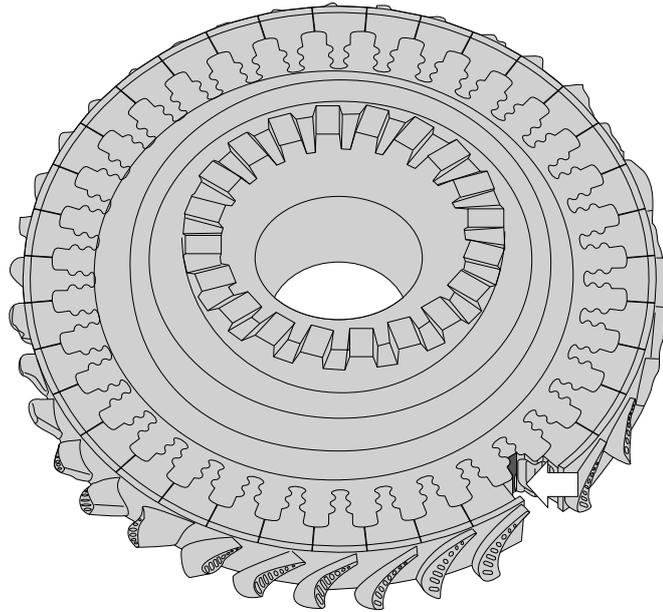


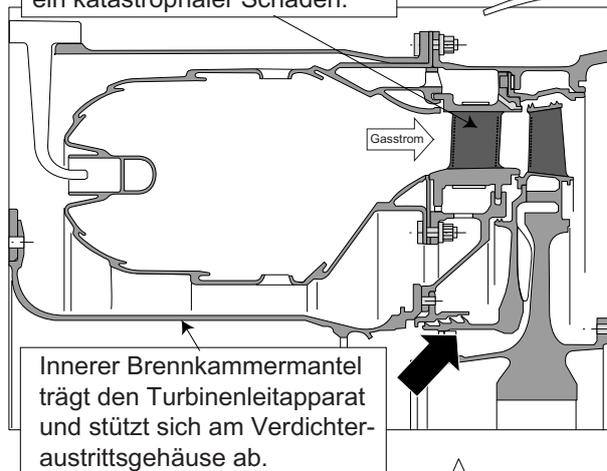
## 21.1 Grenzen der Reparierbarkeit.



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 anderen Bänden dieser Reihe behandelt. Auf diese Stellen wird im Text hingewiesen. Es handelt sich besonders um Band 4, der sich mit Problemen der Neuteilfertigung beschäftigt. Viele dieser Fertigungsverfahren werden auch in der Reparatur angewendet. Kapitel 21.2 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.

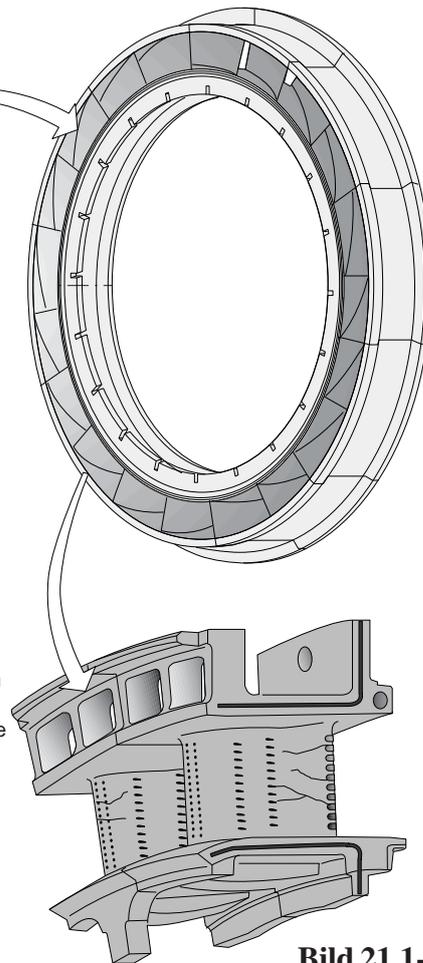
Intensiv reparaturgelötete Turbinenleitsegmente versagten im Betrieb. Es entstand ein katastrophaler Schaden.



Innerer Brennkammermantel trägt den Turbinenleitapparat und stützt sich am Verdichterausstrittsgehäuse ab.

Die Schaufeln des Turbinenleitapparates unterliegen hohen Gasbiegekräften und erzeugen ein großes Drehmoment. Bei einem Bruch der Leitschaufeln kommt es zu einem extremen Schaden auch am Rotor und der Gefahr eines Wellenbruchs durch intensives Anstreifen der Labyrinthdichtung an der Scheibe des "Zusatzverdichters" (Pfeil).

Das Bild zeigt ein Leitschaufelsegment nach längerer Betriebszeit mit typischen ausgeprägten Thermoermüdungsrissen. Nur ein Teil der Schaufelsegmente eines Leitapparates dürfen reparaturgelötet sein, um ausreichende Sicherheit gegen Versagen zu geben. Sie müssen deshalb mit einer Mindestzahl an Neuteilen in einer vorgegebenen Weise am Umfang positioniert sein.



**Bild 21.1-1**

**Bild 21.1-1:** Werden bei der Montage **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 Verdichterausstrittsgehäuse abgestützt. Die Blätter dieser Leitschaufeln sind von den Gaskräften hoch kriebbeansprucht.

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 Überhandbuchs 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**.

