrosion (Lochfraß) und bei den relativ hohen Betriebstemperaturen zur Oxidation. Als Schutz werden* ***Cr-Diffusionsschichten (Inchromieren)*** *eingesetzt. Deren Korrosionsschutzwirkung ist begrenzt. Bei Rissbildung in der spröden Schicht ist nicht mit einem kathodischen Schutz sondern eher mit Elementbildung zu rechnen. Vorteilhaft für eine Inchromierung ist, dass nicht wie bei einer Lackierung, eine deutliche Maßänderung stattfindet. Das Inchromierverfahren kann aber im Vergleich mit einem anorganischen Lacksystem aufwändig sein. Der Beschichtungsprozess ist anspruchsvoll und muss bauteilspezifisch angepasst werden. Das Verfahren neigt zur Bildung kleiner* ***Cr-Warzen*** *die auf Dichtflächen nicht akzeptabel sind. Sie lassen sich aber nicht einfach mechanisch entfernen, weil die Schicht dabei oft ausbricht und Angriffsstellen für Korrosion entstehen. Bei Verzug ist eine abtragende Nacharbeit wegen der geringen Schichtdicke (im 10 µm Bereich) kaum möglich. Ein weiteres Problem ergibt sich aus der erheblichen Sprödigkeit der Schicht. Plastische Verformungen im Fertigungsprozess wie Spannen, Richten und Wärmeverzug können z.B. in Be-*

© Axel Poss als Schulungsu

*reichen einer Spannungskonzentration zur Rissbildung führen. Gerade an solchen, häufig schwer einsehbaren Bauteilzonen kann dann im Betrieb verstärkt Korrosion auftreten. Aus diesen Gründen wird für komplexe Strukturen (**„F“**) nach Möglichkeit **anorganischen Lacken** der Vorzug gegeben.*

Erosionsschutz: *An Verdichterbeschaufelungen aus martensitischen Stählen (z.B. Typ Cr-Stahl) werden Cr-Diffusionsschichten in Kombination mit einer Korrosionschutzwirkung auch als Erosionsschutz eingesetzt (**„F“**). Dieser Schutz ist jedoch erfahrungsgemäß auf Grund der sehr geringen Schichtdicke (im 10 µm Bereich) äußerst begrenzt. Andererseits besteht der Vorteil, dass eng tolerierte Bauteilkonturen (z.B. Schaufelprofile) beschichtet werden können. Eine merkliche Verstimmung der Eigenfrequenzen wie sie z.B. bei den relativ dicken, thermisch gespritzten WC-Co-Schichten auftreten kann, findet nicht statt.*
*Ein Problem ist die Sprödigkeit, die an LCF-beanspruchten Bauteilzonen unter der plastischen Verformung Rissbildung auslöst. Bei kleinen **FOD**s wie sie für den Einschlag von größeren Sandkörnern und Steinchen zu erwarten sind, besteht in der Schicht die Gefahr der Rissbildung und spröder Ausbrüche mit Schwingfestigkeitsabfall. Beschichtungstemperaturen im Fertigungsprozess müssen sich natürlich am Wärmebehandlungszustand des Bauteils orientieren. Ein Festigkeitsabfall als Folge zu hoher Anlasstemperaturen ist unbedingt zu vermeiden. Zusätzlich sind die hohen, aerodynamisch erforderlichen Oberflächengüten an Verdichterschaufeln einzuhalten.*

Oxidationsschutz: *Es handelt sich gewöhnlich um Al-Diffusionsschichten, häufig kombiniert mit anderen Schichtbestandteilen wie Platin (Bild 12.2.1.8.1-2). Sie kommen an Heißteilen wie den Turbinenschaufeln (**„A“**) zum Einsatz. Die Beschichtung (Lit. 12.2.1.8-1) erfolgt als CVD-Prozess (Bild 12.2.1.8.1-2) in einer **Pulverschüttung** (**Pulverpack-Verfahren, Pack-Alitierverfahren**) oder über die **Gasphase** (**„Above“-Packverfahren**). Um potenzielle Fehler zu vermeiden, gestaltet sich der Beschichtungsprozess durchaus anspruchsvoll (Bild 12.2.1.8.1-3).*

Schwingfestigkeitserhöhung: *Diffusionsschichten wie **Einsatzhärteschichten** (**„E“**) und **Nitrierschichten** (**„C“**) können die Schwingfestigkeit von Bauteilen aus martensitischen Stählen entscheidend anheben. Eine Anwendung sind z.B. Übertragungs-Steckwellen, besonders im Bereich eventuell vorhandener Sollbruchstellen (**„C“**, Band 1, Bild 5.4.4-7). An Getriebeverzahnungen nutzt man die hohe Schwingfestigkeit von **Einsatzschichten** (**„E“**). Eine Fertigungsschwierigkeit besteht in der Vermeidung **weicher Flecken**. Hier handelt es sich um, gegenüber dem Diffusionsprozess ungewollt abgedeckte Zonen, etwa um Verunreinigungen. Diese werden von geeigneten nachfolgenden Ätzverfahren als „Flecken“ angezeigt.*
*Verwendet man **lackartige Abdeckungen** besteht erfahrungsgemäß bei ungünstiger Anordnung der Bauteile auf dem Chargiergestell oder Verschmutzungen des Gestells durch den Lack die Gefahr weicher Flecken. **Erweicht oder verflüssigt sich der Abdecklack beim Aufheizen** kurzfristig, kann er auf darunter liegende Bauteile tropfen und diese ungewollt fleckenartig abdecken. Werden derartige Schäden erst spät erkannt und sind eine Vielzahl weitgehend fertiggestellter Teile betroffen, sind diese nicht mehr nachbearbeitbaren Fehler äußerst kostenintensiv.*
*An nicht vorgesehenen Bereichen ist eine Beschichtung mit Hilfe einer Abdeckung zu verhindern. Als Abdeckung kommen meist galvanische Cu-Schichten zum Einsatz, die nachher abgezogen werden. Versagen diese Abdeckungen, kommt es zum „Durchschlagen“ der Einsatzschicht und **örtlichen Aufhärtungen** die als gefährliche Kerben wirken können. Solche Aufhärtungen können sich bei nachfolgenden Strahlprozessen zeigen (Bild 12.2.1.6-10).*

© Axel Bussmann - Turbosonst
alle Rechte unterliegen mir ALLEIN

*Einsatzschichten können auch die Ermüdungsfestigkeit der Laufbahnen hochtouriger Wälzlager (**„D“**), auch in Form integraler Lagerringe an Zahnradwellen (**„E“**) verbessern.*

Gleit- und Schwingverschleißfestigkeit: *Ein hoher Widerstand gegen Reibverschleiß zeichnet Einsatzschichten und Nitrierschichten aus. Dieser Effekt kann neben der hohen Härte auch auf besondere chemische Eigenschaften der Schicht zurückgeführt werden. Einen solchen Effekt hat die nichtmetallische dünne **Epsilon-Schicht** (wenige µ m) von **Badnitrierschichten**. Im Gegensatz zur dickeren und spröden Epsilon-Schicht der Gasnitrierschichten, muss sie nicht von Gleitflächen abgearbeitet werden. Im Gegenteil, in Fällen mit Schmierproblemen wie eng tolerierten **Gleitflächen mit hohen Relativgeschwindigkeiten in Kraftstoff** (Steuerelemente in Kraftstoffreglern) ermöglicht diese Schicht erst die sichere Funktion. Kleinste Nacharbeiten, um einen eventuellen Verzug auszugleichen, können bereits die Funktionsfähigkeit des Bauteils nach kurzen Laufzeiten katastrophal beeinträchtigen (Gefahr der Kaltverschweißung/ „Fressen“).*

***Vielkeilverzahnungen** (**„C“** und **„E“**) an Stahlteilen, meist im Bereich von Anbaugetrieben, werden außer zur Schwingfestigkeitssteigerung, zur Minimierung von Gleitverschleiß (Fretting, Band 1 Kapitel 5.9.3 und Band 2, Bild 6.6.1-1) einsatzgehärtet.*

Bild 12.2.1.8.1-2: *Um einen maximalen **Oxidationsschutz einer Al-Diffusionsschicht** (Alitierschicht) zu gewährleisten, ist eine möglichst **hohe Konzentration an Aluminium anzustreben**. Es bildet, zusammen mit dem Chrom im Grundwerkstoff, bei Betriebstemperatur eine dünne, dichte, schützende Oxidschicht. Alitierschichten verhalten sich, zumindest im unteren Temperaturbereich spröd. Die Sprödigkeit steigt mit der Al-Konzentration. Damit wird das Thermoermüdungsverhalten (Band 1, Bild 5.4.2.1-1 und Lit. 12.2.1.8-26) negativ beeinflusst. Beim Handling der beschichteten Bauteile im Fertigungsprozess ist darauf zu achten, dass keine plastische Verformung auftritt (z.B. durch Anstoßen oder Spannen, Bild 12.2.1.8.1-3). Um den Diffusionsprozess bei Betriebstemperatur, auch wenn dieser langsam abläuft, zu minimieren, werden zusätzlich diffusionshemmende Schichtbestandteile (Platin, Pt-Al-Schicht) am Übergang zum Grundwerkstoff genutzt (Lit. 12.2.1.8-1).*

Al und Cr müssen möglichst gleichmäßig an der Oberfläche verteilt sein, *um örtliche Schwachstellen sowohl bezüglich des Oxidationsverhaltens als auch wegen zu ausgeprägter Versprödung zu vermeiden.*

*Die Beschichtung erfolgt in allen Fällen über die Gasphase und kann als eine Form des **CVD** (engl. „**Chemical Vapor Deposition**“) angesehen werden. In der Literatur wird jedoch CVD einem Verfahren zugeordnet, in dem die Retorte mit zuvor erzeugtem reaktivem Gas beaufschlagt wird.*

*Beim **Packverfahren** (engl. **„Pack Cementation“**) befinden sich die Teile in einer Pulverschüttung aus einem Gemisch des Donators (Al-Pulver, Intermetallische Phasen) und dem Aktivator (NH_4Cl, NH_4F). Das Gas entsteht in unmittelbarer Nähe der Bauteiloberfläche. Es ist verständlich, dass die Schichtqualität entscheidend von einer **guten Mischung des Pulvers** und der Einhaltung der erprobten optimalen Prozessparameter (z.B. Temperaturführung, Zumischung von Gasen) abhängt. Der*

© Axel Rossmann - Turbosoft
als Schulungsunterlage zulässig

Merkmale von Pulverpack- Al-Diffusionsschichten (schematisch).

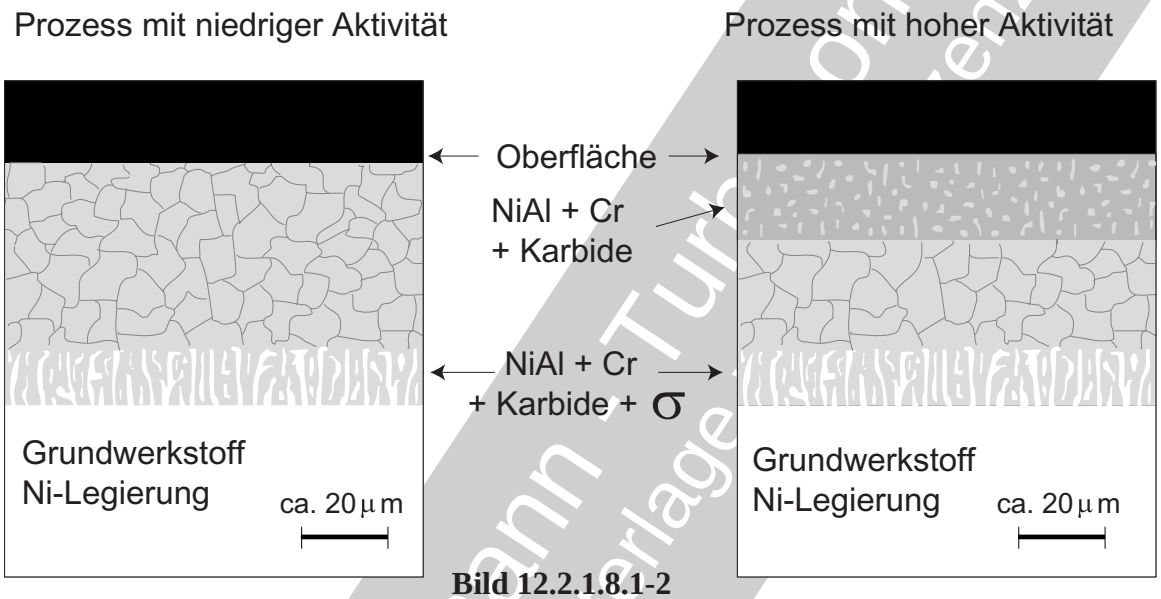


Bild 12.2.1.8.1-2

gewünschte Temperaturverlauf ist in der Retorte für alle Bauteile zu gewährleisten (Lit. 12.2.1.8-3). Dies ist nicht trivial, weil mit Konvektion zu rechnen ist und sich die Teile auf den Wärmefluss auswirken. Um eine definierte Beschichtungsatmosphäre zu ermöglichen, ist eine Mindestgasdichte der ***Retorten*** *Voraussetzung. Diese sind von den wiederkehrenden Prozesszyklen extremer Thermoermüdung ausgesetzt, was die Lebensdauer deutlich begrenzt. Damit sind diese Retorten ein nicht zu unterschätzender* ***Kostenfaktor****. Ihre optimale Gestaltung, trotz durchaus komplexer Innenstruktur, ist* ***für den Fertigungsmittelkonstrukteur eine echte Herausforderung****.*

Um eine Beschichtung von hoch LCF-beanspruchten Bauteilbereichen (z.B. Schaufelfüße) zu verhindern (Bild 12.2.1.8.1-3) sind diese mit geeigneten ***Schichtkombinationen abzudecken****. Dafür kommen sowohl inerte als auch reaktive Materialien, die gezielt als* ***Getter*** *genutzt werden, zur Anwendung. Die bauteilspezifische* ***Entwicklung derartiger Abdeckungssysteme*** *erfordert viel Fachkenntnis und Erfahrung. Nicht selten ist eine umfangreiche aufwändige Fertigungserprobung unumgänglich.*

Man unterscheidet bei Schichten aus dem ***Packverfahren*** *zwei Typen (Lit. 12.2.1.8-3).* ***Niederaktivitätsschicht*** *(Skizze links) und* ***Hochaktivitätsschicht*** *(Skizze rechts). Beide Varianten bestehen aus mehreren Zonen.*

Die ***Hochaktivitätsbeschichtung*** *erfolgt bei relativ niedrigen Temperaturen zwischen 760°C und 980°C in einer großen Aluminium abgebenden Quelle. Unter diesen Bedingungen entstehen sehr aktive Al-Verbindungen. Innerhalb weniger Stunden bildet sich auf einer Ni-Legierung ein Schichtsystem. Um die hohe Sprödigkeit der Schichtbestandteile abzubauen wird für mehrere Stunden eine Wärmebehandlung bei ca. 1100°C angeschlossen. Dabei bilden sich infolge der Diffusion des Al nach innen und Ni nach außen, drei Zonen.*

Die ***Niederaktivitätsbeschichtung*** *läuft bei höheren Prozesstemperaturen (um 1100 °C) und einer geringeren Al-Aktivität. Außer Al kann auch Cr an dem Diffusionsprozess beteiligt*

© Prof. Rossmann - Turbomaschinen - Vorlesungsunterlagen

werden. Die Schichtstruktur hängt entscheidend von Temperaturführung, Konzentrationen und Zusammensetzung des Aktivators und vom Grundwerkstoff ab. Es entsteht eine zweilagige Schicht.
*Für eine **örtliche Ausbesserung von Schichten** an Neuteilen wird zuerst die Schicht an der Fehlstelle entfernt (abrasives Strahlen). Dann wird ein Al-haltiger keramischer Schlicker aufgetragen und das Teil einer Glühung unterzogen.*
*Eine Prüfung der Bauteile auf unerwünschte Beschichtungen (z.B. Kriechbeschichtung) erfolgt mit einer gezielten Oxidation bei der Anlauffarben entstehen (**Heat Tint Test**).*

***Bild 12.2.1.8-3: Al-Diffusionsschichten** (**Alitierschichten**) können unterschiedliche **fertigungsbedingte Fehlstellen und Abweichungen** von einer optimalen Struktur aufweisen. Auch **außerhalb der beschichteten Fläche** können im Ablauf des Beschichtungsprozesses Schädigungen entstehen.*

***Schichtaufbau:** Abweichungen von den optimalen vorgeschriebenen Prozessparametern können sich auf Schichteigenschaften wie Dicke, Aufbau (Detail **„1“**) und Konzentrationsverlauf der Legierungsbestandteile, insbesondere des Aluminiums, auswirken. Damit ist die Oxidationslebensdauer der Bauteile beeinflusst. **Innenbeschichtungen** (**„2“**) sind von solchen Abweichungen besonders betroffen. Dies hängt mit dem problematischen Austausch bzw. der Zuführung des Reaktionsgases in engen Kühlluftkanälen zusammen. Es bedarf umfangreicher Verfahrensentwicklung einen Aufbau in der Retorte zu schaffen, der eine ausreichende Beschichtung aller Innenflächen gewährleistet.*

***Oberflächenvorbereitung:** die Vorbereitung der Bauteiloberfläche muss die gleichmäßige Beschichtung gewährleisten. Verunreinigungen oder Oxidation können zu Problemen führen. Hierzu gehören auch stecken gebliebene **Strahlpartikel** (**„3“**, Beladungseffekt, Bild 12.2.1.6-17). Sie führen zu **Schichtstörungen** und können die Oxidationslebensdauer entscheidend verkürzen.*
*Dringt **Beschichtungspulver in Kühlluftkanäle** und verbleibt dort (**„4“**), kann wegen Kühlluftmangel im Betrieb die Kriechlebensdauer der Heißteile merklich abnehmen. Der Nachweis von Ablagerungen die eine Durchströmung behindern, ist mit **Durchflussmessungen** möglich. Gegebenenfalls müssen derartige Ablagerungen in einer aufwändigen **Nacharbeit** entfernt werden.*

***Schichtrisse:** Bei Raumtemperatur verhalten sich **Alitierschichten gewöhnlich spröd**. Wird eine beschichtete Bauteilzone durch Unachtsamkeit (Anstoßen, zu festes Spannen, Richtvorgänge) in der Fertigung **plastisch verformt,** ist mit Rissbildung in der Schicht zu rechnen (**„5“**). Diese ist besonders bedenklich, wenn sie in das Grundmaterial eindringt. Leider ist ein Nachweis, ob sich die Risse auf die Schicht beschränken, zerstörungsfrei mit ausreichender Sicherheit offenbar nicht möglich. Werden die empfindlichen beschichteten Bauteile nicht sorgfältig genug gelagert und transportiert, sind Kanten für **Ausplatzungen** besonders betroffen (**„9“**). Handelt es sich um scharfkantige Kerben, ist neben dem Einfluss auf die Oxidationsbeständigkeit zu prüfen, ob sie sich in einem dynamisch hochbeanspruchten Bauteilbereich befinden.*

***Kriechbeschichtung:** Beschichtungen ermöglichen örtlich begrenzte, besondere, notwendige Betriebseigenschaften. Diese sind jedoch nicht immer an der gesamten Bauteiloberfläche erwünscht. Sie können sich sogar wegen der **Sprödigkeit bei niedrigen Temperaturen** schädlich auswirken. Alitierschichten sind dann nicht in der Lage, die plastische Verformung des Grundwerkstoffs in hoch LCF-beanspruchten Bereichen aufzunehmen. Neben der zyklischen Fliehkraft ist Thermoermüdung als*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.8-23

© Alfred Strehlau - Turbomaschinen - Abschlussunterlagen zur Habilitation

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Probleme an Al-Diffusionsschichten zum Oxidationsschutz.

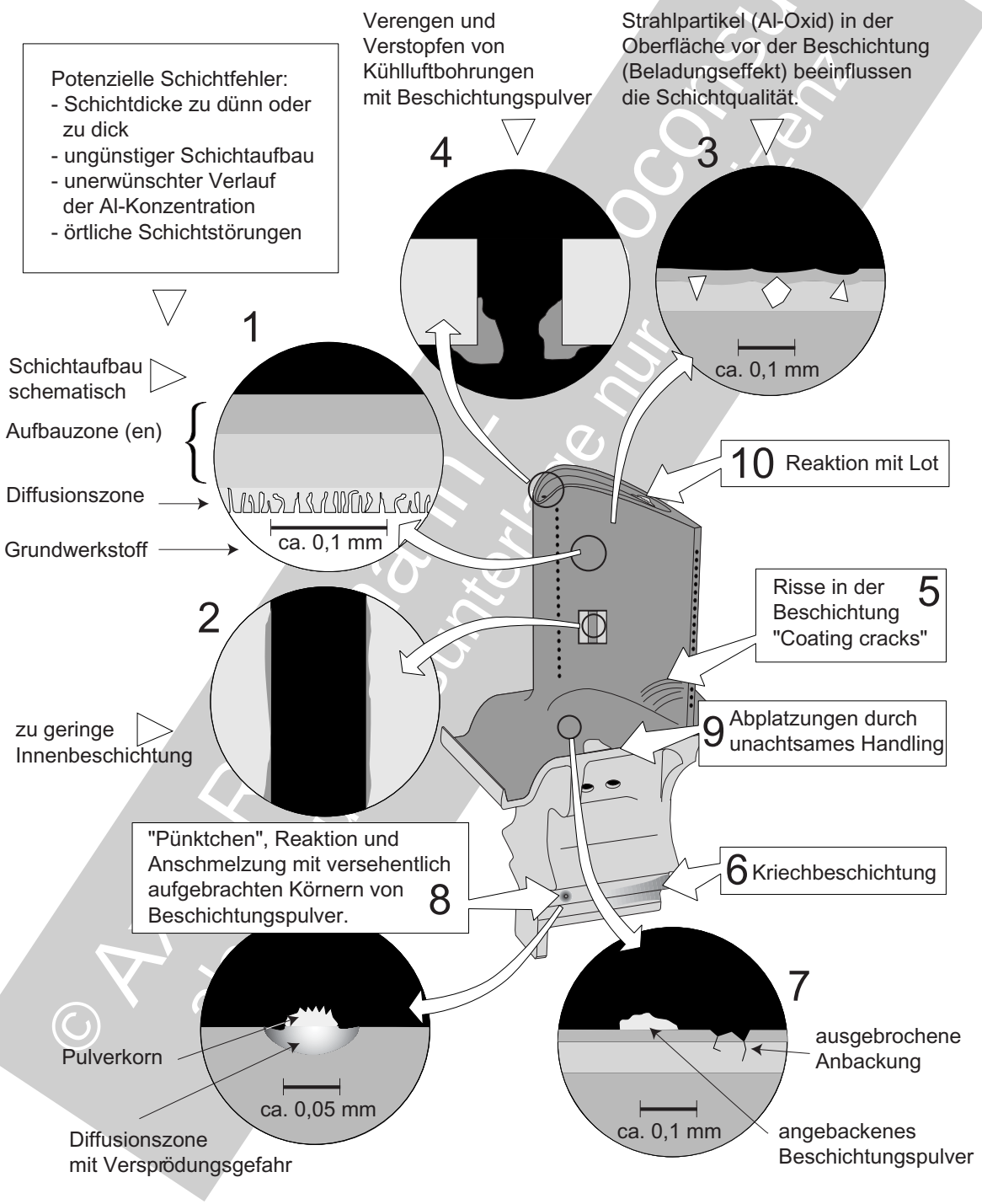


Bild 12.2.1.8.1-3

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Fortsetzung von Seite 12.2.1.8-21

*LCF-Beanspruchung zu beachten. Deshalb ist es für diese Zonen wichtig, dass keine „**Kriechbeschichtung**“ aus benachbarten beschichteten Zonen erfolgt (**„6“**). Um dies zu verhindern, sind geeignete Abdeckungen vorzusehen und gegebenenfalls Nachweise erforderlich.*
***Die erfolgreiche Abdeckung lässt sich zerstörungsfrei** mit speziellen werkstoffspezifischen und unbedenklichen, zugelassenen **Ätzungen oder geeigneter Erwärmung an Luft mit Hilfe von Anlauffarben** (engl. „**Heat Tint Test**“) nachweisen.*
*In der Übergangszone von beschichtet zu unbeschichtet dürfte eine Kerbwirkung vorliegen, welche die Schwingfestigkeit beeinflusst. Deshalb muss die **Beschichtungsgrenze entsprechend den Zeichnungsforderungen** verlaufen.*

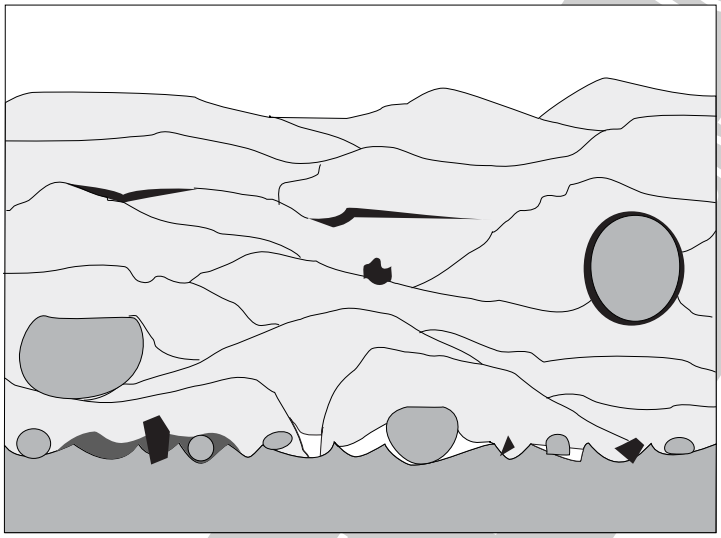
***Anbackungen:** Zeigt das Bauteil nach dem Beschichten **fühlbare Anbackungen,** kann es sich um Beschichtungspulver handeln. In diesem Fall besteht die Gefahr, dass beim Entfernen der Partikel die Schicht örtlich ausbricht und/oder spröde Risse entstehen (**„7“**). Deshalb sind solche Fehlstellen zu minimieren (siehe auch Bild 12.2.1.4-13).*

***Reaktionen auf unbeschichteten Flächen:** Es handelt sich überwiegend um **Beschichtungspulver** (**„8“**), das unter die Abdeckung gedrungen ist (z.B. vor dem Abdecken). Um eine solche **Verunreinigung kann sich eine Diffusionszone bis zur Anschmelzung** bilden. Der gleiche Effekt entsteht, wenn Beschichtungspartikel als Staub bei der Zwischenlagerung vor einem Wärmebehandlungsprozess auf ein Bauteil gelangen (Bild 12.2.1.4-14 und Band 4, Kapitel 18.3-2). Aus diesem Grund ist auf **besondere Sauberkeit im Bereich des Beschichtungsprozesses zu achten und eine Verteilung des Pulvers auf andere Fertigungsbereiche unbedingt zu vermeiden** (Band 4).*
*Mit solchen Fehlstellen besteht die Gefahr, dass lebensdauerbestimmende Eigenschaften wie Zähigkeit/LCF-Festigkeit und Kriechfestigkeit des Grundwerkstoffs von den Auslegungsdaten unzulässig abweichen. An **Auflageflächen** kann es zusätzlich zur Spannungskonzentration als Folge der **Unebenheit** kommen. Damit wird das Problem gegebenenfalls verschärft.*

***Reaktionen mit Lot:** Erfolgt eine Alitierung an gelöteten Bauteilen, insbesondere mit einer nachfolgenden Wärmebehandlung bei hohen Temperaturen, kann es zur Schädigung des Lots kommen (**„10“**). Diese kann sich in „blumenkohlartigem Aufschäumen“ zeigen (Bild 12.2.1.4-16). Falls die Lötung auch gegen Oxidation beschichtet werden soll, ist bei der Einführung des Verfahrens zu prüfen, ob das die vom Grundwerkstoff abweichende Zusammensetzung zulässt.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.8.2 Thermische Spritzschichten



Thermische Spritzschichten werden aufgebracht, indem der Schichtwerkstoff als Pulver oder Draht einer intensiven Wärmequelle zugeführt (z.B. Plasmabrenner), dort aufgeschmolzen und von einem Gasstrom kontinuierlich oder pulsierend auf die zu beschichtende Oberfläche transportiert wird (Lit. 12.2.1.8-1 und Lit. 12.2.1.8-2). Der Beschichtungsvorgang kann an Atmosphäre, in besonderen Gasen (z.B. Schutzgas) und bei Niederdruck erfolgen. Mit diesen Verfahren können metallische (z.B. Al, Mo, Ni, MCrAlY) und/oder nichtmetallische (z.B. $A1_2O_3$, WC) Schichten hergestellt werden. Prallen aufgeheizte (meist schmelzflüssige) Partikel mit hoher Geschwindigkeit auf die Bauteiloberfläche, entstehen gewöhnlich poröse Schichten. Die **Haftfestigkeit** ergibt sich als Folge **mechanischer Verklammerung** und/oder von **Diffusionsvorgängen** (insbesondere bei nachfolgenden Wärmebehandlungen, Bild 12.2.1.8.2-2). Je nach Art der Wärmequelle, der Form des Zusatzwerkstoffes und des Beschleunigungsvorganges unterscheidet man zwischen **Flammspritzen** (Pulver-, Draht-, Stab), Plasmaspritzen (Pulver-, Draht-, Stab-), **Detonationsspritzen** (Pulverspritzen; Beschichtungsverfahren der Fa. Union Carbide) und das **Lichtbogenspritzen** (Drahtspritzen).

Die verschiedenen Spritzverfahren beeinflussen in hohem Maß den Grundwerkstoff und die Spritzschicht. Der Grundwerkstoff wird verfahrensabhängig unterschiedlich aufgeheizt, was zu dessen Festigkeitsveränderung führen kann. Diese Aufheizung erfolgt in erster Linie mit dem auftreffenden heißen Spritzgut und gegebenenfalls einer Vorwärmung.

Unterschiedliches Wärmedehnungsverhalten von Spritzschicht und Grundmaterial kann, je nach Temperaturniveau und -verlauf beim Spritzvorgang zu merklichen **Eigenspannungen** führen. Das Niveau der Eigenspannungen in der Schicht hängt unter anderem von Festigkeit und E-Modul der Spritzschicht ab. Damit ist die zyklische Festigkeit und die Haftfestigkeit der Spritzschicht beeinflusst. Erfahren spröde Spritzschichten wie Wärmedämmschichten im Betrieb hohe zyklische Dehnungen, kann versucht werden mit mehrlagigen und/oder gradierten Schichten einen sanften Übergang zu schaffen, um so den Spannungsverlauf zu entschärfen (Lit. 12.2.1.8-13). Die Spritzschicht hängt in ihrem **Aufbau** (z. B. Porosität, Struktur) und in ihrer Zusammensetzung (z.B. Oxidgehalt oder Anteil verschiedener Phasen wie Nickel und Grafit) erheblich vom Spritzverfahren ab. Ermüdungsrisse in der Spritzschicht können sich, begünstigt von einer guten Haftfestigkeit in das Grundmaterial fortsetzen. Umgekehrt wurde auch beobachtet, dass sich Ermüdungsrisse im Grund-

material unter der Spritzschicht bildeten, ohne dass Risse durch die Spritzschicht zur Oberfläche hin ausgetreten wären. Ein solches Verhalten lässt sich mit einem sehr niedrigen E-Modul der Schicht (insbesondere bei porösen Schichten zu erwarten) im Vergleich zum Grundmaterial erklären. Damit wird die zerstörungsfreie Prüfung von Bauteilen mit Spritzschichten besonders problematisch.

Das Prinzip des **Metallspritzens** lässt erwarten, dass während der Abkühlung in der gegenüber dem Grundwerkstoff heißeren Spritzschicht Zugspannungen entstehen. Diese führen zu Verformungen des Werkstücks (Verzug), falls dieses dünnwandig genug ist, oder zu einer verschlechterten Haftfestigkeit. Zugspannungen können die Schwingfestigkeit der Haftzone verschlechtern und so zum frühzeitigen Abplatzen der Schichten im Betrieb führen. Auch zu hohe Druckspannungen sind ein Problem. An konvex gekrümmten Flächen wie Schaufelkanten unterstützen sie ein Abheben der Wärmedämmschicht (Band 4, Bild 18.8-4.3 und Lit. 12.2.1.8-25).

Bei **Ti-Legierungen** als Grundwerkstoff besteht die besondere Gefahr der Gasaufnahme während des Spritzvorgangs und so einer merklichen Versprödung. Als Gase die auf Ti-Legierungen in diesem Zusammenhang versprödend wirken, kommen in erster Linie Sauerstoff (Oxidbildung, Stabilisierung bestimmter Gefügebestandteile α-Anteil wird erhöht) und **Wasserstoff** in Frage. **Sauerstoffaufnahme** kann nicht mit Hilfe einer Nachbehandlung rückgängig gemacht werden.Das gilt auch für eine Versprödung durch Wasserstoff wenn sich bereits **Titanhydride** gebildet haben.

Bild 12.2.1.8.2-1 Thermische Spritzschichten *werden mit unterschiedlichen Aufgaben in vielen Bereichen von Triebwerken angewandt:*
- Verschleißschutz,
- Wärmedämmschicht,
- Oxidationsschutz,
- Schutz gegen Heißgaskorrosion (HGK),
- Anstreif- und Einlaufschichten,
- Panzerungen
Sie sind den jeweiligen Anwendungen in ihren Eigenschaften angepasst. Dies erfordert sehr anwendungsspezifische Eigenschaften wie
- Abriebverhalten/Einlauffähigkeit
- Widerstand gegen Schwingverschleiß (Fretting)
- Erosionsfestigkeit
- Wärmeisolierung
- Schneidwirkung
- Korrosionsschutz
- Resistenz gegen Metallfeuer/Metallschmelzen
- Schwingungsdämpfung.
Man erkennt, dass ohne thermische Spritzschichten ein modernes Triebwerk nicht mehr realisierbar ist. Das gilt besonders für Forderungen nach einer minimalen Deterioration (Anstieg des Kraftstoffverbrauchs mit der Triebwerkslaufzeit). Sie hängt entscheidend von ***Leckagen an Bewegungsdichtungen*** *(Schaufelspitzen, Labyrinthen) ab (Band 2, Kapitel 6.10.3.1.1).*
Diesen Anforderungen wird mit Hilfe geeigneter Spritzpulver und optimierter, erprobter und

© Axel Rossmann - Turbocon sult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

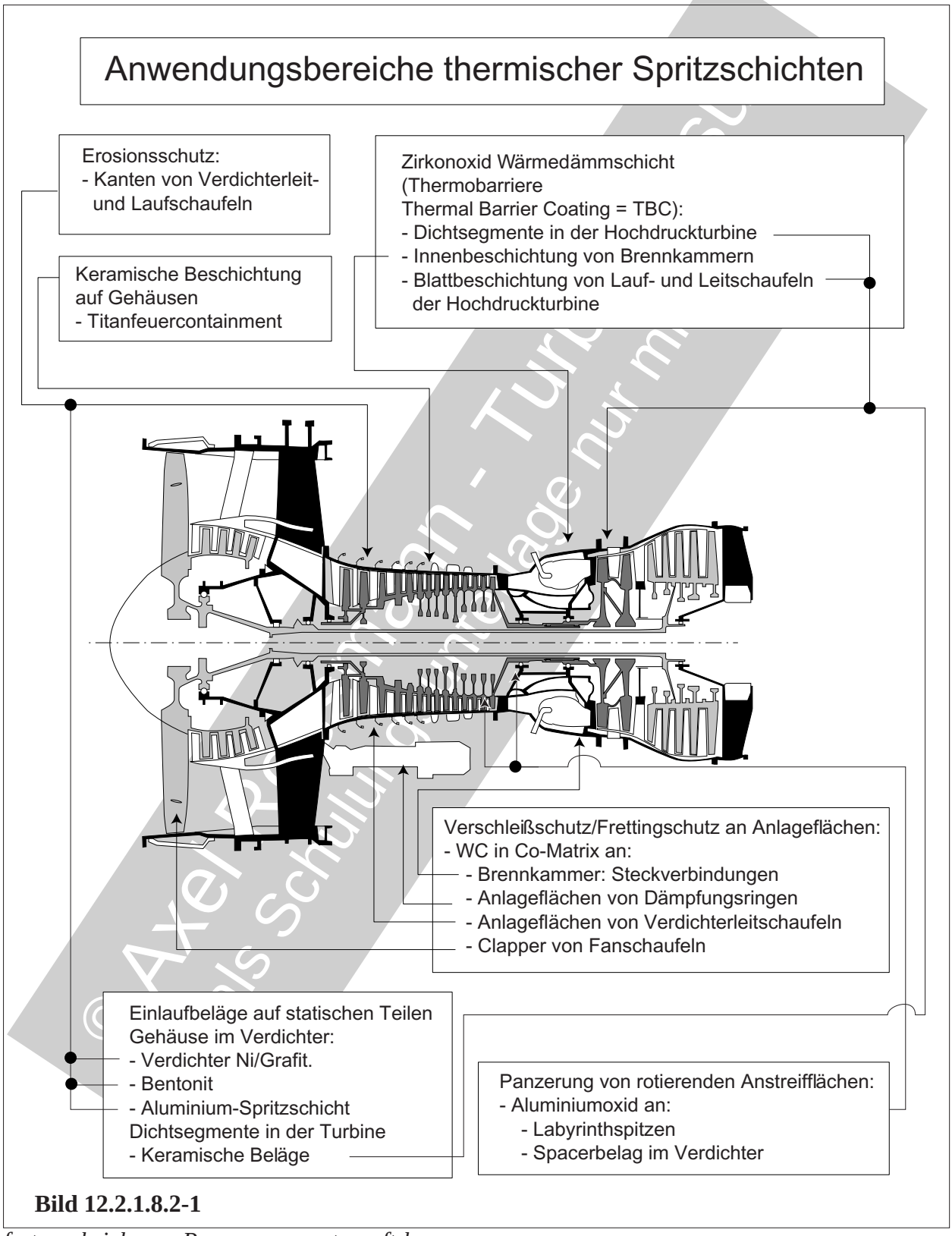


Bild 12.2.1.8.2-1

festgeschriebener Prozessparameter, oft bauteilbezogen entsprochen. Bereits kleine Abweichungen von den vorgeschriebenen Prozessparametern können die Schichteigenschaften unzulässig beeinflussen (Bild 12.2.1.8.2-2 und Bild 12.2.1.8.2-3).

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Die Struktur thermischer Spritzschichten bestimmt entscheidend ihre Eigenschaften.

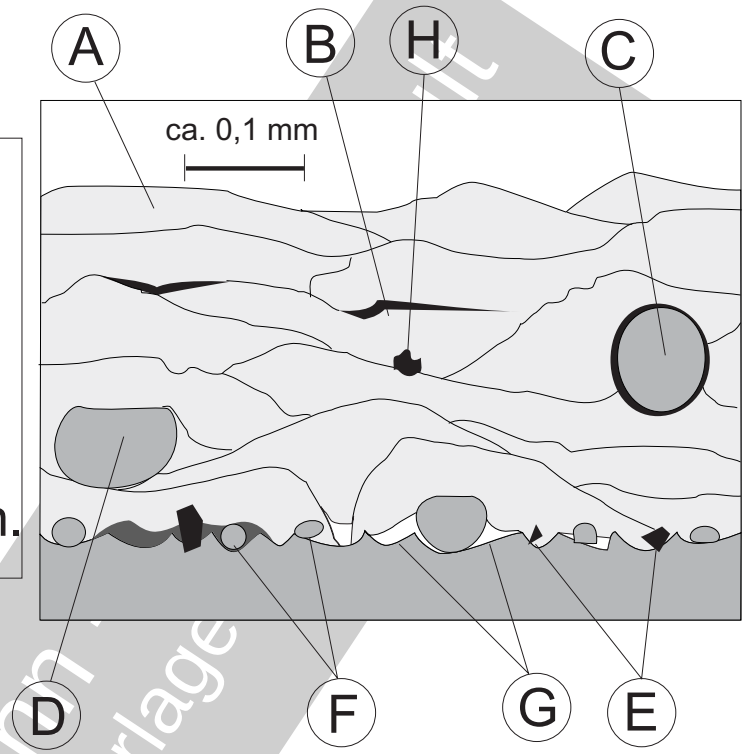


Bild 12.2.1.8.2-2

Bild 12.2.1.8.2-2: *Typische Eigenschaften und Besonderheiten thermischer Spritzschichten sollten nicht nur dem Fachmann bekannt sein. Eine Vielfalt* ***thermischer Spritzverfahren*** *(z.B. Plasma- und Flammspritzverfahren an Luft oder unter Schutzgas, bei atmosphärischem Druck oder bei Niederdruck) stehen zur Verfügung. Die typische* ***Spritzschichtdicke*** *liegt im Bereich von mehreren Zehntelmillimetern. Die* ***Struktur*** *einer solchen Schicht (Lit. 12.2.1.8-1) ist prinzipbedingt lamellar (****"A"****) entsprechend der auftreffenden weichen oder flüssigen Partikel (Bild 12.2.1.8.2-3). Verfahren die an Luft durchgeführt werden, erzeugen verstärkt* ***Oxide (****"B"****)*** *und Teilchen mit Oxidhaut. Nicht selten erkennt man im Querschliff oder einer Bruchfläche oxidierte Teilchen, die sich im Spritzstrahl bei Kontakt mit Sauerstoff bildeten (****"C"****) und* ***nicht ausreichend aufgeschmolzene Partikel (****"D"****).*

Merkliche ***Oxidation des Haftgrunds*** *bei Sauerstoffzutritt während hoher Prozesstemperatur verschlechtert die Bindung der Schicht. Abrasives Strahlen als Vorbereitung der Bauteiloberfläche hinterlässt* ***mineralische Strahlteilchen (****"E"****,* ***Beladungseffekt****, z.B.* Al_2O_3 *oder* SiO_2*).*

*Sogenannte "****Abpraller****" (****"F"****) der Spritzpartikel auf der Haftfläche oder ausgeplatzte Schichten sind in größerer Zahl ein Indiz für* ***schlechte Haftfestigkeit****. Ein vergleichbares Phänomen lässt sich am schlecht haftenden Klebefilm auf einer staubigen Fläche beobachten (Bild 12.2.1.8.2-4 und Lit. 12.2.1.8-26).*

*Poren (****"G"****) in Spritzschichten sind typisch und zur Erzielung bestimmter Eigenschaften auch notwendig. Hierzu gehören Einlauffähigkeit, Thermowechselfestigkeit und Wärmeisolation. Die Bewertung muss sich deshalb an der zugehörigen Spezifikation ausrichten, die wiederum auf betriebsrelevanten Versuchen und Erfahrung beruht. Zu große Porosität im Haftschichtbereich beeinflusst die Haftfestigkeit negativ. Auch* ***nicht aufgeschmolzene Einschlüsse (****"H"****)*** *mit hohem Schmelzpunkt sind in Schichtstrukturen erkennbar und weisen bei häufigem Auftreten auf unzulässige Verunreinigungen des Spritzpulvers hin.*

© Axel Rossmann
als Schulungsunterlage

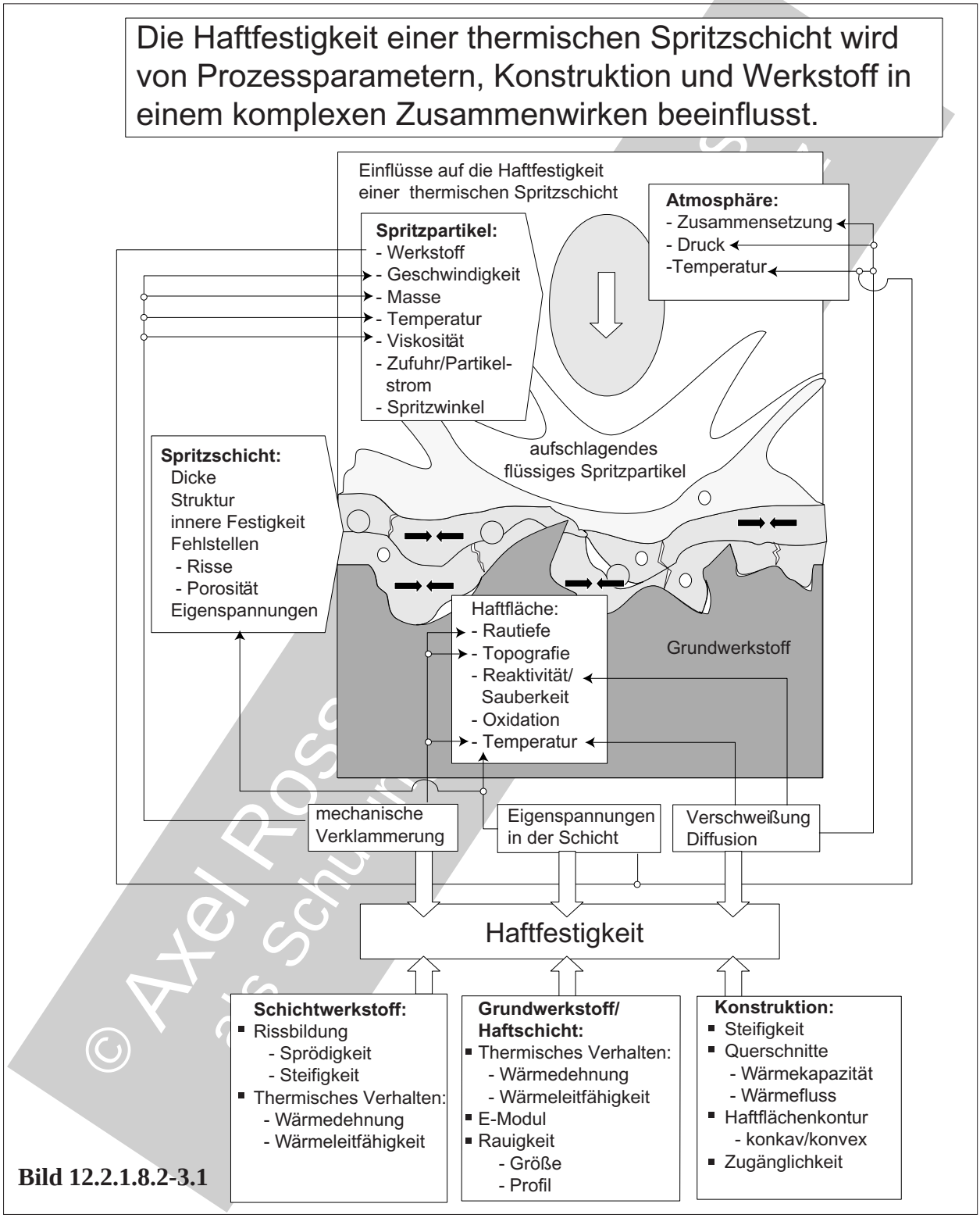


Bild 12.2.1.8.2-3.1

© Axel Rossmann

Bild 12.2.1.8.2-3.1 und Bild 12.2.1.8.2-3.2: *Die **Haftfestigkeit** bzw. deren **Verhalten über der Betriebszeit** ist von entscheidender Bedeutung für die Lebensdauer der Schicht bzw. des Bauteils. Je höher die Haftfestigkeit, umso unwahrscheinlicher sind Schichtablösungen. Andererseits begünstigt eine hohe Haftfestigkeit die **Ausbreitung von Schichtrissen in den Grundwerkstoff** (Bild 12.2.1.8.2-5). Die Haftfestigkeit ist von einem Zusammenwirken unterschiedlicher **Einflüsse** bestimmt (Bild 12.2.1.8.2-3.2). Sie lassen sich Prozesspara-*

metern, Werkstoffeigenschaften und Konstruktion zuordnen. Davon sind wichtige Einflüsse betroffen (Band 4, Bild 18.8-4.1/-4.2/-4.3).
- ***Formschluss** als mechanische Verklammerung,*
- ***Eigenspannungen** in der Schicht,*
- ***Werkstoffschluss** zum Grundmaterial.*

*Die komplexen Zusammenhänge all dieser Einflüsse entziehen sich einer exakten Vorausbestimmung. Die für das benötigte Betriebsverhalten optimalen Prozessbedingungen müssen in Versuchen empirisch ermittelt und ausreichend detailliert festgeschrieben werden. Der Fertigungsprozess hat sich exakt an diese Vorgaben zu halten. Dies ist umso wichtiger, weil kein befriedigendes seriengeeignetes Verfahren für die **zerstörungsfreie Bestimmung der Haftfestigkeit** thermischer Spritzschichten am Bauteil vorliegt (Band 4, Bild 18.8-6). So bleibt nur, durch spezifizierte technologische Prüfungen an statistisch ausgewählten Bauteilen einen vergleichenden Nachweis zu erbringen. Eine quantitative Bestimmung der Haftfestigkeit an Proben ist dagegen durchaus möglich (Band 4, Bild 18.9-5)*

*Der **Formschluss** ist in erster Linie von der **Vorbehandlung** der zu spritzenden Oberfläche abhängig:*
*Um eine gute Haftung zu gewährleisten, werden Spritzflächen geeignet behandelt. Übliche Verfahren sind Drehen, Rändeln, elektrisches Aufrauen mit einer Nickelelektrode, Strahlen mit Korund oder Drahtkorn. Dabei hat jedoch die **Rauigkeit ihre Grenzen,** wenn die Kerbwirkung die Schwingfestigkeit des Bauteils unzulässig beeinflusst (Bild 12.2.1.8.2-5 und Band 4; Lit. 12.2.1.8-10).*
Um eine gute Haftfestigkeit auch unter extremen Betriebsbedingungen (Langzeit, hohe Temperatur, zyklische Beanspruchung) zu gewährleisten, kommen Haftschichten zwischen Grundmaterial und Spritzschicht zum Einsatz.

***Eigenspannungen in der Schicht:** Beim Abkühlen der heißen Schichtspritzer kommt es zur **Wärmeschrumpfung** und damit zu **Zugspannungen** in der Schicht. Diese haben den Vorteil eines **Kraftschlusses** zwischen Schicht und Rauigkeitsspitzen des Grundmaterials (Bild 12.2.1.8.2-3.2). Nachteilig ist, dass die Zugspannungen vorzugsweise parallel zur Haftfläche wirken, und vom Grundwerkstoff aufgenommen werden müssen. Resultierende Schubspannungen können die Haftung schädigen und im späteren Betrieb **Abplatzungen** auslösen. Je nach Temperatur des Bauteils verändert ein Abkühlen des Systems nach Beendigung des Beschichtungsvorgangs diesen Eigenspannungszustand. Im abgekühlten Bauteil sind die Eigenspannungen außer von der Temperaturdifferenz auch vom unterschiedlichen Wärmedehnungsverhalten des Schicht- und Grundwerkstoffs beeinflusst. Im Extremfall, bei sehr geringer Wärmedehnung einer Schicht im Vergleich zum Substrat, befinden sich im abgekühlten Zustand in dieser hohe Druckspannungen. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei keramischen Schichten (Wärmedämmschichten) auf metallischem Grundwerkstoff. Schichten mit hohen Druckspannungen neigen besonders an konvexen Flächen zum Abheben bzw. Ausplatzen (Band 4, Bild 18.8-4.3).*

***Werkstoffschluss** entsteht infolge einer **Verschweißung und Diffusion** metallischer Spritzpartikel während dem Kontakt beim Aufschlag. Dafür sind ausreichend hohe Materialtemperaturen beim Spritzprozess notwendig.*
*Spritzen mit **hochenergetischen Partikeln** (hohe Auftreffgeschwindigkeit) nutzt ein Verschweißen der Partikel mit dem Grundwerkstoff. Auch eine nachfolgende ausreichend hohe Wärmebehandlungstemperatur kann zu einer verbesserten Haftfestigkeit durch Diffusion beitragen.*
Diese kohäsive Bindung von Schicht zum Grundwerkstoff ist besonders zwischen metallischen Schichten auf metallischem Grundwerkstoff zu erwarten. Sie ermöglicht höchste Haftfestigkeiten. Eine solche Verbindung tritt örtlich in Mikrozonen auf, wo ein Verschweißen und/oder Diffusion des Tropfens mit dem

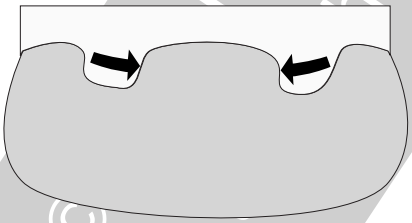
© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Grundwerkstoff stattfindet. Diffusion kann auch während einer nachfolgenden Wärmebehandlung eintreten. Je höher die Spritztemperatur und die Temperatur der Haftfläche und umso reaktiver bzw. vom Spritzmaterial benetzbar diese ist (metallisch blank), umso eher kommt es zu einem Werkstoffschluss.

Mechanismen der Haftung thermischer Spritzschichten.

Formschluss an Hinterschneidungen auf Grund der plastischen Anformung der Spritzpartikel.

Kraftschluss durch Klemmwirkung infolge thermischer Schrumpfung bei der Abkühlung.



Materialschluss durch Diffusion/ Kaltverschweißung beim Auftreffen hochenergetischer Spritzpartikel.

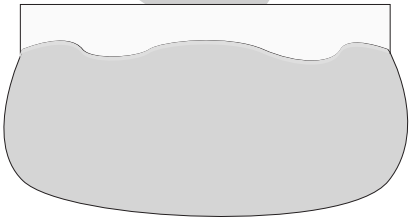
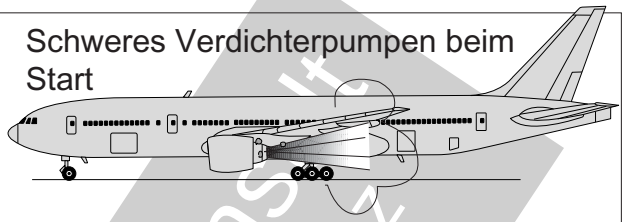
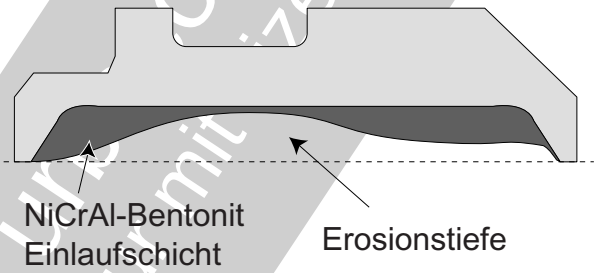
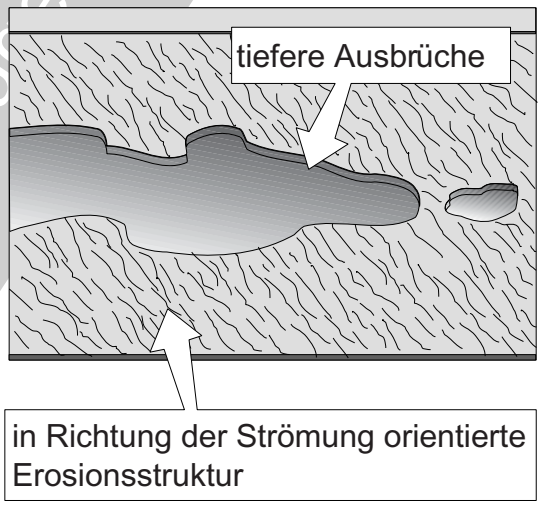


Bild 12.2.1.8.2-3.2





Ansicht der erodierten Einlaufschicht.



Beispiel 12.2.1.8.2-1 (Lit.12.2.1.8.2- 24, siehe auch Lit. 12.2.1.8-26):

Die **frühzeitige Erosion der Einlaufbeläge** des Hochdruckverdichtergehäuses führte zu gefährlichem **Verdichterpumpen** beim Start.

Eine Untersuchung zeigte schadenserklärende **herstellungsspezifische Schichtbesonderheiten**. Dabei ging es um **Porosität** und den **Anteil der metallischen Phase**. Problematisch ist, dass sich die Schichtqualität nur an separat gegossenen Proben mit einer **Eindruckprüfung** (‘Härteprüfung’) überwachen lässt. Diese Probenanordnung erfolgte im aktuellen Fall offenbar nicht am Bauteil entsprechend den Angaben des OEM. Stattdessen konnten die Proben separat gespritzt werden.

© Rossmann - Turbo Consult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

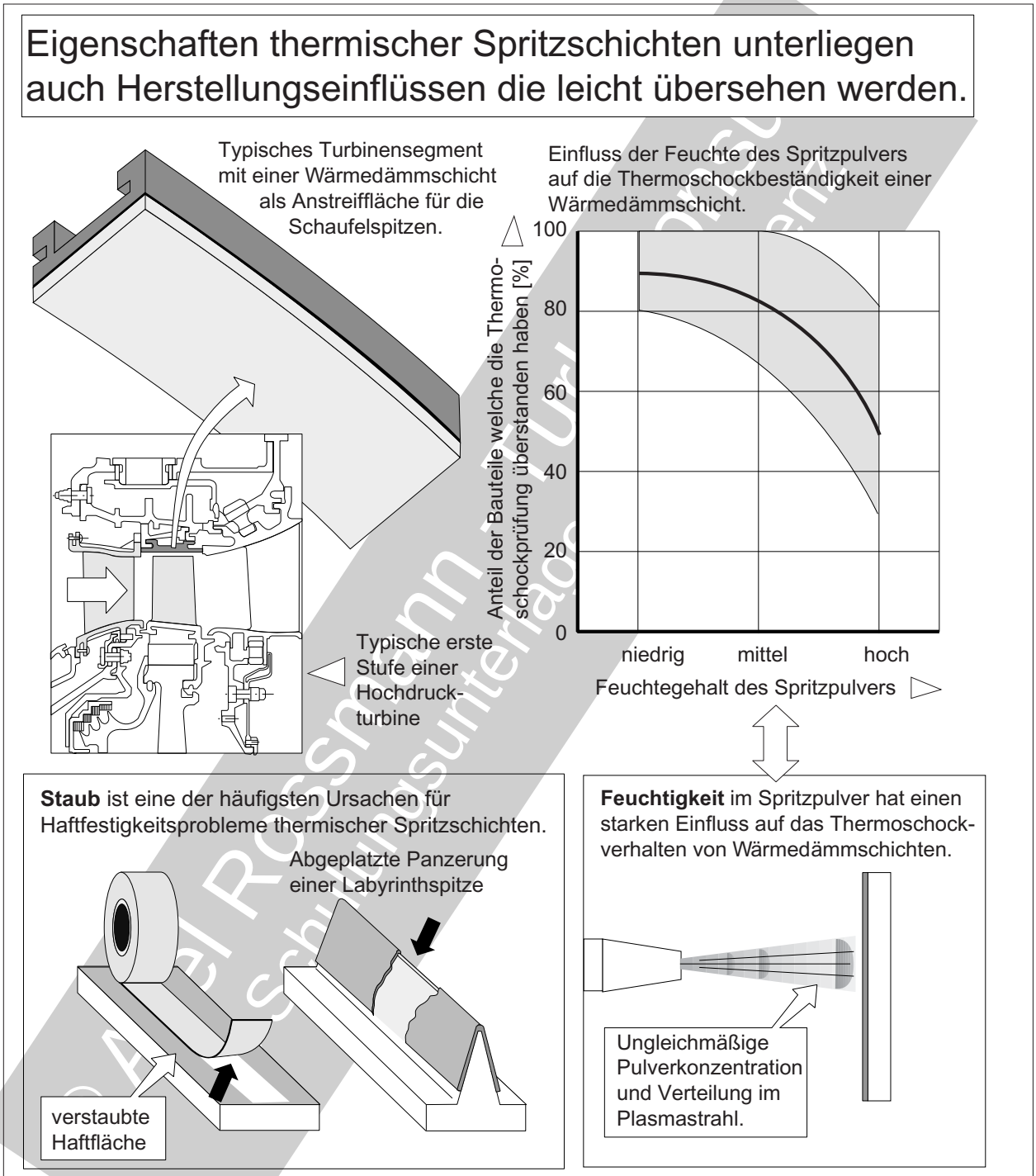


Bild 12.2.1.8.2-4

Bild 12.2.1.8.2-4: *(Siehe auch Band 4, Bild 18.8-5 und Bild 18.8-6 und Lit. 12.2.1.8-26). Es gibt* ***herstellungsbedingte Einflüsse****, die nicht bekannt oder bewusst sind, welche die Eigenschaften von thermischen Spritzschichten aber entscheidend beeinträchtigen können (Bild 12.2.1.8.2-6.1).*

Staubablagerungen auf der zu beschichtenden Werkstückfläche*. Es handelt sich um das sogenannte* ***„Kügelchenproblem“,*** *benannt nach dem typischen mikroskopischen Befund (REM/SEM). Es entsteht während des Spritzprozesses. Auf* ***abgeplatzten Flächen*** *sowohl der Schicht als auch des Substrats erkennt man* ***Ansammlungen kleiner, meist kugeliger Par-***

***tikel**. Dabei handelt es sich in der Regel um Abpraller vom Beschichtungsprozess, die sich auf der zu beschichtenden Fläche wegen ungenügender Abschirmung ablagern konnten und überspritzt wurden. Solche Abpraller können auch bei mehrmaligem Beschichtungsdurchlauf flächig angeordnet in der Schicht auftreten und deren innere Festigkeit schwächen. Es handelt sich um einen Effekt, der mit der allgemein bekannten schlechten Haftung eines Klebstreifens auf einer staubigen Fläche zu vergleichen ist (Skizze unten links). Diese Schwächung der Haftfestigkeit beobachtet man besonders bei porösen Einlaufschichten (z.B. Ni/Grafit) und keramischen Wärmedämmschichten.*

*Kommt **feuchtes Spritzpulver** zur Anwendung, lässt sich an keramischen Wärmedämmschichten (Zirkonoxid) ein deutlich **verschlechtertes Thermoermüdungsverhalten** beobachten (Skizze oben links, Diagramm oben rechts, Lit. 12.2.1.8-9). Dieser Effekt wird offenbar auf die verschlechterte Rieselfähigkeit und/oder Zumischung des Pulvers in den Plasmastrahl zurückgeführt. So entsteht anscheinend eine **ungleichmäßige Partikelverteilung und eine stoßweise Förderung der Partikel im Strahl** (Skizze unten rechts).*

Merksatz:

Bevor Pulver für einen thermischen Spritzprozess einem Aufbewahrungsgefäß entnommen wird, ist es gut durchzumischen.

***Bild 12.2.1.8.2-5:** Der Herstellungsprozess und die thermische Spritzschicht selbst können die **Schwingfestigkeit eines Bauteils** entscheidend beeinflussen. Die nachstehend beschriebenen Effekte wurden in Versuchen an Proben aus 12%-Cr-Stahl mit Wolframkarbidschichten (WC-17%Co), Chromkarbid (Cr_2C_3-20% NiCr) oder Inconel 625 weitgehend bestätigt (Lit. 12.2.1.8-15). Die Größe des Einflusses hängt nicht zuletzt von der **Art der schwingenden Belastung** ab. Die **hohen Spannungsgradienten** bei Biegung lassen die Spannungen zum Grundmaterial merklich absinken (mittlere Skizze). Die Haftfläche wird bereits etwas weniger als die Schicht gedehnt. Ist der Querschnitt gleichmäßig zugbeansprucht, erfahren Schicht, Haftfläche und Grundwerkstoff die gleiche Dehnung. Nach den jeweiligen Verhältnissen richten sich auch die wahrscheinlichen Anrisse bei Schwingermüdung (Details). Dabei sei jedoch angemerkt, dass neben E-Modul und Belastungsart eine Vielzahl weiterer Einflüsse auf die Anrisslage und den Rissfortschritt einwirken (Tabellen). Die Darstellung soll deshalb lediglich auf die Problematik hinweisen.*

***Eigenspannungen** beruhen auf **Wärmedehnungsunterschieden** (Temperaturgradienten) in der Schicht selbst sowie zwischen Schicht und Grundwerkstoff. Allgemein gilt, Zugspannungen vermindern als Mittelspannungsanstieg die Schwingfestigkeit, Druckspannungen führen zu einer Anhebung. Die Eigenspannungen in Schicht und Grundwerkstoff entstehen zunächst in der Schicht beim Erstarren der Tröpfchen nach dem Aufschlag. Dieser Vorgang ist komplex, weil jedes **Tröpfchen mit einem Aufheizeffekt** und möglicherweise einem „**Schmiedeeffekt**“ die Eigenspannungen in den darunter befindlichen Lagen verändert. Je nach Temperatur des Grundwerkstoffs verändern sich beim Abkühlen nach dem Beschichtungsprozess die Eigenspannungen. Auch diese können sich nochmals während einer anschließenden Wärmebehandlung verändern. Gewöhnlich werden die Spannungen von Kriechen/Relaxation abgebaut (Band 4, Bild 18.4-15.1).*

Betrachtet bzw. prüft man das Verhalten der Schichten unter Betriebstemperaturen zeigt sich, dass in Schichten mit einem höheren Wärmedehnungkoeffizienten als der Grundwerkstoff Druckspannungen entstehen, die eine deutlich höhere Schwingfestigkeit in der Schicht erwarten lassen als bei Schichten mit kleinem Wärmedehnungskoeffizienten. Dabei dürften die Schichtfestigkeit und der Spannungsverlauf eine Rolle spielen. Weist die

© Prof. Dr. Rossmann - Tutorium Ingenieurlehre für Lehrer

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Einfluss von Belastungsart und E-Modul auf Schwingrisse in Bauteilen mit thermischen Spritzschichten.

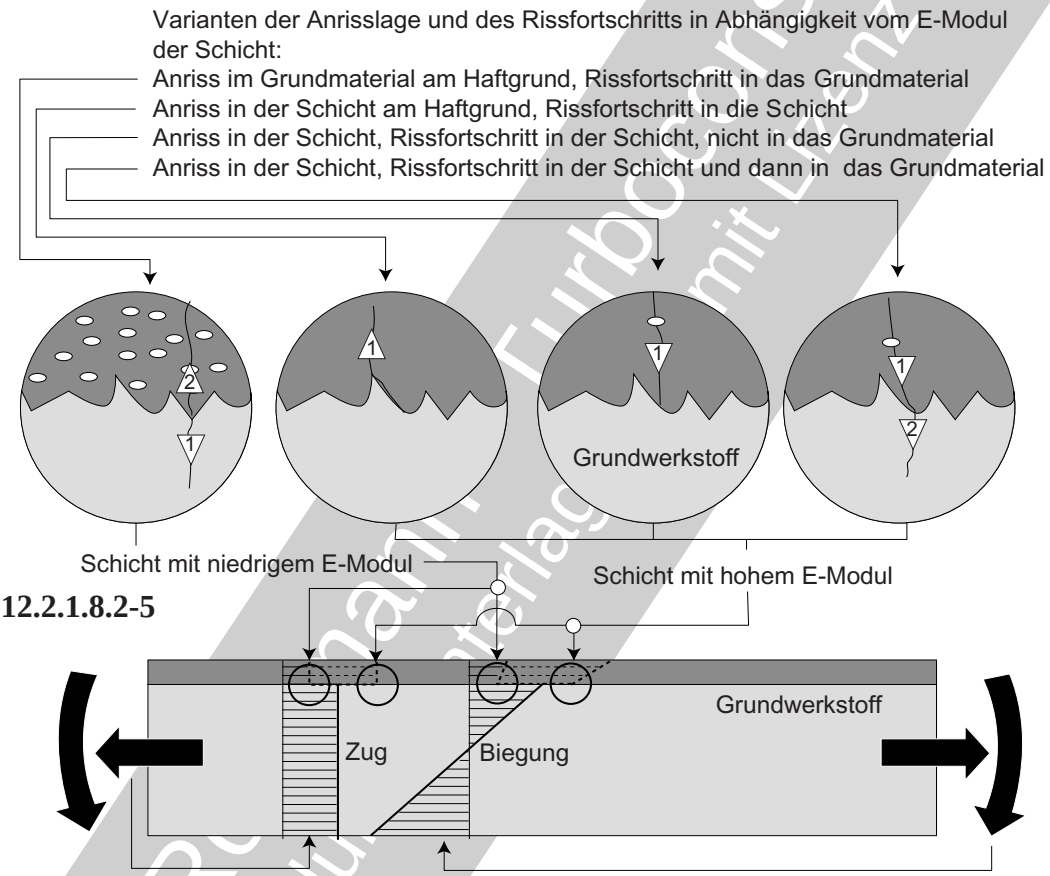


Bild 12.2.1.8.2-5

Einflüsse die einen Schwinganriss im Grundwerkstoff begünstigen :	
Einfluss	Schicht Grundwst.
E-Modul	<
Wärme-dehnung	>
Festigkeit	>
Schichtdicke	dünn
Spannungs-gradient	niedrig
Kerben in der Haftfläche	Aufrauung, Riefen
Temperatur	Festigkeitsabfall
Zugspannung	<

Einflüsse die einen Schwinganriss in der Schicht begünstigen :	
Einfluss	Schicht Grundwst.
E-Modul	>
Wärme-dehnung	<
Festigkeit	<
Schichtdicke	dick
Spannungs-gradient	hoch
Kerben in der Schicht	Poren, Risse Bindefehler
Zugspannung	>

Schicht eine dem Grundwerkstoff vergleichbare Festigkeit und einen hohen E-Modul auf, können hohe Zugspannungen übertragen werden. Bei einem flachen Spannungsgradienten, d.h. ***hoher Schwingbelastung in der Haftfläche*** *des Grundwerkstoffs können gefährliche Anrisse entstehen.*

Je niedriger der E-Modul der Schicht im Vergleich zum Grundwerkstoff („Mismatch“), umso niedriger sind die Spannungen in der

© Axel Rohmann - Turbocorrs Unterlagen mit Lizenz

Schicht bei gleicher Dehnung. Von diesem „Traganteil“ der Schicht ist nicht nur die maximale Höhe der Spannung in der Probe betroffen, sondern auch die Lage des Spannungsmaximums (mittlere Skizze). An Hand des Modells eines Gummibelags auf einer Stahlprobe ist das leicht einzusehen. Auch die Höhe von Eigenspannungen verhält sich bei dehnungsgesteuerten Vorgängen, wie behinderter Wärmedehnung (Thermoermüdung), entsprechend dem E-Modul.

Haftfestigkeit: *Je größer die Haftfestigkeit einer Schicht, umso eher können Risse aus der Schicht in den Grundwerkstoff verlaufen (Details oben, Band 4, Bild 18.7-2) und so die Schwingfestigkeit absenken. Löst sich dagegen eine Schicht, wird der Riss von der Trennung gestoppt.*

Schichtfestigkeit: *Je höher die* ***Zugfestigkeit der Schicht,*** *umso eher kann sie bei äußerer Belastung mittragen. Der Grundwerkstoff kann von den Schichteigenspannungen höher belastet werden. So ist es, abhängig vom Wärmedehnungsverhalten denkbar, dass je nach Betriebstemperatur die Schwingfestigkeit angehoben oder abgesenkt wird.*

Festigkeitsänderung des Grundwerkstoffs: *Als Folge der Erwärmung beim Spritzprozess oder in Diffusionszonen mit der Beschichtung können Härte bzw. Festigkeit deutlich abfallen. Dies gilt insbesondere für Vergütungsstähle. Die Vorwärmtemperatur des Bauteils und die Spritztemperatur sind deshalb geeignet abzustimmen. Gegebenenfalls sind an bauteilrelevanten Proben die Prozessparameter nachzuweisen.*

Topografie der Haftfläche: *In Probenversuchen wurden* ***Schwingrisse unterhalb von Spritzschichten im Grundwerkstoff*** *beobachtet. Diese starteten von Kerben die von Einschlägen scharfkantigen Strahlgutes stammten (Details oben, Lit. 12.2.1.8-22). Dies ist verständlich, wenn die* ***Steifigkeit (E-Modul) der Beschichtung deutlich unter der des Grundwerkstoffs liegt****. Ein typisches Beispiel sind poröse Einlaufschichten aus Ni-Grafit.*

Bild 12.2.1.8.2-6.1: *Weil der zerstörungsfreien Prüfung thermischer Spritzschichten wegen der besonderen Struktur enge Grenzen gesetzt sind, muss die Qualität über die* ***Stabilität des Verfahrens*** *abgesichert werden. Dies geschieht mit einer* ***intensiven Erprobung*** *zur* ***Ermittlung der optimalen Verfahrensparameter****. Diese sind dann strikt einzuhalten.*

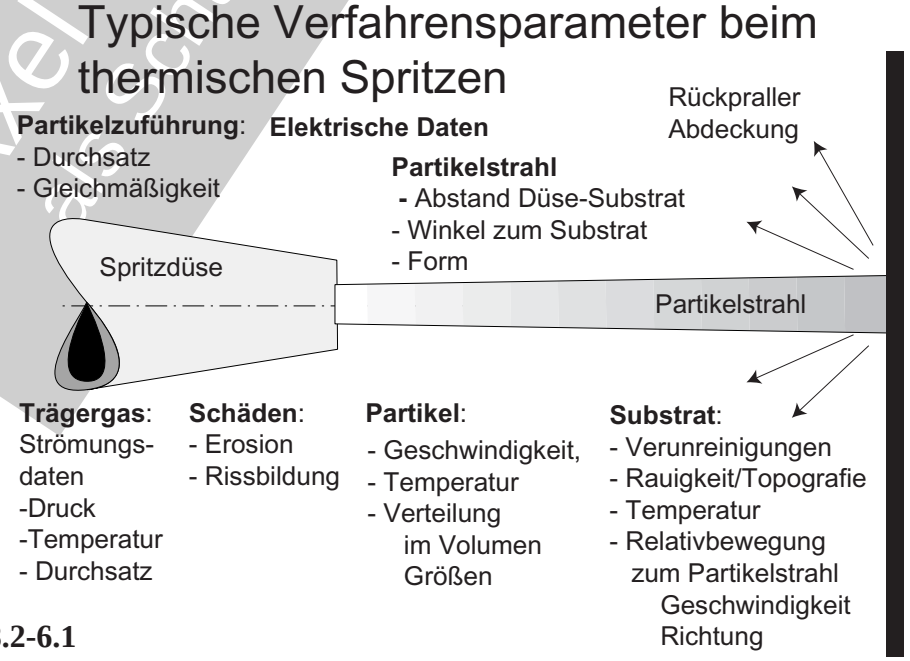


Bild 12.2.1.8.2-6.1

© Axel Rossmann - Turbocon Suit als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

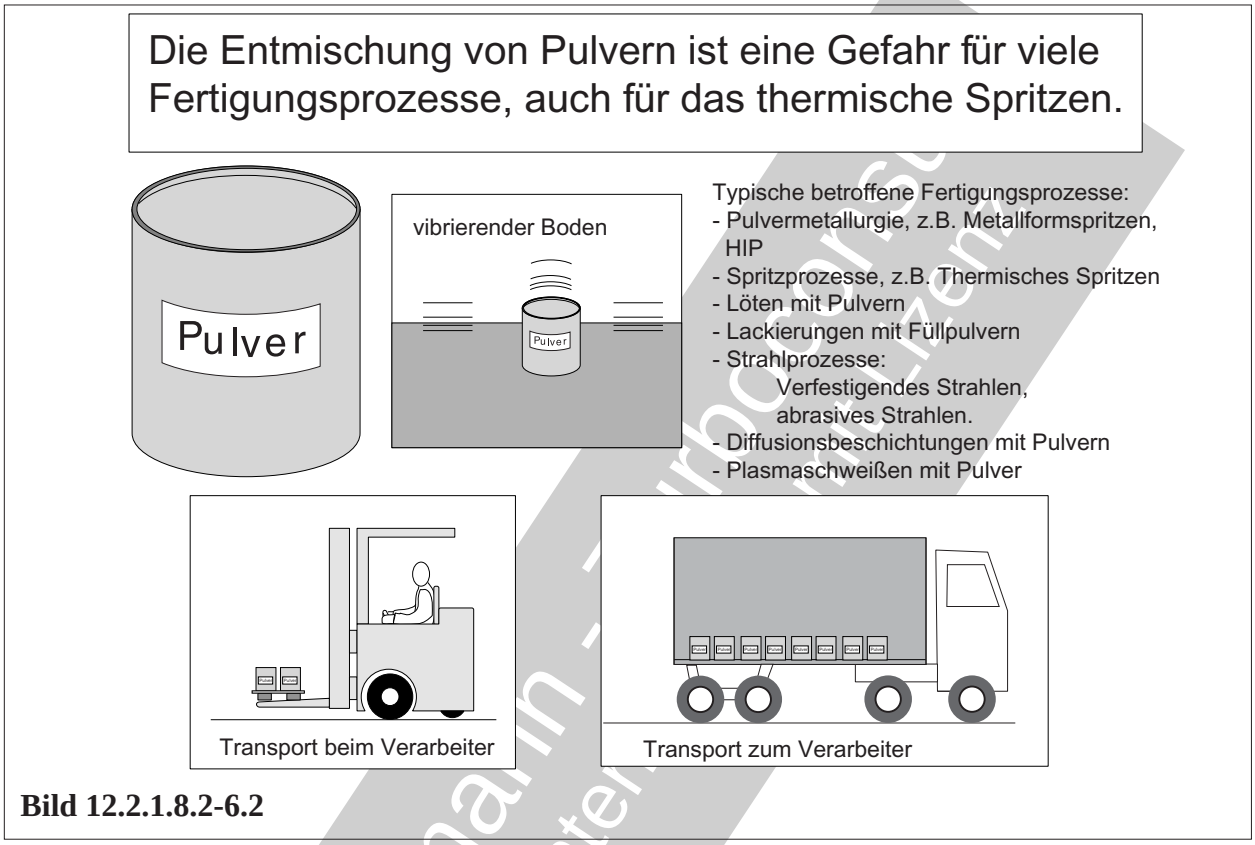


Bild 12.2.1.8.2-6.2

Bild 12.2.1.8.2-6.2: Pulver können sich, abhängig von ihrer Rieselfähigkeit unter Vibrationen entmischen *(siehe auch Bild 11.2.3-3). Für eine Entmischung sind nicht unbedingt auffällige Vibrationen wie beim Transport notwendig. Es genügt, wenn über längere Zeiten scheinbar vernachlässigbare Vibrationen des Hallenbodens auf das Gefäß wirken.*

Die Entmischung des Pulvers kann von Korngeometrie, -größen oder spezifischem Gewicht beeinflusst sein. Selbst minimale Legierungsunterschiede wie ein ***erhöhter Aluminiumgehalt*** *können eine Trennung begünstigen. Gerade Pulvergemische dürften zu Trennungen neigen.*

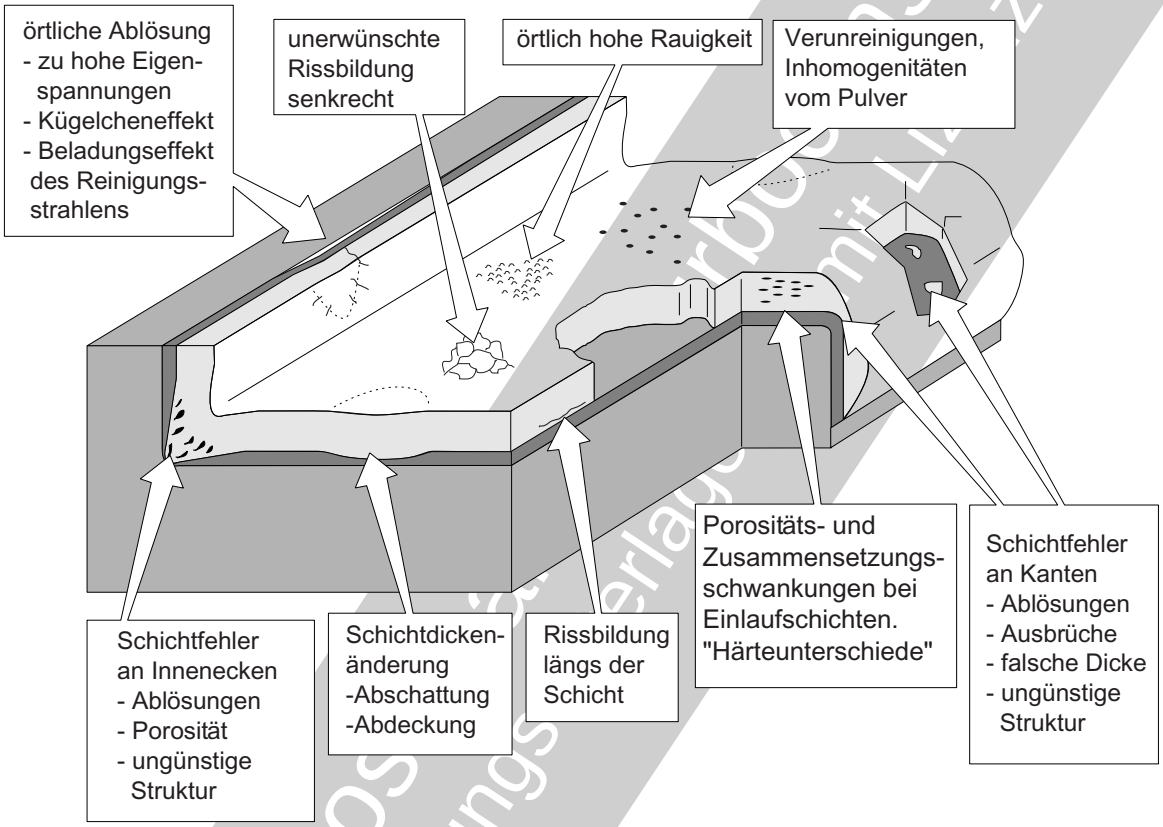
Wird dem Gefäß ohne zuvor ausreichende Mischung Pulver im Bereich der Oberfläche entnommen, können Korngrößen, Kornstruktur oder Zusammensetzung von den erprobten Prozessdaten abweichen und Schichteigenschaften wie Porosität, Festigkeit/Härte, Einlaufverhalten und Thermoermüdung unerwartet beeinflussen.

