

Axel Rossmann

Probleme der Maschinenelemente erkennen, verhüten und lösen

Unter besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus

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

Band 3 C: Handling: Verpackung, Transport und Lagerung.

Überholung und Reparatur: Probleme und Gefahren, Grenzen der Reparierbarkeit, Reparaturentwicklung und Vorgehensweise, Reparaturprüfung.



Axel Rossmann

1. Auflage
(Serie 1.0)

Bei der Erstellung dieses Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgend eine Haftung übernehmen. Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

© 2012 by A.Rossmann, Turbo Consult, Karlsfeld

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung von Turbo Consult unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Bestellung dieses Buches:

Fax Nr. (Deutschland) 08131 50 50 67

ISBN 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 Stofffülle 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 Betriebschäden zu verursachen. Hervorragende Fachliteratur wird in ausreichender Menge angeboten. Hier geht es jedoch in erster Linie um die Beschreibung der Verfahren, deren Anwendung und optimale Prozessparameter. Dagegen sucht man eine zusammenfassende **Darstellung von Produktionsfehlern an Halbzeug und Fertigteil** und deren Einfluss auf das Bauteilverhalten vergeblich.

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

Was mit der besonderen Form dieses Buchs erreicht werden soll.

Motivation: Interessante und überraschende Überschriften zu den Bildern.

Interesse wecken: Schnell erfassbare Bilder typischer Maschinenelemente mit inhaltsbezogenen Merkmalen.

Sinnhaftigkeit und Notwendigkeit des theoretischen Unterbaus im Studium erkennen.

Praxisrelevanz mit dem Bezug zur allgemeinen eigenen technischen Erfahrung. Das sollte bereits ohne den theoretischen Teil eines Studiums für die Industrie von Interesse sein.

Erklärungen möglichst einfach mit Hilfe der Vernetzung (Bildangaben) im Text zu finden.

Praxistauglichkeit. Auch nach dem Studium soll das Buch als ein Ratgeber dienen. Es unterstützt dafür insbesondere das Erkennen auslegungsrelevanter Einflüsse. Dabei soll ein umfangreiches Sachregister helfen..

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

Zur Gestaltung:

Am Anfang jeden Kapitels wird in einem ‘Fließtext’ eine Übersicht gegeben. Der fachliche Inhalt stützt sich jedoch überwiegend auf **Bilder mit ausführlichen Erklärungen** in einem **zugeordneten Text**. Dies ist eine Situation ähnlich einer Vorlesung. Wert wird auch auf die Einschätzung durch den ‘Vortragenden’ gelegt. Das soll Problematiken der Materie aufzeigen und nicht zuletzt ein Gefühl persönlichen Kontakts vermitteln.

Um diese Ziele zu erreichen wurde ein **Netzwerk** gewählt. Es verbindet die Bildbeschreibung mit **Hinweisen auf andere Bilder** die ohne ermüdendes Suchen eine Vertiefung ermöglichen. Das ist besonders bei **Fachbegriffen** und **Schadensmechanismen** nützlich. Literaturangaben sollen, falls erwünscht, der Vertiefung dienen. Dabei handelt es sich auch um **Web-Inhalte** die direkt aus den angegebenen Adressen erreicht werden können.

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

Beispiel:

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

Schadensursächliche Versprödungen:

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

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

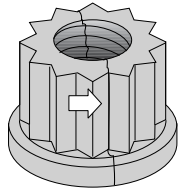
Versprödung durch Eindiffusion von Fremdmetallen (SMIE, Band 1 Bild 5.8.2-1). Diese Gefahr besteht bei unvorgesehen **hohen Betriebstemperaturen**. Risse gehen **bevorzugt vom Gewinde („C1“)** aus (Bild 6.1.1.2-9).

Versprödung durch ‘Einschießen’ von Fremdmetallschmelze (Löttrissigkeit, 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.

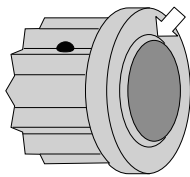
Versprödung durch ‘Werkstoffalterung’ (Band 1 Bild 5.3-1.2). Beispielsweise können warmfeste Stähle mit Chrom, Molybdän und Vanadium bei zu hohem Vergüten nur noch ein Zehntel der geforderten Kerbschlagzähigkeit aufweisen. In diesem Fall der Flanschschraube eines Dampfturbinengehäuses lag die Zugfestigkeit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

Bild zum Beispiel siehe folgende Seite.

Wichtige Schadensbilder und Ursachen für Sprödbrüche an Schrauben und Muttern.

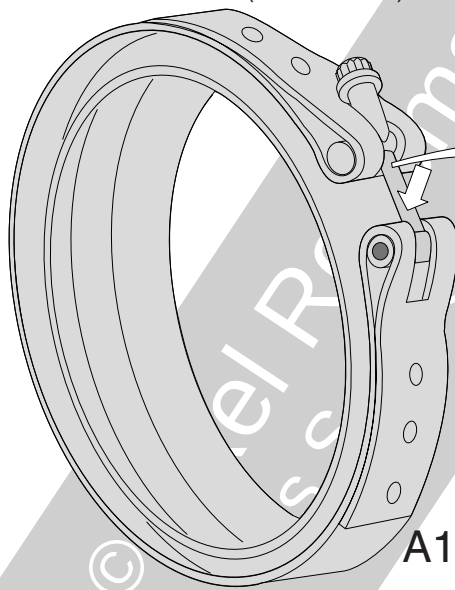


D1 Spröd durchgerissene Schraubenmutter. Material Typ 12%-Cr-Stahl, Härte 44 HRC, mit Kadmium-Korrosionsschutzschicht. Das bei Betrieb geschmolzene Kadmium führte zur Löttrissigkeit (LME)

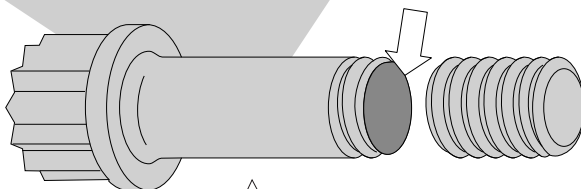


B1 Spröd durchgerissene Schraube. Material Typ 12%-Cr-Stahl. Härte/Festigkeit (bis 1480 MPa) über der max. zulässigen Grenze von 1380 MPa. Bei der Beschichtung mit Kadmium drang Wasserstoff ein und führte zur Wasserstoffversprödung.

Spannschraube
(12% Cr-Stahl)



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

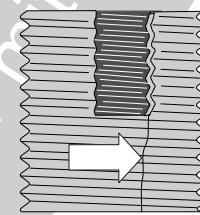


C1 Sprödbruch durch Diffusion im festen Zustand (SMIE) von Metallen wie Silber oder Kadmium bei erhöhter Betriebstemperatur

Schubstange
(Vergütungsstahl
verkadmet) mit
Rissen durch
Wasserstoff-
versprödung



B3

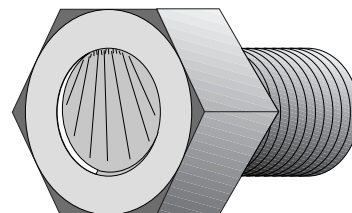
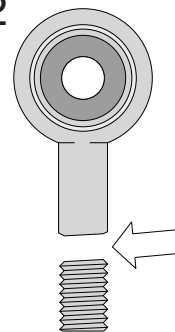


B2

Gewindeeinsatz
(Einsatzstahl verkadmet)
mit Riss durch
Wasserstoffversprödung

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

A2



48 mm

E1 Versprödung durch
'Werkstoffalterung'

Bild zum Beispiel

Mein besonderer Dank für die Korrekturarbeiten gilt

dem Lektor, Herrn Dipl.-Dokumentar Reinhard Glander,

und

Herrn A.o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing.Dr.techn. **Heinrich Hochleitner** für die Durchsicht., mit dem Schwerpunkt des Verständnisses des Lesers für das Verhalten der Maschinenelemente. 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)

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 Heißeilen

11.3 Abhilfen gegen Schäden aus Problemen an Rohteilen und Halbzeug

Herstellung

12. Fertigungsverfahren

12.1 Faktoren die Fertigungsprobleme und Schäden begünstigen

12.2 Fertigung und Betriebsverhalten der Bauteile

12.2.1 Verfahrensspezifische Probleme und Schäden

12.2.1.1 Spanende Bearbeitung

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

Handling

13. Verpackung, Transport und Lagerung

Reparatur

14. Reparatur gelaufener Bauteile

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

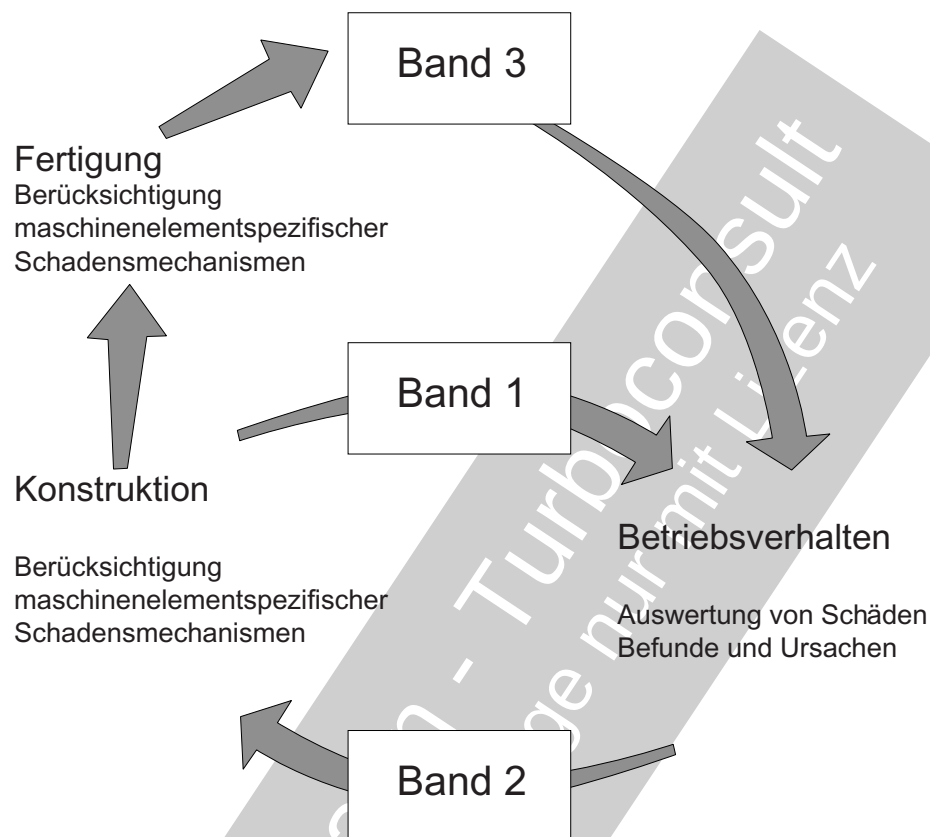
Sachregister

© Axel ROSS
als Schulungs-

Handling und Reparatur von Maschinenelementen

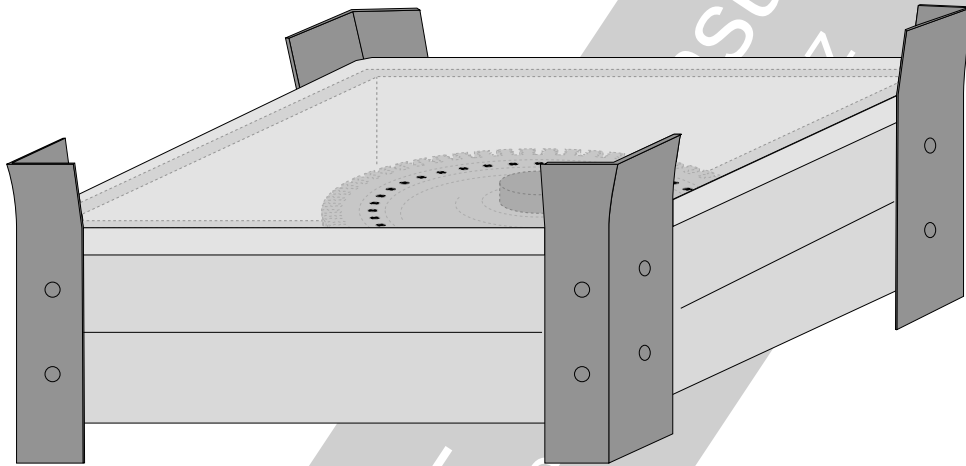
© Axel Rossmann - Tuboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einführung



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

13. Handling, Verpackung, Transport, Lagerung



Bei sicherheitsrelevanten Betrachtungen können Handling, Verpackung, Transport und Lagerung der Werkstücke während und nach dem Fertigungsprozess ganz in den Hintergrund geraten. Zu Unrecht, denn es besteht ein durchaus bemerkenswertes Schädigungspotenzial. Fälle, in denen **am Fertigteil keine zerstörungsfreie Prüfung mehr** erfolgt, sind besonders kritisch.

Die **Handhabung** (engl. **Handling**) der Bauteile im Fertigungsprozess kann **mechanische Beschädigungen** an hochbelasteten Bauteilzonen erzeugen (Bild 13-1). Eine besondere Rolle spielt der innerbetriebliche Transport mit **Gabelstaplern**. Von den Fahrern sind Verhaltensweisen zu fordern, die das Risiko einer Werkstückbeschädigung minimieren (Bild 13-8).

Auch für den Transport im Rahmen des **Versands von Neuteilen** besteht die Gefahr mechanischer Beschädigungen (Bild 13-10).

Eine ganz andere gefährliche Schädigung ist **rissbildende Korrosion** (Bild 13-4). Diese Gefahr kann das **Tragen von Handschuhen** notwendig machen. Mechanische Beschädigungen infolge **Unachtsamkeit** (Band 4), sind im Fertigungsprozess und beim Versand des Neuteils (Bild 13-11) ebenfalls möglich.

Eine wichtige Rolle spielen Schädigungen an Werkstücken während einer **Zwischenlagerung** (Bereitstellung) im Rahmen des Produktionsprozesses (Bild 13-2). Es handelt sich in erster Linie um **Auswirkungen von Verunreinigungen** (Band 4, Kapitel 18.3). Solche Probleme lassen sich mit Hilfe geeigneter Container (Bild 18-5) ausreichend sicher vermeiden. Es gibt aber auch gänzlich andere, schädigende Einflüsse wie die **Überschreitung von vorgegebenen maximal zulässigen Zeitspannen**. In einem solchen Fall können sich Werkstoffeigenschaften unzulässig verändern (Versprödung, Band 4, Bild 18.7-8 und Bild 18.7-10).

Der **Versand erfordert ebenfalls geeignete Behälter bzw. Verpackungen** um Schäden an Neuteilen (Bild 13-5) zu vermeiden (Bild 13-9).

Sind **Beschädigungen** aufgetreten, bieten die heutigen Untersuchungsmethoden eine gute Chance **Ursachen zu klären und ermöglichen so gezielte Abhilfen und Risikoabschätzungen** (Bild 13-11).

Beschädigungen hochbeanspruchter Bereiche beim "handling" von Rotorscheiben verkürzen die Lebensdauer gefährlich.

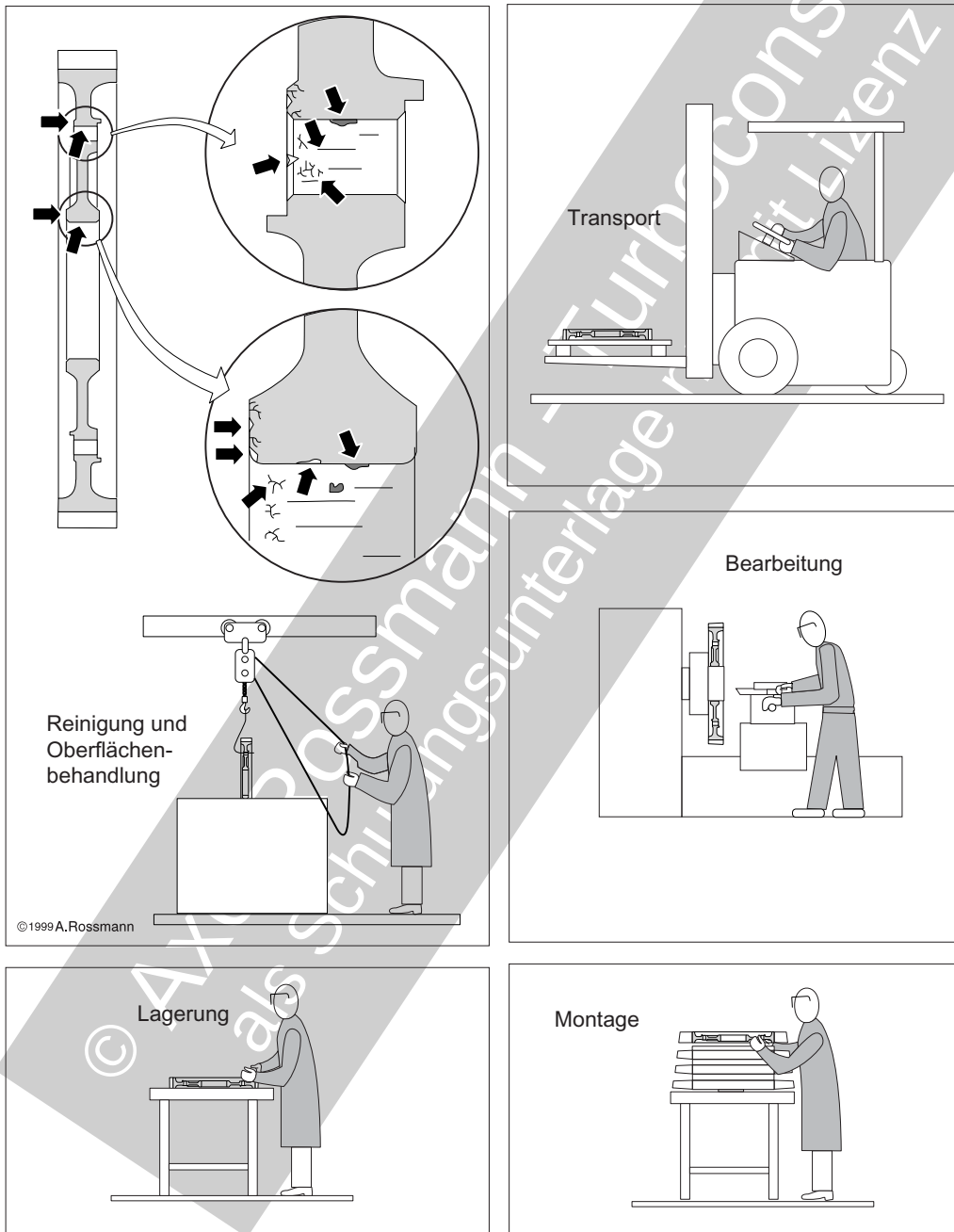


Bild 13-1

Bild 13-1 (Lit. 13-1): Die **Behandlung/Handhabung** (engl. **handling**) von Bauteilen kann **Riefen und Kratzer** erzeugen, die das Betriebsverhalten bzw. die Lebensdauer eines zyklisch belasteten Bauteils unzulässig beeinflussen.

Natürlich führt nicht jeder Kratzer zu einer gefährlichen Situation. Liegt der Kratzer aber an einer hochbeanspruchten (LCF) Stelle des Bauteils in einer ungünstigen Orientierung, kann dies die Lebensdauer des Bauteils entscheidend

verkürzen. Gefährlich sind beispielsweise Kratzer im Nabenbereich einer Scheibe und/oder in einer Verschraubungsbohrung. Gerade sie bieten sich für eine provisorische Aufnahme/Aufhängung zum kurzfristigen Transport oder für einen Tauchvorgang an (Skizze oben links). Bei diesem Vorgang können besonders gefährliche Axialriefen in Bohrungen entstehen. Auch beim Aufschieben eines Werkstücks auf Vorrichtungen besteht die Gefahr von Axialriefen (Band 4, Bild 18.5-1). Planflächen um Bohrungen sind von Riefen unterschiedlicher Orientierung bedroht. Diese entstehen beim Verschieben des Bauteils während Lagerung und Transport bevorzugt an planen Auflagen, wenn harte Partikel (z.B. Strahlgut/Korund) die Gegenfläche verschmutzen. Besonders heimtückisch sind Partikel die sich in einen weichen Werkstoff (z.B. Holz) eingedrückt haben und sich nicht mit Auskehren, Saugen oder Ausblasen entfernen lassen.

Die begrenzte Möglichkeit einer Korrosionsschutzschicht in Bohrungen von Stahlscheiben begünstigt bei ungeschützter Lagerung Korrosionsnarben.

Entstanden solche Riefen beim Handling oder werden sie dabei bemerkt, ist für die Einschätzung der Auswirkungen ein zuständiger Fachmann zu konsultieren (Band 4, Bild 17.7-1), selbst wenn ein scheinbar erfahrener Kollege die Beschädigung als ungefährlich beurteilt. Erst der Fachmann, hier von der zuständigen Qualitätssicherung repräsentiert, gibt die Gewähr einer richtigen Einschätzung und damit die Voraussetzung für die Einleitung geeigneter Schritte. Ist eine vorschriftsmäßige Nacharbeit notwendig und möglich, erfordert diese in jedem Fall ein abgestimmtes Vorgehen (Bild 13.5-1).

Um die Empfindlichkeit der Bauteile gegen kleine (zulässige) Kratzer zu verringern, werden die Oberflächen häufig präventiv kugelgestrahlt. Dadurch lässt sich die Wirkung der Kratzer entschärfen (Bild 12.2.1.6-1). Das heißt natürlich nicht, dass bei solchen Teilen beliebig Kratzer zugelassen sind.

Einige Empfehlungen zur Vermeidung von Beschädigungen der Bauteile beim Handling:

- Am besten ist natürlich, Kratzer und Oberflächenbeschädigungen werden vermieden. Diese Forderung geht besonders an alle die mit Bauteilen hantieren. Besonders in Fertigung, Qualitätskontrolle und Montage. So sind verschmutzte **Aufnahmen an Bearbeitungsmaschinen**, ein **Montagewerkzeug** mit einem Grat oder eine schmutzige **Auflagefläche** typische Ursachen von Riefen (Band 4, Bild 18.5-1).
- Woran erkennt man die Gefährlichkeit eines Kratzers? Erstes Indiz liefert die „**Nagelprobe**“: Bedenklich sind alle Oberflächeneindrücke, die mit dem Fingernagel oder der Fingerspitze fühlbar sind. Kratzer und Riefen können nachträglich auch wieder zugedrückt und deshalb kaum zu spüren sein. Im Zweifelsfall ist deshalb der Rat des zuständigen Fachmanns einzuholen.
- **Die Fehlstelle darf vor einer Beurteilung der Fachabteilung auf keinen Fall verändert werden.** D.h. kein Kratzen mit harten Gegenständen und kein Überpolieren.
- Kratzer, Eindrücke und undefinierte Beschädigungen jeder Art sind der **zuständigen Qualitätssicherung** zur Bewertung vorzulegen.
- **Eigenmächtige Nacharbeit**, wie das Auspolieren, ist **unzulässig**.
- Die **Ermittlung der Beschädigungsursache** stellt die Voraussetzung für gezielte, nachhaltige Abhilfen dar.

Bild 13-2: Die Lagerung der Werkstücke (Zwischenlagerung) zwischen aufeinanderfolgenden Fertigungsprozessen ist durchaus anspruchsvoll. Das zeigen die folgenden Beispiele.

Verschmutzungsgefahr (Skizze oben) wird von den folgenden Einflüssen begünstigt:

- **Ungeeignete Aufbewahrung der Werkstücke.** Sind z.B. die Bauteile nicht ausreichend abgedeckt, besteht erhöhte Gefahr einer schädigenden Verschmutzung (Band 4, Bild 18.3-20).

- **ungünstiger Aufbewahrungsort:** hierzu gehört die Nähe aggressiver Bäder, deren Dämpfe und eventuelle Spritzer auf die Bauteiloberfläche gelangen können.

Auch **Stäube** wie Lotpulver, Strahlgut (SiC) oder Pulver für Diffusionsbeschichtungen (Band 4, Bild 18.3-1.1 und Bild 18.3-2.1) können bei ausreichender Erwärmung in nachfolgenden Prozessschritten zu gefährlichen Schädigungen (Anschmelzungen) führen.

- **Nachlässigkeit und/oder ungenügende Motivation.** Dazu gehört Informationsmangel über die Folgen von Werkstückverschmutzungen (Band 4, Bild 18.3-6 und Bild 18.3-20).

Liegen besonders reaktive Bauteiloberflächen vor, reicht die normale Luftfeuchtigkeit, möglicherweise verstärkt von Schwitzwasserbildung, um in kürzester Zeit Rost entstehen zu lassen. Besonders empfindlich sind frisch abrasiv gestrahlte Stähle.

Wasserstoffversprödung während zu langer Zwischenlagerzeiten (mittlere Skizze, Bild 12.2.1.7-14): Besonders hochfeste Stähle können in Prozessbädern Wasserstoff aufnehmen (Bild 12.2.1.8-5 und Band 1, Kapitel 5.7). Um diese Gefahr zu bannen, muss innerhalb eines Zeitraums von 2 Stunden nach der möglichen Wasserstoffaufnahme eine mehrstündige Erwärmung bei mindestens 180°C erfolgen (Bild 12.2.1.7-14). Wird diese Zeitspanne überschritten, besteht die Gefahr einer irreversiblen Versprödung.

Wasserstoffversprödung beim Schweißen unter Zutritt von Feuchtigkeit (untere Skizze): Werden Bauteile in der Kälte gelagert und dann vor dem Schweißen in einen warmen Arbeitsraum gebracht, kann sich **Schwitzwasser** bilden (Bild 12.2.1.3.1-18). Wird ohne vorhergehende, ausreichende Trocknung geschweißt, dissoziiert das Wasser und den entstehenden Wasserstoff nimmt die Schmelze begierig auf. Nach Tagen und Wochen kann es dann zu spröder Rissbildung kommen (Bild 13-3, Bild 12.2.1.3.1-18 und Band 1 Bild 5.7.1-6).

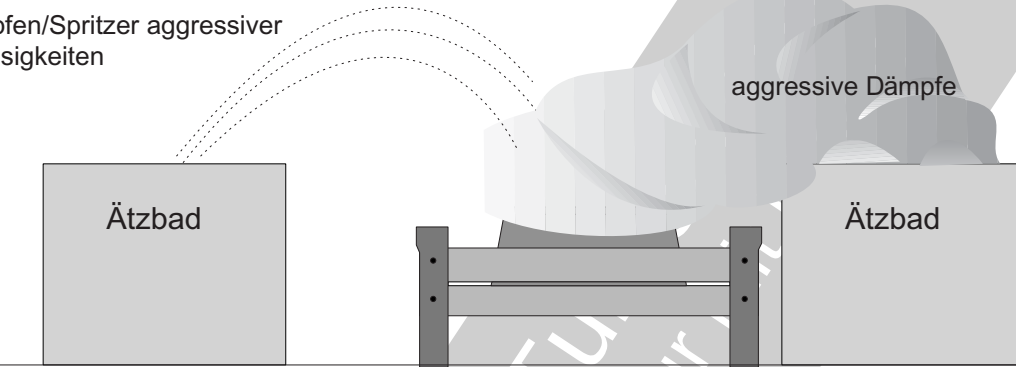
Probleme der Lagerung von Werkstücken im Fertigungsprozess.

Tropfen/Spritzer aggressiver
Flüssigkeiten

aggressive Dämpfe

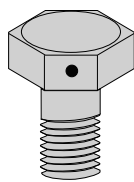
Ätzbad

Ätzbad

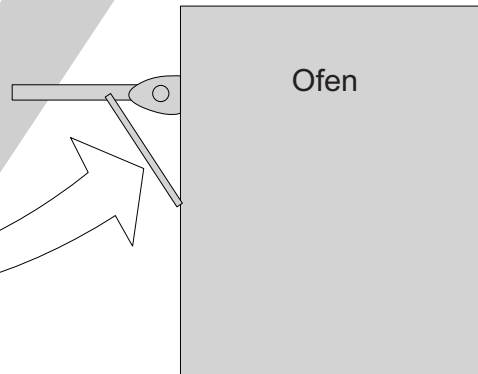


Prozessbad

Bäder in denen Wasserstoff
entsteht:
- galvanische Beschichtung
- Ätzbäder

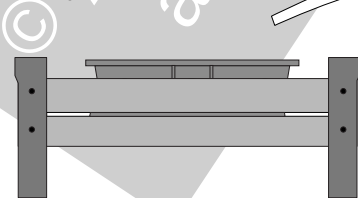


Ofen



zu langer Zeitraum zwischen
Verfahrensschritten:
Gefahr der Wasserstoffversprödung

Schwitzwasserbildung
an Teilen die im Kalten
gelagert wurden und dann
in eine warme Umgebung
transportiert werden.



Gefahr der
Wasserstoff-
versprödung

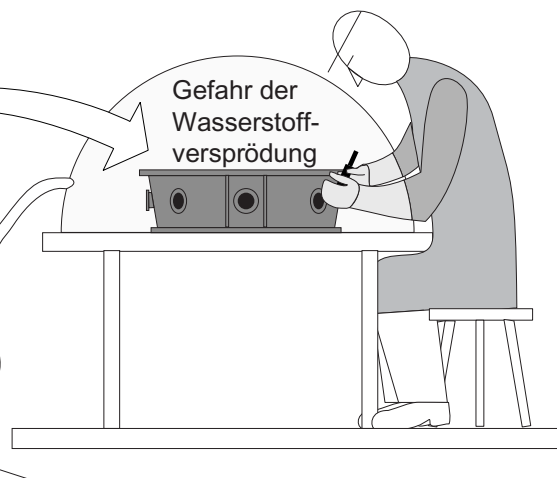


Bild 13-2

Auch während der Lagerung können an Neuteilen durch Korrosion und/oder Versprödung Risse entstehen.

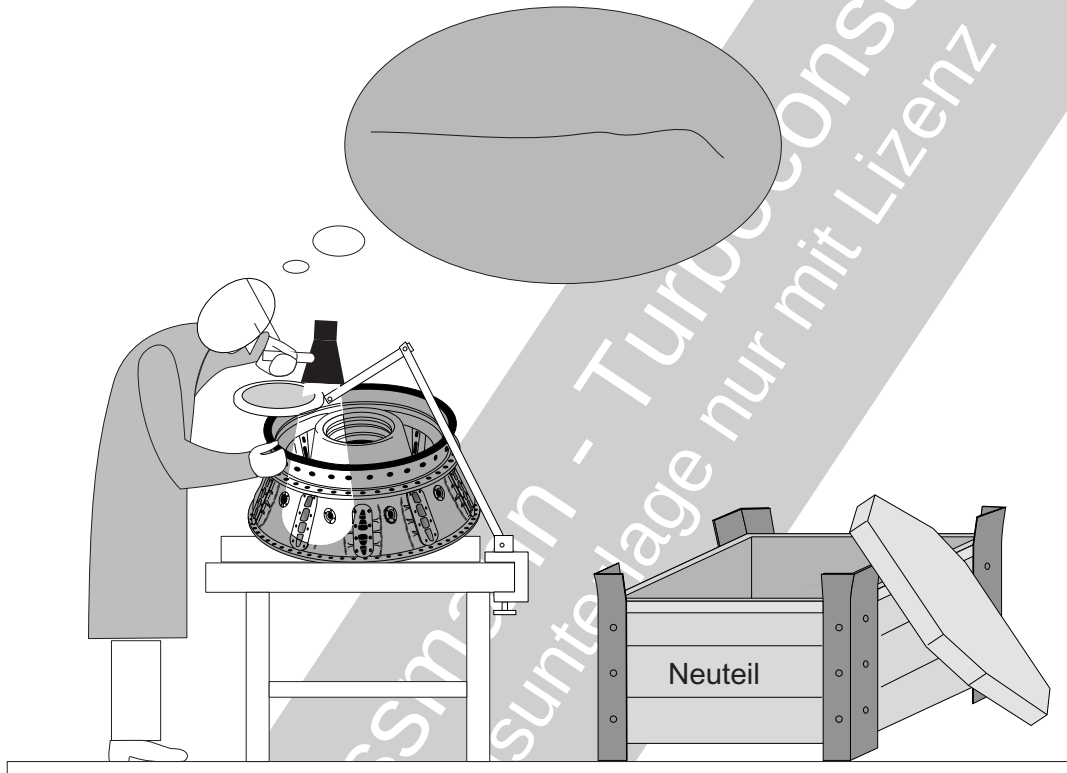


Bild 13-3

Bild 13-3: Verzögerte Rissbildung kann erst längere Zeit nach kritischen Fertigungsprozessen auftreten. Dann sind die Bauteile längst im Lager oder bereits ausgeliefert. Laboruntersuchungen (Bild 13-2, REM, Band 1, 2.2.2.4-3 und Band 4 Bild 17.3.1-12 und 18.7-10) lassen heute mit ausreichender Sicherheit feststellen, ob es sich um einen Mechanismus verzögerter Rissbildung handelt, meist eine Form der **Wasserstoffversprödung**. Sie tritt bevorzugt an Bauteilen aus besonders harten bzw. festen Stählen auf. Dabei muss es sich nicht um komplexe Schweißteile (Seite 12.2.1.3-2) handeln. Auch nicht ausreichend entsprodete Schrauben (Bild 12.2.1.8.3-7), Muttern, Rohrleitungsverbindungen, Gewindeeinsätze und Federn (Bild 12.2.1.7-14, Band 1, Bild 5.7.2-1) können betroffen sein.

Befinden sich Werkstoffe in einem empfindlichen Gefügestand kann **Luftfeuchtigkeit** oder **Meeresatmosphäre Spannungsrisskorrosion** auslösen (Band 1, Bild 5.6.3.1.2-1). Ein Beispiel sind Überwurfmutter aus hochfesten Aluminiumlegierungen bei denen offenbar die Wärmebehandlung von den Vorschriften abwich (Band 1, Bild 5.6.3.1.2-1).

Bild 13-4: Kochsalz löst in Titanlegierungen oberhalb 450°C Spannungsrisskorrosion aus (Band 4, Bild 18.3-16). Erfahrungsgemäß genügt bereits ein Fingerabdruck (Handschweiß), dass sich bei ausreichend hohen Zugeigenspannungen ein Riss bildet. Die erforderlichen Temperaturen werden während des Schweißens, offenbar auch beim Reibschweißen (Bild 12.2.1.3.4-5) und Wärmebehandlungen erreicht.

Handschuhe dienen nicht nur zum Schutz der Hände, sondern sind auch eine Voraussetzung für die Bauteilsicherheit.

Handschweiß ist gefährlich:

An Titanteilen die über 450°C erwärmt werden, können Risse ausgelöst werden.

Die Gefahr besteht besonders beim Wärmebehandeln und Schweißen.

An korrosionsempfindlichen Bauteilen wie Wälzlagern oder frisch abrasiv gestrahlten Stahlteilen kann es zur Rostbildung kommen.

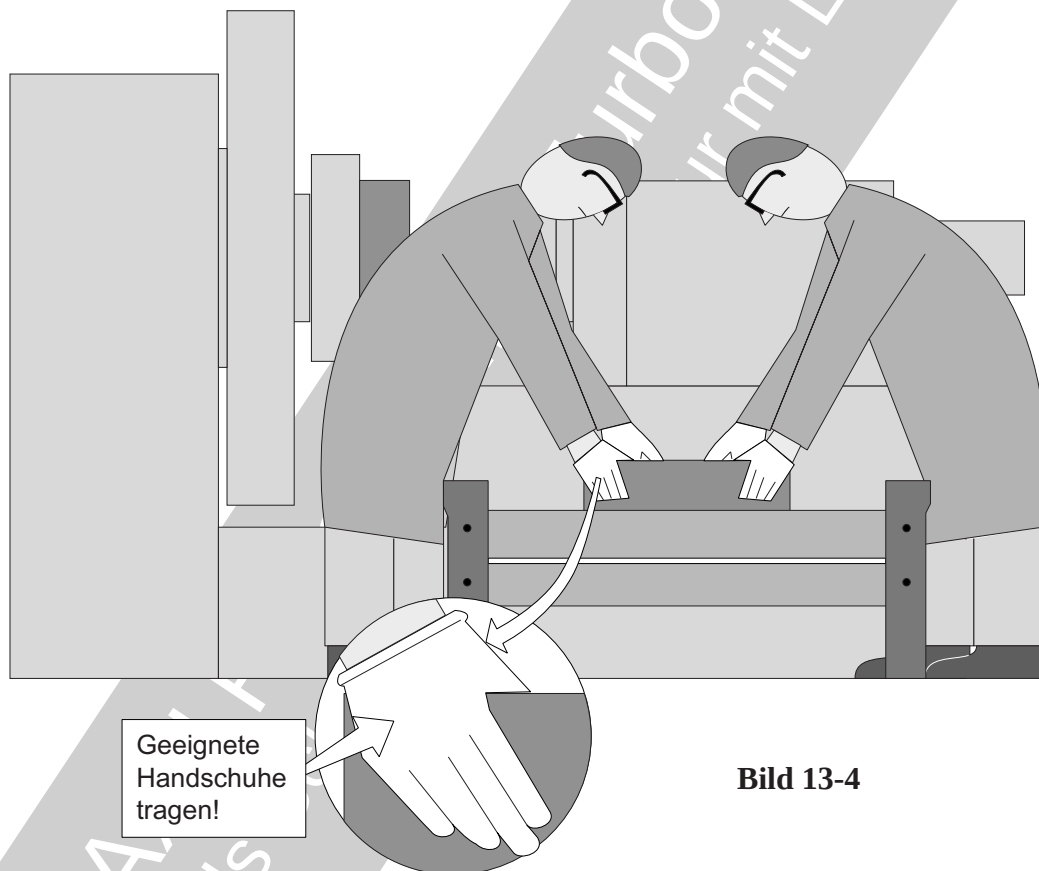


Bild 13-4

Als Vorbeugung gegen derartige Schäden sollten **geeignete Handschuhe** (z.B. Baumwollhandschuhe) beim Handling von Titanteilen getragen werden.

Auch korrosionsempfindliche Stahlteile können im Zusammenhang mit Handschweiß geschädigt werden. Es handelt sich jedoch nicht um Rissbildung, sondern um wässrige Korrosion im Zusammenspiel mit Schweißwasser. Gefährdete Bauteile sind z.B. Wälzlager.

Zumindest wegen des äußeren Eindrucks eines Korrosionsangriffs (Rost), aber auch weil

die Haftfestigkeit von Beschichtungen (z.B. Lacke) beeinträchtigt werden kann, ist das Handling der Bauteile mit bloßen Händen nicht zu empfehlen. Zu besonders empfindlichen Oberflächen gehören frisch geätzte oder gestrahlte Stahlteile und ungeschützte Leichtmetalle (Al- und Mg-Legierungen).

Die richtige Verpackung minimiert das Risiko von Transportschäden.

Transportkiste in der Fertigung

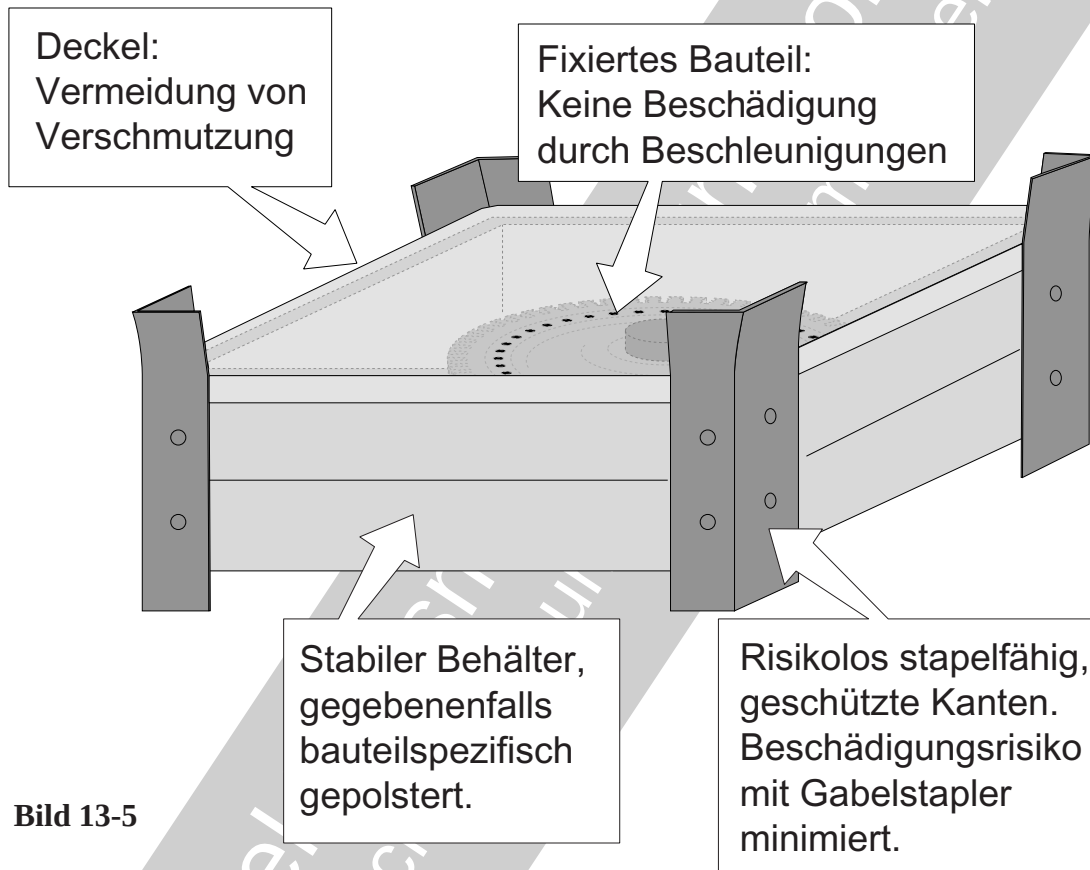


Bild 13-5

Bild 13-5: Ein geeigneter **Behälter für Transport** und Zwischenlagerung im Fertigungsprozess ist Voraussetzung, schädigende äußere Einwirkungen zu vermeiden (Bild 13-9). Zu den Forderungen an einen Behälter für Bauteile gehören:

Der **Deckel** sollte verschmutzende Fremdstoffe aus dem Fertigungsprozess (Bild 13-2) und aus anderen Quellen (Band 4, Bild 18.3-20) sicher abhalten.

Das **Bauteil ist im Behälter zu fixieren**. So wird ein Verschieben (Gefahr der Riefenbildung, Bild 14-1) und bei Stößen oder einer eventuellen Schiefelage das Schlagen an die Wände vermieden.

Der **Behälter muss ausreichend stabil** sein. Dabei sind die erheblichen Beschleunigungen (Stöße) beim Transport zu berücksichtigen. Diese Forderung kann bei schweren Bauteilen, einigen Aufwand erfordern.

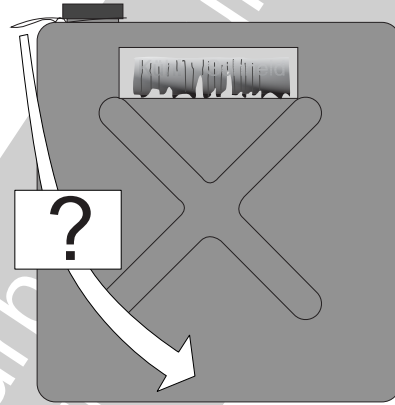
Die **Stapelfähigkeit des Behälters** muss Abrutschen und Kippen beim Aufnehmen und Transport sicher verhindern.

Zu weiteren Eigenschaften zählt bei wiederverwendbaren Behältern eine gute Reinigungsmöglichkeit. Die Sichtbarkeit des Bauteils lässt sich mit der Verwendung eines transparenten Deckels erreichen.

Die Lagerung von Hilfsstoffen der Fertigung erfordert Fachkenntnis und hat ein hohes Schadenspotenzial.



Entmischung durch
Vibrationen des Bodens



Nicht zugelassene
Produkte wie
silikonhaltige
Stoffe.

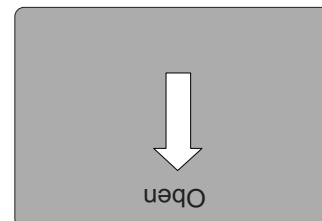


Verarbeitungstermine
und Lagertemperaturen
beachten!

Beschädigte
Kennzeichnung
begünstigt
Verwechslungen.



Verwechslungsgefahr bei
sehr ähnlichen Verpackungen



Ungeeignete Lagerungsrichtung

Bild 13-6

Kunstharze, Klebstoffe, Lacke, Elastomere

Bild 13-6: Die **Lagerung von Hilfsstoffen** der Fertigung kann auf unterschiedliche Weise die Entstehung von Schäden beeinflussen. Das zeigen die folgenden Beispiele.

In **Behältern mit Metallpulvern** (Skizze oben links) für Lote, thermische Spritzschichten, pulvermetallurgische Bauteile oder gefüllte Elastomer- und Kunstharzbeschichtungen können Vibrationen eine Entmischung verursachen (Lit. 13-4, Bild 11.2.3-3 und Bild 12.2.1.8.2-6.2). Es genügen Vibrationen des Hallenbodens

oder eines Transports. Die Entmischung kann die Pulvereigenschaften im Behälter örtlich so verändern, dass das verarbeitete Produkt nicht mehr den Spezifikationen entspricht. Dazu gehören niedrige Festigkeit von PM-Teilen, ungeeignetes Schmelzintervall von Loten oder schlechtes Anstreichverhalten thermisch gespritzter Beschichtungen.

Besonders **bei aushärtbaren organischen Medien** wie den Komponenten von Kunstharzen, Klebstoffen und von Lacksystemen (Skizze unten links) ist auf die maximal zulässige

Lagerzeit zu achten. Diese steht in Zusammenhang mit Bedingungen wie Einhaltung eines geeigneten Temperaturbereichs (z.B. Tiefkühlung reaktiver Harze). Besonders kritisch sind sog. **Prepregs**, vorimprägnierte Lagen faserverstärkter Kunststoffe, die äußerst sensibel auf kurzzeitige Überschreitungen meist deutlich im Minusbereich liegender Lagertemperaturen reagieren. In den genannten Fällen kann die **Festigkeit** des Mediums selbst und/oder die **Haftfestigkeit** von Klebern und Beschichtungen betroffen sein.

Auf die **Position bzw. Lage eines Behälters** ist zu achten (Skizze rechts), wenn diese gekennzeichnet ist.

Eine besondere Gefahr geht von **Verwechslungen** aus. Deshalb sind alle Möglichkeiten dafür zu vermeiden. Bereits die **Ähnlichkeit von Behältern** kann Verwechslungen begünstigen. Das müssen Umfüllungen von Medien in kleinere Gebinde berücksichtigen.

Beschädigte Kennzeichnungen wie **abgerissene Anhänger**, **verwischte Aufkleber** (Skizze oben rechts) an Gebinden oder **deformierte Einprägungen** und **abgeriebene Farbmarkierungen** an Halbzeug können gefährliche Verwechslungen begünstigen. Selbst wenn eine Verwechslung bereits im Fertigungsprozess entdeckt wird, besteht die Gefahr, dass viele Werkstücke betroffen sind. Hohe Kosten und erheblicher Zeitaufwand sind die Folge.

Liegt die Beschaffung von **Hilfsstoffen wie Handwaschpasten oder Schutzcreme** (Skizze Mitte links) im Aufgabenbereich der **Lagerhaltung**, ist auf **explizit zugelassene Produkte** zu achten. So können z.B. silikonhaltige Produkte die Eindringprüfung beeinträchtigen (Band 4) oder die Haftfestigkeit von Lacken und Beschichtungen verschlechtern.

Die Folge einer Verwechslung von Hilfsstoffen kann **sehr teuer** sein. In einem Fall fiel das **ungewöhnliche Aussehen gelöteter Teile** auf. Das erforderte Maßnahmen mit Kosten im Bereich eines komfortablen Einfamilienhauses.

Bild 13-7 (Lit. 13-1): An einer gekühlten **Hochdruckturbinenschaufel** werden typische **Handling- und Transportschäden** gezeigt.

Verstopfen von Kühlluftkanälen und -bohrungen („1“): Staub und kleine Partikel können in unverschlossene Öffnungen eintreten und im späteren Betrieb die Kühlung verschlechtern. Damit wird die Lebensdauer überproportional verkürzt (Band 1 Bild 5.3.2-4 und Band 4). Wirken die Partikel im Betrieb aggressiv, kann Heißgaskorrosion entstehen und das Bauteil gefährlich schädigen (Band 4, Bild 18.3-13).

Abplatzen spröder Auflageschichten („2“ und „3“): Es handelt sich um thermische Spritzschichten wie Wärmedämmschichten und Labyrinthpanzerungen. Werden diese angeschlagen, können sie aus- oder abplatzen. In diesem Fall ist ihre Funktion eingeschränkt. Örtlich unwirksame Wärmedämmschichten führen zum Anstieg der Bauteiltemperatur und einem Lebensdauerabfall (siehe „1“). Ausgeplatzte Panzerungen an Labyrinthspitzen beeinträchtigen den Anstreifvorgang und begünstigen so Rissbildung und/oder Materialaufbau mit Überhitzung. Bei einem Anstreifvorgang steigt die Gefahr katastrophalen Versagens (Lit. 13-4).

Beschädigung der Anstreifflächen von Bewegungsdichtungen („4“) wie thermischen Spritzschichten und Wabendichtungen (engl. Honeycomb). Dichtflächen aus Spritzschichten können ausbrechen, Wabendichtungen sind auf Grund ihrer filigranen Struktur für Deformationen infolge von Gewalteinwirkung empfindlich. Entsteht so ein Heißgasleckstrom zum mechanisch hochbelasteten Schaufelfuß, wird ein frühzeitiges Versagen der Schaufel ausgelöst. **Beschädigung spröder Diffusionsschichten („5“):** Zu solchen Schichten zählen Al-Diffusionsschichten für den Oxidationsschutz (Bild 12.2.1.8.1-2). Besonders Beschichtungen im Bereich von Kanten sind auf Grund der exponierten Lage von Ausplatzungen und/oder Rissbildung bei Stoßbeanspruchung betroffen. Damit wird zum einen der Oxidationsschutz ört-

Typische Transportschäden an einem "High Tech"-Teil des Triebwerksbaus

- 1 Bohrungen verstopfen
- 2 Thermobarrieren platzen aus
- 3 Labyrinthpanzerungen werden abgeschlagen
- 4 Dichtungen wie Honeycomb oder Anlaufschichten werden beschädigt
- 5 Spröde Schutzschichten (Diffusionsschichten) splintern ab
- 6 Rissbildung in spröden Schichten
- 7 Spitzenpanzerungen brechen aus
- 8 Verformungen an Auflage- und Passflächen
- 9 Fremdmaterial wird aufgeschmiert

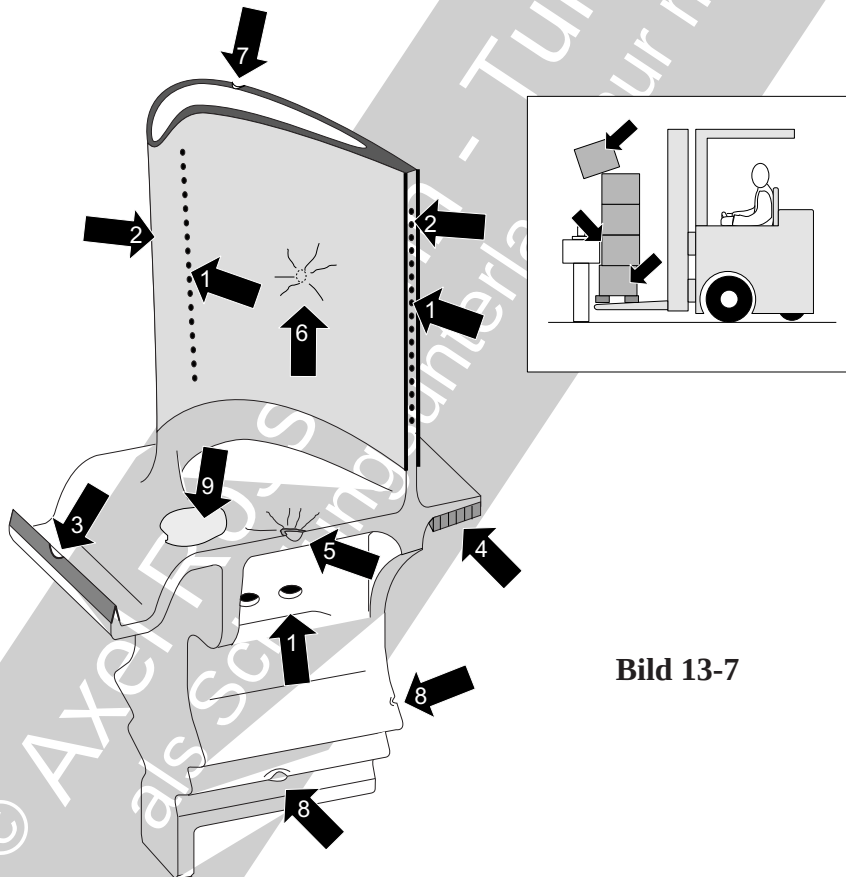


Bild 13-7

lich verschlechtert und die von ihm bestimmte Bauteillebensdauer verkürzt. Zum anderen können scharfe Kerben und Risse die Schwingfestigkeit unzulässig mindern. Thermoermüdung und hochfrequente Schwingungen können zum Risswachstum mit der Gefahr des Bauteilversagens führen.