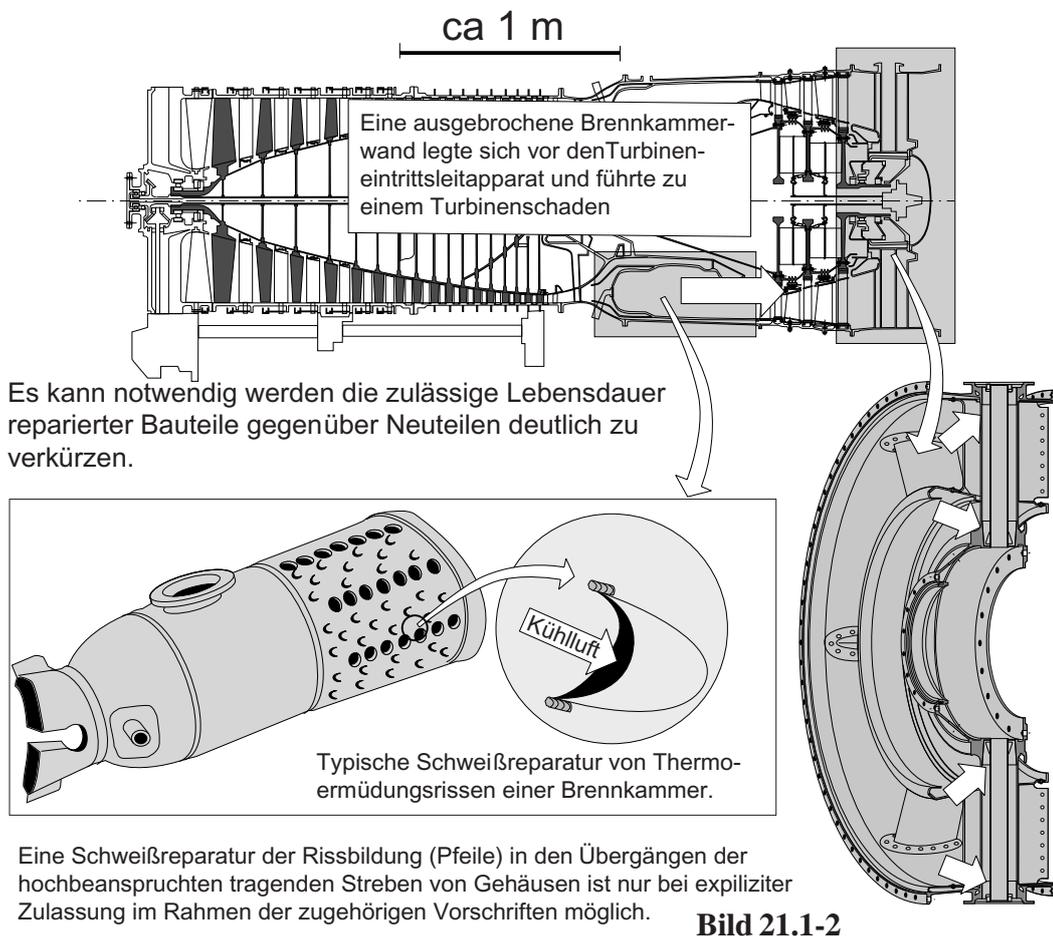
### **Merksatz:**

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 21.1-2:** 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** (Bild 21.2.1-9).

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** (Band 3, Bild 11.2.2.2-2).

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 21.1-3 (Lit 21.1-14):** 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 Rotorschaukeln 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.

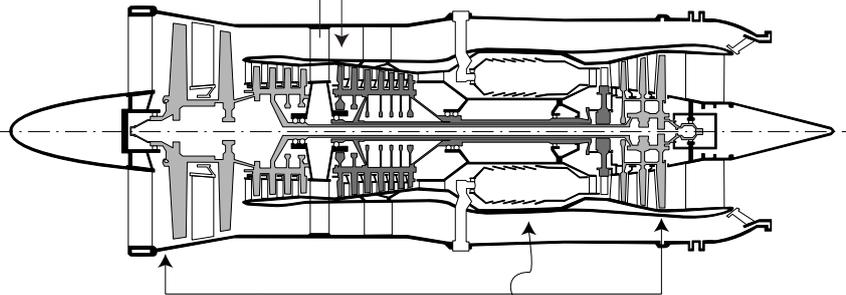
Häufig tragen Triebwerksgehäuse Hauptlager. Dafür sind die Lagerkammern (Bild 21.1-2) über Streben abgestützt. Aus den Lagern können große Radialkräfte und bei Festlagern Axialkräfte wirken. Unwuchten leiten hochfrequente dynamische Belastungen ein. Große Temperaturgradienten, besonders in sog. „Hot Strut“-Konstruktionen (Streben werden durch den Heißgasstrom geführt), erzeugen entsprechende Wärmespannungen. Besonders die Strebenübergänge sind so einer hohen Thermoermüdungsbeanspruchung ausgesetzt.

**Druckgehäuse** sind hoch beansprucht. Entsprechend Vorsicht ist bei Schweißreparaturen angesagt. Die Belastung dieser Gehäuse ist einem Druckkessel vergleichbar. Es handelt sich um hintere Verdichtergehäuse, Brennkammergehäuse (Bild 21.1-4) und Gehäuse der Hochdruckturbinen. 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.

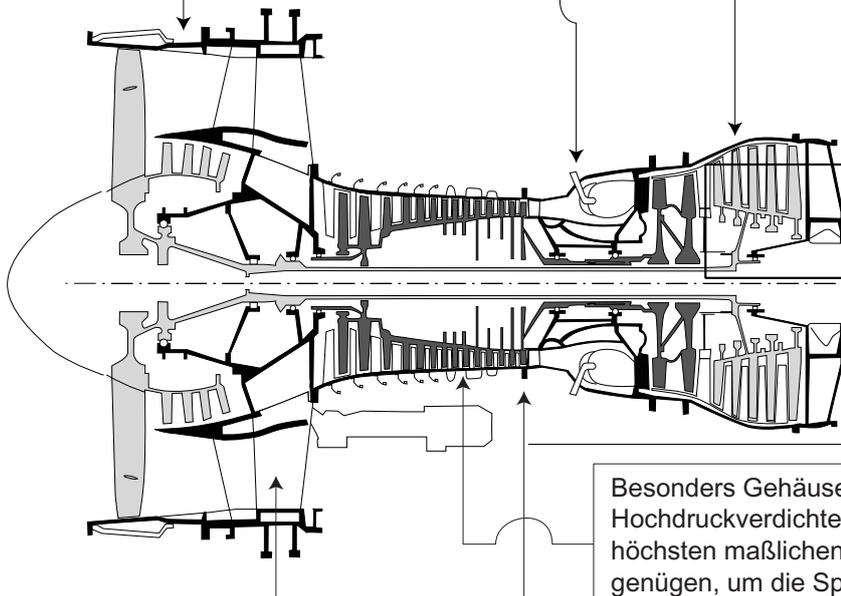
Größte Vorsicht bei der Reparatur von Gehäusen /Zwischengehäusen) welche die Triebwerksstruktur bilden und/oder Hauptlager abstützen.

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 21.1-3**

**Bild 21.1-4 (Lit. 21.1-1): 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 21.1-5). Im Zweifel ist der OEM hinzuzuziehen.

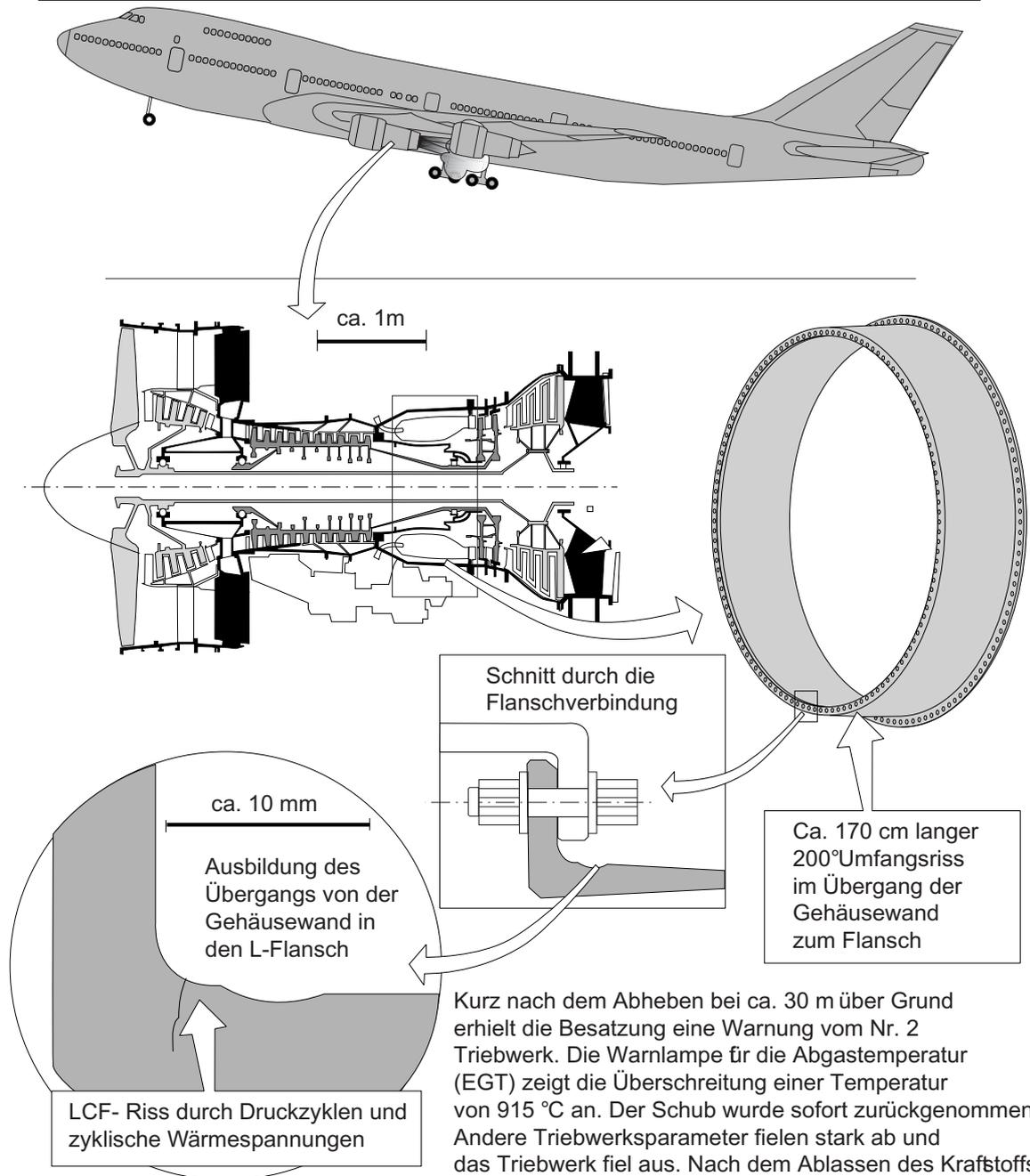
Das gilt besonders für **äußere Brennkammergehäuse** (engl. Combustion Chamber Outer Casing = CCOC). Im Beispiel beträgt die Betriebstemperatur 550°C. Es handelt sich um ein nicht repariertes Teil. Die Übergangsgeometrie der Gehäusewand zum Flansch mit zwei Radien ist beim Schadenstriebwerk eine ältere 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.

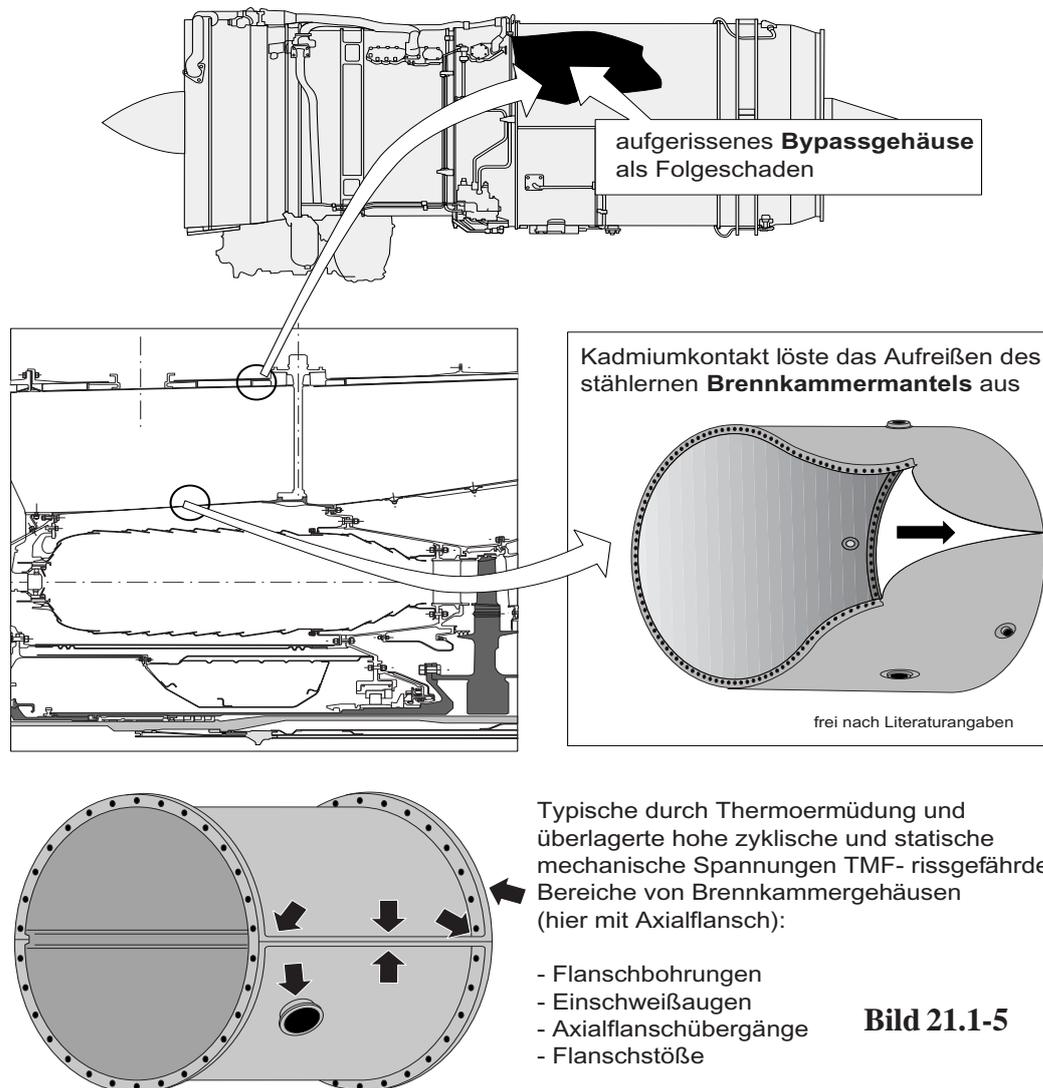
Beispiel für die hohe Betriebsbelastung von Brennkammergehäusen. Bei Reparaturen ist deshalb besondere Vorsicht geboten.



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 21.1-4**

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 21.1-5** (Lit. 21-2): Die Ursache für diesen Triebwerksschaden mit Bruchstückaustritt (siehe auch Bild 19.1.3-5.1) war eine gefährliche, metallische Oberflächenverunreinigung. Sie wurde bei der Reparatur im Rahmen eines Überholvorgangs als Nickel-Kadmium Korrosionsschutzschicht in den Flanschbohrungen auf-

gebracht. Eine solche Beschichtung 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 4, Kapitel 16.2.2.3).

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 21.1-6** (Lit. 21.1-3, Lit. 21.1-4 und Lit. 21.1-5): Von **Reparaturlötungen an Heißeilen ist nicht die Festigkeit und Zähigkeit des ursprünglichen Grundwerkstoffs** zu erwarten. Es ist anzunehmen, dass die Warmfestigkeit und **Kriech Eigenschaften** deutlich niedriger liegen (Band 4, Seite 16.2.1.4-50). Dieser Nachteil gegenüber einem ungeschädigten Grundwerkstoff wird von einer größeren **Sprödigkeit** verstärkt (Band 3, Bild 12.6.2-22 und Band 4, Bild 16.2.1.4-9).

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 (Bild 20.2-6). 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

## 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.

**Bild 21.1-6**

Günstige Gestaltung, Lötnaht außerhalb der hohen Thermoermüdungsbeanspruchung.

**besser!**

Eine Wärmedämmschicht im Gaskanal verringert die Thermoermüdungsbelastung und das Temperaturniveau.

**Thermoermüdungsbelastung reduziert.** Dies lässt sich mit den bereits besprochenen Varianten vorteilhaft kombinieren.

Ähnliche Überlegungen wie hier für Reparaturlötungen gelten auch im übertragenen Sinn für **Reparaturschweißungen** (Kapitel 21.2.1).

### **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.

Oberflächenbehandlungen beeinflussen die Schwingfestigkeit der Bauteile, auch durch die Eigenspannungszustände.

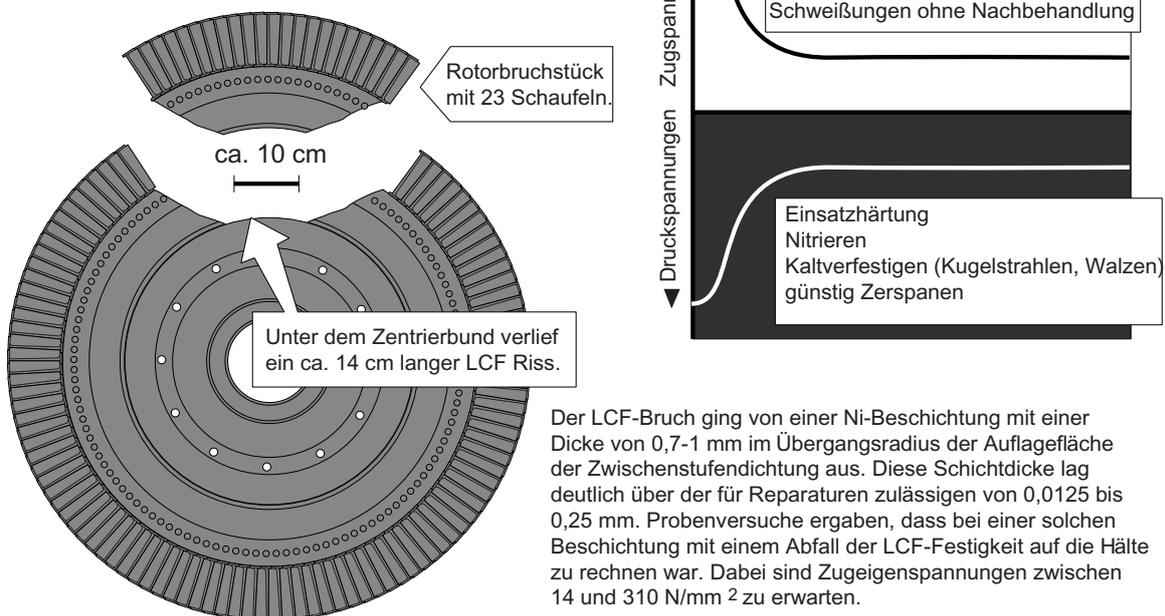
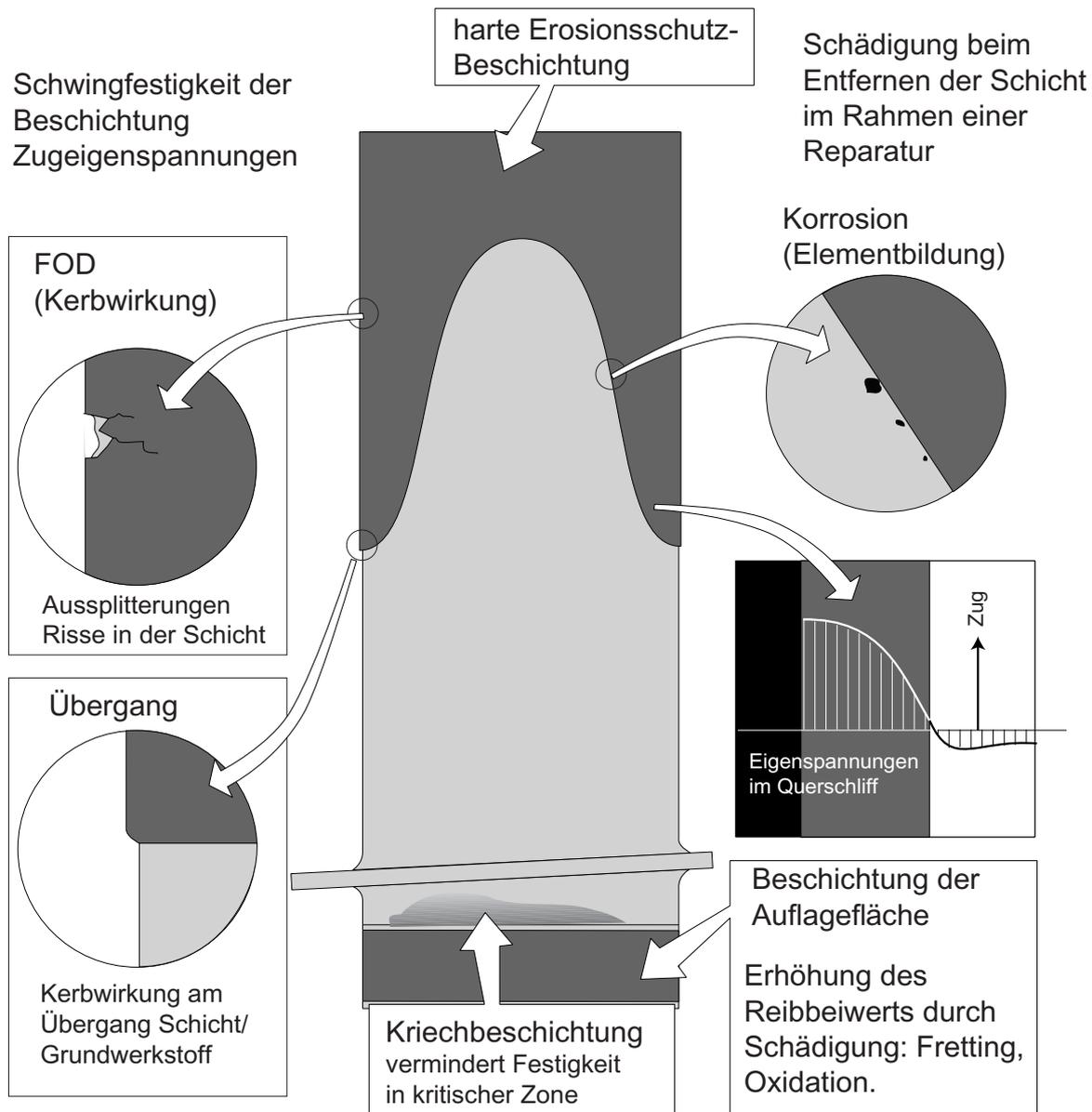


Bild 21.1-7

**Bild 21.1-7** (Lit. 21.1-6): Bei vielen Beschichtungen, besonders **galvanisch** aufgetragenen (Band 4, Bild 16.2.1.8.3-9), ist mit schädlichen (Zug-) **Eigenspannungen** (Diagramm rechts, Band 3, Bild 12.2-13) zu rechnen. Zugeigenspannungen überlagern sich mit Betriebs- 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 21.1-8**

**Bild 21.1-8:** Mit Beschichtungen lassen sich bei Reparaturen **Verschleißflächen wieder aufbauen und vorbeugend schützen**. Das gilt sowohl für **Reibverschleiß** (Band 2 Bild 6.2-8) von Auflageflächen als auch für **Erosionsverschleiß** (Band 1 Bild 5.3.3-5) an umströmten Flächen wie Schaufelblättern. 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 (Band 4, Bild 16.2.1.8.2-5). 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 5.4.1.1-8.1 und Bild 5.4.1.1-8.2). Bilden sich dabei **Grübchen (Lochfraß, engl. corrosion pits, Band 1 Bild 5.4.1.1-3)** 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 5.4.1.1-3).

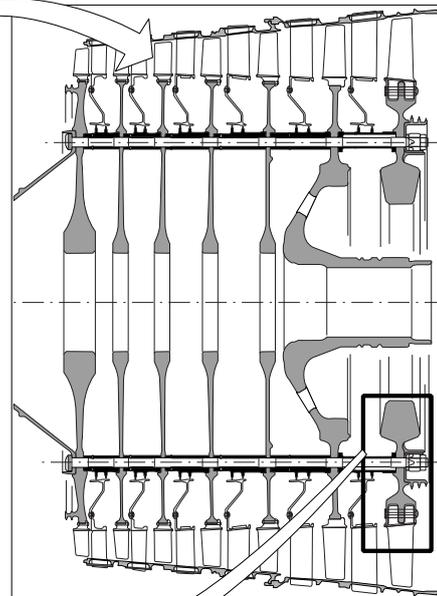
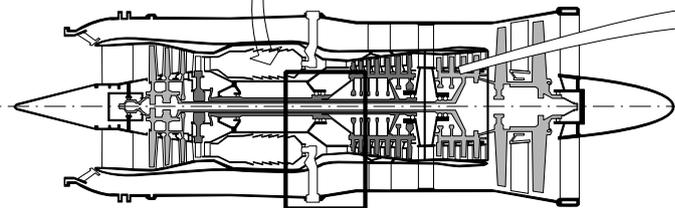
**Zugeigenspannungen** (Detail unten rechts) erhöhen die **Mittelspannung im Betrieb** und senken die Schwingfestigkeit (Bild 23.5.1-2 und Band 4 Bild 16.2.2.4-4).

### 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 21.1-9**

**Bild 21.1-9** (Lit. 21.1-14): Dieses Beispiel (Band 4, Bild 16.2.1.8.3-6) zeigt die **potenzielle Gefährlichkeit von Verfahren mit Stromdurchgang**. Bei der galvanischen Beschichtung

der Verdichterscheibe (Skizze unten Mitte) kam es wegen ungenügender Kontaktierung zur **elektrischen Funkenbildung**. Die entstandene kleine **Anschmelzzone** an einer Scheiben-

bohrung senkte die Schwingfestigkeit (hier LCF) deutlich ab. Es kam zu Rissbildung und Bruch der Scheibe.

Dieser Fall demonstriert die **Gefahr auch kleiner Anmelzkrater** (Band 4, Kapitel 16.2.2.6). 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 (Band 4, Bild 17.5-1). Im Zweifelsfall ist der OEM zu konsultieren.

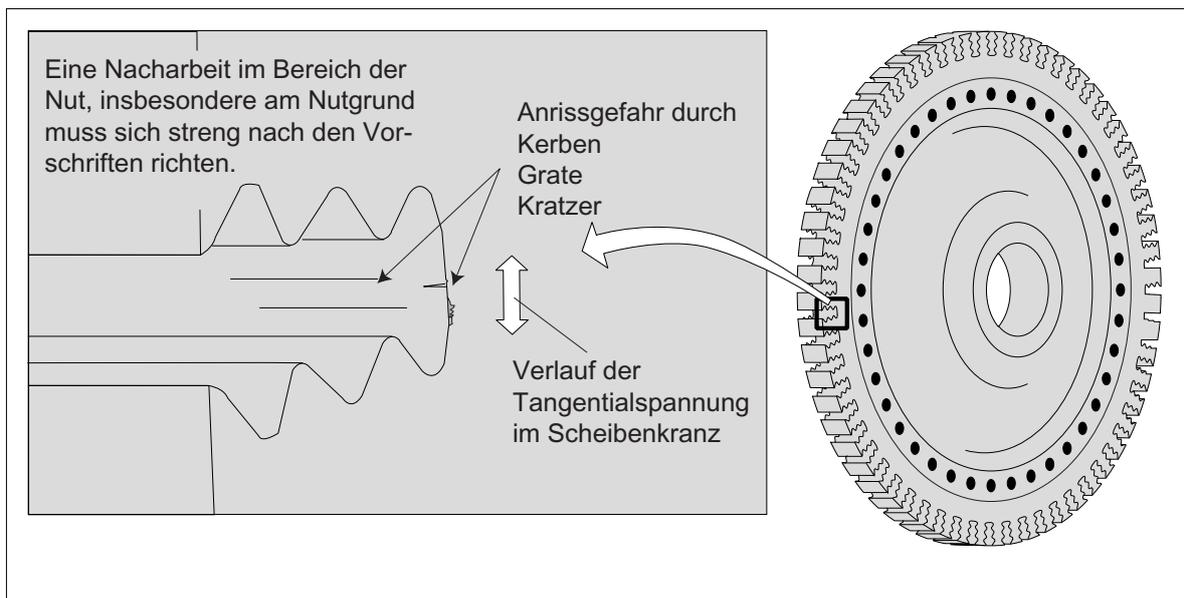
**Bild 21.1-10** (Lit. 21.1-8 und Lit. 21.1-10): Der **Grund von Scheibennuten** ist sowohl im Verdichter- als auch im Turbinenbereich eine insbesondere **zyklisch hochbeanspruchte** Bauteilzone. **Beschädigungen** (Bild 20.1-20) aber auch **Nacharbeiten** sind in diesem Bereich ent-

sprechend problematisch (Band 4 Bild 16.2.2.2-8). 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 (Band 4 Bild 16.2.1.1-9.1 und folgende).

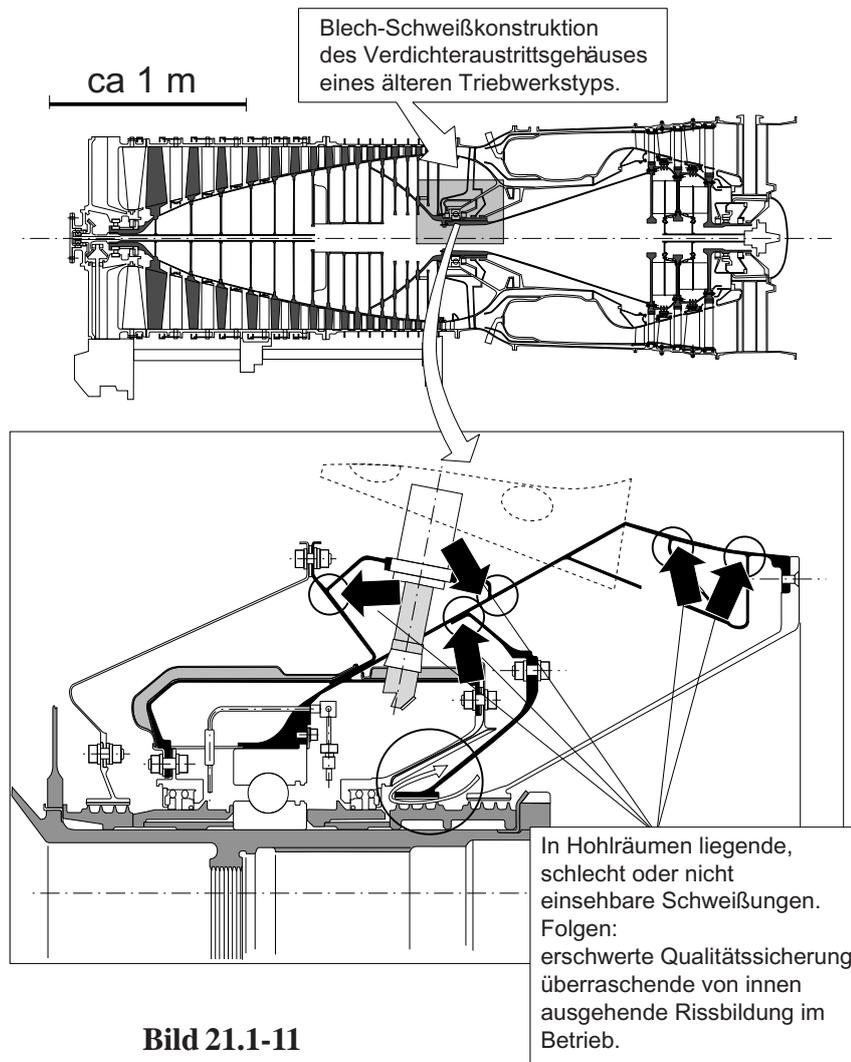
**Bild 21.1-11** (Lit. 21.1-11): Wie gut ein Teil **reparaturschweißbar** ist, hängt außer vom Werkstoff nicht zuletzt von der **konstruktiven Gestaltung** ab. Das gilt besonders für komplexe Gehäuse wie Verdichter- (Skizze unten) und

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



**Bild 21.1-10**

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



**Bild 21.1-11**

Turbinenausstrittsgehäuse älterer Triebwerkstypen. Hier handelt es sich um Schweißkonstruktionen (Bild 21.1-2). 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 (Band 1, Bild 5.4.4.2-4 und Band 4 Bild 16.2.1.3-18). 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?

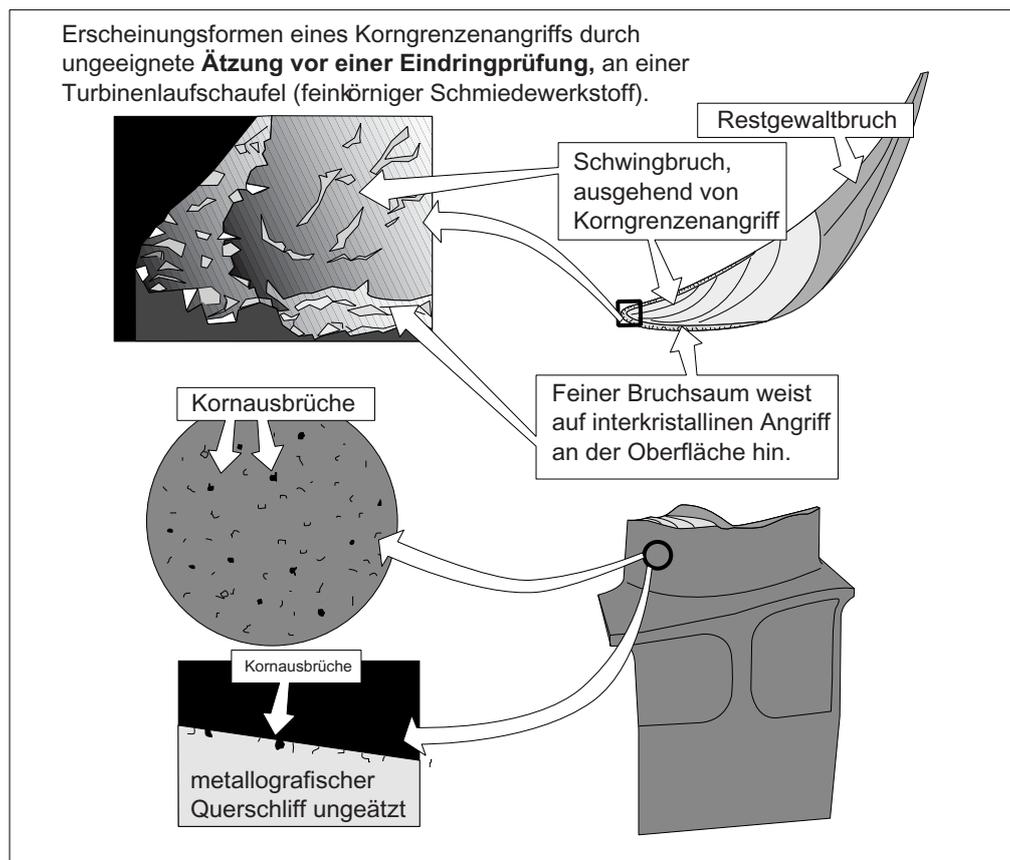
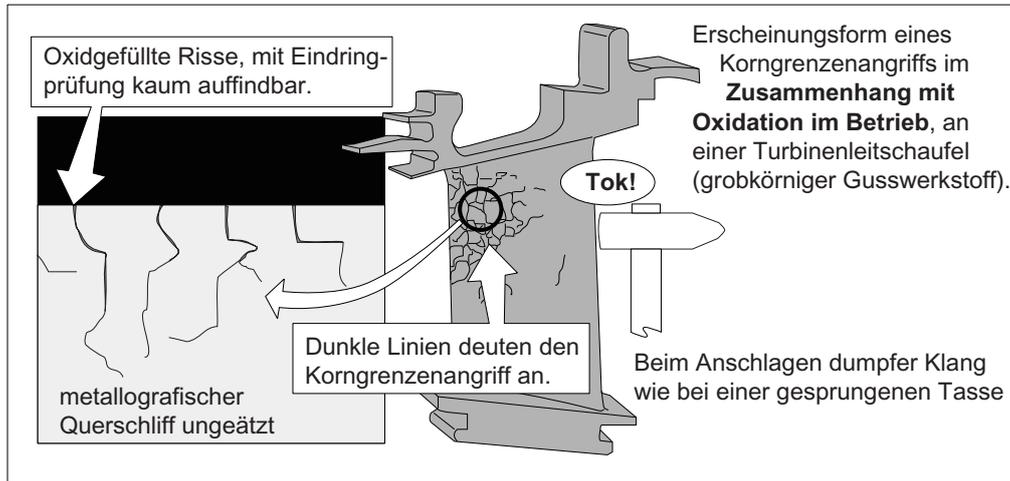


Bild 21.1-12

Bildbeschreibung nächste Seite

**Bild 21.1-12** (Lit. 21.1-12): 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 (Bild 21.2.4-3).

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 5.4.1.1-9). 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 5.4.1.1-9). Derartige Schädigungen sind zerstörungsfrei kaum auffindbar. Im Extremfall tritt ein **ungewöhnlich dumpfer Ton** beim Handling auf (Band 4 Bild 16.2.1.7-10). 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** (Seite 21.2.4-1 und Bild 21.2.4-2 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:

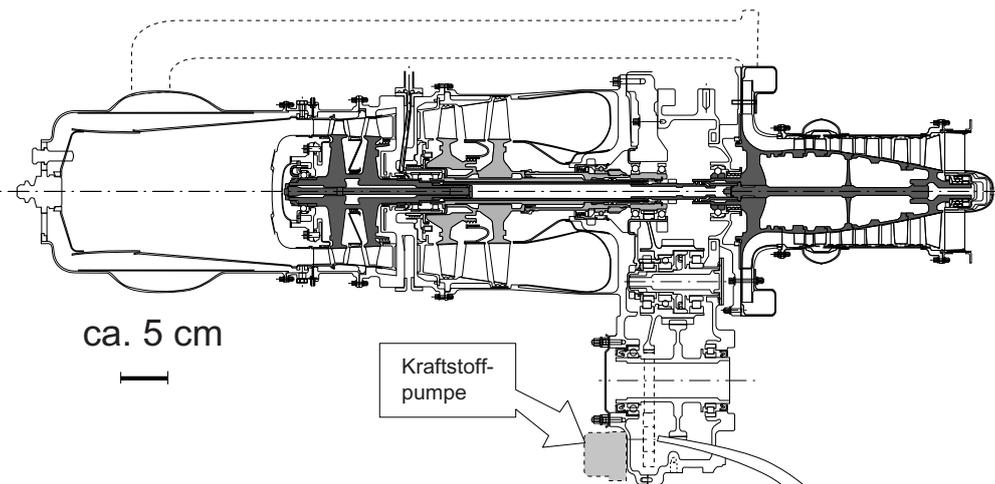
Verschleißflächen sind Tribosysteme. Bei **Änderungen und Nachweisen** sind immer **beide Flächen und einwirkende Medien** zu berücksichtigen.

**Bild 21.1-13** (Lit 21.1-13): 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.



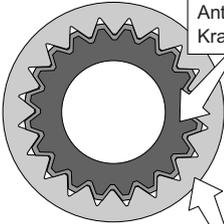
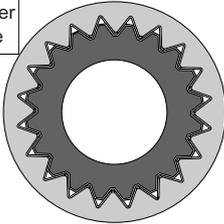
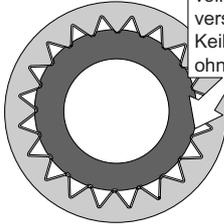
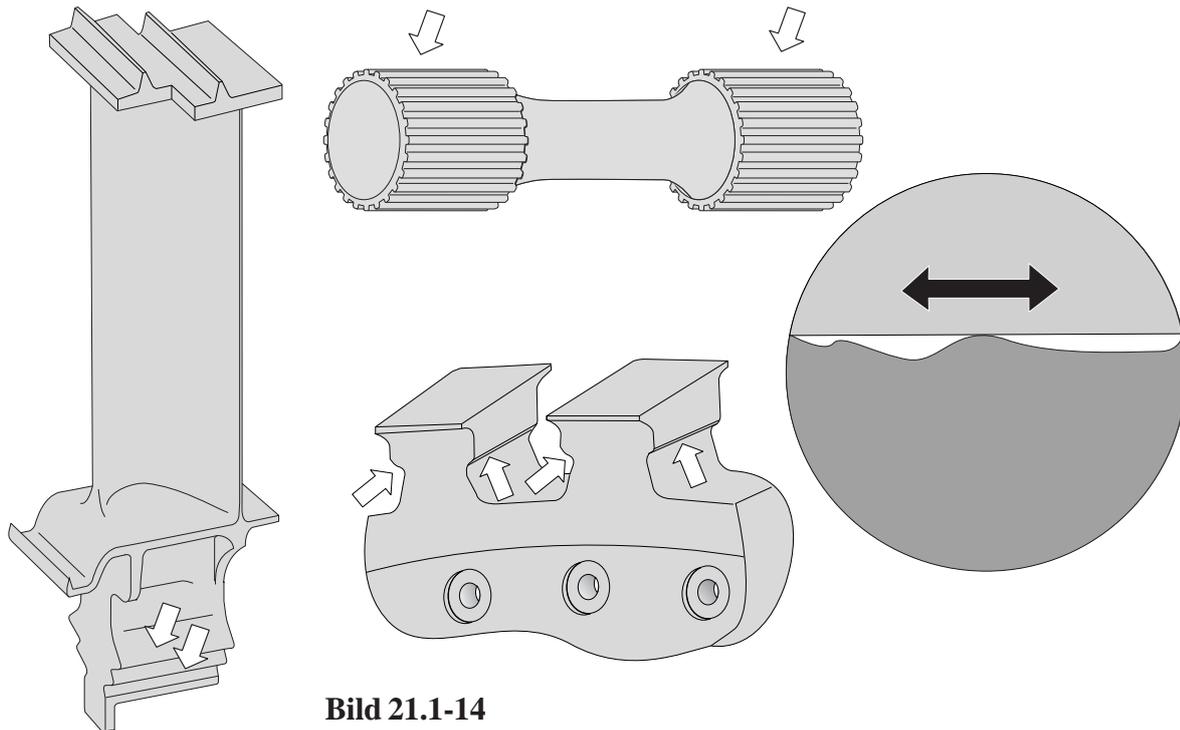
<p>bewährte Version</p>  <p>Beide Teile mit nitrierter Verzahnung seit Jahren bewährt</p>	<p>Modifikation bei Überholung: Zur Verbesserung des Verschleißverhaltens beide Seiten der Verzahnungen hartverchromt</p> 	<p>Repariert aber nicht überholt! Es wurde nur die Zahnradseite hartverchromt. Die Wellenseite blieb gasnitriert.</p>  <p>vollkommen verschlissene Keilverzahnung ohne Eingriff.</p> <p>Extremer Verschleiß an der Vielkeilverzahnung der nur gasnitrierten Kraftstoffpumpenwelle</p>
--	---	--

Bild 21.1-13

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



**Bild 21.1-14**

**Bild 21.1-14:** Durch **Reibverschleiß (Fretting, Band 2 Kapitel 6.1)** 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 2 Bild 6.1-11). Damit werden **Schwingrisse** begünstigt. Dieser Effekt ist beispielsweise besonders bei der Nacharbeit von Frettingflächen an **Schaufelfüßen und Scheibennuten** zu berücksichtigen (Band 2 Bild 6.2-12).

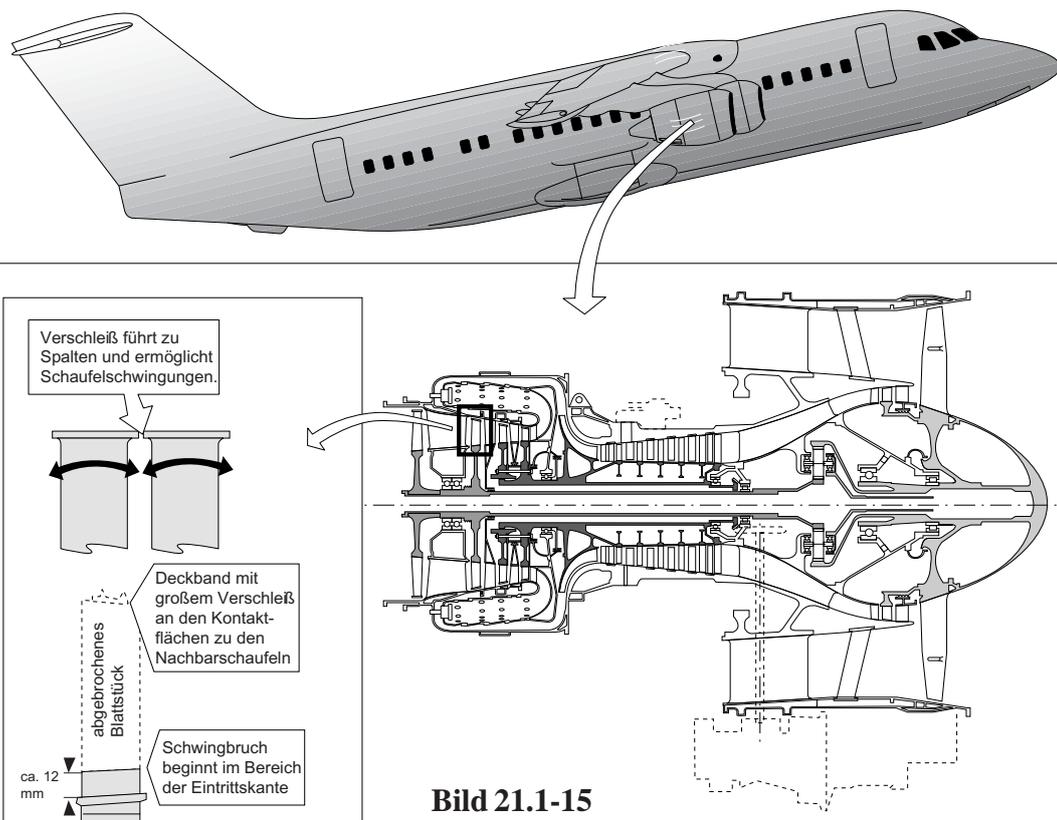
Auch die **Verschleißgeschwindigkeit einer neuen Kombination gelaufener Auflage-**

**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 21.1-15** (Lit. 21.1-15): 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 3 Bild 12.6.3.2-

4) 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 Deckbändern

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 21.1-16** : 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.**

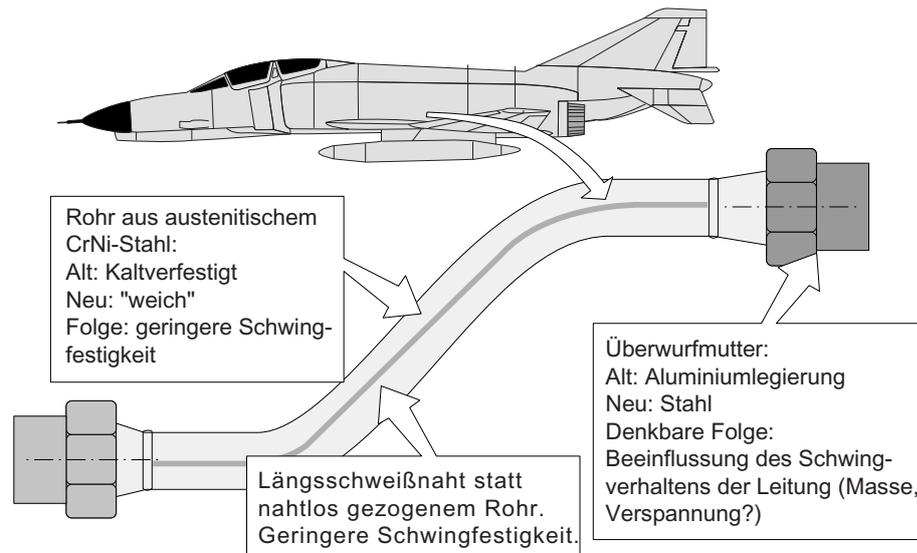
**Werkstoffänderungen** können notwendig werden, wenn die **Bauteillebensdauer angehoben** werden soll (z.B. für Turbinenschaufeln). Das gilt auch, wenn die **Verfügbarkeit** einer alten Legierung (z.B. Ni-Schmiedelegierung) nicht mehr gegeben ist. Ein Beispiel ist der Übergang von **Ni-Schmiedelegierungen** 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 Verdichtleitapparates 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 häu-

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 21.1-16**

#### 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)

fig erst nach längeren Betriebszeiten erkannt, was das Schadensrisiko besonders ansteigen lässt (Bild 21.3.3-7).

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 Betriebseinflüssen oder die Nachgiebigkeit bei Überlastung (z.B. unter unerwarteten Wärmespannungen) ankommt.

**Bild 21.1-17:** Ein **durchaus unerwarteter Effekt** kann gerade an älteren Triebwerkstypen zu Problemen führen. **Moderne Fertigungsverfahren lassen oft höhere Genauigkeiten** zu als die früher gefertigter „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

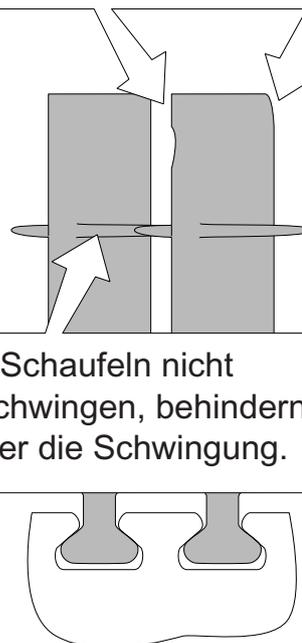
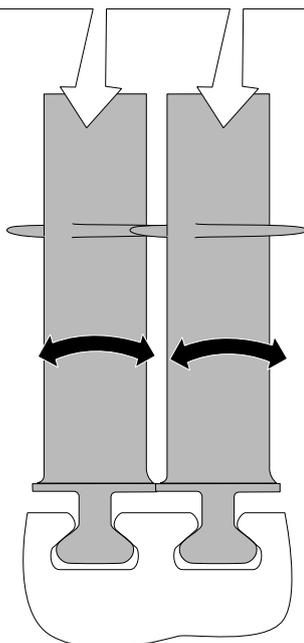
**Resonanz begünstigt** (Skizze rechts, Band 3 Bild 12.6.3.4-6.2).

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 21.1-17

## Literatur zu Kapitel 21.1

- 21.1-1** „Cracked No.2 engine combustion chamber outer case“, Zeitschrift „Aircraft Engineering and Aerospace Technology“, 1999, Volume 71, Issue 3, Seite 269-295.
- 21.1-2** 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.
- 21.1-3** P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, ISBN 3-7643-5971-4, 1998, Seite 151-159
- 21.1-4** 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.
- 21.1-5** Y.Honnorat, J.Lesbgués, „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.
- 21.1-6** 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.
- 21.1-7** 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.
- 21.1-8** J.Hall, „Safety Recommendation“, National Transportation Safety Board, Seite 1-8.
- 21.1-9** 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.
- 21.1-10** C. Kjelgaard, „FAA Inspectors to check maintenance tools after CF6 failure“, 21. Nov. 2001, [www.rati.com/news](http://www.rati.com/news), Seite 1.
- 21.1-11** Metals Handbook „Volume 11, Failure Analysis and Prevention“, American Society for Metals (ASM), November 1986, ISBN 0-87170-007-7, Seite 434.
- 21.1-12** A.Rossmann, „Rissbildung an galvanotechnisch behandelten Bauteilen“, Zeitschrift „Metall-oberfläche“, 35,(1981), 10, Seite 390-396.

- 21.1-13** Transportation Safety Board of Canada, Aviation Occurrence Report A98C0070, „Loss of Power/Loss of Control“, Yukon Helicopters Ltd., Huges 369HS C-FZXC, Waasagamach1998, Manitoba, 23.April 1998, Seite 1-8.
- 21.1-14** „Engine casing repair: present and future“, Zeitschrift „Aircraft Technology Engineering Maintenance“, June/July 1997, Seite 68-74.
- 21.1-15** 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.