Bild 12.2.1.8.2-7: *Eine nicht optimale thermische Spritzbeschichtung kann Ursache unterschiedlicher* ***Schichtfehler*** *sein. Dies ist besonders problematisch, weil sich derartige Fehlstellen auf Grund von Porosität, Schichteigenschaften (z.B. unmagnetisch, nichtmetallisch) oder Schichtstruktur häufig nicht ausreichend sicher am Bauteil zerstörungsfrei nachweisen lassen (Bild 12.2.1.8-4 und Band 4, Kapitel 18.8). In solchen Fällen bleibt daher nur die* ***kontinuierliche dokumentierte Überwachung der relavanten Prozessparameter****.*

In der Skizze oben sind typische ***Fehl- und Schwachstellen an thermischen Spritzschichten*** *dargestellt. Diese treten je nach Beschichtungsbesonderheiten, Bauteilgeometrie und Schichteigenschaften in unterschiedlichen Kombinationen auf. Zu den Entstehungsursachen für diese Mängel siehe Bild 12.2.1.8.2-3.1 und Bild 12.2.1.8-4.*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.8-37

Fertigungsbedingte Fehler und Schäden thermischer Spritzschichten.



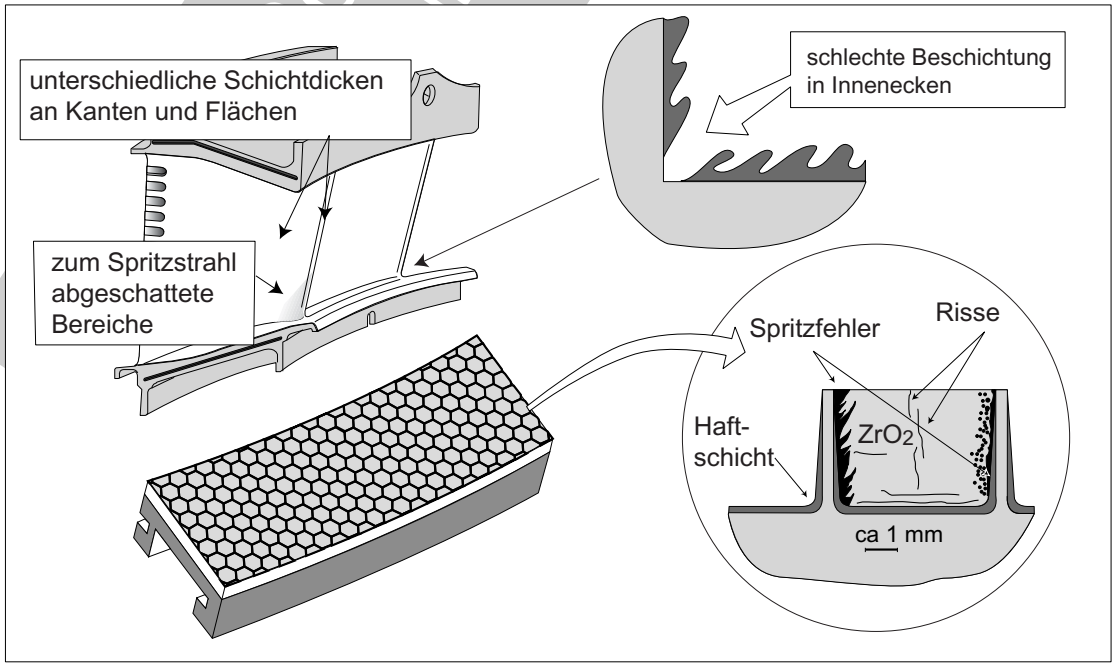


Bild 12.2.1.8.2-7

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Fortsetzung von Seite 12.2.1.8-35

Im Rahmen unten sind zwei typische, von der ***Geometrie des Bauteils bestimmte Probleme*** *dargestellt. Wird der Spritzstrahl von Kanten des Bauteils oder Vorrichtungen abgedeckt, kommt es zu* ***Schatten,*** *in denen die Schichtdicke und/oder die Qualität (z.B. erhöhte Porosität, schlechte Bindung) unzureichend ist (Skizze links). Ein solches Problem weist auf die* ***mangelhafte Erprobung des Beschichtungsprozesses*** *hin.*
Versucht man in einen Hohlraum oder eine konkave Kontur zu spritzen, kommt es verständlicherweise zur Interaktion des ***Spritzstrahls mit Rückprallern*** *und der* ***Verwirbelung des Trägergases****. Das führt zu typischen Spritzfehlern (Detail oben rechts) die sich an der besonderen Orientierung ihrer Porosität identifizieren lassen. Typisches Beispiel ist der Versuch, eine aufgelötete* ***Wabenstruktur*** *(Turbinensegment, unten links)* ***mit einer Spritzschicht zu füllen*** *(Detail unten rechts).*

Bild 12.2.1.8.2-8 *(siehe auch Bild 12.2.1.8-2): Thermische Spritzschichten können mit einer gezielten* ***Nacharbeit*** *erwünscht verändert werden. Sie lassen sich aber auch von nachfolgenden Fertigungsschritten schädigen.*
Übliche gezielte Nachbehandlungen von Spritzschichten sind:

Spanende Bearbeitung*, je nach Schichteigenschaften Schleifen oder Drehen, dient der Maßhaltigkeit. Diese ist z.B. zur Spaltminimierung an Dichtflächen wie Anstreifbelägen erforderlich. Auch eine verbesserte Oberflächengüte (geringe Rauigkeit) kann der Anlass für eine spanende Bearbeitung sein. Porositäten können geöffnet aber auch zugedrückt werden. Das beeinflusst bei weichen Einlaufschichten die Härte und damit das Anstreifverhalten. Verdichtete Schichten erhöhen mit einem Härte-/Festigkeitsanstieg den unerwünschten Spitzenabrieb. Sie können darüber hinaus die Schaufelspitze beim Anstreifen stärker aufheizen und die Schaufel zu gefährlichen Schwingungen anregen (Lit. 12.2.1.8-26).*

In spröden Schichten wie keramischen Wärmedämmschichten entstehen im Oberflächenbereich Mikrorisse (keine Segmentierungsrisse!) welche die ***Erosionsfestigkeit verschlechtern****. Besonders die Erosion keramischer Anstreifflächen von* ***Dichtungssegmenten in der Hochdruckturbine****, kann die Spaltverluste eines Triebwerks merklich erhöhen (Lit. 12.2.1.8-26).*
Setzt sich der ***während der Zerspanung entstehende Staub*** *in der Schichtoberfläche ab, kann dieser im Betrieb in eine Strömung wie Kühlluft oder Öl gelangen. So steigt das Risiko gefährlicher Folgeschäden wie die Laufbahnermüdung von Wälzlagern oder die Überhitzung von Heißteilen als Folge einer Verstopfung. Erzeugt die Zerspanung Verformungen und Eigenspannungen in der Beschichtung, kann dies das Ermüdungsverhalten der Schicht und/oder der Haftfläche beeinträchtigen und so die Lebensdauer verkürzen.*
Eine ***gezielte Wärmebehandlung*** *dient thermischen Spritzschichten zum Abbau von unerwünschten Eigenspannungen und der Duktilitätsverbesserung. Auch die Verbesserung der Haftfestigkeit lässt sich mit Eigenspannungsabbau, Diffusionsglühen und gegebenenfalls mit Aufschmelzen erreichen. Negativ können sich Wärmebehandlungen auswirken, die nicht mit der Schicht in Zusammenhang stehen und den Schichteigenschaften ungenügend angepasst sind. So kann eine poröse Schicht bei zu starker Erwärmung an Luft im gesamten Volumen oxidieren. Davon können auch nur bestimmte Schichtkomponenten betroffen sein, z.B. der Grafit in porösen Ni-Grafit Einlaufschichten. Auf diese Weise können sich auch die Schichthärte und/oder tribologische Eigenschaften wie eine fehlende „Schmierwirkung“ infolge der Oxidation von Grafit, unzulässig verändern.*
Mit Hilfe eines optimierten Temperaturzyklus lässt sich in Wärmedämmschichten ein gewünschtes Rissmuster (Segmentierungsrisse) günstig beeinflussen.
Ätzen und Reinigen: *Werden diese Bäder von porösen Schichten eingesaugt und nachträg-*

© Axel Rossmann - Turbomaschinen - Tubomachinery - Lehrmaterialien

Die Bearbeitung oder Nachbehandlung thermischer Spritzschichten ist in der Lage deren Eigenschaften deutlich, auch unerwünscht zu verändern.

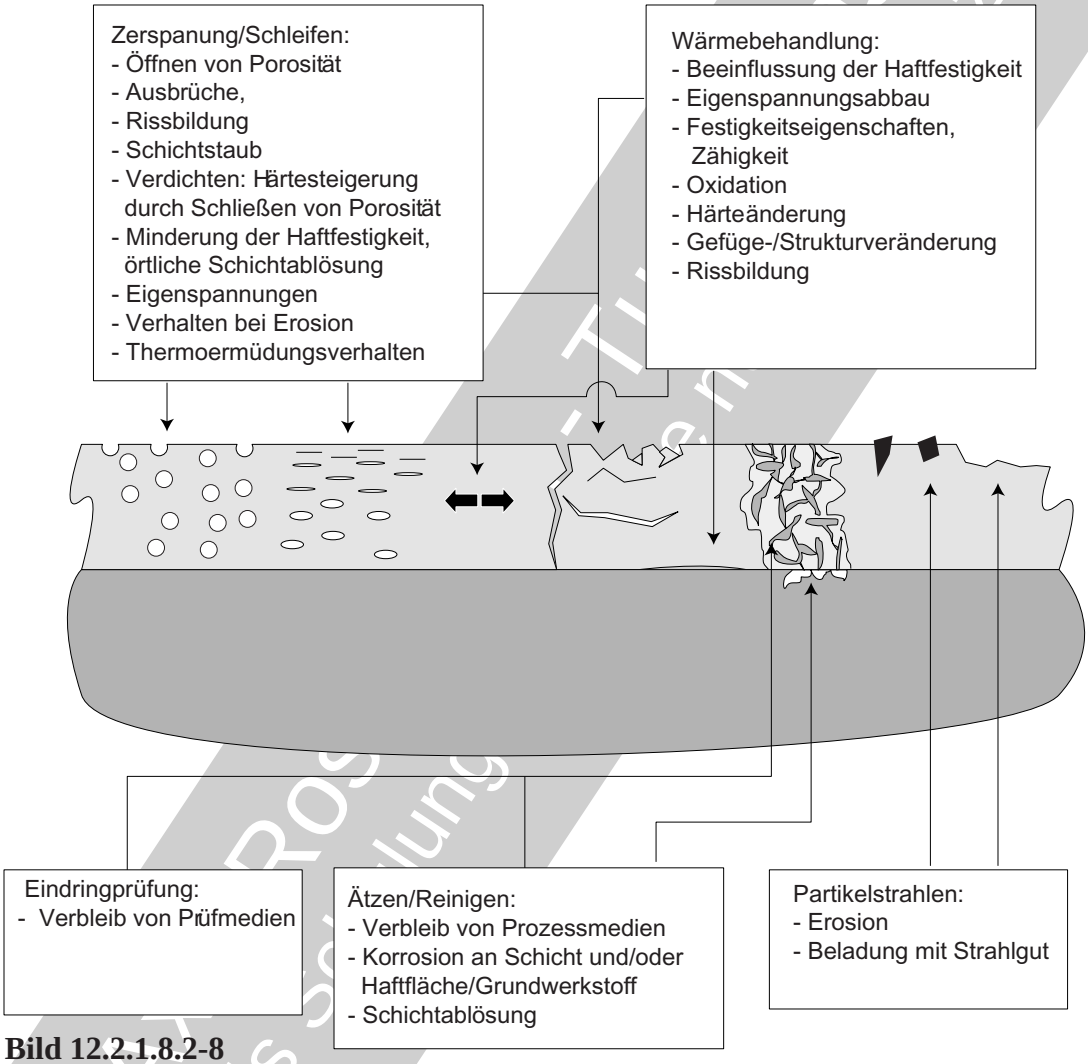
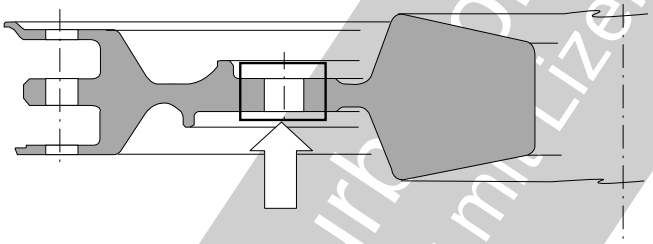


Bild 12.2.1.8.2-8

lich nicht wieder ausreichend entfernt, kann es z.B. bei Betriebstemperaturen zur Konzentration des Mediums und zum Ätzangriff der Beschichtung und/oder des Grundmaterials kommen. Dabei kann sich die Haftfestigkeit bis zur Ablösung der Schicht verschlechtern. Selbst eingetrocknete Badreste sind in der Lage, mit Schwitzwasser aggressive Elektrolyte zu bilden. ***Eindringprüfung:*** *Je poröser die Schicht, umso schlechter eignet sich eine Eindringprüfung. Hier besteht zumindest die Möglichkeit, dass in offener Porosität verbliebener Eindringstoff eine erneute Eindringprüfung behindert.*

Abrasives Strahlen: *Besonders bei spröden und/oder weichen Schichten ist eine Schädigung durch Abtrag oder Mikrorissbildung (z.B. bei keramischen Schichten) nicht auszuschließen. Mikrorissbildung dürfte besonders die Erosionsfestigkeit der Beschichtung beeinflussen. Seitliche* ***Schichtübergänge*** *die verfahrensbedingt häufig eine besonders poröse Struktur aufweisen (Bild 12.2.1.8.2-7), können „****ausgewaschen****“ werden.*

12.2.1.8.3 Galvanisch und chemisch abgeschiedene Schichten



Galvanische Verfahren arbeiten elektrochemisch. Unter (Gleich-) Strom wird die Schicht in einem geeigneten Bad aufgebracht. Metallische Schichten (z.B. Cr, Ni, Cd, Ag, Cu) werden auf dem negativ geladenen (kathodische Verfahren), leitenden Bauteil abgeschieden. Auch nichtmetallische Partikel (z. B. Oxide, Carbide, Nitride) können während der Abscheidung in die Schicht eingebaut werden. So lässt sich der Verschleißwiderstand erhöhen bzw. das Gleitverhalten verbessern. Hauptanwendung sind Korrosionsschutz und Gleitflächen (Bild 12.2.1.8.3-1). Wird die Beschichtung nicht auf Maß nachgearbeitet, spricht man von Maßbeschichten wie Maßverchromen. Die Dicke solcher Schichten liegt unter 0,1 mm. Deutlich dicker sind Schichten die auf Maß geschliffen werden.

Grundlagen wie die Beschreibung der Verfahren sind in Lit. 12.2.1.8-21 nachzulesen.

Kathodische Verfahren:

Diese häufig im Triebwerksbau angewandten Beschichtungen dienen dem Aufbringen von Kupfer, Kadmium, Nickel/Kadmium, Nickel, Chrom und Silber. Dabei besteht grundsätzlich für Bauteile aus martensitischen Stählen die Gefahr einer Wasserstoffversprödung (Bild 12.2.1.7-14). Abhilfe ist eine Erwärmung (Entsprödung) kurz nach dem Beschichtungsvorgang.

Verkupfern erzeugt gasdichte Schichten mit über 25µm Dicke und erstaunliche Härten von 1000-2400 HV. Es dient häufig als Abdeckung beim Aufkohlen (Einsatzhärten) und Gasnitrieren.

Verkadmen kommt wegen der Giftigkeit und dem Risiko einer Wasserstoffversprödung in neueren Triebwerkstypen kaum mehr zur Anwendung. Es erzeugt weiche Schichten (200 HB) mit Dicken um 15 µm. Es ist ein guter Korrosionsschutz bei Betriebstemperaturen unter 230°C. Dieser Temperaturbereich wird jedoch deutlich werkstoffspezifisch eingeschränkt. Der **Kontakt mit Ti-Werkstoffen** kann bereits bei niedrigeren Temperaturen zur Rissbildung führen (Band 4, Bild 18.3-11). Die Gefahr einer **Wasserstoffversprödung** (Band 1 Kapitel 5.7) ist beim Kadmieren von martensitischen Stählen besonders hoch, und nimmt mit steigender Härte bzw. Festigkeit zu (Bild 12.2.1.7-14 und Bild 12.2.1.8.3-8). Ein weiteres Problem ist die **Versprödung des Grundwerkstoffs über 250 °C** als Folge einer **Diffusion oder LMIE**. Dabei schießt die Kadmiumschmelze in die Korngrenzen des unter Zugspannungen stehenden Grundwerkstoffs. Um diese Schädigung bei direktem Kontakt mit Kadmium zu vermeiden, werden **NiCd-Schichten** angewendet. Zuerst wird

© Axel Rossmann - Turbokonsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

eine Nickelschicht aufgebracht. Dann folgt eine Kadmiumschicht die zusammen mit der Nickelschicht einer Diffusionsbehandlung unterzogen wird. Anwendungstemperaturen bis 500 °C sollen so ermöglicht werden. Dieses Verfahren ist durchaus problematisch (Bild 12.2.1.8.3-8), heute wird deshalb davon abgeraten.

Vernickeln (Sulfamat Verfahren): Diese sehr harten (200 - 350 HV) bis 2 mm dicken Schichten dienen in erster Linie zum Aufbau von Flächen (z.B. Nacharbeit und Reparatur) sowie zum Oxidations- und Korrosionsschutz bis 450°C. In Nickelschichten können hohe Zugeigenspannungen wirken (Bild 12.2.1.8.3-2 und Bild 12.2.1.8.3-10), welche die Schwingfestigkeit des Bauteils gefährlich herabsetzen (Bild 12.2.1.8.3-3 und Bild 12.2.1.8.3-9). Aus diesem Grund erfordert die Einführung einer solchen Beschichtung eine bauteilrelevante Erprobung mit dem Nachweis der notwendigen zyklischen Ermüdungsfestigkeit.

Verchromen (Chromsäure-Schwefelsäure Verfahren). Diese äußerst harten (800 - 1250 HV) bis zu 2 mm dicken Schichten dienen dem Oxidationsschutz und als verschleißfeste Gleitflächen. Ihre Anwendung endet bei ca. 450°C. Martensitische Stähle neigen bei der Beschichtung zu Wasserstoffaufnahme und Versprödung. Eine Entsprödung muss sich kurzzeitig anschließen (Bild 12.2.1.7-14). Die hohen Zugspannungen in der Schicht führen zu einer deutlichen Absenkung der Schwingfestigkeit des Bauteils (Bild 12.2.1.8.3-2 und Bild 12.2.1.8.3-3). Das erfordert bei der Einführung einen ausreichenden Nachweis der Betriebssicherheit. Auch ein anschließender Schleifprozess kann im Zusammenhang mit einer Aufheizung zur Rissbildung im Grundwerkstoff beitragen (Bild 12.2.1.8-3).

Versilbern dient in den meisten Fällen zur Verbesserung des Gleitverhaltens. Das gilt sowohl für Kontaktflächen wie Gewinde von Schrauben und Muttern (gleichmäßiges niedriges Anzugsmoment, weniger Festbacken), als auch für Flächen mit hohen Gleitgeschwindigkeiten in Kraftstoff (z.B. Gleitschuhe in Axialkolbenpumpen). Leider kann Silber auf vielfältige Weise direkt und indirekt (LMIE, Sulfidation, Lochfraß) Heißteile schädigen (Band 4 und Lit. 12.2.1.8-25). Deshalb ist man von einem Versilbern der Rotorverschraubungen weitgehend abgekommen. Silber bildet mit Schwefel aus der Umgebung (z.B. auch **schwefelhaltige Schneidflüssigkeiten)** dunkle **Sulfidschichten**. Diese weisen **im Gegensatz zu metallischem Silber einen hohen Reibbeiwert** auf, und können Gleitflächen mit hohen Relativgeschwindigkeiten in kurzer Zeit katastrophal versagen lassen.

Bei **anodischen Verfahren** (Anodisieren, anodische Oxidation, Lit. 12.2.1.8-6) wird das zu beschichtende Bauteil positiv aufgeladen. Mit diesen Verfahren (z.B. Eloxieren bei Al- und Ti-Legierungen, HAE-Überzüge bei Mg-Legierungen) werden in erster Linie Oxidschichten auf Leichtmetallen (Al-, Mg-, Ti-Legierungen) erzeugt. Diese Schichten dienen hauptsächlich dem Korrosionsschutz. Ihre hohe Härte und nichtmetallischer Charakter bieten darüberhinaus mit einem hohen Erosions-und Verschleißwiderstand und einer Verbesserung der Gleiteigenschaften Vorteile (z. B. bei Titan). Dicke Oxidschichten können die Schwingfestigkeit absenken.

Chemische Verfahren (Lit. 12.2.1.8-6):

Genutzt werden chemische Reaktionen des Bades, um Schichten abzuscheiden und/oder mit dem Grundwerkstoff entstehen zu lassen, ohne dass von außen elektrische Ströme wirken. Mit diesen Verfahren können sowohl metallische (z.B. Ni) als auch chemische Reaktionsschichten (z.B. Phosphate, Oxide) mit Verfahren wie **Phosphatieren** und **Brünieren** erzeugt werden (Bild 12.2.1.8-3 und Bild 12.2.1.8.3-11).

Stromlos Vernickeln erzeugt verschleißfeste, harte (750 HV0,25, nach Wärmebehandlung bis 1300 HV, Lit 12.2.1.8-23), nicht zum Fressen neigende Schichten bis zu 1 mm Stärke. Solche Schichten lassen sich auch als **Lot, z.B. für poröse Anstreifbeläge (Metallfilze)**, verwenden (Lit.

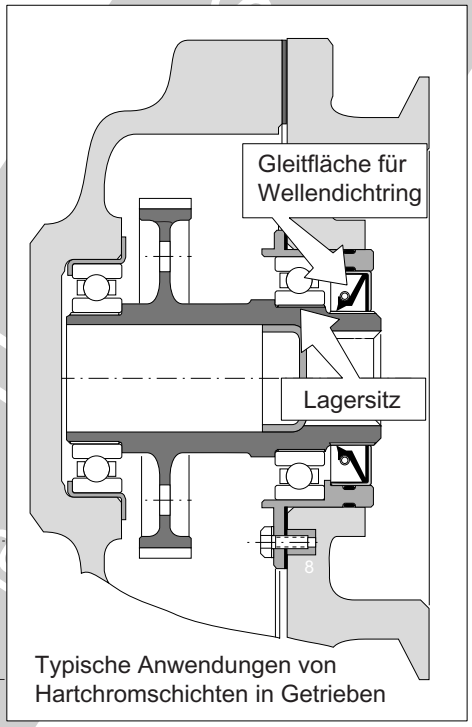
© Axel Rosemann - Tribosonsult
Gesellschaft für Tribologie mbH

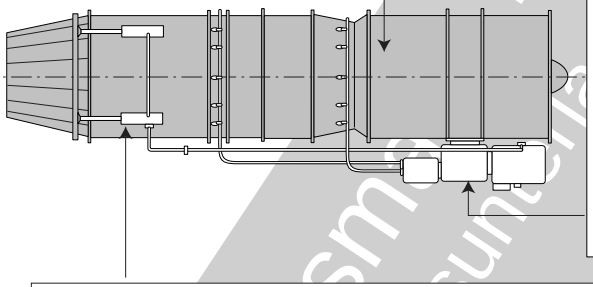
12.2.1.8-6). Die typische Anwendungstemperatur reicht bis 400°C, darüber entsteht ein merklicher Härteverlust. Setzt sich der entstehende Wasserstoff als **Gasblase** am Bauteil, z.B. in einer Hohlwelle fest, verhindert diese örtlich eine weitere Beschichtung, es kommt zu einer Fehlstelle. Selbst bei Stählen höherer Festigkeit (Vergütungsstähle) führt das stromlose Vernickeln offenbar nicht zur **Wasserstoffversprödung**. Es ist jedoch zu bemerken, dass der Wasserstoff in erster Linie bei nachträglichen Beladungen wie Ätzen oder Korrosionsvorgängen von der Nickelschicht aufgenommen wird. Diese gibt den Wasserstoff an den Grundwerkstoff über Diffusion ab und löst Wasserstoffversprödung aus. Weil dieser Vorgang über längere Zeit abläuft ist es möglich, dass Prüfungen bis 100 Stunden für einen Nachweis nicht ausreichen (Lit 12.2.1.8-23). Bei Neuanwendungen ist wegen der Beeinflussung der Schwingfestigkeit eine geeignete, bauteilrelevante Erprobung erforderlich.

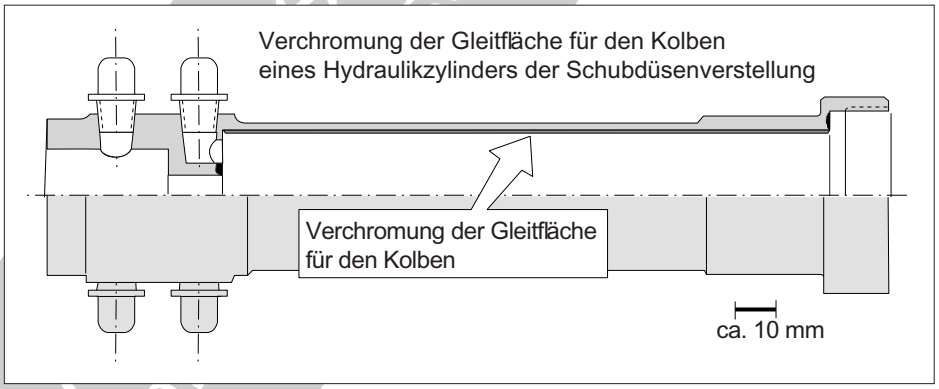
© Axel Rossmann - Turbosoft
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Anwendungsbeispiele galvanischer und chemischer Beschichtungen im Triebwerksbau.

Bild 12.2.1.8.3-1







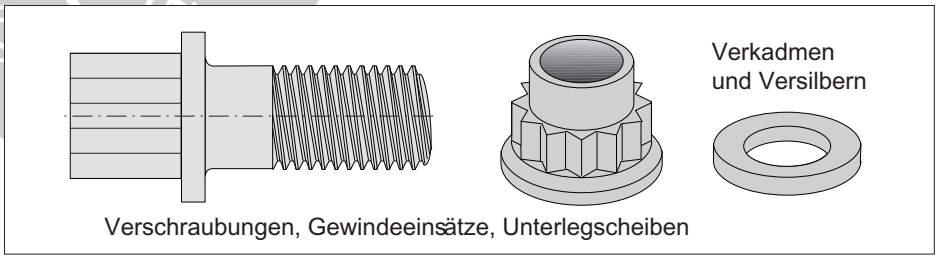


Bild 12.2.1.8.3-1: *Metallische, galvanisch und chemisch aufgebrachte Schichten dienen in erster Linie dem* ***Korrosionsschutz und als Gleitflächen****. Dabei kann wie bei* ***Cr-Schichten*** *die Verschleißfestigkeit im Vordergrund stehen. Typische Beispiele sind nachträglich auf* ***Maß geschliffene Öl-Dichtflächen*** *auf Zahnradwellen auf denen* ***Gleitringdichtungen*** *(Skizze*

oben rechts) laufen. Deren weiche Elastomerdichtlippen betten harte Partikel wie Ölkohle oder Staub ein und können die ***Lebensdauer begrenzenden Rillen*** *selbst in die extrem harte Cr-Schicht fräsen. Auch* ***frettinggefährdete Lagersitze*** *erhalten Cr-Schichten.*

Gleitflächen in Hydraulikzylindern (mittlere Skizze) und Reglern werden für einen niedrigen Reibwiderstand und hohe Verschleißfestigkeit mit Cr-Schichten versehen. Das typische ***Rissnetzwerk*** *in diesen Schichten kann dabei als* ***Ölreservoir*** *dienen und wird gegebenenfalls spezifiziert.*

Grundsätzlich wird die Anwendung von Cr- und Ni-Schichten (auch stromlos Nickel) von einem ***Abfall der Schwingfestigkeit*** *des Bauteils auf Grund* ***hoher Zugeigenspannungen*** *in der Schicht eingeschränkt (Bild 12.2.1.8.3-3).*

Eine der Hauptanwendungen galvanischer Beschichtungen wie Kadmium, Zink und Silber sind Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben. Die Schichten werden dafür in zweifacher Hinsicht genutzt.

Zum einen als ***Gleitschichten auf Gewinden*** *(Silber). Sie sollen ein gleichbleibendes niedriges Drehmoment für die Montage gewährleisten und/oder das Festfressen beim Lösen verhindern.* ***Silber*** *kommt auch an Schrauben aus Ni-Legierungen bei erhöhten Betriebstemperaturen zur Anwendung. Diese Anwendung wurde jedoch reduziert, weil Silber unter diesen Bedingungen schädigend (Sulfidation Band 1 Kapitel 5.6.1.4, LME, Bild 12.2.1.4-14 und Band 4,Kapitel 18.3) wirken kann.*

Zum anderen werden Kadmium und Zink als kathodischer Korrosionsschutz genutzt. Kadmium kommt an Schrauben aus Stählen, die keine hohe Betriebstemperatur erfahren, zum Einsatz. ***Kadmieren*** *löst* ***Wasserstoffversprödung*** *aus (Bild 12.2.1.8.3-7) und wirkt bei erhöhten Temperaturen auf viele Metalle (z.B. Titanlegierungen und Stähle) versprödend (Bild 12.2.1.8.3-8).*

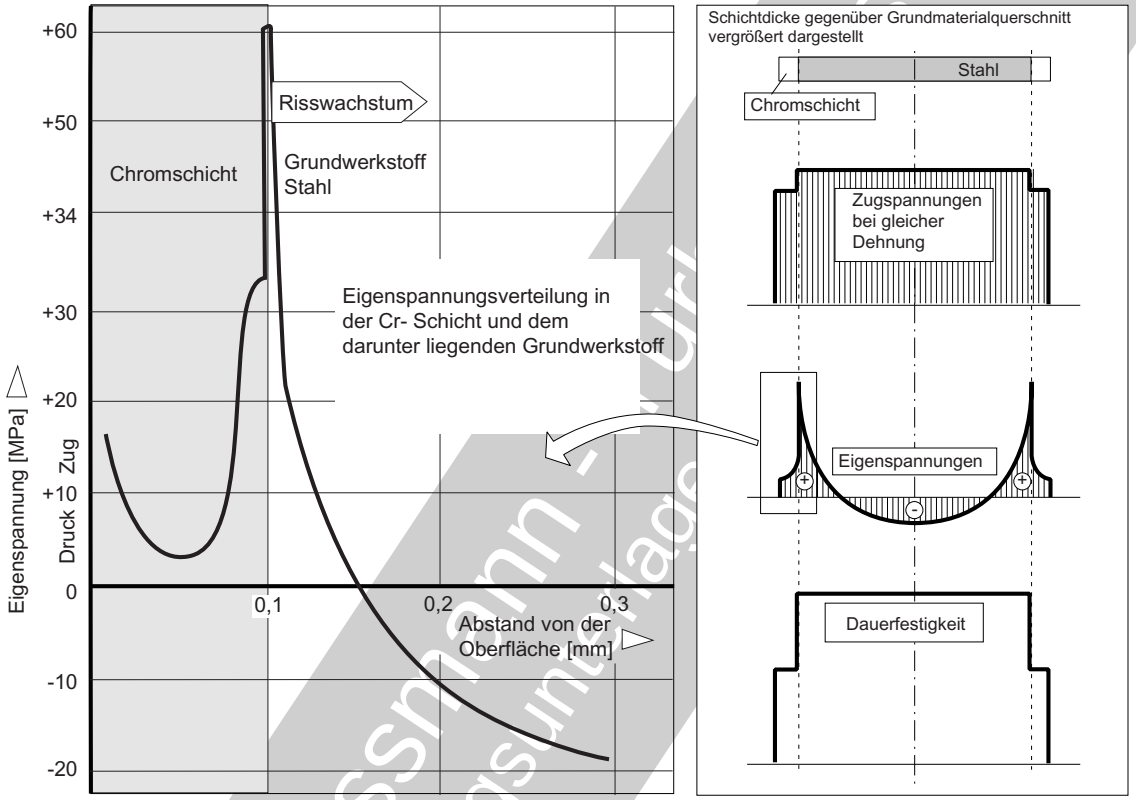
Bild 12.2.1.8.3-2 *(Lit. 12.2.1.8-7): Bei einer* ***Hartverchromung*** *muss mit einer* ***Absenkung der Schwingfestigkeit*** *(Lit. 12.2.1.8-7) des Bauteils gerechnet werden. Das Diagramm oben links zeigt beispielhaft den Eigenspannungsverlauf im Oberflächenbereich einer hartverchromten Stahlprobe (Rahmen oben rechts). Die erstaunlich niedrigen Eigenspannungen werden auf eine Entspannung der Cr-Schicht als Folge der typischen Rissbildung an der Schichtoberfläche zurückgeführt.* ***Wichtig für die Dauerfestigkeit ist die Spannungsspitze an der Haftfläche*** *Schicht/Grundwerkstoff. Hier ist gegebenenfalls mit einem Schwinganriss zu rechnen. Den Einfluss auf die Dauerfestigkeit zeigt das untere Diagramm im Rahmen oben rechts. Dieser liegt für die Cr-Schicht deutlich unter dem des Grundwerkstoffs.*

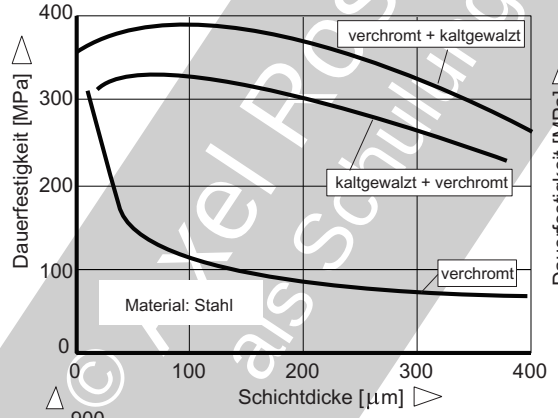
Mit einer Verfestigung durch plastische Verformung lässt sich die Dauerfestigkeit wieder anheben. Dazu dienen ***Kugelstrahlen*** *oder* ***Rollen****. Erstaunlich ist, dass sowohl bei Nickel- als auch bei Cr-Schichten die* ***Behandlung der Schicht günstiger ist, als die Verfestigung des Grundwerkstoffs vor der Beschichtung*** *(mittlere Diagramme). Dieser Effekt ist auch bei dicken Schichten wirksam. Die Wirkung ist dann gegenüber dünnen Schichten leicht abgeschwächt (Diagramm Mitte links).*

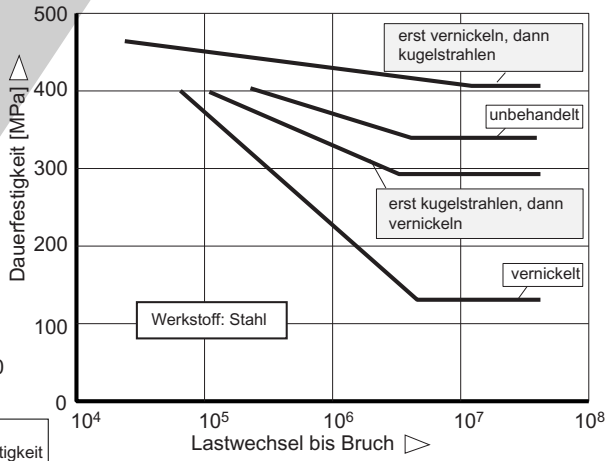
Interessant ist, dass verfestigte Zustände ein Maximum der Dauerfestigkeit bei Schichtdicken zwischen 100 μ m und 200 μ m zeigen. Ein kontinuierlicher Dauerfestigkeitsabfall mit der Schichtdicke liegt also nicht vor. Die ***Zugeigenspannungen*** *in der Cr-Schicht überlagern sich erwartungsgemäß mit den Betriebsspannungen. Damit wirkt der Mittelspannungseinfluss auf die Dauerfestigkeit verchromter Teile offenbar deutlich stärker als auf unverchromte (Diagramm unten). Bei einer Beschichtung hochbelasteter Bauteile wie von Rotoren ist dieser Effekt zu berücksichtigen (Bild 12.2.1.8.3-10).*

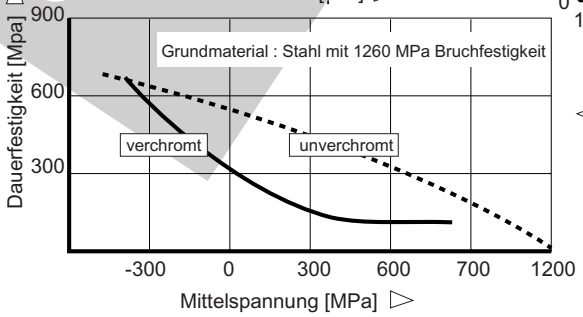
© Axel Rossmann - Turbocourse
Vorlesungsunterlagen nur zur Kenntnis

Einflüsse galvanischer Cr- und Ni-Schichten auf die Schwingfestigkeit.









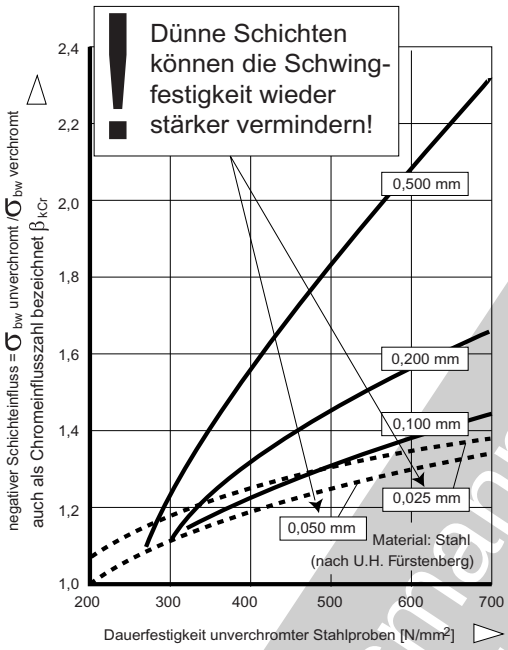
Einfluss der Mittelspannung auf die Dauerfestigkeit verchromter Stahlproben

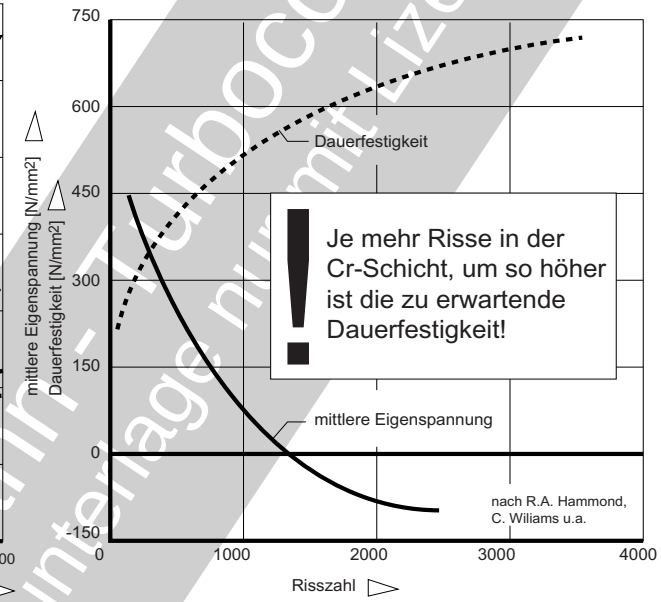
Bild 12.2.1.8.3-2

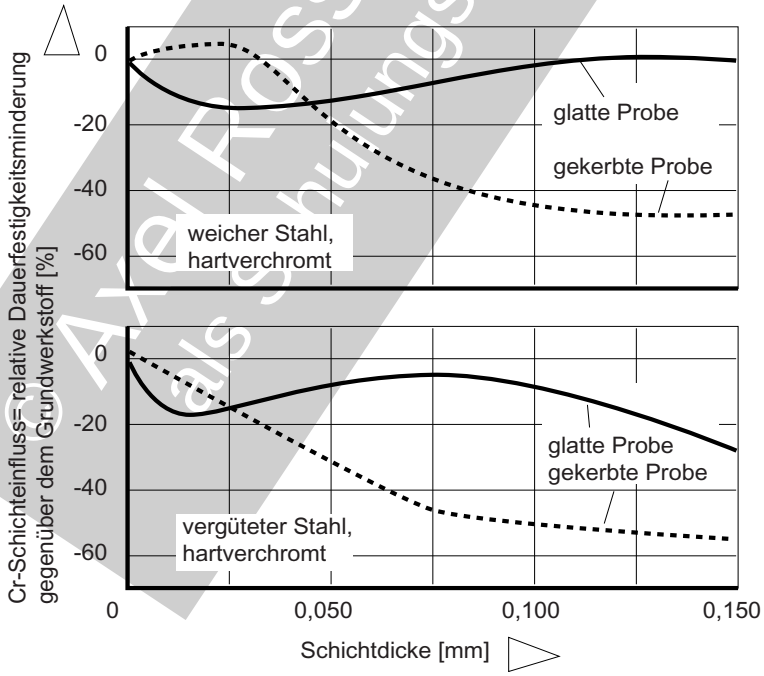
© Axel Rossmann - Fachverlag für Schadensanalyse und -Prävention

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Insbesondere galvanisch abgeschiedene Beschichtungen beeinflussen die Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffs nicht selten auf unerwartete Weise. Schichtdicke und Rissbildung in der Schicht sind wichtige Einflussfaktoren.







Besonders im Bereich beschichteter Kerben ist mit einer deutlichen Abnahme der Schwingfestigkeit zu rechnen!

Bild 12.2.1.8.3-3

© Axel Rossmann - Turbocom als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 12.2.1.8.3-3 *(Lit.12.2.1.8-5 und Lit. 12.2.1.8-7): Die Dicke* ***galvanischer Cr- und Ni-Schichten*** *hat einen deutlichen Einfluss auf die* ***Schwingfestigkeit****. Dickere Schichten wirken sich jedoch nicht generell ungünstiger aus. Im Diagramm oben links ist zu erkennen, dass an glatten Proben abhängig von den Beschichtungsparametern Schichtdicken von 50 µ m die Dauerfestigkeit weniger absenken als solche von 25 µ m. Der Dauerfestigkeitsabfall mit einer Cr- oder Ni-Beschichtung vergrößert sich mit der Härte, Zugfestigkeit und Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffs. Dieser Effekt scheint für* ***Ni-Schichten wegen des höheren E-Moduls ausgeprägter als für Cr-Schichten*** *zu sein. Er führt bei gleichen Dehnungen zu deutlich höheren Spannungen. Der Festigkeitseinfluss des Grundwerkstoffs wird auf den wachsenden Unterschied zur Schichtfestigkeit zurückgeführt. Damit entstehen in der Schicht Risse, deutlich bevor der Grundwerkstoff überlastet ist. So kann die Schicht keine Kräfte mehr übernehmen und der Grundwerkstoff wird von der Schicht nicht entlastet. Werden* ***hochfeste und damit gewöhnlich auch hoch beanspruchte Werkstoffe beschichtet, ist besondere Vorsicht geboten****. Die Schwingfestigkeit niedrigfester Werkstoffe reagiert deutlich weniger auf eine Beschichtung.*

Dichte Rissbildung in der Schicht senkt die Zugeigenspannungen und senkt somit die Schwingfestigkeit weniger ab. Die ***Dauerfestigkeit steigt deshalb mit der Rissdichte*** *(Diagramm oben rechts).*

Werden Kerben beschichtet (Diagramme unten) ist bei dünnen Schichten der Schwingfestigkeitsabfall sogar geringer als bei glatten Proben. Dicke Schichten schädigen dagegen gekerbte Proben mehr.

Das heißt: ***Die Beschichtung von Bauteilzonen mit Spannungskonzentrationen (Kerben) ist an Werkstoffen hoher Zugfestigkeit besonders riskant.***

Bild 12.2.1.8.3-4 *(Lit. 12.2.1.8-5): Die* ***Dauerfestigkeit einer galvanischen Beschichtung****, hier das Beispiel von* ***Hartchromschichten****, ist von einer Vielzahl Parameter beeinflusst.*

Bereits der ***Grundwerkstoff****, die Bauteilkontur und die Haftflächenvorbereitung sind von großer Bedeutung.* ***Das Risiko eines schädlichen Dauerfestigkeitsabfalls steigt mit der Zugfestigkeit bzw. Härte****. Beschichtung in Bereichen von Spannungskonzentrationen (Kerben) verschärfen den negativen Schichteinfluss (Bild 12.2.1.8.3-3). Eine Verfestigung vor der Beschichtung ist zwar vorteilhaft,* ***besser ist jedoch die beschichtete Fläche zu verfestigen*** *(Bild 12.2.1.8.3-2). Die Rauigkeit der Haftfläche und das Auftreten von Riefen, kleinen Graten und scharfen Nadeln (engl.* ***Sliver****, Bild 12.2.1.8.3-5) beeinflusst die Häufigkeit von* ***Fehlstellen wie Poren und Warzen*** *(engl.* ***nodules****) und damit auch die* ***Risskonzentration in der Schicht*** *und so die Dauerfestigkeit (Bild 12.2.1.8.3-3).*

Hartchromschicht und Beschichtungsprozess: *Für Schichtdicken oberhalb 0,05 mm ist mit einem deutlichen Dauerfestigkeitsabfall zu rechnen (Bild 12.2.1.8.3-2). Bei Schichtdicken unter 25 µ m Tiefe wirken sich in erster Linie die Zugeigenspannungen auf die Schwingfestigkeit aus. Mit der Schichtdicke steigt offenbar der Einfluss* ***einzelner Schichtrisse****. Andererseits werden mit steigender Rissdichte in der Cr-Schicht schädliche Zugspannungen abgebaut und die Dauerfestigkeit erhöht (Bild 12.2.1.8.3-3). Diese Eigenschaften werden von den Prozessparametern geprägt.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
Alle Schulungsunterlagen mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Am Beispiel der Haupteinflussfaktoren auf die Dauerfestigkeit hartverchromter Bauteile lässt sich die Problematik der Qualitätssicherung durch alleinige Überwachung von Prozessparametern erkennen.

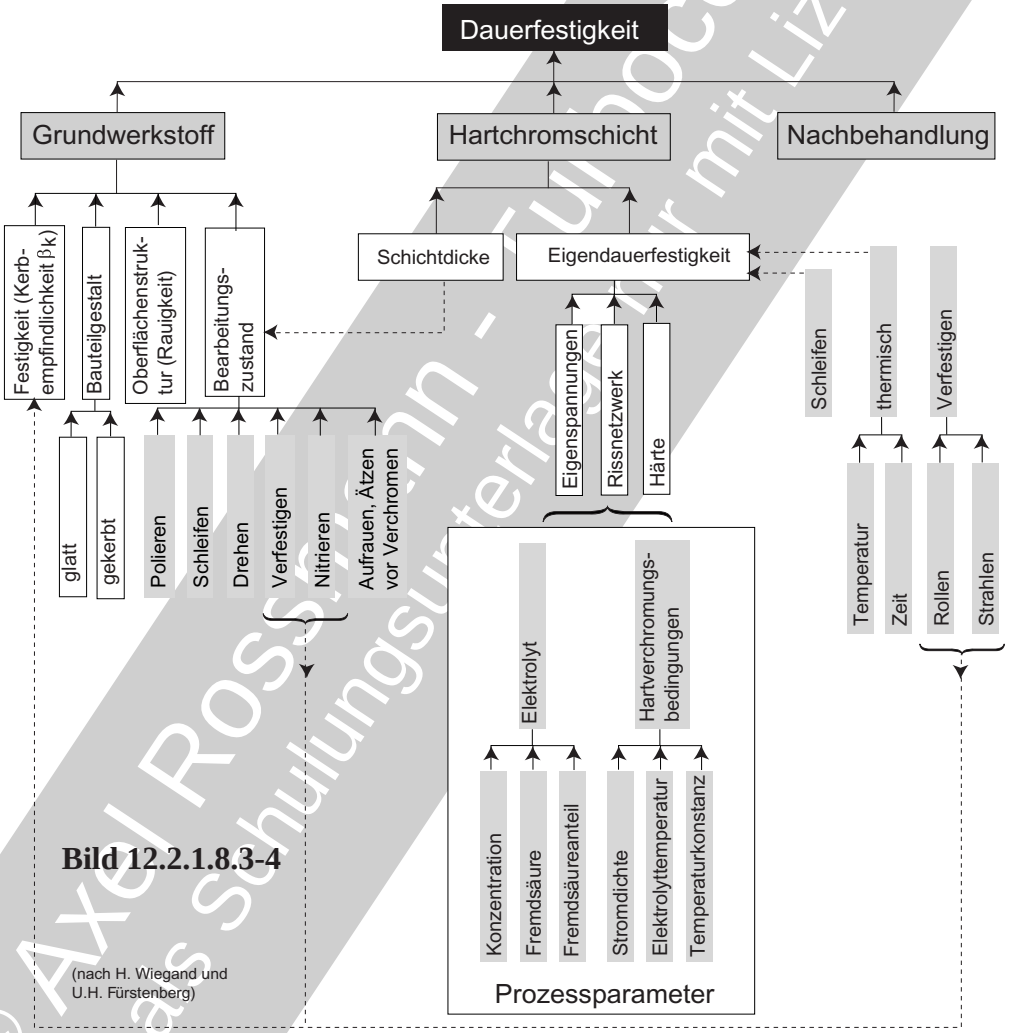


Bild 12.2.1.8.3-4

(nach H. Wiegand und U.H. Fürstenberg)

Einen besonders ausgeprägten Einfluss hat die ***Temperatur des Chrombades*** *(Elektrolyttemperatur).* ***Zu hohe Badtemperaturen*** *(oberhalb 55 °C)* ***können zu hohen Zugeigenspannungen führen*** *und so die Dauerfestigkeit sehr deutlich absenken.*

Nachbehandlung: *Die* ***Verfestigung*** *(Rollen, Strahlen) der beschichteten Oberfläche hebt die Dauerfestigkeit am Besten an (Bild 12.2.1.8.3-2). Eine* ***Wärmebehandlung von 100 °C bis 300 °C ist jedoch äußerst problematisch****. Der starke Dauerfestigkeitsabfall wird auf eine* ***Versprödung der Schicht*** *zurückgeführt. Dieser Effekt ist gegebenenfalls für das Betriebsverhalten zu berücksichtigen. Höhere Temperaturen können sich dagegen positiv auswirken wenn die Schichthärte dabei abgesenkt wird.*

© Axel Rossmann - Turnoco
as Schulungsunterlagen mit Lize

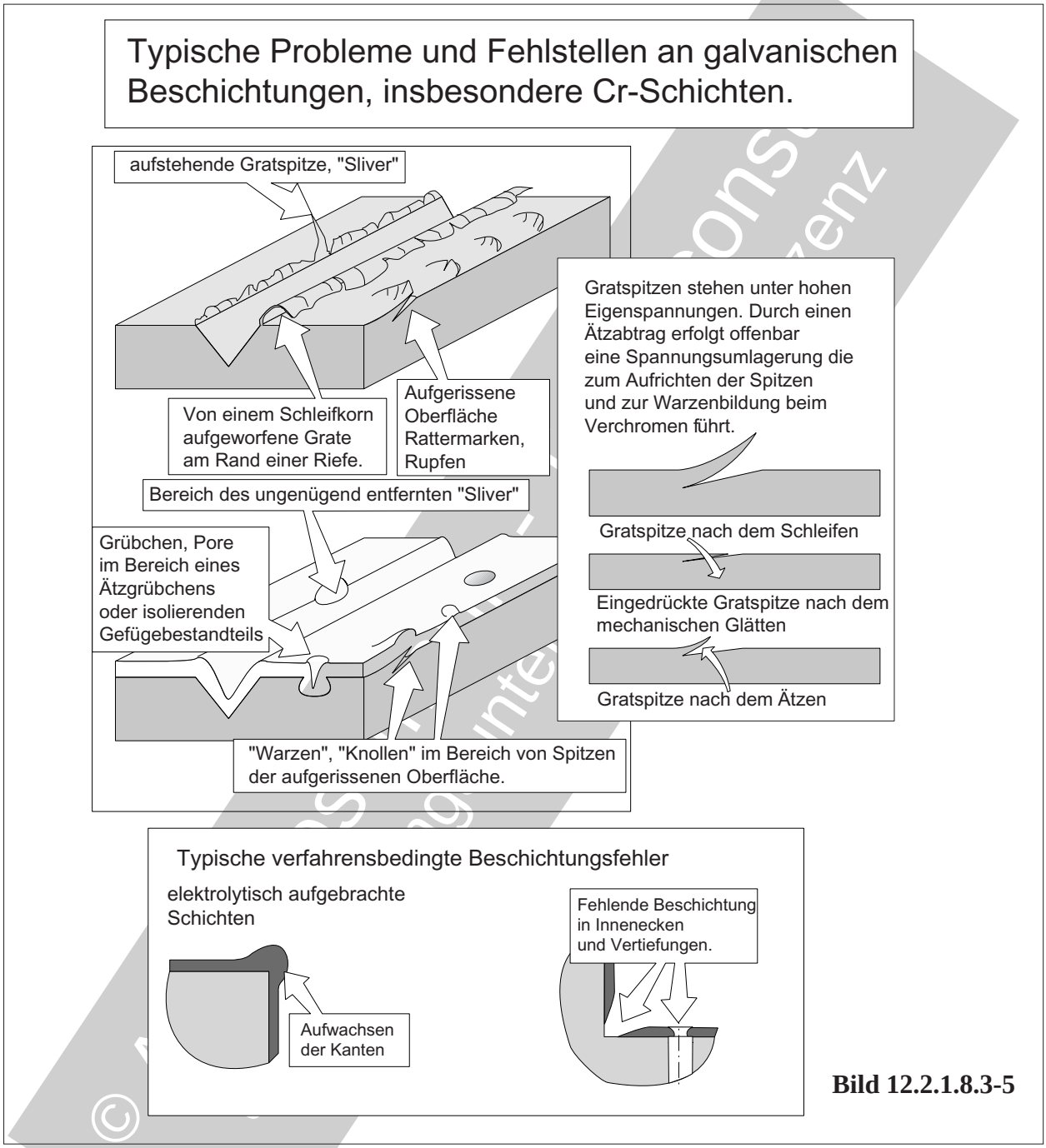


Bild 12.2.1.8.3-5

Bild 12.2.1.8.3-5 *(Lit. 12.2.1.8-16):* ***Fehlstellen wie Poren und „Warzen“*** *(engl.* ***nodules****) spielen bei einer Cr-Schicht, besonders* ***Maßchromschichten*** *eine wichtige Rolle. Warzen können an Kontaktflächen eine Kerbwirkung verursachen und/oder an Dichtflächen zu Undichtigkeiten führen. Brechen sie aus, entstehen ebenfalls Kerben.*

Poren *bilden sich im Bereich* ***nichtleitender Gefügebestandteile*** *und* ***Ätzgrübchen****. Warzen entstehen an scharfen* ***Gratspitzen*** *(engl.* ***Sliver****) der* ***spanend (Schleifen) bearbeiteten Beschichtungsfläche*** *(Rahmen oben links). Diese konzentrieren wie Kanten das elektrische Feld und führen zu einer verstärkten Abscheidung. Umgekehrt wirken Löcher und Innenkanten durch die abschirmende Wirkung (Rahmen unten).*

Eine wie vom Nachpolieren optisch glänzende Fläche ist keine Gewähr Warzen zu ver-

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

meiden. Folgt ein ***zu kurzer Ätzvorgang zum Entfernen der Restgrate, stellen sich die Nadeln erfahrungsgemäß wieder auf****. Dies lässt sich wie folgt erklären: Von der Bearbeitung aufgerissene Nadeln werden wieder eingedrückt. In deren Außenzone werden beim Rückfedern hohe Druckspannungen induziert. Ätzen trägt diese außen liegende Zone mit den Druckspannungen ab. So stellt sich ein veränderter Gleichgewichtszustand ein, in dem die Nadel sich aufrichtet (Rahmen rechts oben).*

Bild 12.2.1.8.3-6: *Besonders zwei Arbeitsschritte im Rahmen eines galvanischen Beschichtungsprozesses haben erfahrungsgemäß großen Einfluss auf die Betriebssicherheit eines Bauteils. Es handelt sich um den* ***Abdeckprozess*** *gegen Beschichtung und die* ***Kontaktierung der Stromanschlüsse****.*
Abdeckungen*: Galvanische Schichten wie Chrom und Nickel vermindern die lebensdauerbestimmende zyklische Festigkeit (LCF) und die HCF-Schwingfestigkeit (Bild 12.2.1.8.3-2, Bild 12.2.1.8.3-3 und Bild 12.2.1.8.3-9). Kadmium kann zu Versprödung und Rissbildung durch Wasserstoff (Bild 12.2.1.8.3-7) oder in Kontakt als SMIE (=Solid Metal Induced Embrittlement) führen. Bei erhöhter Temperatur ist* ***Kadmiumschmelze*** *in der Lage LME (= LMIE = Liquid Metal Induced Embrittlement) auszulösen (Bild 12.2.1.8.3-8 und Band 4, Bild 18.3-10.1). Eine zuverlässige Abdeckung kritischer Bauteilzonen ist damit sicherheitsrelevant. Als Abdeckungen nutzt man organische Schichten wie Wachse und Lacke, Harze oder wiederverwendbare Masken aus Elastomeren wie Gummi. Wegen ihrer* ***Sicherheitsrelevanz erfordern Abdeckungen eine bauteilspezifische Entwicklung und Erprobung****. Ungenügende Auflage an Kanten, Poren bis zum Grundmaterial oder mechanische Beschädigungen (Rahmen oben) sind typische Schwachstellen einer Abdeckung. Diese Fehlstellen sind sowohl beim Aufbringen der Abdeckung zu vermeiden als auch beim nachfolgenden Handling der Werkstücke. Wiederverwendbare Masken sind auf Verschleiß oder Alterung zu kontrollieren, welche den Abdeckeffekt beeinträchtigen können.*

Stromkontakte*: Ein ungenügender Stromkontakt birgt bei den zu übertragenden durchaus hohen Strömen die* ***Gefahr der örtlichen Überhitzung*** *infolge* ***des Übergangswiderstands*** *oder* ***Funkenbildung*** *(engl.* ***„arc burning“****,Band 4).* ***Kontakte müssen sicher, an unkritischen Bauteilzonen, angebracht*** *werden (Lit. 12.2.1.8.3-17, Rahmen unten).* ***Bohrungen, als hochbeanspruchte Bauteilzonen, sind für Stromkontakte ungeeignet****! Leider bieten sich gerade die hochbelasteten Bohrungen von Rotorscheiben wegen der Möglichkeit eine Schraube durchzuführen, als Kontaktzonen an.*
Die Unbedenklichkeit der Kontaktzone ist gegebenenfalls von der, für die Bauteilsicherheit (Festigkeit, Konstruktion) zuständigen Stelle zu bestätigen. Wichtig ist auch, dass die Kontaktvorrichtung nicht von Beschädigungen oder Verschleiß beeinträchtigt ist. ***Stromzuführende Kabel*** *dürfen keine Fehler wie Scheuerstellen aufweisen, die eine Isolation nicht mehr ausreichend gewährleisten. Durchdringen stromführende Leiter die Isolation, kann es zur gefährlichen* ***Funkenbildung bei Berührung mit Bauteilflächen*** *kommen.*
Die Kontaktflächen müssen glatt, eben und sauber (metallisch blank) sein. Grundsätzlich sind Stromkontakte nur an den vorgeschriebenen Bauteilbereichen mit der vorgeschriebenen einwandfreien Vorrichtung erlaubt*.*

Merksatz:

Abdeckungen für galvanische Beschichtungen und **Stromkontakte** sind für die Bauteilsicherheit von großer Bedeutung.

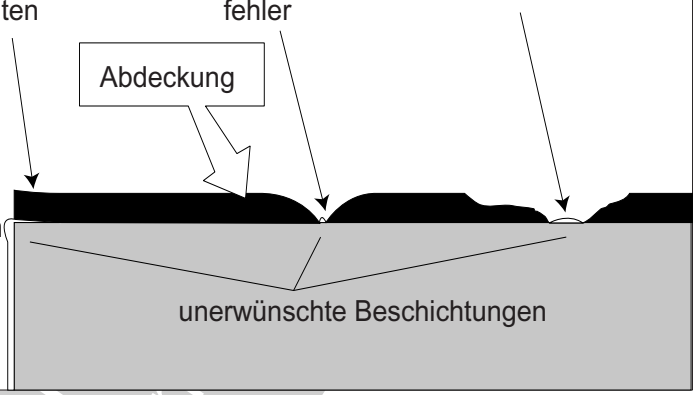
©VerPosnanin - TUBconsult
abschnittsunterlage Konstruktion

Galvanische Prozesse sind für das sichere Betriebsverhalten der Bauteile von besonderer Bedeutung.

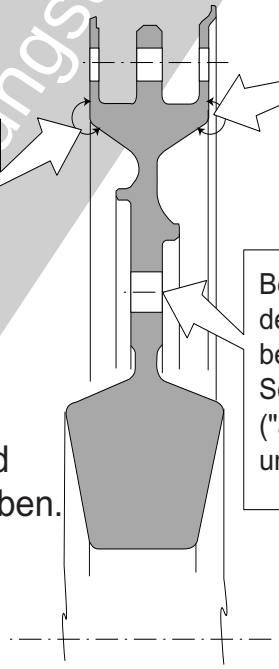
Abdeckungen müssen geeignet und dicht sein. weil:

- Ein Unterwandern führt zur
  - Verunreinigung des Bades mit der Gefahr von Bindefehlern.
- Durchschlagen oder Unterwandern mit Schichtmaterial kann die Bauteilsicherheit gefährden.

Typische Fehlstellen in Abdeckungen:



Den elektrischen Kontakten zum Bauteil ist bei galvanischen Prozessen besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Funkenbildung muss unbedingt vermieden werden.



Notwendiger Zustand der Kontaktflächen:
- glatt,
- eben,
- sauber

Nur vorgeschriebene Kontaktbereiche zur Stromzuführung benutzen.

Bei fälschlicher Nutzung der Bohrung als Kontaktstelle besteht die Gefahr der Schädigung durch Kontaktfunken ("arc burn") die zu LCF-Rissen und Scheibenbruch führen.

! Niemals Kontaktstellen zur Stromeinleitung in und um Bohrungen von Scheiben.

Bild 12.2.1.8.3-6

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

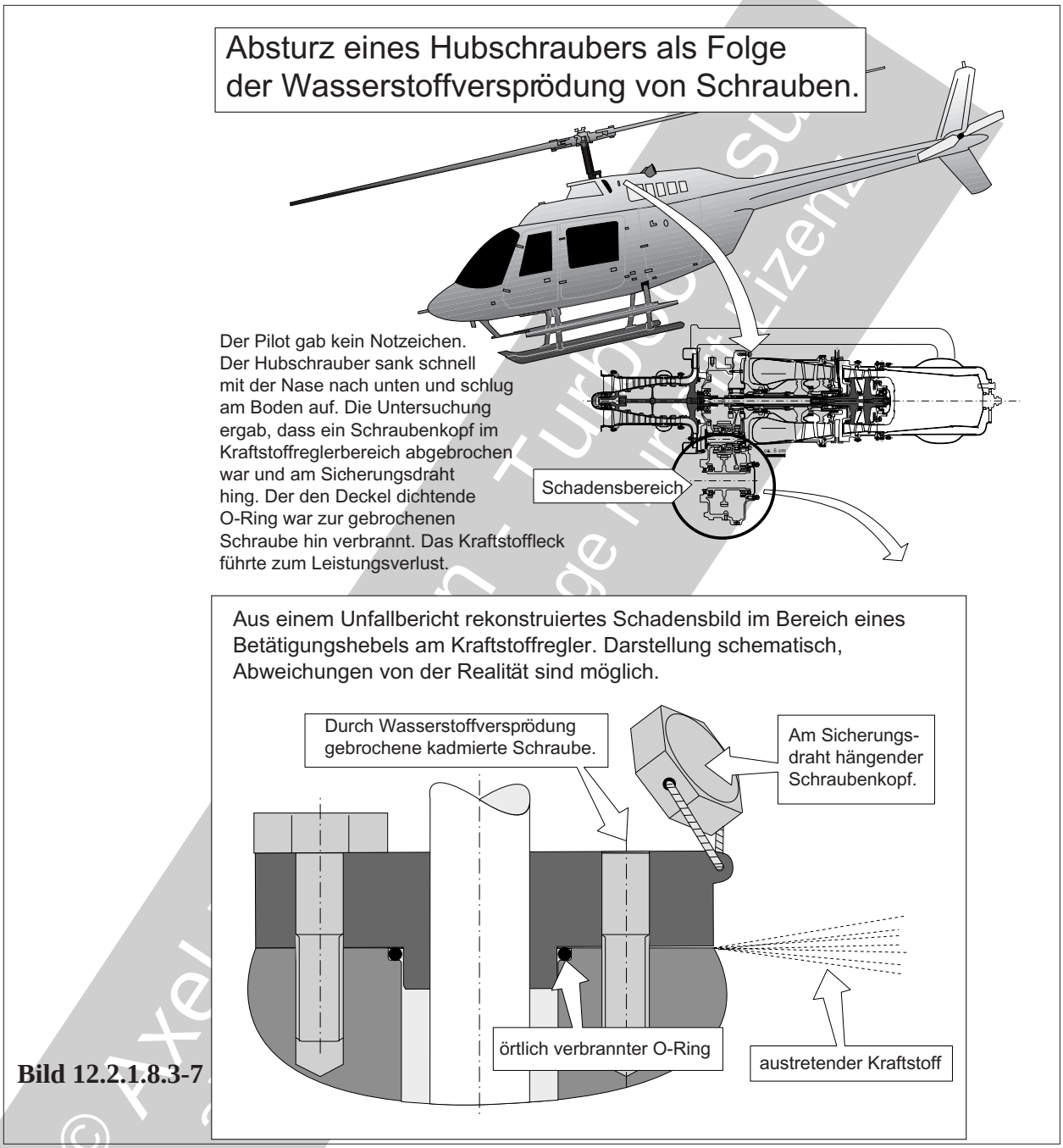
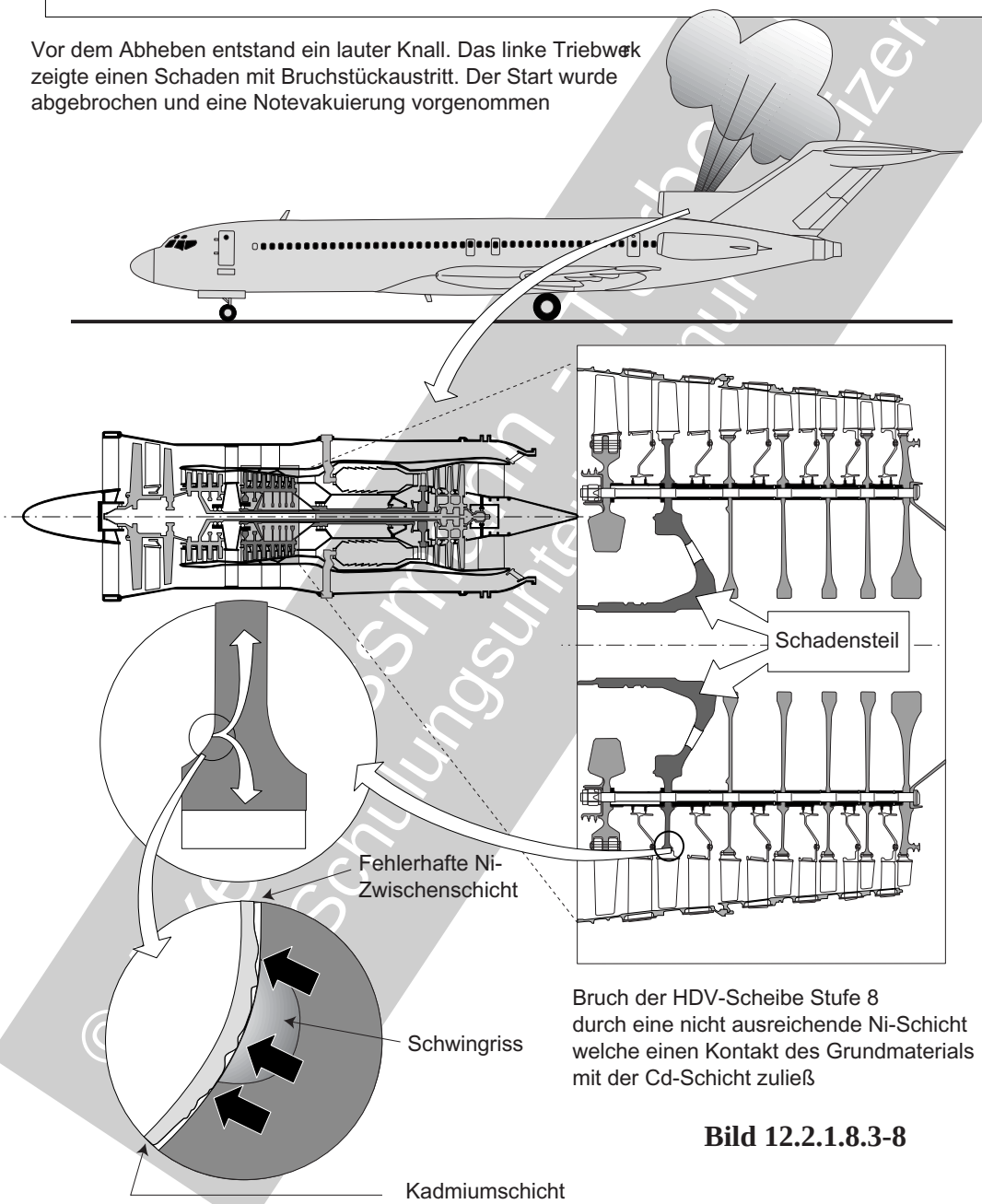


Bild 12.2.1.8.3-7

Bild 12.2.1.8.3-7 *(Lit 12.2.1.8-20): Dieser Unfall entwickelte sich, entsprechend den Indizien aus dem Schadensbild, mit dem* ***Bruch eines Schraubenkopfes*** *(Rahmen unten) infolge* ***Wasserstoffversprödung****. Darauf trat Kraftstoff aus und es kam zum Brand.*
Der Wasserstoff entstand wahrscheinlich bei der ***Cd-Beschichtung*** *und wurde offenbar* ***nicht mit einer Entsprödung*** *unschädlich gemacht. Zusätzlich stellte sich bei der Untersuchung heraus, dass die gebrochene Schraube und weitere benachbarte nicht den Vorschriften entsprachen und* ***deutlich zu hart*** *waren.Es handelte sich um nicht zugelassene Teile (Suspect Unapproved Parts = SUPs bzw. „Bogus Parts“ Lit. 12.2.1.8-27). Je höher die Härte bzw. die Festigkeit des Schraubenwerkstoffs (Vergütungsstahl), umso empfindlicher ist er für Wasserstoffversprödung (siehe Band 1 Kapitel 5.7).*

Der Kontakt von Kadmium mit dem Grundmaterial muss von einer Ni-Sperrschicht verhindert werden. Dies ist nur möglich, wenn die Ni-Schicht ausreichend dick und fehlerfrei ist.



