

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 Reparaturontwicklung 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. **Verschlimmderung** (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 Heißteil 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 Reparaturontwickler 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. Diesen praxisgeeignete **Wirksamkeit ist mit der Reparaturontwicklung zu erproben und nachzuweisen**.

Grenzen des Entwicklungsaufwands für Reparaturen: Verglichen mit der Neuteilentwicklung erfolgt erfahrungsgemäß die Reparaturontwicklung 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 Betriebs-tauglichkeitsnachweis 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.

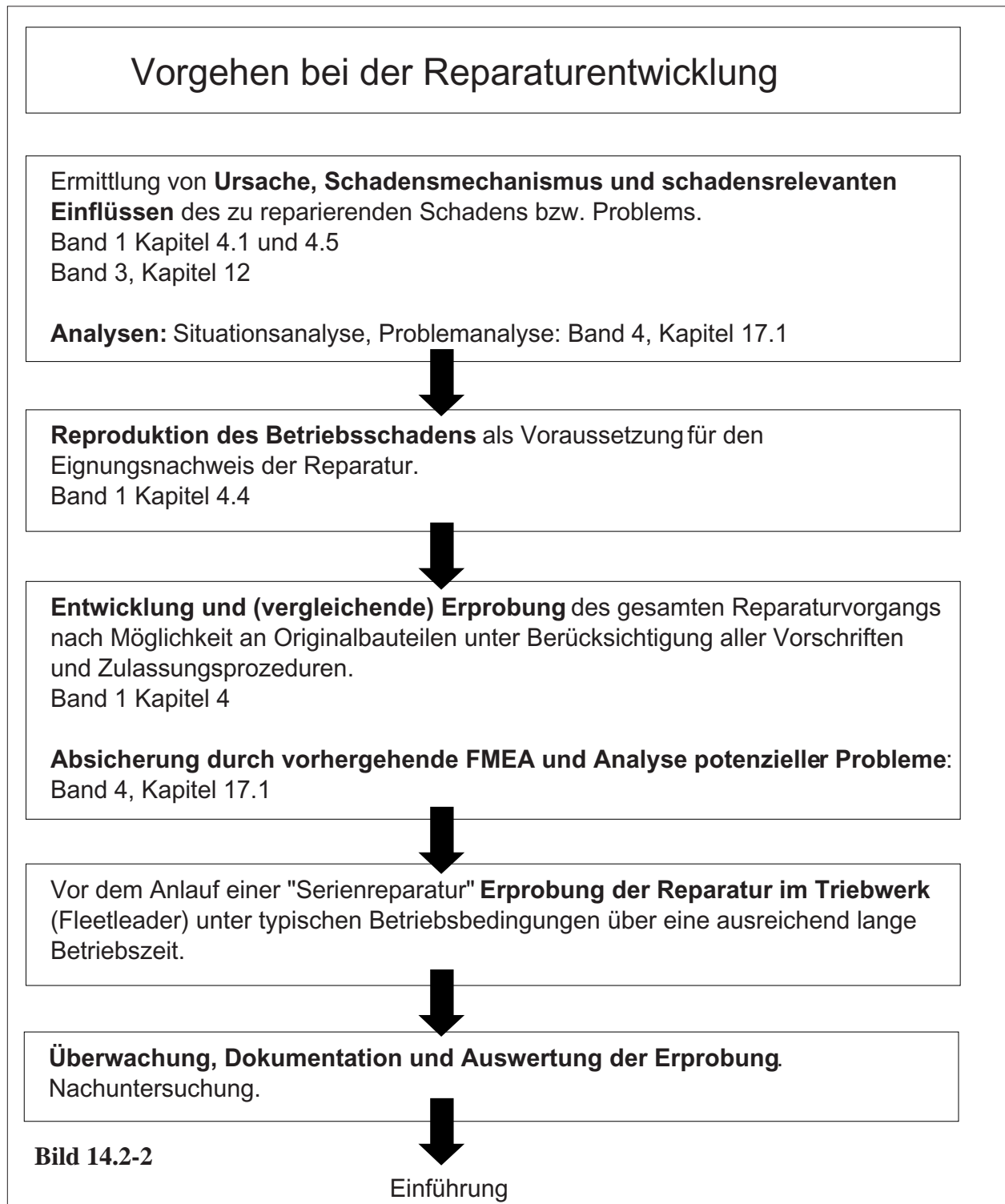


Bild 14.2-2 (Lit. 14.2-1 und Lit. 14.2-2): Um besondere Risiken einer **Reparaturoentwicklung** (Bild 14.2-1) zu minimieren, lässt sich eine Abfolge **empfehlenswerter Einzelschritte** angeben.