Beschädigung von Spitzenpanzerungen („7“): Zur Spaltminimierung werden die Spitzen von Rotorschaukeln in Verdichter und Tur-

bine mit aufgelöten Hartpartikeln gepanzert (Lit. 13-4, Band 2, Bild 12.2.1.4-1). Selbst wenn es nicht zum Abplatzen der Panzerung kommt besteht die Gefahr, dass die spröden, keramischen Hartstoffpartikel ihre Schneidwirkung verlieren. Damit wird der spaltoptimierende Anstreifvorgang zu Betriebsbeginn beeinträchtigt. Die Schaufel wird an der Spitze über das zu erwartende übliche Maß hinaus geschädigt. Folgt eine verstärkte Oxidation mit einer

Spaltvergrößerung (Lit. 13-4), kann sich das sogar im Wirkungsgrad des Gesamttriebwerks bemerkbar machen (Deterioration; typische Werte in Lit. 13-4).

Deformation von Auflage- und Passflächen („8“): Sind Zentrierflächen deformiert, kommt es zu Montageproblemen. Riefen und Fressspuren in Füge-richtung (siehe auch Band 4, Bild 18.5-1) können die LCF-Lebensdauer merklich absenken. Verhindern erhöhte Fügekräfte die Anlage vorgesehener Positionierungsflächen, besteht die Gefahr eines Setzens im Betrieb. Folgen sind die Lockerung der Verschraubung und/oder Unwuchten mit umfangreichen Folgeschäden.

Verformungen an Auflageflächen die zur Kraft-einleitung dienen (z.B. am Schaufelfuß) können gefährliche Spannungsspitzen erzeugen, die zur Ermüdungsrisssbildung und zum Versagen führen.

Aufgeschmiertes Fremdmaterial („9“) ist dann besonders bedenklich, wenn es bei Betriebstemperatur mit dem Grundwerkstoff oder einer Beschichtung reagiert und diese schädigt (Band 4, Bild 18.3-1). Denkbar ist beispielsweise eine Versprödung oder die Schädigung der natürlichen schützenden Oxidschicht mit der Folge verstärkter Oxidation.

Bild 13-8: Gabelstapler als vielverwendetes Transportmittel im Fertigungsprozess und dem Versand der Fertigteile haben, wie die Erfahrung zeigt, ein durchaus bemerkenswertes **Schädigungspotenzial**. Es ist deshalb wichtig, die **Fahrer ausreichend zu sensibilisieren und zu motivieren**. Sie sollten in der Lage sein, eventuelle Vorkommnisse richtig einzuschätzen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Eine Voraussetzung ist, dass relevante Eigenschaften der zu transportierenden Werkstücke und Bauteile bekannt sind. Hierzu gehört die Empfindlichkeit gegen transportbedingte Überlastungen filigraner Strukturen, hohe Maßhaltigkeit und sprödes Verhalten. Ein weiteres Merkmal ist die Sicherheitsrelevanz (z.B. von Rotor-teilen) mit einer Vorstellung möglicher Auswirkungen von Beschädigungen. Nicht zuletzt ist der Wert eines Bauteils wichtig. Er sollte einschätzbar (z.B. relativ zu dem Preis eines Mittelklassewagens) bekannt sein.

Behälter **die sich nicht sicher stapeln lassen** sollten frühzeitig erkannt werden. Kipp-gefährliches Stapeln ist zu unterlassen.

Auf mögliche **Beschädigungen durch das Rangieren** oder bei der **Aufnahme eines Behälters** lässt sich in vielen Fällen aus dem äußeren Zustand rückschließen. Ist das nicht gewährleistet, muss ein solches Ereignis den zuständigen Stellen gemeldet werden. Ein solches vorgehen ist für den Verursacher durchaus keine Selbstverständlichkeit. Es erfordert eine geeignete **Firmenkultur** (Band 4, Bild 17.5-2), kann es doch mit persönlichen Nachteilen verbunden sein.

Vibrationen wie auf unebenen Transportwegen (Querrillen, Schotter) können bei sich **berührenden Bauteilen in ungeeigneten Verpackungen** zu Verschleiß und Kratzern führen. An Baugruppen mit Wälzlager wie vormontierte **Triebwerksmodule**, besteht in nicht ausreichend gedämpft gelagerten Behältern die Gefahr einer Schädigung der Lagerlaufbahnen (**Brinelling**, Bild 13-10). Die Folge sind schwere Schäden im Betrieb.

Einen Gabelstapler zu bedienen ist eine durchaus anspruchsvolle und verantwortungsvolle Aufgabe.

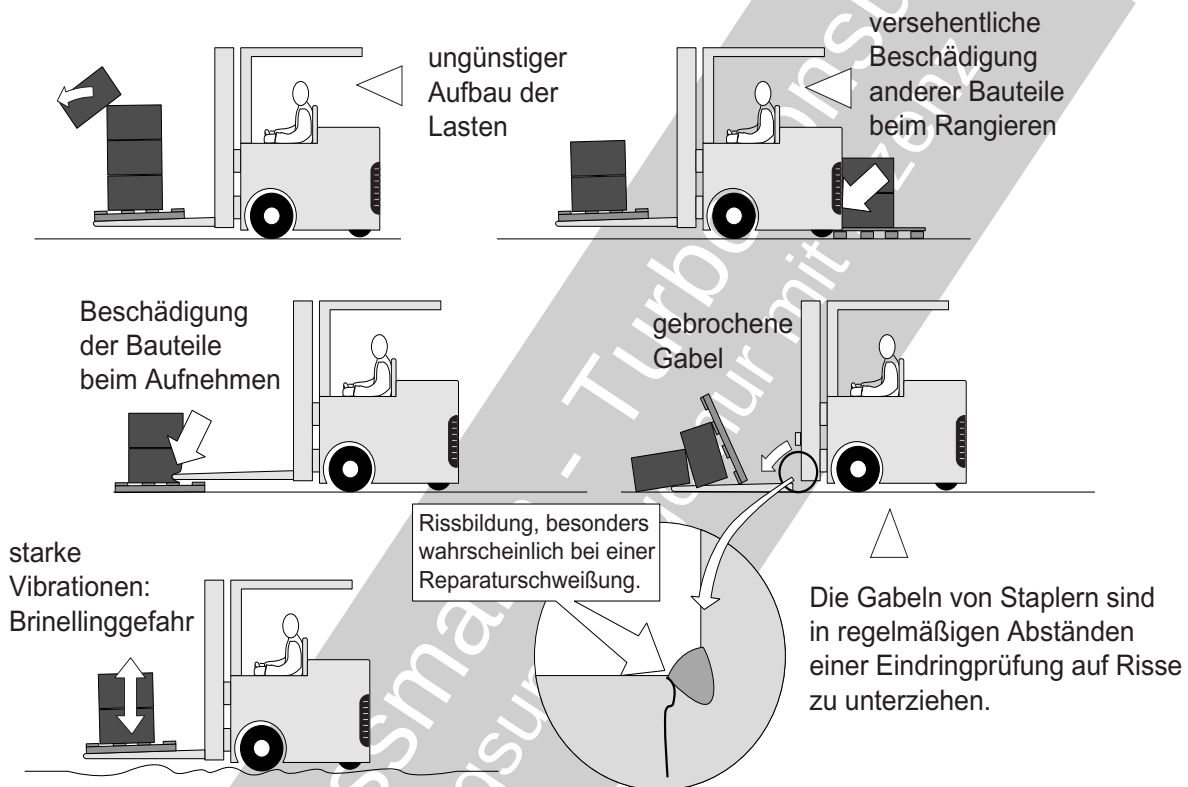


Bild 13-8

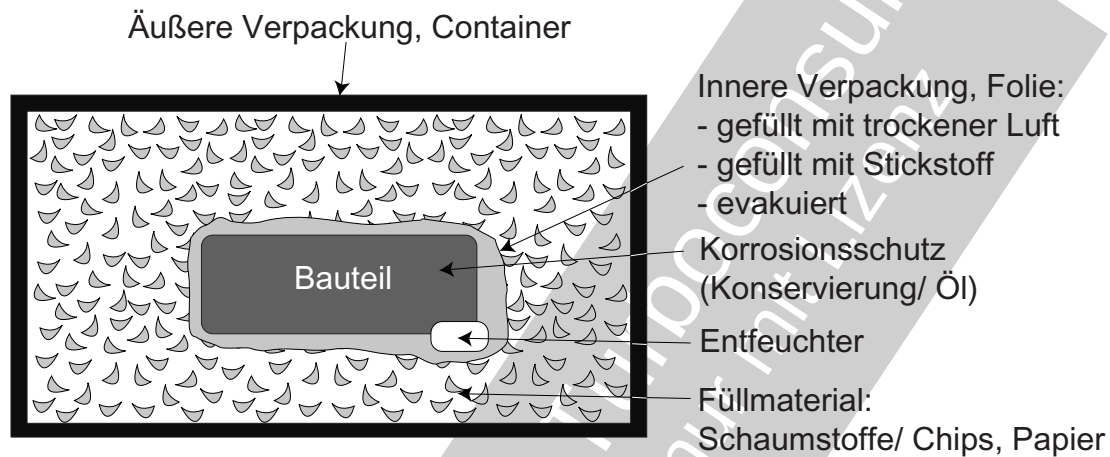
Nicht zuletzt ist die Möglichkeit eines Schadens am Gabelstapler selbst zu beachten. Hier handelt es sich in erster Linie um den **Bruch der Gabel** und das Herabfallen des Behälters. Aus diesem Grund müssen die **Gabeln in regelmäßigen Abständen geeignet** (mit Röntgen oder Eindringprüfung) **auf Risse untersucht** werden. Besonderes Augenmerk ist auf die Innenecke am Übergang zum Schlitten für die Vertikalbewegung zu richten (Skizze Mitte rechts).

Ein Beispiel ist der Bruch einer Gabelzinke und das Herabfallen eines nur provisorisch verpackten Kampfflugzeugtriebwerks aus ca. 1 m Höhe. Verständlicherweise hatte dieser Vorgang umfangreiche und äußerst kostspielige Überprüfungen und Montagevorgänge zur Folge, ohne dass es zu Schäden an der Transportlast gekommen sein muss.

Bild 13-9: Lagerung und Transport von Fertigteilen und Baugruppen können ausgeklügelte Verpackungen bzw. Behälter erfordern (Skizze oben), um Schädigungen durch die vielfältigen, potenziellen äußeren Einwirkungen (Rahmen unten) zu verhindern. So wird die **Verpackung zumindest für die Adaption an die jeweiligen Bauteile zur Spezialistenaufgabe** und erfordert die Kenntnis der Bauteileigenschaften und Sicherheitsforderungen.

Mechanische Verpackungseigenschaften: Hierzu gehört in erster Linie die Einwirkung äußerer Kräfte beim Transport, Stapeln und Handling (Bild 13-8). Mit der Empfindlichkeit und dem Gewicht des Bauteils steigen die Anforderungen an die Verpackung. Nicht nur die äußere Hülle ist von Bedeutung. Auch die Einbettung des Bauteils in Material wie Schaum-

Äußere Einwirkungen bei Lagerung und Transport.



mechanisch:

- Stöße, Vibrationen
- Kräfte vom Stapeln
- örtliche Beschädigung

Korrosiv:

- Feuchtigkeit: Luftfeuchte, Schweißwasser,
- Luftverunreinigungen: Meeresatmosphäre, Industriatmosphäre

Temperaturunterschiede:

- Alterung, Schädigung
- Schichtablösung
- Gasaustausch mit Atmosphäre

Luftdruckschwankungen:

- Gasaustausch mit der Atmosphäre
- Verdampfung oder Veränderung flüchtiger Substanzen

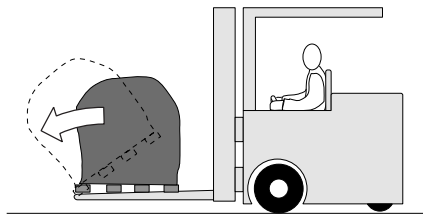
Bild 13-9

stoffformkörper, Schaumstoffchips oder Papierstrukturen. Dabei ist neben dem Aufwand/**Kosten** auch immer der Umweltaspekt (**Entsorgung**) im Auge zu behalten.

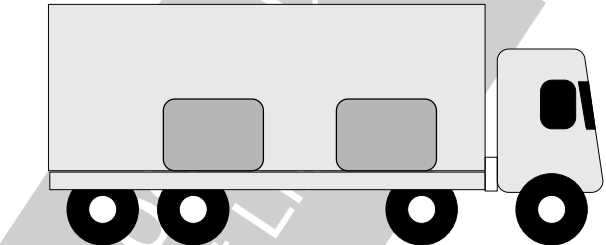
Korrosion ist gewöhnlich die Folge einer für die Umgebungsatmosphäre undichten Verpackung. So erhält **Luftfeuchtigkeit** Zutritt. In Kombination mit Schweißwasserbildung und **Meeresatmosphäre** oder **aggressiver Industriatmosphäre** kann es bei nicht ausreichender

der Konservierung zu einem schädigenden Angriff kommen. Für eine solche Situation sind **Laufbahnen von Wälzlager** besonders empfindlich. Sie sollten sich mit **ausreichend dichten Verpackungen, geeigneter Konservierung der Bauteile und Entfeuchter** (Kieselgel, engl. silica gel) in der Verpackung vermeiden lassen. Große Temperaturunterschiede wie zwischen Tag (Sonneneinstrahlung) und Nacht (z.B. in

Situationen für Transportschäden während und nach dem Fertigungsprozess.



kippen, anstoßen, fallen lassen,
Beschädigung der Verpackung



große Beschleunigungen, Vibrationen

Bild 13-10

Wüstengegenden und/oder beim Lufttransport) kann bei undichten Verpackungen der **Austausch mit der Umgebungsatmosphäre** und damit z.B. der **Zutritt von Feuchtigkeit** und/oder Feinstaub intensiviert werden. Liegen solche Bedingungen über längere Zeiten (z.B. Monate) vor, können Elastomere (Dichtungen, Beschichtungen) oder Kunstharze (Klebstoffe) altern (verspröden, Festigkeitsabnahme) und/oder die Haftfestigkeit abfallen. Über ausge dehnte Lagerungszeiten ist auch eine Veränderung von Medien wie ungeeignetem Konservierungsöl denkbar.

Ein ähnlicher Effekt kann auch im Zusammenhang mit **Luftdruckschwankungen** stehen. Diese sind z.B. bei Veränderung der Höhe zu erwarten, z.B. beim **Transport über hohe Pässe oder in einem Flugzeug**. Dabei ist es auch denkbar, dass Bestandteile eines flüssigen Mediums verstärkt abdampfen.

Bild 13-10 (Lit. 13-1): Transportschäden sind für den Absender, den Transporteur und den Empfänger ein besonderes Ärgernis. Werden sie nicht erkannt, kann das Betriebsverhalten eines Bauteils unzulässig beeinflusst sein. In diesem Fall besteht neben Verzögerungen und Kosten ein potenzielles Sicherheitsrisiko. Einige Transportschäden kann der Absender selbst vermeiden. Gerade Triebwerksteile stellen gewöhnlich einen großen Wert dar. Sie sind

hoch präzise, manchmal auch filigran oder korrosionsempfindlich. Verpackungen müssen diese Eigenschaften des Transportguts und die zu erwartenden Transportbelastungen berücksichtigen. Handelt es sich um Baugruppen (Module) mit **Wälzlager**n können **Vibrationen** (z.B. von einer unebenen Straße) oder **wiederholte Stöße** (z.B. Schienenstöße, Rangierstöße) zu Verschleißschäden an den Wälzlagerlaufbahnen führen (**Brinelling**, siehe auch Band 4, Bild 18.5-8). Natürlich müssen die Verpackungskosten in einem sinnvollen Verhältnis zum Wert des Bauteils stehen. Stöße sind gerade auch von den Kanten her abzufangen, Feuchtigkeit ist vom Innenraum fernzuhalten und Belastungen in einem Stapel sind zu berücksichtigen. Im Inneren dürfen sich Teile nicht berühren, um gefährliche Kerben auszuschließen oder zu verhindern, dass spröde Schichten (z.B. keramische Wärmedämmschichten) abplatzen. Die Teile dürfen bei Vibrationen nicht aneinander reiben, um Verschleiß und Festigkeitsabfall (Fretting) zu vermeiden. Die Verpackung muss das Teil also sicher fixieren. So hat sich z.B. gezeigt, dass **Honeycombdichtungen** mit ihren typischen **dünnen Blechstegen** an den Kanten besonders leicht beschädigt werden können. Das gilt beispielsweise für Transportstöße auf Bauteile in Kunststoffkästen. Die Berührungsflächen der Verpackung müssen so nachgiebig und weich sein, dass die Teile

nicht beschädigt werden können. Hervorstehende Metallteile wie Nägel sind auszuschließen.

Wenn trotz guter Verpackung das Teil beschädigt beim Kunden eintrifft, besteht der berechnete Verdacht, dass der **Transport ungewöhnlich rau** war. Wie lässt sich ein solcher **Verdacht nachweisen**? Moderne Labormethoden, in erster Linie das REM, (Band 1 Bild 2.2.2.4-3) ermöglichen bei akzeptablem Aufwand die Klärung der Ursachen eines Transportschadens. Diese Untersuchungsmethode lässt sowohl über die Geometrie einer Verformung als auch gegebenenfalls mit der chemischen Analyse eines Abriebs oder von Aufschmierungen den Verformungsvorgang rekonstruieren.

So verdächtige anfangs der Empfänger einen herausstehenden Nagel in der Transportkiste als **Ursache eines Transportschadens**. Es handelte sich um die Beschädigung am Außendurchmesser einer Verdichterscheibe. Mit Labormethoden ließen sich jedoch typische Mauerreste in der Beschädigung nachweisen. Sie belegten eindeutig, dass das Teil gegen eine Mauer gestoßen war. Offenbar hatte die Verpackung entweder unter extremer Stoßbelastung versagt, oder das Teil war bereits ausgepackt gegen die Mauer gestoßen.

In einem anderen Fall wurden in verbogenen Honeycombzellen ausgebrochene Kunststoffreste der Verpackung gefunden. Das wies auf einen zu harten Kunststoff der Verpackung hin.

Auch die **Farbe einer Verpackung** kann Anlass für kostspielige Schäden sein. So wurde ein Fall bekannt, bei dem man die gelbe Aramid-Containmentbandage eines kleineren Fantriebwerks während des Auspackens irrtümlich mit einem Messer aufschnitt. Das Personal hatte diese wichtige Triebwerkskomponente **mit einem üblicherweise gelben Verpackungsmaterial verwechselt**.

Einige Empfehlungen zur Vermeidung von Beschädigungen der Bauteile beim Handling:

- **Verpackungen von Triebwerksteilen erfordern Fachwissen von Spezialisten.** Sie müssen eine Vielzahl von Forderungen wie Kosten, Haltbarkeit, Aufwand, Gewicht und Volumen berücksichtigen.
- Verpackungen sollten für den **jeweiligen Anwendungsfall erprobt und spezifiziert** sein. Änderungen sind mit den zuständigen Fachleuten abzusprechen.
- Werden vom Kunden Transportschäden reklamiert, sollten diese, falls Zweifel an der Ursache bestehen, einer **Laboruntersuchung** zur Verfügung stehen.
- Transportschäden an Verpackungen sind auch ein Know-How-Gewinn. Die so teuer erworbenen Erfahrungen sollten in die **Verbesserung der Verpackungen und deren Spezifikation** einfließen.

Bild 14-11: Voraussetzung für eine gezielte **vorbeugende Vermeidung von Transport und Handlingschäden** (Band 4) ist die Ermittlung der Ursachen bereits aufgetretener Fälle. Handelt es sich um sicherheitsrelevante und/oder kostspielige Schäden wird zu einer Problemanalyse geraten (Band 1 Kapitel 2.2.2). Das wichtigste Verfahren zur Ermittlung der notwendigen Fakten ist erfahrungsgemäß die sog. REM-Untersuchung (Band 1 Bild 2.2.2.4-3). Mit ihr lassen sich auch kleinste Beschädigungen dokumentieren, geometrische Besonderheiten erkennen und auf ihren Ursprung rück schließen. Die Zusammensetzung eventueller Aufschmierungen oder eingedrückter Partikel können analysiert werden. Wegen der von der Probenkammer des REM eingeschränkten Probengröße können Abdrücke im Schadensbereich notwendig werden (Band 1 Bild 2.2.2.4-4). Das schließt natürlich chemische Analysen

Die Aufklärung von Transportschäden ist eine Voraussetzung weitere zu vermeiden.

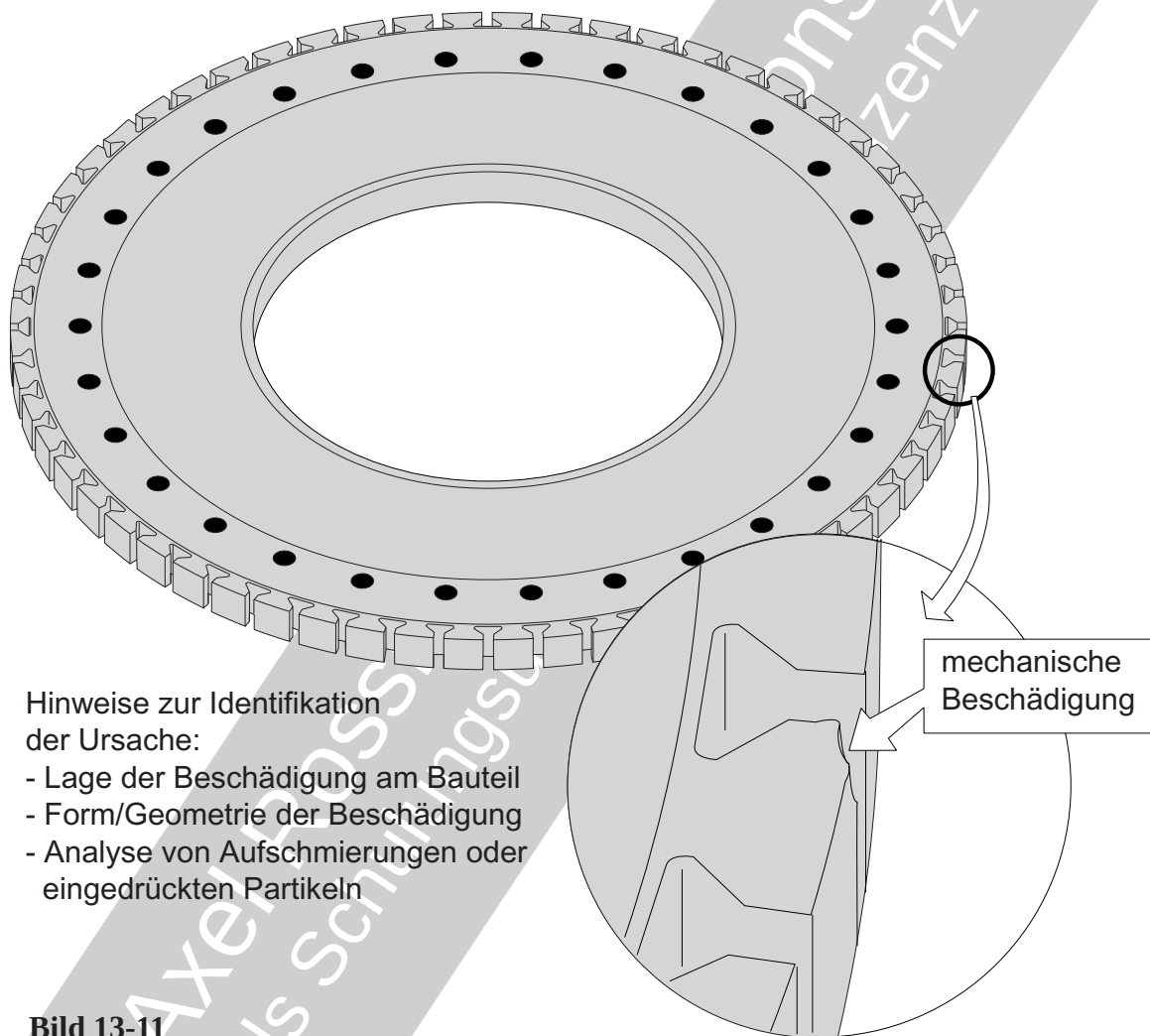


Bild 13-11

aus. Es sei denn, Partikel bleiben am Abdruck haften.

Die **geometrische Form** der Beschädigung gibt wichtige Hinweise auf die Gestalt des Gegenstücks. So sind Nägel, Schrauben oder andere Bauteile und Teile der Verpackung identifizierbar.

Die **chemische Analyse von Aufschmierungen und Partikeln** lässt Rückschlüsse auf deren Art und Herkunft zu.

Im Fall der Beschädigung einer Turbinenscheibe gelang der Nachweis, dass eine Beschädigung durch den Kontakt mit einer Betonwand beim Empfänger der Lieferung erfolgt sein muss.

Die Ergebnisse der REM-Untersuchung können auch für eine nachfolgende Bewertung der **Weiterverwendung** des Bauteils oder einer eventuellen **Nacharbeit** (Band 4, Bild 17.5-1) entscheidend sein.

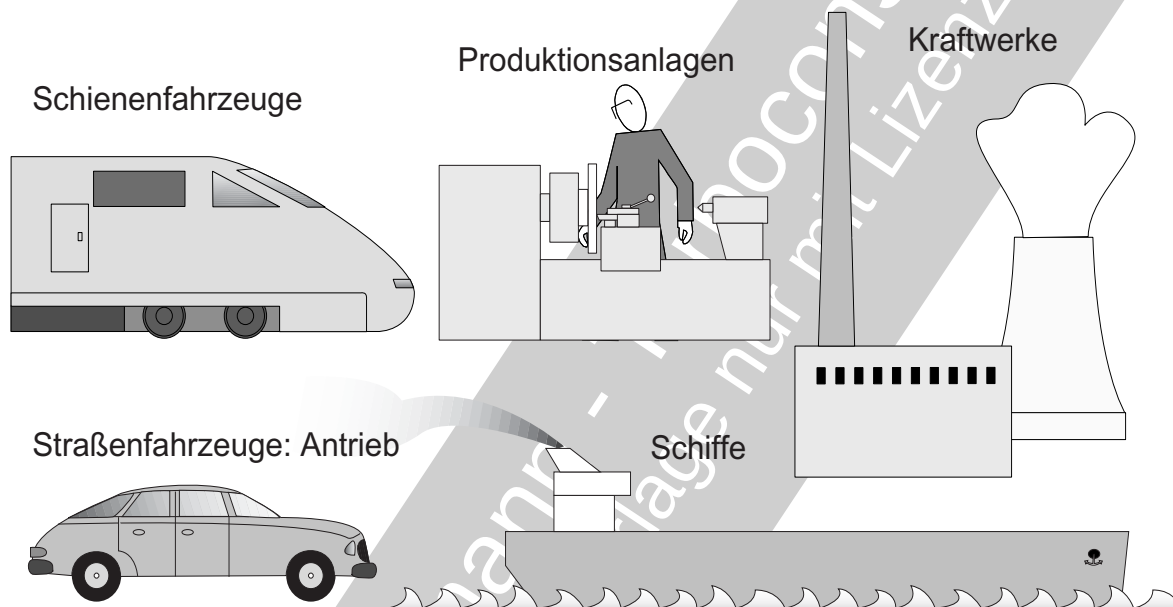
Literatur zu Kapitel 13

- 13-1** A.Rossmann, „Unser Beitrag zur Qualitätssicherung“, 1998, Turboconsult.
- 13-2** Metals Handbook „Volume 11, Failure Analysis and Prevention“, ASM 1986, ISBN 0-87170-007-7. Seite 211, 212.
- 13-3** I.E.Traeger, „Aircraft Gas Turbine Engine Technology“, Second Edition, Glencoe, ISBN 0.07-065158-2, 1994, Seite 399.
- 13-4** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2, 2000 Turboconsult., ISBN 3-00-008429-0, Bild 7.1.3-15, Bild 7.1.4-2, Bild 7.1.4-14 und Bild 7.2.2.-4.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

14. Reparatur gelaufener Maschinenelemente

Beispiele wo Reparaturen an Komponenten angewendet werden



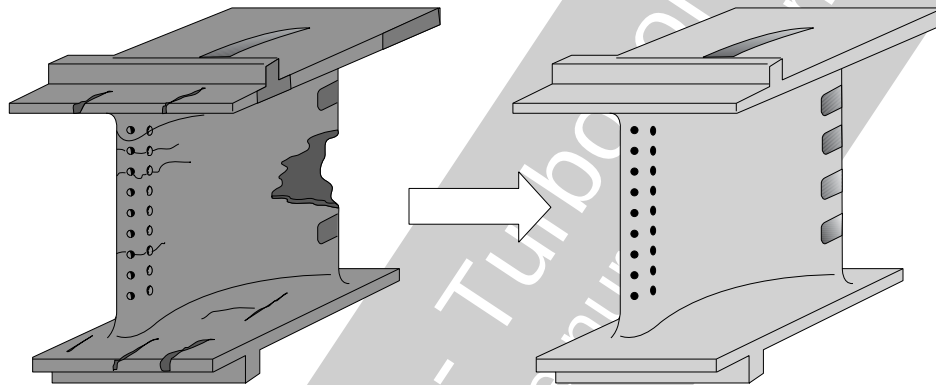
Bei Großserienprodukten wie PKW's werden geschädigte Teile zunehmend **durch Neuteile ersetzt**. Dieser Trend kann sich unter der Notwendigkeit von Ressourcenschonung und Umweltaspekten wieder umkehren. Teure Komponenten wie Kraftfahrzeugmotoren werden auch heute noch häufig als Tauschmotoren repariert.

Anspruchsvolle Anlagen wie in Kraftwerken und Industrieanlagen, die hohe Investitionen repräsentieren werden jedoch repariert. Hier spielt neben den Kosten im Vergleich zum Neuteil auch die Verfügbarkeit eine Rolle. Bei der Reparatur werden Schäden an den Komponenten entfernt oder Verschleiß gegebenenfalls mit geeigneten Verfahren durch Auftrag und Nacharbeit ausgeglichen wird. Die dazu verwendeten **Verfahren entsprechen weitgehend auch der Neuteilfertigung**. Sie werden jedoch auf die Besonderheiten der Reparatur optimiert. Dies ist dann notwendig, wenn gelaufene Bauteile **durch Betriebseinflüsse Veränderungen** (z.B. Gefüge, Korrosion, Oxidation, Rissbildung) erfahren haben. Hier kann eine Reparatur selbst dann sicher sein, wenn die **Festigkeitswerte des Neuteils nicht erreicht** werden, diese aber erfahrungsgemäß auch nicht notwendig sind. In solchen Fällen ist eine ausreichende **Betriebserprobung unerlässlich**. Es ist jedoch auch durchaus möglich und wird häufig eingesetzt, die Schadensstelle so zu reparieren (z.B. mit einer Verschleißschicht), dass sogar **bessere Betriebseigenschaften bzw. längere Lebensdauern als beim Neuteil realisiert** werden.

Veränderungen gegenüber dem Neuteil, z.B. bei Beschichtung von Verschleißflächen um die Maßhaltigkeit zu erreichen, erfordern bei nicht ausreichender Erfahrung eine intensive, betriebsnahe Erprobung für ein akzeptables Ausfallrisiko.

In diesem Kapitel werden **Beispiele aus der Flugtriebwerkstechnik** verwendet. Der Grund ist nicht nur, dass der Autor aus dieser Branche kommt. Vielmehr ist über Literatur wie Flugunfallberichte und Schulungsbücher ausreichend Erfahrung für diese äußerst **anspruchsvolle sicherheitsrelevante Technik** zugänglich.

15. Überholung und Reparatur gelaufener Bauteile.



In diesem Kapitel wird unter **Reparatur** ein Vorgang verstanden, den internationale Vorschriften (Lit. 14-1) als „**Major Repair**“ bezeichnen. Mit einer Reparatur werden aus gelaufenen Teilen einbaufähige **Ersatzteile** (engl. spare parts). Repariert werden Teile mit vom OEM spezifizierten Betriebsschäden, deren Weiterverwendung entsprechend den Vorschriften nur noch begrenzt oder unzulässig ist. Im Folgenden soll sich der Schwerpunkt auf den **Bearbeitungsvorgang**, nicht aber auf den Einbau bzw. die Montage der Teile beziehen. Es handelt sich um Arbeiten, welche

- die **Festigkeit** des Teils beeinflussen,
- **besondere Techniken**, Verfahren, Vorrichtungen oder Anlagen erfordern,
- **Methoden** die eine bauteilspezifische **Zulassung** erfordern.

Zur Reparatur zählt auch die **Überholung einer Anlage/Maschine und/oder seiner Module**. Der Begriff Überholung wird hier **von dem der Wartung unterschieden**. Wartung beschränkt sich auf Arbeiten die nicht die Zerlegung erfordern, einen Tausch aber einschließt. Bei der **Überholung** erfolgt dagegen eine **Zerlegung (Demontage)** mit Reinigung, Inspektion und gegebenenfalls einer Reparatur von Komponenten. Beim folgenden Zusammenbau (**Montage**) kommen in den meisten Fällen auch reparierte Ersatzteile zum Einbau. Je nach Bauteil und Vorschriften handelt es sich um Teile des gleichen und/oder aus einem anderen Triebwerk desselben Typs. Einbaukriterium ist beispielsweise eine noch verbliebene Restlebensdauer. Eine optimale Logistik kombiniert vorteilhaft Bauteile mit ähnlichen Restlebensdauern. Das ermöglicht befriedigende Überholintervalle.

Nachstehend werden einige wichtige, übergeordnete Begriffe und Gesichtspunkte von Reparaturen betrachtet.

Überholintervalle (Bild 14-1 und Bild 14-2) werden nach bestimmten „Philosophien“ festgelegt, denen in jedem Fall eine **ausreichende Sicherheit** zu Grunde liegt. In besonderen Fällen, z.B. militärischem Betrieb in Wüstengegenden (Bild 14-5), müssen vorgesehene Überholintervalle extrem verkürzt werden.

Vor der Reparatur einer Maschinenkomponente, z.B. einer Turbinenschaufel oder von Bremsenkomponenten großer Fahrzeuge, stellt sich die besonders den Betreiber interessierende Frage: Lohnt sich eine **Reparatur oder kommt ein Neuteil zum Einbau**? Die Antwort richtet sich in erster Linie nach den jeweils zu erwartenden Kosten (Bild 15-6).

Einen 'ökonomischen Charme' hat das „**Retirement for Cause Konzept**“ (Bild 15-7). Es scheiterte bisher an den hohen Sicherheitsanforderungen, die mit derzeitigen, seriengeeigneten, zerstörungsfreien Prüfverfahren (Band 1 Seite 1-5) anscheinend nicht erreicht werden können.

Bild 14-1 (Lit. 14-2): Beide Diagramme zeigen anhand der **Badewannenkurve** (Band 1, Bild 2.3-4) zwei Philosophien. Sie unterscheiden sich in der Festlegung von Überholintervallen nach dem „**Festen-Intervall-Prinzip**“ (engl. **Fixed Interval Maintenance, Hard Times**), und der „**Online Condition Maintenance**“ (Bild 14-2).

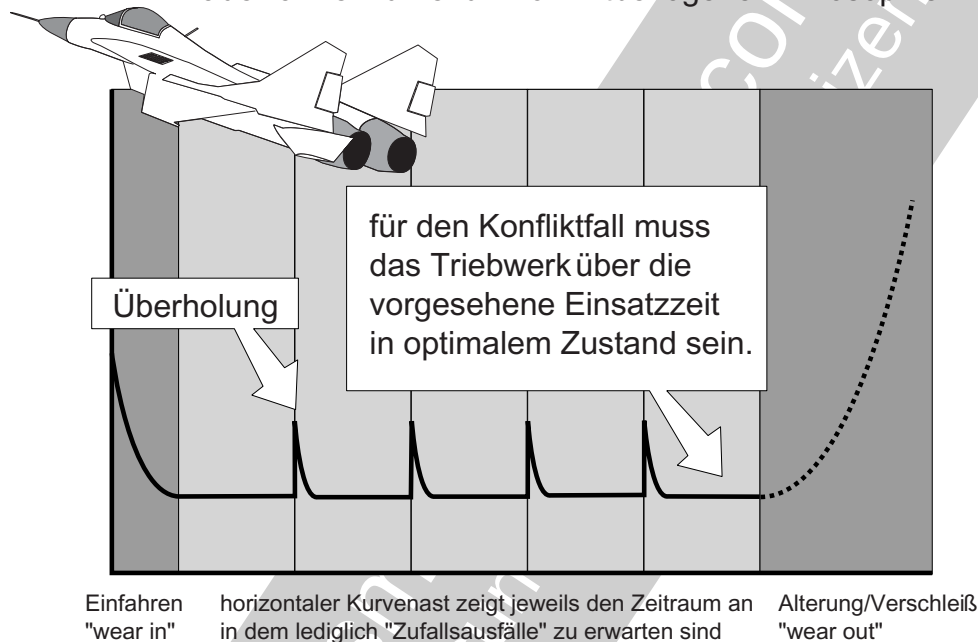
Im oberen Diagramm ist die Philosophie des ehemaligen 'Ostblocks' dargestellt. Im Vordergrund stand die militärische Anwendung. Man kann sie als „**konfliktbezogene Philosophie**“ bezeichnen. Dahinter steht die Überlegung, dass in einem jederzeit kurzfristig möglichen Konfliktfall die Triebwerke in einem bestmöglichen Zustand zur Verfügung stehen müssen. Das macht einen Austausch, deutlich bevor das schädigungsbedingte Lebensdauerende erreicht ist, erforderlich. Natürlich führte diese Vorgehensweise zu relativ **kurzen Überholintervallen** und hohen **Kosten**. Sie steigen weiter, wenn sich die Auslegung der Bauteile an den kurzen Intervallen orientiert. Besonders betroffen sind teure Rotorteile mit LCF-begrenzter Lebensdauer. Weil eine Reparatur auch nach vergleichsweise kurzer Lebensdauer nicht mehr möglich ist, steht die Verschrottung an. Diese Nachteile können anscheinend nicht von günstigeren Reparaturkosten auf Grund relativ kurzer Betriebszeiten weniger geschädigter Bauteile kompensiert werden.

Heute hat sich offenbar überall in der zivilen und in der militärischen Luftfahrt aus ökonomischen Gründen die „**friedensbezogene Phi-**

losophie“ durchgesetzt (Diagramm unten). Man nutzt mit festen Überholintervallen die tatsächlich erreichbare sichere Lebensdauer der entsprechend ausgelegten Komponenten aus. Der Trend scheint noch einen Schritt weiter zu gehen. Dabei geht man von festen Überholintervallen zur „**On-Condition Maintenance**“ über (Bild 14-2).

Die Festlegung der Überholzeitpunkte und -intervalle ist nicht zuletzt eine philosophische Frage.

Badewannenkurve für "konfliktbezogene" Philosophie



Badewannenkurve für "friedensbezogene" Philosophie

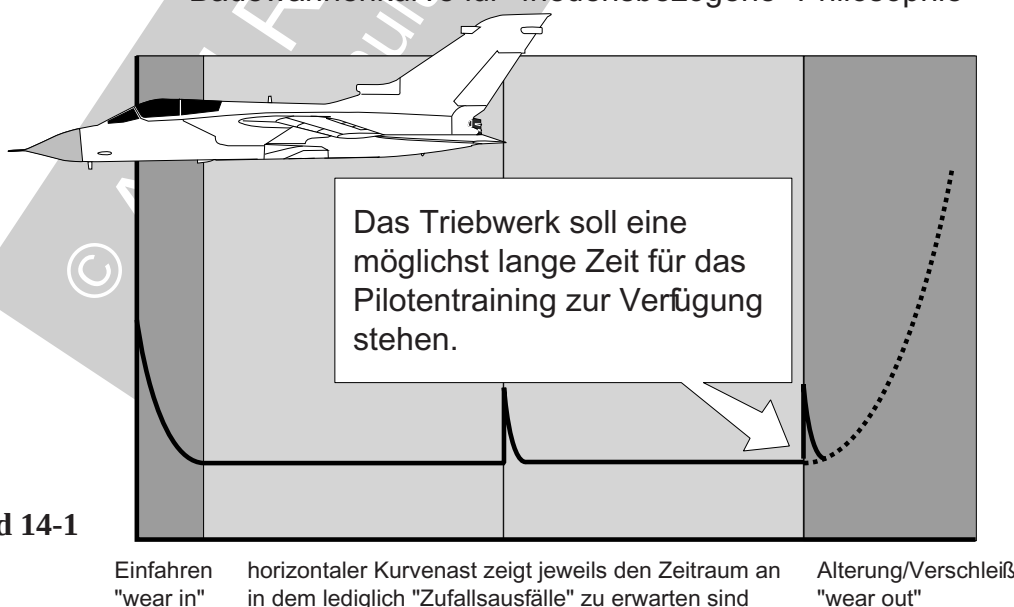


Bild 14-1

Konzepte der Überholung. Fixed Interval Maintenance ("Hard Times") und On-Condition Maintenance.

Fixed Interval Maintenance.

Beispiele:

- Festgelegte Zeiten für lebensdauerbegrenzte Rotorteile (LCF).
- Heißeile (Hot-section Inspections), insbesondere Hochdruckturbine

Vorteile:

- Sicherere Langzeitplanung des Triebwerkseinsatzes (On-wing)
- Sicherere Kostenplanung
- Logistik übersichtlicher
- Überholintervalle zugelassen von den zuständigen Sicherheitsbehörden (z.B. FAA) und in den Handbüchern (Maintenance Manual) angegeben.
- Geeignet für Betreiber mit wenigen Flugzeugen

Nachteile:

- Kosten
- Triebwerksauslastung nicht optimal
- Höheres Risiko gegenüber unvorhergesehenen technischen Problemen, die zu katastrophalen Schäden oder unvorhergesehenen Triebwerksausbauten führen.

On Condition Maintenance. "The Engine will tell us".

Beispiele:

- Erreichen der Lebensdauer aus Auswertung von Sensoranzeigen (Trends)
- Boroskopbefunde: Erosion, Oxidation/Heißgaskorrosion, Rissbildung und/oder Deformationen durch Thermoermüdung
- Sensoranzeigen: Vibrationen, Wirkungsgradabfall/ Deterioration, Pumpverhalten des Verdichters.

Vorteile:

- Längere Zeiten im Betrieb (On-wing), d.h. bessere Triebwerksauslastung, verringert Kosten pro Flugstunde ("Power by the Hour"- Prinzip)
- Größere Flexibilität in Zeitabläufen zum Triebwerkseinsatz, logistische Vorteile
- Trendanalysen führen zur Verringerung des Risikos unvorhergesehener Triebwerksausbauten.

Nachteile:

- Qualifikation bei zuständigen Behörden kosten- und zeitaufwändig.
- Triebwerks (-typ) spezifisch. Z.B. Ausstattung mit Sensoren und Boroskopöffnungen.
- Größere Flotte für ausreichende statistikgeeignete Datenmengen erforderlich.
- Ungünstiger für Betreiber mit geringerer Auslastung der Tageslaufzeit
- Kontinuierliche Überwachung erforderlich, Auswertung (Trendanalysen) sowie die Dokumentation können aufwändig sein (Kosten).
- Gewisse feste Intervalle unvermeidlich, z.B.
 - Routine-Wartungsarbeiten wie Ölfilter, Reinigung von Kraftstoffdüsen
 - LCF-lebensdauerbegrenzte Rotorteile.
 - In Sonderfällen regelmäßige Inspektionen (z.B. Boroskop).

Bild 14-2

Bild 14-2 (Lit. 14-1): Für die Zeitabstände, nach denen ein Triebwerk zu überholen ist, haben sich zwei Konzepte durchgesetzt:

Fixed Interval Maintenance (Bild 14-1) und **On-Condition Maintenance**. Die „Philosophie“ ist **nicht unbedingt an einen Maschinentyp gebunden**, sondern kann **vom Flugzeugtyp abhängig** sein. Dabei wird betrieberspezifisch vorgegangen. Auch verschiedene Varianten eines Triebwerkstyps können unterschiedlich behandelt werden.

Beide Vorgehensweisen haben ihre Vor- und Nachteile.

Fixed Interval Maintenance ist die **traditionelle Vorgehensweise** der Triebwerksüberholung. Sie berücksichtigt besonders die **Auslebensdauer/Garantiebensdauer** der Heißeile. Soll das **Überholungsintervall verlängert** werden, sind **Nachweise erforderlich**. Hierfür wird der Zustand des/der betriebstypischen Triebwerks/e bei der Zerlegung und der Überholung genauestens untersucht und der Teilezustand ermittelt („**Sampling**“). Diese Arbeiten können sehr umfangreich, zeit- und kostenaufwändig sein. Beispielsweise wenn die zulässige Zyklenzahl von Rotorscheiben erhöht werden soll. Dazu können absichernde, zyklische **Schleuderversuche** erforderlich werden. Sie werden an Scheiben die unter repräsentativeren Betriebsbedingungen gelaufen sind durchgeführt. Der OEM gibt dazu Hilfestellung und Empfehlungen. Die **Genehmigung erteilt aber die zuständige Behörde**. Das dann **vom OEM im Handbuch festgelegte Überholungsintervall** bezieht sich üblicherweise auf **Betriebsstunden und/oder Start-/Abstellzyklen** (Bild 14-13).

Bei der **On-Condition Maintenance** erfolgt die Überholung in Form des gezielten **Tauschs einer Komponente**, die ihre Lebensdauergrenze erreicht hat. Natürlich wird man versuchen, **Lebensdauern bzw. Restlebensdauern** der Bauteile eines Triebwerks möglichst **günstig zu kombinieren**. Das gilt sowohl für neue als

auch gelaufene Teile. Es handelt sich dabei nicht zuletzt um eine anspruchsvolle **logistische Aufgabe**.

Es kommt also darauf an, den **Zustand („health“) des Bauteils** mit ausreichender Sicherheit zu ermitteln. Dafür sind unterschiedliche Vorgehensweisen, die auch kombiniert werden, möglich (Band 1 Kapitel 3.2.2 und Kapitel 3.3). **Sensoren überwachen und registrieren die lebensdauerbestimmenden Betriebsparameter**. Aus denen wird mit vom OEM erarbeiteten Algorithmen der Lebensdauerverbrauch bzw. die Restlebensdauer ermittelt. Das wird von modernem „**Trend Monitoring**“ und **elektronischen Reglern** (Full Authority Digital Electronic Control = FADEC) gestützt. Typisches Beispiel sind Rotorscheiben deren (zyklische, LCF) Lebensdauer von den Start-/Abstellvorgängen bestimmt ist. Eine Schädigung ist an diesen Teilen **nicht rechtzeitig** visuell oder mit zerstörungsfreien Prüfungen **erkennbar** (Band 1, Bild 3.2.2-1.1 und Bild 5.4.1.1-3). **Boroskopinspektionen** können dagegen an Bauteilen mit **visuell erkennbaren Schädigungskriterien** im eingebauten Zustand genutzt werden (Lit. 14-19). Sie können die auf Sensordaten beruhenden Abschätzungen des Trend Monitoring absichern und/oder allein als Lebensdauerkriterium verwendet werden. Ein Beispiel sind Schäden wie Rissbildung durch Thermoermüdung oder Oxidation an Leitschaufeln der Hochdruckturbine (Lit. 14-18). Um die betroffenen Teile zu wechseln, ist eine **Modulbauweise** hilfreich. Sie ermöglicht den Teiletausch mit begrenztem Aufwand.

Will ein Betreiber nach On-Condition vorgehen, ist eine **eingehende Vorbereitung mit dem OEM** erforderlich. Die **Genehmigung erfolgt letztendlich von der zuständigen Luftfahrtbehörde** (z.B. FAA).

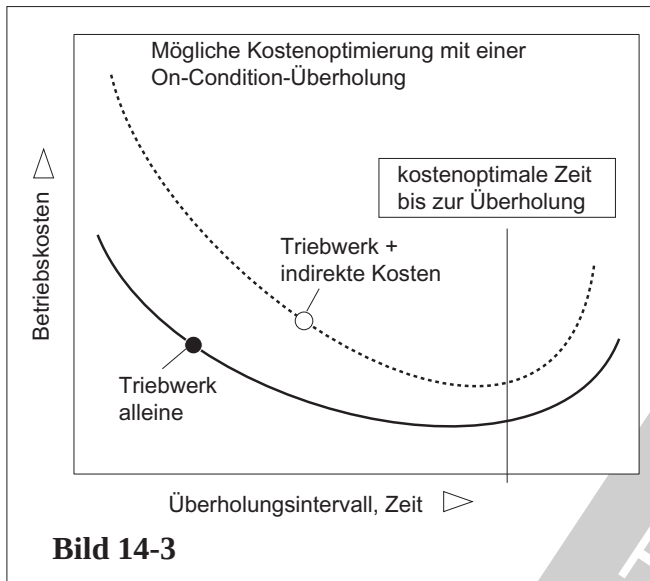


Bild 14-3 (Lit. 14-1): Natürlich stehen bei der Festlegung eines **optimalen Überholungsintervalls** bzw. der „Überholungsphilosophie“ für den Betreiber die **Betriebskosten** unter Einhaltung der erforderlichen **Sicherheit** im Vordergrund.

Die Überholintervalle bei Fixed Interval Maintenance (feste Überholintervalle) aber auch der Überholzeitpunkt bei On-Condition Maintenance können mit zunehmender Erfahrung (z.B. **Fleetleader Prinzip**) aus Sicht der Sicherheit **verlängert** werden. Dann stellt sich die Frage nach dem **kostengünstigst optimierten Überholintervall**. Die Kosten des Triebwerks allein und seine Gesamtkosten, d.h. unter Berücksichtigung der indirekten Kosten, folgen einer Badewannenkurve (Bild 14-1). Anfänglich fallen die Kosten mit längeren Überholintervallen, steigen jedoch irgendwann wieder an. Das kann darauf beruhen, dass teure Bauteile **über eine Reparaturmöglichkeit hinaus geschädigt** sind und mit neuen teureren Teilen ersetzt werden müssen (Bild 14-4). Wie die Kurven zeigen, steigen gerade die **indirekten Kosten nach langen Laufzeiten** stark an. Das dürfte u.A. an einem erhöhten **Kraftstoffverbrauch** liegen. Er entsteht als Folge des Ausriebs der Labyrinthdichtungen, der Vergrößerung von Spitzenspalten in Verdichter und Turbine, Erosionsverschleiß an der Verdichterbeschaufelung sowie Verzug und

Profilveränderungen in der Turbine (Lit. 14-20). Zusätzlich erfordert die Kompensation des Leistungsabfalls (z.B. Startleistung) **erhöhte Heißgastemperaturen**. Dies führt zu einer beschleunigten **Schädigung teurer Heißteile** und verschlechtert so On-Condition-Vorteile.