Bruch der HDV-Scheibe Stufe 8 durch eine nicht ausreichende Ni-Schicht welche einen Kontakt des Grundmaterials mit der Cd-Schicht zuließ

Bild 12.2.1.8.3-8

Bild 12.2.1.8.3-8 *(Lit. 12.2.1.8-19): Der* ***Bruch einer Verdichterscheibe*** *(Rahmen rechts), wahrscheinlich aus martensitischem Stahl, trat während des Starts ein. Die nachfolgende Untersuchung ergab, dass der Scheibenbruch auf einen Riss an der Innenseite des Kranzes zurückzuführen ist. Im Anrissbereich wurde* ***Cd im Kontakt mit dem Grundwerkstoff der Scheibe*** *gefunden. Dies führte offenbar zur „****Kadmiumversprödung****“. Das Kadmium*

*stammte anscheinend von der **NiCd-Beschichtung** als Korrosionsschutz auf der Nabe. Weitere Untersuchungen ließen darauf schließen, dass eine **ungenügend dicke Ni-Zwischenschicht** aufgebracht worden war. Sie konnte einen direkten Kontakt der folgenden Cd-Beschichtung bei der Diffusionsbehandlung nicht verhindern.Es ist anzunehmen, dass es sich bei der sog. „Kadmiumversprödung“ um das Eindiffundieren von festem, aufliegendem Kadmium oder das Einschießen einer Kadmiumschmelze (LME auch als LMIE bezeichnet, Band 4, Bild 18.3-10.3 und 18.3-11) handelt.*
Ganz allgemein lässt sich sagen, dass bei NiCd-Schichten die Gefahr eines Kontakts von Cd mit dem Scheibenwerkstoff nicht völlig auszuschließen ist. Diese Beschichtung sollte deshalb von unproblematischen Alternativen ersetzt werden.

Merksatz:

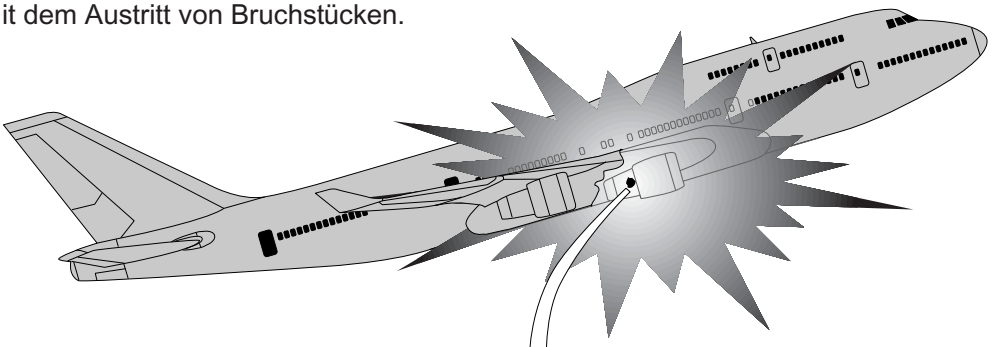
Cd- oder NiCd-Schichten sollten wegen der Gefahr spröder Rissbildung nicht an Rotorteilen verwendet werden.

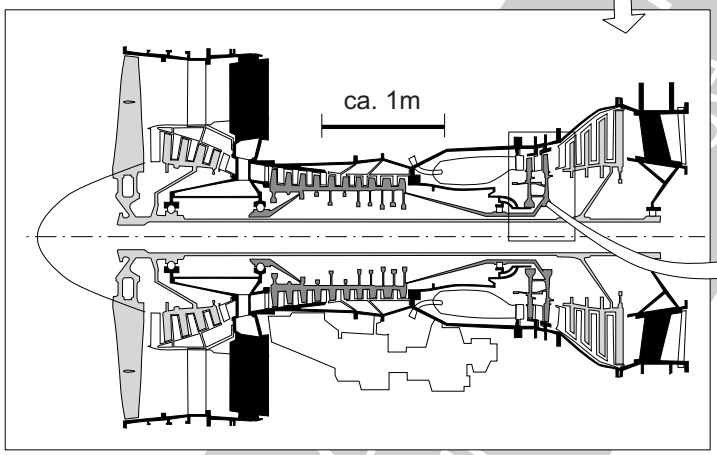
***Bild 12.2.1.8.3-9** (Lit. 12.2.1.8-18): Kurze Zeit nach dem Start kam es zum Versagen der **Scheibe der 2. Hochdruckturbinenstufe (**Rahmen rechts) mit Bruchstückaustritt. Das Turbinengehäuse wurde durchschlagen und es entstanden umfangreiche Schäden im Turbinenbereich.*
*Nachforschungen ergaben, die betroffene Turbinenscheibe mit einer besonderen Konfiguration stammte aus einem sehr frühen Produktionszeitraum. Sie wurde für eine spätere Verwendung nachgearbeitet indem ein Flansch entfernt wurde, um einen Zentrierbund mit einem Führungsansatz zu schaffen. Dieser diente zur Einführung eines Labyrinthzwischenstufenrings („Spacer“) in eine festsitzende Aufnahme (Bild 12.2.1.8.3-10). Hierfür benötigten die **Anlageflächen des Sitzes eine Nickelschicht**.*
*Die Scheibe war früher in einem Flugtesttriebwerk verbaut worden in dem zweimal Übertemperaturen registriert wurden. Eine nachfolgende Eindringprüfung ließ Rissanzeigen im Bereich der Nickelschicht erkennen. Sie wurden jedoch als zurückgebliebene **Eindringstoffreste am Schichtübergang missdeutet**. Man entschloss sich deshalb die fraglichen Zonen nachzuarbeiten und die Scheibe wieder zum Einbau freizugeben.*
Die eingehende Laboruntersuchung ergab, dass der Restbruch von einem ca. 14 cm langen Umfangsriss (Skizze unten links) an der Auflagefläche der Scheibe zum Labyrinthring ausging.
*Im Bereich der **Nickelschicht konnten mehrere Risse** nachgewiesen werden. Zusätzlich zeigte die Nickelschicht ausgeprägte **Fressspuren** (engl. „**galling**“). Die Risse in der Nickelschicht, die in das Grundmaterial der Scheibe verliefen, entstanden durch Schwingermüdung. Untersuchungen an bau-teil-relevanten Proben ergaben eine **Halbierung der Schwingfestigkeit gegenüber dem unbeschichteten Scheibenwerkstoff** (Bild 12.2.1.8.3-10).*

© Axel R... Turbomaschinen - als Schulungsplattform

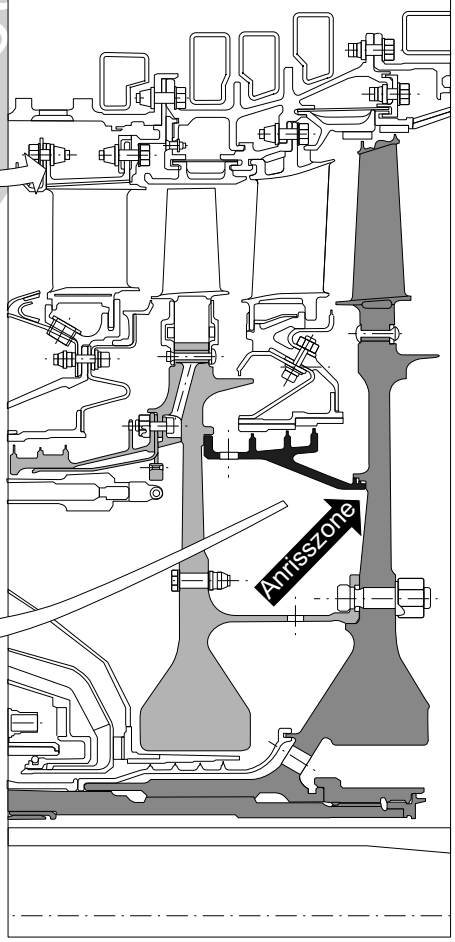
Eine ungeeignete galvanische Reparaturbeschichtung führte zum Bruch einer Turbinenscheibe.

Kurz nach dem Start in ca. 450 m Höhe, kam es zum Bruch einer HDT-Scheibe mit dem Austritt von Bruchstücken.





Hochdruckturbine mit gekennzeichneter Position des Primärschadens.



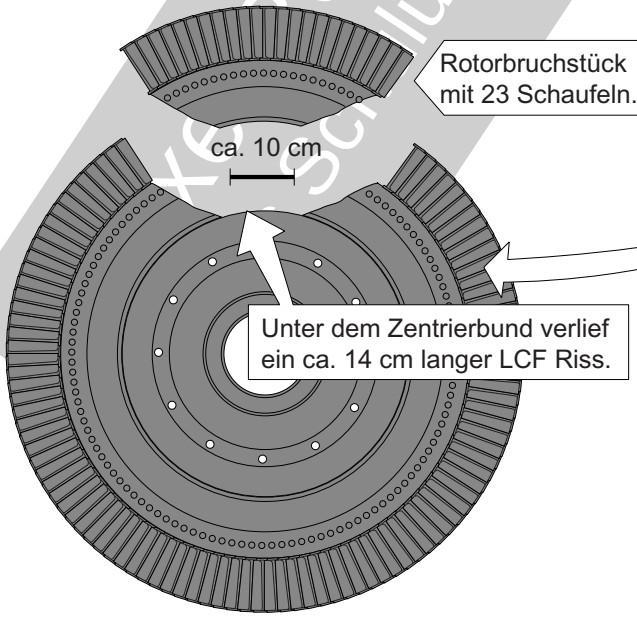


Bild 12.2.1.8.3-9

Wird die Absenkung der Schwingfestigkeit durch eine Nickelschicht nicht berücksichtigt kann es zu katastrophalen Schäden kommen.

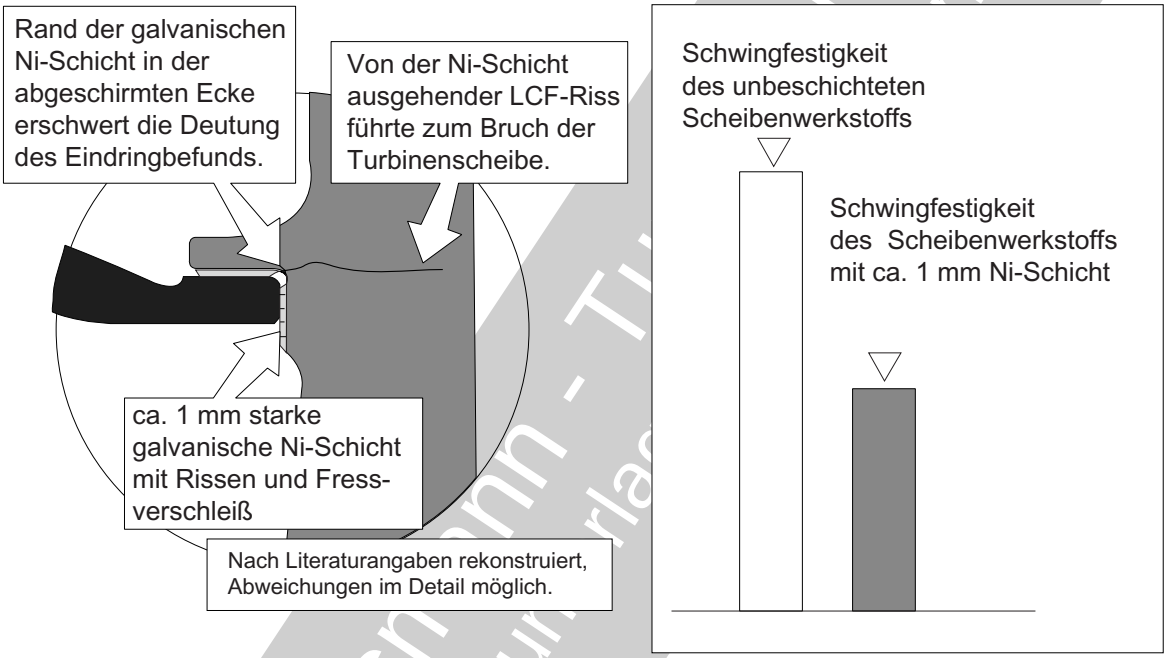


Bild 12.2.1.8.3-10

Bild 12.2.1.8.3-10 *(Lit. 12.2.1.8-18): Dieses Bild erklärt den auf eine* ***Nickelschicht*** *zurückzuführenden* ***Schwingfestigkeitsabfall*** *der zum in Bild 12.2.1.8.3-9 beschriebenen Scheibenbruch führte. Der Riss in die Scheibe begann am Übergang und im Bereich von Rissen in einer galvanisch aufgebrachten Nickelschicht (Skizze). Der Schaden wurde dadurch begünstigt, dass die Risserkennbarkeit einer Eindringprüfung durch die Lage der Schicht am Bauteil und den Schichtübergang erschwert war. Das führte zu einer Fehldeutung des Befunds (Band 4, Bild 17.3.1-9).*

Untersuchungen an Proben die den Bedingungen des Schadensfalls entsprachen ergaben, dass ***eine ca. 1 mm dicke Ni-Schicht die Schwingfestigkeit auf ca. 50% des unbeschichten Werkstoffs absenkt*** *(Diagramm).*

Brünierbäder lösen an Vergütungsstählen, wie sie häufig für Zahnräder und Wellen verwendet werden, eine gefährliche Rissbildung aus.

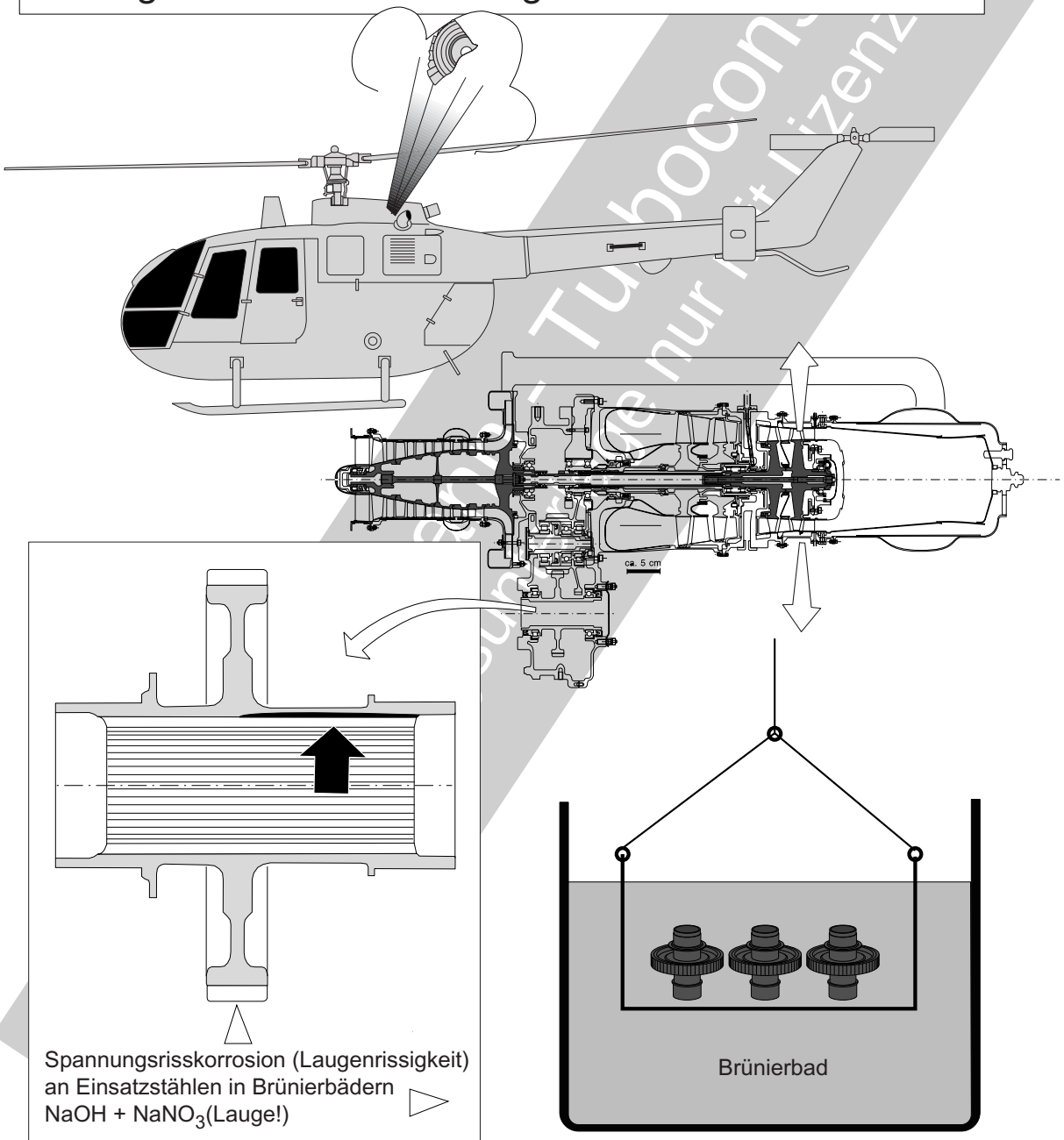


Bild 12.2.1.8.3-11

Bild 12.2.1.8.3-11: *In Getrieben (Wellen, Zahnräder) des Triebwerksbaus häufig verwendete Einsatzstähle werden gewöhnlich „**brüniert**“. Dabei entsteht in einer heißen Lauge (NaOH + $NaNO_3$) ein dünner brauner Belag, dessen positive Wirkung (halten von Öl, Korrosions-*

schutz) jedoch zweifelhaft ist. An solchen Bauteilen wurden Fälle bekannt, in denen nach dem Brünieren zentimeterlange Risse gefunden wurden. Diese zeigten die Merkmale von ***Spannungsrisskorrosion****. Im Fall der Einwirkung einer Lauge spricht man von* ***Laugensprödigkeit****. Sie tritt auf, wenn ausreichend hohe Zugspannungen vorhanden sind. Um das auszuschließen, werden solche Bauteile* ***vor dem Brünieren kugelgestrahlt****. Die induzierten Druckspannungen geben einen ausreichenden Schutz. Problematisch sind jedoch* ***für den Kugelstrahlprozess ungünstige Bauteilzonen****. Hierzu gehören die* ***Keilverzahnungen*** *in Zahnradwellen. Die Ecken in den Nuten wirken als Kerben und werden von den Stahlkugeln nur schwer erreicht. Sie sind damit eine Schwachstelle für Brünierrisse. Hinzu kommt, dass eine* ***magnetische Rissprüfung von der Nutgeometrie behindert*** *wird. So ist verständlich, dass in einigen Fällen angerissene Bauteile in Triebwerke gelangten und nach Schwingrissfortschritt mit umfangreichen Folgeschäden versagten.*

Wahrscheinlich nicht zuletzt aus diesen Gründen wird von einigen OEMs das ***Brünieren von Zahnrädern untersagt****.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.8.4 Kunstharze, Lacke, Elastomere

Häufig handelt es sich um Schichtsysteme, die aus einer **Vorbehandlung** (**Primer**) und einer **Nachbehandlung** wie einer **Versiegelung** bestehen. Diese Beschichtungen können auf unterschiedlichste Weise aufgebracht werden, z.B. durch Spritzen (flüssig, fest) Eintauchen in Pulver („fluidized bed“) Tauchen in Lack, Pinseln usw. Sie unterscheiden sich auch in Verarbeitung (z.B. Ein- und -Mehrkomponentenlacke) und Zusammensetzung (z.B. Epoxid, P. U., Polyester, Silikon, „Keramiklack“ mit metallischem Füllstoff, PTFE). Häufig werden Lacke als Gleitschichten verwendet, wobei die Füllstoffe (z.B. Grafit, MoS_2) ausschlaggebend sind.

Bild 12.2.1.8.4-2 zeigt typische Anwendungen von **Lackierungen und organischen Beschichtungen**. Ältere Triebwerkstypen die einen großen Anteil korrosionsempfindlicher Werkstoffe wie martensitische Stähle (Gehäuse, Verdichterbeschaufelung, Rotorscheiben), Magnesiumlegierungen (Getriebegehäuse, vordere Verdichtergehäuse und Aluminiumlegierungen (Verdichterschaufeln, Verdichtergehäuse, Getriebegehäuse) enthielten, waren auf Schutzlackierungen angewiesen. Moderne Triebwerkstypen verwenden im Verdichterbereich korrosionsfeste Titanlegierungen die keinen zusätzlichen Schutz benötigen. Verstärkt kommen solche Werkstoffe in faserverstärkten Kunststoffen (FVK) von Fangehäusen (Bild 12.2.1.5-1) und als gefüllte Elastomere (Silikongummi) in Anstreifschichten für Labyrinthe und Schaufelspitzen zur Anwendung.

Ein besonderes Problem ist die Vorbereitung der zu beschichtenden Fläche. Sie ist durchaus Klebeflächen vergleichbar (Kapitel 12.2.1.5). In Kapitel 12.2.1.7 werden die Probleme beim Reinigen, Ätzen und Spülen behandelt.

Die **Haftfestigkeitsprüfung** ist eine besondere Aufgabe mit der sich auch Bild 12.2.1.8-4 und Band 4, Bild 18.8-5 und Bild 18.8-6 beschäftigen. Zur Entwicklung und Erprobung von Beschichtungsverfahren sowie zur Qualitässicherung gehört die zerstörungsfreie Schichtdickenbestimmung. Dafür sind mehrere Verfahren verfügbar.

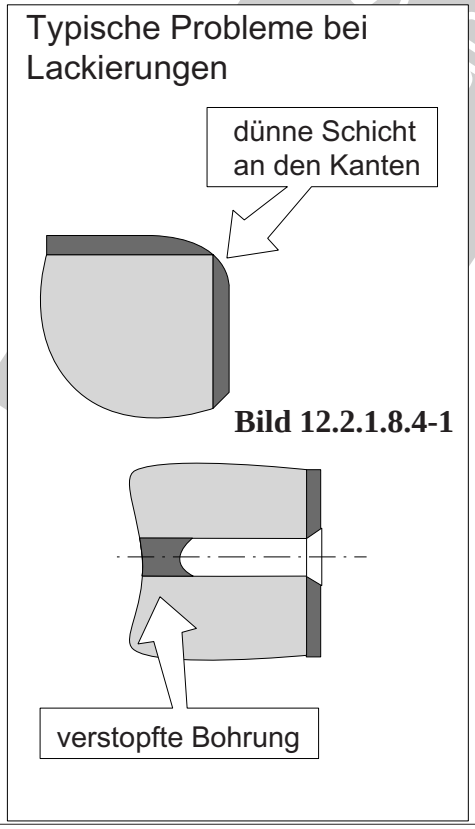
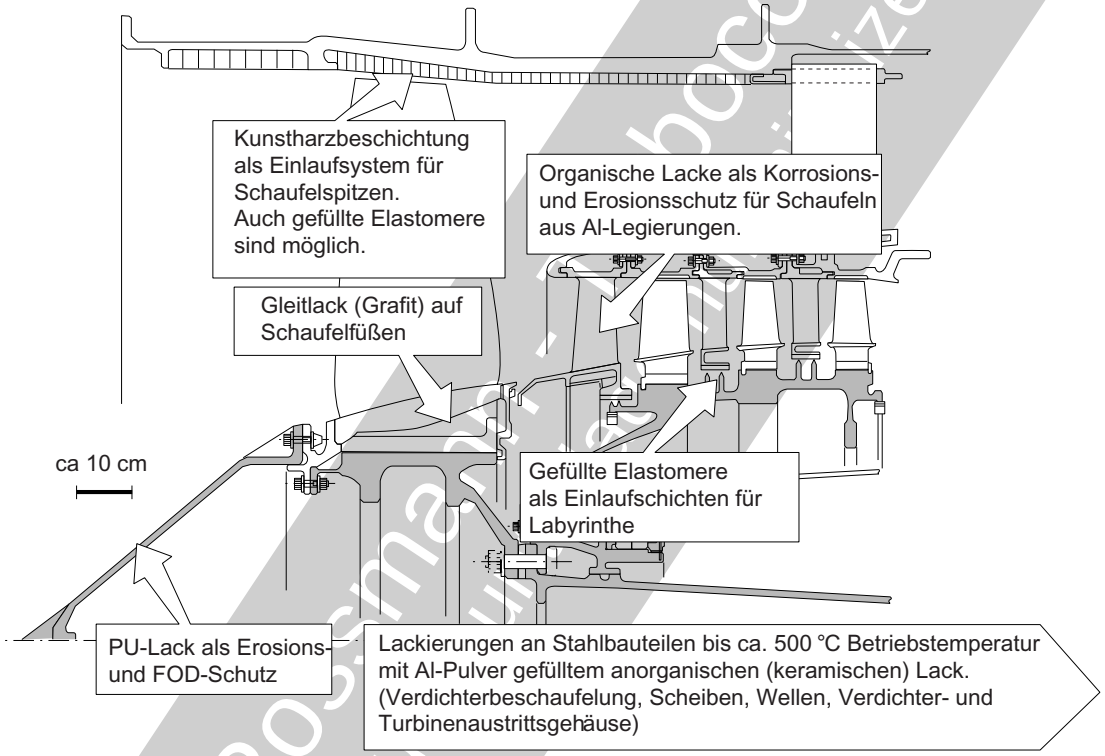


Bild 12.2.1.8.4-1

Bild12.2.1.8.4-1: *Sieht man von elektrostatischen Auftragungsverfahren ab, ist die dünnere* ***Beschichtung an Außenkanten*** *ein latent vorhandenes Lackierungsproblem (Skizze oben). Dies ist umso gravierender, weil Außenkanten für mechanische Beschädigungen besonders exponiert und empfindlich sind. Mit* ***elektrostatischen Verfahren*** *lässt sich an Kanten ein starkes Feld erzeugen und so eine besonders intensive Abscheidung gewährleisten.*
Ein weiteres Problem ist die ***Verstopfung von Bohrungen****. Geeignete* ***Abdeckmaßnahmen*** *sind auch für nicht zu beschichtende Bereiche wie Dicht- und Passflächen erforderlich.*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Anwendungen und spezifische Probleme von Lackierungen und organischen Beschichtungen im Triebwerksbau.



Nicht alle Lacke und Beschichtungen sind notwendigerweise gleichzeitig im dargestellten Fall realisiert!

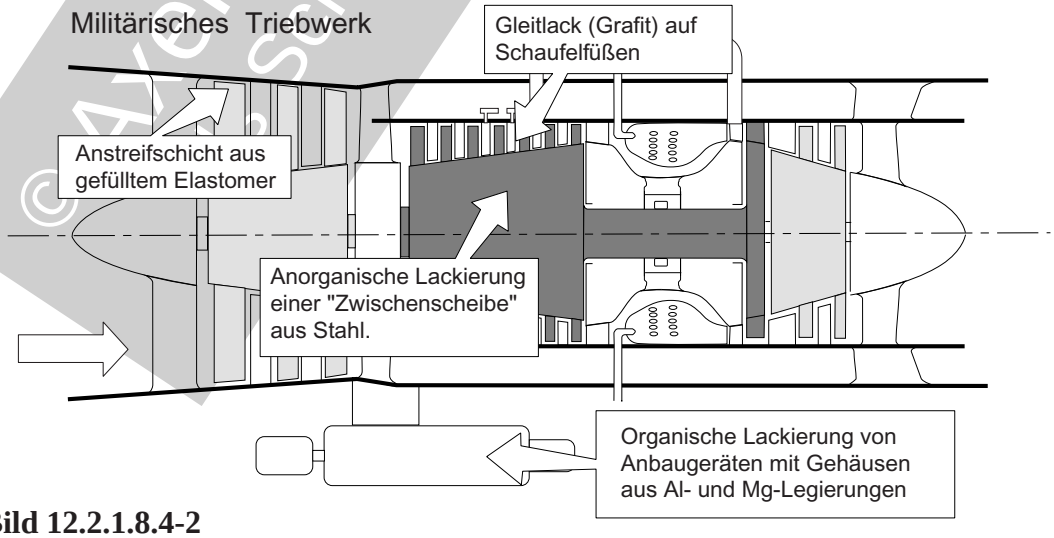


Bild 12.2.1.8.4-2

© Axel Rossmann - Weboconsult
Schulungsunterlagen - Lizenz

Bild 12.2.1.8.4-2: *Organische und anorganische Lackierungen sowie organische Schichten werden in modernen Triebwerken wegen der korrosionsfesten Werkstoffe (Ti- und Ni-Legierungen) immer weniger als Korrosionsschutz benötigt. Stattdessen gewinnen andere Anwendungen an Bedeutung. Siehe hierzu auch Bild 12.2.1.5-1, das die Anwendung von Klebstoffen zeigt.*

Korrosionsschutz: *Leichtmetalle (Al- und Mg) von Gehäusen und Schaufeln älterer Triebwerkstypen müssen mit organischen Lacken geschützt werden.*
Stahlteile wie Wellen und „Zwischenscheiben" (Übergang Ti-Legierung zu Ni-Legierung) in Verdichterrotoren älterer Triebwerkstypen werden wegen der hohen Betriebstemperaturen mit anorganischen, Al-Pulver gefüllten Lacken, versehen.

Anstreifschichten *kommen zum Einsatz, um einen möglichst guten Wirkungsgrad bzw. niedrigen Kraftstoffverbrauch zu gewährleisten. Beispiele sind in Fangehäusen gefüllte Wabendichtungen, Al-Polyester Beläge (Lit. 12.2.1.8-28), Kunstharze (Lit. 12.2.1.8-26) und gefüllte Elastomere (Lit. 12.2.1.8-26).*

Niedriges Gewicht*: Besonders effektiv ist der Einsatz in Fans mit großem Durchmesser.*

Containment*: Wicklungen aus Aramidfasern ermöglichen neben niedrigem Gewicht ein besonders günstiges Verhalten (Nesting, Lit. 12.2.1.8-26)*

Schallabsorption: *Gewinnt immer mehr an Bedeutung. Gefüllte Wabendichtungen aus organischen Werkstoffen kommen im Fanbereich und Bypasskanal zum Einsatz.*

Erosionsschutz*: PU-Beschichtung auf Fanaustrittsleitschaufeln und Spinner. Lacke auf Al-Schaufeln älterer Triebwerkstypen (Lit. 12.2.1.8-28)*

Schwingungsdämpfung*: Einkleben von Schaufeln mit Silikonklebern (Band 1, Bild 5.4.3.3-5). Aufkleben metallischer Dämpfungsfolien (Band 1, Bild 5.4.3.3-5 und Bilder5.4.3.3-13,-14,-15).*

Gleitschichten*: Grafit auf Anlageflächen von Verdichterrotorschaufeln. PTFE auf Gleitflächen und als Versiegelung um Anbackungen („Fouling") zu vermeiden.*

Infiltration und Dichtung*: Poröse Gehäuse von Anbaugeräten wie Getriebe aus Al- oder Mg-Guss werden zur Abdichtung gegen Öllecks mit Kunstharzen oder Wasserglas infiltiert (Bild 11.2-3).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Abhilfen gegen Schäden und Probleme an lackierten oder oganisch beschichteten Bauteilen.

Aus der Erfahrung lassen sich, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, Grundregeln aufstellen, die helfen können, typische Probleme an Lackierungen und organischen Beschichtungen zu vermeiden. Diese sollten dem **Konstrukteur** und in der **Fertigung** besonders in Arbeitsvorbereitung, Qualitätssicherung und den Prozessverantwortlichen geläufig sein.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Beschichtungen

Der **Konstrukteur** muss bei der Auswahl besonders auf mögliche Veränderungen der benötigten Eigenschaften während des Betriebs achten. Liegen nicht ausreichend Langzeiterfahrungen vor, ist an Originalteilen unter ausreichend realistischen Bedingungen (Zeit, Temperatur, Umwelteinflüsse, tribologische Effekte usw.) mit einem Bauteilversuch ein Nachweis durchzuführen.

· **Eigenschaften** organischer Lacke und Beschichtungen (Festigkeit, Härte, Verformbarkeit, Volumen) können sich **reversibel oder irreversibel** durch **Umwelteinflüsse** wie Feuchtigkeit, Kraftstoff, Öl oder **Reinigungsmittel** zeitabhängig verändern. Typische Anzeichen einer **Alterung** sind Quellen, Schrumpfen, Verspröden und Rissbildung. So kann Quellen von **Lagerbüchsen zum Festsitzen** verstellbarer Verdichterleitschaufeln führen. Schrumpfen dagegen eine Lockerung von Passungen oder die Ablösung von Beschichtungen auslösen. Eigenschaften wie Erosionsfestigkeit und FOD-Verhalten können sich unakzeptabel verschlechtern. Die **Lebensdauer** organischer Lacke und Beschichtungen reagiert im Grenzbereich ihrer Anwendung auf scheinbar geringe Temperaturerhöhungen von **wenigen °C sehr sensibel**. So neigen Kunststoffe zum Kriechen (Band 1 Kapitel 5.3.2) und als Folge zu Ablösungen (Band 4, Bild 18.8-3.1 und Lit. 12.2.1.8-28).

· Die **Machbarkeit** ist mit den Fertigungsabteilungen zu prüfen. Dazu gehören die verfahrensspezifische Zugänglichkeit und die Fertigungsfolgen. Nicht zu vergessen ist die Möglichkeit von Ausbesserungen und der **Reparierbarkeit** mit einer **Neubeschichtung**. Voraussetzung ist, dass sich das System ohne Schädigung des Bauteils mit akzeptablem Aufwand entfernen lässt. Dabei sind auch **Umweltschutzauflagen** (Giftigkeit von Lösungsmitteln, Entsorgung) zu berücksichtigen. Nicht zuletzt hängt die Machbarkeit von der **Verfügbarkeit** des Systems (Patente, Lizenzen, Bezugsquellen, Termine) und vom **Zulassungsstatus** (Behörden, OEM) ab.

· **Qualitätssicherung**: Klärung der Prüfbarkeit und Festschreibung mit der Spezifizierung und Definition der **Prüfmerkmale**. Festlegung der Merkmale der Beschichtungsfläche (z.B. Rauigkeit)

Der **Fertigung** muss das Verfahren zur Verfügung stehen und ausreichend Erfahrung mit dem bauteilspezifischen Beschichtungsprozess vorliegen. Ist dies nicht der Fall, ist eine Verfahrenserprobung vorzusehen.

· **Lagerungsbedingungen** (Temperatur, Gefäß, Luftzutritt usw.) sowie die Behandlung von Resten müssen spezifiziert und eingehalten werden.

· Aussagekräftige **Eingangsprüfungen** der Systeme bzw. der Komponenten.

· **Vorbereitung der zu beschichtenden Fläche**: Reinigung, Bearbeitungs- bzw. Behandlungszustand (z.B. Ätzen, abrasives Strahlen).

· Ausreichende **Anmischung** und **Reaktionszeiten**. Verarbeitung innerhalb der Tropfzeiten gewährleisten. Verarbeitungsbedingungen: Raum, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftreinheit ermitteln, spezifizieren und strikt einhalten.

Verarbeitung unter Serienbedingungen in geeigneten Räumen und Umweltbedingungen (Temperatur, Atmosphäre) erproben.

© Axel Bossmann, Tribocoat GmbH
als Schulungsunterlage nutzbar

Literatur zu Kapitel 12.2.1.8

12.2.1.8-1 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite112-148, 209-212.

12.2.1.8-2 ASM „Metals Handbook“, „Volume 5- Surface engineering“, ISBN 0-87170-377-7, 1999, „Plating and Electroplating“ Seite 165-273, „Painting“ Seite 421-447, Vacuum and Controlled-Atmosphere Coating and Surface Modification Process“Seite 497-620.

12.2.1.8-3 S.J.Grisaffe, „Coating and Protection“ aus „The Superalloys“,Verlag John Wiley & Sons, Seite 341-369.

12.2.1.8-4 U.H.Fürstenberg, „Hartverchromung, das Dauerfestigkeitsverhalten hartverchromter glatter und gekerbter Stahlproben“, Forschungsberichte Verbrennungskraftmaschinen, Heft 93, Bericht 2-217/4, 1968.

12.2.1.8-5 H.Wiegand, U.H.Fürstenberg, „Hartverchromung, Eigenschaften und Auswirkungen auf den Grundwerkstoff“, Zeitschrift „Technische Rundschau“, Nr. 12 vom 26. März 1971.

12.2.1.8-6 H.Simon, „Oberflächenbehandlung im Flugtriebwerkbau - Chemische Verfahren, Elektrochemische Verfahren, Beschichtungsverfahren“, Zeitschrift „Metalloberfläche“ 30 (1976) 12, Seite 557 - 565.

12.2.1.8-7 A.Buch, „Cr- und Ni- Schichten beeinflussen Dauerfestigkeit“, Zeitschrift „Maschinenmarkt“ Jg. 76 (1970) Nr. 104, Seite 2383 - 2388.

12.2.1.8-9 R.C.Novak, „Processing Aspects of Plasma Sprayed Ceramic Coatings“, Zeitschrift „Journal of Engineering for Gas Turbines and Power“ (Transactions of the ASME), October 1988, Vol. 110, Seite 617-620.

12.2.1.8-10 H.A.Nied, „Edge Stress Concentrations in Layered Ceramic-Metal Composites Due to Thermal Mismatch“, Proceedings of the Fourth National Spray Conference, Pittsburgh, PA, USA, 4-10 May 1991, Seite 315-322.

12.2.1.8-11 J.D. Lee, H.Y. Ra, K.T. Hong, S.K. Hur, „Analysis of deposition phenomena and residual stress in plasma spray coatings“, Zeitschrift „Surface and Coatings Technology“, 56 (1992) Seite 27-37.

12.2.1.8-12 J.G.Ferguson, „Use of Coatings in Turbomachinery Gas Path Seals“, Proceedings AGARD-CP-237 der Konferenz „Seal Technology in Gas Turbine Engines“, Seite 2-1 bis 2-13.

12.2.1.8-13 L.P.Ludwig, „Gas Path Sealing in Turbine Engines“, Proceedings AGARD-CP-237 der Konferenz „Seal Technology in Gas Turbine Engines“, Seite 1-1 bis 1-393.

© Axel Rossmann - Turbocsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.8-14 A.Matting, „Die Dauerschwingbeanspruchung metallgespritzter korrosions- und verschleißfester Schutzschichten“, Zeitschrift „Metall“, 16. Jahrgang, Juni 1962, Heft 6, Seite 539-546.

12.2.1.8-15 A.Tipton, „The Effect of HVOF Thermal Spray on the Elevated Temperature High Cycle Fatigue Behaviour of a Martensitic Stainless Steel“, Veröffentlichung TP 101 der Dresser-Rand Co, 2002.

12.2.1.8-16 A.R.Jones, „Eliminating Substrate Defects“, Zeitschrift; „Plating and Surface Finishing“, October 1994, Seite 14-17.

12.2.1.8-17 NTSB Aircraft Accident Report AAR-96/03 „Uncontained Engine Failure/Fire Valujet airlines Flight 597..., June 8,1995“.

12.2.1.8-18 NTSB Aircraft Incident Report AAR-71/16 „Northwest Airlines, Inc., Boeing 747-151...May 13, 1971“.

12.2.1.8-19 NTSB Identification MIA99FA005, Continental Airlines, Accident October 07, 1998,

12.2.1.8-20 TSB Aviation Investigation Report - A00W0105, Bell 206B (Helicopter) C-GIFR, 01 June 2000.

12.2.1.8-21 A.Zielonka, H. A.Jehn, „Galvanische Schichten“, Expert Verlag , Reihe „Kontakt & Studium“, Band 406, 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage, TAE.

12.2.1.8-22 H.-D.Steffens, U.Fischer, R.Dammer, ,,Dauerschwingfestigkeitsprüfung an Bauteilen mit thermisch gespritzten Überzügen“, Proceedings des „3rd International Congress for Surface Technology 1985“ (SURTEC), Berlin, VDI-Verlag, ISBN 3-8007-1420-5, Seite 457-464.

12.2.1.8-23 K.Stallmann, F.W.Hirth, H.Speckhardt, ,,Außenstromlos abgeschiedene Nickelschichten“, Zeitschrift „Metalloberfläche“ 38 (1984) 4, Seite 143 bis 150.

12.2.1.8-24 Australian Transport Safety Bureau (ATSB), Aviation Safety Investigation Report/ Aviation Safety Incident Report 200403110, „Engine Failure - Melbourne Airport, Victoria 25-Aug-2004, Boeing Company 777-312, 9V-SYB“, Seite 1-9.

12.2.1.8-25 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 3“, 2000, ISBN 3-00017733-7, Bild 11.2.3.1-4, Bild 11.2.3.1-5, Bild 12.4-13, Bild 12.4-14, Bild 12.6.2-15

© Axel Rossmann - Turboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

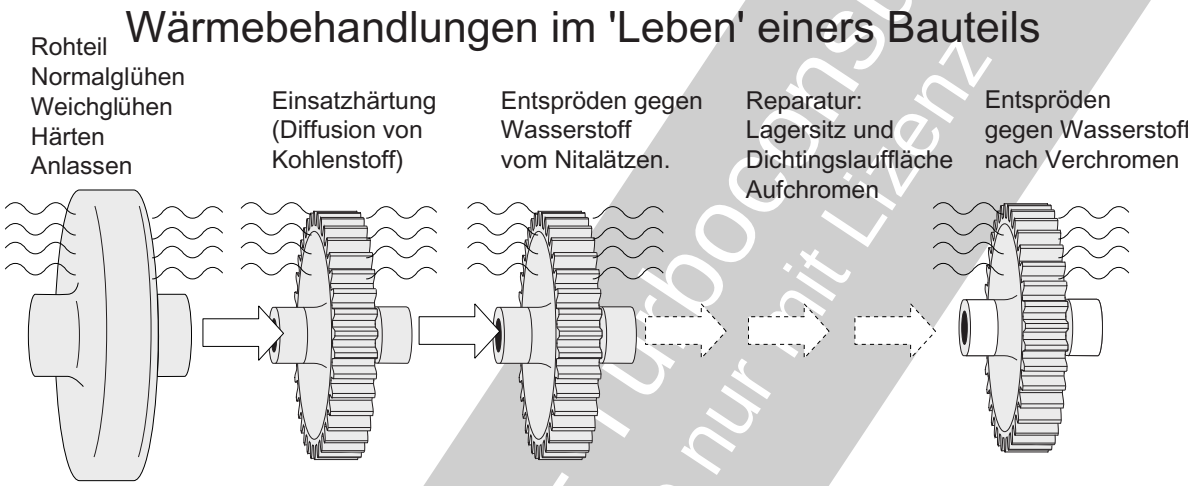
12.2.1.8-26 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 2“, 2001, ISBN 3-008429-0, Bild 6.2-18, Kapitel 7.1.1, Bild 7.1.2-21.1, Bild 7.2.2-34, Bild 7.1.3-4, Bild 7.1.3-10.1, Bild 7.1.3-11, Bild 7.1.4-16, Bild 7.2.2-32, Bild 8.2-16.2

12.2.1.8-27 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 5“, 2008, ISBN 987-3-00-025780-3, Kapitel 20.2.1

12.2.1.8-28 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 1“, 2000, ISBN -3-00-005842-7, Bild 5.2.3-6, Bild 5.3.2-6, Bild 5.4.1.2-3

© Axel Rossmann - Turbosonsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.9 Wärmebehandlung



Unter Wärmebehandlung versteht man „**Verfahren zur Behandlung von Werkstoffen durch thermische, chemisch-thermische oder mechanisch-thermische Einwirkung**“ (siehe unten), um optimale Gebrauchseigenschaften zu erzielen. Dabei unterscheidet man Verfahren zur Gefügeumwandlung auch des **Kernbereichs** eines Bauteils von solchen, die sich auf den **Oberflächenbereich** beschränken.(Lit. 12.2.1.9-3). Zu berücksichtigen ist, dass entsprechend dieser Definition ein Bauteil bereits **während der Fertigung mehrere Wärmebehandlungen** erfahren kann. Beispielsweise indem zunächst am Rohteil ein auf den folgenden Fertigungsprozess (z.B. Zerspanung, plastische Formgebung) optimierten **Gefügezustand** erhält. Anschließend ist z.B. nach einer **Schweißung** eine weitere Wärmebehandlung der **Wärmeeinflusszone** notwendig, um ausreichende Festigkeits- und Zähigkeitswerte zu erreichen. Zusätzlich kann der Abbau von Schweißeigenspannungen erforderlich sein. Auch an gelaufenen Bauteilen sind im Rahmen einer **Reparatur/Überholung** möglicherweise weitere Wärmebehandlungen erforderlich. Typisch ist die **Regeneration** (Kapitel 11.2.3.1) kriechbeanspruchter Heißteile (Band 1 Bild 5.3.2-9 und Bild 5.3.2-12) oder die Behandlung von Reparaturschweißungen.

Nachfolgend eine Übersicht häufiger Wärmebehandlungsverfahren (kein Anspruch auf Vollständigkeit):

Thermische Wärmebehandlung:

- Härten,
- Vergüten/Anlassen,
- Randschichthärten.
- Glühen: Spannungsarmglühen, Normalglühen, Grobkornglühen, Diffusionsglühen, Rekristallisationsglühen.
- Vorwärmen (Schweißen),
- Trocknen,
- Aufschrumpfen und thermisch Lösen (?).
- Entsprödung (gegen Wasserstoffversprödung).

Chemisch-thermische Wärmebehandlungen:

- Aufkohlen, Wiederaufkohlen/Rückkohlen

© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

- ‘Aufsticken’: Carbonitrieren, Nitrieren, Nitrocarburieren.
- Reinigungsglühen, Entoxidieren/Reduktion von Oxiden.

Mechanisch-Thermische Wärmebehandlungen:
- Im Rahmen eines Schmiedeprozesses.
- Beim Kriechumformen,
- Rekristallisieren von kaltverformtem Gefüge.
- Im Rahmen des Heißisostatpressens (Bild 11.2.3.1-1).

***Bild 12.2.1.9-1.1**: In diesem sowie den Bildern 12.2.1.9-1.1/-1.2, 12.2.1.9-2.1/-2.2 und Bild 12.2.1.9-3 ist eine Auswahl von Problemen und Schäden der Wärmebehandlungen zusammengestellt. Sie sollen das Bewusstsein für die zugehörigen Einflüsse schärfen und damit Hilfestellung zur Ermittlung der Ursachen sowie gezielter Abhilfen geben.*

*„**A**“ **Härterisse** (Lit.12.2.1.9-5) sind vielleicht auf den ersten Blick die ‘spektakulärsten’. Sie sind jedoch bei weitem nicht die einzigen potenziellen Schäden. Die Bezeichnung „Härteriss“ kommt von der typischen Entstehungssituation. Besser wäre **Wärmespannungsrisse**. Sie treten auch bei allen anderen metallischen (z.B. Titan- und Al-Legierungen) und vielen nichtmetallischen (Keramiken, Gläser) Werkstoffen auf. Neben den Wärmespannungen wirken sich auch **Gefügeveränderungen mit Volumeneffekten** aus (z.B. Austenit in Martensit, „**F1**“). Hier ist eher mit **gefügeabhängigen Mikrorissen** zu rechnen. Dieser Einfluss tritt besonders an martensitischen Stählen auf. Er ist gewöhnlich bei **Makrorissen** im Vergleich zu den Wärmedehnungen auf Grund der **Temperaturgradienten** (Diagramme oben Mitte) eher gering. Härterisse können auch nach der eigentlichen Wärmebehandlung, dem Härten (Bild 12.2.1.9-1.2), auf Grund der **induzierten Eigenspannungen verzögert auftreten***

*Härterisse bei martensitischen Stählen verlaufen typischerweise **entlang den ehemaligen Austenitkorngrenzen**. Sie haben mikroskopisch (REM) **Sprödbruchmerkmale** (Lit. 12.2.1.9-5 und Lit. 12.2.1.9-6)..*

Ursachen für verzögerte Rissbildung nach dem Härten.

nach Lit. 12.2.1.9-4

Werkstoff

- Seigerungen: Makro und mikro.
- Schlackeneinschlüsse,
- Gefügezeilen (Karbide, Ferrit/Perlit),
- Wasserstoff (gelöst),
- Walz- und Schmiedefehler,
- Werkstoffverwechslung oder ungünstige Auswahl

Härteverfahren

- Vorwärmung nicht optimal,
- Aufheizen: Geschwindigkeit zu hoch,
- Aufheizen und Abkühlen am Teil ungleichmäßig.
- Abschreckbäder ungeeignet.
- Austenitisierungstemperatur,
- Haltezeiten,
- Abkühlung zu schroff,
- Oxidation.
- Randentkohlung,
- Aufkohlung zu stark,

Bild 12.2.1.9-1.2

Nachbehandlungen

- Thermisch: Tiefkühlen, Anlassen,
- Mechanisch: Schleifen, Richten,
- Chemisch: Wasserstoffdiffusion, durch Ätzen, Elektrochem. Bearbeitung. Spannungsrisskorrosion: Atmosphäre, Verunreinigungen, Hilfsstoffe.
- Richten von Verzug (z.B. dünne Wellen).

Makrorisse findet man in erster Linie an der Oberfläche der Bauteile. Das lässt darauf schließen, dass sie in der Abkühlphase entste-

© Axel Rossmann - Tu-Consult
Abschlussunterlage Competenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Wärmebehandlung

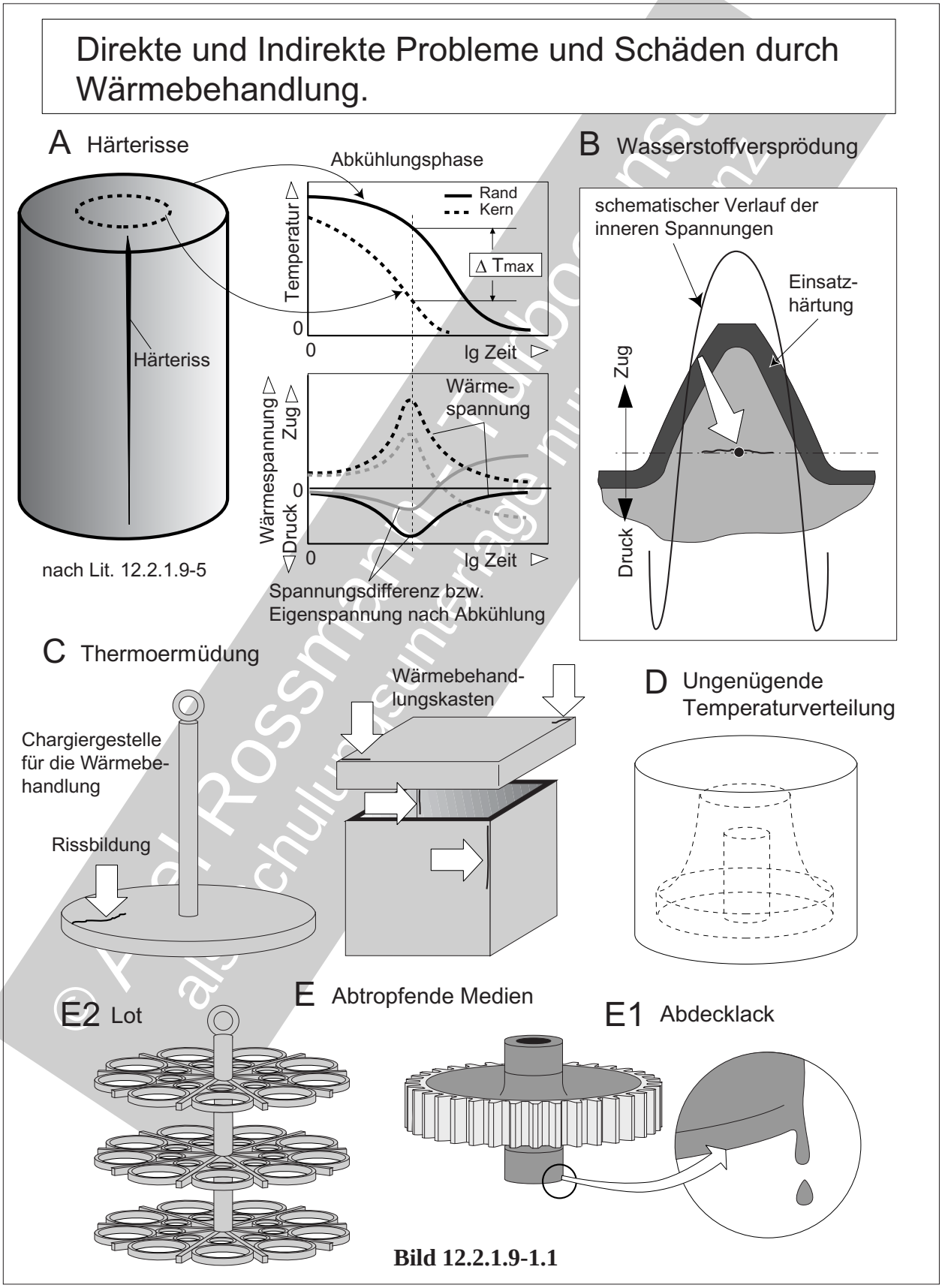


Bild 12.2.1.9-1.1

hen. Entscheidend ist der Temperatur- bzw. Spannungsgradient. Beim Aufheizen entstehen in den schneller erwärmten Außenzonen Druckspannungen, die im Gleichgewicht (sonst

würde sich das Teil bewegen) mit Zugspannungen im kälteren Kern stehen. Dabei kann der Kern plastisch gedehnt, die Randzone plastisch gestaucht werden. Beim Abkühlen entstehen nun in der 'schnelleren' Randzone auf Grund vorheriger plastischer Verformungen hohe ***Zugspannungen,*** *welche sich mit einem „Härteriss" abbauen. Ursachen sind der* ***Wärmedehnungsgradient zum Kern*** *und gegebenenfalls* ***Eigenspannungen.*** *Natürlich ist ein Werkstoff umso gefährdeter je spröder er ist. Diese Sprödigkeit kann bei manchen Werkstoffen auch während der Abkühlung auftreten. Ohne Rissbildung verbleiben die verformungsbedingten Eigenspannungen. Sie können* ***verzögert*** *im abgekühlten Zustand durch weitere Einflüsse (auch in Kombination) wie Wasserstoff, Korrosion,* ***Makro und Mikrokerben Risse auslösen*** *(Bild 12.2.1.9-1.2). In Fällen einer Rissbildung, die zwar auf* ***härtungsbedingte Eigenpannungen*** *zurückgeht, jedoch in* ***anderen Fertigungsfolgen*** *ausgelöst wird. Man findet in der Praxis entsprechende Begriffe wie Schleifrisse, Beizrisse und Richtrisse. Diese werden im Begriff '****Spannungsrisse****' eher unspezifisch zusammengefasst (Lit. 12.2.1.9-5).*

*„****B****" Wasserstoffversprödung ist bei einer Wärmebehandlung in '****Wasserstoffatmosphäre****' wie Schutzgas oder in einer Aufkohlungsatmosphäre möglich. Beim* ***Einsatzhärten*** *in einem* ***Kohlenwasserstoffgas*** *(z.B. Methan) mit hoher Temperatur dissoziiert Wasserstoff und kann eindiffundieren. Dieser ist nach der Aufkohlung offenbar* ***nicht mehr in der Lage aus dem Kern zu diffundieren****. Im Gleichgewicht mit Druckeigenspannungen in der Einsatzschicht entstehen im Bauteilkern Zugeigenspannungen. Sind diese gebenenfalls zusammen mit Betriebsspannungen ausreichend hoch, kommt es an kleinen werkstofftypischen* ***Gefügekerben*** *(keine Fehler)* ***zur verzögerten Rissbildung****. Ein aufgebrochener Riss hat das Aussehen von* ***Fischaugen*** *(Bild 12.2.1.3.1-22). Im Betrieb kann der Riss wachsen und zum Bruch (z.B. eines Zahnradzahns) führen (Band 1 Bild 5.7.2-2). Solche Fälle hat man offenbar auch an* ***Zahnrädern großer Windenergieanlagen*** *beobachtet.*
Haben sich die inneren Risse gebildet, sind diese erfahrungsgemäß bei Zahnrädern mit hoher Sicherheit mit einer angepassten ***automatischen Ultraschallprüfung*** *nachweisbar.*
Fraglich ist, ob bei Einsatzhärtungen eine ***Entsprödung,*** *die* ***spätestens in einem Zeitabstand*** *von zwei Stunden nach der Wasserstoffaufnahme ca. zwei Stunden bei 180°C erfolgen muss, Abhilfe bringt.*

*„****C****" Die* ***Thermoermüdung*** *betrifft als Einmalvorgang '****Thermoschock****' (Bild 12.2.1.9-3, Band 1 Bild 5.4.2.1-3) die* ***Werkstücke*** *und als* ***Ermüdungsvorgang*** *(Band 1 Bild 5.4.2.1-2) die* ***Wärmebehandlungsanlagen*** *(Chargiergestell, Retorten, Kästen). Diese sind gegebenenfalls unter dem Gesichtspunkt* ***elastischen Verhaltens*** *konstruktiv zu optimieren.*

*„****D****" Die* ***Temperaturverteilung*** *im* ***Werkstück*** *hat einen entscheidenden Einfluss auf das* ***Ergebnis*** *der Wärmebehandlung (Bild 11.1-4, Bild 11.1-14) und mögliche Fehler (siehe „****A****", Bild 11.2-13 und Bild 11.2-19). Bei* ***dicken Querschnitten*** *besteht das Problem, dass optimale Temperaturen, Temperaturgradienten und Temperaturänderungen in Geschwindigkeit und Höhe aus physikalischen Vorgaben nicht eingehalten werden können (Bild 11.1-14). Mit Computerprogrammen sind heute sehr nützliche Simulationen und damit Optimierungen der Wärmebehandlung möglich.*

*„****E****" Abtropfende Medien: Temperaturbedingt kommt es meist unbewusst zum Schmelzen metallischer Verunreinigungen und Abdeckmedien. Tropfen diese auf darunter angeordnete Bauteile, werden diese, oft anfangs unbemerkt, geschädigt.*
*„****E1****" 'Abdecklack': Die zeitweise Verflüssigung ist für den Praktiker erfahrungsgemäß besonders schwer zu klären. Betroffen können* ***Beschichtungen auf organischer Basis*** *sein.*

© Kyl Rosmann - Turbocomp
Ausbildungsunterlagen mit Lizenz

Sie dienen als Abdeckung nicht für die Einsatzhärtung vorgesehener Bereiche. Manches Produkt kann erfahrungsgemäß während der Erwärmung ***vorübergehend schmelzen****. So können Tropfen auf tiefer liegende Teile fallen. Auch Tropfen die* ***am Chargiergestell haften,*** *können bei der nächsten Charge verunreinigend wirken. An einer solchen Stelle* ***fehlt die Einsatzschicht*** *oder ist unzureichend ausgebildet. Zwar zeigen sich diese Stellen bei einer* ***Nitalätzung als 'weiße Flecken'*** *mit Tropfenmerkmalen, das Bauteil ist jedoch meist nicht reparierbar.*

*„****E2****" Lot: Werden im Wärmebehandlungsofen oder mit Chargiergestellen auch Lötungen durchgeführt, besteht die Gefahr von* ***Lötrissigkeit*** *(engl. LME, Band 1 Bild 5.3-6, Bild 5.3-7 und Bild 5.3-8). Selbst wenn es noch nicht zur Rissbildung kommt, ist mit* ***gefährlichen Aufschmelzungen*** *hoher Kerbwirkung zu rechnen (Band 1, Bild 5.4.4-1).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

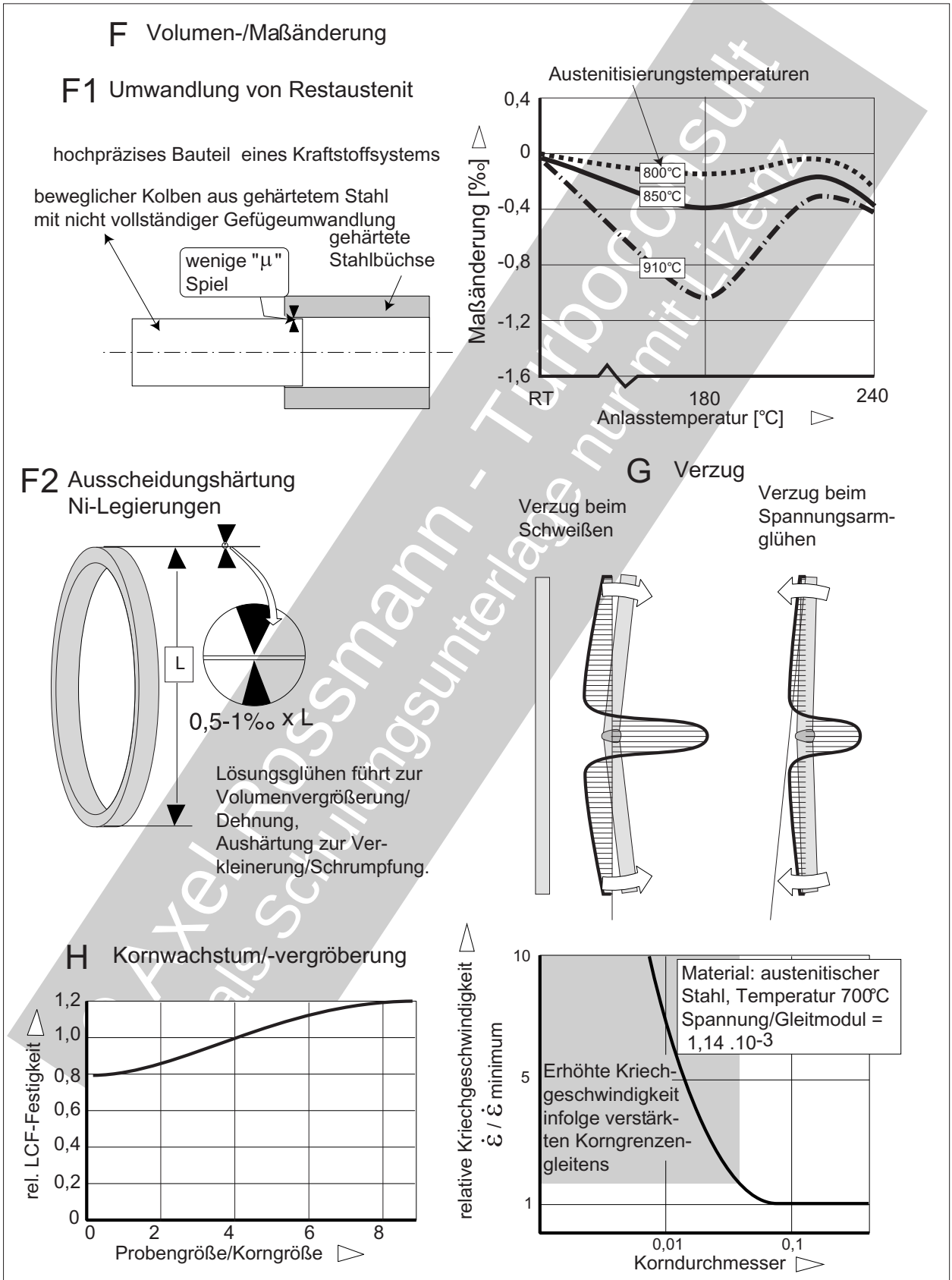


Bild 12.2.1.9-2.1

© Axel Rossmann - Turbocosult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Wärmebehandlung

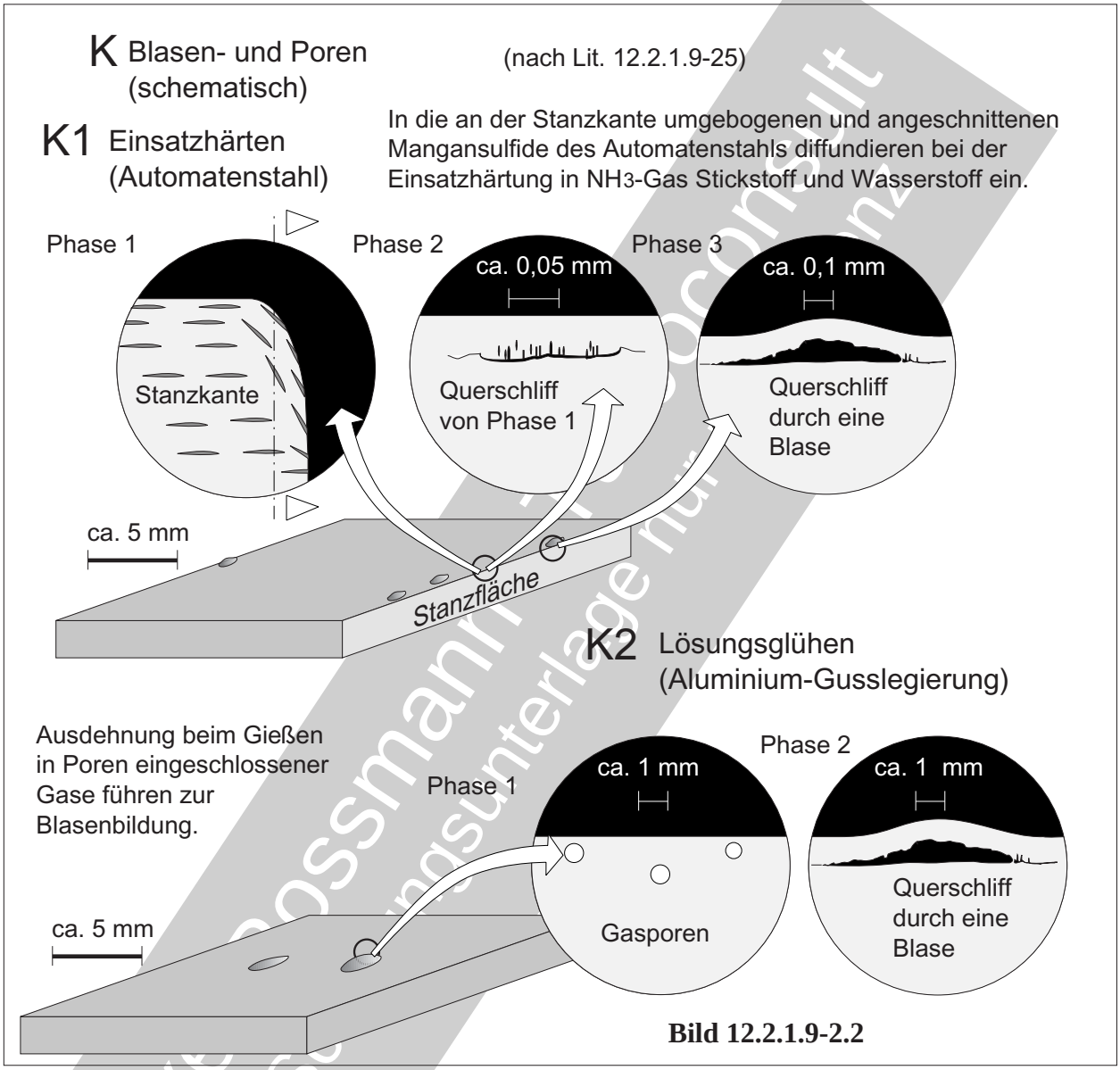


Bild 12.2.1.9-2.2

***Bild 12.2.1.9-2.1**: Dieses Bild gehört zu Bild 12.2.1.9-1 und Bild 12.2.1.9-3, einer Auswahl von Problemen und Schäden der Wärmebehandlungen.*

*„**F**“ **Volumen-/Maßänderungen** bei einer Wärmebehandlung sind auf Gefügeveränderungen zurückzuführen. Gewöhnlich handelt es sich um eine Volumenzunahme*

*- **„F1“, Umwandlungen des Gefüges**. Beispiel ist **Austenit in Martensit**. Dieser kann sich auch bei niedrigen Temperaturen als Restaustenit umwandeln (Skizze oben rechts, Bild 12.2.1.9-3).*

*- **Aushärtung bei Temperatur** (Warmaushärtung) **durch Bildung submikroskopischer Partikel.** (Ausscheidungshärtung) , z.B. γ' bei Ni-Legierungen („**F2**“, Bild 12.2.1.9-4)*

*- Aushärtungsvorgänge ('**Auslagerung**') **im abgekühlten Zustand** (Kaltaushärtung), z.B. bei höher festen Aluminiumlegierungen wie Al-Cu-Legierungen. Leider gibt hier zu Maßänderungen die vorliegende Literatur keine Auskunft. Sie dürfte von Effekten wie Oxidationsschichten und Wärmedehnungen deutlich überdeckt sein.*

*„**G**“ **Verzug** als Maßänderung **in und/oder nach dem Fertigungsprozess** steht häufig im*

© Axel Bossmann - Ingenieurconsult
Abschlussunterlage nur für Lehrzwecke

*Zusammenhang mit **Wärmespannungen** (**Kriechen/Relaxation**, Bild 12.2.1.3.1-16) und/oder der **Veränderung von Eigenspannungen** bei **Materialentnahme**/Zerspanung (siehe Bild 12.2.1.1.2 -2 „**G**“).*

*„**H**“ **Kornwachstum/-Vergröberung** ist umso ausgeprägter, je länger und höher die Temperatur einwirkt. Die **Schwingfestigkeit** eines Werkstoffs mit gröberem Korn liegt in der Regel unterhalb der des Feinkorns (Diagramm links). Die **Kriechfestigkeit** ist dagegen höher (Diagramm links) Band 1 Bild 5.4.2.1-7). So wird z.B. bei Bauteilen wie Turbinenscheiben im äußeren **Kranzbereich** mit hohen Temperaturen, **Grobkorn** angestrebt. Innen im zyklisch besonders beanspruchten aber kälteren **Nabenbereich** dagegen **Feinkorn** (Bild 11.1-4).*

***Bild 12.2.1.9-2.2**: (Lit. 12.2.1.9-25): Ein besonderes Phänomen ist die **Blasenbildung** auf Oberflächen wärmebehandelter Bauteile. Sie kann unterschiedliche Ursachen haben:*
*„**K1**“ **Diffusion der Wärmebehandlungsatmosphäre**: Wegen der geringen Härtbarkeit wird bei unlegierten Einsatzstählen der Einsatzatmosphäre zum Schluss noch NH_3 zugegeben. Bei Stanzteilen aus Automatenstahl führt dies an den Kanten der Stanzflächen zur Blasenbildung. Der Mechanismus wird so beschrieben, dass die **Mangansulfide beim Stanzprozess umgebogen und angeschnitten** werden (Phase 1). Damit kann entstehender **Stickstoff in die Mangansulfide diffundieren** (Phase 2) und rekombinieren. So erzeugen sie einen ausreichenden Druck um Blasen aufzuwerfen (Phase 3). Wieweit Wasserstoff an diesem Vorgang beteiligt ist scheint unklar. Man beobachtet jedenfalls auch feine Porenbildung in Oberflächennähe die mit **Wasserstoffdiffusion** erklärt wird, der aus **dissoziiertem Wasserdampf** in der Lösungsglühatmosphäre stammt. Denkbar ist auch, dass der Wasserstoff vor der Wärmebehendlung, z.B. von einem Beizprozess stammt.*

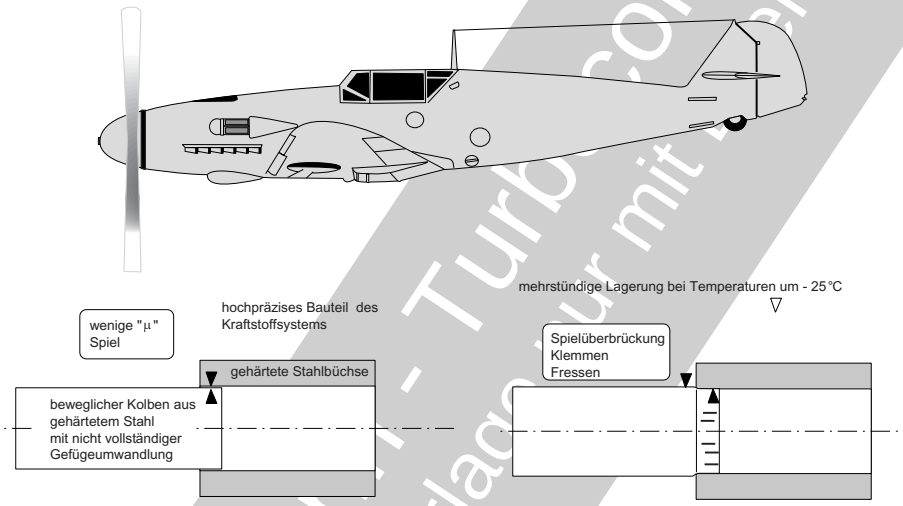
*Ähnliche Effekte der Poren- und Blasenbildung beobachtet man auch bei **aushärtbaren Aluminiumlegierungen**. Hier erfolgt eine Blasenbildung offenbar auf der Schnittfläche und nicht unmittelbar an der Kante wie bei Automatenstählen. Sehr große Blasen kann man im Bereich von **Dopplungen** an Blechteilen beobachten (Bild 11.2.2.1-14). Hier scheint sich neben möglicherweise eingeschlossenem Gas auch eine **schnelle Aufheizung** dieser Oberflächenzone auszuwirken. Die schlechtere Wärmeabfuhr löst einen Stauchprozess und ‘**Ausknicken**’ aus.*
*„**K2**“ **Blasenbildung durch Gasporen** aus dem Gießprozess (Phase 1, Bild 11.1-7, Bild 11.2-3 und Bild 11.2-2.1) beobachtet man an **Gussteilen aushärtbarer Aluminiumlegierungen**. Beim Lösungsglühen entsteht im eingeschlossenen Gas ein ausreichend hoher Druck, der die Oberfläche aufwirft (Phase 2).*

***Bild 12.2.1.9-3: 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 (Bild 12.2.1.8-5). Gewöhnlich ist bei Stahlteilen das Fertigmaß betroffen.*
Auch aushärtbare Leichtmetalllegierungen (Aluminium) und Nickellegierungen unterliegen Volumenänderungen beim wechselseitigen Übergang vom ausgehärteten zum lösungsgeglühten Zustand (Bild 12.2.1.9-4). 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.

© Axel Grossmann - Turbocampus
Lehrunterlagen Luftfahrt

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Wärmebehandlung

Schon Bauteilen anderer Antriebe hat offenbar eine Volumenänderung als Folge der Wärmebehandlung Probleme gemacht.