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**.

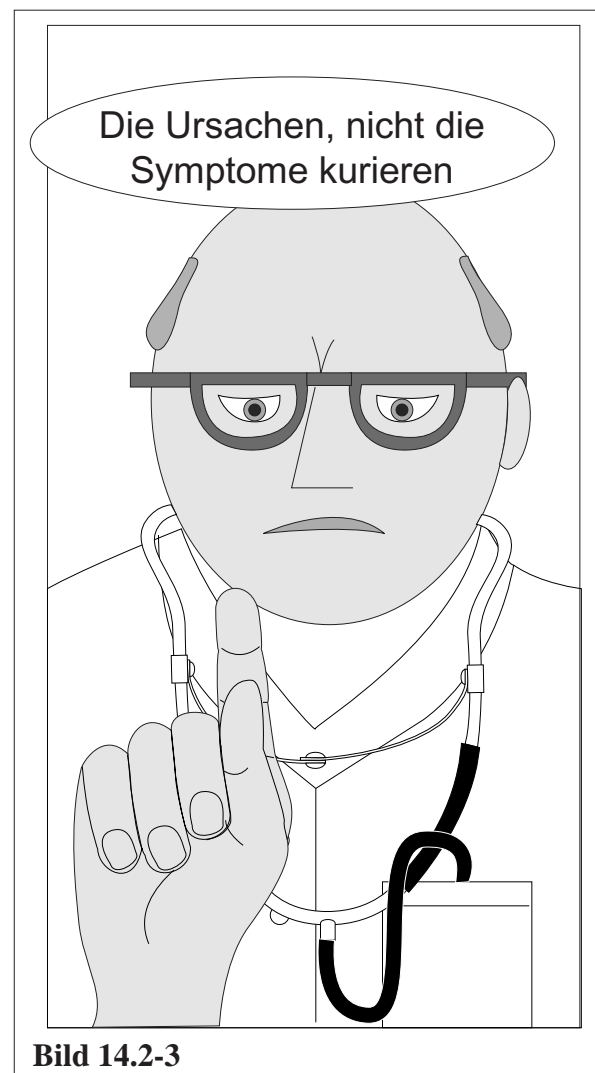


Bild 14.2-3

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!