Bild 14-3: Welche Schäden sind reparierbar?

Wie lange kann man warten bis eine Reparatur erfolgen muss? Was ist das charakteristische an Schäden deren Reparatur nach dem Überholhandbuch oder nach Vorschriften zulässig ist?

Grundsätzlich gilt, gleiche Schadensbilder an verschiedenen oder gleichen Bauteilen verschiedener Triebwerke bedeuten nicht, dass hier gleiche Reparaturgrenzen gelten. Dies wird am Beispiel einer Turbinenleitschaufel im Vergleich zu einer Turbinenrotorschaufel verständlich. Eine Rolle spielt die **bauteil- und auch anwendungsspezifische Betriebsbelastung**. Letztendlich entscheidet die Zulassungsbehörde nach Empfehlungen des OEM. In diesem Bild soll anhand von rotierenden Turbinenkomponenten die Problematik erklärt werden.

Schaufelkanten („A“): Orangenschaleneffekt (Band 1 Bild 5.6.1.4.2-4) durch Oxidation und Thermoermüdung ist für den Fachmann gut erkennbar und identifizierbar. Diese Schädigung ist begrenzt und bei ausreichender, verbleibender Schaufelblattgeometrie/Profil **abtragend nacharbeitbar**. Ein Auflöten oder Aufschweißen, wie bei Leitschaufeln häufig möglich, scheidet aus Belastungsgründen an Rotorschaufeln aus. Zumindest das gleiche sollte auch für die Erosion der Vorderkanten (Kokspartikel, engl. carbon erosion) gelten. Diese Schädigung ist an ihrer charakteristischen Gratbildung gut von thermisch bedingten Schäden unterscheidbar (Lit. 14-19).

Schaufelblattbereiche mit Überhitzungsverdacht („D“) sind gewöhnlich **nicht befriedigend sicher erkennbar**. Einem erfahrenen Fachmann kann die Oberflächenstruktur oder Deformationen (Lit. 14-18) einen Hinweis geben. In weniger kritischen Anwendungen wird man auf eine Reparatur (örtliche Wärmebehandlung) verzichten bzw. ist diese nicht vor-

Fortsetzung übernächste Seite

Nicht alle Alterungsschäden von Bauteilen lassen sich rechtzeitig erkennen und sind beherrschbar oder reparierbar.

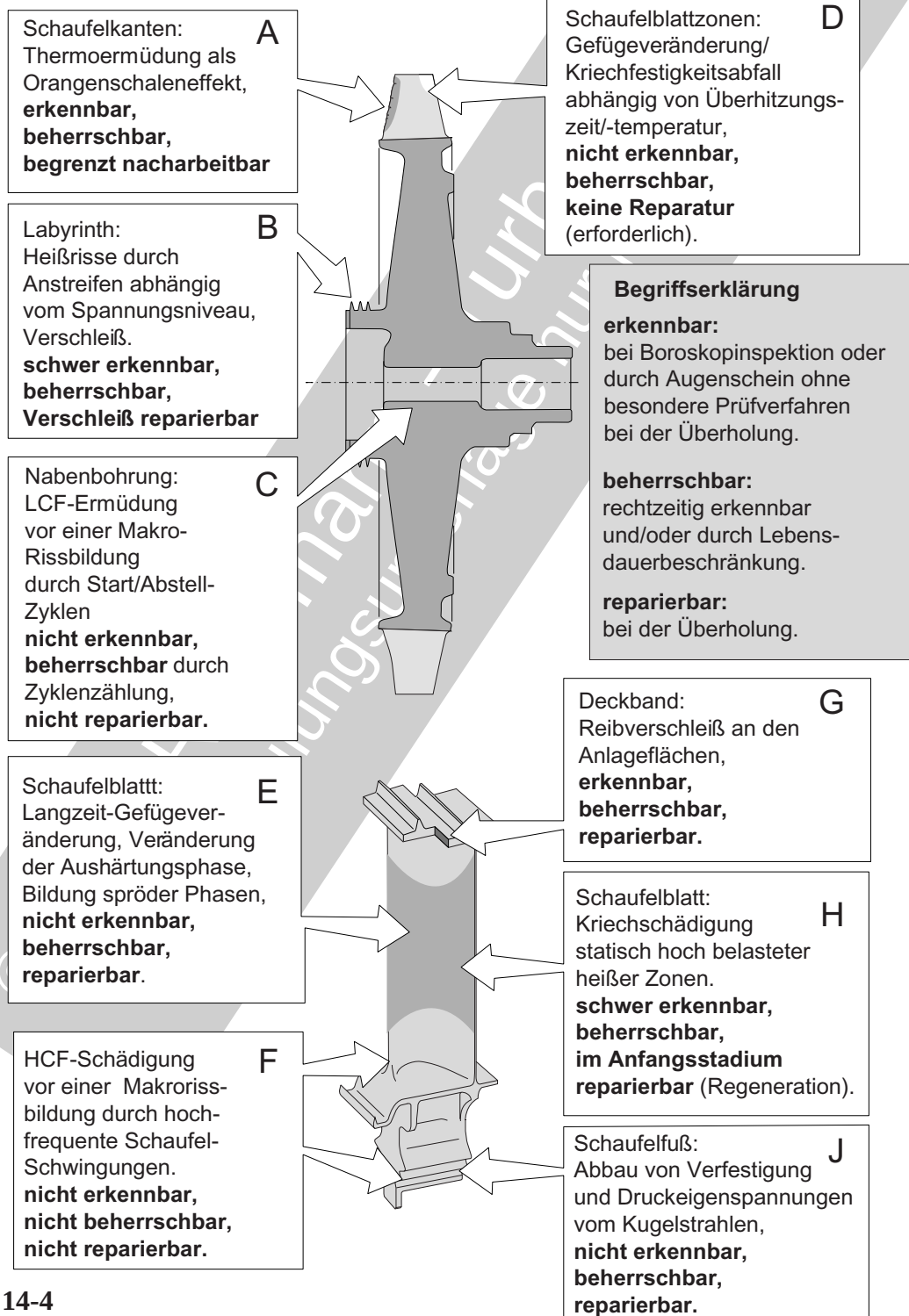


Bild 14-4

Fortsetzung von 2 Seiten vorher.

gesehen. Das gilt, wenn man davon ausgehen kann, dass **bei normalen Betriebstemperaturen ein Aushärtungseffekt** eintritt und die Festigkeit wieder angehoben wird.

Langzeit-Kriechschädigung am Schaufelblatt („H“) ist **äußerlich schwer erkennbar**, wenn es sich nicht in merklichen Verformungen zeigt (Lit. 14-18). Erfolgt die Schädigung über Kriechporenbildung (gewöhnlich nur bei Schaufeln aus Schmiedelegierungen alter Triebwerkstypen, Lit. 14-18) und ist noch nicht zu weit fortgeschritten (Standard erforderlich), lässt sich mit HIP (Kapitel 11.2.3) eine **Regeneration** durchführen.

Langzeit-Gefügeveränderungen („E“) wie Orientierung („raftening“) und/oder Vergrößerung der ‘Gammastrich’-Phase oder die Bildung **spröder Phasen** (z.B. Laves Phase, Sigmaphase) können **Festigkeitsabfall und Versprödung** bedeuten. Diese Veränderungen sind **äußerlich nicht erkennbar**. Mit einer geeigneten Wärmebehandlung ist eine Regeneration denkbar.

Schwingschädigung (HCF) im Schaufelblatt („F“) ist **weder rechtzeitig erkennbar noch beherrschbar**. Dies liegt am **schnellen Rissfortschritt** bei hochfrequenten Schwingungen (Band 1 Bild 4.3-22). Eine **Reparatur**, auch einer Schädigung ohne Rissbildung, ist **nicht möglich**, ein Erfolg nicht nachweisbar.

Deckband Reibverschleiß („G“) ist rechtzeitig erkennbar und mit **Aufschweißen** (Panzern) reparierbar.

Verfestigungsabbau am Schaufelfuß („J“) ist nicht erkennbar, jedoch in der Auslegung berücksichtigt und wird gewöhnlich bei jeder Überholung **mit Kugelstrahlen regeneriert**.

Labyrinthspitzen („B“): Die Reparierbarkeit hängt von den Betriebsbelastungen ab (Band 1, Bild 4.4-10 und Bild 5.4.1.1-3). Zu erwartende hohe dynamische Belastungen (LCF, HCF) können eine Nacharbeit stark einschränken. Heißrisse als Folge eines Anstreifvorgangs (Band 1, Bild 4.4-15) sind gewöhnlich mit Eindringstoff nachweisbar. Auch eine visuelle Erkennbarkeit ist bei größeren Rissen möglich. Als Nacharbeit kommt das örtliche Ausblenden geschädigter Anstreifbereiche oder ein Aufschweißen verschlissener Labyrinthspitzen in Frage.

Nabenbohrung und andere hoch belastete Scheibenzonen („C“) lassen **keine Reparatur einer möglichen LCF-Schädigung bei Lebensdauerende zu**. **Rissbildung ist weder erlaubt noch reparierbar**. Das gilt auch bei Rissfreiheit, wenn die Lebensdauer entsprechend den Vorschriften abgelaufen ist (Lit. 14-19). Dies liegt daran, dass bis heute keine LCF-Schädigung mit seriene geeigneten Verfahren zerstörungsfrei ausreichend sicher nachweisbar ist (Lit. 14-19). Das **Ausblenden kleiner Beschädigungen** wie Kratzer ist nur im Rahmen der Reparaturvorschriften mit der notwendigen Vorsicht (Lit. 14-19) möglich. Meist ist dann ein Kugelstrahlen gefordert.

Bild 14-5 (Lit. 14-7): Dieser Hubschraubertyp kommt **in Wüstengegenden** zum militärischen Einsatz. Dabei machte angesaugter Sand ernste Probleme. In erster Linie handelte es sich erwartungsgemäß um **Erosion der Beschau felung** und der Gehäuseinnenwände des Verdichters (Rahmen Mitte rechts, Band 1 Kapitel 5.5.1.1). Das ließ sich auch mit einem vorgeschalteten Sandabscheider (Skizze unten links und Rahmen unten rechts) nicht befriedigend verhindern. Als Folge mussten die **Überholintervalle deutlich verkürzt** werden.

Der akute militärische Einsatz kann die Überholintervalle der Triebwerke extrem verkürzen.

Dieser Hubschraubertyp erlitt in Wüstengegenden trotz des Partikelfilters schwere, von angesaugtem Staub ausgelöste Triebwerksprobleme. Nach ca. 100 Betriebsstunden mussten die Triebwerke wegen Erosion an der Verdichterschaukelung ausgetauscht werden.

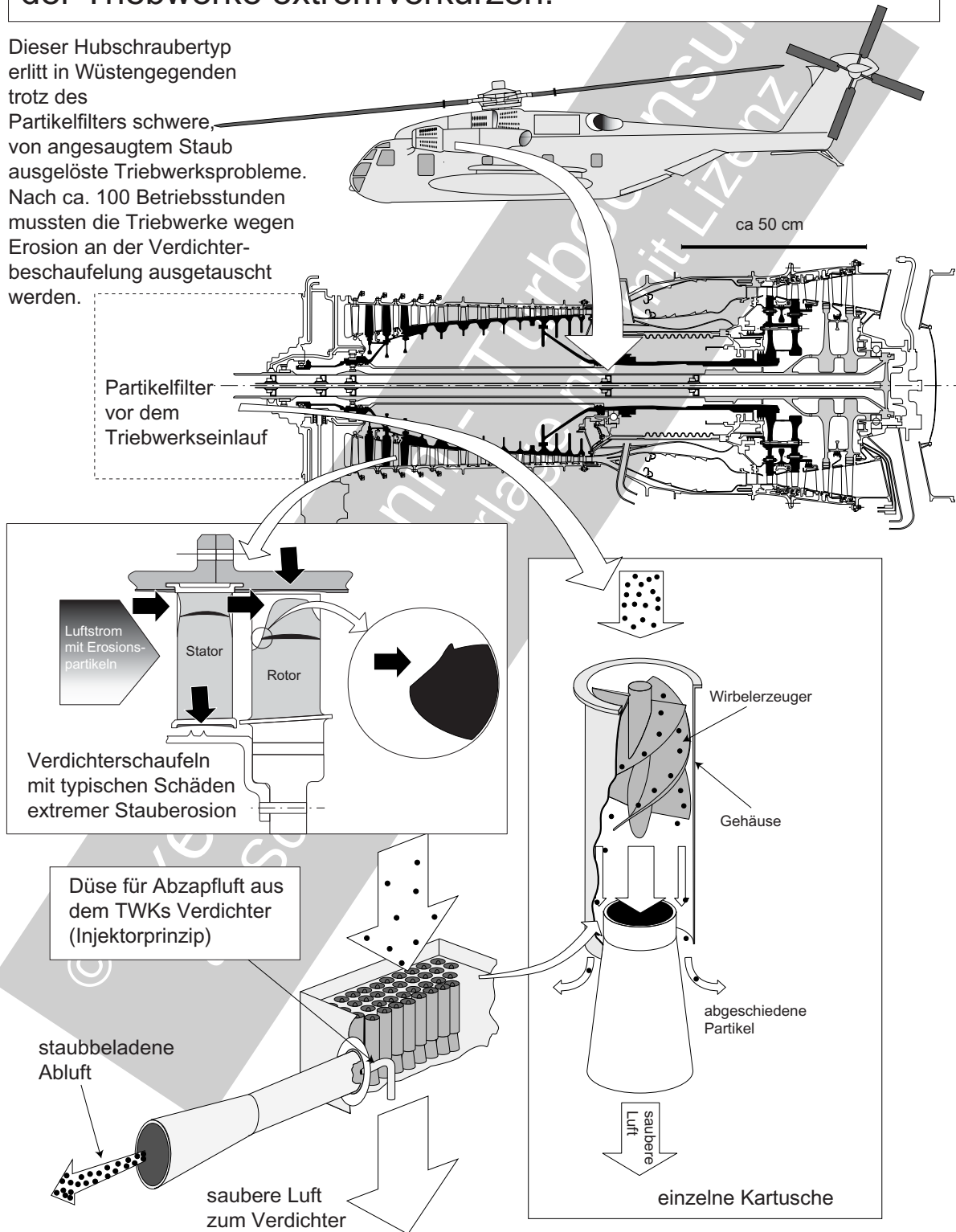


Bild 14-5

Bildbeschreibung vorhergehende Seite

Ersatz durch ein repariertes Teil oder ein Neuteil? Das ist hier die Frage.

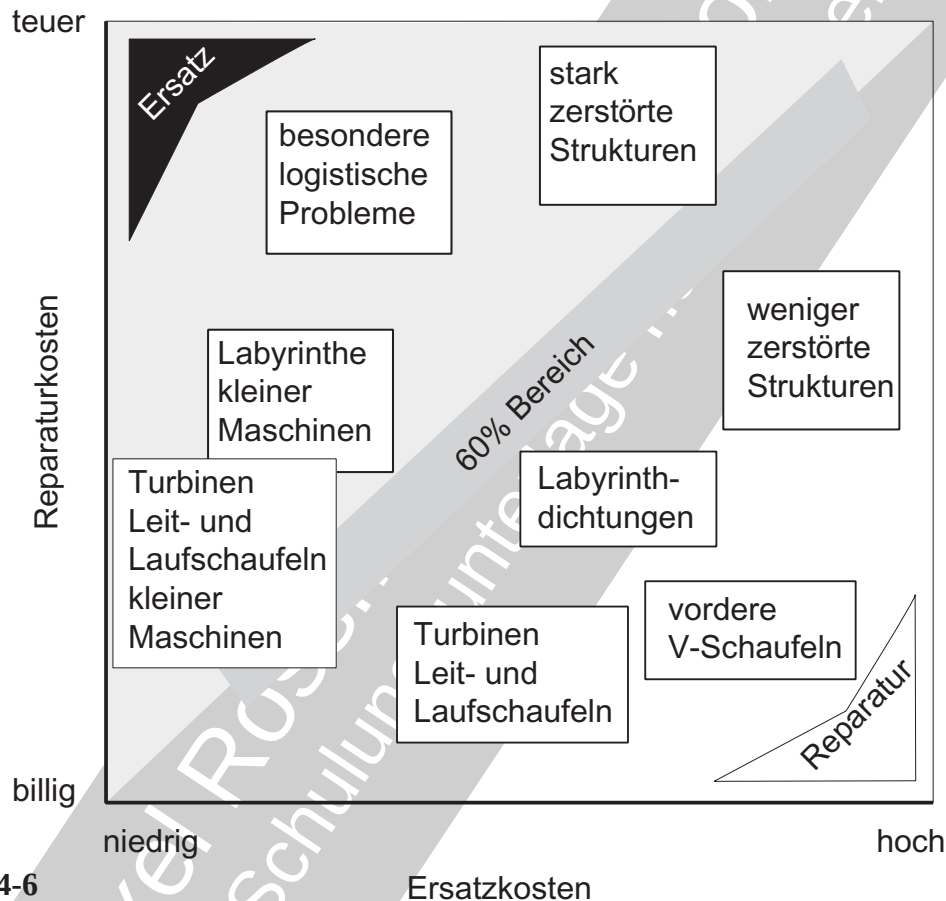


Bild 14-6

Ersatzkosten

Bild 14-6 (Lit. 14-3): Je teurer ein Bauteil, umso größer sind die Anstrengungen es kostensparend zu reparieren. Die übliche Grenze, ab der es sich nicht mehr lohnt, ein Bauteil zu reparieren ist erreicht, wenn die **Reparaturkosten 60% des Neuteilpreises übersteigen**. Dieser Grenzbereich wird vom schräg verlaufenden dunklen Streifen markiert. Die **Häufigkeit einer zu erwartenden Reparatur** ist ein wichtiges Kriterium, das über die **Entwicklung einer Reparatur** (Kapitel 14.2) entscheidet. Das erfordert **Nachweise und Zulassungen** und kann **sehr aufwändig** sein. Eine Reparatur die selten benötigt wird kann sich

deshalb, selbst wenn die 60%-Grenze nicht überschritten wird, nicht lohnen.

Es gibt durchaus Fälle in denen begrenzte technische Mittel (z.B. **Maschinenpark**) eines Shops oder eine bisher nicht verfügbare **Technologie die Reparatur verhindern**.

Wie man aus dem Diagramm erkennt, kommen für eine Reparatur in erster Linie Bauteile mit Schädigungsmechanismen wie Verschleiß, Oxidation, Thermoermüdung und Erosion in Frage. Es handelt sich also eher um Langzeiteffekte. In dieser Zeit ist ein spontaner katastrophaler Schaden nicht zu erwarten. Sie gelten dann als beherrschbar (Schaufelspitzen,

"Retirement for Cause", dieser Wunschtraum des Betreibers wird wohl einer bleiben.

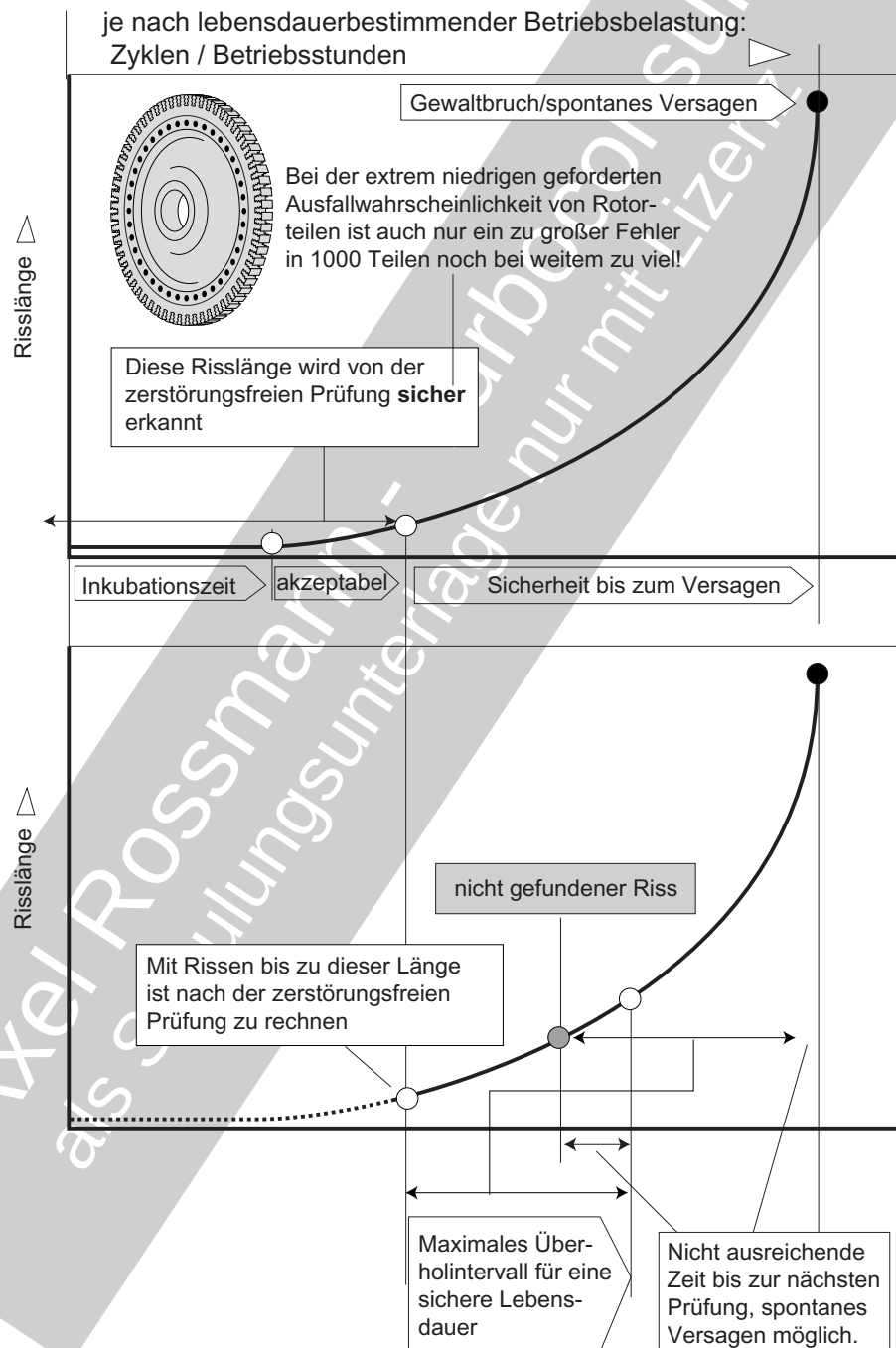


Bild 14-7

Labyrinthspitzen). Bei **Fremdkörpereinschlägen** handelt es sich um **begrenzte Größen** (Angaben im Überholhandbuch, Lit. 14-19). Sie dürfen erfahrungsgemäß für den jeweiligen Anwendungsfall mit ausreichender Sicherheit keine Rissbildung erwarten lassen.

Bild 14-7 (Lit. 14-4, Lit 14-5 und Lit. 14-6): Das „**Retirement for Cause-Prinzip**“ wurde bereits in den frühen 80er-Jahren diskutiert. Es ist eine Folge der **LCF-Lebensdauerbegrenzung** (Band 1, Kapitel 5.4.1.1) von Rotorteilen wie Scheiben und Ringen moder-

ner Triebwerkstypen („**Damage Tolerant Design**“, Band 1 Bild 4.1-1, Lit. 14-18). Die hohen Sicherheitsanforderungen berücksichtigen auch statistische Ausfallwahrscheinlichkeiten. Weil diese extrem klein sein müssen (10^{-9} für Scheibenbrüche pro Flugstunde), ist eine Weiterverwendung über die mit Rechnungen und Versuchen abgesicherte Lebensdauer (z.B. in einem Samplingprogramm) untersagt. Für den Betrieb wird in erster Linie die sog. **Inkubationszeit** genutzt. In dieser erfolgt kein merkliches Risswachstum. Selbst wenn in Einzelfällen ein solches auftreten sollte ist gewährleistet, dass es weit von einer Gefährdung des Bauteils entfernt bleibt (Diagramm oben).

Nur in einem verschwindend geringen Prozentsatz dieser teuren Teile ist daher eine, die Lebensdauer merklich beeinflussende Schädigung in Form einer gefährlich wachstumsfähigen Rissbildung zu erwarten. Diese Wahrscheinlichkeit dürfte deutlich unter 10^{-3} liegen. Da lag der Versuch nahe, **das hohe Lebensdauer- und Kosteneinsparungspotenzial lebensdauerbegrenzter Bauteile zu nutzen**.

Voraussetzung war jedoch das **ausreichend sichere Auffinden von Schädigungen** (Lit. 14-19) welche im Überholintervall eine ausreichende Sicherheit gegen spontanes Versagen (Bruch) garantiert (Diagramm unten).

Bei Untersuchungen stellte sich heraus, dass für den zivilen Einsatz mit seinen typischerweise langen Laufzeiten ausreichend sichere **seriengerechte zerstörungsfreie Prüfverfahren bis heute nicht angeboten** werden. Für militärische Triebwerke wurde inzwischen die Anwendung in wenigen, eher versuchsweisen, Anwendungen bekannt .

Werkstoffe gelaufener Bauteile können sich gegenüber dem Neuteilzustand merklich verändert haben. Deshalb sind Fertigungsverfahren der Neuteile bei der Reparatur nur bedingt anwendbar.

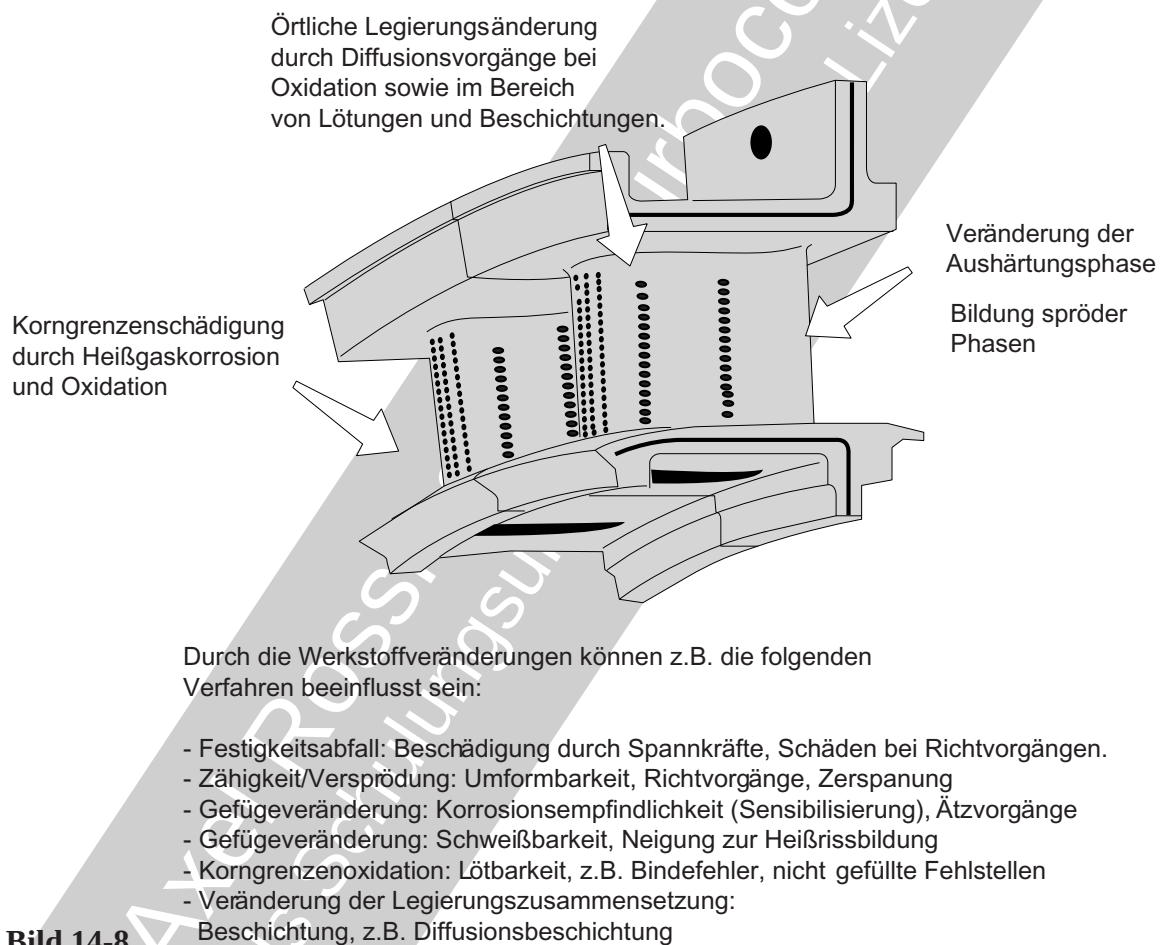


Bild 14-8

Bild 14-8: Eine besondere Problematik der Reparatur ist die Veränderung bzw. **Schädigung der Bauteile unter Betriebseinflüssen** (Lit. 14-19). Diese Veränderungen können Verfahren wie **Schweißen, Löten, Ätzen oder Be- und Entschichten**, die an Neuteilen keine ernsthaften Probleme machen, bis zur **Nichtanwendbarkeit** verschlechtern.

Erhöhung der **Empfindlichkeit gegen äußere Kräfte**: Problematisch ist ein Festigkeitsabfall, besonders in Kombination mit einer gefü-

bedingten Versprödung. Es handelt sich um **Korngrenzenschädigungen** oder **Legierungsverarmung** durch Diffusionsvorgänge, die vom Oberflächenbereich auch tiefer in das Grundmaterial gehen können. Das begünstigt bei der Reparatur Schäden wie **Rissbildung beim Spannen, unter Zerspanungskräften oder Richten**.

Ätzverfahren (Lit. 14-19) können deutlich schädigender wirken als bei Neuteilen (Kapitel 12.2.1.7). Dies mag an **chemisch** deutlich

stabileren Oxiden als das Grundmaterial liegen. Die Folge können **Korngrenzenanfraßungen** oder örtlich sehr unterschiedlicher Abtrag sein.

Haben Betriebstemperaturen das Gefüge sensibilisiert (Band 1 Bild 5.3-3 und Bild 5.6.1.1-4) unterstützt dies ebenfalls **interkristalline Korrosion** (IK, Band 1 Bild 5.6.-2 und Bild 5.6.1.1-5).

Abziehen (Strippen, Lit. 14-19) im Betrieb veränderter Beschichtungen (Oxidation, Gefügeveränderung wie Karbidbildung, Legierungsverarmung) kann sich **deutlich schwieriger als im Neuzustand** gestalten. Schichten wie MCrAlY oder Einlauf- und Anstreifschichten, insbesondere im hinteren Verdichter und auf Heißeilen, können derart chemisch stabil sein, dass eine erhöhte Gefahr der **Grundwerkstoffschädigung** besteht.

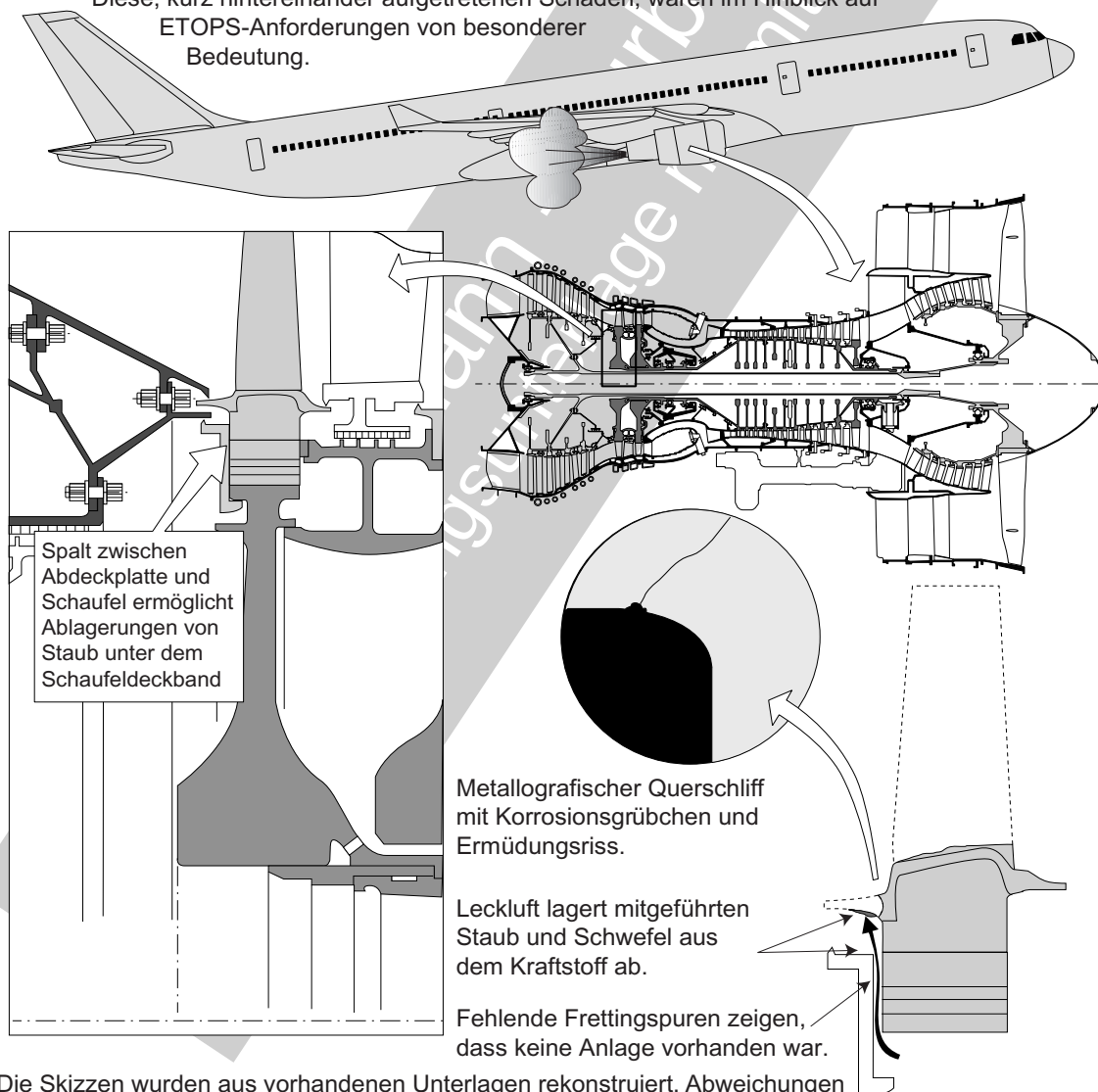
Lötrepaturen an Heißeilen werden von **Oxiden auf den Lötflächen**, ganz besonders in zu schließenden Rissen behindert. Um diese zu entfernen, sind Behandlungen in aggressiven Medien (Bäder, heiße Gasatmosphäre) erforderlich.

Schweißrepaturen an den meist wegen der Neigung zur **Heißrissbildung** (= Warmrissbildung Bild 12.2.1.3.1-10 und Band 1 Bild 4.4-15) problematisch schweißbaren Ni-Legierungen sind eine besondere Herausforderung (Bild 12.2.1.3.1-11 und Bild 12.2.1.3.1-13). Betriebsbedingte Gefügeveränderungen (z.B. Vergrößerung der Aushärtungsphase = 'Gammastrich' - Phase) können die Heißrissbildung fördern. Nicht ausreichend entfernte **Oberflächenverunreinigungen** (z.B. Sulfidation, Band 1 Bild 5.6.1.4.1-3 und Bild 5.6.1.4.1-4) im Schweißbereich beeinträchtigen Festigkeit und Zähigkeit der Schweißung.

Kleine, bei einer Überholung in Ihrer Auswirkung nicht erkannte Abweichungen können gefährliche Schäden auslösen.

Ca. drei Stunden nach dem Abflug trat während eines Zwischensteigflugs ein lauter Knall auf und das rechte Triebwerk fiel aus. Das Triebwerk wurde über den elektronischen Regler abgeschaltet und die Löschanlage aktiviert. 90 Minuten später landete das Flugzeug auf einem Ausweichflugplatz. Der Triebwerksschaden war auf Brüche der Rotorschaukeln der 2. Hochdruckturbinenstufe zurückzuführen. Ein vergleichbarer Schadensfall trat ca. 10 Tage vorher am Paralleltriebwerk auf.

Diese, kurz hintereinander aufgetretenen Schäden, waren im Hinblick auf ETOPS-Anforderungen von besonderer Bedeutung.



Die Skizzen wurden aus vorhandenen Unterlagen rekonstruiert. Abweichungen vom tatsächlichen Schadensbild sind möglich.

Bild 14-9

Bild 14-9 (Lit. 14-8): Bereits ein Jahr vor dem **1. Vorfall** wurde bei der Überholung des Triebwerks **Korrosion unter der Fußplattform Turbinenrotorschaukeln** der 2. Hochdruckturbinenstufe (Rahmen unten links) festgestellt (Detail Mitte). Das führte damals zum Tausch des gesamten Schaufelsatzes gegen reparierte Schaufeln (engl. refurbished) aus zwei anderen Triebwerken. Diese Schaufeln erhielten eine **Schutzschicht** (Platin Aluminid = PtAl-Diffusionsschicht). Eigentlich sind solche Schichten eher ein Oxidationsschutz.

Das Triebwerk des hier behandelten **2. Vorfalls**, der nur 10 Tage nach dem 1. Vorfall auftrat, wurde ebenfalls ein Jahr vor dem Schaden überholt. Auch hier mussten wegen Korrosion unter der Fußplattform alle Schaufeln der betroffenen Stufe ausgetauscht werden. In diesem Fall wurden jedoch neue Schaufeln mit Schutzschicht eingebaut.

Nach den Vorfällen wurden beide Triebwerke beim OEM zerlegt. Es zeigte sich, dass in beiden Fällen Turbinenrotorschaukeln der 2. Hochdruckstufe **durch „Spannungskorrosion“ gebrochen** waren.

Als Ursache wurden **schwefel- und salzhaltige Staubablagerungen unter der Fußplattform** identifiziert. Sie führten zu **Anfressungen**, deren große Kerbwirkung die Risse auslöste.

Derartige Schäden sind schon seit ca. 5 Jahren aus verschiedenen unterschiedlichen Triebwerkstypen bekannt. Sie traten offenbar **betreiberabhängig** auf. Seither erhielten die Schaufeln eine **Schutzschicht**. Ein Jahr vor den hier behandelten Vorfällen ging man zu einem weniger korrosionsempfindlichen Schaufelwerkstoff über. Offenbar genügte die Beschichtung nicht, um das Problem befriedigend zu lösen. Sie wurde deshalb nochmals durch eine neue Variante ersetzt. Auch diese **bewährte sich im Falle von Ablagerungen anscheinend nicht**.

Besonders das Triebwerk des 2. Vorfalls hatte mit 1020 Start/Abstellzyklen unerwartet eine noch niedrigere Lebensdauer als das des 1. Vorfalls (1306 Zyklen). Die Korrosion der zuge-

hörigen neuen Turbinenschaufeln war deutlich stärker (ca. 0,3 mm tiefe Anfressungen) als an den etwas länger gelaufenen (bereits nachgearbeiteten) des 1. Vorfalls (ca. 0,15 mm tiefe Anfressungen).

In beiden Fällen **stieg die Korrosionsschädigung offenbar nach der Überholung trotz der Schutzbeschichtungen dramatisch an**. Die **unbeschichteten Schaufelsätze hielten dagegen mit 4000 Zyklen ohne Bruch länger(!)**.

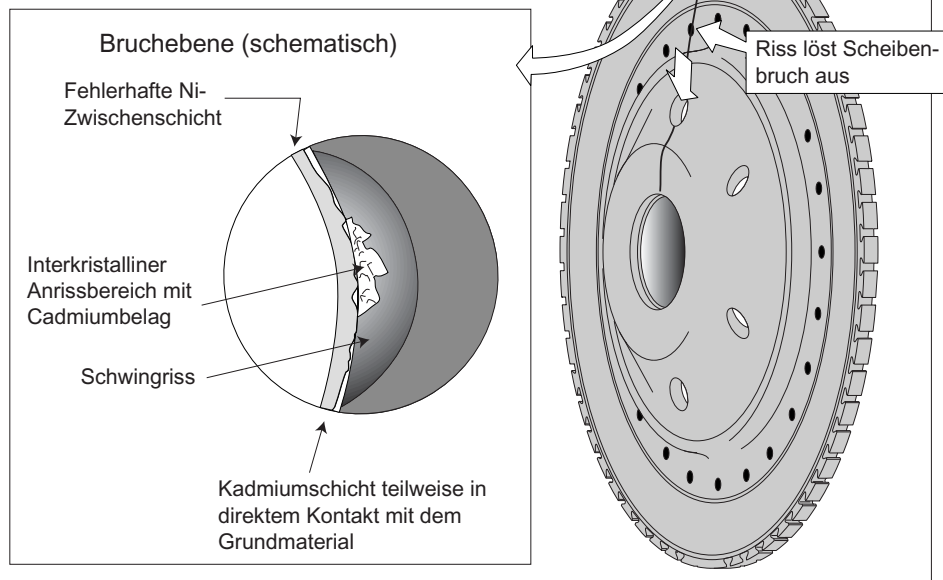
Das legte den Schluss nahe, dass in einer **verstärkten Ablagerung korrosiven Staubs** (Dolomit + Schwefel) **nach der Überholung der Hauptschadenseinfluss** zu suchen ist.

Als **Ursache** wurden **betriebsbedingte Spalte zwischen der hinteren Dichtplatte (side plate) und den Schaufelfüßen** erkannt (Skizze unten rechts). Diese wurden offenbar bei der Überholung trotz Nacharbeit nicht geschlossen (vergrößert?). Im Triebwerk des 2. Vorfalls waren sie besonders ausgeprägt.

Merksatz: Erst wenn der **Schadensmechanismus ausreichend verstanden** ist und die **ursächlichen Einflüsse identifiziert** wurden, kann von einer Reparatur eine befriedigende Abhilfe erwartet werden!

Die Anwendung von Reparaturverfahren mit großem Gefahrenpotenzial sollten nur von besonders sensibilisiertem Personal und unter verschärfter Kontrolle stattfinden. Weniger gefährliche Verfahren zu entwickeln sind eine Aufgabe des OEM.

Kadmiumversprödung beim Korrosionsschutz eines hochbelasteten Stahlteils mit einer Ni-Cd-Schicht



Spannungsrissskorrosion beim Brünieren von Zahnrädern

Brünierriss in einer Zahnradwelle

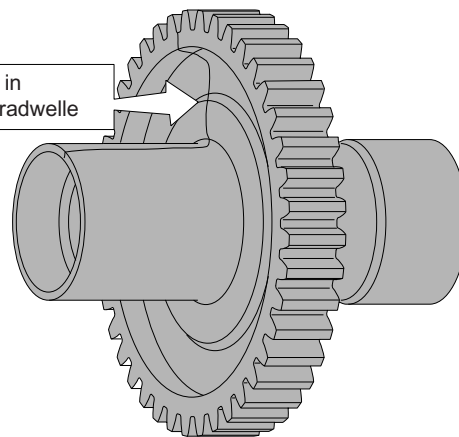


Bild 14-10

Bild 14-10 (Lit. 14-9): Manche **Reparaturverfahren älterer Triebwerkstypen** haben ein **besonderes Gefahrenpotenzial**. Aus diesem Grund werden die Verfahren heute nach Möglichkeit durch unbedenklichere ersetzt. Das kann aber auch wieder Probleme hervorrufen (z.B. veränderte Gleiteigenschaften).

Beschichtung mit Kadmium (Kadmieren): Neben der **Toxizität** treten im Zusammenhang mit Kadmium (Cd) zwei äußerst unangenehme Effekte besonders ausgeprägt auf:

- **Wasserstoffversprödung** (Bild 12.2.1.8.3-7 und Band 1 Kapitel 5.7.1 und Kapitel 5.7.2): Beim galvanischen Beschichtungsprozess des

Kadmierens besteht erfahrungsgemäß eine besonders hohe Versprödungsgefahr.

- **LME, SMIE** (Band 1 Bild 5.8.1-2, Bild 5.8.1-3 und Bild 5.8.1-4): Die Skizzen im Rahmen oben zeigen eine Verdichterscheibe (Bild 12.2.1.8.3-8) mit einer Ni-Cd-Beschichtung. Die **Nickel-Zwischenschicht** muss den **metallischen Kontakt des Kadmiums mit der Stahlscheibe verhindern**. Dies gelang im dargestellten Fall nicht. Es kam zur Rissbildung und zum Scheibenbruch.

Spannungsrissskorrosion beim Brünieren (Band 1 Bild 5.4.2.2-4): **Zahnräder** erhalten ihre 'typisch' **braune Farbe** mit einer Behandlung in heißer Lauge. Weisen die Zahnräder ausreichend hohe Zugspannungen an der Oberfläche auf, kann das Rissbildung auslösen (Skizze unten; Bild 12.2.1.8.3-11 und Band 1 Bild 5.6.3.1.2-3). Wegen dieser Gefahr wurde das Verfahren in den letzten Jahren zumindest von einigen OEMs **verboten**.

Bild 14-11: Es fällt auf, dass häufig Recherchen nachträglich bei vielen schweren Unfällen auf ähnliche Fälle stoßen, die als **Parallelfälle** zu werten sind. Sie hatten lediglich nur nicht vergleichbar gravierende Folgen.

Hier besteht auch ein Zusammenhang mit dem Problem des „**Einzelfalls**“ (Band 1 Seite 2.3-3).

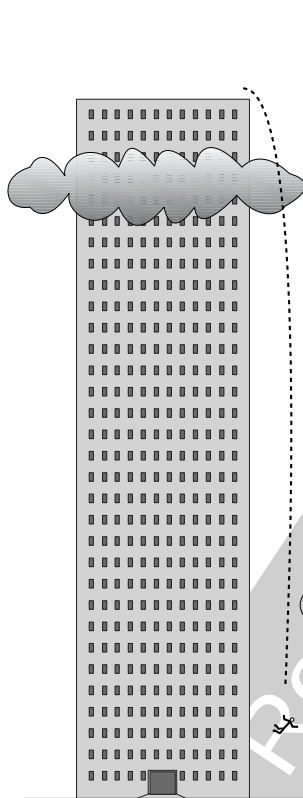
Nicht selten werden kleine Unterschiede der Fälle zum Anlass genommen, jeden als ein Einzelereignis einzustufen. Dabei wird ein Zusammenhang zu anderen Fällen mit durchaus ähnlichem Schadensbild nicht erkannt oder bestritten. Die **Einstufung als Einzelfall** hat einen zusätzlichen, jedoch äußerst riskanten Vorteil. Man glaubt man kann, weil eine Wiederholung ausgeschlossen wird, Maßnahmen und Meldungen vermeiden.

Bei **Vorkommnissen mit ähnlichen Schadensbildern** sollte deshalb **hartnäckig nach dem Zusammenhang gesucht** werden. Er ist der Schlüssel und die Chance den **wahren Schadensmechanismus und die ursächlichen Einflüsse zu erkennen**. Das bildet die Voraussetzung für gezielte, erfolgversprechende Abhilfen und Maßnahmen. Das gilt nicht zuletzt für eine Reparatur.

Unsere besondere Aufmerksamkeit sollte Effekten gelten, die beim Vergleich der Fälle auffallen. Beispielsweise ein **scheinbarer Widerspruch** wie größere Schäden an Bauteilen mit weniger Betriebsstunden. Auch **Übereinstimmungen** wie eine Konzentration der Schäden auf bestimmte Betreiber gibt Hinweise (Lit. 14-19).

Merksatz: Parallelfälle sind eine große Chance die wahren Ursachen von Schäden zu erkennen. Sie bilden damit eine Voraussetzung für erfolgreiche Reparaturen. Wichtig sind **Unterschiede, die das Schadensbild** im Vergleich der Fälle unerwartet beeinflussen.

"Ein Unglück kommt selten allein", das gilt besonders auch für Triebwerksprobleme. Oft kündigt sich ein Incident oder Accident durch mehrere vorangegangene weniger spektakuläre Parallelfälle an.



Die Erfahrung lehrt, mehrere Parallelfälle die noch einmal gut gegangen sind, sind noch kein hinreichender Beweis, dass es immer gut geht. Es scheint eher als ob das Risiko steigt.

Hierzu einige Zitate:

Zitat 1: "There had been twelve reported cases of (combustion-) casing explosive rupture prior to the...accident seen in context of 300 million flying hours on the ...engine, the three ...(casing) ruptures due to (combustion-) can failure prior to ...(the catastrophical accident) could almost be regarded as random failures. However the number of...(casing-) penetrations without rupture and bulges or overheating of the casing indicated that a significant problem existed."

Zitat 2: "Four previous nozzle lock failures...had been reported before this serious incident occurred."

Zitat 3: Following a series of control shaft spline failures in the late 1970s...The ... (OEM) database contained 39 incidents since 1980... in which control shaft malfunctions were involved or suspected."

Zitat 4: "The operator had previously experienced four engine failures...All involved failure of the number-1 bearing. The manufacturer (OEM) has since reported that seventeen engine failures attributed to electrical discharge damage of the number-1 bearing.

Bild 14-11

Die Lebensdauer von Bauteilen.

Die **Lebensdauer** der Bauteile steht in einem **engen Zusammenhang mit ihrer Reparatur**. Ein **Überholintervall** mit der Möglichkeit einer Reparatur richtet sich nach der sicheren Lebensdauer des Bauteils. Eine Reparatur ist nur möglich, wenn die **Schädigung** innerhalb des Überholintervalls für ein geeignetes zugelassenes Reparaturverfahren **nicht zu weit fortgeschritten** bzw. zu groß ist.

In modernen Triebwerken weisen viele Bauteile, besonders von Rotoren, eine **festgelegte Lebensdauer** auf. Ist diese erreicht, muss das Teil ersetzt werden. Eine Reparatur ist nicht mehr möglich,

- wenn eine **Werkstoffschädigung** stattfand, die nicht mehr ausreichend sicher **regeneriert** werden kann. Typisches Beispiel sind zeitstandgeschädigte (Kriechen) Bauteile (Band 1 Kapitel 5.3.2),
- wenn Schädigungen zu erwarten sind (z.B. **Mikrorisse**), die mit den seriengeeigneten Rissprüfverfahren **nicht sicher genug auffindbar** sind. Hier handelt es sich gewöhnlich um **zyklisch ermüdete Bauteile** (LCF, Band 1 Kapitel 5.4.1) Start-Abstell-Zyklen.

Im Fall lebensdauerbegrenzter Bauteile ist die Sicherheit entscheidend von der Verfolgung der relevanten Betriebsparameter abhängig (Monitoring, Band 1 Kapitel 3.3). Bei Start-Abstell-Zyklen spricht man von „**Maxi Cycles**“. In besonderen Fällen, bei deutlichen und häufigen Drehzahländerungen, wie sie für Triebwerke in Kampfflugzeugen und Hubschraubern auf Grund der Leistungsänderungen typisch sind, müssen auch diese sog. „**Mini Cycles**“ berücksichtigt werden. Diese werden heute direkt registriert und von einem Computer in äquivalente „Maxi Cycles“ umgerechnet (Bild 14-13).

Die Verfolgung der Bauteillebensdauer erfordert eine lückenlose Logistik.

Bei thermisch belasteten Bauteilen, besonders Heißeilen wie Turbinenleitschaufeln, bei denen Kriechen vorherrscht, wird die Betriebslebensdauer in Stunden verfolgt. Das kann auch für Bauteile sinnvoll sein deren Lebensdauer von Verschleiß oder Oxidation abhängt. Beispiele sind Turbinenschaufeln deren Oxidationsschutzschicht abgezehrt wird. Auch erosionsbeaufschlagte Bauteile wie Dichtsegmente in Turbinen, deren keramische Anlaufschicht betroffen ist (Lit. 14-20), zählen dazu.

Trendanalysen (Bild 14-12) mit zeitlichen Veränderungen wichtiger Parameter können Hinweise auf Probleme und eine erforderliche Überholung bzw. Reparatur ermöglichen.

Die Lebensdauer eines Bauteils hängt natürlich entscheidend von betreiberspezifischen Betriebsbedingungen ab (Lit. 14-18). Langstreckeneinsatz unterscheidet sich von Kurzstreckenverkehr. Häufige **Starts an hochgelegenen und heißen Flugplätzen** belasten die Bauteile besonders. Das kann die vom OEM festgelegte Bauteillebensdauer merklich reduzieren.

Unabhängig von einer vorgegebenen Lebensdauer sind außergewöhnliche Schädigungen. Beispielsweise Überhitzungen oder ungewöhnliche Heißgaskorrosion nach dem Ansaugen von Vulkanasche (Lit. 14-21). Das Lebensdauerende wird in solchen Fälle wohl in erster Linie vom Befund (Boroskopieren, Lit. 14-19) bei der Wartung abhängen (on condition, Bild 14-2).

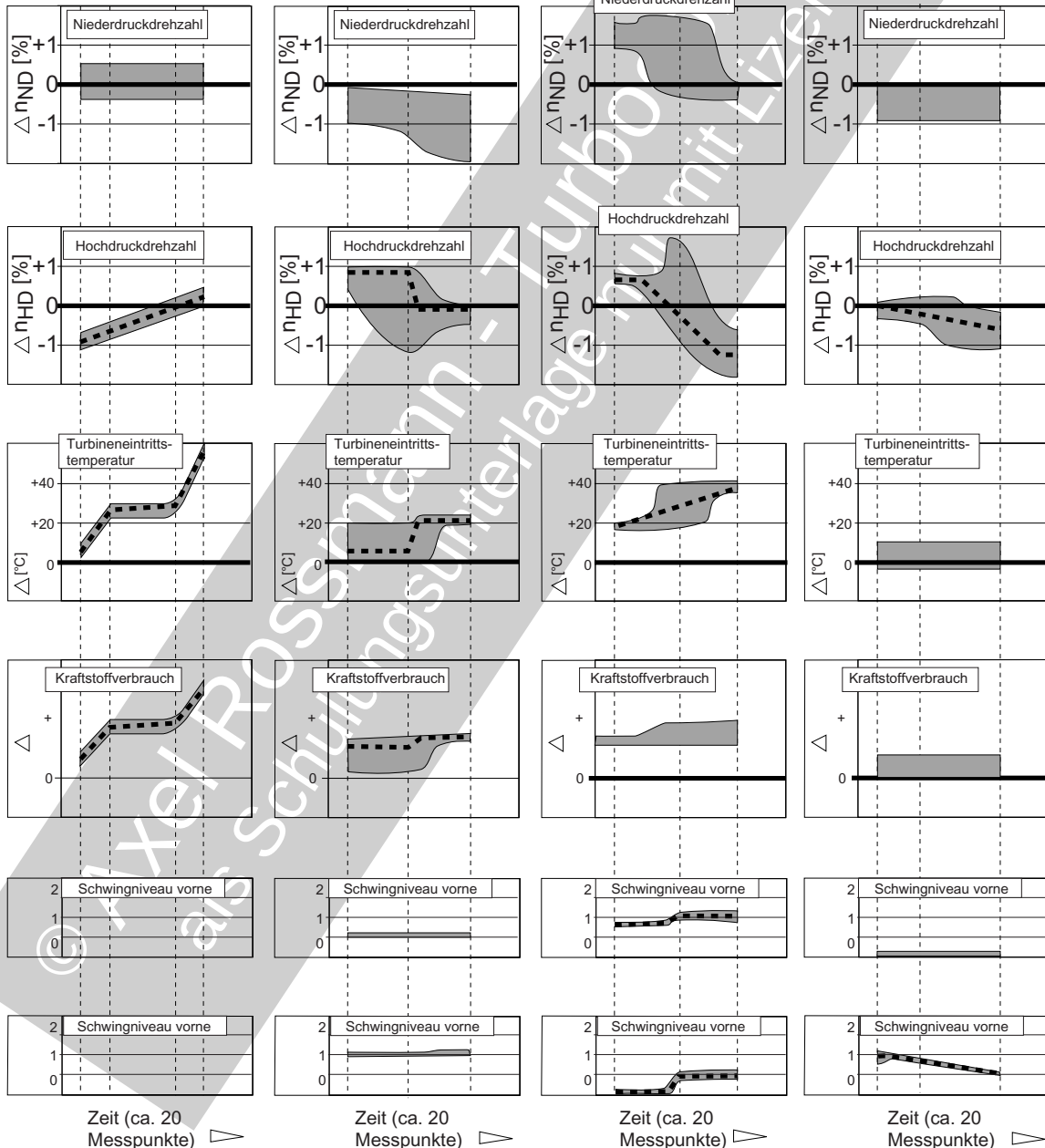
Trendanalysen wichtiger Betriebsdaten weisen auf bestimmte Probleme hin.

Leck im Hochdruckverdichter

Brennkammer-schaden

Schaden am HDT-Leitapparat

Schaden am Verdichterlager



--- Trend
■ Streubereich

Bild 14-12

Bild 14-12 (Lit 14-9, Lit. 14-10 und Lit 14-11): Wenn sich bestimmte **Parameter der Maschine während der Betriebszeit ohne bewusstes äußeres Zutun verändern**, lässt dies auf eine Schädigung schließen. Dabei besteht die Chance, mögliche Schadensbereiche und Schadensarten einzugrenzen und zu identifizieren. Dieses Bild enthält typische Beispiele aus einem Zweiwellen-Triebwerkstyp (JT-8D).

In der Darstellung sind die typischen Betriebsparameter vertikal aufgetragen, die Betriebszeit auf der Abszisse.

Lecks im Hochdruckverdichter entstehen unter anderem bei Schäden an Luftentnahmeleitungen und Abblasventilen (Lit. 14-21). Die Folge ist eine Abnahme des Verdichterenddrucks. Zur Aufrechterhaltung der Leistung muss die Turbineneintrittstemperatur und damit die Turbinenleistung angehoben werden. Damit steigt auch die Drehzahl des Verdichters.

Der Effekt entspricht einer Verschlechterung des Verdichtereffizienzgrads. Alle die beschriebenen Einflüsse führen zu einer merklichen Änderung der überwachten Parameter.

Brennkammerschaden (Ausbrüche der Brennkammerwandungen Lit. 14-18, Schäden an den Einspritzdüsen): Diese Schäden sind sehr schwer aus den Überwachungsparametern zu identifizieren. Oft sind es erst Folgeschäden in der Turbine die das ermöglichen. Also sind die typischen Parameteränderungen bei Turbinenschäden zu erwarten: Abfall der Drehzahlen und Anstieg der Turbineneintrittstemperatur.

Schaden am HDT-Leitapparat: (Lit. 14-18). Ist ein größerer Teil der Beschaufelung betroffen, fällt die HDT-Drehzahl signifikant ab. Turbineneintrittstemperatur und Kraftstoffverbrauch steigen ähnlich wie bei BK-Schäden an. Bemerkenswert sind deutlich verstärkte Schwingungen, was in der vorliegenden Literatur nicht erklärt wird. Denkbar ist eine Schwingungsanregung als Folge einer ungleichmäßigen Strömung vor der Turbine.

Schaden am Lager des HDV: Die Hochdruckdrehzahl geht erwartungsgemäß zurück, gänzlich unerwartet ist jedoch ein deutlicher Abfall des Schwingniveaus im hinteren Triebwerksbereich. Dies zeigt eindrucksvoll die notwendige Expertise zur richtigen Bewertung der Überwachungsparameter.

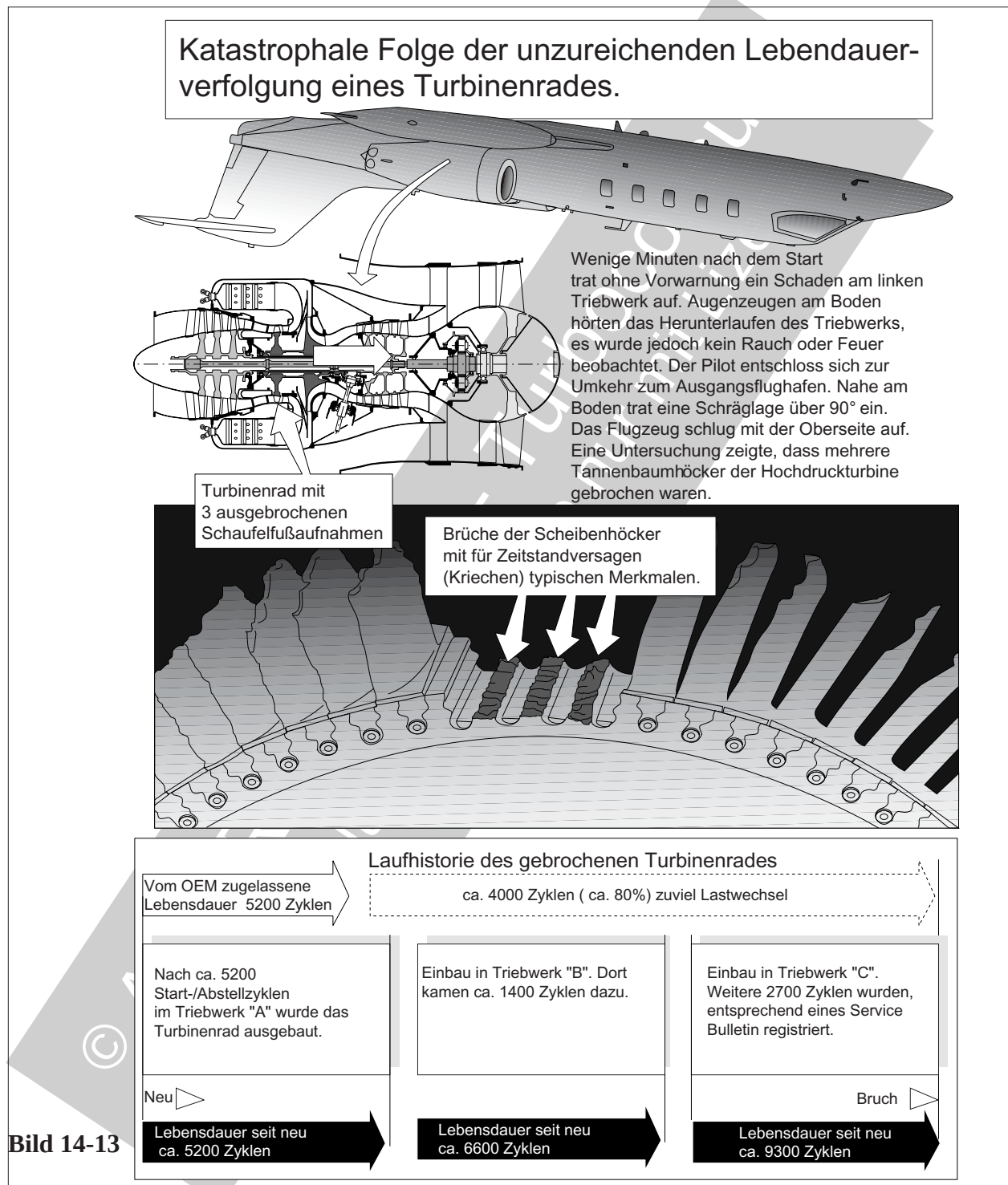


Bild 14-13

Bild 14-13 (Lit 14-12): Die Untersuchung des primären Schadenstriebwerks erfolgte beim OEM unter Teilnahme von Flugsicherheitsbehörden. Es zeigte sich, dass drei benachbarte **Scheibenhöcker des Hochdruck-Turbinenrads** ausgebrochen waren und die vier zugehörigen Schaufeln fehlten (mittlere Skizze). Die

Turbinenscheibe wurde einer Laboruntersuchung unterzogen.

Die Untersuchung der Bruchflächen und des Werkstoffgefüges ließ auf eine **Überschreitung der Lebensdauer** schließen. Dafür war die **Kombination** der für dieses Teil typischen Betriebsbeanspruchungen verantwortlich:

Zyklische Beanspruchung (LCF), Kriechen und Heißgaskorrosion. Weitere, noch nicht gebrochene Scheibenhöcker, wiesen bereits Schädigungsmerkmale (Mikrorissbildung) auf.

Historie: Bei einer 150-Stunden Inspektion wurden **Späne im Ölfilter** gefunden. Der OEM erhielt eine Ölprobe. Er diagnostizierte daraus einen Lagerschaden im Anbaugeschtriebe. Nach 18 weiteren Flugstunden, 1 Tag vor dem Flugunfall, wurde das Triebwerk instand gesetzt.

Wartungseinfluss auf das Schadenstriebwerk (Rahmen unten): Es zeigte sich, dass die mit einem Service Bulletin des OEM auf 5200 Start-Abstell-Zyklen begrenzte Lebensdauer für die HD-Turbinenscheibe überschritten war. **Vorher** war die Scheibe **in zwei anderen Triebwerken** („A“ und „B“) eingebaut. Bei „B“ wurden **abweichend von einer OEM-Anweisung** ca. 4000 Zyklen nicht registriert. Damit hatte die Scheibe beim Einbau bereits ca. 6600 Zyklen. Mit weiteren ca. 2700 Zyklen im Unfalltriebwerk addierte sich die Zyklenzahl auf ca. 9300. So war die **zulässige Zyklen-Lebensdauer deutlich überschritten**.

Kommentar: Man fragt sich, ob es zwischen dem Lagerschaden im Anbaugeschtriebe und dem Turbinenradschaden einen Zusammenhang gibt. Denkbar ist, dass eine **Unwucht des Turbinenrads die Schadensentstehung ankündigte**. Kann sie von der Hochdruckwelle über die Radialwelle in das Getriebe übertragen worden sein und das Lager geschädigt haben? Obwohl es für den Lagerschaden offenbar keine plausible Erklärung gab, wurde dieses Symptom kuriert. Wahrscheinlich war es jedoch nicht die eigentliche Ursache, die möglicherweise zum späteren Versagen des Turbinenrads führte.

Gegen diese Überlegung sollte die Erfahrung des OEM mit Lagerschäden im Getriebe und deren Bewertung sprechen.

Bild 14-14 (Lit 14-13 und Lit. 14-14): Das Triebwerk wies zum Zeitpunkt des Unfalls ca. 8000 Betriebsstunden mit ca. 6800 Start-Abstell-Zyklen auf.

Die Untersuchung des Schadenstriebwerks (mittlere Skizze) ergab:

Der **Tannenbaumfuß einer Schaufel** des Turbinenrads der 2. Stufe des Gaserzeugers war **gebrochen** (Skizze unten links). Der Bruch verläuft im sehr kurzen Schaufelschaft, dicht unter der Plattform (Detail unten rechts). Der Anriss ist ein **Ermüdungsris** (**LCF**), der von einer Kante des Fußhalsquerschnitts auf der **Austrittsseite** ausging (Detail unten rechts).

Historie: Ca. **7 Jahre vorher** (Lit. 14-14) wird von einem ähnlichen Fall berichtet. Hier handelte es sich auch um einen **Ermüdungsbruch** (offenbar **LCF**) der ebenfalls über dem Tannenbaumfuß liegt. Auch er ging von der **Radrückseite** aus. Weitere 27 Schaufeln zeigten an gleicher Stelle Anrisse. Die Risse standen in keinem Zusammenhang mit Fehlstellen. Deshalb wurde schon damals auf ein **Überschreiten der zyklischen (LCF) Lebensdauer** geschlossen.

Zählmethode für Zyklen: Bei diesem Triebwerkstyp wird wie folgt vorgegangen: Im Neuzustand und nach einer Überholung wird in einem Zertifikat die **nutzbare Lebensdauer in Zyklen und Betriebsstunden** für jede Komponente angegeben. Ist einer dieser Werte erreicht, muß das Triebwerk überholt werden.

Unterschieden wird in **Vollzyklen** (Start-Abstell-Zyklen) und **Teilzyklen** (bei jedem Unterschreiten der 85 % Wellendrehzahl) während des Betriebs.

Damit werden **Betriebsbesonderheiten berücksichtigt**. Aus diesen Daten werden die **lebensdauerrelevanten Zyklen** berechnet. Zwei **Methoden** kommen zur Anwendung, wobei eine einen höheren Lebensdauerverbrauch ergibt. Der Gaserzeuger besteht aus fünf lebensdauerbeschränkten Komponenten, alles Rotor-

scheiben aus Verdichter und Turbine. Die Schaufeln der 2. HD-Rotorstufe sind nicht lebensdauerbegrenzt. Versuche lassen jedoch auf eine sichere Lebensdauer in der Größe von zwei zugelassenen Scheibenleben schließen.

Im früheren Schadensfall war das Triebwerk als Überholtriebwerk eingebaut worden. Vorher wurden ca. 4 600 Zyklen akkumuliert. Auch die Schaufeln wurden weiterverwendet. Seitdem hatte das Triebwerk **ca. 2 300 Startzyklen** bei nahezu identischer Stundenzahl. Dies entspricht mit Teilzyklen ca. **4 400 - 5 500 Vollzyklen** (je nach Berechnungsmethode).

Der Lebensdauerverbrauch der Schaufeln des Gaserzeugermoduls beim vorherigen Betreiber wurde ebenfalls nachgerechnet. Er lag zwischen 9 000 und 11 000 Zyklen. Dies stimmte mit der Lebensdauerabschätzung einer Materialuntersuchung überein. Die **Auslegungslbensdauer** liegt offenbar bei 12 000 Stunden. Dass demnach die Schaufellebensdauer nahezu erreicht war wurde nicht erkannt, weil die **Betriebsdaten nicht genau genug** waren. So wurde auch die Chance vertan, das geschädigte Turbinenrad zu identifizieren.

Kommentar: Leider ist der Literatur zum jüngeren Schaden nicht zu entnehmen inwieweit es **weiterhin Probleme mit der Lebensdauererfassung** gab. Wenn es jedoch nach vielen Jahren zum Parallellfall kommt, ist anzunehmen, dass die Probleme immer noch nicht sicher genug gelöst wurden. Möglicherweise ist auch die lebensdauerbestimmende Betriebslast nicht ausreichend identifiziert.

Die verbrauchte Lebensdauer sieht man häufig einem Bauteil nicht an, deshalb sind die Betriebsprotokolle genau zu beachten.



In etwa 30 Metern Flughöhe über Grund hörte der Pilot des Hubschraubers beim Steigflug einen "Bang" und verspürte ein leichtes Abkippen. Nahezu im gleichen Augenblick erhielt der Pilot ein Warnsignal für eine niedrige Triebwerksdrehzahl, der Hubschrauber stürzte ab und wurde zerstört.

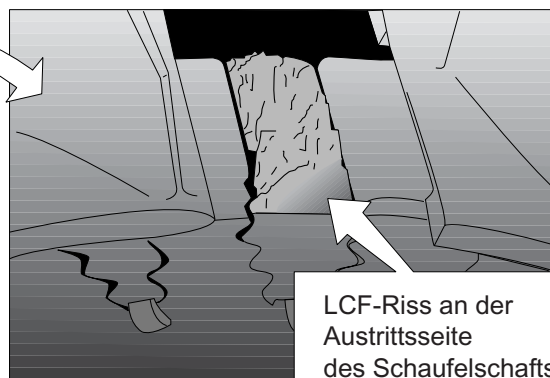
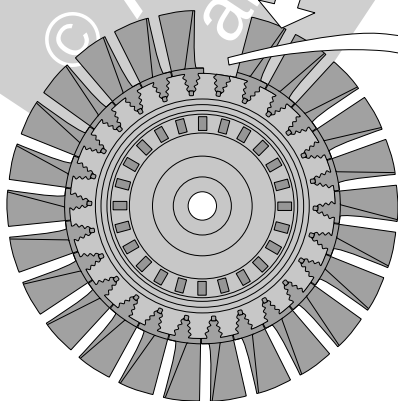
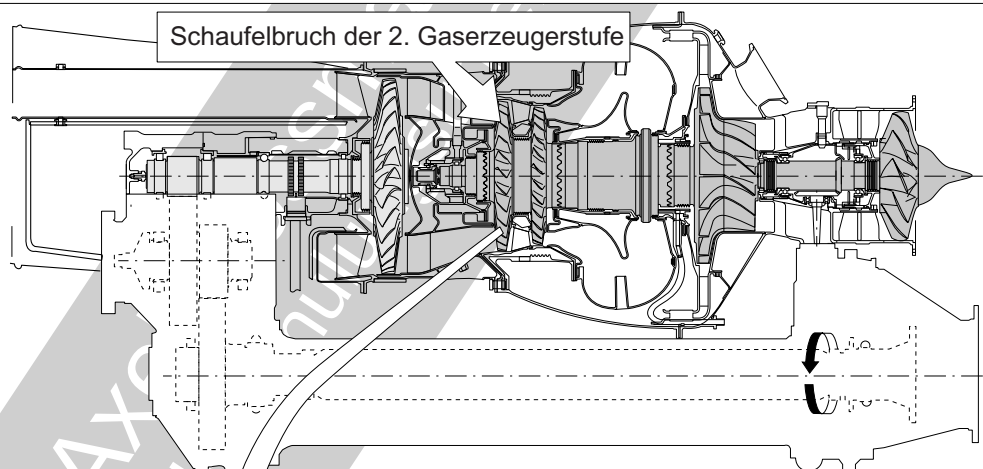


Bild 14-14

Eine ungeeignete, scheinbar harmlose Wartungsprozedur löst einen gefährlichen Triebwerksschaden aus.

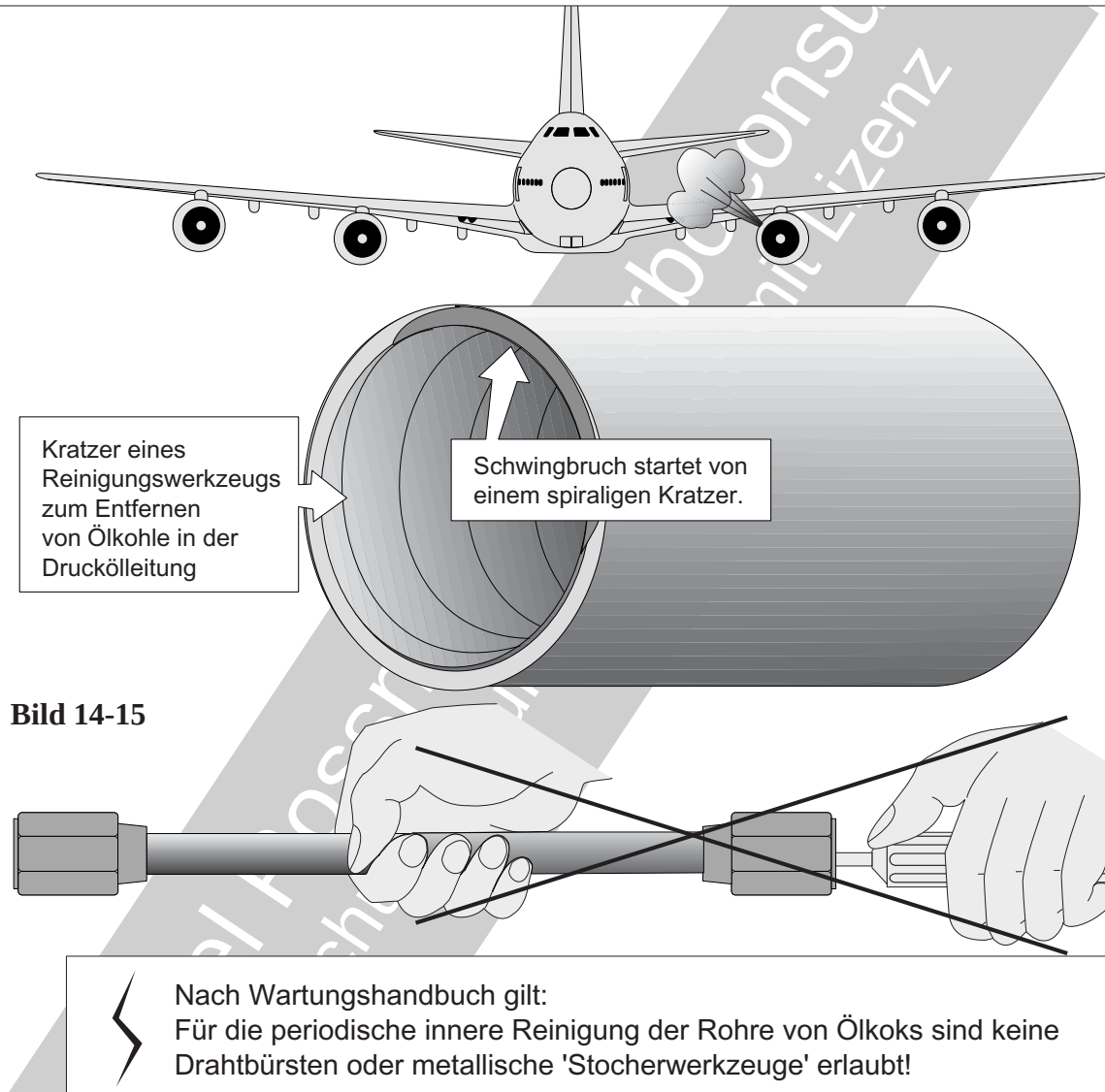


Bild 14-15 (Lit 14-17): Beim Steigflug nach dem Start kam es zu einem **Triebwerksschaden mit Bruchstückaustritt**. Die folgende Untersuchung ergab, dass ein **Ölfeuer** im Bereich eines Hauptlagers der Turbine auftrat. Die Scheibe der letzten Stufe der Niederdruckturbine war wegen Überhitzung plastisch um ca. 25 mm aufgegangen. Die gesamte Stufe schaufelte aus.

Zu dem Druckölaustritt kam es infolge eines ca. 90° umlaufenden **Schwingbruchs** in einer

Ölleitung. Dieser ging von **spiraligen Riefen auf der Rohrinne** aus. Diese Rohre müssen wegen Ölkoksbildung in regelmäßigen Abständen gereinigt werden. Dabei dürfen **keine Werkzeuge wie Drahtbürsten, Bohrer oder Stahlnadeln verwendet werden**. Sie könnten die Rohrinne verletzen.

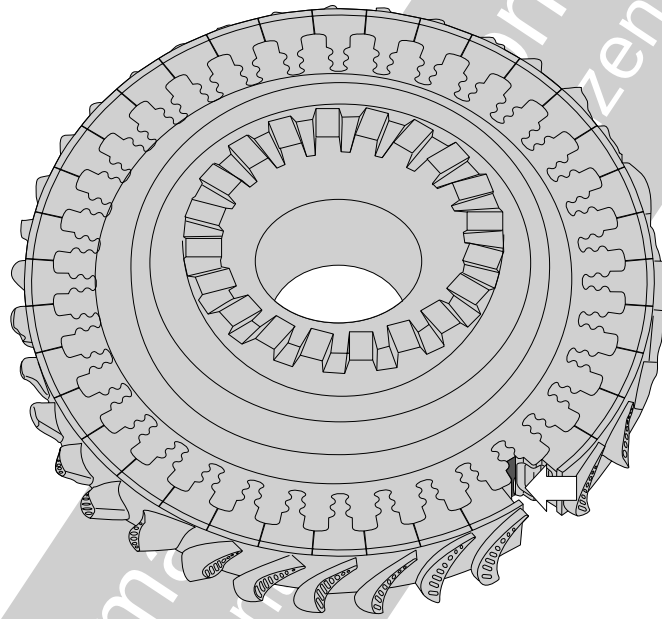
Literatur zu Kapitel 14

- 14.1-1** Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan, Circular No. 3-001, „Maintenance and Alternation of Aircraft“, Issue October 1, 2005, Seite 1-30.
- 14-2** R.Wall „Woes Encumber Helo Ops“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, April 14, 2003, Seite 75.
- 14-3** J.F.Rudy, Konferenzbeitrag zur „Asian Aircraft Engineering and Maintenance Conference“, Singapore, 13-14 January 1986, Conference Proceedings Seite 120-138.
- 14-4** J.S.Faragher, R.A. Antoniou, Bericht Nr. DSTO-TR-0915, „Preliminary Finite Element Analysis of a Compressor Disk in the TF30 Engine“, Department of Defence, Defence Science & Technology Organisation (DSTO), Australia, AR-011-166, January 2000, Seite 1-22.
- 14-5** „New engine maintenance strategy, Throw it Out Just Before it Breaks“, Zeitschrift „Machine Design“, March 10, 1983, Seite 25-30.
- 14-6** J.A.Harris, Jr., C.G.Annis Jr., M.C. Van Wanderham, D.L.Sims, „Engine Component Retirement for Cause“, Seite 1-9.
- 14-7** D.Esler, „Is On-Condition Maintenance Right for Your Operation?“, Zeitschrift „Business & Commercial Aviation“, April 1999, Seite 88-92.
- 14-8** TSB of Canada, Aviation Investigation Report Number A01F0020, „Power Loss - No. 2 Engine, Skyservice Airlines Inc. Airbus A330-300 C-FBUS, Colombo, Sri Lanka, 15 February 2001“, Seite 1-6.
- 14-9** R.Burkel, J.Murphy, „Infrared Imaging Systems Automate Aircraft Engine Inspection at General Electric“, IE, April 1989, Seite 28-32.
- 14-10** I.E.Traeger, „Aircraft Gas Turbine Engine Technology“, Second Edition, Glencoe Verlag, 1994, ISBN 0-07-065158-2, Seite 342-351.
- 14-11** P.Smith, „Gas path analysis“, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Volume 68, Number 2 (1996), Seite 3-9.
- 14-12** Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung (BFU). Untersuchungsbericht CX002-0/01, Mai 2003, „Unfall, 08.Februar 2001, Learjet LR35A“, Seite 1.-27.
- 14-13** Australian Transport Safety Bureau (ATSB), Air Safety Occurrence Report 200103038, Technical analysis Report „Examination of Components from a Failed Turbomeca Arriel 1S1 Turboshaft Engine“, Seite 1- 4.

- 14-14** A.Negrette, "Counting Cycles: Guessing Isn't Good Enough", Zeitschrift „Rotor & Wing“, May 1994, Seite 52.
- 14-15** J.Hall, „Safety Recommendation, In reply refer to: A-00-61 and -62“, National Transportation Safety Board, June 28, 2000, Seite 1-3.
- 14-16** D.Esler, „Is On-Condition Maintenance Right for Your Operation“, Zeitschrift „Business & Commercial Aviation“, April 1999, Seite 88 - 92.
- 14-17** NTSB Identification: LAX96IA087 „Northwest Airlines, INC. incident occurred Jan. 05-96, Aircraft Boeing 747-251B“.
- 14-18** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Bild 11.1-14, Bild 11.2.2.2-1, Bild 11.2.3.2-7, Bild 11.2.3.2-8, Bild 12.5-7, Bild 12.5-15, Kapitel 12.6.2, Bild 13-14.
- 14-19** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5, 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Bild 19.1.2-5, Bild 21-9, Kapitel 21.2.3, Kapitel 21.2.4, Bild 21.2.6-2, Bild 21.2.6-4, Bild 21.3.3-2, Kapitel 24, Bild 25.2.2.2-2, Kapitel 25, Bild 25.2.1.1-7.
- 14-20** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2, 2000, ISBN 3-00-008429-0, Bild 7.0-3, Bild 7.1.3-11.
- 14-21** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 1, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Bild 5.3.2-14 und Bild 5.3.2-15, Bild 5.3.2-16

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

14.1 Grenzen der Reparierbarkeit.



Die Grenzen der Reparierbarkeit zeigen deren **Anwendungsbereich**. Sie sind üblicherweise in Überholhandbüchern, Vorschriften, Spezifikationen und Anweisungen des OEM, der zuständigen Behörde und des Betreibers enthalten. **Nicht immer sind diese Grenzen einfach und unmissverständlich.** Um solche Problemfälle zu erkennen, soll dieses Kapitel den Leser für potenzielle **Gefahren einer Reparatur** sensibilisieren. Das geschieht anhand von tatsächlich aufgetretenen Beispielen. Natürlich können diese bei weitem nicht alle Probleme abdecken. Einige Probleme sind detailliert in Kapitel 12 behandelt das sich mit Problemen der Neuteilfertigung beschäftigt. Auf diese Stellen wird im Text hingewiesen. Viele dieser Fertigungsverfahren werden auch in der Reparatur angewendet. Lit. 14.1-15 beschäftigt sich mit darüber hinausgehenden reparaturspezifischen Problemen.

Bei Kombination reparaturgelöteter und neuer Bauteile dürfen die reparierten Teile eine vom OEM angegebene maximale Zahl nicht überschreiten.

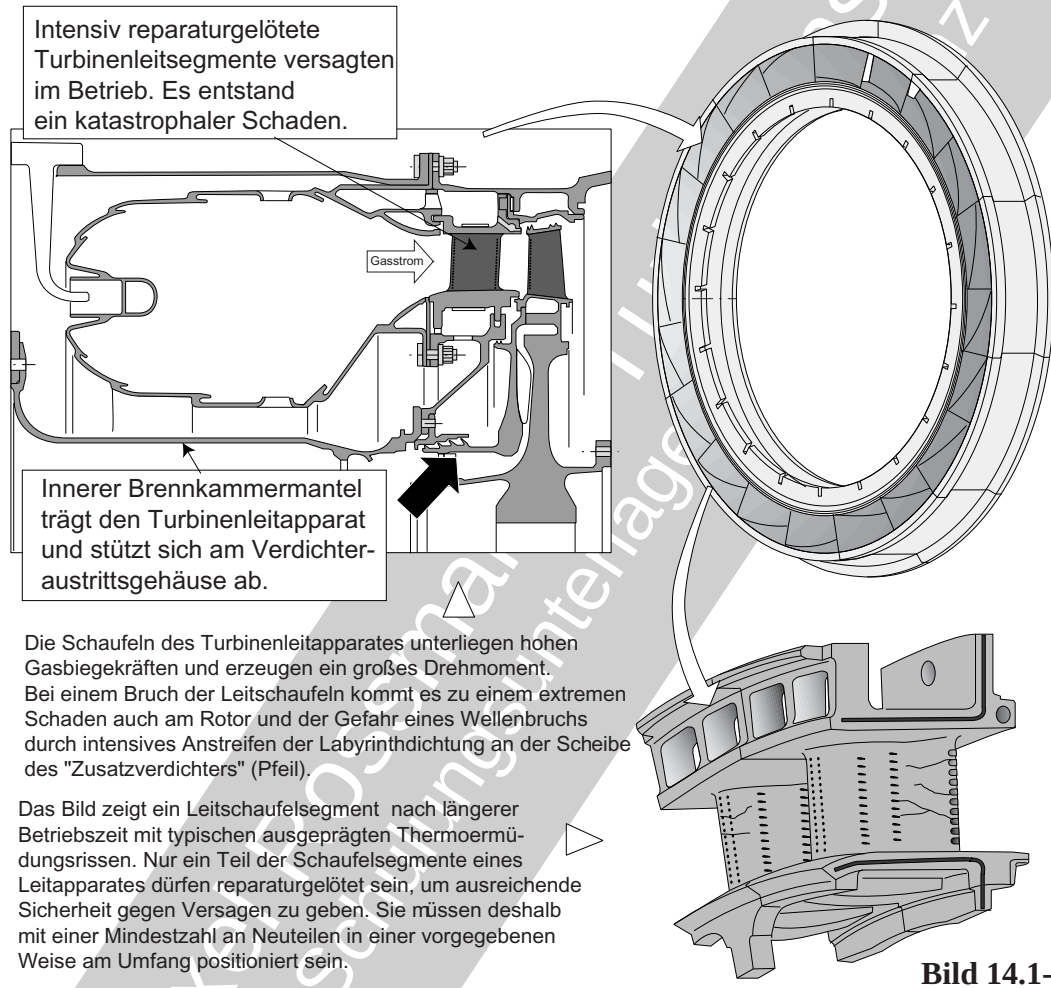


Bild 14.1-1: Werden bei der Montage **Baugruppen zusammengesetzt**, können Einschränkungen zu berücksichtigen sein. Im dargestellten Fall handelt es sich um den Leitapparat der 1. Hochdruckturbinenstufe. Er besteht aus **mehreren Komponenten** (Schaufelsegmente, Detail rechts). Er ist über die Schaufeln und den inneren Brennkammermantel am Verdichteraustrittsgehäuse abgestützt. Die Blätter dieser Leitschaufeln sind von den Gaskräften hoch kriechebeansprucht. Während des Flugs kam es zum Bruch der Schaufeln. Der Leitapparat wurde frei, mit katastrophalen Folgen. Die Untersuchung zeigt

te, dass bei einer vorangegangenen Überholung entgegen den Angaben des Überholungshandbuchs vorgegangen wurde. Alle Schaufeln waren durch umfangreiche Lötungen repariert worden. Das **Handbuch begrenzt dagegen die Zahl der reparierten Schaufelsegmente** und verlangt eine **abwechselnde Kombination mit Neuteilen**.

Merksatz:

Beim Zusammenbau von **Bauteilgruppen aus reparierten Komponenten** ist auf Einschränkungen in Handbüchern und Anweisungen zu achten. Im Zweifelsfall ist der OEM zu konsultieren.

Der Umfang einer Schweißreparatur muss sich an die vom OEM festgelegten Grenzen halten, sonst besteht die Gefahr eines vorzeitigen Ausfalls des Bauteils mit gefährlichen Folgen.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Betriebsfestigkeit einer Reparaturschweißung unter der des Neuteils liegt. Damit ist ein

- früherer Anriss
- schnellerer Rissfortschritt
- und kürzere Lebensdauer einzukalkulieren.

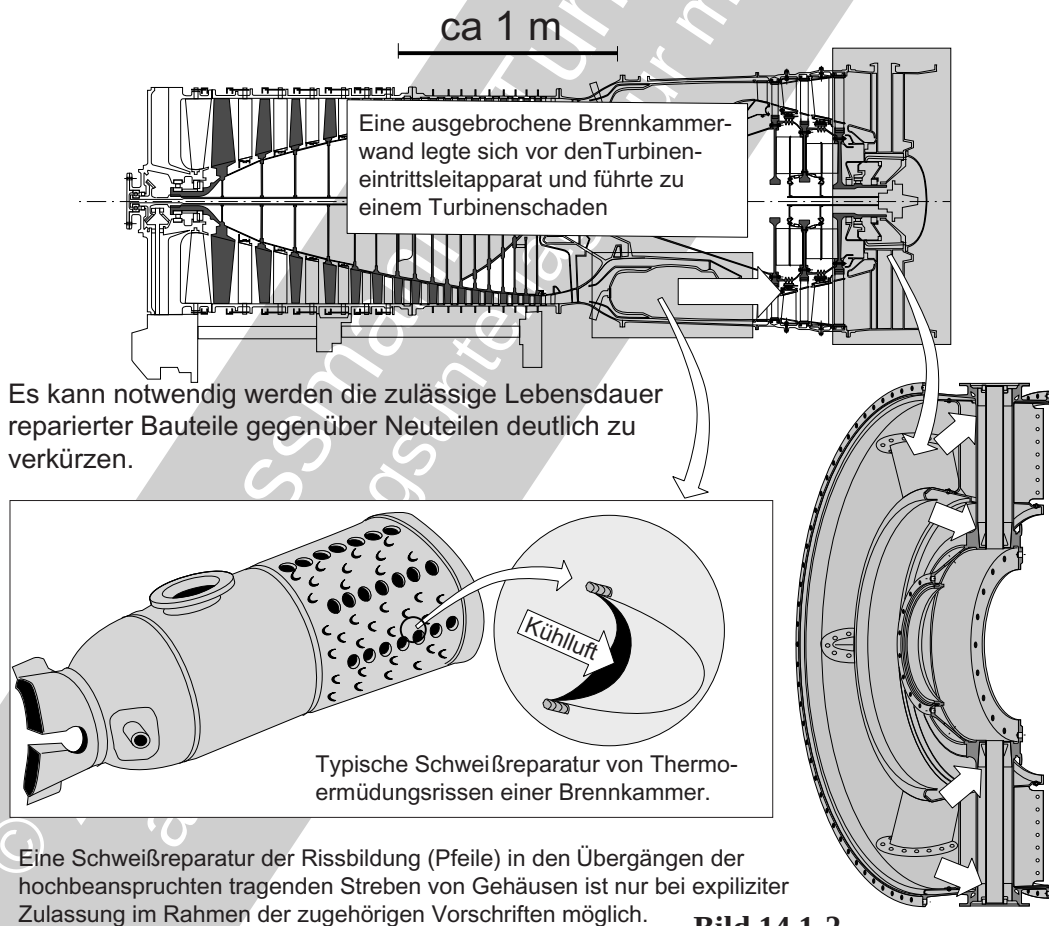


Bild 14.1-2

Bild 14.1-2: Von dem folgenden Problem sind besonders Schweißreparaturen an scheinbar gering belasteten Komponenten älterer Triebwerke (Skizze oben) betroffen. Hier kann wegen logistischer Engpässe der Wunsch bestehen, die im Überholhandbuch festgelegten Grenzen exzessiv zu nutzen oder zu überschreiten. Selbst wenn dies nicht geschieht, ist damit zu rechnen, dass die **Qualität der Schweiß-**

reparatur sich mit jeder Überholung bzw. Reparaturschweißung verschlechtert (Lit. 15.1-16).

Dieser Fall ist zu erwarten, wenn der **Werkstoff „altert“ und/oder Schädigungen wie nicht ausreichend entfernbare Oxidation** aufweist. Solche Mängel sind nicht unbedingt äußerlich ausreichend sicher erkennbar. Es stellt sich also die Frage, **wie oft** bei inter-

pretierbaren Angaben in den Handbüchern **derartige Teile überholt werden können**.

Eine besonders gefährliche Situation tritt ein, wenn solche Teile nicht bewussten, **hohen dynamischen Betriebsbeanspruchungen** (hochfrequente Schwingungen) unterliegen. Wird das Bauteil im Betrieb von einer größeren Risszahl an Reparaturschweißungen geschwächt, kann die Eigenfrequenz so abfallen, dass **Resonanz** eintritt. Im Extremfall ist ein durch Risse „weich“ (elastisch) gewordener Bereich zu **Flatterschwingungen** anregbar.

Ein Beispiel sind die **aus Blech gefertigten Flammrohre von Rohrbrennkammern** (Rahmen unten links). Im dargestellten Fall bestand die Möglichkeit die für eine Reparatur begrenzte Länge, Anzahl und Verteilung typischer Thermoermüdungsrisse in den Ecken der Brennkammerkiemen (Detail) exzessiv zu nutzen. Es zeigte sich, dass dann die dynamischen Belastungen (übliche Verbrennungsschwingungen) zu Schwingbrüchen führten. Brachen größere Stücke der Brennkammerwandung aus, kam es nach wenigen hundert Betriebsstunden zu gefährlichen **Turbinenschäden** (Lit. 14.1-17).

Die Skizze unten rechts zeigt ein **Turbinenaustrittsgehäuse** als Blech-Schweißkonstruktion. Typische Schwachstellen solcher Gehäuse sind die **Übergänge der Lagerstreben in den Gehäuseaußenmantel und die Lagerkammer**. Hier herrscht erfahrungsgemäß eine hohe Thermoermüdungsbelastung in Kombination mit hochfrequenten Schwingungen. Hält man sich bei mehrfach überholten Teilen nicht mit **ausreichendem Sicherheitsabstand an die Reparaturgrenzen im Handbuch**, besteht die Gefahr eines frühen Versagens.

Bild 14.1-3 (Lit 14.1-14): Die besonderen Anforderungen für die **Reparaturen an Gehäusen** werden oft unterschätzt. Deren **hohe Betriebsbelastungen** können unterschiedlicher Art und Ursache sein. Auch an die **Maßhaltigkeit** werden in bestimmten Zonen wie Zentrierflächen oder Spitzenspalten zu den Rotorscheufeln hohe Ansprüche gestellt. Für die oft dünnwandigen, großen und komplexen Strukturen können die Forderungen äußerst anspruchsvoll sein. Oft machen Schweißreparaturen anspruchsvolle **Richtarbeiten** und/oder **spannungsabbauende Behandlungen** (Wärmebehandlung, Kugelstrahlen) notwendig.

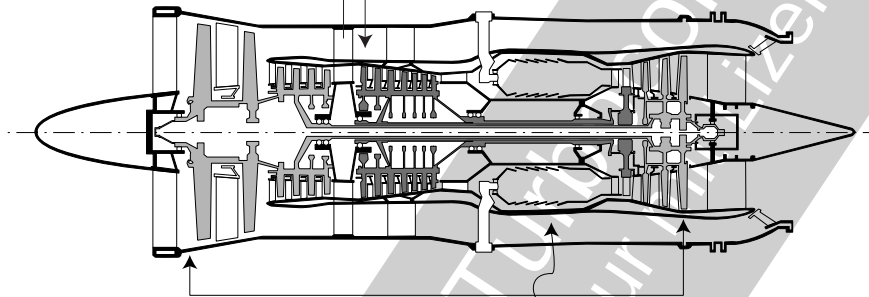
Häufig tragen Triebwerksgehäuse Hauptlager. Dafür sind die Lagerkammern (Lit. 14.1-16) über Streben abgestützt. Aus den Lagern können große Radialkräfte und bei Festlagern Axialkräfte wirken. Unwuchten leiten hochfrequente dynamische Belastungen ein. Große Temperaturgradienten, besonders in sog. „Hot Strut“-Konstruktionen (Streben werden durch den Heißgasstrom geführt), erzeugen entsprechende Wärmespannungen. Besonders die Strebenübergänge sind so einer hohen Thermoermüdungsbeanspruchung ausgesetzt.

Druckgehäuse sind hoch beansprucht. Entsprechende Vorsicht ist bei Schweißreparaturen angesagt. Die Belastung dieser Gehäuse ist einem Druckkessel vergleichbar. Es handelt sich um hintere Verdichtergehäuse, Brennkammergehäuse (Bild 14.1-4) und Gehäuse der Hochdruckturbine. Häufig haben Gehäuse auch **Containmentfunktion**, um **Bruchstücke** der Rotorbeschaufelung (Band 2, Kapitel 8.2) oder austretendes **Feuer** (Titanfeuer, Band 2, Kapitel 9.1) im Schadensfall aufzufangen. Alle diese Funktionen muss man bei einer Reparatur berücksichtigen und dürfen von ihr nicht eingeschränkt werden. Dabei ist beispielsweise daran zu denken, dass von der Gussstruktur einer Schweißung nicht die gleiche günstige **Energieaufnahme** beim Bruchstückaufschlag wie von einem unbeeinflussten Schmiedematerial zu erwarten ist.

Einige Grundregeln für die Reparatur von Triebwerksgehäusen.

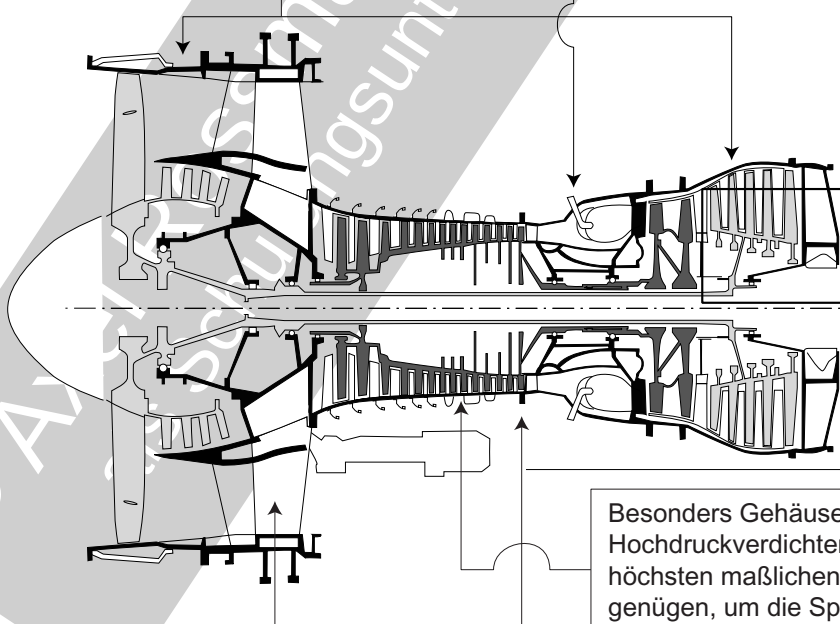
Größte Vorsicht bei der Reparatur von Gehäusen /Zwischengehäusen) welche die Triebwerksstruktur bilden und/oder Hauptlager abstützen.

Besondere Gefahr im Bereich von Flanschen



Keine Reparaturen die das Containmentverhalten beeinträchtigen können. Dies gilt besonders für Fan- und LPT- (NDT-) Gehäuse.

Vorsicht bei der Reparatur der hoch druckbelasteten Brennkammergehäuse. Sie unterliegen hohen zyklischen mechanischen Spannungen und Wärmespannungen.



Besonders Gehäuse des Hochdruckverdichters müssen höchsten maßlichen Forderungen genügen, um die Spalthaltung zu gewährleisten. Kritisch sind deshalb Verfahren die so hohe Eigenspannungen zurücklassen, dass es im Betrieb zum Verzug kommt.

Bild 14.1-3

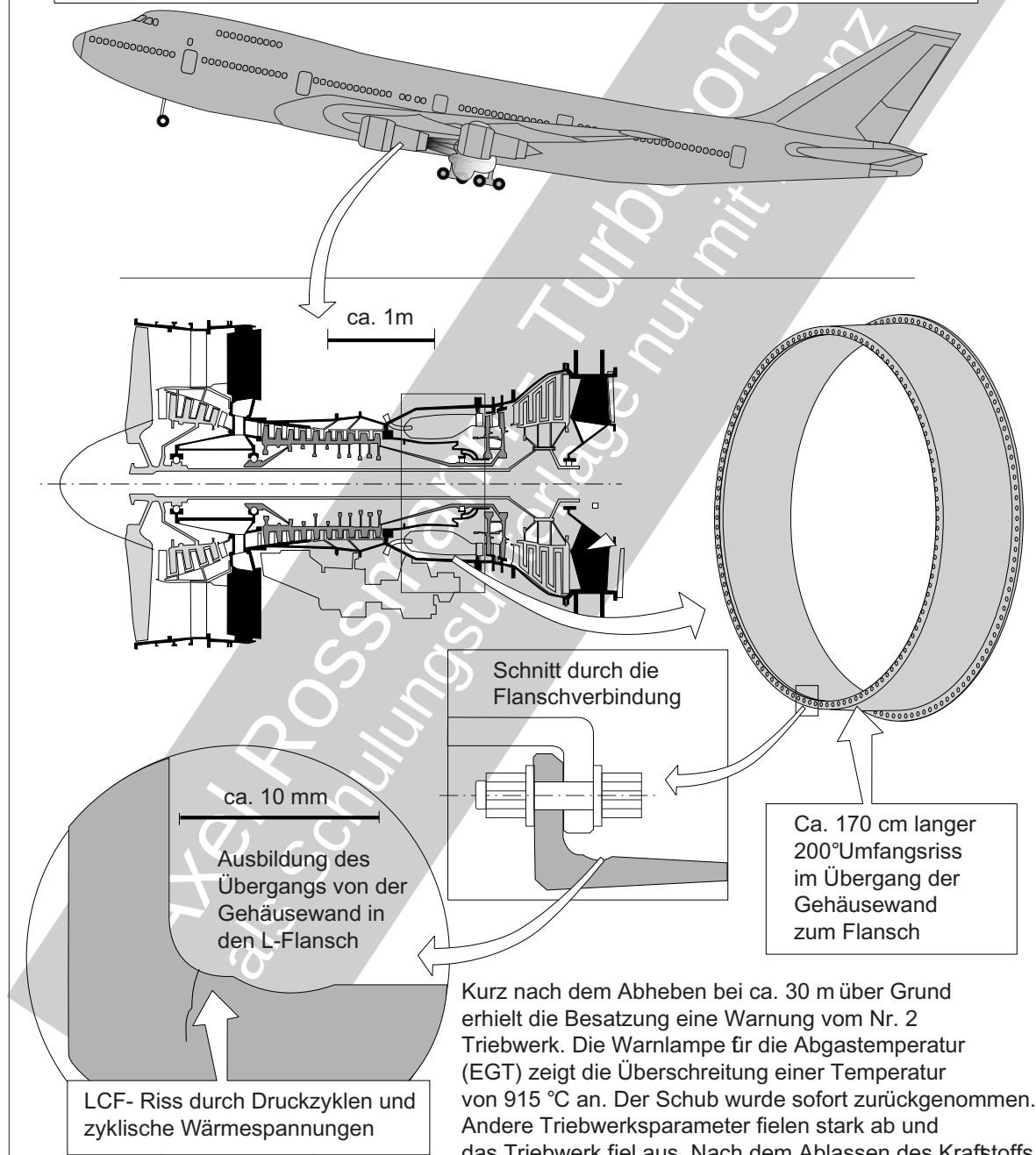
Bild 14.1-4 (Lit. 14.1-1): Betriebsspannungen von Gehäusen mit hohen Innendrücken werden leicht unterschätzt. Das dargestellte Beispiel gibt hierzu einen Eindruck. Es kann als Mahnung gelten, in Flanschzonen von derartigen Gehäusen bei Reparaturen besondere Vorsicht walten zu lassen. In keinem Fall dürfen Reparaturgrenzen in Handbüchern oder Anweisungen überschritten werden (Bild 14.1-5). Im Zweifel ist der OEM hinzuzuziehen. Das gilt besonders für **äußere Brennkammergehäuse** (engl. Combustion Chamber Outer Casing = CCOC). Im Beispiel beträgt die Betriebstemperatur 550°C. Es handelt sich um ein nicht repariertes Teil. Die Übergangsgeometrie der Gehäusewand zum Flansch mit zwei Radien ist beim Schadenstriebwerk eine ältere Version (Details unten). Dass bereits **eine geänderte Version** eingeführt wurde, lässt den Schluss auf bekannte Probleme in dieser Bauteilzone zu. Im flanschnahen Radius entstand über ca. 195° des Umfangs ein LCF-Riss der sich den Start-Abstellzyklen zuordnen lässt. Von mehreren ähnlichen Schäden wird berichtet.

Merksatz:

Im **Flanschbereich von Brennkammergehäusen** besteht erfahrungsgemäß erhöhte Anrissgefahr.

Bei Reparaturen ist hier besondere Vorsicht geboten. Die vom OEM (z.B. in Handbüchern) angegebenen Grenzen dürfen in keinem Fall ohne Rücksprache und Erprobung überschritten werden.

Beispiel für die hohe Betriebsbelastung von Brennkammergehäusen. Bei Reparaturen ist deshalb besondere Vorsicht geboten.



Triebwerken ohne Probleme. Die sofortige Inspektion des Triebwerks zeigt einen ca. 170 cm langen Umfangsriss am äußeren Brennkammergehäuse (CCOC). Dies hatte offensichtlich die Luftströmung im Triebwerk so verändert, dass es zu einem Strömungsabriss (Pumpen, engl. Surge) kam.

Bild 14.1-4

Gehäuse des Kerntriebwerks sind hochbeanspruchten Druckkesseln ähnlich. Reparaturen und Prüfungen haben sich deshalb unbedingt an die Vorschriften bzw. Handbuchangaben zu halten. Eigenmächtiges Überschreiten reparierbarer Fehlergrößen oder Prozessabweichungen bergen die Gefahr eines explosionsartigen Aufreißens.

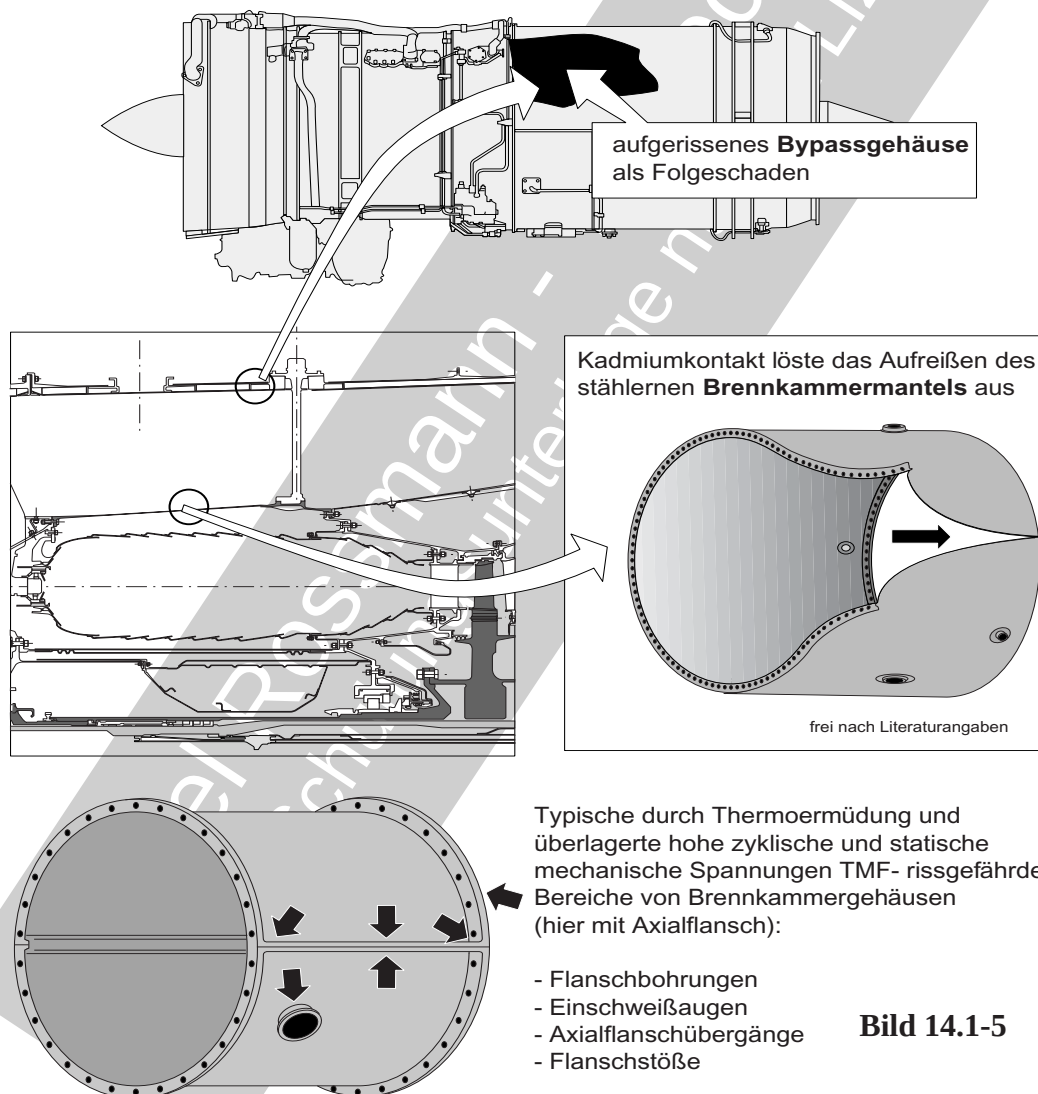


Bild 14.1-5 (Lit. 14.1-2): Die Ursache für diesen Triebwerksschaden mit Bruchstückaustritt (siehe auch Lit. 14.1-16) war eine gefährliche, **metallische Oberflächenverunreinigung**. Sie wurde bei der Reparatur im Rahmen eines Überholvorgangs als **Nickel-Kadmium Korrosionsschutzschicht** in den **Flanschbohrungen** aufgebracht. Eine solche Beschich-

ung verstieß gegen die **Reparaturanweisung** des OEM.

Zitat aus dem Überholhandbuch:

„Cadmium Plate is not allowed in holes of front or rear flange or holes in any other area. Any cadmium plate in any hole must be removed,“

Es war bekannt, dass **Kadmium** bei den zu erwartenden Betriebstemperaturen von einigen 100°C den **Stahl des Gehäuses/Flanschs versprödet**. Dabei handelt es sich um sog. **Lötrissigkeit** (engl. Liquid Metal Embrittlement = **LME**, Band 1, Kapitel 5.8.1).

Offenbar wurden Risse in vielen Flanschbohrungen dieser kritischen Zone bei zwei Zwischeninspektionen mit Wirbelstrom nicht entdeckt. So kam es nach ca. 8000 Start-Abstellzyklen zum Aufreißen des Gehäuses, als ein Riss die kritische Länge erreicht hatte.

Merksatz:

Besondere Vorsicht ist bei Reparaturen an **Gehäusen mit hohem Innendruck** geboten. Auch die Grenzen zugelassener Reparaturprozesse sind möglichst restriktiv zu nutzen.

Bild 14.1-6 (Lit. 14.1-3, Lit. 14.1-4 und Lit. 14.1-5): Von **Reparaturlötungen an Heißeilen** ist nicht die **Festigkeit und Zähigkeit des ursprünglichen Grundwerkstoffs** zu erwarten. Es ist anzunehmen, dass die **Warmfestigkeit und Kriecheigenschaften** deutlich niedriger liegen (Seite 12.2.1.4-50). Dieser Nachteil gegenüber einem ungeschädigten Grundwerkstoff wird von einer größeren **Sprödigkeit** verstärkt (Band 1, Bild 5.4.2.2-4 und Bild 12.2.1.4-9).

Also sind von **Reparaturlötnähten**, die im Gegensatz zu Lötungen am Neuteil mit schlechteren betriebsbedingten Eigenschaften des Grundwerkstoffs zusammentreffen (Oxidation, Gefügeveränderung), **nicht die gleichen Eigenschaften bzw. Lebensdauern wie vom Neuteil** zu erwarten. Das ist bei **Reparaturlötungen** zu berücksichtigen (Lit. 14.1-16). Unter diesem Gesichtspunkt ist beispielsweise der **eingelötete „Flicken“** (engl. patch) in der Skizze oben als äußerst problematisch anzusehen. Seine Lötnaht verläuft in einer üblicherweise lebensdauerbestimmenden hoch thermoermüdungsbeanspruchten Übergangszone des Blattes zu den Deckbändern. Mit einer solchen Gestaltung dürfte ein vorzeitiges Versagen in den Lötnähten vorprogrammiert sein.

Besser erscheinen die unten skizzierten Versionen. Links erstreckt sich das eingelötete Stück über die gesamte Schaufelvorderseite. Damit läuft auch die **Lötnaht in Richtung der Thermoermüdungsbeanspruchung** und ist so entlastet. Ein zusätzlich positiver Effekt ist erzielbar, wenn ein besonders **oxidationsfester und thermoermüdungsbeständiger Werkstoff** (gerichtet erstarrt, Einkristall) eingelötet wird. Positiv zu bewerten ist auch die Variante rechts unten. Hier werden mit Hilfe einer **Wärmedämmschicht** die Wärmespannungen bzw. die **Thermoermüdungsbelastung reduziert**. Dies

Von der Wirksamkeit einer Reparatur durch Schweißen oder Löten darf nicht zu viel erwartet werden.

So lassen sich die Vorteile eines gerichtet erstarrten Werkstoffs kaum nutzen.

Erhöhte Gefahr einer Rissbildung durch Thermoermüdung in der Lötung.

Von einem lediglich durch Schweißen oder Löten reparierten Teil kann in aller Regel kein besseres Betriebsverhalten erwartet werden als vom Neuteil! Das gilt besonders für Sicherheit und Lebensdauer.

schlecht!

Eingelöteter "Originalwerkstoff" oder durch Löten aufgebauter Bereich.

Vorteilhafte Nutzung der hohen Thermoermüdungsfestigkeit eines längs zur Kante gerichtet erstarrten Werkstoffs möglich.

Verbesserungen gegenüber der Originalversion des Neuteils lassen sich durch den Einsatz von Technologien erzielen, welche die lebensdauerbestimmende Beanspruchung absenken und/oder spezifisch höhere Festigkeiten aufweisen.

besser!

Bild 14.1-6

Günstige Gestaltung, Lötnaht außerhalb der hohen Thermoermüdungsbeanspruchung.

Eine Wärmedämmschicht im Gaskanal verringert die Thermoermüdungsbelastung und das Temperaturniveau.

lässt sich mit den bereits besprochenen Varianten vorteilhaft kombinieren.

Ähnliche Überlegungen wie hier für Reparaturlötungen gelten auch im übertragenen Sinn für **Reparaturschweißungen** (Lit. 14.1-16).

Merksatz:

Keine Beschichtungsänderungen ohne Zustimmung des OEM. Schichten die an einer Bauteilzone zulässig sind, können an einer anderen Stelle gefährlich wirken bzw. verboten sein.

Die Eigenspannungen von Beschichtungen sind für das dynamische Bauteilverhalten von großer Bedeutung. Deshalb ist ein wichtiges Kriterium für die Anwendung von Schichten deren Eigenspannungszustand.

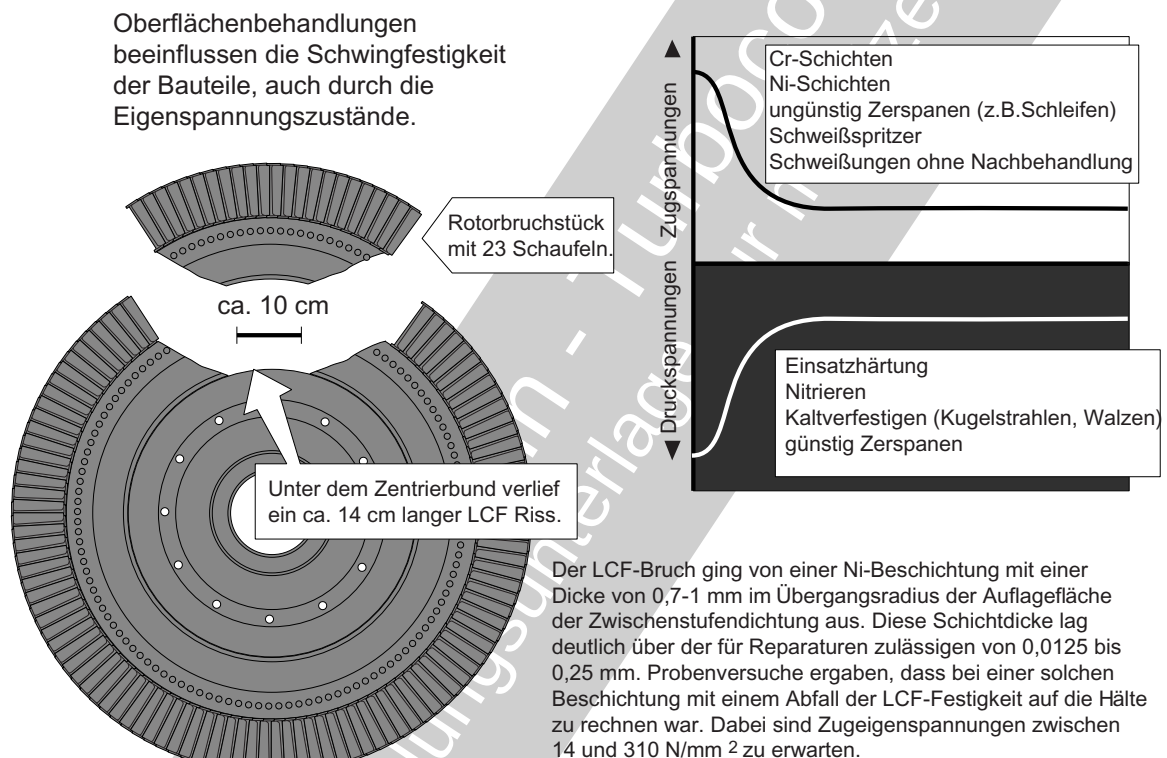


Bild 14.1-7

Bild 14.1-7 (Lit. 14.1-6): Bei vielen Beschichtungen, besonders **galvanisch** aufgetragenen (Bild 12.2.1.8.3-1, Bild 12.2.1.8.3-2 und Bild 12.2.1.8.3-3), ist mit schädlichen (Zug-) **Eigenspannungen** (Band 1, Bild 4.3-15) zu rechnen. Zugeigenspannungen überlagern sich mit Betriebsspannungen und erhöhen so die Mittelspannung. Damit **fällt die ertragbare Schwingbeanspruchung ab**. Dieser Effekt wird von dem typisch hohen E-Modul solcher Schichten und deren Sprödigkeit verstärkt.

Die Höhe der Zugspannungen ist stark von **Verfahrensparametern** abhängig. Diese sind deshalb exakt, entsprechend den Vorschriften, einzuhalten. Auch ein **Wechsel in der Schicht-**

art, z.B. **Übergang von Verchromung auf Vernickelung** ist ohne Zustimmung der zuständigen Stellen (OEM, Behörde) unzulässig. Besonders bei Reparaturen verschlissener Zentrier- und Auflageflächen rotierender Komponenten ist höchste Vorsicht geboten. Die Skizze links zeigt eine solche Scheibe mit einer Beschichtung. In jedem Fall muss man sich **genauestens an Handbuchangaben und Vorschriften halten**. Auf keinen Fall dürfen Beschichtungen, die an ähnlichen Teilen oder Bauteilzonen zulässig sind, an nicht explizit dafür ausgewiesenen Bauteilen bzw. Bereichen angewendet werden.

Erhält ein Bauteil eine harte Schicht, ist mit einem Abfall der Schwingfestigkeit bei Betriebsbedingungen zu rechnen.

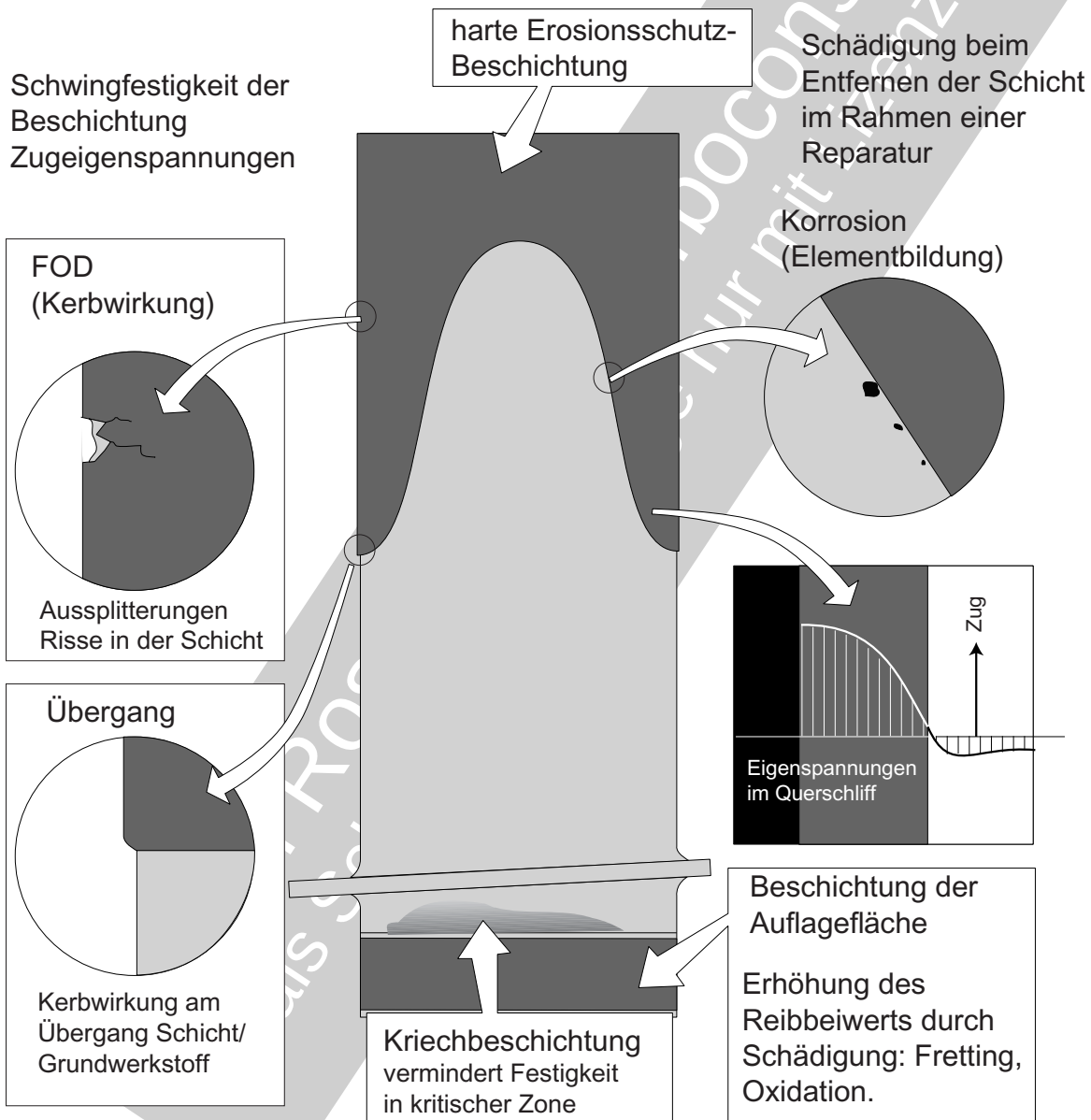


Bild 14.1-8

Bild 14.1-8: Mit Beschichtungen lassen sich bei Reparaturen **Verschleißflächen wieder aufbauen und vorbeugend schützen**. Das gilt sowohl für **Reibverschleiß** (Band 1 Bild 5.9.3-8) von Auflageflächen als auch für **Erosionsverschleiß** (Band 1 Bild 5.5.1.1-1 und Bild 5.5.1.1-5) an umströmten Flächen wie Schau-

felblättern. Aus diesem Grund werden Bauteile häufig mit Beschichtungen repariert. Dabei sind jedoch Risiken unbedingt zu berücksichtigen. In erster Linie handelt es sich um **Effekte welche die Schwingfestigkeit absenken** und so zum katastrophalen Versagen des Bauteils führen können.

Die Gefahr ist umso höher einzuschätzen je härter, spröder und steifer (hoher E-Modul) die Schicht ist (Bild 12.2.1.8-4). Beschichtungen dürfen deshalb **nur dort aufgebracht werden, wo es im Handbuch bzw. der Vorschrift zulässig ist**. Im Zweifelsfall ist unbedingt der OEM und die zuständige Genehmigungsbehörde (z.B. bei militärischer Anwendung) zu konsultieren. Soll eine Reparaturbeschichtung entwickelt werden, ist das **Verfahren mit seinen Parametern bauteilspezifisch** auszuwählen und zu optimieren. Seine Unbedenklichkeit ist in einem geeigneten Zulassungsverfahren nachzuweisen.

Folgende potenziell schädigende Effekte sind zu berücksichtigen:

FOD-Verhalten (Detail oben links) steht besonders bei **Schaufelblättern** in Verdichter und Turbine im Vordergrund. Betroffen sind in erster Linie **festhaftende harte aber auch spröde Schichten**, die sich als **Erosionsschutz** anbieten. Solche Schichten können in unbeschädigtem Zustand die Schwingfestigkeit sogar anheben. Erzeugen aber selbst kleine **Fremdkörper** wie Sandkörner in diesen Schichten **scharfkantige Kerben und Rissbildung**, ist höchste Vorsicht geboten. In einem solchen Fall ist mit einem gefährlichen **Abfall der Schwingfestigkeit** zu rechnen.

Der **Übergang Schicht/Grundwerkstoff** (Detail unten links) kann als **Kerbe** wirken und die Schwingfestigkeit absenken. Ein solcher Übergang sollte sich deshalb zumindest nicht in einem merklich dynamisch belasteten Bereich befinden. Lässt sich ein Übergang an Kanten und Hohlkehlen nicht vermeiden, ist er geeignet zu gestalten bzw. nachzuarbeiten.

Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass keine „**Kriechbeschichtung**“ wie sie beispielsweise bei spröden **Diffusionsschichten** auftreten kann, vorhanden ist. Typisches Beispiel ist eine **Kriechbeschichtung im Tannenbaum und Schaft von Turbinenrotorschaukeln** mit einer Diffusionsschicht des Blattes.

Korrosion des Grundwerkstoffs (Detail oben rechts) kann auf unterschiedliche Weise auftreten. Ist der Schichtwerkstoff edler als das Grundmaterial, muss wegen **Elementbildung** im Betrieb mit Korrosion gerechnet werden (Band 1 Bild 5.6.1.1-3, Bild 5.6.1.2-3 und Lit. 14.1-18).

Bilden sich dabei **Grübchen (Lochfraß, engl. corrosion pits, Band 1 Bild 5.6.1.1-1)** wirken diese als Kerben und **senken die Schwingfestigkeit** gefährlich. Ein solcher Effekt kann zusätzlich von der Kerbwirkung des Schichtübergangs verstärkt werden. Erfahrungsgemäß sind Schaufeln aus martensitischen Stählen (Cr-Stähle) besonders gefährdet. Sie kommen noch in älteren Triebwerkstypen zum Einsatz.

Abziehen einer Schicht (engl. stripping) kann den Grundwerkstoff angreifen. Ein flächiger Abtrag ist dabei weniger gravierend als örtliche Anfressungen und/oder Mikrorissbildung (interkristalline Korrosion, Band 1 Bild 5.6-2, Bild 5.6.1.1-1 und Bild 5.6.1.1-5).

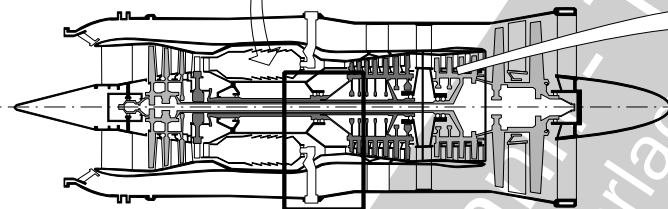
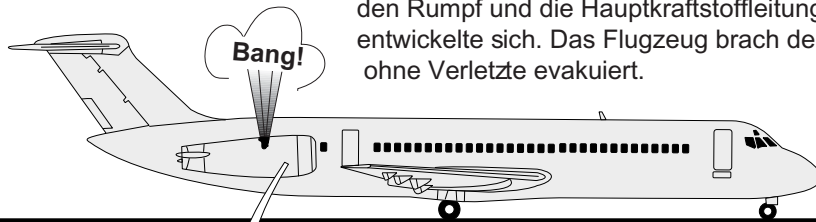
Zugeigenspannungen (Detail unten rechts) erhöhen die Mittelspannung im Betrieb und senken die Schwingfestigkeit (Band 1 Bild 12.2.1.8.3-2).

Merksatz:

Beschichtungen sind auf **Unbedenklichkeit gegenüber FOD** zu prüfen. Je härter die Schicht umso höher das Schädigungspotenzial bei **Ausbrüchen und Mikrorissbildung**.

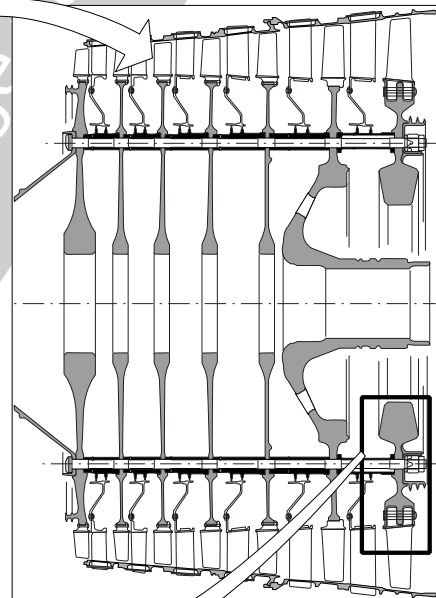
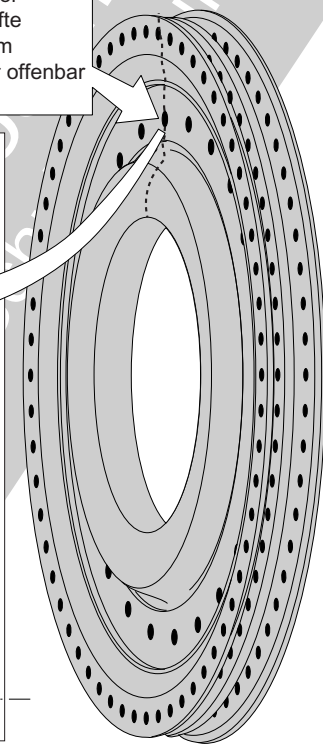
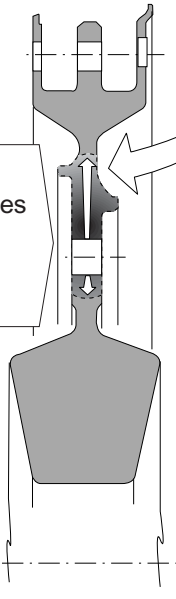
Als Folge einer unbefriedigenden Rissprüfung bei der Überholung einer Verdichterscheibe kam es zu deren Bruch.

Während des Anrollens trat ein lauter Knall am rechten Triebwerk auf und dieses begann zu brennen. Bruchstücke aus dem Triebwerk durchschlugen den Rumpf und die Hauptkraftstoffleitung. Ein Kabinenfeuer entwickelte sich. Das Flugzeug brach den Start ab und wurde ohne Verletzte evakuiert.



Bei der letzten Prüfung der Scheibe im Rahmen der Überholung vor 4400 Zyklen (ca. 4 Jahre) dürfte bereits ein Riss von ca. 12 mm vorhanden gewesen sein, der offenbar nicht erkannt wurde.

Ausbreitung des LCF-Risses von einer Entlastungsbohrung.



Verdichterscheibe aus einem Vergütungsstahl. Zwischen den Bohrungen für die Spannbolzen befindet sich jeweils eine "Entlastungsbohrung".

Bild 14.1-9

Bild 14.1-9 (Lit. 4.1-14): Dieses Beispiel (Bild 12.2.1.8.3-6) zeigt die **potenzielle Gefährlichkeit von Verfahren mit Stromdurchgang**. Bei der galvanischen Beschichtung der Verdichter-

scheibe (Skizze unten Mitte) kam es wegen ungenügender Kontaktierung zur **elektrischen Funkenbildung**. Die entstandene kleine **Anschmelzzone** an einer Scheibenbohrung senk-

te die Schwingfestigkeit (hier LCF) deutlich ab. Es kam zu Rissbildung und Bruch der Scheibe. Dieser Fall demonstriert die **Gefahr auch kleiner Ansmelzkrater** (Band 4). Bei Reparaturen ist deshalb besonders darauf zu achten, dass **keine elektrischen Funken am Bauteil** entstehen. Eine solche Schädigung kann tiefer wirken als es äußerlich erscheinen mag. Eine **Bewertung und Nacharbeit** erfordert deshalb besondere Überwachung und Unbedenklichkeitsnachweise (Bild 14.3-1). Im Zweifelsfall ist der OEM zu konsultieren.

Bild 14.1-10 (Lit. 14.1-8 und Lit. 14.1-10): Der **Grund von Scheibennuten** ist sowohl im Verdichter- als auch im Turbinenbereich eine insbesondere **zyklisch hochbeanspruchte Bauteilzone**. **Beschädigungen** (Lit. 14.1-16) aber auch **Nacharbeiten** sind in diesem Bereich ent-

sprechend problematisch. Aus diesem Grund ist es erforderlich, sich hier an besonders enge Angaben und Einschränkungen in Vorschriften bzw. den Handbüchern zu halten. Zu den beachtenswerten Einflüssen gehört wegen der **Riefenorientierung die Bearbeitungsrichtung**. Unsere Aufmerksamkeit sollte besonders **axial verlaufenden Riefen** gelten. Auch die **Verfahrensparameter** sind einzuhalten, um beispielsweise eine örtliche **Überhitzung** zu vermeiden. Sie sind nach einer folgenden Überarbeitung wie Polieren kaum mehr zerstörungsfrei nachweisbar (Bild 12.2.1.1.2-5 und folgende).

Bild 14.1-11 (Lit. 14.1-11): Wie gut ein Teil **reparaturschweißbar** ist, hängt außer vom Werkstoff nicht zuletzt von der **konstruktiven Gestaltung** ab. Das gilt besonders für komplexe Gehäuse wie Verdichter-(Skizze unten) und

Der Bereich des Grunds von Tannenbaumnuten in Turbinenscheiben ist gewöhnlich sehr hoch belastet und nimmt kleinste Fehlstellen, z.B. einer Nacharbeit übel.

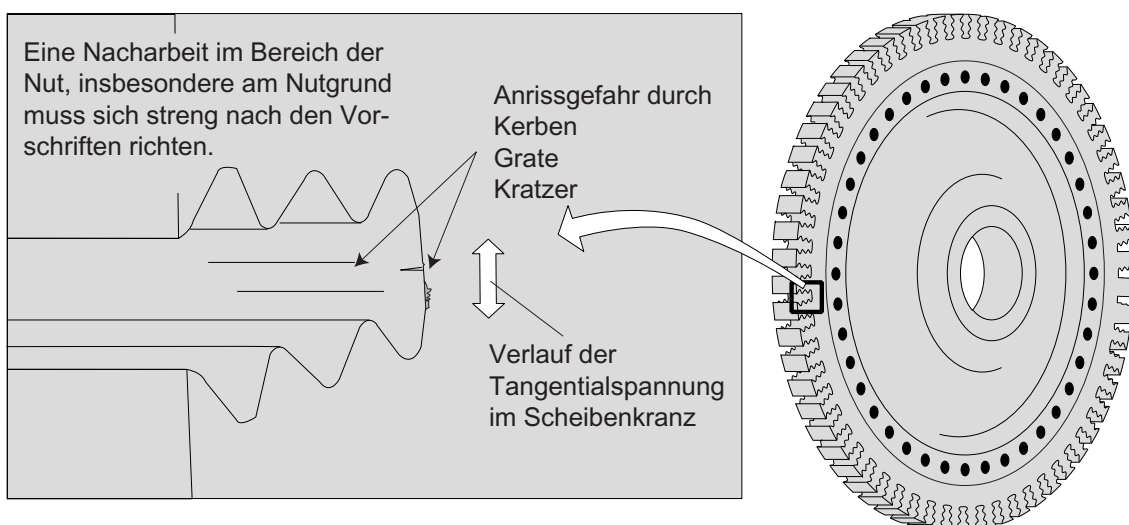


Bild 14.1-10

Schweißreparatur erfordert die geeignete Gestaltung, nicht zuletzt auch für die zerstörungsfreie Qualitätsprüfung.

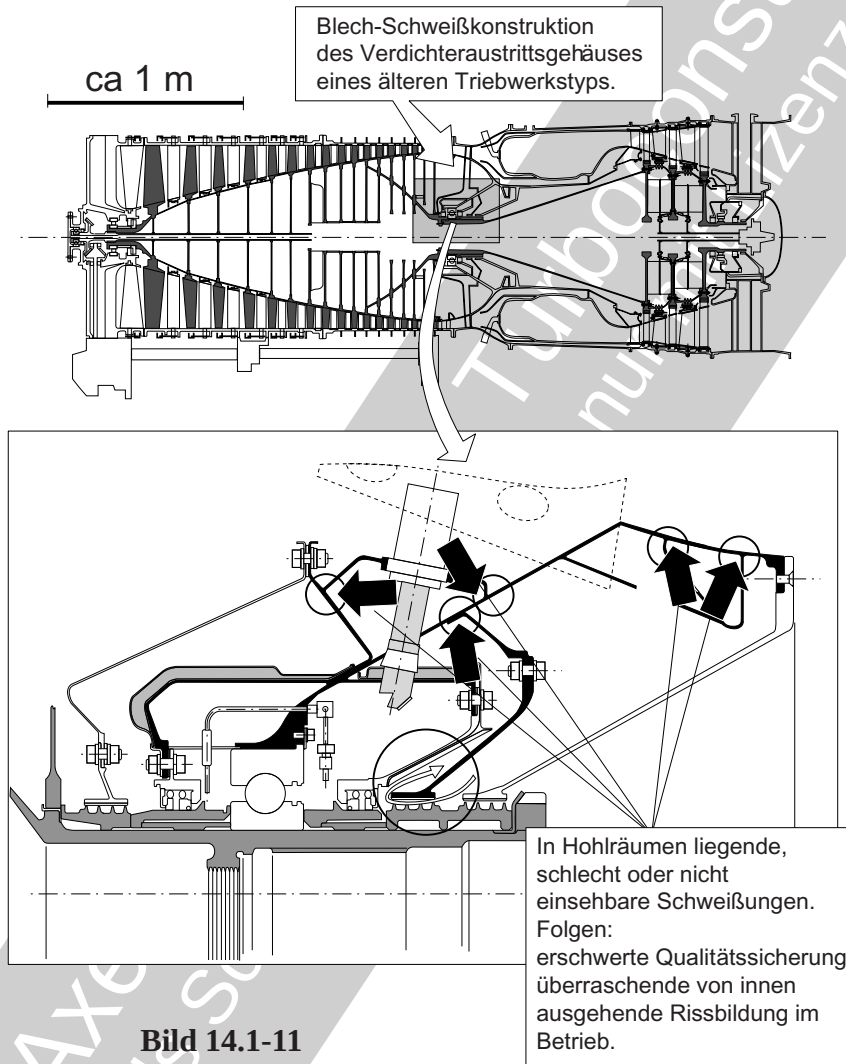


Bild 14.1-11

Turbinenausstrittsgehäuse älterer Triebwerkstypen. Hier handelt es sich um Schweißkonstruktionen (Bild 14.1-2). Weitgehend geschlossene Hohlräume wie Lagerkammern sind eine besondere Herausforderung. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die **zerstörungsfreie Prüfbarkeit** der Reparaturqualität. Diese erfolgt üblicherweise visuell und/oder mit Röntgen. Das erfordert aber eine ausreichende **Zugänglichkeit** die nicht immer gewährleistet ist.

Handelt es sich um niedrig legierte Stähle ist unbedingt darauf zu achten, dass beim Schwei-

ßen **keine Feuchtigkeit** zutreten kann. Andernfalls besteht große Gefahr einer **Wasserstoffversprödung** mit verzögerter Rissbildung (Bild 12.2.1.3.1-18 und Band 1, Bild 5.7.2-3). Diese Forderung ist gerade bei Hohlräumen nicht leicht einzuhalten (Schwitzwasser), selbst wenn mit Schutzgas gearbeitet wird.

Bei austenitischen Legierungen ist im **Wurzelbereich** ebenfalls für ausreichend **Schutzgas** zu sorgen. So lässt sich eine bedenkliche Oxidation der Schweißung zu verhindern.

Wie lässt sich gefährliche interkristalline Korrosion ("IK") beim Ätzen in der Überholung vermeiden bzw. erkennen?

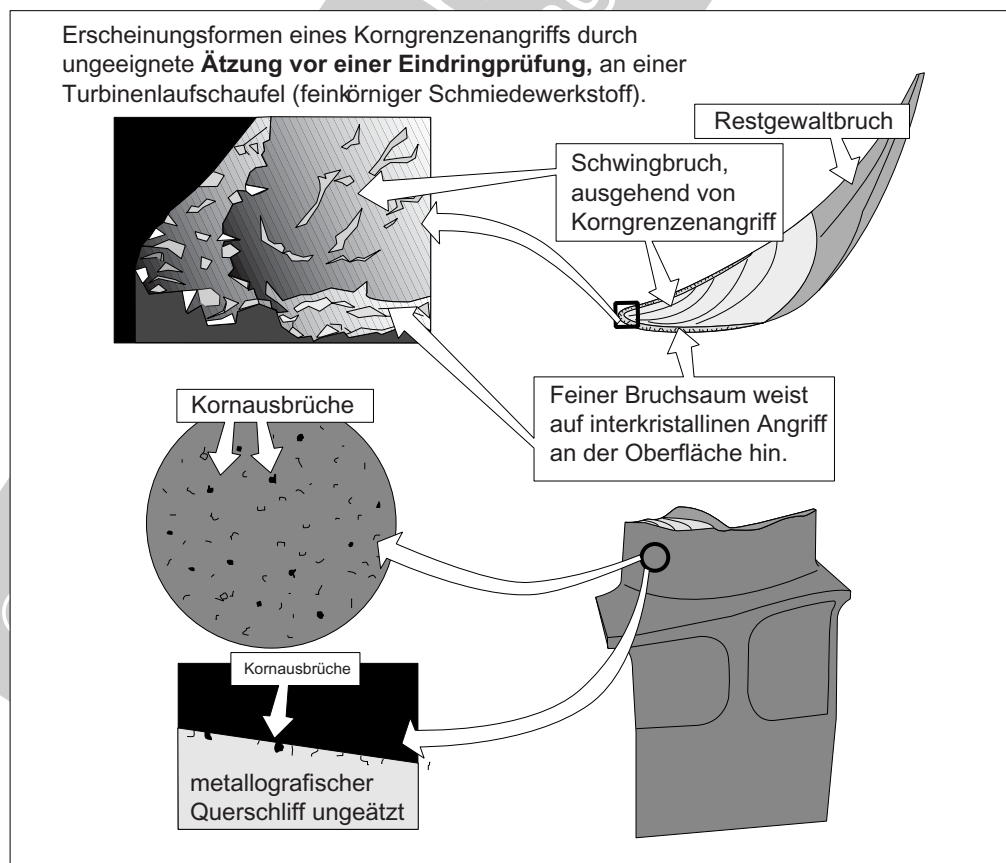
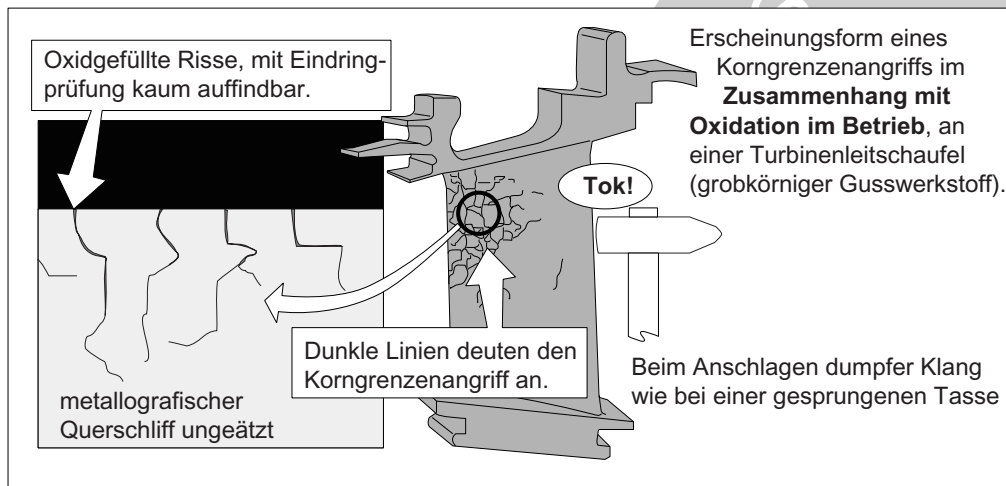


Bild 14.1-12

Bildbeschreibung nächste Seite

Bild 14.1-12 (Lit. 14.1-12): In vielen Fällen verlangt die Überholung bzw. Reparatur ein Ätzen der Bauteile. Die verwendeten **Ätzmedien sind äußerst aggressiv**. Häufig handelt es sich um chlorhaltige Säuren (z.B. wässrige FeCl_3 -Lösung). Ätzen dient besonders der **Reinigung und Entfernung von Oxiden** sowie der **Vorbereitung von Beschichtungsprozessen** (z.B. Verchromen und Vernickeln). Auch zum **Abziehen von Beschichtungen** (Entschichten, engl. stripping) werden aggressive Ätzbäder verwendet. Sie müssen oft stärker als Bäder im Neuteil-Fertigungsprozess wirken, wenn der **Langzeitbetrieb die Schicht verändert** hat. Erst nach einer ausreichenden Entfernung mit einer eventuellen Rissöffnung ist eine erfolgreiche **Eindringprüfung** möglich (Lit. 14.1-16). Gerade Oxide sind chemisch äußerst stabil, mehr als der Grundwerkstoff. Aus diesem Grund besteht beim Abätzen der Oxide die Gefahr einer **Schädigung des Grundwerkstoffs**. Der Grund kann eine **Abweichung des Grundwerkstoffgefüges** vom Neuteil sein. Das ist die Folge einer Alterung bzw. Veränderung der Zusammensetzung des Grundwerkstoffs durch Oxidation und Diffusionsvorgänge im Betrieb (z.B. Sensibilisierung, Band 1, Bild 5.6.1.1-4). Eher wahrscheinlich sind erfahrungsgemäß jedoch nicht eingehaltene **Verfahrensparameter** wie zu lange Ätzzeiten oder **gealterte Bäder**. Diese können die **Korngrenzen** bevorzugt **rissartig angreifen** (Interkristalline Korrosion = IK, Rahmen oben, Band 1, Bild 5.6.1.1-4). Derartige Schädigungen sind zerstörungsfrei kaum auffindbar. Im Extremfall tritt ein **ungewöhnlich dumpfer Ton** beim Handling auf (Bild 12.2.1.7-10). Dieser kann ein Indiz für eine Dämpfung durch Risse sein.

Ein weiteres visuell zu identifizierendes Merkmal, besonders bei Nickellegierungen, sind kleine, als dunkle Punkte (Rahmen unten) erkennbare **Kornausbrüche** (Lit. 14.1-16 Cracked No.2 engine combustion chamber outer case Aircraft Engineering). Sie entstehen bei weit fortgeschrittenem, starkem Korngrenzenangriff. Auch wenn nur die oberste

Kornlage betroffen sein sollte, ist doch mit einem gefährlichen **Schwingfestigkeitsabfall** zu rechnen.

Merksatz:

Verschleißflächen sind Tribosysteme. Bei **Änderungen und Nachweisen** sind immer **beide Flächen und einwirkende Medien** zu berücksichtigen.

Bild 14.1-13 (Lit 14.1-13): Gerade **Verschleißsysteme** wie Vielkeil-Wellenverbindungen sind bei Veränderungen **als Einheit zu betrachten**.

Wird eine Seite verändert/verbessert, hat dies auch einen Einfluss auf das Verhalten der Partneroberfläche. In einem solchen Fall kann eine Verbesserung **Maßnahmen auf beiden Seiten** erfordern. Das kann bei der Überholung eines Moduls zu einem besonderen Problem werden. Das ist der Fall, wenn dieser **Modul** nur ein Element des Tribosystems (z.B. nur die Kupplungshülse oder die Welle) aufweist und nur dieses Element berücksichtigt wird. Das kann zum vorzeitigen Ausfall des Systems nach dem erneuten Einbau führen. Das ist der Fall, wenn das **Gegenstück ohne optimale Oberfläche** nun schneller verschleißt. An dieses Verhalten ist auch bei der Verbesserung von Verschleißsystemen im Rahmen der Reparaturentwicklung zu denken.

Im dargestellten Fall sollte das Verschleißverhalten einer beidseitig nitrierten **Vielkeilkupplung** (Skizze unten links) verbessert werden. Dazu sollten im Rahmen der Überholung **beide Seiten verchromt** werden (Skizze unten Mitte). Es wurde jedoch bei der Reparatur nur die **Büchse verchromt** (Skizze unten rechts), die **Welle blieb nitriert**. Versuche zeigten, dass bei dieser Kombination das nitrierte Teil extrem schnell verschliss und es zum Versagen der Verbindung kam.

Werden neue Überholvorschriften ausgegeben, sind diese auch bei Reparaturen auf alle betroffenen Komponenten anzuwenden.

Als der Hubschrauber sich in Baumwipfelhöhe befand, sackte das Heck plötzlich ab und er kippte zur Seite weg. Er schlug am Boden auf. Ursache war der Verschleiß an einer Vielkeilverzahnung des Kraftstoffpumpenantriebs.

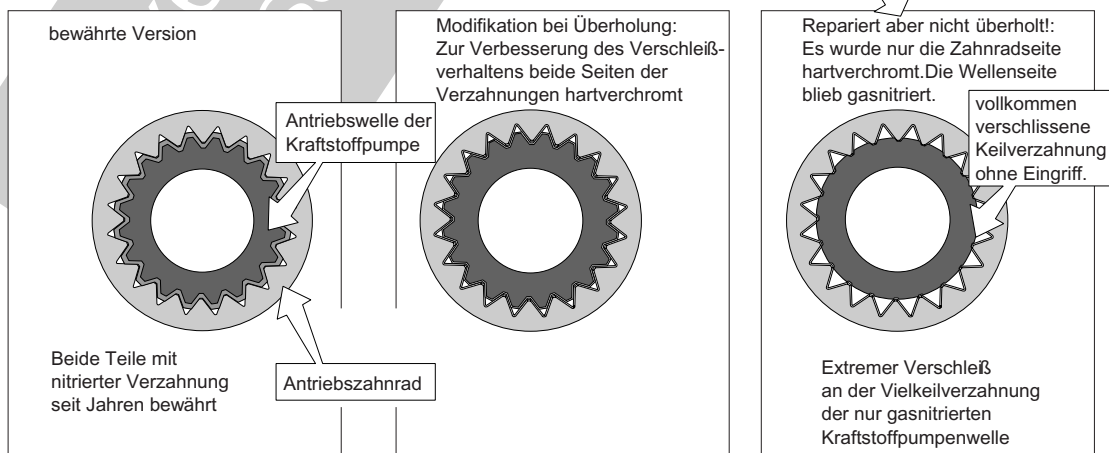
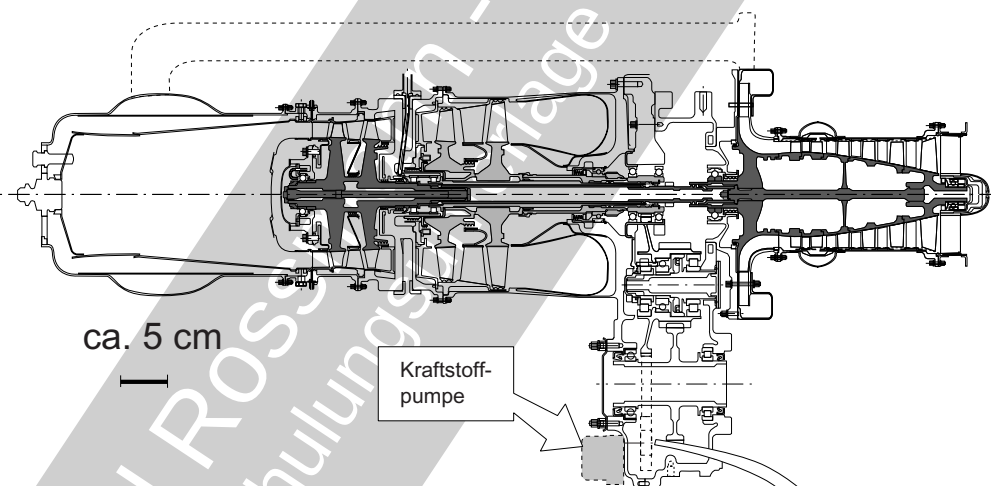


Bild 14.1-13

Eine neue Kombination verschlissener Oberflächen kann den Verschleißvorgang bis zum Versagen beschleunigen.

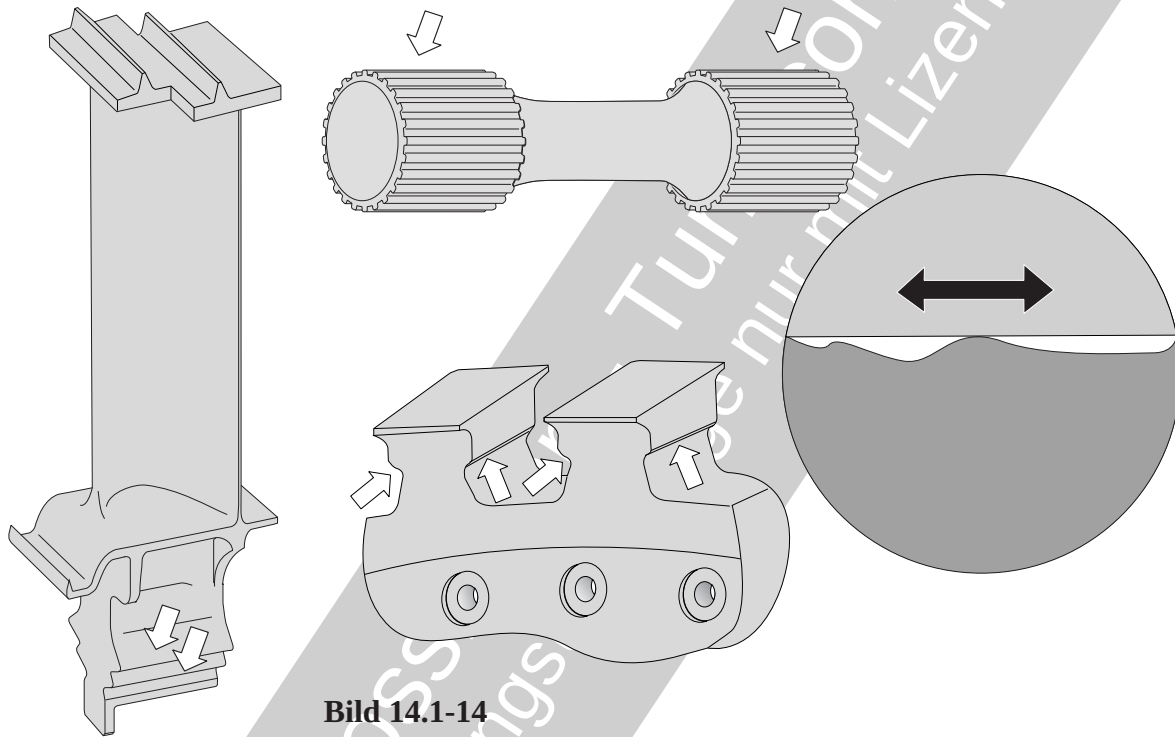


Bild 14.1-14

Bild 14.1-14: Durch **Reibverschleiß (Fretting)**, Band 1 Kapitel 5.9.3) erfahren Sitzflächen, wie sie an **Schaufelfüßen, Zentrierungen und Keilwellen** typisch sind, einen örtlichen Abtrag. Werden diese Flächen **bei einer Montage mit neuen oder bereits verschlissenen Flächen ausgetauschter Bauteile kombiniert**, stimmt das Verschleißprofil der Kontaktflächen nicht mehr zueinander. Das führt zu örtlich **hohen Flächenpressungen und ungünstigen Belastungskombinationen durch Reibkräfte** (sog. Anstrengung, Band 1 Bild 5.9.3-1 und Lit. 14.1-19). Damit werden **Schwingrisse** begünstigt. Dieser Effekt ist beispielsweise besonders bei der Nacharbeit von Frettingflächen an Schaufelfüßen und Scheibennuten zu berücksichtigen (Band 1 Bild 5.9.3-6, Lit.14.1-19). Auch die **Verschleißgeschwindigkeit einer neuen Kombination gelaufener Auflage-**

flächen kann sich (z.B. an **Vielkeilverbindungen**) deutlich erhöhen.

Merksatz: Vor der **Kombination der Verschleißflächen** bei einer Montage ist darauf zu achten, dass **keine ungünstigen Auflagebedingungen** entstehen.

Die Wiederverwendung gebrauchter Bauteile kann auch bei zulässigem Verschleiß zu unerwarteten Problemen führen.

Während des Steigflugs traten in ca. 3000 m Höhe am Triebwerk Nr. 4 starke Vibrationen, deutlich oberhalb der zulässigen Werte, auf. Das Triebwerk wurde abgeschaltet und das Flugzeug landete ohne Probleme. Eine Rotorschaukel der 3. Turbinenstufe war gebrochen.

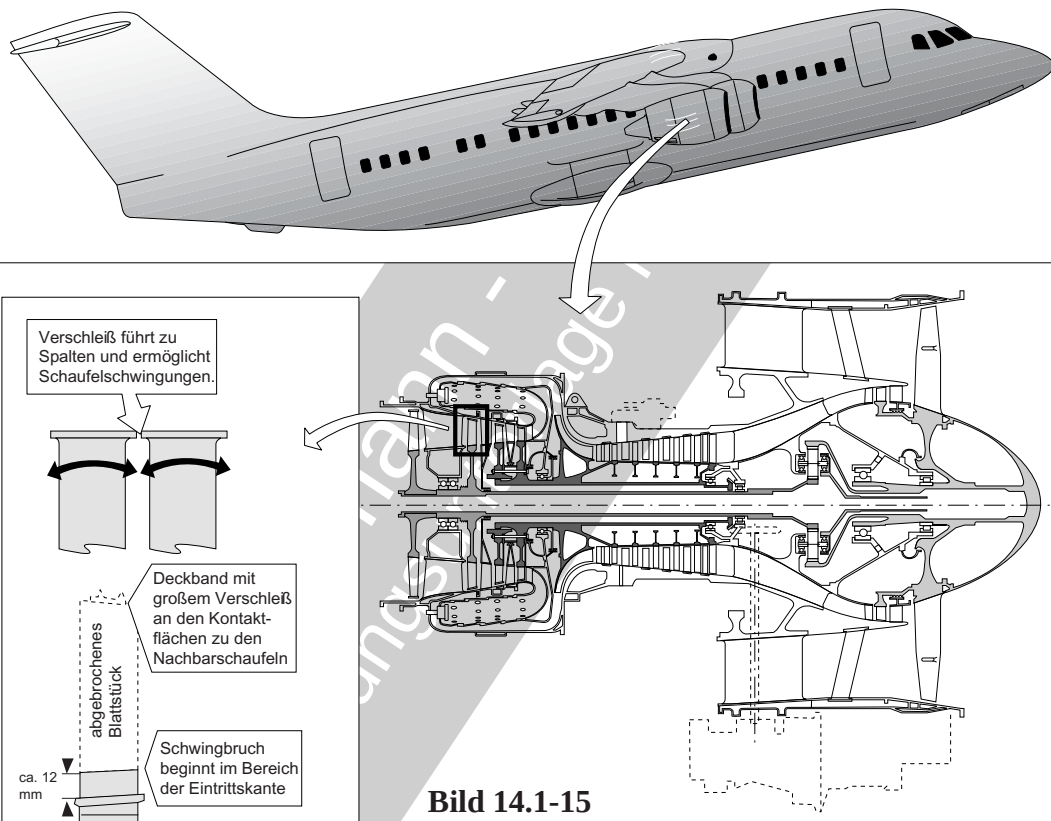


Bild 14.1-15

Bild 14.1-15 (Lit. 14.1-15): Die Zerlegung des Schadenstriebwerks ergab, dass eine **Turbinenrotorschaukel** der 3. Stufe (Skizze rechts) gebrochen war. Dies war bereits **innerhalb eines Jahres der dritte „Parallelfall“** im gleichen Flugzeug. Die Schaufel war im Blatt 12 mm oberhalb der Fußplattform abgebrochen (Rahmen links). Dabei hatte sie das Deckband der gegen die Rotationsrichtung nachfolgenden Schaufel abgeschlagen.

Die Untersuchung der Blattbruchfläche ergab, dass es sich um einen HCF-Bruch (Schwingbruch) handelte. Dieser ging, wie bei Gusswerkstoffen üblich, von einer typischen '1. Stufe Spaltfläche/Facetten' (Band 1 Bild 4.3-6.1)

an der Eintrittskante aus. Als ursächlich einzuschätzende Fehlstellen wie Porosität wurden nicht gefunden. Die Gesamtlaufzeit der Schaufeln betrug ca. 4 100 Stunden mit ca. 3 800 Start-Abstellzyklen.

Alle drei Schaufelbrüche entstanden an mit bereits gelaufenen Schaufeln neu ausgerüsteten Stufen. Diese Schaufeln erfüllten zur Zeit des Einbaus die Maßspezifikationen. Trotzdem **vergrößerten** sich im Betrieb die **Spalte an den Deckbändern auf Grund von Frettingverschleiß unerwartet schnell**. Das wurde vom OEM auf die **ungünstigen, punktförmigen Kontaktbedingungen** zwischen den benachbarten, bereits leicht verschlissenen Deck-

bändern zurückgeführt. Die großen Deckbandspalte verringerten die Dämpfung und Abstützungswirkung. Damit waren **gefährliche Blattschwingungen** möglich, die im ersten Fall zu einem Schwingbruch in der Fußplattform und den beiden nächsten im Schaufelblatt führten.

Als Gegenmaßnahme entwickelte der OEM ein Reparaturverfahren für die Deckbandanlagen.

Bild 14.1-16 : Betrachtet man die **Gesamtlebensdauer** eines **Triebwerkstyps** fällt die weit größere Gebrauchsdauer im Vergleich zum Automobil auf. Ein halbes Jahrhundert ist für Triebwerke durchaus üblich. Natürlich geht in solchen Zeiträumen die **Entwicklung der Technik** weiter. Gleichzeitig werden alte Technologien wegen **ungenügender Effektivität des Verfahrens oder des Produkts** (z.B. geschmiedete Turbinenschaufeln) in modernen Anwendungen fallen gelassen. Das kann dazu führen, dass Nachfertigungen nicht mehr von dem **früheren Know How und erfahrungsbasierten Notwendigkeiten** profitieren. So ist es durchaus möglich, dass an Neuteilen scheinbar belanglose, vom OEM genehmigte und von Behörden zugelassene **Abweichungen von ursprünglichen Originalteilen** auftreten. Diese Unterschiede können im Betrieb zu **unvorhergesehenen Problemen** führen, die bei der Änderung nicht berücksichtigt wurden weil sie in **Vergessenheit** gerieten.

Beispielsweise kann das **Verfahren** und die Nachbehandlung beim Biegen von Rohren aus Kostengründen verändert worden sein (Skizze). Werden in solchen Rohren unerkannt **Zug-eigenspannungen** induziert oder fehlen unbewusste **Verfestigungen** des früher angewendeten Verformungsverfahrens kann dies Schwingbrüche begünstigen.

Die Problematik wird verschärft, wenn nach langen Zeiträumen seit der Entwicklung des Triebwerks die **Erfahrungsträger längst aus**

dem Beruf geschieden sind. Das hat gerade bei militärischen Triebwerken die Folge, dass **Reparaturentwicklungen ganz in den Verantwortungsbereich des Betreibers bzw. Lizenznehmers** übergangen. So fehlt auch die Kenntnis der Auslegung zugrunde gelegter Betriebsbelastungen.

Werkstoff- und Verfahrensänderungen gehören zu den besonders problematischen Maßnahmen.

Werkstoffänderungen können notwendig werden, wenn die **Bauteillebensdauer angehoben** werden soll (z.B. für Turbinenschaufeln). Das gilt auch, wenn die **Verfügbarkeit** einer alten Legierung (z.B. Ni-Schmiedelegierung) nicht mehr gegeben ist. Ein Beispiel ist der Übergang von **Ni-Schmiedelegierungen** von Turbinenschaufeln, wie sie in alten Triebwerkstypen üblich sind, **auf Gusslegierungen** mit höherer Kriechlebensdauer. Diese haben jedoch eine vergleichsweise **niedrigere Schwingfestigkeit**, was gerade in Schaufelfüßen älterer Gestaltung (viele kleine Zähne) zu Schwingbrüchen führen kann.

Überwurfmuttern aus Stahl an Rohrleitungsverschraubungen haben eine höhere Festigkeit als solche aus **Aluminium**, wie man sie an älteren Triebwerksmustern findet. Führt eine Umstellung jedoch wegen der **Massenänderung zur Resonanz**, erhöht sich die Schwingbruchgefahr trotz der besseren Festigkeit. Auch **Steifigkeits- und Wärmedehnungsunterschiede** der Schraubverbindung haben darauf Einfluss.

Kosten sind durchaus ein Grund für **billigere Werkstoffe**. Auch die **Verfügbarkeit** ist ein wichtiges Kriterium. Wurde beispielsweise früher ein **Goldlot** zum Fügen eines Verdichtersleitapparates verwendet, liegt der Wunsch nahe dieses an Nachfertigungsteilen durch ein **Ni-Lot** zu ersetzen. Eine größere Sprödigkeit des Ni-Lots und die höhere Löttemperatur können aber die Festigkeit der Verbindung gefährlich absenken. Leider wird ein solches Problem

Bei nachgefertigten Komponenten alter Triebwerkstypen besteht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass nicht spezifizierte, aber für das Betriebsverhalten wichtige Details von früheren Produktionslosen abweichen.

Schwingrissbildung an einer Kraftstoffleitung aus einem späteren Produktionslos.

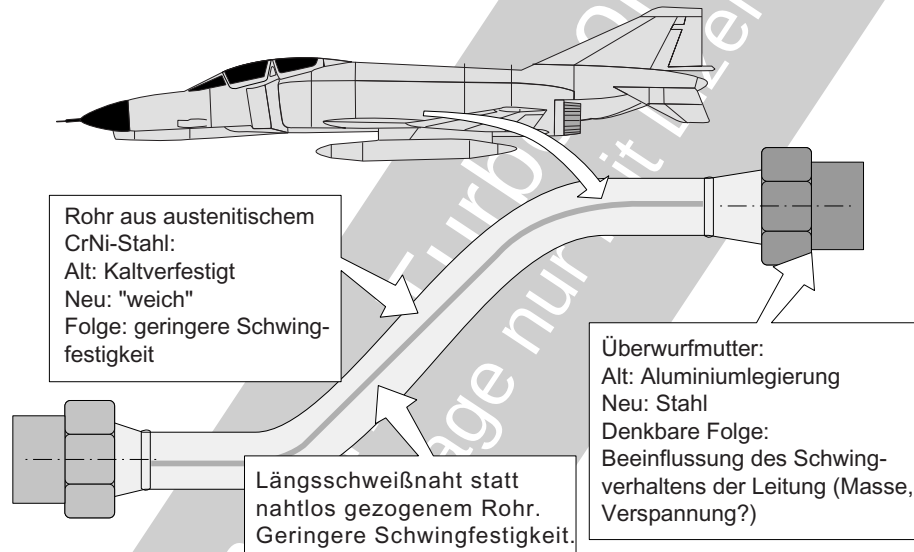


Bild 14.1-16

Weitere Probleme späterer Produktionslose:

Veränderte Technologien infolge

- Umweltbeeinträchtigung und Gesundheitsrisiken: Kadmieren, Verchromen, Verwendung von Asbest, MgTh-Legierungen
- Technische Risiken und Mängel: Silberbeschichtung von Schrauben in Heißeilen, Verschraubungen aus Aluminium (Korrosion, Schwingermüdung)
- Verfügbarkeit: Kobalt
- Materialkosten: Gold (Lot),
- Produktionsvorteile: Effektivere Herstellungsverfahren: Durchflussbeeinflussung durch Rauigkeit in Bohrungen

Typische Eigenschaften die auf solche Änderungen schadensrelevant reagieren:

- Gleiteffekte: Reibbeiwert, Verschleiß/Schwingverschleiß (Fretting), Kaltverschweißen ("Fressen"), Festbacken von Heißeilen (Schrauben)
- Elektrisches Isolationsverhalten unter Betriebsbedingungen (z.B. Asbestisolatoren)
- Alterung
- Korrosion
- Schwingverhalten (Resonanz, Spannungen durch Verspannen)

häufig erst nach längeren Betriebszeiten erkannt, was das Schadensrisiko besonders ansteigen lässt (Lit. 14.1-16).

Die **Umweltverträglichkeit** gerät bei der Werkstoffwahl immer mehr in den Vordergrund. Das kann aber die unschöne Auswirkung haben, dass problematische Werkstoffe wie Asbest mit einer **Kombination besonderer, vorteilhafter Eigenschaften**, nicht mehr zur Ver-

fügung stehen. Die Erfahrung zeigt, wie schwer es ist, in einem solchen Fall befriedigenden Ersatz zu finden. Erst im Betrieb stellt man beispielsweise fest, dass es auch auf **unberücksichtigte Eigenschaften** wie Wasseraufnahme (Schwitzwasser), Reibbeiwert unter Betriebsinflüssen oder die Nachgiebigkeit bei Überlastung (z.B. unter unerwarteten Wärme- spannungen) ankommt.

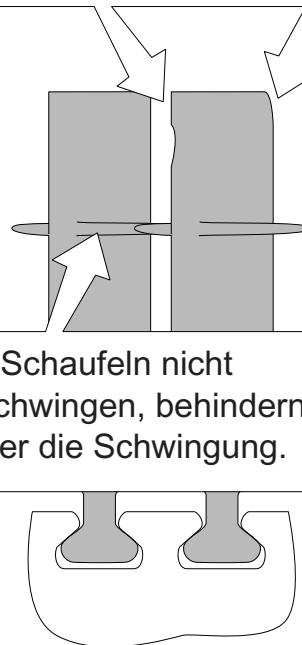
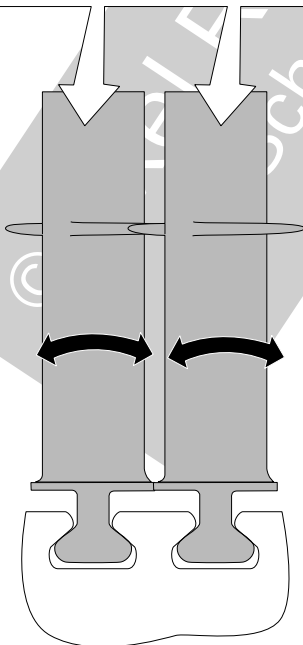
Bild 14.1-17: Ein **durchaus unerwarteter Effekt** kann gerade an älteren Triebwerkstypen zu Problemen führen. **Moderne Fertigungsverfahren lassen oft höhere Genauigkeiten zu als die früher gefertigten „Originalbauteile“.** Auf diese Streuung begründet sich aber eine positive Betriebserfahrung gemäß dem Prinzip „the engine will tell us“. Kommt nun beispielsweise ein neu gefertigter Satz Fanschaufeln zum Einbau, kann dieser schwingempfindlicher sein. Das liegt möglicherweise an den **nahezu gleichen Schwingfrequenzen aller Schaufeln, was eine Resonanz begünstigt** (Skizze rechts, Band 1 Bild 5.4.3.3-6.).

Im Fall von Schaufeln älterer Produktion mit **kleinen, zulässigen Abweichungen** oder **nachgearbeiteten Schaufeln** hat die Abweichung der Schwingfrequenzen untereinander möglicherweise bisher Schwingbrüche verhindert. Dies wird jedoch erst bewusst, wenn es zu Problemen mit der Neuproduktion kommt. Solche Effekte sind also auch bei der Entwicklung von Reparaturen und verbesserter Fertigungsverfahren zu berücksichtigen.

Sehr genau gefertigte Schaufeln können schwingungsempfindlicher sein.

Gleiche Schaufeln haben gleiche Eigenfrequenzen und können sich bei einer Schwingungsanregung leichter aufschaukeln.

Kleine zulässige Nacharbeiten und Abweichungen im Toleranzbereich können die Eigenfrequenzen merklich verändern.



wenn die Schaufeln nicht im Takt schwingen, behindern die Clapper die Schwingung.

Bild 14.1-17

Literatur zu Kapitel 14.1

- 14.1-1** „Cracked No.2 engine combustion chamber outer case“, Zeitschrift „Aircraft Engineering and Aerospace Technology“, 1999, Volume 71, Issue 3, Seite 269-295.
- 14.1-2** Canadian Aviation Safety Board, Aviation Occurrence Report No. 88H0001, „Delta Airlines Inc., Boeing 737-200 N4571M, Vancouver International Airport“, 17 January 1988, Seite 1-22.
- 14.1-3** P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, ISBN 3-7643-5971-4, 1998, Seite 151-159
- 14.1-4** 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.
- 14.1-5** Y.Honnorat, J.Lesbgues, „Reconditionnement de Pieces fixes du Turbine par Brasage Diffusion“, Proceedings AGARD-CP-317 der Konferenz „Maintenance in Service of High Temperature Parts“ des 53rd Meeting of the Structures and Materials Panel of AGARD in Noordwijkerhout, the Netherlands 27 September - 2 October 1981, 1, Seite 9-1 bis 9-12. AGARD 317.
- 14.1-6** National Transportation Safety Board, Aircraft Incident Report No. NTSB-AAR-71-16, „Northwest Airlines Inc., Boeing 747-151, N607US, Honolulu, Hawaii, May 13, 1971“, Seite 1-7.
- 14.1-7** National Transportation Safety Board, Aircraft Accident Report No. AAR-96/03 „Uncontained Engine Failure/Fire ValuJet Airlines Flight 597, Douglas DC-9-32, N908VJ, Atlanta, Georgia, June 8, 1995“ Seite 1-117.
- 14.1-8** J.Hall, „Safety Recommendation“, National Transportation Safety Board, Seite 1-8.
- 14.1-9** Australian Transportation Safety Board, Aviation Safety Investigation Report 200205780, „In-flight uncontained engine failure and air turn-back, Boeing 767-219ER, ZK-NBC“ Seite 1-43.
- 14.1-10** C. Kjelgaard, „FAA Inspectors to check maintenance tools after CF6 failure“, 21.Nov. 2001, www.rati.com/news, Seite 1.
- 14.1-11** Metals Handbook „Volume 11, Failure Analysis and Prevention“, American Society for Metals (ASM), November 1986, ISBN 0-87170-007-7, Seite 434.
- 14.1-12** A.Rossmann „Rissbildung an galvanotechnisch behandelten Bauteilen“, Zeitschrift „Metalloberfläche“, 35,(1981) , 10, Seite 390-396.

- 14.1-13** Transportation Safety Board of Canada, Aviation Occurrence Report A98C0070, „Loss of Power/Loss of Control“, Yukon Helicopters ltd., Hughes 369HS C-FZXC, Waasagomach1998 , Manitoba, 23.April 1998, Seite 1-8.
- 14.1-14** „Engine casing repair: present and future“, Zeitschrift „Aircraft Technology Engineering Maintenance“, June/July 1997, Seite 68-74.
- 14.1-15** Transportation Safety Board of Canada, Aviation Occurrence Report A94A0252, „Engine Component Failure/Intentional Shutdown“, Air Nova British Aerospace GAe-146-200 C-GRNV, Newark, New Jersey, USA, 29. December 1994, Seite 1-7.
- 14.1-16** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5, 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Bild 19.1.3-5.1, Bild 20.1-20, Bild 20.2-6, Bild 21.1-2., Kapitel 21.2, Kapitel 21.2.1, Bild 21.2.1-9, Kapitel 21.2.4, Bild 21.2.4-2, Bild 21.2.4-3.
- 14.1-17** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Bild 11.2.2.2-2.
- 14.1-18** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 1, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Bild 5.4.1.1-8.1.
- 14.1-19** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2, 2000, ISBN 3-00-008429-0, Bild 6.1-11, Bild 6.2-12.

14.2 Entwicklung eines Reparaturverfahrens.

Die Reparatur von Bauteilen nicht mehr hergestellter Triebwerke kann ein "way of no return" sein.



Die **Entwicklung einer sicherheitsrelevanten Reparatur** ist neben Nachweisen, Erprobung (Kapitel 14.4) und Zulassung (Kapitel 14.1) entscheidend mit der **Adaption oder gegebenenfalls der Entwicklung des Reparaturverfahrens** verknüpft.

Eine Reparaturentwicklung birgt im Vergleich zur Neuteilentwicklung **bemerkenswerte Risiken** (Bild 14.2-1). Diese betreffen nicht nur ein Scheitern mit Kosten und Zeitverlust. Das ist durchaus möglich, wenn die Reparatur sich nach einigem Aufwand als technisch oder mit der notwendigen Sicherheit nicht machbar erweist. Die Erfahrung lehrt, dass auch ein hohes Risikopotenzial in einer sog. **Verschlimmbesserung** (Kapitel 14.3) liegt. In vielen Fällen kann ein der Neuentwicklung eines Triebwerks vergleichbarer Aufwand nicht getrieben werden. Oft herrscht zusätzlich großer Zeitdruck zur Beseitigung eines akuten Mangels bzw. der Lösung eines Problems. So bleibt eine bemerkenswerte Restunsicherheit. Auch die Komplexität der **Kombination von Betriebseinflüssen**, welche die Reparatur notwendig machen, entzieht sich einer befriedigend aussagefähigen Berechnung. Ein Nachweis der Betriebstauglichkeit vieler Triebwerksteile erfolgt nach der bewährten Philosophie: „The engine will tell us“ (Band 1, Bild 3.2.2-2). Die Antwort geben Prüfläufe der Neuzulassung. Als Beispiel kann ein Heißeil dienen, das im Reparaturbereich Heißgaskorrosion, Thermoermüdung, Kriechen und Erosion ausgesetzt ist. Erst der Langzeiterfolg nach ausreichender Betriebserfahrung liefert den Erfolgsbeweis. Im Fall ernsthafter Probleme kann schon eine **größere Anzahl von Reparaturteilen ausgeliefert** sein. Befinden sich diese auch im Einsatz, besteht eine Situation die zumindest aus Sicht der **Kosten und Logistik das Potenzial katastrophaler Ausmaße** hat.

Ein besonderes Problem ist die **Reparatur alter Triebwerkstypen**, für die nicht einmal mehr beim OEM Erfahrungsträger vorhanden sind. Besonders bei militärischen Projekten kann dann der Reparaturentwickler weitgehend auf sich allein gestellt sein. Kommt es bei der typischerweise begrenzten Erprobung im nachfolgenden Serieneinsatz zu Schwierigkeiten, sind diese gewöhnlich besonders weitreichend. Verhindert die Reparatur eine befriedigende Nachbesserung weil das Bauteil irreversibel verändert wurde, kann sogar die **Existenz einer solchen Anwendung** (Triebwerk/Fluggerät) gefährdet sein. Eine ähnliche Situation entsteht, wenn Ersatzteile nicht mehr in genügender Zahl vorhanden oder nachlieferbar sind.

Zur **Minimierung potenzieller Risiken** haben sich bestimmte Vorgehensweisen bewährt (Bild 14.2-2). Zuerst ist festzustellen, dass eine Reparatur, die ein dem Neuteil vergleichbares Betriebsverhalten, insbesondere in Bezug auf die Lebensdauer, erwarten lässt, **nicht nur Symptome kurieren darf. Auch die Ursachen sollten zumindest entschärft** werden (Bild 14.2-3). Voraussetzung für eine erfolgreiche Reparatur ist die **Kenntnis und das Verständnis der wirksamen Schadensmechanismen** (Bild 14.2-4 und Bild 14.2-5). Damit wird auch eine sinnvolle **Optimierung und Vorerprobung in einem Laboraufbau** möglich.

Ein den Nachweisen zugrunde liegendes **Verfahren darf auch nicht scheinbar geringfügig abgeändert werden**. Das gilt besonders für die Verfahrensparameter. Eine Änderung erfordert immer einen ausreichend geeigneten Nachweis und gegebenenfalls eine vorschriftsmäßige Zulassung.

Warum besteht bei Entwicklung oder Veränderung von Reparaturverfahren ein besonderes Risiko im Vergleich zur Neuteilfertigung?

Unterschied zur Neuteilentwicklung	Problembegünstigender Einfluss
Kritische Betriebsbelastung in Art und Größe nicht ausreichend bekannt oder bewusst.	Mit dem allgemein anerkannten Prinzip "The Engine will tell us" bei der Neuteilentwicklung ist der Abstand zu einer gefährlichen Belastung (z.B. Schwingungsanregung) nicht bekannt.
Potenziell schadensrelevantes Bauteilverhalten nicht oder nicht ausreichend bekannt.	Beispiele: - Wärmespannungen bei örtlichem Materialwechsel (z.B. Schweißung, Lötung) - Intensität der Schwingungsanregung (Einfluss: Dämpfung, betriebsbedingte Strömungsbeeinflussung).
Teile unter Betriebseinflüssen verändert.	Verzug, Gefüge, Rissbildung, Oberflächenbeeinflussung (z.B. Oxidation).
Verfahrensrelevante Schwachstellen nicht ausreichend bekannt.	Art, Eigenschaften von Fehlstellen, um sie als Schwachstellen zu definieren: Größe, Geometrie, Lage, Einfluss auf die Festigkeit.
Prüfverfahren (ZfP) nicht geeignet bzw. nicht ausreichend angepasst.	Erst wenn die Fehler erkannt sind, lässt sich das Verfahren optimieren oder ein geeignetes einsetzen.
Sehr begrenzter Aufwand möglich.	Zeitraum von Entwicklung bis zur Serie. Keine der Entwicklung von Neuteilen entsprechende Prüfstandserprobung. Konkurrenzdruck durch viele potenzielle Anbieter.
Langer Zeitraum bis zur statistisch ausreichenden Verifikation im Betrieb.	Schaden zeigt sich erst nach längerer Betriebszeit, d.h.: Viele Teile ausgeliefert bzw. verbaut. Teile längere Zeit am Lager, d.h. viele Teile betroffen, Logistikproblem. Bei vielen verbauten Teilen in laufenden Triebwerken hohes potenzielles Sicherheits- und Kostenrisiko
Besondere Anforderungen an Personal und Anlagen.	Begrenzte Ressourcen, keine spezifischen Kenntnisse zur Auslegung, kleine Serien.

! Wer Reparaturverfahren entwickelt oder anpasst, muss über besonders viel Erfahrung und ausgeprägtes "Ingenieurgefühl" verfügen. Seine Aufgabe ist auf keinen Fall weniger anspruchsvoll als die eines erfahrenen Konstrukteurs.

Bild 14.2-1

Bild 14.2-1: Von **neu entwickelten oder veränderten Reparaturverfahren** ist ein **höheres Risiko** zu erwarten als bei Neuteilentwicklungen. Dies liegt an ungünstigeren Rahmenbedingungen.

Betriebsbelastung: Gewöhnlich verfügt nur der OEM über ausreichende Kenntnisse zu Auslegungsphilosophie und Berechnungsdaten. Damit besteht beim unabhängigen Entwickler die Gefahr, dass Schwachstellen in ihrer Bedeutung nicht erkannt oder unterschätzt werden (Bild 14.2-3)

Häufig ist eine Reparatur notwendig, ohne die relevante Betriebsbelastung ausreichend zu kennen (Bild 14.2-4). Das liegt am **komplexen Zusammenspiel unterschiedlicher Schadensmechanismen**. So entzieht sich die Reparatur der ausreichend sicheren analytischen Behandlung bzw. Berechnung von Neuteilen. Die Betriebstauglichkeit des Neuteils wurde in umfangreichen Versuchsläufen und Nachweisen nach dem Prinzip „The engine will tell us“ (Band 1, Bild 3.2.2-2) nachgewiesen. Das ist für dynamisch hochbelastete Bauteile, die bei nur wenig erhöhter Schwingbelastung versagen können, besonders wichtig. So kann eine Reparatur mit abtragender Nacharbeit eine Resonanz ermöglichen (Bild 14.3-7).

Für **alte Triebwerkstypen** sind oft **beim OEM keine Erfahrungsträger** mehr vorhanden. In diesem Fall ist keine befriedigende Hilfestellung zu erwarten.

Der Betriebseinsatz kann **betreiber- und ein-satzspezifisch** stark variieren. Damit verändert sich die Wertung der schadensauslösenden Einflüsse stark.

Bauteilverhalten: Die Reparatur selbst kann das Schadensverhalten deutlich beeinflussen. So verhalten sich beispielsweise Lötnähte bei größeren Lötspalten spröde (Kapitel 14.2, Bild 12.2.1.4-9). Schweißungen können merkliche Zugeigenspannungen aufweisen, welche Schwingermüdung begünstigen. Ihre zu erwartende Festigkeit liegt unter der des Grund-

materials (Lit. 14.2-4). Damit kann das Thermoermüdungsverhalten in den Vordergrund treten, auch wenn die Reparatur wegen Oxidation oder Kriechen notwendig wurde.

Besonders heimtückisch sind Reparaturen die unbewusst das Schwingverhalten (Resonanz, Dämpfung, Bild 14.2-6) beeinflussen. Argwöhnisch sind **Reparaturbeschichtungen** zu behandeln. Auch hier kann die Schwingfestigkeit unerwartet abfallen. Typisches Beispiel sind spröde Erosionsschutzschichten auf Schaufelblättern, die bei kleinen FODs spröde ausplittern (Band 1 Bild 5.4.3.2-10 und Band 1 Bild 5.5.1.1-1). Ein weiteres Beispiel ist eine Reibungserhöhung an Schwalbenschwanz-Schaufelfüßen (Band 1 Bild 5.9.3-6 und Lit. 14.2-5). Das kann bei einer betriebsbedingten Alterung/Oxidation (Zeit, Temperatur) auftreten. Abhängig von dem gebildeten Oxidtyp kann ein Anstieg der Reibung die Fußbelastung (Anstrengung, Band 1 Bild 5.9.3-1) gefährlich erhöhen und Schwingungsanrisse begünstigen (Lit. 14.2-5).

Betriebsbedingte Veränderungen am zu reparierenden Bauteil:

Besonders erschwerend sind Veränderungen die eine der Neuteilfertigung vergleichbare **Konstanz der Bauteileigenschaften** verhindern. Hierzu gehören Beeinflussungen des Grundwerkstoffs wie **Gefügeveränderungen**. Sie beeinträchtigen das Schweißverhalten. Tiefer gehende Oxidation, z.B. in Rissen, erschwert eine Löt-reparatur. Auch das Entfernen (strippen) oxidierter Schichten kann wegen örtlichen Angriffs riskanter werden (z.B. Risskorrosion, Bild 12.2.1.7-10 und Lit. 14.2-4).

Veränderungen am Bauteil nach der Reparatur:

Abtrag durch Einflüsse wie Erosion, Oxidation und Anstreifen kann das Verhalten mit der Betriebszeit schadensbegünstigend verändern. Hierzu gehört eine **Veränderung des Schwingverhaltens** durch sonst beherrschbare Rissbildung oder Querschnittsschwächung. Auch

kann eine Oberflächenveränderung (Erosion, Oxidation, Ablagerungen) über das Reflexionsverhalten die Bauteiltemperatur beeinflussen (z.B. an Brennkammer oder Turbinenschaufel; Lit. 14.2-6). Wird ein solches Verhalten von einer Reparatur verändert, kann es nach längeren Laufzeiten unliebsame Überraschungen geben.

Verfahrensrelevante Schwachstellen können zu Fehlstellen und damit unzulässig werden (Band 1 Bild 3.2.2-1.1). Das ist der Fall, wenn diese in ihrer Auswirkung auf das Verhalten des reparierten Bauteils nicht ausreichend bekannt und definiert sind. Dieser Bewertung müssen sich besonders Reparaturschweißungen und -lötungen stellen.

Prüfverfahren: Zunächst ist die Definition lebensdauer- bzw. sicherheitsbestimmender Fehler einer Reparatur erforderlich. Erschwerend wirkt sich aus, dass anders als bei einem Neuteil, nicht selten die Grenzen für Schwachstellen erweitert werden müssen. Das kann beispielsweise bei Lötungen eine verfahrenstypische, d.h. unter Reparaturbedingungen unvermeidliche, nicht optimale Bindung oder ein sprödes Gefüge sein. Eine Reparatur in einer Bauteilzone, die am Neuteil nicht entsprechend geprüft wird, kann ein speziell **adaptiertes oder neues Prüfverfahren** erfordern. Dessen praxisgeeignete **Wirksamkeit ist mit der Reparaturentwicklung zu erproben und nachzuweisen**.

Grenzen des Entwicklungsaufwands für Reparaturen: Verglichen mit der Neuteilentwicklung erfolgt erfahrungsgemäß die Reparaturentwicklung in einem vom Aufwand her deutlich eingeschränkterem Umfeld. Häufig sind es akute Probleme, welche die verfügbare Zeit stark begrenzen. Das kann sich mit der Konkurrenz zwischen Reparaturbetrieben verstärken. Sie kann dazu verleiten, die Reparatur zu früh in den Serieneinsatz zu bringen

und damit das Risiko eines Misserfolgs mit umfangreichen Kosten zu erhöhen.

Ein genügender Zeitraum bis zum Betriebstauglichkeitsnachweis wie bei Neuteilen im Rahmen der Triebwerkserprobung ist oft bei Reparaturen so nicht möglich. Stattdessen werden „Fleetleader“ genutzt. Sie haben den Nachteil eines vergleichsweise großen Zeitraums (Jahre) für den Nachweis bis zur Serieneinführung.

Personal und Anlagen: Verglichen mit den Entwicklungsressourcen eines OEM sind die eines Repairshops begrenzter. Das beginnt bei den Auslegungsunterlagen sowie den zur Verfügung stehenden Spezialisten und endet noch nicht mit eher grundlagenbetonten Untersuchungs- und Versuchseinrichtungen. Damit verstärkt sich der Zwang zu **intelligenten und ressourcensparenden Lösungen**. Ein Repairshop benötigt dafür besonders erfahrene, qualifizierte und **anwendungsorientierte Mitarbeiter**. Vom Arbeitsspektrum her gesehen, werden eher höhere Ansprüche als in der Neuteilentwicklung gestellt.

Der **Maschinenpark** muss entsprechend den unterschiedlichen Bauteiltypen und kleineren Serien im Vergleich zur Neuteilfertigung besonders **flexibel** sein.

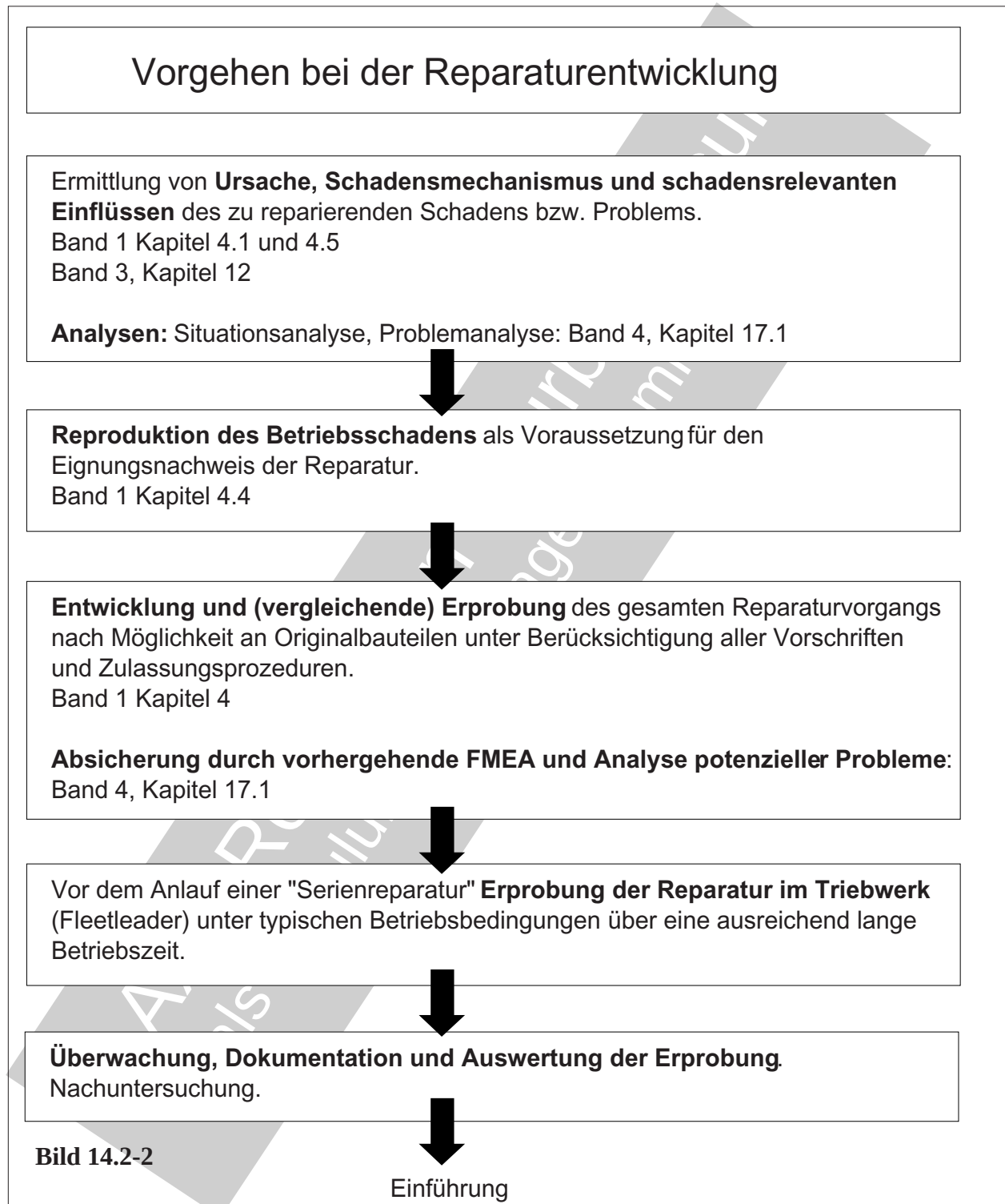


Bild 14.2-2(Lit. 14.2-1 und Lit. 14.2-2): Um besondere Risiken einer **Reparaturoentwicklung** (Bild 14.2-1) zu minimieren, lässt sich eine Abfolge **empfehlenswerter Einzelschritte** angeben.

Die **Ermittlung des ursächlichen Schadensmechanismus** ist Voraussetzung für eine Identifikation der **schadensrelevanten Einflüsse**. Grundlage ist eine systematische Schadens-/ **Problemanalyse**. Daraus ergeben sich die Ansatzpunkte für eine gezielte Abhilfe, auch in

Form einer Reparatur (Band 1 Bild 2.2.1-1 und Band 1 Bild 2.2.1-2).

Die **Reproduktion des Betriebsschadens** ist die **Voraussetzung für eine vergleichende Bewertung und Absicherung der Reparatur**. Ein einfacher Testaufbau für reproduzierbare, ausreichend betriebsnahe Ergebnisse ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Er gewährleistet einen akzeptablen Aufwand für Nachweise.

Entwicklung der Reparatur bzw. des Reparaturverfahrens sollte nach Möglichkeit **an Originalbauteilen und nicht an Proben** erfolgen. Dabei sind alle Vorschriften und Zulassungsforderungen zu berücksichtigen. Natürlich muss die Reparatur die notwendige **Lebensdauer mit ausreichender Sicherheit garantieren**.

Absicherung durch Analysen wie FMEA und Analyse potenzieller Probleme (Band 1 Bild 2-1 und Bild 2.2.1-2). Das Reparaturverfahren sollte mit absichernden Analysen auf seine möglichen unerwünschten Auswirkungen überprüft werden.

Eine **vergleichende Erprobung** ist erfahrungsgemäß für den Nachweis der Betriebstauglichkeit einer Reparatur das geeignete Mittel. Voraussetzung ist der geeignete Prüfaufbau (siehe oben). Die beste aber auch zeit- und kostenaufwändigste Prüfung ist wohl im Triebwerk mit realistischem Betrieb.

Auf eine abschließende **Erprobung im Triebwerk** (Fleetleader) sollte bestanden werden. Diese ist erfahrungsgemäß zeit- und kostenaufwändig. Sie dürfte jedoch die höchste Sicherheit gegen unliebsame Überraschungen (Verschlimmbesserung) gewähren. Eine **vergleichende Bewertung** ist anzustreben. Das ist bei einer großen Zahl gleicher Komponenten wie Schaufeln in „**Regenbogenläufen**“ möglich.

Überwachung, Dokumentation und Auswertung der Erprobung: Selbstverständlich sind nach einem aussagefähigen Betriebseinsatz die reparierten im Vergleich zu nicht reparierten Teilen genauestens zu bewerten und zu dokumentieren. Dieser Aufwand ist bereits zu Entwicklungsbeginn in **Zeit- und Kosten einzuplanen**.

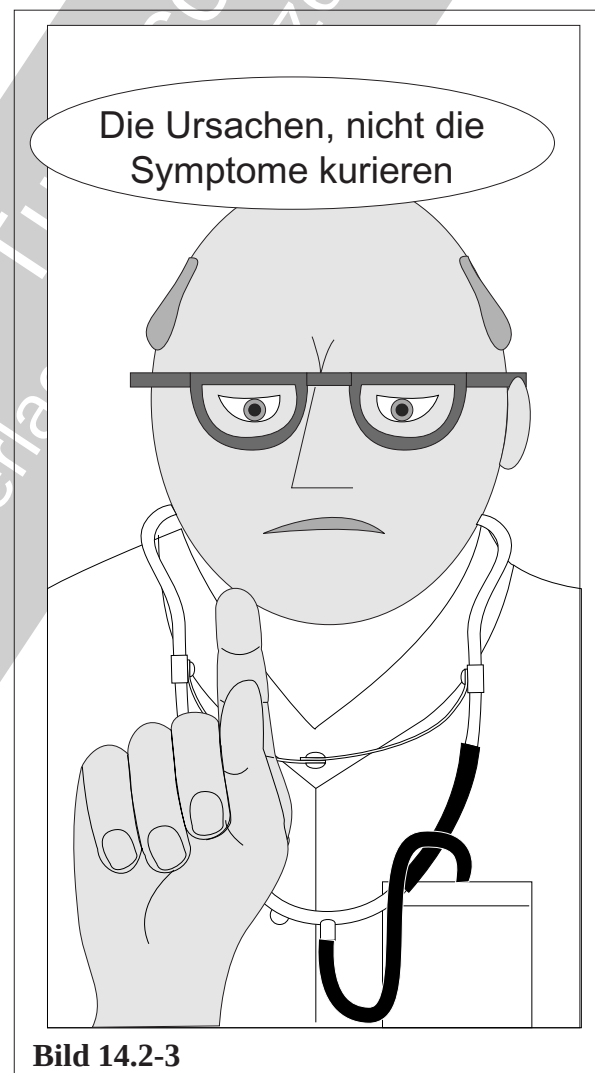


Bild 14.2-3

Bild 14.2-4 (siehe auch Band 1 Bild 2.2.2.4-2): Es ist davon auszugehen, dass in vielen Fällen, z.B. bei **Reparaturschweißungen** (Band 1 Bild 5.4.2.2-4) und **-lötungen**, kein dem Neuteil entsprechendes Betriebsverhalten zu erwarten ist. Das kann eine verkürzte Lebensdauer bedeuten, aber auch den Versagensmechanismus beeinflussen. Damit ist eine Abstimmung von Wartung und Inspektion auf ein solches Verhalten notwendig.

Bei Reparaturen muss man die zum Schaden führenden bauteil- und betriebsspezifischen Betriebsbelastungen kennen und berücksichtigen. Das erfordert viel Erfahrung!

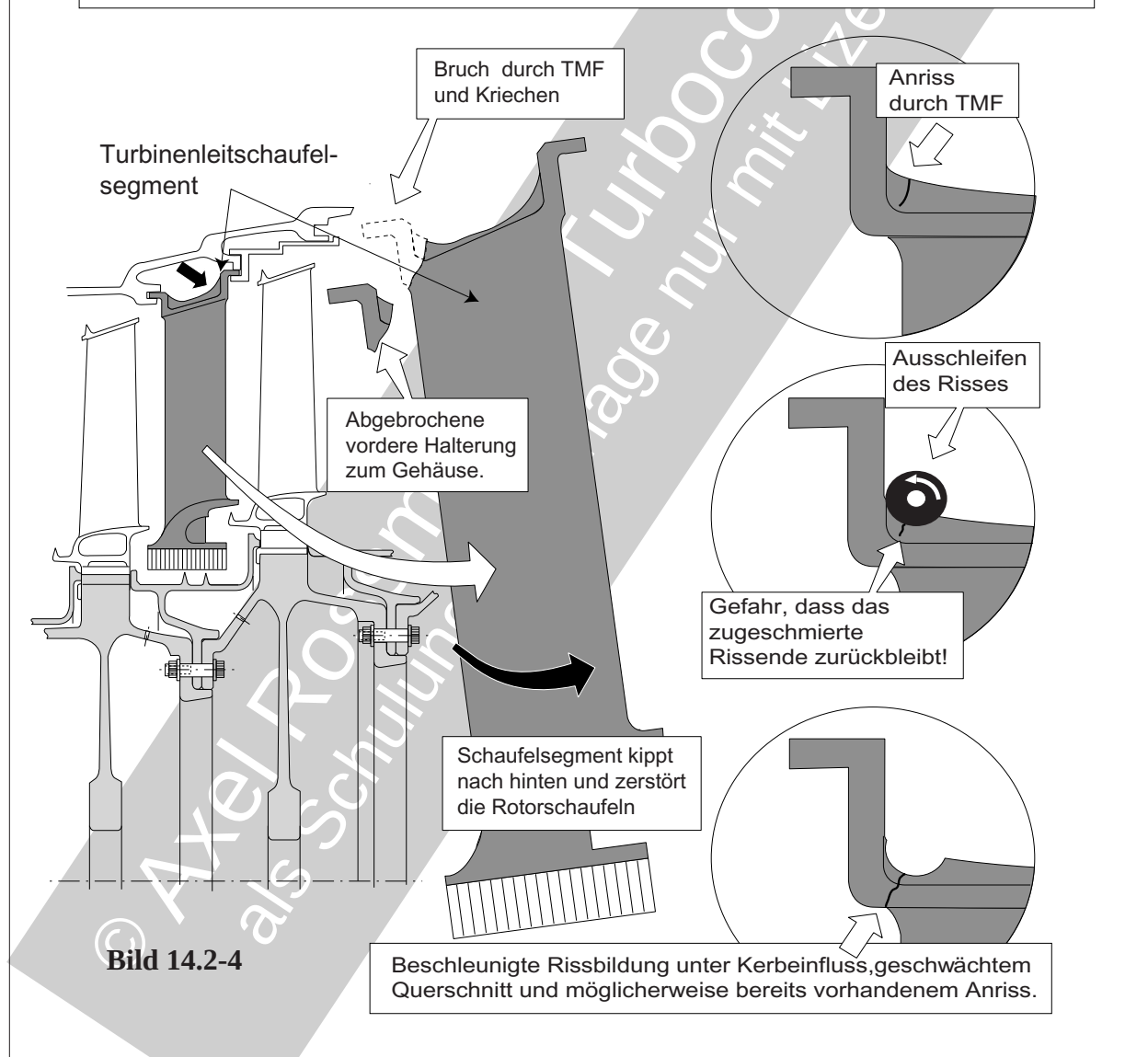


Bild 14.2-4: Das Beispiel zeigt, wie wichtig „Hintergrundkenntnisse“ des OEM über Auslegung und Belastungsverteilung eines Bauteils sind.

Diese in Segmenten angeordneten Niederdruckturbinenleitschaufeln weisen über dem äußeren Deckband einen versteifenden Steg auf (Skizze Mitte). Hier kam es zur Rissbildung

(Detail oben rechts) mit Merkmalen von **Thermoermüdung** (Band 1 Bild 5.4.2.1-10).

Als Abhilfemaßnahme wurde eine Reparatur eingeführt. Risse, die eine bestimmte Tiefe nicht überschritten, wurden ausgeschliffen (Detail Mitte rechts). Diese entstehende Ausnehmung am Steg erhöhte die **elastische Nachgiebigkeit**. Man ging davon aus, dass so Wärmespan-

nungen besser ausgeglichen werden können, was die Thermoermüdungsbelastung vermindert. Nach der Einführung traten jedoch **im Betrieb gefährliche Risse** auf, die im Extremfall zum **Bruch der Haltenase** führten (mittlere Skizze). Die nach rückwärts kippende Schaufel konnte am dahinterliegenden Rotor (Skizze links) schwere Schaufelschäden verursachen. Erschwerend kam hinzu, dass die Bauteile am Steg nicht im eingebauten Zustand auf Risse kontrolliert werden konnten.

Es zeigte sich, dass die **Reparaturarbeit den Versteifungssteg schwächte** und eine Kerbwirkung erzeugte, die offensichtlich Thermoermüdungsrisse weiterhin entstehen ließ. Die nach hinten gerichteten hohen **Gasbiegekräfte** führten dann zu einer Kriechüberlastung des verbliebenen Querschnitts.

Als Abhilfe wurde eine **Konstruktionsänderung** mit einem deutlich massiveren Versteifungssteg eingeführt, die sich bewährt hat.

© Axel ROSSMANN - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Die Sicherheit von Reparaturprozessen hängt nicht zuletzt von der Kenntnis bauteil- und verfahrensspezifischer Schadensmechanismen ab.

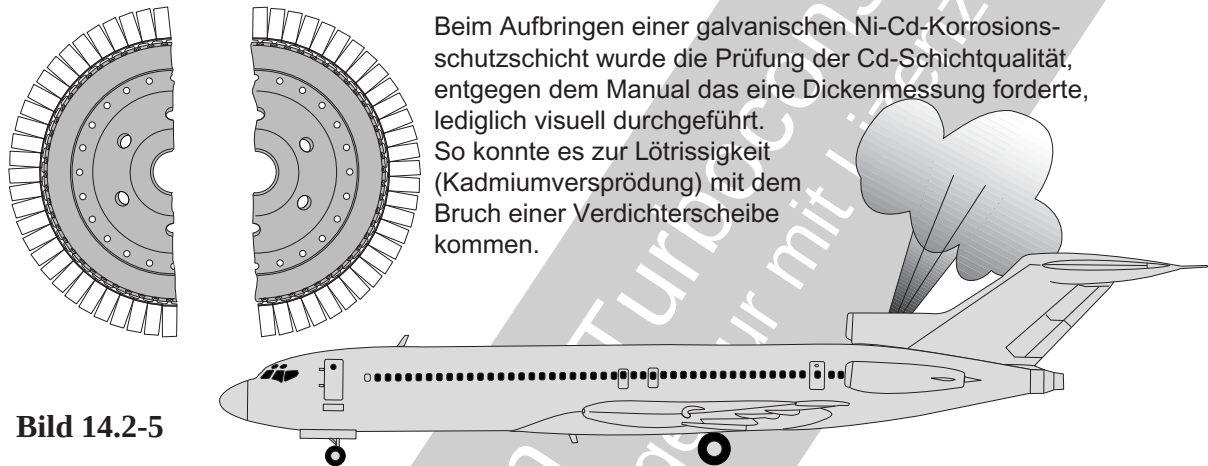


Bild 14.2-5 (Lit. 14.2-3): Bei älteren Triebwerkstypen, in denen noch häufig rostende Stähle an hochbelasteten Komponenten wie Rotorscheiben und Gehäusen zum Einsatz kommen, wird **Kadmium** (Cd) als **Korrosionsschutz** eingesetzt. Kadmium kann an zugspannungsbelasteten Bauteilen bereits bei **Betriebstemperaturen von wenigen hundert °C Versprödung und Rissbildung** auslösen (Bild 12.2.1.8.3-8 und Bild 14.1-5). Dieser als LME bekannte Vorgang (Band 1 Kapitel 5.8) ist äußerst gefährlich (Bild 14.1-5 und Lit. 14.2-4). Im dargestellten Fall kam es zum Bruch einer Verdichterscheibe.

Die Untersuchung zeigte, dass keine ausreichende, entsprechend der Vorschrift schützende Nickelschicht zwischen Kadmium-Korrosionsschutz und Grundmaterial vorhanden war. Eine Überprüfung des Beschichtungsprozesses im Überholshop ergab einen **ungeeigneten Verfahrensablauf** als Hauptschadensursache. Offenbar war **die potenzielle Gefahr dieser bei einer Überholung vorzunehmenden Neubeschichtung nicht bekannt oder nicht bewusst**. Dies dürfte der Grund für den Qualitätsmangel gewesen sein.

Als **Abhilfe** wurden **Überprüfungen** (engl. audits) der Shops die solche Beschichtungen vornehmen durchgeführt. Zusätzlich erfolgte eine **Belehrung** über die Gefährlichkeit einer Kadmium-Versprödung.

Bild 14.2-6 (Lit. 21.3.3-4):

Vorgeschichte:

Fast 20 Jahre vor diesem Unfall (Rahmen oben) waren bereits **Schwingerermüdungsbrüche** (HCF) an der **Scheibe** der 14. Verdichterstufe (Hochdruckverdichter, Detail unten links) aufgetreten. Einer erfolgte im Betrieb und einer beim Test eines neuen Triebwerks am Prüfstand. In beiden Fällen handelte es sich um Triebwerke mit Änderungen, die eine **Lockerung des äußeren radialen Zentriersitzes** zwischen 12. und 14. Statorstufe bewirkten. Zusätzlich war die **Labyrinthdichtfläche** (inner airseal) der 13. Statorstufe **axial versetzt** worden.

Eine Untersuchung beim OEM zeigte damals als Ursache eine **Schwingung** des Labyrinths bei hoher Triebwerksleistung. Ein verschleißbedingter lockerer Sitz zwischen 12. und 13. Stator machte größere Schwingungen des Stators möglich. Diese regten Schwingungen der Rotorscheibe der 13. Stufe an.

Maßnahmen und Abhilfen: Nach dieser Erkenntnis wurde eine **für die Lockerung der Statorzentrierung verantwortliche Konstruktionsänderung rückgängig gemacht**. Zusätzlich wurden die Montagespezifikationen angepasst. Das galt für alle Triebwerke mit der ungünstigen Konfiguration. Auch die Scheibengeometrie wurde optimiert. Diese Maßnahmen senkten die Schwingbelastung auf ein erträgliches Maß. **Leider trat nun eine, wenn auch niederenergetische Anregung bei geringer Triebwerksleistung auf.**

Akuter Schadensfall:

Ein Segment mit 20 Schaufeln war am Kranz über dem Zentrieransatz (engl. snap) ausgebrochen (Skizze unten rechts). Die Bruchfläche zeigte eine halbmondförmige **Schwingbruchzone**, die entsprechend den ausgeprägten Rastlinien von der **Scheibenrückseite** aus-

ging. Die weitere Untersuchung ergab, dass ein zweiter vergleichbarer Riss auf der Scheibenrückseite existierte.

Im **Bruchausgang** ließ sich eine **Vorschubmarkierung** des Zerspanungswerkzeugs (engl. feed line) von der **Nacharbeit im Übergangsradius** erkennen (siehe Maßnahmen und Abhilfen in der Vorgeschichte). Diese Nacharbeit führte offenbar zu einer **Toleranzabweichung am Zentriersitz**, die außerhalb der Zeichnungsangaben lag.

Weiter wurde festgestellt, dass auf den Statorzentrierungen der 12. und 13. Stufe **eine vorgeschriebene harte Verschleißschuttschicht** fehlte. Es handelte sich um den **Fehler einer früheren Reparatur/Nacharbeit** im Rahmen einer Überholung.

Die Wand des **Befestigungsflanschs** am inneren Deckband des Stators der 13. Stufe hatte 0,5 - 0,7 mm **Untermaß**.

Stator und Rotor wiesen ähnliche Schwingrisse auf.

Die vordere Kante des inneren Statordeckbands der 13. Stufe fehlte.

Nach Erfahrungen der **Vorgeschichte** bewertete man diese Abweichungen als ausreichend für eine gefährliche Schwinganregung der Verdichterscheibe.

Auch in anderen Bauteilen des Triebwerks wie der 12. Statorstufe und dem **Diffusorgehäuse** (Verdichteraustrittsgehäuse) wurden Schwingrisse gefunden. Möglicherweise hat der gerissene Diffusor die Anregung der Scheibe begünstigt. Andere Risse wurden als Folgeschäden eingestuft.

Als schadensursächlich für die verbliebene oder neue (?) **Schwinganregung bei niedriger Triebwerksleistung** gilt im beschriebenen Fall auch die 'verbesserte' Konfiguration (siehe 'Maßnahme und Abhilfen' der Vorgeschichte). Damit handelt es sich auch hier um eine Verschlimmbesserung.

Ein Fall von "Verschlimmbesserung", die besondere Gefahr bei Reparaturen.

Nach ca. 20 Sekunden während des Abhebens hörte die Besatzung einen lauten Knall und das Flugzeug zog nach links. Der Start wurde sofort abgebrochen. Anfangs wurde fälschlicherweise auf einen Reifenplatzer geschlossen. Nach ca. einer Minute wurde ein Feuer im Bereich der Flügelhinterkante beobachtet. Eine Notevakuation wurde eingeleitet. Das Feuer zerstörte das Flugzeug. Die folgende Untersuchung des Triebwerks zeigte, dass der Unfall auf den Bruch einer Verdichterscheibe zurückzuführen war.

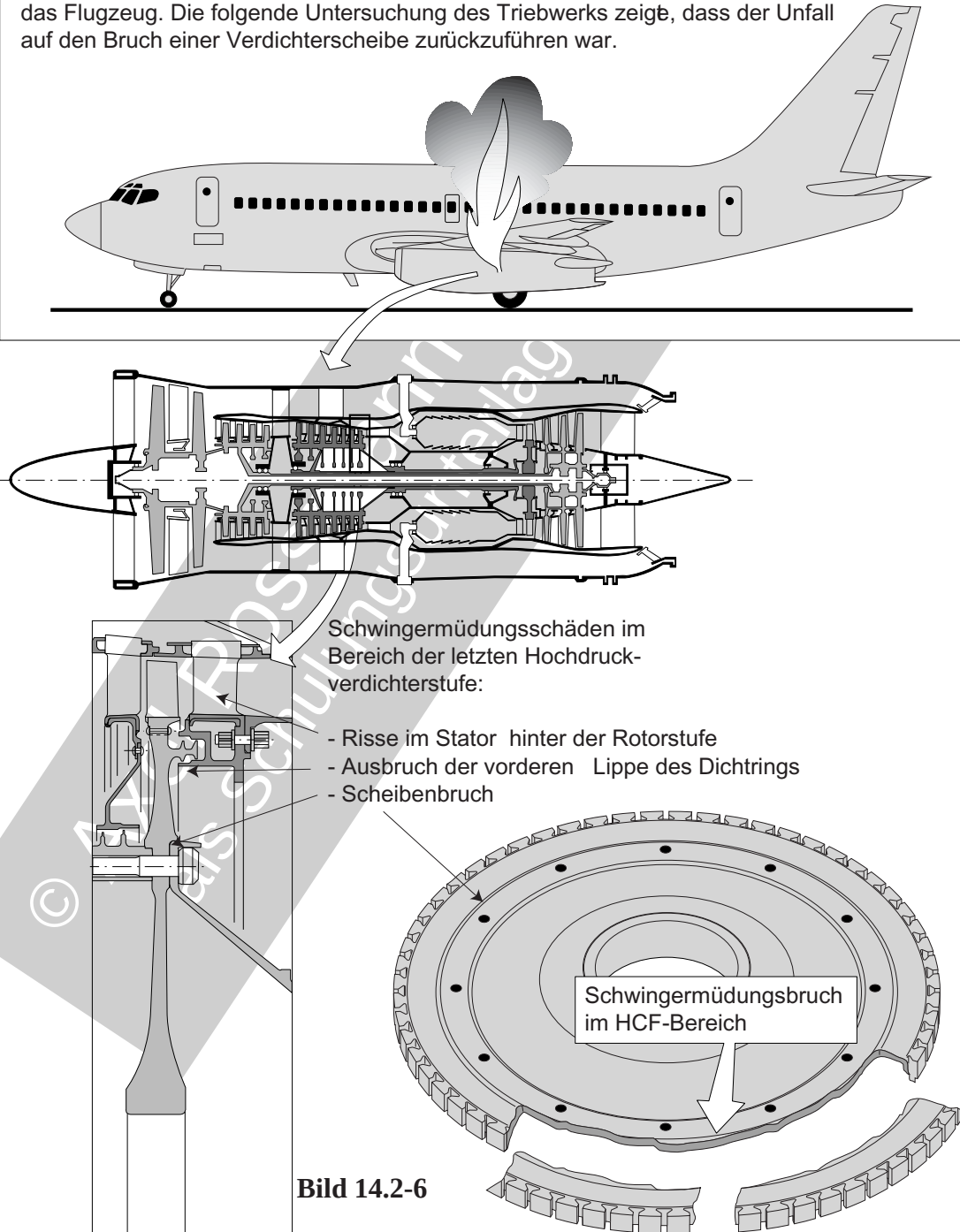
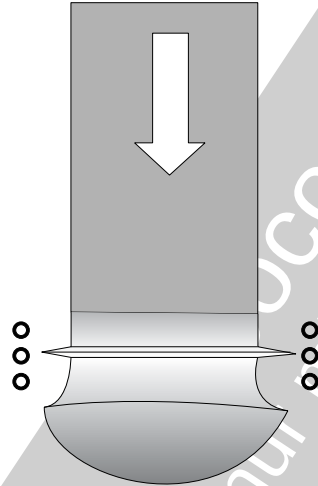


Bild 14.2-6

Literatur zu Kapitel 14.2

- 14.2-1** P.C.Patnaik, R.Thamburaj, „Development of a Qualification Methodology for Advanced Gas Turbine Engine Repairs/Reworks“, Paper RTO MP-17, des RTO AVT Workshops on „Qualification of Life Extension Schemes for Engine Components“, Corfu, Greece, 5-6 October 1998, Seite 12-1 bis 12-11.
- 14.2-2** Department of Defense Handbook, „Engine Structural Integrity Program (Ensip)“, MIL-HDBK-1783B, w/Change 2, 22 September 2004, Seite 1-176.
- 14.2-3** J.Hall, „Safety Recommendation, In reply refer to: A-00-61 and -62“, National Transportation Safety Board, June 28, 2000.
- 14.2-4** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5, 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 21.2.1, Bild 21.2.3-4, Kapitel 21.2.4
- 14.2-5** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2, 2000, ISBN 3-00-008429-0, Bild 6.1-10., Bild 6.1-20.
- 14.2-6** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Bild 11.2.2.1-7.
- 14.2-7** TSB Canada, Aircraft Accident Report 84-H40003, „Uncontained Failure, 22. March 1984, Boeing 737-200“, Seite 1-27.

14.3 Zulassung eines Reparaturverfahrens.



Ziviler Bereich: Hier gilt für sicherheitsrelevante Reparaturen beispielhaft das Vorgehen der amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA.

Die Entwicklung eines von den **zuständigen Behörden** (z.B. FAA, EASA, Lit. 14.3-1) bzw. deren „**Administrator**“ zulassungsfähigen Reparaturverfahrens setzt **beim Entwickler besondere Fähigkeiten, Ressourcen und Eigenschaften** voraus (Bild 14.3-1, Lit. 14.3-2). Diese sind für die Zulassung des Entwicklers (engl. applicant) nachzuweisen. „Der Administrator kann eine Firma oder Privatpersonen mit der Prüfung, mit Versuchen und Inspektionen sowie mit der Zulassung beauftragen. **Ermessensspielraum** kann indessen nicht übertragen werden“.

Für die **Betreuung von Reparaturentwicklungen** können von der Luftfahrtbehörde ernannte Fachleute, beispielsweise FAA appointed **Designated Engineering Representatives (DERs)** genutzt werden (Lit. 14.3-3). Sie sind mit den für die Zulassung verantwortlichen Behördenstellen und den Abläufen vertraut und sorgen für einen **vorschriftsgerechten Ablauf**. Dazu erstellen sie im Auftrag des Shops die **erforderliche Dokumentation** für die Vorlage bei der Zulassung. Es handelt sich um Versuchspläne, Beobachtungen/Ergebnisse, Berichte u.s.w. Natürlich muss auch die **Qualitätssicherung** mitentwickelt bzw. erprobt und nachgewiesen werden. Weiter unterstützen sie Informationen in der Organisation des Entwicklers.

In den überwiegenden Fällen von Reparaturentwicklungen wird es notwendig sein, den **OEM rechtzeitig einzubeziehen** (Bild 14.3-4). Nur er verfügt über das **ausreichende Wissen zur Auslegung der Bauteile, Betriebsbelastungen, potenziellen Schadensmechanismen, Werkstoffbesonderheiten, Herstellungsverfahren und Lebensdauern**. Das macht seine Beurteilung beim Zulassungsverfahren bzw. der Zulassungsbehörde wichtig. Ein nachträglicher **Einspruch des OEM** kann weitreichende Folgen haben (Bild 14.3-4).

Der Ablauf, die **Verfahrenszulassung und die Anwendung** müssen in jeder Beziehung **vorschriftenkonform** sein. Ist dies nicht der Fall, können die Reparaturteile beispielsweise als

Suspected Unapproved Parts (Lit. 14.3-6) eingestuft werden. **Begleitpapiere** geben Auskunft über den Status eines Teils (für Neuteile siehe Lit. 14.3-6).

Das **für eine bestimmte Anwendung zugelassene Reparaturverfahren** kann nicht ohne Zustimmung der Behörden auf andere, auch scheinbar vergleichbare Bauteile oder Anwendungen übertragen werden (Bild 14.3-3). Dies ist durchaus verständlich, wenn man an die betriebspezifischen Betriebsbelastungen denkt (z.B. Kurzstrecken- oder Langstreckeneinsatz).

Bei dem sog. **Risk and Revenue - Prinzip im zivilen Bereich trägt der Entwickler** als Partner bei **Problemen** mit Neuteilen, anders als in militärischen Projekten, die **Konsequenzen** mit (Kosten, juristisch). Das gilt auch für Reparaturen.

Militärischer Bereich:

In diesem Fall scheinen nationale Unterschiede in der Vorgehensweise zu bestehen. Im Folgenden werden zwei typische Szenarien betrachtet, die aber keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit haben.

Ein Kriterium dürfte sein, ob das **Militär Reparaturen und deren Entwicklung selbst vornimmt**. Hier dürften **Entwicklung, Erprobung und Zulassung in eigener Verantwortung** erfolgen.

Wird die **Reparatur von einem zivilen Hersteller übernommen**, dürfte dieser zumindest **Entwicklung und Labornachweise** unter Begleitung einer staatlichen Aufsicht (z.B. Güteprüfstelle) durchführen. Die Erprobung im Triebwerk, am Prüfstand oder in der Zelle (Erprobungsstellen) als auch die Bewertung und Zulassung liegt dann beim militärischen Betreiber.

Weil im **militärischen Bereich die zulassende Institution auch gleichzeitig Betreiber und Erprober ist**, trägt hier, anders als im zivilen Bereich, vertragsabhängig die zulassende Stelle die **Konsequenzen** (Kosten) mit.

Bild 14.3-1 (Lit. 14.3-1 und Lit. 14.3-2): Die Vorschrift **Federal Aviation Regulation Subtitle No. 36 (SFAR No.36)** der amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA kann als allgemeingültige Vorlage auch für andere Länder gelten (Lit. 14.3-1). Sie regelt die Reparatur von Luftfahrtbauteilen. Dazu gehört das Vorgehen bei Entwicklung und Zulassung (Bild 14.3-2) von Reparaturen bzw. Reparaturverfahren.

Bild 14.3-2 (Lit.14.3-2): Die **Entwicklung und Zulassung von Reparaturverfahren** ist eine anspruchsvolle und verantwortungsvolle Aufgabe (Bild 14.3-1). Die Instanz mit dem **entscheidenden, nicht delegierbaren Ermessens-**

Bevor Bauteile für Flugtriebwerke repariert werden können, muss einer Vielzahl von Forderungen und Nachweisen entsprochen werden.

Die FAA ist für Sicherheitsbelange im Luftverkehr (der USA) zuständig. Ihre Forderungen können als international richtungsweisend gelten und sind deshalb auch dort einzuhalten. Hierzu gehören unter anderem:

- Abschluss von Verträgen zur Förderung der Forschung im Luftverkehrsbereich, auch Prototypen. In diesem Zusammenhang gehört zu den Aufgaben der FAA:
- Technologien entwickeln und Informationen zur Analyse der Wirkungsweise von Konstruktionen hinsichtlich der Wirkungsweise, Materialermüdung und Sicherheit sammeln und auswerten.
 - Systeme, Verfahren und Einrichtungen verbessern, verändern, testen und auswählen.
 - Untersuchung des Einflusses der "Human Factors" auf Unfälle.
 - Zulassungswesen und Ausstellung von Sicherheitsbescheinigungen, dazu gehören:
 - Typenzertifikate
 - Produktionszertifikate
- **Reparatur- und Wartungsstätten.** Diese Aufgabe wird in folgender Vorschrift definiert: Federal Aviation Regulation Subtitle No. 36 (SFAR No36). Alle Zulassungen beruhen letztlich auf Entscheidungen im Rahmen dieser Vorschrift die auch Tests und zusätzliche Auflagen beinhalten können. In diesem Rahmen sind auch die **OEM's eingebunden**. Die Vorschrift behandelt Gebiete wie:
 - Reparaturdaten und Rückführung der Teile in den Betrieb
 - Definition der Voraussetzungen für einen Antragsteller einer Zulassung
 - Handbuch des zugelassenen Prozesses
 - Zeitliche Begrenzung einer Zulassung
 - Übertragbarkeit einer Zulassung
 - Inspektionen zur Überprüfung der Zulassung
 - Grenzen der Anwendbarkeit einer Zulassung
 - Forderung der Nachweise durch die Überprüfung von Daten und Betriebserfahrung
 - Dokumentation notwendiger Daten.
- Beauftragung von Firmen oder Privatpersonen mit Prüfungen, Versuchen und Inspektionen.
- Prüfung von Genehmigungen auf internationaler Ebene um sicherzustellen, dass Flüge in die USA internationalen Sicherheitsstandards genügen.

Bild 14.3-1

*spielraum ist die zulassende Luftfahrtbehörde (hier FAA). Der Entwickler einer Reparatur, wird in Vorschriften auch als „applicant“ bezeichnet. Es kann sich um den OEM, einen Betreiber (Fluglinie) oder eine unabhängige **Reparaturentwickler/-werkstatt** (engl. repair-shop) handeln. Ein Repairshop muss für die Behördenzulassung **Voraussetzungen** erfüllen. Das betrifft besonders die **Organisation mit der Qualifikation des Personals** und die **Dokumentation** (Vorschriften, Handbücher, Rahmen unten). Der Repairshop kann sich für die Betreuung einer Reparaturentwicklung und als*

*Kontakt zur Zulassungsbehörde eines sog. **Designated Engineering Representative (DER)** bedienen. Dies ist eine von der Luftfahrtbehörde bestätigte, in solchen Aufgaben erfahrene Person. Dazu müssen die notwendigen Nachweise und Expertisen vorgelegt werden. Der OEM ist in das Zulassungsverfahren eingebunden. Er berät bei der Entwicklung, hilft bei **Definition und Durchführung der Erprobung im Triebwerk** und bewertet die Tauglichkeit. Damit hat er gegenüber der Zulassungsbehörde zumindest **eine wichtige Beraterfunktion**.*

Die Entwicklung und Zulassung einer Reparatur vollzieht sich in einer festgelegten Organisation mit Aufgaben/Pflichten und Rechten.

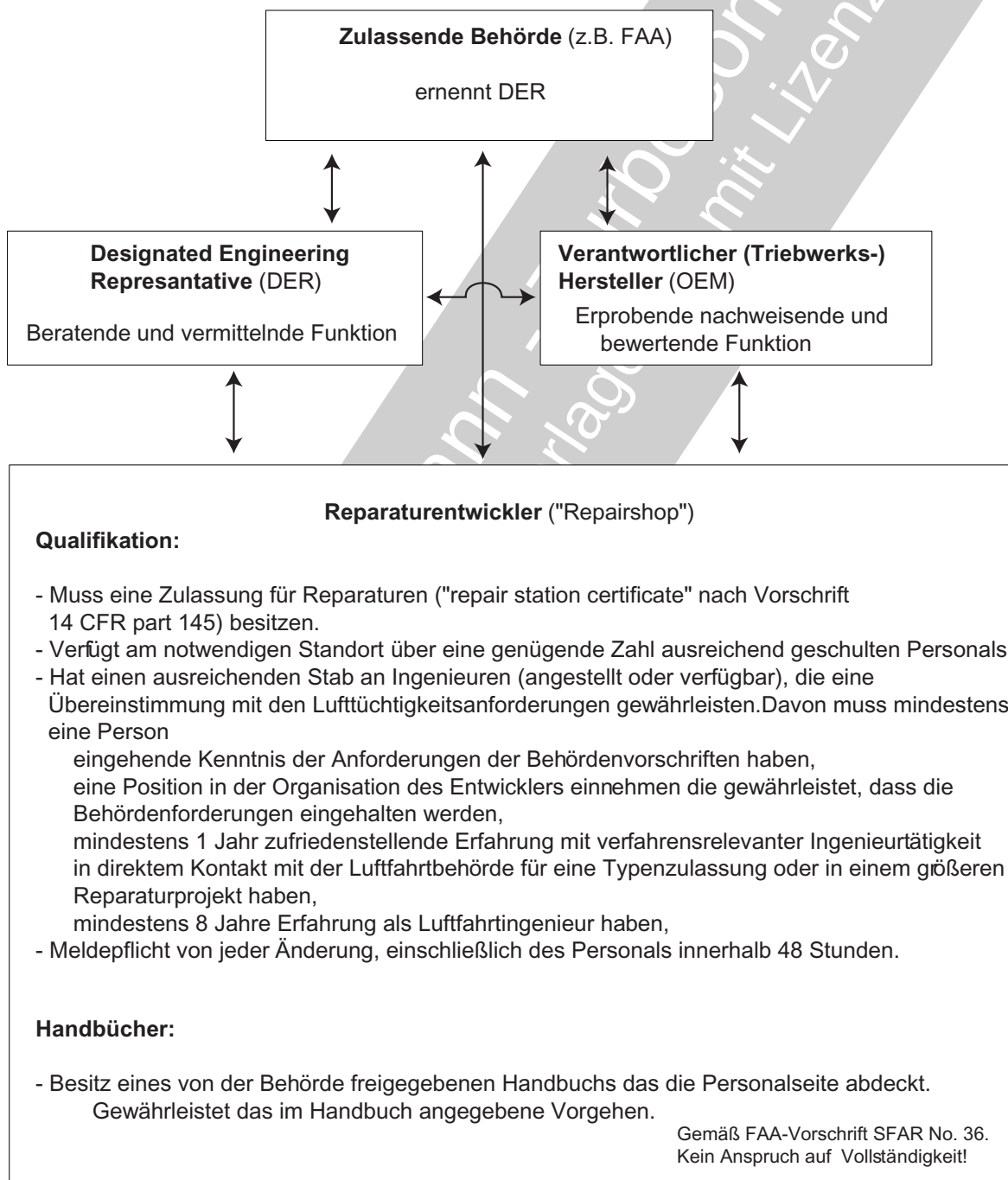


Bild 14.3-2

Bei der Reparatur besteht im Vergleich zur Neuteilfertigung ein erhöhtes Risiko der schädigenden Veränderung.

Folgen einer unbeabsichtigten Einwirkung von Prozessbädern (Ätzen, Entlacken, Reinigen), Strahlverfahren und Hilfsstoffen (z.B. KSS)

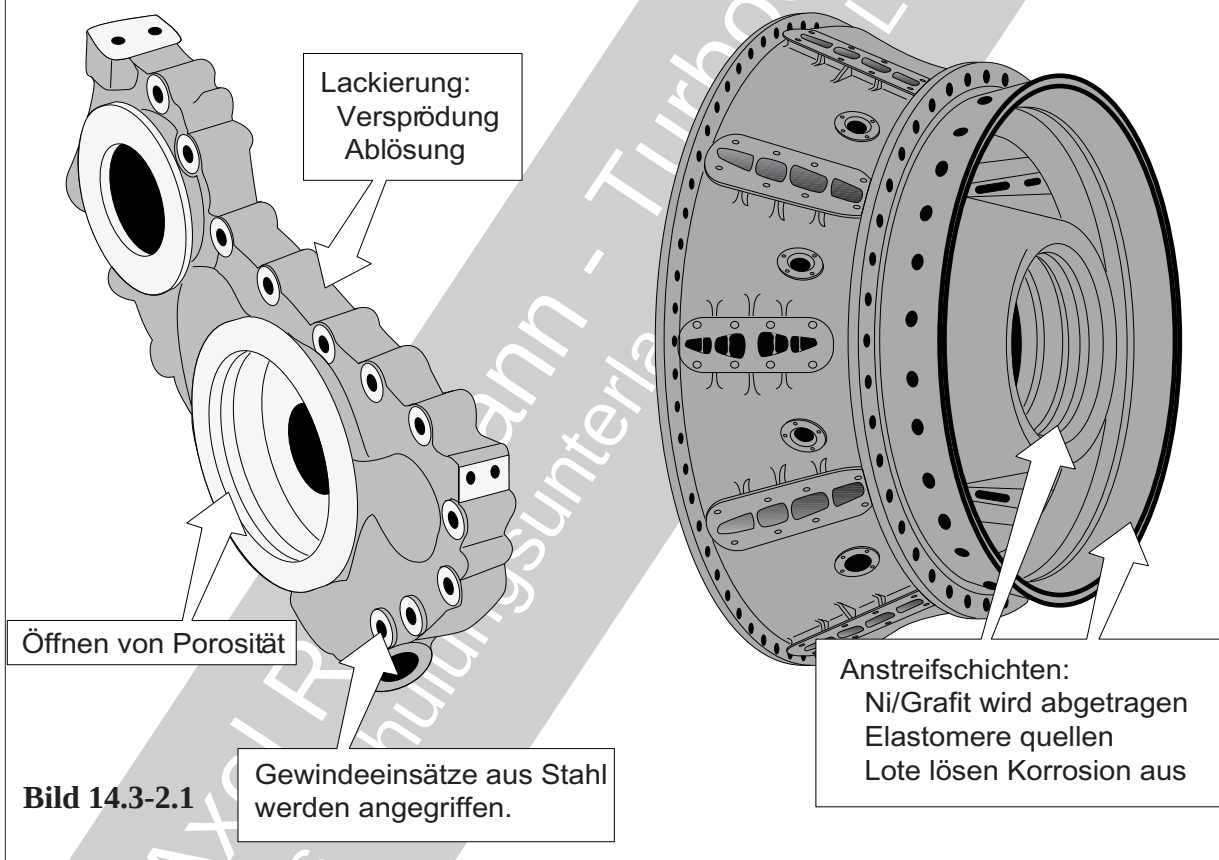


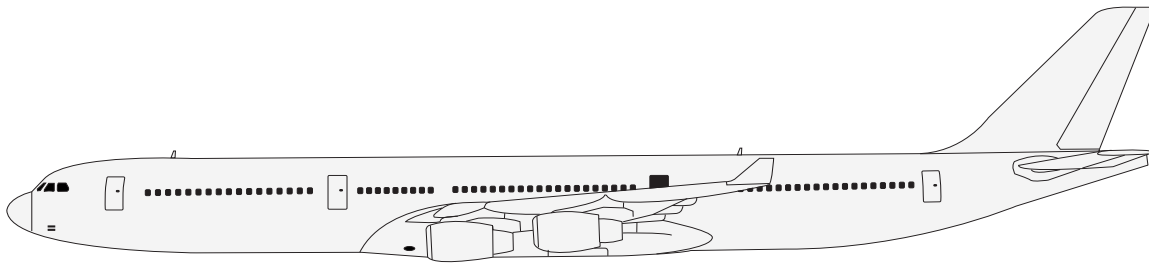
Bild 14.3-2.1: Selbst wenn die zu reparierenden Bauteile nicht durch den Betrieb bedenklich in Ihren Eigenschaften verändert sind (Bild 14.3-2) können **Verfahren der Neuteilherstellung problematisch** sein. So muss die Entwicklung einer Reparatur berücksichtigen, wenn sich das **Bauteil vom Neuteil durch eine Kombination von Technologien** (z.B. Beschichtungen) und **Elementen** (z.B. Gewindeeinsätze) unterscheidet. Damit sind die Fertigungsprozesse der Neuteile nur noch eingeschränkt anwendbar.

Ein Beispiel sind Anstreifbeläge in Verdichtergehäusen. Bestehen diese aus **Silikon gummi**

der mit Glasperlen gefüllt ist, kann sie **Kühlschmierstoff** (KSS) zum **Quellen** bringen. Das ist offenbar reversibel, doch ist zumindest eine zeitweise Beeinträchtigung der Haftfestigkeit zu erwarten.

Merksatz:

Der Bauteilzustand muss eine mögliche **Schädigung integrierter Komponenten bzw. Technologien** durch den Reparaturprozess berücksichtigen.



Reparaturen die an einem Triebwerkstyp und/oder für eine Anwendung bzw. einen Betreiber zulässig sind können bereits bei Varianten oder veränderten Einsätzen unzulässig sein. Werden Reparaturen bei solchen Veränderungen übertragen, erfordert dies die genaue Kenntnis der Betriebsbelastungen und des Einflusses der Reparatur auf das Betriebsverhalten. Diese Kenntnisse hat gewöhnlich nur der OEM.

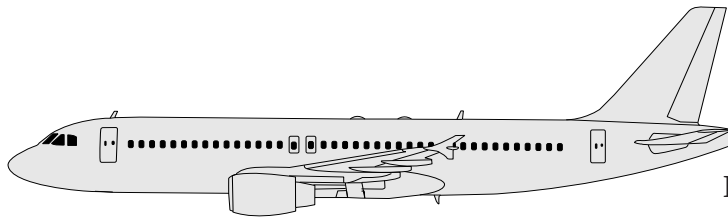


Bild 14.3-3

Bild 14.3-3 (Lit. 14.3-2): Zwar spielt die **Betriebs- und Verfahrenserfahrung** für den **Einsatz einer Reparatur** eine wichtige Rolle bei der Zulassung (Bild 14.3-1 und Bild 14.3-2). Dies ist aber **nicht ausreichend**, um die Reparatur **ohne eine weitere Zulassung** durch die zuständige Behörde an anderen Teilen einzuführen. Das gilt auch dann, wenn diese vergleichbar, bzw. Varianten oder gleiche Teile in einem anderen Betriebseinsatz sind. Eine solche Einschränkung hat wichtige, nicht zuletzt sicherheitsrelevante Gründe.

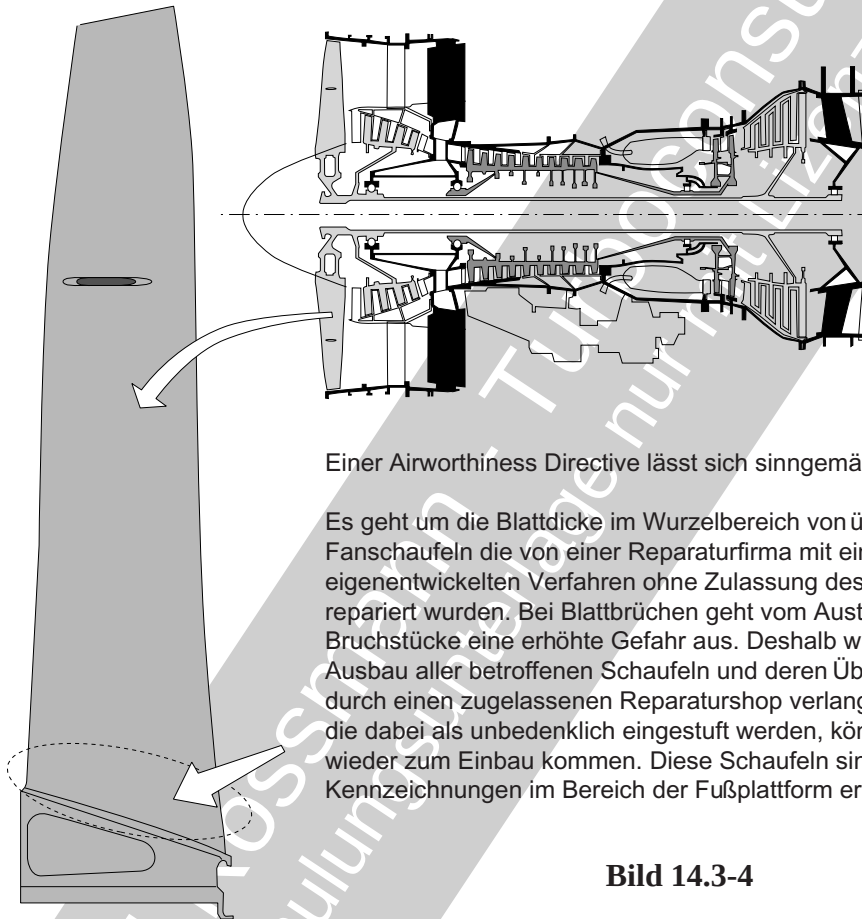
Klar ist, dass sich die lebensdauerrelevante **Betriebsbelastung in Höhe und Art** von Bauteilen der gleichen Funktion (z.B. HD-Turbinenrotorschaukeln) in **verschiedenen Triebwerkstypen** deutlich unterscheiden kann. Verständlich ist auch, dass sich beim **gleichen Triebwerkstyp** die Thermoermüdung der

Heißeile auf Grund der **Startzyklenzahl** im **Kurzstreckeneinsatz vom Langstreckeneinsatz** deutlich unterscheidet.

Selbst die **Flugroute**, z.B. die Höhenlage eines häufig angeflogenen Startflugplatzes, kann einen deutlichen Unterschied ausmachen. Das hat Auswirkungen auf die Belastung der Reparatur und damit die Bauteillebensdauer. Das gilt sogar für den **Versagensmechanismus** (z.B. Thermoermüdung statt Kriechen), der als Tauglichkeitsnachweis der Reparatur-erprobung zu Grunde lag.

Es bedarf also besonderer Expertise, die eine Bewertung durch den **für die Auslegung verantwortlichen OEM** notwendig macht. Sie ist eine Voraussetzung für die Zulassung einer, bereits in anderen Fällen erfolgreichen, Reparatur (Bild 14.3-4).

Die Anwendung nicht vom OEM zugelassener Reparaturen kann sicherheitsrelevant und sehr teuer werden.



Einer Airworthiness Directive lässt sich sinngemäß entnehmen:

Es geht um die Blattdicke im Wurzelbereich von über 500 Fanschaufeln die von einer Reparaturfirma mit einem eigenentwickelten Verfahren ohne Zulassung des OEM repariert wurden. Bei Blattbrüchen geht vom Austritt der Bruchstücke eine erhöhte Gefahr aus. Deshalb wird der Ausbau aller betroffenen Schaufeln und deren Überprüfung durch einen zugelassenen Reparaturshop verlangt. Schaufeln, die dabei als unbedenklich eingestuft werden, können dann wieder zum Einbau kommen. Diese Schaufeln sind an Kennzeichnungen im Bereich der Fußplattform erkennbar.

Bild 14.3-4

Bild 14.3-4 (Lit. 14.3-5): In einer Airworthiness Directive (=AD, Lufttüchtigkeitsanweisung) fordert die zuständige Luftfahrtbehörde (FAA) für angegebene Teilenummern (Part Number = PN und Serial Number = S/N) eines bestimmten Triebwerkstyps eine **Maßüberprüfung der Fanschaufel im Übergangsbereich zur Fußplattform** (Skizze links). Diese Bauteilzone wird vom OEM als kritisch angesehen. Das führte zu folgenden Forderungen:

Die Überprüfung muss von einer vom OEM dafür anerkannten Reparaturstation erfolgen. Begründung für das Vorgehen:

Zitat: „This AD results from a report that a repair station **created their own repair** and performed it on 520 1st stage fan blades, **without approval from ... (the OEM).**“

Damit erhöht sich offenbar nach Befürchtungen des OEM das Risiko eines Fanschaufelbruchs mit Bruchstückaustritt (engl. *uncontained failure*).

Der OEM verlangt für die Anerkennung eines Reparierers (repair station) einen Nachweis (source demonstration) des Reparaturvorgangs.

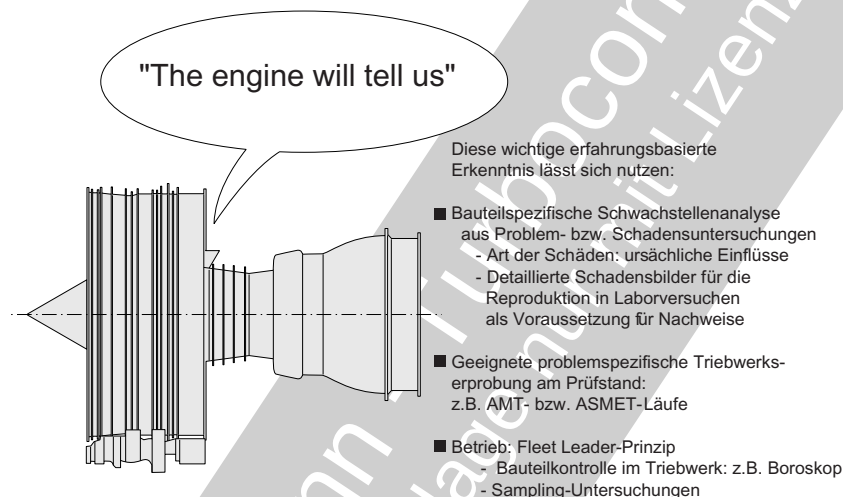
Identifizierte Schaufeln müssen ausgebaut und an einen für die Maßprüfung vom OEM zugelassenen „Shop“ überstellt werden. Nach zufriedenstellendem Ergebnis können sie weiterverwendet werden. Diese Aktion dürfte mit erheblichem Aufwand (Logistik, Zeit, Kosten) verbunden sein.

Literatur zu Kapitel 14.3

- 14.3-1** „Vergleichende Studie betreffend die amerikanische Federal Aviation Administration (FAA) sowie die vorgeschlagene Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA)“. Europäisches Parlament, Generaldirektion Wissenschaft, Seite 1-12.
- 14.3-2** Federal Aviation Regulation SFAR No.36, Seite 1-6.
- 14.3-3** Federal Aviation Administration, DER-Antrag auf Zulassung,, „General Regulatory Criteria“, Seite 1-13.
- 14.3-4** P.Hoeveler, „Reparieren statt wegwerfen“, Zeitschrift Flug Revue, April 2007, Seite 83-85.
- 14.3-5** Airworthiness Directive FAA 2005-26-09 Amdt.39-14430, „Pratt & Whitney JT9D-7R4 Turbofan Engines“, 21.12.2005, Seite 1-4.
- 14.3-6** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5, 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 20.2.1, Bild 20.2.1-9

14.4 Reparaturерprobung

Es gibt Vorgehensweisen bei der Reparaturoentwicklung die das Risiko von Problemen und Schäden im Betrieb minimieren.



Dieses Kapitel widmet sich dem Nachweis des **Betriebsverhaltens** bzw. der **Tauglichkeit** eines reparierten Bauteils im Rahmen einer **Erprobung**. Diese gilt auch für das **Reparaturverfahren** (Kapitel 14.2 und Kapitel 14.3), insbesondere wenn es sicherheitsrelevant ist.

Die Erprobung der Reparatur bzw. des reparierten Bauteils muss **ausreichend betriebsrelevant** sein (Bild 14.4-2). Der Aufwand in Kosten und Zeit ist möglichst gering zu halten. Dafür hat sich ein schrittweises Vorgehen bewährt (Bild 14.2-2 und Bild 14.4-1). Voraussetzung ist, dass der **Schadensmechanismus mit den ursächlichen Einflüssen ausreichend sicher geklärt** ist. Hierfür bietet sich eine systematische **Problemanalyse** an (Band 1 Bild 2.2.1-1 und Bild 2.2.1-2). Diese Erkenntnisse sollten die Definition eines **vereinfachten Versuchs** an Proben, **gestützt von Berechnungen** oder eines speziellen Aufbaus ermöglichen (Bild 14.4-5 und Bild 14.4-7). Entscheidend ist, dass dessen Relevanz mit einer befriedigenden **Reproduktion** (Band 1 Kapitel 2.2.2.5) aufgezeigt wurde.

Gewöhnlich entstehen zu reparierende Schäden in einem **komplexen Zusammenwirken unterschiedlichster Betriebseinflüsse** (Bild 14.4-2). Diese Beanspruchungen entziehen sich meist einer ausschließlichen „Behandlung am Computer“. Sicher wäre die ausschließlich **analytisch-theoretische Methode** der schnellste und kostengünstigste Nachweis. Deshalb erhöht sich erfahrungsgemäß die Gefahr, dass solche „Nachweise“ ohne **aufwändige Reproduktion** erfolgen. Die fallspezifische Untauglichkeit dieser Vorgehensweise ist mit großen Sicherheitsrisiken verbunden. In der überwiegenden Zahl der Fälle wird aber nur eine **Triebwerkserprobung** letztendlich ausreichend Gewissheit über den Reparaturерfolg geben können. Auch hier gilt die Maxime „**The engine will tell us**“.

Diese Nachweise erfordern üblicherweise mehr als lediglich einen relativ kurzen Lauf am Prüfstand, auch wenn dieser 150 Betriebsstunden dauern sollte (Lit. 14.4-4). Erfahrungsgemäß reichen diese Zeiten nicht, um Langzeitschädigungen wie Oxidation, Alterung von Belägen, Erosion und Verschleiß genügend betriebsnah zu simulieren. Auch für die Simulation von Einflüssen wie Landestöße oder Kreiselkräfte sind Prüfstände kaum geeignet.

In solchen Fällen bietet sich eine Erprobung beim Betreiber mit „**Fleetleadern**“ an. Das ist wohl der zeitlich aufwändigste Weg. Diese, mit regelmäßiger Überwachung bzw. Inspektionen verfolgten Triebwerke müssen einer einsatzrelevanten Betriebsbeanspruchung unterliegen. Das gilt für Einflüsse wie das **Einsatzprofil** und/oder unvermeidliche Besonderheiten. Dazu gehören hoher Staubanfall oder eine korrosive Atmosphäre.

Bild 14.4-1 (Lit. 14.4-1 und Lit. 14.4-2): Verfahrensentwicklung wird in Kapitel 14.2 behandelt. Hier geht es um den **Tauglichkeitsnachweis des reparierten Bauteils**.

Verständnis des Problems bzw. Schadens der die Reparatur notwendig macht. Hierzu gehören

- **Schadensmechanismus** (Band 1 Bild 2.2.1-2),
- **zeitlicher Ablauf**,
- **Risiken** und
- **ursächliche Einflüsse** (Lit. 14.4-5).

Erst dieses Wissen erlaubt **zielgerichtetes Handeln mit hoher Erfolgswahrscheinlichkeit**. Es ist auch die Voraussetzung für die **Definition und Durchführung der Nachweise**.

Für das Verständnis können **Schadensanalysen, Statistiken** und **Überholhandbücher** wichtige Informationen liefern. Solche Erfahrungen sind besonders beim OEM und dem Betreiber zu erwarten. Weil es sich um produktspezifisches Wissen handelt, steht es nicht immer für die Entwicklung einer Reparatur zur Verfügung.

Analytische Betrachtungen und Berechnungen nehmen für das Verständnis schädigender Betriebsbelastungen mit verbesserten Computerprogrammen an Bedeutung zu. Für solche Analysen ist der OEM prädestiniert. Ihm sollten Belastungen mit zeitlichen Abläufen bereits von der Auslegung der Neuteile ausreichend bekannt sein. Auch der effektive und sinnvolle Einsatz des Computers hat das „Verständnis des Schadens“ als Voraussetzung.

Ein **problemrelevanter Bauteilversuch** ist die beste Voraussetzung für die **Abschätzung** oder **Demonstration** des **Erfolgs** bei den zulassenden Institutionen. Diese wichtigen Absiche-

rungen erfolgen am effektivsten in **vergleichen- den Versuchen**.

Voraussetzung ist ein geeigneter und machbarer (Kosten, Zeit) Bauteilversuch (Band 1 Kapitel 2.2.2.5). Kriterium für die Eignung ist die makroskopische und mikroskopische Reproduktion des zu reparierenden Schadens. Das muss unter definierten, wiederholbaren Versuchsbedingungen an einem relevanten Bauteil, meist einem Neuteil, erfolgen. Ist diese höchst anspruchsvolle Aufgabe gelöst, besteht die Möglichkeit das Verhalten, insbesondere die zu erwartende **Lebensdauer der reparierten Teile abzuschätzen**. Die Grenze dieser Nachweise liegt in Betriebslasten die nicht bekannt oder bewusst sind und vom Prüfaufbau nicht simuliert werden. Hierzu gehören hochfrequente Schwingungen oder Übertemperaturen (z.B. beim Start).

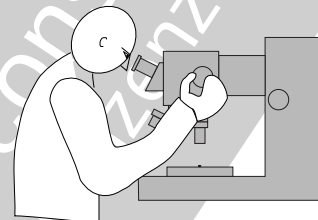
Der Nachweis in **Triebwerksversuchen am Prüfstand** kann lediglich das Verhalten einer Reparatur bei kurzfristig wirkenden Effekten überprüfen. Diese müssen natürlich im Versuchsprogramm eintreten. Gewöhnlich sind solche Versuche aus Kostengründen auf zum Flugbetrieb vergleichsweise kurze Laufzeiten (unter 150 Stunden) beschränkt. Damit sind **Auswirkungen von Langzeiteffekten** wie Erosion, Reibverschleiß und Korrosion, kaum ausreichend betriebsnah zu prüfen (Lit. 14.4-4). Auch **besondere Belastungen** wie Landestöße (wichtig für Anstreifen und Spalthaltung) oder Kreiselkräfte bei abrupten Richtungsänderungen (beim Abheben, miliärische Manöver, Band 1 Bild 5.4.3.1-8.1) entziehen sich diesen Prüfungen.

Der zeitaufwändigste aber auch aussagekräftigste **Nachweis erfolgt beim Betreiber** im

Phasen der Entwicklung und des Nachweises einer Bauteilreparatur:

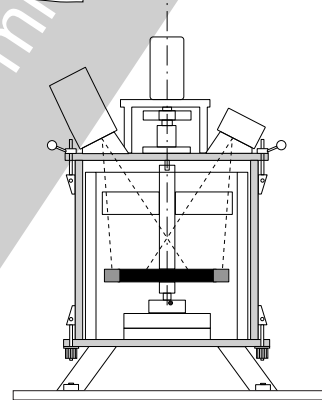
1. Verständnis des Problems bzw. Schadens:

- Problem-/Schadensuntersuchung:
 - Ermittlung des Schadensmechanismus
 - Ermittlung der ursächlichen und beitragenden Einflüsse
- Auswertung von
 - Schadensuntersuchungen und -statistiken
 - Überholungshandbüchern
 - Analytische Betrachtungen/Berechnungen

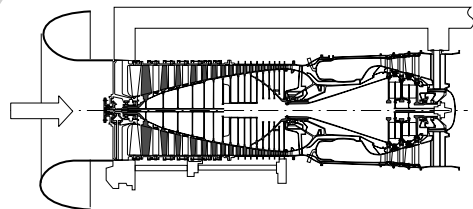


2. Problemrelevanter Bauteilversuch:

- Die Eignung wird mit der Reproduktion des Betriebsschadens gezeigt.
- Vergleichende Bauteilversuche zwischen Neuteilen, gelaufenen Teilen und gegebenenfalls mehreren Reparaturvarianten



3. Nachweis in Triebwerksversuchen am Prüfstand



4. Nachweis beim Betreiber:

- Fleetleader-Prinzip
- Samplinguntersuchungen
- Überwachung im eingebauten Zustand (z.B. Boroskop)

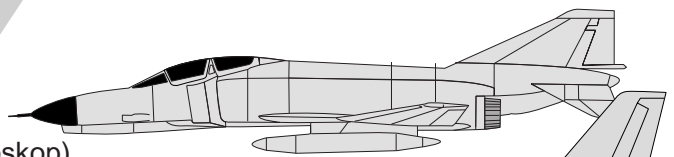
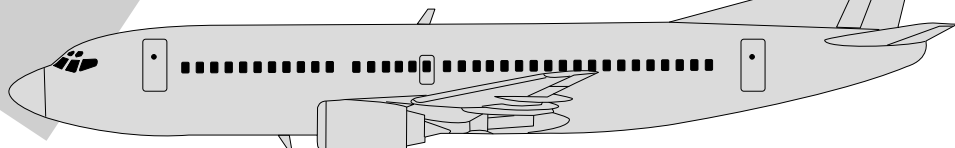


Bild 14.4-1



betriebstypischen Einsatz. Um Risiken zu minimieren, werden dafür einige wenige mit der Reparatur ausgerüstete Triebwerke („**Fleetleader**“) eingesetzt. Der Zustand der Reparatur wird dabei geeignet überwacht. Hierfür dienen beispielsweise Boroskopinspektionen (Lit-

. 14.4-9). Werden nach aussagekräftigen Laufzeiten Prüfteile entnommen und im Bauteilversuch auf die Auswirkung möglicher Schädigungen überprüft, spricht man von „**Sampling**“.

Die Erprobung einer Reparatur ist entscheidend für die Betriebssicherheit der betroffenen Bauteile. Nachweise müssen die triebwerksspezifischen Betriebsbedingungen ausreichend berücksichtigen.

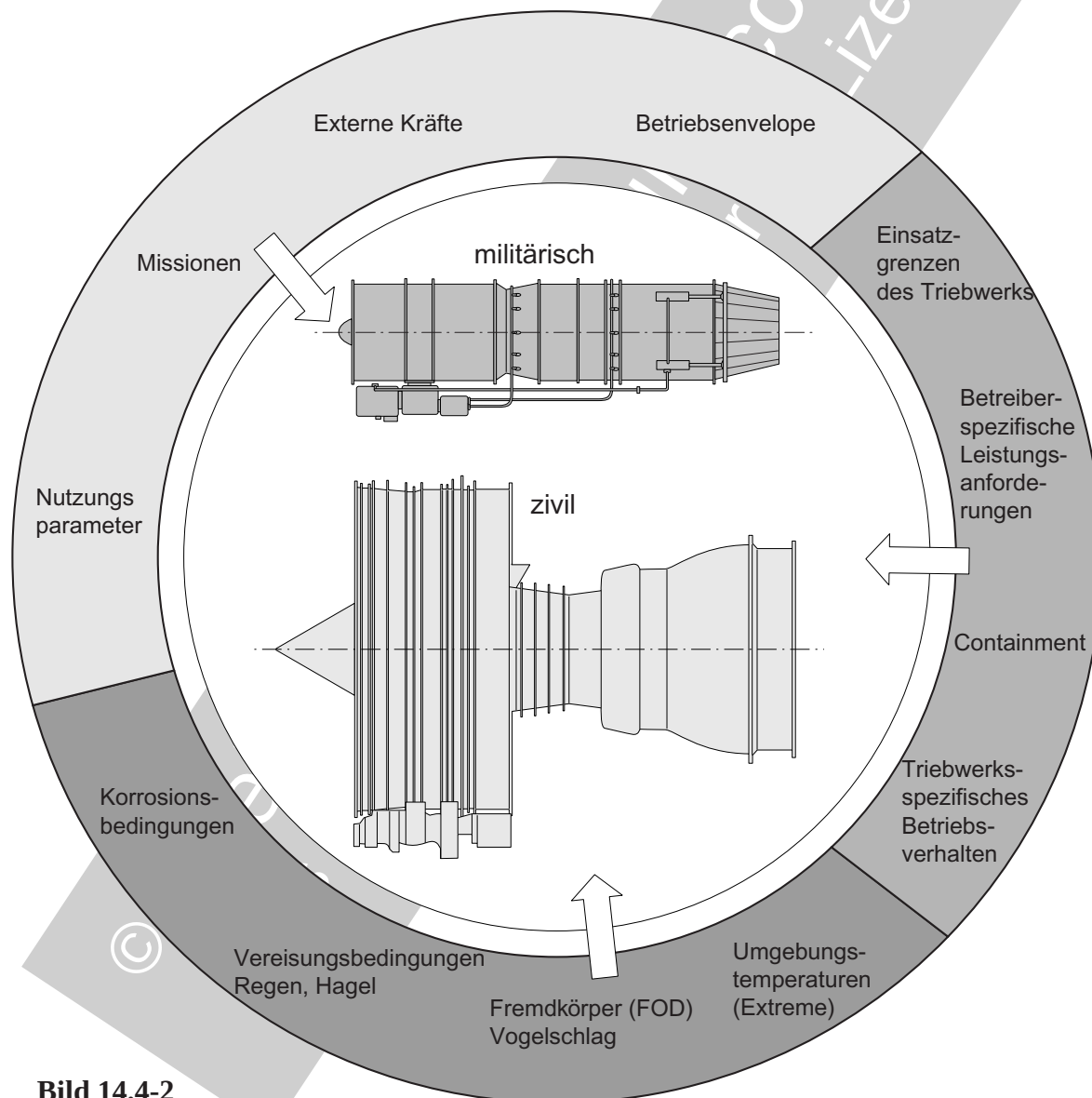


Bild 14.4-2

Bild 14.4-2: Die Erprobung einer Reparatur ist durchaus anspruchsvoll. Eine nützliche Übersicht über Vorgehensweisen und Nachweisprobleme gibt das „**Department of Defense Handbook**“ (Lit. 14.2-2). Es hat das „**Engine Structural Integrity Program**“

(*ENSIP*) zum Inhalt und wurde zugänglich in das Internet gestellt.

Häufig stehen für den Nachweis der **Betriebs-tauglichkeit von Reparaturen** aufwändige, umfangreiche zyklische Prüfläufe, wie sie etwa im Rahmen eines ETOPS-Einsatzes durchgeführt werden, nicht zur Verfügung (Lit. 14.4-5). Aus

diesem Grund werden, je nach Problem bzw. Reparatur und zu reparierender Schadensart, **spezifische Nachweise** angewendet (Bild 14.4-1). Zu den dabei bedenkenswerten Betriebseinflüssen gehören:

Einsatzgrenzen, Betriebsenvelope und externe Kräfte (Lit. 14.4-2): Es handelt sich zum einen um den Flight envelope, d.h. die Betriebsgrenzen in Abhängigkeit von Flughöhe und Fluggeschwindigkeit. In diesem Bereich müssen beispielweise Zündung und Betrieb von Brennkammern sowie eines Nachbrenners sicher gewährleistet sein (Lit. 14.4-4). Auch dürfen keine gefährlichen Effekte wie Ölfeuer (Band 2 Kapitel 7.1.4) oder zu hohe Hauptlagerlasten (Lit. 14.6) auftreten.

Im Betriebsenvelope müssen auch g-Lasten bei Manövern (besonders im militärischen Einsatz, Lit. 14.6) sicher ertragen werden. Hier sind Effekte wie das Anstreifen von Schaufelspitzen und Labyrinthen betroffen (Lit. 14.6).

Betreiberspezifische Missionen und Nutzungsparameter im Betriebsenvelope bestimmen Häufigkeit und zeitliche Abläufe von Parametern wie Drehzahl, Gastemperatur und Verdichterdrücke. Davon sind Belastungen wie Thermoermüdung, Zeitstand, Fliehkraft und Anregungen hochfrequenter Schwingungen abhängig. Es kann ein großer Unterschied sein, ob sich ein Bauteil im Triebwerk eines Kurzstrecken- oder Langstreckenflugzeugs befindet. Auch ist die militärische Variante gewöhnlich deutlich höher belastet. Das kann sich durchaus in einer auslegungsgemäß ca. 10 mal kürzeren Lebensdauer niederschlagen. Entsprechend verhalten sich auch die Überholintervalle. Die Reparaturkosten dürften im umgekehrten Verhältnis höher liegen.

Korrosions- und Erosionsbedingungen sind umso härter je länger der Betrieb in Bodennähe erfolgt. Besonders **Hubschraubertriebwerke** sind von diesen Einflüssen hoch beansprucht. Erosion im Verdichter (Band 1 Bild 5.5.1.1-1 und Lit. 14.4-4) und Belag-

bildung in der Turbine (Lit. 14.4-6) sind für diese Triebwerke in vielen Fällen lebensdauerbegrenzend.

Nasskorrosion, besonders an älteren Triebwerkstypen mit korrosionsempfindlichen Stählen (z.B. Verdichterschaukel, Rotorscheiben), wird von den **Stillstandszeiten** und einer dabei auftretenden **Schwitzwasserbildung** merklich begünstigt. Standorte in Meeresnähe und Tief- flüge über dem Meer, die besonders häufig bei militärischem Einsatz vorliegen (Flugzeugträger!) begünstigen Korrosion.

Vereisung (Lit. 14.4-5), **Regen** (Lit. 14.4-5), **Hagel** (Lit. 14.4-5) sind abhängig von Art und Ort des Einsatzes. Es sind Einflüsse die besonders auf den vorderen Triebwerksbereich wirken. Im Extremfall schädigen sie die Beschaukelung des Fans und/oder des Verdichters.

Blitzschlag (Band 1 Kapitel 5.12.1, Lit. 14.4-5) ist in erster Linie bei Propellertriebwerken und Hubschraubern zu berücksichtigen.

Vogelschlag stellt eine erhebliche Gefahr dar. Potenziell betroffene Bauteile müssen in umfangreichen Nachweisen ein akzeptables Verhalten nachweisen (Band 1 Bild 5.2.4.1-4 und Lit. 14.4-5).

Ein Triebwerk sollte möglichst resistent gegen **Fremdkörpereinwirkung** (FOD) (Lit. 14.4-5) sein. Je größer Beschädigungen/Kerben in der Beschaukelung sein dürfen, ohne dass Schwingbruchgefahr besteht, umso besser. Reparaturen dürfen dieses Verhalten zumindest nicht verschlechtern.

Das **Containmentverhalten**, d.h. der Widerstand der Gehäuse gegen ein Durchdringen von Rotorbruchstücken (Band 1 Kapitel 5.2.2, Lit. 14.4-6) darf von einer Reparatur (z.B. Schweißung) nicht beeinträchtigt werden. Es handelt sich in erster Linie um abgeschleuderte Schaufeln, und interne Feuer (Titanfeuer, Band 1 Kapitel 5.10.3 und Lit. 14.4-6).

Voraussetzung für einen aussagekräftigen Bauteilversuch ist die Reproduktion des Problems bzw. Schadens an relevanten Bauteilen in allen Details. Das klingt einfacher als es ist.

Typische Merkmale am Beispiel einer Turbinenrotorschaukel, die auf schadensurächliche Einflüsse rückschließen lassen

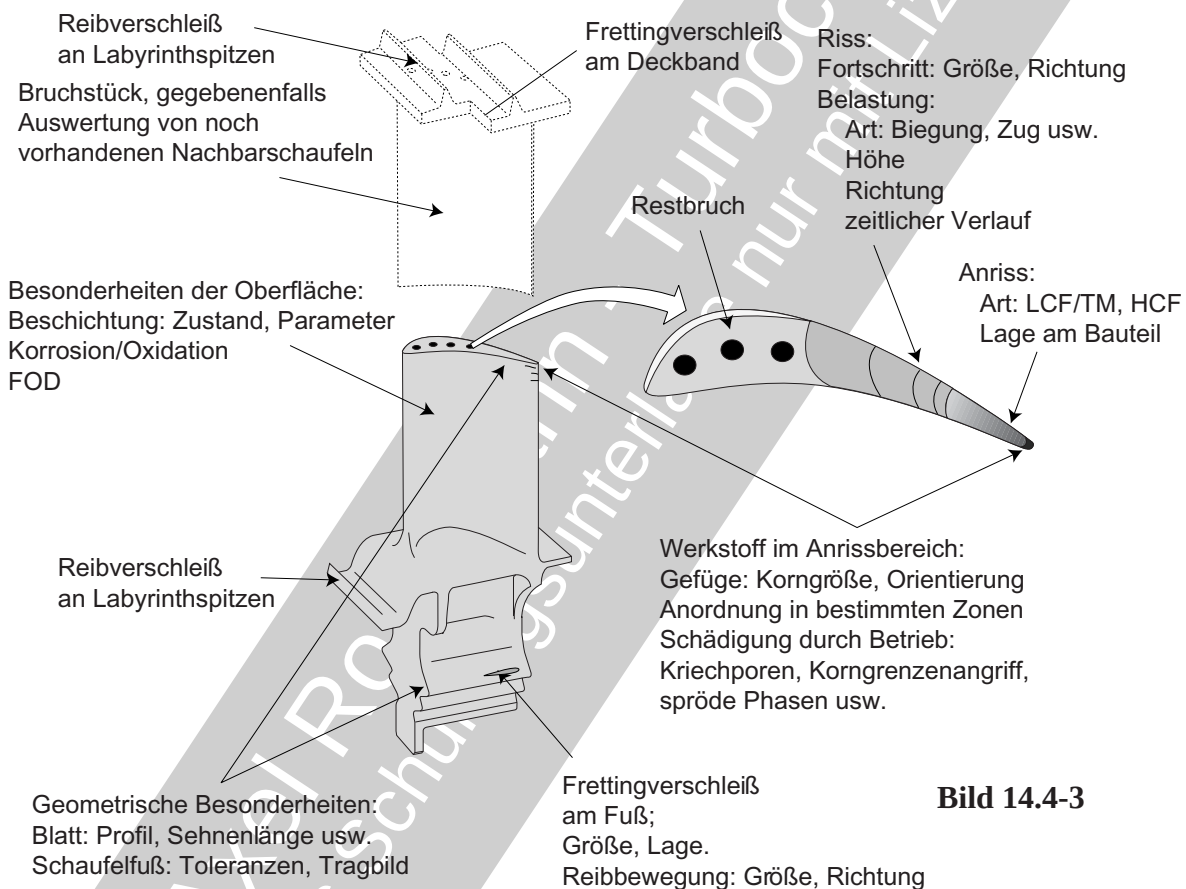


Bild 14.4-3

Bild 14.4-3 (Lit. 14.4-): Dem Fachmann ist es bei etwas Glück möglich, aus dem mikroskopischen und makroskopischen **Schadensbild** wichtige Folgerungen zu ziehen. Hilfreich sind Kombinationen mit **Werkstoffuntersuchungen**, die auf den **Schadensmechanismus, -ablauf** und die **ursächlichen Einflüsse** rückschließen lassen. Ist dies gelungen, sind die **Voraussetzungen für reproduzierende Bauteilversuche** (Band 1 Kapitel 2.2.2.5) geschaffen. Damit besteht eine kostengünstige Möglichkeit der Erprobung, des Betriebstauglichkeitsnachweises und einer Risikoabschätzung (Bild 14.4-2). Der

Blattbruch einer typischen Niederdruckturbinenrotorschaukel soll hier als Beispiel dienen. Sicher sind nicht alle Merkmale, wie hier gezeigt, bei einem Schadensfall auswertbar. Es handelt sich vielmehr um eine Zusammenstellung möglicher Indizien.

Zu den **Anstreifmerkmalen der Labyrinthspitzen** am Deckband gehören Verschleißgröße, deren Verteilung und Überhitzungsmerkmale (Lit. 14.4-6). Sie sollten Rückschlüsse, ob ein heftiges Anstreifen die Schaufel gefährlich hoch dynamisch belastet haben könnten, zulassen.

Das Ausmaß von **Frettingverschleiß** (Band 1 Kapitel 5.9.3) **an den Anlageflächen des Deckbands** (Lit. 14.4-4) gibt Hinweise auf eine Lockerung der Verspannung. Diese begünstigt Schwingungen der Schaufel.

Das makroskopische Bruchbild zeigt Bruchausgang, Fortschrittsrichtung und Art der Belastung. Rastlinien lassen auf zeitliche Abläufe, z.B. Start/Abstellzyklen schließen. Damit lässt sich der Zeitpunkt des Risswachstums eingrenzen. Dies ist von Bedeutung, falls besondere Betriebsbelastungen bekannt wurden. Die Restbruchgröße (Gewaltbruch) weist auf das fliehkraftbedingte Belastungsniveau der Schaufel hin.

Eine **mikroskopische Bruchflächenuntersuchung (REM)**, Band 1 Bild 2.2.2.4-3 und Bild 4.4-3) lässt Besonderheiten im Anrissbereich erkennen (z.B. FOD, Porosität, Kriechriss, Schwingriss).

Der Zustand der **Blattoberfläche** (z.B. Oxidation, Beschichtungszustand, Ablagerungen) zeigt besondere Betriebsbedingungen.

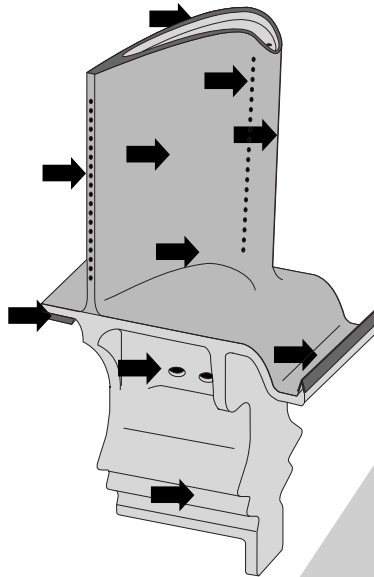
Eine **mikroskopische Werkstoffuntersuchung (Metallografie)**, Band 1 Bild 2.2.2.4-1) kann Fragen nach Überhitzungen, Schädigungen (z.B. Besonderheiten der Aushärtungsphase), Werkstoffzustand und -fehlern beantworten.

Geometrische Besonderheiten wie Profilabweichungen und verkürzte Sehnenlänge (z.B. durch Nacharbeit) können Ursache für ein schadensauslösend verändertes Schwingverhalten (Eigenfrequenz) sein (Lit. 14.4-7).

Der Zustand der **Labyrinthspitzen an der Fußplattform** kann Hinweise geben, ob der vorgelegte Turbinenleitapparat seine Lage schadensbeeinflusst verändert hatte.

Stärke und Verteilung des Frettingverschleißes an den Auflageflächen des Schaufelfußes lassen auf Art (z.B. Biegung) und Belastung (mikroskopische Länge der Verschleißspuren, Verschleißvolumen) schließen.

Typische bedenkliche Veränderungen im Rahmen einer Reparatur die das Betriebsverhalten des Bauteils beeinflussen und eines Nachweises bedürfen.



Einige erfahrungsgemäß beeinflusste Bauteilzonen an einer gekühlten Turbinenrotorschaukel

Veränderte Materialeigenschaften beeinflussen:

- Festigkeit
 - ☐ Lebensdauer: dynamisch, Kriechen, TF,
 - ☐ Sicherheitsfaktoren, Empfindlichkeit gegen Überlastung
- Zähigkeit: Versprödung
- Bruchmechanisches Verhalten
 - ☐ niedrige Risszähigkeit: kleinere zul. Fehlergröße
 - ☐ kritische Fehlergröße, beginnendes Risswachstum
 - ☐ Rissfortschritt
- FOD-Verhalten (z.B. Haircut-Gefahr)
- Belastung
 - ☐ Gewichtsänderung: Fliehkraft /Kriechlebensdauer, Resonanzen
 - ☐ Reibungskräfte an Auflageflächen
 - ☐ Schwingformen und Frequenzen (Resonanz) als Einfluss des E-Moduls oder der Massenverteilung
 - ☐ Wärmedehnung, Wärmeleitfähigkeit: Wärmespannungen, Eigenspannungen, TF
- Erosion: Deterioration
- Reibverschleiß:
 - ☐ Fretting (Schwingfestigkeit),
 - ☐ Anstreifen (Aufheizung/Schädigung)
- Containment / Aufschlagwirkung,
- Brandeigenschaften (z.B. Titanfeuer),
- Korrosion / Oxidation, Alterung
- Schädigende Wirkung auf andere Teile: LME, Verstopfungsgefahr
- Reparaturverfahren: Schweißen, Löten, spanende Bearbeitung/Schleifen
- Elektrochemische Bearbeitung (Bohren),
- Funkenerosion (EDM)
- Beschichtungen

Veränderungen im Reparaturprozess bzw. gegenüber dem Fertigungsprozess des Neuteils beeinflussen:

- Beschichtungen: Rissbildung und Rissfortschritt bei FOD, LCF/TMF, HCF
- Wärmebehandlung: siehe Materialeigenschaften
 - ☐ Heißeisostatpressen HIP: Primärkriechen verstärkt
- Schweißverfahren: Mikrorissbildung, TMF, Fehlerarten/Schwachstellen
- Lötverfahren: Rissbildung, Versprödung, TMF
- Zerspanung: Schwingfestigkeit (LCF, HCF)
- Lebensdauererweiterung: sicheres Überholintervall, Anforderungen an ZfP
- Umgebung: z.B. Anstreifpartner, Kontakt-/Gleitflächen, schädigende Bestandteile: Rissbildung (LME), Reaktionen (Korrosion, Sulfidation)

Veränderung der Geometrie und Rauigkeit beeinflussen:

- Aerodynamik (Rauigkeit, Blattprofil, Eintrittskante:
 - ☐ Betriebsverhalten des Triebwerks, Neigung zum Verdichterpumpen
 - ☐ Schwingungen (Strömungsablösung, Rotating Stall)
- Spannungserhöhung
 - ☐ Ausblenden (Schwingfestigkeit)
 - ☐ Auflagebedingungen (Fuß, Deckband)
- Fouling, Korrosion
- Bauteiltemperatur: Rauigkeit, Reflexion

Bild 14.4-4

Bild 14.4-4: In diesem Bild wird auf Stellen in der Buchreihe „Problemorientierte Trieb-

werkstechnik“ verwiesen (Lit. 14.4-5 bis 14.4-8). Diese Bücher stehen für Lehrzwecke im

Hinweise auf eine detailliertere Behandlung des Themas in der Buchreihe

"Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken"

Kein Anspruch auf Vollständigkeit!

Band 4 Bild 15.2-7 (Wärmebehandlung EK), Band 3 Bild 12.5-16 (Wärmebehandlung) und Bild 12.5-18 (HIP), Band 4 Bild 16.2.1.4-7 (Löten), Bild 16.2.1.4-9 (Löten), Band 4 Kapitel 16.2.1.3 (Schweißen), Bild 21.2.8-3.1 (HIP), Bild 21.2.8-3.2 (HIP) Bild 21.2.1-3 (Schweißen), Bild 21.2.1-7 (Schweißen), Bild 21.2.1-4 (Aufschweißen von Spitzen), Bild 21.3.3-2, Bild 21.3.3-3, Bild 21.3.3-4

Bild 21.2.1-6 (Schweißen), Bild 21.2.6-1 (Ausblenden)

Band 4 Bild 16.2.1.3-4 (Schweißen), Bild 16.2.1.3-19 und Bild 16.2.1.3-20 (Schweißen, Titan), Bild 21.2.3-2 und Bild 21.2.3-4 (Beschichtung), Bild 21.2.5-2 (Kugelstrahlen)

Bild 21.3.3-7 (Ausblenden), Bild 21.2.6-3 (Ausblenden)

Bild 21.3.3-6 (Löten, Wärmedehnung)

Bild 21.3.3-4 (Schwingverschleiß/Fretting)

Bild 21.2.1-4 (Aufschweißen von Spitzen)

Band 2 Bild Bild 8.1-13

Bild 21.1-5 (LME, Cd-Versprödung)

Band 4 Bild 16.2.1.4-7 (Löten), Bild 16.2.1.4-9 (Löten), Band 4 Kapitel 16.2.1.3 (Schweißen), Bild 21.2.1-3 (Schweißen), Bild 21.2.1-7 (Schweißen), Bild 21.2.1-4 (Aufschweißen von Spitzen), Band 4 Bild 16.2.1.3-4 (Schweißen), Bild 16.2.1.3-19 und Bild 16.2.1.3-20 (Schweißen, Titan)

Band 3 Bild 12.6.2-15, Bild 21.2.3-2 und Bild 21.2.3-4 (Beschichtung)

Band 3 Bild 12.5-16 (Wärmebehandlung)

Bild 21.2.8-3.1 (HIP), Bild 21.2.8-3.2 (HIP)

Band 4 Bild 16.2.1.3-11 (Mikrorissbildung), Bild 21.2.1-3 (Mikrorissbildung)

Band 4 Bild 16.2.1.4-7 (Löten), Bild 16.2.1.4-9 (Löten),

Band 4 Bild 16.2.1.1-2

Kapitel 24.2, Bild 21.2.5-3 (Strahlen)

Band 2 Kapitel 7.1.4 (Schaufelspitzen), Band 2 Bild 7.2.2-9.2 und Bild 7.2.2-10 (Labyrinthspitzen)

Band 3 Bild 11.2.1.1-9.1 (Rauigkeit) und Bild 11.2.1.1-1 (Profilveränderung), Band 4 Bild Bild 16.2.2.1-1 und Bild 16.2.2.1-2 (Rauigkeit), Band 4 Bild 16.2.2.9-5 (Profilveränderung),

Bild 21.2.1-6 (Schweißen), Bild 21.2.6-1 (Ausblenden)

Band 4 Bild 16.2.2.9-4 (Schaufelfuß)

Band 3 Bild 11.2.2.1-7 (Brennkammer)

Bild 14.4-4

Internet zum kostenlosen 'Down Load' an der TU-Graz zur Verfügung. Hier werden die

genannten Effekte eingehender behandelt.

Beispiel für Untersuchungen zur Beeinflussung der LCF-Lebensdauer von Labyrinthzähnen durch Aufschweißen im Rahmen einer Reparatur.

Probenversuche zur Abschätzung des LCF-Risikos durch Schwachstellen in der Reparatur-Aufschweißung:

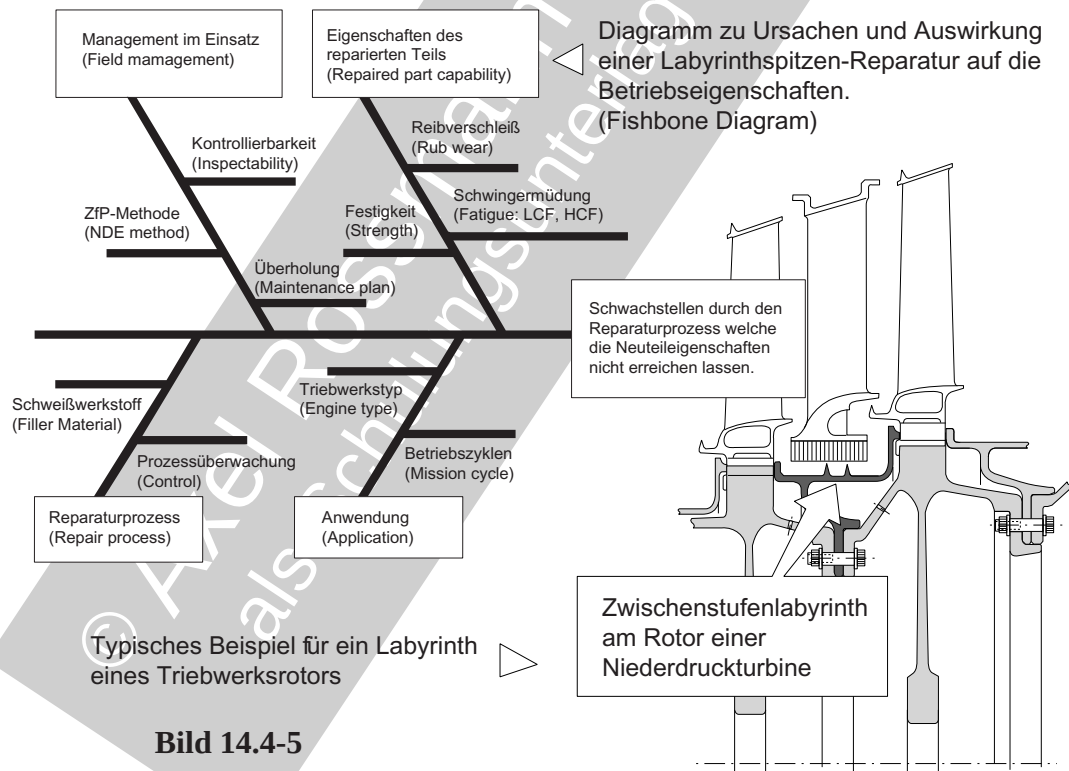
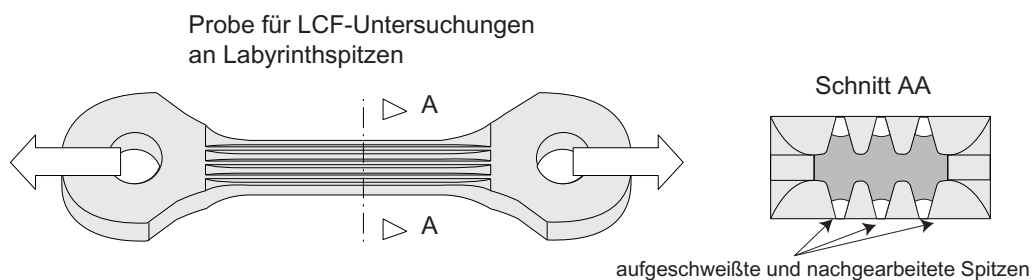


Bild 14.4-5 (Lit. 14.4-3): Labyrinth sind funktionsbedingt Schädigungen ausgesetzt. Es handelt sich um **Verschleiß** (Lit. 14.4-6), **Warmrissbildung** (Band 1 Bild 4.4-15, 12.2.1.3.1-10, Bild 12.2.1.3.1-11 und Lit. 14.4-7), **örtliche Aufheizung** (Gefüge, Zugeigenspannungen) und **Beschädigungen** bei der Montage. Bei der Überholung erfolgt deshalb

eine **Schweißreparatur** (Lit. 14.4-7). Dazu werden die Labyrinthspitzen teilweise abgeschliffen und in mehreren Lagen aufgeschweißt. Danach wird die Schweißung spanend (Schleifen) auf Maß bearbeitet.

Die Schweißung ist besonders bei **Ni-Legierungen die zur Warmrissbildung** neigen (Bild 12.2.1.3.1-11 und Lit. 14.4-7) problematisch.

In **Titanlegierungen** ist dagegen eher mit **Porosität** zu rechnen (Bild 12.2.1.3.3-7). Von solchen Fehlstellen können im Betrieb **LCF-Risse** ausgehen (Bild 11.2.2.1-10 und Lit. 14.4-6). Natürlich ist auch auf ein günstiges **Anstreifverhalten** zu achten. D.h. keine Wärmrissbildung oder aufheizungsbedingte Schädigungen (Gefügeveränderungen, Härteabfall) mit bedenklichen Festigkeitseinbußen.

Das dargestellte Beispiel zeigt die Anwendung der Bruchmechanik für eine Optimierung der **Schweißreparatur von Labyrinthspitzen**. Dabei kommt es unter anderem darauf an, die **beste Kombination von Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff** zu finden.

Zunächst wurde ein sog. „**Fischgrätendiagramm**“ (engl. fishbone diagram) von einem Team aus Konstruktion, Reparatur, Werkstofftechnik und 'Festigkeit' (Life Management Engineering) erstellt (Schaubild unten links). Ein solches Diagramm enthält die Einflüsse auf die Entstehung von Schwachstellen der Reparaturschweißung. Es entsteht mit einer kreativen Phase („Brain Storming“). **Mindestkriterium war das Betriebsverhalten des unreparierten Teils**. Für diese Anforderung wurden vier übergeordnete Aspekte identifiziert: Management im Einsatz, Eigenschaften des reparierten Teils, Reparaturprozess und Anwendung.

Die LCF-Festigkeit als entscheidendes Merkmal des Betriebsverhaltens reparierter Labyrinthspitzen wurde mit **zyklischen Versuchen** ermittelt. Dafür wurden **Proben mit längslaufenden Labyrinthspitzen** für Zugschwellversuche verwendet (Rahmen oben). Die Geometrie des Prüfquerschnitts (Schnitt AA) entsprach einem üblichen NDT-Zwischenstufenlabyrinth (Skizze unten rechts). Die Prüfung erfolgte bis zum Bruch. Die Prüftechnik erlaubte es nicht, bereits die Anrissphase zu erkennen.

Die Versuchsergebnisse und deren Bewertung zeigt Bild 14.4-6.

Bild 14.4-6 (Lit. 14.4-3): Die in Bild 14.4-5 dargestellten **LCF-Versuche an Proben mit Labyrinthprofil** ließen für die mit Ti-6Al-4V (Zusatzwerkstoff) aufgeschweißte Titanlegierung Ti-17 (Grundmaterial), folgende Schlüsse zu:

- Selbst nicht aufgeschweißte Proben zeigten eine niedrigere LCF-Lebensdauer als Rundproben. D.h. **ein Labyrinthprofil senkt die LCF-Lebensdauer ab**.

- Schweißreparierte Proben wiesen eine **große Streuung der LCF-Lebensdauer** auf.

- **Die LCF-Lebensdauer** der schweißreparierten Proben **war kürzer** als die der nicht reparierten Proben.

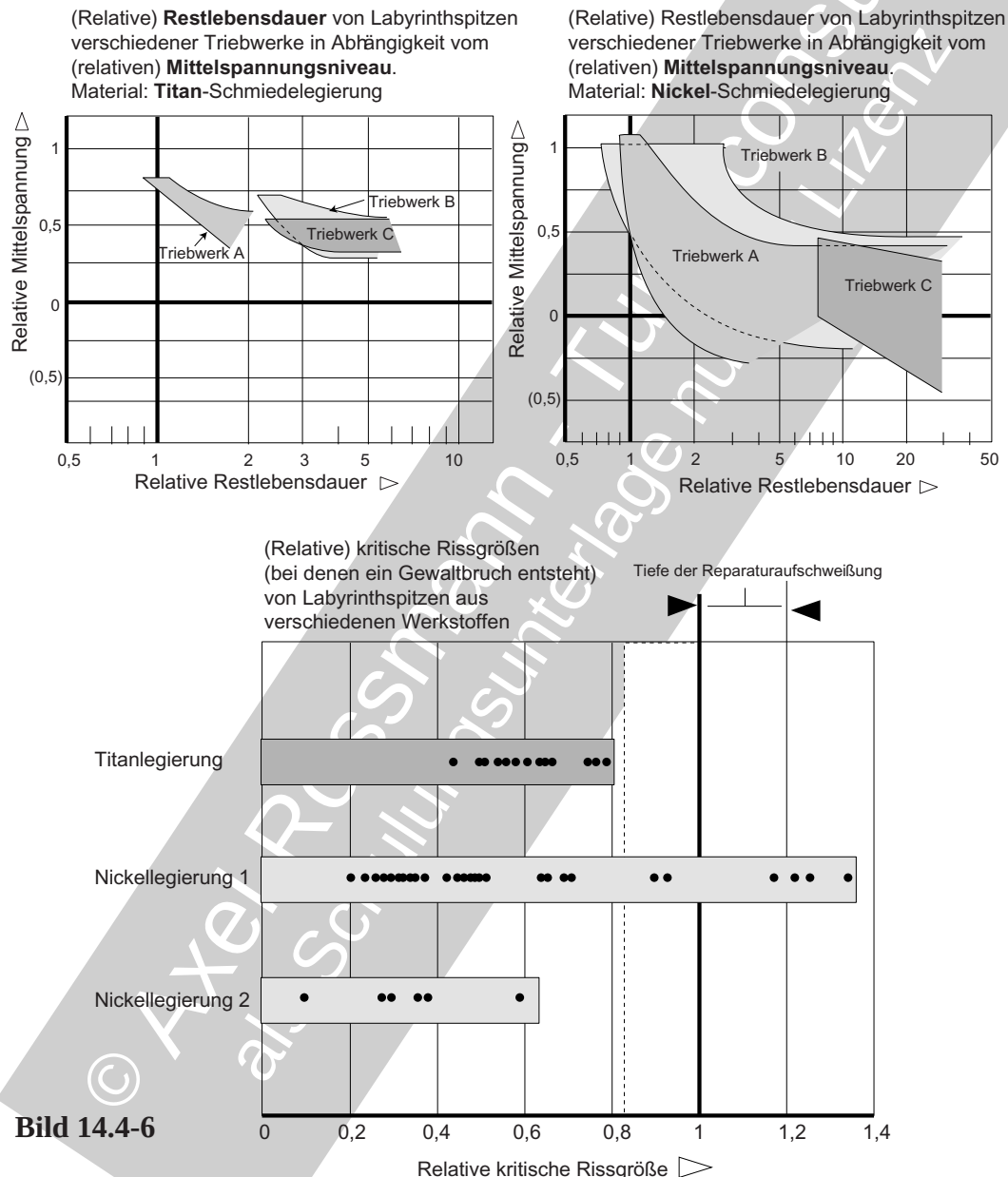
- **Eine Wärmebehandlung** nach dem Reparaturschweißen **verbesserte die Lebensdauer nicht**. D.h. Eigenspannungen dürften hier von untergeordneter Bedeutung sein.

Die mikroskopische Nachuntersuchung der Probenbruchflächen ergab, dass die typischen **Rissausgänge in der Schweißnaht** lagen. Anrissursachen waren **verfahrenstypische Schwachstellen** (Bild 14.1-2) wie Poren (Bild 12.2.1.3.3-8), große Gefügeinhomogenitäten und Überlappungen aus der mechanischen Bearbeitung.

Die Lebensdauern einer **bruchmechanischen Abschätzung** anhand der Initialfehlergröße wich deutlich von den Versuchsergebnissen ab (kürzere Lebensdauer). Dies wird auf den Gefügeeinfluss (grobe Struktur hemmt den Rissfortschritt?) der Schweißung zurückgeführt. Damit wäre die **bruchmechanische Abschätzung 'auf der sicheren Seite'**.

Die Restlebensdauern bei Auslegungsspannungen und einer Initialrissgröße von 0,127 mm wurden für Ti- und Ni-Legierungen bruchmechanisch abgeschätzt. Das erfolgt für unterschiedliche Labyrinth über das gesamte Triebwerk (Diagramme oben). Die Mittelspannungen wurden mit den höchsten im Betrieb

LCF-Verhalten aufgeschweißter Labyrinthspitzen aus Ti- und Ni-Schmiedelegerungen.

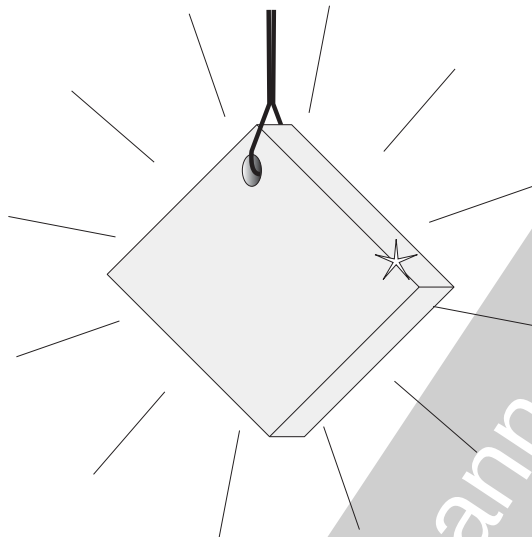


relativiert. Die so aus den Proben ermittelten Lebensdauern wurden mit der auslegungsgemäßen Mindestlebensdauer des jeweiligen Bauteils verglichen. **Höher beanspruchte reparierte Labyrinthzähne** haben in den jeweiligen Triebwerkstypen A,B,C **eine geringere relative Lebensdauererwartung**. Reparaturen sollten deshalb bevorzugt an Labyrinthringen

mit niedriger Mittelspannung durchgeführt werden.

Die Streuung der relativen Lebensdauern ist offenbar für Ni-Legierungen (Diagramm oben rechts) **deutlich größer als für Titanlegierungen**. Dies könnte im Zusammenhang mit der ausgeprägten Warmrissbildung mancher Ni-Legierungen stehen. Das dürfte mit einer, im

Tauglichkeitsnachweise von Reinigungs- und Ätzverfahren in Überholung und Reparatur.



Eine "klinisch reine" Probe oder ein Neuteil sind oft ungeeignet, um für ein gelaufenes Bauteil ausreichend repräsentative Aussagen zu gewährleisten.



Bauteil mit typischen Veränderungen durch den Betrieb:

- Oxidation,
- Angriff einer Diffusionsschicht
- Fretting
- Veränderte Panzerung an Labyrinthspitzen
- Veränderungen des Grundwerkstoffgefüges

! Versuche, Erprobungen und Nachweise sollten an Originalteilen mit typischen Betriebsveränderungen durchgeführt werden. Grundsätzlich sollte die Zustimmung des OEM eingeholt werden. !

Bild 14.4-7

Vergleich zu Titanlegierungen, großen Streuung der kritischen Rissgröße zu sehen sein (Diagramm unten). Um die Streuung einzuengen ist die **Überwachung und strikte Einhaltung optimierter Prozessparameter** Voraussetzung.

Aus diesem Grund sind **für Erprobung und Optimierung von Reparaturverfahren grundsätzlich repräsentative, gelaufene Bauteile** zu verwenden.

Bild 14.4-7: Über dem Betriebstauglichkeitsnachweis einer Reparatur darf nicht der Nachweis bzw. die **Optimierung des Reparaturverfahrens** vergessen werden. Dabei ist besonders zu berücksichtigen, dass sich **Oberfläche** (z.B. Oxidation, Skizze rechts) und **Grundmaterial** (z.B. Gefüge) **betriebsbedingt verändert** haben könnten. Das kann die Anwendung eines für die Neuteilfertigung geeigneten Verfahrens für Reparaturteile ohne Adaption verhindern.

Literatur zu Kapitel 14.4

- 14.4-1** P.C.Patnaik, R.Thamburaj, „Development of a Qualification Methodology for Advanced Gas Turbine Engine Repairs/Reworks“, Paper RTO MP-17, des RTO AVT Workshops on „Qualification of Life Extension Schemes for Engine Components“, Corfu, Greece, 5-6 October 1998, Seite 12-1 bis 12-11.
- 14.4-2** Department of Defense Handbook, „Engine Structural Integrity Program (Ensip)“, MIL-HDBK-1783B, w/Change 2, 22 September 2004, Seite 1-176.
- 14.4-3** P.A.Domas, „Fracture Mechanics Evaluation of Weld Repaired Seal Teeth for Life Extension of Aircraft Gas Turbine Engine Components“, Paper des „RTO AVT Workshop on „Qualification of Life Extension Schemes for Engine Components“, Corfu, Greece, 5-8 October 1998, Seite 16-1 bis 16-8.
- 14.4-4** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Bild 11.1-8, Bild 11.2.1.3-9, Bild 11.2.1.3-10, Bild 11.2.3.2-5, Bild 11.2.4-4
- 14.4-5** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 1, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 3, Bild 3-8, Kapitel 5.1.1, Kapitel 5.1.2, Kapitel 5.1.3, Kapitel 5.1.4, Kapitel 5.2.1, Kapitel 5.2.2, Bild 5.3.2-9.
- 14.4-6** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2, 2000, ISBN 3-00-008429-0, Bild 5.3.2-12.3, Bild 7.1.2-12, Bild 7.2.1-2, Kapitel 7.1.4, Bild 7.2.2-3.1, Bild 7.2.2-9, Bild 7.2.2-9.2, Bild 7.2.2-10, Kapitel 8.2, Kapitel 9.1.
- 14.4-7** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5, 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Bild 21.2.1-3, Bild 21.2.1-4, Bild 21.2.1-5, Bild 21.2.1-6, Bild 21.2.1-7, Bild 21.2.3-2 und Bild 21.2.3-4, Bild 21.2.5-2, Bild 21.2.5-3, Bild 21.2.6-1.1, Bild 21.2.6-3, Bild 21.3.3-2, Bild 21.3.3-3, Bild 21.3.3-4, Bild 21.3.3-6, Bild 21.3.3-7, Kapitel 24.2
- 14.4-8** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Bild 11.2.1.1-1, Bild 11.2.1.1-9.1, Bild 11.2.2.1-7, Bild 12.5-16, Bild 12.6.2-15
- 14.4-9** A.Rossmann, „Industrie Gasturbinen“ www.Turboconsult.de 2008, ISBN 3-00-008428-2, Kapitel 0, 2.6, 3.1.2.2, 3.2 und 4.1..

Sachregister

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 Wärmebehandlungsrisse 11.3-27

Lötfehler 12.2.1.4-49

Abkühlgeschwindigkeit /-raten,

beim Lösungsglühen 11.2.1-34

beim Schmieden 11.1-35 Abkühlungsraten

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 Lötten
12.2.1.4-4

Abtrag

einer Beschichtung 12.2.1.7-1

Oxidschichten 12.2.1.7-1

Abtrennen,

Schwingerermüdung 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

Aliterschicht. 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-Diffusionsschichten 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 KLonstruktors
 10-1
- Aufgeschmiertes** Fremdmaterial beim Handling 13-12
- Aufheizrisse/-bildung** beim Elektronenstrahl-
 schweißen 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

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, Punktschweißung 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
Gefügeoptimierung 11.2.1-12
schweißgeeignet 12.2.1.3.1-2
BEA. *Siehe* Blue Etch Anodizing
Beanspruchung, 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 Spritzschicht 12.2.1.8-27
Belastung
 Kraftgesteuert 11.2.1-31
 Richtung, Blech 11.1-8

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

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

Spannungsrissskorrosion 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 einer 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

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 (Chemical Vapour 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-Schaukel 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 Fanschaukel 12.2.1.3.5-8
 Einfluss von Maßänderungen 12.2.1.9-12
 Fanschaukelbruch 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-Pressen 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

- 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.** (Electric Beam Welding), *Siehe* Elektronenstrahlschweißen
- ECM.** *Siehe* Elektrochemische Bearbeitung
- Edelrost.** *Siehe* Fretting
- Eigenschaften**
Reparatlötung 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 durch Nacharbeit 12.2.1.8-9
- Einsatzgehärtete** Zahnräder, Wasserstoffversprödung 1.2.1-3, 12.2.1.8-13, 11.2.1.8-15
- 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

- 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 Reparaturoentwicklung 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, Lötten 12.2.1.4-48
Fanschäufel
 Bindefehler in Diffusionsschweißung 12.2.1.3.5-8

- 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 Fertigungsfehler 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
 - Kategorien in Schmiedeteilen 11.2.2.1-7
 - Lage und Betriebssicherheit 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
 - Beeinflussung 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*

- 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
Spannungsrissskorrosion 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**, Warmrisssbildung 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 Werkzeugmaschinen 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 Ätzen 14.1-18
auf die Qualitätssicherung 11.1-14

- der Wärmebehandlung 11.1-10
 des Schmiedeprozess 11.1-10
 Kerben (Gefügekerbe) 12.2.1.3.1-3
 Optimierung 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 Titan-
 legierung 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 Formge-
 bung 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
- Gesensschmieden** 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 Vielkeilver-
 zahnungen 12.2.1.8-19
- Glühen**
 Abkühlungsrate 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 Beschichtungsfläche 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 Kornorientierung auf die Schwingfestig-
 keit 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

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 Oberfläche 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
 Werkzeugschleiß 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

Haftschrift 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

- 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 Titan-
 legierungen 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
- Hatrlöten**, 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
- Heißeile**
 Lötrepatur 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 Verdichterroto-
 schaufel 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-Press**/Pressentyp 11.2.3-3
 Diffusionsschweißen 12.2.1.3.5-4
- Hochaktivitätsschicht**, Al-diffusionsschicht
 12.2.1.8-20
- Hochausgelasteten Strukturen** 10-1
- Hochdruckturbin**,
 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, 12.2.1.4-16 Hohlstellen

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; Gefüge-
 bestandteile
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
 Nachweis 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

- 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 Schweißverbindung
- Kitakawa Diagramm** 11.3-23
- Klang**, Klopfrage 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
 Verdrehssicherung 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
 Anstreichvorgang nach Versagen 12.2.1.5-17
 Betriebseigenschaften 12.2.1.5-14
 Betriebseinflüsse 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 Verdrehssicherung 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 Betriebsbedingungen 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
- Klopfrage**, 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
- Kommarrisie** 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

- lötgerecht 12.2.1.4-49
 Ursache 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
- Korrosion** ↑
 ↓
 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**
 geschmiedete 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

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-Keramikklack 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 Verdichtertorschaufel 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 Spannungsgradienten 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

Querschnitteinfluss 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

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/Kühlluftführung/Kühlluftkanal

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) 12.2.1.1.1-3, 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
 Einfluss 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
 Quellen von gefülltem Silikongummi 14.3-5
 Schädigung 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, Hartlötten 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 Verfahren 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

- 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
 Maßprobleme 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* Löttrissigkeit
 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 Löttrissigkeit
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

↑
Löten
↓

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 Löttrissigkeit 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
 Spannungsrissskorrosion 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

↑
Löten
↓

Heißeile 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 Heißeilen 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

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
Loterrosion 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
Lotspritze, 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
Lufttuchtigkeitsanweisung 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 Wälzlager 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

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, Reparaturoentwicklung 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 Werkzeugma-
schinen 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

Rollnahrtschweißung 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

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 Lötrepaturen 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 Lagerauflächen 12.2.1.6-37

P

Pack-Alitverfahren (Pack Cementation) 12.2.1.8-18, 12.2.1.8-19

Palladiumlot 12.2.1.4-15

Panzerungen

Labyrinth, 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 (Perchloräthyl) 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

- 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 Heißeilen* 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
- Schrumpfporen 11.1-18
- Schweißen 12.2.1.3.1-26
- von Ni-Legierungen* 12.2.1.3.1-26
- Titansmiedeteil 11.2.2.1-7
- 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
- Teilverwechslung 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-

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, Reparturnachweis 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 12.2.1.3.1-1, 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 (Physical 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 Reparaturoentwicklung 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
 Guss Haut 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
Nickel- und Titanegierung 12.2.1.6-39
 Schichten durch Kühlschmierstoff 12.2.1.1.2-24
Reaktionszeit
 Beschichtungsmassen 12.2.1.8-61
 Prozessbad 12.2.1.7-26
Reaktiv/-es
 metallische Verunreinigungen 11.2.3-7
 organische Partikel in 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 Heißeilen 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

↑
Reibschweißen
↓

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

↑
Reparatur
↓

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
 Heißeile 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

↑ Reparatur ↓

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 Triebwerkstypen 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

↑ Riss ↓

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 Schleiffrissen 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

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

Schaukel

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

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 durch 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

Schwingerermüdung 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

Weißer 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

Schleifkorn,

Reaktion mit Werkstoffen 12.2.1.1.1-12

reaktives 12.2.1.1.1-6

Schleifkörper, Chip (Vibrationsschleifen)

14

Schleiföle für Titanlegierungen

Schleifparameter

Schleifriefen

Schleiffriss,

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

Schlieren

auf Badoberfläche 12.2.1.7-24

Prozessbad 12.2.1.7-26

Schmelzbad, Einfluss auf Fehlstellen

Schmelzbereich, Lot

Schmelze, Fließeigenschaft

Schmelzprozesse

Schmelzschweißungen

Schmelzschweißverfahren

Schmiedefalte

in Verdichterschaufel 11.2.2.1-25

↑ Schicht ↓

↑ Schleifen ↓

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
 - Kategorien* 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
- Querkzugfestigkeit 11.2.2-3
- Umformgrad 11.1-16
- Ultraschallkontur 11.1-16
- Wärmebehandlung 11.1-16

Schmiedenumformung/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 einer 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

Schrumpfporen 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 Schwingfestigkeit 12.2.1.3.1-26

- 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 12.2.1.3.1-6
 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 12.2.1.3.1-5
 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
 Verpödung 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 Abschätzung 14.4-11
Schweißspritzer
 beim Punktschweißen 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
 Wasserstoffverspödung 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

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 Werkzeugmaschinen 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 Ätzbild 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 Anstreichschicht 12.2.1.4-46
Silikon

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 durch 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 Beschichtungsfläche
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

Reibverschleißte 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

Spannungsrissskorrosion 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

- Zugspannungen 12.2.1.7-9
- Spröbruch** 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
- Spröbruch 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, Rispprüfung 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/Abrasionssrahl**
- Anlage 12.2.1.6-9
- 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
- Partikelbruch 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**, Gusschwachstelle 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

↑ Strahlen ↓

T

Tannenbaumfuß, Bruch 14-27

Tauglichkeitsnachweis, repariertes Bauteil 14.4-2
TCP (Tricresylphosphat) 11.2.1-33
Technologie, serieneegnete 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
Thermisches 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 Schwingfestigkeit
 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
 Flammsspritzen 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 Wärmedämmschicht, 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 (Thermo-
 mechanical Processing) 11.2.2.1-4
Thermomechanisches Modell, Schmieden 11.1-35
Tiefziehfett, Einfluss auf Schweißung 12.2.1.3.1-29
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 Schwei-
 ßen 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

- Sauerstoffaufnahme beim Schweißen 12.2.1.3.1-11
 Schädigung 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
 durch 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 versagenden 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

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 Überhitzung 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

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

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

Verschlossenes Werkzeug 10-7

Verschmutzung

Gefahr in der Fertigung 13-4
Im Fertigungsprozess bei Zwischenlagerung 13-4
Schweißfläche mit 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 Sauerstoffaufnahme 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
dünnwandig 11.2.1-2

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

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 Thermischen 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

Werkstoff

Werkstoff

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
 durch 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
 Fischeugen 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
Weißer Flecken. *Siehe* White Spots
Weißer 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
Werkzeugmaschinen, 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 Gusschaut 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

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

Wiedererstartete 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 12.2.1.1.2-8
- Spänekontakt 12.2.1.1.2-2

Wismuth, Werkstoffbeeinflussung 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 Mikrohärtigkeit 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

Schwingerermüdung 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

Weißer 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

Zerspanen



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 Fehlstellen 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