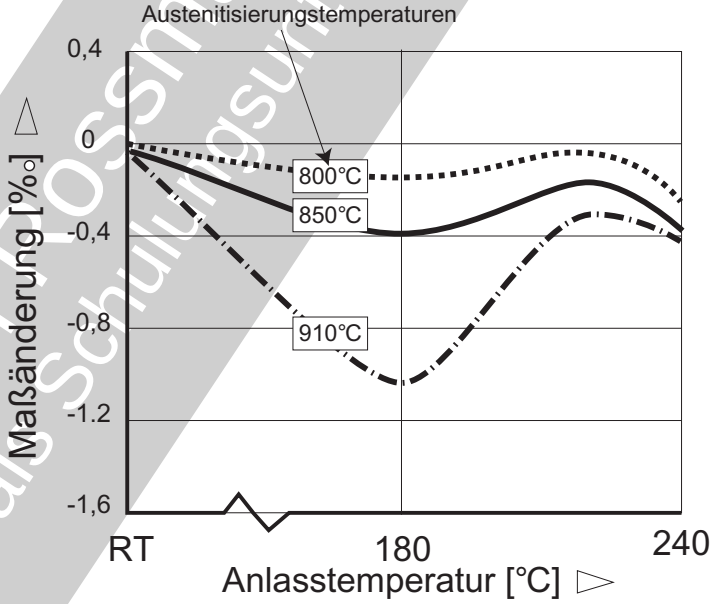
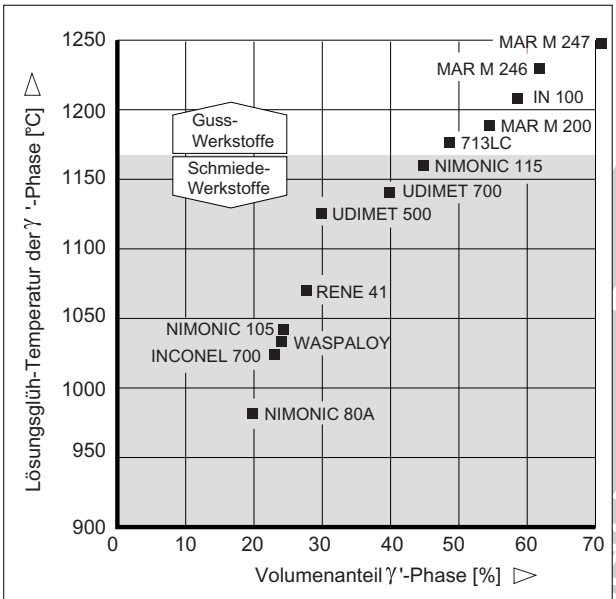


Bild 12.2.1.9-3

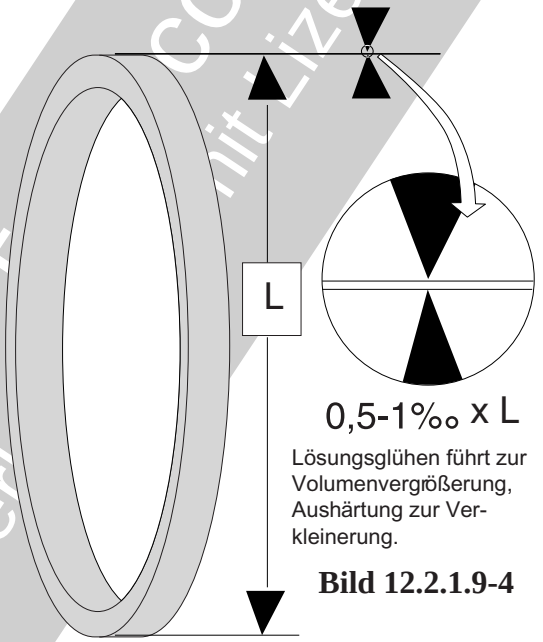
Erfolgt beim Härteprozess von Stählen beim Abkühlen nicht die volle Umwandlung des Austenits in Härtegefüge, liegt ein instabiler Gefügezustand vor. Dieser kann mit einer Erwärmung (unterhalb von 300 °C, Diagramm unten) oder einer Tiefkühlung (ca. -25 °C) nachträglich mit einer Volumenvergrößerung umklappen. 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 ein weiteres Beispiel. Hier blockierte ein Zumesskolben des Kraft-

© 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 12.2.1.9-4

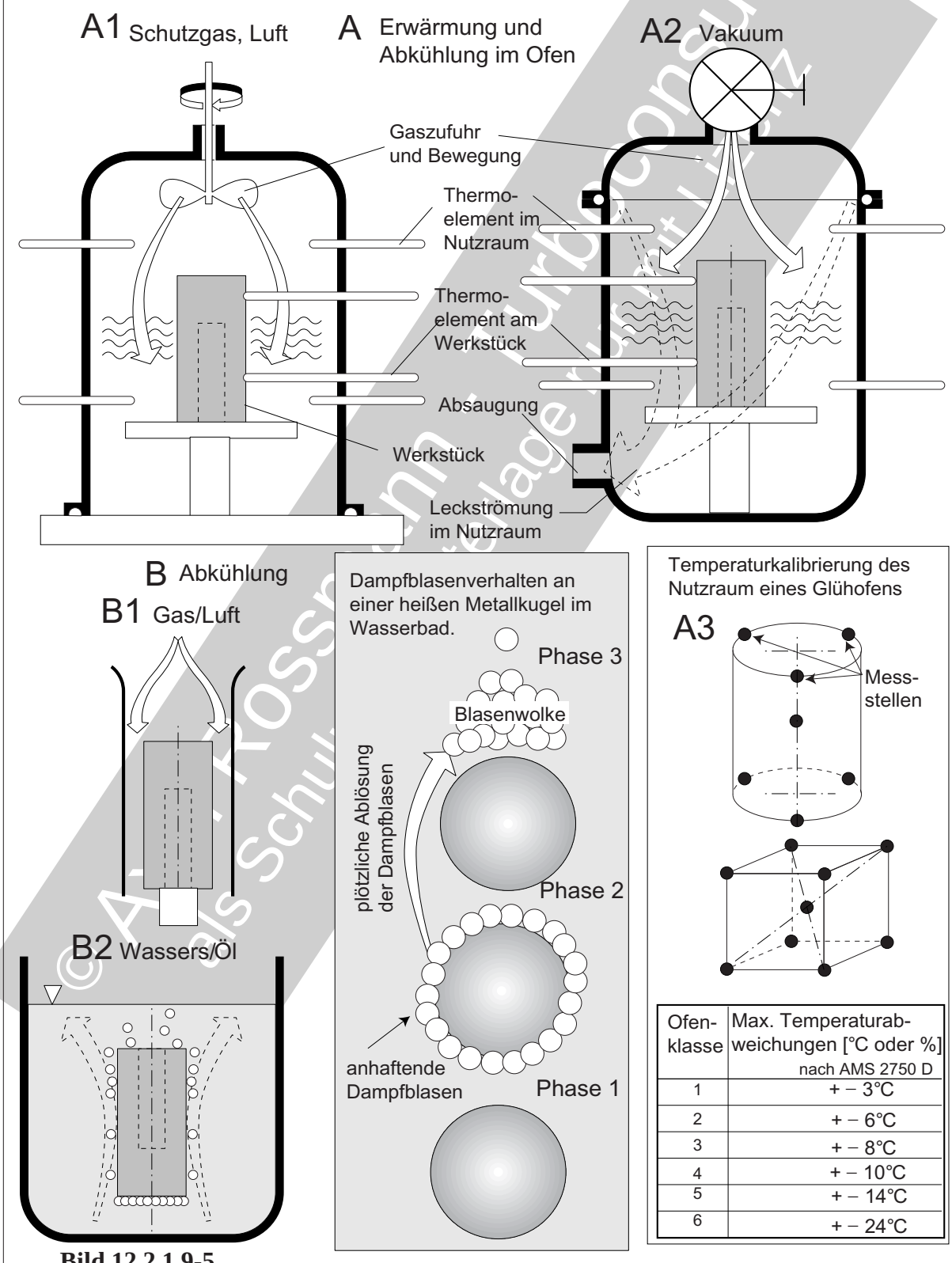
stoffreglers eines Hubschraubertriebwerks während des Tests in einer Kältekammer.
Bei diesen extrem eng tolerierten Schiebepassungen genügte eine Durchmesservergrößerung von wenigen µ m (mittlere Skizzen).
*An **Wälzlagern** hat man bei hohen Betriebstemperaturen das „Wachsen" eines Durchmessers von 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. 12.2.1.9-21).
Je niedriger die Austenitisierungstemperatur, umso geringer ist in diesem Fall die zu erwartende Massänderung.

***Bild 12.2.1.9-4: 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 12.2.1.9-3). 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. das Verhalten der Bauteile nicht. Das erklärt sich daraus, dass entsprechende Wärmebehandlungen an Rohteilen mit ausreichend Aufmaß durchgeführt werden. Probleme dürften sich daher auf Sonderfälle beschränken.

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.9-12

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Wärmebehandlung

Probleme mit Wärmebehandlungsanlagen



Ofen-klasse	Max. Temperaturab-weichungen [°C oder %] nach AMS 2750 D
1	+ − 3°C
2	+ − 6°C
3	+ − 8°C
4	+ − 10°C
5	+ − 14°C
6	+ − 24°C

Bild 12.2.1.9-5

Bildbeschreibung siehe nächste Seite

Fortsetzung von Seite 12.2.1.9-10

*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 12.2.1.3.5-2).*

***Bild 12.2.1.9-5:** Wärmebehandlungsanlagen sind selbst besonderen Problemen ausgesetzt.*
- *Probleme der Temperaturmessung (Bild 12.2.1.9-6).*
- *Probleme der Temperaturführung und -verteilung.*
- *Reaktion mit der Ofenatmosphäre. (Heißgaskorrosion/Oxidation).*
- *Thermoermüdung durch Temperaturzyklen*

*„**A**“ **Erwärmung und Abkühlung im Ofen**: Problem ist die Gewährleistung spezifikationsgerechter **Temperaturen im Ofenraum** („**A3**“) **und am Werkstück**. Maximal zulässige Temperaturabweichungen werden von der **Ofenklasse** die dem Werkstück zugeordnet ist bestimmt. Sie sind für die Messtechnik durchaus eine Herausforderung. Verwendet werden in erster Linie Thermoelemente (Bild 12.2.1.9-6) die selbst einer Überwachung auf Schädigungen bedürfen.*

*„**A1**“ **Gasatmosphäre** (Luft, Schutzgas) beeinflusst durch seine Eigenschaften und Relativbewegung (Konvektion) an der Werkstückoberfläche den **Wärmeübergang**. Dieser, zusammen mit den Werkstoffeigenschaften des Werkstücks und dessen Masse, bestimmt die **Aufheizdauer** nach der die Durchwärmung erfolgt ist. Die Abkühlung kann mit zusätzlich eingebrachtem kühlen Gas erfolgen. Eine zu **schnelle Aufheizung begünstigt** auch eine **Rissbildung bei der Abkühlung** (Bild 12.2.1.9-1.1 „**A**“). Natürlich beeinflusst das Gas auch die Retortenwände (Hochtemperaturkorrosion, Oxidation) und die Werkstückoberfläche.*

*„**A2**“ **Vakuum**: Hier ist eine **Aufheizung** des Werkstücks nur über **Strahlung** möglich. Dies führt zu längeren Aufheizzeiten. Die **Abkühlung** kann mit **Schutzgas** erfolgen, das in den Nutzraum eingelassen wird. Ein besonderes Problem sind **Luftlecks** an den **Dichtungen** des Deckels oder bei unbemerkter **Rissbildung**. Falls Risse am **Kühlsystem** der Anlage auftreten, ist mit schädigendem dissoziiertem **Wasserdampf** (Sauerstoff, Wasserstoff) zu rechnen. Zeigen Werkstücke **trotz ausreichend guten Vakuummesswerten Anlauffarben** bis zur leichten **Oxidation,** ist auf ein im Vergleich zur **Leistungsfähigkeit der Vakuumpumpen** kleines Leck zu schließen. Dies reicht aber für eine merkliche Strömung im Nutzraum.*

*„**B**“ **Abkühlung**:(Bild 12.2.1.9-8) Schnellere Abkühlungen können zur Erzielung des gewünschten Gefüges benötigt werden. Dazu nutzt man **Flüssigkeiten** oder **Gase**.*

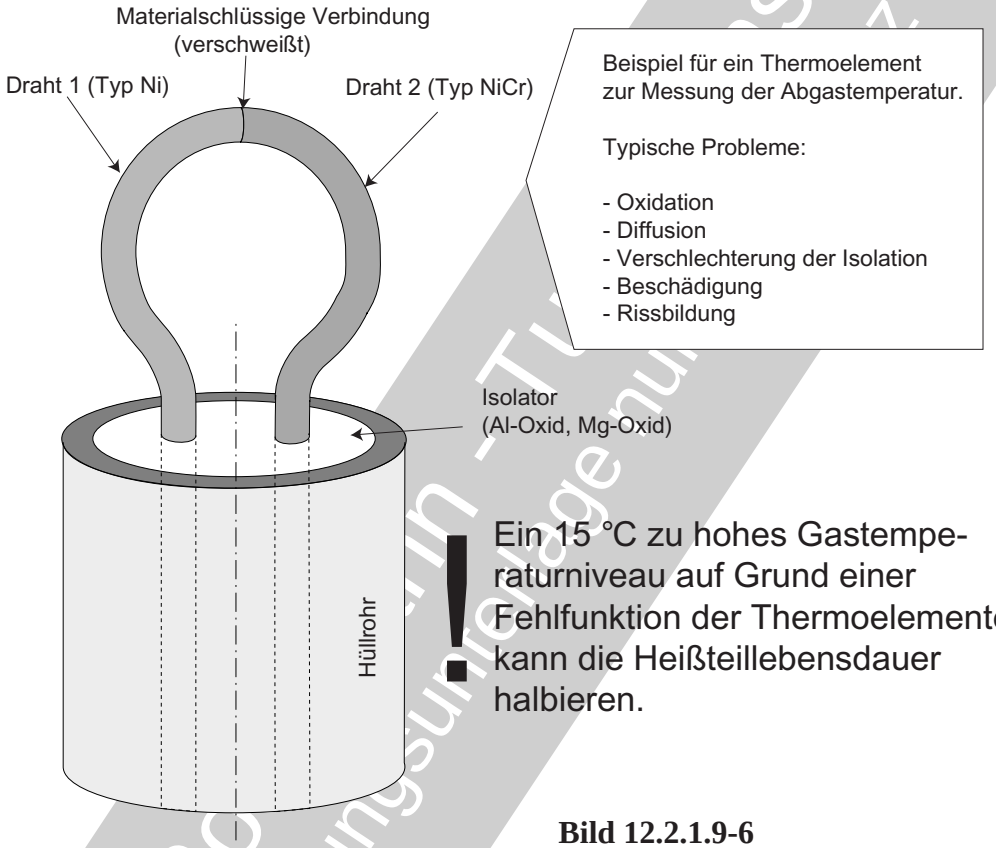
*„**B1**“ **Gase** als Kühlmedium: Weil die Kühlwirkung des Gases entscheidend von der **Strömungsgeschwindigkeit an der Werkstückoberfläche** abhängt, können für die erforderliche Abkühlrate geeignete **Führungen**/Leitbleche notwendig werden. Diese muss gegebenenfalls der Konstrukteur vorsehen und eine Erprobung veranlassen.*

*„**B2**“ **Flüssigkeiten** als Kühlmedium haben grundsätzlich eine weitaus stärkere **Kühlwirkung** als Gase (Bild 12.2.1.9-8). Das ist Vorteil und Nachteil. Besonders problematisch sind örtlich ablösende oder anhaftende **Dampfblasen**. Sie lassen die Wärmeübergänge extrem schwanken. Kommt es zur typischen **plötzlichen großflächigen Dampfblasenablösung**, hier am Extrembeispiel einer Kugel dargestellt, ist mit schockartigen 'Abkühlungsstößen' zu rechnen. Es ist auch darauf zu achten, dass sich nicht **Dampfblasen in Ecken und Hohlräumen** zu Polstern vereinigen. Sie sind in der Lage, die Abkühlung örtlich stark zu verlangsamen. Im Extremfall ist bei der Expansion eines großen Dampfpolsters ein 'Katapultieren' des Teils aus dem Bad denkbar. Das kann zu gefährlichen Situationen führen.*

© Axel Rossmann - Turbomotut
Lehrgangsunterlage Maintenance

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Wärmebehandlung

Schäden an Thermoelementen machen sich gewöhnlich an Heißteilen erst nach längeren Zeiten bemerkbar, dann aber sehr kostspielig.



! Ein 15 °C zu hohes Gastemperaturniveau auf Grund einer Fehlfunktion der Thermoelemente kann die Heißteillebensdauer halbieren.

Bild 12.2.1.9-6

Bild 12.2.1.9-6 *(Lit 19.2.1.9-23 und Lit.. 12.2.1.9-24):* ***Thermoelemente*** *werden in Triebwerken nicht nur zur Messung von Heißgastemperaturen verwendet (Lit. 12.2.1.9-24). Weitere Anwendungsbeispiele sind*
- Öl- und Kraftstofftemperaturen,
- Ansaugluftemperatur,
- Temperatur in den Verdichtern.

Es gibt mehrere Bauweisen, um die Zuverlässigkeit über lange Betriebszeiten zu gewährleisten. Üblicherweise wird im Heißteilbereich die Metallkombination Nickel („Alumel“) / Chrom Nickel („Chromel“) verwendet. Deren Anwendungstemperatur liegt in der Industrie bei maximal 1200°C (Lit. 12.2.1.9-24).

Thermoelemente können von ***Betriebseinflüssen mehrfach geschädigt*** *werden:*

Ein geschädigtes Thermoelement lässt immer einen Abfall der Thermospannung erwarten. Dies bedeutet, dass ***eine zu niedrige Temperatur angezeigt wird****. Für Triebwerke kann das bedeuten, dass die Temperatur vom Regler, oder bei älteren Triebwerken vom Piloten, höher angewählt wird und so* ***Langzeit-Überhitzungsschäden*** *auftreten können. In den meisten Fällen ist die Fügestelle (engl. hot junction) sichtbar verändert. 15°C erhöhte Bauteiltemperatur kann die Kriechlebensdauer halbieren!*
Erfahrungsgemäß sind die häufigsten Probleme an der ***Fügestelle des Sensors*** *und an den anschließenden Verbindungen zu den Leitungsdrähten zu finden.*
Bereits bei visueller Prüfung, gegebenenfalls unter dem Binokular, lassen sich Schädigungen erkennen. Typisch sind ***Rissbildung*** *mit*

Verfärbungen *(z.B. grün) und Pustelbildung (Anschwellungen). In einigen Fällen kann das Metall deutlich aberodiert sein. Dies ist gewöhnlich im Zusammenhang mit Korrosion/ Oxidation zu sehen. Eine Reparatur ist in diesen Fällen nicht möglich.*
Ein Schadensmechanismus ist die *Diffusion von Verunreinigungen im Heißgas und/oder eine Reaktion (z.B. Heißgaskorrosion) mit den* ***Elementdrähten****. Beispielsweise kann verstärkte Oxidation Legierungsbestandteile bevorzugen und so die Drahtzusammensetzung verändern. Auch eine* ***Diffusion von Verunreinigungen*** *(Fe, Si) aus der isolierenden Keramik in die Drähte und im Bereich der Verbindung (Schweißung) zwischen den Elementwerkstoffen ist möglich.*

Bruch der Drähte *kann auf eine Querschnittsschwächung (Heißgaskorrosion/Sulfidation, Oxidation, Erosion), Überlastung durch Fremdkörpereinwirkung und/oder Versprödung beruhen. Diffundieren Elemente wie Aluminium (Anstreifschichten im Verdichter) oder Silizium (Staub) ein, kann das derartig versprödend wirken, dass Risse entstehen. Auch ein Fremdkörper kann den Bruch eines Drahts auslösen.*

Verschlechterter Isolator: *An einem älteren Triebwerkstyp wurden* ***dünne Metallbrücken im Isolator*** *(Mg-Oxid?) beobachtet. Möglicherweise bildeten sie sich bei einer fälschlicherweise deutlich zu hohen Kalibrierungstemperatur bei einer Überprüfung. Leider ist die Ursache dieses Phänomens nicht befriedigend geklärt.*

Kurzschluss im Thermoelement oder dessen Drähten. *Am Bruch im Thermoelement* ***entsteht ebenfalls ein Thermoelement,*** *das nun ein Signal entsprechend der hier herrschenden Temperatur erzeugt. Ursachen für Kurzschlüsse im Element selber sind gewöhnlich*
- ein zerbrochener keramischer Isolator,
- Metall im Schutzrohr und
- eine gerissene Verbindungsstelle.
In den Drähten handelt es sich meist um eine ungeschützte, eingeklemmte Stelle.
Hat sich der poröse Isolator mit ***Feuchtigkeit*** *vollgesogen, kann sich die Isolationswirkung deutlich verschlechtern.*

Schädigung des Schutzrohrs*: Undichtigkeit ermöglicht den Zutritt von Heißgas oder anderen Verunreinigungen zum Elementinneren. In einem solchen Fall ist mit* ***Pustelbildung*** *und* ***ungewöhnlichen Verfärbungen*** *zu rechnen.*

Bild 12.2.1.9-7*: Eine Wärmebehandlung hat meist auch das Potenzial, die Schwingfestigkeit des Werkstücks zu beeinflussen. Auch deren Abfall ist möglich und sollte vermieden werden. Er wirkt sich überproportional verkürzend auf die Betriebszeit/ertragbare Zyklenzahl aus! Ein solcher unerwünschter Effekt (Bild 12.2.1.9-2.1 „****H****“) tritt mit einer Kornvergröberung ein (Diagramm oben links, Lit. 12.2.1.8-20.). Gerade bei dynamisch hochbelasteten Bauteilen wie den biegebelasteten* ***einsatzgehärteten Getriebezähnen*** *ist mit einem Schwingfestigkeitsabfall bis zu 25 % zu rechnen.*
Noch krasser ist die Auswirkung bei ***torsionsbeanspruchten Wellen.*** *Hier ist ein Schwingfestigkeitsabfall in der Nähe der Dauerfestigkeit bis zu 45 % möglich (Diagramm oben rechts). Im Zeitfestigkeitsbereich (LCF) ist dieser Effekt kaum vorhanden.*
Interessant ist auch, dass sich bei Einsatzhärtung die Korngröße auf die Lage der Anrissbildung zur Oberfläche auswirkt (Dia-

© Axel Rossmann - Turbocon Suit
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Wärmebehandlung

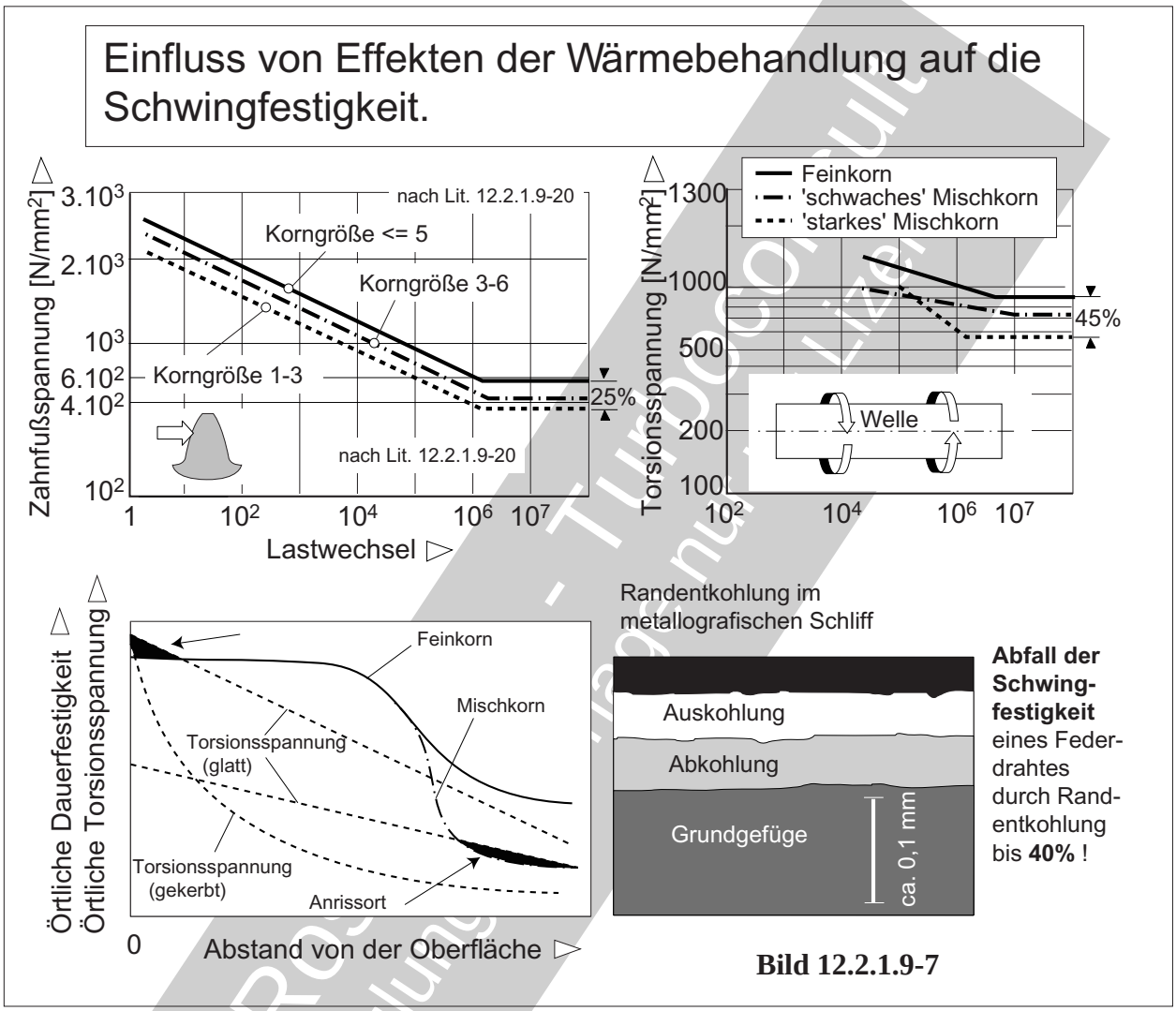


Bild 12.2.1.9-7

*gramm unten links). Im Bereich der Dauerfestigkeit erfolgt bei Torsionsbeanspruchung einer **glatten Oberfläche und Feinkorn** der Anriss an der Oberfläche der Einsatzhärtung. Liegt **Mischkorn** vor, beginnt der Anriss deutlich unter der Oberfläche. Dies steht auch im Zusammenhang mit einer **ausgeprägteren Mischkörnigkeit in der Übergangszone** . Deshalb sollte hier die **Korngrößenbestimmung** erfolgen.*

***Randentkohlung** (Skizze unten rechts) tritt **bei allen Wärmebehandlungen** bei **oxidierenden, ungeschützten Oberflächen** auf. Leider war es nicht möglich, in der Literatur belastbare Angaben zum Einfluss der Randentkohlung auf die Schwingfestigkeit im Vergleich mit dem nichtentkohlten Zustand zu finden. Dies ist um so verwunderlicher, weil überall auf einen signifikanten **Abfall der Schwingfestigkeit** bei Randentkohlung hingewiesen wird. Dieser Effekt nimmt mit der Festigkeit/Härte des Werkstoffs zu. Er ist bei **Federn/Federstählen besonders groß** (Lit. 12.2.1.9-21). Aus diesem Grund wird hier lediglich eine pauschale Angabe gemacht. Dagegen wird im Zusammenhang mit **Kugelstrahlen** auf die Anhebung der Schwingfestigkeit randentkohlter Bauteile verwiesen.*

***Bild 12.2.1.9-8**:Lit. 12.2.1.9-19) Die allein der Wärmezu- und -abfuhr sowie dem Werkstückschutz dienende **Wärmebehandlungsatmosphäre** (Tabelle oben) wird prozessspezifisch ausgewählt. Als **Schutz**(gas)**atmosphäre** kommen Schutzgase wie Edelgase und Wasserstoff in Betracht. Auch ein **Vakuum** lässt sich hier einordnen. Wichtig ist die Einhaltung der geforderten **Mindestreinheit,** um Schädigungen wie Oxidation, werkstoffverändernde Reaktionen oder Diffusionen zu vermeiden.*

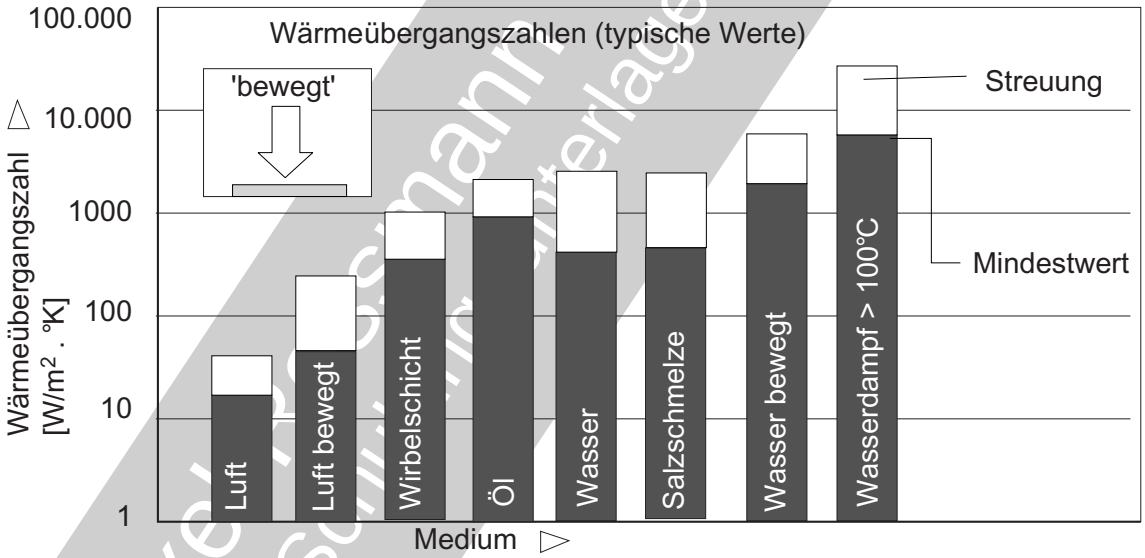
*Um geforderte **Gefüge** mit deren **Festigkeitsmerkmalen** zu erreichen, bedarf es **Mindestabkühlgeschwindigkeiten**. Sie richten sich nach der erzielbaren **Wärmeübergangszahl** (Balkendiagramm). Diese unterscheidet sich für die **Medien** und deren **Aufbringungsart** um vier Zehnerpotenzen. Interessant ist die extreme Abkühlung durch **Wasserdampf**. Trotzdem scheinen Sicherheitsaspekte diese Möglichkeit weitgehend auszuschließen. Es müsste sich für jede Aufgabe eine Lösung finden, wenn die **Abkühlgeschwindigkeit nicht zu hoch ist**. So lässt sich **das Risiko einer Rissbildung** minimieren. Über Fehlerursachen und Abhilfen gibt Bild 12.2.1.9-9 Auskunft.*

*Man unterscheidet zwei Abkühlvorgänge. **Selbstabkühlung** bei der eine ausreichend große Bauteilmasse die Wärme aus der **Randschicht** nach innen ableitet. **Fremdabkühlung**/ Abschreckung führt dagegen die Wärme aus der Oberfläche nach außen ab. Verfahren des **Randschichthärtens** wie Flamm- und Induktionshärten verwenden gewöhnlich **Fremdabschrecken**. Dabei nutzt man Wasser. Mit wässrigen **Polymerlösungen** als aufgesprühtes Abschreckmittel lässt sich das **Rissrisiko mindern** (Lit. 12.2.1.9-19). Beim Auftreffen bildet sich auf dem heißen Werkstück ein dünner **Kunststofffilm,** der auch kleine Dampfnester verhindert. **Filmsieden geht dann nahezu schlagartig in Blasensieden über**. Diese Kühlung sorgt für eine **gleichmäßige Wärmeabgabe in der Abkühlphase am gesamten Werkstück**.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Wärmebehandlung

Wärmebehandlungsatmosphäre			
Nutzraum-atmosphäre	Anwendung für	Reinheit {%]	Taupunkt [°C]
Schutzgas: Argon, Helium, Wasserstoff	Stähle, Nickel- und Kobaltlegierungen	99,99	<= minus 37
Schutzgas: Argon, Helium	Titanlegierungen	99,99	<= minus 50
		Arbeitsdruck [mPa , 10^2 mbar]	Leckrate [Pa/h, 10^{-2} Pa/h
Vakuum	Stähle, Nickel- und Kobaltlegierungen	<=130 mPa	<= 2 Pa/h
Vakuum	Titanlegierungen Temp > 600°C	<=10 mPa	<= 0,1 Pa/h



Abschreckmittel		
Kühl/Abschreckmittel	Kühlmethode	Anmerkungen
Wasser/Salzwasser	Spritzbrausen Turbulentes Tauchbad	- Wegen Dampfblasen Zuverlässigkeit ? - Legierte Stähle: Rissgefahr. - Korrosionsgefahr
Hochleistungsöle	Turbulentes Tauchbad Spritzbrause (Sonderfall)	- Hochlegierte Stähle: Rissgefahr. - wirkt als Korrosionsschutz
Druckluft	Luftdüsen	- Dünne Bauteile - für rissempfindliche hochlegierte Stähle - Störende Lautstärke.
Druckluft mit Wasseranteil	Spezialdüsen	- kaum Erfahrung

nach Lit. 12.2.1.2-19

Bild 12.2.1.9-8

© Axel Bossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

***Bild 12.2.1.9-9**: Lit. 12.2.1.9-19) Beim **Randschichthärten** (Flammhärten, Induktionshärten) können unterschiedliche **Fehler** mit spezifischen **Ursachen** auftreten. Die Tabelle gibt dazu einen Überblick.*

*Für den Konstrukteur ist die Gestaltung des **Auslaufs einer Randschichthärtung** bedeutsam für ein sicheres Betriebsverhalten. Dabei muss es klar sein, dass der **Auslauf einer Randschichthärtung** aus mehrfacher Sicht eine **Kerbe** darstellt. Das gilt selbst dann, wenn sie nicht in einer Formkerbe des Bauteils liegt (Band 1 Bild 5.4.4-1). Für das Ende der Härtezone sind Kerbwirkungen zu bedenken:*

- ***Gefügekerbe** durch Übergang von Härtegefüge zum ungehärteten Grundwerkstoff.*
- ***Festigkeitskerbe** durch Härtesprünge.*
- ***Eigenspannungsunterschiede**.*
- ***Zähigkeitskerbe** zum Grundwerkstoff.*

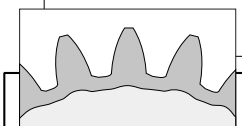
*Es ist also besonders bei **Schwingbeanspruchung** und **Überlastungsgefahr im plastischen Bereich** (Stoßüberlastungen) notwendig, den Härteübergang günstig zu einer vorhandenen Formkerbe anzuordnen. Das Schaubild unten gibt dazu Gestaltungshinweise.*

© Axel Rossmann - Turbosoft
als Schulungsunterlage im Netz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Wärmebehandlung

Ursachen für Fehler randschichtgehärteter Bauteile.

nach Lit. 12.2.1.9-19



Zahnrad nach der Flammhärtung

Fehler	werkstoffbedingt	verfahrensbedingt
Härte zu niedrig	- Ferrit nicht umgewandelt - nicht genügend Karbide aufgelöst	"A1", "B1"
	zu geringer Martensitanteil	"A1", "B1", "E"
	Restaustenit	"A2", "B2", "F"
	zu weicher Martensit	"H", "C1", "D2"
Härte zu hoch	Martensit zu hart	"C2", "D1"
Zu geringe Einhärtungstiefe	zu wenig Martensit	"A1", "B1", "G1"
Zu große Einhärtungstiefe	zu viel Martensit in tieferer Lage	"C2", "D1", "G2"
Maß- und Formabweichung	Spannungen (Wärme, Umwandlung)	"K1", "K3", "K4", "D1"
Risse	Zugeigenspannungen zu hoch	"K1", "K2", "K3", "K4", "K5"
Anschmelzungen	Temperatur zu hoch	"L1", "L2", "L3

"**A1**" = zu kurze Austenitisierung, "**A2**" = zu lange Austenitisierung, "**B1**" = zu niedrige Austenitisierungstemperatur, "**B2**" = zu hohe Austenitisierungstemperatur, "**C1**" = zu hohe Anlasstemperatur, "**C2**" = zu niedrige Anlasstemperatur, "**D1**" zu kurz angelassen." "**D2**" zu lang angelassen."**E**" = zu schwache Abschreckwirkung, "**F**" = Tiefkühlung mangelhaft, "**G1**" = zu geringe Einwärmtiefe, "**G2**" = zu große Einwärmtiefe,"**H**" = Entkohlung, "**K1**" = ungleichmäßig erwärmt, "**K2**" = zu schnelll erwärmt, "**K3**" = ungleichmäßig austenitisiert, "**K4**" = ungleichmäßige Abschreckung, "**K5**" = zu schroffe Abschreckung, "**L1**" Überhitzt, "**L2**" =Leistungsdichte zu hoch, "**L3**" = Heizungsphase zu lang

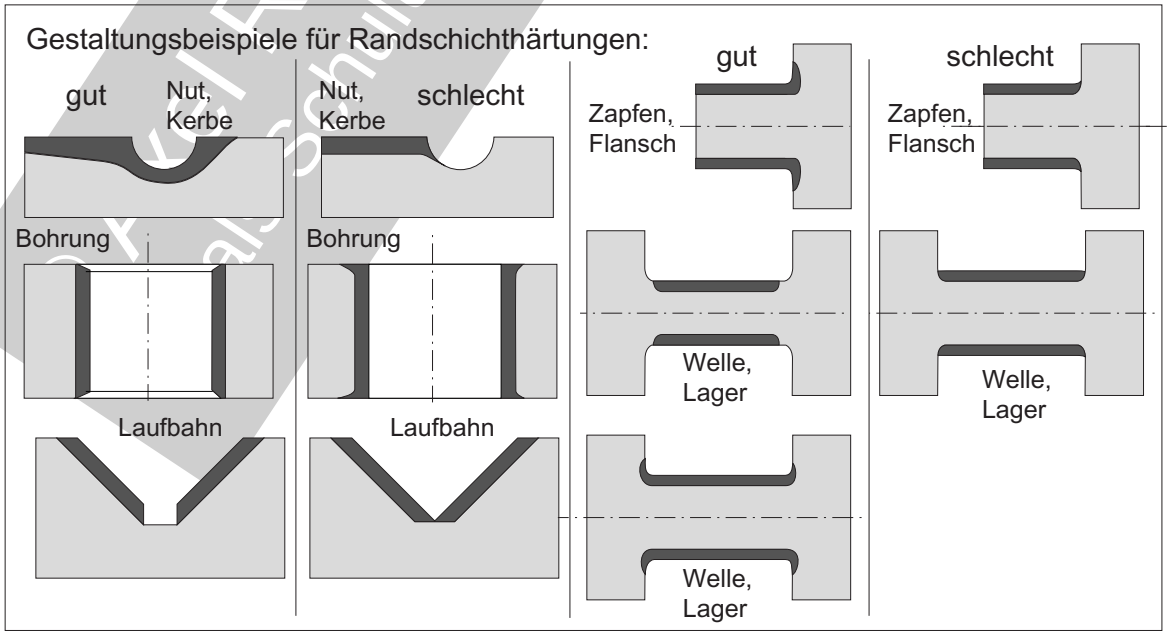


Bild 12.2.1.9-9

Literatur zu Kapitel 12.2.1.9

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.9-1 ASM „Metals Handbook Ninth Edition“, „Volume 11- Failure Analysis and Prevention“, ISBN 0-87170-007-7, 1986; G.F.Vander, „Failures of Tools and dies“, Seite 563-585

12.2.1.9-2 ASM „Metals Handbook Ninth Edition“, „Volume 4- Heat Treating“, ISBN 0-87170-379-3, 1991; T.Ericsson, „Principles of Heat Treating of Steels“, Seite 3-19.

12.2.1.9-3 „Wärmebehandlung“, Stand Dez.2011, http://de.wikipedia.org/wiki/, Seite 1-3.

12.2.1.9-4 H.Jöst, P.Mecke, K.Schneider, „Metallografische und mikrofraktografische Untersuchungen von Härterissen in X 22 CrMoV 12 1“, Beitrag zur Tagung „Bruchuntersuchung und Schadenklärung - Probleme bei Eisenwerkstoffen“ des ‘Allianz-Zentrum für Technik, 20./21. November 1975, Ismaning bei München, Seite 114-118.

12.2.1.9-5 E.Macherauch, H.Müller, O.Vöhringer, „Härterisse - ihre Erscheinung und möglichen Ursachen“, Beitrag zur Tagung „Bruchuntersuchung und Schadenklärung - Probleme bei Eisenwerkstoffen“ des ‘Allianz-Zentrum für Technik, 20./21. November 1975, Ismaning bei München, Seite 119-130.

12.2.1.9-6 H.Klingele, „Rasterelektronische Untersuchungen von Metallschäden“, 1974 Gerling Institut für Schadenforschung und Schadenverhütung GmbH Köln, ISBN 3-9800043-0-9, Seiten 142, 152, 199, 200.

12.2.1.9-7 G.Niemann, H.Winter, B.-R.Höhn, „Maschinenelemente - Band 1“, 4. Auflage, 2005, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-25125-1, Seite 191-201.

12.2.1.9-8 G.Niemann, H.Winter, „Maschinenelemente - Band 2“, 2. Auflage, 2003, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-11149-2, Seite 178- 204.

12.2.1.9-9 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuserverlag Basel Boston Berlin, 1998, ISBN 3-7643- 5971-4, Seite 42-45.

12.2.1.9-10 H.Cerjak, „Härtbarkeit und Aushärtung - 3.4 Wärmebehandlung von Stahl“, Werkstoffkunde Laborübung (303. 004), home.arcor.de/thiessen-berlin/WB%20von20%Stahl.üdf, Seiten 3-17 bis 3-26.

12.2.1.9-11 „14 Auswirkungen von Wärmebehandlungen“, www.ifw-dresden/institutes/imw/lectures/pwe/.../C14auswirk.pdf, , Seiten 223 - 233.

12.2.1.9-12 „Ausscheidungshärtung“, http://de,wikipedia.org/wiki/Auscheidungsh%C3%A4rtung, Stand Juli 2012, Seiten 1-3.

12.2.1.9-13 „Grobkornglühen“, http://de,wikipedia.org/wiki/Grobkorngl%C3%BChen, Stand 25. Aug. 2011, 1 Seite.

12.2.1.9-14 „Praxis - Service, Erfolgreiche Edelstahlverarbeitung“, Firmenangaben ‘Böhlerstahl’, www.rubig.com, upload/content/haertetechnik/.../praxisservice.pdf, Seite 15.

12.2.1.9-15 „AMS 2750 D, NADCAP, CQI-9“, Firmenangaben ‘Nabertherm’, www.nabertherm.de/produkte/...1-ams/1-ams_deutsch.pdf, Seite 65-66.

12.2.1.9-16 H.Falk, „Massenspektrometer-Sonde zur in-situ-Beobachtung von Oberflächenreaktionen an Stahloberflächen“, Vortrag 2010 auf dern RFA Fu-OES Dortmund, www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/zuv/.../aktuell.pdf, 19 Folien.

12.2.1.9-17 T.Berrenberg, „Schutzgasanwendungen in der Ofentechnik“, FFa. ‘WSP Aachen, www.itp-aachen.de/.../VDI_Wissenf_WSP_TB_Schutzg_Pp.Pd, Seite 1-11.

12.2.1.9-18 G.Lange (Hsg.), „Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle“, 5. Auflage, 2008, Verlag ‘Wiley-VCH, ISBN 978-3-527-30417-2, Seite 203, 204, 344, 357, 146.

12.2.1.9-19 D.Liedtke, H.Stiele, „Wärmebehandlung von Stahl-Randschichthärten“, Merkblatt 236, Ausgabe 2009, ISSN 0175-2006, Stahl-Informations-Zentrum, www.stahl-info.de/.../MB236_Waermebehandlung_von_Stahl_..., Seite 31-37.

12.2.1.9-20 St.Hock, J.Kleff, M.Schulz, A.Sollich, D.Wiedmann, „Einfluss von Umform- und Wärmebehandlungsfolgen auf Korngröße und Schwingfestigkeit von einsatzgehärteten Bauteilen“, Vortrag Härterei Kolloquium 1997 in Wiesbaden, www.zf.com/mesia.../Einfluss_Hock_HTM_1999, 7 Seiten.

12.2.1.9-21 B.Kaiser, „The Effect of Shot Peening on the Fatigue Strength of Spring Elements“, Zeitschrift ‘Springs’ October 1987, www.shotpeener.com/library/pdf/1987167pdf, Seite 59 - 65.

12.2.1.9-22 J. Grosch, „Schadenskunde im Maschinenbau“, Expert Verlag, Band 308, Kontakt&Studium, Maschinenbau, 2. Auflage, ISBN 3-8169-1202-8, 1995, Seite 37 und 38.

12.2.1.9-23 Technical Information Nr. 1110-PD-001-0-00, „Identifying and Correcting Temperature Control Problems“, Fa. Barber-Colman Co., Seite 8-2 bis 8-12.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

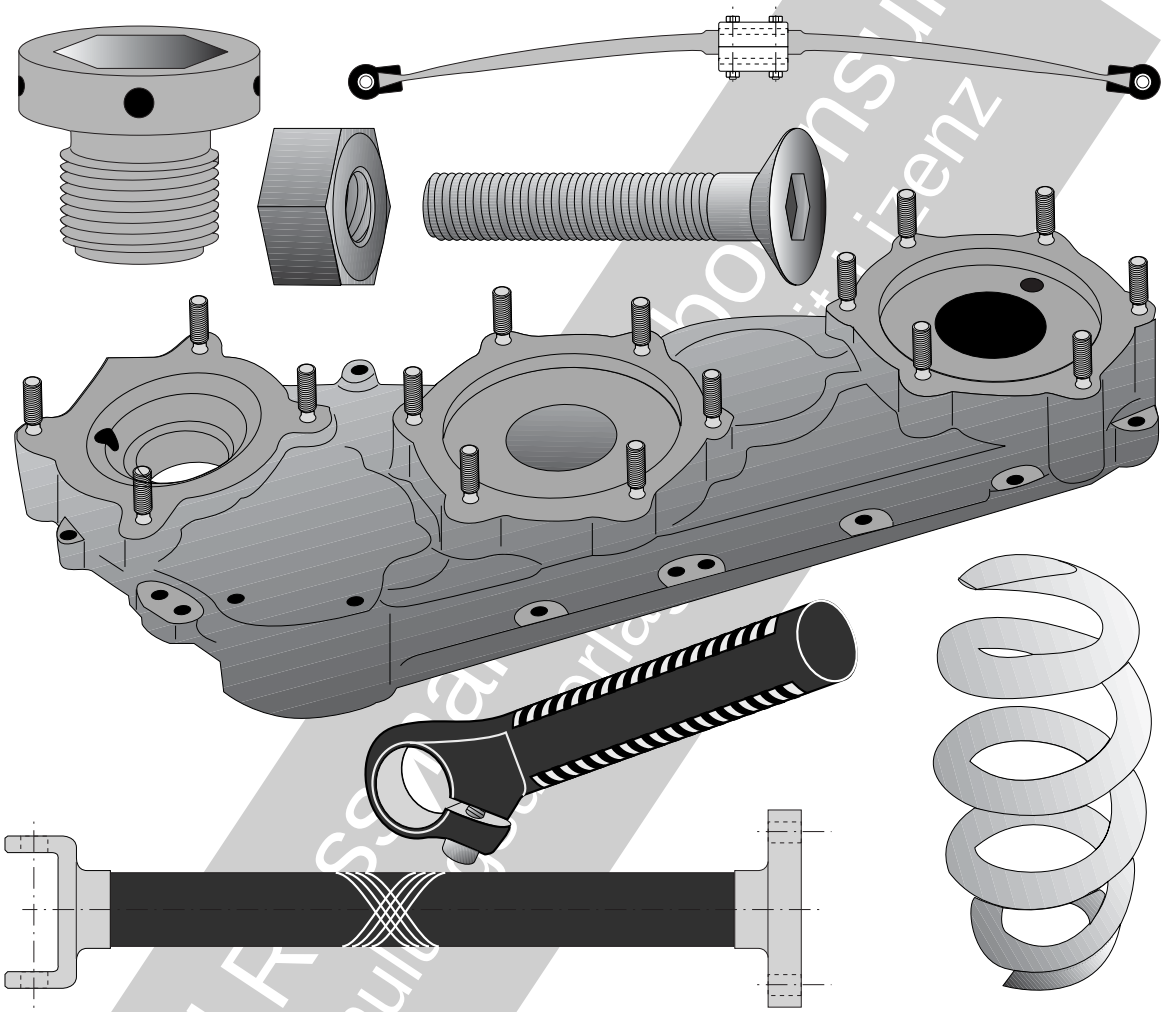
12.2.1.9-24 Firmenprospekt, Rosemount, „ Thermoelemente für Hochtemperaturen“, Produktdatenblatt 00813-0405-2654, Rev. 2. September 2002, Seite 1-10.

12.2.1.9-25 R.Jonck, „ Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften im Bauteil durch die Fertigung“, VDI-Gesellschaft für Werkstofftechnik, 1981/82, Seite 27-36.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

12.2.1.10 Fasertechnik.



Dieses Kapitel soll sich im Schwerpunkt mit **Maschinenelementen in Fasertechnik** beschäftigen. Kennzeichnend sind komplexe Geometrie mit Wanddickenunterschieden und Querschnittssprüngen, Hybridkonstruktionen, häufig mit Metallstrukturen zur Kraftübertragung oder als Schutz (z.B. gegen Erosion). Flächige Anwendungen wie Karosserieteile von Kraftfahrzeugen oder Zellenteile von Flugzeugen stehen hier nicht im Zentrum der Betrachtungen.

Das besondere an der Fasertechnik ist, dass die gewünschten Werkstoffeigenschaften erst bei der formgebenden Fertigung entstehen. In hochfesten Bauteilen sind diese gewöhnlich orientiert. Das ist vom Konstrukteur bereits bei der **Gestaltung** und den **Krafteinleitungen** zu berücksichtigen. In vielen Fällen ist eine Kombination mit metallischen Beschlägen oder Einsätzen, z.B. bei hohen Flächenpressungen (Bild 12.2.1.10-5), erforderlich. Eine besondere Herausforderung.

Dem Konstrukteur stehen heute eine große Zahl von **Verfahren** mit spezifischen Vor- und Nachteilen zur Verfügung. Diese Verfahren werden an Hand typischer Anwendungsbeispiele aufgezeigt. Sie werden von unterschiedlichen Halbzeugen (Bild 12.2.1.10-2) bzw. Harze/Matrices und Verstärkungsfasern, die auch kombiniert werden können, gebildet. Die Fasern werden entspr. ihrer Länge wie folgt eingeteilt: Kurzfaser 0,1-1 mm, Langfaser 1-50 mm, Endlosfaser > 50 mm.

Vorteile fasertechnischer Bauteile gegenüber metallischen sind:
- **Geringes Gewicht.**
- **Hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit** (bezogen auf die Dichte)
- **Isolierende Wirkung** gegen **Wärme** und/oder **elektrische Ströme** (bei C-Fasern nicht immer gültig).
- **Korrosionsfest** und **chemisch beständig**, z.B. weitgehend resistent gegen viele Hilfsmedien.
- **Schwingungdämpfend**.
- **Ermüdungsverhalten mit Fail Save-Charakteristik**. Keine Rissbildung mit direkter Bruchgefahr wie bei Metallen.
- **Nicht kerbempfindlich**.
- **Kein Kaltverschweißen** (Fressen), meist gutes Gleitverhalten.
- **Schalldämpfend**. z.B. geringe Schallabstrahlung bei Getrieben (Bild 12.2.1.10-9.1).

Es gibt jedoch auch **Nachteile** gegenüber metallischen Werkstoffen:
- **Anisotropes Verhalten**. Ungünstig bei mehrachsiger Belastung.
- Nur **niedrige Fläschenpressung** zulässig.
- **Lange Taktzyklen** und hohe **Produktionskosten**. Häufig hoher Handarbeitsanteil.
- Notwendige **Erfahrung** und **Geschick**.
- **Elektrisch isolierend** (z.B.Gefahr bei Blitzschlag).
- Geringe **Temperaturstabilität**.
- **Reparierbarkeit** kann problematisch sein, z.B. bei Delamination.
- **Eigenschaftsveränderung** (reversibel) unter Betriebseinflüssen (Temperatur, Feuchtigkeit).
- Empfindlich gegen **Partikel-** und **Tropfenerosion**.
- Geringere Energieaufnahme bei Schlagbeanspruchung (z.B. Vogelschlag).
- Ungeschützt **Schädigung durch intensive Strahlung** (z.B. UV-Strahlung).
- **Quellen** in spezifischen Medien, z.B. in Wasser.
- **Recycling** mit Wiederverwendung problematisch.

Bild 12.2.1.10-1 *(Lit. 12.2.1.10-1, Lit. 12.2.1.10-3, Lit. 12.2.1.10-4 und Lit. 12.2.1.10-6): Gewöhnlich muss das* ***Fertigungsverfahren*** *entsprechend den Anforderungen des Werkstücks gewählt werden. Dabei spielt neben den spezifischen Materialeigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit die geeignete rationelle Fertigung eine wichtige Rolle (Diagramm oben). Dazu ist die enge Zusammenarbeit der Bauteilauslegung und Konstruktion mit der Fertigung (Anlagen, Vorrichtungen, Halbzeug) erforderlich. Beide sollten jeweils vom Gebiet des Anderen Sachkenntnis besitzen.*
Im Folgenden werden für den Maschinenbau wichtige Verfahren beschrieben.
*„**A**“* ***Aufspritzen eines Langfaser-Harzgemischs****: Verwendet werden Glas-Langfasern denen das Duroplast Polyester zugesprüht wird. Dieses Verfahren wird für großflächige dünnwandige Bauteile verwendet. Die Kompaktierung der Masse erfolgt in Handarbeit mit Rollern.*
*„**B**“* ***Wickelverfahren*** *dient zur Herstellung hochfester Bauteile (z.B. Druckbehälter bis 700 bar, Torsionswellen, Bild 12.2.1.10-6). Es ist für vollautomatischen Großserieneinsatz geeignet. Der Kern/Wickeldorn muss bauteilspezifische Eigenschaften aufweisen. Dazu gehört die* ***Ausformbarkeit*** *(z.B. geteilt, ausschmelzbar), wenn der Kern nicht als Diffusionssperre oder Medienschutz im Bauteil verbleibt. Darauf wird ein* ***harzgetränkter Faserstrang*** *(Rowing) entsprechend den Betriebsbelastungen orientiert gewickelt. Die Verfahrensparameter Wickelwinkel und Wickelkraft sind bauteilspezifisch und gegebenenfalls nach*

Fortsetzung Seite 12.2.1.10-4

© Alfred Rossmann - Eurocorsult
Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

Fasertechnische Fertigungsverfahren, Vorteile und Schwächen.

Verfahrensspezifische Eignung von Herstellungskonzepten

Verfahren	Manufaktur	Manufaktur teilautomatisch	Vollautomatisierte Fertigungszellen	Voll verkettete Fertigungslinie
Prepreg Ablegen				
Vakuum Infusion				
Handlaminieren				
Imprägnierte Fasern Ablegen(D)				
Form-/ Fließpressen (E)				
Harzübertragung (RTM, F)				
Pultrusion (C)				
Wickeln (B)				

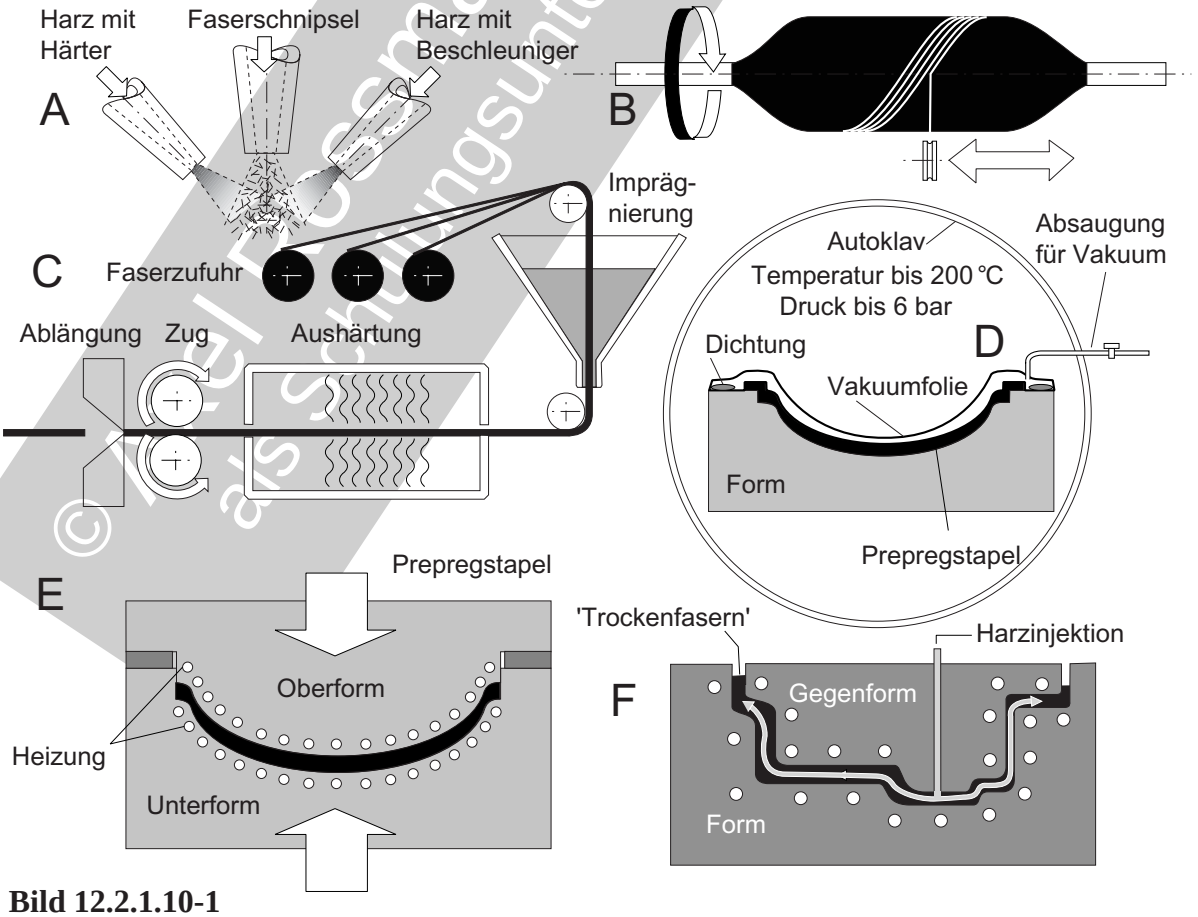


Bild 12.2.1.10-1

© Axel Roesmann Turboconsult als Schulungsunterlagen mit Lizenz

Fortsetzung von Seite 12.2.1.10-2

einer Optimierung festzuschreiben. Die Wickelbewegung kann mit Hilfe von Robotern auch bei komplexeren Geometrien (mit örtlich rotationssymetrischem Querschnitt) realisiert werden (Lit. 12.2.1.10-3). Als Matrix lassen sich Duroplaste (Tränkbad) oder Thermoplaste (Heizung erforderlich) verwenden.

„C“ ***Pultrusion*** *(Strangziehen) ermöglicht mit einer Faserorientierung in Herstellungsrichtung hochfeste Bauteile mit komplexen Querschnittsgeometrien (Bild 12.2.1.10-5). Sie entstehen automatisch und in großer Zahl. Abhängig vom Halbzeug, z.B. als Gewebeschlauch oder durch nachträgliches Umwickeln (Bild 12.2.1.10-5), lässt sich auch die* ***Querfestigkeit*** *optimieren. Das Halbzeug (Rowing, Gewebe) wird durch ein Duroplast-Tränkbad gezogen oder mit Thermoplast vorimprägniert. Die* ***Aushärtung*** *des* ***Duroplasts*** *erfolgt in einem Durchlaufofen vor der Ablängung. Halbzeuge aus* ***Thermoplast*** *lassen sich anschließend in geheizten Formen weiterverarbeiten.*

„D“ ***Prepregverarbeitung*** *(Autoklaven-Verfahren): Das Zuschneiden und Auflegen der vorgetränkten Faserlagen (Prepregs) sowie Anbringen einer Vakuum-/Druckdichtung kann zeitaufwändig (lange Taktzeiten) arbeitsintensiv sein. Je nach Querschnittsdicke werden die Prepreglagen wiederholt mit einer Folie vakuumdicht abgedeckt und evakuiert. In diesen Zwischenschritten wird der Prepregstapel verdichtet, um Lufteinschlüsse oder vom Auflegen verbliebene Trennstellen zu vermeiden. Erforderlich sind* ***Geschick und Erfahrung****. Dabei spielt die Gestaltung der Formen für ein gutes Ergebnis eine wichtige Rolle (Bild 12.2.1.10-15). Im Autoklaven erfolgt bei harzabhängigen Temperaturen zwischen 120 °C und 180°C und Drücken bis 6 bar (Luft) die Aushärtung. So lassen sich bei hohem Faseranteil bis 60 % und exzellenter Qualität hochfeste Bauteile herstellen (Bild 12.2.1.10-7.1).*

„E“ ***Nasspresstechnik****: Dient zur Herstellung eher flächiger Bauteile, jedoch durchaus mit einer versteifenden Formgebung (z.B. Tankdeckel). In die beheizte Form werden* ***trockene Faserlagen*** *entsprechend den Bauteilanforderungen (Gewebe, Gelege, Vorformlinge) positioniert. Solche Fasereinlagen lassen sich im Ganzen* ***vorkonfektionieren****. So entfällt weitgehend die Handarbeit für das Einlegen. Das macht auch große Stückzahlen realisierbar. Dann wird eine optimierte Harzmenge zugegeben und die Form mit festgelegter Geschwindigkeit geschlossen. Das vermeidet eine Beschädigung der Faserlagen durch den entstehenden Harzstrom. Die Werkzeugtemperatur liegt harzspezifisch zwischen 90°C und 140°C bei einem Pressdruck am Bauteil von 5 - 25 bar .*

„F“ ***Harzinjektionsverfahren*** *(Resign Transfer Moulding = RTM): Besonders die RTM-Variante hat sich heute für die Herstellung* ***hochfester, komplex geformter Bauteile*** *wie sie für Maschinenelemente typisch sind durchgesetzt. Es umfasst einen weiten Bereich der Fertigung bis zur automatisierten Großserie (Bild 12.2.1.10-11). Bei dem Verfahren werden* ***Trockengelege****, vorzugsweise vorkonfektioniert, in die geöffnete Form gelegt. Nach dem Schließen erfolgt gewöhnlich eine Evakuierung, was eine geeignete Dichtung der Formauflagen erfordert. Dann wird das Harz aus einem Vorratsbehälter in die beheizte Form gesaugt/gedrückt. Dieser Vorgang wird gestoppt, wenn genügend Harz aus der Absaugöffnung getreten ist bevor diese geschlossen wird. Die* ***Herausforderung für Konstruktion und Fertigung ist eine gleichmässige vollständige Harzfüllung*** *der Form.bzw. des Fasergeleges (Bild 12.2.1.10-12). Wird hochreaktives Harz eingespritzt spricht man von* ***Resin Injection Moulding*** *(=RIM). RIM hat deutlich kürzere Zykluszeiten als RTM (Stunden).*

Für dieses Verfahren gilt im Besonderen was für alle Fasertechnik-Verfahren gilt. Ein erstes ***positives Ergebnis in der Entwicklungsphase beweist noch längst nicht die Serientauglichkeit****. Erst wenn eine* ***größere Zahl Bauteile reproduzierbar hergestellt*** *wurde kann eine Serienproduktion ins Auge gefasst werden.*

© Axel Bosemann - Tumgonsk
Ausschnittsunterlagen zur Firma

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

Selbst damit ist erfahrungsgemäß immer noch keine Sicherheit vor Fertigungsproblemen gegeben. In der späten Entwicklungsphase aber auch in der Serienfertigung ist es durchaus möglich, dass ***unverhoffte Probleme*** *auftauchen, die erst zeitaufwändig gelöst werden müssen. Das führt nicht selten zur* ***Vezögerung ganzer Projekte*** *(z.B. Flugzeugbau), die existenzbedrohlich werden können. Erst wenn der Fertigungsprozess mit allen Effekten verstanden ist, lässt sich von einem stabilen Prozess sprechen, der unliebsame Überraschungen minimiert.*

Bild 12.2.1.10-2 *(Lit. 12.2.1.10-1 und Lit. 12.2.1.10-3): Dieses Bild zeigt Tendenzen und Trends, die dem Konstrukteur für* ***Auslegung und Auswahl des Fertigungsverfahrens*** *hilfreich sind. Dabei geht es nicht wie in Bild 12.2.1.10-12 primär um die Seriengröße als Kriterium der Eignung. Bestimmend sind die erzielbaren Bauteileigenschaften in Bezug auf Geometrie, sowie pysikalischem und festigkeitsbezogenem Werkstoffverhalten.*

*„**A**“ und „**B**“* ***Hochfeste Verbundwerkstoffe****: Von Interesse sind nicht in erster Linie Absolutwerte sondern spezifische Werte, die sich auf die Dichte/spez. Gewicht beziehen (Band 1 Bild 3-5).* ***Spezifische Festigkeit*** *(Reißlänge, Band 1 Bild 3-2 und Bild 3-5) und* ***spezifische Steifigkeit*** *stehen im Vordergrund. Verständlicherweise ist die schwerere Glasfaser hier der Kohlefaser unterlegen. Nicht aufgeführt ist die hochfeste organische Faser „**Aramid**“. Sie zeichnet sich durch eine besonders hohe elastische Dehnfähigkeit und Zähigkeit (Bruchdehnung) aus.*

Das hat mehrere Gründe:

*- **Spezifische Festigkeit** wird für niedriges Gewicht genutzt um Massenträgheit zu minimieren (z.B. bei Sportgeräten, Fahrzeugen, Robotern oder in der Raketentechnik). Das lässt sich beispielsweise bei Fahrzeugen zur Minimierung ungefederter Massen nutzen (z.B. Rad/Radaufhängung, Bild 12.2.1.10-5). Ein besonders wichtiges Argument ist eine möglichst geringe Antriebsenergie (Kraftstoffeinsparung).*

- Hohe spezifische Festigkeit ist besonders bei selbstbelasteten Bauteilen wie rotierenden Körpern (Bild 12.2.1.10-7.1) erwünscht.

*- **Spezifische Steifigkeit** soll elastische Verformungen unter Betriebslast begrenzen. Beispiel sind **Getriebegehäuse** (Bild 12.2.1.10-9.2), deren Achsabstände möglichst konstant gehalten werden.*

*- **Schwingermüdung:** Faserverbunde haben Vorteile gegenüber Metallen (Lit. 12.2.1.10-21). Das spielt in der Fasertechnikliteratur eine oft unterschätzte Rolle, wenn man die Bedeutung für Maschinenelemente betrachtet. Entscheidend ist die Faserstruktur. Sie hat zwei Effekte:*

- Hohe Dämpfung durch innere Reibung.

*- Kein schnelles Risswachstum quer zur Belastung. Die Ermüdung erfolgt durch den Bruch einzelner Fasern und Lösung des Verbunds/ Schichten (**Delamination**). Damit steigt die Dämpfung, was zu einem ‘Fail-Save-Verhalten’ führt (Band 1, Bild 4.3-24).*

*In diesem Zusammenhang ist auch die **Schadenstoleranz** zu sehen. Kerben durch Handling oder Betrieb werden, was die Ermüdung anbetrifft, besser toleriert (geringe Kerbwirkung, Band 1 Kapitel 5.4.4). Das gilt jedoch nicht für **statische Druckspannungen wie bei Biegung und Knickung**. Hier ist die Druckseite (!) durch ein spontanes Versagen (Bruch) gefährdet. Dies kann bereits von einem kaum erkennbaren Einschlag/-druck ausgelöst werden (Band 1 Bild 3-12). Solche Schäden sind z.B. von Komponenten der Sportgeräte wie Fahradrahmen oder Segelmasten bekannt.*

Impactverhalten *ist auch im Licht der* ***Schadenstoleranz*** *zu sehen. Dient es der* ***Gefahrenreduzierung*** *wobei das Bauteil zerstört wird, haben fasertechnische Werkstoffe Vorteile. Das lässt sich z.B. beim vogelschlaggefährdeten rotierenden Nasenconus (Spinner) von Flugtriebwerken nutzen (Lit. 12.2.1.10-21). Besonders*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.10-7

©AZ Essenpark - Turbocontent GmbH Abschlussunterlagen mit Lizenz

Was man von 'Fasertechnologie' wissen solte.

nach Angaben aus Lit. 12.2.1.10-1

A Hochfeste Verbundwerkstoffe

erzielbare Eigenschaft	Kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK)		Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)	
	Duroplast	Thermoplast	Duroplast	Thermoplast
Steifigkeit	++	+	0	0
Festigkeit	+	+	+	0
Gewicht	++	+	0	0
Kosten	--	-	-	-
Beispiel (Bildnr.)	12.2.1.10-6, -7	12.2.1.10-4	12.2.1.10-5	12.2.1.10-8

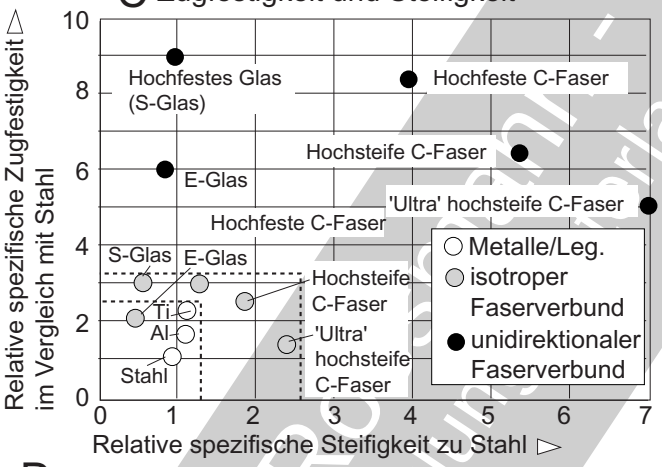
schlechter -- - 0 + ++ besser

B Komponenteneinfluss

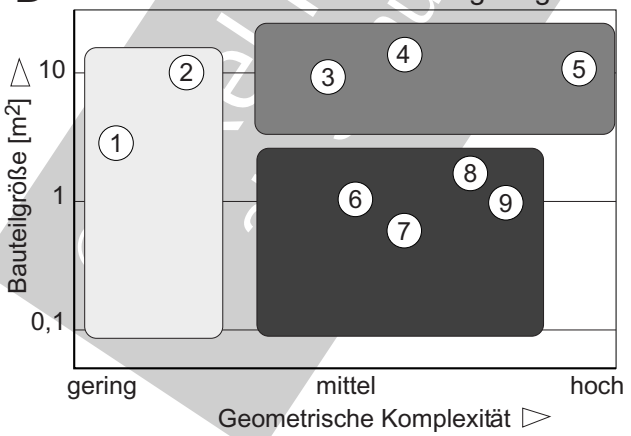
	Eigenschaften	Faser	Matrix
Mechanisch	Steifigkeit	-	+
	Festigkeit	-	+
	Ermüdung (dyn.)	-	+
	Schadenstoleranz	+	-
	Impactverhalten	+	-
	Thermomechanik	+	-
physikalisch chemisch	Elektrische	0	0
	Temperaturbeständigkeit	++	--
	Chemische Beständigkeit	++	--
	Korrosionsverhalten	+	-
Verarbeitung		++	--

gering -- - 0 + ++ groß

C Zugfestigkeit und Steifigkeit



D Bauteilbestimmte Verfahrenseignung



1 Pultrusion
2 Wickeln
— Symmetrische Bauteile

3 Ablage von Prepregs
4 Vakuumunterstützt
5 Handlaminieren
— Große und komplexe Bauteile

6 Formpressen
7 Ablage von Prepregs (Aush. im Autoklaven)
8 Harzübertragung (RTM)
9 Fließpressen
— Größenbegrenzte Bauteile

E Faser-Matrix-Halbzeuge

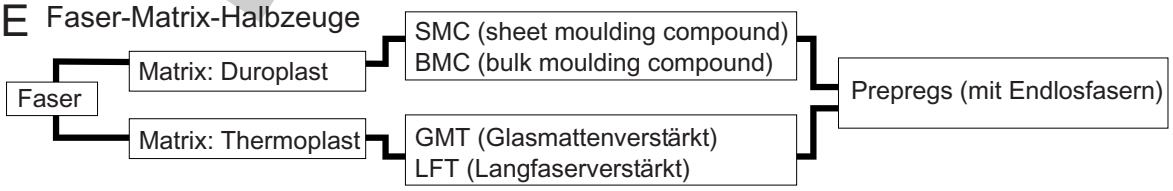


Bild 12.2.1.10-2

Prof. Rosemann - TU Ilmenau
Vorlesungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

Fortsetzung von Seite 12.2.1.10-5

die crashgefährdeten Zellen von Sportfahrzeugen (z.B. Formel 1) nutzen die hohe Aufnahmeenergie des Faserverbunds (C-Faser-Epoxid) erfolgreich. Hier sei noch erwähnt, dass die Wirkung schusssicherer Westen und der Schutz gegen Einschläge (Bruchstücke, Projektile, Band 1 Bild 3-15) nicht auf einem Faser-Matrix-Verbund sondern auf dem Verhalten von ***Trockenfasergelegen*** *beruhen (Lit. 12.2.1.10-22).*

Thermisches Verhalten, Thermomechanik und thermische Beständigkeit*: Grundsätzlich sind die* ***Betriebstemperaturen*** *bedingt durch die* ***organische Matrix*** *im Vergleich zu 'Konstruktionsmetallen' deutlich begrenzt. Dabei ist es wichtig, dass der Konstrukteur den großen Einfluss auch scheinbar geringer* ***Temperatursteigerungen*** *erkennt. So können bereits wenige °C die Lebensdauer deutlich verändern. Dies beruht sowohl auf Schädigung ('Alterung', Zersetzung) als auch plastischer Verformung (Kriechdehnung).*

Der Temperatureinfluss gilt, was die ***Reaktions- bzw. Verarbeitungszeit*** *anbetrifft auch für* ***Fertigungstemperaturen*** *(Aushärtung, 'Topfzeit', Gelierzeit, Lagerung). Es ist davon auszugehen, dass sich die Reaktionsgeschwindigkeit mit ca. 10 °C Temperaturanstieg (nach Arrhenius) verdoppelt. Eine besondere Herausforderung sind* ***hochreaktive Harze*** *(z.B. für kurze Zykluszeiten), die z.B. bei tiefen Temperaturen (Kühltruhe) gelagert werden müssen und selbst da nur eine kurze Zeit bis zur Verarbeitung erlauben.*

Eine Besonderheit von C-Fasern und Aramidfasern ist im Gegensatz zu Glasfasern die ***negative Wärmedehnung****, d.h. Schrumpfung bei Temperaturanstieg. Dies lässt sich durch die Orientierung von Faserlagen für eine gewünschte Wärmedehnung des Verbunds nutzen. So ist es beispielsweise möglich, die Wärmedehnung metallischen Beschlägen und Anbauten anzugleichen. Auch in Getriebegehäusen lassen sich die Achsabstände der Lagerungen der Wärmedehnung von Zahnrädern angleichen (Bild 12.2.1.10-9.2). Für den* ***Werkzeugbau*** *wird diese Möglichkeit ebenfalls genutzt.*

Was die ***Wärmeleitfähigkeit*** *anbetrifft, so ist diese für C-Fasern in Faserrichtung (unidirektional) hoch, für Glasfasern und Aramid jedoch vergleichsweise niedrig. Das gilt für C-Faserverbunde auch in Querrichtung.*

Die geringe ***elektrische Leitfähigkeit*** *von Glas- und Aramidfasern sowie CFK in Querrichtung hat unterschiedliche Folgen. Sie lässt sich für* ***isolierende*** *Bauteile nutzen. Anders bei* ***Blitzeinschlag*** *(z.B. in Flügel von Windenergieanlagen, Band 1 Bild 5.12.2-3). Hier kann es zu gefährlicher Überhitzung (Schädigung, holzähnliches Aufreißen /Delamination) und* ***Lichtbögen*** *(Brandschäden) kommen. Aus diesem Grund werden leitende metallische Gewebe in Oberflächennähe eingelegt (z.B. Flugzeugzellen) die Blitzableiterwirkung haben.*

Chemische Beständigkeit und Korrosionsverhalten *ist von Fasern (C-Faser, Glasfaser und Aramid) im Vergleich zu Metallen gut. Aramid kann reversibel bis zu 7 % Wasser aufnehmen und ist deshalb gegebenenfalls vor der Verarbeitung auf 3 % zu trocknen.*

Besonderes Problem bei ***Aramidfasern*** *ist die Empfindlichkeit gegenüber* ***UV-Strahlung****. Eine Schädigung macht sich äußerlich in einem bronzenen Farbton bemerkbar. Sonnenlicht ausgesetzt kann die* ***Festigkeit bis auf 25 % (!) absinken****. Das ist in der Fertigung bei der Lagerung zu berücksichtigen. Der Konstrukteur hat am Fertigteil eine schützende Beschichtung vorzusehen.*

Das Korrosionsverhalten der Matrixharze ist insbesondere gegenüber Hilfsstoffen wie ***Lösungs- und Reinigungsmitteln*** *problematisch.*

Verarbeitung*: Hier spielt die Verarbeitung der Faser eine besondere Rolle. So müssen Lagen zugeschnitten und aufgebaut, komplexe Geometrien vorkonfektioniert (Bild 12.2.1.10-11) und Halbzeug wie Gewebe und Gestricke (sogar 3D) hergestellt werden.*

„D“ ***Verfahrenseignung****: Die gezielte Auswahl der bauteilspezifisch geeigneten Herstel-*

Fertigungsspezifische Vor- und Nachteile.

Anwendung der Hybridisierung von Faserverbundkunststoffen		
Endlosfaserverstärkt CFK/GFK	Endlosfaserverstärkter FVK und Metall	Endlosfaserverstärkt Kurz-/Langfaser/Kunststoff
Nutzung der kostengünstigen Glasfaser an gering belasteten Bauteilbereichen Versteifung hochbelasteter Bereiche mit Kohlefasern, um die elastische Verformung zu minimieren Örtliche Anpassung temperaturbedingter Effekte: Wärmedehnung, Wärmeleitung	Metalle zur Aufnahme hoher örtlicher Lasten bzw. Flächenpressung Metalle in komplexen, mehrachsig belasteten Zonen, z.B. Krafteinleitung an Wellenenden.	Endlosfaser nur in höchst-belasteten Zonen in Belastungs-richtung Kurz- und Langfaserverstärkung bei mehrachsiger jedoch niedriger Belastung und aus Kostengründen.
Verfahren: - Prepregaufbau mit Vakuumunterstützung. - Handlaminieren	Verfahren: - RTM - Prepregaufbau mit Vakuumunterstützung. - Handlaminieren - Pressverfahren	Verfahren: - RTM - Pressverfahren
Beispiel: Bild 12.2.1.10-11	Beispiel: Bild 12.2.1.10-6	Beispiel: Bild 12.2.1.10-11

Faktoren die den Masseneinsatz von FVK begrenzen.