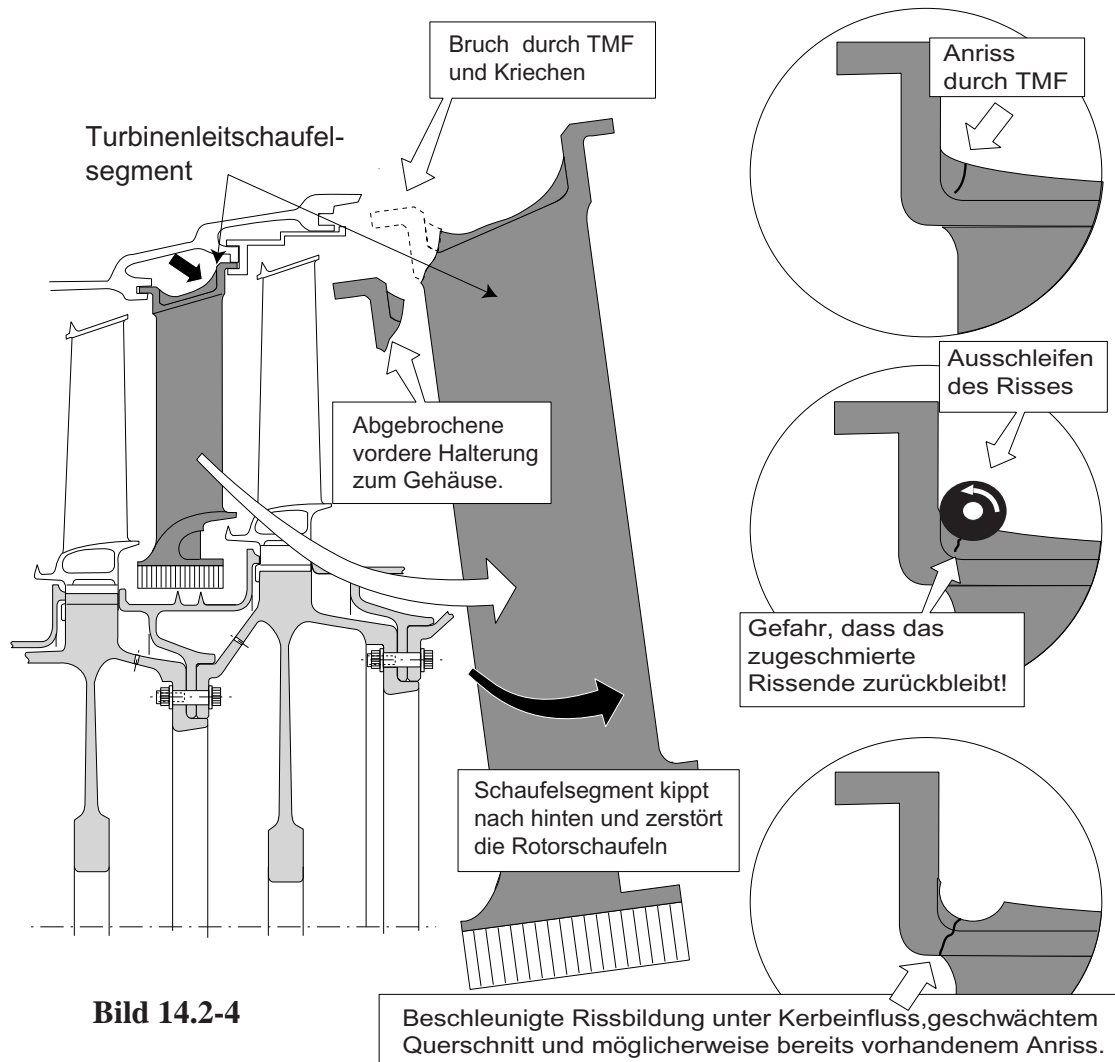


Bild 14.2-4

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.

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

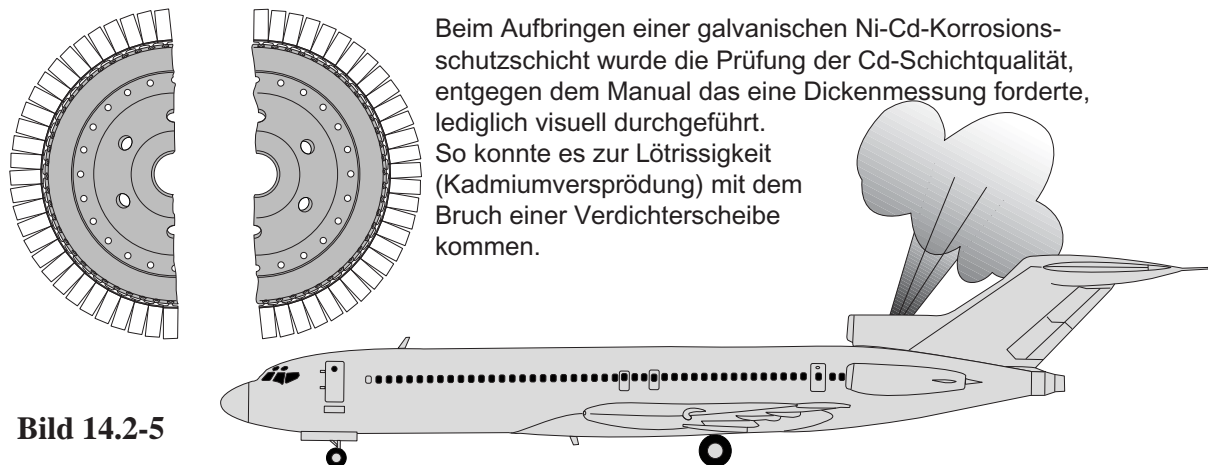


Bild 14.2-5 (Lit. 14.2-3): Bei älteren Triebwerkstypen, in denen noch häufig rostende Stähle an hochbelasteten Komponenten wie Rotorscheiben und Gehäusen zum Einsatz kommen, wird **Kadmium** (Cd) als **Korrosionsschutz** eingesetzt. Kadmium kann an zugspannungsbelasteten Bauteilen bereits bei **Betriebstemperaturen 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 **Schwingerbruchzone**, 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 Verschleißschicht** 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 Notevakuierung wurde eingeleitet. Das Feuer zerstörte das Flugzeug. Die folgende Untersuchung des Triebwerks zeigt, dass der Unfall auf den Bruch einer Verdichterscheibe zurückzuführen war.