- **Kosten**: Eine Senkung verbessert sich mit dem Anteil der Bauteile (Nutzungsgrad). Eine 70% Reduzierung ist bei ca. 100 % der potenziellen, heute metallischen Anwendungen realisierbar.
- **Verfügbarkeit:** Nur wenn gewährleistet Großserieneinsatz.
- **Reparierbarkeit:** Praktizierbarkeit entsprechend Metallen.
- **Recycling:** Unbefriedigend solange nur thermische Verwertung.

Bild 12.2.1.10-3

*lung muss mehrere **Kriterien** berücksichtigen. Neben der Seriengröße (Bild 12.2.1.10-1) mit Taktzyklen und Kosten stehen die Bauteilgröße und die geometrische Komplexität. Dazu sind ausreichende **Verfahrenskenntnisse** notwendig (Bild 12.2.1.10-1) sowie die vorhandenen **Anlagen** und **Ressourcen** zu berücksichtigen. Selbstverständlich gehört, was das **Matrix-Faser-Halbzeug** anbetrifft, eine gewisse 'Begriffssicherheit' dazu („**E**"). Sie sollte u.A. Auswahl sowie zeit- und verfahrensgerechte Beschaffung gewährleisten.*

© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

Bild 12.2.1.10-3 *(Lit. 12.2.1.10-1 und Lit. 12.2.1.10-3): FVK ermöglicht die* ***Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren****. Dabei steht vermehrt die Tauglichkeit für eine günstige* ***Großserienproduktion*** *im Vordergrund (Bild 12.2.1.10-1). Die 'Massenfertigung' ist Folge eines entsprechenden Bedarfs der Anwendung. Hier sind nicht nur die* ***Kosten*** *relevant (Rahmen unten). Auch die* ***Verfügbarkeit*** *des Halbzeugs in Art und Menge (Fasern) sowie die Verarbeitbarkeit (Matrix/Harz: z.B. Lagerungsfähigkeit) spielt eine Rolle. So ist für die Anwendung von CFC in Großserien des Automobilbaus (z.B. Elektrofahrzeuge) der Aufbau einer Faserproduktion Voraussetzung. Weiteres wichtiges zu lösendes Kriterium ist die* ***Reparierbarkeit****. Dabei geht es nicht nur um den optischen Eindruck, sondern in vielen Fällen um* ***Festigkeit*** *und* ***Sicherheit****. Sie ist beispielsweise für den Großeinsatz an Zellen und Strukturen von Verkehrsflugzeugen von großer Bedeutung.* ***Recycling*** *tritt im Rahmen des Umweltbewusstseins und gerade bei Serienanwendungen (Elektrofahrzeuge) in den Fokus. Eine thermische Entsorgung ist problematisch. Eine Wiederverwendung zumindest der Fasern ist für hochbelastete Anwendungen nicht in Sicht.*

Die ***Hybridisierung*** *von Faserverbundwerkstoffen ist eine vom Konstrukteur nutzbare Möglichkeit bereichsspezifische Eigenschaften des Bauteils zu optimieren. Es besteht die Möglichkeit einer Kombination von Faserarten, -lagen (Orientierung) und Metallen (Tabelle oben). Das kann im Hinblick auf die Krafteinleitung, insbesondere Flächenpressung oder bei mehrachsigem Spannungszustand über metallische Ein- und Ansätze geschehen (Bild 12.2.1.10-5 und Bild 12.2.1.10-6). Gerichtete Eigenschaften wie hohe Festigkeit, hohe Steifigkeit und Wärmedehnung lassen sich mit Einlagen bzw. optimiertem Lagenaufbau ausgewählter Fasertypen (z.B. Hochmodulfaser oder Hochfestigkeitsfaser) realisieren.*

Bild 12.2.1.10-4 *(Lit. 12.2.1.10-5, Lit. 12.2.1.10-16 und Lit. 12.2.1.10-17): Es ist offenbar gelungen ein seriengeeignetes Verfahren (Composite Flow Moulding = CFM) zu entwickeln, mit dem* ***hochfeste Schrauben*** *aus FVK, insbesondere CFK oder Hybrid CFK/GFK realisierbar sind. Bei diesem Verfahren wird das Vormaterial (thermoplastgetränkter Rowing) auf 200°C bis 400°C erhitzt. Während des axialen Pressens der Schrauben schieben sich Fasern schraubenförmig um den unidirektionalen Kern in das Gewinde ohne zerstört zu werden. Die Teile sind nach dem Abkühlen* ***ohne Nacharbeit*** *verwendbar. Die relativ lange Abkühlungsphase verhindert noch eine Großserienanwendung.*

*Solche Schrauben ('****Carbonschrauben****') werden am Markt angeboten. Der Faseranteil liegt bis über 60 %. Eine offenbar bestandene Herausforderung ist die* ***Krafteinleitung über das Gewinde*** *in den zugbeanspruchten Kern/Schaft. Als Matrix wird ein* ***Thermoplast*** *verwendet. Möglich sind unterschiedliche Systeme wie Polyetheretherketon (PEEK), Polyetherimid (PEI), Polyphenylsulfid (PPS) und Polyamid (PA). Die erzielten* ***Festigkeiten liegen deutlich über Schrauben aus einer Titanlegierung*** *(!, Balkendiagramm). Das Gewicht liegt merklich unter Stahlschrauben. Dabei tritt der verblüffende Effekt auf, dass mit zunehmender Dicke einer FVK-Schraube mehr Gewicht eingespart wird. Dies ist auf den Dichtevorteil des FVK zurückzuführen. Der Konstrukteur sollte also die Schrauben* ***im Rahmen der Bauteilgeometrie möglichst groß auslegen****. Besonders hervorzuheben ist, dass der FVK-Werkstoff nicht wie Titanlegierungen bei Schwingverschleiß (Fretting) zu einem extremen Schwingfestigkeitsabfall (bis um 70 %!, Band 1 Bild 5.9.3-8) neigt.*

Die ***Anwendung*** *erfolgt bereits im* ***Flugzeugbau****, der* ***Raumfahrt*** *und im* ***Rennsport****. Die Korrosionsfestigkeit und die hohe kerbunempfindliche Schwingfestigkeit eröffnen ein Potenzial in der* ***Medizin****. Es besteht eine US-*

© Ayer Possanzini - Turkcosgun assoziierte Anwaltskanzlei

Schrauben aus FVK, insbesondere hochfeste aus langfaserverstärktem CFK für den Leichtbau.

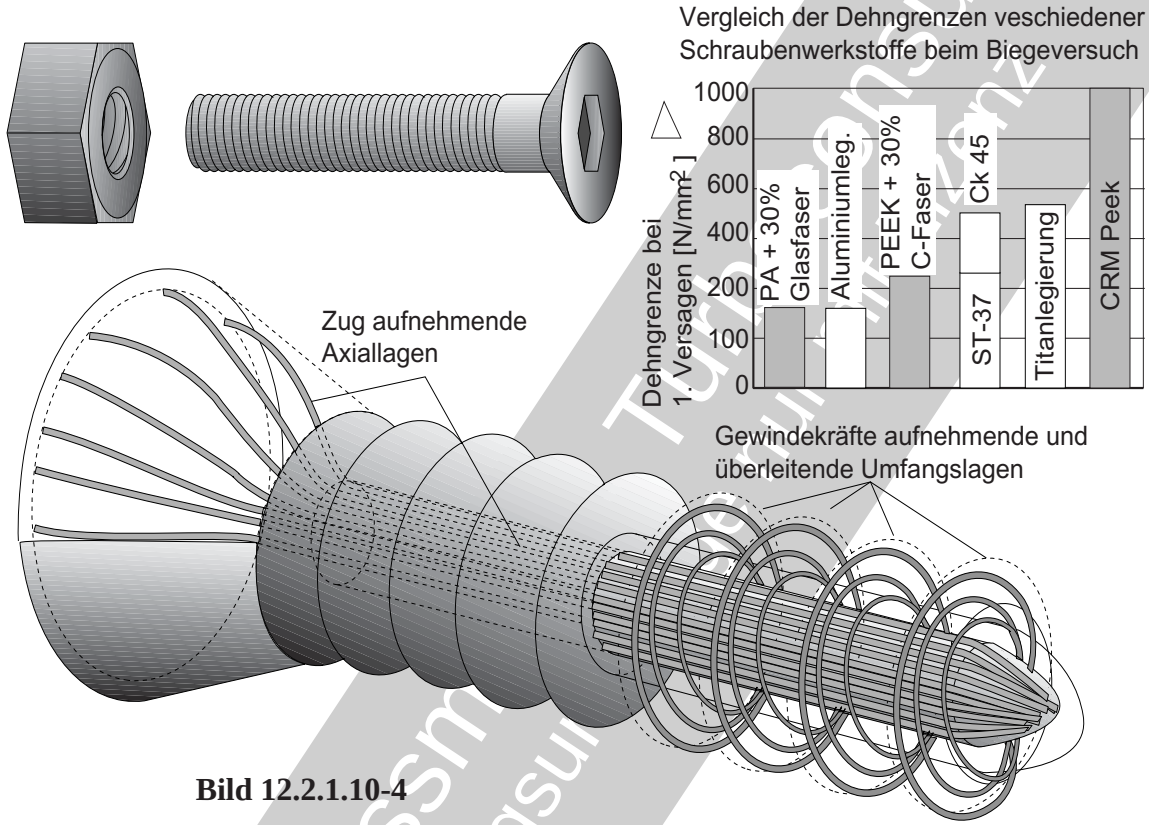


Bild 12.2.1.10-4

behördliche (FDA) Zulassung als implantierbar und biokompatibel.

Glasfaserverstärkte *(GFK) Schrauben bieten sich wegen ihrer Korrosionsfestigkeit ohne Elementbildung für das Verschrauben von Leichtmetallteilen aus Al- und Mg-Legierungen an. Sie sind in der Lage, sich* ***in Leichtmetalle*** *(Al-, Mg-Legierungen)* ***einzuschneiden****.*

Bild 12.2.1.10-5 *(Lit. 12.2.1.10-10, Lit. 12.2.1.10-12 und Lit. 12.2.1.10-114): Die Anwendung von FVK für* ***elastische Federn*** *ist naheliegend. In erster Linie geht es um Federn von Fahrzeugen aber auch Kleinflugzeugen. Für diese Anwendungen bietet sich das* ***Pultrusionsverfahren*** *an (Bild 12.2.1.10-1). Damit lässt sich unausgehärtetes, unidirektional verstärktes, rundes und flaches Halbzeug herstellen, das zu Federn weiterverarbeitet wird.*

Blattfedern *(Skizzen oben) für den Ersatz von mehrlamelligen Ausführungen aus Stahl werden einstückig ausgeführt. Auf Grund ihrer höheren spezifischen Festigkeit (Reißlänge) haben sie deutliche Gewichtsvorteile (ca. 80 % leichter) und sind in der Lage, höhere elastische* ***Energie zu speichern****. Weiterer Vorteil ist die* ***Korrosionsfestigkeit****. Zur Anwendung kommen gewöhnlich unidirektionale GFK-Lagen*

© Axel Rossmann Technologieberatung Fachberatung Weiterbildungsunterstützung

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

Federn aus FVK haben interessante Eigenschaften, Probleme sind die Fertigungskosten und Krafteinleitung.

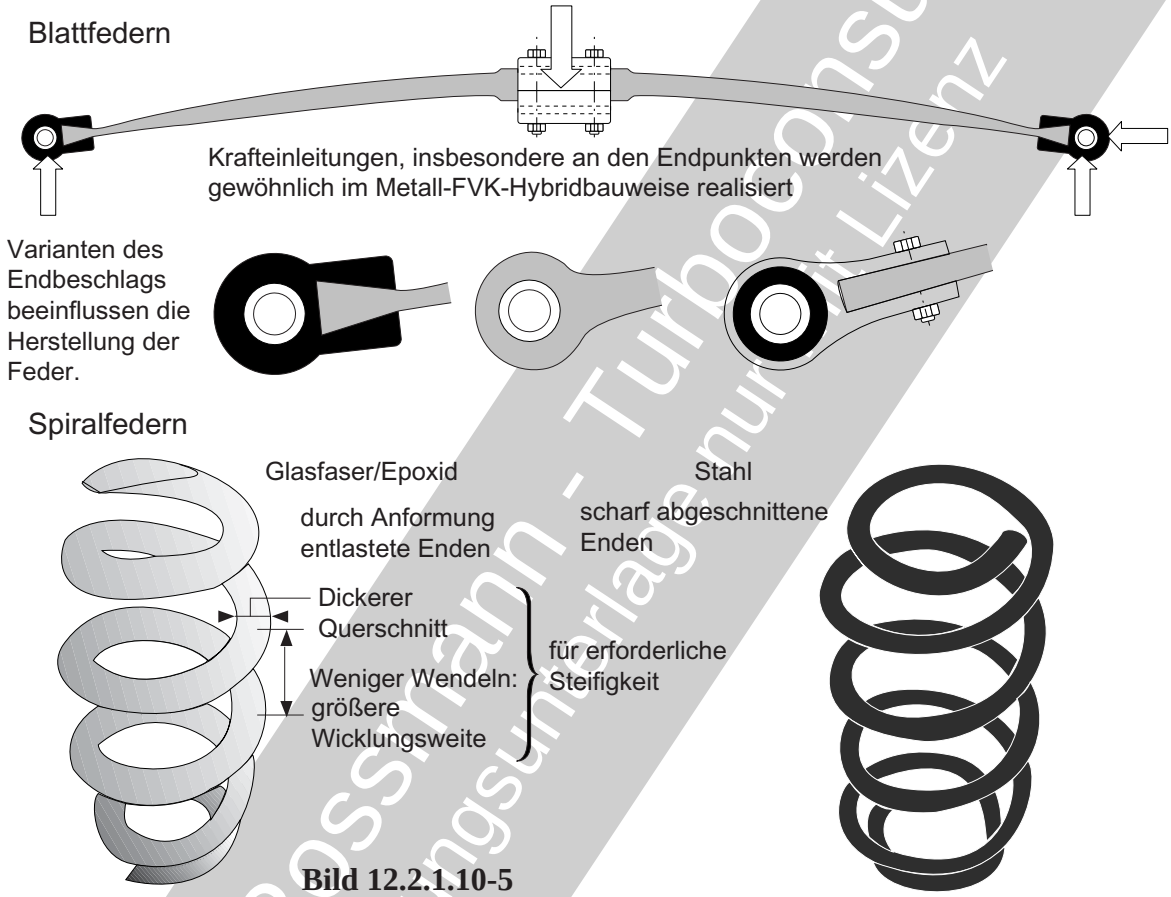


Bild 12.2.1.10-5

mit Epoxidharz-Matrix. Ein besonderes Augenmerk gilt der Krafteinleitung an den Federenden und in der Federmitte. Es handelt sich oft um ***Hybridbauweisen*** *mit Formteilen aus Stählen. Dabei hat der Konstrukteur verschiedene Optionen wie Schwalbenschwanz und direkte oder indirekte Bolzenverbindung (Gabel).* ***Spiralfedern****: Auch hier steht das vergleichsweise niedrige Gewicht im Vordergrund. Das Ziel ist eine Gewichtseinsparung bis 80%. Weiterer unerwarteter Vorteil ist neben der* ***Korrosionsfestigkeit****, dass die FVK-Version sogar für höhere* ***Betriebstemperaturen*** *(!) geeignet sein soll (Lit. 12.2.1.10-11). Ein Nachteil von FVK sind die höheren* ***Produktionskosten*** *und die* ***Anisotropie*** *. Sie erschwert Konstruktion und Herstellung der komplexen Form. Nach einer Vielzahl von Entwicklungsansätzen, meist mit besonderen Formkernen (z.B. aus Elastomer, Lit. 12.2.1.10-14 oder ausschmelzbar, Lit. 12.2.1.10-12) innerhalb der Feder sind nun vielsversprechende Technologieen erkennbar. Mit der sog.* ***Radius-Pultrusion*** *(Lit. 12.2.1.10-24) lassen sich z.B. im Endlosverfahren schraubenförmige Profile herstellen. Die Form wird schrittweise über das entstehende Profil bewegt während bei konventioneller Pultrusion das getränkte Faserbündel durch die Form gezogen wird. Dank dieser neuen Technologie wird die Herstellung von Großserien im Kfz-Bau wahrscheinlicher.*

© Axel Rossmann - Turbocons
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Wellen aus FVK haben viele praktische Vorteile. Die Herausforderung ist die sichere Verbindung mit metallischen Wellenenden/Kupplungen. Sie bestimmt wechselseitig die Fertigungstechnik.

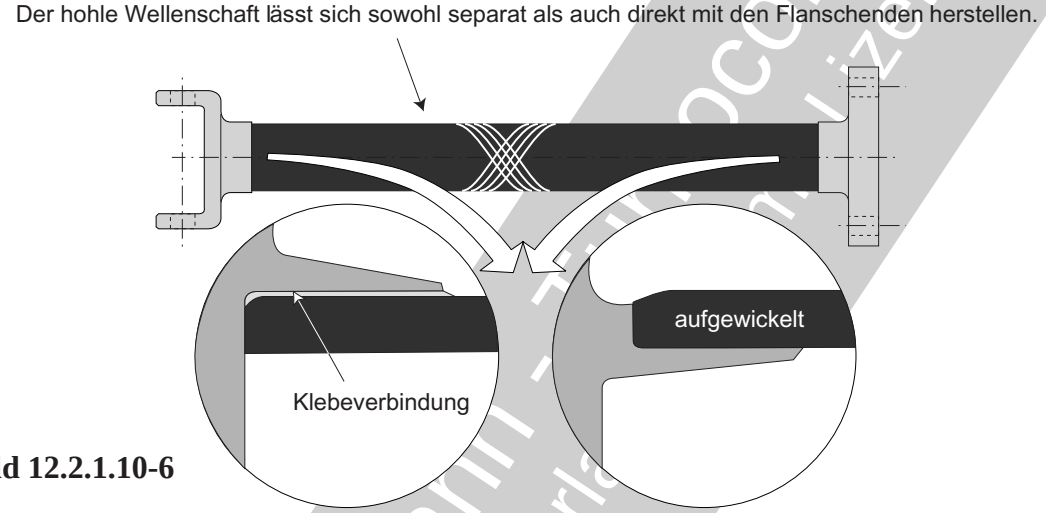


Bild 12.2.1.10-6

Bild 12.2.1.10-6 *(Lit. 12.2.1.10-7, Lit. 12.2.1.10-8 und Lit. 12.2.1.10-10): Heute werden Antriebswellen aus FVK für Boote und Motorsportfahrzeuge vielfach am Markt angeboten. An den Enden des hohlen FVK-Schafts mit vorzugsweise +-45° Faserverstärkung zur Aufnahme der Torsionsbelastung werden metallische Anschlüsse fixiert. Das Material der Hohlwelle besteht bei anspruchsvollen Anwendungen aus CFK. Genutzt werden Vorteile der Fasertechnik wie*

- *Hohe spezifische Steifigkeit und spezifische Festigkeit.*
- *Korrosionsfestigkeit, besonders bei Schiffsantrieben.*
- *Hervorragende Schwingfestigkeit mit erkennbarem Versagensbeginn, kein schneller Rissfortschritt bis Bruch.*
- *Schwingungsdämpfend, unterdrückt Vibrationen. Das vermindert Geräusche und Schwingverschleiß im Antriebsstrang.*
- *Hohe kritische Drehzahl (hohe Biegeeigenfrequenz). Es werden längere Wellen (Endlagerabstände) ohne Zwischenlager möglich.*
- *Anwendungsspezifisch realisierbare Steifigkeits- und Festigkeitsverteilung.*
- *Im Vergleich zu einer metallischen Welle bei Bruch begrenzte Folgeschäden. Z.B. erfahrungsgemäß geringere Verletzungsgefahr.*

Die Kupplungsanschlüsse sind mit der heutigen Technologie keine Schwachstellen.

Bild 12.2.1.10-7.1 *(Lit. 12.2.1.10-19, Lit. 12.2.1.1023 und Lit. 12.2.1.10-25): Diese* ***schwenkbare*** *Schaufel wurde Anfang der 90er-Jahre für ein konzipiertes Großtriebwerk mit gegenläufigen Fanstufen entwickelt. Es ist ein eindrucksvolles Beispiel der FVK-Technik für die Realisierung eines hochbelasteten, sicherheitsrelevanten und komplexen Bauteils. Genutzt werden sollte die gegenüber der Metallbauweise (Titanlegierung) hohe* ***spezifische Festigkeit*** *und* ***Steifigkeit****. Das ermöglicht entsprechend den Dichten (CFK 1,7 kg/dm³, Ti 4,5 kg/dm³) ein deutlich niedrigeres* ***Gewicht****. Zusätzlich sind die hohe* ***Ermüdungsfestigkeit****, die* ***Schwingungs-***

© Axel Bossmann - Fingocom
als Schulungsunterlage - Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

Beispiel für ein Maschinenelement in Metall/FVK-Hybridbauweise.

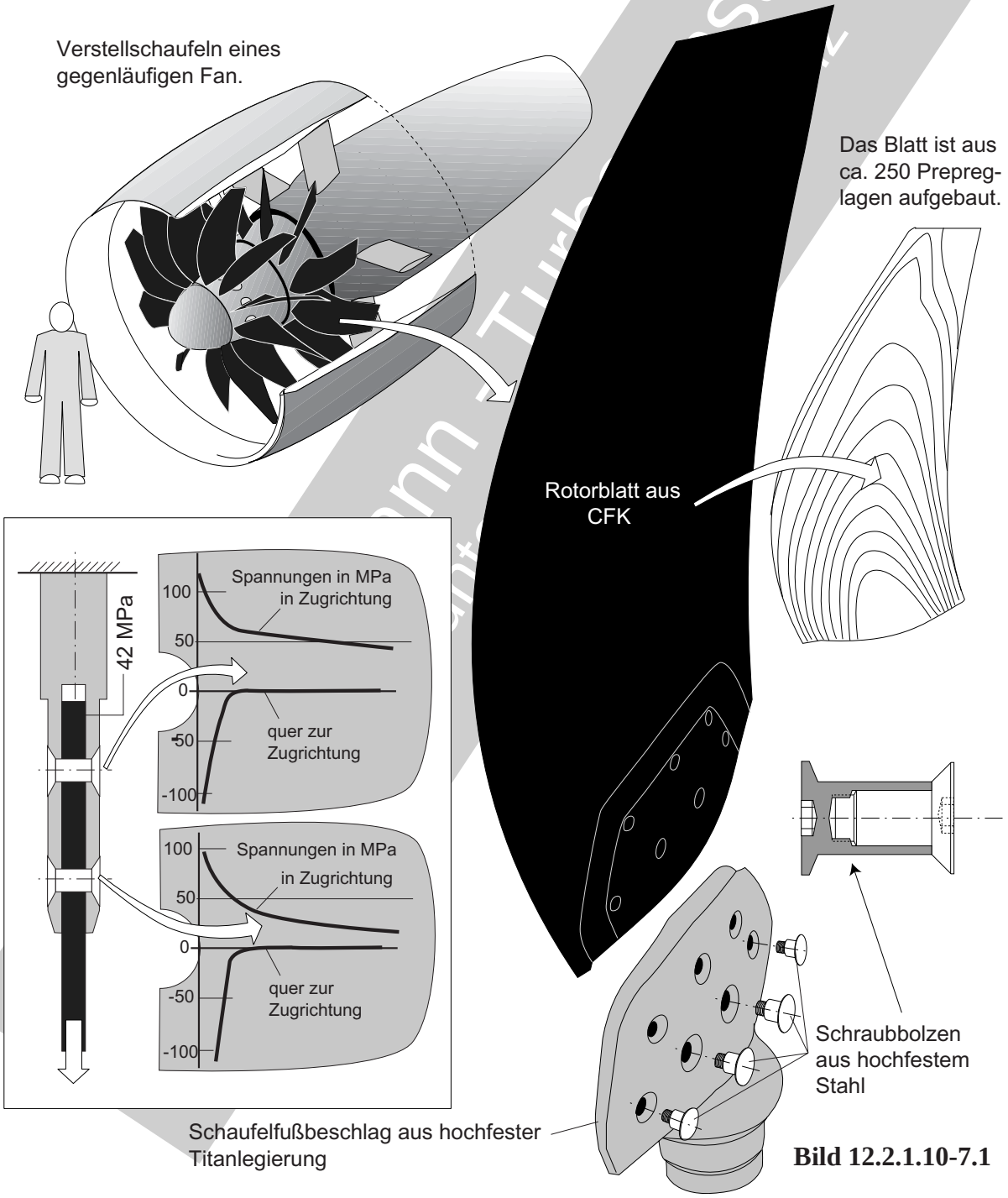


Bild 12.2.1.10-7.1

dämpfung *und die* ***Kerbunempfindlichkeit*** *wichtige positive Eigenschaften. Die Möglichkeit durch den Lagenaufbau die örtliche Steifigkeit des Blattes und damit die Schwingungsformen zu optimieren war besonderes Auslegungsbestandteil. Dazu gehörte neben Resonanzen auch die Vermeidung aeroelastischer Instabilität (Flattern, Band 1 Bild 3-9.2). Weiter sind Vorteile eines leichteren* ***Containments*** *nicht zu unterschätzen. Es*

dient im umgebenden Gehäuse eventuelle Schaufelbruckstücke aufzufangen (Band 1 Bild 5.2.2-1). Das Blatt ist in dem drehbaren, gabelförmigen Fuß aus einer hochfesten Titanlegierung mit ***Schraubbolzen*** *fixiert. Konstruktionen mit einem Hohlblatt (Schaumstoffkern) und innenliegendem eingenieteten Metallschaft haben sich wegen frühzeitiger Lockerung nicht bewährt.*

Das massive Schaufelblatt besteht aus mehreren hundert Einzellagen. Zum Einsatz kamen unidirektionale (UD) Kohlefaser-Epoxid-Prepregs. Die Lagen ergaben sich bei der computergestützten Konstruktion und (CAD) Auslegung des Schaufelblattes, insbesondere des Profils. Die Blattdicke beträgt an der Schaufelspitze ca. 2 mm, im Fußbereich ca. 30 mm. Die Lagen wurden in einer fortgeschrittenen Phase mit einer Schneidmaschine automatisch auf Basis der Konstruktionsdaten aus dem Halbzeug geschnitten. Sie wurden in einer zweischaligen Pressform soweit möglich symmetrisch positioniert. Das fertige Bauteil entstand dann in der erforderlichen hochgenauen Form ohne Nacharbeit. Presszyklus im Autoklaven bei 8 bar und 175 °C.

Bild 12.2.1.10-7.1 *(Lit. 12.2.1.10-19 und Lit. 12.2.1.10-27): Eine Technologie wie in Bild 12.2.1.10.7.1 beschrieben findet man heute im Großserieneinsatz in modernen großen Fan-Triebwerken. Offenbar setzt sie sich ca. 30 Jahre nach den ersten, jedoch wegen Vogelschlag gescheiterten Anwendungsversuchen, gegen hohle Titanschaufeln durch. Es ist davon auszugehen, dass dieser Erfolg nicht zuletzt auf Fortschritte bei der ertragbaren Energieaufnahme im Falle des Vogelschlags zurückzuführen ist. Es kommen 3D-Gewebe und Querverbindungen der Faserlagen ('Steppen') in Frage, um ein Versagen durch Delamination zu erschweren. Leider wird aus verständlichen Gründen hierzu wenig veröffentlicht.*

Die wenigen brauchbaren Veröffentlichungen lassen folgende Schlüsse zur Technologie zu.

FVK-Fanblatt eines modernen großen Flugtriebwerks.

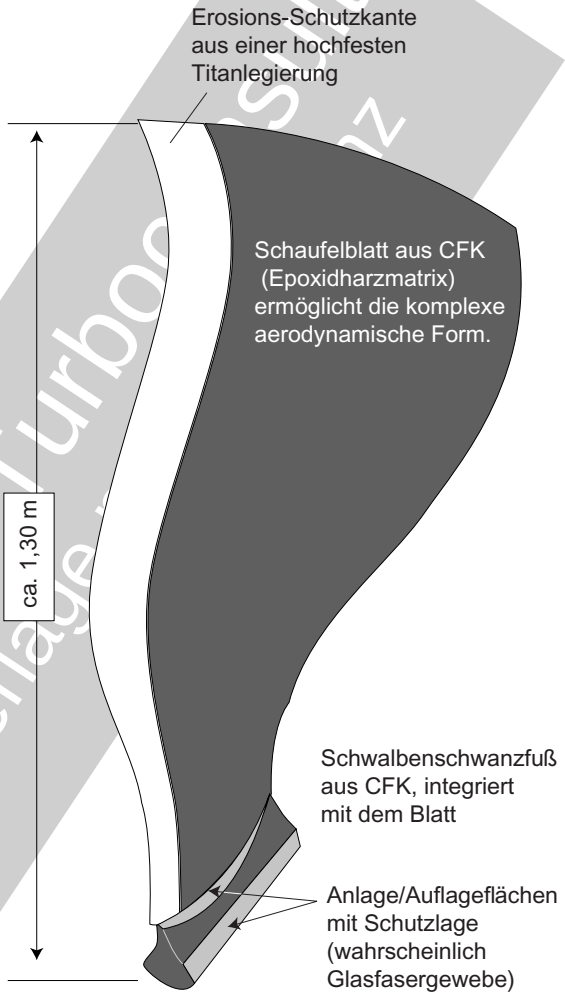


Bild 12.2.1.10-7.2

Es handelt sich erkennbar um eine FVK-Metall-Hybridkonstruktion. Auffällig ist die breite metallische Schutzkante gegen ***Partikelerosion*** *(Band 1 Kapitel 5.5.1.1) und* ***Tropfenschlag*** *(Band 1 Kapitel 5.5.1.2). Die FVK-Bauweise kommt der komplexen, aerodynamisch bedingt geschwungenen Schaufelgeometrie zu Gute. Die Schaufeln sind fest mit einem integrierten Schwalbenschwanzfuß ebenfalls in CFK in die Scheibe geschoben. Die Auflageflächen sind offenbar mit geeigneten Lagen (wahrscheinlich Glasgewebe) beschichtet. Dies dürfte als Verschleißschutz (Fretting, Band 1 Kapitel 5.9.3) gerade auch für die Nuten der Fanscheibe (hochfeste Titanlegierung!) und*

© Axel Rossmann - Turbodonsult als Schulungsunterlage

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

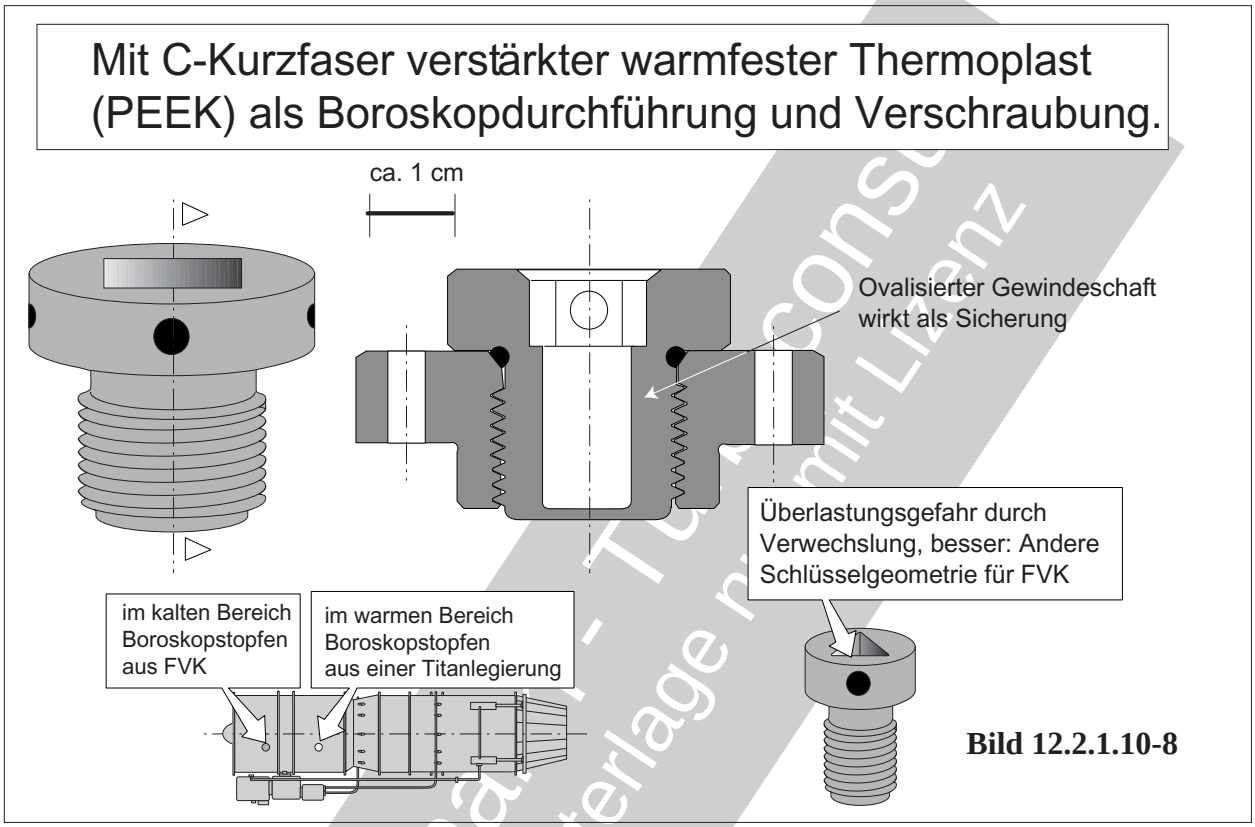


Bild 12.2.1.10-8

den Zwischenstücken (da eine Fußplattform fehlt) der Strömungsführung dienen.

Bild 12.2.1.10-8 *(Lit. 12.2.1.10-23): Dieses zweiteilige Spritzgussteil wird aus einer C-Faser-verstärkten warmfesten Thermoplastmatrix (PEEK) hergestellt. Es ersetzt im vorderen (kälteren) Teil eines militärischen Turbotriebwerks die metallischen (hochfeste Titanlegierung) verschließbaren Öffnungen für Boroskope (Inspektionssonden). Diese Durchführungen bestehen aus zwei Teilen. Einem Auge, das am metallischen Außengehäuse verschraubt wird. In dieses wird nach der Inspektion das zweite Teil, ein abgedichteter Verschlussstopfen, geschraubt.*

Neben der ***Gewichtseinsparung*** *stand die Kostenreduzierung im Vordergrund. Während die Titanteile aufwändig aus dem Vollen gefräst werden, sind die Spritzgussteile vergleichsweise* ***kostengünstig****. Die* ***Sicherung*** *gegen Lösen bzw. Aufdrehen des Stopfens wurde auf einfache Weise mit der Ovalisierung des Gewindebereichs erreicht. Der niedrige E-Modul ließ die notwendige* ***elastische Verformung*** *ohne Schädigung zu. Die* ***Fixierung der Eindruckkugeln*** *des Schlüsselvierkants wurde durch Radialbohrungen im Kopf, die bis zur Schlüsselöffnung reichen ermöglicht. Damit ließ sich das Spritzgusswerkzeug einfacher gestalten.* ***Dies ist ein schönes Beispiel für die Integration von Konstruktion, Technologie und Fertigung bei der Realisierung von FVK-Teilen****.*

Das ***Hauptproblem*** *zeigte sich jedoch erst bei der Serienanwendung. Im heißeren Triebwerksteil kamen weiterhin die geometrisch gleich aussehenden Metallteile mit einem deutlich höheren Anzugsmoment des Stopfens zum Einsatz. Wegen dem gleichen Schlüsselansatz kam es zu Verwechslungen des vorgeschriebenen Anzugsmoments. Die Kunststoffteile wurden überlastet (Bruch, Rissbildung). Das zeigt ein oft nicht beachtetes Problem beim Ersatz von Metallteilen durch FVK Teile. Der Konstrukteur hat dafür zu sorgen, dass* ***Verwechslungen nicht möglich*** *sind. Informationen allein genügen offensichtlich nicht.*

© AGE Rossmann - TU Ilmenau
Abschaltungsunterlage mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

Getriebegehäuse aus langfaserverstärktem CFK haben etliche Vorteile gegenüber konventionellen aus Al- oder Mg-Gusslegierungen.

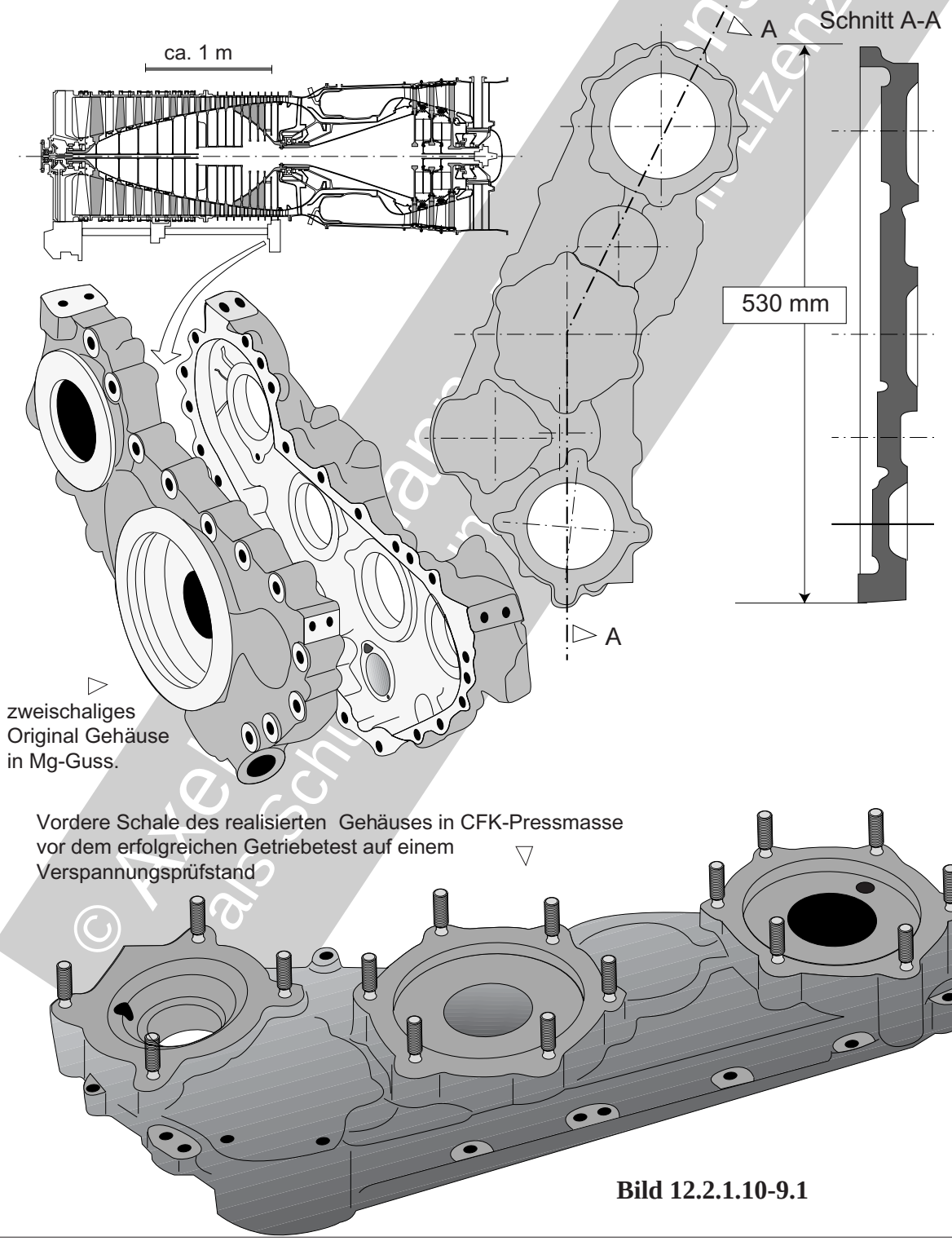


Bild 12.2.1.10-9.1

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

Bild 12.2.1.10-9.1 *und* ***Bild 12.2.1.10-9.2*** *(Lit. 12.2.1.10-21): Dieses Beispiel soll die vielfältigen Überlegungen beim Einsatz von FVK an einem Maschinenbauteil aufzeigen. Bereits in den 80er-Jahren wurde versucht, die Vorteile der Fasertechnik für* ***Gehäuse von Anbaugetrieben*** *der Luftfahrtantriebe (Skizze oben links) zu nutzen. Diese Möglichkeit sollte in einem Forschungs- und Versuchsprogramm untersucht werden. Es handelte sich um relativ schmale mit einem Flansch verbundene Gehäusehälften. Dabei ging es darum* ***Nachteile der vorhandenen Metallversion*** *zu vermeiden.*

- ***Korrosionsanfälligkeit****,*
- ***niedrige Schwingfestigkeit****,*
- ***radioaktive Belastung*** *des mit Thoriumoxid dispersiongehärteten Magnesium-Sandguss.*
- ***Durchgehende Porosität,*** *die aufwändig abgedichtet werden muss.*
- ***Hohe Wärmedehnung,*** *welche die Achsabstände der Zahnradwellen aus Stahl (Bild 12.2.1.10-10) im Betrieb merklich verändert.*
- ***Geringe Dämpfung*** *mit Neigung zu* ***Schwingungen und Vibrationen****. Dies ist auch der Grund für eine*
- *intensive* ***Schallabstrahlung****.*
- ***Überholung****: Probleme der für die Rissprüfung mit Eindringmittel notwendigen Entlackung. Dies führte wiederum zu Porosität mit Ölausschwitzungen.*

Die ***Auswahl*** *des Faser-Matrix-Werkstoffs musste den folgenden Kriterien genügen:*

- ***Niedriges Gewicht****,*
- ***isotropisches Werkstoffverhalten*** *wegen der mehrdimensionalen Spannungsverteilung.*
- *Realisierung einer* ***komplexen Gehäusegeometrie*** *(Skizzen Mitte) mit anspruchvollem* ***Querschnittsverlauf*** *(Skizze oben rechts) bei minimaler Nachbearbeitung.*
- *Möglichst Anwendung von* ***Verschraubungen und Einsätzen*** *(Lagerhalterungen) der vorhandenen metallischen Version.*
- *Ausreichend kurze* ***Taktzeiten*** *für eine Seriengröße von ca. 1000 Stück.*
- ***Dauerbetriebstemperatur*** *< 70°C, örtliche Spitzentemperatur bis 120°C.*
- *Beherrschung der* ***Wärmeabfuhr*** *trotz der vergleichsweise schlechten Wärmeleitfähigkeit des FVK. Möglicherweise müssen die Kapazität des Ölkühlers und/oder der Ölumlauf adaptiert werden.*

Tendenz der an integralen Proben ermittelten Werkstoffdaten.

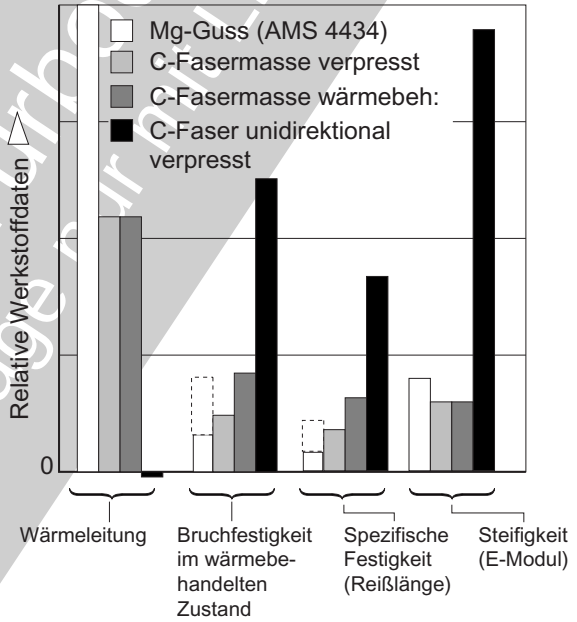


Bild 12.2.1.10-9.2

Material*: Es wurde eine mit 30 % C-Faser langfaserverstärkte (13 mm, siehe Def. Seite 12.2.1.10-1) hochreaktive Einkomponenten-Epoxid-Pressmasse (Bild 12.2.1.10-11) ausgewählt. Dies war notwendig, um eine ausreichend kurze Taktzeit zu erreichen. Sie sollte die provisorischen, aus FVK gefertigten, geheizten Pressformen nicht thermisch und mit der Presskraft überfordern. Die Masse wurde tiefgekühlt angeliefert und gelagert. Eine Temperierung erfolgte erst unmittelbar vor der Verarbeitung. Diese fand in einer mechanischen Presse mit Unter- und Oberwerkzeug bei 150°C und 50 bar Druck statt. So konnte lediglich eine kleine Zahl brauchbarer Gehäuse gefertigt werden. Aus einem wurden integrale Biegepro-*

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.10-19

©Vogelpohl, Turbomaschinen, Ausschnittunterlage zur Nutzung

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

Der Betriebstauglichkeitsnachweis erfolgt so weit wie möglich in Vergleichsversuchen mit der zu ersetzenden metallischen Variante.

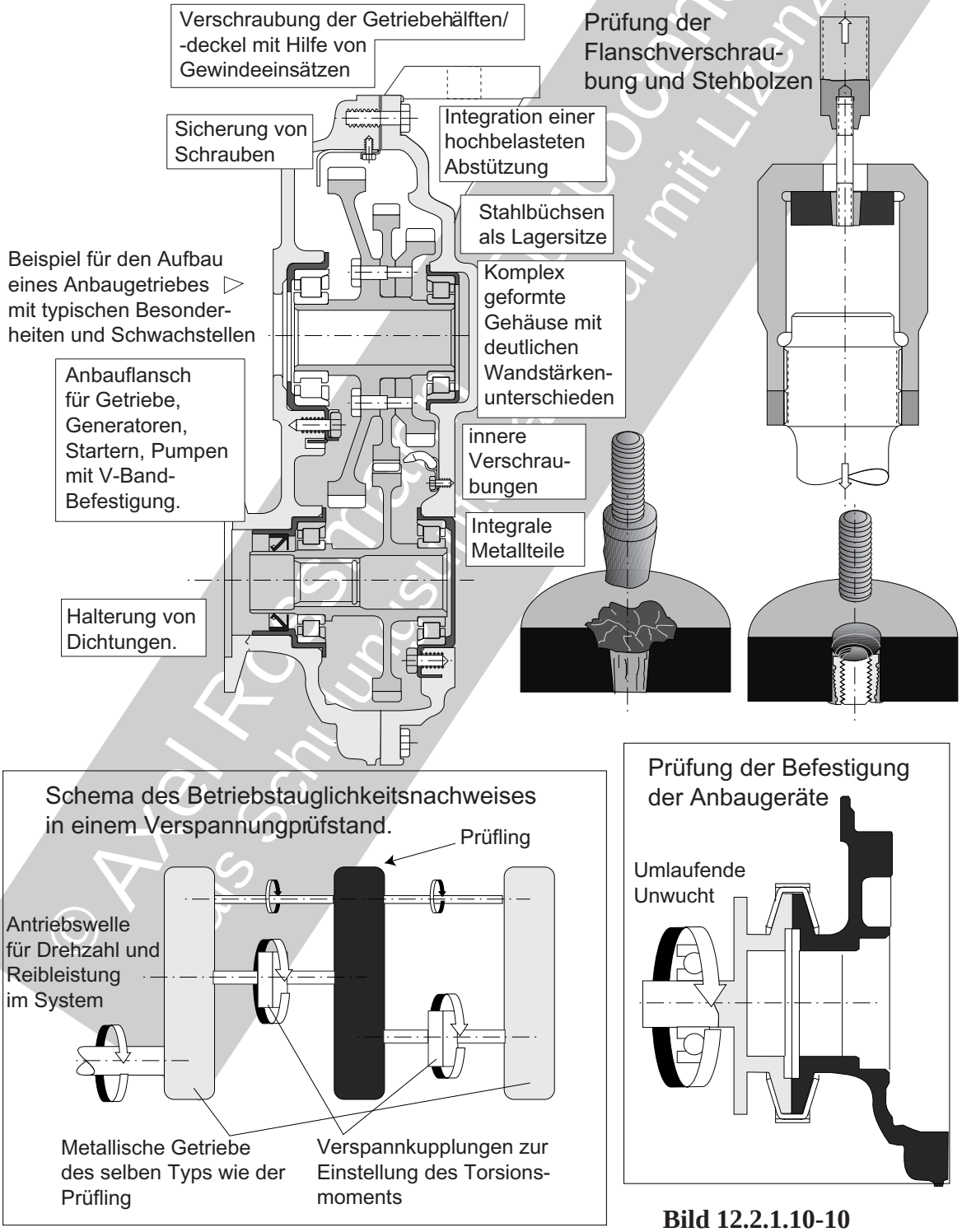


Bild 12.2.1.10-10

© Axel Rossmann Werkstoffconsult
Das Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

Fortsetzung von Seite 12.2.1.10-17

ben entnommen. Die Prüfergebnisse zeigt Bild 12.2.1.10-9.2. Das Belastungsverhalten wurde im Vergleich zur Mg-Legierung als ausreichend eingeschätzt. So war selbst gegenüber der leichten Mg-Legierung eine Gewichtsreduktion um bis zu 30 % zu erwarten.

Bild 12.2.1.10-10 *(Lit. 12.2.1.10-21): Die Abschätzung der Betriebstauglichkeit der Schraubenverbindungen erfolgte mit angepassten, separat hergestellten Proben. Dazu wurde ein Gehäuse vollkommen betriebsfertig hergestellt (Schnitt oben links). Die Erprobung fand in einem Verspannungsprüfstand gegen zwei Originalgehäuse* ***mechanisch und thermisch zyklisch*** *über 100 Stunden statt (Rahmen unten links). Dabei entsprachen Drehzahlen und Momente den Betriebslasten bis in einen maximal auftretenden Dauertemperaturbereich von 80 - 90°C. Die Temperaturen aller Lager wurden kontinuierlich überwacht. Das Gehäuse zeigt nach der Prüfung keine bedenklichen Veränderungen und wurde als betriebsgeeignet eingeschätzt.*
Wie wichtig betriebsnahe Versuche sind, zeigte auch ein ***bemerkenswerter Nebenbefund****. Es fiel auf, dass die unangenehm starke, hochfrequente* ***Schallabstrahlung*** *der metallischen Gehäuse bei FVK nicht auftrat. Das war auf Grund der* ***Dämpfungseigenschaften*** *auch leicht erklärlich.*
Der ***Befestigungsflansch*** *(V-Band), wie er für Generatoren und Pumpen verwendet wird, wurde einer gesonderten dynamischen Prüfung unterzogen. Dazu wurde der Gehäusedeckel auf eine Halteplatte mit dem Teilungsflansch gespannt. Der Befestigungsflansch wurde dann mit einem Unwuchterreger umlaufbiegebelastet (Rahmen unten rechts). Dieser Bereich ist erfahrungsgemäß bei den Originalgehäusen durch Schwingermüdung gefährdet (Band 1 Bild 6.4.2-6). Die Ergebnisse waren ermutigend. Als Schwachstelle erwies sich nicht die Aggregatbefestigung, sondern, eher unerwartet, das* ***Einschraubgewinde*** *am Aufspannflansch. Die Ergebnisse der entsprechenden Proben zeigten jedoch, dass mit einer Optimierung sogar bessere Werte als beim Originalgehäuse aus Mg-Guss zu erwarten sind.*
Als Schwachstelle hatten sich die ***Verschraubungen im FVK*** *herausgestellt. Deshalb wurden zur Optimierung separat verpresste* ***Gewindeeinsätze*** *(Skizzen oben rechts) mit eingeschraubten Bolzen erprobt. Die in den Metallgehäusen als Spirale (Typ Heli Coil ®) eingeschraubten Gewindeeinsätze wurden ersetzt. Es wurden am Markt erhältliche, für die vorgesehene Anwendung bewährte Gewindeeinsätze aus Messing verwendet. Sie wurden in die Bohrung geklebt. Die Prüfung erfolgte auf einem Hochfrequenzpulser in Axialrichtung. Kriterium für ein befriedigendes Verhalten war das Ermüdungsversagen des eingeschraubten Bolzens. Es zeigte sich, dass dazu die* ***Gewindebüchse ausreichend tief unter der Oberfläche*** *positioniert werden muss.*

Fazit*: Die Untersuchungen ergaben eine realistische Chance für die Serieneignung eines FVK Getriebegehäuses. Ein tatsächlicher Ersatz der vorhandenen Gehäuse war jedoch wegen der umfangreichen Zulassungsprozedur nicht vorgesehen. Trotzdem wird diese* ***Technologie gerade im Hinblick auf E-Mobilität und Leichtbau wieder an Bedeutung gewinnen. Dabei kann auch die elektrische Isolationswirkung von Interesse sein. So lassen sich Lagerschäden durch Stromdurchgang vermeiden*** *(Band 1, Bild 5.12.1-5)****. Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Vorteil ist die geringe Schallabstrahlung im Vergleich zu Leichtmetallgehäusen. Das ist für den Fahrkomfort sehr vorteilhaft.***

© Vogelsang - Turbosystem
als Schulungsunterlage zur Lehre

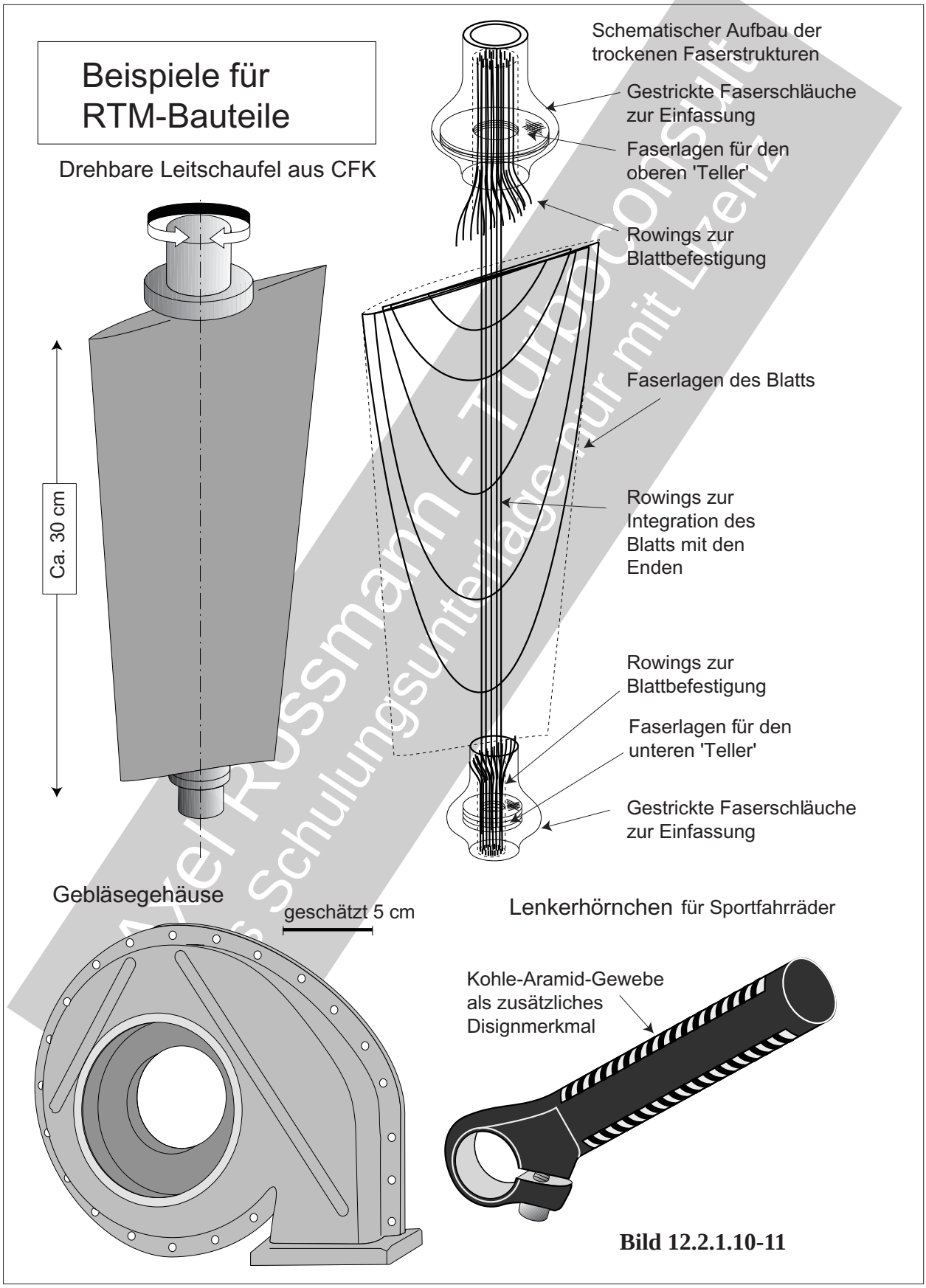


Bild 12.2.1.10-11

Axel Rossmann - Turbocon Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

Bild 12.2.1.10-11 *(Lit. 12.2.1.10-1, Lit. 12.2.1.10-3, Lit. 12.2.1.10-6 und Lit. 12.2.1.10-23): Das* ***RTM Verfahren*** *(Bild 12.2.1.10-1 „F“) bietet sich für die Herstellung von Maschinenelementen mit typisch komplexen Formen und mehrachsigen Spannungszuständen an. Dabei wird ein* ***Trockenfaser-Vorformling*** *in eine dann zu verschließende Form gelegt. Anschließend wird Harz, gegebenenfalls nach vorheriger Evakuierung, eingespritzt. Der trockene Vorformling kann aus unterschiedlichen Fasern und Gelegen wie Geweben oder Gestricken aufgebaut sein (Skizze oben rechts). Diese richten sich nach den Angaben des Konstrukteurs, um die gewünschte Festigkeit und Steifigkeit zu erzielen. In die Form lassen sich verbleibende Kerne (z.B. Schäume) einlegen. Typisch sind Hybridbauweisen mit integrierten Metallformstücken die am Teil verbleiben. Beispielsweise eine Erosionsschutzkante (Bild 12.2.1.10-7.2) oder kraftübertragende Auflageflächen wie am unten rechts dargestellten Klemmgriff.*

Das Gebläsegehäuse unten links zeigt, dass sich auch dünnwandige Strukturen herstellen lassen.

Mit dem RTM-Verfahren werden heute Serien von über 10^5 relativ großer Bauteile (z.B. Flugzeugspanten) in Taktzeiten von wenigen Minuten hergestellt. Der Qualitätsnachweis erfolgt über die Prozessstabilität und an Hand von Stichproben. Auch eine 100% zerstörungsfreie Prüfung ist je nach Anwendungsfall möglich.

Anwendungskriterien und Besonderheiten von Epoxid-Harzsystemen*:*

Einkomponentensysteme *(1K):*

- *Definierte Zusammensetzung, da keine Anmischung mit dem Härter vor Ort.*
- *Gekühlte Lagerung.*
- *Säuberung der durchflossenen Leitungen von Harzrückständen.*
- *Lange Aushärtungszeiten.*

Zweikomponentensysteme *(2K) :*

- *Kurze Aushärtungszeiten.*
- *Voraussetzung ist ein konstantes Mischungsverhältnis, auch bei unterschiedlichem Forminnendruck.*
- *Keine Aushärtung der Komponenten, d.h. lange’Topfzeit’.*
- *Einsatz interner Trennmittel oder Additive möglich (siehe Kapitel 12.2.1.10.1 „Trennmittel“).*

© Axel Bossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Eine der größten Herausforderungen bei Injektionsverfahren sind Position, Anordnung und Verlauf der 'Anschnitte' für Absaugung/Evakuierung/Austritt und Injektion.

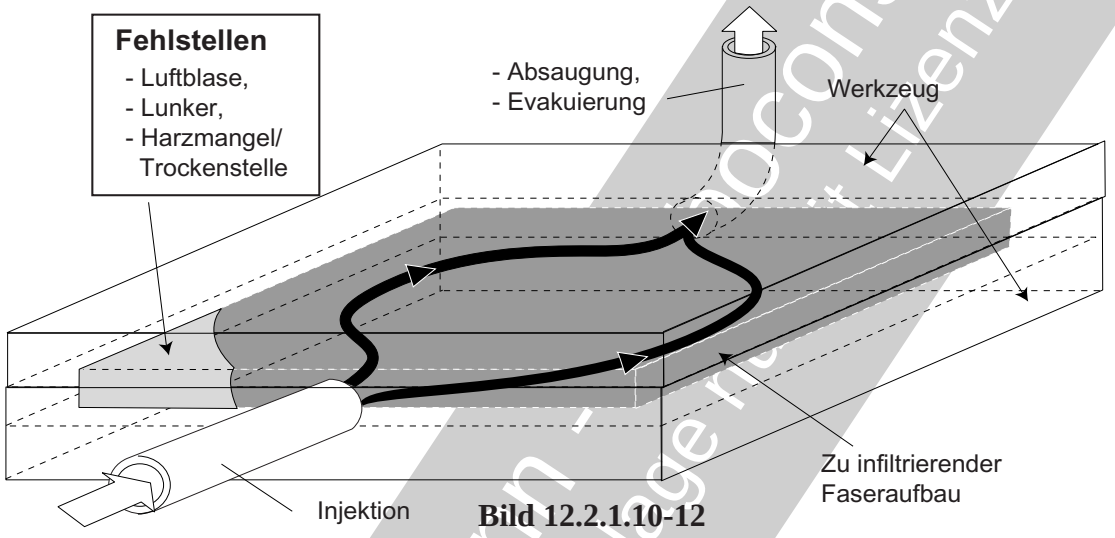


Bild 12.2.1.10-12

***Bild 12.2.1.10-12**: Gerade bei Injektionsverfahren wie RTM ist ein betriebsnaher, selbstkritischer Nachweis des Serienverfahrens erforderlich. Erfahrungsgemäß können Defizite mit Zeitverzögerung und hohen Zusatzkosten ein ganzes Projekt gefährden. Besonders kritisch ist nach einem ersten erfolgreich hergestellten Bauteil der Schluss, das Verfahren zu beherrschen. Erst wenn eine Anzahl guter Teile hintereinander hergestellt werden konnten weist dies auf ein tragbares Risiko für eine Serienproduktion hin. Trotzdem sind böse Überraschungen nicht ganz auszuschließen. Das Bild zeigt das Problem örtlich **ungenügender Harztränkung**. Dies zu vermeiden erfordert die Kenntnis der Harzverteilung und die dabei wirkenden werkzeugspezifischen Einflüsse. Hier können Computersimulationen hilfreich sein.*

Gefahr eines Autoklavbrands!

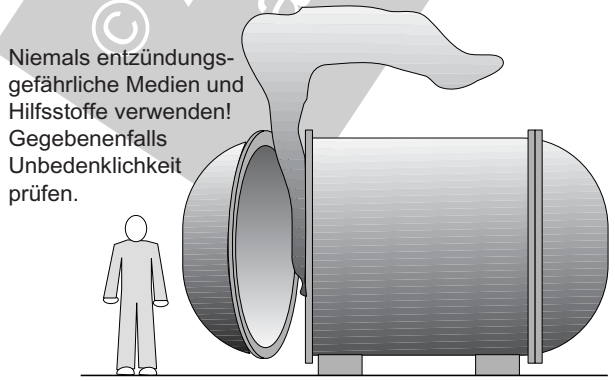


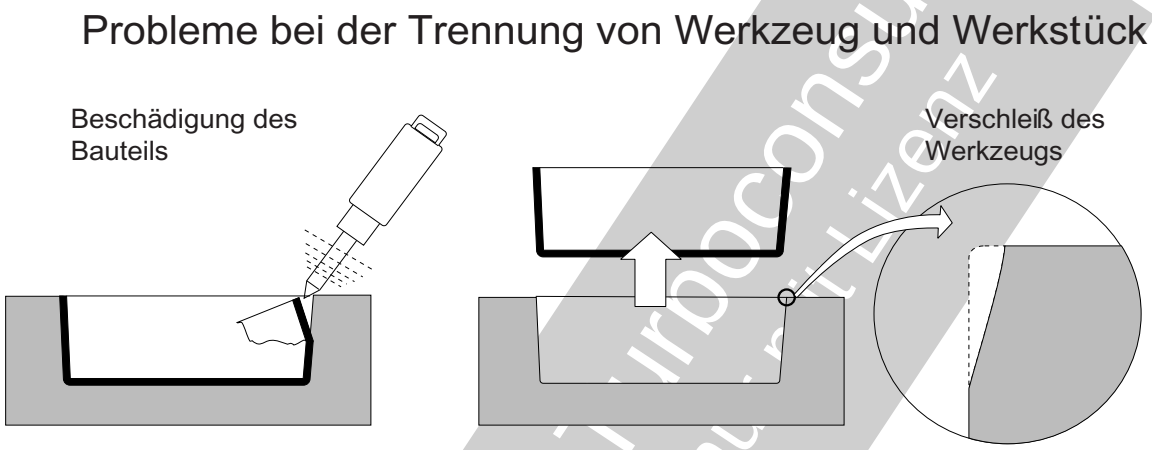
Bild 12.2.1.10-13

***Bild 12.2.1.10-13**: Wegen des hohen Drucks herrscht im luftgefüllten Autoklaven ein entsprechend großes **Sauerstoffangebot**. Damit besteht die Gefahr der **Selbstentzündung ungeeigneter Hilfsstoffe**. Aus diesem Grund sind diese zu überprüfen. Dazu gehören:*
- Trennmittel,
- Folien,
- Dichtungen und Dichtungspasten.

*Anmerkung: Nach Vorschlag von H. Hochleitner müsste sich der **Sauerstoffgehalt in der Autoklavenluft** auf einfache und preiswerte Weise **unter unbedenkliche 15 %** absenklen lassen. Dafür bietet sich das bekannte **Vorschalten einer Membrantechnik** an.*

© Axel Hahn - Ingenieurbüro Consultant
Nur als Skriptunterlage mit Lizenz

12.2.1.10.1 Oberflächenbehandlung von Formwerkzeugen der FVK-Herstellung: Trennmittel, Reinigungsmittel und Verschleißschutz



Wer selbst in Entwicklung und Produktion von FVK-Bauteilen tätig war weiß von der großen Bedeutung der **Behandlung ausformbeanspruchter Werkzeugoberflächen** (Lit. 12.2.1.10-32). Es wundert deshalb, warum so wenig dazu in Unterlagen zur Lehre zu finden ist. Vielleicht liegt es daran, dass es sich um Know How handelt, welche Medien wie zu verarbeiten sind und welchen Einfluss sie auf Werkzeug und Bauteil haben.

Trennmittel beeinflussen die Fertigung von FVK-Bauteilen entscheidend. Dabei stehen ihre **Verschleißschutzwirkung**, das Verhindern von **Anklebungen** und die **Schmierwirkung**/Gleitfähigkeit zum Minimieren der Reibungskräfte beim Ausformen im Vordergrund. Weiter soll das Trennmittel eine optimale **Oberflächenqualität**/Anmutung (z.B. Glanz) des Bauteils ermöglichen. Vor dem Polieren erleichtern matte Trennschichten das Erkennen ungenügend behandelter Zonen.

Ein Trennmittel soll das Bauteil/Laminat über den **gesamten Aushärtungsvorgang fixieren**. Ein vorzeitiges Ablösen (**Pre-Release**) muss verhindert werden, um Ausschuss zu vermeiden.

- **Fertigungskosten** hängen nicht zuletzt von der **Taktzeit** ab. Diese wird vom Aufbringen und Polieren des Trennmittels sowie der späteren Reinigung von Form und Bauteil und der Zeit für die Ausformung bestimmt.
- Zusätzlich können hohe Kosten durch Reparatur oder Ersatz der **Werkzeuge**/**Formen** auf Grund von '**Verschleiß**' (Lit. 12.2.1.10-28) entstehen. Stumpfe Werkzeuge können die Bearbeitungsflächen schädigen (Kapitel 12.2.1.10.3).
- Schlechte Ausformung kann zur **Beschädigung der Bauteile** führen. Damit entsteht Nacharbeit oder gar Ausschuss.
- **Anhaftendes Trennmittel** kann eine **Nachbehandlung** des Bauteils wie Lackieren verhindern und muss gegebenenfalls **aufwändig entfernt** werden. Bei der Reinigung besteht die Gefahr der **Verschleppung des Trennmittels** (Band 4, Bild 18.3-2.1), wobei Bindefehler an anderen Bauteilen ausgelöst werden.

Man unterscheidet mehrere Trennsysteme:

- **Universelle Formtrennmittel** auf flüssiger oder pastöser Basis die getrocknet, bei manchen Systemen auch heiß gehärtet, und nachpoliert werden. Sie sind bei jedem Takt zu erneuern. Zu berücksichtigen ist, dass häufig die sichere, optimale **Trennwirkung der Form erst nach mehreren Taktzyklen** eintritt. Im günstigen Fall reicht sie dann auf Grund eines dünnen, verbleibenden Films auf der Werkzeugoberfläche für mehrere Entformungen (Lit. 12.2.1.10-31). Wichtig ist, dass

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

möglichst **wenig Trennmittel am Bauteil** verbleibt, um **Nachbehandlungen** nicht zu erschweren. Besonders problematisch können wegen der Verschleppungsgefahr und der Kontamination anderer Bauteile (z.B. Klebeflächen und Lackierungen) Trennmittel auf Silikonbasis sein (Band 4, Bild 18.3-2.1).

- **Semipermanente Formtrennmittel** können ohne Versiegelung der Form auskommen. Günstig für den Umweltaspekt sind solche auf Wasserbasis. Sie bilden nach kurzer Aushärtung einen widerstandsfähigen Polymerfilm (Lit. 12.2.1.10-30) der auf der Form verbleibt und **nicht auf das Bauteil übertragen** wird. Dieser ermöglicht bereits beim einmaligen Auftrag ein **mehrfaches Ausformen**. Ein weiterer Vorteil ist, dass eine Nachbehandlung wie Lackieren keine zusätzliche Reinigung erfordert. Es werden auch lufttrocknende Systeme angeboten die keine Heißaushärtung benötigen und bei denen die Gefahr eines unzulässigen Trennmittelaufbaus in der Form nicht besteht.

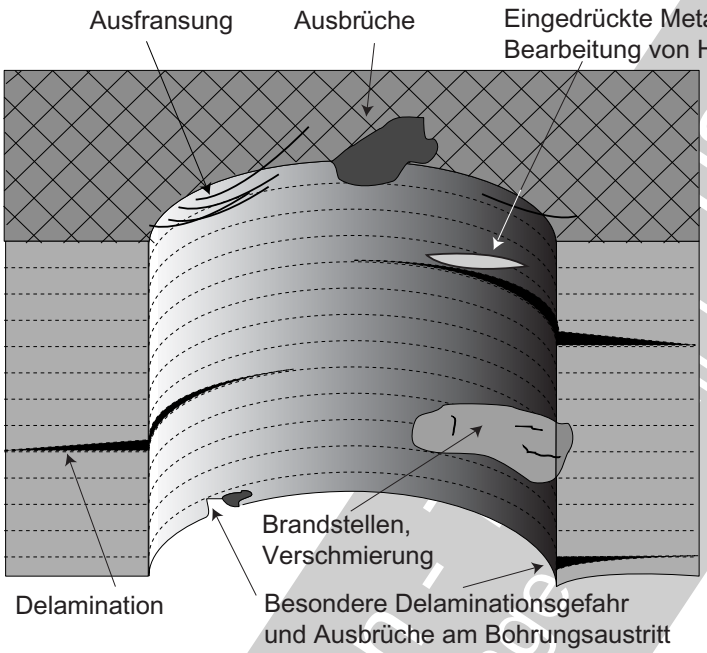
'Release Systeme' werden mit einem vorbereitenden Versiegler oft in mehreren Schichten aufgetragen. Ein solches System nutzt mehrere Hilfsstoffe: Reiniger, Versiegler, Primer und Trennmittel. Besonders bei großen Formteilen mit hohem Gewicht besteht die Gefahr des **'Pre-Release'**, einem vorzeitigen, beschädigungskritischen Ablösen des Bauteils in der Form.

- **Trennfolien** (Lit. 12.2.1.10-32) ermöglichen trennmittelfreies Arbeiten. Es handelt sich um tiefziehfähige Polymerfolien die mit einer **aufgedampften sehr dünnen Trennschicht** versehen sind. Das System lässt sich um ca. 300 % Dehnen. Die nach dem Entformen am Bauteil haftende Folie lässt sich **rückstandslos abziehen**. Das ermöglicht eine Prepregverarbeitung verschiedener Faser-Matrix-Systeme im Autoklaven bis zu 180°C. Vorteile einer auszuschließenden Trennmittelkontamination ist die **Weiterverarbeitung der Bauteile** (z.B. Lackieren, Verkleben) **ohne Nachbehandlung**. Zusätzlich wird eine Formenreinigung von Trennmittelresten gespart. Folien lassen sich bereits in der Form mit einer Schicht (z.B. Lackschicht) versehen. Diese kann mit hoher Oberflächenqualität auf das Bauteil übertragen werden und verbleibt dort nach dem Abziehen der Folie.

- **Metallbeschichtungen** und **metallverstärkte Beschichtungen** (Lit. 12.2.1.10-29): Alle Schichten erfordern zusätzlich eine Trennmittelbehandlung. Ziel ist, den **Verschleiß der Form zu veringern**, d.h. die Standzeit zu erhöhen. Die Schichten sind gerade für Formen aus FVK geeignet, weil die Abscheidungstemperatur niedrig ist. Galvanisch abgeschiedene Schichten eignen sich besonders auf Aluminiumwerkzeugen. Schichtneuentwicklungen (bis 150°C) sind für Werkzeuge aus FVK geeignet und enthalten metallische Verstärkungspartikel. Sie lassen sich lackartig aufzutragen. Diese 0,1 - 0,8 mm starken Schichten haben nicht die Nachteile galvanischer Schichten wie hohe Eigenspannungen/Wärmespannungen (Ablösungsgefahr) und Mikrorissigkeit.

© Axel Bossmann, Hochschule Darmstadt als Bauunterlage nur für Lehrzwecke

12.2.1.10.2 Spanende Bearbeitung von FVK-Bauteilen.



Die spanende Bearbeitung von FVK bedarf Erfahrung und besonderer Werkzeuge, um ein optisch befriedigendes Ergebnis ohne Schädigungen zu erzielen.

Die Zerspanung von FVK erfordert **Faser- und matrixspezifische Werkzeuge** und **Verfahrensparameter** (Lit. 12.2.1.10-35). Gewöhnlich wirken die **Fasern** (C-Faser, Glasfaser und Aramid) sehr verschleißend auf Schneidwerkzeuge, was zu einem **Standzeitproblem** führt. Die Qualität der Schnittfläche, insbesondere der Kanten hängt auch von der Art der **Faserlagen** (Gewebe, Gestricke, uni- oder mehrdirektional) ab. Besonders **Aramid** ist äußerst zäh und neigt zum Ausfransen. Auch die **Matrix** spielt eine wichtige Rolle. Die **schlechte Wärmeleitfähigkeit** führt zu örtlichen **Überhitzungen** (‘Brandstellen’) mit Erweichungen, bleibenden Schädigungen (Versprödung, Rissbildung), Verschmierung und Ablösen der Faserlagen (Delamination). Die Beherrschung der anspruchsvollen Zerspanbarkeit ist eine Voraussetzung für **Reparaturen** und flächige Verbindungen hochbelasteter FVK-Bereiche. Dies erfordert eine **Schäftung,** bei der beide Verklebungsflächen durch Zerspanen (Schleifen, Fräsen) hergestellt werden. Verlangt ist eine extrem gute Oberflächenqualität mit möglichst ungeschädigten Faserlagen und hoher Ebenheit. Das ist eine Voraussetzung für den Einsatz von FVK bei großen Verkehrsmaschinen. Hier ist immer mit örtlichen Beschädigungen wie Delaminationen (z.B. bei der Beladung mit einem Hebefahrzeug) zu rechnen. In letzter Zeit wurden in der Verfahrensentwicklung wichtige Fortschritte unter Verwendung automatischer Fräsbearbeitung mit Robotereinsatz (Lit. 12.2.1.10-34) gemacht.

Beim Zerspanen, insbesondere dem Bohren, werden prinzipbedingt **Fasern angeschnitten**. **Kohlefasern** verhalten sich wie Edelmetalle, sie sind **elektrisch leitend und korrosionsfest**. Das führt mit vielen Metallen zur **Elementbildung**. Beispielsweise sind Niete (Al-Legierungen, Stähle) im Kontakt korrosionsgefährdet. Einzig **Titanlegierungen** werden nicht angegriffen.

Wichtiger Hinweis: Bei der Zerspanung von CFK entstehen **elektrisch leitende Partikel**. Dieser Staub kann in elektronische Geräte (z.B. Steuerungen) oder Elektromotoren über die Kühlung eindringen, sich ansammeln und zum Ausfall führen. Deshalb sind geeignete Absaugungen (Schutz vor Staubexplosion, Band 1 Kapitel 5.11.1) und Filter vorzusehen. Die Bauteile müssen staubfrei sein. Das gilt auch bei der Auslieferung bearbeiteter Teile, um solche Probleme im späteren Betrieb zu vermeiden.

© Axel Rossmann - Institut für Schulungsunterlagen - Lizenz

Zerspanungswerkzeuge (Bohrer, Fräser) für FVK sind hoher Verschleißbeanspruchung ausgesetzt. Dies erfordert eine geignete Geometrie und extreme Härte der Schneiden.

Beispiel:
Kernbohrer mit hartstoffbesetzter Schneide

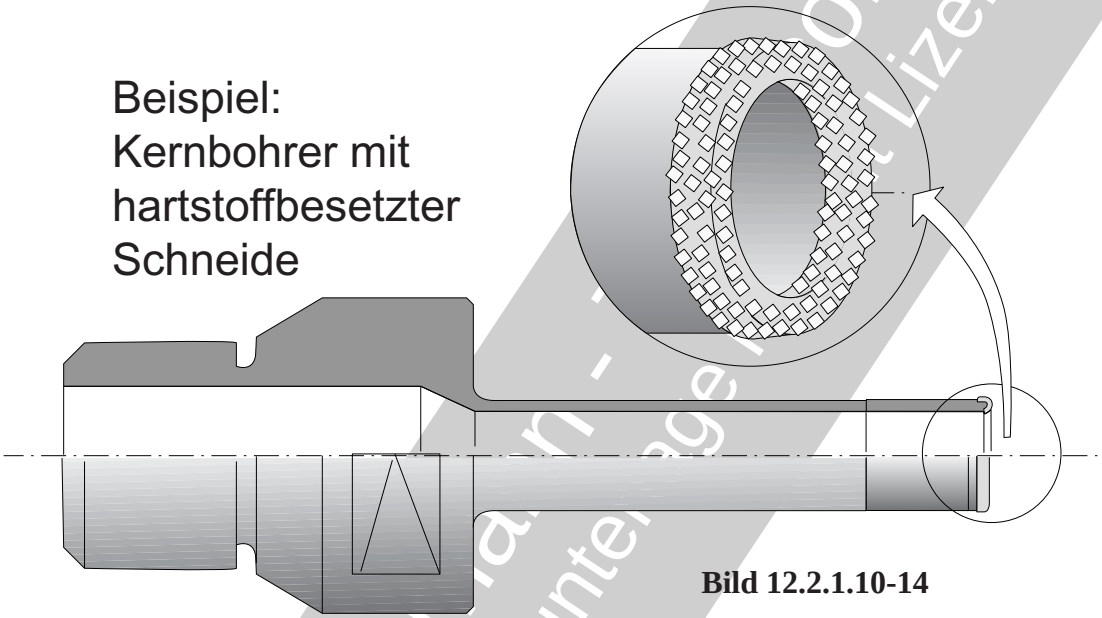


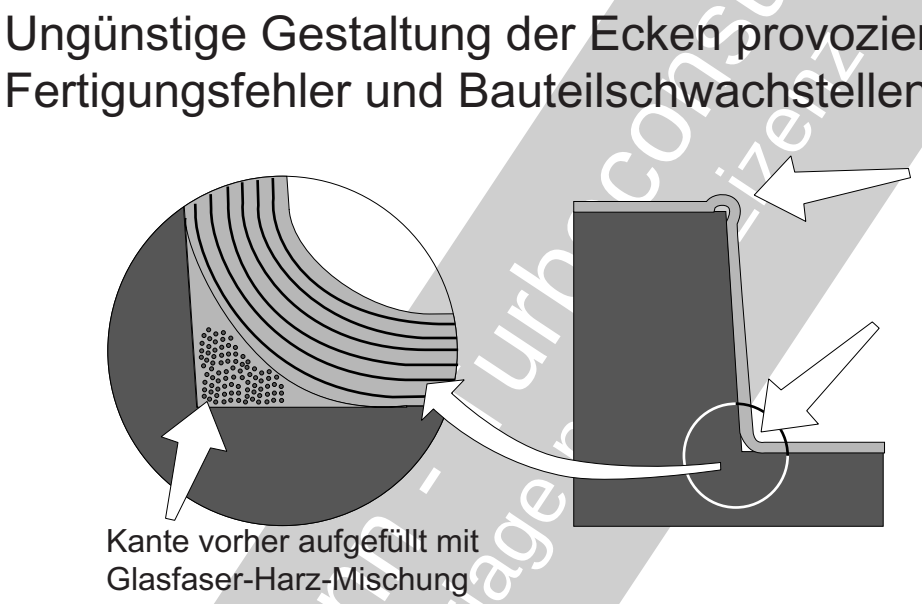
Bild 12.2.1.10-14

Bild 12.2.1.10-14 *(Lit. 12.2.1.10-34 und Lit. 12.2.1.10-36): Die spanende Bearbeitung von FVK erfordert* ***spezifisch angepasste Schneidwerkzeuge*** *wie Bohrer und Fräser.*
Wichtig sind die Schneidfähigkeit und der Spantransport. Je besser das Werkzeug schneidet, umso weniger Wärme entsteht. Das reduziert auch Anhaftungen an den Schneiden, die wiederum eine Wärmeerzeugung unterstützen. Auch die Verschmierung von Harz wird geringer.
Eine besondere Herausforderung sind ***FVK-Metall-Hybridstrukturen*** *(Lit. 12.2.1.10-37) bei denen beide Werkstoffarten in einem Arbeitsgang zerspant werden müssen. Hier ist ein Eindrücken von Metallspänen in die Bearbeitungsfläche zu vermeiden.*
Am Markt werden unterschiedliche Werkzeuge angeboten, welche die Forderungen berücksichtigen.

*- **Kernbohrer**: Die Schnittkante des hohlen Bohrers ist gewöhnlich mit **Hartstoffpartikeln**, insbesondere **Diamantsplittern** belegt. Es gibt jedoch auch Ausführungen mit **Hartmetallschneiden** und besonderer Schneidengeometrie.*
*- **Spiralbohrer** mit **Sichelspitze** oder Schnittwinkeln <= 100 Grad ermöglichen auch am Bohrungsaustritt ein delaminationsfreies Ergebnis.*
*- **Hochleistungs-Kühlkanalbohrer** mit mehreren schneidenden Führungsphasen gewährleisten schadenfreie, hochgenaue Bohrungen.*
*- **Fräser** mit besonderer, multipler Verzahnung nutzen hartstoffbeschichtetes Hartmetall. Das ermöglicht eine vibrationsarme Bearbeitung bei langen Standzeiten.*

© Aal Bossmann - Consult
als Schulungsunterlage Lizenz

12.2.1.10.3 Konstruktive Gestaltung von FVK-Bauteilen und Formwerkzeugen.



Die **Konstruktion** des FVK-Bauteils bestimmt entscheidend **potenzielle Probleme des Fertigungsprozesses**. Eine Voraussetzung für die Realisierung ist es deshalb, bestimmte Grundregeln einzuhalten (Lit. 12.2.1.10-3). Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf der **Formgebung** der Bauteile in Hinblick auf die **Formwerkzeuge**. So sind z.B. zu scharfe Ecken und Kanten häufige Ursache für nicht ausgefüllte Bereiche, Ablösungen der Faserlagen, Harzansammlungen mit Ausbrüchen, Rissen und Verzug. Mit der geeigneten Formgebung lassen sich fertigungsbedingte Fehler und Schwachstellen in den Bauteilen weitgehend vermeiden (Bild 12.2.1.10-15). Die Gestaltung muss natürlich die bauteilspezifische Fertigungstechnologie berücksichtigen. Diese dürften z.B. bei RTM-Werkzeugen (z.B. gute Infiltration des gesamten Formvolumens, Bild 12.2.1.10-12) anders sein als für Laminataufbauten (z.B. Kantengestaltung). Hierzu ist Erfahrung des Konstrukteurs notwendig.

© Axel Rossmann - urb consult als Schulungsunterlage mit Lizenz

Konstruktive Gestaltung nutzt Lehren aus Schäden und Problemen.

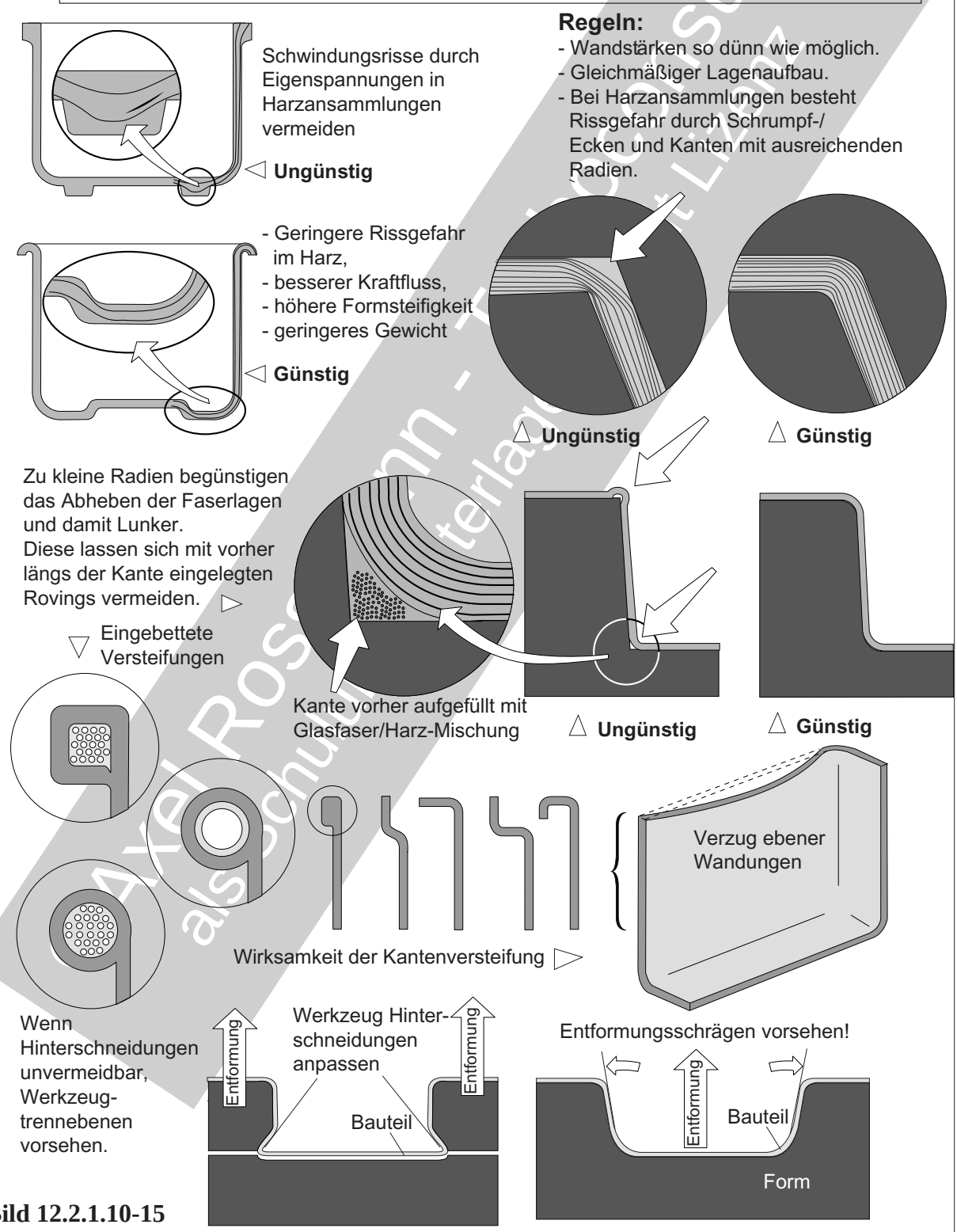


Bild 12.2.1.10-15

Axel Rosemann - Technoconsult als Schulunterlage mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 12.2.1.10

12.2.1.10-1 R.Lässig, M.Eisenhut, A.Mathias, R.T.Schulte, F.Peters, T.Kühmann, T.Waldmann, W.Bergemann, „Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen“, Studie, Sept. 2012, www.rolandberger.de/.../Roland_Berger_Serienproduktion_hochfest, Seite 1-70.

12.2.1.10-2 J.Enz, C.Sigolotto, „Vom Flugzeugbau über den Unimog zu Premium-Fahrzeugen“, „CFK-Strukturbauteile im Automobilbau - Carbon Composites eV“, ACE 1/07 (2007), www.carbon-composites.eu/sites/carbon...eu/.../02_V_af_07.pdf, Seite 1-9.

12.2.1.10-3 W.H.Müller, „Verbundwerkstoffe in der Herstellung; Kenngrößen der Einzelschicht und des Laminats; Gestaltungshinweise“, April 2011, www.ifm.tu-berlin.de/.../Verbundwerkstoffe/.../VL4_Herstellung_, Seite 1-64.

12.2.1.10-4 A.Schmidt, „Neue Fertigungsverfahren für die Großserienfertigung von Faserverbundwerkstoffen im Automobilbau“, Stand Oktober 2012, http://www.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Neue_Fertigungsverfahren_f%C3%..., Seite 1-13.

12.2.1.10-5 „Schrauben aus Kunststoff übertrumpfen solche aus Titan“, VDI Nachrichten, 20.01.2006, http://www.vdi-nachrichten/Schrauben-aus-Kunststoff-uebertrumpfen-solche-aus-Titan/259..., Seite 1-5.

12.2.1.10-6 S.Torstrick, M.Meyer, M.Wiedemann, „Endkonturnahe Fertigung von CFK-Bauteilen in hoher Stückzahl“, 2011, www.dlr.de/.../DLR_Wissenschaftstag 2011_Endkonturnahe_Fertigung, Seite 1-16.

12.2.1.10-7 M.R.Khoshravan, A.Paykani, „Design of a Composite Drive Shaft and its Coupling for Automotive Application“, Journal of Applied Research and Technology, 10.Dez. 2012, cibermetica.ccadet.unam.mx/vol10.../design_2p..., Seite 826 - 834.

12.2.1.10-8 „High Performance Carbon Fiber Driveshafts“, „Advanced Composite Products& Technology, Inc.“, 2008, http://www.acpt.com/Products/Composite-Driveshafts.aspx, 2 Seiten.

12.2.1.10-9 „Simulationsanwendungen von ESI für die Fertigung von Verbundfaserbauteilen“, lightweightdesign, 22.02.2012, http://app.gwv-fachverlage.de/lwd/index.php;do=show/site=lwd/sid=106735801750d850593c10822619..., 2 Seiten.

12.2.1.10-10 B.B.Deshmukh, „Design and Analysis of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Leaf Spring.“, Nov. 2011, http://ieeeplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6120559&url= http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee..., 2 Seiten.

© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.10-11 D.A.Budan, T.S.Manjunatha, „Investigation on the Feasibility of Composite Coil Spring for Automotive Applications.“, ‘World Academy of Science, Engineering and Technology 46 2010’, https://www.waset.org/journals/waset/v46/v46-119.pdf, Seite 662 - 666.

12.2.1.10-12 B.Copping, „Audi saves weight with plastic coil Spring.“, 2012, Zeitschrift ‘Plastic News China’, http://plasticnews.com/china/english/printer_en.html?id=1333118378, 1 Seite.

12.2.1.10-13 R.Aldi, „Static Fixturing and Testing of Torsional Shafts in Combined Loading.“, April 2009, www.asee.org/.../Static-Fixturing-and-Testing-of..., Seite 1-14.

12.2.1.10-14 A.M.Wahl, „The design and manufacture of a spring using composite materials.“, Fa. Lightweight Structures B.V., 2012, www.lightweight-structures.com/...design-and-m..., Seite 1-10.

12.2.1.10-15 K.S.Kim, W.T.Kim, D.G.Lee, „Optimal tubular adhesive-bonded lap joint of the carbon fiber epoxy composite shaft“, Zeitschrift ‘Composite Structures’ Volume 21, Issue 3, 1992, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0263822392900166, Seiten 163 - 176.

12.2.1.10-16 L.Budde, „Technische Innovationen und Trends in der Fügetechnik - Alternativen und/oder Ergänzungen zu Schrauben?“, Vortrag, 15.05.2003, www.fds-online.de/publikationen/vortrag1.pdf, Seite 63.

12.2.1.10-17 „Carbonschrauben“, Firmenangaben Stand Dez. 2012, http://www.carbon-team.de/Ishop,showrub,2004g,d,,carbonschraube,,,.htm, Seite 1-3.

12.2.1.10-18 „Pultrusion“, Stand oct. 2012,http://en.wikipedia.org/wiki/Pultrusion,Seite1-3.

12.2.1.10-19 J.Frischbier, S.Sikorski, „Crisp-Faserverbund-Fanschaufel - Strukturmechanik und Bauweisentechnologie“, Plenarvortrag Nr. 90-174 der ‘DGLR Jahrestagung, Friedrichshafen, 1.-4. Okt. 1990, www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/211510491.pdf, Seite 1-9.

12.2.1.10-20 A.Rossmann, W.Feist, H.Zech,, „Gearbox Casings of Fibre-Reinforced Plastic for Aero Engines“, Vortrag, 1977, Seite 1-18

12.2.1.10-21 A.Rossmann, “Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 3“, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 14.

12.2.1.10-22 A.Rossmann, “Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 2“, 2000, ISBN 3-00-008429-0, ,Kapitel 8.2.

12.2.1.10-23 S.Sikorski, “Anforderungen an FVK-Bauteilen in Flugtriebwerken“, Berlin, Vortrag am 11. Juni zur Konferenz an der ILA 8.-13.06.2010, 8 Folien.

© Axel Rossmann - Turbocosult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.10-24 "Feder-Werkstoffe, Faserverbund wird salonfähig", http://www.drahtmagazin.de/draht-fachartikel/faserverbund_wird_salonfähig_134_de/, Stand Jan. 2013, 2 Seiten.

12.2.1.10-25 S.Sikorski, J.Frischbier, "Betriebsfestigkeit von Leichtbauverdichterschaufeln aus CFK", www.mtu.de/technologies/.../Frischbier_Betriebsfestigkeit.pdf, Seite 1-10.

12.2.1.10-26 S.Sandner, R.Hornfeck, "Experimentelle Untersuchung von Spannungen und Festigkeitseigenschaften an bauteilnahen CFK-Proben und Abgleich mit numerischen Berechnungsverfahren", Dez. 2009, Abschließender Forschungsbericht, opus-bayern.de/ohm-hochschule/volltexte/2010/6/1, Seite 1-51.

12.2.1.10-27 H.Kyobei, K.Konji, S.Jun, S.Junichi, "Development of GE90-115B Turbofan Engine", IHI Engineering Review Vol 37. No. 1, Feb. 2004. www.ihi.co.jp/ihi/file/.../10006_.pdf, Seite 1-8.

12.2.1.10-28 M.Meyer, S.Bürkner, M.Engelhart, D.Jonke, H.Fietzek, O.Rohr, "Verschleißschutz auf CFK-Formen", www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resources/dokumente/.../2004_14.pdf, Seite 1-10.

12.2.1.10-29 "Metallbeschichtung für Formen in der FVK-Verarbeitung", 24.09.2012, Zeitschrift 'Kunststoff Magazin online' http://www.kunststoff-magazin.de/Formenbau/Formprotect/Metallbeschichtung-fuer-Formen-in-der-FV..., Seite 1.

12.2.1.10-30 "Konventionelle Release-Systeme", „Semi-permanente Lösungen für hohe Effizienz", „Interne Formtrennmittel für spezielle Anwendungen", Firmenangaben Stand Anfang 2013, http://www.chemtrend.com/de/mach_anwendung/verbundwerkstoffe/...4 Seiten.

12.2.1.10-31 "Anwendung: Trennmittel", Firmenangaben, Stand Anfang 1013, http://www.muench-chemie.com/produkt-Trennmittel-Mikon-..., 4 Seiten..

12.2.1.10-32 A.-G.Becker, "Trennmittelfreie FVK-Bauteilfertigung durch...-Trennfolie", 20.03.2012, Messemitteilung, http://idw-online.de/pages/de/news?print=1&id=468844, 2 Seiten.

12.2.1.10-33 M.Emonts, H.Janssen, "Neue Technologien der Faserverbundtechnik", 13.12.2011, Fraunhofer OPT, www.wzlforum.rwth-aachen.de/cms/.../vortrag_Emonts_Janssen.pdf, Seite 1-27.

12.2.1.10-33 Ch.Fuchs, „Herstellung von CFK-Leichtbaukomponenten in Autoklav- und Injektionstechnik", www.tuev-sued.de/uploads/images/:::/24_fuchs_d..pdf, Seite 1-10.

12.2.1.10-34 "Lösungen und Ideen-Optimierung in der Zerspanung", Fa. Hufschmied Zerspanungssysteme, Okt. 2012, www.carbon-composites.eu/sites/...eu/.../03hufschmied_ralph.pdf, Seite 1-51.

© Axel Rossmann - Turbocourse
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

12.2.1.10-35 K.Haubert, “Besonderheiten in der Zerspanung von FVK-Bauteilen“, J.Kraus, „Spezieller Hochleistungsfräser für duroplastische FVK-Bauteile“, M.Danielczick, L.Banduch, J.Kraus, „Kompressionswerkzeuge als Schlüssel zum Erfolg“, Zeitschrift ‘MM Maschinenmarkt’, 2011, http://www.maschinenmarkt.vogel.de, compositesworld/ articles/.../, Jeder Beitrag 2 Seiten.

12.2.1.10-36 „Prozesssicheres Bohren und Fräsen von faserverstärkten Kunststoffen“, 2013, www.maschinenmarkt.vogel.de, 1 Seite.

12.2.1.10-37 „Neue Bohrwerkzeuge für die prozesssichere Bearbeitung von CFK/GFK und SPPW“, 2013, http://www.pressebox.de/pressemitteilung/spanabhebende-praezisionswerkzeuge-gmbh/Jetzt-Neue-Boh..., Seite 1 und 2.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Sachregister

© Aßmann - Tuxbo Consult
Nur als Schulungsunterlage im Intranet

A

α-Anreicherung in Titanlegierung 12.2.1.3.1-26
α-case in Titanlegierungen 11.3-15
α-Seigerungen 11.2.2.1-12
Abbrennstumpfschweißen 12.2.1.3.5-2
Abdecken**, Abdeckung**
beim Diffusionsbeschichtung 12.2.1.8-18
mit Getter 12.2.1.8-20
beim Kugelstrahlen 12.2.1.6-13
Bleiband 12.2.1.6-33
beim Lackieren 12.2.1.8-58
gegen Lot 12.2.1.4-15
Schichten für
Diffusionsverfahren 12.2.1.8-15
galvanische Beschichtung 12.2.1.8-49
Abdichtung
Leichtmetallgehäuse 12.2.1.8-60
Schaufelfuß im Verdichter 12.2.1.5-4
Abdiffundieren, Lotzusätze 12.2.1.4-2
Abfangen von Rissen 11.1-6
Abhilfe
gegen Beschichtungsprobleme 12.2.1.8-61
gegen Transportschäden 13-1
gegen Wärmebehandlundsrisse 11.3-27
Lötfehler 12.2.1.4-49
Abkühlgeschwindigkeit /-raten,
beim Lösungsglühen 11.2.1-34
beim Schmieden 11.1-35Abkühlungsraten
beim Lösungsglühen 11.2.1-34
Abkühlungsrisse in Schweißung 12.2.1.3.1-14
Ablagerungen im Prozessbad 12.2.1.7-26
Ablösung eines Lots 12.2.1.4-35
Above-Packverfahren 12.2.1.8-18
Abplatzungen einer thermischen Spritzschicht 12.2.1.8-29
Abpraller, Spritzschicht 12.2.1.8-27
Abrasive Strahlbehandlung/Strahlverfahren 12.2.1.6-1, 12.2.1.6-36, 12.2.1.6-38
Gussteil/Guss 11.1-26, 11.2.1-12, 11.2.1-20
Thermische Spritzschichten 12.2.1.8-38
Abrieb von Werkzeug 12.2.1.7-9
Abriebwuzzeln beim linearen Reibschweißen 12.2.1.3.4-11
Abstimmung, Wärmedehnungen beim Löten 12.2.1.4-4
Abtrag
einer Beschichtung 12.2.1.7-1
Oxidschichten 12.2.1.7-1
Abtrennen,
Schwingermüdung 11.2.1-20
Gusstrauben, 11.1-25
Abziehen
Ätzen 14.1-18
Lack 12.2.1.7-1
Schicht 14.1-13, 14-16
Acrylklebstoffe 12.2.1.5-9
AD. *Siehe* Airworthiness Directive
Additive, oxidierende zur Vermeidung von Wasserstoffaufnahme 12.2.1.7-7
Administrator 14.3-1
Airworthiness Directive 14.3-7
Al-Diffusionsbeschichtung/-schicht, 12.2.1.8-21
Aluminiumkonzentration 12.2.1.8-19
Anbackungen 12.2.1.8-23
Anlauffarben 12.2.1.8-23
Ausbesserung 12.2.1.8-21
Ausplatzungen 12.2.1.8-21
fertigungsbedingte Fehlstellen 12.2.1.8-21
Heat Tint Test 12.2.1.8-23
Hochaktivitätsschicht 12.2.1.8-20
in der Gasphase 12.2.1.8-18
in einer Pulverschüttung 12.2.1.8-18
in Kühlluftkanälen 12.2.1.8-21
Innenbeschichtungen 12.2.1.8-21
Kriechbeschichtung 12.2.1.8-23
Niederaktivitätsschicht 12.2.1.8-20
Oberflächenvorbereitung 12.2.1.8-21
Oxidationsschutz 12.2.1.8-19
Reaktionen mit Lot 12.2.1.8-23
Schichtaufbau 12.2.1.8-21
Schichtrisse 12.2.1.8-21
Schichtstörungen 12.2.1.8-21
Temperaturabhängige Sprödigkeit 12.2.1.8-21
Al-Keramiklack, Kugelstrahlen 12.2.1.6-11
Alitieren 11.2.1-3, 12.2.1.8-2
Alitierschicht. *Siehe* Al-Diffusionsschicht: Oxidationsschutz
Alkoholbäder, Halogenverunreinigung 12.2.1.7-6
Almenintensität 12.2.1.6-7, 12.2.1.6-11
ungeeignete Messposition 12.2.1.6-24
Alterung/Alterungsprozess
Klebeverbindung 12.2.1.5-16
Kühlschmierstoffe 12.2.1.1.2-27
Prozessbad 12.2.1.7-11
Aluminium, Sandguss 11.2.1-2
Aluminiumkonzentration, Diffusionsschicht 12.2.1.8-19
Aluminiumoxid, Werkstoffeinschluss 11.2.2.1-23
Ameisensäure, Wasserstoffversprödung in Ti 12.2.1.7-14
Aminoplaste. *Siehe* Harnstoffkleber : Anlauffarben auf Titanlegierungen 12.2.1.3.1-30

Anaerobe Klebstoffe 12.2.1.5-8
Analyse des Prozesses in FMEA 10-2
Anbackung
Al-Diffusionsschiochten 12.2.1.8-23
an Auflageflächen 12.2.1.8-23
Beschichtungspulver 12.2.1.8-23
Änderung
an Verschleißsystemen 14.1-18
Fertigungsprozess 10-7
Anerkennung eines Reparierers 14.3-7
Anhaftende metallische Spritzer 12.2.1.7-9
Anisotropie
Plattenmaterial 11.1-8
Stangenmaterial 11.1-8
Anlasstemperatur, falsche 11.2.2.1-26
Anlauffarben
Al-Diffusionsschichten 12.2.1.8-23
an Titanteilen 12.2.1.7-24
auf Titanlegierungen 12.2.1.3.1-30
bei Bearbeitung 12.2.1.1.1-14
Schweißung 12.2.1.3.1-30
tramlines 12.2.1.3.1-30
Anlieferungszustand aushärtbarer Legierungen 11.2.1-2
Anodizing. *Siehe* Elektrische Oxidieren
Anorganische Klebstoffe 12.2.1.5-9
Angriff durch Laugen 12.2.1.7-12
Anorganischen Lacke 12.2.1.8-18
Anriss
Fehlergröße, wirksame 11.2.2.1-7
unter der Oberfläche 11.2.2.1-8
Anschmelzen/-ung
an Gussteilen 11.2.1-22, 11.2.1-30
beim Löten 12.2.1.4-11, 12.2.1.4-20
Gefügebestandteile 11.3-15
bei Stromdurchgang 14.1-14
mikroskopische Untersuchung 12.2.1.4-32
Nacharbeit 12.2.1.4-32, 14.1-15
Anstreifbelag auflöten 12.2.1.4-46
Anstreifmerkmale, Labyrinth 14.4-6
Anstreifschicht 12.2.1.8-60
aufgelötet 12.2.1.4-4
aus Silberlot 12.2.1.4-46
Löten 12.2.1.4-13
Anstreifvorgang 11.1-20
Versagen einer Klebeverbindung 12.2.1.5-17
Anwendung
Klebeverbindungen 12.2.1.5-2
thermischer Spritzschichten in Triebwerken 12.2.1.8-25
Arbeitstemperatur. *Siehe* Arbeitstemperatur: Lötung
Hochtemperaturlötung 12.2.1.4-25
Lötung 12.2.1.4-10
Arc burning. *Siehe* Funkenbildung: Stromkontakt
As HIP (Prozess) 11.2.3-3, 11.2.3-5, 11.2.3-7
Atmosphäre, Löten 12.2.1.4-12
Ätzangriff
Auswirkung der Vorbehandlung 12.2.1.7-14
Flussmittel von Lötungen 12.2.1.4-19
Guss 11.2.1-20
Ätzbad 12.2.1.7-1
Auflösung von Lotwerkstoff 12.2.1.7-11
Aussehen von Schädigungen 12.2.1.7-24
Hydridbildung 12.2.1.7-4
Interkristalline Korrosion an Ni-Legierung 12.2.1.7-19
Rückstände 12.2.1.7-11
Schadensmechanismen 12.2.1.7-14
Selektiver Angriff 12.2.1.7-10
Versprödung 12.2.1.7-4
Wasserstoffaufnahme 12.2.1.1.1-12, 12.2.1.7-4
Ätzbehandlung, Gussteil 11.2.1-12
Ätzbild durch Rauigkeitsunterschiede 12.2.1.7-9
Ätzen/-verfahren
Blue Etch Anodizing 11.2.2.1-10
gealterte Bäder 14.1-18
Gefügeeinfluss 14.1-18
Korngrenzenangriff 14.1-18
Probleme 14.1-18
Rauigkeitsanstieg 12.2.1.8-49
Schädigung durch 14-15
Thermische Spritzschichten 12.2.1.8-37
Ätzmittel
Rückstände 11.1-26
in Kühlluftkanälen 12.2.1.7-15
Aufbewahrungskannen 11.2.3-7
Aufdampfschicht 10-13
Auffinden von Schädigungen 14-14
Aufgaben fertigungsrelevante des KLonstrukteurs 10-1
Aufgeschmiertes Fremdmateriel beim Handling 13-12
Aufheizrisse/-bildung beim Elektronenstrahlschweißen 12.2.1.3.1-14, 12.2.1.3.3-7
Aufkohlen 12.2.1.8-2
bei HIP 11.2.3-3
Auflageflächen
Anbackungen 12.2.1.8-23
Handlingschaden 13-12
Auflageschichten, Abplatzen als Handlingschaden 13-10
Aufmaße beim Linearen Reibschweißen 12.2.1.3.4-11
Aufplatzen, Gehäuse 12.2.1.1.2-20
Aufschäumen von Lot 12.2.1.4-20
Aufschmieren
Gefährlichkeit bei Wärmebehandlung 12.2.1.1.1-12
Schleifen 12.2.1.1.1-6
von Bürstenmaterial 12.2.1.1.1-12

© Wegmann - Tutzpatsut
alle Schulungsunterlagen mit Lizenz

von Eingussmassen 12.2.1.7-9
von Fremdmetall 12.2.1.1-8
von Spänen 12.2.1.7-9, 12.2.1.1.2-4
von Vorrichtungen 12.2.1.7-9
Aufschweißen, Deckbandverschleiß an T-Schaufeln 14-10
Aufspritzungen, Wasserstoffversprödung an Titanlegierung 12.2.1.7-18
Ausbesserung von Al-Diffusionsschichten 12.2.1.8-21
Ausblenden (Egalisieren) 14-10
Ausblühungen, Lötung 12.2.1.4-34
Ausbrechen gelöteter Wabendichtung 12.2.1.4-24
Ausbringrate Guss 11.3-2
Ausbruch, Scheibenhöcker 14-25
Ausdampfen von Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-24
Ausfallmusterprüfung 11.1-5
Ausfallsicherheit, Diffusionsschweißung 10-12
Aushärtbare Medien (nichtmetallisch) , Lagerung 13-9
Aushärtbaren Legierungen, Anlieferungszustand 11.2.1-2
Aushärten, Maßänderung bei Nickellegierungen 12.2.1.9-10
Aushärtungszustand 11.1-38
Ausknöpfen, Punktschwießung 12.2.1.3.2-2
Auslaugen, Gusskern 11.2.1-20, 11.1-25
Auslegung 12.2-1
Berücksichtigung von Fehlstellen 11.1-2
Daten/Kennwerte 10-4
Lebensdauer 14-6
Ausplatzungen, Al-Diffusionsschichten 12.2.1.8-21
Ausschussquoten/-raten 11.3-2
akzeptabel 11.1-1
minimieren 11.3-15
Ausschwitzungen bei Lötung 12.2.1.4-20
Außenkanten beschichten 12.2.1.8-58
Aussplitterungen
spröde Schicht 10-13
Auswahl geeigneten Lots 12.2.1.4-15, 12.2.1.4-49
Auswertung
Bauteilversuche 10-6
von Strahlversuchen 12.2.1.6-34
Automatenmaterial, Spanbrecher Sulfide, Blei 11.2.2-3

B

Bäder. *Siehe* Prozessbäder
Baderprobung, Ätzen 12.2.1.7-14
Badewannenkurve 14-3
Badmerkmale, Hinweise auf Badzustand 12.2.1.7-26
Badtemperaturen, Einfluss auf Cr-Schicht 12.2.1.8-47
Badüberwachung 12.2.1.7-14
Badveränderungen 12.2.1.7-4
Badverunreinigung 12.2.1.7-6
Auswirkung auf Haftfestigkeit 12.2.1.7-6
Fluorverbindungen 12.2.1.7-6
Gleitschichten 12.2.1.7-6
Halogene in Alkoholbädern 12.2.1.7-6
Trennmittel 12.2.1.7-6
Badverwechslung 12.2.1.7-26
Baumringe. Gefügemerkmal, *Siehe* Tree Rings
Bauteil
Belastung, Einfluss vom Flugplatz 14-22
Festigkeit, Schädigende Einflüsse 12.2-3
Funktion, Fertigungsbeeinflusst 12.2-3, 12.2-5
Geometrie, Einfluss auf Gussfehler 11.3-8
Lebensdauer 14-22
Sicherheit 10-1
Tests, Nachweise 10-6
Verhalten 14.2-3
Versuche, Auswertung 10-6
Weiterverwendung 10-2
Zonen
Gefügeoptimirerung 11.2.1-12
schweißgeeignet 12.2.1.3.1-2
BEA. *Siehe* Blue Etch Anodizing
Beanspruchun, Gehäuse 14.1-6
Bearbeitung
Anlauffarben 12.2.1.1.1-14
Dämpfungsmaßnahmen 10-8
Entstehen von Oberflächenmuster 11.2.1-3
Überhitzung 12.2.1.1.1-14
Vibrationen 11.2.1-3
Bearbeitungsmaschine
Stillstand 12.2.1.1.2-31
Veränderung 10-2
Bearbeitungsriefen
Gehäuseplatzer 12.2.1.1.2-21
Riss an Brennkammergehäuse 12.2.1.1.2-20
Rissbildung bei Wärmebehandlung 11.1-40
Bearbeitungsstaub in porösen Schichten 12.2.1.8-9
Bedeckungsgrad, Kugelstrahlen 12.2.1.6-7
Behälter
beschädigte Kennzeichnungen 13-10
Farbmarkierungen 13-10
Lagekennzeichnung 13-10
Behinderte Wärmedehnung 11.1-22
Behörden, Entwicklung von Reparaturverfahren 14.3-1
Beladung,
durch Partikel, z.B. Strahlen 12.2.1.6-37 11.2.1-12, 12.2.1.3.1-30, 12.2.1.7-14
Einfluss auf Thermische Spriztschicht 12.2.1.8-27
Belastung
Kraftgesteuert 11.2.1-31
Richtung, Blech 11.1-8

© Axel Rossmann - Turbocontrol
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Benetzbarkeit/Benetzung
Ätzen, Verhalten 12.2.1.7-24
Beeinflussung durch Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-24
Lötung 12.2.1.4-8
Temperatur, Löten 12.2.1.4-13
Verbesserung durch Oxidstrahlen 12.2.1.6-37
Beraterfunktion durch Zulassungsbehörde 14.3-3
Beschädigungsursache, Ermittlung 13-3
Beschaffung
des Halbzeugs 11.1-1
Rohteil 11.1-1
Beschichtung
Abtrag 12.2.1.7-1
Alitieren 12.2.1.8-2
anorganischer Lacke 12.2.1.8-18
Aufkohlen 12.2.1.8-2
Betriebsverhalten 12.2.1.8-4
Blasenbildung 12.2.1.6-23
Cr-Warzen an Cr-Diffusionsschicht 12.2.1.8-17
Diffusionsschichten 12.2.1.8-2
Diffusionsverfahren 12.2.1.8-15
Eigenschaften von Diffusionsschichten 12.2.1.8-17
Elastomere 12.2.1.8-58
Einfluss auf das FOD-Verhalten 14.1-13
Einsatzhärten 12.2.1.8-15
Elementbildung 14.1-13
Haftfestigkeit 12.2.1.8-11
Haftfläche, Gratspitzen 12.2.1.8-48
Haftschicht 12.2.1.8-5
Inchromieren 12.2.1.8-2
Neuteile 10-13
Nitrieren 12.2.1.8-2, 12.2.1.8-15
Prozesskontrolle 12.2.1.8-5
Reparatur 14.2-3
Reparaturteile 10-13
Schichtdicke 12.2.1.8-5
Verfahren 12.2.1.8-1
Abdecken von Diffusionsschichten 12.2.1.8-15
Alitieren 12.2.1.8-15
Borieren 12.2.1.8-15
Chemische Verfahren 12.2.1.8-2
CVD 12.2.1.8-3
Diffusionsbeschichten 12.2.1.8-3
Diffusionsschichten 12.2.1.8-2
Emaillieren 12.2.1.8-3
Galvanische Verfahren 12.2.1.8-2
Inchromieren 12.2.1.8-15
Ionenplattieren 12.2.1.8-3
PVD 12.2.1.8-3
Sputtern 12.2.1.8-3
Thermisches Spritzen 12.2.1.8-3
von Außenkanten 12.2.1.8-58
Wärmefluss 12.2.1.8-5
Wasserstoffversprödung beim Kadmieren 12.2.1.8-13
ZfP 12.2.1.8-5
Beschichtungsatmosphäre, Einfluss auf Lot 12.2.1.4-34
Beschichtungsgefäße, Verzug 11.3-27
Beschichtungsprobleme, Abhilfen 12.2.1.8-61
Beschichtungspulver, Anbackung 12.2.1.8-23
Betriebsbelastung
Einfluss auf Reparatur 14.2-3
spezifische 14-8
Betriebseigenschaften, Klebeverbindung 12.2.1.5-14
Betriebseinflüsse
auf Klebeverbindungen 12.2.1.5-1
Beeinflussung von Thermoelementen 12.2.1.9-13
Betriebsenvelope 14.4-5
Betriebskarte 12.2.1.1.2-4
Betriebstemperatur
kugelgestrahlter Bauteile 12.2.1.6-13, 12.2.1.6-21
zulässige bei Lötung 12.2.1.4-23
Betriebsverhalten
Einfluss von Fertigungsfehlern 12.2-5
Lötung 12.2.1.4-16
Nachweis durch Erprobung 14.4-1
Risswachstum 10-4
Thermische Spritzschichten 12.2.1.8-28
von Schichten 12.2.1.8-4
Betriebszeiten, Streuung bei Werkstofffehlern 11.2.1-23
Beule nach Wärmebehandlung 11.2.2.1-25
Beurteilungskriterien, Schweißbarkeit 12.2.1.3.1.1-4
Bewegungsdichtungen, Handlingschaden 13-10
Bewerten
Kriterium, Diffusionsschweißfehler 12.2.1.3.5-8
von Bearbeitungsspänen 12.2.1.1.2-6
Billet 11.1-26, 11.1-32. *Siehe auch* Stöckel
Bindefehler
Elektronenstrahlschweißen 12.2.1.3.3-12
in Diffusionsschweißungen 12.2.1.3.5-2
Lötung 12.2.1.4-7, 12.2.1.4-16
Reibschweißen 12.2.1.3.4-8
Binder in Loten 12.2.1.4-15
Blasen
einer Beschichtung 12.2.1.6-23
Blasenbildung
in Prozessbad 12.2.1.7-26
Blasting. ***Siehe*** **Strahlverfahren**
Blechdicke
Einfluss auf das Betriebsverhalten 12.2.1.3.2-5
Blechen
Belastungsrichtung 11.1-8
Blechkonstruktionen
Besonderheiten 12.2.1.3.2-5
Blei
Werkstoffbeeinflussung 11.1-23
Bleiband
Abdeckung beim Kugelstrahlen 12.2.1.6-33

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Blind Spot, Ultraschallprüfung 11.2.2.1-10
Blitzschlag 14.4-5
Blue Etch Anodizing 11.2.2.1-10, 11.2.2.1-13, 12.2.1.1.2-15
Bogus Parts
Schrauben 12.2.1.8-51
Bohren 12.2.1.1.2-1
Fanscheibenbruch 12.2.1.1.2-10
Fanscheibenschaden 12.2.1.1.2-14
Fanscheibenschaden im Zusammenhang mit 12.2.1.1.2-15
Fanscheibenschaden im Zusammenhang mit Spänestau 12.2.1.1.2-15
Schädigung Coverplate 12.2.1.1.2-18
Schwer anätzbare Zone 12.2.1.1.2-18
Wärmeeinflusszone 12.2.1.1.2-18
Bohrer
Bruch mit Scheibenschaden 12.2.1.1.2-18
Bohrerbruch
Fanscheibenschaden 12.2.1.1.2-15
Bohrung
Druckstelle 12.2.1.1.2-18
Einflüsse der Zerspanung 12.2.1.1-11
mit Rattermarken 12.2.1.1.2-15
Schaden in Cover plate 12.2.1.1.2-18
Schädigung in Nickellegierung 12.2.1.1.2-18
Strahlvorrichtung 12.2.1.6-28
visuelle Inspektion 12.2.1.1.2-15
Wirbelstromprüfung 12.2.1.1.2-18
Bond-line defect 12.2.1.3.5-8
Borieren 12.2.1.8-15
Bornitrid, Einfluss auf Reibschweißen 12.2.1.3.4-8
Brandgefahr ölbasierter KSS 12.2.1.1.2-2
Brazing. *Siehe* Löten
Brennkammer
Gehäuse 14.1-6
Riss von Bearbeitungsriefen 12.2.1.1.2-20
Mantel
Schweißfehler 12.2.1.3.1-7
Versatz 12.2.1.3.1-8
Reparaturschweißung 14.1-4
Brinelling beim Transport 13-12, 13-15
Bruch
einer Turbinenscheibe
Werkstofffehler 11.2.2.1-21
einer Verdichterscheibe 12.2.1.8-52
Tannenbaumfuß einer Schaufel 14-27
Bruchbild 14.4-7
Brüche von Schrauben, Merkmale 0-5
Bruchflächenuntersuchung, mikroskopisch 14.4-7
Bruchmechanischen Abschätzung, Länge von Schweißrissen 14.4-11
Bruchverlauf, Hinweis auf Haftfestigkeit 12.2.1.8-11
Brünieren
Kugelstrahlen 12.2.1.8-11
Rissbildung 12.2.1.8-11
Spannungsrisskorrosion 12.2.1.8-57, 14-20
Zahnräder 12.2.1.8-56
Büchsendeckeleffekt, Kugelstrahlen 12.2.1.6-24

C

Cadmium. *Siehe* Kadmium, Wasserstoffversprödung 12.2.1.8-13
Carbonitridseigerung 11.2.2.1-22
Casting Billets. *Siehe* Billets
Casting Salvage 11.3-15. *Siehe auch* Ausschussrate: minimieren
Cer und Lanthan
Seigerung in Ni-legierung 11.2.2.1-19
Verunreinigung, Bruch einre Turbinenscheibe 11.2.2.1-19
Chargen, eingrenzen bei Schaden 11.2.1-35
Chargiergestell, Thermoermüdung 11.3-27
Chatter marks. *Siehe* Rattermarken
Chemical Vapor Deposition. *Siehe* CVD
Chemische Verfahren 12.2.1.8-2, 12.2.1.8-40
Stromlos Vernickeln 12.2.1.8-40
Chip, Schleifkörper 12.2.1.1.1-14
Chlor/Cl
in Kühlschmierstoffen 12.2.1.1.2-21, 12.2.1.1.2-26
Chlorverbindungen
Bäder 12.2.1.3.4-9
Beeinflussung von Titanwerkstoffen 12.2.1.7-17
in Prozessbädern 12.2.1.7-6
Reinigungsmittel, SpRK an Titanlegierungen 12.2.1.3.1-29
Verunreinigung in Methanol 12.2.1.7-17
Cleavage. *Siehe* Spaltflächen: in Titanlegierungen
Computergesteuerte Formgebung 12.2.1.3.5-3
Containment
Einfluss einer Schweißung 12.2.1.3.1-3
Energieaufnahme 14.1-4
Funktion 14.1-4
für Feuer 14.1-4
Klebeverbindung 12.2.1.5-14
Verhalten 14.4-5
Corner cracks (Eckenrisse) 10-4
Cover plate (Zusatzverdichter)
Schaden von Bohrung 12.2.1.1.2-18
Cr-Diffusionsschicht, Cr-Warzen 12.2.1.8-17
Cr-Schicht
als Gleitfläche 12.2.1.8-42
Eigenspannungen 12.2.1.8-43
Einfluss der Badtemperaturen 12.2.1.8-47
Kugelstrahlen 12.2.1.8-43
Rissbildung 12.2.1.8-7
Rissnetzwerk 12.2.1.8-43
Schwingfestigkeit 12.2.1.8-43, 12.2.1.8-46
Überschleifen 12.2.1.8-7
Wärmebehandlung 12.2.1.8-47

© Axel Rossmann - Turbosonsult
für Schulungsunterlagen mit Lenz

Warzenbildung 12.2.1.8-48
ZfP 12.2.1.8-5
Cr-Stahl, Spannungsrisskorrosion 11.2.2.1-26
Cr-Warzen an Cr-Diffusionsschicht 12.2.1.8-17
CVD (Chamical Vabpour Deposition) 12.2.1.8-3, 12.2.1.8-19
Cyanoacrylat Klebstoffe 12.2.1.5-7

D

δ-Phase 11.2.1-34
Dämpfungsmaßnahmen bei Bearbeitung 10-8
Dauerfestigkeit
Galvanischer Beschichtungen 12.2.1.8-46
Hartverchromung 12.2.1.8-43
Deckbänder
Turbinenschaufeln 11.2.1-29
Verschleiß
Aufschweißen 14-10
T-Schaufel 14.1-21
Deckel für Transportbehälter 13-8
Definition
Schwachstellen 11.1-2
Werkstofffehler 11.1-2
Dendriten 11.1-25
Dendritischer Fehlertyp
im Ni-Schmiedematerial 11.3-20
White Spots 11.1-31
Department of Defense Handbook 14.4-4
DER. *Siehe* Designated Engineering Representative
Design lines 10-4
Designated Engineering Representative 14.3-1, 14.3-3
Detonationsspritzen 12.2.1.8-24
DFW. *Siehe* Diffusionsschweißen
Dichtung Kleben 12.2.1.5-2
Diffusion
Lötung 12.2.1.4-23
von Fremdmetallen in Schrauben 0-5
Diffusion welding. *Siehe* Diffusionsschweißen
Diffusionsbeschichten/-ung 12.2.1.8-3, 12.2.1.8-15
Abdeckungen 12.2.1.8-18
Alitieren 12.2.1.8-15
Beeinflussung durch Oxidstrahlen 12.2.1.6-37
Borieren 12.2.1.8-15
Einsatzhärten 12.2.1.8-15
Inchromieren 12.2.1.8-15
Nitrieren 12.2.1.8-15
Diffusionsglühen, Stahlguss 11.2.1-9
Diffusionslöten 12.2.1.3.5-2
Diffusionsschicht/-en 10-13, 12.2.1.8-2, 12.2.1.8-5, 14.1-13
Abdeckschichten 12.2.1.8-15
Schwingfestigkeit 12.2.1.8-18
spezifische Eigenschaften 12.2.1.8-17
Diffusionsschweißen 10-12, 12.2.1.3-1, 12.2.1.3-3, 12.2.1.3.5-1
Ausfallsicherheit 10-12
Beeinflussung durch Oxidstrahlen 12.2.1.6-37
Bewertung von Fehlstellen 12.2.1.3.5-8
Bindefehler 12.2.1.3.5-2
in Fanschaufel 12.2.1.3.5-8
Einfluss von Maßänderungen 12.2.1.9-12
Fanschaufelbruch 12.2.1.3.5-7
Fehler in Titanlegierung 12.2.1.3.5-7
Fertigungsprozess 12.2.1.3.5-2
Gekühlte Wände in 12.2.1.3.5-3
Gestaltung 12.2.1.3.5-2
mit HIP-Presse 12.2.1.3.5-4
Sandwichbauweisen 12.2.1.3.5-1
Titanlegierungen 12.2.1.3.5-2
Turbinenrad 12.2.1.3.5-6
Diffusionsverbindung 12.2.1.3.5-4
Auswirkung einer Oxidhaut 12.2.1.3.5-4
Klebestelle 12.2.1.3.5-4
Diffusionszonen, Lötung 12.2.1.4-24
Directionally solidified. *Siehe* gerichtet erstarrt
Dirty White Spots 11.1-31
Diskreter Fehlertyp, Seigerungstyp 11.1-30
im Ni- Schmiedematerial 11.3-20
Dispersionsklebstoffe 12.2.1.5-7
Dokumentation, Lage im Rohmaterial 11.3-18
Dopplung 11.2.2-5, 12.2.1.3.1.1-2
in Schmiedeteilen 11.2.2.1-25
Ursache Gasblasen 11.2.2.1-25
Double Sourcing (zwei Bezugsquellen) 11.1-5
Drehen 12.2.1.1.2-1
Dross 11.2.1-18, 11.2.1-29, 11.2.2.1-19, 11.2.2.1-22
Erscheinungsform 11.2.1-18
Druckgefäß, Gehäusewandung 11.1-8
Druckguss 11.2.1-14
Lunker 11.2.1-14
Oxidhäute 11.2.1-16
Poren 11.2.1-14
Seigerungen 11.2.1-16
Druckrost. *Siehe* Fretting
Druckstelle in Bohrung 12.2.1.1.2-18
Dry blasting. *Siehe* Trockenstrahlen
DTF. *Siehe* Dwell Time Fatigue
Dual Property 11.1-10, 12.2.1.3.5-6
Durchflussmessung, Kühlluftkanäle 12.2.1.8-21
Durchschmiedung 11.2.2-5
Duty cycles. *Siehe* Lastzyklen
Dwell Time (Haltezeit) 11.2.2.1-15
Dwell Time Fatigue/Dwelltime Fatigue 12.2.1.3.1-12, 11.2.2.1-17

E

E-Modul

© Axel Bossmann - Turbomotor
als Schulungsunterlage nur im KMZ

Gerichtet erstarrter Werkstoff 11.2.1-25
Schwingfestigkeit einer Thermischen Spritzschicht 12.2.1.8-34
EB-Schweißen 12.2.1.3.3-1
EBW. (Electic Beam Welding), *Siehe* Elektronenstrahlschweißen
ECM. *Siehe* Elektrochemische Bearbeitung
Edelrost. *Siehe* Fretting
Eigenschaften
Reparaturlötung 14.1-9
von Diffusionsschichten 12.2.1.8-17
Eigenspannungen 12.2.1.3.1-3
Abbau 14.1-4
bei der Wärmebehandlung 11.1-38
Cr-Schicht 12.2.1.8-43
durch Zerspanung **12.2.1.1.2-5**
Fertigung 10-4
Galvanische Schicht 14.1-11
in einer Schweißnaht 12.2.1.3.1-24
in einer spanend bearbeiteten Fläche 12.2.1.1-7
in thermischer Spritzschicht 12.2.1.8-29
Kugelstrahlen 12.2.1.6-9
Messungen, Kugelstrahlen 12.2.1.6-34
Schleifen 12.2.1.1.1-2
Schmieden 11.1-32, 11.2.2-3
Thermische Spritzschicht 12.2.1.8-24
vom Richten 11.1-39
vom Schmieden 11.2.2.1-4
Zerspanung 12.2.1.1-11
Einatmen von KSS-Nebel 12.2.1.1.2-31
Einbrandkerbe 12.2.1.3.1-5, 12.2.1.3.1-9
Eindringprüfung
ätzen zur Rissöffnung 12.2.1.7-2
Auswirkung von Silikonen 12.2.1.1.2-24
Schicht 12.2.1.8-5
Schichtübergang 12.2.1.8-53
Thermische Spritzschichten 12.2.1.8-38
Versagen 11.2.2.1-19, 12.2.1.1.2-15
Eindringsprüfung, Versagen 11.2.2.1-12
Eingedrückte Späne 12.2.1.1-8
Eingussmasse, Aufschmierungen 12.2.1.7-9
Einkristall (Einkorn) 11.1-25, 11.2.1-26
Fehlkörner 11.1-25
Freckles 11.2.1-27
Guss
Rekristallisation 11.2.1-27
Sliver 11.2.1-27
Zebras 11.2.1-27
Korngrenzeneinfluss 11.2.1-27
Kornstrukturfehler 11.2.1-27
Mikroseigerungen 11.2.1-27
Rissfortschritt 11.2.1-26
Thermoermüdung 11.2.1-26
Einlaufbelag/-schicht
einkleben 12.2.1.5-2,. 12.2.1.5-12
Silikongummi 12.2.1.5-4
Verhalten, Beeinflussung duch Nacharbeit 12.2.1.8-9
Einsatzgehärtete Zahnräder, Wasserstoffversprödung 1.2.1-3, 12.2.1.8-13, 112.2.1.8-15
Einsatzgrenzen von Reparaturen 14.4-5
Einsatzhärten 12.2.1.9-8
'Durchschlagen' der Abdeckung 12.2.1.8-18
Schichten, Schwingfestigkeit 12.2.1.8-18
Einschlüsse in Gussteilen 11.2.1-29
Einspritzdüse, Schaden 14-24
Einzelfall, Problematik 14-20
Eisen
Anreicherung, Hinweis auf Werkzeugschaden 12.2.1.1.2-10
Einfluss auf Ti-Schweißungen 12.2.1.3.1-29
Verunreinigungen durch Eisen, Wasserstoffaufnahme in Ti 12.2.1.7-7
Wasserstoffversprödung an Titan 12.2.1.7-18
EK. *Siehe* Einkristall
Elastomer
Auflagen Kleben 12.2.1.5-3
Beschichtungen 12.2.1.8-58
Schädigung in Prozessbädern 12.2.1.7-23
Schichten 12.2.1.8-3
Haftfestigkeit 12.2.1.8-13
Electron beam welding. Siehe Elektronenstrahlschweißen
Elektrische Kontaktierung (Galvanik) 12.2.1.7-21
Elektrisch Oxidieren 12.2.1.8-2
Elektrochemische Verfahren, Werkstoffeinfluss 11.1-14
Elektronenstrahlschweißen 12.2.1.3-1, 12.2.1.3-2, 12.2.1.3.3-1, 12.2.1.3.3-4
Aufheizrissbildung 12.2.1.3.1-14, 12.2.1.3.3-7
Auslenkung des Schweißstoßes 12.2.1.3.3-12
Bearbeitung der Stoßflächen 11.1-38
Beispiele für Serienanwendung 12.2.1.3.3-1
Fehler/Fehlstellen 12.2.1.3.3-2, 12.2.1.3.3-7
Bindefehler 12.2.1.3.3-12
geeigneter Werkstoffzustand 12.2.1.3.3-9
Gestaltung 12.2.1.3.3-2, 12.2.1.3.3-16
Heißrisse/-felder 12.2.1.3.3-4
LCF-Verhalten 12.2.1.3.3-14
Nahtvorbereitung 12.2.1.3.3-9
Poren 11.1-19, 12.2.1.3.3-12, 12.2.1.3.3-14
Probleme 12.2.1.3.3-2
Querschrumpfung 12.2.1.3.3-12
Risse 12.2.1.3.3-4
durch SpRK 12.2.1.7-18
Spaltbildung am Stoß 12.2.1.3.3-11
Spikes 12.2.1.3.1-23, 12.2.1.3.3-6, 12.2.1.3.3-7
Spröde Phasen 12.2.1.3.3-4
Titanlegierung 12.2.1.3.3-14
Überschweißen 12.2.1.3.3-9
ungewollte Strahlablenkung 12.2.1.3.3-9
Ursachen für Fehler 12.2.1.3.3-9

© A. Rossmann - Turbomaschinen
abschulungsunterlagen mit Lizenz

Verfahrensvorteil 12.2.1.3.3-2
Vorrichtungen 12.2.1.3.3-1
Warmrissbildung 12.2.1.3.1-21
Werkstoffe
Reinheit 12.2.1.3.3-6
Kombinationen 12.2.1.3.3-4
Wiederaufschmelzrisse 12.2.1.3.1-14
Zahnradwelle 12.2.1.3.3-15
zulässige Porengrößen 12.2.1.3.3-14
Zusatzwerkstoffe/Zwischenlage 12.2.1.3.3-4
Elektronischer Regler *Siehe* Digitaler Regler 14-6
Elektrostatische Verfahren Lackieren 12.2.1.8-58
Elementbildung
bei Beschichtung 14.1-13
durch Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-24
mit Lot 12.2.1.4-4
Elephant Tail 12.2.1.6-6
Eloxalschichten 12.2.1.8-2
Emaillieren 12.2.1.8-3
Empfehlungen für das Schweißen 12.2.1.3.1.1-5
Emulsion
Korrosionsgefahr 12.2.1.1.2-29
Öl-Wasser 12.2.1.1.2-29
Salmonellen 12.2.1.1.2-30
Zusammenbruch 12.2.1.1.2-29
Endbearbeitung, handgeführtes Schleifen 12.2.1.1.1-16
Energieaufnahme, Gehäuse 14.1-4
Engine Structural Integrity Program (ENSIP) 14.4-4
Prozessbäder 12.2.1.7-2
Entfettung/-bäder
Inhibitoren gegen Zersetzung 12.2.1.7-17
spätere Rissbildung 12.2.1.7-17
Entfeuchter bei Lagerung 13-14
Entformen
Beschädigung von Gussteilen 11.2.1-29
Guss 11.1-25
Entgraten
Gratbildung 12.2.1.1.1-13
handgeführt 12.2.1.1.1-12
Entlackung, Gussteil 11.2.1-7
Entmischen von Pulvern 12.2.1.8-35
Entschäumer. *Siehe* Tenside: in Waschmitteln
in Kühlschmierstoffen 12.2.1.1.2-22
Mittel 12.2.1.7-6
Entsprödung
bei Wasserstoff 12.2.1.8-14
Zeitspanne 12.2.1.7-29
Entwicklung
Prozessbäder 12.2.1.7-2
Schritte einer Reparaturentwicklung 14.2-1, 14.2-5, 14-12
Zulassung von Reparaturverfahren 14.3-2
zuständige Behörden 14.3-1
EP-Zusätze. *Siehe* Hochdruckzusätze: Kühlschmierstoffe
Konzentration überprüfen in Kühlschmierstoffen 12.2.1.1.2-22
Epoxid Klebstoffe 12.2.1.5-7
Ermüdung ohne Makroriss 12.2.1.1.2-2
Erosion
Einfluss in Wüstengegend 14-10
Hubschraubertriebwerke 14.4-5
Schutz, harte Schichten 12.2.1.8-18
Verschleiß 14.1-12
Erprobung 10-6
einer Reparatur 14.2-1
Lötung 12.2.1.4-50
Nachweis des Betriebsverhaltens 14.4-1
Probleme 10-6
Reparatur 14.2-6
Zerspanung 12.2.1.1.2-7
Erschmelzung 11.1-14
Auskleidungswerkstoff als Fehlstelle 11.2.2.1-23
Cer und Lanthan Zugabe 11.2.2.1-19
Erscheinungsform von Dross 11.2.1-18
Keramischer Filter 11.2.2.1-23
Werkstofffehler 11.2.2.1-10
Erstarrung 11.2.1-14
Phasenänderungen 11.2.1-14
Risse in Schweißung 12.2.1.3.1-14
White-Spots 11.1-31
Erwärmung bei Zerspanung 12.2.1.1-7
Erwartungshorizont bei ZfP 11.2.2.1-5
ES-Schweißen 12.2.1.3.3-1. *Siehe auch* Elektronenstrahlschweißen
ESR-Prozess 11.1-26, 11.1-28
Explosion
Magnesiumstaub 12.2.1.1.2-26
Stäube beim Kugelstrahlen 12.2.1.6-33
Vorbeugung in Werkzeugmaschine 12.2.1.1.2-28

F

FAA (Federal Aviation Administration), Ermessensspielraum 14.3-2
Facettenartige Rissbildung in Titanlegierungen 11.2.2.1-7
Fachbegriffe, Schmieden 11.2.2-1
FADEC. *Siehe* Full Authority Digital Electronic Control
Fahrlässigkeit, Def. grobe 10-5
Fail Safe
einer Lötung 12.2.1.4-49
Lötung 12.2.1.4-19, 12.2.1.4-39, 12.2.1.4-43
False Brinelling. *Siehe* Fretting
Faltenbalg, Löten 12.2.1.4-48
Fanschaufel
Bindefehler in Diffusionsschweißung 12.2.1.3.5-8

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bruch durch Diffusionsschweißfehler 12.2.1.3.5-7
Fanscheibe
Bohrerbruch 12.2.1.1.2-15
Bruch durch Nachpolieren 12.2.1.1.2-19
Bruch, Einfluss "Human Factor" 12.2.1.1.2-15
Bruch nach Fertigunsfehler 12.2.1.1.2-10
Spänestau 12.2.1.1.2-15
Farbmarkierungen, Behältermarkierung 13-10
Faser1
Fasern (Gefüge)
Krümmung 12.2.1.1-7
durch Zerspanung 12.2.1.1-1
Richtung 11.2.2-5
Kritische Risslänge 11.1-8
Verlauf 11.1-3, 11.1-8, 11.2.2.1-2, 11.2.2-5
Werkstoffgefüge 11.1-2
Faserverstärktemetallische Werkstoffe 11.2.3-1
Fe-Abrieb vom Kugelstrahlen 12.2.1.6-25
Federal Aviation Regulation Subtitle 14.3-2
Fehler
beim Kugelstrahlen 12.2.1.6-24
Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-2
Größe in Ni-Guss 11.3-10
In Elektronenstrahlschweißungen 12.2.1.3.3-7
in Reibschweißung 12.2.1.3.4-9
in Schmiedeteilen 11.2.2.1-2
in Titanlegierungen 11.2.2.1-8
Kategorieen in Schmiedeteilen 11.2.2.1-7
Lage und Betriebssicheheit 11.3-20
Typen in Titanlegierungen 11.2.2.1-13
Wahrscheinlichkeit 11.3-21
Fehlkörner im Einkristall 11.1-25
Fehlstelle
White Spot 11.3-20
Zustrahlen 11.2.1-12
Fehlstellen
aus Gussblock in Schmiedeteil 11.1-26
Berücksichtigung in der Auslegung 11.1-2
Einfluss auf LCF 11.3-6
entfernen durch HIP 11.3-15
fertigungsbedingte in Al-Diffusionsschichten 12.2.1.8-21
im Schmiedeteil 11.1-32
Schmiedeverformung 11.2.2.1-8
Feinguss 11.1-23
Feinkorn 11.2.1-12, 11.2.1-14
Schweißung 12.2.1.3.1-14
Fertigteile, Lagerung 13-13
Fertigung
Aufgaben 10-1
Auswirkung von Halbzeugeigenschaften 11.1-13
Eigenspannungen 10-4
auf Schwingfestigkeit 10-4
Einfluss der Gusshaut 11.2.1-5
Einfluss der Härte 11.2.1-2
Einfluss der Korngröße 11.2.1-3
Einfluss von Werkstoffeigenschaften 10-4
Fehler
Einfluss auf das Betriebsverhalten 12.2-5
Kosten 12.2-5
Prestigeverlust 12.2-6
Turbinenschaufeln 12.2-9
hochfeste Werkstoffe 10-3, 10-4
Konstruktive Gestaltung 11.3-2
Probleme, bauteilspezifische 12.2-7
Prozess
Änderung 10-7
Beeinflusung durch Strahlen 12.2.1.6-6
Diffusionsschweißen 12.2.1.3.5-2
stabiler 10-1
Schäden 11.3-1
Mechanismen 12.2.1.1-1
Präventives Vorgehen 11.3-1
Scheibenbrüche 12.2.1.1-4
Stäube als Verschmutzung 13-4
Verschmutzungsgefahr 13-4
Festen-Intervall-Prinzip 14-3
Festigkeit
Abfall beim Schleifen 12.2.1.1.1-9
Beeinflussung durch die Fertigung 12.2-5
einer Lötverbindung 12.2.1.4-16
Einfluss des Kühlschmierstoffs 12.2.1.1.2-22
Einfluss von HIP 11.3-15
Konstruktion von Lötverbindung 12.2.1.4-39
Lot 12.2.1.4-31
Lötung 12.2.1.4-23
Schmiedeeinfluss 11.1-35
Veränderung durch Zerspanung 12.2.1.1-7
Festigkeit/Härte, Beeinflussung der Zerspanung 11.1-13
Feuchtes Schutzgas, Wasserstoffversprödung 12.2.1.3.1-33
Feuchtes Spritzpulver 12.2.1.8-32
Feuchtigkeit
Auswirkung auf Prozesse 12.2.1.7-28
bei Schweißung 12.2.1.3.1-26
Probleme beim Schweißen 14.1-16
Schweißen 12.2.1.3-2
Thermoelement 12.2.1.9-14
Verprödung beim Schweißen 13-4
Feuer, Containment 14.1-4
Filter, Fehlstellen beim Gießen 11.1-23
Filzmetall, Einkleben 12.2.1.5-2
Fingerabdrücke 12.2.1.3.4-9
SpRK an Titanlegierungen 12.2.1.3.1-29
Firmenkultur 13-12
Fischaugen 11.2.2-5, 12.2.1.3.1-33
Entstehung 12.2.1.3.1-35
Fischgrätendiagramm (fishbone diagram) 14.4-11
Fixed Interval Maintenance 14-6. *Siehe auch*

©Axel Rossmann - Turbocoaut
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Festen-Intervall-Prinzip
Fixierung von Lötspalten durch Heftschweißung 12.2.1.3.1-9
Flammpunkt, Kühlschmierstoffe 12.2.1.1.2-27
Flammspritzen 12.2.1.8-24
Flatterschwingungen 14.1-4
Fleetleader
Erprobung einer Reparatur 14.4-2
Prinzip 14-7
Flight envelope. *Siehe* Flugbereich
Flugplatz, Einfluss auf die Bauteilbelastung 14-22
Fluorverbindungen, Badverunreinigung 12.2.1.7-6
Flussmittel
interkristalline Versprödung 12.2.1.4-31
Lötung 12.2.1.4-1, 12.2.1.4-35, 12.2.1.4-6, 12.2.1.4-8, 12.2.1.4-16, 12.2.1.4-19
Einschlüsse 12.2.1.4-7
Nester 12.2.1.4-8
Reste/Rückstände 12.2.1.4-35, 12.2.1.4-20
Spannungsrisskorrosion 12.2.1.4-37
FMEA Analyse 10-2
FOD. *Siehe* Fremdkörpereinwirkung
Resistenz einer Schicht 12.2.1.8-4
Verhalten
beschichteter Teile 14.1-13
spröder Schichten 12.2.1.8-18
Formkerbe 12.2.1.3.1-3
durch Reibschweißen 12.2.1.3.4-9
Kugelstrahlen 12.2.1.6-15
Reibschweißen 12.2.1.3.4-9
Formmassen, Warmrissbildung 11.1-20
Formschluss bei lötung 12.2.1.4-43
FPI. Siehe Eindringprüfung
Fräsen 12.2.1.1.2-1
Zirkularfräsen 12.2.1.1-11
Freckles 11.1-30
Einkristallguss 11.2.1-27
Freie Schwingungen bei Werkzeigmaschinen 12.2.1.1.2-8
Freiformschmieden 11.2.2-1
Fremderregte Schwingungen beim Zerspanen 12.2.1.1.2-8
Fremdkörpereinwirkung 14.4-5
Fremdmetall
Aufschmieren bei Zerspanung 12.2.1.1-8
Schmelze, Eindringen in Schrauben 0-5
Fressen
Späne mit Werkstück 12.2.1.1.2-2
Spuren in Ni-Schicht 12.2.1.8-53
Fretting 12.2.1.6-7, 12.2.1.6-15
in Ultraschallbädern 12.2.1.7-26
Schaufelfüße 14.4-7
Verschleiß, Schaufeldeckband 14.4-7
Friction Welding (FRW) 12.2.1.3.4-1. *Siehe auch* Reibschweißen
Full Authority Digital Electronic Control (FADEC) 14-6
Funken
anhaftende Verunreinigungen 12.2.1.7-9
Bildung
durch stromzuführende Kabel 12.2.1.8-49
in Prozessbädern 12.2.1.7-26
Stromdurchgang 14.1-14
Stromkontakt 12.2.1.8-49
Elektrische Kontaktierung 12.2.1.7-21
Schleifen 12.2.1.1.1-6
Fußplattform (Turbinenschaufel) , Korrosion durch Staubablagerungen 14-18
FVK, Verunreinigungen 12.2.1.7-6

G

γ'-Phase, Schmieden 11.2.2.1-4
Gabelstapler, Transportprobleme/-risiken 13-1, 13-12
Galling. *Siehe* Fressen
Galvanische Beschichtung/Schicht
Abdeckung 12.2.1.8-49
Dauerfestigkeit 12.2.1.8-46
Eigenspannungen 14.1-11
Grat 12.2.1.1.1-7
Nickelschicht 10-13
Schwingfestigkeit 14.1-11
Stromanschlüsse 12.2.1.8-49
Verfahren 12.2.1.8-39
Kathodische 12.2.1.8-39
Verhalten von Kerben 12.2.1.8-46
Ganzmetallfolien, Lötung 12.2.1.4-15
Garantielebensdauer 14-6
Gasaufnahme
beim Schweißen 12.2.1.3.1-29
bei Ti-Legierungen
Thermisches Spritzen 12.2.1.8-25
von Metallschmelze 12.2.1.3.1-26
Gasblasen 11.2.2-5
Ursache für Dopplung 11.2.2.1-25
Gasporen 11.1-19
in der Pulvermetallurgie 11.2.3-9
in Leichtmetallguss 11.2.1-7
Gealterte Prozessbäder 14.1-18
Gefährdungspotenzial, Maschinenbrand 12.2.1.1.2-28
Gefüge
Abweichungen 12.2.1.7-10
Änderung
Massänderung 12.2.1.9-8
Volumenänderungen 12.2.1.9-8
Charakteristiken 11.1-6
Einfluss
auf das Verhalten beim Ätzten 14.1-18
auf die Qualitätssicherung 11.1-14

© Axel Rossmann - Turbomsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

der Wärmebehandlung 11.1-10
des Schmiedeprozess 11.1-10
Kerben (Gefügekerbe) 12.2.1.3.1-3
Optimirerung in Bauteilzonen 11.2.1-12
Richtung/Orientierung 11.2.2.1-2
Schädigung durch Zerspanen 12.2.1.1.2-6
Schmieden 11.1-35
Untersuchung, Sauerstoffaufnahme von Titanlegierung 12.2.1.3.1-31
Veränderung
an T-Schaufeln über Langzeit 14-10
durch Zerspanung 12.2.1.1-7
Versprödung 11.1-40
Gehäuse
Ablösen von Gusshaut 11.2.1-18
aufplatzen 12.2.1.1.2-20
Betriebslasten 14.1-6
Energieaufnahme 14.1-4
Kraftstoffpumpe 11.2.1-8
Reparaturfähigkeit 14.1-4
Reparaturschweißung 14.1-4
Wandung, Druckgefäß 11.1-8
Gekühlte Wände bei computergesteuerter Formgebung 12.2.1.3.5-3
Genauigkeit, Probleme zu hoher 14.1-24
Geometrie, Auswirkungen auf Bruchbild 14.4-7
Gerichtet erstarrter Werkstoff 11.1-25, 11.2.1-25
E-Modul 11.2.1-25
LCF-Risse 11.2.1-26
Thermoermüdung 11.2.1-25
Gesenkschmieden 11.2.2-1, 11.2.2-3
Gesetz von Murphy 11.3-25
Gestaltung
Diffusionsschweißen 12.2.1.3.5-2
Elektronenstrahlschweißen 12.2.1.3.3-16
Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-2
Gießtechnische 11.2.1-7
Gussteil 11.2.1-5
Herstellungsgerecht 10-9
Klebeverbindung 12.2.1.5-10
Lotdepot 12.2.1.4-44
Lötung 12.2.1.4-39
Getter als Abdeckung 12.2.1.8-20
Gewinde, Gleitbeschichtung 12.2.1.8-43
Gießen
aus dem Filter 11.1-23
Bedingungen, Warmrissbildung 11.1-20
Fehler in Schmiedeteilen 11.1-15
Gestaltung 11.2.1-7
Kaltschweiße 11.2.1-20
Schädlicher Metalle 11.1-23
Glasperlenstrahlen, 12.2.1.6-12
als Haftfestigkeitsprüfung 12.2.1.6-23
Glätten
einer Schicht 12.2.1.8-7
gestrahlter Flächen 12.2.1.6-33
Gleitbeschichtung/ Gleitschichten
Badverunreinigung durch 12.2.1.7-6
Gewinde 12.2.1.8-43
Gleitfläche, Cr-Schicht 12.2.1.8-42
Gleitführungen, Klemmen 10-11
Gleitlinien durch Zerspanung 12.2.1.1-11
Gleitringdichtung 12.2.1.8-42
Gleitverschleiß, Beschichtung von Vielkeilverzahnungen 12.2.1.8-19
Glühen
Abkühlungsraten 11.2.1-34
Temperatur
Abweichungen 11.2.2.1-4
von Gussteilen 11.1-26
Vorrichtung 11.1-40
Wärmebehandlung 11.2.1-2
Glykolsäure, Schädigung von Ni-Legierungen 12.2.1.7-14
Goldlot 12.2.1.4-15, 12.2.1.4-33
Grafit, Einfluss auf Reibschweißen 12.2.1.3.4-8
Grat
Entgraten 12.2.1.1.1-13
Galvanisch 12.2.1.1.1-7
Kugelstrahlen 12.2.1.6-6
Spitzen auf Beschichtugnsfläche 12.2.1.8-48
Grenzen der Reparierbarkeit 14.1-1
Grenzschnittiefe 12.2.1.1.2-8
Grobe Fahrlässigkeit 10-5
Grobkorn 11.2.1-12
Bereiche beim Schmieden 11.2.2.1-4
Guss
Abrasive Strahlbehandlung 11.1-26
Anschmelzungen 11.2.1-22, 11.2.1-30
Ätzangriff 11.2.1-20
Ausbringrate 11.3-2
Auslaugen von Kernen 11.1-25
Beschädigung durch Entformen 11.2.1-29
Dendriten 11.1-25
Dendritenausbildung 11.2.1-30
Einfluss der Bauteilgeometrie auf Fehler 11.3-8
Einfluss der Kornorientierun auf die Schwingfestig 11.2.1-31
Einkristall 11.1-25
Einschlüsse 11.2.1-29
Entformen 11.1-25
Entformungskräfte 11.2.1-20
Fehler
Einfluss des Gusskerns 11.1-23
Gestaltungsursachen 11.2.1-5
Turbinenschaufel 11.2.1-36
typischer 11.2.1-5
Urache Konstruktion 11.2.1-5
Freckles 11.2.1-27
Gefügemerkmal, Striations 11.2.1-27
Gerichtet erstarrt 11.1-25