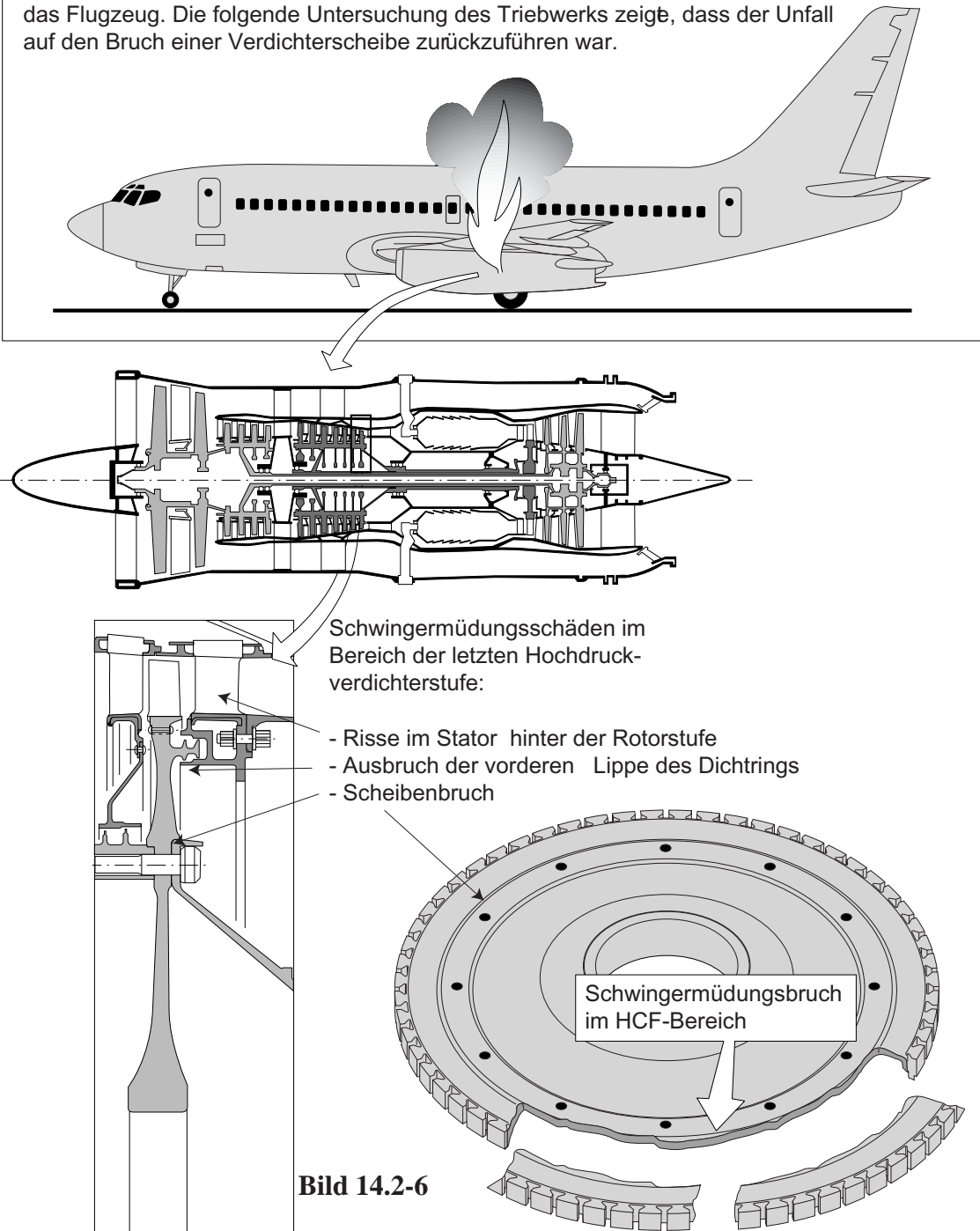


Bild 14.2-6

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.