©Axel Rossmann - Turbocomfort
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Glühtemperatur 11.1-26
Handhabung 11.2.1-29
Kaltschweisse 11.1-25
Karbide 11.2.1-30
Keimbildung 11.1-23
Keramikeinschlüsse 11.2.1-23
Kern auslaugen 11.2.1-20
Kernbruch 11.2.1-20
Kernrückstände 11.1-25, 11.2.1-23
Kernversatz 11.2.1-20
Korngrenzenangriff 11.1-25
Korngrenzenverlauf 11.2.1-22
Kornorientierung 11.2.1-22
Kornselektion 11.2.1-27
Lagenlunker 11.2.1-22
Lagenporosität 11.1-25
Lunker 11.2.1-22, 11.2.1-29
Maßabweichungen 11.2.1-20
mit keramischen Teilchen 11.2.1-29
Nacharbeit am Rohteil 11.3-3
Oberfläche 11.2.1-5
Oxidhäute 11.2.1-23, 11.2.1-29
Parallelfälle 11.2.1-23
Probleme, Bauteilgestalt 11.1-23
Reaktionen an der Oberfläche 11.2.1-22
Rekristallisation 11.2.1-27
Resteutektikum 11.2.1-30
Richten 11.2.1-20, 11.3-8
Schrumpf 11.1-25
Schwingermüdung 11.2.1-20
Schwingermüdung vom Abtrennen 11.2.1-20
Schwingrissbildung 11.1-25
Seigerungen 11.2.1-22
Sliver 11.2.1-27
Spannungen 11.2.1-10
Stängelkristalle 11.1-25, 11.2.1-26
Strahlbehandlung 11.2.1-29
Strahlgutreste an der Öberfläche 11.2.1-23
Thermoermüdung 11.2.1-26
Titan 11.2.1-2
Verzug 11.2.1-20
Wärmespannungen 11.2.1-27
Warmrisse 11.2.1-20
Werkstofffehler 11.2.1-23
Zebras 11.2.1-27
Zug-Eigenspannungen 11.2.1-14
zulässige Fehlergröße 11.3-10
Gussbarren. Siehe Ingot, Lage eines Schmiedeteills 11.2.2.1-19
Gussblock 11.2.2-5
Gussgehäuse, Kraftstoffpumpe 11.2.1-8
Gusshaut 11.1-18, 11.2.1-5, 11.2.1-17
Ablösen in Gehäusen 11.2.1-18
Dicke 11.2.1-17
Einfluss auf Bauteileigenschaften 11.2.1-18
Einfluss auf Schwingfestigkeit 11.2.1-18
Formpartikel 11.2.1-18
Rauigkeit 11.2.1-17
Sprödigkeit 11.2.1-18
Werkzeugerschleiß 11.2.1-18
Zusammensetzung 11.2.1-18
Gusskern, Einfluss auf Gussfehler 11.1-23
Gussteil
abrasive Strahlbehandlung 11.2.1-12, 11.2.1-20
Ätzbehandlung 11.2.1-12
Bearbeitung, Serienfertigung 11.2.1-2
Entlackung 11.2.1-7
Gestaltung 11.2.1-5
Machbarkeit 11.2.1-5
Nachbehandlung 11.2.1-11
Reaktion mit der Formmasse 11.2.1-12
Reparaturschweißungen 11.2.1-12
Reparaturverfahren 11.2.1-5
Richten 11.1-23

H

Haarspray, Wirkung auf Haftfestigkeit 12.2.1.5-12
Haftfestigkeit
Badverunreinigung 12.2.1.7-6
Beeinflussung durch Haarspray 12.2.1.5-12
Beschichtung 12.2.1.8-11
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 12.2.1.8-34
Elastomerschichten 12.2.1.8-13
gefüllter Silikongummi 12.2.1.8-13
Hinweis des Bruchverlaufs 12.2.1.8-11
Klebeverbindung 12.2.1.5-10, 12.2.1.5-11
Prüfung 12.2.1.8-58
Kugelstrahlen 12.2.1.6-6
Spritzschicht 12.2.1.8-27
Thermische Spritzschicht 12.2.1.8-24
Änderung im Betrieb 12.2.1.8-28
Haftfläche, Schwingbelastung 12.2.1.8-33
Haftgrund, Oxidation 12.2.1.8-27
Haftschicht 12.2.1.8-5
Hagel 14.4-5
Halbzeug
Beschaffung 11.1-1, 11.1-3
Serienanlauf 11.1-5
Eigenschaften
Auswirkung auf die Fertigung 11.1-13
Einfluss auf Wärmebehandlung 11.1-14
Lieferzeiten 11.1-5
Probleme 11.1-1
Halogene
Verbindungen, Entfernung von Oxiden 12.2.1.4-20
Verunreinigung in Alkoholbädern 12.2.1.7-6
Haltezeit, Einfluss auf LCF 11.2.2.1-15
Handbuch, Department of Defense Handbook 14.4-4
Handgeführtes Schleifen 12.2.1.1.1-1
Handhabung (Handling) 13-2

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Aufschmieren von Fremdmaterial 13-12
Empfehlung gegen Beschädigungen 13-16
Gussteile 11.2.1-29
Schaden
Abplatzen spröder Auflageschichten 13-10
an Auflageflächen 13-12
an Bewegungsdichtungen 13-10
an Hochdruckturbinenschaufel 13-10
an Passflächen 13-12
an Spitzenpanzerungen 13-11
Vermeidung 13-16
von Werkstücken und Bauteilen 13-1
mit Handschuhen 13-7
Handschuhe
Abhilfe gegen Korrosion 13-1
beim Handling der Werkstücke 13-7
zum Schutz 13-1
Handschweiß 12.2.1.3.4-9
Rissbildung in Titan 12.2.1.7-17
Titanlegierung 11.2.2.1-27
Hard α (Gefüge) 11.2.2.1-13, 11.2.2.1-17,
Hard Times. *Siehe* Festen-Intervall-Prinzip
Harnstoffkleber 12.2.1.5-8
Hartchromschicht, Einfluss der Prozessparameter 12.2.1.8-46
Härte
Änderung durch Schleifen 12.2.1.1.1-3
Einfluss auf Fertigung 11.2.1-2
des Grundwerkstoffs, Einfluss auf Kugelstrahleffekt 12.2.1.6-21
nachgearbeitete Schicht 12.2.1.8-9
Härteprüfung, Sauerstoffaufnahme bei Titanlegierungen 12.2.1.3.1-30
Hartlöten 12.2.1.4-1, 12.2.1.4-3
Hartmetall,
Werkstoffverunreinigung 11.1-28
Einschlüsse in Titanlegierungen 12.2.1.3.1-23
Hartphasen/Hartstoffphasen 11.2.1-5
in Lötung 12.2.1.4-22
Hartstoffpartikel, aufgelötet 12.2.1.4-4
Härtung von Stählen, Maßänderung 12.2.1.9-8
Hartverchromung 12.2.1.8-43
Hatrtlöten, Kupfer-Beryllium-Legierung 12.2.1.4-48
HCF abhängig von Rissgröße 11.3-23
Header beim Umschmelzen 11.2.2.1-11
Heat soaking. *Siehe* Abstellen: Verkokung
Heat Tint Test 12.2.1.8-23
Hefen als KSS Verunreinigung 12.2.1.1.2-30
Heftschweißung
Fixierung von Lötspalten 12.2.1.3.1-9
für Punktschweißung 12.2.1.3.2-2
Problematik 12.2.1.3.1-9
Heiß-Isostatisches Pressen /Heißisostatpressen (siehe HIP) 11.2.3-1, 11.2.3-10, 11.3-14
Heißrissbildung 14-16. *Siehe auch* Warmrissbildung
Heißrisse/Heißrissigkeit 1 11.1-2, 12.2.1.3.1-16, 1.2.2-3
beim Schmieden 11.1-32
Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-4
in Schweißungen an Ni-Legierungen 12.2.1.3.1-19
Heißteile
Lötreparatur 12.2.1.4-50
Regeneration 11.2.3-2
Reparaturlötung 14.1-9
Schädigung durch erhöhte Temperatur 14-7
Herstellungsgerechte Gestaltung 10-9
Hilfsstoffe
Lagerhaltung 13-9, 13-10
Poren in Druckguss durch zersetzen 11.2.1-14
Hintergrundfluoreszenz 11.2.1-12
gestrahlter Flächen 12.2.1.6-39
Hinterkantenversprödung an Verdichterrotorschaufel 12.2.1.7-18
HIP
As HIP-Prozess 11.2.3-3
Aufkohlung 11.2.3-3
Einfluss auf die Festigkeit 11.3-15
Explosion der Kapsel 11.2.3-7
Füllen der Kapseln 11.2.3-7
Gasporen 11.2.3-9
Kapselfüllung 11.2.3-7
Kohlenstoffdiffusion 11.3-15
Prozess 11.1-19, 11.2.1-14
Reaktive metallische Verunreinigungen 11.2.3-7
Reaktive organische Partikel 11.2.3-7
Regenerationsprozess 11.1-20, 11.2.3-11
Risiken einer Regeneration durch 11.2.3-11
thermisch induzierter Porosität 11.2.3-7
Verunreinigungen des Pulvers 11.2.3-7
Verunreinigungen in Kapsel 11.2.3-7
von Lötungen 12.2.1.4-50
Voraussetzungen für Anwendung 11.2.3-10
Wärmebehandlung 11.3-15
HIP and forge 11.1-16, 11.2.3-3
HIP-Presse/Pressentyp 11.2.3-3
Diffusionsschweißen 12.2.1.3.5-4
Hochaktivitätsschicht, Al-diffusionsschicht 12.2.1.8-20
Hochausgelasteten Strukturen 10-1
Hochdruckturbine,
Leitapparat Schaden 14-24
Schaufel, Transportschäden 13-10
Hochdruckzusätze, Kühlschmierstoffe 12.2.1.1.2-21
Hochfeste Werkstoffe, Fertigung 10-4
Hochtemperaturgleitmittel, Beeinflussung von Reibschweißen 12.2.1.3.4-5
Hochtemperaturkleber 12.2.1.5-9
Hochtemperaturlöten 12.2.1.4-5
Arbeitstemperatur 12.2.1.4-25
Lote 12.2.1.4-1, 12.2.1.4-16Hohlstellen

© Axel Rossmann - Turbokonsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

vom Schweißen 12.2.1.3.1-3
Hohlwelle beim Reibschweißen 12.2.1.3.4-9
Honeycomb. *Siehe* Wabendichtung
Füllen durch thermisches Spritzen 12.2.1.8-37
Transportschäden 13-15
Hot Isostatic Pressing = HIP 11.3-14
Hot start. *Siehe* Heißstart
Hubschraubertriebwerke, Korrosion und Erosion 14.4-5
Hüftgelenk, Reibschweißen 12.2.1.3.4-2
Human Factor, Fanscheibenschaden 12.2.1.1.2-15
Hybrid Turbine Wheel 12.2.1.3.5-6
Hydridbildung
in Ätzbädern 12.2.1.7-4
Titanlegierung 12.2.1.7-18

I

Identifikation von Schüttware 11.2.1-35
IK. *Siehe* Interkristalline Korrosion
IN100 11.2.1-34
Inchromieren 12.2.1.8-2, 12.2.1.8-15. *Siehe auch* Cr-Diffusionsschichten
Incipient melting. *Siehe* Anschmelzen: Gefügebestandteile
Inducer. *Siehe* Cover plate
Inertia Welding. *Siehe* Schwungradreibschweißen
Infektionsrisiko KSS 12.2.1.1.2-31
Infiltration
Leichtmetall Sandguss (Gehäuse) 11.2.1-7, 12.2.1.8-60
Ingot 11.1-32, 11.2.2-5, 11.2.2.1-11, 11.2.2.1-13, 11.2.2.1-19
Inhibitoren 12.2.1.7-1
in Entfettungsbädern 12.2.1.7-17
Inkubationszeit eines Schadens 14-14
Innenbeschichtungen, Al-Diffusionsschichten 12.2.1.8-21
Inspektionen 11.1-6
Integrale Bauteile 11.3-5
gegossene Bauteile 11.2.1-2
Interkristalline Korrosion 12.2.1.3.1-3, 14-16
Ätzbad 12.2.1.7-19
Flussmittel 12.2.1.4-20
Kornausbrüche 14.1-18
Kugelstrahlen 12.2.1.6-6
Interkristalline Versprödung von Lötungen mit Flussmittel 12.2.1.4-31
Intermetallische Phasen 11.1-8, 11.2.1-33
Ionenplattieren 12.2.1.8-3

K

Kadmium
Bruch einer Verdichterscheibe 12.2.1.8-52
Kontakt mit Tiitan 12.2.1.8-39
LME 12.2.1.8-49
Lötrissigkeit 14.1-9
Oberflächenverunreinigung 14.1-8
Rissbildung bei Temperatur 12.2.1.4-31
Toxizität 14-19
Versprödung durch 12.2.1.8-52
bei Temperatur 14.2-9
Wasserstoffversprödung 12.2.1.8-43, 12.2.1.8-51
Kaltbiegen, Einfluss auf Lötung 12.2.1.4-33
Kaltlauf 11.2.1-16
Kaltriss 11.2.2-6, 12.2.1.3.1-13, 12.2.1.3.1-16,
Bildung 12.2.1.3.1-26
Kaltschweisse 11.1-25, 11.2.1-20, 11.2.1-16, 11.2.1-24, 11.2.2-5
in einer Schweißung 12.2.1.3.3-7
EB-Schweißung 12.2.1.3.3-15
Kaltverfestigung 11.1-40
Kaltverschweißen 12.2.1.1.2-4
Kanne (Behälter) 11.2.3-7
Kanten
Kugelstrahlen 12.2.1.6-30, 12.2.1.6-33
Reparatur mit Kleber 12.2.1.5-3
Rissbildung 10-4
Kapillare Wirkung/Kapillarwirkung 12.2.1.4-13
beim Löten 12.2.1.4-1
Fülldruck beim Löten 12.2.1.4-13
Kräfte 12.2.1.4-7
Spalt 12.2.1.4-10
Kapselfüllung, HIP 11.2.3-7
Karbide
Herauslösen durch Glykolsäure 12.2.1.7-14
im Guss 11.2.1-30
Kardanwelle, Reibschweißen 12.2.1.3.4-4
Kathodische Verfahren 12.2.1.8-39
Verchromen 12.2.1.8-40
Verkadmen 12.2.1.8-39
Verkupfern 12.2.1.8-39
Vernickeln 12.2.1.8-40
Versilbern 12.2.1.8-40
Keilverzahnungen
Kugelstrahlen 12.2.1.6-15
Rissbildung 12.2.1.8-57
Keimbildung (Gefüge) 11.1-23, 11.2.1-14
Keime in KSS 12.2.1.1.2-30
Nacfhweis 12.2.1.1.2-31
Kennzeichnung, beschädigte an Behälter 13-10
Keramikeinschlüsse im Guss 11.2.1-23
Keramische Klebstoffe 12.2.1.5-1
Hochtemperaturkleber 12.2.1.5-9
Keramische Teilchen im Gussteil 11.2.1-29
Keramischer Filter bei der Erschmelzung 11.2.2.1-23
Kerbempfindlichkeit, Leichtmetalle 11.2.1-14
Kerben 12.2-5

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

durch Zerspanung 12.2.1.1-8
galvanisch b eschichtet 12.2.1.8-46
Gefüge 12.2.1.3.1-3
Rissbildung bei Wärmebehandlung 11.1-40
Kern (Gusskern) 11.2.1-23
Bruch 11.2.1-20
Rückstände 11.1-25
Versatz 11.2.1-20
Kissing Bond 12.2.1.3.4-2, 12.2.1.3.5-4, 12.2.1.3.3-5. *Siehe auch* Klebestelle: einer Schweißberbindung
Kitakawa Diagramm 11.3-23
Klang, Klopfprobe 12.2.1.7-19
Klebeflächen
notwendige Eigenschaften 12.2.1.5-14
Struktur 12.2.1.5-11
Vorbehandlung 12.2.1.5-11
Kleben
Dichtung 12.2.1.5-2
Einlaufbelag 12.2.1.5-12
Elastomerauflagen 12.2.1.5-3
Metallfilz 12.2.1.5-12
Sandwichstrukturen 12.2.1.5-3
Verdrehsicherung 12.2.1.5-2
Kleber/-system
Kanten Reparatur 12.2.1.5-3
Klebeflächenstruktur 12.2.1.5-11
Lagerung 12.2.1.5-11
Oberflächenhaut 12.2.1.5-11
Topfzeit 12.2.1.5-11
Klebestelle einer Schweißverbindung 12.2.1.3.3-5, 12.2.1.3.4-8
beim Reibschweißen 12.2.1.3.4-2
IN in Diffusionsverbindung 12.2.1.3.5-4
Schwungradreibschweißen 12.2.1.3.4-6
Klebeverbindung 12.2.1.5-1
Alterungsprozess 12.2.1.5-16
Anwendungen 12.2.1.5-2
Anstreifvorgang nach Versagen 12.2.1.5-17
Betriebseigenschaften 12.2.1.5-14
Betreibseinflüsse 12.2.1.5-1
Containmentverhalten 12.2.1.5-14
Einfluss von Waschmittel 12.2.1.5-14
geeignete Oberflächenrauigkeit 12.2.1.5-14
Gestaltung 12.2.1.5-10
Haftfestigkeit 12.2.1.5-10, 12.2.1.5-11
konstruktive Gestaltung 12.2.1.5-14
Korrosion 12.2.1.5-16
notwendige Eigenschaften der Klebeflächen 12.2.1.5-14
Primer 12.2.1.5-16
Qualitätssicherung 12.2.1.5-10
Schädigung in Prozessbädern 12.2.1.7-23
Schälung /Schälbeanspruchung 12.2.1.5-2 12.2.1.5-14
Thermografie 12.2.1.5-10
Wirkung von Kühlschmierstoffen auf Haftfestigkeit
Klebstoff
als Verdrehsicherung 12.2.1.5-4
Einfluss
Kraftstoff 12.2.1.5-1
Öl 12.2.1.5-1
Wasch- und Reinigungsmittel 12.2.1.5-1
Einsatz in Triebwerken 12.2.1.5-4
für Metallfolien 12.2.1.5-4
Keramische 12.2.1.5-1
Schwingungsdämpfung 12.2.1.5-4
Verarbeitung 12.2.1.5-1
Wabenstrukturen 12.2.1.5-4
Klebstoffsysteme 12.2.1.5-7
Absimmung auf Betreibsbedingungen 12.2.1.5-1
Acrylklebstoffe 12.2.1.5-9
Anaerobische Klebstoffe 12.2.1.5-8
Anorganische Klebstoffe 12.2.1.5-9
Cyanoacrylat Klebstoffe 12.2.1.5-7
Dispersionsklebstoffe 12.2.1.5-7
Eigenschaften 12.2.1.5-7
Epoxid Klebstoffe 12.2.1.5-7
Harnstoffkleber 12.2.1.5-8
Keramische Hochtemperaturkleber 12.2.1.5-9
Phenolkleber 12.2.1.5-8
Polyurethanklebstoffe 12.2.1.5-8
Primer 12.2.1.5-9
Probleme 12.2.1.5-7
Sekundenkleber 12.2.1.5-7
Silikonklebstoffe 12.2.1.5-8
Klemmen von Gleitführungen 10-11
Klopfprobe, Klang, Hinweis auf IK 12.2.1.7-19
Knallgasgemisch, in Werkzeugmaschine 12.2.1.1.2-26
Kochsalz
Rissbildung in Titan 12.2.1.7-17
SpRK bei Titanlegierungen 13-6
Kohlenstoff, Diffusion bei HIP 11.3-15
Kommarisse 12.2.1.1-7, 12.2.1.1.2-22, 12.2.1.1.2-23
Konservieren/Konservierung
gestrahlter Werkstücke 12.2.1.6-33
bei Lagerung 13-14
Konstrukteur
Aufgaben 10-1
Bauteilsicherheit 10-1
Qualitätssicherung 10-1
Verantwortung 10-1
Konstruktion 12.2-1
Einfluss auf Fertigung 10-3
Einfluss auf Warmrissbildung 11.1-20
Einfluss auf Werkstofffehler 11.1-17
fertigungsgerechte Gestaltung 11.3-2
Klebeverbindung 12.2.1.5-14

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

lötgerecht 12.2.1.4-49
Urache für Gussfehler 11.2.1-5
von Lötungen 12.2.1.4-15
von Schweißteilen 12.2.1.3.1.1-1
Kontaktierung
elektrische 12.2.1.7-21
Galvanische Beschichtung 12.2.1.8-49
Kontrolle, optische/visuelle 10-9
Kopfstück 11.2.3-3
vom Gussblock 11.1-28
Korn (Gefüge)
Ausbrüche, Interkristalline Korrosion 14.1-18
Belag/Belegung
Einfluss auf Lötung 12.2.1.4-31
Einfluss auf Schleifen 11.2.1-3
Einfluss auf Schweißen 11.2.1-3
Korrosionsempfindlichkeit 11.2.1-3
Stahlguss 11.2.1-9
Bildung 11.2.1-14
Einfluss bei Einkristallen 11.2.1-27
Form 11.1-25
Grenzen
Orientierung 11.1-8
Angriff 11.2.1-3
in Gussteilen 11.1-25
Größe 11.1-25, 11.2.2-5
Einfluss auf die Fertigung 11.2.1-3
Einfluss einer Pulverentmischung 11.2.3-7
Kriechen 11.1-6
Pulvermetallurgie 11.1-16
Verteilung, Kugelstrahlen 12.2.1.6-9
Orientierung 11.1-8, 11.2.2-5
Einfluss auf Schwingfestigkeit 11.2.1-31
Guss 11.2.1-22
Rissfortschritt 11.3-13
Warmrissbildung 11.1-22
Struktur 11.1-6
Verteilung 11.1-6
Wachstum
beim Löten 12.2.1.4-10
Lötung 12.2.1.4-20
Korngrenzen
Orientierung 11.1-25, 11.2.1-3
Verformung durch Zerspanung 12.2.1.1-11
Verlauf bei Guss 11.2.1-22
Kornselektion bei Einkristallguss 11.2.1-27
Kornstrukturfehler
Ätzen 11.2.1-27
im Einkristall 11.2.1-27
Kornzerfall. *Siehe* Interkristalline Korrosion, Lötung 12.2.1.4-35
Korrosion/-angriff
Abhilfe durch Handschuhe 13-1
bei Zwischenlagerung 12.2.1.7-11
Cr-Stahl 12.2.1.7-23
durch Klebstoff 12.2.1.5-16
durch Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-24
durch Luftfeuchtigkeit bei Lagerung 13-6
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 14.1-13
Einfluss von Luftdruckschwankungen 13-15
Empfindlichkeit durch Korngrenzenbelegung 11.2.1-3
Gefahr durch Emulsion 12.2.1.1.2-29
Hubschraubertriebwerke 14.4-5
Interkristalline 14-16
Kugelstrahlen 12.2.1.6-6
Lot
Einfluss der Fließrichtung 12.2.1.4-35
Lote und gelötete Teile 12.2.1.4-35
Schleifen 12.2.1.1.1-6
Schwingfestigkeitsabfall 14.1-18
unter Fußplattform an T-Schaufel 14-18
Verstärkung durch Schutzbeschichtung 14-18
Korrosionsschutz
Lackierung 12.2.1.8-60
metallischer Schichten 12.2.1.8-42
Kosten
einer Reparatur, Laufzeitabhängig 14-7
fertigungsbedingter Fehler 12.2-5
Optimierung 10-2
Werkstoffe 14.1-22
Werkstoffentwicklung 10-4
Kostensenkung 10-2
Programme 10-4
Kraftgesteuert 11.2.1-26
Belastung 11.2.1-31
Kraftstoff
Einfluss auf Klebstoff 12.2.1.5-1
Leitung
Lötung 12.2.1.4-33
Schweißung 12.2.1.3.1-6
Kraftstoffpumpe, Gussgehäuse 11.2.1-8
Kriechbeschichtung 14.1-13
Al-Diffusionsschichten 12.2.1.8-23
Kriechen
HIP-regenerierter Teile 11.2.3-14
Korngröße 11.1-6
Kriechporen 11.1-19, 11.2.3-10, 11.2.3-11
Bildung, Beurteilung, Streuung 11.2.3-14
Kriterium für Regenerationsfähigkeit 11.2.3-13
Kriechschädigung
geschmidete T-Schaufeln 11.2.3-13
Regeneration durch HIP 11.2.3-10
Risse 11.2.1-5
Turbinenschaufel 14-10
Kristallorientierung, Abweichungen bei EK 11.2.1-26
Kritische Risslänge 11.2.2.1-1
Einfluss der Faserrichtung 11.1-8

© Axel Rossmann - Turbomasch
als Schulungsunterlage mit Lizenz

KSS/-System 12.2.1.1.2-1, 12.2.1.1.2-29. *Siehe auch* Kühlschmierstoffe
Brandgefahr 12.2.1.1.2-2
Infektionsrisiko 12.2.1.1.2-31
Keimbildung 12.2.1.1.2-30
Nachweis von Keimen 12.2.1.1.2-31
Nebel einatmen 12.2.1.1.2-31
Neufüllung 12.2.1.1.2-31
Reinigung 12.2.1.1.2-31
Schmierwirkung 12.2.1.1.2-29
Überwachung 12.2.1.1.2-30
Kügelchenproblem 12.2.1.8-31
Kugelstrahlen 12.2.1.6-1, 12.2.1.6-9, 12.2.1.6-27, 12.2.1.6-32
Abdeckung 12.2.1.6-13
Abdeckung mit Bleiband 12.2.1.6-33
Abdeckung mit Bleiband beim Kugelstrahlen 12.2.1.6-33
Abhilfe gegen Spannungsrisskorrosion 12.2.1.6-17
Al-Keramiklack 12.2.1.6-11
Almenintensität 12.2.1.6-7
als Qualitätsprüfung 12.2.1.6-23
Auswertung von Strahlversuchen 12.2.1.6-34
Bedeckungsgrad 12.2.1.6-7
Beeinflussung des Fertigungsprozesses 12.2.1.6-6
Behandlung nachher 12.2.1.6-13
Betriebstemperaturen 12.2.1.6-21
Bruch einer Verdichterrotorschaufel 12.2.1.6-30
Büchsendeckeleffekt 12.2.1.6-24
Cr-Schicht 12.2.1.8-43
Effekt des Spannungsgradienten 12.2.1.6-11
Eigenspannungen 12.2.1.6-9
Eigenspannungsmessungen 12.2.1.6-34
einer Schicht 12.2.1.8-9
einfluss auf die Schwingfestigkeit 12.2.1.6-15
Einfluss auf Schwingverschleiß 12.2.1.6-19
Einfluss des Grundwerkstoffs 12.2.1.6-21
Einfluss des Spannungsgradients 12.2.1.6-30
entschärfen von Kratzern 12.2.1.6-7
Entstehung explosiver Stäube 12.2.1.6-33
Fehler 12.2.1.6-24
Formkerben 12.2.1.6-15
Glasperlen 12.2.1.6-12
Glättung gestrahlter Flächen 12.2.1.6-33
Grat 12.2.1.6-6
Haftfestigkeitsprüfung 12.2.1.6-6
Haftfestigkeitsprüfung von Silberschichten 12.2.1.6-23
Interkristalline Korrosion 12.2.1.6-6
Kathodische Schutzwirkung 12.2.1.6-7
Keilverzahnungen 12.2.1.6-15
Konservieren gestrahlter Werkstücke 12.2.1.6-33
konstruktive Gestaltung 12.2.1.6-32
Kontrolle des Verfahrens 12.2.1.6-32
Korngrößenverteilung 12.2.1.6-9
Korrosion 12.2.1.6-6
Lacksysteme 12.2.1.6-7
Materialabtrag 12.2.1.6-27
mit Stahlkies 12.2.1.6-27
mögliche Betriebstemperatur 12.2.1.6-13
Nacharbeit 12.2.1.6-13
Oberflächenzustand 12.2.1.6-33
Optimierung 12.2.1.6-21
Prozessdaten 12.2.1.6-11
PSEF 12.2.1.6-9, 12.2.1.6-11
Qualitätsprüfung 12.2.1.6-23
Qualitätssicherung 12.2.1.6-11
Querschnittseinfluss auf die Schwingfestigkeit 12.2.1.6-19
Rekristallisation 12.2.1.6-17
Relaxation 12.2.1.6-21
Risse schließen 12.2.1.6-6
Rollover 12.2.1.6-24, 12.2.1.6-39
Sättigung 12.2.1.6-7
Sättigungsgrenze 12.2.1.6-9
Schäden 12.2.1.6-24
Schadensverhütung 12.2.1.6-24
Scharfkantiges Strahlmittel 12.2.1.6-24
Schaufelfuß 14-10
Scheibenbruch durch Strahlfehler 12.2.1.6-30
Schließen von Rissen 12.2.1.6-26
Schrägstrahlen 12.2.1.6-24
Schwingfestigkeit 12.2.1.6-1
Sollbruchstelle 12.2.1.6-15
Spannungsrisskorrosion 12.2.1.6-6, 12.2.1.6-7
Stottern 12.2.1.6-12
Strahlanlagen 12.2.1.6-9
Strahlbewegung 12.2.1.6-14
Strahlbild 12.2.1.6-15, 12.2.1.6-24
Strahlbild Kontrolle 12.2.1.6-15
Strahldüse 12.2.1.6-12
Strahlgut
Abrieb auf Werkstück 12.2.1.6-25
Bruch 12.2.1.6-32
Strahlintensität 12.2.1.6-28, 12.2.1.6-34
Strahlmittelverunreinigung 12.2.1.6-12
Strahlvorrichtung 12.2.1.6-34
Strahlvorrichtung für Bohrungen 12.2.1.6-28
Strahlwinkel 12.2.1.6-28
Abhängigkeit der Strahlintensität 12.2.1.6-28
Strahlwinkel zu flach 12.2.1.6-30
Topografie 12.2.1.6-21
Transportmedium 12.2.1.6-25
Überstrahlt 12.2.1.6-24
Überstrahlung 12.2.1.6-9
Überwachung des Strahlguts 12.2.1.6-12
ungeeigneter Werkstoff 12.2.1.6-24
ungünstige Oberflächenstruktur vorher 12.2.1.6-24
Verfahrensüberwachung 12.2.1.6-7
Verstopfung von Kühlluftbohrung durch Strahlgut

© Axel Kossmann - Turbomaschine als Ausbildungsunterlage mit Lizenz

Kugelstrahlen

12.2.1.6-26
Verunreinigtes Strahlgut 12.2.1.6-24
Verzugs 12.2.1.6-6
von Kanten 12.2.1.6-30, 12.2.1.6-33
vor Brünieren 12.2.1.8-11
vor dem Schweißen 12.2.1.6-17
Vorbehandlung 12.2.1.6-12
vorherige Oberflächenrauigkeit 12.2.1.6-12
Zeichnungsangaben 12.2.1.6-33
Zeitabstand 12.2.1.6-19
Zeitabstände 12.2.1.6-21
Kühlkonfiguration/KühlluftführungKühlluftkanal
Al-Diffusionsschichten 12.2.1.8-21
Ätzmittelrückstände 12.2.1.7-15
Durchflussmessungen 12.2.1.8-21
im Bauteil 11.2.1-2
mit Noppen 11.1-19
Verstopfung durch Strahlmittel 12.2.1.6-13, 12.2.1.6-39
Kühlmittel, Zutritt 12.2.1.1.1-10
Kühlschmierstoff (KSS) 12.2.1.1-3, 12.2.1.1.2-1, 12.2.1.1.2-21
Alterung 12.2.1.1.2-27
Ausdampfen 12.2.1.1.2-24
Auslösen von Korrosion 12.2.1.1.2-24
Auslösen von Spannungsrisskorrosion 12.2.1.1.2-26
Auslösen von Sulfidation 12.2.1.1.2-24
Auswirkung auf Messing 12.2.1.1.2-24
Beeinflussung der Benetzbarkeit 12.2.1.1.2-24
Bildung von Reaktionsschichten 12.2.1.1.2-24
Chlorhaltig 12.2.1.1.2-26
Einfluss auf die Festigkeit 12.2.1.1.2-22
Einfluss auf die Maßhaltigkeit 12.2.1.1.2-23
Einfluss auf die Oberflächentopografie 12.2.1.1.2-23
Einfluss auf Schweißung 12.2.1.3.1-29
Einfluss auf Werkzeuglebensdauer 12.2.1.1.2-25
Eionfluss auf eine Lackierung 12.2.1.1.2-24
Elementbildung 12.2.1.1.2-24
EP-Konzentration überprüfen 12.2.1.1.2-22
Hochdruckzusätze (EP) 12.2.1.1.2-21
Flammpunkt 12.2.1.1.2-27
Konzentrationssteigerung 12.2.1.1.2-24
Kühlwirkung 12.2.1.1.2-22
mit Chlorverbindungen 12.2.1.1.2-21
mit Entschäumer 12.2.1.1.2-22
mit Phosphorverbindungen 12.2.1.1.2-21
mit Silikonöl 12.2.1.1.2-22
Ouellen von gerfülltem Silikongummi 14.3-5
Schädiigung einer Titanlegierung durch Cl 12.2.1.1.2-24
Schaumbildung 12.2.1.1.2-22
Schmierwirkung 12.2.1.1.2-21
Schwefelaufnahme bei Silber 12.2.1.1.2-24
Schwefelzusätze 12.2.1.1.2-21
ungeeignet für Titanlegierungen 12.2.1.1.2-26
Wirkung auf Haftfestigkeit einer Klebeverbindung 12.2.1.5-11
Zugelassene 12.2.1.1.2-27
Kühlung
Reduzierung beim Schleifen 12.2.1.8-11
Wirkung von Kühlschmierstoffen 12.2.1.1.2-22
Kunstharz
Schichten 12.2.1.8-3
Beschichtungen 12.2.1.8-58
Kupfer-Beryllium-Legierung, Hatrtlöten 12.2.1.4-48
Kurze Risse, bruchmechanisch 11.3-23

L

Labyrinth
Anstreifmerkmale 14.4-6
Einfluss der Belagslötung 12.2.1.4-26
Panzerungen 12.2.1.8-4
Proben für LCF-Versuche 14.4-11
Reparatur, Laborproben 14.4-11
Spitzen
Reparieren 14-10
Schweißpanzerung 12.2.1.3.1-19
Schweißreparatur 14.4-11
Versprödung 12.2.1.7-18
Verschleiß 14.4-10
Warmriss 10-10
Warmrissbildung 14.4-10
Lack/-system 12.2.1.7-1, 12.2.1.8-3
Abziehen 12.2.1.7-1
Kugelstrahlen 12.2.1.6-7
Lack of bond (Bindefehler) 12.2.1.3.5-8
Lackieren/Lackierung 12.2.1.8-58
Abdecken 12.2.1.8-58
als Korrosionsschutz 12.2.1.8-60
Anwendungen im Triebwerk 12.2.1.8-60
Einfluss von Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-24
Elektrostatischen Verfahre 12.2.1.8-58
Ladder cracking (Gefügeschaden) 12.2.1.1.2-10
Lagekopplung, Zerspanungswerkzeug 12.2.1.1.2-10
Lagenlunker 11.1-19
Guss 11.2.1-22
Lagenporosität 11.1-25
Lagerhaltung nur zugelassen Hilfsstoffe 13-10
Lagerlaufflächen, Ermüdung durch Strahlgut 12.2.1.6-37
Lagerschaden, Trend 14-24
Lagersitze Verchromen 12.2.1.8-43
Lagerung/-bedingungen
Aushärtbarer Medien 13-9
Beschichtungsmassen 12.2.1.8-61
Kleber 12.2.1.5-11

© Vogelsmann - Turbomotorsuli
Ausschnittungsunterlagen nur mit Lizenz

Konservierung 13-14
mit Entfeuchter 13-14
Risiken durch Schwitzwasser 13-4
verzögerte Rissbildung 13-6
von Fertigteilen 13-13
von Hilfsstoffen 13-9
von Metallpulvern 13-9
Lange Risse, bruchmechanisch 11.3-23
Längsanzeigen in Lötungen 12.2.1.4-19
Lanthan und Cer, Seigerung in Ni-legierung 11.2.2.1-19
Laschenstöße 12.2.1.3.1.1-2
Laser beam welding. *Siehe* Laserschweißen
Laser-Pulverschweißen 10-10
Laserschweißen 12.2.1.3-1
Laugen
Angriff anorganischer Klebstoffe 12.2.1.7-12
LBW. *Siehe* Laserschweißen
LCF
Bruch einr Fanscheibe
Nacharbeit 12.2.1.1.2-19
Einfluss der Haltzeit 11.2.2.1-15
Einfluss verschiedener Fehlstellen 11.3-6
Einfluss von Schweißporosität 12.2.1.3.1-12
Festigkeit
Einfluss der Zerspanung 12.2.1.1-10
Ni-Schicht 12.2.1.8-53
Turbinenscheibe 11.1-10
Lebensdauerbegrenzung 14-13
Riefeneinfluss
beschränkte aussage einer Rauigkeitsmessung 12.2.1.1.2-20
Risse in gerichtet erstarrtem Werkstoff 11.2.1-26
Schwachstelle und Lebensdauer 11.3-6
Verhalten von Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-14
Versuche an Labyrinthproben 14.4-11
Lebensdauer 14-6
Abschätzung bei Reparatur 14.4-2
Begrenzung, LCF 14-13
der Bauteile 14-22
Streuung bei Reparaturschweißung 14.4-12
Triebwerk 14.1-22
Leichtbau
Trend 10-1
Werkstoffe 11.2.1-1
Leichtmetall
Gehäuse, Infiltration 12.2.1.8-60
Guss
Gasporen 11.2.1-7
Korrosion im Prozessbad 12.2.1.7-11
Oxidhaut 11.2.1-8
Oxidhäute 11.2.1-7
Infiltration von Guss 11.2.1-7
Kerbempfindlichkeit 11.2.1-14
Legierungen, Schädigungen in Prozessbad 12.2.1.7-23
Mittelspannungsempfindlichkeit 11.2.1-14
Sandguss 11.2.1-2, 11.2.1-6
Undichtigkeit 11.2.1-7
Leitapparat, Schaden in Hochdruckturbine 14-24
Lichtbogenspritzen 12.2.1.8-24
Lieferant
Einfluss auf das Schweißverhalten 12.2.1.3.1-21
Zulassung 11.1-5
Lieferbarkeit, Absicherung durch Reparatur 11.3-8
Lieferzeiten, Halbzeug, Rohteile 11.1-5
Lineares Reibschweißen
Probleme 12.2.1.3.4-11
Lineares Reibschweißen 12.2.1.3.4-11. *Siehe auch* Reibschweißen
Abriebwuzzel 12.2.1.3.4-11
als Reparatur 12.2.1.3.4-11
Betriebsbeanspruchung der Naht 12.2.1.3.4-11
erforderliche Aufmaße 12.2.1.3.4-11
Maßgprobleme 12.2.1.3.4-11
Sauerstoffaufnahme 12.2.1.3.4-11
Zugänglichkeit der Schweißzone 12.2.1.3.4-11
LME 12.2.1.4-20, 14-20. *Siehe auch* Lötrissigkeit
durch Kadmium 12.2.1.8-49
Rissbildung 12.2.1.1.1-12
Lochfraß 11.2.1-3, 14.1-13
um Lötung 12.2.1.4-35, 12.2.1.7-11
Löschanlage/-system
für Zerspanung 12.2.1.1.2-2
in Werkzeugmaschinen 12.2.1.1.2-28
Löschmittel, Maschinenbrand 12.2.1.1.2-26
Lösungsglühen, Abkühlungsraten 11.2.1-34
Lot
als Verunreinigung 12.2.1.4-31
Aufschäumen 12.2.1.4-20
Auslösung von Rissen 12.2.1.4-31
Auswahl 12.2.1.4-15
durch stromlos Vernickeln 12.2.1.8-40
Festigkeit 12.2.1.4-31
Fließrichtung
einfluss auf Korrosion 12.2.1.4-35
Goldlot 12.2.1.4-15, 12.2.1.4-33
Nacharbeit bei Lotspritzern 12.2.1.4-29
Reaktionen bei Al-Diffusionsbeschichtung 12.2.1.8-23
Sprengwirkung 12.2.1.4-31
Versprödung 12.2.1.4-31
Lotablagerungen 12.2.1.4-20
Lötbrüchigkeit. *Siehe* Lötrissigkeit
Lotdepot, Gestaltung 12.2.1.4-44
Lotdiffusion 12.2.1.4-6, 12.2.1.4-19
Wabendichtungen 12.2.1.4-20
Löten/Lötung 12.2.1.4-1
Abdiffundieren von Zusätzen 12.2.1.4-2
Abdeckungung gegen Lot 12.2.1.4-15
Abhilfen gegen Fehler 12.2.1.4-49

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Ablösung 12.2.1.4-35
Abstimmung der Wärmedehnungen 12.2.1.4-4
Anschmelzungen 12.2.1.4-11, 12.2.1.4-20
Anstreifbelag/-schicht 12.2.1.4-4, 12.2.1.4-13, 12.2.1.4-46
Arbeitstemperatur 12.2.1.4-10
Atmosphäre 12.2.1.4-12
Ätzangriff durch Flussmittel 12.2.1.4-19
Aufschäumen von Lot 12.2.1.4-20
Ausblühungen 12.2.1.4-34
Auslösen von Lötrissigkeit 12.2.1.4-16
Ausschwitzungen 12.2.1.4-20
Auswaschungen 12.2.1.4-8
Auswirkung von Flussmittelresten 12.2.1.4-35
Benetzung
Fähigkeit 12.2.1.4-8
Temperatur 12.2.1.4-13
Betriebsverhalten 12.2.1.4-16
Bindefehler 12.2.1.4-7, 12.2.1.4-16
Binder in Loten 12.2.1.4-15
Diffusion 12.2.1.4-23
Diffusionszonen 12.2.1.4-24
Einfluss der Belagstung 12.2.1.4-26
Einfluss der Beschichtungsatmosphäre 12.2.1.4-34
Einfluss der Fließrichtung
Korrosion 12.2.1.4-35
Einfluss der Konstruktion auf die Festigkeit 12.2.1.4-39
Einfluss der Spaltweite 12.2.1.4-13
Einfluss des Richtens 12.2.1.4-33
Einfluss einer Kaltbiegung 12.2.1.4-33
eingeschlossenes Flussmittel 12.2.1.4-16
eingeschlossene Luft 12.2.1.4-48
Elementbildung 12.2.1.4-4
Entfernung von Oxiden 12.2.1.4-20
Erprobung 12.2.1.4-50
Erwärmungsgeschwindigkeit 12.2.1.4-25
Fail Safe (Verhalten) 12.2.1.4-19, 12.2.1.4-39, 12.2.1.4-43, 12.2.1.4-49
Faltenbalg 12.2.1.4-48
Fehler 12.2.1.4-19
Festigkeit 12.2.1.4-16, 12.2.1.4-23
Flussmittel 12.2.1.4-1, 12.2.1.4-35, 12.2.1.4-6, 12.2.1.4-8, 12.2.1.4-19
Spannungsrisskorrosion 12.2.1.4-37
Einschlüsse 12.2.1.4-7
Nester 12.2.1.4-8
Rückstände 12.2.1.4-20
für Reparaturen 12.2.1.4-50
Gestaltung 12.2.1.4-39, 12.2.1.4-41
des Lotdepots 12.2.1.4-44
Hartlöten 12.2.1.4-1
Hartstoff
Partikel 12.2.1.4-4
Phasen 12.2.1.4-22
Heißteile 14.1-9
HIP -Behandlung 12.2.1.4-50
Hochtemperaturlöten/-lote 12.2.1.4-1, 12.2.1.4-16
im Vakuum 12.2.1.4-20
Inspektionsmöglichkeit 12.2.1.4-19
Interkristalline
Korrosion durch Flussmittel 12.2.1.4-20
Versprödung durch Flussmittel 12.2.1.4-31
kapillare Wirkung 12.2.1.4-13
Kapillarwirkung 12.2.1.4-1, 12.2.1.4-10
Fülldruck 12.2.1.4-13
Kräfte 12.2.1.4-7
Konstruktion 12.2.1.4-15
geeignete 12.2.1.4-49
Kornwachstum 12.2.1.4-20
Kornzerfall (siehe auch interkristalline Korrosion) 12.2.1.4-35
Korrosion 12.2.1.4-35
kosmetische Lötung 12.2.1.4-50
Kraftstoffleitung 12.2.1.4-33
Kupfer-Beryllium-Legierung 12.2.1.4-48
Längsanzeigen 12.2.1.4-19
Lochfraß 12.2.1.4-35, 12.2.1.7-11
Lotauswahl 12.2.1.4-6, 12.2.1.4-15, 12.2.1.4-49
Lotdiffusion 12.2.1.4-19
Loterosion 12.2.1.4-8, 12.2.1.4-19, 12.2.1.4-24
Lötspalt 12.2.1.4-25
Löttemperatur 12.2.1.4-10
Lotdiffusion
Loterosion 12.2.1.4-6, 12.2.1.4-24
Luftleitung 12.2.1.4-4
Metallfilz 12.2.1.4-26
Mindestbindefläche 12.2.1.4-11
mit Formschluss 12.2.1.4-43
mit Ganzmetallfolien 12.2.1.4-15
Oberflächenrauigkeit der Lötfläche 12.2.1.4-8
Ofenlötungen 12.2.1.4-8
Öldüse 12.2.1.4-4
Palladiumlot 12.2.1.4-15
Qualität 12.2.1.4-6
Rekristallisation 12.2.1.4-20, 12.2.1.4-29
Reparatur 14.2-6
von Heißteilen 12.2.1.4-50
Oxidationseinfluss 14-16
Schälbeanspruchung/-belastung 12.2.1.4-15, 12.2.1.4-16, 12.2.1.4-39
Schmelzbereich 12.2.1.4-10
Schutzgas /-atmosphäre 12.2.1.4-13, 12.2.1.4-15
Schwachstellen 12.2.1.4-19
Schwingbruch 12.2.1.4-35
Silberlot 12.2.1.4-33
Spalt
Breite 12.2.1.4-3
Füllung 12.2.1.4-8
Länge 12.2.1.4-6

Löten

Löten

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Weite 12.2.1.4-17
Spitzenpanzerung 12.2.1.4-4, 12.2.1.4-5
Spröde Phasen 12.2.1.4-19
spröder Korngrenzenbelag 12.2.1.4-31
Steifigkeitssprünge 12.2.1.4-39
Spaltlöten 12.2.1.4-13
Spannungsrisskorrosion durch Flussmittel 12.2.1.4-20
Strahlen mit SiC 12.2.1.4-12
Temperatur 12.2.1.4-10
Führung bei Metallfilz 12.2.1.4-26
Titan 12.2.1.4-10
Topographie der Lötfläche 12.2.1.4-8
Turbine
Dichtsegment 12.2.1.4-6
Schaden 12.2.1.4-43
Schaufelsegment 12.2.1.4-5, 12.2.1.4-22
Überzeiten 12.2.1.4-10
Ultraschallprüfung 12.2.1.4-45
Verdichterleitapparat/-schaufel 12.2.1.4-4
Versprödung 12.2.1.4-6
Verunreinigung eines Radialturbinenrads 12.2.1.4-29
Viskosität des Lots 12.2.1.4-11
von Waspaloy 12.2.1.4-33
Vorbehandlung der Lötfläche 12.2.1.4-50
vorher Vernickeln 12.2.1.4-49
Vorrichtungen 12.2.1.4-49
Visuellen Inspektion 12.2.1.4-44
Wabendichtung 12.2.1.4-6, 12.2.1.4-24
Wärmedehnungseigenschaften 12.2.1.4-6
Weichlöten 12.2.1.4-1
Werkstoff, selektive Auflösung 12.2.1.7-11
Zeitstandfestigkeit 12.2.1.4-23
Zerstörungsfreie Prüfung 12.2.1.4-45
zulässige Betriebstemperatur 12.2.1.4-23
zulässige Übertemperatur 12.2.1.4-23
Loterosion 12.2.1.4-6, 12.2.1.4-8, 12.2.1.4-11, 12.2.1.4-19
Lotreste, Schäden durch 12.2.1.4-29
Lötrissigkeit 12.2.1.4-20, 12.2.1.4-31
Abhilfe durch Pufferwerkstoff 12.2.1.4-31
durch Lötung 12.2.1.4-16
Kadmium 14.1-9
Lötspalt 12.2.1.4-25
Fixierung durch Heftscheißung 12.2.1.3.1-9
Länge 12.2.1.4-6
Weite 12.2.1.4-17
Lotspritzer, Nacharbeit 12.2.1.4-29
Luftdruckschwankungen, Korrosion 13-15
Luftfeuchtigkeit, Korrosion bei Lagerung 13-6
Luftleitung Löten 12.2.1.4-4
Luftporen in Druckguss 11.2.1-14
Lufttüchtigkeitsanweisung 14.3-7
Luftzutritt um den Gießstrahl 11.2.1-8
Lunker 11.1-2, 11.1-18
Bildung 11.1-25
Einfluss auf Schwingfestigkeit 11.3-10
fehlende Restschmelze 11.1-18
Feld 11.1-18
Guss 11.2.1-22, 11.2.1-29
im Schmiedeteil 11.1-19
in Druckgussteil 11.2.1-14
Lagenlunker 11.1-19
öffnen 11.1-18
Schrumpflunker 11.1-18

M

Machbarkeit, Gussteil 11.2.1-5
MAG (Aktiv Gas Schweißen) 12.2.1.3.1-1
Magnesium
Sandguss 11.2.1-2
Staub, Brand, Explosion 12.2.1.1.2-26
Magnetische Rissprüfung
Versagen 11.2.2.1-27
Zahnradwelle 12.2.1.8-10
Major Repair. *Siehe* Reparatur
Makroätzung
auf Spänekontakt **12.2.1.1.2-2**
Blue Etch Anodizing 11.2.2.1-10
Makrogefüge 11.1-26
Makrolunker 11.2.1-14
Makroseigerungen 11.2.1-27
Maschinenbrand
Gefährdungspotential 12.2.1.1.2-28
Löschmittel 12.2.1.1.2-26
Spänenester 12.2.1.1.2-26
Zündquellen 12.2.1.1.2-27
Maschinenparameter 14-24
Maschinenpark 14-12
Maßabweichung/-änderung
durch Gefügeänderung 12.2.1.9-8
durch Härtung von Stählen 12.2.1.9-8
durch Volumenänderung 10-11
durch Wachsen bei Wälzlagern 12.2.1.9-10
Einfluss auf das Diffusionsschweißen 12.2.1.9-12
Gefügeänderung bei Ni-Legierung 12.2.1.9-8
Gussbedingt 11.2.1-20
Maßgenauigkeit/Maßhaltigkeit 14.1-4
Einfluss auf Schaufelschwingungen 14.1-24
Einfluss des Kühlschmierstoffs 12.2.1.1.2-23
Lineares Reibschweißen 12.2.1.3.4-11
Maßnahmen
bei akuten Problemen 11.3-2
gegen Werkstofffehler 11.3-1
Maßverchromung 12.2.1.8-48
Materialabtrag beim Kugelstrahlen 12.2.1.6-27
Meeresatmosphäre, Korrosion bei Lagerung 13-6
Messing, Auswirkung von Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-24

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Metallchloride, Bildung 12.2.1.7-17
Metallfilz
Einkleben 12.2.1.5-12
Lötung 12.2.1.4-26
Metallfolien aufkleben 12.2.1.5-4
Metallografie 14.4-7
metallografischer Schliff, Zerspanungseffekte 12.2.1.1-11
Metallpulver, Lagerung 13-9
Metallschmelze, Gasaufnahme 12.2.1.3.1-26
Metallspritzens. *Siehe* Thermische Spritzschichten
Methanol, Cl-Verunreinigung 12.2.1.7-17
Microsegregation. *Siehe* Mikroseigerung
MIG (Inert Gas Schweißen) 12.2.1.3.1-1
Mikrohärte, Zerspanungseinfluss 12.2.1.1-11
Mikrolunker 11.2.1-14, 11.2.1-29, 11.3-6
Rissbildung 11.3-13
Mikroporosität 11.2.1-12
Mikrorisse, Schließen innerer durch HIP 11.2.3-10
Mikroseigerungen 11.1-30
im Einkristall 11.2.1-27
Mikroskopische Untersuchung, Anschmelzungen 12.2.1.4-32
Mikrowelligkeit 12.2.1.1.1-9
Militärischer Bereich, Reparaturentwicklung 14.3-2
Mindestzeit für Lagerung, Überschreitung 13-1
Mini Cycles (zyklische Betriebsbelastung) 14-22
Missionen, betreiberspezifisch 14.4-5
Mittelspannungsempfindlichkeit von Leichtmetall 11.2.1-14
Modellbetrachtungen, Löschen von Werkzeugmaschinen 12.2.1.1.2-28
Modellierung des Schmiedeprozesses 11.3-21
Modulbauweise 14-6
Molybdändisulfid, Einfluss auf Reibschweißen 12.2.1.3.4-8
Montage 14-2
Motivation
Staplerfahrer 13-12
zur Vermeidung von Verschmutzung 13-4
Murphy, Gesetz von 11.3-25

N

Nabe
Bereich 13-3
Bohrung, Reparatur 14-10
Nachweis von Keimen in KSS 12.2.1.1.2-31
Nacharbeit
an Gussrohteilen 11.3-3
an Thermischen Spritzschichten 12.2.1.8-37
Anschmelzung 12.2.1.4-32
Anschmelzungen 14.1-15
bei Transportschaden 13-17
Bruch einer Fanscheibe 12.2.1.1.2-19
Kugelstrahlen 12.2.1.6-13
Lotspritzer 12.2.1.4-29
Reparaturschweißungen
mit Elektronenstrahl 12.2.1.3.3-9
Schaufelkanten 14-8
sichere 12.2.1.1.2-6
Übergangsradius 12.2.1.1.2-21
Nachbehandlung
durch Kugelstrahlen 12.2.1.6-13
Gussteil 11.2.1-11
von Schichten 12.2.1.8-7
Nachbrennermantelrohr, Schwingbruch an Rollnahrschweißung 12.2.1.3.2-8
Nachschweißen 12.2.1.3.1-3
Nachweis
einer Wasserstoffversprödung 12.2.1.7-28
Grenzen von ZfP-Verfahren 11.2.2.1-2
mit Bauteiltests 10-6
Zulassungen einer Reparatur 14-12
Nadelstichkorrosion 12.2.1.7-6
Naht
Geometrie, Einfluss des Schutzgas beim Schweißen 12.2.1.3.1-27
Überhöhung 12.2.1.3.1-5, 12.2.1.3.1-9
Vorbereitung für Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-9
Naßstrahlen 12.2.1.6-1
Nebennahtrisse 12.2.1.3.1-32
Neufüllung eines KSS-Systems 12.2.1.1.2-31
Neuteilpreis, Verhältnis zu Reparaturkosten 14-12
Ni-Legierungen
Poren beim Schweißen 12.2.1.3.1-26
Schädigung durch Glykolsäure 12.2.1.7-14
Warmrissbildung 14.4-10
Ni-Schicht/Nickelschicht
Bruch einer Turbinenscheibe 12.2.1.8-53
galvanische 10-13
LCF-Festigkeit 12.2.1.8-53
mit Fressspuren 12.2.1.8-53
Schwingfestigkeit 12.2.1.8-43, 12.2.1.8-46,
Abfall 10-13, 12.2.1.8-55
Ni/Grafit-Einlaufbeläge, Ursache für Wasserstoffversprödung an Ti 12.2.1.7-18
NiCd-(Nickel-Kadmium) Beschichtung/Schicht 12.2.1.8-39, 12.2.1.8-53
Oberflächenverunreinigung mit 14.1-8
Nickellegierung
Bohrung mit Schädigung 12.2.1.1.2-18
Maßänderung beim Aushärten 12.2.1.9-10
Reaktion mit Schleifkörner 12.2.1.1.1-12
Reaktion mit Strahlgut 12.2.1.6-39
Volumenänderung 12.2.1.9-8
Niederaktivitätsschicht, Al-Diffusionsschicht 12.2.1.8-20
Nitrieren 12.2.1.8-2
Beschichtung 12.2.1.8-15

© Axel Rossmann - Turbocomsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Vielkeilkupplung 14.1-18
Schicht
Schwingverschleißfestigkeit 12.2.1.8-19
Schwingfestigkeit 12.2.1.8-18
No start. *Siehe* Fehlstart
Nodules. *Siehe* Warzen: in Cr-Schicht
Noppen 11.1-25
im Kühlluftkanal 11.1-19

O

Oberfläche
Beschädigung 13-3
Glanz, Einfluss von Bädern 12.2.1.7-24
Muster durch Bearbeitung 11.2.1-3
Porosität 12.2.1.3.1-23
Rauigkeit
Klebeverbindung 12.2.1.5-14
Lötfläche 12.2.1.4-8
vor dem Kugelstrahlen 12.2.1.6-12
Zerspanung 12.2.1.1.2-1
Topografie
Einfluss des Kühlschmierstoffs 12.2.1.1.2-23
Schleiffläche 12.2.1.1.1-8
Versprödung, Schleifen 12.2.1.1.1-6
Verunreinigung, Nickel-Kadmium 14.1-8
Vorbereitung, Al-Diffusionsschichten 12.2.1.8-21
Zustand für Kugelstrahlen 12.2.1.6-33
Oberflächenhaut, Kleber 12.2.1.5-11
OEM, Kenntnisse für Reparatur 14.2-7
Ofenlötung 12.2.1.4-8
Öffnen von Lunkern 11.1-18
Öl, Einfluss auf Klebstoff 12.2.1.5-1
Öl-Wasser-Emulsionen 12.2.1.1.2-29
Öldüse, Lötung 12.2.1.4-4
On-Condition Maintenance 14-3, 14-6
Optimierung
einer Reparatur 14.2-1
eines Reparaturverfahrens 14.4-13
Kugelstrahlen 12.2.1.6-21
Optische/visuelle Kontrolle 10-9
Orangenschaleneffekt 11.1-13
Orbitales Reibschweißen 12.2.1.3.4-2
Organische Beschichtungen 12.2.1.8-58
Orientierung
der Rauigkeit durch Strahlen 12.2.1.6-39
Korn 11.1-8
Overlap. *Siehe* Schweißen: Nahtüberlappung
Oxidation
des Haftgrunds 12.2.1.8-27
Einfluss auf Lötreparaturen 14-16
Oxidationsschutz, Al-Diffusionsschicht 12.2.1.8-19
Oxidaufbereitung 12.2.1.7-18
Oxidhaut/-schicht 11.2.1-16
Abtrag 12.2.1.7-1
Diffusionsverbindung 12.2.1.3.5-4
im Druckguss 11.2.1-16
im guss 11.2.1-23
in Gussteilen 11.2.1-29
in Leichtmetallguss 11.2.1-7, 11.2.1-8
Oxidstrahlen 12.2.1.6-1
Abrasives Strahlen 12.2.1.6-36
Beeinflussen von Diffusionsschweißen 12.2.1.6-37
Beladungseffekt 12.2.1.6-37
Hintergrundfluoreszenz 12.2.1.6-39
Orientierung der Rauigkeit 12.2.1.6-39
Rollover 12.2.1.6-39
Verbesserung der Benetzung 12.2.1.6-37
Verunreinigung von Lagerlaufflächen 12.2.1.6-37

P

Pack-Alitierverfahren (Pack Cementation) 12.2.1.8-18, 12.2.1.8-19
Palladiumlot 12.2.1.4-15
Panzerungen
Labyrintehe, Schaufelspitzen 12.2.1.8-4
Schädigung im Prozessbad 12.2.1.7-11
Schweißen 12.2.1.3-3
Parallelfälle 14-20
an Gussteilen 11.2.1-23
bei Werkstofffehlern 11.2.1-1
Parameter
der Gasturbine 14-24
Optimierung, Punktschweißung 12.2.1.3.2-3
Überwachung, Reibschweißen 12.2.1.3.4-5
Passflächen
Handlingschaden 13-12
Korrosion. *Siehe* Fretting
Passungsrost. *Siehe* Fretting
PAW. *Siehe* Plasmaschweißen
Pedestal 11.1-19
Peened Surface Extrusion Folds. *Siehe* PSEF
"Pensacolaunfall"
Fanscheibenbruch 12.2.1.1.2-10
Peppering 12.2.1.1.1-2, 12.2.1.1.1-9
Per (Perchlorethen) 12.2.1.7-17, 12.2.1.3.1-29, 12.2.1.3.4-9. *Siehe auch*
Phacomp-Verfahren 11.2.1-33
Phasen
Änderungen, Erstarrung 11.2.1-14
intermetallische 11.1-8
Phenolkleber 12.2.1.5-8
Phosphor, in Kühlschmierstoffen 12.2.1.1.2-21
Physical Vapor Deposition. *Siehe* PVD
Pickling 12.2.1.3.1-29
Pittingkorrosion. *Siehe* Lochfraß: um Lötung
Plasmaschweißen (Plasma Arc Welding) 12.2.1.3-1
Plasmaspritzen 12.2.1.8-24
Schicht 12.2.1.8-27
Plastische Verformung
beim Schleifen 12.2.1.1.1-9

© Axel Rossmann - Turbocontrol
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

durch Zerspanung 12.2.1.1-7
Plattenmaterial, Anisotropie 11.1-8
PM. *Siehe* Pulvermetallurgie, unvermeidliche Fehlstellen 11.3-24
Polyurethanklebstoffe 12.2.1.5-8
Pore, 11.1-2, 11.1-18
Bildung
Schweißen von Ni-Legierungen 12.2.1.3.1-26
durch Wasserstoff 11.2.2-5
Kriechen von Heißteilen 11.2.3-11
durch zersetzen von Hilfsstoffen 11.2.1-14
Einfluss auf die Schwingfestigkeit von EB-Nähten 12.2.1.3.3-12
Elektronenstrahlschweißen 12.2.1.3.3-12, 12.2.1.3.3-14
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 12.2.1.3.3-12
im Druckguss 11.2.1-14
in Elektronenstrahlschweißungen 11.1-19
in Leichtmetallguss 11.2.1-7
in Schmiedeteil 11.2.2-5
in Titanlegierungen 11.1-19, 11.2.2.1-7
Pulvermetallurgie 11.2.3-9
Schrumpfporosität 11.1-18
Schweißen 12.2.1.3.1-26
von Ni-Legierungen 12.2.1.3.1-26
Titanschmiedeteil 11.2.2.1-17
Verwechslung mit Riss 12.2.1.1.1-11
Wirkung von Eigenspannungen 11.2.2.1-17
Zulässige Größe in EB-Schweißungen 12.2.1.3.3-14
Pore Cracking 11.2.2.1-17, 12.2.1.3.1-6, 12.2.1.3.1-29
in Titanlegierungen 11.2.2.1-17, 12.2.1.3.1-12
Porosität, Einfluss auf Schichtverhalten 12.2.1.8-9
Präzisionsschmieden 11.2.2-1
Preis, Rohteil 11.1-5
Pressschweißen 12.2.1.3.5-2
Prestigeverlust 10-1
durch Fertigungsfehler 12.2-6
Primer
für Klebeverbindung 12.2.1.5-16
für Klebstoffe 12.2.1.5-9
Proben
Entnahme 10-5, 11.1-8
separat hergestellt 10-6
Problemanalyse 14.4-1
Probleme
bauteilspezifischer Fertigung 12.2-7
Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-2
Halbzeug 11.1-1
Lineare Reibschweißen 12.2.1.3.4-11
mit Prozessbädern 12.2.1.7-2
Rohteile 11.1-1
verfahrensspezifische 12.2.1.1-1
von Klebstoffsystemen 12.2.1.5-7
Zerspanung 12.2.1.1.2-1
Problemzonen, Hinweise 11.3-6
Produkthaftung 10-1, 10-5
Prozess
Stabil 12.2.1.7-2
stabiler 10-1
Prozessbad 12.2.1.7-1
Alterung 12.2.1.7-11
Ätzen 12.2.1.7-1
Blasenbildung 12.2.1.7-26
Einfluss auf Oberflächenglanz 12.2.1.7-24
Entfetten 12.2.1.7-2
Erprobung von Ätzbädern 12.2.1.7-14
Funkenbildung 12.2.1.7-26
Hinweise auf Badzustand 12.2.1.7-26
in der Entwicklung 12.2.1.7-2
in der Reparatur 12.2.1.7-4
Korrosion an Leichtmetallguss 12.2.1.7-11
Probleme 12.2.1.7-2
Reaktionszeit 12.2.1.7-26
Schadensmechanismen in Ätzbädern 12.2.1.7-14
Schädigung von Elastomeren 12.2.1.7-23
Schädigung von Klebeverbindungen 12.2.1.7-23
Schädigung von Panzerungen 12.2.1.7-11
Schädigung von Wolframcarbid 12.2.1.7-11
Schädigung von Wolframkarbid 12.2.1.7-23
Schädigungen an Leichtmetalllegierungen 12.2.1.7-23
Schlammablagerungen 12.2.1.7-26
Schlieren 12.2.1.7-24, 12.2.1.7-26
Selektiver Angriff 12.2.1.7-10
Stromkontakte 12.2.1.7-26
Strömungsbedingungen 12.2.1.7-24
Überwachung 12.2.1.7-4
Überzeiten 12.2.1.7-11
Teileverwechslung 12.2.1.7-26
Trocknung 12.2.1.7-27
Veränderung 12.2.1.7-4
Verfärbungen von Titan 12.2.1.7-24
Verhalten von Werkstoffkombinationen 12.2.1.7-23
Verschleppung 12.2.1.7-6
von Verunreinigungen 12.2.1.7-4, 12.2.1.7-21
Verunreinigung durch Cl-Verbindungen 12.2.1.7-6
Verwechslung 12.2.1.7-26
Wasserstoffaufnahme 12.2.1.7-28
Prozess
Beobachtung, Schadensverhütung 12.2.1.1.1-14
Daten
Kugelstrahlen 12.2.1.6-11
Reibschweißung 12.2.1.3.4-6
Kontrolle, Beschichtung 12.2.1.8-5
Optimierung, Ätzbäder 12.2.1.7-14
Parameter
Einfluss auf Hartchromschicht 12.2.1.8-46
Fehler in thermischen Spritzschichten 12.2.1.8-

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

35
Überwachung 14.4-13
Stabilität 12.2.1.7-14
Überwachung, Reibschweißen 12.2.1.3.4-2
Prüflage, Einfluss auf Erkennbarkeit beim Röntgen 12.2.1.3.3-15
Prüfstandsversuch, Reparaturnachweis 14.4-2
Prüfung auf Oberflächenfehler mit Fingernagel 13-3
Prüfverfahren für reparierte Teile 14.2-4
PSEF 12.2.1.6-11, 12.2.1.6-24, 12.2.1.6-30
Kugelstrahlen 12.2.1.6-9, 12.2.1.6-11
PTFE 12.2.1.5-12, 12.2.1.7-6
Pufferwerkstoff gegen Lötrissigkeit 12.2.1.4-31
Pulver
Entmischung durch Vibrationen 12.2.1.8-35, 11.2.3-7
für Thermische Spritzschicht 12.2.1.8-34, 12.2.1.8-35
Pulver-Laserschweißen 10-10
Pulverherstellung, für PM-Teile 11.2.3-7
Pulvermetallurgie 11.2.3-3
Gasporen 11.2.3-9
Korngröße 11.1-16
nichtmetallische Partikel 11.2.3-7
Reaktive metallische Verunreinigungen 11.2.3-7
Reaktive organische Partikel 11.2.3-7
Teile 11.2.3-1
Verunreinigungen des Pulvers 11.2.3-7
Werkstoffe
Probleme 11.2.2.1-1
Schweißbarkeit 12.2.1.3.1-15
Pulverpack-Verfahren 12.2.1.8-18
Punkt- und Rollnahtschweißen
Heftschweißung 12.2.1.3.2-2
Merkmale für Schweißfehler 12.2.1.3.2-3
Parameteroptimierung 12.2.1.3.2-3
Punktschweißen 12.2.1.3-1, 12.2.1.3.2-1, 12.2.1.3.2-3
Ausknöpfen 12.2.1.3.2-2
Schweißspritzer 12.2.1.3.2-1
Qualitätssicherung 12.2.1.3.2-1
Schäden 12.2.1.3.2-2
Verfahrenserprobung 12.2.1.3.2-3
PVD (Physixcal Vapour Deposition) 12.2.1.8-3

Q

Qualität
einer Lötung 12.2.1.4-6
Prüfung durch Kugelstrahlen 12.2.1.6-23
Sicherung
Aufgabe des Konstrukteurs 10-1
bei Reparaturentwicklung 14.3-1
durch Werker bei Zerspanung 12.2.1.1.2-2
Gefügeeinfluss 11.1-14
Klebeverbindung 12.2.1.5-10
Kugelstrahlen 12.2.1.6-11
Punktschweißen 12.2.1.3.2-1
Reibschweißen 12.2.1.3.4-5
Quellen von Silikongummi in KSS 14.3-5
Querzugfestigkeit, Schmiedeteil 11.2.2-3

R

Radialturbinenrad, Lötung zur Welle 12.2.1.4-29
Randschicht, weiße beim Zerspanen 12.2.1.1.2-4
Rapid Prototyping 11.2.3-1, 12.2.1.3.5-3
Rattern
beim Schleifen 12.2.1.1.1-8
in Bohrung 12.2.1.1.2-15
Marken 12.2.1.1.2-22
Regeneratives 12.2.1.1.2-9
Schwingungen 12.2.1.1.2-8
Zerspanen 12.2.1.1.2-1, 12.2.1.1.2-2, 12.2.1.1.2-8
Rauigkeit
Anstieg beim Ätzen 12.2.1.8-49
beschränkte Aussagefähigkeit bei Riefen 12.2.1.1.2-20
Gusshaut 11.2.1-17
haftfläche Thermischer Spritzschicht 12.2.1.8-29
Unterschiede, Ätzbild 12.2.1.7-9
Räumen 12.2.1.1.2-1
Reaktion
an Gussoberfläche 11.2.1-22
beim Gießvorgang 11.2.1-22
beim Nachverdichten 11.2.1-22
mit Formmasse, Gussteil 11.2.1-12
mit SiC 11.2.1-23
mit Strahlgut 11.1-26, 11.2.1-23
Nickell- und Titanegierung 12.2.1.6-39
Schichten durch Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-24
Reaktionszeit
Beschichtugnsmassen 12.2.1.8-61
Prozessbad 12.2.1.7-26
Reaktiv/-es
metallische Verunreinigungen **11.2.3-7**
organische Partike lin Pulvermetallurgie 11.2.3-7
Schleifkorn 12.2.1.1.1-6
Recast layer 12.2.1.1.2-4
Recycling 11.1-28
Regen 14.4-5
Regeneration
durch HIP 11.2.3-10, 14-22
Risiken 11.2.3-11
von Heißteilen 11.2.3-2
Fähigkeit, Kriechporen als Kriterium 11.2.3-13
Prozess 11.1-20
Regeneratives Rattern 12.2.1.1.2-9
Reibbeiwert, Sulfidschichten auf Silber 12.2.1.8-40
Reibkorrosion. *Siehe* Fretting
Reibmartensit 12.2.1.1.2-4
Reibrost. Siehe Fretting

© Wolfgang Roßmann - Turbosonsult
Nur zu Schulungsunterlagen mit Lizenz

Reibschweißen 12.2.1.3-1, 12.2.1.3.4-1
Beeinflussung durch Hochtemperaturgleitmittel 12.2.1.3.4-5
Einfluss von Trockenschmiermittel 12.2.1.3.4-8
Fehler 12.2.1.3.4-9
Formkerbe 12.2.1.3.4-9
Formkerben 12.2.1.3.4-9
Hohlwelle 12.2.1.3.4-9
Hüftgelenk 12.2.1.3.4-2
Kardanwelle 12.2.1.3.4-4
Klebestellen 12.2.1.3.4-2, 12.2.1.3.4-6
Lineares 12.2.1.3.4-11
mit Schutzgasschleier 12.2.1.3.4-1
Orbitales 12.2.1.3.4-2
Parameterüberwachung 12.2.1.3.4-5
Prozess
Überwachung 12.2.1.3.4-2
Daten 12.2.1.3.4-6
Qualitätssicherung 12.2.1.3.4-5
Schweißspritzer 12.2.1.3.4-9
Schweißwulst 12.2.1.3.4-8
Schwingungen 12.2.1.3.4-2
Serienbeispiele 12.2.1.3.4-2
Spannungsrisskorrosion von Titan 12.2.1.3.4-9
Spannvorrichtungen 12.2.1.3.4-2
Spröde Phasen 12.2.1.3.4-8
Titanlegierungen 12.2.1.3.4-2
Ventile 12.2.1.3.4-4
Verfahrensparameter 12.2.1.3.4-8
Warmrisse 12.2.1.3.4-1, 12.2.1.3.4-8
Werkstoffkombination 12.2.1.3.4-2
Werkstoffkombinationen 12.2.1.3.4-5
Reibverschleiß 14.1-12. *Siehe auch* Fretting
Wiedereinbau 14.1-20
Reibverschweißte Späne 12.2.1.1.2-2
Reinigen/-ung
Ätzen 14.1-18
KSS-System 12.2.1.1.2-31
Thermischer Spritzschichten 12.2.1.8-37
Reinigungsbad 12.2.1.7-1
organische 12.2.1.7-3
SpRK SpRK an Titanlegierungen durch Cl-haltige 12.2.1.3.1-29
Verschleppung 12.2.1.7-6
Wasserstoffaufnahme 12.2.1.1.1-12
Rekristallisation
bei Lötung 12.2.1.4-29
beim Löten 12.2.1.4-10
beim Schmieden 11.1-35
durch Richten 11.3-9
im Einkristallguss 11.2.1-27
Lötung 12.2.1.4-20
nach Kugelstrahlen 12.2.1.6-17
Schmieden 11.2.2.1-4
Relaxation/Relaxieren 11.3-26
Kugelstrahlen 12.2.1.6-21
Risse 12.2.1.3.1-13, 12.2.1.3.1-16
Versuch 11.3-8
REM (Rasterelektronenmikroskop) 14.4-7
Repair. *Siehe* Reparatur
Station 14.3-7
Reparatur 14-2
Abändreung von Verfahren 14.2-1
Abschätzung der Lebensdauer 14.4-2
Absicherung 14.2-6
als Absicherung der Lieferbarkeit 11.3-8
alter Triebwerkstypen 14.1-22
Änderung von Verfahren 14.2-3
Aufbau von Kanten 12.2.1.5-3
Ausblenden 14-10
Bauteilverhalten 14.2-3
Beschichtungen 10-13, 14.2-3
durch lineares Reibschweißen 12.2.1.3.4-11
Einfluss der Betriebsbelastung 14.2-3
Eignungsnachweis im Prüfstandsversuch 14.4-2
Entwicklung 14.2-1
betreuende Fachleute 14.3-1
Entwicklungsschritte 14.2-5
im militärischen Bereich 14.3-2
Qualitätssicherung 14.3-1
Erprobung 14.2-1
Erprobung im Triebwerk 14.2-6
Erprobung in Fleetleader 14.4-2
Gehäuseanforderungen 14.1-4
Grenzen 14.1-1, 14.1-4
bei Turbinenleitapparat 14.1-2
Kombination von Neu- und Reparaturteilen 14.1-2
Kosten, Verhältnis zum Neuteilpreis 14-12
Labyrinthspitzen 14.4-11
laufzeitabhängige Kosten 14-7
Lötung 12.2.1.4-50, 14.2-6
Eigenschaften 14.1-9
Heißteile 14.1-9
Nabenbohrung 14-10
Nachweise und Zulassungen 14-12
Optimierung 14.2-1
Prozessbäder 12.2.1.7-4
Prüfverfahren 14.2-4
Risiken 14.2-1
beim Transport mit Gabelstapler 13-12
Rissbildung 14-10
Schwächung von Turbinenleitschaufeln 14.2-8
Schweißung 14.2-6
Brennkammer 14.1-4
Eigenschaften 14.1-3
Gehäuse 14.1-4
Grenzen 14.1-4
mit Elektronenstrahl 12.2.1.3.3-9
Rohgussteil 11.2.1-12
Streuung der Lebensdauer 14.4-12

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Werkstoffeinfluss 12.2.1.3.1-15
spezifischer Einsatz 14.3-6
Triebwerkserprobung 14.4-1
Veränerung des Betriebsverhaltens 14.2-3
Verfahren
an älteren Triebwrkstypen 14-19
anwendungsspezifisch 14.3-2
Einschränkung der Verfahren der Neuteilherstellung 14.3-5
Entwicklung und Zulassung 14.3-2
Für Entwicklung zuständige Behörden 14.3-1
Gussteil 11.2.1-5
Optimierung 14.4-13
Zulassung 14.3-1
Verschlimmbesserung 14.2-1
von Labyrinthspitzen 14-10
von Verschleißflächen 14.1-12
Reparierbarkeit
nicht bei Schwingschädigung 14-10
Schäden 14-8
Reparierer, Anerkennung 14.3-7
Reproduktion von Schäden 14.4-1
Reservoirwirkung einer Schicht 12.2.1.8-5
Resistance butt welding. *Siehe* Punktschweißen
Resistance seam welding. ***Siehe*** **Rollnahtschweißen**
Resistance welding. ***Siehe*** **Widerstandsschweißen**
Resteutektikum im Guss 11.2.1-30
Restlebensdauer 14-6
Restschmelze 11.2.1-14
Lunkerbildung 11.1-18
Retirement for Cause Konzept/Prinzip 14-3
Richten
Arbeiten 14.1-4
Eigenspannungen 11.1-39
Gussteile 11.2.1-20, 11.3-8
Rekristallisation bei Einkristallen 11.3-9
Werkstoffeinfluss 11.1-13
von Gussteilen 11.1-23
Riefen
Bildung
bei Glättung 12.2.1.1.1-14
beim Schleifen 12.2.1.1.1-9
in Scheibennuten 14.1-15
Rauigkeitsmessung
beschränkte Aussage bei LCF 12.2.1.1.2-20
Rinsing. *Siehe* Spülen
Risiko/-en
einer Reparatur 14.2-1
HIP-Regeneration 11.2.3-11
Minimierung bei Werkstofffehlern 11.3-3
sicherheitsrelevante 10-1
Risk and Revenue - Prinzip 14.3-2
Riss
Abfangen 11.1-6
Abhängigkeit der HCF 11.3-23
bei Wärmebehandlung 11.3-27
beim Schleifen 12.2.1.1.1-9
beim Schmieden 11.2.2.1-2, 11.2.2.1-25
Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-4
Fortschritt 11.2.1-26, 11.2.2.1-1
Einfluss der Kornorientierung 11.3-13
im EK 11.2.1-26
Länge
Kritische 11.2.2.1-1
Faserrichtung 11.1-8
Netzwerk in Cr-Schicht 12.2.1.8-43
Öffnung durch Ätzen für Eindringprüfung 12.2.1.7-2
Schleißen durch Strahlen 12.2.1.6-26
Schließen durch Kugelstrahlen 12.2.1.6-6
spröder in Titanlegierung 11.2.2.1-17
unverschmiedet 11.2.2.1-25
Verlauf von Schleifrissen 12.2.1.1.1-10
verschobene Rissufer 11.2.1-10
Verwechslung mit Poren 12.2.1.1.1-11
von Seigerung 11.2.2.1-25
Wachstum
im Betrieb 10-4
in Titanscheiben 11.2.2.1-7
Titan in Per-Dampf 12.2.1.7-17
Zuschmieren beim Schleifen 12.2.1.1.1-9
Rissbildung 11.2.2.1-1, 12.2.1.1.1-11
an Kanten 10-4
an Mikrolunkern 11.3-13
bei Brünierung 12.2.1.8-11
bei der Wärmebehandlung 11.1-38
durch Lot 12.2.1.4-31
durch Zerspanung 12.2.1.1-7
in Cr-Schicht 12.2.1.8-7
in Keilverzahnungen 12.2.1.8-57
Kadmium bei Temperatur 12.2.1.4-31
nach einem Entfettungsbad 12.2.1.7-17
Reparatur 14-10
Schleifen einer Cr-Schicht 12.2.1.8-11
Schweißung durch Wasserstoff 12.2.1.3.1-32
Thermoelemente 12.2.1.9-13
verzögerte bei Lagerung 13-6
Rissprüfung
Schleiffläche 12.2.1.1.1-8
Verchromte Oberfläche 12.2.1.1.1-8
von Staplergabeln 13-13
Risszähigkeit, Abfall 12.2.1.3.1-3
Rohgussteil, Reparaturschweißungen 11.2.1-12
Rohr, Einfluss des Richten auf Lötung 12.2.1.4-33
Rohteil
Beschaffung 11.1-1
Herstellung
Einfluss auf das Schweißverhalten 12.2.1.3.1-21
Umschmelzen 11.3-17
Lieferzeiten 11.1-5
Preise 11.1-5

© Axel Rossmann - Turbocontrol
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Probleme 11.1-1
Rollnahtschweißen 12.2.1.3-1, 12.2.1.3.2-1, 12.2.1.3.2-3
Schäden durch Schwingermüdung 12.2.1.3.2-6
Rollover (Einbödeln von Kanten durch Erosion)
durch Strahlen 12.2.1.6-39
Kugelstrahlen 12.2.1.6-24
Röntgen
Bestimmung der Mindestbindefläche 12.2.1.4-11
Einfluss der Prüflage auf Erkennbarkeit beim 12.2.1.3.3-15
Mikrorisse in Schweißung 12.2.1.3.1-19
Rotbrüchigkeit 11.2.2-3
Rotoren, Zulassung nach Prozessänderung 11.3-18
Rotorscheiben
fertigungsbedingte Fehler 12.2-9
Zusammenstellung fertigungsbedingter Fehler 12.2-9
RSEW. *Siehe* Rollnahtschweißen
Rückpraller beim Thermischen Spritzen 12.2.1.8-37
Rückstände
von Ätzbädern/Ätzmittel 12.2.1.7-11
von Ätzmittel
Rückverfolgbarkeit 11.1-26, 11.2.1-35
Rupfen, Zerspanen 12.2.1.1.2-8
RW. *Siehe* Widerstandsschweißen

S

Safe Live Concept 14-14
Salmonellen in KSS Emulsion 12.2.1.1.2-30
Sampling 14.4-3
Sandguss, Leichtmetall 11.2.1-2, 11.2.1-6
Sandwich
Bauweisen, Diffusionsschweißen 12.2.1.3.5-1
Strukturen, Kleben 12.2.1.5-3
Sättigung, Kugelstrahlen 12.2.1.6-7
Grenze 12.2.1.6-9
Sauerstoffaufnahme
beim Schweißen von Titan 12.2.1.3.1-11
lineares Reibschweißen 12.2.1.3.4-11
Versprödung von Titanlegierungen 12.2.1.1.2-22
von Ti beim thermischen Spritzen 12.2.1.8-25
Scale Conditioning. Siehe Oxidaufbereitung
Schaden
Chargen eingrenzen 11.2.1-35
Einspritzdüse 14-24
Hochdruckturbine, Leitapparat 14-24
Schäden
beim Kugelstrahlen 12.2.1.6-24
durch Lotreste 12.2.1.4-29
Probleme des Zerspanens 12.2.1.1.2-2
Punkt- und Rollnahtschweißen 12.2.1.3.2-2
reparierbare 14-8
ursächlicher Fehler, Identifikation 11.3-18
verfahrensspezifische 12.2.1.1-1
Verhütung
durch Kugelstrahlen 12.2.1.6-24
mit Prozessbeobachtung 12.2.1.1.1-14
Wahrscheinlichkeit, Einflüsse auf 11.3-5
Werkzeugschneiden 12.2.1.1.2-4
Zerspanung 12.2.1.1.2-1
Schadensbild, Folgerungen aus 14.4-6
Schadensmechanismen
Fertigung 12.2.1.1-1, 12.2-3
in Ätzbädern 12.2.1.7-14
Klärung 14.4-1
Schädigung
Auffinden 14-14
Bauteilfestigkeit 12.2-3
bei Stromdurchgang 14.1-14
beim Schleifen 12.2.1.1.1-9
durch Ätzverfahren 14-15
Kriterien 14-6
von Bauteilen 14-15
von Scheibennuten 14.1-15
Schädliche Metalle, Gießen 11.1-23
Schälbeanspruchung/-belastung/Schälung
bei Klebeverbindungen 12.2.1.5-2
Lötung 12.2.1.4-15, 12.2.1.4-16, 12.2.1.4-39
Schichtbelastung 12.2.1.8-13
Schallabsorption 12.2.1.8-60
Schallemissionsanalyse 11.3-8
Schaufel
Blattoberfläche, Zustand 14.4-7
Deckband, Frettingverschleiß 14.4-7
Fuß
Frettingverschleiß 14.4-7
Kugelstrahlen 14-10
im Verdichter, Abdichtung 12.2.1.5-4
Kanten, Nacharbeit 14-8
Schwingungen, Abhängig von Maßgenauigkeit 14.1-24
Spitzen, Panzerungen 12.2.1.8-4
Schaumbildung, Kühlschmierstoffe 12.2.1.1.2-22
Schaumbremse 12.2.1.1.2-22, 12.2.1.1.2-24, 12.2.1.5-11
Scheibe (Rotor)
aus Stangenmaterial 11.1-8
Bruch
ausgelöst von Ni-Schicht 12.2.1.8-53
Fertigungsmängel 12.2.1.1-4
Kugelstrahlfehler 12.2.1.6-30
Werkstofffehler in Titanlegierung 11.2.2.1-16
Höcker, Ausbruch 14-25
Lage im Gussbarren 11.2.2.1-19
Nuten, Schädigung 14.1-15
Schaden
durch Bohrerbruch 12.2.1.1.2-18
Fehler im Schmiedematerial
Waspaloy 11.2.2.1-22

© Axel Rossmann - Turbokonsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Zusammenstellung fertigungsbedingter Fehler 12.2-9
Schicht
als Korrosionsschutz 12.2.1.8-42
anorganischen Lacke 12.2.1.8-18
Anwendungsort 14.1-13
Aussplitterungen 10-13
Belastung durch Schälung 12.2.1.8-13
Cr-Diffusionsschichten 12.2.1.8-17
Cr-Warzen an Cr-Diffusionsschicht 12.2.1.8-17
Dicke 12.2.1.8-5
Eigenschaften, abhängig von Spritzverfahren 12.2.1.8-27
Eindringprüfung 12.2.1.8-5
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 12.2.1.8-4
Einfluss der Porosität auf das Verhalten 12.2.1.8-9
Einlaufverhalten
Beeinflussung duch Nacharbeit 12.2.1.8-9
Elastomere 12.2.1.8-3
Festigkeit, Einfluss auf die Schwingfestigkeit 12.2.1.8-34
FOD-Resistenz 12.2.1.8-4
Glätten 12.2.1.8-7
Härte bei Nacharbeit 12.2.1.8-9
Kugelstrahlen 12.2.1.8-9
Kunstharze 12.2.1.8-3
Nachbehandlung 12.2.1.8-7
Probleme beim Abziehen 14.1-13
Reste 12.2.1.7-9
Risse,
Al-Diffusionsschichten 12.2.1.8-21
Bildung bei Brünierung 12.2.1.8-11
Störungen in Al-Diffusionsschichten 12.2.1.8-21
Thermografie 12.2.1.8-5
Überschleifen 12.2.1.8-7
verbliebener Bearbeitungsstaub 12.2.1.8-9
Verfestigen 12.2.1.8-9
Verhalten bei FOD 12.2.1.8-18
Verschleiß 12.2.1.8-5
ZfP 12.2.1.8-5
Schimmelpilze 12.2.1.1.2-30
Schlamm im Prozessbad 12.2.1.7-26
Schlauchmaterial für Schutzgas 12.2.1.3.1-33
Schleifbrand 12.2.1.1.1-4
Schleifen 12.2.1.1.1-9
Abfall der Festigkeit 12.2.1.1.1-9
Aufschmierungen 12.2.1.1.1-6
Chromschicht 12.2.1.1.1-8
Eigenspannungen 12.2.1.1.1-2
Eignung eines Werkstoffs 12.2.1.1.1-11
Einfluss der Korngrenzenbelegung 11.2.1-3
Einfluss der Parameter 12.2.1.1.1-9
Einfluss der Schleifmaschine 12.2.1.1.1-9
Einfluss der Schleifscheibe 12.2.1.1.1-9
Funken 12.2.1.1.1-6
Geeignete Parameter 12.2.1.1.1-12
Gratbildung 12.2.1.1.1-6
Härteänderung 12.2.1.1.1-3
Korrosion 12.2.1.1.1-6
Kühlmittelzutritt 12.2.1.1.1-10
Oberflächenversprödung 12.2.1.1.1-6
Peppering 12.2.1.1.1-2, 12.2.1.1.1-9
Plastische Verformung 12.2.1.1.1-9
Rattern 12.2.1.1.1-8
Reaktives Schleifkorn 12.2.1.1.1-6
Riefenbildung 12.2.1.1.1-9
Riss Zuschmieren 12.2.1.1.1-9
Rissbildung 12.2.1.1.1-4
Rissbildung unter Cr-Schicht 12.2.1.8-11
Schädigungen 12.2.1.1.1-9
Schwingermüdung 12.2.1.1.1-2
SiC als Schleifmittel 12.2.1.1.1-6
Späne 12.2.1.1.1-6
Verfahren 12.2.1.1.1-1
Vibration 12.2.1.1.1-8
Wärmespannungen 12.2.1.1.1-9
Wasserstoffaufnahme und Rissbildung 12.2.1.1.1-5
Weiße Randschicht 12.2.1.1.1-4
weniger Kühlung 12.2.1.8-11
Schleiffläche
Oberflächentopografie 12.2.1.1.1-8
Rissprüfung 12.2.1.1.1-8
Schleifgrate 12.2.1.1.1-6
Schleifkorn,
Reaktion mit Werkstoffen 12.2.1.1.1-12
reaktives 12.2.1.1.1-6
Schleifkörper, Chip (Vibrationsschleifen) 12.2.1.1.1-14
Schleiföle für Titanlegierungen 12.2.1.1.2-26
Schleifparameter 12.2.1.1.1-12
Schleifriefen 12.2.1.1.1-8
Schleifriss, 11.2.1-3, 12.2.1.1.1-4, 12.2.1.1.1-8
Kontureinfluss 12.2.1.1.1-10
Verlauf 12.2.1.1.1-10
ZfP 12.2.1.1.1-8
Zuschmieren 12.2.1.1.1-9
Schleifscheibenkörnung, Einfluss auf die Schwingfestigkeit 12.2.1.1.2-23
Schleifstaub 12.2.1.1.1-6
Schlieren
auf Badoberfläche 12.2.1.7-24
Prozessbad 12.2.1.7-26
Schmelzbad, Einfluss auf Fehlstellen 11.1-31
Schmelzbereich, Lot 12.2.1.4-10
Schmelze, Fließeigenschafft 11.2.1-16
Schmelzprozesses 11.1-28
Schmelzschweißungen 12.2.1.3-1
Schmelzschweißverfahren 12.2.1.3.1-1
Schmiedefalte 11.2.2-3
in Verdichterschaufel 11.2.2.1-25

© Axel Rossmann - Turbocontrol
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Schmiedekontur 11.1-35
Schmieden
Abkühlgeschwindigkeit 11.1-35
Eigenspannungen 11.1-32, 11.2.2.1-4
Einfluss auf das Gefüge 11.1-35
Einfluss auf die Festigkeit 11.1-35
Entstehung von Heißrissen 11.1-32
Fachbegriffe 11.2.2-1
γ'-Phase 11.2.2.1-4
Grobkornbereiche 11.2.2.1-4
Prozess
Einfluss auf das Gefüge 11.1-10
Simulation 11.2.2-6
Rekristallisation 11.1-35, 11.2.2.1-4
Risse 11.2.2.1-2
Temperaturführung 11.2.2.1-4
Thermomechanische Umformung 11.2.2.1-4
Thermomechanisches Modell 11.1-35
Verformungsgrad 11.1-32
Verformungsverhalten beim 11.2.2-6
Wärmebehandlung 11.1-32, 11.1-35
Warmfestigkeit 11.2.2.1-4
Zerkleinerung von Fehlern 11.2.3-3
Schmiederiss 11.2.2.1-25
Turbinenscheibe 11.2.2.1-5
Schmiedeteil 11.1-2
Dopplung 11.2.2.1-25
Faserverlauf 11.2.2.1-2
Fehler/Fehlstellen 11.1-32, 11.2.2.1-2
durch Gießen 11.1-15
trotz Umformen 11.1-16
Kategorieen 11.2.2.1-7
Seigerungen 11.1-15
Gefügerichtung 11.2.2.1-2
innere Sprödrisse 11.2.2-5
Lage im Gussbarren 11.2.2.1-22
Lunker 11.1-19
Poren 11.2.2-5
Querzugfestigkeit 11.2.2-3
Umformgrad 11.1-16
Ultraschallkontur 11.1-16
Wärmebehandlung 11.1-16
Schmiedeumformung/Verformung 11.2.2.1-2
verhindern von Fehlstellen 11.2.2.1-8
Schmierwirkung Kühlschmierstoff (KSS) 12.2.1.1.2-21, 12.2.1.1.2-29
Schneidenaufbau 12.2.1.1.2-4
Schneidöl.*Siehe* Kühlschmierstoff (KSS) 12.2.1.7-4
Schnittkraft
Charakteristik 12.2.1.1.2-9
Diagramm 12.2.1.1.2-9
Schraube/-n
Diffusion von Fremdmetallen 0-5
Eindringen von Fremdmetallschmelze 0-5
Merkmale von Brüchen 0-5
mit Silber als Gleitbeschichtung 12.2.1.8-43
Verfärbung einr Bruchfläche 0-5
Wasserstoffversprödung 12.2.1.8-51
Schrumpf beim Gießen 11.1-25
Schrumpflunker 11.1-18, 11.2.1-7, 11.2.1-9, 11.2.1-14, 11.2.2-5, 11.3-6
Einfluss auf Schwingfestigkeit 11.3-10
Thermoermüdung 11.3-13
Schrumpfporosität 11.1-18, 11.2.1-14
Schüttware, Identifikation 11.2.1-35
Schutzbeschichtungen, Verstärkung von Korrosion 14-18
Schutzgas
Atmosphäre, Lötung 12.2.1.4-15
Feuchtes 12.2.1.3.1-33
Löten 12.2.1.4-13
Schlauchmaterial 12.2.1.3.1-33
Schleier
beim Reibschweißen 12.2.1.3.4-1
Schweißen 14.1-16
ungenügender Schleier 12.2.1.3.1-30
Verunreinigung 12.2.1.3.1-29
Verunreinigungen 12.2.1.3.1-27
Schutzgasschweißen 12.2.1.3-1
Schwachstelle 11.2.3-3, 11.3-6, , 11.3-10, 11.3-24, 10-4,
an Lötungen 12.2.1.4-19
Definition 11.1-2
durch Schweißen 12.2.1.3.1-2
Verfahrensrelevant 14.2-4
Schwefelhaltige Schneidflüssigkeiten (KSS), Auswirkung auf Silber 12.2.1.1.2-21, 12.2.1.8-40
Schweißbarkeit, Beurteilungskriterien 12.2.1.3.1.1-4
Schweißelektrode, feuchte Umhüllungen 12.2.1.3.1-33
Schweißen/Schweißung 12.2.1.3.1-26
α-Anreicherung in Titanlegierung 12.2.1.3.1-26
Abhilfe gegen Warmrisse 12.2.1.3.1-14
Abkühlungsrisse 12.2.1.3.1-14
Anlauffarben 12.2.1.3.1-30
Auswirkung äußerer Einflüsse 12.2.1.3.1-28
Diffusionsschweißen 12.2.1.3.5-1
Eigenspannung in einer Naht 12.2.1.3.1-24
Einbrandkerbe 12.2.1.3.1-5
Einbringen von W-Partikeln 12.2.1.3.1-29
Einfluss auf das Containmentverhalten 12.2.1.3.1-3
Einfluss der Eigenspannungen auf LCF
Titanlegierung 12.2.1.3.1-25
Einfluss der Feuchtigkeit 12.2.1.3-2
Einfluss der Korngrenzenbelegung 11.2.1-3
Einfluss der Nahtbreite auf Warmrisse 12.2.1.3.1-21
Einfluss der Prüfrichtung auf Schwingffestigkeit 12.2.1.3.1-26

© Axel Rossmann - Turbocontrol
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einfluss der Rohteilherstellung 12.2.1.3.1-21
Einfluss des Schutzgas auf die Nahtgeometrie 12.2.1.3.1-27
Einfluss des Wärmebehandlungszustands 12.2.1.3.1-14
Einfluss einer Reinigung mit Stahlwolle 12.2.1.3.1.1-6
Einfluss eines Kunststoffschlauchs für Schutzgas 12.2.1.3.1-26
Einfluss von Eisenverunreinigungen bei Titanlegier 12.2.1.3.1-29
Einfluss von Kühlschmierstoffen 12.2.1.3.1-29
Einfluss von SiC 12.2.1.3.1-30
Empfehlungen 12.2.1.3.1.1-5
Erstarrungsrisse 12.2.1.3.1-14
Fehler an Brennkammermantel 12.2.1.3.1-7
Feinkorneinfluss 12.2.1.3.1-14
Fischaugen 12.2.1.3.1-33
Gasaufnahme 12.2.1.3.1-29
geeignete Bauteilzonen 12.2.1.3.1-2
Gehäuse 14.1-4
geschädigtes Teil 14.1-3
Hohlstellen 12.2.1.3.1-3
Kaltschweiße 12.2.1.3.3-7
Klebestelle 12.2.1.3.3-5
Konstruktionseinfluss 12.2.1.3.1.1-1
Kraftstoffleitung 12.2.1.3.1-6
Lieferanteneinfluss 12.2.1.3.1-21
Nahtüberhöhung 12.2.1.3.1-5
Nahtüberlappung 12.2.1.3.1-5
Oberflächenporosität bei Titanlegierungen 12.2.1.3.1-23
Optimaler Werkstoffzustand 12.2.1.3.1-21
Panzerung von Verschleißzonen 12.2.1.3.1-19
Panzerungen 12.2.1.3-3
Poren 12.2.1.3.1-26
Porosität in Titanlegierungen 12.2.1.3.1-23
Probleme bei Feuchtigkeit 14.1-16
Probleme der Wurzel 12.2.1.3.1-11
Pulvermetallurgische Werkstoffe 12.2.1.3.1-15
Reparatur 14.2-6
einer Naht 12.2.1.3.1-3
Rissbildungsmechanismen 12.2.1.3.1-16
Röntgen auf Mikrorisse 12.2.1.3.1-19
Schutzgasschleier 14.1-16
Schutzgasverunreinigungen 12.2.1.3.1-27
Schwachstellen 12.2.1.3.1-2
Schweißfolge 12.2.1.3.1.1-2
Schwingfestigkeitsabfall 12.2.1.3.1-2
Stoßversatz 12.2.1.3.1-7
Titanlegierungen 12.2.1.3.1.1-5, 14.4-11
Trennungen 12.2.1.3.1-3
ungenügender Schutzgasschleier 12.2.1.3.1-30
Verprödung durch Feuchtigkeit 13-4
Verunreinigung des Schweißstoßes 12.2.1.3.1-26
vorher Kugelstrahlen 12.2.1.6-17
Wärmeeinflusszone 12.2.1.3.1-2
Warmrisse 12.2.1.3.1-13
Werkstoffeinfluss 11.1-13
Schweißfehler 12.2.1.3.1-11
Schweißfläche
Verrostete 12.2.1.3.1-33
verschmutzt mit Kohlenwasserstoffen 12.2.1.3.1-33
Schweißfolge 12.2.1.3.1.1-2
Plan 12.2.1.3.1.1-3
Schweißkonstruktionen 12.2.1.3-2
Naht 12.2.1.3.1-2
Ausbildung 12.2.1.3.1-5
Breite, Warmrisse 12.2.1.3.1-21
Schweißporosität
Einfluss auf LCF 12.2.1.3.1-12
in Titanlegierungen 12.2.1.3.1-23
Schweißreparatur
Eigenschaften 14.1-3
Labyrinthspitzen 14.4-11
Betriebsverhalten 12.2.1.3.1-15
Schweißrisse, Bruchmechanischen Abschätzun 14.4-11
Schweißspritzer
beim Punktschwißen 12.2.1.3.2-1
Reibschweißen 12.2.1.3.4-9
Schweißstoß
Verunreinigung 12.2.1.3.1-26
Versatz, Einfluss auf die Schwingfestigkeit 12.2.1.3.1-7
Wasserstoffeinfluss 12.2.1.3.1-32
Wasserstoffversprödung 12.2.1.3-2, 14.1-16
Schweißqualität 12.2.1.3.1-1
Schweißversatz 12.2.1.3.1-7, 12.2.1.3.1-8
Schweißwulst, beim Reibschweißen 12.2.1.3.4-8
Schweißwurzel 12.2.1.3.1-11
Schwer anätzbare Zone vom Bohrungen 12.2.1.1.2-18
Schwindungsporosität 11.2.1-14
Schwingbruch, an Lötung 12.2.1.4-35
Schwingermüdung
Abtrennen an Gusstrauben 11.2.1-20
in der Gießerei 11.2.1-20
ohne Makroriss 12.2.1.1.2-2
Schäden an Rollnahtschweißungen 12.2.1.3.2-6
Schleifen 12.2.1.1.1-2
Verdichterscheibe 14.2-10
Zerspanung 12.2.1.1.2-2
Schwingfestigkeit 12.2-5
Abfall durch Korrosion 14.1-18
Cr- und Ni-Schichten 12.2.1.8-46
Cr-Schicht 12.2.1.8-43
Diffusionsschichten 12.2.1.8-18
einfluss der Haftflächentopografie 12.2.1.8-34
Einfluss der Schichtfestigkeit 12.2.1.8-34

© Axel Grossmann - Turbomaschinen
Abschnittsunterlagen mit Lizenz

Einfluss der Schleifscheibenkörnung 12.2.1.1.2-23
einfluss des Kugelstrahlens 12.2.1.6-15
Einfluss des Spannungsgefälles 11.3-10
Einfluss des Spannungsgradienten 12.2.1.8-32
Einfluss eines Schweißstoßversatzes 12.2.1.3.1-7
Einfluss von Gusshaut 11.2.1-18
Einfluss von Lunkern 11.3-10
Einfluss von Poren beim Elektronenstrahl-schweißen 12.2.1.3.3-12
Einfluss von Schichten 12.2.1.8-4
Einfluss von Schleifriefen 12.2.1.1.1-8
Einfluss von thermischer Spritzschicht 12.2.1.8-32
Fertigungseinfluss 10-4
galvanische Beschichtung 14.1-11
Hartverchromung 12.2.1.8-43
Kornorientierung im Guss 11.2.1-31
Korrosionseinfluss 14.1-13
Kugelstrahlen 12.2.1.6-1
Ni-Schicht 12.2.1.8-43
Nitrierschichten 12.2.1.8-18
Querschnittseinfluss beim Kugelstrahlen 12.2.1.6-19
Schweißung
Einfluss der Prüfrichtung 12.2.1.3.1-26
Verchromung 14.1-11
Vernickeln 14.1-11
Schwingfestigkeitsabfall
Ni-Schicht 12.2.1.8-55
Nickelschicht 10-13
Schweißung 12.2.1.3.1-2
spröde Schicht 10-13
Schwingriss
EB-geschweißte Zahnradwelle 12.2.1.3.3-15
im Gussteil 11.1-25
unter der Oberfläche 12.2.1.6-24
Schwingrissbildung
Abtrennen an Gusstrauben 11.1-25
Schwingschädigung
Reparierbarkeit 14-10
Schwingungen
Anregung bei Zerspanungsvorgang 10-8
Dämpfung durch Klebstoffe 12.2.1.5-4
Freie von Werkzeigmaschninen 12.2.1.1.2-8
Reibschweißen 12.2.1.3.4-2
selbsterregte beim Zerspanen 12.2.1.1.2-8
Zerspanung 12.2.1.1.2-1
Schwingverschleiß. *Siehe* Fretting
Einfluss des Kugelstrahlens 12.2.1.6-19
Festigkeit, Nitrierschicht 12.2.1.8-19
Schwitzwasser 12.2.1.3.1-26
Bildung 14.4-5
bei Lagerung 13-4
Einfluss bei Schweißung 12.2.1.3.1-26
Wasserstoffversprödung beim Schweißen 12.2.1.3.1-33
Schwungradreibschweißen 12.2.1.3.4-6
Klebestellen 12.2.1.3.4-6
Segmentierungsrisse (Wärmedämmschicht) 12.2.1.8-4
Seigerung 11.1-2, 11.2.1-2, 11.2.2-5
Carbonitrid 11.2.2.1-22
Diskreten Typ 11.1-30
Diskreter Typ 11.1-30
in Ni-legierung
Lanthan und Cer 11.2.2.1-19
Rissbildung 11.2.2.1-25
Seigerungen
α-Gefüge 11.2.2.1-12
durch Pulverentmischung 11.2.3-7
Entstehung 11.1-26
Guss 11.2.1-22
Druckguss 11.2.1-16
Schmiedeteile 11.1-15
Seigerungsätzung 12.2.1.7-2
Sekundenkleber 12.2.1.5-7
Selbsterregte Schwingungen beim Zerspanen 12.2.1.1.2-8
Selektiver Angriff im Ätzbad 12.2.1.7-10
Serie
Anlauf, Halbzeigbeschaffung 11.1-5
Fertigung 10-2
Prüfverfahren, Auffindproblem 11.2.1-23
Verfahren
Bestandteil der Auslegung 12.2-2
zur Absicherung 12.2-2
Severity. *Siehe* Lebensdauerverbrauch
SFAR. *Siehe* Federal Aviation Regulation Subtitle
Shop
Anerkennung/Zulassung 14.3-7
Shot Peening. *Siehe* Kugelstrahlen
SiC
als Schleifmittel 12.2.1.1.1-6
Einfluss auf Schweißung 12.2.1.3.1-30
Reaktion mit Ni- und Ti-Legierungen 12.2.1.1.1-12
Reaktionen 11.2.1-23
Strahlen einer Lötfläche 12.2.1.4-12sicherheits-relevante Risiken 10-1
Sigmaphase (σ -Phase) 11.1-8
Silber
als Gleitbeschichtung 12.2.1.8-43
Auswirkung schwefelhaltiger Schneidflüssigkeiten 12.2.1.8-40
Reibbeiwert von Sulfidschichten 12.2.1.8-40
Schicht, Qualitätsprüfung durch durch Kugel-strahlen 12.2.1.6-23
Schwefelaufnahme aus Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-24
Sulfidschichten 12.2.1.8-40
Silberlot 12.2.1.4-33
als Anstreifschicht 12.2.1.4-46
Silikon

© Axel Rossmann - Turbocampus
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Verbindungen 12.2.1.7-6, 12.2.1.7-24
Auswirkung auf Eindringprüfung 12.2.1.1.2-24
Silikongummi
Belag 12.2.1.5-4
Haftfestigkeit 12.2.1.8-13
Quellen dirch Kühlschmierstoff 14.3-5
Quellen in KSS 14.3-5
Silikonklebstoffe 12.2.1.5-8
Silikonöl
in Kühlschmierstoffen 12.2.1.1.2-22
Siliziumkarbid. *Siehe* SiC: Strahlen einer Lötfläche
Simulation, Schmiedeprozess 11.2.2-6
Single Crystal. *Siehe* Einkristall
Singlesourcing 11.3-3
Sioux City-Flugunfall 11.2.2.1-14, 11.2.2.1-6
SK. *Siehe* Einkristall
SLC. *Siehe* Sustained Load Cracking
Sliver. Siehe Gratspitzen: auf Beschichtugnsfläche
im Einkristallguss 11.2.1-27
SMIE 14-20
Soldering. Siehe Löten: Weichlöten
Solidification White Spots. *Siehe* Erstarrungs-White-Spots 11.1-37
Sollbruchstelle, Kugelstrahleinfluss 12.2.1.6-15
Sonic Defects 11.1-30
Source demonstration 14.3-7
Spaltbreite/Spaltweite
Einfluss auf Lötung 12.2.1.4-6, 12.2.1.4-13
12.2.1.4-17, 12.2.1.4-22
Spaltflächen in Titanlegierungen 11.2.2.1-7
Spaltfüllung, Lötung 12.2.1.4-8
Spaltlöten 12.2.1.4-13
Span/Späne
Arten 12.2.1.1.2-6, 12.2.1.1.2-8
Aufschmieren 12.2.1.7-9
Aufschmierungen 12.2.1.1.2-4
Aussehen 12.2.1.1.2-8
Bewerten 12.2.1.1.2-6
Bildung 11.2.1-2
Eingedrückte 12.2.1.1-8
Farbe 12.2.1.1.2-8
Form 12.2.1.1.2-8
Zerspanung 12.2.1.1.2-6
Fressen mit Werkstück 12.2.1.1.2-2
Reibverschweißte 12.2.1.1.2-2
Schleifen 12.2.1.1.1-6
Spanbrecher, Sulfide 11.2.2-3
Spanbruch 12.2.1.1.2-8
Spänekontakt (Aufschmieren)
Makroätzung 12.2.1.1.2-2
Wirbelstromprüfung 12.2.1.1.2-2
Spanen /spanende Bearbeitung 12.2.1.1-3
Eigenspannungen 12.2.1.1-7
mit definierter Schneide 12.2.1.1-3
mit undefinierter Schneide 12.2.1.1-3
Thermischer Spritzschichten 12.2.1.8-37
verfahrensspezifische Probleme 12.2.1.1-1
Späne
Nester, Maschinenbrand 12.2.1.1.2-26
Stau 12.2.1.1.2-2
Fanscheibenschaden 12.2.1.1.2-15
Transport 11.2.1-2
Spannungs-Dehnungs-Diagramm 11.2.2-6
Spannungsarmglühen 11.2.1-14
Einfluss auf Schwingfestigkeit
Spannungsgradient/Spannungsgefälle
Einfluss auf Schwingfestigkeit 11.3-10, 12.2.1.8-32
Kugelstrahleffekt 12.2.1.6-11
Wirksamkeit des Kugelstrahlens 12.2.1.6-30
Spannungsrisskorrosion 12.2.1.3.1-3
Abhilfe durch Kugelstrahlen 12.2.1.6-7, 12.2.1.6-17
beim Brünieren 14-20
Brünieren 12.2.1.8-57
Cl-haltiger Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-26
Cr-Stahl 11.2.2.1-26
durch Flussmittel 12.2.1.4-20, 12.2.1.4-37
in Titanlegierung 11.2.2.1-27
Kugelstrahlen 12.2.1.6-6
Reibschweißung von Titan 12.2.1.3.4-9
Spannvorrichtungen, Reibschweißen 12.2.1.3.4-2
Spezifikationsgrenzen als Fehlerdefinition 11.1-2
Spikes 12.2.1.3.3-6
in einer Zahnradwelle 12.2.1.3.3-15
in Elektronenstrahlschweißungen 12.2.1.3.1-23, 12.2.1.3.3-6, 12.2.1.3.3-7
Spitzenpanzerung
aufgelötet 12.2.1.4-4, 12.2.1.4-5
Handlingschaden 13-11
Splitter. *Siehe* Sliver: im Einkristallguss
Sporenbilder 12.2.1.1.2-30
Spritzer, anhaftend 12.2.1.7-9
Spritzpulver
feucht 12.2.1.8-32
Thermoermüdungsverhalten Wärmedämmshicht 12.2.1.8-32
Spritzschicht
Abpraller 12.2.1.8-27
Eigenschaften 12.2.1.8-25
Haftfestigkeit 12.2.1.8-27
Struktur 12.2.1.8-27
Thermische 12.2.1.8-24
Spritzverfahren, Schichteigenschaften 12.2.1.8-27
SpRK
An Titanlegierungen durch Fingerabdrücke 12.2.1.3.1-29
Brünieren 12.2.1.8-11
Prüfung, Zugvorrichtung in Bädern 12.2.1.7-17
Rissbildung an Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.7-18

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Zugspannungen 12.2.1.7-9
Sprödbruch Stahlguss 11.2.1-9
Spröde Phasen 11.1-40, 11.2.1-33
Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-4
in Lötungen 12.2.1.4-19
Reibschweißung 12.2.1.3.4-8
Sprödigkeit
Al-Diffusionsschichten 12.2.1.8-21
Gusshaut 11.2.1-18
Lötung 14.1-9
Risse im Inneren eines Schmiedeteils 11.2.2-5
Spülen 12.2.1.7-2
Bäder
Aussehen von Schädigungen 12.2.1.7-24
Verschleppung 12.2.1.7-6
Spurenelement im Werkstoff 11.1-8
Sputtern 12.2.1.8-3
Stabiler Prozess 10-1, 10-2, 12.2.1.7-2, 12.2.1.7-14
Stahlbürsten, Aufschmieren von Material 12.2.1.1.1-12
Stahlguss
Diffusionsglühen 11.2.1-9
Korngrenzenbelegungen 11.2.1-9
Sprödbruch 11.2.1-9
Verdichterrad 11.2.1-9
Stall. *Siehe* Strömungsabriss: Verdichter
Stängelkristalle 11.1-25, 11.2.1-12, 11.2.1-14
Guss 11.2.1-26
Stangenmaterial
Anisotropie 11.1-8
Scheiben aus 11.1-8
Stanzwerkzeuge 10-7
Stapelfähigkeit
Transportbehälter 13-8
Stapler
Fahrer motivieren 13-12
Gabel, Risprüfung 13-13
Staub/Stäube
Ablagerungen auf Spritzfläche 12.2.1.8-31
in der Fertigung 13-4
unter Fußplattform 14-18
Steifigkeitssprung, Lötung 12.2.1.4-39
Steppschweißen /Steppnaht 12.2.1.3.2-1, 12.2.1.3.2-3
Stillstand
von Bearbeitungsmaschinen **12.2.1.1.2-31**
Zeiten 14.4-5
Stöckel 11.2.2.1-12
Strahlen/Kugelstrahlen/Abrasionssrahlen
Anlage12.2.1.6-9
Behandlung, Gussteil 11.2.1-12, 11.2.1-29

Bewegung, Kugelstrahlen 12.2.1.6-14
Fehler, Scheibenbruch 12.2.1.6-30
Gussteile abrasiv 11.2.1-20
Intensität 12.2.1.6-34
Abhängigkeit vom Strahlwinkel 12.2.1.6-28
Kugelstrahlen 12.2.1.6-28
Verfahren 12.2.1.6-35
Abrasiv 12.2.1.6-1, 12.2.1.6-38
Abrasives Strahlverfahren
Oxidstrahlen 12.2.1.6-36
Kontrolle 12.2.1.6-32
Kugelstrahlen 12.2.1.6-1
Naßstrahlen 12.2.1.6-1
Oxidstrahlen 12.2.1.6-1
Versuche, Auswertung 12.2.1.6-34
Vorrichtung 12.2.1.6-34
für Bohrungen 12.2.1.6-28
Strahlbild
Kontrolle 12.2.1.6-15
Kugelstrahlen 12.2.1.6-15, 12.2.1.6-24
Strahldüse, Kugelstrahlen 12.2.1.6-12
Strahlgut/Strahlmittel
Abrieb auf Werkstück 12.2.1.6-25
Einfluss beim Schweißen 12.2.1.3.1-30
Partiklelbruch 12.2.1.6-32
Reaktion mit Ti- und Ni-Legierungen 12.2.1.6-39
Reaktionen mit 11.1-26
Reste auf Gussoberfläche 11.2.1-23
Scharfkantig 12.2.1.6-24
Verstopfung von Kühlluftkanälen 12.2.1.6-39
Verunreinigung, Kugelstrahlen 12.2.1.6-12, 12.2.1.6-24
Stottern, Kugelstrahlen 12.2.1.6-12
Strahlwinkel
Abhängigkeit der Strahlintensität 12.2.1.6-28
Kugelstrahlen 12.2.1.6-28
zu flach 12.2.1.6-30
Striations, Gussschwachstelle 11.2.1-27
Strippen. *Siehe* Abziehen: von Schichten
Strom
Anschluss/Kontakt
Funkenbildung 12.2.1.8-49
galvanische Beschichtung 12.2.1.8-49
in Prozessbädern 12.2.1.7-26
Durchgang, Schädigungen 14.1-14
Stromlos Vernickeln 12.2.1.8-40
Stromzuführende Kabel, Funkenbildung 12.2.1.8-49
Struktur (Gefüge), Korn 11.1-6
Sulfamat Verfahren. *Siehe* Vernickeln
Sulfidation durch Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-24
Sulfid/-e
als Spanbrecher 11.2.2-3
Schichten auf Silber 12.2.1.8-40
Surface Integrity 12.2-1
Sustained Load Cracking 12.2.1.3.1-12, 12.2.1.3.1-29

T

Tannenbaumfuß, Bruch 14-27

© Axel Rossmann - Tundscheit als Schulungsunterlage mit Lizenz

Tauglichkeitsnachweis, repariertes Bauteil 14.4-2
TCP (Tricresylphosphat) 11.2.1-33
Technologie, seriengeeignete 12.2-1
Teflon. *Siehe* PTFE
Teileverwechslung in Bädern 12.2.1.7-26
Teilzyklen (LCF-Belastung) 14-27
Temperaturführung
beim Schmieden 11.2.2.1-4
Lötung von Metallfilz 12.2.1.4-26
Tenside in Waschmitteln 12.2.1.7-1
Termisches Spritzen, thermische Spritzschicht 12.2.1.8-3, 12.2.1.8-24, 12.2.1.8-25
Abplatzungen 12.2.1.8-29
Abrasiv Strahlen 12.2.1.8-38
Ätzen 12.2.1.8-37
aufgeschmolzene Einschlüsse 12.2.1.8-27
Beeinflussung des Grundwerkstoffs 12.2.1.8-34
Betriebsverhalten 12.2.1.8-28
Diffusion mit Grundwerkstoff 12.2.1.8-30
Eigenschaften 12.2.1.8-25
Eigenspannungen 12.2.1.8-24, 12.2.1.8-29
Eindringprüfung 12.2.1.8-38
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 12.2.1.8-32
Einfluss der Haftfestigkeit auf die Schwingfestigk 12.2.1.8-34
Einfluss des Beladungseffekts 12.2.1.8-27
Einfluss des E-Moduls auf die Schwingfestigkeit 12.2.1.8-34
Einfluss von Rückprallern 12.2.1.8-37
Fehler durch Prozessparameter 12.2.1.8-35
Flammspritzen 12.2.1.8-24
Füllen von Honigwaben 12.2.1.8-37
Gasaufnahme bei Ti-Legierungen 12.2.1.8-25
Haftfestigkeit 12.2.1.8-24
Haftfestigkeit, Änderung im Betrieb 12.2.1.8-28
Lichtbogenspritzen 12.2.1.8-24
Metallspritzens 12.2.1.8-25
Nacharbeit 12.2.1.8-37
Plasmaspritzen 12.2.1.8-24
Pulvereigenschaften 12.2.1.8-34, 12.2.1.8-35
Rauigkeit der Haftfläche 12.2.1.8-29
Reinigen 12.2.1.8-37
Sauerstoffaufnahme von Titan 12.2.1.8-25
Schichtfehler 12.2.1.8-25
Schwingbelastung der Haftfläche 12.2.1.8-33
Schwingfestigkeit
Einfluss der Schichtfestigkeit 12.2.1.8-34
Spanende Bearbeitung 12.2.1.8-37
Spritzfläche mit Staubablagerungen 12.2.1.8-31
Struktur 12.2.1.8-24
ungleichmäßige Pulverförderung 12.2.1.8-32
Wärmebehandlung 12.2.1.8-37
Tests und Erprobung 10-6
Tetrachloräthan 12.2.1.7-17
Textur. *Siehe* Gefügerichtung
Thermoelement 12.2.1.9-13
Betriebseinflüsse 12.2.1.9-13
Feuchtigkeitseinfluss 12.2.1.9-14
Isolatorproblem 12.2.1.9-14
Rissbildung 12.2.1.9-13
Schädigung des Schutzrohrs 12.2.1.9-14
Thermoermüdung 11.3-13, 14.2-7
Belastung reduzieren 14.1-9
Einfluss von Schrumpflunkern 11.3-13
Einkristall 11.2.1-26
Gerichtet erstarrt er Werkstoff 11.2.1-25
Guss 11.2.1-26
Verhalten Wärmedämmshicht, Spritzpulverfeuchte 12.2.1.8-32
von Chargiergestellen 11.3-27
Thermografie
Klebeverbindung 12.2.1.5-10
Schicht 12.2.1.8-5
Thermomechanische Umformung (Thermomechanical Processing) 11.2.2.1-4
Thermomechanisches Modell, Schmieden 11.1-35
Tiefziehfett, Einfluss auf Schweißung 12.2.1.3.1-2**9**
TIG. *Siehe* Tungsten Inert Gas welding
Titan/Titanlegierung
Anlauffarben 12.2.1.7-24
α-case 11.3-15
α-Anreicherung beim Schweißen 12.2.1.3.1-26
Äußere Anzeichen auf Versprödung 12.2.1.3.1-30
Diffusionsschweißen 12.2.1.3.5-2
Einfluss von Eisenverunreinigungen beim Schweißen 12.2.1.3.1-29
Elektronenstrahlschweißen 12.2.1.3.3-14
Facettenartige Rissbildung 11.2.2.1-7
Fehler/Fehlstellen 11.2.2.1-8
in Diffusionsschweißung 12.2.1.3.5-7
Typen 11.2.2.1-13
Gefügeuntersuchung auf Sauerstoffaufnahme 12.2.1.3.1-31
Guss 11.2.1-2
Härteprüfung auf Sauerstoffaufnahme 12.2.1.3.1-30
Hartmetalleinschlüsse 12.2.1.3.1-23
Kontakt mit Kadmium 12.2.1.8-39
Lötung 12.2.1.4-10
Oberflächenporosität in Schweißung 12.2.1.3.1-23
Poren 11.2.2.1-7
Pore Cracking 12.2.1.3.1-12
Reibschweißen 12.2.1.3.4-2
Reaktion mit
Schleifkörnern 12.2.1.1.1-12
mit Strahlgut 12.2.1.6-39
Rissbildung durch Handschweiß 12.2.1.7-17, 11.2.2.1-27
Rissbildung durch Kochsalzverunreinigungen 12.2.1.7-17
Risswachstum in Per-Dampf 12.2.1.7-17

©Vogel Kessmann - Turbomaschinen
ausschließlich zur Schulungsunterlage mit Lizenz

Sauerstoffaufnahme beim Schweißen 12.2.1.3.1-11
Schädiigung durch Cl im Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-24
Schmiedeteil, Pore als Anriss 11.2.2.1-17
Schleiföle 12.2.1.1.2-26
Schweißen/Schweißung 12.2.1.3.1.1-5, 14.4-11
bei Verunreinigung 12.2.1.1.1-12
Einfluss der Eigenspannungen auf LCF 12.2.1.3.1-25
Porosität 12.2.1.3.1-23
Spannungsrisskorrosion (SpRK) 11.2.2.1-27
durch Cl-haltige Reinigungsmittel 12.2.1.3.1-29
durch Fingerabdrücke 12.2.1.3.1-29
durch Kochsalz 13-6
Verfärbungen 12.2.1.3.1-30
spröde Rissbildung 11.2.2.1-17
ungeeigneter Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-26
Verfärbungen in Bädern 12.2.1.7-24
Versprödung
durch Sauerstoffaufnahme 12.2.1.1.2-22
mechanismus bei Fe-Verunreinigung 12.2.1.7-18
Wasserstoff 11.2.2.1-17
Aufnahme beim Termischen Spritzen 12.2.1.1.1-12, 12.2.1.8-25
Versprödung durch Aufspritzungen 12.2.1.7-18
Versprödung
durc h Ameisensäure 12.2.1.7-14
durch Eisenablagerungen 12.2.1.7-18
durch Ni/Grafit-Einlaufbelä 12.2.1.7-18
Werkstoff
Beeinflussung durch Chlorverbindungen 12.2.1.7-17
Fehler 11.2.2.1-7
in Rotor 11.2.2.1-10
Probleme 11.2.2.1-1
Spaltflächen 11.2.2.1-7
Titanschwamm 11.2.2.1-11
TMP. *Siehe* Thermomechanical Processing
Toleranzabweichung, Zentriersitz 14.2-10
Topfzeit, Siehe Reaktionszeiten, Beschichtungsmassen, Klebersystem 12.2.1.5-11.
Topographie
Kugelstrahlfläche 12.2.1.6-21
Lötfläche 12.2.1.4-8
Zerspanung 12.2.1.1.2-1
Topological Close Packed = TCP 11.2.1-33
Toxizität, Kadmium 14-19
Tramlines, Anlauffarben 12.2.1.3.1-30
Transport
Behälter 13-8
Deckel 13-8
Stapelfähigkeit 13-8
Brinelling 13-12, 13-15
Probleme beim Gabelstapler 13-1
Risiken durch Vibrationen 13-15
Schäden an Honeycombdichtungen 13-15
Schaden 13-15
Abhilfe 13-1
an Hochdruckturbinenschaufel 13-10
Nacharbeit 13-17
Ursache 13-16
Ursachennachweis 13-16
Vermeidung 13-16
Weiterverwendung 13-17
Tree Rings 11.1-30, 11.1-36
Trend
Monitoring 14-6
zum Leichtbau 10-1
Trennmittel 12.2.1.7-4, 12.2.1.7-6
Badverunreinigung 12.2.1.7-6
Trennungen in Schweißung 12.2.1.3.1-3
Tri 12.2.1.3.1-29, 12.2.1.3.4-9. *Siehe auch* Trichlorethen
Trial and Error Prinzip 12.2.1.3.2-3
Tribokorrosion. *Siehe* Fretting
Trichlorethen 12.2.1.7-17
Triebwerk/Turbomaschine
Erprobung einer Reparatur 14.4-1
Lebensdauer 14.1-22
Trockenschmiermittel, Einfluss auf das Reibschweißen 12.2.1.3.4-8
Trockenstrahlen 12.2.1.6-1, 12.2.1.6-35
Trocknung
Auftreten von Vereisung 12.2.1.7-28
nach Badbehandlung 12.2.1.7-27
Verfahren 12.2.1.7-28
Tungsten Inert Gas welding 12.2.1.3-1
Turbine
Dichtsegment, Lötung 12.2.1.4-6
Leitapparat/Leitschaufel
Bruch einer Haltenase 14.2-8
Grenzen einer Reparatur 14.1-2
Schwächung durch Reparatur 14.2-8
Warmrissbildung 11.1-22
vom Gießen 11.1-20
Rad/Rotor, Diffusionsschweißung 12.2.1.3.5-6
Schaden, Folge einer versagnden Lötung 12.2.1.4-43
Schaufel
Deckbandverschleiß durch Fretting 14.1-21
Fehler in Deckbändern 11.2.1-29
geschmiedete 11.2.3-13
Gussfehler 11.2.1-36
Kaltschweiße 11.2.1-24
Korrosion unter Fußplattform 14-18
Kriechschädigung 14-10
Langzeit-Gefügeveränderungen 14-10
Problem bei Wärmebehandlung 11.3-4

Titan

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Überhitzungsverdacht 14-8
Werkstofffehler 11.2.1-23
Zusammenstellung fertigungsbedingter Fehler 12.2-9
Scheibe
Bruch 11.2.2.1-21, 12.2.1.1.1-16
Bruch durch Cer und Lanthan Verunreinigung 11.2.2.1-19
Bruch durch Überhitzaung bei Bearbeitung 12.2.1.1.1-16
Bruch wegen Ni-Schicht 12.2.1.8-53
LCF-Festigkeit 11.1-10
Schmiederiss 11.2.2.1-5
Zusammenstellung fertigungsbedingter Fehler 12.2-9
Segment, gelötet 12.2.1.4-5, 12.2.1.4-22

U

Übergangsradius, Nacharbeit 12.2.1.1.2-21
Überhitzung 11.1-20
durch Bearbeitung 12.2.1.1.1-14
Bruch einer Turbinenscheibe 12.2.1.1.1-16
Verdacht, T-Schaufelblatt 14-8
Überholung 14-2
Intervalle 14-2
Festlegung des optimalen 14-7
friedensbezogene Philosophie 14-3
verlängern 14-6
Überschleifen einer Schicht 12.2.1.8-7
Überschreitung
von Mindestzeitspannen 13-1
Zyklische (LCF) Lebensdauer 14-26, 14-27
Überstrahlung, Kugelstrahlen 12.2.1.6-9, 12.2.1.6-24
Übertemperatur, zulässige bei Lötungen 12.2.1.4-23
Überwachung
KSS 12.2.1.1.2-30
Prozessbäder 12.2.1.7-4
Strahlgut 12.2.1.6-12
Überzeiten
beim Löten 12.2.1.4-10
Prozessbad 12.2.1.7-11
Ultra-high tensile strength 11.2.3-5
Ultraschall prüfung einer Lötung 12.2.1.4-45
Ultraschallbäder, Fretting, False Brinelling 12.2.1.7-26
Ultraschallprüfung
Blind Spot 11.2.2.1-10
Fehlerauffindbarkeit 11.2.2.1-2
Kontur von Schmiedeteilen 11.1-16
Versagen, Grenzen 11.2.2.1-12, 11.2.2.1-22
Umformen, Fehlstellen in schmiedeteilen 11.1-16
Umformgrad, Schmiedeteil 11.1-16
Umhüllungen Schweißelektrode 12.2.1.3.1-33
Umschmelzen
Header 11.2.2.1-11
mehrfach 11.2.2.1-11
Prozess 11.1-28
Fehlerverteilung 11.3-20
Rohteilherstellung 11.3-17
Umweltverträglichkeit 14.1-23
Undefinierte Beschädigungen 13-3
Undefinierter Schneide, Spanen 12.2.1.1-3
Undercut. *Siehe* Einbrandkerbe
Undichtigkeit in Leichtmetall Sandguss 11.2.1-7
Ungänze 12.2.1.3.1-11
Unternahtrisse 12.2.1.3.1-32
Unwucht kündigt Schaden an 14-26
Urformen 11.1-2

V

Vacuum Arc Remelting (VAR) 11.1-26,11.1-28, 11.3-17
Vakuumlöten 12.2.1.4-20
Vapor Blasting. *Siehe* Naßstrahlen
Ventile reibschweißen 12.2.1.3.4-4
Veränderung einer Bearbeitungsmaschine 10-2
Verantwortung des Konstrukteurs 10-1
Verchromen 12.2.1.8-40
auf Maß 12.2.1.8-48
Lagersitze 12.2.1.8-43
Schwingfestigkeit 14.1-11
Vielkeilkupplung 14.1-18
Wasserstoffversprödung 12.2.1.8-13
Verdichterleitapparat/-schaufel
gelötet 12.2.1.4-4
Verdichterrad/-rotor/-scheibe
Bruch
durch Kadmium 12.2.1.8-52
durch Schwingermüdung 14.2-10
Stahlguss 11.2.1-9
Werkstofffehler 11.2.2.1-9
Verdichterschaufel
Bruch wegen Kugelstrahlfehler 12.2.1.6-30
Hinterkantenversprödung 12.2.1.7-18
mit Schmiedefalte 11.2.2.1-25
Verdrehsicherung
Kleben 12.2.1.5-2
Klebstoffe 12.2.1.5-4
Vereisung 14.4-5
bei Trocknung 12.2.1.7-28
Verfahren
der Neuteilherstellung, Anwendung bei Reparaturen 14.3-5
Erprobung, Punktschweißen 12.2.1.3.2-3
Kontrolle, Kugelstrahlen 12.2.1.6-32
Parameter beim Reibschweißen 12.2.1.3.4-8
Prozess, stabiler 10-1
Spezifische Probleme 12.2.1.1-1
spanende Bearbeitung 12.2.1.1-1

© Axel Fossmann - Turbomaschinen
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Trocknung 12.2.1.7-28
Überwachung, Kugelstrahlen 12.2.1.6-7
Zulassung von Reparaturen 14.3-1
Verfärbung
an Titanteilen 12.2.1.3.1-30, 12.2.1.7-24
Schraubenbruchfläche 0-5
Verfestigen
Schicht 12.2.1.8-9
Strahlen 12.2.1.6-27
Verhalten. *Siehe* Kugelstrahlen
Verformungsgrad 11.1-32, 11.2.2-6
Verformungsverhalten beim Schmieden 11.2.2-6
Verfügbarkeit 14.1-22
Verkadmen 12.2.1.8-39
Verkupfern 12.2.1.8-39
Vernickeln 12.2.1.8-40
Lötfläche 12.2.1.4-49
Schwingfestigkeit 14.1-11
Verpackung
für Versand 13-1
Triebwerksteile 13-16
Verrostete Schweißfläche 12.2.1.3.1-33
Versagen
Ablauf 10-6
Indizien 10-6
Versand 13-1
Verschleiß
Beschichtung 12.2.1.8-5
Deckband T-Schaufel 14.1-21
Flächen, Reparatur 14.1-12
Grenzen, Werkzeug 12.2.1.1.2-4
Kombination gelaufener Teile 14.1-20
Labyrinth 14.4-10
Schutz, Spritzschicht 12.2.1.8-25
Systeme, Änderungen 14.1-18
Werkzeug 12.2.1.1.2-4
Zonen, Schweißpanzerung 12.2.1.3.1-19
Verschleppung
Reinigungsbäder 12.2.1.7-6
Spülbäder 12.2.1.7-6
von Verunreinigungen im Bädern 12.2.1.7-4
Verschlimmbesserung durch Reparatur 14.2-1
Verschlissenes Werkzeug 10-7
Verschmutzung
Gefahr in der Fertigung 13-4
Im Fertigungsprozess bei Zwischenlagerung 13-4
Schweißflächemit Kohlenwasserstoffen 12.2.1.3.1-33
Vermeidung durch Motivation 13-4
Versilbern 12.2.1.8-40
Versprödung
Äußere Anzeichen bei Titanlegierungen 12.2.1.3.1-30
Cr-Schicht durch Wärmebehandlung 12.2.1.8-47
Gefüge 11.1-40
in Ätzbädern 12.2.1.7-4
Kadmium bei Temperatur 14.2-9
Lotdiffusion 12.2.1.4-6
Mechanismus, Titanlegierung mit Fe-Verunreinigung 12.2.1.7-18
Sauerstoffaufnahme von Titanlegierungen 12.2.1.3.1-31
Schweißung durch Wasserstoff 12.2.1.3.1-32
von Labyrinthspitzen aus Ti 12.2.1.7-18
von Titanlegierungen durch Saurestoffaufnahme 12.2.1.1.2-22
Verstopfung
Kühlluftbohrung durch Strahlgut 12.2.1.6-26
Kühlluftführung durch Strahlmittel 12.2.1.6-13
Verunreinigung
anhaftende Funken 12.2.1.7-9
auf Bauteilen 13-1
Auswirkung auf FVK 12.2.1.7-6
bei Zerspanung 12.2.1.1-8
durch Lot 12.2.1.4-31
im Werkstoff 11.1-8
Lotablagerungen 12.2.1.4-20
Metallische auf Oberflächen 12.2.1.7-8
Pulver beim HIP 11.2.3-7
Schweißen von Titanlegierungen 12.2.1.1.1-12
Verschleppung durch Bäder 12.2.1.7-21
von Schutzgas 12.2.1.3.1-29
Wasserstoffaufnahme in Ti 12.2.1.7-7
verzögerte Rissbildung bei Lagerung 13-6
Verzug
an Gussteilen 11.2.1-20
bei Wärmebehandlung 11.1-40, 11.3-26
Kugelstrahlen 12.2.1.6-6
von Beschichtungsgefäßen 11.3-27
Werkstücks 12.2.1.1.2-5
dünnwandig11.2.1-2
Vibration
Bearbeitung 11.2.1-3
Entmischung von Pulver 12.2.1.8-35
Pulverentmischung 11.2.3-7
Risiken bei Transport 13-15
Schleifen 12.2.1.1.1-8
Zerspanen 12.2.1.1.2-1, 12.2.1.1.2-8
Vibrationsschleifen, Beschädigungen durch 12.2.1.1.1-14
Vielkeilkupplung/-verzahnung
Beschichtung gegen Gleitverschleiß 12.2.1.8-19
Nitrieren 14.1-18
Verchromung 14.1-18
Viskosität, Lot 12.2.1.4-11
Visuelle Inspektion
in Bohrung 12.2.1.1.2-15
Lötung 12.2.1.4-44
Vogelschlag 14.4-5
Vollzyklen (LCF) 14-27
Volumenänderung

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

durch Gefügeänderung 11.3-27, 12.2.1.9-8
Maßabweichung 10-11
Nickellegierung 12.2.1.9-8
Voraussetzungen für Anwendung von HIP 11.2.3-10
Vorbehandlungen
Auswirkung auf Ätzangriff 12.2.1.7-14
einer Lötfläche 12.2.1.4-50
Klebeflächen 12.2.1.5-11
Kugelstrahlen 12.2.1.6-12
Vorrichtung
Aufschmierungen 12.2.1.7-9
Elektronenstrahlschweißen 12.2.1.3.3-1
für Lötung 12.2.1.4-49
Glühen 11.1-40

W

W-Partikel (Wolframpartikel) in Schweißung 12.2.1.3.1-29
Wabendichtung 12.2.1.4-6
Ausbrechen 12.2.1.4-24
Lötung 12.2.1.4-6, 12.2.1.4-24
Diffusion 12.2.1.4-20
Wabenstrukturen, Klebstoffe 12.2.1.5-4
Wachsausschmelzverfahren. *Siehe* Feinguss
Wahrscheinlichkeit
eines Werkstofffehlers 11.3-24
von Schmiedefehlern 11.3-21
Wälzlager, Maßänderung durch Wachsen 12.2.1.9-10
Wärmebehandlungsrisse 11.1-38
Wärmebeeinflusste Zone (Schweißen) 12.2.1.3.1-3
Wärmebehandlung 11.1-38
Abhilfe gegen Rissbildung 11.3-27
bei HIP 11.3-15
Beule im Schmiedeteil 11.2.2.1-25
Cr-Schicht 12.2.1.8-47
Eigenspannungen 11.1-38
Einfluss auf das Gefüge 11.1-10
Einfluss von Halbzeugeigenschaften 11.1-14
Gefährlichkeit von Aufschmierungen 12.2.1.1.1-12
in einer Glühvorrichtung 11.2.1-2
Rissbildung 11.1-38, 11.3-27
Rissbildung durch Bearbeitungsriefen 11.1-40
Rissbildung durch Kerben 11.1-40
Schmieden 11.1-32
Thermische Spritzschichten 12.2.1.8-37
Turbinenschaufel 11.3-4
Verzug 11.1-40, 11.3-26
Volumenänderungen 11.3-27
von Schmiedeteilen 11.1-35
Zustand, Einfluss auf Schweißung 12.2.1.3.1-14
Wärmedämmschicht. *Siehe* Thermische Spritzschicht 12.2.1.8-4
Segmentierungsrisse 12.2.1.8-4
Wärmedehnung
Behinderte 11.1-22
Eigenschaften, Einfluss auf Lötung 12.2.1.4-6
Wärmeeinflusszone
Schweißen 12.2.1.3.1-2
vom Bohren 12.2.1.1.2-18
Wärmefluss in einer Schicht 12.2.1.8-5
Wärmespannungen
beim Schleifen 12.2.1.1.1-9
im Gussteil 11.2.1-27
Warmfestigkeit, Schmieden 11.2.2.1-4
Warmriss 11.1-2, 11.2.1-3, 11.2.1-5, 11.2.2-3 11.2.2.1-5
Abhilfen beim Schweißen 12.2.1.3.1-14
Bildung 11.1-20. *Siehe auch* Heißrissbildung
Bauteilbereich 11.1-22
EB- Schweißung 12.2.1.3.1-21
Einfluss der Konstruktion 11.1-20
Einfluss von Formmassen 11.1-20
Gießbedingungen 11.1-20
Guss 11.2.1-20
in Labyrinth 10-10
Kornorientierung 11.1-22
Labyrinth 14.4-10
Metallurgische Einflüsse 11.1-20
Ni-Legierungen 14.4-10
Schweißungen 12.2.1.3.1-13
Einfluss der Nahtbreite 12.2.1.3.1-21
Reibschweißen 12.2.1.3.4-1, 12.2.1.3.4-8
Werkstoffabhängigkeit 12.2.1.3.1-14
Warmzerreißfestigkeit, Einfluss der Ausscheidungsphase 11.2.1-34
Wartung 14-2
Warzen an Cr-Schicht 11.2.2-3, 12.2.1.8-48
Wasch- und Reinigungsmittel
Einfluss auf Klebstoff /Klebeverbindung 12.2.1.5-1, 12.2.1.5-14
Tenside 12.2.1.7-1
Waspaloy (warmfester Schmiedewerkstoff)
Lötung 12.2.1.4-33
Scheibenschaden 11.2.2.1-22
Wasserstoff
Ätzbäder 12.2.1.7-4
Aufnahme
Fe-haltige Verunreinigungen auf Ti 12.2.1.7-7
im Ätzbad 12.2.1.1.1-12
im Reinigungsbad 12.2.1.1.1-12
von Titan beim Termischen Spritzen 12.2.1.8-25
von Titanlegierungen 12.2.1.1.1-12
Beladung 12.2.1.7-30
Einfluss auf Schweißung 12.2.1.3.1-32
Entsprödung, Zeitspanne 12.2.1.7-29
in Prozessbädern 12.2.1.7-28
in Titanlegierung 11.2.2.1-17
Porenbildung 11.2.2-5
in Titanlegierungen 11.1-19
Rissbildung, Schleifen 12.2.1.1.1-5
Wasserstoffpumpen im Gefüge 12.2.1.3.1-35

© Axel Rossmann - Turboconsult
alg schulungsunterlage nur mit Lizenz

Wasserstofftransport in Metallen 12.2.1.3.1-35
Wasserstoffversprödung 11.1-19, 11.2.2-6, 14-19
an Schweißungen 14.1-16
beim Schweißen durch Schwitzwasser 12.2.1.3.1-33
beim Verchromen 12.2.1.8-13
Bruch eines Schraubenkopfs 12.2.1.8-51
durc h Ameisensäure in Titan 12.2.1.7-14
durch Feuchtes Schutzgas 12.2.1.3.1-33
durch zu lange Zwischenlagerung 13-4
Entsprödung 12.2.1.8-14
Fischaugen 12.2.1.3.1-33
in Schrauben 0-5
in Schweißungen 12.2.1.3-2
Kadmium 12.2.1.8-43, 12.2.1.8-51
Nachweis 12.2.1.7-28
Titanlegierung 12.2.1.7-18
Weichlöten 12.2.1.4-1
Weiße Flecken. *Siehe* White Spots
Weiße Randschicht 12.2.1.1.2-4
durch Schleifen 12.2.1.1.1-4
Weiterverwendung
bei Transportschaden 13-17
von Bauteilen 10-2
Weld bead. *Siehe* Schweißnaht
Weld reinforcement. *Siehe* Nahtüberhöhung
Welligkeit durch Zerspanen 12.2.1.1.2-8
Werkstoff
Änderung, Auswirkung 14.1-22
Beeinflussung
durch Blei 11.1-23
durch Wismuth 11.1-23
Einschluss Aluminiumoxid 11.2.2.1-23
hochfeste Fertigung 10-4
Eigenschaften, Einfluss auf Fertigung 10-4
Eignung für das Schleifen 12.2.1.1.1-11
Einfluss auf das Richten 11.1-13
Einfluss auf das Schweißen 11.1-13
Einfluss auf den Werkzeugverschleiß 11.1-13
Einfluss auf elektrochemische Verfahren 11.1-14
Einschluss Aluminiumoxid 11.2.2.1-23
Entwicklung, Zeit und Kosten 10-4
Fehler 11.1-1, 11.1-14, 11.2.1-1
Bruch einer Turbinenscheibe 11.2.2.1-21
Definition 11.1-2
Dendritischer Typ 11.3-20
diskreter Typ 11.3-20
Erschmelzung 11.2.2.1-10
Guss 11.2.1-23
im Triebwerk 11.3-3
in Titanlegierungen 11.2.2.1-7
konstruktive Einflüsse 11.1-17
Maßnahmen gegen 11.3-1
Parallelfälle 11.2.1-1
Risikominimierung 11.3-3
Rückschluss auf Entstehungsmechanismus 11.3-20
Scheibenbruch in Titanlegierung 11.2.2.1-16
Streuung der Betriebszeiten 11.2.1-23
Titanrotor 11.2.2.1-10
Verdichterrotor 11.2.2.1-9
Wahrscheinlichkeit 11.3-24
White Spots 11.3-20
Festigkeit, Beeinflussung durch die Fertigung 12.2-5
Gefüge
Einfluss auf die Qualitätssicherung 11.1-14
Fasern 11.1-2
hochfeste Fertigung 10-4
Kombinationen
Reibschweißen
Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-4
in Prozessbädern 12.2.1.7-23
Reibschweißen 12.2.1.3.4-2, 12.2.1.3.4-5
Leichtbau 11.2.1-1
Preis 14.1-22
Probleme bei Titanlegierungen 11.2.2.1-1
Reinheit für Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-6
Schädigung 14-22
Spurenelemente 11.1-8
Verunreinigungen 11.1-8
durch Hartmetallschneiden 11.1-28
Zulassung 11.1-3
Zustand
für Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-9
für optimale Schweißung 12.2.1.3.1-21
Werkstoffschluss (Verbindung) bei thermischen Spritzschichten 12.2.1.8-29
Werkstück
Kontakt mit Werkzeughalter 12.2.1.1.2-2
Verzug 12.2.1.1.2-5
Werkzeugmaschninen, freie Schwingungen 12.2.1.1.2-8
Werkzeug
Abrieb 12.2.1.7-9
Bruch 12.2.1.1.2-4
bei Zerspanung 12.2.1.1-8
Lebensdauer, Einfluss des Kühlschmierstoffs 12.2.1.1.2-25
Schaden, Eisenanreicherung als Hinweis 12.2.1.1.2-10
Schneide, Schäden **12.2.1.1.2-4**
Verschleiß 11.2.1-2, 12.2.1.1.2-4
durch Gusshaut 11.2.1-18
Grenzen 12.2.1.1.2-4
verschlissenes 10-7
Werkstoffeinfluss 11.1-13
*Zerspanung 12.2.1.1.2-1, **12.2.1.1.2-2***
Werkzeughalter, Kontakt mit Werkstück 12.2.1.1.2-2

© Wolfgang Rossmann - Turbocomplete
Ausschnittungsunterlage nur mit Lizenz

Werkzeugmaschine
Löschsysteme 12.2.1.1.2-28
Modellbetrachtungen zum Löschen 12.2.1.1.2-28
Vorbeugung gegen Explosion 12.2.1.1.2-28
Wet start. *Siehe* Fehlstart: Restkraftstoff
WEZ. *Siehe* Wärmebeeinflusste Zone/Wärmeeinflusszone
Mikrorisse 12.2.1.3.1-19
Schweißen 12.2.1.3.1-2
White Spot 11.1-30, 11.1-31, 11.1-37
Fehlstelle 11.3-20
White-etching Layer 12.2.1.1-7
Widerstandsschweißen 12.2.1.3-1, 12.2.1.3.2-1
Wiederaufschmelzrisse in EB-Schweißung 12.2.1.3.1-14
Wiedereingeschmolzene Späne bei Titanlegierungen 12.2.1.3.1-23
Wiedererstarrte Zone 12.2.1.1.2-4
Wiederverwendetes Material 11.1-27
WIG 12.2.1.3-1, 12.2.1.3.1-1
WIG und MIG Schweißungen
Abhilfen bei Problemen 12.2.1.3.1.1-1
Wirbelbildung 11.2.1-16
Wirbelstromprüfung
Bohrung 12.2.1.1.2-18
Spänekontakt 12.2.1.1.2-2
Wismuth, Werkstoffbeinflussung 11.1-23
Wissensmanagement 10-2
Wolframkarbid
Schädigung im Prozessbad 12.2.1.7-11, 12.2.1.7-23
Wurzel, Probleme bei Schweißnaht 12.2.1.3.1-11
Wüstengegend, Erosionseinfluss 14-10

Z

Zahnräder
Brünieren 12.2.1.8-56
Wasserstoffversprödung 12.2.1.8-13
Zahnradwelle 12.2.1.8-10
Elektronenstrahlschweißen 12.2.1.3.3-15
Schwingriss an Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-15
Zebras (Gefüge) im Einkristallguss 11.2.1-27
Zeichnungsangaben, Kugelstrahlen 12.2.1.6-33
Zeitabstand (für Regeneration), Kugelstrahlen 12.2.1.6-19, 12.2.1.6-21
Zeitbedarf einer Werkstoffentwicklung 10-4
Zeitspanne für Wasserstoffentsprödung 12.2.1.7-29
Zeitstandfestigkeit, Lötung 12.2.1.4-23
Zentrallunker 11.1-31
Zentriersitz, Auswirkung einer Toleranzabweichung 14.2-10
Zersetzung von Entfettungsbädern 12.2.1.7-17
Zerspanen
Aufschmieren von Fremdmetall 12.2.1.1-8
Betriebskarte 12.2.1.1.2-4
Effekte im metallografischen Schliff 12.2.1.1-11
Eigenspannungen 12.2.1.1-11, 12.2.1.1.2-5
Einfluss auf die LCF-Festigkeit 12.2.1.1-10
Einfluss auf die Mikrohärte 12.2.1.1-11
Einfluss der Festigkeit/Härte 11.1-13
Einflüsse auf eine Bohrung 12.2.1.1-11
Entstehung von Gleitlinien 12.2.1.1-11
Erprobung 12.2.1.1.2-7
Erwärmung 12.2.1.1-7
Faserkrümmung 12.2.1.1-7, 12.2.1.1-11
Fremderregte Schwingungen 12.2.1.1.2-8
Gefügeveränderung 12.2.1.1-7
Kerben 12.2.1.1-8
Kommarisse 12.2.1.1-7
Kosten 12.2.1.1.2-23
Kühlschmierstoffe 12.2.1.1.2-21
Löschanlage 12.2.1.1.2-2
Mechanische Gefügeschädigungen 12.2.1.1.2-6
Oberflächenrauigkeit 12.2.1.1.2-1
Plastische Verformung 12.2.1.1-7
Probleme 12.2.1.1-4, 12.2.1.1.2-1
Qualitätssicherung durch Werker 12.2.1.1.2-2
Rattern 12.2.1.1.2-1, 12.2.1.1.2-8, 12.2.1.1.2-2
Rissbildung 12.2.1.1-7
Rupfen 12.2.1.1.2-8
selbsterregte Schwingungen 12.2.1.1.2-8
Schäden und Probleme 12.2.1.1.2-1, 12.2.1.1.2-2
Schwingermüdung 12.2.1.1.2-2
Schwingungen 12.2.1.1.2-1
Anregung 10-8
Spanarten 12.2.1.1.2-6
Spanformen 12.2.1.1.2-6
Topografie 12.2.1.1.2-1
Veränderung der Festigkeit 12.2.1.1-7
Verfahren mit definierter Schneide 12.2.1.1.2-1
Verunreinigungen 12.2.1.1-8
Vibrationen 12.2.1.1.2-1, 12.2.1.1.2-8
Weiße Randschicht 12.2.1.1.2-4
Welligkeit 12.2.1.1.2-8
Werkzeug,
Bruch 12.2.1.1-8
Lagekopplung 12.2.1.1.2-10
Verschleiß 12.2.1.1.2-1, 12.2.1.1.2-2
Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) 10-4
Auffindproblem 11.2.1-23
Cr-Schichten 12.2.1.8-5
Eindringprüfung
Problem an Schichtübergang 12.2.1.8-53
Thermische Spritzschichten 12.2.1.8-38
Erwartungshorizont 11.2.2.1-5
magnetische Rissprüfung 12.2.1.8-10
Nachweisverschlechterung durch Zerspanung 12.2.1.1-7
Schicht 12.2.1.8-5

© Axel Rossmann - Turbomaschinen
als Schulungsunterlagen mit Lizenz

Schleifrisse 12.2.1.1.1-8
von Lötungen 12.2.1.4-45
Verfahren
Grenzen 11.3-24
Nachweisgrenzen 11.2.2.1-2
Zerstörungsfreie Prüfung 10-4
Zirkularfräsen 12.2.1.1-11
Zugeigenspannungen
Guss 11.2.1-14
Problematik 14.1-13
Zugelassene Kühlschmierstoffe 12.2.1.1.2-27
Zugspannungen, Einfluss auf SpRK 12.2.1.7-9
Zugvorrichtung, SpRK-Prüfung 12.2.1.7-17
Zulassung
Behörde, Beraterfunktion 14.3-3
einer Reparatur 14-12
im militärischen Bereich 14.3-2
Lieferant 11.1-5
Rohteile für Rotoren 11.3-18
Werkstoff 11.1-3
Zündquellen, Maschinenbrand 12.2.1.1.2-27
Zusammenbruch einer Emulsion 12.2.1.1.2-29
Zusatzwerkstoffe, Elektronenstrahlschweißung 12.2.1.3.3-4
Zuschmieren von Rissen beim Schleifen 12.2.1.1.1-9
Zustrahlen von Fehlstelle n 11.2.1-12
Zwischeninspektion abhängig vom Risswachstum 11.1-6
Zwischenlagerung
Korrosion 12.2.1.7-11
Ursache für Wasserstoffversprödung 13-4
Verschmutzung im Fertigungsprozess 13-4
Zyklische Lebensdauer (LCF) Überschreitung 14-26, 14-27

ZfP

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz