Axel Rossmann

Probleme der Maschinenelemente erkennen, verhüten und lösen

Unter besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus

für

- Studierende
- Konstrukteure
- Betreiber
- Qualitätssicherung
- Wartung und Kundendienst
- Untersucher
- Gutachter

Band 4 A: **Firmenkultur und Arbeitsklima**: Schadensminimierende Konstruktion.
Technologische Entwicklung: Minimierung von Entwicklungsrisiken.
Arbeitsumfeld - „Human Factors“: Erfahrung und Fähigkeiten, Handbücher für Wartung und Konstruktion, Problemanalysen.

© Axel Rossmann - Turbo consult
Ausschnittsunterlage nur mit Lizenz

turbo consult
Axel Rossmann

1. Auflage
(Serie 0.1)

© Axel Rossmann - Turboconsult
ausschulungsunterlage nur mit Lizenz

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

© 2012 by A.Rossmann, Turbo Consult, Karlsfeld

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

Bestellung dieses Buches:

Fax Nr. (Deutschland) 08131 50 50 67

ISBN xxxxxxxxxxxxxx

Vorwort

Dieser Band 4 der Reihe „**Probleme der Maschinenelemente - erkennen, verhüten und lösen**“ befasst sich mit „**den Einflüssen auf die Qualität von Maschinenelementen**“. Der Inhalt lehnt sich weitgehend an die Bände 3, 4 und 5 der Reihe „Die Sicherheit von Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“. Damit wird die Erfahrung dieses High Tech-Maschinenbaus insbesondere für die erhöhten Ansprüche an die typischerweise hochbelasteten Maschinenelemente des **Leichtbaus** genutzt.

Zunächst sollen **übergeordnete Einflüsse auf die Qualität** betrachtet werden die oft nicht in ihrer ganzen Tragweite bewusst sind. Insbesondere das Management hat zumindest die erforderlichen Voraussetzungen zu gewährleisten. Hier sind auch Bereiche wie die **Personalverwaltung** und die **Budgetverantwortlichen** angesprochen, denen oft ein ausreichendes Problembewusstsein dazu fehlt. Betroffen sind z.B. **Ausbildung**, **Weiterbildung der Qualitätsverantwortlichen** im weitesten Sinn und **Personalrichtlinien** für qualitätsrelevante Problemfälle wie der Umgang mit der Verantwortung und möglichen **Konsequenzen bei Qualitätsproblemen**, insbesondere bei Ausschuss.

Dabei spielt die **Firmenkultur** auch in Form des **Arbeitsklimas** eine besondere Rolle. So ist eine positive Motivation mit der Einsicht in das Notwendige erfahrungsgemäß der Bedrohung/ Strafe vorzuziehen.

Ein weiteres wichtiges übergeornetes Thema sind die sog. **Human Factors**. Sie stehen für ein qualitätsförderndes/gewährleistendes Umfeld. Dazu gehören neben den Arbeitsbedingungen auch das Handling im Produktionsablauf und die Montage.

Bewusst wird auf die Darstellung der Funktion der Prüfverfahren verzichtet. Hier befindet sich ausreichend gute Literatur am Markt. Diese hat jedoch weniger die Probleme der Verfahren wie fertigungsbedingte Einflüsse auf die Nachweisgrenzen im Blick. Es wird versucht das ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu ergänzen.

Ein besondererer Schwerpunkt dieses Buchs sind ausgewählte **Einflüsse auf Qualitätsmerkmale**, die insbesondere für Betriebsverhalten und Betriebssicherheit von Bedeutung sind. Diese sind in dem konventionellen Maschinenbau mit typisch hohen Sicherheiten weit weniger von Bedeutung als bei den typischerweise hochbelasteten Leichtbauteilen. Hier sind die Erfahrungen aus der Flugtriebwerkstechnik äußerst wertvoll um das **Qualitätsbewusstsein zu sensibilisieren**.

Axel Rossmann

© Axel Rossmann Turboconsult
alle Rechte vorbehalten mit Lizenz

Was mit der besonderen Form dieses Buchs erreicht werden soll.

Motivation: Interessante und überraschende Überschriften zu den Bildern.
Interesse wecken: Schnell erfassbare Bilder typischer Maschinenelemente mit inhaltsbezogenen Merkmalen.
Sinnhaftigkeit und Notwendigkeit des theoretischen Unterbaus im Studium erkennen.
Praxisrelevanz mit dem Bezug zur allgemeinen eigenen technischen Erfahrung. Der behandelte Stoff sollte bereits ohne den theoretischen Teil eines Studiums den Lernenden für die Industrie interessant machen.
Erklärungen möglichst einfach mit Hilfe der Vernetzung (Bildangaben) im Text zu finden.
Praxistauglichkeit. Auch nach dem Studium soll das Buch als ein Ratgeber dienen. Es unterstützt dafür insbesondere das Erkennen auslegungsrelevanter Einflüsse. Dabei soll ein umfangreiches Sachregister helfen.
Bereits bei einem Studienabbruch nach wenigen Semestern, die auch den Inhalt dieser Bücher behandeln, sollte nach Einschätzung des Autors bereits ein Interesse der Industrie bestehen.
Vertiefungsmöglichkeit mit Hilfe von Literaturhinweisen. Viele haben Angaben zum kostenlosen Down-Load im Internet.

Zur Gestaltung:

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

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

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

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

Schadensursächliche Versprödungen:

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

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

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

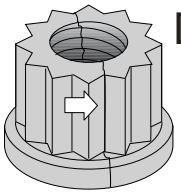
Versprödung durch ‘Einschießen’ von Fremdmetallschmelze *(Lötrissigkeit, engl. LME, Band 1 Bild 5.8.1-2 und Bild 5.8.1-3). Dabei dringt in einem schnellen Vorgang benetzende* ***Metallschmelze*** *in den unter ausreichender* ***Zugspannung*** *stehenden Werkstoff („****D1****“). Die Bruchfläche kann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

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

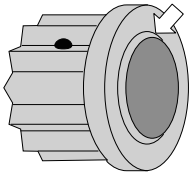
Bild zum Beispiel siehe folgende Seite.

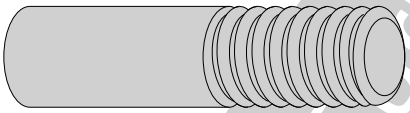
© Prof. Rosemann - Turbocorsult
Ausschnittunterlage nur zur Lehre

Wichtige Schadensbilder und Ursachen für Sprödbrüche an Schrauben und Muttern.

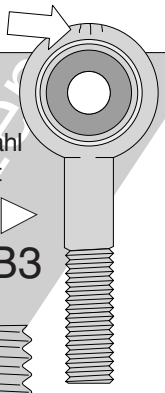


D1 Spröd durchgerissene Schraubenmutter. Material Typ 12%-Cr-Stahl, Härte 44 HRC, mit Kadmium-Korrosionsschutzschicht. Das bei Betrieb geschmolzene Kadmium führte zur Lötrissigkeit (LME)

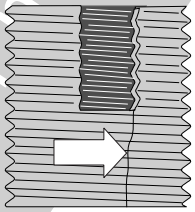




B1 Spröd durchgerissene Schraube. Material Typ 12%-Cr-Stahl. Härte/Festigkeit (bis 1480 MPa) über der max. zulässigen Grenze von 1380 MPa. Bei der Beschichtung mit Kadmium drang Wasserstoff ein und führte zur Wasserstoffversprödung.

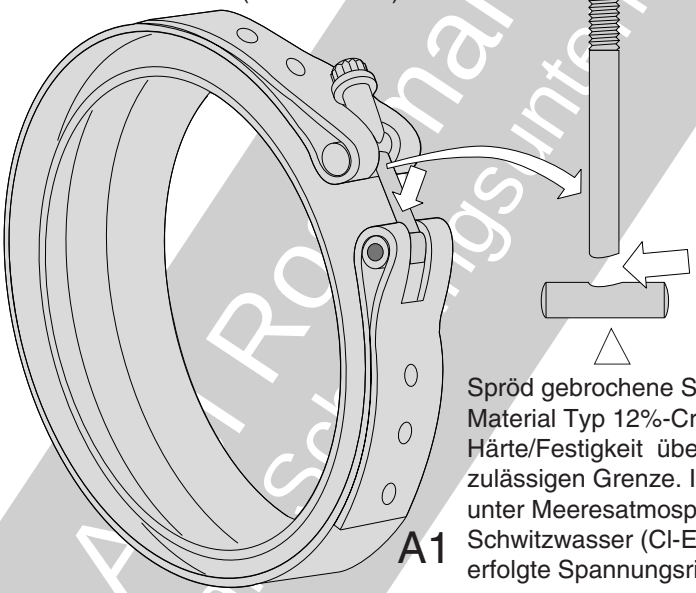


Schubstange (Vergütungsstahl verkadmet) mit Rissen durch Wasserstoff-versprödung B3



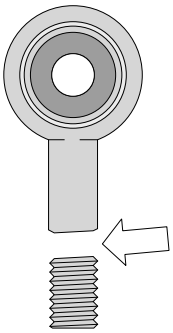
B2 Gewindeeinsatz (Einsatzstahl verkadmet) mit Riss durch Wasserstoffversprödung

Spannschraube (12% Cr-Stahl)

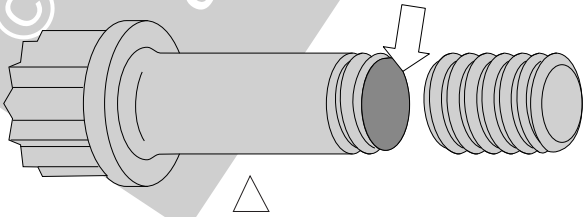


Schubstange (Vergütungsstahl) mit Bruch infolge Spannungsrisskorrosion wegen ungünstigem Gefüge (zu hart).

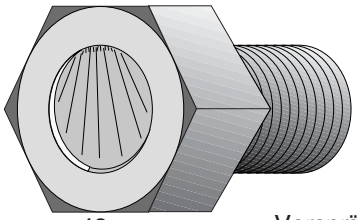
A2



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



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



48 mm

E1 Versprödung durch 'Werkstoffalterung'

Bild zum Beispiel

© A. Romann - Turbocom
als Schulungsunterlage nur mit Erlaubnis

Mein besonderer Dank für die Korrekturarbeiten gilt

dem Lektor, Herrn Dipl.-Dokumentar Reinhard Glander,

und

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

sowie dem Berater

- Herrn Ruda Eckhard (Erfahrungen mit zerstörungsfreien Prüfungen)

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Qualitätsmerkmale der Fertigung

15. Firmenkultur und Arbeitsklima.
15.1 Schadensminimierende Konstruktion
15..1.1 Gestaltungsregeln
15.2 Technologische Entwicklung
15.2.1 Der Entwicklungsprozess
15.2.2 Risiken und Probleme technologischer Entwicklung
15.2.3 Minimierung des Entwicklungsrisikos

16. Das Arbeitsumfeld - „Human Factors“
16.1 Erfahrung, Fachkenntnis und Fähigkeiten
16.1.1 Arbeitsübergabe und Kommunikation
16.2 Handbücher, Arbeitsunterlagen, Vorschriften uns Spezifikationen.
16.3 Wartunggsfreundliche Konstruktion
16.4 Vermeidung von Arbeitsfehlern mit Hilfe systematischer Analysen

17. Qualitätssicherung
17.1 Strategien und Vorgehen bei Problemen
17.2 Die ungeschädigte Oberfläche - „Surface Integrity“
17.3 Prüfverfahren, Probleme und Grenzen
17.3.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren
17.3.2 Zerstörende Prüfverfahren
17.4 Kennzeichnen von Bauteilen
17.5 Nacharbeit

18. Schadensrelevante fertigungsbedingte Effekte
18.1 Oberflächentopografie, Rauigkeit
18.2 Grate und scharfe Kanten
18.3 Verunreinigungen
18.4 Eigenspannungen
18.5 Mechanische Überlastung und Beschädigungen
18.6 Überhitzungen, Anschmelzungen, Metallspritzer
18.7 Rissbildung
18.8 Haftfestigkeitsprobleme
18.9 Maßabweichungen, Bauteilgeometrie

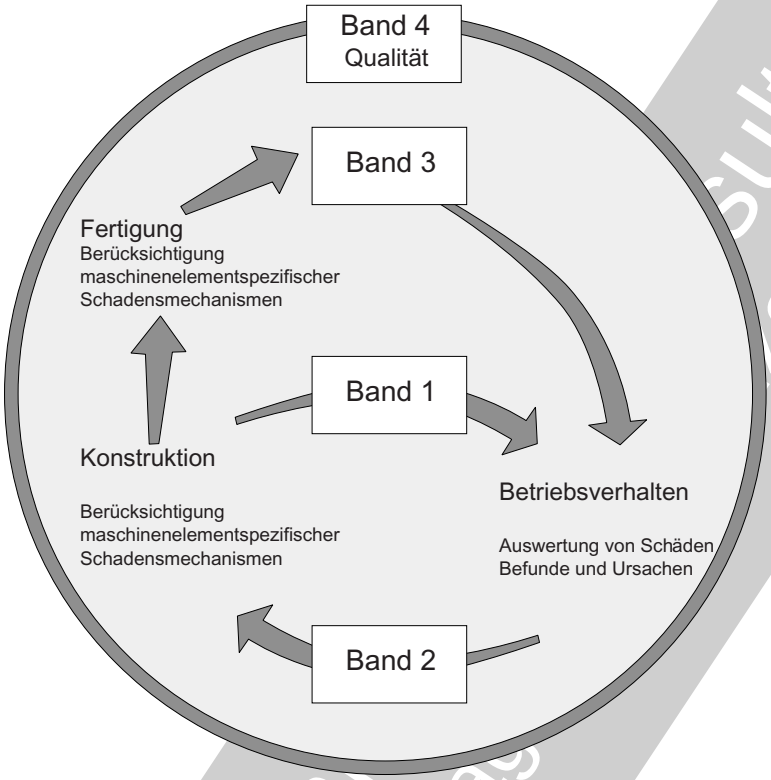
Sachregister

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einfluss der Firmenkultur auf die Qualität

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Enführung



Das Bemühen um die Qualität der Bauteile/Maschinenelemente umfasst den gesamten Entstehungsprozess. Dies soll in dem obigen Schema zum Ausdruck kommen.

Mit der **Tendenz zum Leichtbau** und damit **Strukturen hoher Festigkeitsauslastung**, meist zwangsläufig mit einer entsprechend beanspruchten großen Oberfläche, nehmen die Anforderungen an die Fertigung von Bauteilen hoher Sicherheit gegenüber dem konventionellen Maschinenbau deutlich zu.

Es geht jedoch nicht nur um die **festigkeitsrelevante Sicherheit**. Einen wichtigen Platz nimmt das **Betriebsverhalten** ein, bei dem die Bauteilsicherheit gegen Versagen (Bruch) nicht unbedingt im Vordergrund steht. Hierzu gehören aerodynamische Effekte die von der Geometrie (z.B. Strömungsprofil) und der Oberflächentopografie (z.B. Rauigkeit) abhängen.

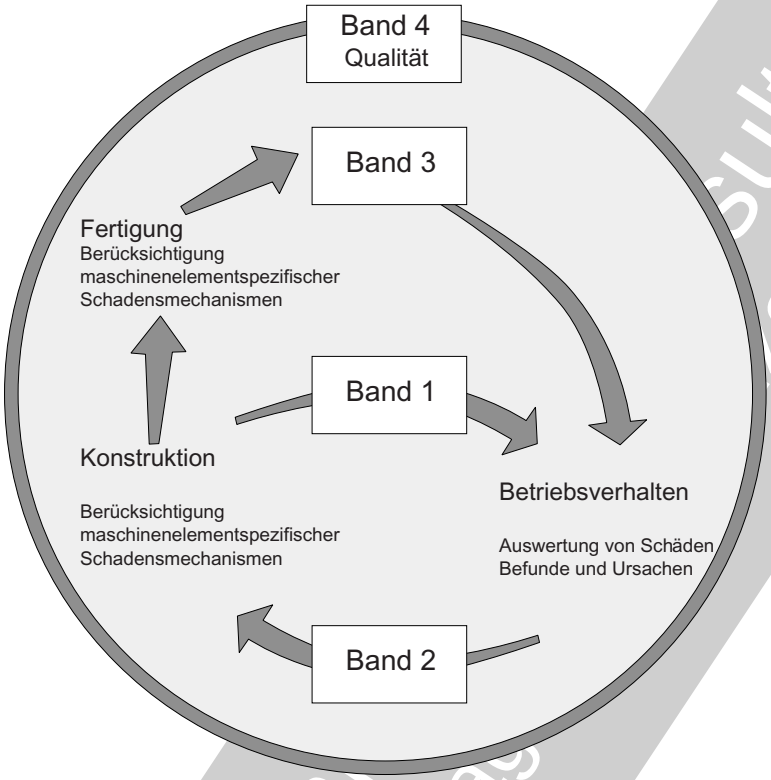
Gewöhnlich wird eine **Auffälligkeit** in der Fertigung während der Herstellung oder bei den Prüfungen entdeckt. Die Beurteilung erfolgt dann nach Standards/Spezifikationen. In Zweifelsfällen sollte sich der verantwortliche Konstrukteur um die Beurteilung, gegebenenfalls eine **Nacharbeit** kümmern. Voraussetzung ist ausreichendes Hintergrundwissen über Einflüsse im späteren Betrieb (Band 1) und Versagensmechanismen (Band 2).

Um **Abweichungen zu erkennen** ist eine ausreichende **Sensibilisierung** aller derer, die mit dem Bauteil zu tun haben Voraussetzung. Dies erfordert ein **bauteilspezifisches Bewusstsein** für bedenkliche Einflüsse und ausreichend **Erfahrung**. Zu solchen Abweichungen gehören beispielsweise örtliche Anschmelzungen im Mikrobreich wie durch elektrische Funken (Kapitel 18.6) oder die Einwirkung von angeschmolzenen Verunreinigungspartikeln. Natürlich ist hier Hintergrundwissen über Probleme der Fertigungsverfahren wichtig. Das ist oft firmenspezifisch und gilt als zu schützendes Know How. Es steht deshalb häufig der Lehre nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund werden solche, die im Rahmen des anspruchsvollen Leichtbaus (Turboflugtriebwerke) erkannt wurden, in Band 3 behandelt.

Von besonderer Bedeutung sind die **Prüfverfahren** (Kapitel 17.3) , wobei deren **Anwendungsbereich**, **Grenzen** und **Unzulänglichkeiten** auch **in Konstruktion, Fertigung und Montage bewusst** sein sollten, selbst wenn deren Aufgaben nicht direkt zur Qualitätskontrolle gehören.

© Vieweg Professional Consult
ein Imprint von Springer Verlag GmbH & Co. KG Wiesbaden

Enführung



Das Bemühen um die Qualität der Bauteile/Maschinenelemente umfasst den gesamten Entstehungsprozess. Dies soll in dem obigen Schema zum Ausdruck kommen.

Mit der **Tendenz zum Leichtbau** und damit **Strukturen hoher Festigkeitsauslastung**, meist zwangsläufig mit einer entsprechend beanspruchten großen Oberfläche, nehmen die Anforderungen an die Fertigung von Bauteilen hoher Sicherheit gegenüber dem konventionellen Maschinenbau deutlich zu.

Es geht jedoch nicht nur um die **festigkeitsrelevante Sicherheit**. Einen wichtigen Platz nimmt das **Betriebsverhalten** ein, bei dem die Bauteilsicherheit gegen Versagen (Bruch) nicht unbedingt im Vordergrund steht. Hierzu gehören aerodynamische Effekte die von der Geometrie (z.B. Strömungsprofil) und der Oberflächentopografie (z.B. Rauigkeit) abhängen.

Gewöhnlich wird eine **Auffälligkeit** in der Fertigung während der Herstellung oder bei den Prüfungen entdeckt. Die Beurteilung erfolgt dann nach Standards/Spezifikationen. In Zweifelsfällen sollte sich der verantwortliche Konstrukteur um die Beurteilung, gegebenenfalls eine **Nacharbeit** kümmern. Voraussetzung ist ausreichendes Hintergrundwissen über Einflüsse im späteren Betrieb (Band 1) und Versagensmechanismen (Band 2).

Um **Abweichungen zu erkennen** ist eine ausreichende **Sensibilisierung** aller derer, die mit dem Bauteil zu tun haben Voraussetzung. Dies erfordert ein **bauteilspezifisches Bewusstsein** für bedenkliche Einflüsse und ausreichend **Erfahrung**. Zu solchen Abweichungen gehören beispielsweise örtliche Anschmelzungen im Mikrobreich wie durch elektrische Funken (Kapitel 18.6) oder die Einwirkung von angeschmolzenen Verunreinigungspartikeln. Natürlich ist hier Hintergrundwissen über Probleme der Fertigungsverfahren wichtig. Das ist oft firmenspezifisch und gilt als zu schützendes Know How. Es steht deshalb häufig der Lehre nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund werden solche, die im Rahmen des anspruchsvollen Leichtbaus (Turboflugtriebwerke) erkannt wurden, in Band 3 behandelt.

Von besonderer Bedeutung sind die **Prüfverfahren** (Kapitel 17.3) , wobei deren **Anwendungsbereich**, **Grenzen** und **Unzulänglichkeiten** auch **in Konstruktion, Fertigung und Montage bewusst** sein sollten, selbst wenn deren Aufgaben nicht direkt zur Qualitätskontrolle gehören.

© Vieweg Professional Consult
ein Imprint von Springer Verlag GmbH & Co. KG Wiesbaden

15. Firmenkultur und Arbeitsklima

15.1 Schadensminimierende Konstruktion

Das Kapitel soll sich mit **Voraussetzungen des Arbeitsumfelds**, Vorgehensweisen und dem **Selbstverständnis des Konstrukteurs** beschäftigen und Empfehlungen geben, um die Risiken von Schäden zu minimieren. Es werden keine detaillierten Angaben zu konstruktiver Gestaltung und Auslegung gegeben. Dies ist Aufgabe von Konstruktionshandbüchern.

Der Konstrukteur sollte sich in seinem Selbstverständnis, entsprechend seiner Position im Entwicklungsablauf, neben kreativem Schaffen, als **zentrale Figur** für die Umsetzung in die Realisierung seiner Konstruktionen, insbesondere in mittelständischen Firmen, verantwortlich fühlen (Bild 15-2). Diese Aufgabe lässt sich unter dem Begriff der „**Structural Integrity**“ (Bild 15-10) zusammenfassen. Dieses Kapitel „**sichere Lebensdauer**“ beschäftigt sich mit dieser Thematik. Als Beispiele dienen Komponenten für Flugtriebwerke. Im Kapitel 15.1.1 wird lediglich auf grundlegende Prinzipien und Überlegungen eingegangen. Die hohe Auslastung der Festigkeit von Bauteilen führt zur Lebensdauerbegrenzung und zum steigenden Einfluss von Fehlern. Bei niedrigeren Belastungen früherer Triebwerkstypen konnten solche Fehler noch als **Schwachstellen** (Band 1 Bild 3.2.2-1.1) betrachtet werden. Damit tritt die Beurteilung von Fehlstellen und ein mögliches Risswachstum immer mehr in den Vordergrund.

In der Konstruktionsphase sind Fehler am effektivsten vermeidbar. Fehler die erst später, z. B. in der Produktion oder im Betrieb gefunden werden, verlangen für die Abhilfen einen deutlich höheren Aufwand (Bild 15-1.2). Deshalb muss es von größtem Interesse sein, bereits **in der Konstruktionsphase Probleme im „Lebenslauf“ des Bauteils zu vermeiden**.

Der Begriff „**schadensminimierende Konstruktion**“ lässt sich sehr unterschiedlich interpretieren. Bereits das **Umfeld des Konstrukteurs** beeinflusst die Wahrscheinlichkeit späterer Probleme. **Erfahrung** (Bild 15-1.1) ist neben dem Können eine Voraussetzung für erfolgreiches Konstruieren. Sie kann die Wiederholung gravierender Fehler vermeiden helfen, fördert die **evolutionäre Verbesserung** als eine Voraussetzung für Sicherheit komplexer Anlagen und minimiert Probleme in der Produktion und im Serienbetrieb. Eigene Erfahrungen werden gewöhnlich mit Kosten, Zeit-

und Prestigeverlusten erkauft. Deshalb ist die **Übertragung von Erfahrung** anzustreben. Erfahrung, im Gegensatz zu Wissen (Bild 15-1.2), lässt sich wenig effektiv mit Literaturstudium und Datenbanken für das praktische engagierte Handeln erwerben. Sehr viel effektiver ist die Übertragung von Erfahrung im spontanen, vertrauensvollen kollegialen **Fachgespräch**. So ist das für Erfahrung notwendige Miterleben eher gewährleistet. Dieser Form der Kommunikation (Bild 15-1.1) stehen jedoch die Arbeitsbedingungen des Konstrukteurs immer mehr im Weg. Erste Voraussetzung ist eine Organisationsform welche die räumlichen und zeitliche Voraussetzungen zur Kommunikation mit Erfahrungsträgern unterstützt. Dabei kann Fachreferenten und Fachteams die **Kommunikation als eine Aufgabe** gestellt sein. Die frühere Konstruktion in Form einer Zeichnung auf dem Reißbrett lud während der Entstehung zur persönlichen Fachdiskussion ein. So ergab sich für einen „Chefkonstrukteur" im zwanglosen Gespräch die Möglichkeit, mit seiner fachlichen Kompetenz und Wertschätzung, Hilfestellung und Anregungen zu geben. Der heutige **Bildschirmarbeitsplatz** hat zweifelsfrei viele Vorteile wie den Zugriff auf Arbeitsunterlagen und die Einbindung in Arbeitsabläufe. Es dürfen dabei jedoch auch **gravierende Probleme** nicht übersehen werden. Trotz aller Vernetzung führt der **Bildschirmarbeitsplatz eher zur „Vereinsamung" und erschwert so die Übertragung von Erfahrung**. Die Position des Konstrukteurs „**mit dem Rücken zur Außenwelt**" vor einem im Vergleich zum Reißbrett kleinen Bildschirm, den er weitgehend verdeckt, ist kein Ambiente das die Übertragung von Erfahrungen begünstigt. Auch wird ein Überblick vom beschränkten Zeichnungsausschnitt erschwert. So ist es einem flüchtigen Beobachter nur schwer möglich, diskussionswürdige Besonderheiten zu erfassen. Diesen Nachteilen kann der Konstrukteur, abhängig von der „**Firmenkultur**" selbst entgegen wirken (Bild 15-1.1).

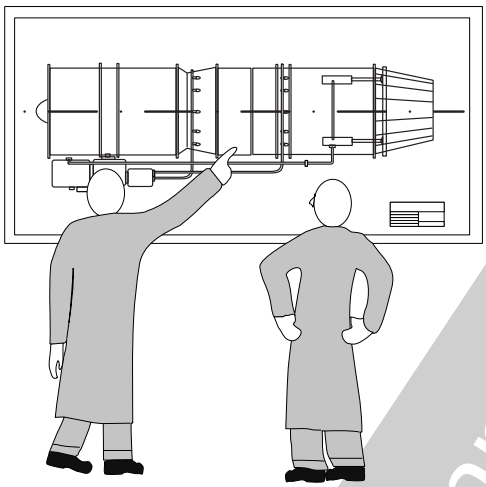
Ein weiterer Aspekt schadensminimierender Konstruktion ist die Berücksichtigung von **Gestaltungsregeln** (z.B. Bild 15-16), die zwar meist trivial erscheinen, aber durchaus nicht immer bewusst sind und deshalb mit katastrophalen Folgen übersehen werden können.

Computerbasiertes Konstruieren, wie die heutige Vorgehensweise inzwischen auch bezeichnet wird (Bild 15.1-1.2), unterliegt zumindest für die Konzept- bzw. Entwurfsphase verstärkter Kritik. Es wird bemängelt, dass die erforderliche Kreativität und das „Wissensfundament" nicht genutzt wird. Besonders die Erfahrung fließt nicht mehr ausreichend in die Arbeit ein was bekannt gewordene Beispiele zu belegen scheinen (Lit 15-14). So wird eine optimale Lösung, die sich letztendlich auch in einem Kostenvorteil manifestiert, weniger wahrscheinlich. Statt dessen empfiehlt man sog. **wissensbasiertes Konstruieren**. Dieses nutzt besondere Begabungen, Können, Gesamtsicht und die Erfahrung des Konstrukteurs besser. Es stehen die Fähigkeiten des Konstrukteurs als Mensch im Vordergrund und weniger die Optimierung von Abläufen. Diese Art des Konstruierens kommt offenbar eher der früherer Generationen näher.

***Bild 15-1.1: Erfahrung und deren Übertragung** ist eine Voraussetzung **schadensminimierender Konstruktion**. Der Konstrukteur kann aktiv im Rahmen des vorgegebenen Umfelds selbst viel zu seiner Erfahrung und damit seinem fachlichen Erfolg beitragen. Um die **Nachteile eines modernen Arbeitsplatzes** in persönlicher Kommunikation zu entschärfen, sollte er gewisse **Verhaltensregeln** forcieren. Vielleicht gelingt dies, indem er in regelmäßigen Abständen einen **Ausdruck der laufenden Arbeit** für Fachkollegen einfach zugänglich in seiner Nähe aufhängt. Natürlich erfordert dies eine geeignete Gestaltung des Arbeitsplatzes und ist vordergründig sicher nicht immer die preiswerteste Lösung (z.B. größere Arbeitsfläche). Die Kommunikation kann aber auch von einem **fachlich kompetenten Vorgesetzten** positiv motivierend gefördert werden. Dieser könnte sich z.B. häufiger am Arbeitsplatz unter Hinzuziehung anderer Fachleute für die Arbeiten interessieren ohne besserwisserische*

© Axel Rossmann – Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Es gibt mehr Erfahrung um uns herum als wir glauben, wir müssen die Chance nur nutzen!



Beispiele für sich bietende Möglichkeiten:

- Nicht hinter den Computer "verkriechen".
- Fachgespräche mit Erfahrungsträgern suchen.
- Fachliche Weiterbildung nutzen.
- Kollegen zur Kommunikation animieren.
- Fertigung und Montage besuchen.
- Realisierung mit der Fertigung besprechen.
- Auch in die Bibliothek gehen.
- Wartungshandbücher und Überholhandbücher.
- Frühere Schäden und Probleme.

Bild 15-1.1

*Kontrollatmosphäre aufkommen zu lassen. Natürlich werden solche Verhaltensweisen nicht zuletzt von der „**Firmenkultur**“ geprägt, d.h. auch dem fachlichen Stellenwert in der Hierarchie.*

*Hierzu gehört auch der Stellenwert fachlicher, d.h. **„nachhaltiger“ Weiterbildung** was sich z.B. im Ambiente (z.B. extern) zeigen sollte.*

*Die Gelegenheit **Montage und Produktion** zu besuchen ist unbedingt wahrzunehmen. Natürlich gilt dies insbesondere für die Realisierung eigener Konstruktionen. So ist z.B.ein fachliches Vorgespräch mit den ‘betroffenen’ Abteilungen (Fertigung, Montage, Reparatur) ebenso wichtig wie ein späteres „feed back“ von **Fertigungs- und Betriebserfahrungen** nachdem diese vorliegen. Beides sollte vom Konstrukteur eingefordert werden. So lassen sich beits im Vorfeld Probleme vermeiden.*

*Gezielte Information in einer guten **Fachbibliothek,** wie sie in einem High-Tech-Unternehmens vorhanden sein sollte, kann beitragen „Sackgassen“ zu vermeiden und von vorneherein erfolgversprechende Lösungswege zu beschreiten. Die Fragestellung, **„wie machen es andere?“** kann dabei immer im Vordergrund stehen. Aus diesem Grund sollten **Bibliotheksbesuche** gefördert werden. In der Entwurfskonstruktion kann sogar der Nachweis einer **Recherche** erforderlich sein. **Patentrecherchen** sind in diesem Zusammenhang nicht zu vergessen. Patente repräsentieren den Stand der Technik, zeigen in der Dokumentation der Erfindungshöhe Probleme auf, und können vor der Nutzung nicht **zugänglicher Technologieen** schützen. Die moderne elektronische Kommunikation zu **Datenbanken** und über das **Internet** ermöglichen eine Fülle von Informationen. So ist z.B. die **Homepage der Flugsicherheitsbehörden** (z.B. NTSB und FAA) mit den öffentlich zugänglichen, oft erstaunlich detailreichen technischen Beschreibungen von Flugunfällen (Accidents) und gefährlichen Vorkommnissen (Incidents), eine äußerst wichtige Erfahrungsquelle.*

*Von ganz besonderer Bedeutung ist ein **Konstruktionshandbuch** das die Anwendung firmenspezifischer bewährter Technologieen und Konstruktionsprinzipien gewährleistet und so in entscheidendem Maße Erfahrungen konserviert und überträgt.*

*Nicht zu vergessen sind **Überholungshandbücher und Wartungshandbücher**. Sie können*

© Aeroskrann - Nur zur Ausbildungsunterlage mit Lizenz

Wissensbasierte Konstruktion ("Knowledge-Based Design") könnte die Schwächen computerbasierter Konstruktion ("Computationally Based Design") ausgleichen.

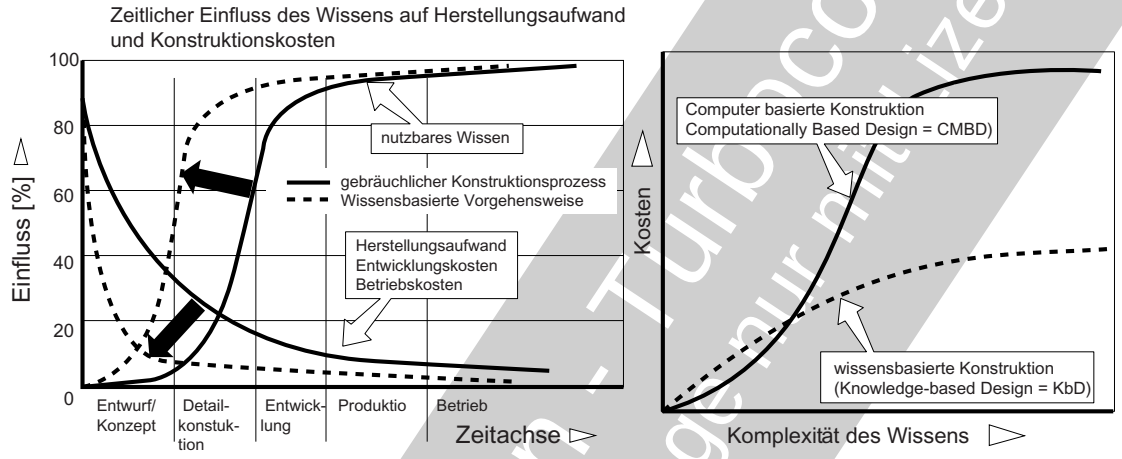


Bild 15-1.2

z.B. wichtige Hinweise auf bauteilspezifische Schwachstellen (tolerierbar, Band 1 Bild 3.2.2-1.1) und Fehlergrenzen geben.
Eine gute Sammlung von Erfahrungen enthält die ausführliche ***Dokumentation von Schäden.*** *Sie sollte nach verschiedensten Begriffen abfragbar, und vom Konstrukteur einfach und übersichtlich, möglichst online, nutzbar sein. Es ist darauf zu achten, dass dem interessierten Nutzer auf Wunsch die gesamte Dokumentation zum jeweiligen Schadensfall mit dem* ***zugehörigen Bildmaterial*** *zur Verfügung steht. Nur so ist erkennbar, ob der Fall zur jeweiligen Fragestellung passt und der typischerweise visuell geprägte Konstrukteur erhält die Möglichkeit, sich selbst einen Eindruck von der jeweiligen Situation zu machen.*

Bild 15-1.2 *(Lit. 15-13): Die folgende Betrachtung stützt sich auf die angegebene Literatur. Danach verstärkt sich der Verdacht, dass die junge K0nstrukteursgeneration bereits in einer, das Ergebnis nicht optimierenden, Ausschließlichkeit auf* ***CAD (Computer Aided Design)*** *angewiesen ist und sich darauf verlässt. Dieser Trend macht es notwendig, sich über mögliche Risiken und Schwächen einer solchen Vorgehendsweise klar zu werden und gegebenenfalls Korrekturen vorzunehmen.*
Können Vorgehensweisen, wie sie zum Teil in früheren Konstrukteursgenerationen praktiziert wurden, Schwachstellen und Lösungsansätze dem Konstrukteur aufzeigen? Das sog. wissensbasierte Konstruieren (engl. ***Knowledge-based Design*** *=* ***KbD****) wird heute als Alternative zum computerbasierten Konstruieren (engl.* ***computationally based design*** *=* ***CMB****) diskutiert.*
Mit KbD soll der Konstrukteur (nicht der Computer) alles benötigte Wissen das er erarbeitet und ansammelt berücksichtigen, um mit dem unerlässlichen Engagement die richtige Konstruktion zu finden. ***KbD ist auf den Menschen***

© Axel Bossmann - Turboconsult
ausschließlich Unterlage nur mit Lizenz

fokussiert *und deshalb nicht genau definierbar. Daten, Informationen und Wissen die im Rahmen des Konstruktionsvorgangs erarbeitet werden, fließen auch in das* ***Wissensfundament****. Dies ermöglicht eine Gesamtsicht als Voraussetzung für die kritische Interpretation der Daten.*

Der Konstrukteur muss für ein optimales Ergebnis alle seine Begabungen, Sinne und sein Wissen nutzen. Eine entsprechende Vorgehensweise unterscheidet sich von Ansätzen wie künstliche Intelligenz (engl. ***artificial intelligence*** *=* ***AI****) und* ***Expertensytemen*** *(engl.* ***expert systems*** *=* ***ES****). Bei solchen Ansätzen erfolgt die Entscheidung letztendlich nicht durch den Menschen.*

CMB bedient sich im Unterschied von KbD der AI und ES*. Je mehr CMB mit den verfügbaren Computerprogrammen auch das typisch* ***multidisziplinäre Umfeld des Konstrukteurs*** *dominiert um so stärker wird eine* ***„Erosion“ des erfahrungsbasierten Könnens*** *befürchtet. Damit wird das Wissensfundament für die Zukunft eher geschwächt. Offenbar wird dieser Trend auf Gebieten wie Festigkeit und Aerodynamik beobachtet. CMB wird als schnell und billig angesehen und deshalb als effektivere Vorgehensweise. Diese erwarteten Vorteile hängen entscheidend von der Verlässlichkeit der „Programmwerkzeuge“ ab. KbD wird dagegen von den Befürwortern des CMB als nicht ausreichend exakt für den heutigen Konstruktionsablauf betrachtet. Ihm wird deshalb nur die Rolle eines* ***Moderators*** *oder eines* ***Wissensmangements*** *zugestanden.*

KbD will den Konstrukteur als ein Individuum mit besonderem Können nutzen, dessen wichtigste Aufgabe schöpferisch und kreativ ist. *Dies führt zu einer klaren Unterscheidung zwischen einem typischerweise auch kreativ tätigen, funktionsverantwortlichen Konstrukteur und einer Person die Routine-Konstruktionsarbeiten durchführt. Als Beispiel wurde das Musizieren im Konzert gegenüber dem Abspielen einer Schallplatte gewählt.*

Das linke Diagramm soll zeigen, wie stark Herstellungsaufwand oder Kosten eines Produkts, insbesondere von der Entwurfs- bzw. Konzeptphase am Anfang, beeinflusst („Einfluss“) sind. In dieser Phase sind die Arbeiten von grundlegenden Effekten und einfachen Modellen bestimmt. Eine CMB-Vorgehensweise hat zu diesem Zeigpunkt den großen Nachteil, dass offenbar nur ***ein Bruchteil vorhandenen Wissens zur Lösung des speziellen Problems im Zusammenhang mit den verwendeten Programmen steht****.*

Es wird z.B. deshalb in der zitierten Literatur vorgeschlagen, drei Voraussetzungen zu schaffen um Kosten zu minimieren und das Ergebnis zu maximieren.

- Schaffung einer hochkreativen und multidisziplinär ablaufenden Entwurfsphase.

- Vorgehen nach KbD und so die notwendige intellektuelle Freiheit ermöglichen.

- Es ist anzuerkennen, dass der Erfolg entscheidend vom Konstrukteur und nicht vom Konstruktionsprozess abhängt.

Es wird erwartet, dass sich damit die Kurven entsprechend den schwarzen Pfeilen vorteilhaft verschieben lassen.

Das Diagramm rechts dient als Argument für ein Vorgehen nach KbD. Bei einfachen gut übersehbaren Aufgaben (geringe Komplexität des Wissens) verläuft die Kurve für KbD und CMB nahezu gleich. Wenn jedoch ***komplexe Zusammenhänge vorliegen steigen die CMB-Kosten*** *mit dem Rechenaufwand und den notwendigen begleitenden Arbeiten dramatisch an. KbD kann auf Grund einer wissensbasierten Gesamtsicht durch geeignete Eingrenzungen und eine Vorauswahl erfolgversprechender Lösungsansätze diesen Aufwand entscheidend verringern.*

© Axel Rossmann - Turbosoft
als Schulungsunterlage zur Verfügung

Eine solche "Stabübergabe" kann nicht funktionieren.

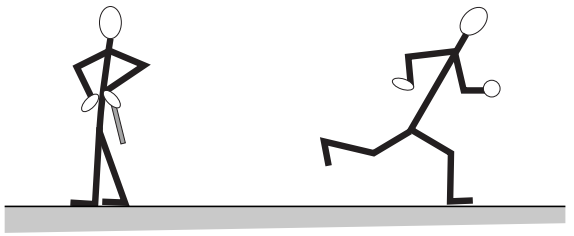


Bild 15-1.3

Bild 15-1.3: Der Erfahrungsträger:
Ein großes Problem entsteht beim ***Ausscheiden von Erfahrungsträgern****. Dies ist um so größer, wenn, wie im Falle einer Krise, eine ganze Generation älterer, erfahrener Fachleute wie Konstrukteure, Mitarbeiter aus Entwicklung, Fertigung und Versuch ausscheidet. Bei scheinbar kleinen Veränderungen an sicherheitskritischen Bauteilen wie Rotoren von Turbomaschinen, werden häufig bereits umfangreiche* ***Nachweise*** *bzw. eine neue* ***Zulassung*** *notwendig. Ein typischer Fall ist die Einführung einer neuen „Generation“ von Bearbeitungsmaschinen, z.B. Elektronenstrahl-Schweißmaschinen. Scheidet ein Erfahrungsträger aus und übernimmt dessen Aufgabe ein unerfahrener Nachfolger, ist eine vergleichbare Absicherung eher die Ausnahme. Damit erhöht sich bei einem solchen Wechsel nicht nur das Risiko eines Kostenanstiegs und Zeitverlusts, auch* ***die Sicherheit der Bauteile und damit der gesamten Maschine ist betroffen.*** *Um dieses Risiko zu minimieren, sollte ein Plan für die* ***optimale Vorgehensweise beim Ausscheiden eines Erfahrungsträgers*** *vorliegen. Dieser ist zu befolgen. Ein solcher Plan sollte die folgenden Elemente enthalten:*

- ***Rechtzeitige Bestimmung des Nachfolger****s. Dem Nachfolger sollte ca. 1 Jahr Einarbeit ermöglicht werden.*

- ***Auswahl des Nachfolgers unter Mitsprache des Erfahrungsträger****s. Auf keinen Fall darf ein Nachfolger kontrovers bestimmt werden. Eine effektive Einarbeit kann nur erwartet werden, wenn die „Chemie“ mit dem Nachfolger stimmt. Dann lässt sich erwarten, dass Know How weitgehend vorbehaltlos weitergegeben wird.*

- Der Nachfolger ist ***zu allen fachlich relevanten Besprechungen mitzunehmen****. Seine zukünftigen Kunden und Teamkollegen sind ihm vorzustellen. Mit fortgeschrittener Einarbeitung ist ihm in steigendem Maße die fachliche Vertretung seines Aufgabengebiets zu überlassen. Dabei ist er vom Erfahrungsträger zu unterstützen.*

- ***Mitnahme auf Reisen****, z.B. zu Partnern, Kunden und auf Konferenzen.*

- ***Fachberichte und Korrespondenz*** *sollten vom Nachfolger im Laufe der Einarbeitung unter wohlmeinender Assistenz des Erfahrungsträgers erstellt werden.*

- Der Nachfolger sollte das ***Büro mit dem Erfahrungsträger*** *teilen. So ist gewährleistet, dass Diskussionen und Informationen zwanglos ausgetauscht werden. Im Urlaub oder sonstiger Abwesenheit des Erfahrungsträgers, kann der Nachfolger Erfahrungen sammeln und zunehmend Verantwortung übernehmen.*

- Der Nachfolger sollte vom Erfahrungsträger in die, gewöhnlich über lange Jahre ***gesammelte Literatur und sonstige wichtige Schriftstücke wie Vorschriften und Berichte, eingeführt werden****. Er sollte animiert werden, diese Unterlagen selbstständig zu nutzen. So kann er das meist sehr „individuelle System“ solcher Sammlungen kennen lernen.*

Den Problemkreis um einen Erfahrungsträger bilden auch Personalpolitik und Firmenkultur:

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

*- **Der Kaminaufstieg:** Unter diesem Stichwort versteht man den Aufstieg eines fachlichen Erfahrungsträgers in Führungsverantwortung innerhalb seiner langjährigen Organisationseinheit. Heute ist ein solcher Aufstieg kaum mehr möglich, er wird nicht selten sogar explizit ausgeschlossen. Damit besteht die Gefahr, **sich der Nutzung von oft sehr teuer erworbener Erfahrung und Know How zu berauben**. Eine Fachhierarchie ist hierfür erfahrungsgemäß keine befriedigende Alternative. Es können sich neue Strukturen bilden, die bewusst den Kontakt zu außenstehenden, typischerweise nicht „disziplinierbaren" Erfahrungsträgern meiden. **Ein Kaminaufstieg mit Personalverantwortung fachlicher Erfahrungsträger sollte im Interesse der Triebwerkssicherheit, der Kosteneffizienz und des Firmenprestiges erwünscht sein**.*

*- **Jobrotation:** Darunter versteht man die heute verbreitete Vorgehensweise, den Aufgabenkreis und den Arbeitsplatz innerhalb der Firma nach wenigen Jahren zu wechseln. Ein solcher Wechsel kann mit leichter „Nachhilfe" der Personalverantwortlichen erfolgen. Natürliche führt dies dazu, **dass Erfahrungsträger erst garnicht entstehen können**. Um auf den typisch, komplexen Gebieten des Maschinenbaus ein Erfahrungsträger zu werden, benötigt man viele Jahre, nicht selten ein Berufsleben.*

*- **Outsourcing:** Dies ist eine Methode zur Kostenminimierung, indem Arbeiten von Zulieferern akquiriert werden. Dabei besteht die Gefahr, dass es sich auch um die Aufgaben wichtiger Erfahrungsträger handelt und so die **Fähigkeit für Entwicklungsaufgaben des Kerngeschäfts verloren gehen**. Ähnliche Effekte können auch entstehen, wenn die Zusammenarbeit mit Hochschulen und Instituten nicht **strategisch langfristig abgesichert** ist.Das gilt besonders für die erarbeitete Erfahrung. Ein solcher Fall kann beispielsweise beim Ausscheiden eines langjährigen Mitarbeiters des Auftragnehmers eintreten. Um diese Situation zu vermeiden ist genau **festzulegen, welche Aufgaben für Outsourcing nicht in Frage kommen**. Hat man sich für das Outsourcing von Aufgaben entschieden, in denen wichtige Erfahrungen zu erwarten sind, oder werden eigene Erfahrungsträger ersetzt, ist die Kontinuität mit einer verbindlichen Langfriststrategie zu gewährleisten.*

***Bild 15-2:** Versteht sich der **Konstrukteur als verantwortlich für den letztendlichen Erfolg** seines Werks, benötigt er einen über die eigentliche Konstruktionsarbeit hinausgehenden technischen Horizont, der dafür ausreichen muss, um die an der Realisierung Beteiligten zu verstehen, gegebenenfalls Aktionen auszulösen und zu bewerten. Die Aufgaben sind unter dem Begriff der „**Structural Integrity**" (Bild 15-10) und des „**Damage Tolerant Design**" zusammengefasst (Bild 15-12).*

*So ist die Konstruktion untrennbar mit den zur Verfügung stehenden **Werkstoffen** verbunden (siehe auch Band 1, Kapitel 3.2 und 3.2.2). Dies gilt z.B. für die nutzbaren statischen und dynamischen Festigkeitseigenschaften und die Anforderungen besonderer Betriebseinflüsse wie Korrosion, Verschleiß oder Anstreifvorgänge. Die Festigkeitseigenschaften hängen nicht zuletzt mit der Güte der **seriengeeigneten** verfügbaren **Prüfverfahren** zusammen.*

*Die Realisierung setzt eine geeignete **Fertigung** voraus. Deshalb ist rechtzeitig, in Absprache mit der Fertigung (Arbeitsvorbereitung) zu prüfen, ob z.B. für die Fertigung notwendige Zugänglichkeit gewährleistet ist (Bild 15-27), die geforderten Form- und Masstoleranzen und die Oberflächengüte mit akzeptablem Aufwand eingehalten werden können.*

***Montage und Zusammenbau** sind z.B. von Bedeutung für das Bauteilverhalten im Serienbetrieb (Bild 15-26). Kerbempfindliche Werkstoffe, wie z.B. Titanlegierungen, sind so an-*

© Axel Grossmann - Turboconsult
Lehrbriefe und Vorlesungsunterlagen mit Lizenz

Bild 15-2

zuwenden, dass die Gefahr von ***Handlingbeschädigungen*** *minimiert ist.* ***Modulbauweise*** *ist z.B. an den Trennstellen (Lager, Labyrinthe) zu berücksichtigen, um Montageschäden auszuschließen.*
Für die ***Wartung*** *ist nicht nur eine unproblematische Zugänglichkeit zu gewährleisten. Es kann auch erforderlich sein, die Hilfsstoffe wie z.B. Waschmittel unter Berücksichtigung besonderer Konstruktionsmerkmale (z.B. Beschichtungen) zu spezifizieren.* ***Kleb- und andere Kunststoffe*** *(Matrixharze, Gummi, Lacke) müssen bereits in der Konstruktion entsprechend ihrer Neigung zu Alterung und Schädigungen ausgewählt werden.*
Nicht zuletzt stellt sich dem Konstrukteur die Frage nach der ***Reparierbarkeit****. Dabei ist die* ***Grenze reparaturfähiger Schäden*** *zu beachten (****Überholhandbuch****) als auch die Machbarkeit. Ein warmrissanfälliger Labyrinthwerkstoff lässt z.B. gravierende Probleme bei einer Schweißreparatur der Spitzen erwarten. Eine mit dem Grundwerkstoff weitgehend artgleiche Spritzschicht ist gewöhnlich kaum ohne eine problematische Schädigung des Grundwerkstoffs zu entfernen (z.B. Abätzen vor einer ZfP).*

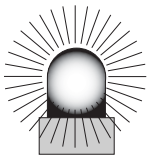
Bild 15-3: *Der Konstrukteur erhält bereits frühzeitig „****Warnsignale****“ verschiedenster Art, die ihn auf* ***konstruktive Risiken und Mängel*** *hinweisen. Zu unterscheiden sind natürlich Vorentwicklungen und Serienanwendungen. Zu Warnsignalen der Serienanwendung gehören:*

Ungewohnte Gestaltungsmerkmale und Konstruktionsprinzipien: *Das Sprichwort „man soll nie etwas zuerst machen“ hat für Serienbauteile durchaus seine Berechtigung. Warum wurde z.B. eine naheliegende konstruktive Gestaltung bisher offenbar nie in einem Serienprodukt bekannt? Dass alle anderen Mitbewerber dümmer waren ist kaum anzunehmen. Viel wahrscheinlicher ist, dass ein fundamentales Problem (vielleich ein Showstopper, Siehe Bild 15.3-5) vorhanden ist, aber noch nicht erkannt wurde.*

Chronische Qualitätsmängel*,* ***Lieferverzögerung und hohe Ausschussraten*** *bei Halbzeuglieferanten können ein „Vorbote“ bleibender Probleme im Zusammenhang mit besonderen Forderungskombinationen einer Konstruktion sein. Dabei kann es sich z.B. um zu enge Tole-*

© Arc. Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Typische Alarmzeichen für konstruktive Risiken und/ oder Mängel:



- "Ungewohntes" bei konstruktiver Gestaltung und Werkstoffkombinationen.
- chronische Qualitätsmängel, Lieferverzögerung, hohe Ausschussraten beim Rohteillieferanten und/oder in der Fertigung.
- mehrere ähnliche Schäden in der Erprobung werden zu Einzelfällen erklärt.
- Belastungen die keine "Schwachstellen" im Bauteil, insbesondere dem Werkstoff, zulassen.
- Unerprobte Technologien für die "Serie".

Bild 15-3

ranzen handeln, aber auch um zu scharfe Querschnittsänderungen an Gussteilen. Ungewöhnlich ausgeprägte Warmrissbildung in Bauteilzonen, die auch im Betrieb diesem Einfluss ausgesetzt sind, lassen entsprechende Schäden (später) im Triebwerk erwarten. Ein typisches Beispiel sind Werkstofffehler in Verdichterrotoren aus Titanlegierungen. Diese Probleme scheinen die Triebwerkstechnik bereits seit Anfang der 70er- Jahre zu beschäftigen (Band 1 Bild 5.4.1.2-2).

Treten in der Entwicklungsphase und ***Erprobung mehrere ähnliche Schäden*** *auf, ist dies ein alarmierendes Zeichen für eine* ***maschinenspezifische Schwachstelle*** *(Bild 15-4). Werden solche Schwachstellen nicht in einer frühen Phase gezielt behoben sondern nur „entschärft“ indem man beitragende Ursachen bekämpft , die Hauptursache aber bleibt, begleiten sie erfahrungsgemäß den betroffenen Triebwerkstyp die gesamte Nutzungszeit (Beispiel 15.3-5).*

Fehler, die nicht mit den verfügbaren seriengeeigneten ***ZfP-Verfahren*** *(Kapitel 17.3.1) ausreichend sicher gefunden werden können, zeigen eine* ***ungeeignete Werkstoffauswahl und/oder zu optimistische Festigkeiten*** *an. Eine solche Situation kann sich bereits während der* ***Ausfallmusterprüfung*** *oder bei zyklischen Schleuderversuchen zum Lebensdauernachweis ankündigen.*

Kommen ***unerprobte oder/und „fremde Technologien“*** *zum Einsatz, sollte dies den Serienkonstrukteur alarmieren. Oft erfordert ein sicherer Einsatz einer Technologie die Kenntnis und Erfahrung besonderer Eigenschaften, die sich erst sehr spät, im schlechtesten Fall nach längeren Laufzeiten zeigen.*

Beispiel 15-1 (Lit 15-12):

Zitat: „...The new HPC ring case design, developed to counter a string of **surge** issues that have nagged the 2,4m (109in)-fan diameter version **for several years**, is based on a set of one piece rings that replaces the original segment design. The 2,4m fan... derivative... suffered ‘an asymmetric distortion of clearance due to case deformation, while the ring case for the 112in version of the engine remained perfectly round, offering much better control’...Better matching of the expansion coefficient ot the rotating stages and the casing has now been achieved for the critical high power, low-altitude conditions that have often led to surges occurring at the take-off, says the company ....Between 70% and 75% of the 2,200 affected engines will be retrofitted during overhauls... deadline for fleet completion by the first quarter of 2007...“

Kommentar: Immer wieder wurde über surges an diesem Triebwerkstyp seit seiner Einführung berichtet (Lit 15-11). Der „**Geburtsfehler**“ (Bild 15.1-4) war offensichtlich das **axial geteilte Gehäuse** (Lit. 15-7). Die Probleme waren anscheinend evolutionär nicht zu lösen. So musste das Konstruktionsprinzip geändert werden.

© Axel Bosemann - Turbosoft
Abschnittsunterlage nur mit Lizenz

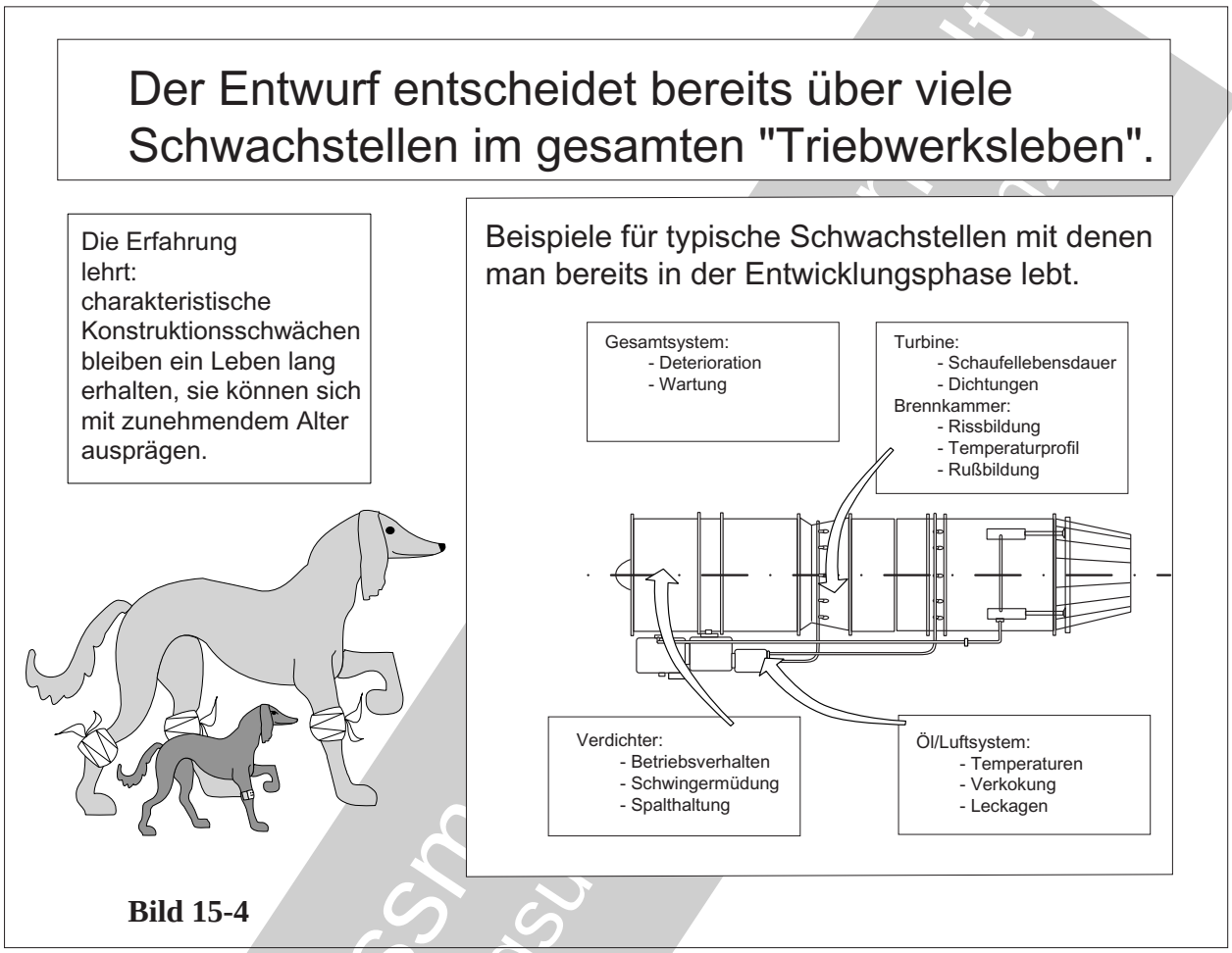


Bild 15-4

Bild 15-4: *In der Natur entscheiden unsere Gene über Stärken und Schwächen. Schwächen können sich auch erst im fortgeschrittenen Lebensalter zeigen. Erfahrungsgemäß scheinen sich Triebwerke ähnlich zu verhalten. So kündigen sich Schwachstellen eines bestimmten Triebwerkstyps bereits früh in der Entwicklungsphase an. Unter dem Zwang evolutionärer Entwicklung können diese* ***Schwachstellen*** *nicht immer auf einfache Weise vermieden werden. Dies ist der Fall, wenn die Hauptschadensursache im Zusammenhang mit einem besonderen* ***Konstruktionsmerkmal*** *steht (Beispiel 15-1). Die Schwachstelle muss stattdessen mit Optimierungen von nebenursächlichen Effekten „entschärft“ werden. Das kann z.B. dazu führen, dass die Lebensdauer für die Entwicklungsphase ausreicht, die* ***Probleme im späteren Serienbetrieb*** *mit typisch langen Laufzeiten und/oder im Rahmen von Reparaturen jedoch wieder auftauchen.*

Besteht der Verdacht, dass es sich um eine solche Schwachstelle handelt, können Entwicklungsprotokolle und/oder Überholhandbücher eine sicherere Bewertung ermöglichen. Typische Schwachstellen sind in der nebenstehenden Skizze zusammengestellt. Hierzu gehört die Neigung zum Verdichterpumpen (Beispiel 15-1), z.B. beim Abfeuern der Kanone (Band 1, Bild 5.2.5-3, Lit. 15-18). Weitere Beispiele sind Zündschwierigkeiten des Nachbrenners mit der Auslösung eines Pumpvorgangs in einem bestimmten Bereich des Flight Envelope (Lit. 15-18). Die Durchbiegung des Kerntriebwerks (engl. „backbone bending“) wurde bei den großen Fantriebwerken der ersten Generation zu einem besonderen Problem und war erst mit der Einführung einer externen Versteifungsstrebe befriedigend gelöst (Lit. 15-17).

Konstruktion: Schadensminimierung

Eine Voraussetzung für die Sicherheit komplexer Anlagen ist Erfahrung. Evolution baut auf Erfahrung auf, Konstruktionsprinzipien werden beibehalten.

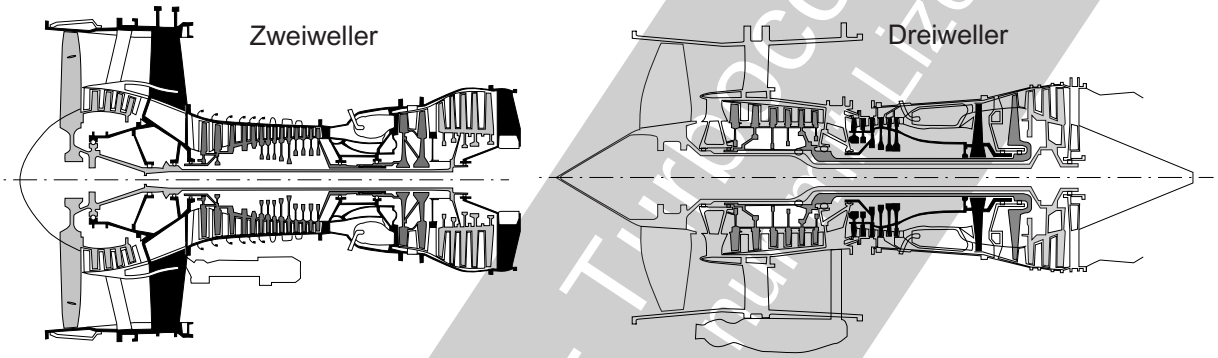


Bild 15-5

Bild 15-5: *Komplexe Anlagen und/oder Großserien mit möglichst geringen Ausfallraten (z.B. im Automobilbau) erfordern ein sehr vorsichtiges Vorgehen bei der Entwicklung, um das Risiko akzeptabel niedrig zu halten. Es hat sich als äußerst riskant erwiesen, neue oder gar* ***revolutionäre Technologien ohne den notwendigen Erfahrungshintergrund*** *einzuführen (Lit. 15-17). Auch Technologien, die sich nachweislich bei Wettbewerbern seit Jahren hervorragend bewähren, können nicht einfach übernommen werden, wenn der Erfahrungshintergrund zu Auslegung, Betrieb- und Langzeitverhalten nicht ausreicht. Ein typisches Beispiel sind große Fantriebwerke in Zwei- und Dreiwellenbauweise. Offenbar hat die Dreiwellenbauweise mit steigender Triebwerksgröße bedeutende Vorteile (Gewicht, Deterioration; Lit. 15-17). Trotzdem wird diese Bauweise von der Mehrheit der OEM's nicht eingesetzt, obwohl ihnen die Auslegungswerkzeuge mit Sicherheit zur Verfügung stehen. Es darf vermutet werden, dass spezifische Probleme der Dreiwellenbauweise, wie die Zwischenwellenlagerung in ihrem Langzeitverhalten (heute übliche garantierte Lebensdauern), die kurzfristige Übernahme eines solchen Konstruktionsprinzips verhindern.*

Die Vorgehensweise im Triebwerksbau, insbesondere bei Triebwerken für den zivilen Einsatz ist daher ***evolutionär****. Sie baut auf erprobten* ***„verstandenen" Konstruktionsprinzipien*** *auf, die über lange Zeiträume schrittweise verbessert wurden. „Verstanden" heißt, neben Auslegung, Konstruktion und Fertigung das Betriebsverhalten, auch bei Sonderbelastungen, zu verstehen. An solchen Konstruktionen wird auch bei Problemen festgehalten und ein weiterer Verbesserungsschritt versucht, bevor auf ein anderes Prinzip, das den bekannten Fehler vermeidet aber möglicherweise andere Schwachstellen hat, umgestellt wird.*

© Axel Pössmann - Turbocontrolt
als Schulungsunterlage nur als Lizenz

Nur verstandene Konstruktionsprinzipien übernehmen!

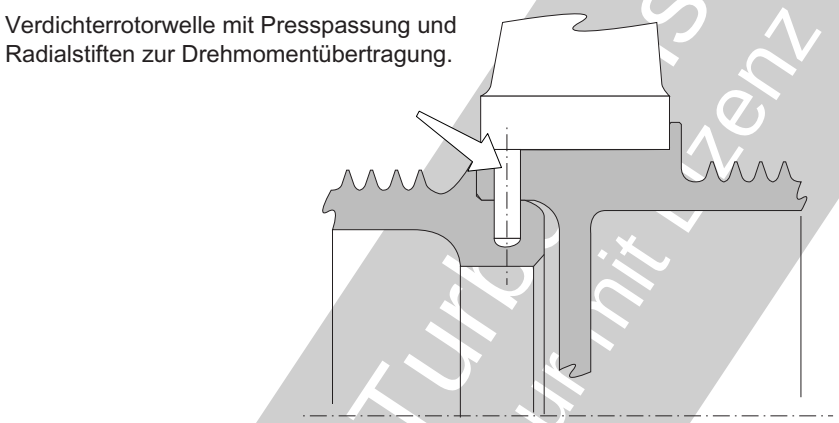


Bild 15-6

Bild 15-6: Ein Konstruktionsprinzip zu verstehen bedeutet nicht nur die Funktion zu durchschauen *und die Auslegung entsprechend vorzunehmen. Der erfahrene Triebwerkskonstrukteur weiß, dass langjährige Betriebserfahrung notwendig ist, um die Versagensmechanismen und Schwachstellen eines Konstruktionsprinzips zu erkennen und zu vermeiden. Hierzu gehören Verschleiß (Fretting), Reibbeiwerte (Veränderungen über der Zeit), Alterungsprozesse, Ermüdung (LCF-Verhalten) und Korrosion. Bestimmte Eigenschaften wie Steifigkeit, Kräfte in lösbaren Fügungen und Dämpfung können sich auf andere Komponenten in unvorhergesehener Weise auswirken.*

Als Beispiel wurde ein Konstruktionsdetail gewählt (Lit. 15-1), das die Verbindung von Verdichterrotorstufen mit Hilfe einer Schrumpfpassung und Radialstiften zur Übertragung des Drehmoments zeigt. Diese scheinbar einfache und kostengünstige Lösung dürfte einige Erfahrung benötigen und kann mit Sicherheit nicht einfach ohne die notwendige Erfahrung für eine Serienanwendung übernommen werden. So müssen die ***Anwendungsgrenzen*** *bekannt sein, um über die vorgesehene Lebensdauer des Rotors die Funktion ausreichend sicher zu gewährleisten. Die Kerbwirkung im Stiftbereich kann z.B. wegen zu kurzer LCF-Lebensdauer den Einsatz deutlich einengen. Die Verbindung beeinflusst die Steifigkeit und damit das Schwingverhalten des Rotors. D.h. die gesamte Rotorkonstruktion ist auf ein solches Prinzip abzustimmen. Die Schrumpfpassung muss selbstverständlich auch im instationären Betrieb wie bei Temperaturänderungen und Aufweitung unter Fliehkraft in der Startphase ihre Funktion behalten (Lit. 15-18). So können z.B. beim Pumpen des Verdichters hohe dynamische Kräfte auf die Verbindung wirken. Mikrobewegungen dürfen nicht zu unzulässigem Verschleiß an den Radialbolzen und den Auflageflächen führen. Damit stellen sich Fragen nach Toleranzen der Fügung, eventuellen Beschichtungen und der Werkstoffkombination.*

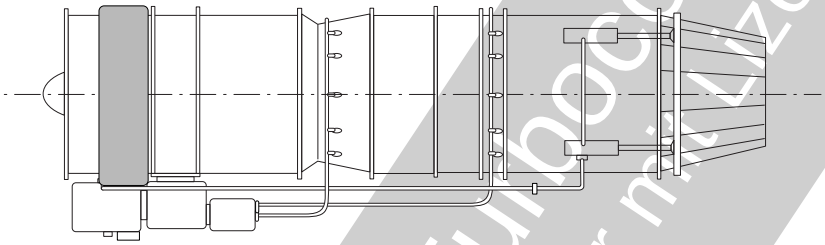
Natürlich muss die ***Montage*** *sicher und einfach möglich sein.*

Selbst wenn die Bedingungen des normalen Betriebs beherrscht werden, ist das vorschriftsgerechte Verhalten ***im Schadensfall*** *und/oder bei ungewöhnlichen Belastungen zu gewährleisten. Dies gilt auch für das Verhalten bei „Rotorbow“ (Band 2, Bild 6.5.1.1-2). Denkbar sind auch große Unwuchten bei Vogelschlag oder einem Schaufelbruch.*

Die ***Reparierbarkeit*** *ist zu klären. In welchen Grenzen ist diese z.B. bei Verschleiß oder Korrosion möglich. Davon hängen die Folgekosten ab. Sie können für den Betreiber und/oder bei Laufzeitgarantieen für den OEM inakzeptabel hoch werden.*

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Warum haben Andere etwas naheliegendes offenbar noch nicht in der Serienanwendung?



Aramid-Containment an einem Fighter-Triebwerk?

Bild 15-7

Bild 15-7: *Ein wichtiges* ***Warnzeichen****, insbesondere bei der* ***Einführung neuer Konstruktionen und Technologien*** *ist, wenn* ***eine Serienanwendung nicht bekannt*** *geworden ist (Bild 15.3-19). Wir sollten uns davor hüten davon auszugehen, etwas für den Fachmann Naheliegendes als Erste erkannt zu haben. Dies ist zwar durchaus möglich, jedoch eher unwahrscheinlich. In einem solchen Fall besteht der berechtigte Verdacht, dass* ***nicht erkannte Probleme*** *vorhanden sind, welche die Mitbewerber nicht befriedigend lösen konnten.*

Als Beispiel wurde das ***fasertechnische Containment*** *für Triebwerke von Kampfflugzeugen gewählt. Es wäre ein fataler Fehler aus der Serienanwendung bei Verkehrsflugzeugen mit Gondeltriebwerken am Flügel zu schließen, diese Technologie ist auch direkt für Triebwerke in der Zelle, wie für Kamofflugzeuge typisch, übernehmbar, auch wenn eine solche Anwendung nicht bekannt geworden ist. In einem solchen Fall muss zuerst die Frage geklärt werden, warum die Mitbewerber den offensichtlichen Vorteil geringen Gewichts nicht genutzt haben.*

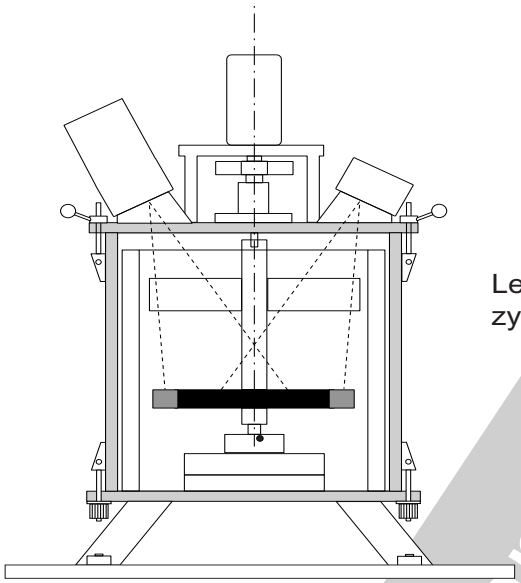
Versuche in einem Schleuderstand werden schnell zeigen, dass die Nutzung der Vorteile eines fasertechnischen Containmentrings eine ausreichende elastische Dehnung des Auffangrings voraussetzt (Band 1, Kapitel 5.2.2, Lit. 15-17). Dieser Raum ist jedoch in den beengten Verhältnissen im Rumpf meist nicht gegeben oder muss bereits in der Konzipierung des Flugzeugs und des Triebwerks (Anbringung der Anbaugeräte, Lit. 15-17) berücksichtigt worden sein.

Darüber hinaus ist zu klären, ob nicht weitere unerwartete Effekte auftreten. Möglicherweise sind die Umgebungstemperaturen bereits schädigend hoch oder im Containmentfall gibt es überraschende Auswirkungen auf das Paralleltriebwerk. Zu prüfen ist auch, ob sich bei Montage und Wartung (z.B. Benetzung mit Kraftstoff) Probleme ergeben.

Merksatz*: Ohne ausreichende eigene Erfahrung und/oder Hilfestellung eines Lizenzgebers erfordert die Einführung ungewohnter, auch bei anderen bewährten Konstruktionsprinzipien umfangreiche eigene Entwicklungsarbeit.*

© Kellermann - Turbocopy
Lehrmaterialien nur mit Lizenz

Das eigene Sicherheitskonzept durchhalten.



Lebensdauernachweis mit
zyklischen Schleuderversuchen

Bild 15-8

Bild 15-8: *Ein OEM hat ein, von den Abnahmebehörden anerkanntes,* ***Sicherheitskonzept****. Insbesondere für die* ***Lebensdauer der Rotorteile*** *ist dies von der „****Auslegungsphilosophie****“, z.B. Auslastung der Bauteilfestigkeit und Lebensdauerkonzept, abhängig. Ein solches Konzept bezieht u.a. die gesamte Produktion von Vormaterial und Halbzeug, die Qualitätssicherung (z.B. ZfP) und spezifizierten Betrieb ein. Diese individuellen Randbedingungen lassen es gewöhnlich für einen Konstruktionsverantwortlichen (außerhalb einer Lizenzproduktion) nicht zu, ein solches Konzept statt dem eigenen zu übernehmen. Im Extremfall, z.B. bei mehreren Projekten mit unterschiedlichen Partnern, können mehrere Sicherheitskonzepte nebeneinander anwendungsspezifisch existieren.*

Es ist ein Grundprinzip, dass ***das eigene etablierte Sicherheitskonzept zugelassen und auf alle eigenverantwortlichen Produkte zur Anwendung*** *kommen sollte.*

Ein Beispiel ist der Lebensdauernachweis von Rotorkomponenten mit Hilfe zyklischer Schleuderversuche. Diese Versuche sind zeit- und kostenaufwändig. Hier scheint es ein Einsparpotenzial mit Hilfe vereinfachter Versuche zu geben. Bei näherer Betrachtung ist jedoch festzustellen, dass in einem solchen Fall auch die Auslegung entsprechend anzupassen ist. Z.B. ist denkbar, dass die Abnahmebehörde dann eine niedrigere Festigkeitsauslastung verlangt, was wiederum schwerere Bauteile zur Folge hat. Es ist auch denkbar, dass die vereinfachte Vorgehensweise den Nachweis umfangreicher Erfahrung erfordert, was wiederum nur schwer möglich ist.

> ***Merksatz****: Das eigene zugelassene Sicherheitskonzept ist bei Bauteilen unter Selbstverantwortung einzuhalten.*
> *Eine Mischung von Sicherheitskonzepten ist zu vermeiden.*

Bild 15-9: *Bei jedem OEM lassen sich typische,* ***charakteristische Konstruktionsmerkmale*** *entdecken. Dies kann natürlich auch mit Auflagen des Betreibers, etwa von Amtsstellen bei militärischen Anwendungen, in Zusammenhang stehen.*

Das Schaubild oben zeigt die Wahrscheinlichkeit eines Triebwerksausfalls durch Beschuss,

© Aero Rossmann - Turboconsult
Lehrgangsunterlage nur mit Lizenz

Konstruktion: Schadensminimierung

Auch die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Triebwerks bei Beschuss wird vom konstruktiven Grundkonzept beeinflusst.

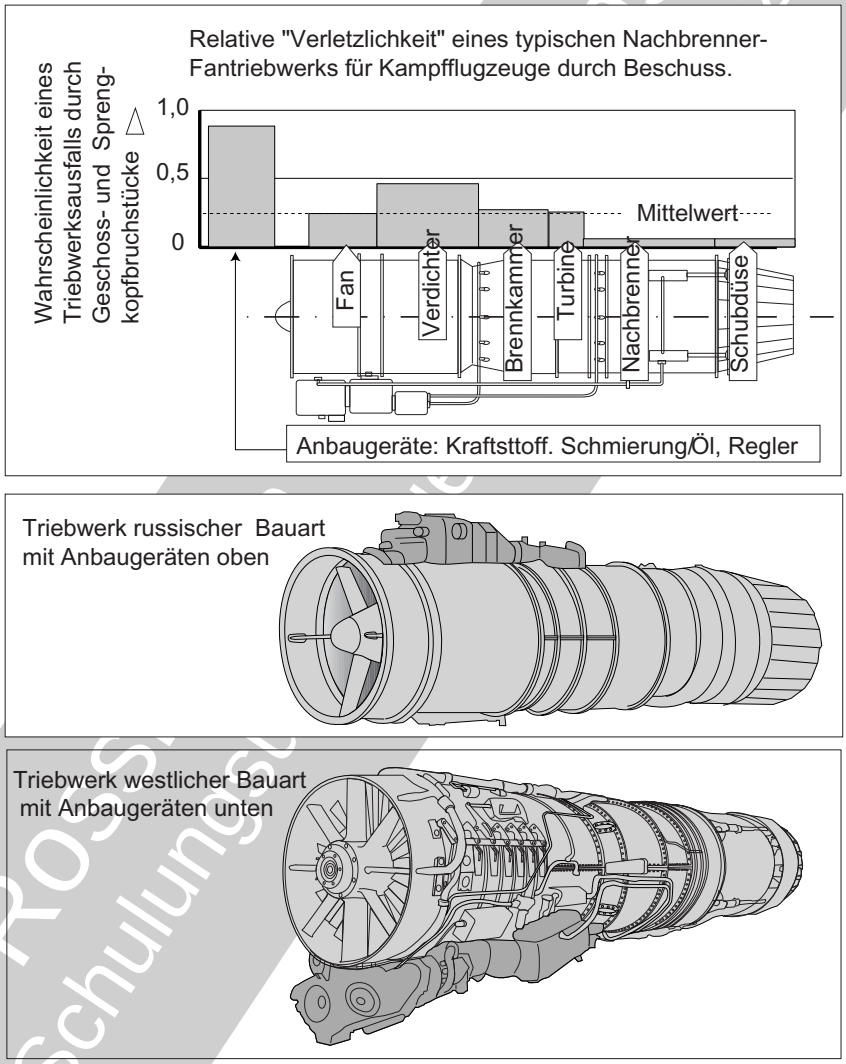


Bild 15-9

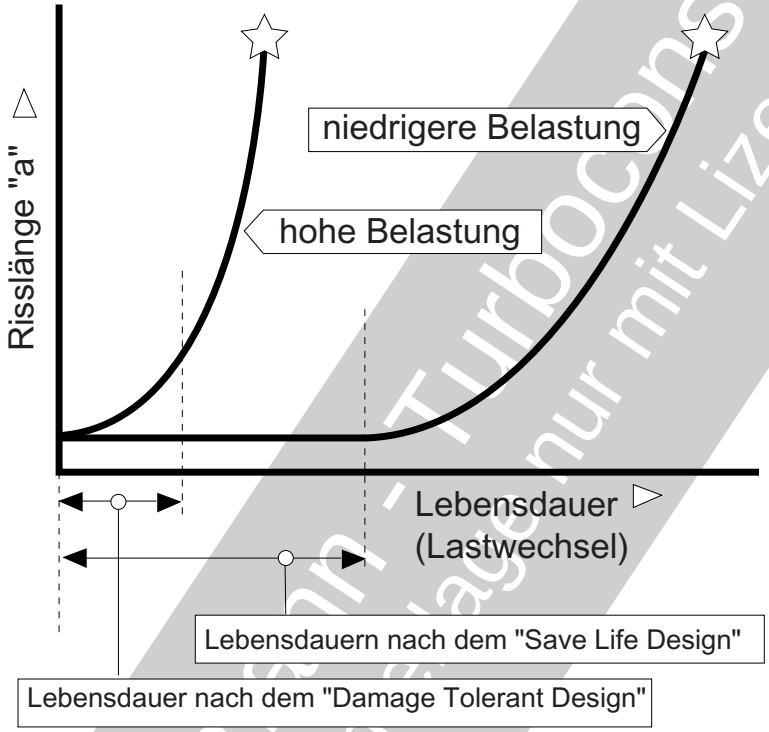
wenn die Anbauaggregate unten am Triebwerk angebracht sind (Lit 15.1-2). Man erkennt, dass eine Beschädigung der Anbaugeräte zu einem hohen Anteil für Triebwerksausfälle im Kampfeinsatz verantwortlich ist.

Sind die Anbaugeräte auf dem Triebwerk angebracht (mittlere Skizze), hat dies den Vorteil geringerer Verletzlichkeit unter Beschuss vom Boden. Unten befestigte Geräte sind bei Wartungsarbeiten besser zugänglich. Auch der Aufhängung des Triebwerks dürfte diese Position zu Gute kommen.

Bereits bei der Konzipierung eines Triebwerks werden viele wichtige Eigenschaften vorgegeben. An diesen kann die nachfolgende Entwicklung nur noch wenig verändern. Sollen also in eine Neuentwicklung auch neue Technologien genutzt werden, ist die Konzeptphase entscheidend. Hier müssen bereits alle notwendigen, auslegungsbeeinflussende Eigenschaften der neuen Technologie für die Serienauslegung vorliegen (siehe Bild 15-7). Eine ***langfristige Entwicklungsstrategie für Technologien der eigenen Kernprodukte ist damit unerlässlich*** *(Bild 15.2.3-36).*

©Axel Rossmann Luftfahrtschulungen

15.1 Sichere Lebensdauer



© AVL Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

In diesem Kapitel werden einige Grundprinzipien zu **schadenstoleranter (Damage-Toleranz, engl. damage tolerance**) **und schadensminimierender Vorgehensweise** in Auslegung und Konstruktion, sowie dem entsprechenden Bauteilverhalten dargestellt. Dieses Konzept schließt eine mögliche Rissbildung in ihrem Einfluss auf die Lebensdauer ein (Bild 15-14). Im Gegensatz dazu steht das frühere **Konzept des „safe life“** welches eine Rissbildung in der Auslegungslebensdauer ausschließt. Man kann solche Teile unter dynamischer/zyklischer (LCF) Beanspruchung als, für die zu erwartende Lebensdauer als ‘dauerfest’ bezeichnen (Bild 15-14). Detaillierte Anweisungen zum Handeln werden nicht gegeben. Lediglich die Problematik wird bewusst gemacht und die Beschäftigung mit dieser angeregt. Dieses Kapitel ersetzt also nicht Angaben eines Konstruktionshandbuchs.

Einen wichtigen Teil nimmt **Fail-Safe-Design** ein. Dieses betrachtet ein beherrschbares Bauteilverhalten im Falle von Rissbildung und Bruch. Anzustreben ist, dass Risswachstum nicht zum Ausfall der Betriebstauglichkeit führt, bevor der Schaden entdeckt wird bzw. sich bemerkbar macht. Das kann durch **rechtzeitige Entdeckung** infolge Merkmalen wie Unwuchten oder Vibrationen, ungewöhnliche Geräusche oder Auffälligkeiten bei Boroskopinspektionen geschehen. Die Aufgabe eines Fail-Safe-Verhaltens wird mit der Nutzung höherer Festigkeiten, kleinerer Sicherheitsabstände, höherer dynamischer Belastungen, höherer Drehzahlen und höheren Temperaturen immer schwieriger. Der Grund ist, dass kleinere Fehler wachstumsfähig werden, die stabile Rissfortschrittgeschwindigkeit ansteigt und die kritische Risslänge, bei der der Restbruch erfolgt, kleiner wird.

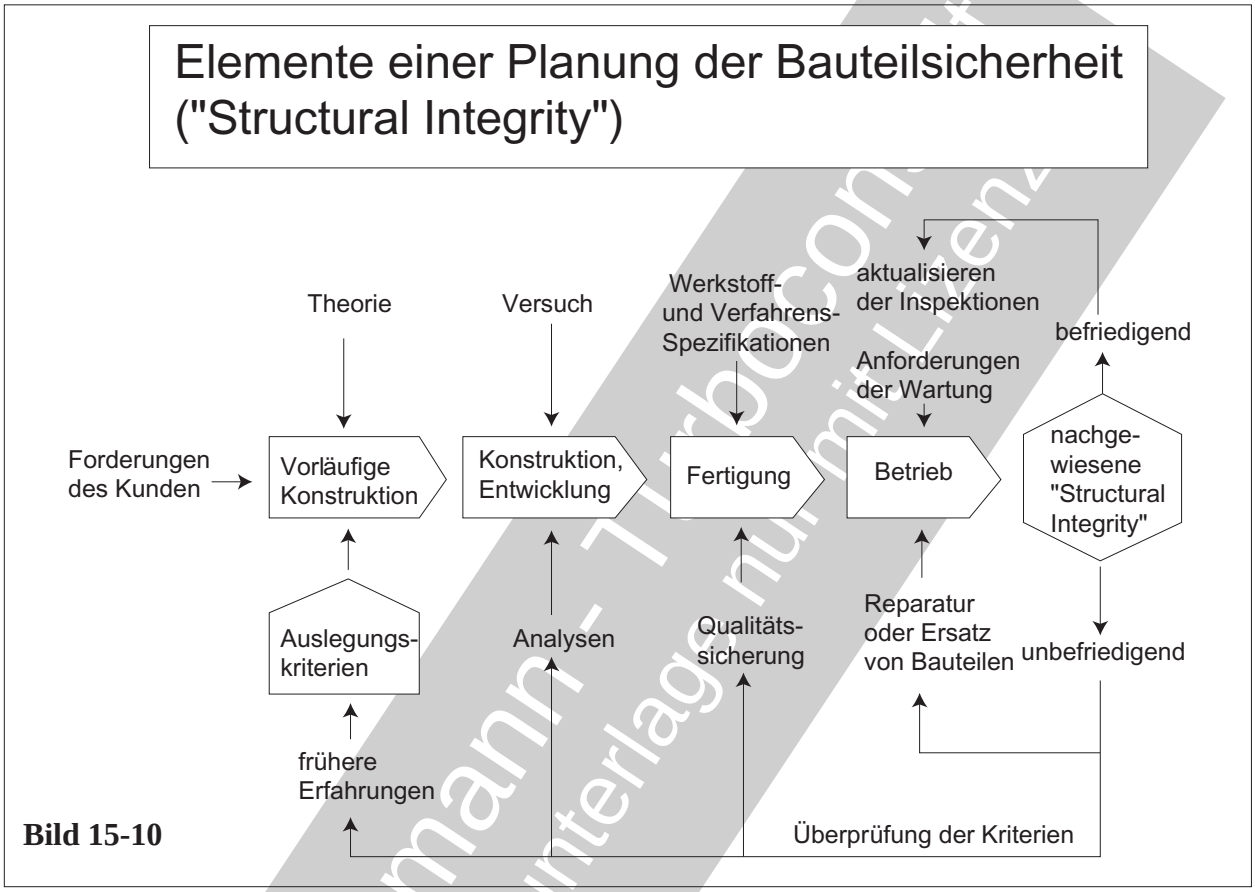


Bild 15-10

Bild 15-10 *(Lit 15-3): Die* ***Bauteilsicherheit*** *(engl.* ***structural integrity****) ist von einer Vielzahl Einflüsse abhängig, welche die gesamte Entwicklungsphase umschließt. Sie ist damit vielen Teildisziplinen wie Werkstofftechnik, Festigkeit und Bruchmechanik übergeordnet. Zur Entwicklung sicherer, komplex und hoch beanspruchter Bauteile gehört die* ***iterative Integration des gesamten Umfelds eines Konstrukteurs****. Diesem ist eine Koordinationsfunktion nicht nur zuzugestehen sondern zu fordern. „Structural Integrity" muss bereits in der Konstruktions- bzw. Auslegungsphase auf folgenden Gebieten (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) geplant werden:*

- *Spannungs-, Dehnungs-, Belastungs- und Temperaturanalysen (**Festigkeit**)*
- *Konzept zur Berücksichtigung von Ermüdungsvorgängen*
- *Analysen angerissener Komponenten (**Bruchmechanik**)*
- *Fehlerkriterien (z.B. zulässige Fehlergrößen)*
- *Verschleißkonzept*
- *Konzept für Kriechvorgänge*
- *Konzept für Korrosionsbeanspruchung*
- *Werkstoffauswahl*
- *Werkstoffverformung und Schadensmechanismen*
- *Prüfbarkeit der Bauteile (z.B. Zugänglichkeit)*
- *Zerstörungsfreie Prüfung*
- *Herstellungsprozess (z.B. Machbarkeit)*
- *Wartbarkeit*

Aspekte im Rahmen der Structural Integrity sind safe life design und damage tolerant design (Bild 15-14).
Diese Konzepte bzw. die Philosophien berücksichtigen die Ermüdungsvorgänge.

Konstruktion unter dem Gesichtspunkt rissfreier, sicherer Lebensdauer (engl. safe-life design): *Dieses Vorgehen erfordert Analysen und/oder Versuche zum Nachweis, dass jedes Versagen innerhalb der angenommenen Lebensdauer extrem unwahrscheinlich (engl.*

© Vogelsemann - Turbocomp
Arbeitsunterlage nur mit Lizenz

extremely remote, Band 1, Bild 2.3-3) ist. Dabei ist es gleichgültig, ob eine unbegrenzte Lebensdauer oder begrenzte Lebensdauer angenommen wurde. ***Rissbildung wird bei diesen Betrachtungen ausgeschlossen****.*

Fehlertolerante Konstruktion *(engl.* ***damage tolerant design****), einschließlich* ***schadenstoleranten Konstruktionen*** *(engl. fail-safe design; Bild 15-12, Band 1, Bild 3-18): Dieses Konzept wird besonders für die Berücksichtigung des Einflusses von Fehlstellen auf die Lebensdauer zyklisch beanspruchter Bauteile genutzt. Es wird angenommen, dass ein akzeptables, ausreichend sicheres Betriebsverhalten einer beschädigten Struktur bis zur Entdeckung der Schädigung und der Einführung geeigneter Abhilfemaßnahmen zu gewährleisten ist. Dafür stehen die folgenden „Hilfsmittel" zur Verfügung:*

- ***Identifikation kritischer Komponenten*** *bzw. deren kritischer Bereiche.*
- ***Mehrfache Belastungseinleitungen*** *bzw. Aufnahmen (Redundanz, Bild 15-12).*
- ***Rissstopper*** *(Band 1, Bild 5.4.2.2-2 und Bild 5.4.2.2-4)*
- ***Proof-Tests****: Hierzu gehören Überlastungstests wie Überdrehzahltests bei rotierenden Bauteilen aus spröden Werkstoffen ohne ausgeprägtes Ermüdungsverhalten (z.B. Keramiken).*
- Techniken zur ***Abschätzung des Rissfortschritts****.*
- ***Inspektionen*** *wie Boroskopieren, Augenschein bei der Wartung, ZfP (z.B. Eindringprüfung, Wirbelstrom).*

Beim „damage tolerant design" geht man der Einfachheit halber davon aus, dass bereits eine rissartige Kerbe existiert (Bild 15-12, siehe auch Band 1, Bild 4.1-4). Für die Abschätzung der sicheren Lebensdauer (Inkubation und Risswachstum,Band 1, Bild 4.3-9) sind jedoch eine Vielzahl von Einflüssen zu berücksichtigen, um die folgenden für die Abschätzung notwendigen Parameter zu ermitteln (Kapitel 12.2):

- ***Versagenskriterium*** *(das Lebensende kennzeichnender Schaden, Risikoanalyse).*

- ***Risseigenschaften****:*
- Art, Größe, Lage und Orientierung im Spannungsfeld (siehe Band 1, Bild 4.3-11 und Bild 4.3-22),
Auffindbarkeit bei Inspektionen, Ausbreitungsmodus (Rissöffnungsarten, Band 1, Bild 4.3-2),
- Rissgröße im Verhältnis zur Gefügestruktur (Band 1, Bild 4.3-9 und Bild 5.4.3.2-11),
- Gültigkeit der Bruchmechanik (z.B. Querschnittsdicke, Band 1, Bild 5.2.1-5).

- ***Belastungen****: Kräfte,Verformungen, Temperaturen in Größe, Richtung, Art (einachsig, mehrachsig), zeitlicher Verlauf.*

- ***Risswachstumsmodus****: Unterkritisch und kritisch, Paris-Funktion (Band 1, Bild 4.3-3),*

- ***Verhalten des Werkstoffs und des Bauteils*** *(z.B. Spannungsumlagerung, Bild 15-16),*
- Bruchzähigkeit,
- Einfluss der Umgebungsatmosphäre (Band 1, Bild 4.3-12 und Bild 4.3-13),
- Belastungsspektrum (Band 1, Bild 5.4.3.2-12), zeitlicher Belastungsverlauf.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

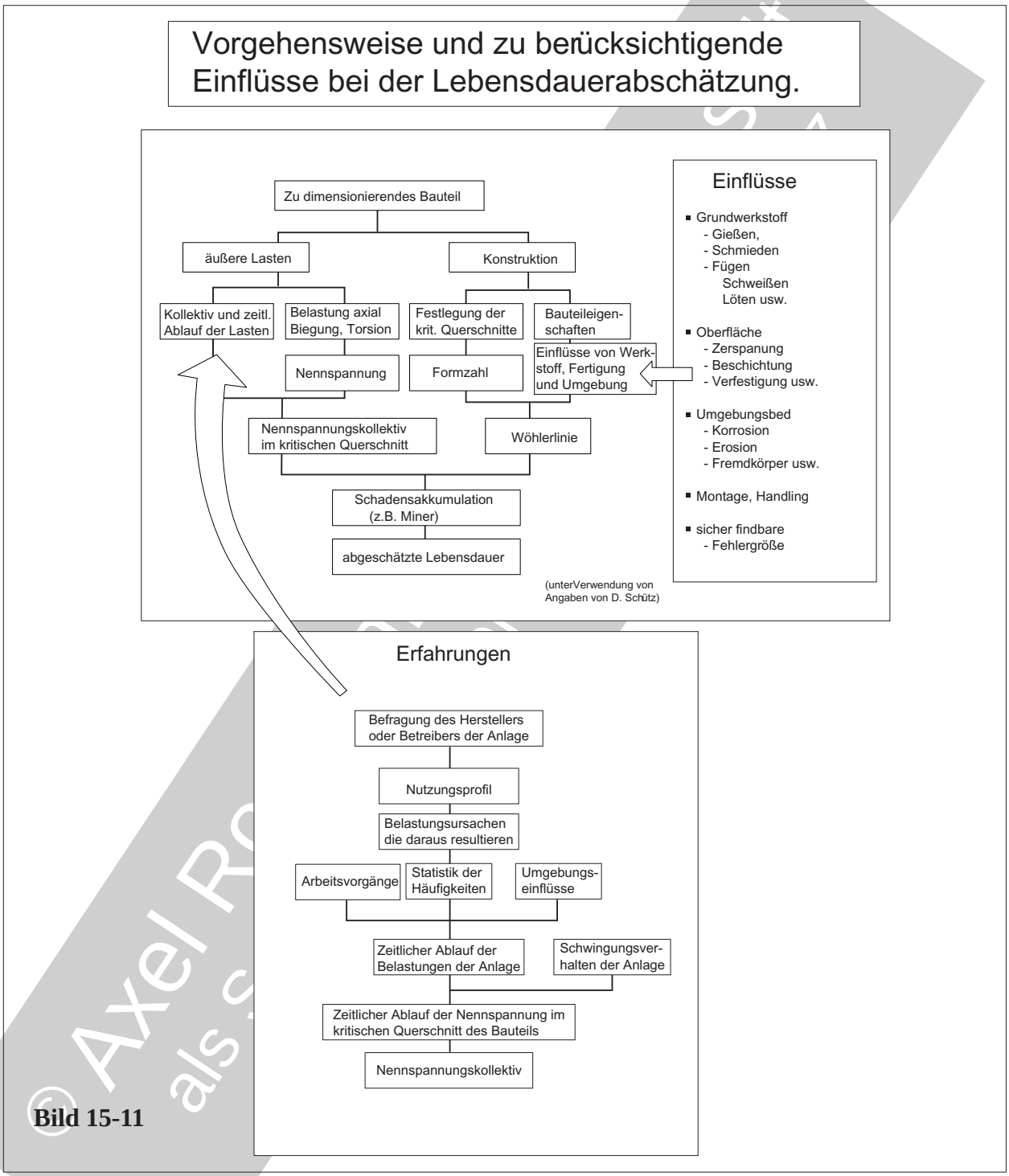


Bild 15-11

Bild 15-11 *(Lit 15-9): Diese Schaubilder geben einen Eindruck vom Vorgehen und den zu berücksichtigenden Einflüssen bei einer Lebensdauerabschätzung für das „**Save-Life Design-Konzept**“ (Bild 15-14). In diesem Fall ist das die Lebensdauer bestimmende Kriterium der erste Anriss. Die **Lebensdauer liegt also innerhalb der Inkubationszeit** (Band 1, Bild 5.4-2). Man erkennt, dass **Erfahrung** (Schaubild unten) eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche, d.h. ausreichend sichere Lebensdauerabschätzung darstellt.*

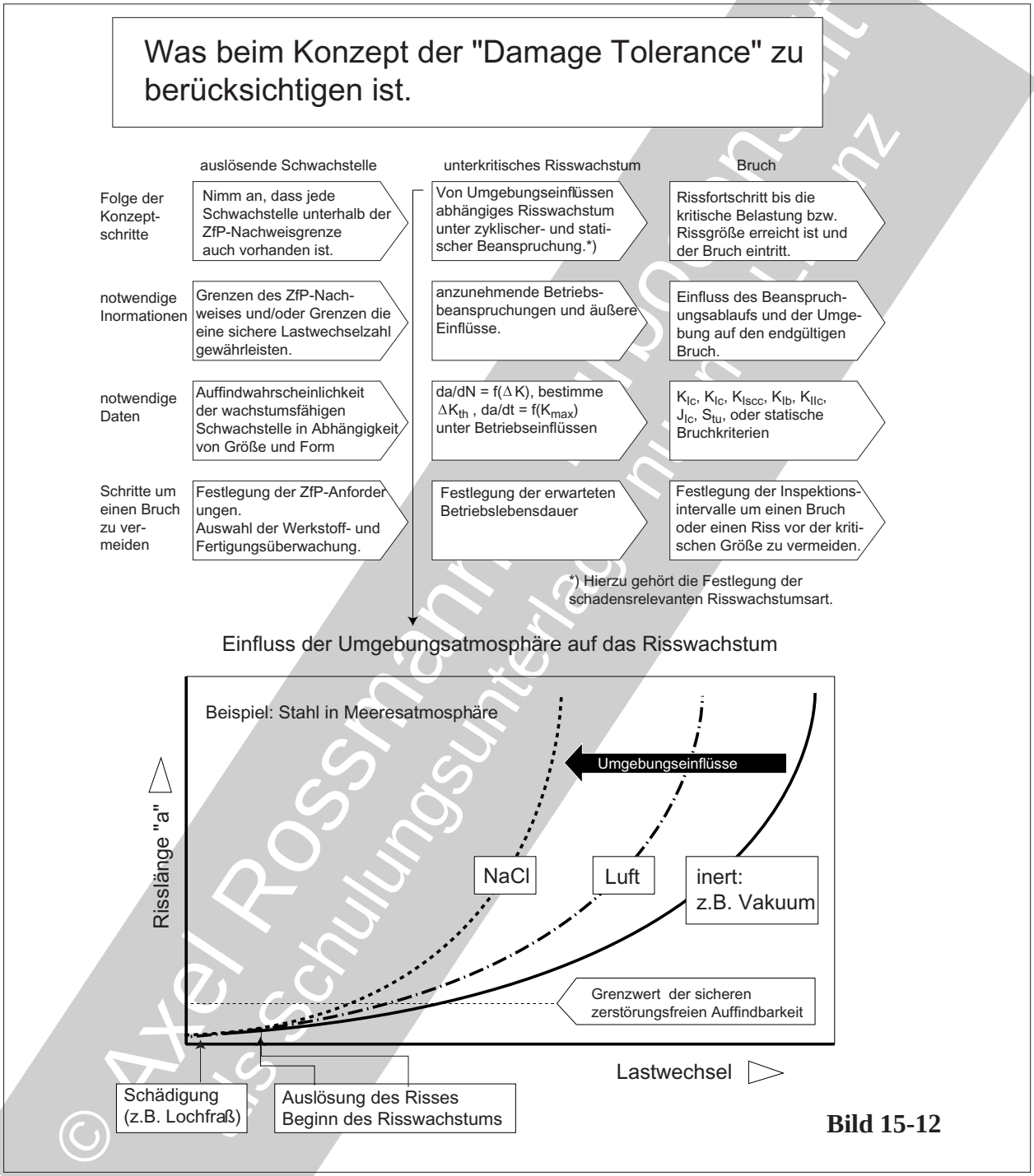
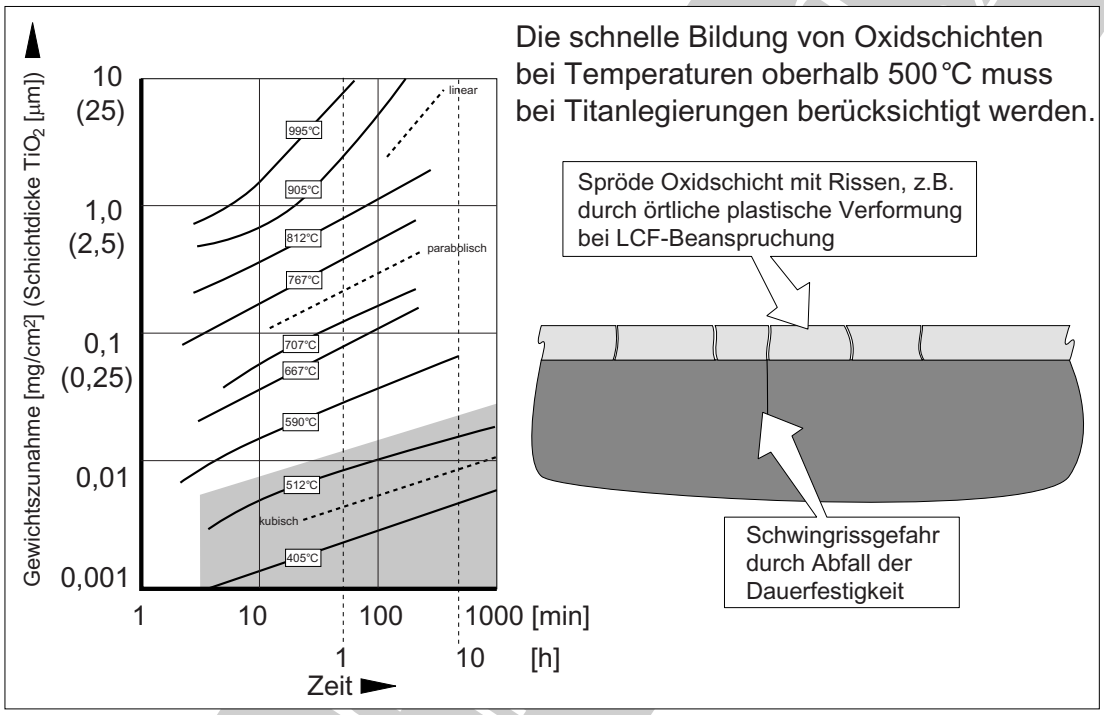


Bild 15-12: *Beim Damage-Tolerant-Konzept sind eine* ***Vielzahl von Einflüssen auf Risshäufigkeit*** *(Bild 15-13), Rissgröße und Risswachstum (siehe auch Band 1, Kapitel 4.3) zu berücksichtigen bzw. Annahmen zu deren Auswirkung notwendig (Aufstellung oben, Lit 15-3).*

Das Diagramm unten (Lit 15-8) zeigt beispielhaft den ***Einfluss des Umgebungsmediums*** *auf das Risswachstum. Dies ist natürlich zu berücksichtigen, wenn die Datenermittlung an Proben eines empfindlichen Werkstoffs nicht in einer Atmosphäre erfolgte die dem Betrieb entspricht Band 1, Bild 4.3-12 und Bild 4.3-13.*

© Axel Rossmann
Ausschulungsunterlagen mit Lizenz

Berücksichtigung von Versagensmechanismen bei "erweiterten" Betriebsbelastungen.



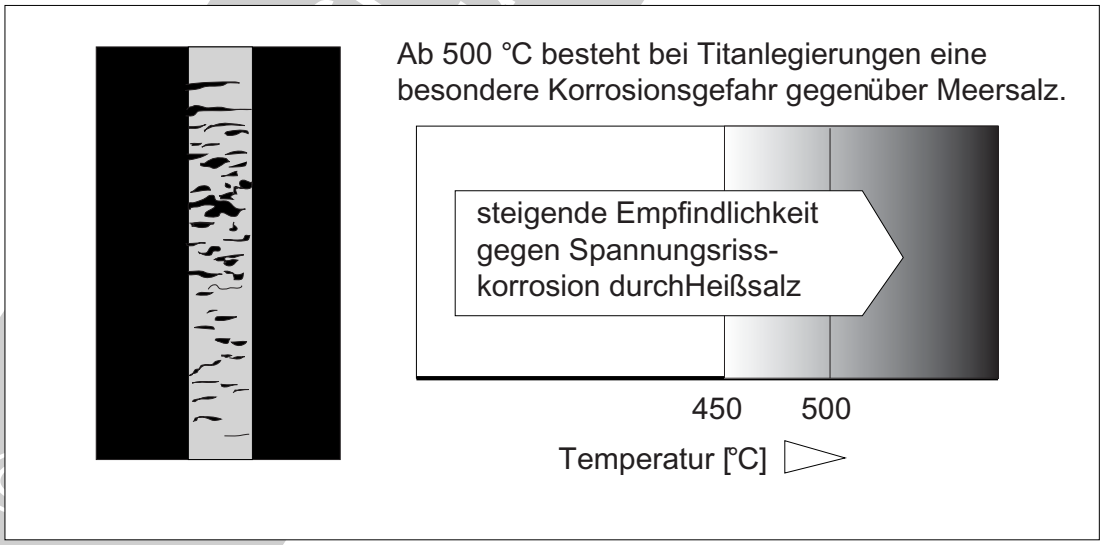


Bild 15-13

Bild 15-13: *Betrachtet man bei der Auslegung lediglich die an relativ* ***kleinen Proben*** *(Band 1 Bild 5.4.3.2-2) unter üblichen Versuchen (z.B. ruhende Luft) ermittelten Festigkeitswerte, kann der Zwang, an die Einsatzgrenzen der Werkstoffe zu gehen, zu gefährlichen Situationen führen.*

Je ***höher die genutzte Festigkeit, um so kleiner werden die zulässigen Fehlstellen****. So kann eine Grenze überschritten werden, ab der der Halbzeughersteller* ***nicht mehr die erforderliche Qualität garantieren*** *kann und/oder die seriengeeigneten Qualitätssicherungsmaßnahmen überfordert sind. Besonders gefährlich*

ist es, wenn dieser Zustand erst dann in seiner Konsequenz bewusst wird, wenn nur noch sehr aufwändige Maßnahmen erfolgversprechend sind.

*Auch **Veränderungen während des Betriebs** können die Bauteileigenschaften unzulässig beeinflussen. Als Beispiel wurden hochfeste Titanlegierungen gewählt.*

*Geht man vom Warmfestigkeitspotenzial aus, lassen sich **Titanlegierungen** deutlich über 500°C einsetzen. Nutzt man diese Möglichkeit, treten neue, die Sicherheit gefährdende Effekte auf.*

*Für Verdichterschaufeln sind neben der dynamischen Werkstofffestigkeit die **Reibverhältnisse** von großer Bedeutung (Band 2, Bild 6.1-12). In der oberen Skizze ist die Bildung von **Oxidschichten** bei hohen Betriebstemperaturen logarithmisch aufgetragen. Man erkennt die starke Zunahme der Oxidschichtdicke zwischen 500 °C und 600°C. Dicke spröde Oxidschichten dürften die nutzbare Festigkeit am Schaufelfuß (z.B. einreißen unter LCF-Belastung) eher absenken sowie die FOD-Empfindlichkeit am Blatt (Rissbildung und HCF) erhöhen.*

*Oberhalb von 500°C steigt das Risiko von **Spannungsrisskorrosion** unter Meersalz bei Titanlegierungen stark an (Skizze unten; Band 1, Bild 5.6.3.1.1-7). Weil mit diesem Korrosionsmedium im Verdichter immer zu rechnen ist, ist von dieser Schadensform auszugehen.*

Der Konstrukteur muss also auch darauf achten, dass die Festigkeitsauslegung solche Betriebseinflüsse berücksichtigt.

***Bild 15-14:** Man unterscheidet zwei Lebensdauerkonzepte. Das **„Save-Life-(Design) Konzept“** und das **„Damage-Tolerant-(Design) Konzept“**.*

*Beim **Save-Life-Konzept** ist die zugelassene (Auslegungs-) **Lebensdauer auf die Inkubationszeit beschränkt** (Band 1, Bild 5.4-2). Es tritt also **in der Lebensdauer kein Risswachstum** auf. Auf Grund einer langen Inkubationszeit ist eine Begrenzung der zyklischen Lebensdauer gewöhnlich nicht vorgesehen. Dies erfordert entsprechend niedrige Belastungen und könnte deshalb **älteren Triebwerkstypen** zu Grunde gelegt werden. Sind die Belastungen deutlich höher, können Fehler bereits früh wachsen. Die Wachstumsphase muss zum Erreichen einer ausreichend langen Lebensdauer dann in die Auslegung einbezogen werden (Diagramm oben links).*

*Für **neuere Triebwerkstypen** mit hoch belasteten Bauteilen muss deshalb das **Damage-Tolerant-Design-Konzept** angewendet werden. Es **begrenzt die zyklische Lebensdauer unter Berücksichtigung einer wachstumsfähigen Fehlergröße**. Weil die Inkubationslebensdauer sonst für die üblichen Anwendungen zu kurz ist, wird das (mögliche) Risswachstum mit in das Lebensdauerkonzept (Auslegung) einbezogen. Das Diagramm oben rechts zeigt, dass bei einem Damage-Tolerant-Konzept bei gleichem Spannungsniveau auch wachstumsfähige größere Fehler zugelassen werden können. Voraussetzung ist eine akzeptabel lange sichere Lebensdauer.*

Das Damage-Tolerant-Konzept beschäftigt sich also in erster Linie mit dem Einfluss von Fehlergröße und Rissbildung auf die Bauteillebensdauer.

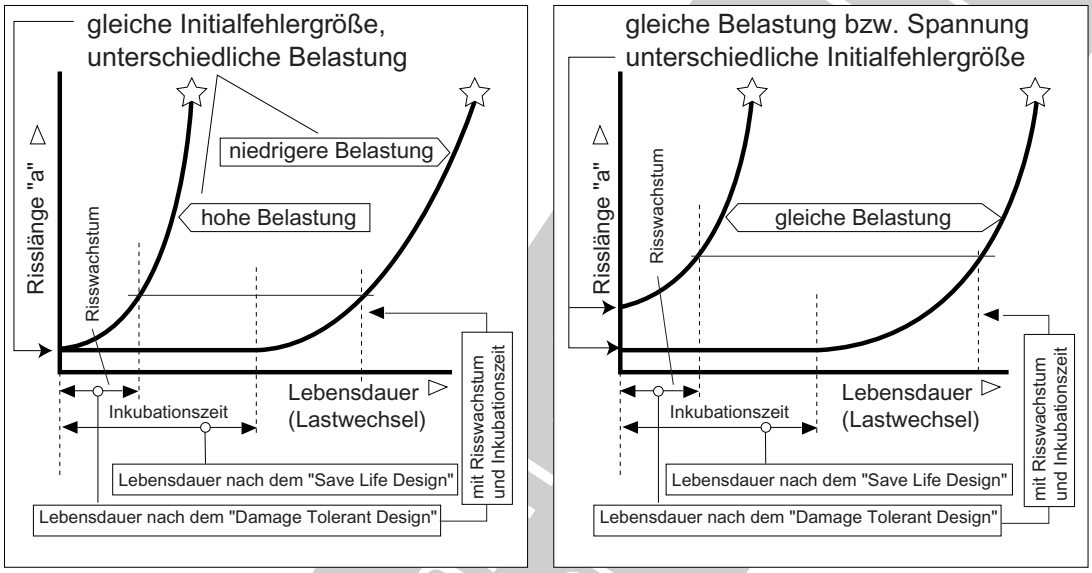
*Natürlich beeinflussen diese Konzepte auch **Wartung und Reparatur**. So sind die **Inspektionsintervalle** bei hoch belasteten Bauteilen moderner Triebwerke im akuten Fall kürzer, die Gefahr von Schäden bei Beschädigungen größer als für ältere Triebwerkstypen.*

Reparaturen an niedrig belasteten Bauteilen ermöglichen größere „Spielräume“, obwohl natürlich auch hier bei Änderungen der Verfahren immer ein Nachweis erforderlich ist.

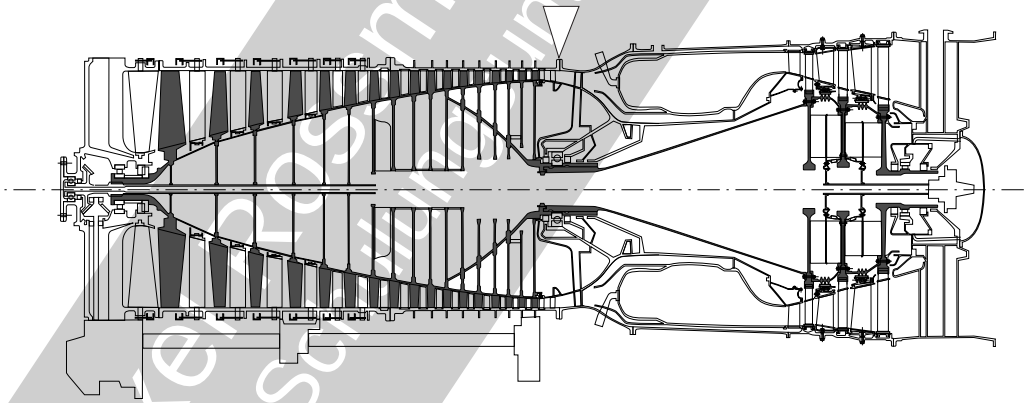
© Avel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Konstruktion: Schadensminimierung

Unterschied zwischen auslegungsorientiertem "Save Life Design" und "Damage Tolerant Design".



"alter" Triebwerkstyp, bei dem das "Safe Life Design"-Konzept auf Rotorteile anwendbar ist



"neuer" Triebwerkstyp, bei dem wahrscheinlich das "Damage Tolerant Design"-Konzept auf Rotorteile angewendet wird.

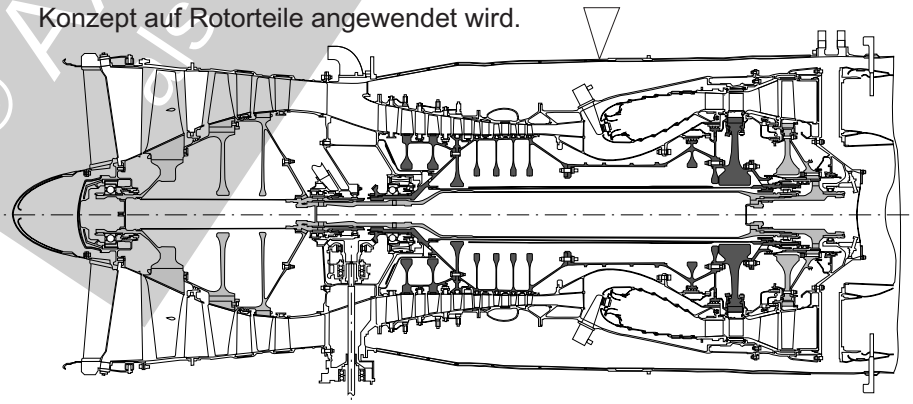


Bild 15-14

© Axel Rosmann

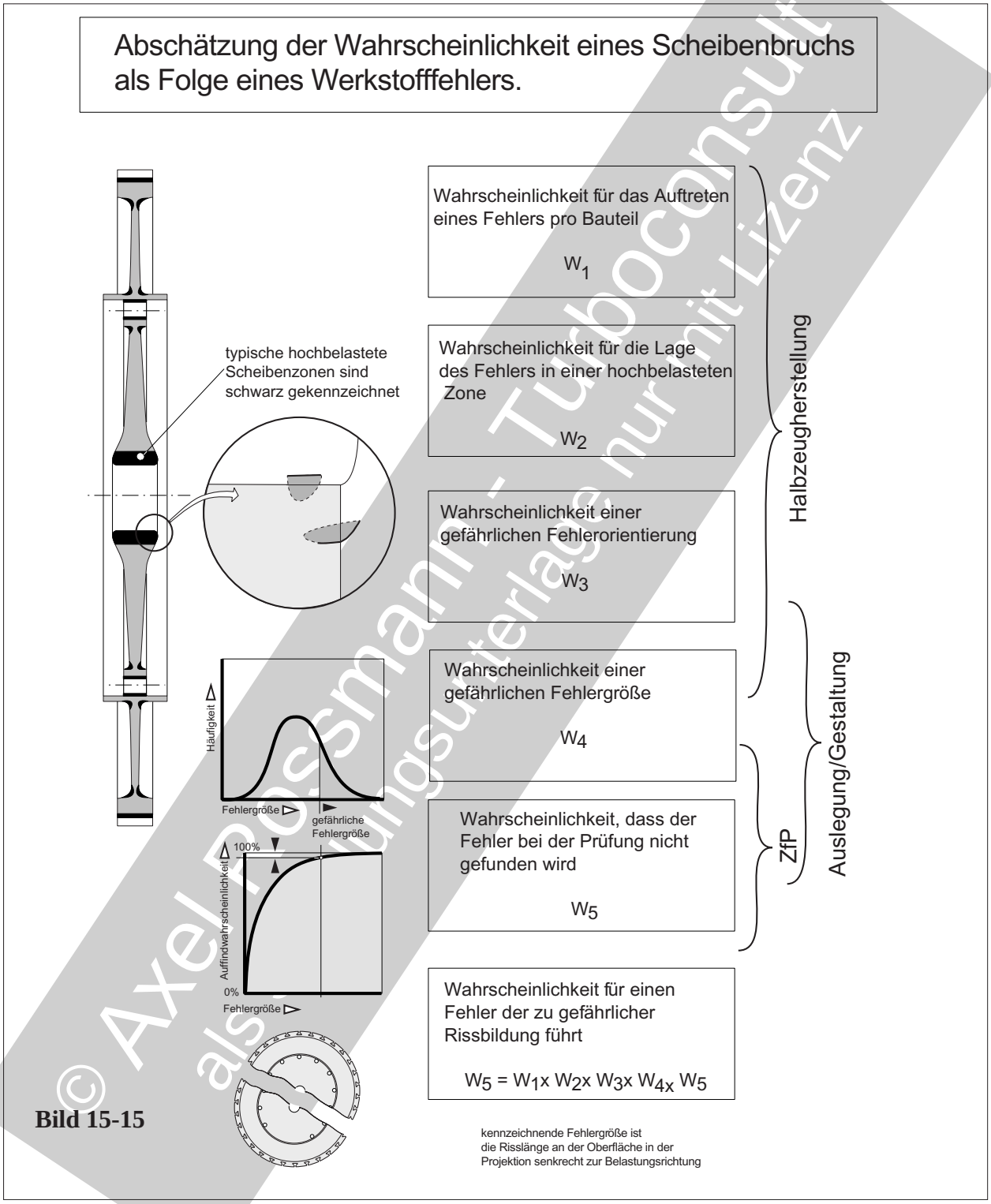


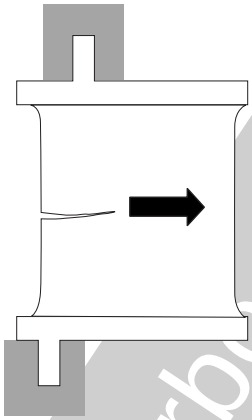
Bild 15-15

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Prüfungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 15-15: *Ein* ***Werkstofffehler*** *in einem Bauteil der die Lebensdauer unzulässig beeinflusst, ist nur beim* ***Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Bedingungen*** *möglich. Hierzu gehört die Halbzeugherstellung, die ZfP und die Auslegung (Belastung).*

Die Wahrscheinlichkeit hängt natürlich entscheidend vom Belastungsniveau des Bauteils ab (Bild 14-8 und Band 1, Bild 4.1-1). Hohe Spannungen bedeuten, dass kleine Fehler gefährlich werden können und verschlechtern die Wahrscheinlichkeit den Fehler mit ZfP zu finden.

15.1.1 Gestaltungsregeln



© Axel Pesiridis - Turboconsult
Nur mit Lizenz

Es gibt eine Vielzahl von Gestaltungsregeln und Vorgehensweisen die bei richtiger und kritischer Anwendung das **Schadensrisiko minimieren**. Leider sind Gestaltungsregeln oft Kompromisse und somit nicht immer problemlos. Was sich in einem Fall positiv auswirkt, kann in einem andern sogar die Schadensrisiken erhöhen. Hierzu einige Beispiele:

Um Unwuchten zu minimieren und unvermeidliche Unwuchten (z.B. bei Beschuss) besser aufnehmen zu können (Bild 15-22) werden **geschweißte Rotoren** als damage-tolerant günstig bewertet. Andererseits sind Schweißungen immer auch mit einem erhöhten **Fehlerrisiko** verbunden (Band 3, Kapitel 12.2.1.3). Fehlstellen wie Poren, Bindefehler („Klebestellen“) und Mikrorisse sind oft sehr schwer zu finden bzw. zu vermeiden. **Risse können sich bei integralen Bauteilen weiter ausbreiten** (Bild 15-23) als in geflanschten Verbindungen die als Rissstopper wirken.

Ein zusätzliches Problem ist die **geringere Dämpfung integraler Bauteile** (z.B. Blisk und Bling, Band 1,Bild 3-16) wegen fehlender Reibung (Band 1, Bild 5.4.3.3-17). So werden hochfrequente (Resonanz-) Schwingungen mit HCF-Anrissen begünstigt (Lit. 15-17).

Höhere **Festigkeiten** sind gewöhnlich einem damage-toleranten Verhalten nicht förderlich. Wird, wie üblich notwendig, das Festigkeitspotenzial möglichst genutzt, erhöht sich das **Risiko bei Rissbildung**. Bei hohem Spannungsniveau werden kleinere Fehler wachstumsfähig, die zyklische Rissfortschrittsgeschwindigkeit schneller und es kommt bereits bei einer kürzeren Risslänge (kritische Risslänge) zum Bruch (Band 1, Bild 4.3-7).

Auch **Werkstoffeigenschaften** können sich sehr unterschiedlich auswirken. Hochfeste pulvermetallurgische Werkstoffe mögen eine hohe Risszähigkeit aufweisen, trotzdem kann die typisch geringe Korngröße bei dicken Querschnitten die **Rissfortschrittsgeschwindigkeit** erhöhen (Bandn 1, Bild 4.3-9 und Band 3, Beispiel 11.2.3-1) und damit nach einem Anriss das zur Verfügung stehende Inspektionsintervall so verkürzen, dass es zur Vermeidung eines Bruchs nicht nutzbar ist.

Generell wird man versuchen **werkstofftypische Fehler** so zu den Hauptbelastungsrichtungen auszurichten, dass sie die Festigkeit, insbesondere die zyklische Ermüdung möglichst wenig beeinflussen. Schmiedeteile (Band 3, Bild 11.2.2-3 und Bild 11.2.2.1-1) wie Scheiben werden so verformt, dass sich Fehler in möglichst axial-radialer Ebene und damit in die Richtung fliehkraftinduzierter Spannungen ausrichten. Auch deshalb werden pulvermetallurgische (HIP) Teile nachgeschmiedet (Bild 11.2.3-2).

Weitere Aspekte einer Werkstoffauswahl unter dem Gesichtspunkt der Damage-Toleranz ist die **Neigung zur Rissbildung bei funktionsbedingten**, **schädigenden Einflüssen.** Typische Beispiele sind Bauteile mit Dichtungsfunktion. Labyrinthe (Band 2, Kapitel 6.10.3.1, Bild 6.10.3.1.2-9.2) werden beim Anstreifen örtlich so aufgeheizt, dass Bedingungen für Warmrissbildung eintreten (Band 1, Bild 4.4-15 und Bild 5.3-3). Natürlich sollte ein Labyrinthträger (Band 2, Bild 6.10.3.1.2-10) möglichst warmrissbeständig sein. Diese Forderung kann jedoch mit den Festigkeitsan-

forderungen kollidieren. Anstreifende Schaufelspitzen werden ebenfalls aufgeheizt und können dabei so geschädigt werden, dass Rissbildung eintritt (Lit. 15-17).

Die **breiten Schaufelprofile** (**wide chord**) moderner Verdichter mögen zwar gegenüber bestimmten Fremdkörpern und Grundbiegeschwingungen weniger empfindlich als schmale Schaufeln älterer Triebwerkstypen (Band 1, Bild 5.4.3.3-5) sein. Sie neigen jedoch zu **Schwingungen höherer Ordnung** die z.B. Eckenrisse auslösen was im Zusammenspiel mit **Anstreifschädigungen** das Schadensrisiko deutlich erhöht.

Bei großen Überlastungen wie sie im Ablauf eines **Vogelschlags** (Band 1, Bild 5.2.2-12) auftreten, können **Clapper** an schmalen Schaufeln **kleinere Bruchstücke** ermöglichen (Blattstück oberhalb des Clappers, Band 1 Bild 5.4.3.3-5, Lit. 15-19). Breite Schaufeln ohne Clapper können dagegen im Fußbereich so hoch belastet werden, dass sie das gesamte Blatt verlieren.

Auch ein **beidseitig gelagerter Fanrotor** hat nicht nur Vorteile. Er verbessert zwar das Spaltverhalten bei Manövern oder begrenzt die Auslenkung während kleineren Unwuchten. Es besteht jedoch als Folge eines „High-speed-impact"- Vogelschlags die erhöhte Gefahr eines Lagerversagens und der Überlastung der Fanschaufeln. Eine fliegende Lagerung kann Unwuchten reduzieren und hat so Vorteile (Lit. 15-19).

Verbesserte Damage Toleranz kann auch mit der Einführung neuer Prinzipien und Technologien erreicht werden. Hierzu gehören **Bürstendichtungen,** die nicht den katastrophalen Versagensmodus der Labyrinthdichtungen eines selbstverstärkenden Anstreifvorgangs aufweisen (Band 1, Bild 5.4-4; Band 2, Bild 6.10.3.1.2-5).

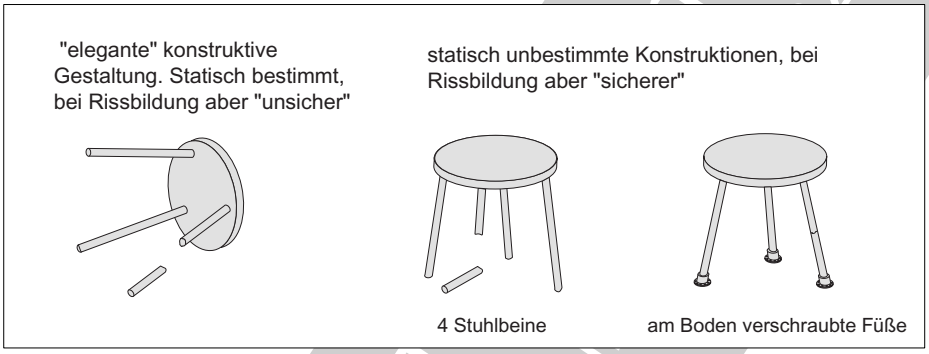
Auch die Einführung **fasertechnischer Werkstoffe** kann aus Sicht der Damage-Toleranz Nachteile bei FOD mehr als ausgleichen. Hierzu gehören Folgeschäden bei unvermeidlichem Schaufelbruch (Vogelschlag, Bild 15.4-28) oder hohe innere Dämpfung und damit Sicherheit gegen HCF-Versagen (Bild 15.4-29).

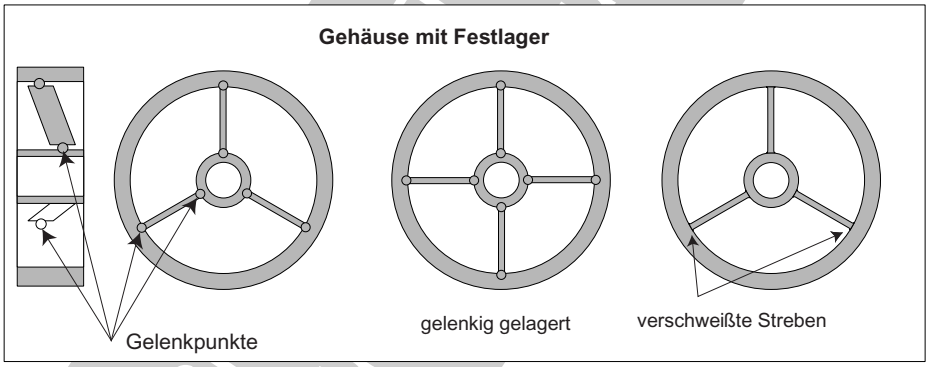
Bild 15-16 *(Lit 15-4): Die* ***Konstruktionsphilosophie*** *spielt für Rissverhalten und Versagensablauf eine wichtige Rolle.*
- ***statisch bestimmte Bauweisen****, insbesondere wenn ein einziges Element die Betriebslasten überträgt, lassen meist keine Risse zu. Solche Konstruktionen weisen kein Fail-Safe-Verhalten auf, weil der Bruch eines tragenden Elements das gesamte System sofort versagen lässt. Zusätzlich führt das Risswachstum zu einem schnellen Belastungsanstieg im Restquerschnitt. Das beschleunigt den Riss zusätzlich. Nach relativ kurzer Betriebszeit, die ein rechtzeitiges Erkennen eher dem Zufall überlässt, kommt es zum Bruch mit katastrophalem Versagen. Hier muss sich die Lebensdauerauslegung auf die Inkubationsphase beschränken (Band 1, Bild 5.4-2). Ein typisches Beispiel aus unserer Umgebung sind dreibeinige Varianten von Tischen und Stühlen. Ein Wackeln, solange die drei Beine tragen, ist ausgeschlossen. Kommt es jedoch zum Bruch eines Beins, fällt das 'System' unweigerlich um (Skizze oben).*
- ***Vielfach statisch unbestimmte Bauweisen*** *verhalten sich schadenstoleranter als statisch bestimmte. Da mehrere Elemente tragen lagert sich bei Rissbildung und Bruch die Belastung so um, dass das geschädigte Element entlastet wird. Statische Unbestimmtheit entsteht z.B. wenn mehr als die unbedingt zur Kraftübertragung notwendigen Elemente daran beteiligt sind und/oder die Gelenkwirkung an den Knotenpunkten durch feste Verbindungen (z.B. Schweißungen) eliminiert ist.*
Bei 4 Abstützungen steht ein Stuhl beim Bruch eines Beins durchaus noch. Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch bei 3 Beinen erreichen, wenn diese fest mit dem Boden verbunden sind. Auch hier handelt es sich um eine statisch unbestimmte Variante. Bricht ein Bein, übernehmen die intakten Beine bei ausreichender Biegefestigkeit die Last.

© Xel Professional - Turbosoft
Ausbildungsunterlage nur intern verwenden

Konstruktion: Schadensminimierung

Einfluss von Konstruktionsphilosophien auf das Bauteilversagen bei Rissbildung.





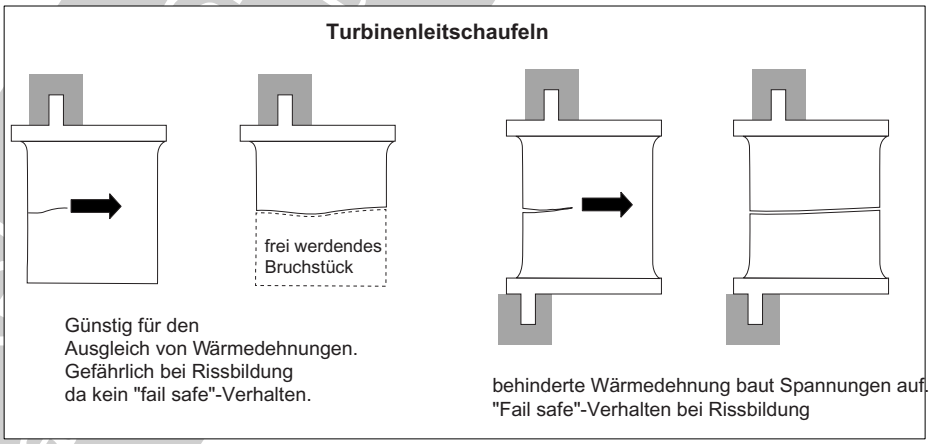


Bild 15-16

In übertragenem Sinn lassen sich Lagerabstützungen in Gehäusen mit dem Beispiel des Stuhls vergleichen. Hier dürfte sich ein Strebenbruch bei den statisch unbestimmten Varianten durch Vibrationen und Anstreifvorgänge vor einem katastrophalen Versagen bemerkbar machen.

Die untere Skizze zeigt am Beispiel einer Turbinenleitschaufel die Einflüsse der Befestigung auf den Schadensablauf. Eine einseitige Befestigung entlastet zwar das Bauteil von Wärmespannungen. Bei einem Riss kommt es jedoch zum Abbrechen eines Blattstücks und umfangreichen Folgeschäden. Die rechte Variante führt zwar zu einer unübersichtlichen Belastung. Reißt das Blatt jedoch durch, ist nicht mit einem sofortigen Funktionsausfall und Folgeschäden zu rechnen. Eine Boroskopinspektion hat in diesem Fall die Chance, den Schaden rechtzeitig zu erkennen.

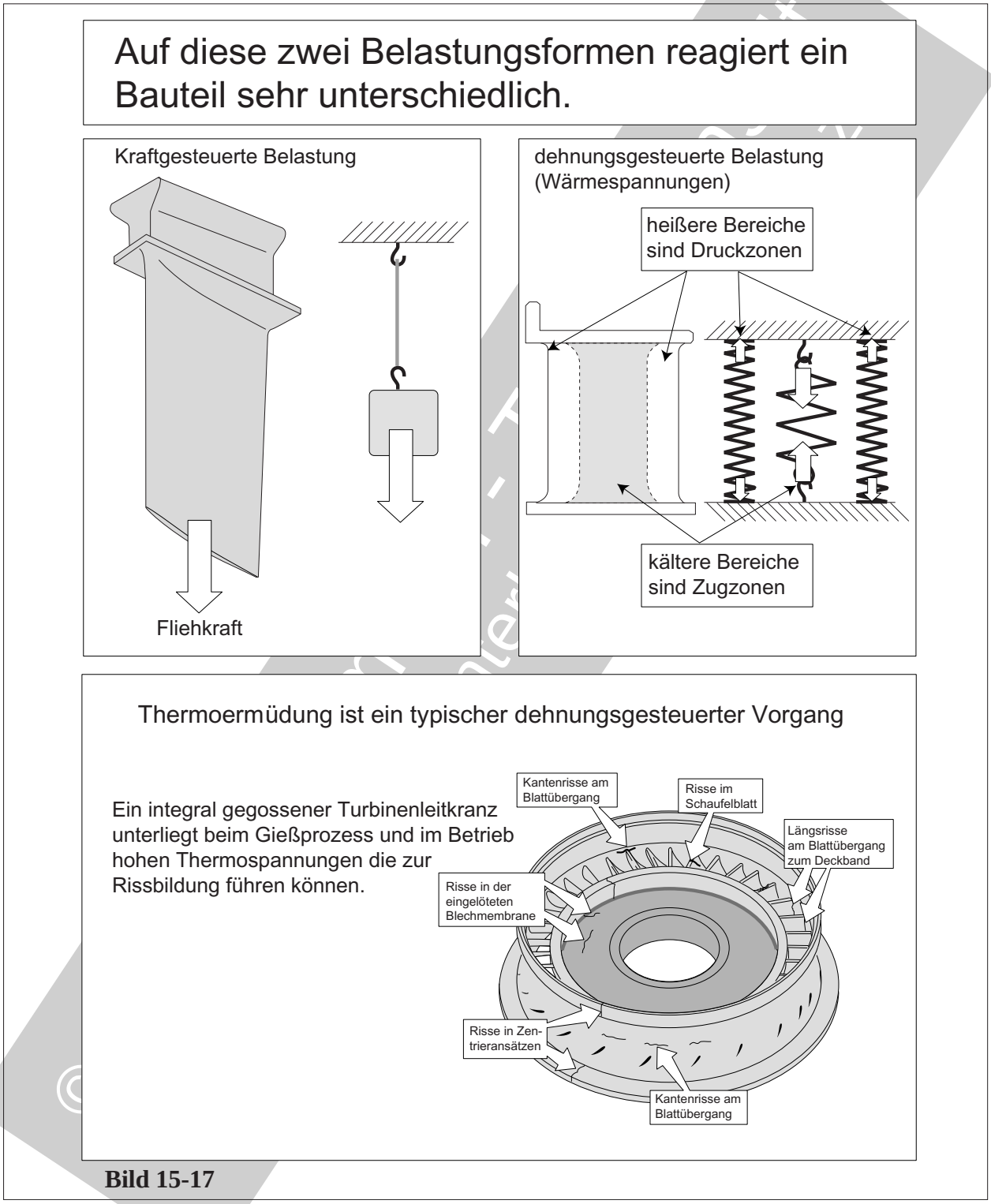


Bild 15-17

Bild 15-17: *Für das sichere Verhalten eines Bauteils trotz Rissbildung spielt die Belastungsform eine wichtige Rolle.*
Links oben ist schematisch eine ***kraftgesteuerte Belastung*** *skizziert. Zeitstandprüfungen und zyklische Prüfungen zur Dauerfestigkeitsermittlung entsprechen dieser Belastungsform. Die Spannung ist in der Probe die Steuergröße. Nimmt der tragende Querschnitt durch Verformung (Einschnürung) oder/und Rissbildung ab, wird der Restquerschnitt entsprechend höher beansprucht.* ***Wenn kein merklicher Spann-***

ungsgradient z.B. auf Grund der Bauteilgeometrie vorliegt, beschleunigt sich der Rissfortschritt *bis zum Bruch.*
Eine ***dehnungsgesteuerte Belastung*** *(Skizze oben rechts) gibt dem Bauteil eine Dehnung innerhalb bestimmter Grenzen vor. Wird diese Dehnung in Folge erhöhter Elastizität (Rissbildung) und/oder plastischen Verformungen abgebaut, sinkt die Belastung entsprechend ab. So verlangsamt sich eine Schädigung wie Risswachstum oder Kriechdehnung. Solche* ***Schädigungen*** *unter dehnungsgesteuerter Belastung können als „****beherrschbar****“ gelten und werden in Grenzen häufig an Heißteilen in Wartungshandbüchern als zulässig spezifiziert. Hierzu gehören Thermoermüdungsrisse (Band 1, Kapitel 5.4.2). Auch* ***Spannungsarmglühen und Relaxation*** *gehören zu dehnungsgesteuerten Vorgängen. Dehnungsgesteuerte Betriebsbelastungen von Bauteilen stehen gewöhnlich im Zusammenhang mit einer* ***Dehnungsbehinderung****. Dabei werden örtliche Dehnungen vom umgebenden Querschnitt behindert (Band 1, Bild 5.4.2.1-2). Typisches Beispiel sind Eigenspannungen bei Schweißungen, oder LCF-beanspruchte Scheibenzonen. Eigenspannungen lassen sich durch Relaxation d.h. Spannungsarmglühen, abbauen. Ein Beispiel für dehnungsbehinderte Strukturen sind integrale Turbinenleitkränze (Skizze unten). Das steife Außen- und Innendeckband behindert die Wärmedehnungen der Schaufelblätter. Die Deckbänder sind beim Aufheizen (Startphase) deutlich kühler als die Schaufeln, beim Abstellen kann sich das Temperaturgefälle umkehren. Dadurch entstehen große zyklische Wärmedehnungen, die von den Temperaturunterschieden vorgegeben sind. Im Schaufelblatt treten zusätzlich große Temperaturgradienten zwischen benachbarten Bereichen auf, die sich gegenseitig mit den entsprechenden Wärmedehnungsunterschieden belasten.*

Bild 15-18: *Kerben bestimmen als Bereiche mit* ***Spannungskonzentrationen*** *häufig die Lebensdauer eines Bauteils. Es besteht für den Konstrukteur die Aufgabe Kerbspannungen möglichst niedrig zu halten. Hierzu muss einem aber die* ***Kerbe bewusst*** *sein, was nur auf den ersten Blick selbstverständlich erscheint. Kerben können sich auf doppelte Weise ungünstig auswirken. Sie vermindern die Ermüdungsfestigkeit und langgezogene Kerben können den Rissfortschritt orientieren und stark beschleunigen (Bild 15-24).*
Kerben können in vielfältiger Art auftreten:

Formkerben/Steifigkeitskerbe („1“): *Es handelt sich um geometrisch bedingte Kerben. Sie beruhen auf zwei Effekten, dem* ***Kerbradius*** *und/oder einem* ***Steifigkeitssprung****. Bereits „unscheinbare“ Vergrößerungen des Kerbradius können die Kerbwirkung vermindern und damit die Lebensdauer entscheidend verlängern (Bild 15-24). Entsprechende Nacharbeiten des Radius bieten sich zumindest als Übergangslösungen in akuten Fällen an.* ***Entlastungsbohrungen*** *an Flanschen und Scheiben (Band 1, Bild 5.4.4-2) oder Aussparungen (engl. scallops) sind in der Lage, Spannungen auszugleichen, d.h. gefährliche Spannungsspitzen abzubauen. Formkerben können auch in weniger augenfälligen Bereichen wie an* ***Übergängen von Beschichtungen*** *wirksam werden. Mit der Haftfestigkeit, Festigkeit, Sprödigkeit und E-Modul der Schicht steigt die negative Auswirkung auf die Schwingfestigkeit.*

Bearbeitungskerbe („2“): *Bearbeitungsübergänge unterschiedlicher Zerspanungsverfahren und Schaltstufen des Zerspanungsvorgangs können einen kerbartig wirkenden* ***Sprung in Festigkeit*** *und* ***Eigenspannungszustand*** *an der Oberfläche erzeugen. Dies gilt auch am Übergang zu* ***Verfestigungszonen*** *(z.B. Kugelstrahlen). Solche Bereiche sollten außerhalb dynamisch hochbeanspruchter Zonen liegen und nach Möglichkeit* ***„weiche“ Übergänge*** *aufweisen.*

© Aero Gas Turbine - Technologie
Lehrunterlage nur mit Zustimmung

Eine Konstruktion ist von mehr Kerben bedroht als man auf den ersten Blick erkennt.

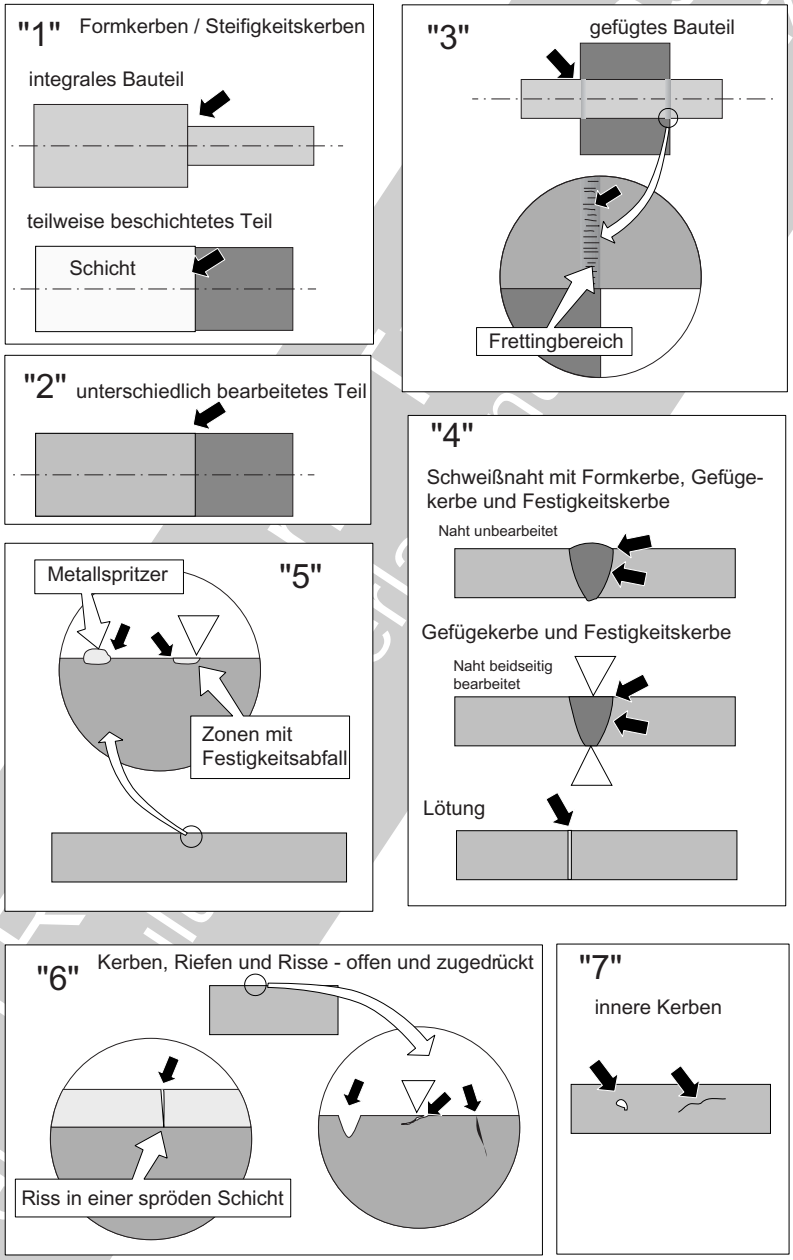


Bild 15-18

Lösbare Fügungen („3“): *Bilden sich Formkerben können* ***Mikrobewegungen*** *den Schwingfestigkeitsabfall im Kerbbereich verstärken. Bei elastischer Verformung führen Mikrobewegungen zusätzlich zur* ***Spannungserhöhung*** *(Anstrengung) und* ***Schädigung*** *(Fretting, Band 1,Kapitel 5.9.3). Ist ein Korrosionsmedium vorhanden (Pumpwirkung), besteht die Gefahr von Korrosionskerben (Lochfraß, Band 1, Bild 5.6-2 und Bild 5.6.1.1-2.1).*

Fügungen(„4“): Schweißnähte *wirken auf mehrfache Weise als Kerben. Formkerben entstehen an unbearbeiteten Schweißnähten infolge* ***Nahtüberhöhung*** *und* ***Einbrand-***

***kerben**. Selbst wenn die Naht bearbeitet wurde werden weitere Kerbeinflüsse wirksam. Am Übergang eines erstarrungsbedingten gerichteten Gussgefüges der Schweißung zum unbeeinflussten Grundwerkstoff (z.B. feinkörniges Schmiedematerial), entsteht eine Kerbwirkung (**Gefügekerbe**, siehe hierzu Bild 5.4.4-1 und Bild 5.4.2.2-5). **Festigkeits- bzw. Härteunterschiede** und **Eigenspannungen** verstärken den Kerbeffekt.*

***Lötungen** wirken entsprechend ihrer gegenüber dem Grundwerkstoff unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften als Kerbe. Zusätzlich ist bei Lötungen immer mit Bindefehlern zu rechnen. Die Kerbwirkung von Lötungen zeigt sich in der geringen Scherfestigkeit weicher Lote („Fischbüchseneffekt"). Arteigene Lote wie **Hochtemperaturlote** weisen gewöhnlich eine hohe Festigkeit und ausreichende Härte auf. Ihre **Sprödigkeit** begünstigt jedoch die Wirkung von Kerben. Bei Lötungen ist deshalb auf geeignete entlastende Formgebung der Übergänge zu achten.*

***Kerbeinflüsse als Folge örtlicher Temperatureinwirkung („5"):** In der Fertigung (z.B. Hochgeschwindigkeitszerspanen, Schleifen, Trennen, Schweißen) aber auch im Betrieb (Anstreifvorgänge) können Metalltropfen entstehen. Treffen diese auf eine Bauteiloberfläche, kann diese in mehrfacher Weise geschädigt werden. **Tropfen von Titanlegierungen** sind besonders gefährlich. Während des Flugs durch die Luft brennen Titantropfen und heizen sich dabei auf. Ein festhaftender Tropfen kann als Formkerbe wirken. Aber selbst wenn der Tropfen nicht haften bleibt, kann das Gefüge des Grundwerkstoffs am Kontaktpunkt gefährlich verändert werden (Gefügekerbe):*

- Versprödung (spröde Phasen, Oxidation),
- Veränderung der Härte bzw. Festigkeit (Weichglühen, Aufhärten, Diffusionsvorgänge),
- Zugeigenspannungen.

***Oberflächenkerben („6"):** Kratzer entstehen z.B. beim, Handling (Fertigung, Montage, Wartung). Sie sind um so ernster zu nehmen je **kerbempfindlicher der Werkstoff** ist. Deshalb kann der **Übergang von Stahlrohren zu Titanrohren** problematisch sein.*

Risse in Beschichtungen können das Risiko besonders erhöhen. Es steigt gewöhnlich mit der Schichtfestigkeit und Sprödigkeit. So sind im Bereich von Formkerben kritische Beschichtungen (z.B. Vernickeln und Verchromen) möglichst zu vermeiden. Dies gilt besonders in LCF-beanspruchten Bereichen, weil diese Lebensdauer bestimmend sind. Treten merkliche plastische Verformungen auf, lösen diese Risse in spröden Schichten aus (Bild 12.6.2-15).

***Innere Kerben („7"):** Es handelt sich gewöhnlich um Werkstofffehler wie Risse, Poren und Lunker. Auch Bereiche verminderter Festigkeit wie Seigerungen oder schroffe Gefügeübergänge (Band 1, Bild 5.4.2.1-4, Lit. 15-18) wirken als Kerben. Eine besondere Problematik ist die schlechtere Auffindbarkeit der kleinen, bereits gefährlichen Kerben eines hochbelasteten Bauteils.*

***Bild 15-19.1** (Lit 15-5): Diese zweistufige Hochdruckturbine eines Kampfflugzeugtriebwerks ist für 8000 **Zyklen** ausgelegt. Die zweistufige Bauweise wurde der einstufigen vorgezogen. So lassen sich, wegen des besseren Wirkungsgrads gegenüber der einstufigen Version, die Gastemperaturen und die Schaufelbelastung (Drehzahl) niedrig halten. Damit wurden bewusst Gewichtsnachteile, größere axiale Länge und höherer Kühlluftverbrauch in Kauf genommen.*

Auf möglichst geringe Spannungskonzentration wurde Wert gelegt. Dazu gehört die Vermeidung von Verschraubungsbohrungen und Kühlluftlöcher in den Scheibenmenbranen und im Kranzbereich.

Die Auswahl des Scheibenwerkstoffs berücksichtigte besonders den Aspekt der „damage

© Aktenzeichen: Turbosmart alle Schulungsunterlagen und Texte

Verbesserung der Haltbarkeit im Hochdruck-Turbinen-Bereich eines modernen Kampf-flugzeug-Triebwerks.

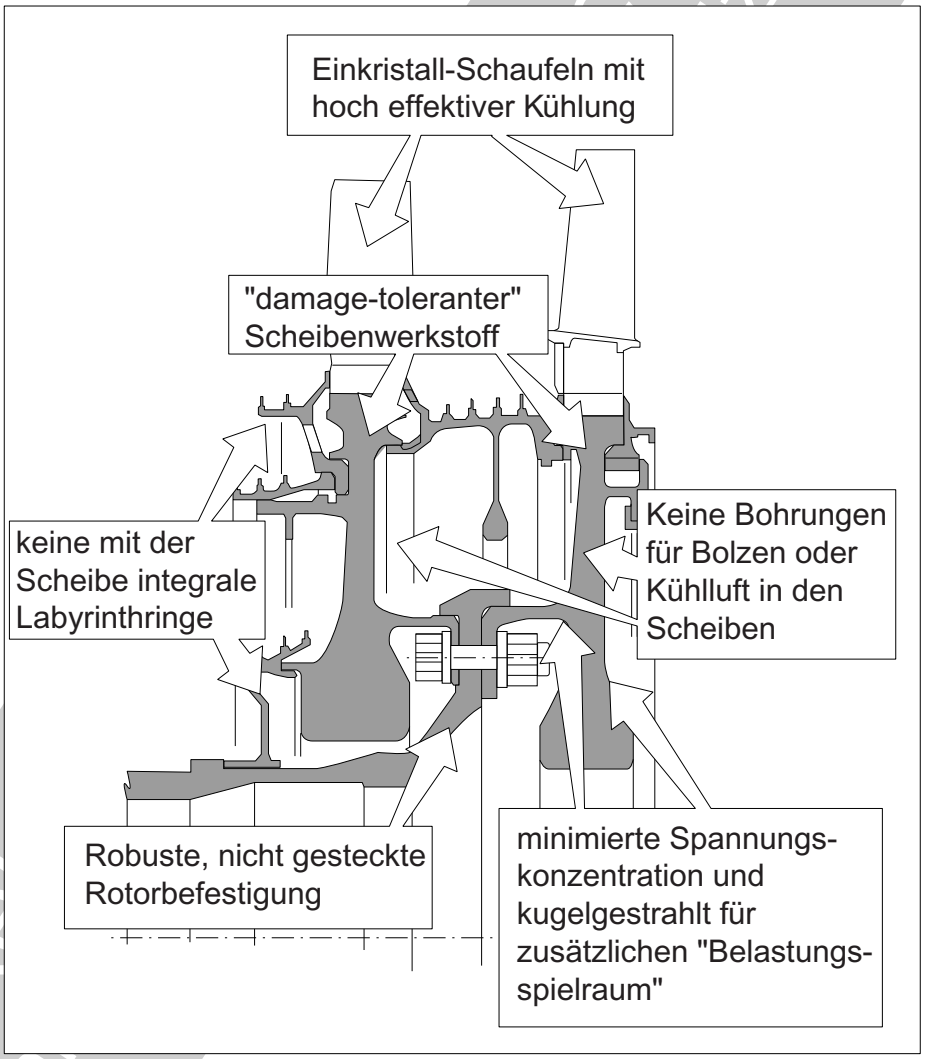


Bild 15-19.1

tolerance“ und damit des Risswiderstands (Risszähigkeit). Es handelt sich um einen pulvermetallurgischen Werkstoff. Dieser ist in der Lage, selbst bei einer wachstumsfähigen Fehlstelle, nach der Inkubationszeit (engl. ***crack initiation life****), noch die vorgesehene Lebensdauer zu erreichen. Bei dem konventionellen Werkstoff war dies nicht möglich. Hier ist anzumerken, dass die zweistufige Turbine im Vergleich zu der einstufigen Variante niedrigere Scheibenbelastungen ermöglicht und damit auch entscheidend zur Fehlertoleranz und einer niedrigeren Rissfortschrittsgeschwindigkeit beiträgt. Das verringert auch die Life-cycle-Kosten und verlängert die Inspektionsintervalle. So wird ein Vorgehen nach der „****Retirement for Cause****“- Philosiphie (Band 1, Bild 4.5-2 und Band 3, Bild 14-7) begünstigt (Lit 15-15). Diese geht davon aus, rissbehaftete Bauteile rechtzeitig zu erkennen und auszuson-*

dern. Rissfreie Teile werden innerhalb der potenziellen Risswachstumsphase weiter verwendet (Lit. 15-10). Weil die Literatur bereits von 1984 stammt, lässt sich heute sagen, dass das ***Retirement for Cause-Konzept sich trotz der bestechenden kosteneinsparenden Vorteile der Lebensdauernutzung bis heute nicht durchgesetzt hat****. Dies liegt in erster Linie an den nicht ausreichend sicheren Nachweisgrenzen der serienmäßig verfügbaren Prüfverfahren.*

Gewöhnlich sind Labyrinthringe im Kranzbereich und Fixierungsringe für die Schaufeln infolge hoher Thermoermüdungsbeanspruchung lebensdauerbegrenzte Bauteile. Im dargestellten Beispiel sind diese ***Ringe formschlüssig aufgesetzt*** *und von kolbenringartigen Befestigungen fixiert. Diese Fixierungen werden von der Fliehkraft verspannt. Damit ist eine gute Dichtwirkung ohne Verschraubung oder Niete gewährleistet.*

Das gestufte Zwischenstufenlabyrinth hat vier gepanzerte Spitzen um die Zirkulation von Heißgasen mit der Leckströmung zu minimieren. So soll der Kranzbereich der Scheiben möglichst kühl gehalten werden. Die Panzerung dürfte beim Anstreifen die Wärmeentwicklung und damit eine Heißrissbildung minimieren.

Die Scheiben sind auf die Welle über einen Konus geklemmt. Seinerseits ist dieser mit den Flanschen der Scheiben außenzentriert verschraubt. So wird eine besonders steife Verbindung geschaffen.

Die Rotorteile wurden in einem superplastischen Umformprozess in Endkonturnähe hergestellt. Das verbessert die Werkstoffeigenschaften und senkt die Kosten. Um die Ermüdungsfestigkeit zu steigern und Fehlstellen zu entschärfen wurde auf sanfte Übergänge zu den Flanschen geachtet und die Oberflächen kugelgestrahlt.

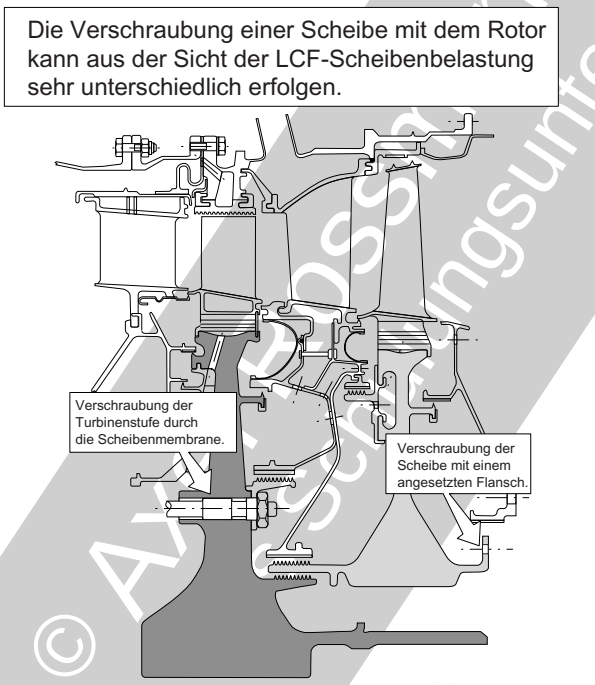


Bild 13-19.2

Bild 15-19.2: *Diese jeweils einstufige Hochdruck- und Niederdruckturbine eines Kampfflugzeugtriebwerks zeigen zwei* ***sehr unterschiedliche Scheibenverschraubungen*** *mit dem jeweiligen Rotor. Die Hochdruckturbinenscheibe ist* ***durch die Scheibenmembrane*** *verschraubt. Diese Scheibenzone steht unter relativ hoher LCF- Belastung (Band 1, Bild 5.4.1.1-2)aus Fliehkraft und Wärmespannungen. Die Schraubenbohrung dürfte einen lebensdauerbestimmenden Bereich der Scheibe darstellen. Bei Rissbildung ist mit einem schnellen Rissfortschritt zu rechnen.*

Die Niederdruckturbine ist mit der Welle ***über einen Flansch*** *verschraubt. Die Flanschbohrung dürfte in einem durch Start-Abstellzyklen relativ niedrig belasteten Bereich liegen und so die LCF-Lebensdauer der Scheibe kaum begrenzen.*

© Axel Bossmann - Turbopressure
Gestaltungsunterlagen mit Urheberrecht

Bajonettverschluss statt Verschraubung vermeidet Löcher mit großer Kerbwirkung und erhöht damit die LCF-Lebensdauer.

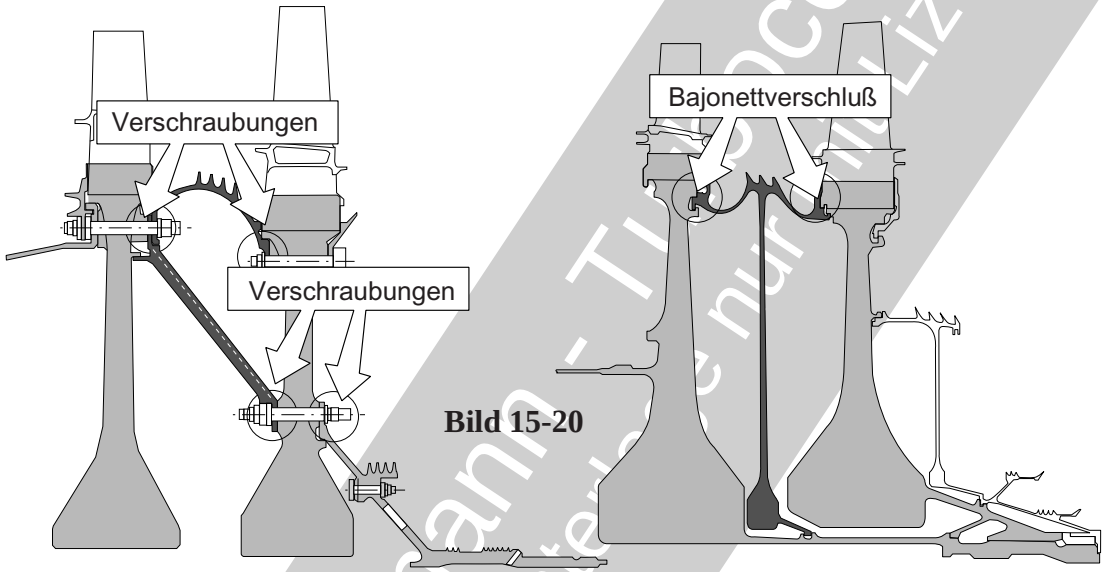


Bild 15-20

Variante eines älteren Triebwerkstyps mit Verschraubung

Scheibenverbindung ohne Verschraubung an einem neuerenTriebwerkstyp

Bild 15-20: *Die linke Skizze zeigt den zweistufigen Turbinenrotor eines großen zivilen Fan-Triebwerks der „ersten Generation“. An beiden Scheiben sind die Schaufelfixierungen und Labyrinthringe sowie der Kranz von* ***Bohrungen*** *der Verschraubung geschwächt. Zusätzlich erzeugt die, für die Kühlluftzufuhr notwendige ausgeprägte* ***Strukturierung des Kranzbereichs****, problematische Steifigkeitssprünge. Sie standen bereits im Zusammenhang mit gravierenden Schäden (Lit. 15-17). Die zweite Stufe weist Bolzenbohrungen für die Wellenbefestigung in der Scheibenmembrane auf. Dadurch entstehen Bereiche mit hohen Spannungsspitzen die Lebensdauer begrenzend wirken dürften.*

In der rechten Skizze ist die ebenfalls zweistufige Hochdruckturbine des selben OEM, jedoch eines neueren Triebwerkstyps gezeigt. Mit Hilfe eines ***Bajonettverschlusses*** *wurde der selbsttragende Labyrinthträger zwischen den Scheiben fixiert. Die Scheiben sind jeweils direkt über Ansätze im* ***Nabenbereich mit der Welle über Steckverbindungen*** *verbunden. Die* ***axiale Schaufelfixierung*** *erfolgt offenbar mit* ***formschlüssigen Ringen*** *(Bild 15-19) die sich unter Fliehkraft verspannen. Damit sind alle Bohrungen in der Scheibe, dem Kranz und den Dichtungen vermieden. Von einer solchen Konstruktion kann eine optimale zyklische Lebensdauer erwartet werden.*

Bild 15-21 *(Lit 15-6): In diesem Fall wurde ein lebensdauerkritisches Bauteil eines älteren Serientriebwerks dadurch verbessert, dass die* ***Spannungen in der Nabe mit einer Vergrößerung des tragenden Querschnitts abgesenkt*** *wurden und die Bohrungen der Verschraubung in der Scheibenmembrane durch* ***Flanschansätze*** *vermieden werden konnten.*

©Wolfgang Bossmann - Turbocom
Übersetzungsunterlage nur für Lizenz

Verbesserung der LCF-Lebensdauer durch Umkonstruktion.

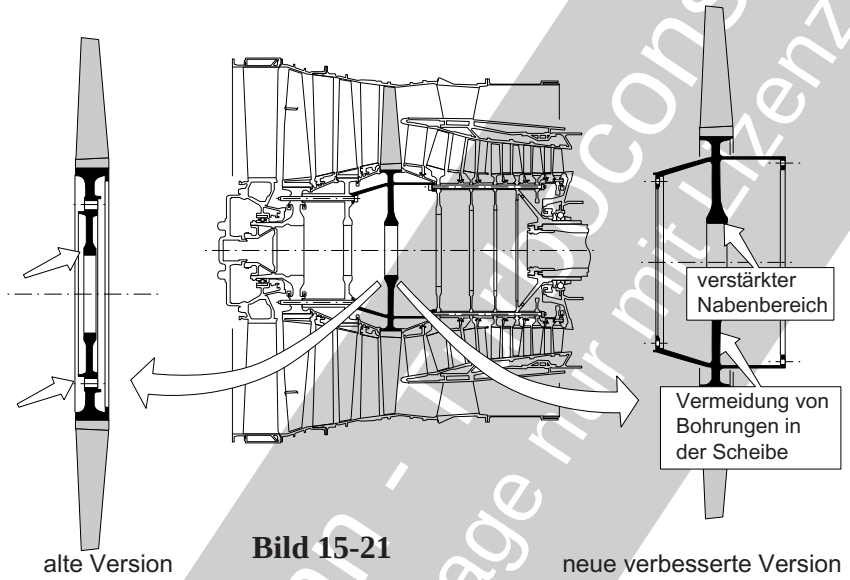


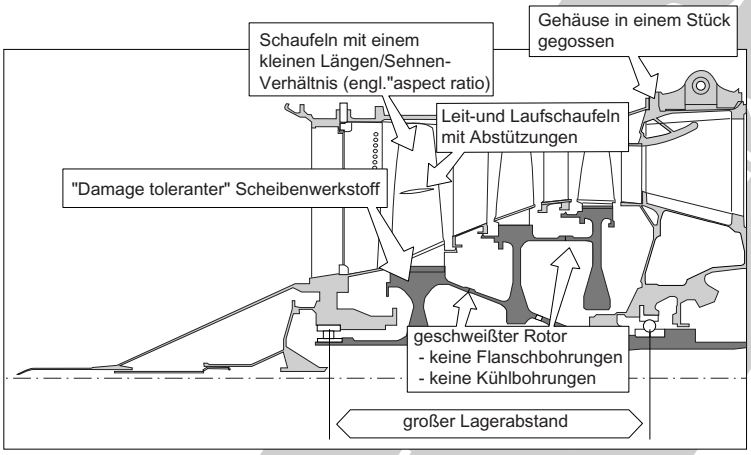
Bild 15-21

© Kurzmann - Wiwiconsult
Lehrbuchunterlage nur mit Lizenz

Bild 15-22 *(Lit. 15-5): Der* ***Fan*** *(Skizze oben) ist entscheidend für den Gesamtwirkungsgrad des Triebwerks. Deshalb muss bei dieser Komponente auf die Erhaltung des Wirkungsgrads bzw. eine Minimierung der Deterioration (Lit. 15-17) besonders geachtet werden. Mit „****Wide-chord-Schaufeln****" lassen sich Stalls besser vermeiden, da sie einen* ***höheren Pumpgrenzenabstand*** *ermöglichen und* ***weniger empfindlich für Störungen in der Eintrittsströmung*** *und bei instationärem Betrieb sind. So werden* ***Anstreifvorgänge*** *mit Spaltvergrößerungen* ***minimiert****. Die Rotorschaufeln der ersten Stufe sind mit Clappern ausgestattet, um Flattern und hochfrequente Schwingungen zu vermeiden sowie sie unempfindlicher gegen Kampfeinwirkung zu machen. Die Anlageflächen am Fuß und an den Clappern sind hart beschichtet, um Verschleiß zu vermeiden. Dies erscheint jedoch problematisch, weil an den Schaufelfüßen harte Schichten die Schwingfestigkeit vermindern können.* ***Die Zahl der Flansche*** *und Verschraubungen werden* ***durch Schweißungen reduziert****. Damit werden Kerbstellen vermieden und das* ***Wuchtverhalten verbessert*** *(keine Verschiebungen). Der Rotor ist beidseitig gelagert, um die Spalte während der Flugmanöver einzuhalten (Band 2, Kapitel 7). Dieses Prinzip kann jedoch bei Vogelschlag und im Containmentfall (Band 1, Kapitel 5.2.2, Lit. 15-17) deutliche Nachteile gegenüber einer „fliegenden" Lagerung aufweisen (Band 1, Bild 5.4.3.1-8.1 und Bild 5.4-4). Alle* ***Statoren haben ein Innendeckband,*** *um Schwingungen zu vermeiden und Fremdkörperschäden zu minimieren. Die Steifigkeit des Zwischengehäuses mit der Festlagerung wird von einem Gussgehäuse garantiert.*

Moderne ***Hochdruckverdichter*** *(Skizze unten) nutzen* ***verschweißte Rotoren,*** *um die Zahl der Flansche mit den spannungserhöhenden Bohrungen zu minimieren Dabei ist jedoch anzumerken, dass ausreichend fehlerfreie Schweißungen (Poren, Mikrorisse, Klebestellen, ungünstiges Gefüge) garantiert werden müssen. Die verwendeten* ***Werkstoffe*** *werden nach „****Damage-Toleranz-Gesichtspunkten****" ausgewählt, d.h. hohe Risszähigkeit und niedriges Risswachstum (Bild 15-18). Schaufeln mit langer Sehnenlänge (engl.* ***wide chord****, low aspect ratio) kommen wegen eines robusteren Verhal-*

Verbesserung der Haltbarkeit von Komponenten an einem modernen Triebwerk eines Kampfflugzeugs.



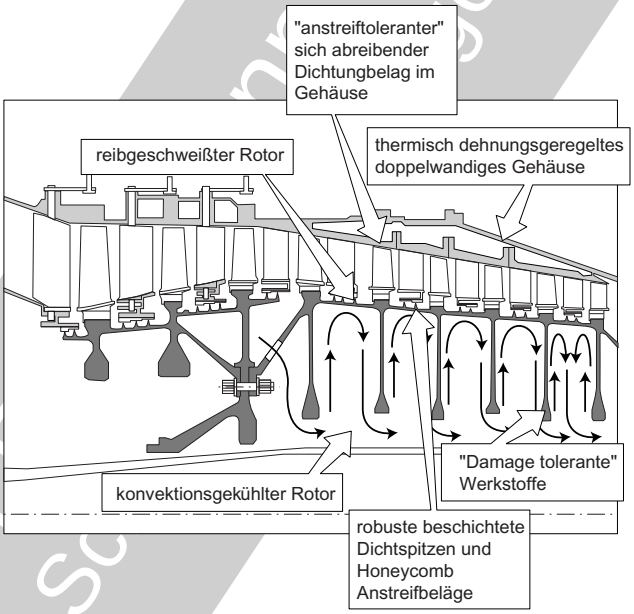


Bild 15-22

tens gegenüber der häufigen Grundbiegeschwingung (Band 1, Bild 5.4.3.3-10), Kampfeinwirkung und Erosion zum Einsatz. Aus den selben Gründen weisen die Statoren Innendeckbänder auf. Anzumerken ist, dass sich Widechord-Schaufeln gegen Schwingungen höherer Ordnung als empfindlich erwiesen haben. Insbesondere steigt das ***Risiko von Kantenrissen****. Besonderer Wert wird auf* ***erosionsfeste Dichtungsbeläge*** *(Band 1, Bild 5.5.1.1-6, Band 2, Bild 6.10.3.1.2-3.2) mit* ***günstigem Einlaufverhalten*** *(Band 2, Bild 6.10.3.1.1-9) gelegt.*

Ein weiterer Schwerpunkt ist eine robuste ***Leitschaufelverstellung****. Um den Verschleiß in den Lagerungen zu minimieren, werden* ***lange Führungen*** *verwendet und die* ***Zahl der Verbindungen minimiert****. Mit ausgleichenden* ***torsionsweichen Verstellhebeln*** *lassen sich Kugelgelenke vermeiden. Man nimmt erhöhte Verstellkräfte auf Grund der Federwirkung der Hebel in Kauf. Die* ***Befestigung des Hebels am Schaufelzapfen*** *wird redundant ausgeführt. Es darf auf keinen Fall zur Verdrehung der Schaufel und damit zu Folgeschäden durch die Strömungsstörung im Verdichter kommen.*

Konstruktion: Schadensminimierung

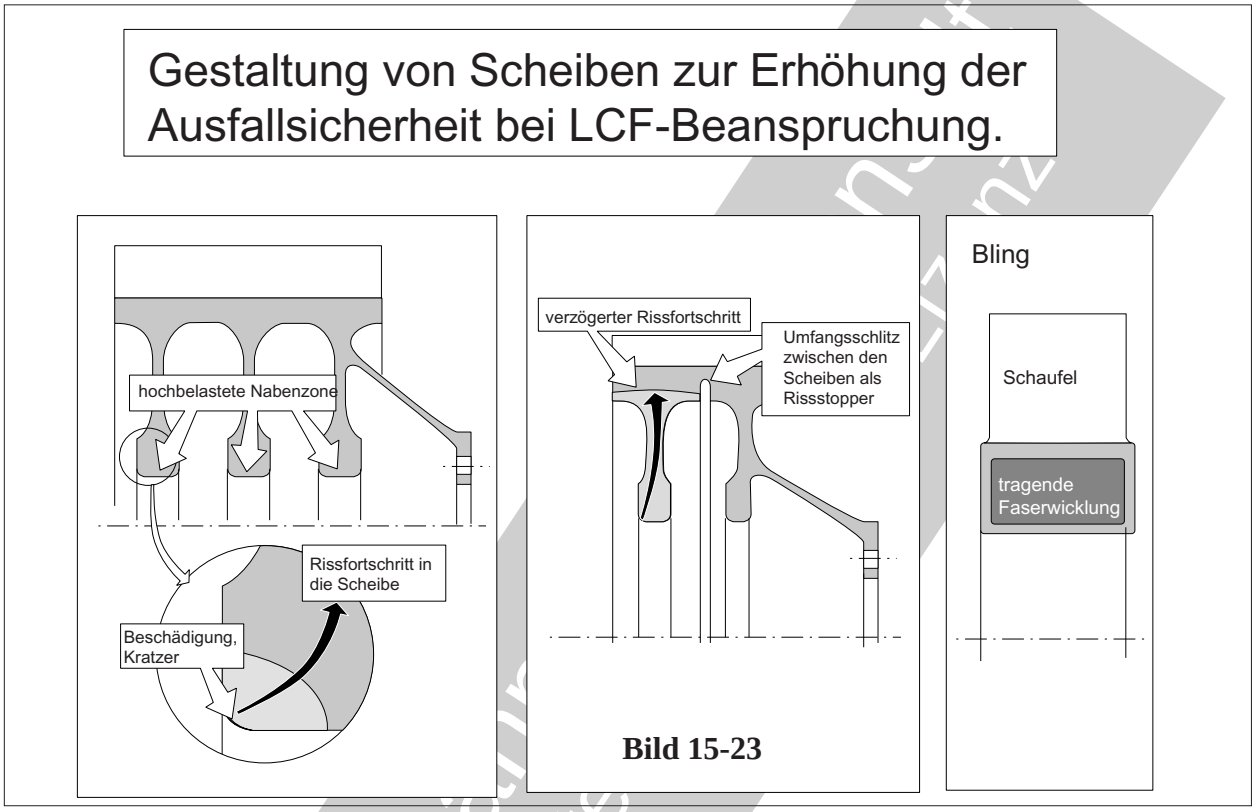


Bild 15-23: Strategien für die „Damage-Toleranz" von Rotorscheiben*. Aufgabe ist es, im Falle eines* ***Nabenrisses*** *diesen rechtzeitig , d.h. vor dem katastrophalen Versagen zu erkennen. Hierzu ist eine ausreichend lange Rissfortschrittsphase und ein äußerlich erkennbares* ***Anzeichen wie eine Unwucht*** *oder ein sicheres Inspektionsmerkmal (erkennbarer Riss) notwendig. Am besten ist, wenn das Risswachstum sich verzögert oder für eine gewisse Zeit zum Stehen kommt. In jedem Fall ist eine möglichst* ***hohe Risszähigkeit*** *des Scheibenmaterials anzustreben. Dies verzögert den Rissfortschritt und vergrößert die kritische Risslänge ab der der Bruch erfolgt.*

Eine Verzögerung des Rissfortschritts lässt sich erreichen, indem eine einzelne dicke Scheibe, wie sie für einen modernen Fan mit Widechord-Schaufeln typisch ist, geeignet in mehrere dünne aufgeteilt wird (Skizze links, Lit 13-7 und Lit. 15-10). Ein Rissfortschritt in die benachbarten Scheiben ist aber kaum vermeidbar.

Die mittlere Skizze zeigt eine Variante bei der ein zusätzlicher Umfangsschlitz als Rissstopper (engl. isolation slot) ***zwischen benachbarte Scheiben*** *angebracht wird. Eine richtige Abstimmung der Scheibenlasten und der Geometrie kann den Riss zum Stillstand bringen, bevor er in die Nachbarscheibe läuft.*

Bei ***Bling-Konstruktionen*** *(Skizze unten rechts) wäre anzustreben, dass die tragende Faserwicklung Eigenschaften langsamen Rissfortschritts aufweist (Bild 14-29). Ob sich dies realisieren lässt ist eine technologische Frage und bleibt abzuwarten.*

Ganz allgemein lässt sich sagen, dass ***geschweißte Rotoren*** *(Bild 15-21) vom Standpunkt der Damage-Toleranz auch* ***Nachteile*** *gegenüber Flanschen aufweisen können.* ***So sind Flansche in der Lage Risse abzufangen*** *und ein spontanes Aufreißen des Rotors zu verhindern. Dies kann gerade bei Zwischenstufenlabyrinthen auf Trommelläufern wichtig sein (Band 2, Bild 6.10.3.1.2-11).*

Kerben an dynamisch hoch beanspruchten Druckkesseln wie Brennkammermänteln sollte unser ganz besonderer Argwohn gelten!

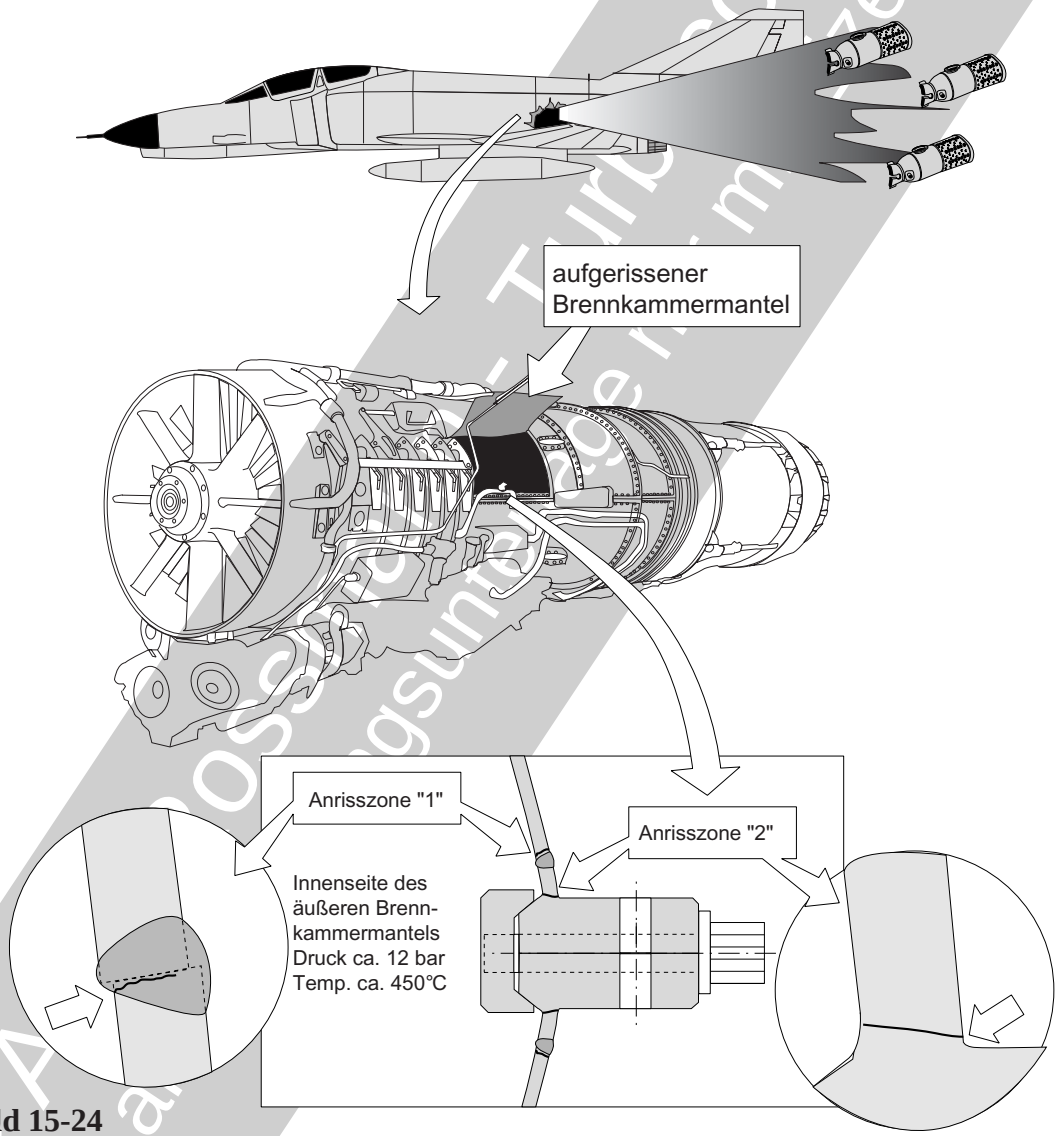


Bild 15-24

Bild 15-24: *Dieses Bild zeigt die Problematik einer* ***Schweißung*** *in einem hoch beanspruchten Bereich, hier eines äußeren Brennkammermantels. Bereits ein kleiner* ***Versatz*** *der Naht (Anrisszone 1) kann zu einem* ***Anriss auf der Innenseite*** *dieses „Druckgefäßes“ führen. Dieser wird erst bemerkt, wenn es zum instabilen Aufreißen kommt.*
Immer wieder beobachtet man, wie Bauteile „ohne Not“ mit scharfkantigen ***Konstruktionskerben*** *geschwächt werden (Anrisszone 2). Die Kerbe begünstigt einen schnellen Rissfortschritt und verschlechtert so die Chance, den Riss bei einer Inspektion zu finden.*
Bereits wenig ***vergrößerte Kerbradien*** *senken die Spannung in der Kerbe bedeutend ab. So lässt sich auch mit Nacharbeiten oft eine ausreichend sichere Lebensdauer erreichen.*

Konstruktion: Schadensminimierung

Sichere Konstruktionen gefügter Bauteile sind eine Herausforderung für den Konstrukteur. Das Problem ist eine schlechte zerstörungsfreie Prüfbarkeit und eine verminderte Festigkeit in der Fügezone.

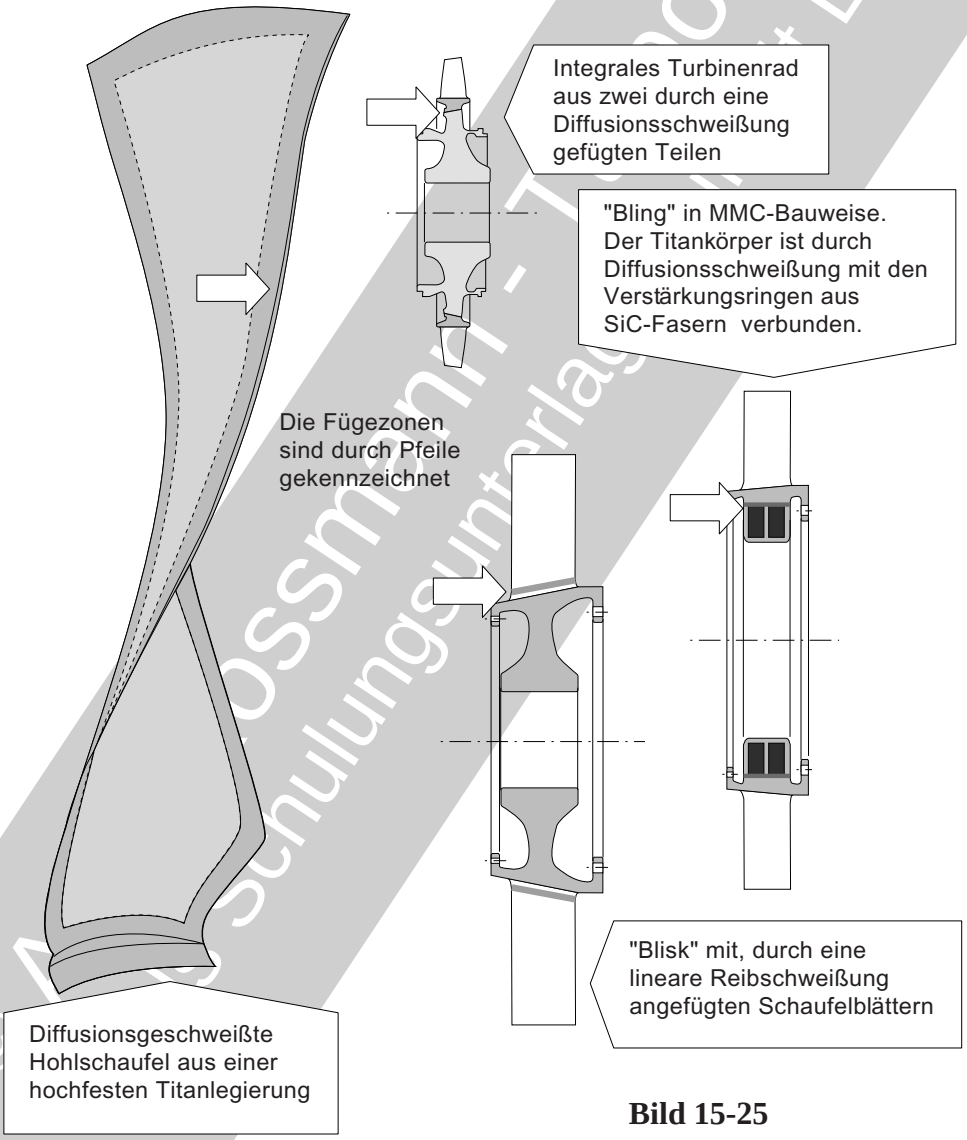


Bild 15-25

Bild 15-25: Schweißungen und Lötungen *sollten nach Möglichkeit* ***in nicht Lebensdauer bestimmenden, d.h. weniger belasteten Bauteilzonen*** *liegen. Die hohle Fanschaufel (Skizze links) aus einer Titanlegierung kommt dieser Forderung beispielhaft nach. Die Verbindung der beiden Blatthälften liegt parallel zur Fliehkraft. Im Bereich hoher dynamischer Beanspruchung (Grundbiegung) befindet sie sich nicht an der Oberfläche (Lit. 15-7) sondern in der Nähe der neutralen Faser.*

*Das oben dargestellte „**Dual-property**“-Turbinenrad weist zwischen Gusskranz und*

Schmiedescheibe eine ***Diffusionsverbindung*** *auf. Typische Fehler dieser Verbindungen sind* ***„Klebungen“, die mit seriengeeigneter ZfP nicht ausreichend sicher zu finden*** *sind. Dies führt nach sehr unterschiedlichen Lebensdauern zum spontanen Ablösen des Kranzes. Möglicherweise lässt sich das Problem mit einer HIP-Behandlung ausreichend entschärfen. Werden Teile wie Blings (Skizze rechts) mit HIP-Fügungen hergestellt ist darauf zu achten, dass notwendige Fügezonen möglichst nicht quer belastet werden.*
Unter besonderen Bedingungen ist es offenbar möglich, Schweißungen auch in statisch und potenziell dynamisch hoch belasteten Zonen rotierender Bauteile anzuwenden. Blisks (Skizze unten Mitte) mit Schaufeln die im Fußplattformbereich aufgeschweißt sind, stehen vor dem Serieneinsatz. Das Schweißverfahren (lineares Reibschweißen) ist einer besonderen Verfahrenskontrolle unterworfen. Zusätzliche ***angepasste ZfP-Prüfungen*** *können die Sicherheit weiter erhöhen. Trotzdem wird erst der Serieneinsatz eine statistische Absicherung ermöglichen.*

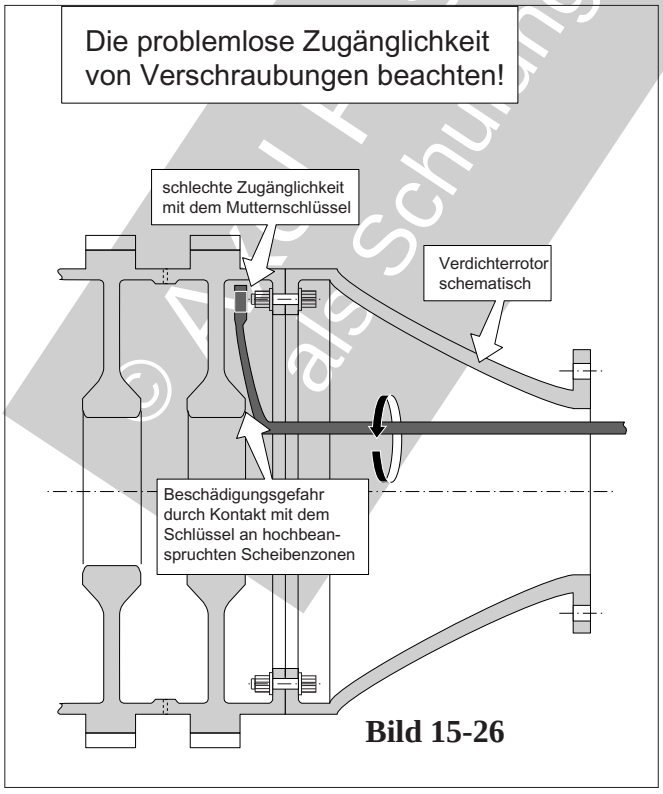


Bild 15-26

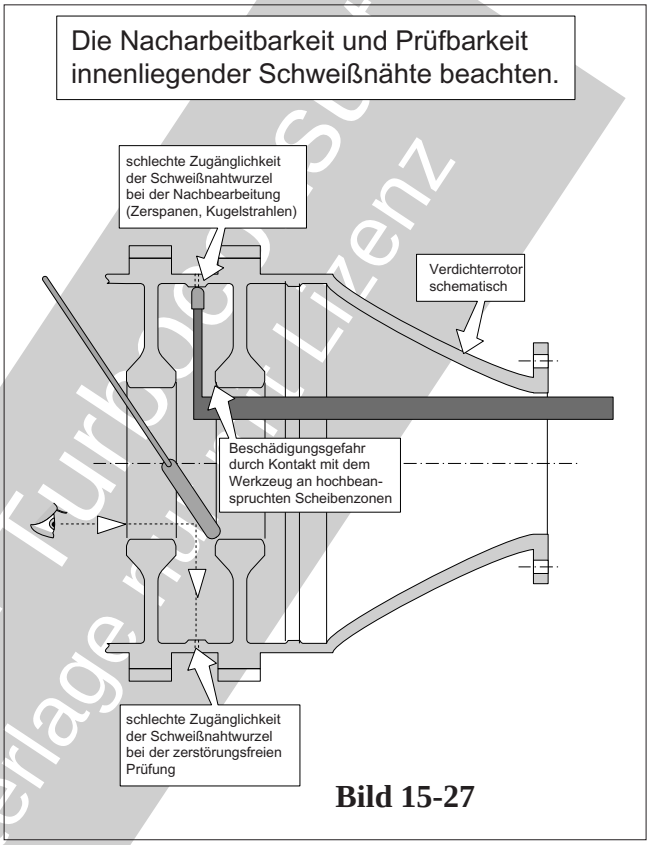


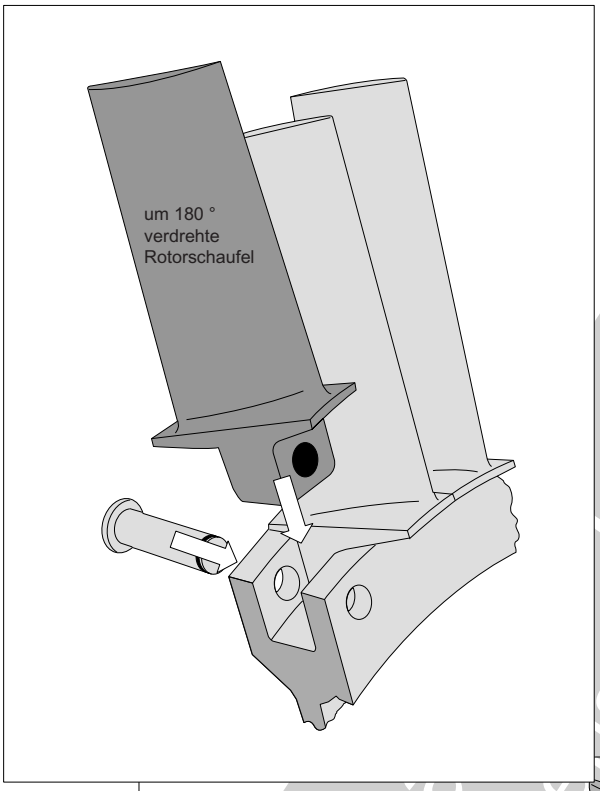
Bild 15-27

Bild 15-26: *Für ausreichende* ***Prüf- und/oder Nacharbeitsbedingungen*** *ist bei* ***Schweißungen*** *und* ***Lötungen*** *zu sorgen. Damit steht und fällt die auslegungsrelevante Fehlergröße und so die Belastbarkeit des Bauteils. Bei Elektronenstrahl-Schweißungen (engl. elecron beam welding = EB-welding) müssen auch auf der* ***Wurzelseite*** *Spritzer sicher entfernt werden. Reibschweißungen sind wegen der typischen Grate auf der Wurzelseite nachzuarbeiten und zu prüfen.*

Bild 15-27: *Eine* ***Montage****, z.B. das sicher kontrollierte Anziehen von Muttern, ist zu gewährleisten. Es darf z.B. nicht die Gefahr bestehen, dass sich der* ***Drehmomentschlüssel verklemmt*** *und so ein richtiges Anzugsmoment vortäuscht. Hier dürften moderne computergestützte Methoden wie* ***Montagesimulationen*** *am Computer und/oder an, mit* ***Rapid Protoyping*** *hergestellten Teilen hilfreich sein.*

© Alle Rechte bei MTU Aero Engines
Nur für den Gebrauch als Schulungsunterlage mit Lizenz

Konstruktion: Schadensminimierung



Was falsch eingebaut werden kann, wird auch irgendwann falsch eingebaut. Optische Merkmale verhindern den Einbau nicht sicher. Deshalb sind ausreichend große Formabweichungen notwendig, die einen Zusammenbau verhindern.

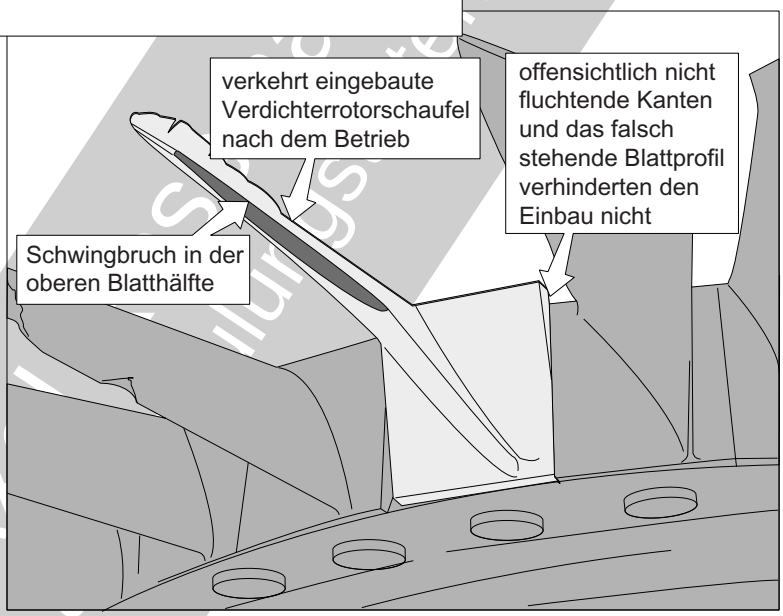


Bild 15-28

Bild 15-28: *Dem Konstrukteur ist die scheinbar einfache aber nicht immer leicht zu erfüllende Aufgabe einer* ***irrtumssicheren Montage*** *gestellt. Im gezeigten Fall war es möglich, die Schaufeln um 180 ° verdreht einzubauen, was eigentlich an der Profilorientierung gut zu erkennen war. Trotzdem trat eine solche Fehlmontage auf und führte zu Strömungsstörungen und einem Verdichterschaden.*

Eine weitere Aufgabe des Konstrukteurs ist, bei der Einführung neuer Tehnologien oder besonderer Montageabläufe das ausführende Personal zu informieren (Bild 14-35).

Ein Sicherheitskonzept kann auch in der Trennung von Funktionen beruhen.

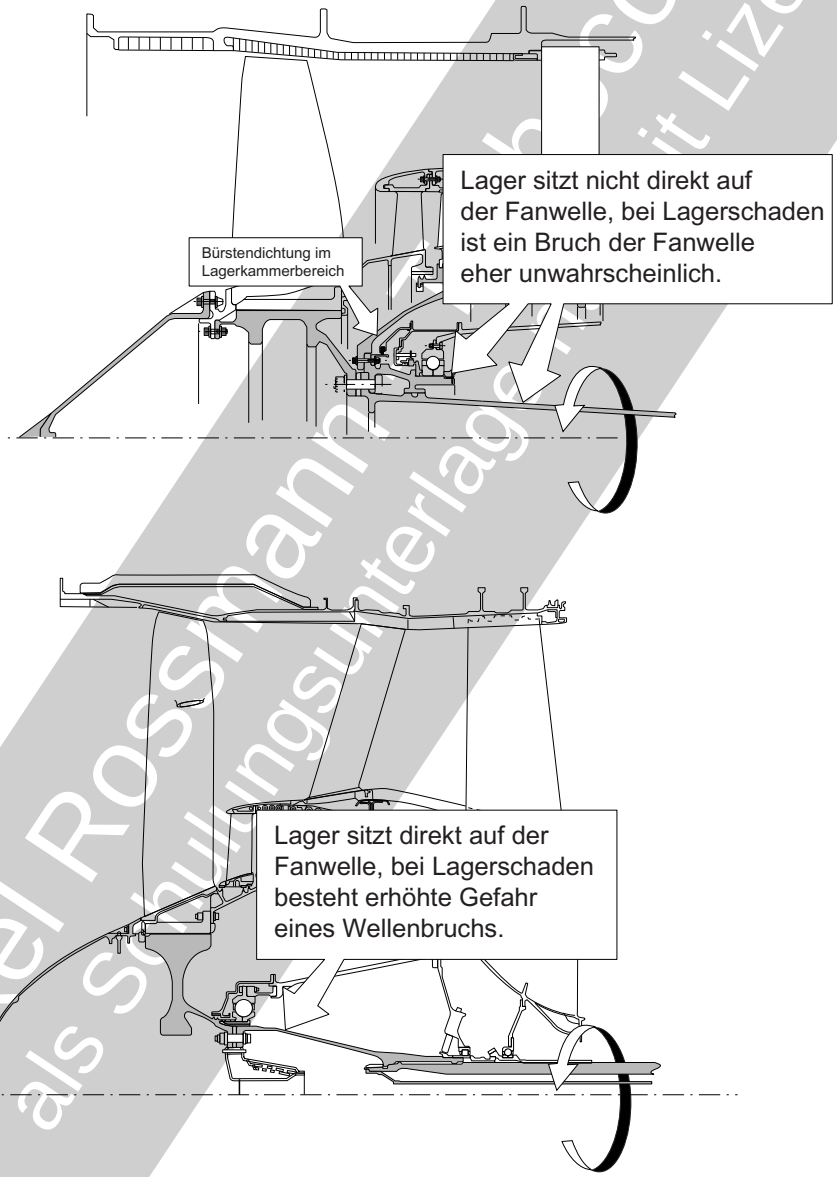


Bild 15-29

© Axel Rossmann
als Schulungsunterlage
mit Lizenz

Bild 15-29: *Die* ***Funktionen eines Bauteils****, können in manchen Fällen so auf verschiedene Komponenten* ***aufgeteilt*** *werden, dass ein beherrschbares Versagen und damit ein* ***Fail Safe-Verhalten*** *gewährleistet ist.*
In der oberen Skizze sitzt das Fan-seitige Festlager der Niederdruckwelle auf einem eigenen Wellenansatz der kein Torsionsmoment überträgt. Der Fan wird von der deutlich radial abgesetzten Niederdruckwelle angetrieben. Damit wird es unwahrscheinlich, dass es bei einem Versagen des Lagers zum Bruch der Welle kommt. So werden Folgen wie das Durchgehen der Niederdruckturbine (Lit. 15-19) oder das Freiwerden des Fans (Lit. 15-19) unwahrscheinlich.

Konstruktion: Schadensminimierung

Die Trennung der Dichtwirkung von der Festigkeit der Verdichterrotortrommel kann bei Zwischenstufenlabyrinthen die Sicherheit erhöhen.

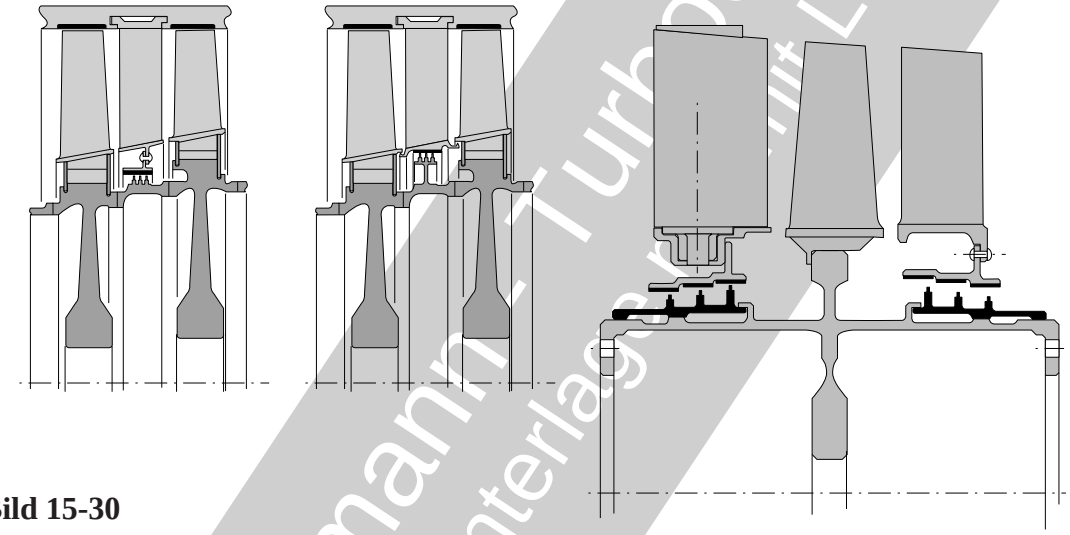


Bild 15-30

Bild 15-30: *Hier wird durch die* ***Trennung unterschiedlicher Aufgaben*** *von* ***Zwischenstufenlabyrinthen*** *wie Dichtung und Rotorfestigkeit das Betriebsverhalten des Triebwerks sicherer gemacht. Bei einem modernen Trommelläufer mit integrierten Labyrinthspitzen (Skizze links) besteht bei Überhitzung und/oder Rissbildung durch das Anstreifen des Labyrinths die Gefahr einer unzulässigen Schwächung des Rotors (Band 2, Bild 6.10.3.1.1-12 und Lit. 15-17).*

Von einem nicht in die Trommel integrierten Labyrinthträger (Skizze rechts), angesetzten Labyrinthringen oder einem mit Hilfe eines Radialstegs abgesetzten Labyrinthrings (Skizze Mitte), ist eine derartige Schwächung des Rotorverbands nicht zu erwarten. Natürlich gibt es andere Gründe die gegen eine solche Lösung sprechen (z.B. Kosten, Gewicht, Komplexität).

© Axel Rossmann - Turbocomplett
als Schulungsunterlagen mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 15

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

15-1 Z.S. Palley, I.M. Korolev, E.V. Rovinskiy, „Structure and Strength of Aircraft Gas-Turbine Engines“, Übersetzung aus dem Russischen, Foreigen Technology Division FTD-HT-23-903-68, 1967, Seite 25-28.

15-2 R. Whitford, „Fundamentals of Fighter Design“, Airlife Publishing Ltd, ISBN 1 84037 112 9, 2000, Seite 82.

15-3 D.W. Hoeppner, „Parameters that Input to Application of Damage Tolerance Concepts to Critical Engine Components“, Proceedings Paper AGARD-CP-393 der Konferenz „Damage Tolerance for Critical Engine Components“, Seite 4-1 bis 4-16.

15-4 W. Schütz, „Lebensdauer-Berechnung bei Beanspruchungen mit beliebigen Last-Zeit-Funktionen“, VDI-Berichte Nr. 268, 1976, Seite 113.

15-5 B.L. Koff, „Design for durability in fighter engines“, Zeitschrift „International Journal of Turbo and Jet Engines“, 1, 1984, Seite 209-222.

15-6 B.L. Koff, „Aircraft Engine Design & Development“, Proceedings Paper AGARD-CP-215, Kapitel 9, Seite 9-3.

15-7 B. Gunston, „The development of Jet and Turbine Aero Engines“, Verlag: Patrick Stephens Ltd, Kapitel 8.

15-8 A.K. Vasudevan, K. Sadananda, „Environmental Effects on Fatigue Crack Initiation and Growth“, Paper RTO-MP-18 des RTO AVT-Workshops on „Fatigue in the Presence of Corrosion“ Corfu, Greece, 7-8 October 1998, Seite 17-1 bis 17-13.

15-9 D. Schütz, „Derzeitiger Stand der Lebensdauervorhersage für Bauteile“, VDI-Berichte Nr. 268, 1976.

15-10 „GE90 Program Summary“, Seminarvortrag an der TU München, Institut für Flugantriebe, November 1995.

15-11 „FAA expected to announce further PW4000 compressor inspections“, Zeitschrift Flight International“, 17-23 July, 2002, Seite 9.

15-12 „P&W set to certificate fix for PW4000 surge“, Zeitschrift Flight International“, 10-16 December, 2002, Seite 9.

15-13 R.M. Wood, S.X.S. Bauer, „Discussion of Knowledge-Based Design“, „Journal of Aircraft“, Vol. 39, No. 6, November-December 2002, Seite 1053-1060.

15-14 M.E. Taverna, „Ariane 5 EC-A Upgrade Faces Long, Costly Flight Delay“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, January 13, 2003, Seite 402.

15-15 „New engine maintenance strategy: Throw it out just before it breaks“, Zeitschrift „Machine Design“,March 10, 1983, Seite25-30.

15-16 J.A.Harris Jr., C.G Annis Jr., M.C. Van Wanderham, D.L.Sims, „Engine Component Retirement for Cause“, Seite 1-9.

15-17 Axel Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“, Band 2, 2001, ISBN 3-00-008429-0, Bild 7.1.3-20 , Bild 7.1.2-17, Bild 7.0-2, Bild 8.2-5, Bild 8.2-18, Bild 7.2.2-28, Bild 8.1-19, Bild 7.0-2, Bild 8.2-14, Bild 8.2-15, Bild 8.2-19, Bild 7.2.2-11.

15-18 Axel Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“, Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Bild 11.1-6, Bild 11.2.1.2-10, Bild 11.2.1.2-14, Bild 12.6.3.3-6, Bild 12.6.2-15.

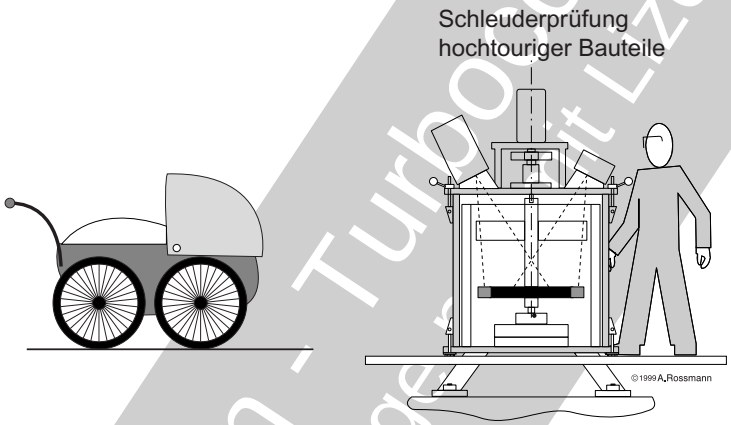
15-19 Axel Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“, Band 1, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Bild 5.2.2.1-8, Bilds 5.2.2.1-18, Bild 4.5-4, Bild 4.5-5, Bild 4.5-6.

© Axel Rossmann - Turbosonsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

15.2. Technologische Entwicklung

Investitionen in die Zukunft müssen sein.



Unter **technologischer Entwicklung** wird im Folgenden die Entwicklung von Hardware mit Schwerpunkt in **Werkstoff- und Fertigungstechniken,** verstanden. Im folgenden werden auf der Basis von Erfahrugen in der Entwicklung von Flugtriebwerken für den anspruchsvollen allgemeinen Maschinenbau , insbesondere dem Leichtbau, Empfehlungen gegeben.

Trotz hoher Kosten und großer Risiken, verlangt die Zukunftssicherung technologische Entwicklung. Diese wird besonderds für sicherheitsrelevante Maschinen und solche bei denen in der Anwendung ein hohes Kostenrisiko besteht **im Rahmen von Serienentwicklungen wird evolutionär** vorgegangen. Die Entwicklung eines neuen Maschinentyps ist derart aufwändig, dass heute selbst große Firmen Partner für verschiedene Komponenten bzw. Module suchen (z.B. Flugzeugbau. Automobilbau, Kraftwerksbau).

Neue Technologien, bei denen es sich um **revolutionäre Schritte** handelt, finden nahzu auschließlich im Rahmen **militärischer Entwicklung** statt. Hier wird das finanzielle Risiko meist durch staatliches Engagement erträglich. Entwicklung und Erprobung ist für militärische Anwendungen typischerweise langfristig angelegt und die angestrebten Betriebszeiten (2000 h) im Vergleich zur zivilen Anwendung (20 000 h) eher übersehbar. Nach erfolgreicher militärischer Erprobung ist eine Nutzung in zivilen Anwendungen mit eher tragbaren Risiken verbunden.Daraus lassen sich auch Vorgehensweisen für zivile Entwicklungen ableiten. Anzumerken ist, dass **werkstofftechnologische Entwicklungen** erfahrungsgemäß in mehreren 5-Jahresschritten ablaufen. Innerhalb und zwischen diesen Schritten sollte eine Überprüfung des Entwicklungsstands und der Realisierungschancen (engl. **gate**, Bild 15.2-36) erfolgen. Von der Idee bis zum eher unwahrscheinlichen Serieneinsatz, ist mit einer Zeitspanne von 15-20 Jahren zu rechnen. Die ersten dieser Entwicklungsschritte werden vorteilhaft in Hochschulen und Instituten, unter der „Beobachtung“ des potenziellen industriellen Nutzers, durchgeführt. Erst wenn sich Technologien in begrenzten Zahlen (z.B. Kleinserien) bewährt haben, lässt sich der Schritt in die zivile Anwendung vollziehen. Beispiele für solche Vorgehensweisen sind Einkristallwerkstoffe, Wärmedämmschichten und Kühltechnologien. Was ist der Antrieb für eine derartig riskante „Geldanlage“ wie technologische Entwicklung? Es ist **der Wunsch des Kunden nach einem Produkt, das seine Position am Markt verbessert**. Dafür muss er diese

© Axel Rossmann - Turbocon suit
als Schulungsunterlage mit Lizenz

befriedigen, manchmal erst wechen.Hierzu gehören heute in erster Linie **geringer Energieverbrauch** und **niedrige Betriebskosten**. Dazu kommen noch besondere **Forderungen wie zu spezifischen Betriebsbedingungen** (Mission) und nach einem möglichst hohen Leistungs-Gewichts-Verhältnis und/ oder niedrigem Energieverbrauch. Die Vorteile für den potenziellen Kunden rechtfertigen einen entsprechenden Entwicklungsaufwand wenn anzunehmen ist, dass sich dies zu einem akzeptablen Anteil im Verkaufserlös realisieren lässt.

Das Potenzial der Technologien ist natürlich im Zusammenhang mit dem zukünftigen Kerngeschäft und einem angestrebten Produkt-Portfolio zu sehen. Für Werkstofftechnologien der Triebwerkstechnik ist der **Festigkeitsverlauf über der Temperatur** ein wichtiges Kriterium (Bild 15.2-2).

im vorliegenden Kapitel soll den Entwicklungsprozess genauer betrachten. Hierzu gehört die Erarbeitung der Ziele und der typische Ablauf.

Die Wahl der optimalen Vorgehensweise hängt von vielen Vorgaben und Rahmenbedingungen ab. Im Fordergrund stehen gewöhnlich

- Ausreichende Sicherheit das Ziel zu erreichen
- Termine/Zeitrahmen
- Aufwand
- Resourcen (Finanzen, Personal, Anlagen)
- Know How

Die Erfahrung zeigt, dass Entscheidungsträger bestimmte Voraussetzungen mitbringen sollten um die Erfolgswahrscheinlichkeit einer Entwicklung abzusichern. So sollte man nicht einfach aus Zeit- und Kostengründen Technologien der Mitbewerber nachvollziehen. Hier ist das Risiko sehr hoch auf unerwartete Probleme zu stoßen. **Es ist sehr schwierig alle wichtigen Details einer 'fremden' Konstruktion zu erkennen und zu berücksichtigen ohne die Funktion im Detail ausreichend verstanden zu haben** (Bild 15.2-0.2).

Beispiel: Von einem Entwicklungslabor wird eine rotierenden Schlüsselkomponente für Flugtriebwerke mit einer bedeutenden Gewichtseinsparung vorgestell. Die Veröffentlichungen wird suggeriert, dass diese Technologie dicht vor dem Serieneinsatz steht. Das veranlasste einen Mitbewerber die Entwicklung unter hohem Kostenaufwand nachzuvollziehen. Tests an Probeteilen ließen schnell erkennen, dass das propagierte Konzept (Band 1, Bild 3-16) aus technisch/physikalischen Gründen ('Show Stopper', Bild 15.2.2-5) nicht realisierbar ist. So wurde eine tragende Faserwicklung von Radialkräften querbelastet. Diese Kräfte konnte die Haftung der Fasern nicht übertragen. Das geeignete Konzept belastet jedoch die Fasern tragender Ringe durch Tangentialspannungen längs. Aus den gesammelten Erfahrungen wurde ein geeignetes Konzept entwickelt.

Es darf aus Erfahrung durchaus vermutet werden, dass Veröffentlichungen technologischer Entwicklungen strategisch erfolgen, um dem Mitbewerber einen Kostenvorteil zu nehmen indem er eine ungeeignete Spur verfolgt.

Scheinbare Verbesserungen, meist Vereinfachungen, können sich zu spät als unzulässig erweisen. Es darf davon ausgegangen werden, dass auch die Mitbewerber über diese „einfachen" Lösungen nachgedacht und sie verworfen haben (Bild 15.2-0.1). Solche „Holzwege" können gewöhnlich durch kontinuierliche, ausreichend langfristige, eigene Entwicklungsarbeit vermieden werden.

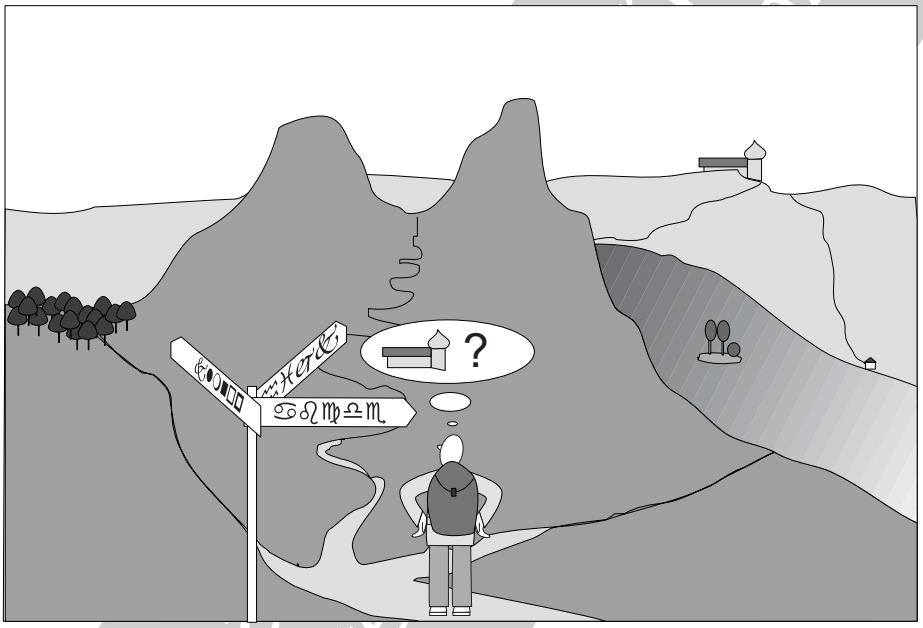
In Kapitel 15.2.1 wird versucht, die Risiken und Probleme technologischer Entwicklung genauer zu beleuchten.

Kapitel 15.2.2 gibt Hinweise zu Vorgehensweisen, die das Entwicklungsrisiko minimieren können.

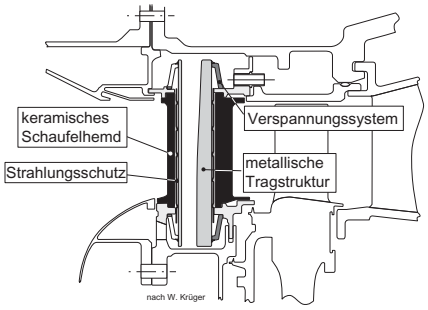
Axel Rossmann - Turbocon Consult
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Technologische Entwicklung: Der Entwicklungsprozess

Besonders schwerwiegende Fehler werden nicht selten zu Beginn eines Projekts gemacht.



Beispiel für den scheinbar schwierigen Weg



Keramischer Turbinenleitapparat in Keramik/Metall-Hybridbauweise

Beispiel für den scheinbar einfachen Weg

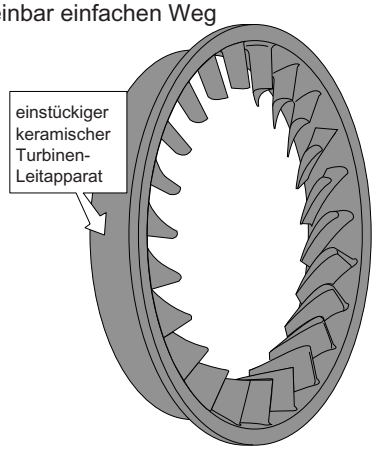


Bild 15.2-0.1

Bild 15.2-0.1: *Die Erfahrung lehrt, dass durchaus* ***nicht immer die anfangs als einfacher erscheinende Entwicklungsrichtung oder Technologie zum gewünschten Erfolg führt****. Häufig wird versucht* ***konstruktiv lösbaren Aufwand durch Werkstofftechnologie zu ersetzen****. Erst später stellt sich heraus, dass deren Realisierbarkeit auch durch eigenes Zutun nicht gewährleistet ist. Dies gilt z.B. für einen einstückigen Turbinenleitapparat aus monolithischer Keramik (Skizze unten rechts). Hier wird der Zusammenbau und die Fertigung vieler Einzelstücke vermieden, dagegen ist das Thermoermüdungsverhalten, die Krafteinleitung aus der tragenden Struktur und die Garantie der erforderlichen Festigkeitseigenschaften sehr problematisch.*
Eine Hybridversion (Sklizze unten links) vermeidet diese Probleme auf Kosten einer aufwändigeren Konstruktion.

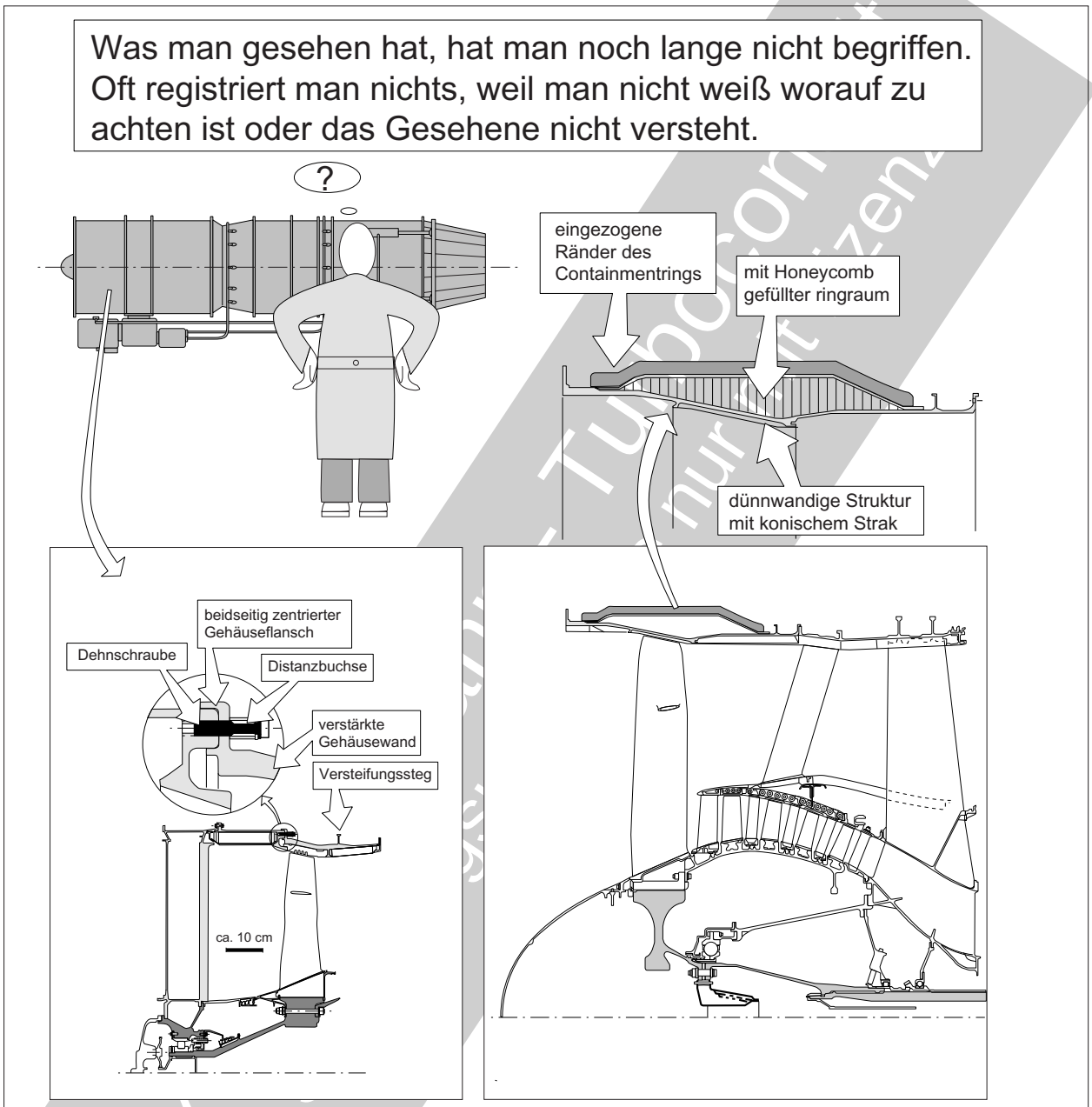
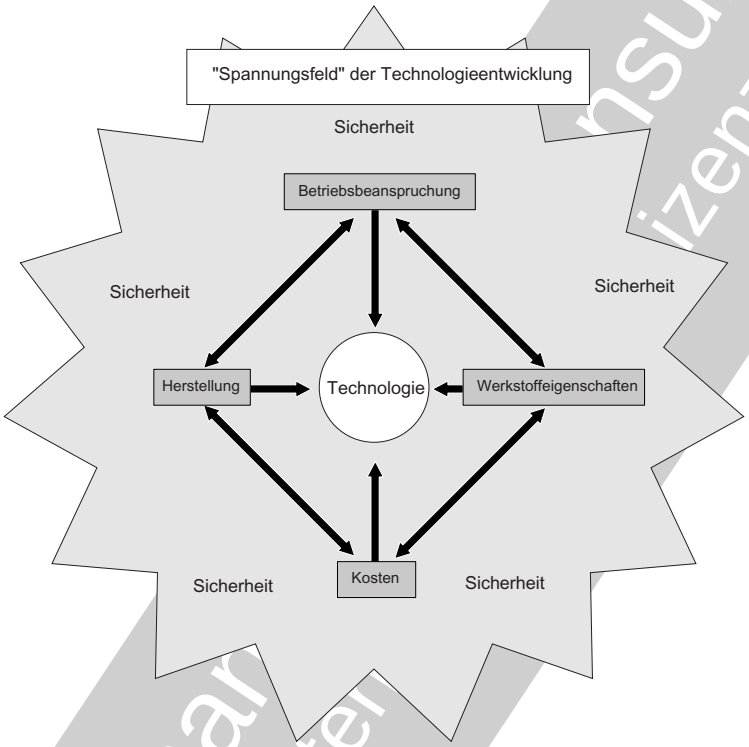


Bild 15.2-0.2

Bild 15.2-0.2: *Erst was man* ***selbst erarbeitet*** *und in ausreichend betriebsnahen Versuchen untersucht hat kann als ausreichend verstanden angesehen werden. Dies ist die Voraussetzung um* ***Risiken einer Entwicklung zur Sereienreife mit akzeptabler Sicherheit abschätzen*** *zu können.*
Die Skizze links unten zeigt unauffällige konstruktive Merkmale die ein akzeptables Containmentverhalten des Gehäuses gewährleisten (siehe Band 1, Kapitel 5.2.2, Lit. 15.2-17).
Die rechte Skizze Stellt einen Containmentring aus Aramidfaser dar. Seine besondere Form, der mit Honeycombmaterial gefüllte Ringraum zur dünnen, konisch verlaufenden Innenwand dürften für die Funktion wichtige Merkmale sein (Lit. 15.2-17).

15.2.1 Der Entwicklungsprozess



Der **Entwicklungsprozess** findet in einem Spannungsfeld statt. Er ist aufwändig und der endgültige Erfolg wird durch Risiken unsicher. Der Prozess technologischer Entwicklung umschließt die Vision oder Idee bis zum erfolgreichen Serieneinsatz. Die Überlegungen befassen sich hier im Schwerpunkt mit **Bauweisen, Werkstoff- und Herstellungstechnologien**. Diese sind erfahrungsgemäß mit den höchsten Entwicklungsrisiken (Kapitel 15.2.2) verbunden.

Ausgangspunkt soll der Stand der Technik und bekannte Entwicklungstendenzen sein (Bild 15.2-1). Um den Aufwand an Zeit und Kosten besser einschätzen zu können ist es hilfreich, sich bisherige Erfahrungen näher anzusehen. Betrachtet man technologische Entwicklungen über längere Zeiten, scheinen sich Gesetzmäßigkeiten abzuzeichnen. Antrieb in eine Entwicklungsrichtung sind die Prioritäten des Kunden. Für Kampfflugzeugtriebwerke wird beispielsweise ein möglichst **hohes Schub/Gewichtsverhältnis** angestrebt (Bild 15.2-4), für zivile Anwendung dagegen ein **niedriger spezifischer Kraftstoffverbrauch**.

Zuerst ist Grundlagenarbeit erforderlich und die Machbarkeit abzuschätzen. Dann muss der Schritt zur Serienreife getan werden. Gewöhnlich benötigen neue **„revolutionäre" Technologien** Jahrzehnte in mehrmaligen **periodischen „Anläufen"** (Bild 15.2-3). Die Entwicklung in der Serienanwendung passt sich den Forderungen des Kunden entsprechend einem typischen zeitabhängigen Verlauf an (Bild 15.2-36). Anfangs sind die Entwicklungsschritte (Reife) relativ groß. Mit steigender „Reife" der Technologien flacht die Entwicklungskurve ab.

© MTU Friedrichshafen GmbH
Nur zur internen Verwendung
Lizenz

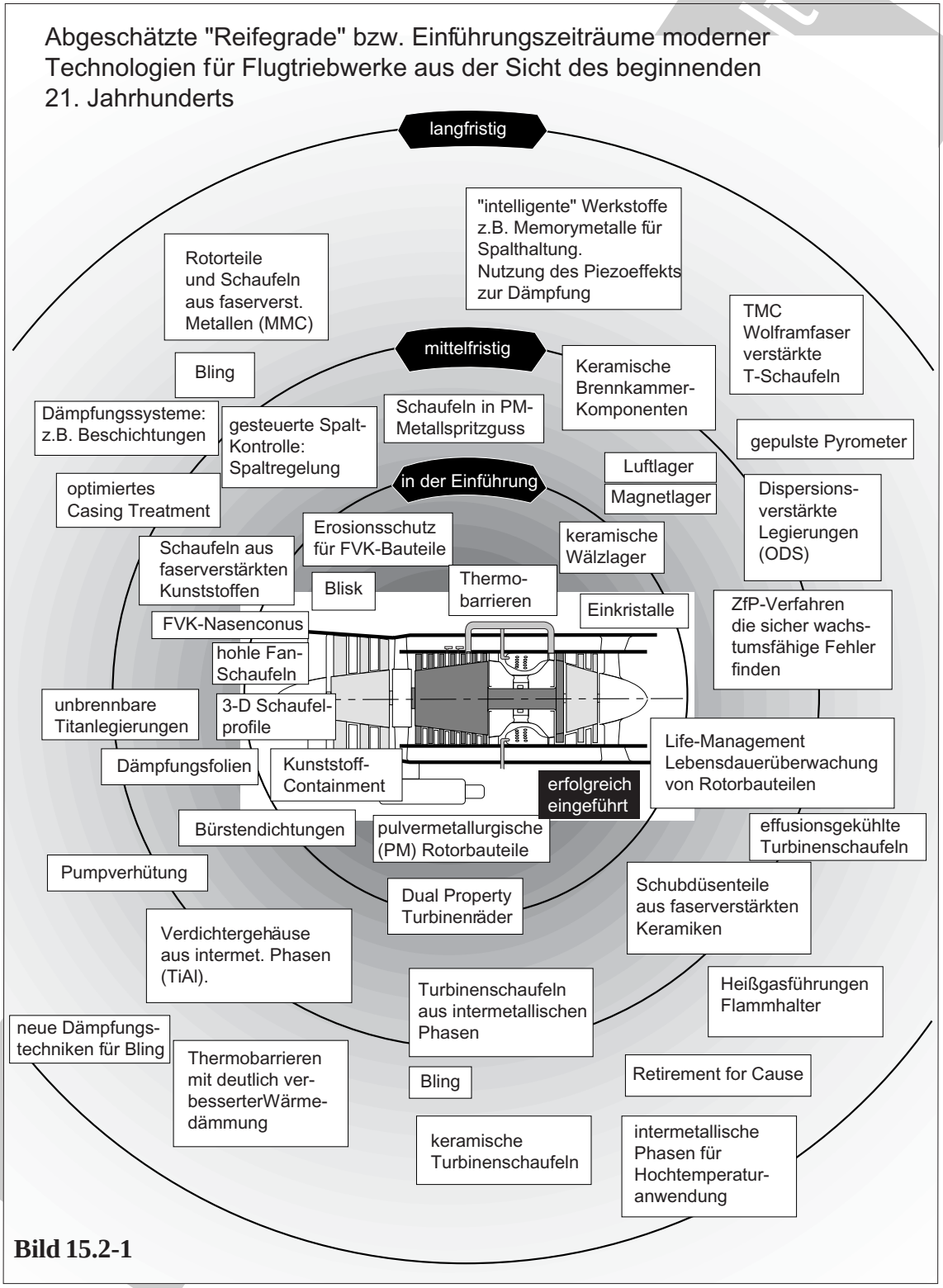


Bild 15.2-1

Bild 15.2-1: *Diese Darstellung entspricht einer* ***subjektiven Einschätzung****. Sie beruht in erster Linie auf der Verfolgung technologischer Entwicklung in Fachzeitschriften, Patenten und Konferenzbeiträgen (Lit. 15.2-1 bis Lit. 15.2-3). Zuerst ist die* ***Vielfalt der Entwicklungen*** *beeindruckend, obwohl kein Anspruch auf Vollständigkeit besteht. Es kann also keine*

Rede davon sein, 'alles wäre schon entwickelt, entscheidende Verbesserungen seien nicht mehr zu erwarten'.
Im Gegenteil werden ***neue Technologien neue Aufgaben entstehen*** *lassen. Ein Beispiel sind Blisks, die effektive und serientaugliche Dämpfungsmaßnahmen benötigen, die parallel zu entwickeln sind. Die Entwicklungen sind so konzentrisch in dem Diagramm angeordnet, dass sie etwa die zeitliche Realisierung anzeigen.* ***'In der Einführung'*** *heißt, dass der militärische Serieneinsatz erfolgt oder kurzfristig bevorsteht. '****Mittelfristig****' beschreibt einen wahrscheinlichen Einführungszeitpunkt in 5 bis 10 Jahren ab dem Jahr 2000. '****Langfristig****' dient als Begriff für einen Zeitraum von 20 Jahren bis zum Serieneinsatz.*

*B****ild 15.2-2:*** *Ein Indikator für das* ***Potenzial einer Werkstofftechnologie*** *des Triebwerksbaus sollte die Parameter Festigkeit, Temperatur und Gewicht beinhalten. Unter dieser Annahme erscheint der Verlauf der* ***spezifischen Festigkeit*** *über der Anwendungstemperatur besonders aussagefähig. Leider sind vergleichbare Angaben, die sich auf dynamische Festigkeiten wie LCF und HCF beziehen, kaum vorhanden.*
Unter ***spezifischer Festigkeit*** *versteht man eine Festigkeit wie Bruchfestigkeit bzw. Warmfestigkeit oder eine Kriechgrenze bezogen auf das spezifische Gewicht. Dabei erhält man einen Wert mit der Dimension einer Länge. Für Bruch die sog.* ***Reißlänge****. Diese Größe kann man sich als die Länge eines Drahtes aus dem jeweiligen Werkstoff vorstellen, der unter seinem Eigengewicht reißt. Dieser Kennwert ist besonders für* ***Bauteile charakteristisch, die sich mit ihrem Gewicht selbst belasten****. Es handelt sich meist um Rotorbauteile wie Schaufeln und Scheiben.*
Die angegebenen Werkstofffestigkeiten sind nur als Potenzial zu betrachten und erfordern ***Idealbedingungen****. Sie sind daher kaum im Bauteil nutzbar.*

Bei ***faserverstärkten Werkstoffen*** *bedeutet das üblicherweise einen* ***unidirektionalen Verbund*** *mit einer Belastung in Faserrichtung. Handelt es sich um Angaben zur Festigkeit der Einzelfaser, sind dies pysikalische Grenzwerte die sich kaum, auch nur näherungsweise in einem Bauteil, realisieren lassen. Komplexe Strukturen mit Querschnittssprüngen wie sie im Triebwerksbau typisch sind (z.B. ein Blisk) erfordern mehrlagige Aufbauten mit unterschiedlichen Faserorientierungen. In diesen Teilen ist die unidirektionale Festigkeit bei Weitem nicht realisierbar. Konstruktionen mit unidirektional gewickelten Faserringen kommen dem Ideal schon näher, verlieren aber wieder an Effektivität, wenn sie mit niedriger festen Werkstoffen (z.B. zur Krafteinleitung bei Hybridbauweisen) kombiniert werden müssen.*
Keramiken *erfordern zum Erreichen der Angaben eine entsprechend geringe Fehlstellengröße. Wegen der* ***Oberflächen-*** *und* ***Volumenabhängigkeit der Festigkeit*** *(Bild 15.2.3-34) ist es ein gewaltiger Unterschied, ob eine Festigkeit in kleinen Probenvolumen oder um Größenordnungen Volumen hochbelasteter Maschi nenbauteile gültig ist (Band 1, Bild 5.4.3.2-2).*
Wird der Werkstoff von den, für den Anwendungsfall typischen, ***Umgebungsbedingungen geschädigt,*** *sind die angegebenen Werte nur hypothetisch, so lange es nicht gelingt, einen geeigneten Schutz zu finden. Beispiele sind die Oxidation von C-Fasern oder die Salzkorrosion von Titanlegierungen bei Temperaturen oberhalb von 500°C (Band 1, Bild 5.6.3.1.1-7).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

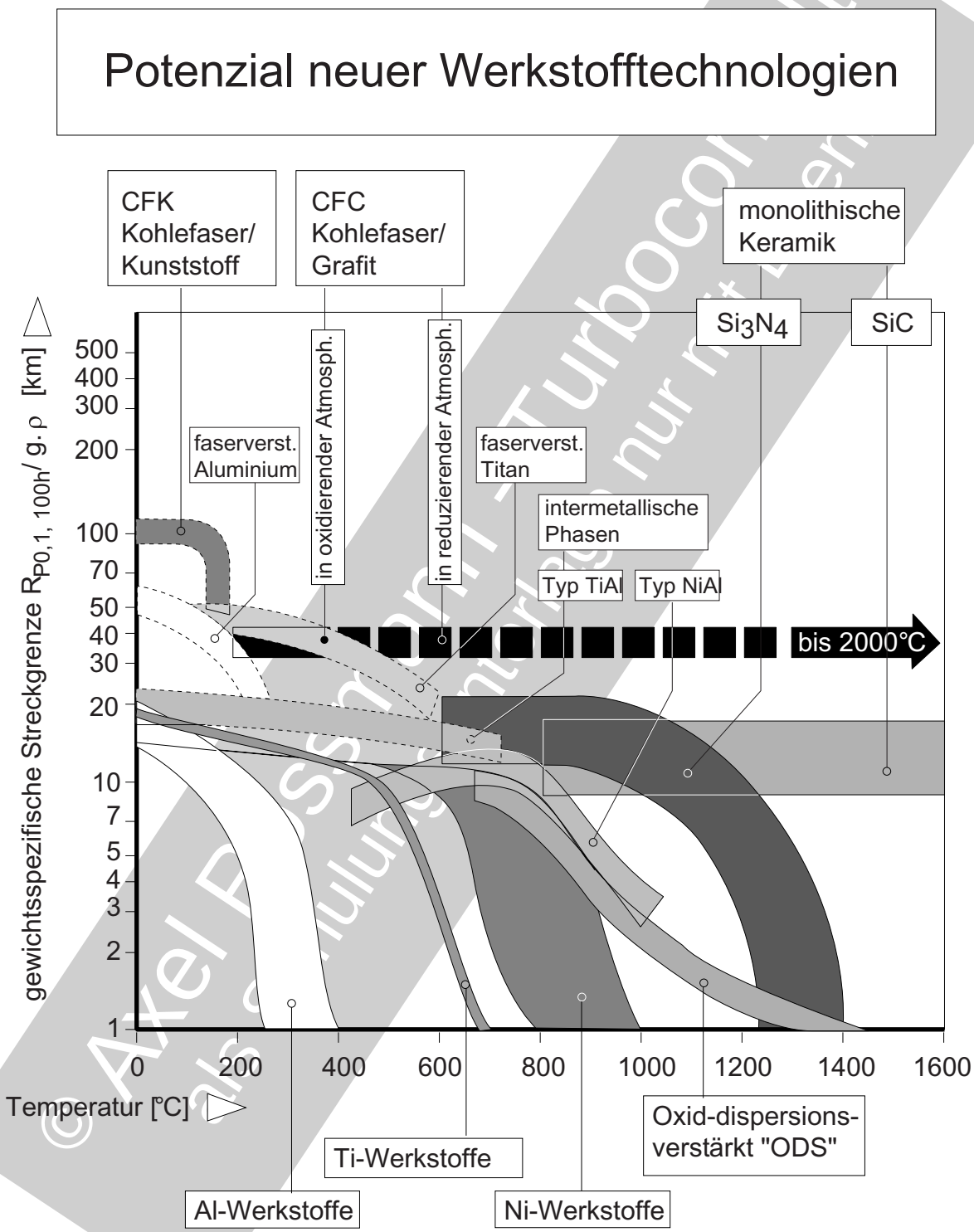
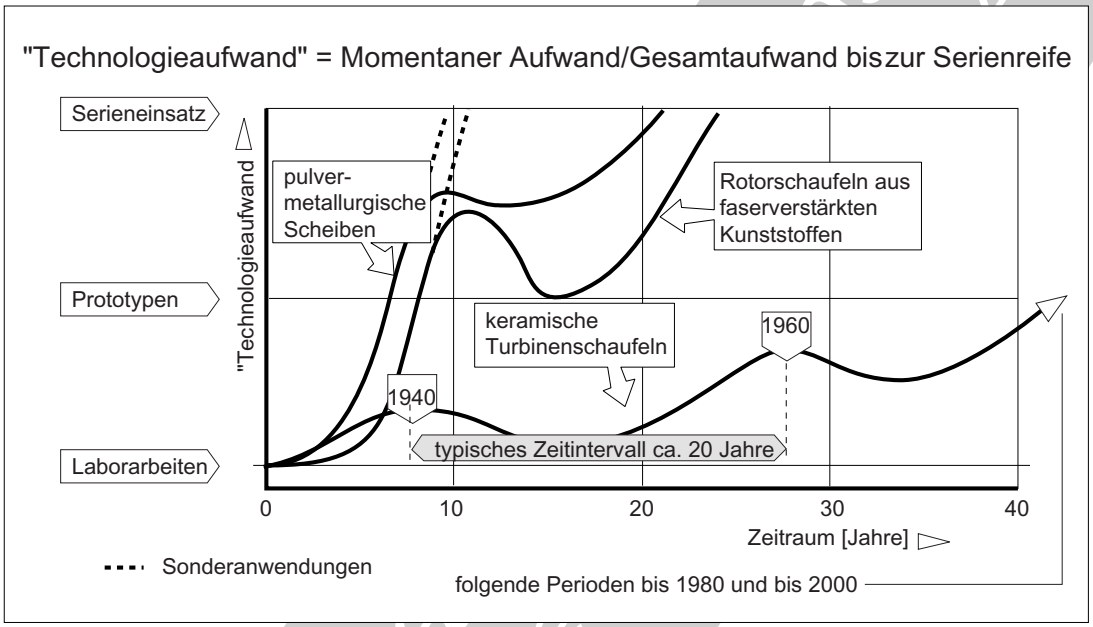


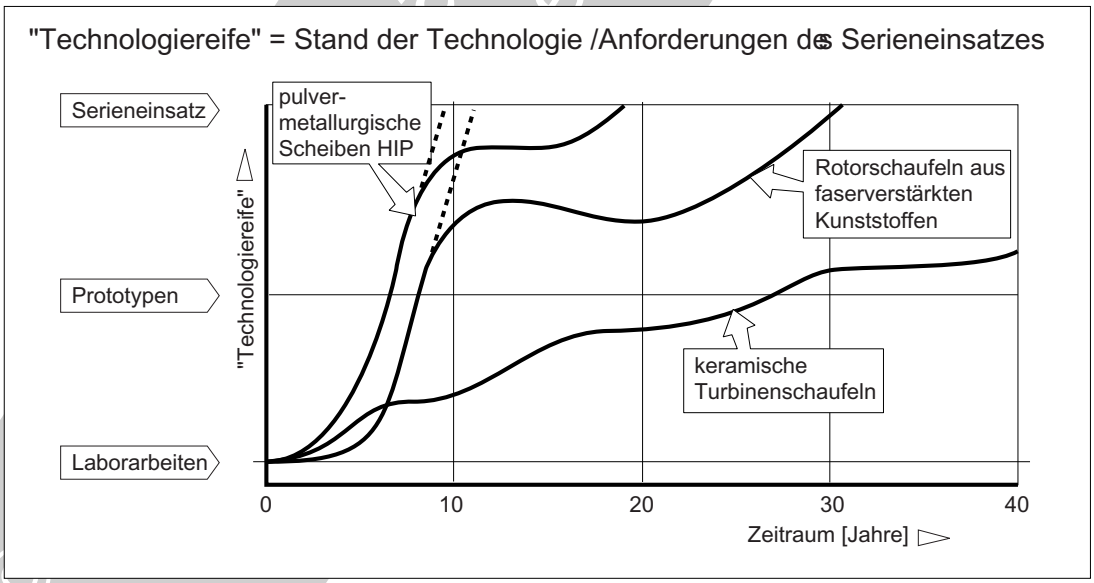
Bild 15.2-2

© Axel Rossmann - Turbocontrol
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Technologische Entwicklung: Der Entwicklungsprozess

Der akkumulierte Entwicklungsaufwand und die Technologiereife stehen in einem Zusammenhang.





Erfolgt Technologieentwicklung in mehreren Zeitperioden, die etwa einer Generation entsprechen bis sie die Serienreife erreichen?

Bild 15.2-3

Bild 15.2-3: *Die Erfahrung scheint über den* ***zeitlichen Verlauf einer Entwicklung*** *gewisse Gesetzmäßigkeiten zu zeigen. Ein Indiz ist der Technologieaufwand (Diagramm oben) und die Technologiereife (Diagramm unten). Auf der Abszisse sind Zeitintervalle, nicht ein bestimmtes Datum aufgetragen.*
Unter ***relativem Technologieaufwand*** *wird der momentane Aufwand, bezogen auf den gesamten Aufwand von der „Idee“ bis zum Serieneinsatz, verstanden.*

*Man erkennt eine unterschiedlich stark ausgeprägte **Wellenbewegung**. Das Zeitintervall zwischen den Wellenbewegungen scheint zwischen 10 und 20 Jahren zu liegen. Es darf spekuliert werden, dass ein Zusammenhang mit dem **Generationswechsel der fachlichen Entscheidungsträger** besteht. Möglicherweise verblassten die Probleme die den Serieneinsatz verhinderten und/oder neue Technologien lassen eine Lösung erwarten.*

Als Beispiele wurden pulvermetallurgische Scheiben, Rotorschaufeln aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) und Turbinenschaufeln aus hochfesten monolithischen Keramiken gewählt.

***Pulvermetallurgisch hergestellte Scheiben** sind heute in unterschiedlich nachverformter Version (engl. **HIP and forge**) im Serieneinsatz. Das Zwischenmaximum dürfte die Entwicklung der **„As HIP"- Version** (reine isostatische Verdichtung ohne Nachschmieden) markieren, die nach einem Scheibenbruch im Flugzeug (Bild 14-10) sehr skeptisch betrachtet wurde. Der erneute Anstieg des Aufwands steht mit der erfolgreichen Anwendung einer Nachverformung in Zusammenhang. In erster Linie sollte so die Wahrscheinlichkeit gefährlicher Werkstofffehler minimiert werden.*

***Fanrotorschaufeln aus faserverstärktem Kunststoff** schienen zu Beginn der 70er-Jahre dicht vor dem Serieneinsatz. Bei Abnahmeläufen der ersten Generation großer Fantriebwerke wurde jedoch das Vogelschlagverhalten als nicht akzeptabel erkannt. Es musste wieder auf Titan-Vollschaufeln übergegangen werden (Bild 15.2.3-14?). Erst in den 90er-Jahren gelang der Serieneinsatz von FVK-Fanschaufeln. Die Grenzbedingungen der Vogelschlaganforderungen (z.B. Umfangsgeschwindigkeit) waren ermittelt worden (Bild 15.2.3-26?). Mit einer entsprechenden Auslegung der Schaufeln und Optimierung der Technologie (Querverstärkungen, Schutzkante) gelang der Serieneinsatz.*

*Besonders eindrucksvoll ist die Entwicklung **monolithischer Keramik-Turbinenschaufeln**. Bereits in den frühen 40er Jahren war ein erster Höhepunkt erreicht, der jedoch weit unterhalb eines Serieneinsatzes lag. Ursache waren ungelöste Probleme im Zusammenhang mit der Sprödigkeit. Hierzu gehörte die Krafteinleitung und die niedrige Mindestfestigkeit der damals zur Verfügung stehenden keramischen Werkstoffe. Die steile Lernkurve der zum gleichen Zeitpunkt im Serieneinsatz befindlichen warmfesten metallischen Legierungen verhinderte gleichzeitig einen ausreichenden Vorteil dieser neuen Technologie.*

Ein nächstes 'Zwischenhoch' lässt sich Anfang der 60er-Jahre erkennen. Hier war die große Hoffnung ein Einsatz in Industriegasturbinen. Wieder war aus ähnlichen Gründen wie vorher ein Serieneinsatz nicht zu erreichen. Ein weiteres „Zwischenhoch" wurde in den frühen 80er-Jahren durchlaufen. Diesmal waren die deutlich verbesserten Kühlungen der Serienschaufeln auf Ni-Basis mit der entsprechend angestiegenen Gastemperatur eine zu hohe Hürde. Zur Verfügung standen Keramiken, die oberhalb 1400 °C durch Oxidation zu sehr geschädigt wurden, um die erforderlichen Festigkeiten über die nunmehr geforderten langen Laufzeiten zu garantieren. Es scheint sich nun, in der ersten Dekade des neuen Jahrhunderts, ein erneuter Aufschwung in Entwicklungsaktivitäten anzuzeigen. Diese dürften im Zusammenhang mit positiven Langzeiterfahrungen im industriellen Versuchseinsatz und der Entwicklung militärischer Kurzzeitanwendung (unbemannte Kampfflugzeuge UAV's) zu sehen sein.

***Relative Technologiereife** wird hier als erreichter Stand der Technologie relativ zur Anforderung des Serieneinsatzes verstanden. Dieser Begriff ist als Absolutwert nur äußerst subjektiv bestimmbar. So ist zunächst zu klären, welches die Messgröße(n) ist (sind). Ist dies z.B. bei einer Turbinenschaufel die von Oxidation und Gefügestabilität bestimmte maximale Einsatztemperatur oder die Warmfestigkeit?*

Als Beispiele wurden die selben wie beim Technologieaufwand gewählt. Zu erkennen ist,

© Axel Rossmann - Turbosoft
Ausbildungsunterlagen mit Lizenz

Technologische Entwicklung: Der Entwicklungsprozess

Eine Gesetzmäßigkeit die auch für die technologische Entwicklung von Flugtriebwerken gilt.

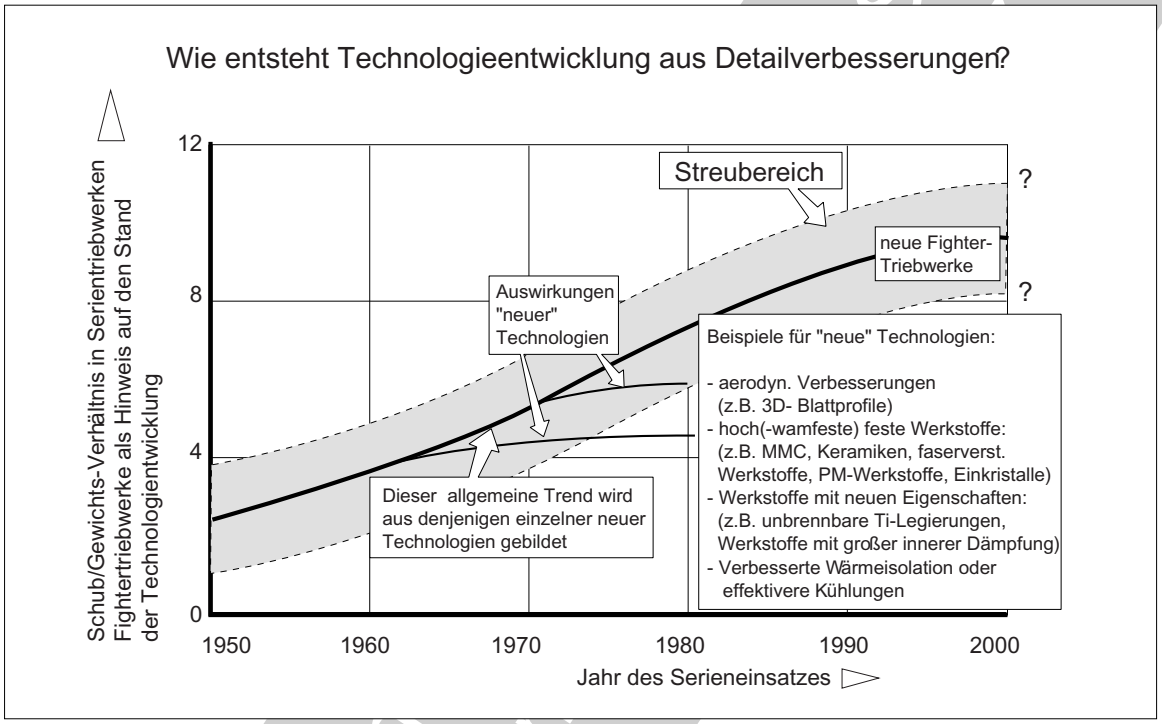


Bild 15.2-4

dass Reife und Aufwand in Phase verlaufen. Während PM-Scheiben und FVK-Fanschaufeln die Serienreife erlangt haben, scheint dies für keramische Turbinenschaufeln noch nicht in Sicht.

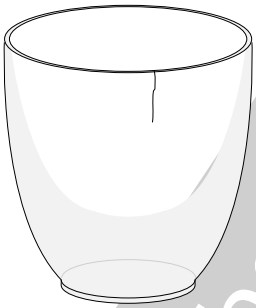
Bild 15.2-4: *die* ***Evolution einer Serientechnologie*** *folgt nach einem typischen Verlauf. Dies gilt auch für Entwicklungstrends, die sich aus der Summe und dem Zusammenwirken einzelner Technologieentwicklungen ergeben. Anfangs, in der Einführungsphase beobachtet man einen relativ flachen Kurvenverlauf, der von einer Beobachtung des Betriebsverhaltens und so dem Sammeln von Erfahrung geprägt ist. Dann beschleunigt sich der Fortschritt. Dies kann mit einer allgemeinen Akzeptanz der Technologie und einem entsprechend größeren* ***Aufwand für weitere Verbesserungen*** *erklärt werden. Am Ende eines Trends flacht sich die Kurve wieder ab. Die Technologien sind weitgehend ausgereizt, weitere Fortschritte erfordern einen stark ansteigenden Aufwand.*

Als Beispiel dient hier der, vom Wunsch nach hohem Schub/Gewichts-Verhältnis geprägte, Trend für Kampfflugzeugtriebwerke (Lit. 15.2-18).

© Axel Rossmann
als Schulmaterial

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

15.2.2 Risiken und Probleme technologischer Entwicklung



©Ayer Rossmann - Turboconsult
Nur mit Lizenz

Zuerst stellt sich die Frage nach dem **Unterlassungsrisiko**. Als Beispiel sei eine Meldung in Fachkreisen angeführt. Einem Mitbewerber sei es gelungen, Wärmedämmschichten zur Einsatzreife zu bringen, die eine deutlich bessere Isolierwirkung aufweisen als die bisherigen im Serieneinsatz (Lit 15.2-29). Eine solche Entwicklung bedeutet höhere Gastemperaturen mit Vorteilen in Kraftstoffverbrauch und Leistungskonzentration. Sie kann aber auch in höherer Lebensdauer und damit niedrigeren Betriebskosten genutzt werden. Diese entscheidenden Verkaufsargumente könnten bedeuten, dass nur dieser Anbieter in Zukunft den Markt konkurrenzlos beherrscht. Also kann die Minimierung des Entwicklungsaufwands dem der eine solche Technologie nicht besitzt, letztendlich teuer zu stehen kommen, ja die eigene Existenz gefährden. **Risiken der Unterlassung und der Entwicklung sind also gegeneinander abzuwägen**.

Technologische Entwicklung ist typischerweise von hohen Risiken geprägt. Dabei beeinflussen sich unterschiedliche Risiken. Das Entwicklungsziel kann nicht erreicht werden und/oder der Aufwand ist zu hoch (Zeit, Kosten, Ressourcen). Als Beispiel kann Glas dienen. Es gilt allgemein als absolut korrosionsfest gegenüber der Umgebungsatmosphäre. Diese Annahme kann sich unter bestimmten Einflüssen, die in der technischen Anwendung nicht immer auszuschließen sind, als trügerisch herausstellen. Steht Glas unter ausreichend hohen Zugspannungen (z.B. Eigenspannungen) und weist es eine Kerbe (kleiner Kratzer, Schlagstelle) auf, kann die normale Luftfeuchtigkeit unterkritisches Risswachstum (Spannungsrisskorrosion) auslösen. In manchen Fällen wie einer Windschutzscheibe mit Steinschlag oder einem angeschlagenen Trinkglas, lässt sich ein solches Risswachstum über Tage und Wochen beobachten bis eine kritische Risslänge erreicht wird und das Glas zerspringt.

Wird eine aufwändige Entwicklung an einem Bauteil aus Glas vorgenommen und ist dieser Effekt nicht bekannt bzw. bewusst, besteht ein hohes potenzielles Entwicklungsrisiko. Steht das Glasbauteil unter hohen Zugbeanspruchungen und ist beschädigungsgefährdet, besteht die Gefahr, dass das Problem der Rissbildung erst in der Serie erkannt wird. Selbst wenn eine Abhilfe gelingt, kann der zusätzliche Aufwand und die Gewinnausfälle die Existenz eines Unternehmens bedrohen.

Die größte Gefahr besteht in einem „**Show Stopper**“ (Bild 15.2-5). In diesem Fall erkennt man erst nachdem bereits ein beträchtlicher Aufwand geleistert wurde, dass ein Naturgesetz die Realisierung unmöglich macht.

Je weiter ein Entwicklungsprozess fortgeschritten ist und/oder je länger sich ein System bereits im Einsatz bewährt hat, um so schwieriger und aufwändiger ist es, hier eine neue serienreife Technologie einzuführen. **Evolutionäre Verbesserungen** sind nur noch in kleinen Schritten zu erwarten (Bild 15.2-4). **Revolutionären Verbesserungen** stehen gewöhnlich die hohen, bereits erreichten Anforderungen an Betriebssicherheit und Lebensdauer entgegen.

Das Entwicklungsrisiko steigt mit den **Anforderungen moderner Triebwerke**. Hierzu gehört die Nutzung immer festerer Werkstoffe und die steigende Auslastung des Festigkeitspotenzials (Bild 15.2- 6 und Bild 15.2-7). Auch die sehr langen garantierten Laufzeiten sind ein großer Risikofaktor für eine Entwick-

lung. Hohe Gastemperaturen, die deutlich über dem Schmelzpunkt der derzeit in der Serienanwendung stehenden Werkstoffe liegen, höchste Wirkungsgrade und Stufendruckverhältnisse in Verdichter und Turbine sind eine wachsende technologische Herausforderung.

Neue Technologien haben meist **spezifische Schadensmechanismen** und Schwachstellen. Diese stellen sich manchmal erst in der Serie mit der großen Zahl und der Akkumulation langer Betriebszeiten heraus (Bild 15.2-9). So ist es möglich, dass erst spät erkannt wird, wenn Verbesserungen gegenüber der bisherigen Technologie von Verschlechterungen der neuen Technologie kompensiert werden.

Ist eine **Technologie durch einen spektakulären Schaden bzw. Unfall in Misskredit geraten,** hat ein erneuter Anlauf wahrscheinlich erst in der nächsten Fachgeneration (Bild 14-3) wieder Aussicht auf Erfolg (Bild 15.2-10 und Bild 15.2-14). Dieses Problem besteht auch zu Beginn einer Entwicklung, wenn in **vereinfachten Versuchen** das Potenzial einer Technologie demonstriert werden soll (Bild 15.2-20). So kann z.B. ein Berstschleuderversuch, der definitionsgemäß den Bruch des Bauteils zum Ziel hat, selbst bei Erfüllung aller Erwartungen, von Entscheidungsträgern ohne ausreichendes fachliches Verständnis als Misserfolg gedeutet werden und zum Abbruch der Entwicklung führen.

Diese Probleme können dazu führen, dass wichtige absichernde Versuche im Vorfeld einer technologischen Entwicklung unterbleiben und so das Entwicklungsrisiko unkontrollierbar wächst. Dagegen kann es zu reinen „**Show-Versuchen**“ kommen, die wenig über das tatsächlich erforderliche und nutzbare Potenzial aussagen sondern lediglich den Entscheidungsprozess ‘günstig’ entsprechend einer subjektiven Interessenlage beeinflussen sollen.

Ein besonderes Problem tritt dann auf, wenn zwar eine Technologie ein großes Verbesserungspotenzial hat, dafür aber die erforderlichen besonderen Eigenschaften erst mit Hilfe angepasster Konstruktionsprinzipien nutzbar gemacht werden können. Typisches Beispiel ist der optimale Einsatz von Faserwerkstoffen wie FVK (Bild 15-7, Bild 15.2-25 und Bild 15.2-26, Band 1 Bild 3-11, Bild 3-12; Band 3, Kapitel 12.2.1.10).

Nicht zuletzt sind auch **menschliche Probleme** mit technologischer Entwicklung untrennbar verbunden. Das **notwendige große Engagement** für die Sache und den Erfolg, damit zusammenhängendes Prestige und Kostenverantwortung sowie eine gewisse Abhängigkeit der eigenen Existenz, können die notwendige Kritikfähigkeit beeinträchtigen. Ein rechtzeitiger Abbruch einer technologischen Fehlentwicklung kann so verpasst werden. Besteht dann noch eine, wenn auch nur theoretische Erfolgschance, indem auf rechtzeitige Entwicklungen im Umfeld gehofft wird (Bild 15.2-21), ist die Situation gegeben, dass ein „Weg ohne Umkehr“ bis zum „bitteren Ende“ beschritten wird.

Die **„Wiedereinführung“ von Technologien** früher Maschinentypen ermöglicht nur scheinbar auf sofort nutzbare Erfahrung mit geringem Risiko zurückzugreifen. So sind aerodynamisch, thermodynamisch und mechanisch hochbelastete Komponenten moderner Triebwerke meist, zumindest ohne Adaption, nicht mit „alten Technologien“ realisierbar. Beispielsweise kann die Verwendung hochfester Al-Legierungen (Bild 15.2-15) daran scheitern, dass sich die scharfkantigen dünnen Profile moderner Verdichter nicht realisieren, oder die gegenüber früheren Verdichtern deutlich stärkeren Schwingungsanregungen nicht beherrschen lassen. In jedem Fall wird man möglicherweise neu zu erarbeitende frühere Konstruktionsprinzipien benötigen. Bei Al-Schaufeln kann dies die Rollbolzenbefestigung des Fußes und das Einkleben der Leitschaufeln mit dämpfendem Silikongummi, zur Minimierung von Schwingungen, sein.

Technologien die auch eine **Halbzeugentwicklung** einschließen können dazu verleiten, dass der Maschinenhersteller seine eigentliche Aufgabe, die Herstellung eines Serienbauteiles aus den Augen verliert und der Schwerpunkt sich stattdessen auf die **Grundlagen- und Rohteilentwicklung** verlagert. Dies ist aber die Aufgabe der Zulieferer, was für Guss- und Schmiedeteile besonders einsichtig ist.Typische Beispiele sind Bauteile aus hochfester Keramik oder fasertechnischen Werkstoffen. Es kann sogar vorkommen, dass der Entwicklungsschwerpunkt sich auf Technologien wie die Faserherstellung verlagert.

© MTU Aero Engines AG, Munich
Alle Rechte vorbehalten

Dies geschieht, weil es offenbar einer Neigung des Wissenschaftlers nachkommt. Die eigentliche Aufgabe des OEM, Technologie - und Bauteilerprobung, ist dagegen 'unangenehmer'. Eine Erfolgskontrolle ist nachprüfbar sicherheitsrelevant und läuft unter besonderen, meist gut überprüfbaren Zeit- und Kostenvorgaben ab. Damit ist motivierende Kreativität eher eingeengt.

Abschließend sei noch auf ein besonderes Problem hingewiesen. Entscheidend für einen Erfolg kann die **Auswahl der, bzw. Investition in die Mitarbeiter** sein . Abhängig von deren Neigungen und Ausbildung wird der Verlauf der Entwicklung bestimmt. Von Ingenieuren und Technikern ist z.B. eine **anwendungsbetonte Entwicklung** mit einem Schwerpunkt in der Erprobung realer Bauteile zu erwarten. Wissenschaftler neigen dagegen eher zu **grundlagenorientierter Arbeit** wie Werkstoffentwicklung und Verfahrenstechnik. Diese ist gewöhnlich an Laborproben und nicht an Bauteilen orientiert. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch die Führung eines Entwicklungsprojekts.

Bild 15.2-5: *Von einem „**Show-Stopper**" spricht man, wenn sich bei einem, für eine Technologie unbedingt erforderlichen Merkmal bzw. einer Eigenschaft, im Laufe der Entwicklung herausstellt, dass ihm ein Naturgesetz entgegensteht. Falls lediglich technische Schwierigkeiten zum Scheitern führen, besteht die Chance, zu einem späteren Zeitpunkt wenn der technische Fortschritt die Randbedingugen verbessert hat die Entwicklung wieder aufzunehmen (Bild 15.2-3). Auch eine geänderte Sicherheitsphilosophie kann einen erneuten Versuch rechtfertigen solange nur technisch lösbare Probleme vorliegen. Typisches historisches Beispiel ist ein „Perpetuum mobile". Oft ist schwer erkennbar wo und wie der Energieerhaltungssatz verletzt ist. Erst nach umfangreichen Versuchen mit teuren Aufbauten wurden solche Irrtümer erkannt. Außenstehende haben erfahrungsgemäß eher eine Chance das Problem zu erkennen. In manchen Fällen wurden die Einwände aber nie von den engagierten Entwicklern akzeptiert. In einem solchen Fall können Kosten ohne Ende die Folge sein.*

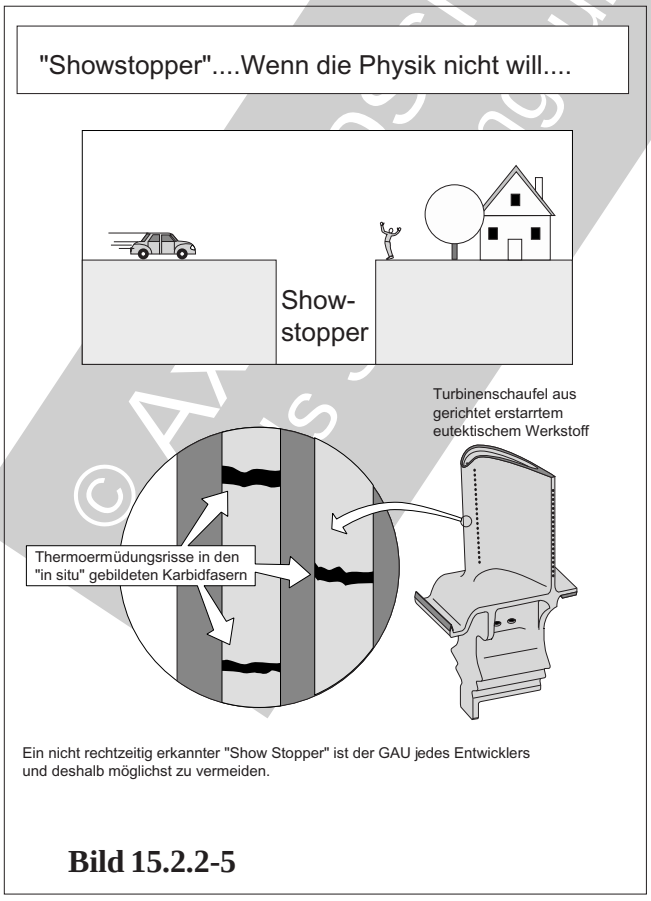


Bild 15.2.2-5

*Auch in der Triebwerkstechnik wurden Entwicklungen bekannt, die unter den **damaligen Voraussetzungen** zum Scheitern verurteilt waren. Hierzu gehören:*

- *Fan-**Rotorschaufeln aus FVK**.(Bild 15.2-14)*
- ***C-Faser verstärkte Keramiken** für Heißteile von Ziviltriebwerken.*
- *Turbinenschaufeln aus mit **Wolframdraht verstärkten Nickellegierungen**.*
- ***Cr-Basis-Legierungen** (N-Versprödung?)*
- ***Niob-Basis-Legierungen** (Oxidation?)*
- ***Effusionsgekühlte Turbinenschaufeln** (Bild 15.2-16)*
- *Turbinenschaufeln aus **gerichtet erstarrten eutektischen Werkstoffen** mit 'in situ' gebildeten Keramikfasern. In diesem, im Bild dargestellten Fall, zeigten betriebsnahe Versuche, dass die Wärmedehnungsunterschiede zwischen Matrix und Keramikfaser nach wenigen Thermowechseln zum Bruch der Fasern führte.*

© AXA Versicherungen - Turbosuisse Ausbildungsunterlagen zum Urkatz

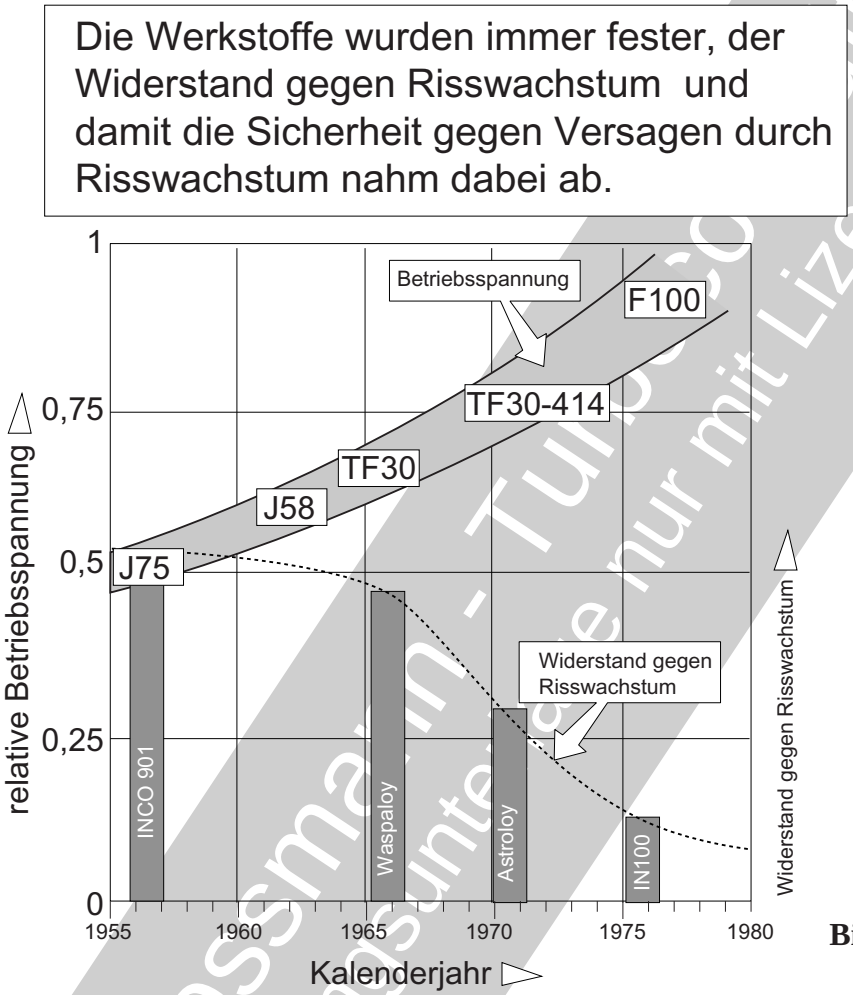

Die Werkstoffe wurden immer fester, der Widerstand gegen Risswachstum und damit die Sicherheit gegen Versagen durch Risswachstum nahm dabei ab.

Bild 15.2-6

Damit war der Verstärkungseffekt verloren. Interessant ist, dass in der mehrjährigen „wissenschaftlichen“ Entwicklungsphase dieser Werkstoffe das Problem in seiner Tragweite offenbar nicht erkannt oder nicht veröffentlicht wurde. Das Problem wurde den Anwendern erst recht spät bewusst, als sie bereits Prototypen-Bauteile herstellten. Nicht zu vernachlässigen war wohl auch die menschliche Problematik für alle diejenigen, deren Existenz von diesen Projekten abhing.

Bild 15.2-6 *(Lit 15.2-4): Obwohl dieses Bild auf älteren Literaturangaben beruht, zeigt es deutlich zwei Tendenzen, die einen* ***ansteigenden Trend der Versagensrisiken*** *an Rotorbauteilen für Kampfflugzeugtriebwerke erkennen lässt. Es handelt sich einmal um* ***steigende Spannungen****. Diese sind auf höhere Drehzahlen (höhere Verdichterleistung) bei weiterer Gewichtsreduzierung zurückzuführen. Die zur Realisierung der Anforderungen notwendigen festeren Scheibenwerkstoffe zeigen einen* ***abnehmenden Widerstand gegen Rissfortschritt*** *(Gefüge,Bild 15.2-8 und Band 1, Bild 4.3-9). Ein hoher Widerstand gegen Rissfortschritt ist jedoch wünschenswert, um bei den hohen LCF-Beanspruchungen auch eine eventuelle Rissfortschrittsphase sicher beherrschen zu können. Erschwerend kommt hinzu, dass der Rissfortschritt bei steigendem Zugspannungsniveau schneller wird (Band 1, Bild 4.3-3). Zusätzlich führt ein höheres Spannungsniveau dazu, dass* ***kleinere Fehler wachstumsfähig*** *werden. Obwohl es sich um eine evolutionäre Entwicklung handelt, steigt so das Risiko eher an. Entsprechend aufwändig ist die Qualitätssicherung, um das steigende Risiko zu kompensieren.*

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

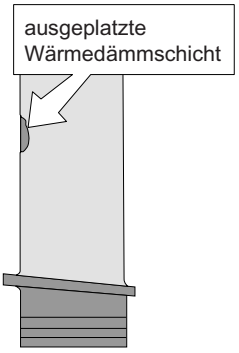
Technologische Entwicklung: Risiken und Probleme

Es ist ein großer Unterschied, ob man eine Technologie für die zusätzliche Sicherheit einsetzt oder die Technologie in die Auslegung einbezieht.

Turbinenrotorschaufel mit **Wärmedämmschicht**:

zusätzliche Sicherheit: bei Beschädigung der Schicht bleibt ausreichend Zeit für geeignete Maßnahmen. Die garantierte Lebensdauer wird trotzdem erreicht.

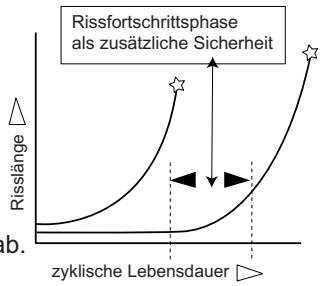
Auslegung: Bei Beschädigung ist mit nicht abzufangendem Versagen des Bauteils zu rechnen.



Rissfortschrittsphase in der Lebensdauer einer Rotorscheibe:

zusätzliche Sicherheit: Bei wachstumsfähigen Fehlern Sicherhet gegen Bruch während eines Überholintervalls

Auslegung: Sicherheit hängt von der richtig "eingeschätzten" Rissfortschrittsphase ab.



Kugelstrahlen einer Rotorscheibe:

zusätzliche Sicherheit: unempfindlicher gegen Oberflächenbeschädigungen (z.B. "handling")

Auslegung: Sicherheit hängt von der in allen kritischen Bereichen auslegungsgemäß wirksamen Kugelstrahlbehandlung ab.

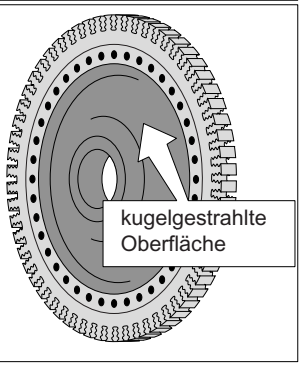


Bild 15.2-7

Bild 15.2-7: *Für das Entwicklungsrisiko ist es von großer Bedeutung, ob eine Technologie lediglich die* ***Sicherheit eines Bauteils erhöhen oder dessen Belastungsfähigkeit steigern soll****. Im ersten Fall wirkt die Technologie sicherheitserhöhend, im anderen Fall eher risikoerhöhend. Typische Beispiele der Triebwerkstechnik sind Wärmedämmschichten, die Einbeziehung der Rissfortschrittsphase und Kugelstrahlen. In allen Fällen wurde über Jahre das Verfahren zur* ***Sicherheitserhöhung*** *angewendet und erst nach evolutionärer Verbesserung in der* ***Bauteilauslegung*** *genutzt.*

Trend des Einsatzes von Werkstoffen

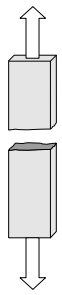
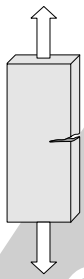
symbolische Bauteilbelastung	Auslegung und Beanspruchung	Werkstoffeigenschaften	Versagensverhalten
	Lebensdauer begrenzte Bauteile - niedrige Sicherheitsfaktoren - hohes Belastungsniveau	Hochfester, wenig duktiler bis spröder Werkstoff, sehr empfindlich gegen Risskorrosionsformen und Kerben (z.B. Werkstoff-inhomogenitäten und fertigungsbedingte Schwachstellen)	Versagen bei Auslegungsbeanspruchung - statisch: unwahrscheinlich wenn keine unvorhergesehenen Zusatz-effekte (z.B. spröde Schichten) und das relevante Werkstoffverhalten voll verstanden ist. - dynamisch: erhöhtes Risiko, da kleine schädigende Einflüsse durch Risswachstum gefährlich werden können. Kerbempfindlich - ungünstige bruchmechanische Eigenschaften (Anrissfehlergröße, Rissfortschritt, kritische Risslänge) bei Überlast: - Spontanes Versagen mit weitgehend sprödem Gewaltbruch. Sehr kleine kritische Risslänge. "Abfangen" eines katastrophalen Schadens unwahrscheinlich.
		Entwicklungstendenz	
	Lebensdauer begrenzte Bauteile - mittlere Sicherheitsfaktoren - mittleres Belastungsniveau	Duktiler Werkstoff mit kleinem Streckgrenzenverhältnis. steigende Empfindlichkeit für Risskorrosionsformen und Kerben (z.B. Werkstoffinhomogenitäten und fertigungsbedingte Schwachstellen)	Versagen bei Auslegungsbeanspruchung - statisch: unwahrscheinlich - dynamisch: unwahrscheinlich innerhalb der "sicheren" Lebendauer gegebenenfalls Rissbildung und Risswachstum - akzeptabel bruchmechanische Eigenschaften bei Überlast: -Zäher Gewaltbruch mit geringer plastischer Verformung Abfangen eines Schadens weniger wahrscheinlich, weil kleinere plastische Verformungen und kleine kritische Risslängen sich nach außen kaum bemerkbar machen.
		Entwicklungstendenz	
	Überdimensionierte Bauteile - hohe Sicherheitsfaktoren - niedriges Belastungsniveau	Duktiler Werkstoff mit hohem Streckgrenzenverhältnis. relativ unempfindlich gegen Risskorrosionsformen und Kerben. Stähle korrosionsempfindlich	Versagen bei Auslegungsbeanspruchung - statisch: auszuschließen - dynamisch: unwahrscheinlich wenn unter der Dauerfestigkeit beansprucht - günstige bruchmechanische Eigenschaften bei Überlast: -Zäher Gewaltbruch mit großer plastischer Verformung Chance eines "Abfangens" eines katastrophalen Schadens (Unwuchten, Anstreifen) oder einer Schadens-begrenzung (z.B. Ausschaufeln)

Bild 15.2-8

Bild 145.2-8 *(dieses Bild findet sich auch in Band 1 als Bild 4.1-1)* ***:*** *Der Trend zu* ***steigenden, möglichst weit ausgelasteten Werkstoff-festigkeiten führt in der Tendenz zu einem potenziell risikoreicherem Verhalten der Komponenten*** *(Bild 15.2-6). Diese Tendenz kann nur mit erhöhtem Qualitätssicherungs-aufwand, besserer analytischer Beherrschung aller relevanten Beanspruchungen, Damage-Toleranz-Konzepten (Beispiel 15.2-1) und umfangreicher betriebsnaher Erprobung ausgeglichen werden.*

© Axel Rossmann - Tuboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Technologische Entwicklung: Risiken und Probleme

Risiken für die Bauteilsicherheit sind von drei Hauptfaktoren beeinflusst:

- Auslegung bzw. Beanspruchung
- Werkstoffeigenschaften
- Versagensverhalten

Auslegung und Beanspruchung: *Mit der Festigkeit stiegen die auslegungsgemäßen Betriebsspannungen. Damit stieg die Rissfortschrittsgeschwindigkeit, das Risswachstum erfolgte bereits bei kleineren Initialfehlern und der Restbruch trat bei kleineren kritischen Risslängen auf (Band 1, Bild 4.3-3). Die Folgen zeigen einige typische Beispiele:*
Kleine Werkstoffschwachstellen werden zu lebensdauerbeeinflussenden Fehlern. Anforderungen an seriengeeignete ZfP-Methoden steigen. Fertigungsprozesse müssen genauer festgeschrieben und kontrolliert werden. Beschädigungen wie Kratzer sind bei Wartungs- und Montagearbeiten noch weniger tolerierbar.
Hohe Mittelspannungen verringern die ertragbaren Spannungsausschläge und vergrößern so die Gefahr von Ermüdungsschäden.

*- **Werkstoffeigenschaften und Versagensverhalten**: Das **Streckgrenzenverhältnis** ist das Verhältnis Bruchfestigkeit zu Streckgrenze.Mit steigender Belastung kamen Werkstoffvarianten mit höherer Streckgrenze bei ähnlicher Bruchfestigkeit zum Einsatz. Das Streckgrenzenverhältnis reduzierte sich.*
*Je größer der Abstand der Streckgrenze von der Bruchfestigkeit, um so eher zeigt sich eine **plastische Verformung vor dem endgültigen Versagen (Bruch)** an. **Warnungen** wie starke Unwuchten lassen sich so sicherer rechtzeitig erkennen.*
*Verringert sich mit steigender Festigkeit die Bruchdehnung, wird der Werkstoff spröder. Dies ist bei einer Festigkeitsmaximierung zu erwarten. Kerbspannungen können dann weniger leicht ohne Schädigung durch plastisches Fließen abgebaut werden. Bei Heißteilwerkstoffen steigt mit der Warmfestigkeit die Möglichkeit hoher **Eigenspannungen.** Einem Spannungsabbau sind von einer hohen Kriechfestigkeit enge Grenzen gesetzt. Die höhere Eigenspannung wirkt als Mittelspannung und senkt die zyklische Belastbarkeit ab (Bild 15.2-9). Überlast kann bereits bei dünneren Querschnitten und niedriger **kritischer Risszähigkeit** zu **Sprödbrüchen** führen (Band 1, Bild 5.2.1-5).*
*Mit höheren Festigkeiten nimmt gewöhnlich die Empfindlichkeit eines Werkstoffs für **Umgebungseinflüsse** zu. Es handelt sich um **rissbildende und das Risswachstum fördernde Korrosionsarten** (Band 1, Kapitel 5.6.3).*
*Geht die Anhebung der Werkstofffestigkeit und damit die Belastung mit kleineren **Korngrößen einher** (z.B. pulvermetallurgische Werkstoffe), können sich die ungünstigen bruchmechanischen Kennwerte zusätzlich risikoerhöhend auswirken. Beispielsweise kann die Rissfortschrittsgeschwindigkeit ansteigen (Band 1, Bild 4.3-9; Beispiel 14-1, Zitat 5) und die Bruchzähigkeit abfallen. Dies führt wie eine Spannungserhöhung zu kleineren rissfortschrittsfähigen Fehlern und kleineren kritischen Rissgrößen.*
*Kleine Korngrößen können den Vorteil einer besseren **Ultraschallprüfung** haben (kleinere Störungen, „**Gras**“). Bauteile aus gleichem Werkstoff jedoch konventionell durch gießen und schmieden hergestellt, können größere Körner als die pulvermetallische Variante aufweisen. Dies kann eine deutlich schlechtere Ultraschallprüfung bedingen. So entsteht eine höhere Wahrscheinlichkeit größerer Fehler was die **Festigkeitsausnutzung** verschlechtert.*

© Axel Bossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 15.2-9

Bild 15.2-9: *Hohe* ***Warmfestigkeiten*** *können die nutzbare Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils auch auf eine unerwartete Weise entscheidend reduzieren. Die hohe Warmfestigkeit und die Gefügebeeinflussung lässt es manchmal nicht zu,* ***Eigenspannungen aus dem Schmiedeprozess*** *(Band 3, Bild 11.2.2-1)* ***und/oder Wärmebehandlungen*** *so weit durch nachträgliche Glühbehandlungen abzubauen, dass die Mittelspannungserhöhung vernachlässigbar ist (Diagramm oben). Je* ***dicker die Querschnitte,*** *mit um so höheren Eigenspannungen ist zu rechnen. Durch die Eigenspannungen können Bauteilzonen lebensdauerbestimmend belastet werden, von denen man dies nicht erwartet hätte (Band 3, Bild 11.2.2.1-9). Stehen größere Querschnitte bzw. Volumen in einer Scheibe unter hohen Zugspannungen, nimmt auch die* ***Wahrscheinlichkeit rissfortschrittsfähiger Fehlstellen*** *zu und damit die nutzbare Festigkeit ab (Band 1, Bild 4.3-12 und Bild 4.3-18).*

©Axel Rossmann Ingenieurbüro Ausbildungsunterlagen mit Lizenz

Technologische Entwicklung: Risiken und Probleme

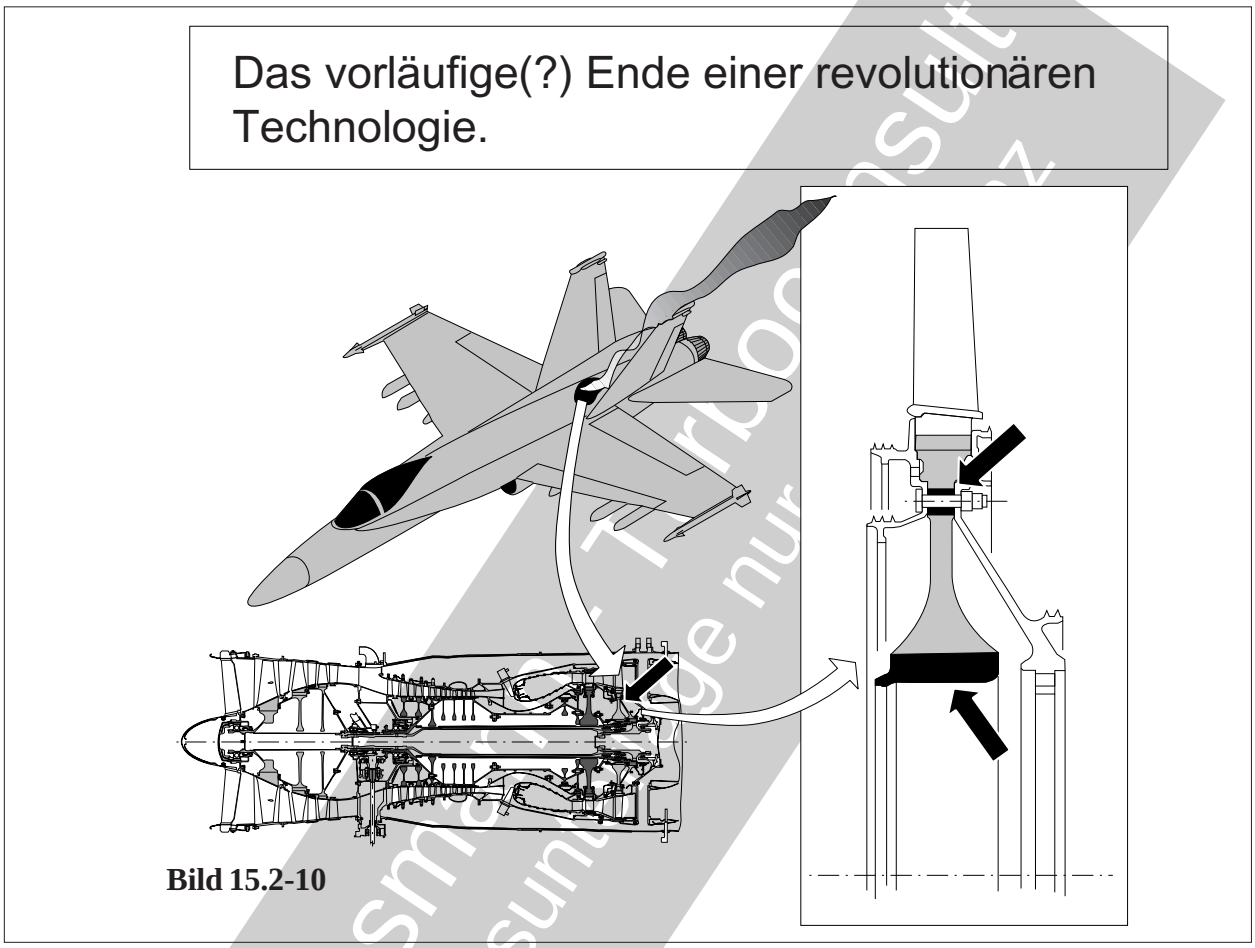


Bild 15.2-10

Bild 15.2-10 *(Beispiel 14-1): Dieser Fall kann als beispielhaft für die Risiken der Einführung neuer Technologien in hochbeanspruchten Serienkomponenten gelten. Der dargestellte Fighter befand sich in der Erprobung. Es kam zum* ***Bruch der ND-Turbinenscheibe*** *und nachfolgendem Absturz. Wahrscheinliche Schadensursache war ein* ***LCF-Bruch,*** *der von einem kritisch hoch beanspruchten Bereich ausging (Pfeile im Detail rechts). Der Triebwerkstyp war in seiner Leistung deutlich verbessert worden. Die wegen der* ***Einstufigkeit*** *hochbeanspruchte Niederdruckturbine erhielt eine Scheibe aus besonders festem („****ultra-high tensile strength****", Lit 15.2-7) Werkstoff. Es handelte sich um einen pulvermetallurgischen Werkstoff in der* ***„as HIP"-Version****, d.h. nicht nachgeschmiedet. Diesen Werkstoff zeichnet sehr feines gleichmäßiges Korn aus. Nachteile des Gefüges waren* ***Kerbempfindlichkeit, niedrige Risszähigkeit und schneller Rissfortschritt****. Die Gefahren einer derartigen Kombination von schadensbegünstigenden Effekten sollte jedem der Technologien entwickelt als wichtige Erfahrung dienen.*

Es darf vermutet werden, dass wegen der hohen Beanspruchung, eine Risswachstumsphase nur äußerst schwer beherrschbar war. Der große Vorteil des PM-Werkstoffs war neben der hohen Festigkeit das äußerst preisgünstige ***„as HIP"-Verfahren*** *zu einer endkonturnahen Halbzeugform. Dieser Fertigungsprozess verwendet eine hohle Blechform (Kanne), die mit Metallpulver im Vakuum gefüllt und dicht verschweißt wird (Lit. 15.2-10). Eine so gefüllte Kapsel wird in einem Autoklav, der sog. Heißisostatpresse (engl, hot isostatic pressing = HIP) unter hohem Argondruck (>1000 bar) und hohen Temperatur zu einem dichten Werkstoff verpresst. Anschließend wird die Kapsel entfernt.*

Aus diesem Schaden lassen sich folgende Lehren ziehen:

© Axel Bossmann - Turbomaschinenberatung
Abschnittsunterlage nur zum Unterricht

*- Die Aussagefähigkeit einer **akkumulierten Gesamtlaufzeit** mehrerer Triebwerke und/oder Aufbauten, insbesondere wenn diese bei einigen tausend Stunden liegt, kann **nicht als ausreichendes Argument** für den Serieneinsatz einer Technologie gewertet werden.*

*- Ein neues Konstruktionskonzept (hier die einstufige Turbine), das die **Bauteilbelastung deutlich erhöht,** erfordert **mehr als nur einen festeren Werkstoff**.*

*-Die Nutzung eines höher **festen Werkstoffs verringert die Schadenstoleranz** und erfordert zusätzlich **bruchmechanische Betrachtungen** (Bild 15.2-7).*

*- **Bruchmechanische Kennwerte** wie Risszähigkeit, kritische Risslänge, Initialfehlergröße, Rissfortschritt und Kerbempfindlichkeit müssen für die Anwendung bekannt, verstanden und möglicherweise optimiert werden.*

*- **Safe-Life-Konzept** genügt nicht, es muss zumindest mit einem **Damage-Toleranz-Konzept** (Bild 15-11) **kombiniert** (Bild 15-12) werden. D.h. Anrissphase und Rissfortschrittsphase sind mit zu betrachten (Bild 15-14).*

*- Eine **neue Technologie muss in allen Auswirkungen auf die Bauteilsicherheit verstanden** sein. Hierzu gehören die Kenntnis der Fehler im Halbzeug: Größe, Verteilung und Wahrscheinlichkeit.*

*- **Proof-of-concept-Tests** müssen die geforderte **Eigenschaft direkt nachweisen**. Ein indirekter Nachweis ist nicht ausreichend. Rückschlüsse aus einem Berstschleuderversuch auf die LCF-Lebensdauer eines höchst ausgelasteten Bauteils sollten nicht gezogen werden.*

*- Der **Einzelfall ist gewöhnlich nur der erste Fall** (Band 1, Bild 2.3-3).*

*- Ein **spektakulärer Schaden** kann leicht das, zumindest vorläufige, **Ende einer Technologie** sein.*

Beispiel 15.2-1 (Bild 15.2-10): **„As Hip“**

Zitat 1 (Lit 15.2-6): „...fighter aircraft crashed shortly after departure from Farnborough Sept. 8, the day after the Farnborough air show ended. The aircraft, which had performed daily at the show, was en route to Spain for demonstration before the Spanish military...both (pilots) ejected from the aircraft shortly before it crashed...

The...(aircraft) departed Farnborough and reached an altitude of about 20,000 ft. when...(the pilot) experienced a loud explosion followed by a rapid rise in turbine temperature in the right engine. The engine was shut down...(the pilot) was unable to hold altitude due to control problems and also found that the throttle for the left engine would not move...

‘The preliminary information we have received seems to indicate that there was a failure of the low-pressure turbine section...’ Adding to this conviction of a possible explosion in the flight is the fact that two pieces of the engine’s low-pressure turbine and an aircraft’s speedbrake were found 20 mi. from the aircraft’s crash site...

(The OEM declared) ‘We have **accumulated 2,246 hr. in flight test program** to date, and nothing in the history of the test program indicates a problem in the low-pressure turbine area’...“

Zitat 2 (Lit 15.2-5): „...the ...(fighter) engine will have new materials in the turbine section. Inconel DA718 is being used in place of Rene 95 in the turbine disks of this and all versions of the ...(same engine type) being delivered to the Navy. The switch from Rene 95 was made after a low-speed turbine failed in a (fighter)...that crashed near Farnborough, England (Sept 1980)...

Use of the DA718 material for the turbine disks will save approximately $25,000 per engine,“... Rene 95 will continue to be used in high- pressure retaining plates and high-pressure rotor stub shafts.“

Zitat 3 (Lit 15.2-8): „Another ...crash occurred on Nov. 14, 1980, but the navy opted not to restrict flight operations as had been done after

©AxelPoenicke - Turbosoft
als Schulungsunterlage nutzbar

the crash at the Farnborough Air Show. ...The November 14 accident involved the first ...(aircraft type) **equipped with all of the proposed production fixes**.

In December 1980, ...(the OEM) indicated that while its technicians would probably never be able to identify the exact causes of the failure of the LP turbine disc in one of the ...September 8...crash, the firm **felt certain that such a occurrence would not again happen**. According to the engine manufacturer, the fixes and changes being instituted were:

-Use of 150-mesh Rene 95 alloy in place of 60-mesh.(Anmerkung: höherer mesh-Wert bedeutet **kleineres Korn**)

-Low pressure turbine disks would be inspected at the 140-hour mark (half the number of hours on the engine involved in September 8 crash).

-The 6,000 hour-plus lifetime of parts made with the 150-mesh alloy had been downgraded to 2,330 hours.

-**The number of bolt holes was being increased by 50 percent** in the low pressure turbine disc (from 41 to about 60).

- The bore area of the LP turbine disc would be recontoured and **bolt holes would be reshaped**.

...(OEM) officials also confirmed that the company and its vendors had increased cleanliness in powder manufacturing by using completely sealed systems during the powder engine component fabrication."

Zitat 4 (Lit 15.2-9): „A...design review team was formed soon after the...loss. ...a copy of the report was first obtained by Defense Week and details were recently made public.

The report was based on a 'worst case scenario' because only a portion of the low pressure turbine disc was recovered...The report's recommendations will be re-considered in view of the tests and evaluation of the test data.

According to the Navy officials, the low pressure turbine disc which fractured and failed in the September 8 accident **had operated only 280 hours**. The officials said that they never expected this particular component to fail since a similar disc underwent 4,000 to 5,000 hours of spin pit testing before failing. A second low pressure turbine disc, they added, has undergone 4,000 to 5,000 hours running tests and has yet to fail.

The report said that the low-time disc failure was caused by either

- a fracture emanating from a **large undetected flaw** or

- a fracture caused by **higher than expected stresses**, temperature or cyclic loading or

- a combination of both.

Because the portion of the low pressure turbine disc which failed was not recovered, the project office is not able to pinpoint the cause of the low pressure turbine disc failure.

As a result, the Navy has implemented both **manufacturing and design changes** to guard against a re-occurance of the problem..."

Zitat 5 (Lit 15.2-11): The conclusions reached by the design review team ...included:

- The Rene 95 material and the powder metallurgy process are not fundamentally suspect.

- **Life analyses were overly optimistic and did not account for the developmental stage of materials and processes**.

- A fracture emanating from a large undetected flaw or a low-cycle fatigue fracture caused by higher-than expected stresses, temperature or cyclic loading could account for the low time disc failure in the crashed ...(fighter),

- Rene 95 **notch sensitivity**, manufacturing process evaluation and **lack of confidence in ...(OEM's) stress analysis** suggest a combination of the above theories.

- Life prediction of ...(the engines) rotors are in question as a result of this failure review...

The team found that the ...(engine's) **single stage turbine design required material of high ultimate strength and that considerations of material properties were state-of-the-art, but**

Fortsetzung auf Seite 15.2.2-12

© Axel Rossmann - Turbocourse
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Fortsetzung von Seite 15.2.2-11

material selection placed little emphasis on fracture toughness and crack propagation and that ... (the OEM) had compromised fracture toughness to achieve high ultimate strength...

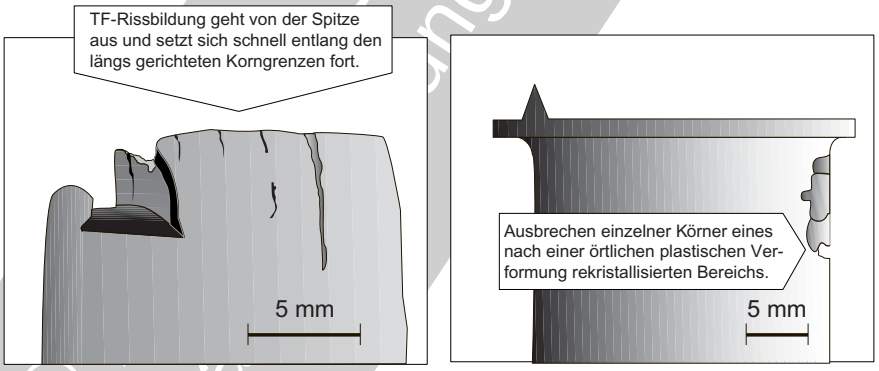
A ...(OEM official) countered these findings with:

'In the ...(engine) our first criterion was to achieve **overspeed capability** in the neighborhood of 122. To achieve this goal you have to **sacrifice some low-cycle fatigue** values because they are not totally compatibel. At ...(the OEM) we judge time to crack initiation and not crack growth'..."

Kommentar: Die Probleme im Zusammenhang mit der Serieneinführung eines neuen Werkstoffs können für einen solchen HIP-Prozess als exemplarisch betrachtet werden.

Offenbar wurde ein „ultra-hochfester" Scheibenwerkstoff eingeführt und entsprechend seinem Festigkeitspotenzial ausgelastet, ohne dass man sich über die damit im Zusammenhang stehenden Risiken im Klaren war. Weil bei solchen Belastungen mit einer **Rissbildung im Betrieb** zu rechnen ist, muss die **Lebensdauerauslegung der Scheibe auch unter bruchmechanischen Gesichtspunkten** erfolgen und Prinzipien der Damage-Toleranz zur Anwendung kommen. Anscheinend wurde jedoch nur das Safe-Life-Konzept angewendet (Bild 15-14). Das erhöhte Risiko infolge der Kerbempfindlichkeit des Werkstoffs und einem ungünstigen Rissverhalten waren in dem **nicht vollständig abgeschlossenen Entwicklungsstadium** des Werkstoffs nicht in der ganzen Tragweite erkannt worden.

Mit neuen Werkstoffen und Technologien lassen sich alte Schadensformen vermeiden, häufig treten jedoch neue auf.



Spitze einer unbeschichteten, gerichtet erstarrten Turbinenrotorschaufel.

Spitze einer unbeschichteten, einkristallinen Turbinenrotorschaufel.

Bild 15.2-11

Bild 15.2-11: *Bei neuen Werkstoffen und/oder Herstellungstechnologien muss mit spezifischen Schadensformen gerechnet werden. Die Einführung* ***gerichtet erstarrter Werkstoffe (****Skizze links, siehe Band 3, Bild 11.2-15) begünstigte radiale* ***Rissbildung an der Schaufelspitze*** *entlang den Korngrenzen mit Ausbrüchen und Leistungsverlust.*

Bei einkristallinen Turbinenschaufeln (Skizze rechts) tritt im Fertigungsprozess (Gießen, Glühen) oder bei hohen Betriebstemperaturen im Bereich von ***plastischen Verformungen Rekristallisation*** *auf. Dabei bilden sich Körner die unter Betriebsbeanspruchung (Kriechen, Thermoermüdung) zur Rissbildung bis zum vollständigen Herauslösen neigen.*

Mit unerwarteten Effekten ist bei neuen Technologien immer zu rechnen, hierzu gehört unterkritisches Risswachstum in Gläsern an feuchter Luft.

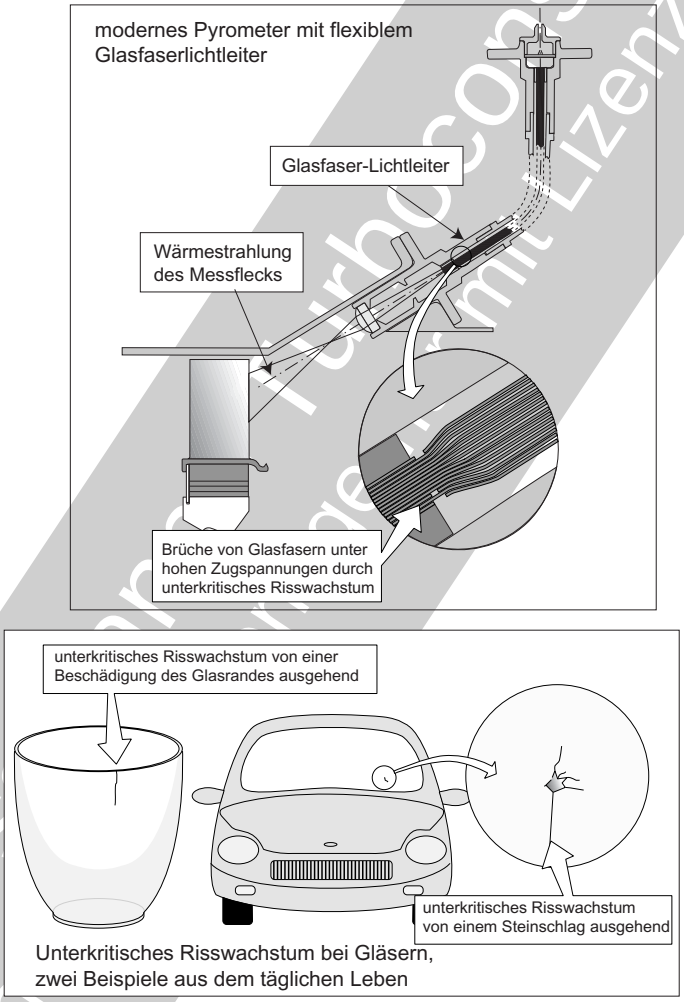


Bild 15.2-12

Bild 15.2-12: *Neue Technologien sind immer für Überraschungen gut. Ein erstaunliches Verhalten zeigen* ***Gläser und hochfeste Keramiken*** *mit Glasphasen (Sinterhilfe) in Umgebungsatmosphäre. Stehen diese Werkstoffe unter ausreichend hohen* ***Zugspannungen*** *kann die normale* ***Luftfeuchtigkeit Spannungsrisskorrosion*** *auslösen. Dabei kommt es zum Anriss, gewöhnlich an kleinen Kerben (z.B. Beschädigungen wie Kratzer und Schlagstellen) mit unterkritischem Risswachstum bis zum Bruch (Lit 15.2-26). Ein typisches Beispiel sind Brüche von Autoscheiben (hohe Zugeigenspannungen in Sicherheitsglas), die von kleinen Steinschlagbeschädigungen ausgehen. Das Risswachstum bis zum plötzlichen Zersplittern der Scheibe kann über Tage beobachtet werden. Einen vergleichbaren Effekt zeigen Haushaltsgegenstände aus Glas (Skizzen unten) und findet man in der Medizintechnik (keramische Implantate).*

Das Versagen von ***Pyrometern*** *(Skizze oben), die zur Überwachung der Bauteiltemperatur im Turbinenbereich angewendet werden, ist in einigen Fällen auf den beschriebenen Effekt zurückzuführen. Werden im Einspannbereich die Fasern des Lichtleiters zum Sensor hoch auf Zug beansprucht und hat Feuchtigkeit zutritt, kommt es zum Bruch einzelner Glasfasern. Dies führt zu einer schleichenden Verschlechterung der Sensibilität des Pyrometers und damit zur* ***Gefahr eines zu hohen Temperaturniveaus****.*

© Axel Rossmann Turbocons
als Schulungsmedium mit Lizenz

Technologische Entwicklung: Risiken und Probleme

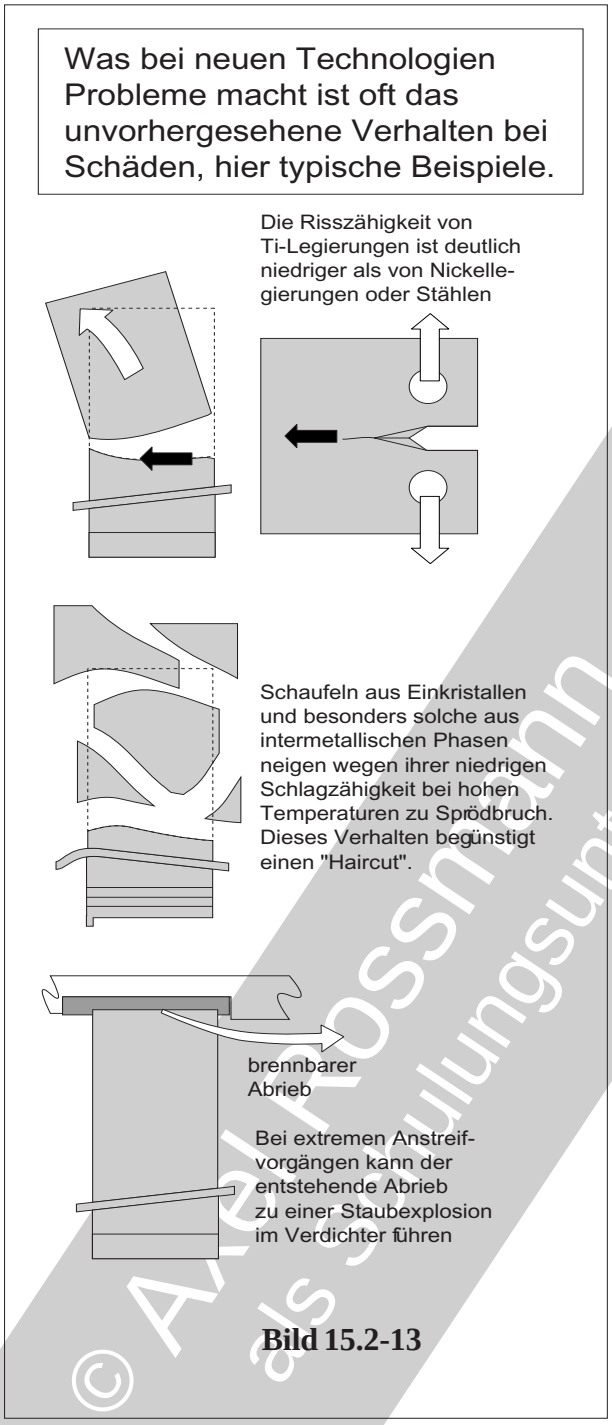


Bild 15.2-13

Bild 15.2-13: *Das* ***unvorhergesehene Verhalten bei ungewöhnlichen Belastungen****, etwa im Schadensfall, heftigen Anstreifvorgängen und FOD, kann die Einführung einer neuen Technologie verhindern oder einschränken. Hier einige Beispiele:*
Typische Situationen mit ungewöhnlichem Verhalten treten im Ablauf von ***Schadensfällen*** *auf.*

Hohe Verformungsgeschwindigkeiten ***wie Schlagbeanspruchung*** *führen bei metallischen Werkstoffen und Kunststoffen (z.B. PEEK, Bild 5.3-11) zu sprödem Verhalten. Das Maß der* ***Versprödung*** *ist werkstoffspezifisch. Schlagbeanspruchungen entstehen in Situationen wie Containmentfall, Vogelschlag und Einwirkung sonstiger angesaugter Fremdkörper oder durch Bruchstücke aus dem Triebwerk selbst. Der Versprödungseffekt kann von der Betriebstemperatur deutlich beeinflusst werden. Wider Erwarten beobachtet man nicht nur bei sehr niedrigen Temperaturen, sondern auch bei sehr* ***hohen Temperaturen eine ausgeprägte Versprödung*** *(Band 1, Bild 5.3-11). Die besondere Neigung mancher* ***Kunstharze zur Versprödung*** *bei Schlagbeanspruchung kann z.B. den vorteilhaften Einsatz in Spinnern aus FVK verhindern. Eine bei Betriebstemperatur* ***verminderte Schlagzähigkeit von Einkristallwerkstoffen*** *führt zu deutlich größeren Folgeschäden als beim unempfindlicheren aber weniger warmfesten vielkristallinen Werkstoff.*
Das steigende Risiko mit dem Einsatz ***hochfester Werkstoffe*** *kann nicht zuletzt mit ungünstigen* ***bruchmechanischen Kennwerten*** *in Zusammenhang stehen. Wird ein solches Verhalten nicht richtig eingeschätzt, ist die Realisierung im Serieneinsatz gefährdet (Bild 15.2-8, Beispiel 15.2-1). Erhöhte* ***Kerbempfindlichkeit*** *(z.B. bei Titanlegierungen) kann nach Beschädigungen durch Fremdkörper oder im Ablauf eines Schadens unerwartetet große Folgeschäden (z.B. Haircut einer Schaufelstufe) auslösen.*
Kerben und Risse in harten, spröden und festhaftenden Beschichtungen *wie sie durch Fremdkörper entstehen, können die Schwingfestigkeit deutlich stärker abfallen lassen als bei unbeschichtetem Material.*
Extreme Anstreifvorgänge *im Schaufelspitzenbereich und in Labyrinthen lassen an Kontaktflächen sehr viel Abrieb entstehen. Kommt es zur Zündung kann eine gefährliche Staubexplosion auslgelöst werden (Band 1, Bild 5.11.1-3 und bild 5.11.1-4).*

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

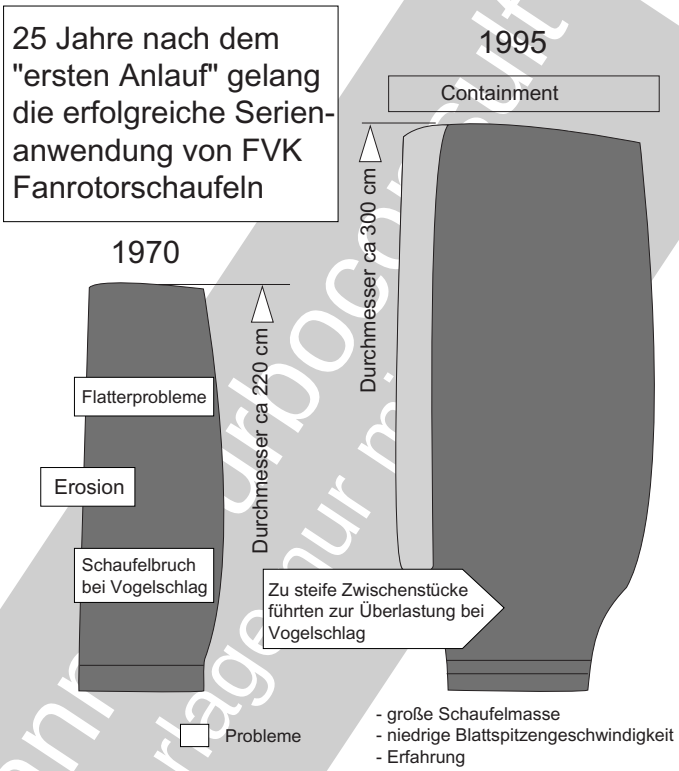


Bild 15.2-14

Bild 15.2-14 *(Beispiel 15.2-2 und Beispiel 15.2-3): Dieses Bild zeigt* ***FVK-Fanschaufeln*** *zweier Triebwerksgenerationen. Skizze links stammt von einem großen Fan-Triebwerk der ersten Generation aus den frühen 70-er Jahren. Trotz ähnlichen Gestaltungsmerkmalen (große Sehnenlänge, ohne Clapper, Schwalbenschwanzfuß) war die frühe Entwicklung am* ***Vogelschlagverhalten*** *(Band 1 Kapitel 5.2.2) mit katastrophalen Folgen für den Entwickler gescheitert.*

Skizze rechts zeigt eine Fanschaufel eines Triebwerks der 3. Generation Mitte der 90-er Jahre. Auffällig ist der ***Größenunterschied****. Weiter springt die ausgeprägte metallische Eintrittskante (Titanlegierung) ins Auge.*

Die Serienrealisierung wurde in erster Linie durch die ***große Masse*** *möglich, die bei gleicher Vogelschlagenergie das Blatt deutlich niedriger belastet als das kleine Blatt der früheren Entwicklung. Zusätzlich wurden* ***3-D-Verstärkungen*** *(gegen Delamination) sowie* ***verbesserte Fasern und Matrix*** *verwendet (Schlagzähigkeit, Festigkeit). Die* ***integrierte metallische Eintrittskante*** *garantiert ausreichendes FOD-Verhalten und Erosionsschutz. Diese Eigenschaften haben sich mittlerweile in einem sehr guten Betriebsverhalten über lange Betriebszeiten und an vielen Triebwerken bestätigt. Hierzu gehören* ***hervorragendes Vogelschlagverhalten und größte Ermüdungsfestigkeit****.*

Für die Anwendung der nun erfolgreichen Schaufel (Lit 15.2-23) war es notwendig, die ***Umfangsgeschwindigkeit der Schaufel*** *unter einen Grenzwert zu drücken (Bild 15.2-26). Trotzdem kam es im Rahmen des Tauglichkeitsnachweises der Serienanwendung zu großen Problemen. Die beim Vogelschlag und* ***Containment*** *stark ausgelenkten Schaufeln wurden von den scharfen Kanten der, die Nabenkontur bildenden Zwischenstücke, überlastet. Es kam zum Bruch der Schaufeln im Blatt. Abhilfe brachten nachgiebigere Zwischenstücke. Auch das Containment musste an das Werkstoffverhalten der Schaufeln angepasst werden. Dabei war es sehr hilfreich, das nachgewiesene besondere Versagensverhalten der Schaufeln zu nutzen. Der Bruch erfolgte, anders als bei metallischen Schaufeln, deutlich oberhalb des Fußes.*

© Axel Rossmann urbocomult als Schulungsunterlage nur mit

Beispiel 15.2-2 (Bild 15.2-14): **„Gescheiterte Serieneinführung von FVK-Fanschaufeln "**

Zitat 1 (Lit 15.2-12): „ ...In another test work on Hyfil, the company has produced a theoretical analysis of bird impacts on metal blades and has applied this to the work on composites

...Hyfil has now been designed to withstand the impact of a 4-lb. bird, a size chosen from service experience which shows that chances of meeting a larger bird are small.

In the RB.211 engine, the Hyfil fan blade is nearly 3 ft. long and has a 1-ft. chord at the tip.

(Anmerkung: Hyfil ist ein früher C-Faser verstärkter Kunststoff)

Zitat 2 (Lit 15.2-16): „...it is now likely that 25-blade **Hyfil fans will not be used** until 1973 or 1974 for airline service even though one in four **development engines is running with them**. A decision wether to proceed with this development will be taken at the end of the year. The Hyfil blades are very stiff, require no midspan dampers and are **stressed for 140 to 150 per cent overspeed**, giving a 100 per cent excess stress level. **Grit erosion and rain-induced delamination** were overcome earlier this year, but the high stress levels in the root- generated by the steel inserts used to overcome these earlier problems,- posed another themselves. This has been overcome by a revised root splice, but the impact of large birds and the subsequent vibratory stresses still poses a problem.

Zitat 3 (Lit 15.2-17): „...From the outset of the...programme it was decided that the fan blade should be specified in a **carbon fibre composite known as Hyfil**...Relative to the best performance that could be achieved with a titanium fan blade of acceptable weight penalty, the Hyfil blade represented approximately **1 % improvement in s.f.c and 300 lbs. reduction engine weight**...

It was recognised from the onset that the introduction of a new composite material for the fan blade of a new engine could represent an extremely difficult development problem. The **major difficulties that could be foreseen with the composite were those of protection against rain and grit erosion and doubts concerning the shear strength of the composite under conditions of large bird impact**...

These potential problems prompted...(the OEM) to take out **two insurance policies**. The first was the initiation of a **flight test program** in which hyfil blades were installed in certain...(smaller engines). These blades are still flying...in normal civil operation,...the total flying time was 16,747 hours.

The second insurance policy was a decision to **develop a titanium fan blade**...in parallel...

experience on representative test pieces and also on glass reinforced composite blading...had indicated that a.g.r. composite material without any protection was quite unsuitable under conditions of rain and grit erosion...a perfectly satisfactory solution was developed in which the **leading edge of the blade was nickel plated** and the remaining surfaces protected by a layer polyurethane paint....under conditions of **bird impact** this **treatment was inadequate** in providing the necessary spread of the local impact at the leading edge...a hard leading edge was formed from a **number of layers of thin steel** which were than scarfed into the hyfil sheets...From a bird impact point of view this solution has proved extremely encouraging (and represented the basis for the standard blade).

...further problems...The first was a **blade flutter** ...at approximately 80% L.P. speed...The traditional solution has been to twist a metal blade...A Hyfil blade is not at this time capable of accepting twist...

The second problem has been associated with the introduction of the **steel laminates**...Without the steel reinforcement the fatigue properties of the Hyfil blades have been excellent. Introduction of the steel laminates has led to some **deterioration in fatigue properties** due to the

© Axel Rossmann - Turbomaschinen als Schulungsunterlage nur für den Verfasser

stress concentrations out of the steel sheets into the blade root...“

Zitat 4 (Lit 15.2-15): „...the most famous name in British engineering, last week went into receivership and was immediately **nationalized by the British Government** in a move patently designed to circumvent large cancellation claims for the...engine program, by the ...(customer)...The official said that contributing to ...**(the OEM’s) desparate position**, in which there actually last week was no cash to pay salaries...“

Kommentar: Dieses Beispiel ist wie Beispiel 15.2-1 in Fachkreisen berühmt und äußerst lehrreich. Ganz allgemein erhält man den Eindruck, dass wichtige Anforderungen für den ausgewählten Serieneinsatz dieser Technologie nicht in ihrer Tragweite erkannt waren. Damit war der **fundamentale Grundsatz missachtet, eine Serienvariante erst zu entwickeln, wenn alle notwendigen Eigenschaften abgesichert dem Konstrukteur in Richtlinien zur Verfügung stehen** (Bild 15.2-21 und Bild 15.2-36). Auch nachdem solche gravierenden Probleme sichtbar wurden, setzte man offenbar auf noch **kurzfristigere Entwicklungen** wie Blechlagen, die zu neuen unerwarteten Schadensmechanismen führten. Dies verstößt gegen die Erkenntnis, dass **eine Technologie, von der man noch weniger weiß als von der problematischen Technik mit der man sich eben beschäftigt, gewöhnlich positiv überschätzt wird**. Insgesamt bekommt man ein Gefühl für die Zwangsläufigkeit des gesamten Ablaufs bis zum katastrophalen Ausgang.

Beispiel 15.2-3 (Bild 15.2-14): **„Erfolgreiche Serieneinführung von FVK-Fanschaufeln “**

Zitat 1 (Lit 15.2-14): „...Because the alternative test would be applicable only to composite fan blades, competing engines designed ..(by other OEM’s) would be unable to benefit from the new test plan...The procedure ... **(the OEM) wants to change is the blade-off test**. The present test calls for a blade to be explosively separated from a running fan at the blade root. The separated blade and resulting fragments must then be confined within the engine, mostly by the fan containment system - a ring of material, often reinforced with Kevlar or steel, that surround the fan - (the OEM wants) **to separate the fan blade some distance away from the root** because... tests and analyses indicate the composite blades- unlike metal blades- are unlikely to fail at their roots.

In addition to decreasing the weight of the resulting projectile, the modified blade off test would change the kinematics which would allow...to shorten the length of the fan containment system....the separated blade would be far less likely to strike other blades...the subsequent unbalanced loads placed on the engine, allowing ...engineers to **reduce the robustness of the engine’s mounts, turbine exhaust case and bearing supports**.

Zitat 2 (Lit 15.2-13): „ The ...(OEM) has developed a solution to the fan-blade failure which has grounded...flight-test aircraft...The loss of three composite wide-chord fan blades during the birdstrike test was initiated by the affected **blades coming into contact with aluminium platforms or flow-path spacers**, located between the blades where they meet the hub. The first blade to be struck apparently flexed sideways, causing the **aluminium platform to cut through the composite** fibres at its base, weakening the blade and causing into break off when it rebounded. Two neighbouring blades were forced sideways and failed similarly, resulting in a fan imbalance

© Axel Rossmann - Turbopsych
ausschließlich für Lizenz

exceeding design requirements. The fan is designed to withstand the loss of 2,3 blades. The ...fan blade had already passed the same test at the rotational speed equating to the initial 377 kN-thrust rating and the test was being restaged at the higher fan speed required for 409 kN growth engine. In the first test the bird was fired at a point halfway along the blade. At the US FAA's request, the growth rig-test was staged with the bird aimed at the 75%-diameter mark."

Kommentar: Auch wenn sich die Serienanwendung der FVK-Fanschaufeln nun offenbar über lange Zeit bewährt hat, ist doch das hohe **Restrisiko bei der Entwicklung** spürbar. Wieder waren es hohe Schlagbeanspruchungen bei Vogelschlag und Containmentversuchen die unerwartete Probleme machten. Doch es gelang diese zu lösen weil offenbar die Eigenschaften für die gewählte Anwendung ausreichten. Die folgenden Maßnahmen scheinen zum Erfolg einen besonderen Beitrag geleistet zu haben:

-**Langjährige Entwicklung der Technologie** in der offenbar die entscheidenden Konstruktions- und Auslegungsmerkmale ausreichend betriebsnah ermittelt wurden.

- Ein **günstiger Containmentversuch** der die Vorteile des FVK-Werkstoffs berücksichtigte. Die besondere Leistung des OEM war es, in der Entwicklungsphase ausreichend **Nachweise zu erarbeiten,** welche das günstigere Ermüdungs- und Bruchverhalten der FVK-Blätter für die Zulassungsstellen ausreichend belegten.

- **Erarbeitung von Auslegungsdaten**, insbesondere die Definition einer **Grenz-Umfangsgeschwindigkeit** der Fanblätter für ein befriedigendes Vogelschlagverhalten (Bild 14-26).

- **Analyse der Ursache für die Probleme** des missglückten Vogelschlagtests mit einer gezielten **praktikablen Abhilfe** deren Nachweis durch den folgenden Test erfolgte.

Bild 15.2-15: In alten Triebwerkstypen bewährte Technologien lassen sich wider Erwarten nicht einfach in modernen Triebwerken anwenden*. Die hohen statischen und dynamischen Belastungen sowie gestiegene aero- und thermodynamische Anforderungen erfordern wichtige Adaptionen, die vom Entwicklungsaufwand her in die Nähe der Entwicklung neuer Technologien geraten können. Selbst die Verwendung traditioneller Werkstoffe, die in älteren Triebwerken häufig genutzt wurden, können in modernen Triebwerkstypen mit deutlich höheren Bauteilbelastungen zu großen Problemen führen. Ein typisches Beispiel sind* ***Al-Legierungen*** *im Fan oder Hochdruckverdichter von Kampfflugzeug-Triebwerken. Das Fehlen einer ausgeprägten Dauerfestigkeit (Diagramm unten rechts) zusammen mit Erosions- und Korrosionsempfindlichkeit und niedrigem Festigkeitsniveau erhöhen deutlich das Risiko der Schwingermüdung. Insbesondere die dünnen scharfkantigen Profile moderner Verdichter verstärken die Problematik weiter.*

Folgeschäden nach einem Schaufelbruch und/ oder einem FOD führen erfahrungsgemäß zu einem ***Haircut*** *in großen Teilen des Verdichters (Bild oben). Dies liegt in erster Linie an der großen Auslenkung wegen des niedrigen E-Moduls und dem geringen Schaufelgewicht (Band 1, Bild 4.3-8, Bild 5.2.1-7 und Bild 5.3-1.1).*

Ein weiteres Beispiel sind ***Blechkonstruktionen****. Die Gehäuse früher Triebwerkstypen unterscheiden sich von den Gussteilen moderner Triebwerke durch äußerst komplexe* ***Schweißkonstruktionen*** *aus Blech- und Schmiedeteilen. Ab und zu taucht der Vorschlag auf, solche Konstruktionen wieder anzuwenden, um einen vermeintliches Kostenvorteil zu nutzen. Dabei wird außer acht gelassen, dass solche Schweißteile umfangreiches Know How erfordern. Ausreichend verzugsfreie Schweißfolgen zu konzipieren und das erforderliche handwerklich geschickte* ***Fachpersonal auszubilden ist eine Langzeitaufgabe****. Selbst wenn mit Hilfe moderner Schweißroboter teure*

© Aero Rosemann - Turbosoft
Lehrgangsunterlagen mit Lizenz

Technologische Entwicklung: Risiken und Probleme

Die Wiedereinführung der Technologien früherer Triebwerkstypen erfordert auch die zugehörigen speziellen Kenntnisse, Erfahrungen und das Fertigungs-Know-How dieser Zeit.

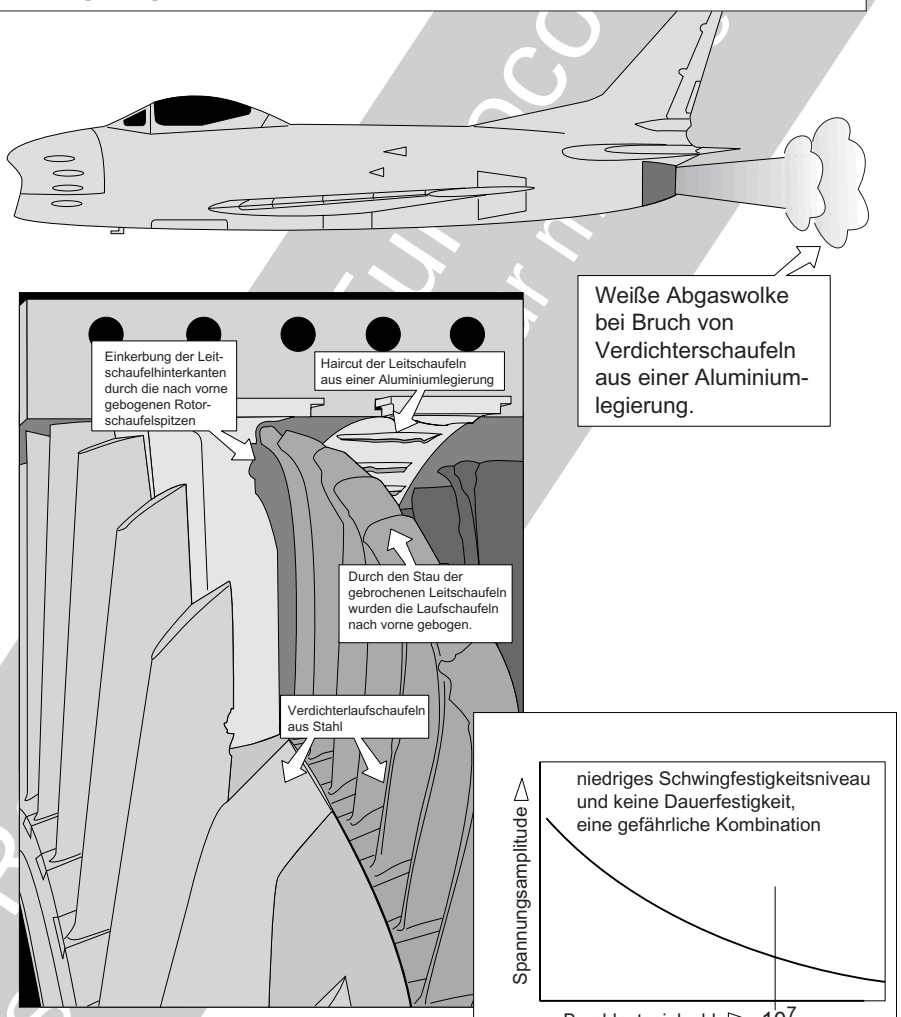


Bild 15.2-15

Verdichterschaden mit Schaufelstau

Handarbeit heute minimiert werden kann, sind umfangreiche ***Fertigungsentwicklungen unerlässlich****. Trotzdem kann es sich lohnen, solche Möglichkeiten wieder ernsthaft zu prüfen, weil die Möglichkeiten des CAD wie die Simulation des Zusammenfügens, des Schweißverzugs und die Festigkeitsberechnung komplexer Strukturen neue Perspektiven eröffnen.*

Bild 15.2-16: *Die* ***Kühlung der Turbinenschaufeln ist eine Schlüsseltechnologie*** *welche Kraftstoffverbrauch, Leistung und Gewicht eines Triebwerks günstig beeinflusst. Manche Konzepte wie Effusionskühlung und der Einsatz monolithischer Keramiken haben bis heute nicht den Weg in die Serienanwendung gefunden. Der Grund war in beiden Fällen ein zu unsicheres Betriebsverhalten als Folge eines* ***nicht ausreichend sicher abfangbaren Schadensmodus*** *bei Fremdkörpereinwirkung („****carbon impact****“). Die* ***Effusionskühlung*** *hat*

Es gibt mehrere denkbare Varianten von gekühlten Turbinenschaufeltypen. Nur zwei konnten sich bisher durchsetzen.

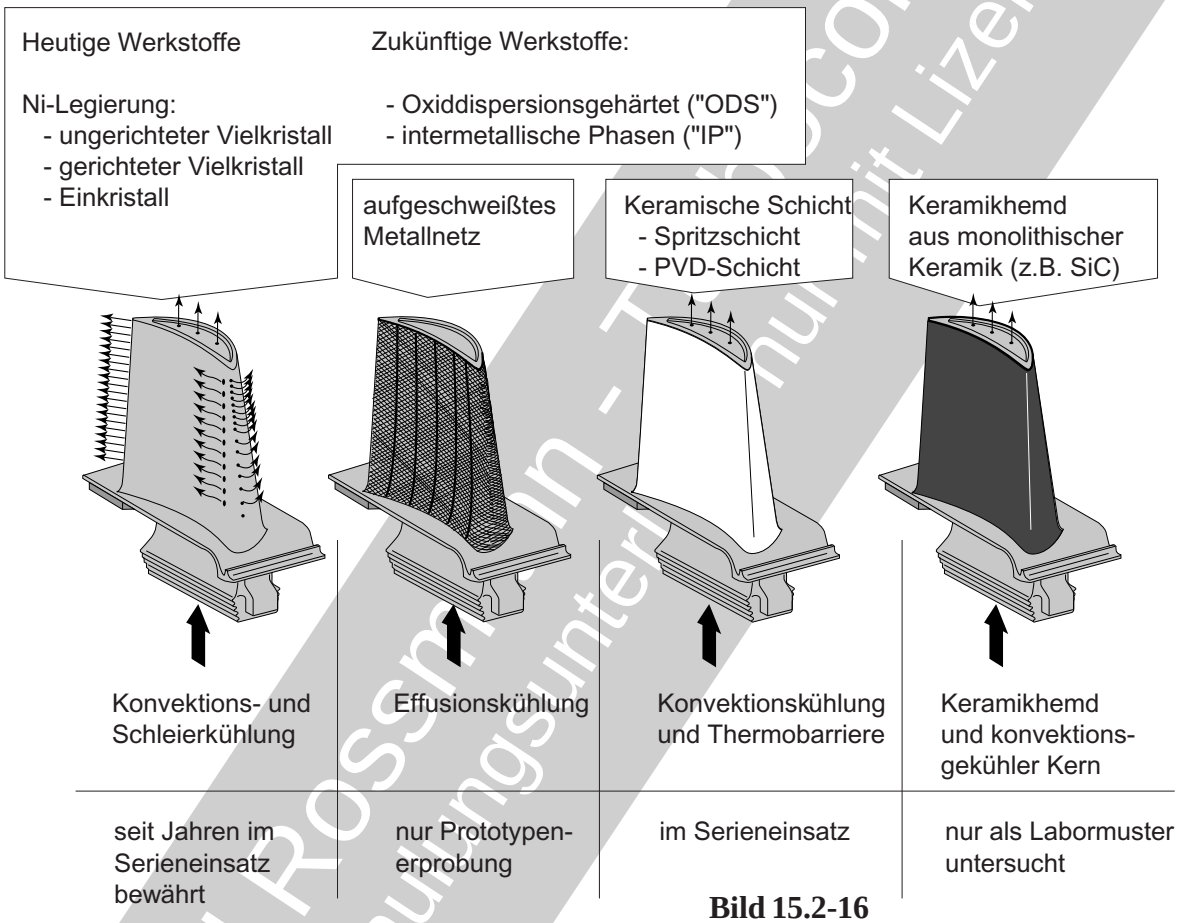


Bild 15.2-16

*darüber hinaus Probleme mit Erosion, Verstopfung, Oxidation und Thermoermüdung. Die Schaufel mit dem „**Keramikhemd**“ hat Probleme mit Thermoermüdung und der Krafteinleitung vom tragenden Metallkern in die Keramik.*

Intensiv gekühlte gegossene Schaufeln sind dagegen bisher die Standardtechnologie. Auch diese hat Probleme, doch sie sind innerhalb der geforderten Lebensdauer ausreichend sicher beherrschbar.

*Moderne Triebwerksmuster verwenden Turbinenschaufeln mit keramischen Wärmedämmschichten. Diese Technologie hat sich bisher als **lebensdauerabsichernd** bewährt. Wird nun die Wärmedämmung **Auslegungsbestandteil**, erhält die Zuverlässigkeit einenhöheren Stellenwert (Bild 15.2-24).*

Beide Serientechnologien wurden über Jahre in einer evolutionären Entwicklung auf den heutigen Stand gebracht, was die Einführung anderer neuer Technologien sehr erschwert.

© Axel Rossmann - Technologie
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

15.2.3 Minimierung des Entwicklungsrisikos

Das Entwicklungsrisiko wird wie jedes Risiko von Wahrscheinlichkeit des Eintritts und der Auswirkung bestimmt. Die Auswirkung bzw. der Schaden hängt besonders vom **Aufwand und den Folgekosten** ab, wie sie aus Nichteinhaltung von Lieferverträgen entstehen (Bild 15.2-17).

Die Einschätzung der Erfolgswahrscheinlichkeit durch die Verantwortlichen ist für die Entscheidung über eine Entwicklung von ausschlaggebender Bedeutung . Die Meinungsbildung bzw. Entscheidungsfindung erfordert eine möglichst **fundierte objektive Analyse**. Hierfür sind ausreichende fachliche Kenntnisse und ein Überblick zum **Stand der Technik** sowie Urteilsvermögen und Erfahrung unerlässlich. Die Höhe des tragbaren Risikos hängt wie immer von den Chancen und Ressourcen ab.

Um ein Risiko zu minimieren ist es vorteilhaft, die Einflüsse zu kennen (Reihenfolge ist keine Wertung, kein Anspruch auf Vollständigkeit):

Entwicklungsrisiko:

- Das Entwicklungsziel wird nur teilweise oder nicht erreicht.
- Das Ziel wird erreicht, der Aufwand ist jedoch deutlich höher als erwartet.
- Das Ziel wird erreicht, es werden jedoch Rechte verletzt, die eine Nutzung nur teilweise oder gar nicht zulassen (z.B. Patente oder Verträge).
- Wichtige Ressourcen wurden gebunden.
- Wettbewerber sind am Ende der Entwicklung schneller.
- Falsches Produkt.

Ursachen für das Entwicklungsrisiko:

- Falsche Einschätzung der Realisierungschance (falscher „Proof-of-concept, Bild 14-20). Probleme werden nicht erkannt oder nicht genannt.
- Ungeeignete Entwicklungsstrategie (Partner, Aufgabenverteilung, Entwicklungsschritte).
- Nicht ausreichende und/oder ungeeignete Erfolgskontrolle .
- Falsche Einschätzung des Aufwands und des Zeitbedarfs.
- Fehlende, unbedingt benötigte Technologien (Hoffnung auf Trends, Bild 15.2-21).

© Axel Rossmann - Turbokonsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

- Veränderte Finanzlage bzw. Budgets (z.B. ausbleibende Förderung).
- Unzureichende Recherchen zum Stand der Technik (Patente, Fachliteratur, Konferenzen u.s.w.).
- Ungeeignete fachliche Führung.
- Ungeeignete Personalressourcen.
- Ungenügende Ausrüstung.
- Sorglosigkeit und Mangel an Erfahrung (Beispiel 15.2-4.1)

Man erkennt, dass in der **Phase der Entscheidungsfindung** für eine Entwicklung die gravierendsten Fehler gemacht werden können. Deshalb ist die **fachliche Vorbereitung der Entscheidungsfindung von ausschlaggebender Bedeutung**. Auf ihr muss die Aufwand- und Zeitschätzung basieren. Nur dann können für den Aufwand Verantwortliche mit definierbarem Risiko Entscheidungen fällen. Auf die Entscheidung wirken viele zusätzliche Einflüsse. Einige wie Macht, Auslastung, persönliche Zukunftsperspektive und Neigung sind subjektiv geprägt. Diese Erkenntnis erscheint selbstverständlich, doch sie ist es erfahrungsgemäß nicht. So beeinflusst die „**Firmenkultur**" den fachlichen Stellenwert in den Hierarchien und damit das Risiko einer Entwicklung.

Um das Entwicklungsrisiko zu minimieren, sind Grundregeln zu berücksichtigen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden solche in diesem Kapitel in Form von Merksätzen dargestellt (grau unterlegte Felder).

Als Beispiele für die Entwicklung und Einführung neuer Technologien dienen fasertechnische (Bild 15.2-28 bis Bild 15.2-32) und monolithische keramische (Bild 15.2-34, Band 1, Bild 3-21) Triebwerksanwendungen.

Bild 15.2-7: *Das oberste Diagramm zeigt einen* ***„pragmatischen Ansatz"*** *(Lit 15.2-20) für die zeitliche Abschätzung eines Aufwands. Die Komplexität der Fragestellung lässt oft auch mit aufwändigen Mitteln keine sicheren Ergebnisse zu. Man erkennt entsprechend dem dargestellten Prinzip, dass* ***für ca. 80% der Reife eines Produkts nur mit ca. 20 % an Entwicklungsaufwand zu rechnen*** *ist. Die größten Kosten sind in den letzten 20% Reife enthalten. Daraus ergibt sich:*

Eine ***weitgehend abgeschlossene Entwicklung birgt bis zur Serienreife noch große Risiken****.*

Die Risiken bzw. der Aufwand für die Fehlerbeseitigung bei einem ***„wissensbasierten Ansatz"*** *(Lit 15.2-19) zeigt das mittlere Diagramm. Die Anwendung erfolgt* ***Computer gestützt****. Damit ist es mit Simulationen und Animationen eher möglich, verborgene Fehler in der frühen Konstruktions- bzw. Entwicklungsphase zu entdecken und die* ***FMEA*** *(Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, engl.* ***Failure Mode Effects Analysis****, Lit 15.2-28) zu verbessern. So bewegt sich die Wahrscheinlichkeit, Fehler bereits in der Entwicklungsphase zu entdecken auf der Zeitachse nach vorne und reduziert das Risiko.*

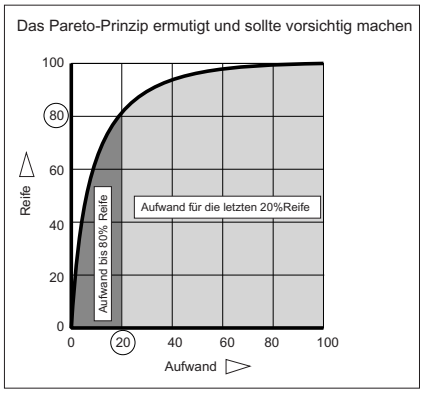
Die Kosten steigen mit dem Fortschritt der Entwicklung zur Serienanwendung exponentiell an

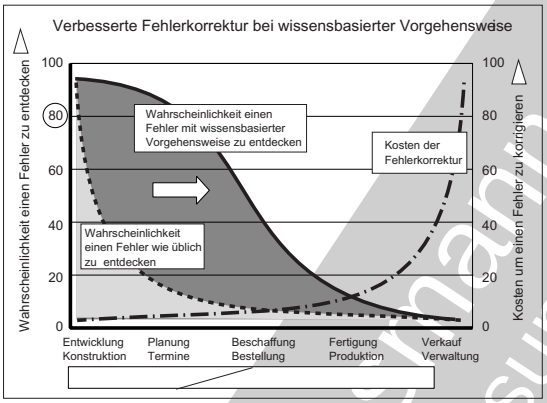
Der typische Verlauf der ***Kosten über dem Lebenszyklus*** *(engl. life cycle costs = LCC) lässt sich aus dem untersten Diagramm erkennen (Lit 15.2-18). Die Erfahrung zeigt,*

auf die LCC kann zu Beginn eines Projekts am besten Einfluss genommen werden.

Axel Rossmann - Turboconsult
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bei der Vermeidung von Fehlern ist die Anfangsphase am wichtigsten: erst denken, dann handeln.





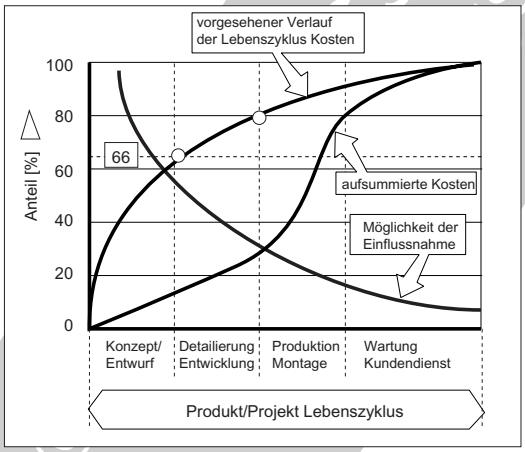


Bild 15.2-17

Diese Möglichkeit lässt mit dem Entwicklungsfortschritt deutlich nach. Die ***Lebenszykluskosten*** *(d.h. die zu erwartenden Gesamtkosten) werden entscheidend von der Anfangsphase bestimmt. Dies ist verständlich, weil der größte Kostenanteil (Aufwand, Diagramm oben) erst spät im* ***Entwicklungszyklus*** *entsteht.*

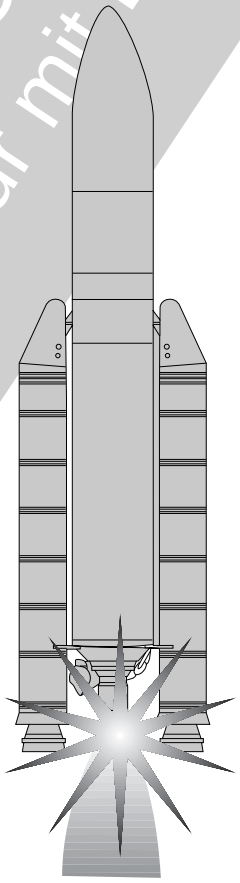
Turboconsult
Lizenz nur mit Lizenz

Beispiel 15.2-4.1 (Lit 15.2-30):

Zitat: „...The main change entailed raising the cooling tube section from 4x4 mm to 4x6 mm, allowing the number of tubes to be cut from 456 to 288 and production time to be sliced from 13 weeks to five...the conjunction of costcutting and performance enhancement requirements had forced designers '**to flirtwith the limits of the state of the art**.'...although tubewall thickness was increased from 0,4 mm to 0,6 mm to compensate for the increase in tube size, the design changes virtually doubled inflight aerodynamic loads...'**the changes...were dictated by the market and...the limitation of finite-element modeling systems** used to validate the design...**made it impossible to fully predict the effect of thermomechanical stresses in flight**. **It's part of the normal learning curve**.'

...The inquiry panel recommended that engineers change the nozzle design, 'drawing on experience obtained with Vulcain 1'...Ariane 4 has seen years of service without incident....(comment about former finite-element calculations) 'It's obvious we **underestimated the amount of margin required for existing procedures**.'

Kommentar: Es handelte sich um den Absturz einer großen zivilen Rakete (Ariane 5). Der Schaden liegt im Milliarden EUR-Bereich und ist mit großem Prestigeverlust sowie hohen Folgekosten (z.B. Versicherungsprämien, Zeitverzug) verbunden. Man ging **scheinbar nur sehr wenig über den Erfahrungshorizont** mit dem Vorläufer (Ariane 4). Insbesondere scheinen die Computergestützten Berechnungen nicht ausreichend sichere Schlussfolgerungen ermöglicht haben. Es ist fraglich, ob man ein solches Desaster noch als Teil einer „normalen Lernkurve" bezeichnen kann.



© Axel Bossemann - Turbocomsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 15.2-18: *Eine angewandte technologische Entwicklung muss bestimmten Forderungen genügen, um das* ***Entwicklungsrisiko zu minimieren****. Die Tabelle enthält typische Beispiele ohne Anspruch auf Vollständigkeit.*

Eine Realitätsbezogenheit ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwicklung. Dies bedeutet, dass bei einem Anwender der Serieneinsatz das letztendliche Entwicklungsziel sein muss. D.h. ***Halbzeug****- und* ***Grundlagenentwicklung*** *(Bild 15.2-21) sind „natürlichen"* ***Partnern*** *(z.B. Hochschulen , Halbzeuglieferanten) zu übertragen. Der* ***Anwender*** *konzentriert sich auf Aufgaben wie:*

- *Erarbeitung der Konstruktion.*
- *Erarbeitung und Spezifizierung der Auslegungskriterien und -daten (Bild 15.2-22 und Bild 15.2-25).*
- *Qualitätssicherung (Bild 15.2-22).*
- *Fertigung.*
- *Reparaturen.*
- *Betriebstauglichkeitsnachweis (Bild 15.2-20).*

Technologische Entwicklung: Risikominimierung

Wichtige Forderungen an eine angewandte technologische Entwicklung:

- Ein Serieneinsatz ist das Ziel, eine Triebwerkserprobung wird als Erfolgskriterium angestrebt.

das bedeutet:
- Proben sind nicht das Entwicklungsziel. Die Entwicklung hat an betriebsnah prüfbaren Bauteilen zu erfolgen.
- Technologien für die keine ausreichende aussagefähigen Prüfmöglichkeiten vorhanden sind haben keine Realisierungschance.

- Die Serien-Machbarkeit (Fertigung) muss im Auge behalten werden.

das bedeutet:
- Die Entwicklungsteile müssen für Triebwerksteile ausreichend realistisch sein.
- Ein seriengeeignetes Herstellungsverfahren muss sich zumindest abzeichnen, wenn dies nicht bereits Teilziel der Entwicklung ist.
- Der Umweltschutz muss berücksichtigt werden.
- Die Halbzeugverfügbarkeit ist sicherzustellen. Z.B. muss bei Gussteilen zur Minimierung des Ausschusses eine Schweißung möglich sein.

- Die zur Konstruktion, Auslegung, Herstellung und Qualitätssicherung notwendigen Daten sind zu erarbeiten.

das bedeutet:
- Erforderliche Daten und Angaben sind zu erarbeiten und geeignet bereitzustellen.
- Eine ausreichende Qualitätssicherung muss vorhanden sein oder ist zu erarbeiten.

- Eine seriengeeignete Reparatur muss, wenn nicht bereits vorhanden, erarbeitet werden.

das bedeutet:
- Notwendige Füge- und Beschichtungsverfahren müssen vorhanden sein oder sind bereitzustellen.
- Beschichtungen müssen erneuert werden können, hierzu gehört auch das Entfernen.
- Die ausreichende Wiederholbarkeit ist zu gewährleisten.
- Eine etwaige unvermeidliche Schädigung (z.B. Ätzen) ist zu berücksichtigen.

- Das Handling und die Montage müssen ausreichend sicher machbar sein. Vorschriften sind gegebenfalls zu erarbeiten.

das bedeutet:
- z.B. bei Bauteilen aus spröden Werkstoffen keine Schlagbeanspruchung
- z.B. bei Schraubverschlüssen aus FVK (Überlastungsgefahr vermeiden).

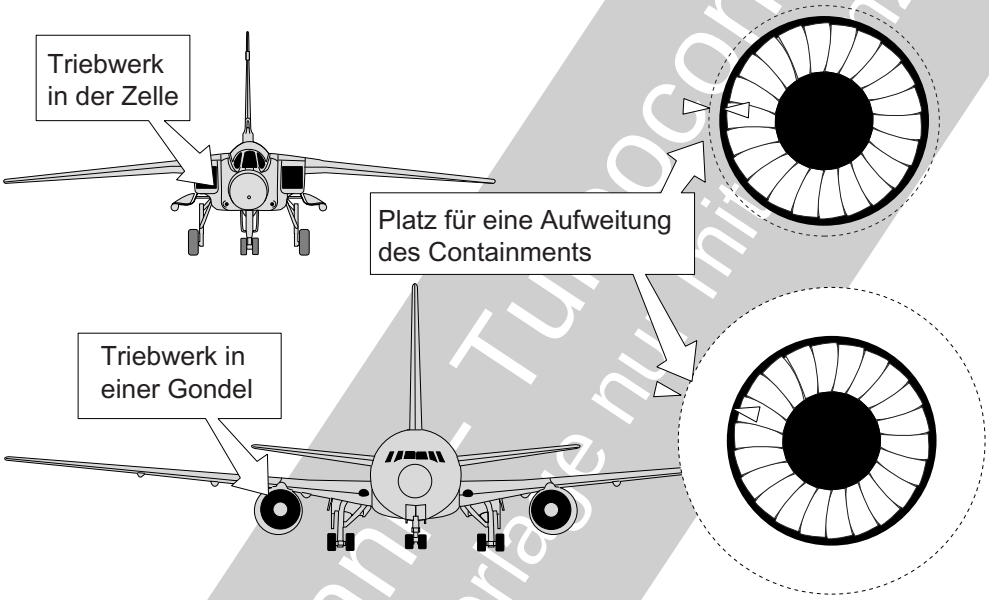
- Die absehbaren Kosten müssen abschätzbar sein.

das bedeutet:
- z.B. realistische Kostenschätzung, auch keine Benachteiligung gegenüber eingeführten Verfahren.

Bild 15.2-18

© Axel Bonsmann Ingenieurbüro

Vorsicht wenn man anscheinend bei einer Technologie oder Anwendung der Erste ist.



Warum wurden bei Triebwerken von Kampfflugzeugen im Gegensatz zu Verkehrsflugzeugen keine Anwendung eines Aramid-Containments bekannt?

Bild 15.2-19 Ein Aramidcontainment benötigt Platz für die radiale Aufweitung. Der steht ist der Zelle eines Kampfflugzeugs nicht zur Verfügung.

Bild 14-19:

*Man sollte immer davon ausgehen, dass **einleuchtende, innovative Ideen** bereits Anderen für die Realisierung gleich fähigen Wettbewerbern eingefallen sind.*

*Für ein potenziell hohes Entwicklungsrisiko spricht, wenn zwar Aktivitäten auf dem fraglichen Gebiet bekannt sind aber offenbar wieder fallen gelassen wurden. Dies kann ein Hinweis auf einen kurz bevor stehenden Erfolg sein. Erfahrungsgemäß ist jedoch wahrscheinlicher, dass ein (vorerst) **unüberwindliches Problem, im Extremfall ein „Show Stopper“** (Bild 15.2-5) auftrat.*
Die entscheidende Frage ist deshalb:

Warum hat eine Realisierung (noch) nicht stattgefunden?

Erst wenn diese Frage plausibel beantwortet ist, sollte die Entscheidung über eine Entwicklung getroffen werden.
Fasertechnische Containmentringe sind bei zivilen Triebwerken seit langem erfolgreich im Einsatz. Das dargestellte Beispiel erklärt, warum die Anwendung fasertechnischer Containmentringe in Triebwerken von Kampfflugzeugen bisher nicht als Serienanwendung bekannt wurde. Platzmangel zur Nutzung der erforderlichen Aufweitung verhindert eine gewichtsoptimierte Funktion. Es gibt Hinweise, dass nun eine Einführung bevor steht. Welche Voraussetzungen sich geändert haben, darüber lässt sich nur spekulieren.

***Bild 15.2-20:** Um das **Potenzial einer Technologie** zu erkennen und Entwicklungsrisiken besser abschätzen zu können, bieten sich Versuche an. Diese müssen das Prinzip bzw. die Funktion und damit Vorteile und Nachteile der*

Technologische Entwicklung: Risikominimierung

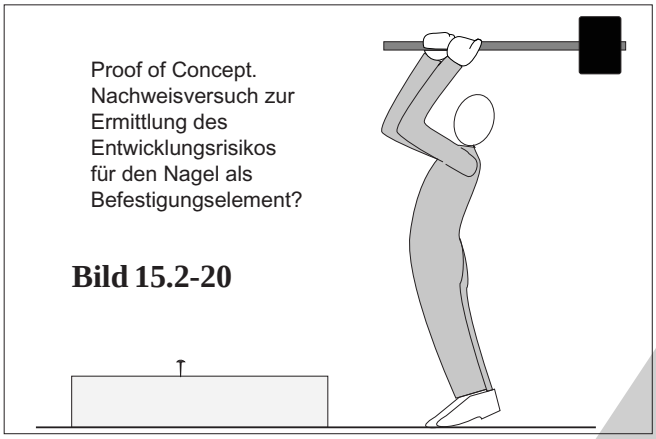


Bild 15.2-20

Technologie den Entscheidungsträgern ***überzeugend demonstrieren*** *(engl. proof of concept). Die Erfahrung zeigt jedoch, dass diese, durchaus sinnvolle, Vorgehensweise mit großen Risiken behaftet ist. Das Problem liegt in der Auswahl eines geeigneten Versuchs zum Nachweis eines solchen Konzepts.*

Voraussetzung ist, dass der ***lebensdauerbestimmende Schadensmechanismus*** *auch vom* ***Demonstrationsversuch*** *aktiviert wird.*

Nicht selten ähnelt ein solcher Demonstrationsversuch eher einem mittelalterlichen Gottesurteil, bei dem z.B. ein gerissenes Seil die Unschuld des aufzuhängenden Deliquenten beweist. Ein typisches Beispiel ist der Nachweis des Potenzials der besseren ***zyklischen Lebensdauer*** *einer höchstbelasteten Rotorscheibe mit einem* ***Berstschleuderversuch****. Hier wird zyklische Ermüdung durch Zerreißen ersetzt. Beide Schadensabläufe unterscheiden sich fundamental und werden von unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften gesteuert. Das Ergebnis des Ermüdungsversuchs (Schwingfestigkeit) hängt entscheidend von einer vorhandenen Fehlergröße ab. Beim Berstversuch wird die Bruchfestigkeit und Bruchdehnung (Spannungsumlagerung durch plastische Verformung) geprüft. Das Ergebnis hängt gewöhnlich nur unwesentlich von den relativ kleinen Fehlern ab. Es ist durchaus möglich, dass ein besonderer, weniger plastisch verformbarer Werkstoff (z.B. mit fasertechnischer Verstärkung) keine merkliche Verbesserung der Bruchdrehzahl gegenüber der konventionellen Version zulässt. Spannungskonzentrationen können von einem Werkstoff mit großer Duktilität ausgeglichen werden. Bei der niedrigeren Betriebsdrehzahl kann jedoch ein weniger plastisch verformbarer faserverstärkter Werkstoff deutlich längere zyklische Lebensdauer ermöglichen. In diesem Fall könnte der Versuch den Vorteil nicht demonstrieren. Aber auch der umgekehrte, gefährlichere Fall ist denkbar, wenn der Versuch einen Vorteil suggeriert der später nicht realisierbar ist.*

Es ist also immer zu fragen welcher Vorteil oder welches Risiko zu demonstrieren ist. Danach ist der Demonstrationsversuch auszuwählen*.*

Bild 15.2--21

Bild 15.2-21:

Höchstes Entwicklungsrisiko besteht, wenn ein notwendiger Schritt zur Realisierung der Serienanwendung einer ***Technologie fehlt****.*

Dies kann ein ***Halbzeug*** *oder ein* ***Verfahren*** *sein.*

©Axel Bossmann - Turbomaschinen - Vorlesungsunterlage WS 2012

Es wird z.B. zur Realisierung eines monolithischen keramischen Turbinenrads ein Werkstoff, der für die bauteilspezifische Geometrie geeignet ist, benötigt. Voraussetzung ist hohe Festigkeit und geringe Streuung. Diese Eigenschaften erscheinen zwar im mittelfristigen Trend möglich, wurden jedoch noch nicht realisiert. Die Erfahrung zeigt, dass gerade das Warten auf einen ausstehenden Technologieschritt, selbst wenn Termine zugesagt wurden, immer wieder zum Scheitern des gesamten Projekts führten. Im Zweifelsfall ist zuerst dieser Schritt zu verifizieren, bevor die eigentliche Entwicklung beginnt.

***Bild 15.2-22: Technologien und Konstruktionen mit wachstumsfähigen Fehlstellen**, die nicht ausreichend sicher zerstörungsfrei zu finden sind, bergen ein hohes Risiko. Deshalb:*

Es muss ein glaubwürdiges und ausreichend abgesichertes, nachweislich seriengeeignetes Qualitätssicherungssystem vorliegen, das Fehler oberhalb einer, der Auslegung zu Grunde gelegten, maximalen Fehlergröße ausschließt.

Die maximal zulässige Schwachstelle ist von der für die Festigkeit verantwortlichen Stelle zu definieren. Die Auslegungslebensdauer wird entsprechend den Betriebsanforderungen, festgelegt.
***Qualitätssicherung** muss mit geeigneter **ZfP** und/oder mit **Verfahrenskontrolle** gewährleistet sein (Lit 15.2-21). Dabei gilt:*

Eine ZfP ist einer Verfahrenskontrolle vorzuziehen.

*Voraussetzung einer ausreichend sicheren **Verfahrenskontrolle** ist, dass alle relevanten Verfahrensparameter und Effekte kontrolliert werden und keine unbemerkten Abweichungen auftreten. Hierzu gehört der Ausfall von Überwachungsinstrumenten und menschliches Versagen.*

Die Qualitätssicherung muss die Auslegungsbasis im Serienprodukt garantieren

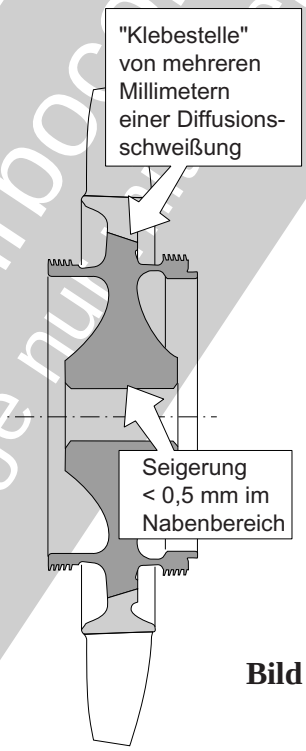


Bild 15.2-22

© Axel Pohmann - Turbomaschinen - Unterlage nur für Schulungszwecke

Technologische Entwicklung: Risikominimierung

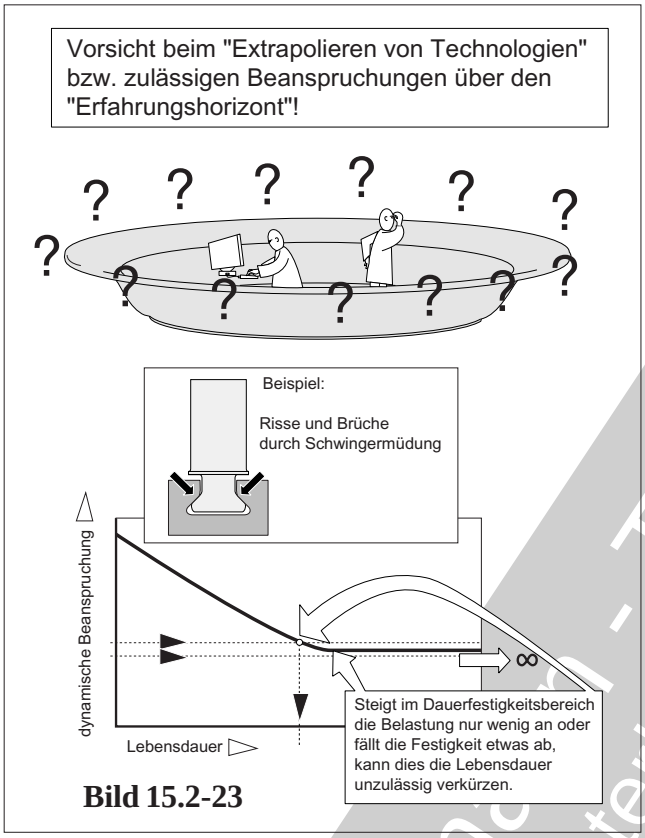


Bild 15.2-23

Bild 15.2-23: *Der* ***Erfahrungshorizont*** *beschreibt die Grenzen des Betriebs in dem sich Bauteil, Technologie, Konstruktion und Auslegung bewährt haben. Der* ***Erfahrungshorizont sollte in einer spezifizierten Auslegung (z.B. Konstruktionshandbuch) festgeschrieben*** *sein.*

Es gibt eine Menge Beispiele aus der Triebwerkstechnik in denen eine ***Extrapolation den Erfahrungshorizont nur scheinbar geringfügig überschritt****. Die Folge war, dass trotz der empirischen Entwicklung eine Realisierung nicht mehr möglich war und/oder es kam zu hohen Schadensraten. Eine solche Situation kann auf verschiedenen Gebieten wie Festigkeit, Verfahrenstechnik Aerodynamik (Beispiel 15.2-4.2) und Betriebsbeanspruchungen (Lit. 15.2-34, Beispiel 15.2-4.1) eintreten.*

Beispielsweise kann eine auslegungsgemäße Flächenpressung, welche die in Betriebserfahrungen abgesicherten Grenzen übersteigt, nach inakzeptabel kurzen Laufzeiten zu Schwingbrüchen führen (Diagramm). Dies ist der Fall, wenn die dynamische Beanspruchung auf Grund der Belastungsänderung und/oder einem Schwingfestigkeitsabfall, die Dauerfestigkeit übersteigt. Eine bereits gefährliche Erhöhung der dynamischen Beanspruchung kann mit der Betriebszeit auf einen Anstieg der Reibkräfte an den Auflageflächen zurückzuführen sein. Selbst wenn sich die Belastung nicht erhöht hat, kann ein Abfall der nutzbaren Schwingfestigkeit durch Einflüsse wie Fretting oder Mittelspannungserhöhung zu einem gravierenden Lebensdauerverlust beitragen.

Daraus ergibt sich:

Beispiel 15.2-4.2 (Lit 14-22):

Zitat: „...According to ...(the OEM) the ...(engine) burns some 6 percent more fuel than original estimates, a discovery that will likely force the company to redesign the high pressure compressor...The source of the fuel-efficiency problem appears to stem from ...(the OEM's) aim to make the engine simpler and lighter by minimizing the number of stages in the high-pressure compressor. But the...five-stage design may place too much strain on each stage of the compressor...The ...(OEM) has considered, adding another stage and using lighter blades and discs throughout the compressor to compensate for the resulting weight increase..."

Kommentar: Offenbar wurde der Erfahrungshorizont des Verdichterdesigns soweit überschritten, dass in der fortgeschrittenen Entwicklungsphase eine Umkonstruktion unvermeidlich wurde. Damit gerät der Erfolg des gesamten Projekts in Gefahr.

Auch scheinbar geringfügige Extrapolationen im Rahmen einer empirischen Entwicklung über den Erfahrungshorizont können hoch riskant sein. Im Zweifelsfall muss die ausreichende Erfahrung rechtzeitig erarbeitet werden.

© Axel Rossmann - Trainingsunterlagen

Es ist ein großer Unterschied, ob ich eine Technologie lediglich zur Erhöhung der Sicherheit nutze oder sie Teil der Auslegung ist.

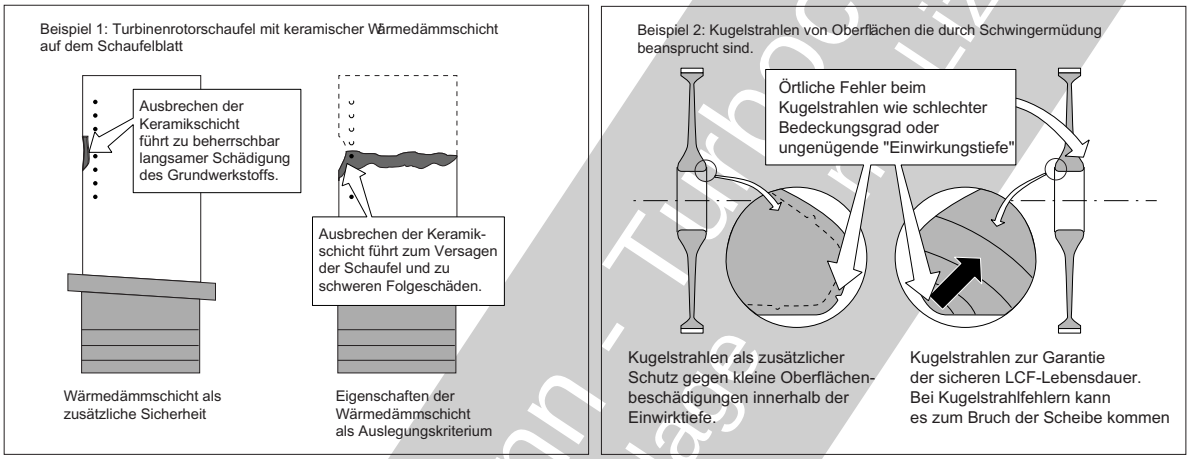


Bild 15.2-24

Bild 15.2-24: *Das Entwicklungsrisiko ist besonders von der Berücksichtigung einer Technologie in der Auslegung, abhängig.*

Eine Technologie als Bestandteil der ***Lebensdauerauslegung*** *erfordert einen sehr viel höheren Entwicklungsaufwand und hat deshalb ein deutlich höheres Entwicklungsrisiko als eine Technologie die lediglich zur* ***Schadensminimierung*** *angewendet wird.*

Typische Beispiele sind die Anwendung von ***Wärmedämmschichten*** *(Skizze oben. Band 1, Bild 5.6.1.4.2-5, Band 3, Bild 12.2.1.8-1, Lit. 15.2-35) für eine Anhebung der Gastemperatur und des* ***Kugelstrahlens*** *zur Erhöhung der Ermüdungslebensdauer (Skizze unten; Bild 15.2-7). Solange diese Technologien zur Absicherung einer Lebensdauer, die auch ohne sie erreicht werden kann, dienen, tragen sie zur Sicherheit bei.* ***Benötigt die Auslegung jedoch diese Technologien um eine bestimmte Lebensdauer überhaupt erst möglich zu machen, erhöht sich das Versagensrisiko****.*

Bild 15.2-25 *und* ***Bild 15.2-26:*** *Voraussetzung für den Erfolg einer* ***revolutionären Technologie*** *ist, dass sie zur Serienanwendung kommt. Hier sind jedoch bestimmte Bedingungen zu erfüllen:*

- Die spezifischen Vor- und Nachteile einer Technologie müssen erkannt und verstanden sein. Nur so ist es möglich, die notwendigen Entwicklungsschritte für einen erfolgreichen Einsatz zu definieren.

- Alle Auslegungs-, Gestaltungsspezifikationen und Richtlinien müssen erarbeitet und abgesichert sein. Die Qualität als Basis der Auslegung muss gewährleistet sein.

- Bereits die Projekt- und Entwurfsphase muss die optimale Nutzung der Vorteile der einzusetzenden Technologie berücksichtigen.

Das heißt, die Entwicklung von Technologien muss langfristig angelegt sein (Bild 15.2-36).

© Aßmann - Turbocomt
als Vorlesungsunterlage

Technologische Entwicklung: Risikominimierung

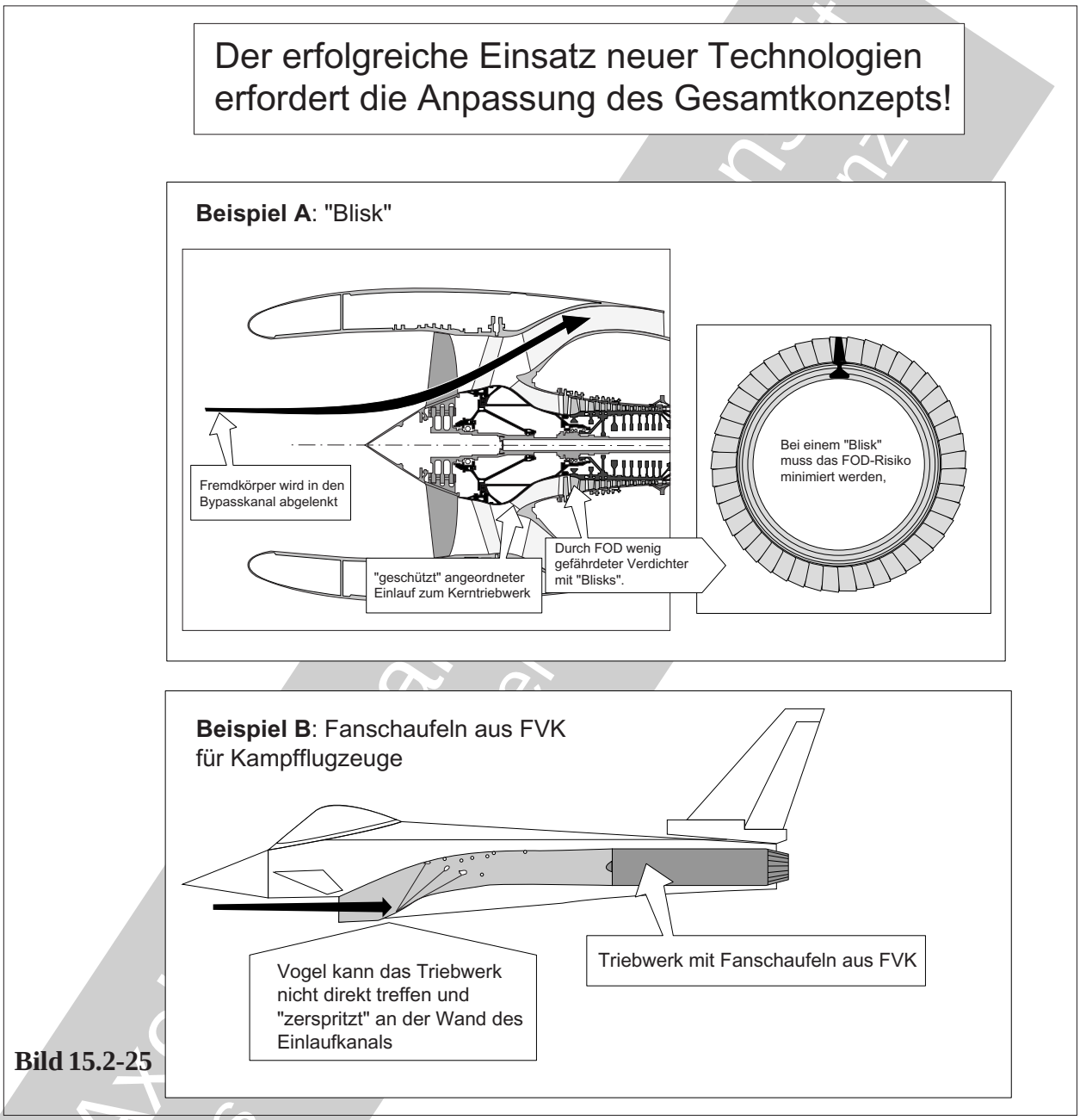


Bild 15.2-25

*Sie muss **bereits vor einer Projektphase erarbeitet** sein. In der Anfangsphase ist Technologieentwicklung in eine langfristige Strategie, unabhängig von einem bestimmten Projekt, einzubinden. Die folgenden Beispiele zeigen die Notwendigkeit dieser Forderungen:*

***Beispiel A:** Die Reparatur- und Logistikproblematik eines Blisk erfordert eine möglichst geringe FOD-Schadensrate. Diese lässt sich mit einer geeigneten Gestaltung des Fanbereichs und HDV-Eintritts erreichen. Der zum Bypasskanal schräg angeordnete HDV-Eintritt lenkt angesaugte Fremdkörper ab (Lit. 15.2-33).*

***Beispiel B:** Um **FVK-Verdichterschaufeln und andere FVK-Bauteile (Gehäuse, Spinner) in einem Kampfflugzeugtriebwerk** einsetzen zu können, muss das Vogelschlagrisiko(Band 1 Kapitel 5.2.2) minimiert werden (Bild 15.2-14, Lit. 5.2-33). Mit einer geeigneten Krümmung des Ansaugkanals lässt sich ein direkter Aufschlag des Vogels im*

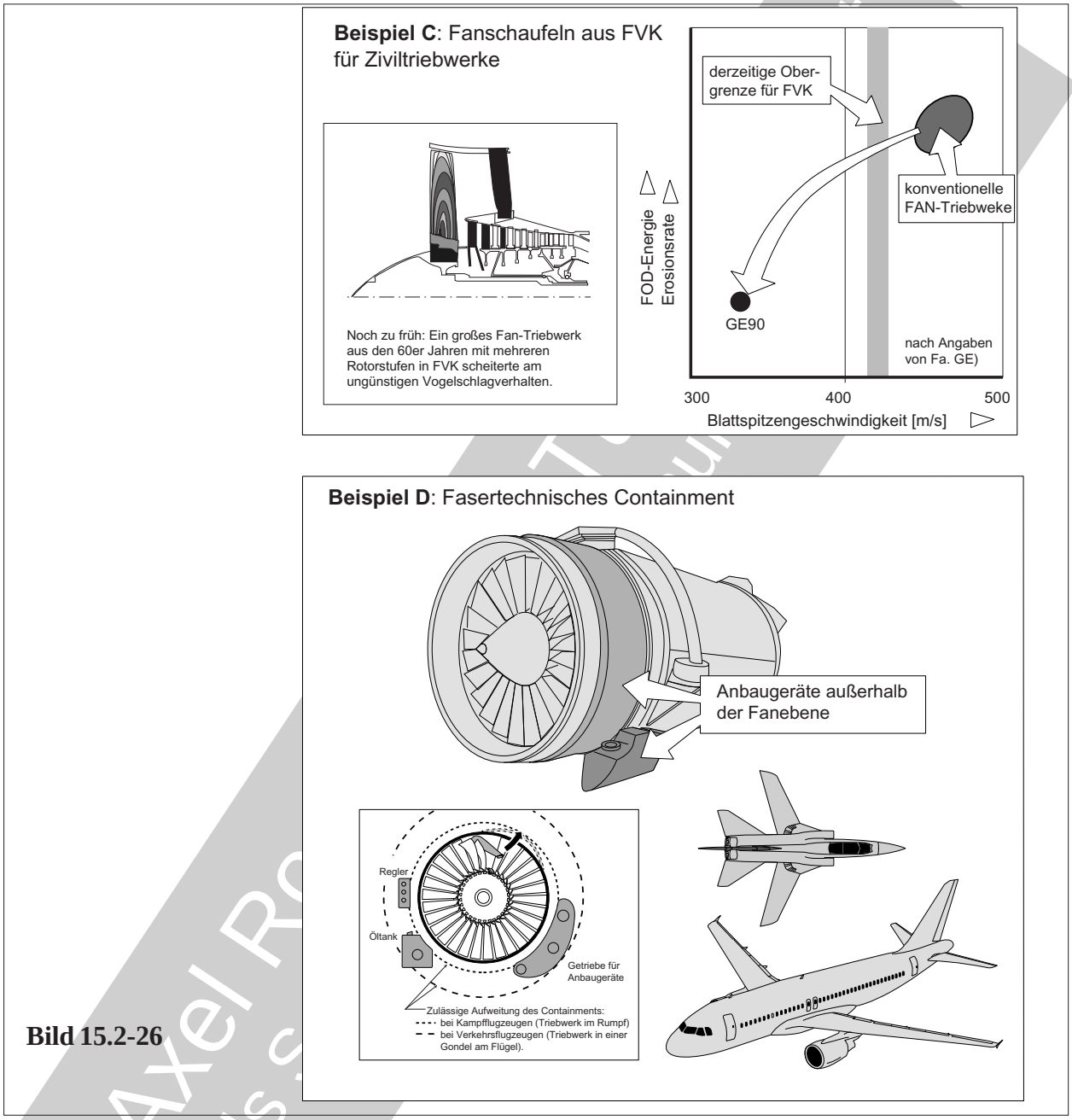


Bild 15.2-26

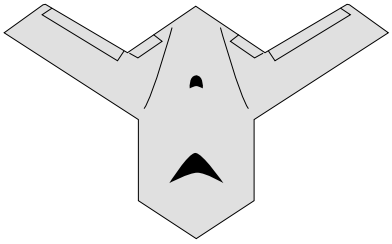
Fanbereich vermeiden. Trifft der Vogel zuerst auf die Wand des Ansaugkanals „zerspritzt" er und die Schaufelbelastung wird mit den kleinen Teilchen minimiert.

Beispiel C: *Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass sich* ***FVK-Fanrotorschaufeln*** *bei ausreichender Masse nur unterhalb einer bestimmten Umfangsgeschwindigkeit (Aufschlaggeschwindigkeit des Vogels) sicher einsetzen lassen (Diagramm oben rechts, Lit. 15.2-27). Dies ist bei der Auslegung und Gestaltung des Fan zu berücksichtigen (Bild 15.2-14 und Lit. 15.2-34).*

Beispiel D: *Ein gewichtsoptimiertes* ***fasertechnisches Containment*** *erfordert eine ausreichende radiale Aufweitung. Diese darf nicht von Anbauaggregaten beeinträchtigt werden. D.h. die Anbringung der Anbauaggregate muss bereits das Containmentkonzept berücksichtigen.*

Technologische Entwicklung: Risikominimierung

Die technologischen Probleme der einen Anwendung können die Vorteile einer anderen Anwendung sein.



Unbemannte Kampfflugzeuge (UAV):

Betriebszeit: Größenordnung 10^2 Stunden
Vogelschlag: nicht relevant
Erosion: nicht relevant
Wartung: möglichst keine
Reparatur: keine

Technologien: revolutionär (z.B. Keramik, Fasertechnik)

Kampfflugzeuge:

Betriebszeit: Größenordnung 10^3 Stunden
Vogelschlag: Auslegungskriterium
Erosion: Lebensdauerrelevant
Wartung: großer Aufwand
Reparatur: großer Aufwand
Technologien: evolutionär

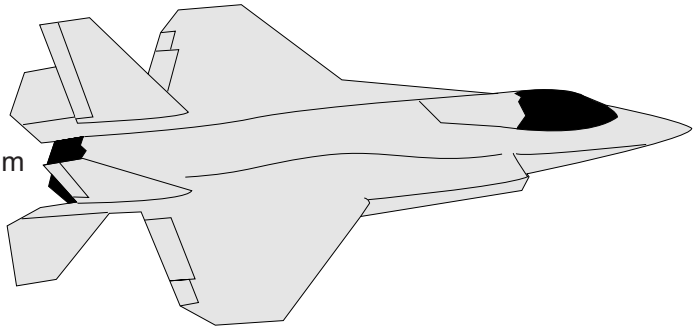


Bild 15.2-27

Bild 15.2-27: Schwächen einer Technologie *können je nach Anwendung sehr unterschiedliche Bedeutung haben. Was in einem Fall die Anwendung verhindert, kann in einem anderen Fall akzeptabel oder vorteilhaft sein. Ein typisches Beispiel sind Technologien für Triebwerke unbemannter Kampfflugzeuge. Im Vergleich zu bemannten Kampfflugzeugen sind wahrscheinlich deutlich niedrigere Lebensdauern erforderlich. Eine oxidationsbedingte begrenzte Lebensdauer faserverstärkter Kramiken kann toleriert, und so Vorteile nutzbar werden. Dem intensiven Einsatz von FVK-Werkstoffen im Verdichter dürften Erosionsprobleme und die Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Vogelschlags nicht mehr im Wege stehen. Der Aufwand für Lebensdauernachweise dürfte vergleichsweise niedrig sein. Ausnahmsweise besteht damit die die* ***Möglichkeit revolutionärer Entwicklungsschritte****, die bei Antrieben bemannter Kampfflugzeuge nicht gewagt werden können..*

Bild 15.2-28:

Der Einsatz einer Technologie erfordert die optimale Nutzung deren Vorteile. Dazu müssen besondere Konstruktionsmerkmale die spezifischen Nachteile auf ein akzeptables Maß entschärfen.

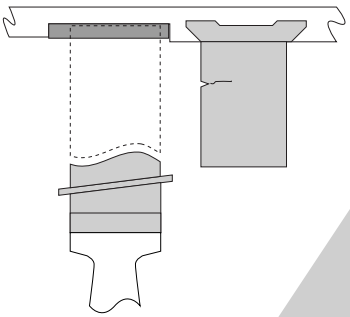
Für den Einsatz einer Technologie ist der ***Sicherheitsaspekt*** *besonders wichtig. FVK-Leitschaufeln in Verdichtern von Kampfflugzeugen sind dafür ein gutes Beispiel.*

© Axel Poss Ausstellungsgesellschaft

Technologische Entwicklung: Risikominimierung

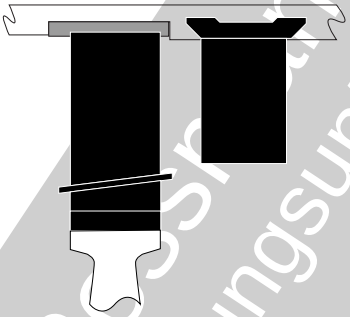
Um neue Technologien erfolgreich zum Einsatz zu bringen, müssen die Sicherheitsphilosophien so abgestimmt werden, dass die besonderen Vorteile optimal genutzt werden.

metallische Beschaufelung



Vorteile	Nachteile
- Zäh (duktil)	- schwer
- Schlagunempfindlich	- Schwingermüdung
- Erosionsfest	- kerbempfindlich
- bei Impact geringe Auslenkung	- große Folgeschäden
- Warmfestigkeit	- geringe Dämpfung

Schaufeln aus Faserverstärktem Kunststoff



Vorteile	Nachteile
- gutmütiges Verhalten gegenüber Schwing-beanspruchung	- bei Impact große Auslenkung
- hohe Dämpfung	- impactempfindlich
- leicht	- erosionsempfindlich
- geringe Folgeschäden	- niedrige Warm-festigkeit
- Kerbunempfindlich	
- Werkstoffdaten im Bauteil optimierbar	

Bild 15.2-28

Die Forderung nach akzeptabel geringen Schäden im Falle eines Vogelschlags verhinderte lange Zeit FVK-Schaufeln in Leitapparaten hinter der ersten Rotorstufe. Die filigranen Leitapparate aus Titanlegierungen moderner Kampfflugzeuge und die hohen Fluggeschwindigkeiten in Bodennähe zeigten, dass bei einem „High-speed-impact“ (Band 1, Bild 5.2.2-12, Lit. 15.2-33) auch ***mit einem Bruch der metallischen Schaufeln*** *zu rechnen ist. Unter dieser Voraussetzung bieten* ***FVK Schaufeln den Vorteil****, dass diese bei einem Bruch nur* ***geringe Folgeschäden*** *erwarten lassen und so einen Sicherheitsvorteil gegenüber metallischen Schaufeln bieten.*

Eine geänderte Sicherheitsphilosophie erfordert die ***frühzeitige Abstimmung mit den Zulassungsbehörden****. Zu klären sind auch Nachweise ausreichender Betriebseigenschaften.*

Werden Behörden spät eingeschaltet, besteht der berechtigte Verdacht, dass ein Entwicklungsziel nur mit Zugeständnissen erreicht werden kann. Damit werden gute Argumente suspekt bzw. entwertet.

© Axel Rossmann - Turboconsult
Ausschulungsunterlage nur mit Lizenz

Erfolgreiche Konstruktionsphilosophien nutzen spezifische Vorteile der Werkstoffe.

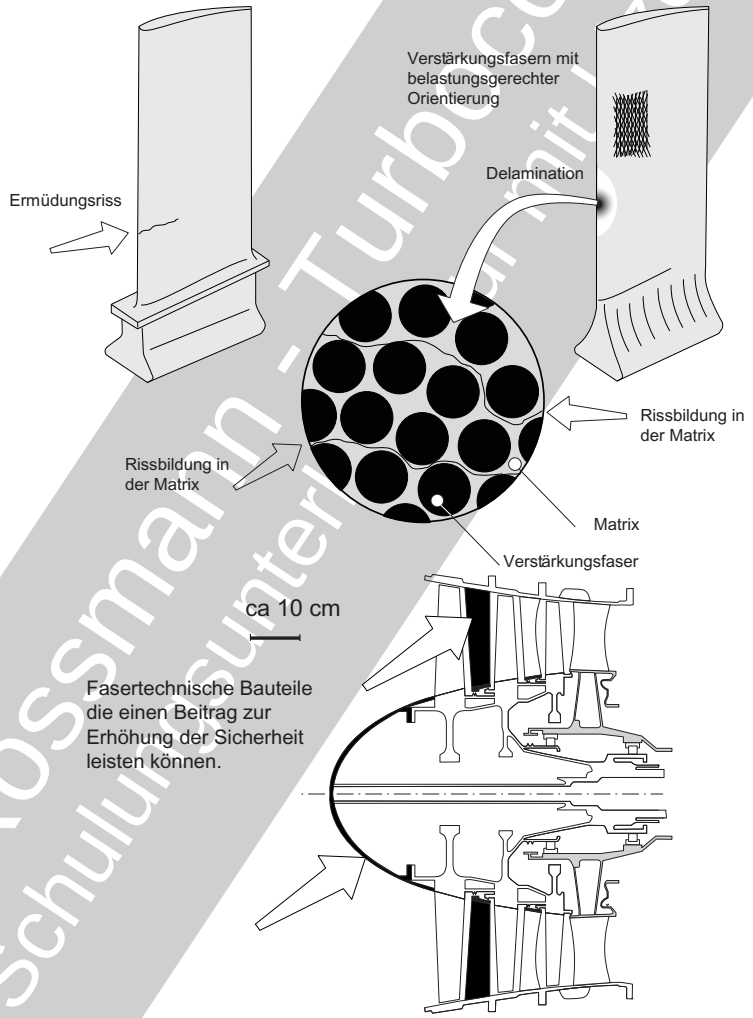


Bild 15.2-29

Bild 15.2-29: FVK-Verdichterschaufeln haben wichtige Vorteile *gegenüber metallischen Schaufeln (Bild 15.2-28). Von besonderer Bedeutung ist das günstige Verhalten gegenüber* ***Schwingermüdung****. Bereits bei der Auslegung lässt sich das selbe Schaufelprofil durch Variation der unterschiedlich orientierten Faserlagen in seinen* ***Eigenfrequenzen beeinflussen*** *und hilft so Resonanzen zu vermeiden.*
Die hohe ***Dämpfung*** *des FVK-Werkstoffs lässt diese Schwinganregungen tolerieren, die für metallische Schaufeln gefährlich wären.*

Der ***Versagensmechanismus bei Schwingermüdung*** *erfolgt nicht wie bei Metallen mit einem kaum beherrschbar schnellen Rissfortschritt. Die Ermüdung führt bei FVK zur* ***Delamination*** *(Auflösung entlang der Faserlagen, Bild 15.2-30) ohne gefährliche Faserbrüche. Damit erhöht sich die Dämpfung, während eine ausreichende Zugfestigkeit noch gewährleistet ist. So entsteht ein gewisses* ***„Fail-save-Verhalten“****. Eine solche Schädigung ist bei Inspektionen rechtzeitig erkennbar. Das Schadensrisiko wird so gegenüber Ermüdung deutlich minimiert.*

©Axel Rossmann - Turbconsult
aus Schulungsunterlagen mit Lizenz

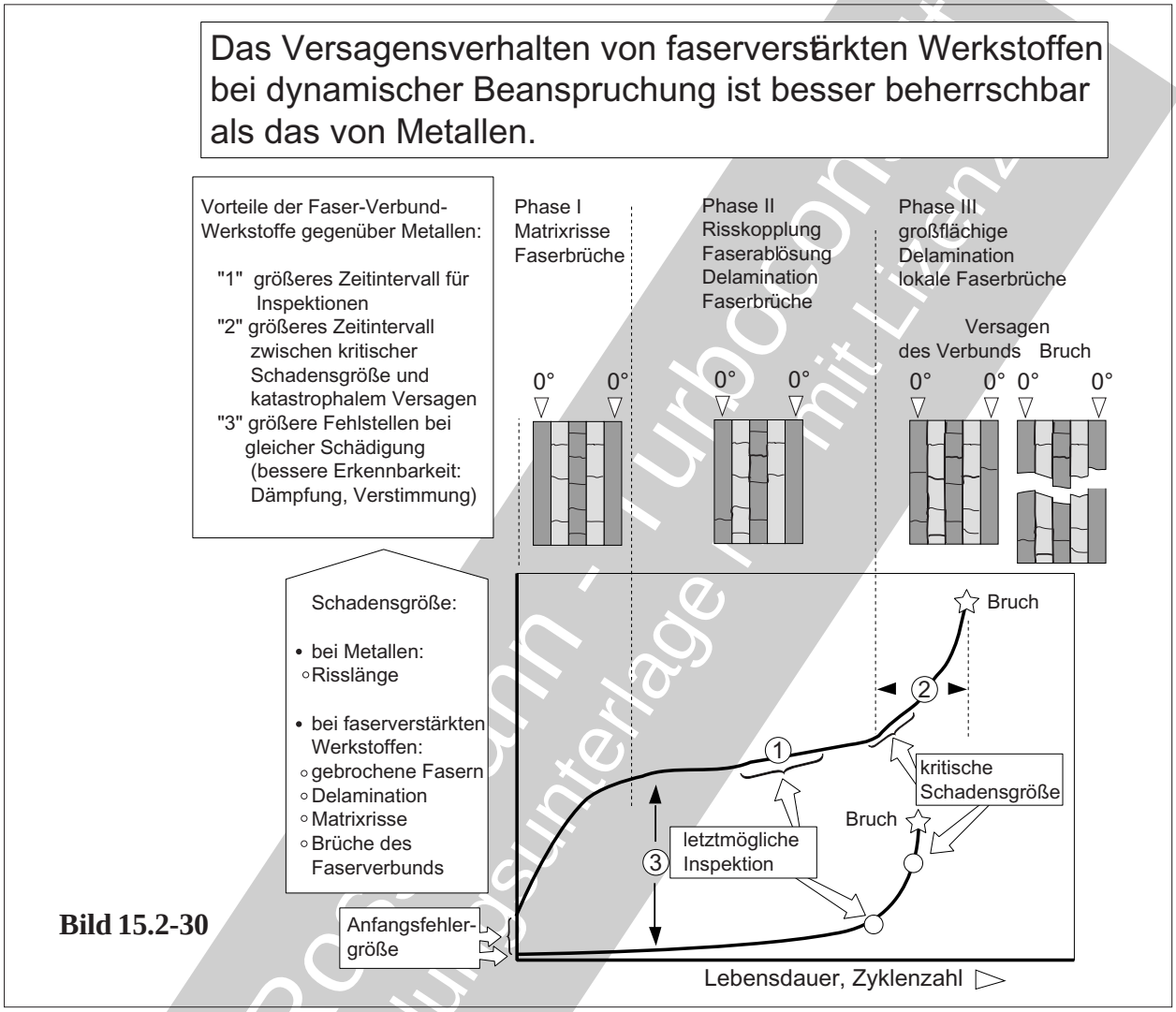


Bild 15.2-30

Bild 15.2-30 *(Lit 15.2-24):* ***Der „gutmütige" Versagensmechanismus von faserverstärkten Kunststoffen*** *(FVK) unter dynamischer Belastung (Bild 15.2-29) ist ein wichtiger Vorteil gegenüber homogenen metallischen Werkstoffen. Bei FVK-Werkstoffen ist wegen der* ***geringen Kerbempfindlichkeit*** *bereits eine Anrissschwachstelle relativ zu Metallen groß (obere Kurve). Davon ausgehend sind mehrere Schädigungsmodi (Matrixrisse, Delaminationen, Faserbrüche) möglich. Sie verteilen die eingeleitete dynamische Energie auf ein größeres Volumen . Das endgültige Versagen des Bauteils mit beschleunigtem Wachstum der Schädigung tritt erst bei einer relativ großen Schädigung ein. Entsprechend gut ist die Erkennbarkeit einer Schädigung wie Delamination mit deutlichem Steifigkeitsabfall (Bild 15.2-31). In homogenen metallischen Werkstoffen ist der Fehler, an dem der Anriss beginnt, vergleichsweise klein (untere Kurve). Typischer Schadensmodus ist der Rissfortschritt. Der Riss bleibt lange klein, um dann beschleunigt anzuwachsen. Die Zeitspanne bis zum Erreichen der kritischen Rissgröße und Bruch des Querschnitts ist im Vergleich zu FVK kurz. Insgesamt benötigt der Schadensfortschritt bei vergleichbarer Belastung im FVK länger als im metallischen Werkstoff. Dieses Verhalten bedeutet für FVK-Teile eine größere Chance ein Versagen unter dynamischer Beanspruchung rechtzeitig abzufangen.*

Bild 15.2-31 *(siehe auch Band 1 Bild 3-12):* ***Unterschiedliches werkstoffspezifisches Versagen*** *ist in der Konstruktion zu berücksichtigen. Wird z.B. ein einseitig eingespannter me-*

© AVIO Rolls-Royce Deutschland - Turbomeca - Lizenzausgabe für Lufthansa Technik AG mit Lizenz

Bild 15.2-31

tallischer Träger mit aufgedicktem Einspannquerschnitt statisch biegebelastet (Skizze oben) erfolgt plastische Verformung und Rissbildung quer zur Oberfläche. Der Riss führt zu beschleunigtem Festigkeitsverlust und zum Bruch.

Ein Biegebalken aus faserverstärktem Kunststoff (FVK) mit einer ***Verstärkung an der Einspannung*** *(Skizze: faserverstärkter Werkstoff „1“) wird zwar in der gleichen Bauteilzone wie der metallische versagen. Der* ***Versagensmodus*** *läuft jedoch mit einem A****bheben der oberflächennahen Lagen****, also einer Rissbildung längs der Oberfläche ab. Dabei ist der Festigkeitsabfall vergleichsweise moderat, denn die delaminierten Faserlagen können Zugkräfte übernehmen. So* ***kündigt sich der Bruch rechtzeitig an und kann somit abgefangen werden****. Besonders gefährdet sind* ***hohle Biegeträger****, z.B. Sandwichstrukturen oder Rohre aus FVK. Sie sind empfindlich für ein* ***Ausknicken auf der Druckseite*** *(Lit. 15.2-32). Dies gilt besonders bei* ***örtlicher Beschädigung****. Das ist auch bei* ***Reparaturen*** *zu beachten.*

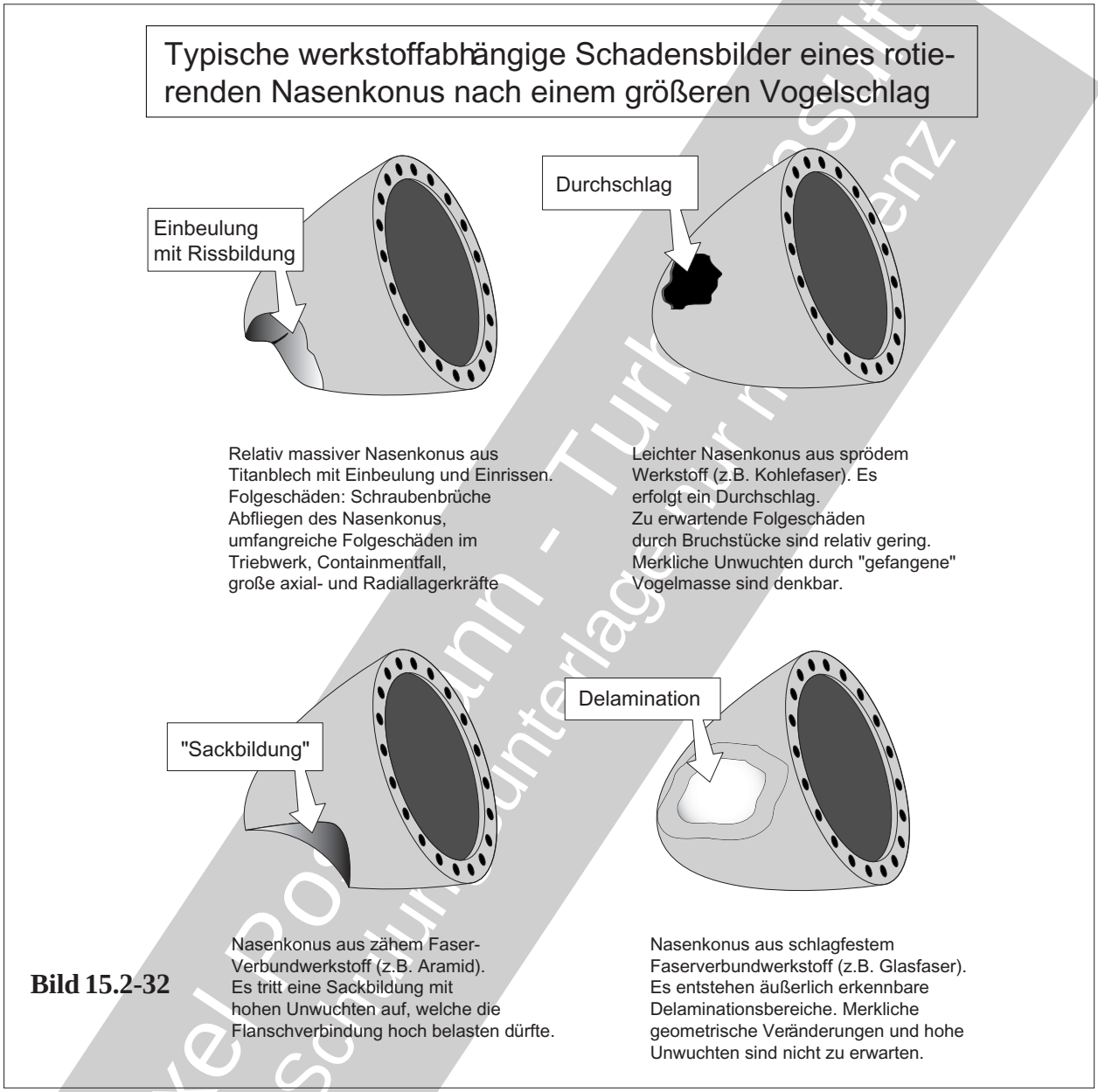


Bild 15.2-32

Bild 15.2-32: *Im dargestellten Beispiel zeigen ein aus Titanblech hergestellter (oben links, Lit 15.2-34) und unterschiedliche* ***FVK-Spinner*** *(rotierende Nasenconi) beim* ***Vogelschussversuch*** *sehr verschiedene Eigenschaften. Diese Versuche lassen erkennen, dass sich erwartete Vorteile „neuer Fasern“ und „neuer Harze“ nicht im Bauteilverhalten unter* ***Schlagbeanspruchung*** *realisieren lassen. Das umso mehr, wenn eine Kunststoffmatrix bei* ***Hochgeschwindigkeitsbeanspruchung einen ausgeprägten Versprödungseffekt*** *aufweist (typisch für PEEK, Lit. 15.2-34).*

Der für dieses Bauteil günstigste Werkstoff bleibt ein seit Jahren ***bewährtes glasfaserverstärktes Epoxidharz****.*

Merksatz:

*Erst a****usreichend betriebsnahe Versuche*** *lassen Probleme und Vorteile einer Technologie erkennen. Grundsätzlich gilt:*
Was man nicht ***selbst entwickelt oder zumindest nachvollzogen*** *hat, ist wahrscheinlich* ***nicht ausreichend verstanden****. Das führt zu einem hohen Risiko der Serieneinführung.*

©Axel Pohlmann - Turbomasch
ausschließlich Unterlagen für nicht-kommerz

Eine Grundregel der technologischen Entwicklung:

Die Ermittlung von Werkstoffdaten muss den gesamten Fertigungsprozess einbeziehen und an ausreichend originalgetreuen Bauteilen erfolgen.

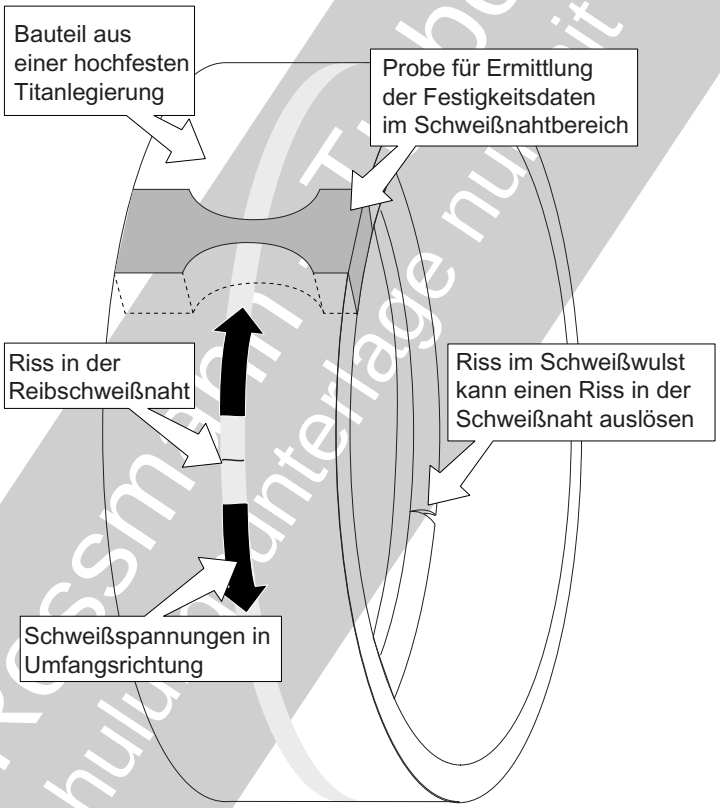


Bild 15.2-33

In diesem Beispiel muss das Bauteil vor der Probenentnahme alle serienrelevanten Fertigungsschritte wie Wärmebehandlungen durchlaufen haben! Wärmebehandlungen an einer vorher entnommenen Probe finden z.B. ohne schadenspotenzielle Ringspannungen statt.

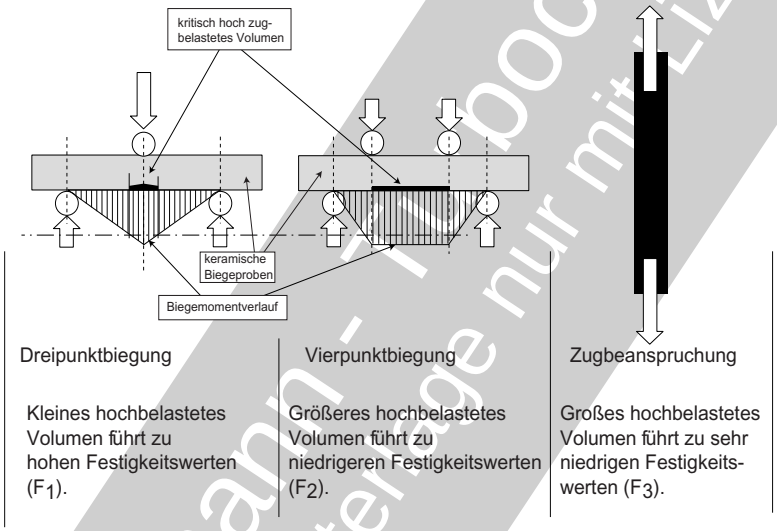
© Axel Rossmann, Turbomsuit
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 15.2-33: Werkstoffdaten *sind die Basis der Auslegung und somit entscheidend für die Sicherheit des Bauteils. Aus diesem Grund*

müssen die Eigenschaften einer Probe dem Bauteil, für dessen Auslegung sie dienen sollen, ausreichend entsprechen.

Siehe hierzu auch Band 1 Bild 5.4.2.2-5 und Bild 5.4.3.2-3. ***Separat hergestellte Proben*** *unterscheiden sich häufig von späteren Serienteilen in Werkstoff- und Bearbeitungszustand. Bevor ein Serieneinsatz ins Auge gefasst werden kann, müssen Kennwerte aus Proben repräsentativer Bauteile ermittelt werden. Damit ist auch auf die Lage der Probe im Bauteil zu achten. Falls besondere Technologien, z.B. Fügetechniken, zur Anwendung kommen, ist deren Einfluss auf die Auslegungsdaten unter den genannten Gesichtspunkten zu bestimmen.*

Bei spröden Werkstoffen, insbesondere Keramiken hängt der Festigkeitswert in hohem Maß von der Probengröße ab. Bauteile mit relativ großem belasteten Volumen bzw. großer Oberfläche(z.B. Rotorscheiben) müssen deshalb für eine ausreichende Ausfallwahrscheinlichkeit entsprechend niedrig belastet werden!



Nach Weibull ergibt sich bei gleicher Ausfallwahrscheinlichkeit:

für Volumenfehler: $\sigma_2 / \sigma_1 = (V_1 / V_2)^{1/m_V}$

für Oberflächenfehler: $\sigma_2 / \sigma_1 = (O_1 / O_2)^{1/m_O}$

"m" ist der sog. Weibullparameter, ein Werkstoffkennwert für die Streuung.

daraus folgen prüfungsabhängige Festigkeitswerte:

$F_1 > F_2 > F_3$

Bild 15.2-34

Bild 15.2-34 *(Lit 15.2-25 und Lit 15.2-31):* ***Spröde Werkstoffe*** *wie Keramiken sind besonders kerbempfindlich und reagieren bereits auf sehr kleine Fehlstellen mit Rissbildung und Bruch. Dieses Verhalten führt zu einer merklichen Abhängigkeit der Festigkeit von der Fehlerwahrscheinlichkeit. J****e größer das kritisch hoch belastete Volumen bzw. die Oberfläche (abhängig von der Fehlerlage), um so kleiner ist die nutzbare Festigkeit****. Die Messwerte werden merklich von Größe und Spannungsverteilung in der Probe beeinflusst (Band 1, Bild 5.2.1-9 und Bild 5.2.1-10). Selbst bei gleicher Probengeometrie ergibt eine Dreipunktprüfung höhere Werte als eine Vierpunktprüfung. Die niedrigsten Werte lässt die Zugprobe erwarten. Bei dominierendem Oberflächeneinfluss wirken sich bereits kleine Unterschiede in Bearbeitung und Behandlung auf die Festigkeit aus. Aus diesem Grund gilt:*

Festigkeitswerte spröder Werkstoffe *müssen besonders kritisch auf die Relevanz der Probeneigenschaften für die Anwendung überprüft werden.* ***Prospektangaben*** *ohne genaue Angaben zur Prüfung sind für eine Auslegung ungeeignet.*

© Axel Rossmann - Powerpoint Ausgabe nur mit Lizenz

Technologische Entwicklung: Risikominimierung

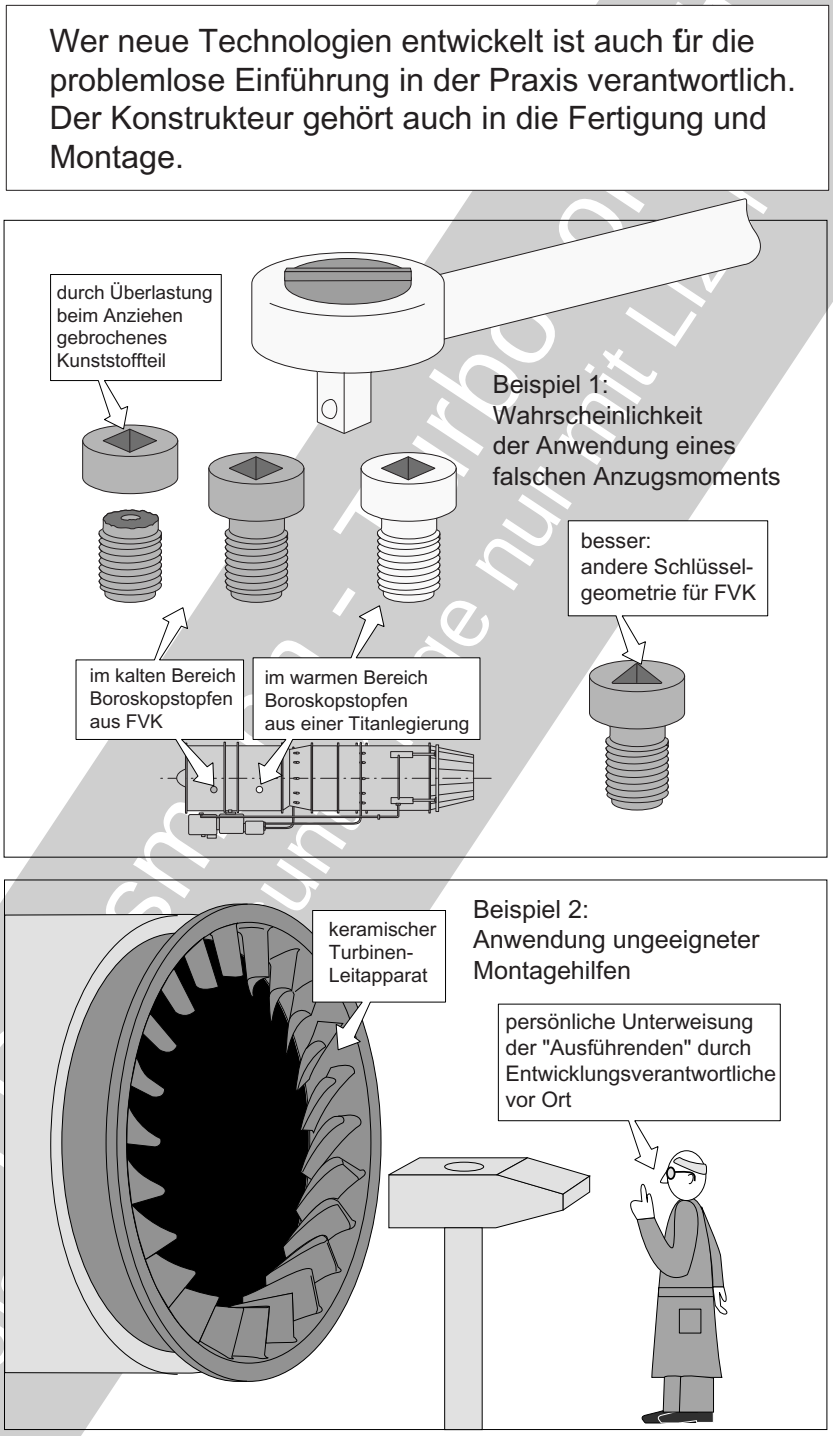


Bild 15.2-35

Bild 15.2-35: *Zu einer Technologie gehört die problemlose Beherrschung von* ***Wartung und Montage****. Dafür hat auch der Konstrukteur zu sorgen (Bild 15-28).*

Um das Risiko besonderer Eigenschaften wie niedrigere Festigkeit oder Sprödigkeit in akzeptablen Grenzen zu halten, müssen ***Vorgehensweisen und Konstruktionsmerkmale*** *entwickelt, erprobt und spezifiziert werden.*

Technologische Entwicklung: Risikominimierung

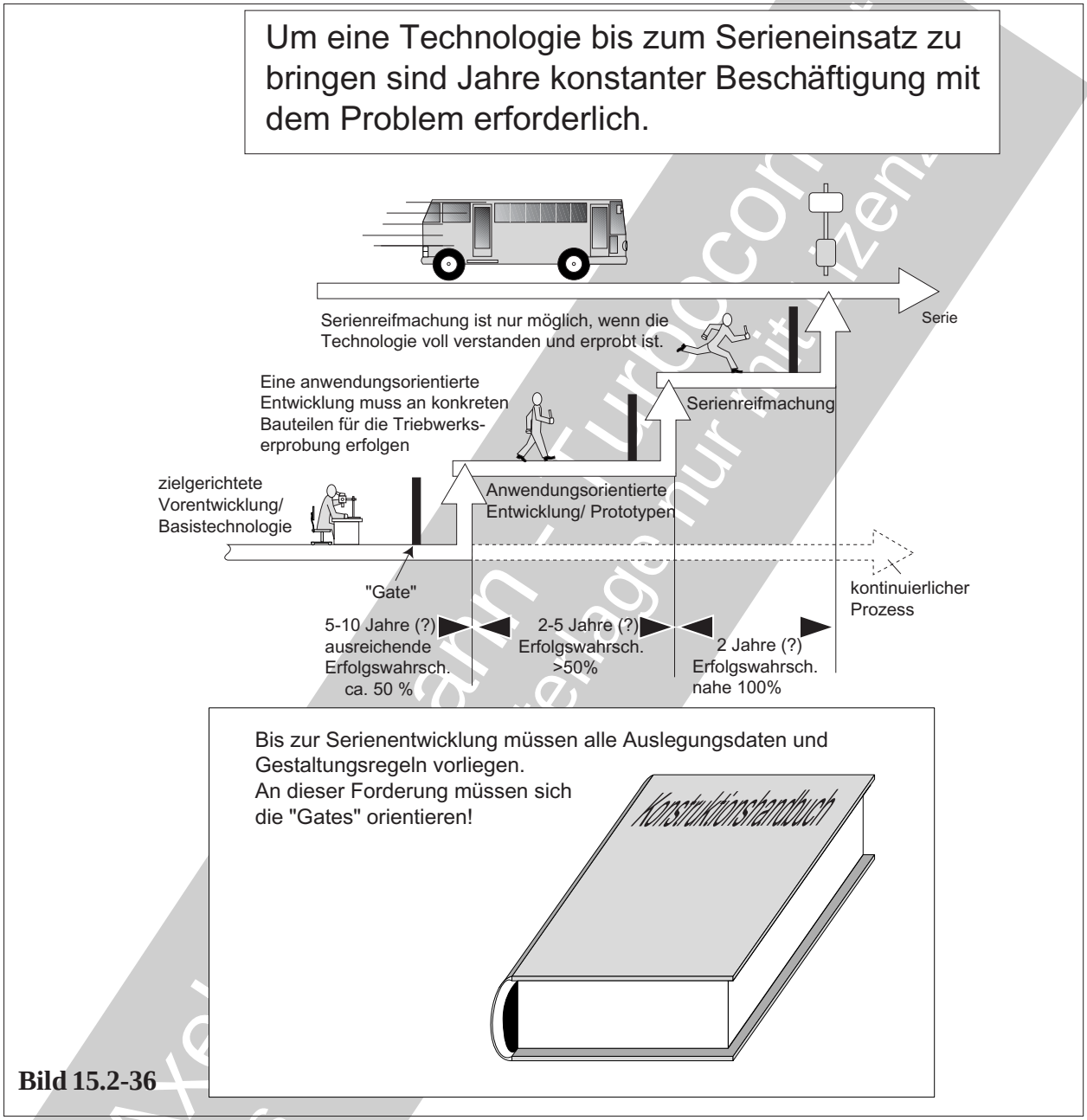


Bild 15.2-36

Bild 15.2-36: *Die Entwicklung von Technologien erfordert* ***strategisches Denken und langfristige Planung****. Es ist mit 5-Jahresschritten zu rechnen. Während solcher Schritte sind Zwischenprüfungen sinnvoll. Am Ende eines Schritts muss eine* ***Revision*** *zeigen, ob und wie gegebenenfalls weiter zu verfahren ist.*

Die Serienreife ist erst erreicht, wenn alle zur Auslegung, Konstruktion, Fertigung und Betrieb notwendigen Kenntnisse erarbeitet und spezifiziert sind.

Erst dann kann der Einsatz in einem Serienprojekt erwogen werden. Eine technologische Entwicklung, die notwendigerweise langfristig ist, kann daher nicht mit dem Argument abgelehnt werden, dass innerhalb kurzer Zeit kein Serienprojekt zu erwarten ist.

Bild 15.2-37: *Auch vergleichbar kurze* ***Prüfläufe*** *können zur Haltbarkeit von Komponenten und Technologien in Triebwerken wichtige Hinweise geben (Lit. 15.2-350). Voraussetzung ist eine* ***sehr genaue Untersuchung potentieller Problemzonen****. Um diese zu identifizieren*

Technologische Entwicklung: Risikominimierung

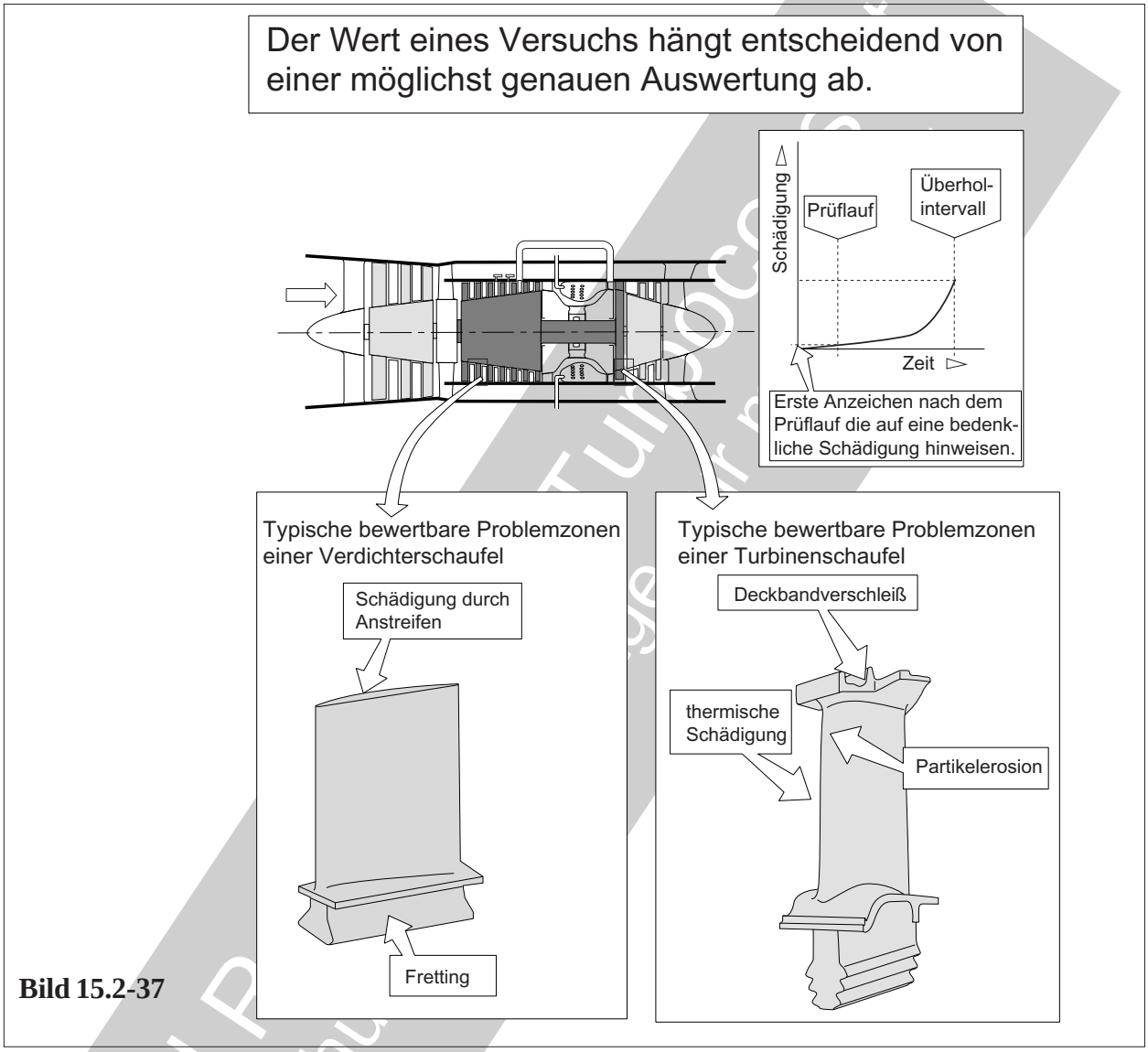


Bild 15.2-37

ist besonders Erfahrung erforderlich. ***Erste Anfänge einer bedenklichen Schädigung*** *sollten erkannt werden. Entsprechend einem schädigungsspezifischen zeitlichen Ablauf können solche Anzeichen nach den relativ kurzen Laufzeiten sehr schwach sein (Skizze oben rechts). In dem vorgesehenen Überholintervall der Serienanwendung können sie sich aber gefährlich entwickeln. Damit besteht die Gefahr, dass sie unterschätzt werden.*

Nicht selten wird versucht, den erheblichen Aufwand ausreichend intensiver ***Nachuntersuchungen*** *zu minimieren. Diese Kosten werden dann im Budget nicht vorgesehen. Auf diese Weise wird der Prüflauf lediglich zu einem Funktionsnachweis für Bauteile ohne typische Betriebsschädigungen. So wird das Risiko von Langzeitschäden und hohen Folgekosten erhöht .*

Zur Beherrschung dieser kosten- und prestigeträchtigen Schadensrisiken ist die ***Auswertung von Prüflaufteilen*** *von großer Bedeutung. Sie ist deshalb möglichst genau zu planen (z.B. Schwachstellen) und von erfahrenen Fachleuten durchzuführen, genauestens zu dokumentieren und die Ergebnisse zu bewerten. Danach ist entsprechend einem festgeschriebenen Ablauf vorzugehen, der notwendige Aktivitäten gewährleistet.*

Literatur zu Kapitel 15.2

15.2-1 S.F. Powel IV, „On the Leading Edge: Combining Maturity and Advanced Technology on the F404 Turbofan Engine“, Paper No. 40-GT-149 des „35th International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition“, Brussels, Belgium, June 11-14, 1990, veröffentlicht in „Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, January 1991, Vol. 113, Seite 1-10.

15.2-2 J. Kumpfert, M. Peters, W.A. Kaysser, „The Potential of Advanced Materials on Structural Design of Future Aircraft Engines“, Proceedings des NATO-RTO Symposium on „Design Priciples and Methods for Aircraft Engines“ , 11-15 May 1998, Toulouse, France. Seite 42-1 bis 42-12.

15.2-3 S.W. Kandebo, „GE and Allison Probe Core Engine Failure“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“ May 17, 1999, Seite 30.

15.2-4 C.H. Cook, C.E. Spaeth, D.T. Hunter, R.J. Hill, „Damage Tolerant Design of Turbine Disks“, ASME Proceedings Paper 82-GT-311, 1982, Seite 1-8.

15.2-5 K.F. Mordoff, „General Electric Testing 404 Derivative Engine“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, April 12, 1982, Seite 59-61.

15.2-6 „F-18 Fighter Crashes in England“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, September 15, 1980, Seite 20.

15.2-7 J.L. Bartos, „P/M Superalloys for Military Gas Turbine Applications“, Proceedings Paper des „1979 P/M in Defense Technology Seminar“ der MPIF, Yuma, Arizona, Seite 81-112.

15.2-8 „DMS Market Intelligence Report“, Gas Turbine Engines, 1982, Seite 5.

15.2-9 „Interavia Air Letter“, No. 9649, December 12, 1980, Seite 1 und 2 .

15.2-10 Zeitschrift „PM Powder Metallurgy“, 12, 1980, 4 Seite 507.

15.2-11 D.N. North, „Changes to F404 Engine Urged by Design Review“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, December 8, 1980, Seite 24.

15.2-12 H.J. Coleman, „Rolls Studies Coatings to Cut Erosion of Carbon Fan Blades“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, May 27, 1968, Seite 74.

15.2-13 G. Warwick, „GE confident of fan blade answer“, Zeitschrift „Flight International“, 21-27 June, 1995, Seite 5.

15.2-14 S.W. Kandebo, „New Engine Test Rules Contested“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, October 10, 1994, Seite 33.

© Axel Rossmann - Turbocoursult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

15.2-15 H.J. Coleman, „Rolls Nationalisation Clouds RB.211 Future“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, February 8, 1971, Seite 26.

15.2-16 P. Middleton, „RB.211: transatlantic bridgehead“, Zeitschrift „Flight International“, 5. November, 1970, Seite 709.

15.2-17 J.M.S. Keen, „Development of the Rolls-Royce RB.211 turbofan for airline operation“, Proceedings Paper 700292, des ASE „National Air Transportation Meeting“, New York, N.Y., April 20-23, 1970, Seite 5- 7.

15.2-18 E.M. Murman, M. Wallon, E. Rebentisch, „Challenges in the better, faster, cheaper era of aeronautical design, engineering and manufacturing“, Zeitschrift „The Aeronautical Journal“, October 2000, Seite 481-489.

15.2-19 S. Vajna, „Approaches of Knowledge-based Design“, Proceedings des „19th CAD-FEM Users’ Meeting 2001, International Congress on FEM Technology“, 17-19 October 2001, Berlin, Seite 1-9.

15.2-20 K-D. Thoben, F. Waber, M. Wunram, „ Pragmatic Approaches to Overcome Barriers in Knowledge Management“, Proceedings des „19th CAD-FEM Users’ Meeting 2001, International Congress on FEM Technology“, 17-19 October 2001, Berlin, Seite 1-9.

15.2-21 D.R. Hinghton, W.J. Chrispin, „ Future Advanced Aero-Engines - the Materials Challenge“, Proceedings AGARD CP-449 der Konferenz „Application of Advanced Material for Turbomachinery and Rocket Propulsion“, Seite 4-1 bis 4-10.

15.2-22 G. Polek, „Engine woes cast pall over first flight of A318“, Zeitschrift „Aviation International News“, February 2002, Seite 57.

15.2-23 S.W. Kandebo, „Upcoming Blade Tests Aimed at Growth GE90“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, May 31, 1999, Seite 40.

15.2-24 J.R. Schaff, „Fatigue and Life Prediction“, ASM Handbook, Volume 21, composites, Seite 252-258.

15.2-25 A. Rossmann, „Schadenuntersuchung und Schadenverhütung an Bauteilen der Ingenieurkeramik“, Buchreihe Kontakt & Studium, Expert Verlag, Band 308, H. Grosch, „Schadenskunde im Maschinenbau“, ISBN 3-8169-1202-8, 1990s, Seite 76-96.

15.2-26 W.H. Rentzsch, G. Willmann, „Ein einfaches Hilfsmittel zum Konstruieren mit Keramik“, Zeitschrift „Materialwissenschaft u. Werkstofftechnik“, 33, 2002, Seite184-189.

15.2-27 „GE 90 Program Summary“, Vortrag an der TU-München, Seminar des Instituts für Flugantriebe, November 1995.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

15.2-28 W. Hansen, G.F. Kaminske, „Praxishandbuch , Techniken des Qualitätsmanagements“ , Symposion Verlag, ISBN 3-933814-53-7, 2001, Seite 236-240.

15.2-29 M. Phelan, „NASA’s coating promises efficiency breakthrough“ , Zeitschrift „Flight International“, 11-17 March 2003, Seite30.

15.2-30 M.A. Taverna, „Ariane 5 EC-A Upgrade Faces Long, Costly Flight Delay“ , Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, January 13, 2003, 402-403.

15.2-31 D.R. Bush, „Designing Ceramic Components for Structural Applications“, Zeitschrift „Journal of Materials Engineering and Performance“, Volume 2 (6), December 1993, Seite 851-862.

15.2-32 S.Steinke, „Flügelverstärkung nach Strukturproblemen, noch kein neuer Zeitplan für 787“, Zeitschrift „Flug Revue“, September 2009, Seite 32.

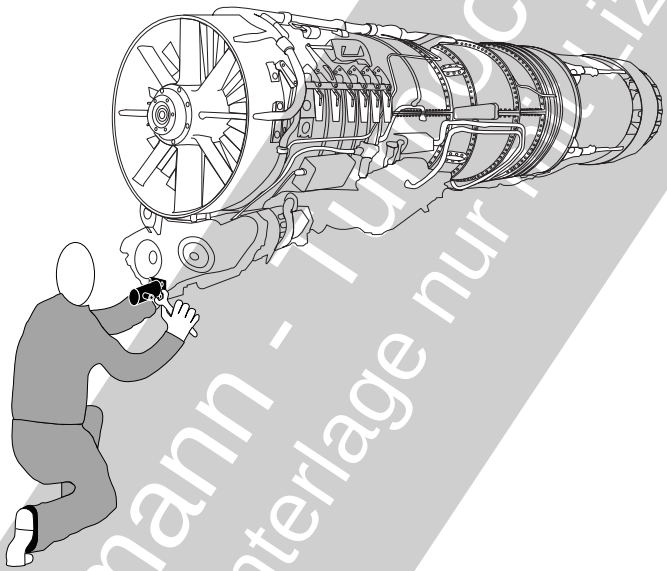
15.2-33 Axel Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“, Band 1, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 5.2.1.3, Bild 5.2.2.1-1, Bild 5.2.2.2-7, Bild 5.2.2.3-5.

15.2-34 Axel Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“, Band 2, 2001, ISBN 3-00-008429-0, Bild 6.1-15.1, Bild 8.1-13, Bild 8.2-18,

15.2-35 Axel Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“, Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Bild 11.2.3-10 und Bild 12.1-5.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

16. Das Arbeitsumfeld - „Human Factors“.



© Axel Rossmann - Turbo consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Das Arbeitsumfeld mit seiner Wechselwirkung mit dem Menschen lässt sich unter dem Begriff „**Human Factors**“ (Bild 16-1.1) zusammenfassen. Dieses Thema wird beispielhaft im „**Human Factors Design Guide**“ (Lit. 16-25, ca. 1000 Seiten), herausgegeben von US Behörden wie DOT, FAA behandelt und aktualisiert. Er beschäftigt sich mit der Hardware des Arbeitsumfelds (Bild 16-1.1). Diesem Gesichtspunkt widmet z.B. die US-Luftfahrtbehörde ihre besondere Aufmerksamkeit (Lit 16-3 und Lit. 16-4). Das sollte für Wartung (Kapitel 16.1) und Überholung in der Triebwerkstechnik von besonderer Bedeutung sein. Der Begriff „Human Factors“ beschreibt Einflüsse auf die menschlichen Eigenschaften und Bedürfnisse (Lit. 16-20, Bild 16-1.1). Das kann arbeitsgebietspezifisch sehr unterschiedlich sein. Stehen z.B. organisatorische Gesichtspunkte im Vordergrund, werden eher negative Begriffe, die sich unter dem Stichwort „menscheln“ (Karriere, Machtposition) einordnen lassen, angesprochen (Lit. 16-1). Hierzu passt eher der Begriff „Human Factor“ als Faktor Mensch. Im medizinischen oder psychologischen Bereich findet man wieder andere Zusammenhänge. Im Englischen ist das „Human Factors Engineering“, also die Ergonomie ein Hauptanliegen (Lit. 16-3). Damit beschränkt man sich eher auf den technischen Bereich.

Zum besseren Verständnis der komplexen Zusammenhänge können das **SHEL** - (Bild 16-0.1) und das **Reason-Modell** (Bild 16-0.2) dienen.

Die Betriebserfahrung, insbesondere im Zusammenhang mit dem „Aloha-Unfall“ (Bild 19.1-10), zeigt **wartungstypische Einflüsse,** die besonders häufig in Verbindung mit Problemen und Schäden auftauchen. Diesen wurden einzelne Kapitel gewidmet:

- **Schichtwechsel** und Personalwechsel (Kapitel 16.1.1).
- **Kommunikation** in und zwischen den Arbeitsebenen (Kapitel 16.1.1).
- **Fähigkeiten** des Personals (Kapitel 16.1).
- **Arbeitsunterlagen** und Dokumentationen (Kapitel 16.2).
- **Wartungsfreundliche** Konstruktionen (Kapitel 16.3).

Modelle zum Verständnis der Human-Factors-Problematik.

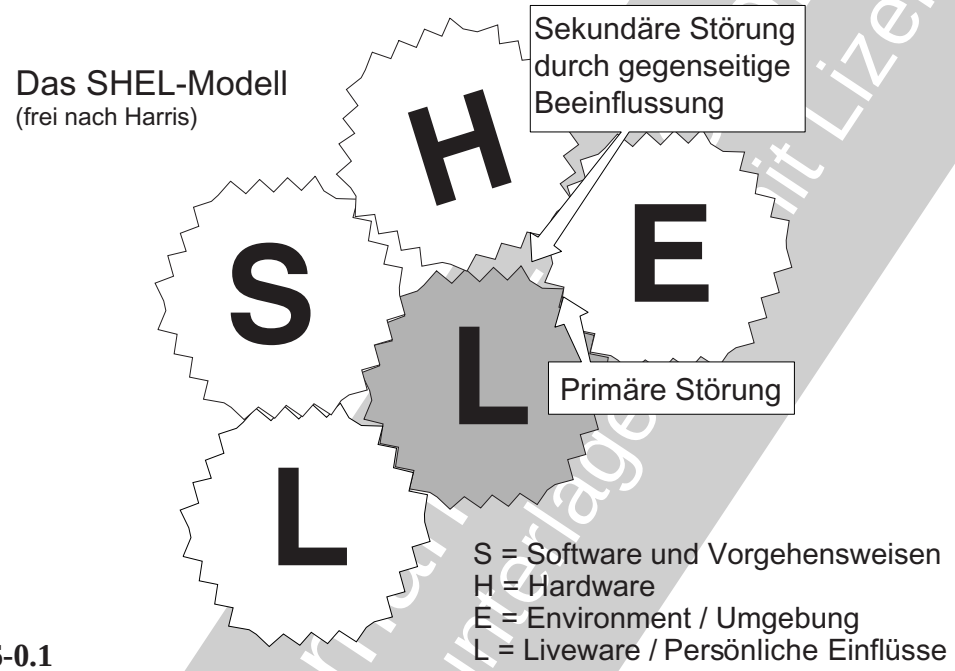


Bild 16-0.1

Bild 16-0.1*(Lit. 16-24): Das* ***SHEL-Modell*** *zusammen mit dem* ***Ursachenmodell*** *(Bild 16-0.2) dient dazu, die Bedeutung der „Human Factors“ für Sicherheit und Effektivität in der Luftfahrt zu erkennen (Bild 16-9). Es ist lediglich als* ***Hilfe zum Verständnis*** *des Begriffs „Human Factors“ zu sehen und soll einen Eindruck für die gegenseitige Beeinflussung bzw. das Zusammenwirken der Bereiche* ***S****oftware (Vorgehen),* ***H****ardware (Maschine),* ***E****nvironment (Umfeld) und* ***L****iveware (menschlich) ermöglichen. Die Einflüsse sind verzahnt dargestellt (feste Bausteine, keine Zahnräder!). Für ein Optimum müssen sie genau zusammenpassen. Ist dies nicht der Fall, entstehen Verspannungen bis zum Zusammenbruch des Systems. Tritt dies an einer Stelle ein, kann es sich auch an anderen Stellen auswirken. Dass die Wirklichkeit recht gut abgebildet wird, zeigt sich an vielen Beispielen katastrophaler Schäden und Flugunfälle (z.B. „Pensacolaunfall“, Band 3 Bild 12.2.1.1.2-5 bis -10).*

‘Liveware’ *berücksichtigt den Menschen als Zentrum. Es beinhaltet von ihm bestimmte Einflüsse.*

Körperliche *Vorgaben: Hierzu gehören Größe und Kraft.*

Bedürfnisse*: Verpflegung, Atemluft, sanitäre Bedingungen.*

Aufnahmeeigenschaften *für Informationen. Wahrnehmung/Sinne, Psychologie und Physiologie.*

Verarbeitung von Informationen *hängt z.B. äußerlich von Anzeigegeräten ab. Individuelle Einflüsse sind Wissen, Gedächtnis, Stress und Motivation.*

Agieren, Reagieren*: Zu den persönlichen Einflüssen zählen Kommunikation, Teamfähigkeit. Auf Tätigkeiten wirkt die Biomechanik, z.B. bei Bewegungen.*

Umgebung *wirkt sich über Temperatur, Vibrationen, Feuchtigkeit, Geräusch, Tageszeit und Beschleunigungskräfte auf das Befinden aus.*

© Axel Rossmann Produktionsunterlagen mit Lizenz

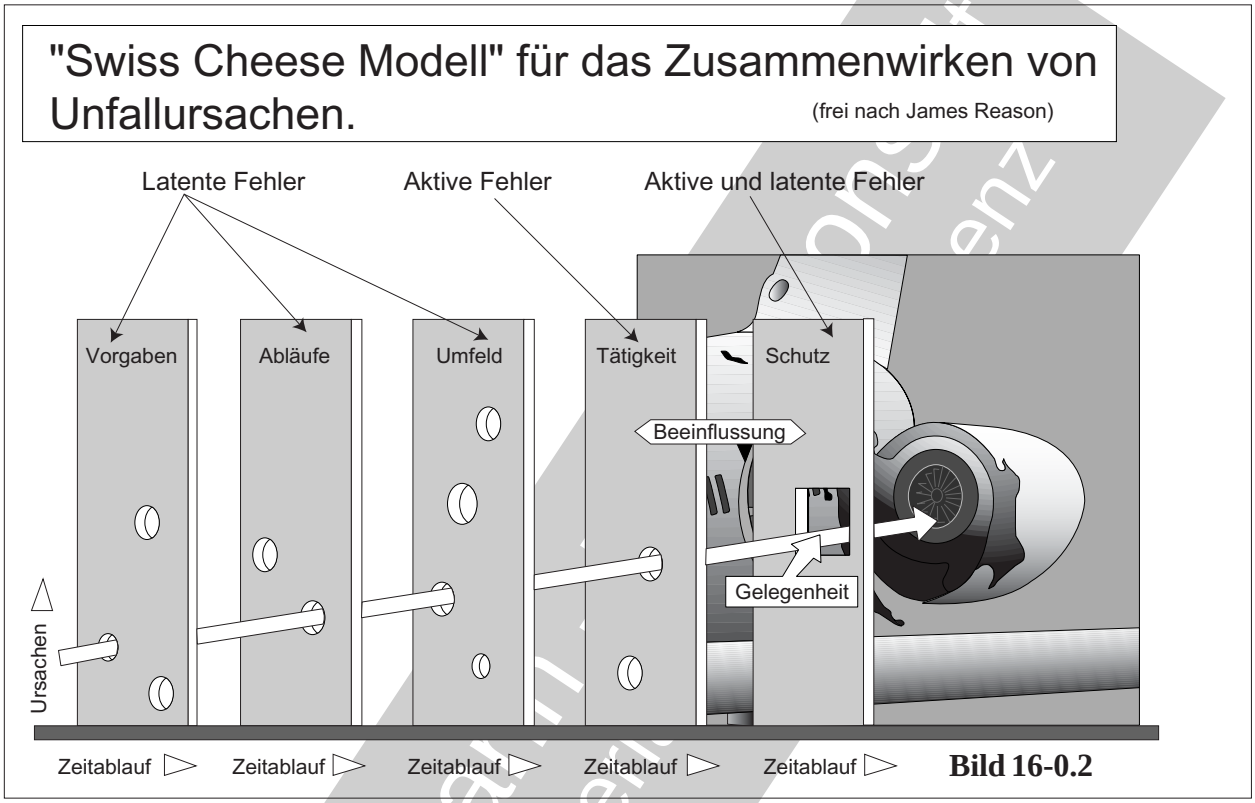


Bild 16-0.2

*Dazu gehört auch die **Gestaltung des Arbeitsplatzes**.*

***Zusammenwirken der Modellbereiche**:*

***L-H** gilt für das System Mensch-Maschine. Hierzu gehört die Einrichtung des Arbeitplatzes. Wegen der Anpassungsfähigkeit des Menschen werden Mängel oft **erst bei einer Katastrophe erkannt**.*

***L-S** steht für das Zusammenspiel mit Vorschriften, Handbüchern, Prüflisten, Computerprogrammen u.s.w.*

***L-E**: Dazu gehören Probleme mit dem Biorhythmus, Klimaanlagen, toxische Materialien, Sauerstoffmangel, und g-Lasten.*

***L-L** steht für den **zwischenmenschlichen Kontakt**. Er ist bei **Teamarbeit** besonders wichtig. Weitere Aspekte sind Führung und Zusammenarbeit. Dies steht in engem Zusammenhang mit dem **Firmenklima**.*

***Bild 16-0.2**(Lit. 16-24): Dieses **Ursachenmodell** (engl. Reason Model) macht die Situation für einen Schaden/Unfall deutlich (Bild 16-3, Bild 16-8 und Bild 16-10). Dazu sind mehrere gleichzeitige Bedingungen notwendig. Sie sind als Löcher in **Hindernissen**, die für Einflussbereiche stehen, dargestellt. Bilden sie eine Linie kann der ‘Unheilstrahl’ durchtreten. So entspricht es dem **Murphy Prinzip**: ‘Alles was passieren kann wird auch passieren’- es ist nur eine Frage der Zeit. Das Modell hat folgende ‘Hindernisse’:*

***Vorgaben** (decision makers): Oberes Management. Es gibt die übergeordneten Ziele vor. Dabei geht es um das Spannungsfeld Sicherheit und Kosten.*

***Abläufe** (line management): Hier fallen anhand der Ziele die Entscheidungen für die Umsetzung.*

***Umfeld** (preconditions) für die Ausführenden mit deren Können, Wissen und Motivation. Wichtig sind die technischen Vorbedingungen wie Werkzeuge und Vorrichtungen sowie sichere Arbeitsbedingungen.*

***Tätigkeit** (productive activities) steht für die Durchführung der Arbeiten. Dabei können Abweichungen von den Vorschriften (unsafe acts) einen vorgesehenen **Schutz** (defences) unwirksam machen. So entsteht die **Gelegenheit** für einen Schaden bzw. einen Unfall.*

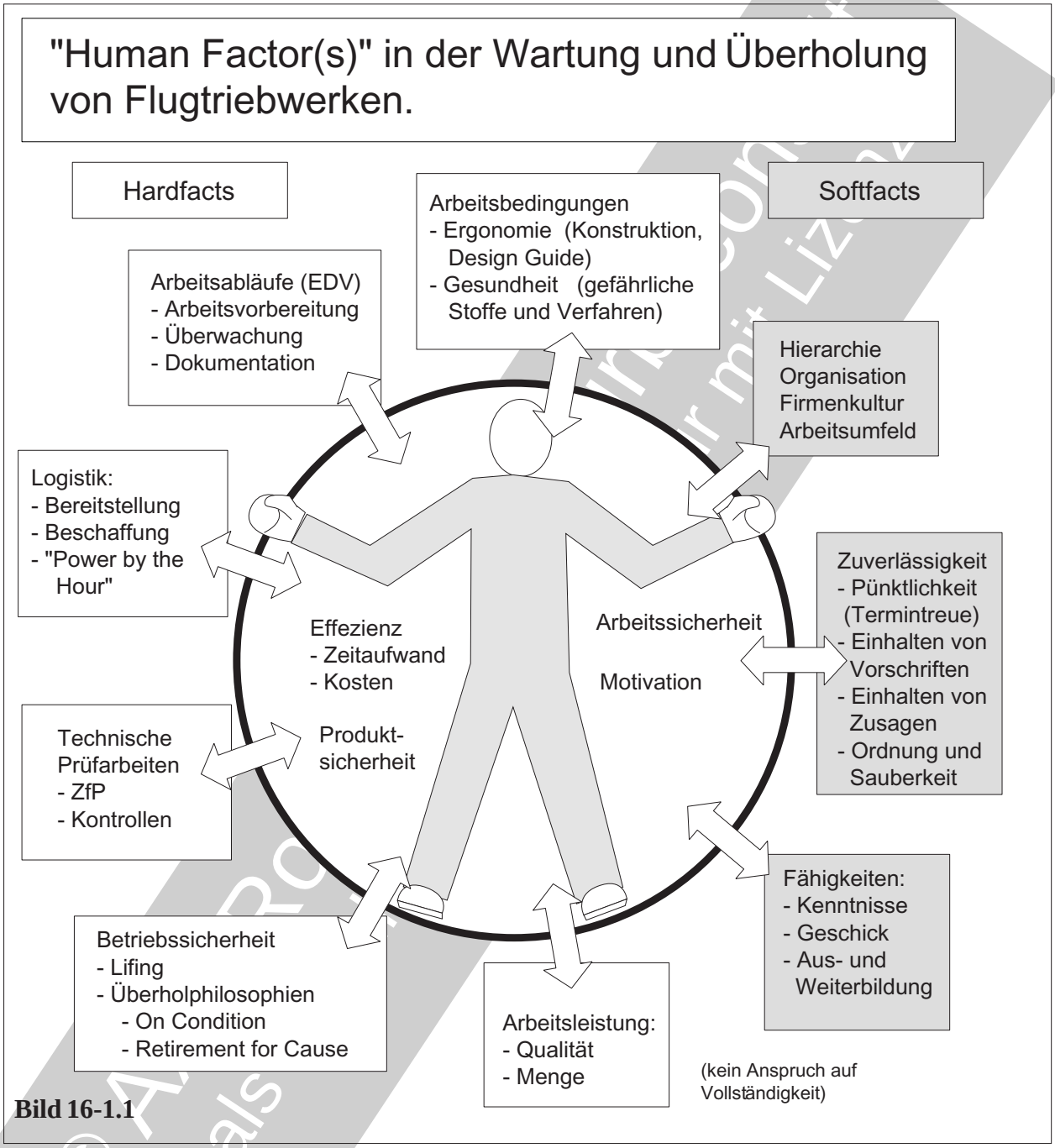


Bild 16-1.1

Bild 16-1.1*(Lit. 16-2): Die „Human Factors“ beeinflussen dieTätigkeit an der Hardware wie bei Wartung und Überholung (Bild 16-1.2). Sie unterscheidet sich damit von solchen eher organisatorischen Aufgaben. Hier drängen sich* ***persönliche Ziele****, beispielsweise die Karriere in den Vordergrund. So können die Faktoren und/oder deren Wertung sehr unterschiedlich subjektiv sein (Bild 16.1.1-1 und Bild 16.1.1-2).*

Die Tätigkeiten vor Ort dürften dagegen das ***Fachliche*** *besonders werten. So kann Facharbeit und damit Sicherheitsanforderungen* ***von leitenden Hierarchien unterschätzt*** *werden. Missverständnisse sind dann die Folge und führen zu unterschiedlichen Prioritäten. Das macht sich besonders in der* ***Personalpolitik*** *auf Feldern wie Motivation (Bild 16-4), Arbeitsbelastung und Erfahrung bedenklich bemerkbar. Diesem Problem widmet sich das „****Mainte-***

nance Resource Management *“ (**MRM**, Bild 16-4).*
*Arbeitsleistung wird an Effizienz (Kosten, Zeitaufwand), Produktsicherheit und Arbeitssicherheit gemessen. Sie werden von dem Faktor Motivation (Bild 16-4) entscheidend beeinflusst. Das steht wiederum im Zusammenhang mit der **Arbeitsumgebung,** die sich aus vielen Einzelfaktoren zusammensetzt. Mehr immaterielle Einflüsse wie **Motivation** (Bild 19.1-4), Kenntnisse (Bild 16-3) und **Erfahrung** („Softfacts“, grau angelegt) lassen sich von „**Hardfacts**“ wie der Werkstatteinrichtung oder der Wartungsfreundlichkeit (Bild 16-5) unterscheiden. Diese Faktoren wirken auf den Menschen ein und werden umgekehrt auch von ihm bzw. seinen Forderungen und Bedürfnissen für eine optimale Arbeitsleistung beeinflusst.*

The "Dirty Dozen"

1 Mangel an Kommunikation

2 Selbstüberschätzung

3 Wissenslücken

4 Verwirrung, Ablenkung

5 Mangelnde Teamarbeit

6 Ermüdung

7 Teilemangel, ungenügende Logistik

8 Arbeits- / Zeitdruck

9 Fehlendes Selbstbewusstsein

10 Stress

11 Mangelndes Bewusstsein /Erkenntnis

12 Verhaltensnormen, Gewohnheiten

Bild 16-1.2

Bild 16-1.2 *(Lit. 16-20): Mit diesen „Human Factors“ sind wichtige Einflüsse im Wartungsbereich von Flugzeugen für Lehrzwecke zusammengestellt. Zugehörige Poster sind im Internet zugänglich.*

„1“ Mangel an Kommunikation*: Es handelt sich wohl um den bedeutendsten Problemfaktor (Bild 16.1.1-1, 16.1.1-2 und 16.1.1-3). Kommunikation kann mündlich und schriftlich erfolgen. Einzeln und in Kombination kann es zu **Missverständnissen** kommen oder es können **Informationen verloren** gehen. Die modernen Kommunikationsmittel wie Bildschirm oder Handy können das Risiko von Problemen auch*

© Axel Rossmann - T
als Schulungsunterl

vergrößern. Sie dürften die Sicherheit einer Dokumentation nicht ersetzen.

Abhilfen:
*- Um Zweifel auszuräumen bieten sich **Dokumentationen** wie Arbeitskarten, (Bild 16.2-3.3) und Logbücher (z.B. „Handover Book“) an. Voraussetzung ist eine konsequente Nutzung, auch bei **scheinbar sicherer mündlicher Information** (Bild 16.1.1-4, Bild 16.1.1-6.2).*
*- Besprechung des **Stands der Arbeiten**.*
- Nie etwas annehmen. Überzeugen sie sich immer selbst.

***„Selbstüberschätzung“** (Complacency): Sie kann bei häufig wiederholten Arbeitsschritten wie Prüfvorgängen entstehen. Wurde beispielsweise nie ein Fehler gefunden, kann das Urteilsvermögen beeinträchtigt werden (Band 4, Bild 17.3.1-9).*

Abhilfen:
*- **Selbstmotivation**.*
*- Niemals etwas als erledigt abzeichnen was nicht **nachweislich** getan und vollendet wurde (Bild 16.1.1-6.2 und Lit. 16-25).*

***Wissenslücken** sind bei den ständig aktualisierten oder neuen Anweisungen und Informationen sowie Hardwareänderungen als Folge des Fortschritts der Triebwerkstechnik zu erwarten. Der Mangel kann durch Selbstüberschätzung („Can-Do“) verschärft werden.*

Abhilfen:
- Training an dem speziellen Fall /Situation.
- Verwendung aktueller Handbücher.
*- Lieber einmal mehr **die Richtigen fragen**.*

Merke:
Fragen ist eher ein Zeichen von Fachkompetenz und dem für Sicherheit notwendigen kritischen Denken.

***„4“ Verwirrung, Ablenkung:** Ca. 15 % aller Wartungsfehler werden diesem Einfluss zugerechnet. Typisches Beispiel ist eine unterbrochene Aufgabe, bei deren Fortsetzen die Vorstellung besteht, **man sei bereits weiter** als tatsächlich fortgeschritten (Bild 19.1.1-7).*

Abhilfen:
*- Möglichst immer die **Arbeit abschließen**.*
*- **Kennzeichnen** der nicht abgeschlossenen Arbeit.*
*- **Sichern** der nicht abgeschlossenen Arbeit*
*- Die Arbeit immer **mehrere Schritte vor der Unterbrechung** erneut beginnen.*
- Verwendung einer detaillierten Dokumentation (Prüfkarte).

***„5“ Mangelnde Teamarbeit:** Steht oft im Zusammenhang mit Kommunikationsproblemen. Diese verschärfen sich mit der Teamgröße.*

Abhilfen:
*- **Besprechung** was zu tun ist, wer die Aufgabe auszuführen hat und wie sie auszuführen ist.*
*- Absichern, dass jeder verstanden hat und **bewusst zustimmt**.*

***„6“ Ermüdung“** ist sehr heimtückisch, weil sie erst im Extremfall dem Betroffenen bewusst wird. Sie verhindert geradezu rechtzeitig erkannt zu werden. Der für die Wartung typische Schichtbetrieb kann das Problem begünstigen.*

Abhilfen:
*- **Erkennen der Symptome** bei sich und anderen.*
*- **Komplizierte Arbeiten** günstig in den (individuellen) **Tagesrhythmus** legen.*
*- Regelmäßiger **Schlaf und Übungen**.*
*- Fordere andere auf **deine Arbeit zu prüfen**.*

***„7“ Teilemangel, Logistikproblem** (Lack of Resources): Der typische Wart ist stolz darauf, das Flugzeug wieder in den Flugbetrieb zu bringen. Für ihn als Praktiker („Can-Do“) ist eine gegenteilige Entscheidung nicht leicht.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Abhilfen:
*- Bereits zu Beginn die **benötigten Teile identifizieren** und anfordern.*
*- Kenntnis der **Teilebeschaffung**.*
*- Halte einen **Sicherheitsstandard** ein, im Zweifelsfall das Flugzeug „grounden“.*

***„8“ Arbeits-/ Zeitdruck** (Pressure): Gerade in der Flugzeugwartung herrscht großer Druck die Arbeit abzuschließen. Die Kunst ist zu erkennen **wann dies unrealistisch** ist.*

Abhilfen:
*- Prüfe ob der Druck nicht **selbst erzeugt** ist,*
*- **Kommuniziere deine Sorgen**.*
*- Bitte um zusätzliche **Hilfe**.*
*- Einfach **‘Nein’ sagen**.*

***„9“ Fehlendes Selbstbewusstsein / Bestimmtheit** (Lack of Avertiveness): Es kann, wenn auch selten, notwendig werden, dass **Bestimmtheit erforderlich** wird. Beispielsweise um zu gewährleisten, dass das Richtige getan und nicht übergangen wird. Dabei können auch **persönliche Nachteile** entstehen.*

Abhilfen:
*- Wenn es nicht kritisch ist und keine sofortige Aktion erfordert, **vermerke es im geeigneten/ vorgeschriebenen Dokument** (Journey Log Book). Zeichne dann nur das Betriebstaugliche ab.*
- Stehe zu deiner Überzeugung ohne Kompromisse.

***„10“ Stress**, ein normaler Zustand solange er nicht überhand nimmt. Es kommt darauf an, diesen **Zeitpunkt zu erkennen**.*

Abhilfen:
*- Sei dir bewusst, wie Stress deine **Arbeit beeinflussen** kann.*
*- Halte ein und versuche deine Arbeit **„von außen“ zu betrachten**.*
*- Lege eine vernünftige **Vorgehensweise fest** und halte diese ein.*
*- **Nimm den Zeitdruck heraus** oder mache wenigstens eine kurze Pause.*
*- **Bespreche dich** mit jemandem.*
*- **Bitte Kollegen** deine Arbeit anzusehen.*
*- **Entspannungsübungen.***

***„11“ Mangel an Bewusstsein / Erkenntnis:** Gerade Erfahrene können das Bewusstsein für mögliche Konsequenzen ihres Handelns verlieren. Decken Handbücher den Fehler nicht ab, kann man nachher hören: „Der gesunde Menschenverstand hätte ausreichen müssen“.*

Abhilfen:
*- **Überlege** was bei einem Unfall passieren kann.*
*- **Überprüfe** deine Arbeit unter dem Gesichtspunkt ob sie sich mit **bestehenden Modifikationen oder Reparaturen verträgt**.*
*- Frage **andere** ob sie im Zusammenhang mit der getanen Arbeit **ein Problem erkennen**.*

***„12“ Verhaltensnormen/Gewohnheiten** (Norms): Dieser Einfluss ist nicht zu unterschätzen. Gewöhnlich wollen Menschen zu einer Gemeinschaft gehören und akzeptieren damit deren Normen. Es ist schwer, sich diesem „**Gruppenzwang**“ zu entziehen.*

Abhilfen:
*- Arbeite **immer nach Vorschrift. Hinterfrage Abweichungen**.*
*- Sei dir bewusst, dass „Normen“ auch falsch sein können. Sichere dich bei Bedenken mit einer **Nachprüfung** ab.*

© Axel Rossmann - Turbopropult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Tendenzen die sich auf die wartungsbedingte Flugzeugsicherheit auswirken.

Verantwortlichkeit bei steigendem Outsourcing:

Betreiber/Auftraggeber
oder
Outsourcing bzw. Contractor

Symptome: Anstieg von wartungsbedingten

Verzögerungen/ Verspätungen

Flugabbrüche

Unfällen und Vorkommnissen

Warnzeichen:

Nicht ausreichendes Training gemessen an der steigenden technischen Komplexität, insbesondere bei verstärktem Outsourcing

Bild 16-2

Bild 16-2 *(Lit. 16-21 und Lit. 16-23): Die Tendenz zum verstärkten* ***Outsourcing von Wartungsarbeiten*** *hat ihre problematischen Seiten.*

Verantwortlichkeit*: Im Fall des „Alaska Airlines“ Unfall (Bild 16-10) wurde anfangs juristisch entschieden: Fluglinien sind für Wartungsarbeiten eines Vertragspartners (Contractors) nicht verantwortlich zu machen, wenn sie diese nicht kannten und bei ausreichenden Überprüfungen nicht erfahren konnten. Dies widerspricht der FAA-Auffassung: „...****carriers have unrestricted and unconditional responsibility for the independent maintenance contractors****...“ . D.h. die Fluglinie trägt die volle Verantwortung für die Arbeiten eines Vertragspartners in der Wartung.*

Symptome der Problematik*: Wartungsfehler (Bild 16-3) spielen bei Flugunfällen (accidents) und Vorkommnissen (incidents) eine deutlich größere Rolle als lange gedacht.*
Zur Problematik gehört der Trend zu immer mehr Outsourcing. Weil der ***Überwachungsaufwand*** *offenbar nicht entsprechend erhöht wurde, ist mit einem Anstieg von Risiken, wie* ***ungeeignete Werkzeuge und ungültige Handbücher*** *zu rechnen.*

Warnzeichen und Symptome*:*
- Anstieg wartungsbedingter ***Verzögerungen im Flugbetrieb****.*
- Eine wachsende Zahl von wartungsbedingten ***Flugabbrüchen*** *in Form einer Umkehr (turnback) oder Anflug eines Ausweichflugplatzes (diversion).*
- Einige kürzlich aufgetretene Unfälle und Vorkommnisse hatten die Wartung zur Ursache.

Reaktionen:
- Eine ansteigende Zahl von ***Veröffentlichungen zum Thema der Wartungssicherheit****. Darin werden besonders folgende Schwächen angesprochen:*
- ***Schulungsprogramme des technischen Wartungspersonals*** *können mit der steigenden Komplexität der Flugzeugtechnik nicht mithalten. Beispielsweise wurde 2003 in den USA festgestellt, dass sich die Schulungsunterlagen für Triebwerkstechniker seit ca. 50 Jahren kaum geändert haben*

© Axel Rossmann - als Schulungsunterlage

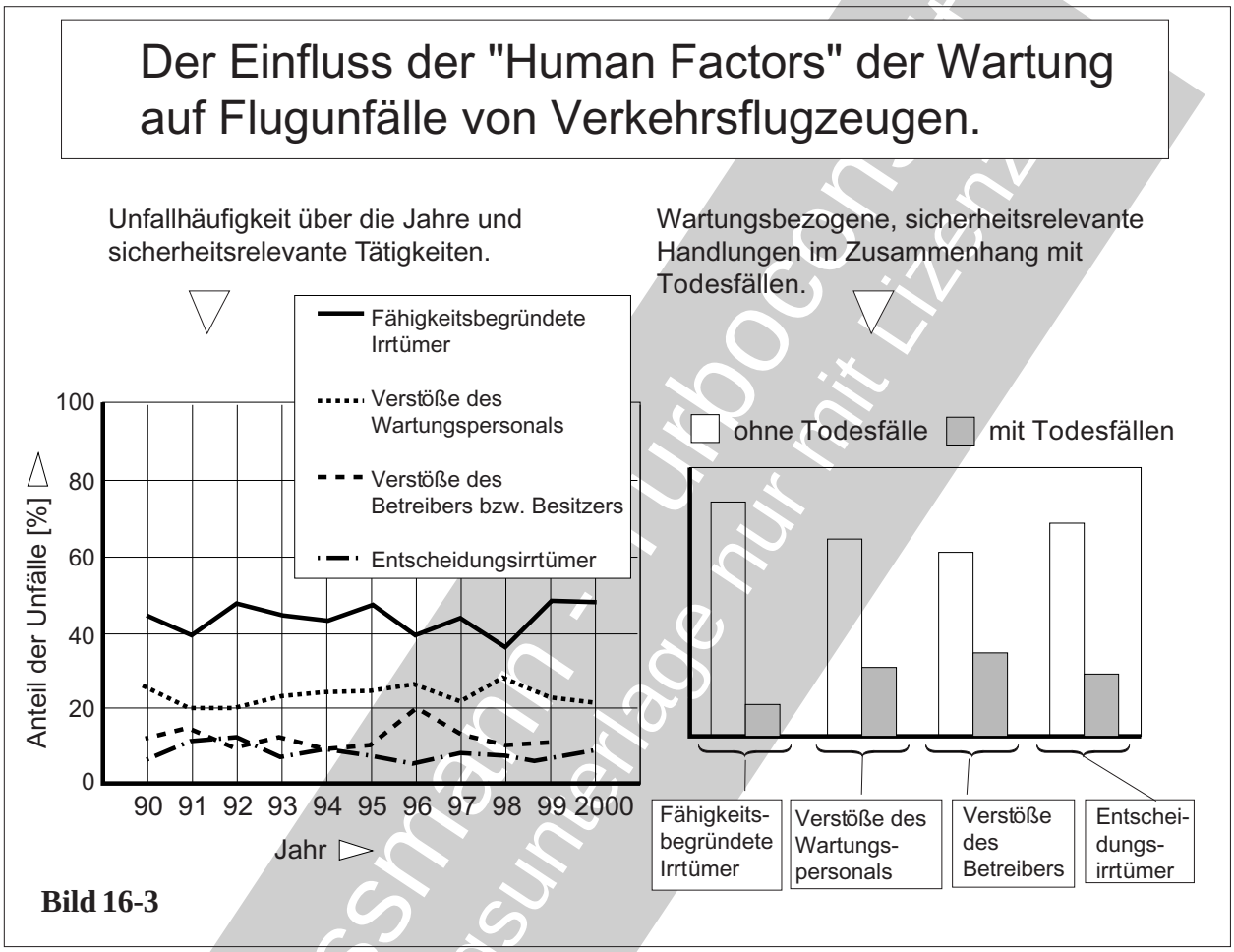
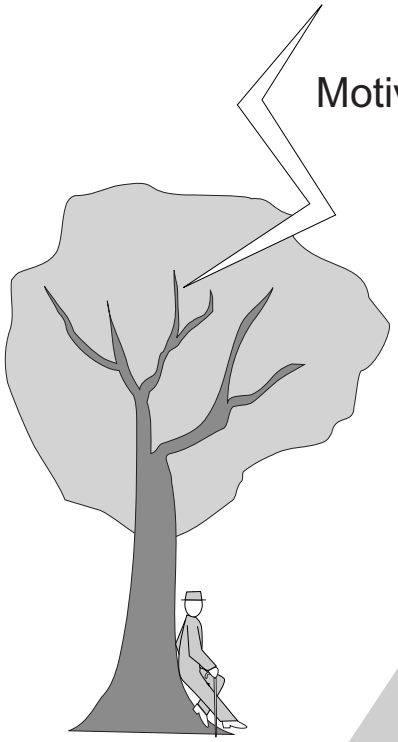


Bild 16-3

Bild 16-3 *(Lit. 16-22): Es handelt sich um eine Auswertung von Flugzeugproblemen, also nicht allein der Triebwerke. Trotzdem dürften die Tendenzen auch für Triebwerke interessant sein.*
*„**Fähigkeitsbegründete Irrtümer**“ (skill-based errors) stehen am häufigsten mit Flugunfällen in Verbindung (Diagramm links). Es folgen **Verstöße** (Definition Bild 16.5-1) des Wartungspersonals, des Betreibers und Entscheidungsirrtümer.*
*Häufigste Entscheidungsirrtümer (ca. 1/3) betrafen **Abweichungen von einer Anweisung** wie „Service Bulletin“ oder „Service Letter“. Dem folgten Probleme bei der **Überholung** und der **Tausch von Teilen** mit jeweils ca. 10 %.*
*Fähigkeitsbegründete Fehler, die den **Reparaturshops zuordenbar** waren, ließen sich auf Montage (ca. 30 %) und Prüffehler (inspection errors, > 15 %) zurückführen. Verstöße der Mechaniker waren ähnlich häufig wie fähigkeitsbegründete Fehler. Dem folgten Verstöße bei Verfahren und Anweisungen (>10%).*
***Verstöße beim Betreiber** der selbst die Wartung/Überholung durchführt, stehen häufig im Zusammenhang mit der Einhaltung jährlicher Inspektionen (ca. 20%). Es folgten Probleme bei Wartung und Überholung und Montageprobleme (je ca. 10 %). Mit ca. 5 % waren jeweils **ungenehmigte Konstruktionsveränderungen, Modifikationen und Abweichungen** von Vorschriften vertreten.*
*Das rechte Schaubild ordnet Unfallursachen den Folgen in Form von Personenschäden zu. Besonders katastrophal (Todesfolge) scheinen sich **Verstöße des Wartungspersonals und des Betreibers** auszuwirken.*

© Axel Rossmann - Turbocontrol als Schulungsunterlage nur mit Lizenz



Motivation ist von größter Bedeutung!

Treten Fehler wie Betriebsrisse in Rotorscheiben sehr selten auf, kann dies zum Nachlassen der Aufmerksamkeit und/oder zu einer Fehleinschätzung der Sicherheitsrelevanz beim Prüfpersonal führen.

Aus diesem Grund sind wiederholte Belehrungen, Schulungen und Kontrollen zur Motivation äußerst wichtig.

Bild 16-4

Bild 16-4 *(Lit. 16-5, Bild 16-1.1): Nicht nur „Hardfacts“ sind einflussreiche Human Factors. Auch „Softfacts“ sind nicht zu unterschätzen. Als solche können fehlende Erfolgserlebnisse die Sicherheit von Prüfverfahren gefährlich beeinflussen (Lit. 16-5). Werden beispielsweise über längere Zeiträume bei einer Prüfung keine Fehler gefunden, kann dies zu* ***Ermüdung, nachlassender Aufmerksamkeit und Frustration beim Prüfpersonal*** *führen. Liegt dann doch ein rissbehaftetes Bauteil vor, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Fehler unerkannt bleibt (Lit. 16-25).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Arbeitsumfeld und „Human Factors“

Eine wartungsspezifische Ausbildung als positiver Human Factor sollte den folgenden Lehrstoff beinhalten:

- **Human Factors Design Guide** als Voraussetzung für optimale Arbeitsergebnisse: Inhalt, Nutzung.

- **Gefahren am Arbeitsplatz:** Arten, Erkennen, Analyse und Einschätzung, Vermeidung/Abhilfen.

- **Fachkenntnisse zum Arbeitsprozess:**
  Technische Grundlagen: Hierzu gehören Funktion und Betriebsbelastung des Triebwerks und seiner Komponenten. Die Kenntnisse dienen dem Verständnis der eigenen Tätigkeit, von Vorschriften, Anweisungen und Abweichungen. Sie sind für die Motivation unerlässlich.
  Fachbegriffe, Definitionen, Erkennungsmerkmale, Abweichungen.

- **Prüf- und Kontrolltätigkeiten:** Hintergrund, Bedeutung, potenzielle Auswirkungen,

- **Dokumentation** der eigenen Arbeiten/Tätigkeiten.

- **Normen und Vorschriften:** Aussagen, Anwendung

Bild 16-5

Kein Anspruch auf Vollständigkeit!

***Bild 16-5**: Die Aus- und Weiterbildung des Wartungspersonals wird offenbar vielfach weltweit angeboten (Lit. 16-6 und 16-7).*
*Von besonderer Bedeutung ist der „**Human Factors Design Guide**“ (Lit. 16-3) der sich auf ca. 1000 Seiten mit einem optimalen Arbeitsumfeld beschäftigt.*
*Einen hohen Stellenwert haben persönliche Sicherheits-/Gesundheitsaspekte. Hierzu wird **gefährlichen Werkstoffen und Verfahren** („**Hazardous materials**“ (Lit. 16-3)) eine besondere Aufmerksamkeit eingeräumt. Dabei handelt es sich nicht nur um die **Werkstoffe der Bauteile** selbst, sondern auch um **Hilfsstoffe** und **Verfahrensmedien** (Lit. 16-3 und Lit. 16-25).*
*Die Kenntnis **aufgabenspezifischer technischer Grundlagen** wurde erkannt, doch offenbar durchaus nicht immer ihrer Bedeutung entsprechend gewertet. Technische Grundlagen sind nicht nur in der Aufsichtsebene wichtig. Besonders die **mit den Wartungsarbeiten beschäftigten Praktiker** (Warte, Prüfer) benötigen solche Kenntnisse, was sich auch in Berufsbeschreibungen niederschlägt (Kapitel 19.1.3). Dazu gehört eine gewisse **Begriffssicherheit der typischen Probleme, Schäden, Schadensbilder, Schadensmechanismen, Betriebseinflüsse** (Bild 16.1-1 und Lit. 16-25) **und -belastungen** (siehe Band 1, Kapitel 1 und 2). So wird es erst möglich, mit ausreichender Wahrscheinlichkeit richtige Schlüsse zu ziehen und gezielte Maßnahmen einzuleiten. Das Sammeln **fundierter Erfahrungen** und so die Sicherheit der Arbeit kontinuierlich zu optimieren, erfordert ebenfalls ein ausreichendes Begriffsverständnis. Das ist eine **äußerst anspruchsvolle Forderung,** die oft in ihrer Tragweite von den Verantwortlichen nicht erkannt wird. Sie manifestiert sich zumindest zeitweise in „verwaisten“ oder ungeeignet besetzten Arbeitsplätzen mit hohen Anforderungen an Erfahrung und Fachkenntnis (Band 2, Bild 9.1.2-*

© Axel Ross als Schulungs

9.2). Es erscheint aus der Sichtung von Literatur und Ausbildungsangeboten (bis 2006) auf diesem Gebiet gerade ***für Werker noch Nachholbedarf*** *zu bestehen.*

Prüf- und Kontrolltätigkeiten *(z.B. Boroskopie, Bild 16.4-7 und Lit. 16-25) stehen oft im Zusammenhang mit aktuellen Problemen und dienen der Absicherung. Es handelt sich in vielen Fällen um dem Problem angepasste Prüfverfahren. Deren Handhabung und die Ergebnisbewertung verlangt viel Fachkenntnis, Erfahrung und Geschick sowie Beurteilungsvermögen. Geeignete, auch triebwerkstypspezifische Kurse, scheinen im Internet angeboten zu werden. In kritischen Fällen sind besondere Einweisungen und praktische Übungen notwendig.*

Der ***Dokumentation*** *der Bauteile und eigenen* ***Tätigkeiten*** *nimmt zu. Hilfreich, oft unerlässlich, aber durchaus nicht immer für den Einzelnen einfacher, ist dabei der* ***EDV-Einsatz****. Die Einführung eines EDV-Systems erfordert umfangreiche Schulungen mit Auffrischungen über längere Zeiträume. Insbesondere muss das System seine Eignung in der Praxis zeigen und benötigt dazu, zumindest in der Einführungs- bzw. Erprobungsphase, ein* ***iteratives Vorgehen****.*

Ein weiterer Aspekt der Dokumentation ist das ***Arbeiten nach Dokumenten*** *wie Handbüchern, Prozessvorschriften, Anweisungen und technischen Zeichnungen. Voraussetzung ist, dass deren Inhalt richtig verstanden wird. Nur dann kann entsprechend dem Sinn einer Vorschrift gearbeitet werden. Es muss sich erst zeigen, ob die* ***elektronische Bilddarstellung*** *mit Hilfe des Laptops vor Ort tatsächlich eine Verbesserung gegenüber Papierdokumenten bedeutet.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Arbeitsumfeld und „Human Factors“

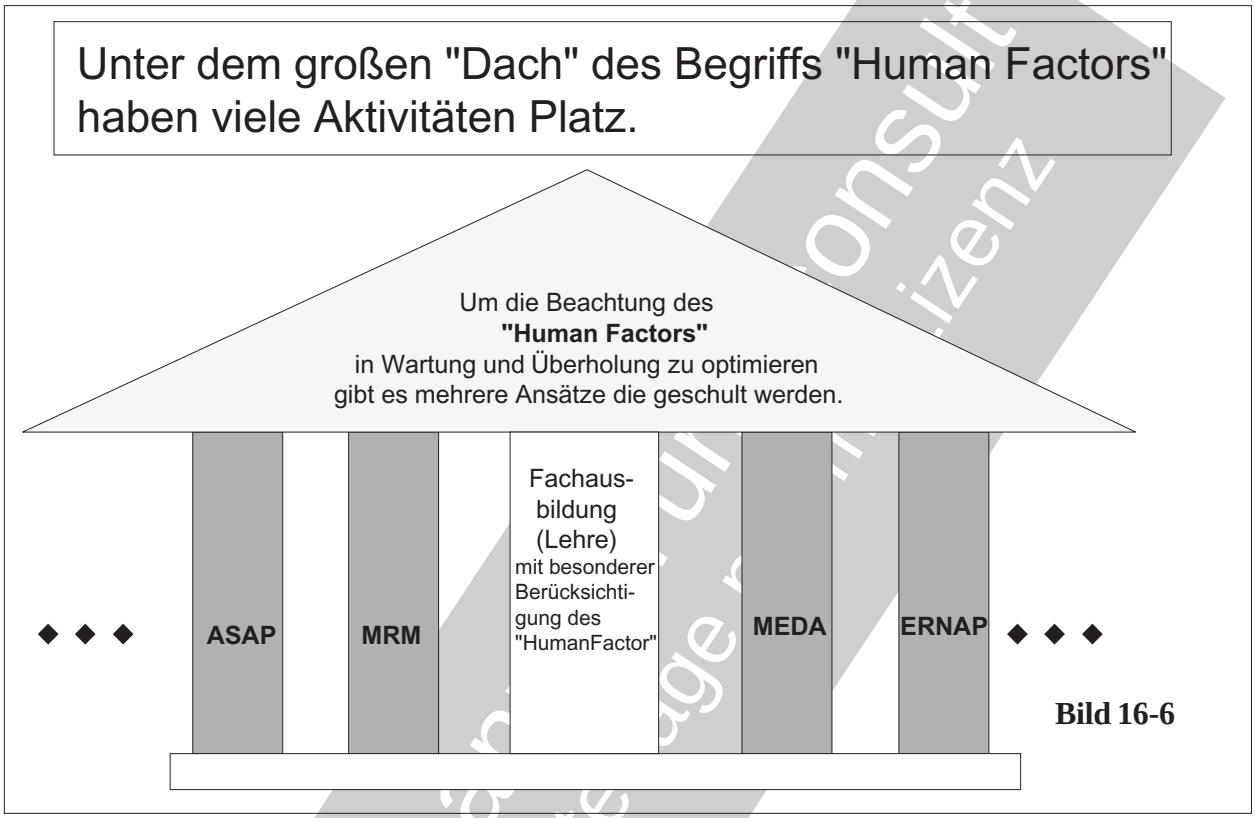


Bild 16-6

Bild 16-6 *(Lit. 16-12, 16-19 und 16-20): Die Realisierung des „Human Factors-Gedankens“ bedarf der* ***Wahrnehmung der Einflussfaktoren*** *und ihrer spezifischen Probleme. Hierfür wurden von Firmen, Behörden und Schulen erhältliche bzw. angebotene Vorgehensweisen erarbeitet (Lit. 16-12, und im Internet: Beispiele Lit. 16-6 und 16-7). Die* ***Schulungen*** *sind den Bedürfnissen der Betreiber (Airlines) und den „Maintenance Shops“ angepasst. Die Vielzahl der Programme und Aktivitäten, um die Wartungs- und Überholsicherheit zu gewährleisten, zeigt den heutigen hohen Stellenwert dieses Vorhabens.*

Die praktische ***Lehre als Fundament*** *einer Ausbildung zum Facharbeiter im Bereich der Luftfahrttechnik sollte das Thema „Human Factors“ beinhalten und dafür sensibilisieren. Dies gilt gerade auch für den* ***militärischen Einsatz****.*

Für berufsbegleitende Weiterbildung scheinen zwei ***Schulungsthemen im Vordergrund*** *zu stehen:*

*Das „****Maintenance Resource Mangement“*** *(****MRM****, Bild 16-7) und in diesem Rahmen der „****Maintenance Error Decision Guide“*** *(****MEDA****, Bild 16.4-4 und Bild 16.4-6).*

Darüber hinaus gibt es offenbar noch eine Reihe weiterer Programme von denen die folgenden kurz dargestellt werden.

*„****Assessment of Aviation Safety Programs“*** *(****ASAP****, Lit. 16-22) in Wartungsorganisationen ist ein weiteres Programm, das auf der Auswertung von Flugunfällen und Vorkommnissen beruht und der Sicherheit dient. Ein besonderes Anliegen dieses Programms ist, das* ***Vertrauen zwischen den Wartungsmechanikern und der Aufsichtsebene*** *zu verbessern.*

*Das „****ERgoNomic Audit Programme“*** *(****ERNAP****) ist ein Werkzeug, das ursprünglich in und für die USA entwickelt wurde. Es soll die verschiedenen Audit-Vorgehensweisen (Tools) zusammenfassen. Damit dient es der Einschätzung der* ***Ergonomie von Wartungs-/Überhol- und Prüfvorgängen****. Auch* ***Konstrukteure*** *können das Verfahren für ergonomisch bessere Prozesse und Systeme nutzen.* ***Formblätter und Vorgehensweisen*** *sind in Lit. 16-20 enthalten.*

© Axel Rossmann, Consult
Alle Rechte vorbehalten, Lizenz

Maintenance Resource Management (MRM):

Behandelt im Schwerpunkt **nicht-technische Einflüsse bzw. das Verhalten** von Personen im Überholungsprozess:

- **Kommunikation** auf gleicher Organisationsebene und mit Vorgesetzten/ überwachenden Organisationsebenen
- **Einschätzung von Situationen**
- **Teamarbeit** und Synergie
- **Führung**sverhalten
- **Konflikt**verhalten
- **Entscheidung**sfindung

- Abläufe, Verhaltensmuster, Art
- Situationsbezogen: Schichtwechsel, Übergabe einer Tätigkeit.
- Verbreitung von Informationen, Informationsfluss.
- "Kultureinflüsse": zwischen Organisationsebenen, national bedingt, Sicherheitseinschätzung.

- Verantwortlichkeit der Einzelperson und einer Gruppe. Spezifisch für Management und technisch orientiertem Personal
- Teamfähigkeit, Verhalten
- Kennzeichen für die Beurteilung einer Teamarbeit

Bild 16-7

Kein Anspruch auf Vollständigkeit!

Bild 16-7 *(Lit. 19.1-6, 16-16 und Lit. 16-20):* ***Maintenance Resource Management*** *(MRM) beschäftigt sich mit nicht technischen Einflüssen (siehe auch Bild 16-2). Es handelt sich also eher um sog. „Soft Skills“, die das geeignete Verhalten unter bestimmten Situationen betreffen (siehe auch Bild 16-1.1).*

Wichtiger Lehrstoff :

Kommunikation *(Bild 16.1.1-2): Die Erfahrung hat gezeigt, dass Probleme und Schäden bei Wartung und Überholung im Zusammenhang mit einer* ***ungenügenden Kommunikation*** *standen. Eine typische Situation tritt beispielsweise während eines* ***Schichtwechsels*** *auf (Kapitel 16.1.1). Hier ist die unmissverständliche Übergabe der Arbeiten von großer Bedeutung für die technische Sicherheit. Auch die* ***Anweisungen und das Feedback zwischen Facharbeitern und Aufsicht*** *ist von einer optimalen Kommunikation bestimmt.*

MRM durchlief historisch mehrere Stufen (Lit. 16-8). Von Schulungen über Kommunikation im Cockpit (Cockpit/Crew Resource Management Training =CRM) zur ***Kommunikation zwischen ausführendem und beaufsichtigendem Wartungspersonal*** *bis zu Trainingskursen für* ***Mechaniker****. Damit soll sich bei sicherheitsrelevanten Tätigkeiten die Aufmerksamkeit erhöhen und das individuelle Kooperationsverhalten verbessern.*

Situationen einschätzen *ist eine Voraussetzung für richtiges Reagieren bzw. Handeln. Das erfordert beispielsweise das Erkennen und Einschätzen einer kritischen Situation (Bild 16.1-1). Bei technischen Problemen ist eine ausreichende Fachkenntnis (Kapitel 16.3) entscheidend.*

Teamarbeit und Synergie *beeinflussen in besonderem Maß Sicherheit /Qualität und Effektivität der Arbeiten.* ***Teamfähigkeit muss gelernt werden*** *und bewertbar sein. Sie beschreibt sowohl das Verhalten innerhalb des Teams, als auch gegenüber äußeren Einflüssen wie der Hierarchie.*

Führungsverhalten *auf der Basis von Vertrauen und Kompetenz bestimmt die Kommunikation positiv. Negativ dürften sich Arroganz und*

© Aviation Professional Training

als ungerecht empfundene Reaktionen auswirken.

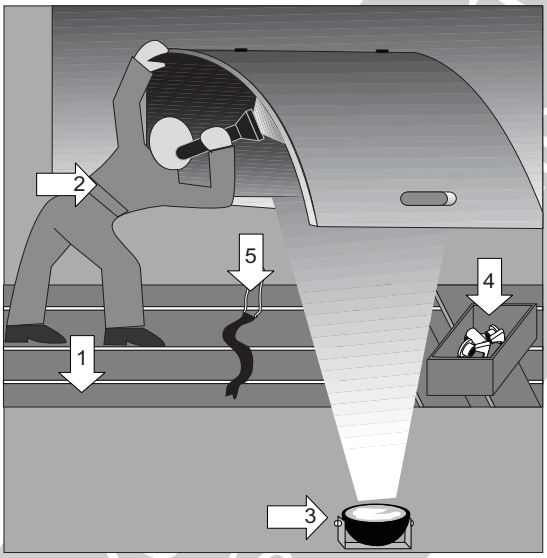
***Konfliktverhalten**: Konflikte entstehen meist im Rahmen besonderer, zumindest subjektiv als kritisch eingeschätzter Situationen. In solchen Fällen sind **Überreaktionen** oder ungeeignete Reaktionen vorprogrammiert. Das provoziert Missverständnisse mit hohem Problempotenzial. Es ist also von großer Bedeutung, derartige **Situationen zu erkennen, einzuschätzen** und geeignet zu handhaben.*

***Entscheidungsfindung**: Selten hat eine Entscheidung im Rahmen einer Problembeseitigung nur einen positiven Aspekt. Dies gilt gerade auch für die typischerweise komplexen technischen Probleme der Triebwerkstechnik. Sie werden erfahrungsgemäß von mehreren beitragenden Ursachen beeinflusst. Meist handelt es sich um einen Kompromiss zwischen der Aktion im Rahmen der **Abhilfe** und damit in Verbindung stehenden Übeln (z.B. Kosten, Prestigeverlust). Mit einem Vorgehen nach dem MEDA-Prinzip ist eine systematische, nachvollziehbare Entscheidungsfindung zu erwarten (Lit. 16-25).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Die Nichtbeachtung der "Human Factors" erhöht das Schadens-/und Unfallrisiko deutlich.

Nach dem Aufsetzen bei der Landung war die Schubumkehr an allen vier Triebwerken normal. Erst als bei 90 Knoten (ca. 167 km/h) die Triebwerksleistung erhöht wurde, schwang ein Triebwerk am Pylon nach unten. Der untere vordere Teil der Cowl rutschte auf der Landebahn und wurde abgeschliffen. Nach dem Stillstand wurde ein Feuer in Triebwerksnähe vom Bodenpersonal gelöscht. Bruchstücke des vorderen Verbindungsbolzens zwischen Pylon und Flügel wurden im Pylon gefunden (Details nächste Seite).



Human Factors-Mängel die den Schaden begünstigten:

1: Unsichere, teils provisorische Standfläche in ca. 3 m Höhe über dem Betonboden. Keine Sicherungen gegen Herabfallen von Gegenständen.

2. Nur mit Verrenkungen zugängliche Prüfzone. Wegen sehr ungünstig, zu dicht positionierter Arbeitsbühne Absturzgefahr von Personen.

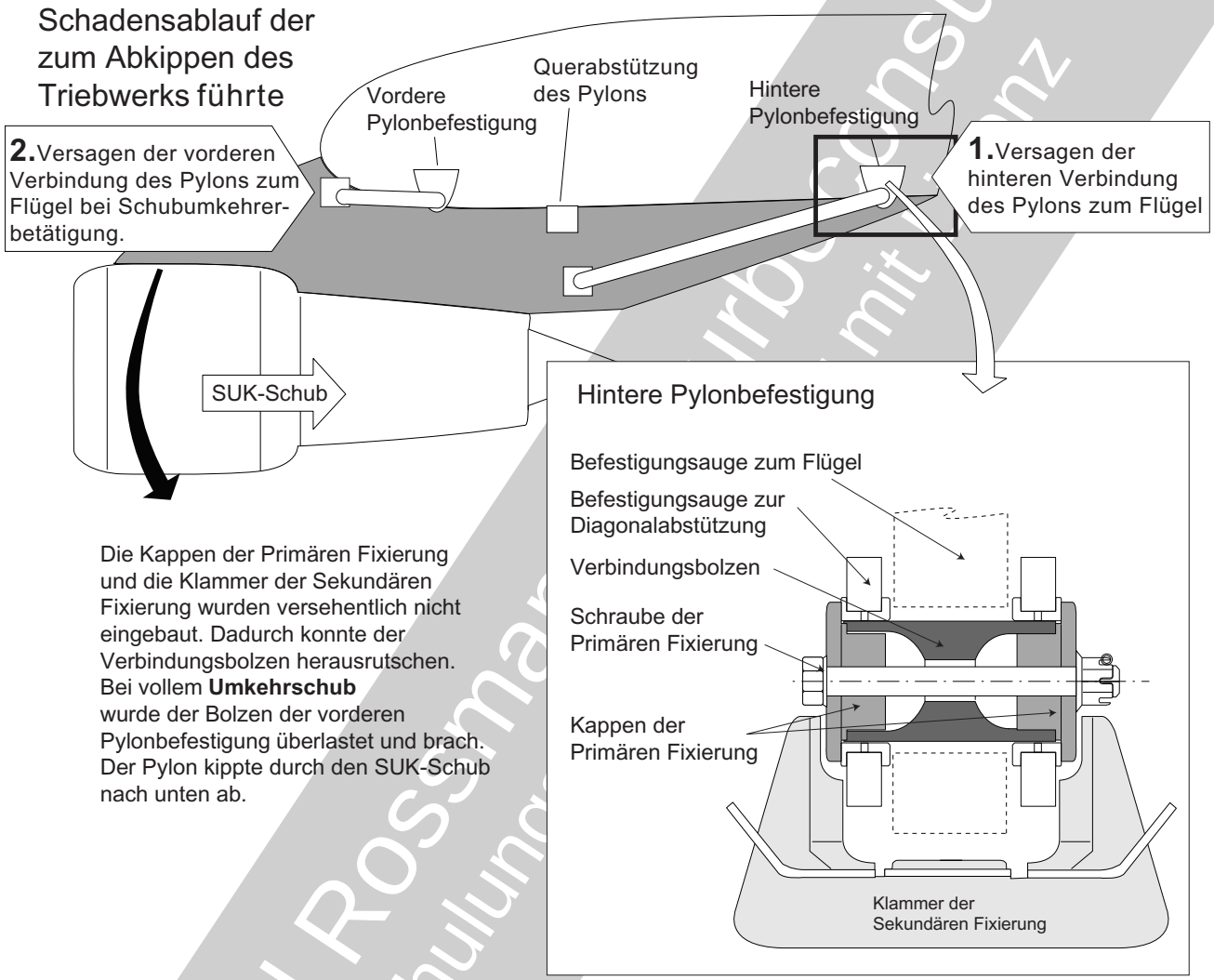
3. Von Farbe verschmutzte Beleuchtung nicht ausreichend.

4. Die ausgebauten Teile wurden ungeeignet gelagert.

5. Warnsystem ("Red Flag") nicht ausreichend verstanden.

Bild 16-8 *und* ***Bild 16-9*** *(Lit. 16-14 und Lit. 16-15): Zu dem Unfall kam es wegen eines* ***unsachgemäß eingebauten Sicherungsbügels für den hinteren Verbindungsbolzen*** *der Gondel zum Flügel (Skizzen rechts, „**1**“). So konnte der Bolzen aus der Verbindung rutschen. Das führte zu Überlastung und Bruch des noch vorhandenen vorderen Bolzens („**2**“) und zum* ***Ablösen der Gondel****. Fünf vorausgehende Fälle (!) mit einem „**Wandern**“* ***der Verbindungsbolzen*** *und ein früherer Parallelfall wurden von anderen Airlines bekannt. Alle Fälle standen im Zusammenhang mit einer* ***fehlerhaften Montage*** *der Gondelverbindung.*

Im Rahmen der Untersuchung dieses Unfalls wurden 18 Befragungen von Mechanikern, Prüfern (Inspektoren) und dem Management durchgeführt. Dazu kamen Interviews der Inspektoren der Aufsichtsbehörde für die Wartungsarbeiten beim Betreiber. Es wurden ***Abweichungen gefunden, die für die gesamte Luftfahrtindustrie von Interesse waren****. Zusätzlich wurden Informationen bei anderen Fluglinien gesammelt, bei denen ähnliche Pro-*



Die Kappen der Primären Fixierung und die Klammer der Sekundären Fixierung wurden versehentlich nicht eingebaut. Dadurch konnte der Verbindungsbolzen herausrutschen. Bei vollem **Umkehrschub** wurde der Bolzen der vorderen Pylonbefestigung überlastet und brach. Der Pylon kippte durch den SUK-Schub nach unten ab.

Bild 16-8

bleme aufgetreten waren. Wichtigste Erkenntnisse dieses Falls waren (siehe Bild 19.1-9):

*Das **Wartungspersonal des Flugzeugs war nicht geeignet trainiert** (geschult) **und fachkundig,** um die notwendigen Wartungsarbeiten und Inspektionen der großen Wartungsarbeiten (Heavy Maintenance) durchzuführen. Das begünstigte Fehler.*

*Es stellte sich heraus, dass **keine regelmäßige Schulung** in einem Schulungsraum stattfand. Die Position des **Schulungsdirektors war nicht besetzt**, seine Aufgabe einer anderen Funktion übertragen. Das Training erfolgte lediglich informell vor Ort (On-the-job-training = OJT). Dafür waren die Vorarbeiter (Lead mechanics) verantwortlich. Dieses Vorgehen galt auch für das „General Engineering and Maintenance Manual“ (GEMM) des Betreibers. Hier wurden die Inspektoren und Mechaniker spezifisch vertraut gemacht. Mechaniker wurden **geschult, wenn ein Training erforderlich war und die Arbeit es zeitlich zuließ**. Neu eingestellte Mechaniker nahmen an einem eintägigen Einführungsprogramm, das sich mit Grundlagen beschäftigte, teil.*

© Axel Rossmann Urbeconsult als Schulungsmittel mit Lizenz

Zusammenstellung der die Schadensentstehung begünstigenden Mängel im Wartungsprozess:

a. **Personal war nicht ausreichend trainiert und qualifiziert** um die notwendigen Wartungsarbeiten und Inspektionen durchzuführen.

b. Die **Zuordenbarkeit der mangelhaft ausgeführten Arbeiten** (Vergessen des Einbaus der Bolzensicherungen) nicht möglich.

c. Der Prüfer **zeichnete die Arbeitsschritte** auf den EDV-gestützten Arbeitskarten **nicht ordnungsgemäß ab**. Es entstand der Eindruck die Bolzensicherungen wären nach der Ultraschallprüfung eingebaut worden.

d. Die Endinspektion ("OK to Close") wurde von **schlechter Beleuchtung** behindert.

e. Das **EDV-gestützte System war unzureichend** denn es fehlten angemessene Informationen aus dem von der Aufsichtsbehörde (FAA) genehmigten Wartungshandbuch. Dies entsprach **nicht dem allgemeinen Wartungshandbuch** des Betreibers und es fehlten besondere Hinweise auf Vorgehen, Bauteile und Systeme für den Pylon des betroffenen Flugzeugtyps.

f. Mechaniker und Inspektoren **verstanden das EDV-gestützte System nicht ausreichend.** Das Verständnis des Sicherheitssystems mit dem Anbringen einer roten Flagge bei kritischen Wartungsarbeiten war ebenfalls mangelhaft.

g. Das **Aufsichtspersonal** des Betreibers **versäumte zu überprüfen**, ob die Vorgehensweise der Werker und Prüfer in Übereinstimmng mit dem zugelassenen Handbuch steht.

h. Die **Arbeitsumgebung war unzureichend** und begünstigte Fehler der Werker.

Bild 16-9

i. Eine geeignete **Aufbewahrung der ausgebauten Teile fehlte.** Das trug zum Schaden bei.

k. Die **Aufsichtsbehörde bemerkte mangelhafte Prozesse nicht** und ließ die unzureichenden Arbeitsbedingungen zu.

(siehe Bild 19.1-0.1 und Bild 19.1-0.2)

Während der Schulungen erhielten Mechaniker und Prüfer die Fähigkeit einen „ungewöhnlichen (nonroutine) Zustand der Aufgabe zu erkennen*. Der Ort konnte mit einem roten besonderen Wimpel (Red Flag) gekennzeichnet werden, dem eine beschreibende Karte, wie auch bei Routinearbeiten, zugeordnet wurde. Befragungen der Mechaniker zeigten Verständnisprobleme bei Vorgehen und Ablauf. Ein weiteres Problem war das betreiberspezifische EDV-gestützte Arbeitsplanungs-, -dokumentations- und -überwachungssystem. Eine Überprüfung im Rahmen der Unfalluntersuchung ließ eine Menge Schwierigkeiten im Zusammenhang mit diesem System erkennen. Beispielsweise traten Karten zweifach auf und konnten so zur doppelten Durchführung der gleichen Arbeit führen. Die häufigsten Probleme entstanden aus* ***Abweichungen zum Flugzeug-Wartungshandbuch*** *(airplane maintenance manual) sowie aus zu wenig* ***Grafiken und Schaubildern****. Das führte zu umfangreichem Abgleichungsaufwand mit dem Flugzeug-Wartungshandbuch.*

Neben den genannten ***allgemeinen Problemen*** *der Ausbildung, Organisation und Dokumentation förderten die Untersuchungen noch mehrere* ***spezielle Probleme*** *in Zusammenhang mit dem Unfall zu Tage. Alle Probleme sind in Bild 16-9 zusammengestellt.*

Die untere Skizze in Bild 16-8 zeigt ***Mängel in der „Arbeitsumgebung“*** *bei Arbeiten an der Gondelverbindung. Weder die* ***Montagebühne*** *noch die* ***Beleuchtung*** *oder die Aufbewahrung bzw.* ***Lagerung der ausgebauten Teile*** *entsprachen den Erfordernissen solcher sicherheitsrelevanter Arbeiten.*

© Axel Rossmann - Turbocons
Lizenz

Spektakuläre Folge von Wartungsmängeln

Am Flugzeug trat während des Fluges in ca. 8 000 Metern Höhe über dem pazifischen Ozean eine explosionsartige Dekompression auf. Nahezu 6 Meter der oberen Kabinenhälfte hinter dem Cockpit nach der Kabineneintrittstür war oberhalb des Kabinenbodens abgerissen. Ein Besatzungsmitglied wurde über Bord gerissen, Es gelang das Flugzeug auf einem Ausweichflugplatz einer Insel zu landen.

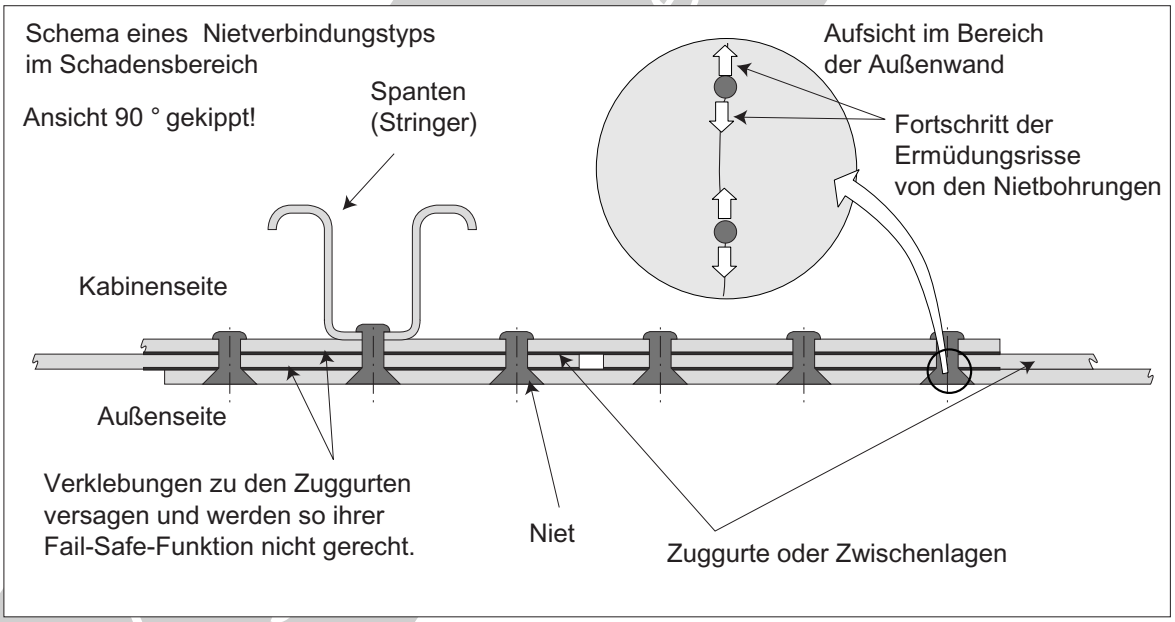


Bild 16-10

Bild 16-10 *(Lit. 16-17 und Lit. 16-18): Dieser Unfall hat zwar mit den Triebwerken nicht ursächlich zu tun, ist jedoch ein eindrucksvolles* ***Beispiel für Wartungs- und Überholprobleme****. Er war Anstoß für verstärkte Aktivitäten zum Einfluss der „Human Factors“. Deshalb soll er hier eingehender behandelt werden.*

Der Versagensablauf begann im Bereich einer ***Nietverbindung****. Entlang der Lochreihe längs der Kabinenwand entstanden an mehreren Stellen* ***Schwingrisse,*** *nachdem die zusätzliche* ***Klebeverbindung*** *des eingenieteten Zuggurtes versagte. Sie war für ein* ***Fail-Safe -Verhalten der Verbindung*** *gedacht, wies aber Fabrikationsmängel auf. Nach dem Versagen der Verbindung kam es zum dargestellten Schaden.*

Aus den ***Schlussfolgerungen des Untersuchungsberichts*** *(Lit. 16-17) lässt sich in Auszügen zusammengefasst entnehmen:*

- Vor dem Lösen der Klebeverbindungen mit nachfolgender Korrosion und Ermüdungsrissen

war bereits ***ca. 14 Jahre früher in einem Bulletin vom Flugzeughersteller gewarnt*** *und wiederholte Inspektionen gefordert worden.* ***Das potenzielle Schadensausmaß wurde jedoch nicht erkannt****.*

- Beim Betreiber lagen ***ausreichend Informationen*** *vor, um das Lösen der Klebeverbindungen mit einer Rissbildung in Verbindung zu bringen.*

Das hätte für die Durchführung des Wartungsprogramms ausreichen müssen, um Rissbildung zu erkennen und rechtzeitig zu reparieren.

- Die ***Aufsichtsbehörde*** *hätte die Inspektionen von einer (offenbar besonders kritischen) Überlappungsverbindung auf alle erweitern müssen.*

- Es war nicht herauszufinden, ob der Betreiber tatsächlich die in einer ein Jahr früher ausgegebenen ***Airworthiness Directive*** *(AD) geforderte* ***Wirbelstromprüfung*** *durchgeführt hatte oder die Prüfung unzureichend war. Diese* ***Prüfung hätte auch zusätzliche Ermüdungsrisse angezeigt****.*

Die Anweisungen der ***AD*** *ließen es wegen einer* ***Ungenauigkeit*** *zu, dass das Wartungspersonal den Austausch einer kritischen Nietsorte nicht vornahm.*

- Von der Aufsichtsbehörde wurde ***kein ausreichendes Wissen der von ihr zugelassenen Mechaniker*** *gefordert. Dies war jedoch erforderlich, um moderne Flugzeuge zu warten und zu prüfen. Grund waren für den Stand der Technik* ***nicht mehr zeitgemäße Schulungsunterlagen****.*

- Es gab ***Arbeitsbedingungen (Human Factors)****, die sich nachteilig auf eine* ***visuelle und zerstörungsfreie Prüfung*** *auswirkten. Das konnte dazu führen, dass zu erkennende Schäden nicht festgestellt wurden (siehe hierzu Band 4, Kapitel 17.3).*

- Das ***Betreibermanagement übersah menschliche Faktoren,*** *um eine erfolgreiche Prüfung zu motivieren. Hierzu gehörte die Konzentration auf Korrosion und Rissbildung kritischer Verbindungen. Spätere Informationen zeigten, dass dieser* ***Mangel offenbar bei vielen Betreibern*** *des betroffenen Flugzeugtyps bestand.*

- Ein ein Jahr früher durchgeführtes nationales Überprüfungsprogramm (NASIP)der Betreiberflotte ***fand die Schwachstellen nicht****.*

- Die ***Aufsichtsperson*** *der für den Betreiber zuständigen Behörde war* ***mit anderen Aufgaben überlastet*** *und nicht ausreichend über die Betreiberflotte informiert. So konnte sie nicht ausreichend auf den Wartungsprozess einwirken.*

Zusätzlich war sie mit dem Verbindungsproblem ***nicht besonders vertraut*** *und es fehlten* ***Informationen*** *zu absichernden Programmen der Behörde mit dem Flugzeughersteller.*

Für den Behördenvertreter ist es schwer, Verbesserungen in Wartungsprogrammen des Betreibers außerhalb der Anweisungsbefugnis allein durch Überzeugung auszulösen.

Die Schlussfolgerung der Untersuchung für die ***Hauptschadensursache*** *lässt sich wie folgt zusammenfassen:*

Der Flugunfall ist auf das ***Versagen des Wartungsprogramms*** *des Betreibers zurückzuführen. Gefährliche Trennungen der* ***Klebeverbindungen und Ermüdungsschäden,*** *die das Versagen der Kabine auslösten, wurden deshalb* ***nicht erkannt****.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 16

16-1 „Human Factor, Definition im Projektmanagement“, Internetzeitschrift www.Projektmagazin.de, 17.09.2006, Seite 1.

16-2 „Human Factors“, „Wikipedia“ Lexikon im Internet, 17.09.2006, Seite 1-6.

16-3 Dan Wagner, „Human Factors Design Guide“, Final Report and Guide, January 15, 1996, zu beziehen durch: National Technical Information Service, Springfield, Virginia (USA) 22161.

16-4 „Aviation Maintenance“ human factors research. FAA, „Flight Deck/Aviation Maintenance“, www.hf.faa.gov/flight.htm. 17.09.2006.

16-5 Aircraft Accident Report NTSB/AAR-96-03 (PB96-910403), „Uncontained Engine Failure Valujet Airlines flight 597 Douglas DC-9-32, N908VJ, Atlanta, Georgia, June 8, 1995“. (3680)

16-6 Weiterbildungsangebot „Magister Ludi“, Via Natale Battaglia, 8-20127 Milano Italy., www.magisterludi.com/aviation.

16-7 Weiterbildungsangebot „Maintenance Resource Management (MRM)“,Anbieter „Global Jet Stervices Inc“, www.globaljetservices.com.

16-8 J.C.Taylor, M.S.Patankar, „The Role of Communication in the Reduction of Human Error“, Seite 1-27.

16-9 G.J.Fogarty, R.Saunders, R.Collyer, „Developing a Model to Predict Aircraft maintenance Performance“, Proceedings des „10th International Symposium of Aviation Psychology“, May 3-6,1999, Columbus Ohio.

16-10 M.S.Patankar, J.C.Taylor, “Posterior probabilities of causal factors leading to unairworthy dispatch after maintenance“, „Journal of Quality in Maintenance Engineering“, Vol.9, Issue 1, May 2003, , Seite 38-47.

16-11 V.Mancuso, “Moving from Theory to Practice: Integrating Human Factors into an Organization“.

16-12 J.C.Taylor, “Evaluating the Effects of Maintenance Resource Management (MRM) in Air Safety“, Report of Research, SUC Project # NAR003, Vol.9, July 31, 2000, Seite 1-96.

16-13 J.C.Taylor, M.S.Patankar, “Four Generations of Maintenance Resource Management Programs in the United States: An Analysis of the Past, Present, and Future“, „Journal of Air Transportation World Wide“, Vol.6, No.2 - 2001, Seite 1-32.

16-14 NTSB Special Investigation Report,, „Maintenance Anomaly Resulting in Dragged Engine during Landing Rollout, Northwest Airlies Flight 18“, Narita Japan, March 1, 1994, PB94-917006, NTSB/SIR-94/02, Seite 1-61.

© Axel Rossmann - Fulbconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

16-15 Jim Hall, NTSB Safety Recommendation,, „Reply to A-04-218 through -223“, January 11, 1995, Seite 1-5.

16-16 E.G. Tripp, „Human Factors in Maintenance“, Zeitschrift „Business & Commercial Aviation“ April 1999, Seite 82-87.

16-17 NTSB, Aircraft Accident Report NTSB/AAR-89/03, „Aloha Airlines, Flight 243, Boeing 737-200, N73711, Near Maui, Hawaii, April 28, 1988“, 1089, Seite 1-214.

16-18 Maintenance and Ground Operations Systems - Customer Support, The BOEING Commercial Airplane Company. 1987, „Aloha Airlines Maintenance Evaluation“ Appendix I, Attachement to M-7360-87-3169, 1989, Seite 215-244.

16-19 E.G.Tripp, „Human Factors in Maintenance“, Zeitschrift „Business&Commercial Airlines“, April 1999, Seite 82-87.

16-20 Civil Aviation Authority (CAA), CAP 716, „Aviation Maintenance Human Factors (JAA JAR 145)“,First Edition 7.January 2002 , ISBN 0 86039 832 3, Appendix A „Definition of Human Factors “ .

16-21 B.Alexander, „Serious Flawed Security - An Object for Maintenance Malpractice?“, Zeitschrift „Air Safety Week“, 13. Dec. 2004, Seite 1-3. (3974)

16-22 W.K.Krebs, Information zum „Aviation Maintenance Human Factors Execution Plan“ , Oct. 15th, 2004, FAA ATO-P R&D Human Factors, , Seite 1-9.

16-23 G.Drury, J.Ma „Do Language Barriers Result in Aviation Maintenance Errors“, Proceedings of the „Human Factors and Ergonomics Society 47th Annual Meeting - 2003“.

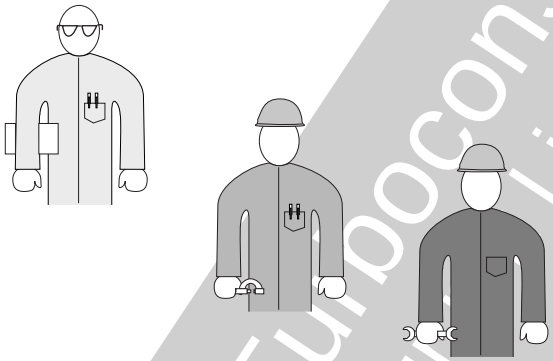
16-24 Civil Aviation Authority (CAA), Safety Regulation Group, CAP 718, „Human Factors in Aircraft Maintenance and Inspection“ (previously IVAO Digest No. 12), First Edition 24.January 2002 , ISBN 0 86039 836 6

16 -25 D.Wagner, J.A. Birt, M.Snyder,, J.P. Duncanson, „Human Factors Design Guide“, For Acquisition of Commercial-Off-The- Shelf Subsystems, Non Development Items and Development Systems, January 15 (1996, US Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA) und Office of the Chief Scientific and Technical Advisor for Human Factors (AAR 100), National Technical Information Service, Springfield, Virginia 22161, zum freien Down Load im Internet. erhältlich.

16-26 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Torbo-Flugtriebwerken“, Band 5, 2008, Turboconsult, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 19.2, Bild 19.2-2.2, Bild 19-4, Bild 19-11 und Kapitel 25.2.2.1.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

16.1 Erfahrung, Fachkenntnis und Fähigkeiten.



Die Probleme dieser Aspekte werden **am Beispiel der Wartung sicherheitsrelevanter Maschinen** und Anlagen behandelt.Die komplexen und oft auch höchstbelasteten Bauteile einer modernen Maschine, insbesondere des Leichtbaus wie eines Triebwerks erfordern vom damit Beschäftigten ein hohes Niveau an praktischen Fähigkeiten mit umfangreichem Fachwissen. Es ist wichtig dass sich auch die schulische Ausbildung (praxisorientierte und Hochschule) an dieser Notwendigkeit orientiert. Dabei kommt es darauf an, das **Wissen in Handeln umzusetzen**. Diese Begabung schließt theoretische Orientierung ohne Bezug zur Praxis aus. Die Beschreibungen des **Berufsbilds von Technikern, Ingenieuren und Mechanikern**, insbesondere von **Prüfern** (**Certifying Staff** Maintenance), beinhaltet Wissen, das einer Zusatzausbildung bedarf. Beispielsweise sind die Aufgaben der **Triebwerksmechaniker** (aircraft engine mechanic) und deren Vorstufen als **Triebwerksreparierer** (aircraft engine repairer) äußerst anspruchsvoll. Natürlich sind ähnliche Anforderungen auch in Berufsbildern von Kraftwerkspersonal oder in der Kraftfahrzeugreparatur von Vorteil. Hier ist jedoch die Sicherheitsrelevanz gewöhnlich niedriger. Das gilt insbesondere für die Risiken eines Unfalls als Folge eines Fehlers.

Die folgenden Beispiele (Bild 16.1-1) lassen die hohen Ansprüche an die Tätigkeit erkennen :

Bereits in einer unteren Stufe als „**Repairer**“ wird verlangt:
- **Einschätzung und Entscheidung über Wiederverwendbarkeit bzw. Reparierbarkeit.**
- **Schäden finden** bzw. Teile **bewerten**.
- **Erkennen** ungewöhnlicher Verschleißanzeichen, beispielsweise an Leitungen aller Art.
- Ermittlung von **Ursachen für Fehlfunktionen** und Schäden.

Der **Mechaniker** hat darüber hinaus Tätigkeiten zu entscheiden und durchzuführen wie:
- Besondere Problemlösungskapazität zur **Klärung von Fehlfunktionen** und zur Einleitung geeigneter **Massnahmen**.
- **Diagnose von Problemen** durch Auswertung von Sensordaten mit Analysesoftware.
- **Ursachen von Schäden** ermitteln.

Prüfer (Freigabeberechtigte, **Certifying Staff**) haben eine besonders anspruchsvolle Tätigkeit (Bild 16.1-2). Sie müssen die oben angegebenen Forderungen in größerer Tiefe beherrschen.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur Lizenz

Erfahrung, Kenntnisse und Fähigkeiten

Um aus dem Verhalten einer Maschine bei Fehlfunktionen **ursächliche Zusammenhänge** zu erkennen, ist ein hohes Maß an logischem Denken sowie **profunde Kenntniss der zu bearbeitenden Systeme unerlässlich**. Ein Beispiel ist das Verständnis des Mechanismus und der Auswirkung von Pumpvorgängen im Verdichter auf Triebwerksbauteile. Deren gezielte Überprüfung erfordert umfangreiches Bildmaterial in Handbüchern und Anweisungen mit der Kenntnis möglicher gegenseitiger Auswirkungen, insbesondere bei Veränderungen und Schäden. Dies ist wiederum für erfolgversprechende Maßnahmen, wie Inspektionen oder Prüfläufe notwendig (Lit. 16.1-18). Häufig sind neben allgemeinem Wissen **Spezialkenntnisse für den zu betreuenden Triebwerkstyp** unerlässlich. Dazu gehören Schadensmechanismen, deren Identifikation und Einschätzung (Bild 16.1-1). Üblicherweise sollte dem „Repairer" bzw. dem Mechaniker **ausreichendes Bildmaterial** vorliegen, das eine Identifikation des Problems und ausreichend sichere Bewertungen gewährleistet. Solche Angaben sollten in Handbüchern oder speziellen Anweisungen bei Sonderaktionen erwartet werden. Trotzdem ist ein hohes Maß von Erfahrung und Fachkenntnis notwendig.

Kontrollbefunde, wie von einer Boroskopinspektion, erfordern neben der reinen Prüftätigkeit die sichere Deutung. Beschreibungen und Bilder in einer Anweisung oder einem Handbuch müssen dazu ausreichend verstanden sein. Das unterstützt eine Tendenz in Richtung einer Ingenieurausbildung. Hier lauern aber auch Gefahren, wenn die praktische Tätigkeit, obwohl unerlässlich für die Umsetzung des Wissens, ihren berufstypischen Stellenwert verliert.

Während die praktischen Tätigkeiten besonders effektiv mit „**Learning by Doing**" vermittelt werden, ist dies bei Problemsituationen wie **Abweichungen und Schäden** deutlich schwieriger. Zwar werden Vorgehensweisen zur Problemlösung vermittelt (MEDA, Bild 16-6) doch fehlt oft die **Fachbegriffssicherheit** und ein ausreichendes Verständnis dahinter stehender Effekte. So wird die Einschätzung der Gefahr einer Situation schwierig (Bild 16 .1.1-1).

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

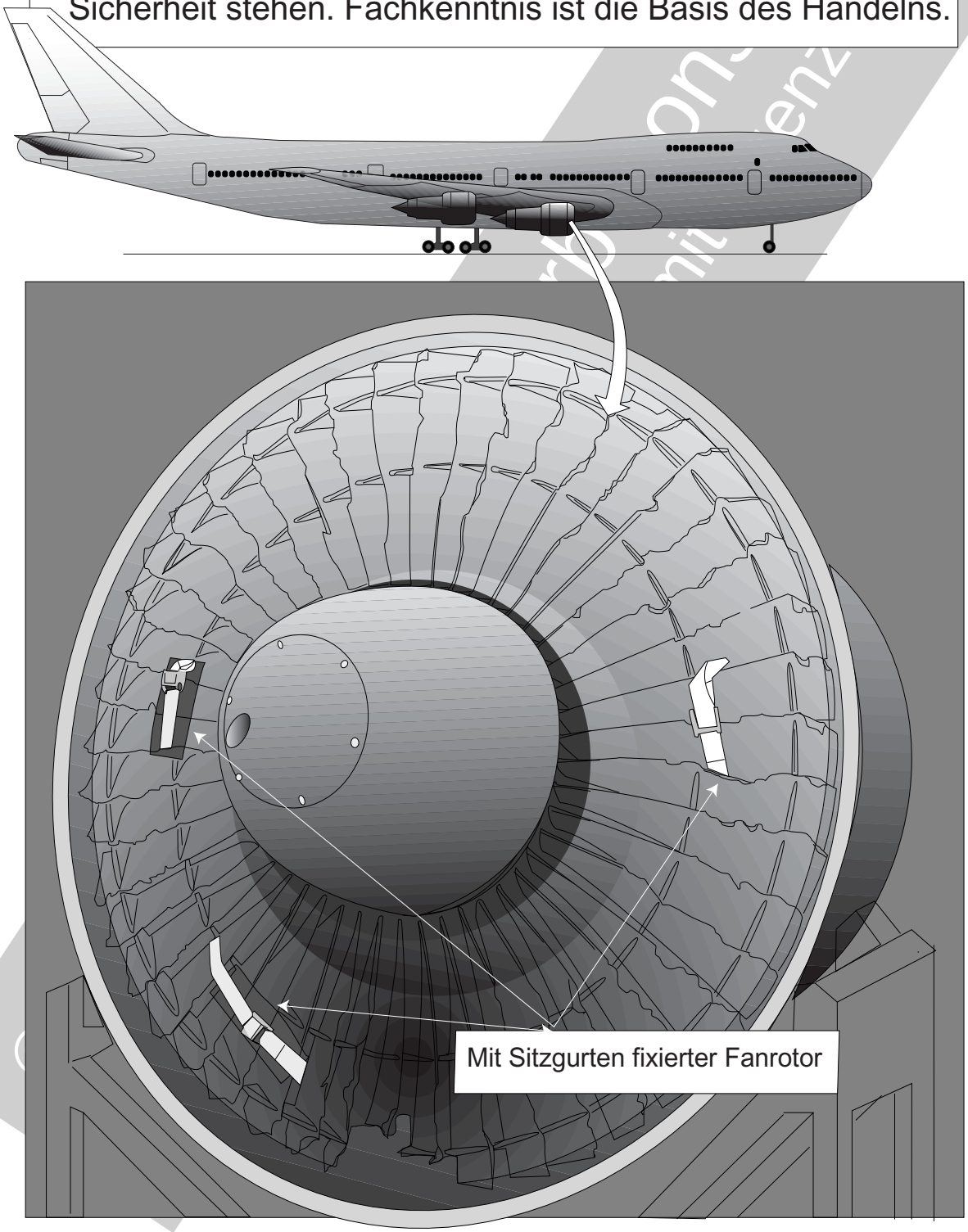
***Bild 16.1-0.1**: Dieses große Fantriebwerk eines vierstrahligen Verkehrsflugzeugs erlitt einen Vogelschlag und musste wegen heftiger Vibrationen abgeschaltet werden. Das Triebwerk auszubauen und zum Reparaturshop zu bringen ist zeit- und kostenaufwändig. Dies dürfte ein Grund sein,warum sich die Wartungsmannschaft entschloss, mit **Gurten** (Sitzgurte?) **den Fanrotor zu fixieren**. So sollte im Flug ein Windmilling mit entsprechenden Vibrationen vermieden werden. Anschließend erfolgte der Flug mit den drei verbliebenen intakten Triebwerken. Der **hohe Luftwiderstand des stehenden Fans** führte zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch, was offenbar nicht eingeplant war. So musste für einen Tankstopp zu einem Flughafen auf der Strecke ausgewichen werden. Die dortigen Flugsicherheitsbehörden erzwangen den Austausch des Triebwerks, was ca. 10 Tage erforderte. Eine Inspektion der anderen 3 Triebwerke ergab, dass auch diese wegen Mängeln ausgetauscht werden mussten. DieserFall kann als abschreckendes Lehrbeispiel dienen. Er lässt nämlich auf eine **Geisteshaltung innerhalb der Wartungscrew** schließen, die für Wartungsarbeiten an Flugzeugen bzw. Triebwerken absolut ungeeignet ist.*

*Auch wirft die **Priorisierung ökonomischer Überlegungen** gegenüber Sicherheit und Fachkenntnis ein schlechtes Licht auf das gesamte Management des Betreibers und auf die **Firmenkultur**.*

***Vorschriften und Handbücher des OEM** wurden offenbar nicht beachtet.*

Erfahrung, Kenntnisse und Fähigkeiten

Kostenminimierung kann bei der Wartung nicht vor der Sicherheit stehen. Fachkenntnis ist die Basis des Handelns.



Dieses durch Vogelschlag stark beschädigte Triebwerk wurde am Flügel mit blockiertem Fanrotor transportiert. Der hohe Luftwiderstand erforderte eine frühzeitige Landung.

Bild 16.1-0.1

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

***Bild 16.1-0.2**: Die **Aus- und Weiterbildung des Wartungspersonals** (Berufsbezeichnung **Triebwerkstechniker**) hängt nicht zuletzt von den **Lehrunterlagen** ab (siehe auch Kapitel 19-1). Sie sollten die Erfahrungen anhand **konkreter und praxisnaher Beispiele** nutzen. Leider werden in erster Linie nur Flugunfälle oder besondere Vorfälle (Incidents) so ausreichend dokumentiert veröffentlicht, dass sie für Lehrzwecke tauglich sind. Von großem Informationsgehalt und damit besonders lehrreich sind **Schadens-/Unfallberichte** (Accident Incident Reports) der verschiedenen nationalen Flugsicherheitsbehörden wie ATSB und NTSB. Solche Berichte sind über das Internet zugänglich. Sie sollten jedoch von einem ausreichend erfahrenen Fachmann zu Lehrzwecken geeignet ausgewertet werden.*

Eine vielfach größere Zahl interessanter, insbesondere praktischer Probleme tritt zwar offensichtlich weltweit täglich auf. Die zum Verständnis notwendigen Hintergrundinformationen sind jedoch gewöhnlich, wenn überhaupt vorhanden, sehr spärlich. Sie sind so für den Außenstehenden zu unbefriedigend, um lehrreich zu sein. Zu solchen Dokumenten gehören verschiedenste Anweisungen (Bild 19-1), wie

- Lufttüchtigkeitsanweisungen (AD-Notes),
- Alerts,
- Service Difficulty Reports (Lit. 16.1-16).

*Gerade aber „**kleine tägliche Vorkommnisse**“ wären für die praktische Arbeit des Wartungspersonals lehrreich und so für die Sicherheit von Bedeutung.*

Erfahrung, Kenntnisse und Fähigkeiten

Leider können wir nur aus einem kleinen Teil der Vorkommnisse, die ausreichend zugänglich dokumentiert sind, lernen.

Auf einen allgemein zugänglichen, detaillierten Bericht kommen weitaus mehr Probleme die außerhalb der Öffentlichkeit gelöst werden. Man fühlt sich an einen Eisberg erinnert.

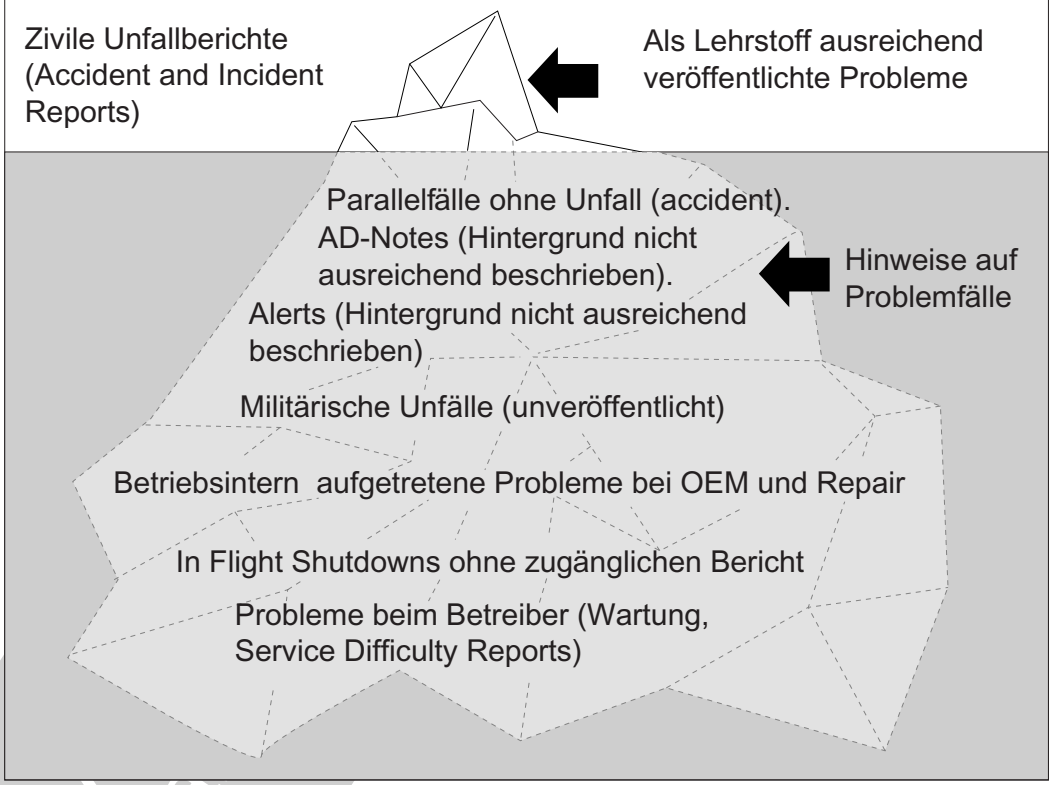


Bild 16.1-0.2

Bild 16.1-1 *(Lit 16.1-2): Diese* ***Berufsbilder*** *sind als sehr anspruchsvoll zu bewerten. Es ist anzunehmen, dass die Voraussetzungen für die beschriebenen Tätigkeiten auch Ausbildern nicht voll bewusst sind. Daraus ergibt sich die Frage, ob die Ausbildung den heutigen Anforderungen gerecht wird (Bild 16-2). Im Folgenden wird deshalb versucht, die notwendigen Kenntnisse als Voraussetzung für bestimmte Tätigkeiten zu beschreiben.*

Erkennen und Bewerten äußerer Beschädigungen*: Viele Beschädigungen sind teilespezifisch und stehen in enger Beziehung zu deren Funktion. Das gilt z.B. für Rohrleitungen (Band 2, Kapitel 6.11). Sowohl typische Bauteilzonen, an denen bestimmte Schäden wie Reibverschleiß (Fretting) oder Ermüdungsrisse auftreten, sind zu identifizieren, als auch die Art des Schadens. So ist Fretting an Titanrohren im Vergleich zu CrNi-Stahlrohren besonders kritisch zu werten.*
Das Erkennen ungewöhnlicher Beschädigungen wie Verschleißerscheinungen setzt die Kenntnis „gewöhnlicher“, d.h. bauteilspezifischer Schäden voraus. Dieser Vergleich ist nur bei ***ausreichender Erfahrung*** *möglich.*

Einschätzung der Weiterverwendbarkeit bzw. Reparierbarkeit *erfordert genauere Kenntnisse der Bauteilfunktion in Abhängigkeit von betriebsbedingten Veränderungen. Insbesondere wenn diese Angaben in den Bewertungsunterlagen nicht zweifelsfrei zuordenbar sind (Bild 16-5). Um Befunde den Angaben und Grenzen in den Dokumenten wie Handbüchern zuzuordnen, ist der* ***Schädigungsmechanismus zu identifizieren****. Hierfür sind weitgehende Kenntnisse, sowohl theoretischer Art, als auch auf Basis von Erfahrung, notwendig. Solche Anforderungen gelten auch für das „****Lesen und Interpretieren technischer Dokumente****“.*

Die ***Kenntnis der Systeme*** *beinhaltet neben komplexen Funktionen und deren Auswirkungen auch das Erkennen und Bewerten von Abweichungen. Typisches Beispiel sind Fremdkörper im Öl (Band 2, Kapitel 7.1.3.2.2). Die richtige Vorgehensweise bei Magnetchip- und Filterkontrollen erfordert auch Kenntnisse möglicher Ursachen (Band 2, Kapitel 7.1, Kapitel 7.2 und Kapitel 81).*
Die ***Diagnose von Problemen*** *soll die Ursache von Schäden mit geeigneten Abhilfemaßnahmen (Reparaturen, Kapitel 16.4) ermitteln. Das erfordert noch weitreichendere Kenntnisse, weil sonst die Gefahr besteht, dass lediglich an Symptomen kuriert wird.*

Freigabeberechtigtes Personal:

Eine besonders hohe Qualifikation wird von sog. ***Prüfern von Luftfahrtgerät*** *verlangt, seit 1991 als* ***freigabeberechtigtes Personal*** *bezeichnet. Dafür ist eine* ***Ermächtigung*** *nach JAR 145 für Triebwerke (mit Musterberechtigung) erforderlich (Lit. 16.1-18). Der notwendige Wissensstand ist, entsprechend der Einstufung in eine „Category“, in einer spezifischen Prüfung nachzuweisen.*
Die Europäischen Luftfahrtbehörden (Joint Aviation Authorities = JAA) haben 1991 eine Harmonisierung beschlossen.
Diese geht vom ***personenorientierten Prüfwesen zur systemorientierten Qualitätssicherung*** *über.*

- ***JAR 145 Approved Maintenance Organisations****. Die entsprechende Freigabebescheinigung regelt die betriebliche Ermächtigung für eine persönliche Freigabeberechtigung zusammen mit JAR 66.*
*Zum Kreis des „****Certifying Staff****“ gehören nach dieser Vorschrift für den triebwerksrelevanten Bereich:*
- ***Line Maintenance Certifying Mechanic*** *(LMCM, Category A). Ist berechtigt Freigabebescheinigungen für persönlich durchgeführte*

Fortsetzung 2 Seiten weiter

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Erfahrung, Kenntnisse und Fähigkeiten

Berufsbeschreibung für Flugtriebwerksmechaniker

Ansteigende Qualifikation, Komplexität der Aufgabe und Verantwortung

Aircraft Engine **Repairer** (Grade 8)

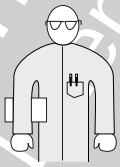
Führt standardmäßige Demontage- und Montagearbeiten sowie festgeschriebene Änderungen an Triebwerken und deren Komponenten durch.

- Demontage und Montage von Triebwerken und deren Komponenten.
- **Entscheiden über Wiederverwendbarkeit. Erkennen äußerer Beschädigungen**
- Anwendung von Sonderwerkzeugen und Vorrichtungen um Beschädigungen zu vermeiden.
- Schadensfrei gängig machen bzw. lösen festsitzender oder beschädigter Teile.
- Anwendung von Standard-Messverfahren **um Schäden zu finden bzw. beschädigte Teile zu bewerten**.
- Lesen/Verstehen von Zeichnungen und Vorschriften für eine visuelle/maßliche **Prüfung von Teilen auf Beschädigungen und Betriebseinflüsse**.
- **Erkennen von ungewöhnlichen Verschleißanzeichen** an Teilen und mechanischen Systemen.
- **Einschätzung der Weiterverwendbarkeit bzw. Reparierbarkeit** ausgebauter Teile.
- Feststellung nicht passender bzw. nicht fluchtender Teile als **mögliche Ursache für Fehlfunktionen oder Schäden**.
- Anwendung der EDV für die Nutzung elektronischer Handbücher und die Verfolgung von Bauteilen.
- **Erkennen fehlerhafter oder verschlissener Leitungen** (elektrisch, Kraftstoff, Öl, Hydraulik...) und Verschraubungen/Verbindungen.
- Verwendung handelsüblicher angetriebener Werkzeuge.

Aircraft Engine **Repairer** (Grade 9)

Führt Demontage- und Montagearbeiten im gesamten Bereich konventioneller und/oder **modifizierter Triebwerke** durch. Montage an komplexen eng tolerierten Bauteilen und Systemen.

- Anpassen neuer oder modifizierter Montagevorgänge.
- Kombinieren und **anpassen von Tätigkeiten** für kritische Arbeiten wie Spalthaltung zwischen Rotor und statischen Teilen.
- Anwendung von Präzisionsmessgeräten, um **Abweichungen zu ermitteln** und passende Teile (Toleranzen, Wuchtzustand) auszuwählen.
- Anwendung von Anzeigegeräten für die Toleranz von Aufbauten, wie Rotoren, Verstellleitschaufeln und Schubdüsen.
- Auswahl der geeigneten Werkzeuge und Vorrichtungen für **sicheres und effizientes Arbeiten**.
- Anwendung von Drehmomentschlüsseln und automatischer Messaufbauten für **Anzugsmomente** von Schrauben und Verspannung von Lagern.
- Anwendung von besonderen Montage-/ Demontagewerkzeugen
- Anwendung **elektronischer Datenverarbeitung** für Handbücher (manuals) im Zusammenspiel mit Arbeitsabläufen und Montageplänen, bis hin zum kompletten Triebwerk.
- Lesen und **Interpretation von technischen Zeichnungen** und Skizzen.
- **Finden und identifizieren von Problemen** wie Graten an Zerspanungsflächen, welche die Montage behindern (z.B. Ausrichtung) und Unwuchten in Rotoren erzeugen.
- **Kenntnis der Systeme** (Öl, Kraftstoff, Hydraulik, Elektrik) um deren Funktion zu gewährleisten



Aircraft Engine **Mechanic** (Grade 10)

Besitzt **Problemlösungskapazität** (troubleshoot) um Fehlfunktionen auch in modifizierten Triebwerken zu lösen und Reparaturen durchzuführen. Hierzu **Kenntnisse der gesamten Systeme.**

- Erkennen und Auswahl **alternativer Methoden,** um zugelassene Reparaturmethoden sowie Werkzeuge und Teile auch an neuen Triebwerkstypen anzuwenden
- **Reparatur und Nacharbeit** an Triebwerksteilen und Komponenten. Einstellarbeiten an Systemen.
- Anwendung von **Präzisionsmessgeräten** wie zur Schwingungsanalyse (z.B. an Rotoren), um **Probleme zu erkennen und Abhilfen zu realisieren**
- **Diagnose von Problemen** mit Hilfe der Bordinstrumentierung, die das Betriebsverhalten des Triebwerks beeinflussen.
- Anpassung und Anwendung neuer Hilfsmittel wie Zyklenzähler für die Lebensdauer.
- Anwendung von Pyrometern und Messaufbauten an Prüfständen.
- Abgleich **digitaler Diagnosedaten** sowie Abhilfe bei Abweichungen.
- Anwendung von **Analysesoftware** gegen Fehlfunktionen des Triebwerks.
- **Erstdiagnosen,** um das geeignete Werkzeug für die Zerlegung auszuwählen.
- Nutzung der Prüfausrüstung, um die **Ursache von Schäden zu ermitteln** und die erforderliche Reparatur festzulegen.
- Auswahl geeigneter **Techniken, um Probleme abzustellen** (Troubleshooting). Hierzu gehört die **Auswertung von Informationen aus der Wartungsmannschaft als auch von den Piloten**.
- Anwendung komplexer technischer Beschreibungen wie Zeichnungen oder Wartungsbulletins.

Sinngemäß nach Job Grading Standard for Aircraft Engine Mechanic, 8602

Bild 16.1-1

© MTU Aero Engines - Turbocons - Lehrmaterialien nur zum Unterricht an Schulen und Universitäten

Fortsetzung von Seite 16.1-6

einfache planmäßige Wartungsarbeiten und behobene einfache Mängel auszustellen.
*- **Line Maintenance Certyfying Technician** (LMCT). Für Triebwerke **Category B1**. Berechtigt zu Freigaben entsprechend Category A und nach Wartungsarbeiten an Triebwerken und elektrischen Systemen.*
*- **Base Maintenance Certifying Engineer** (BMCE, Category C) ist berechtigt Instandhaltungsarbeiten für das Gesamtflugzeug und alle Systeme freizugeben.*

*- **JAR 66** Certifying Staff Maintenance regelt die Voraussetzungen für die Lizenz zur Freigabeberechtigung, zusammen mit JAR 145.*

*- **JAR 147** Approved Maintenance Training / Examinations: Regelt Ausbildung und Genehmigung der Ausbildungseinrichtungen.*
Nach der JAR 145 erfolgt der Lufttüchtigkeitsnachweis durch die Instandhaltungsbetriebe. Nach deutschem Recht erfolgte dies von Prüfern selbst oder unter deren Aufsicht.
*Damit ging man vom **personenorientierten Prüfwesen zur systemorientierten Qualitätssicherung** über. Dazu muss das freigabeberechtigte Personal eine Lizenz nach JAR-66 und eine betriebliche Ermächtigung besitzen.*
*Neben ausreichender praktischer Erfahrung, die sich auch nach der abgeschlossenen Ausbildung richtet, sind umfangreiche theoretische Kenntnisse notwendig. Dafür kommen sowohl erfahrene Facharbeiter (z.B. Triebwerksmechaniker) mit spezifischer Weiterbildung, als auch Techniker und **Ingenieure mit Hochschulausbildung und nachgewiesener praktischer Erfahrung** in Betracht. Die Ausbildungen werden von der zuständigen Luftfahrtbehörde **zugelassenen Lehranstalten** (Lit. 16.1-18) angeboten.*

Die Aufgaben/Rechte freigabeberechtigten Personals sind sehr verantwortungsvoll.

*Betrachtet man die dazu angebotene **Fachliteratur** (Lit. 16.1-18) so lässt sich daraus der Schluss ziehen, dass Freigabeberechtigte in der Lage sein müssen auch **komplexe Situationen einzuschätzen**. Dazu dürfte beispielsweise auch die Kenntnis von **Schadensabläufen, -mechanismen und Risiken** gehören. Diesen Themen widmet sich die vorliegende Buchreihe besonders, wie es wohl in keiner bisher frei verfügbaren Fachliteratur der Fall ist.*

***Bild 16.1-2** (Lit. 16.1.1-9): Das Wartungspersonal und der Betreiber kann durch Aufmerksamkeit Anzeichen für Probleme frühzeitig erkennen und gegebenenfalls in Zusammenarbeit mit dem Hersteller rechtzeitig geeignete Abhilfemaßnahmen einleiten (Lit. 16.1-18). In nebenstehendem Bild sind typische äußere Merkmale für sich anbahnende Probleme an einem Triebwerk dargestellt:*

*Drahtummantelungen von elastischen Bälgen **(A)** können nach längeren Laufzeiten auf Grund der funktionsbedingten Bauteilbewegungen von der Innenseite her durchgescheuert werden. Dies führt zu Drahtbrüchen und einem Aufspleißen des Balgs, bevor ein vollständiges Versagen der Rohrverbindung eintritt.*

Bälge auf Aufspleißungen kontrollieren!

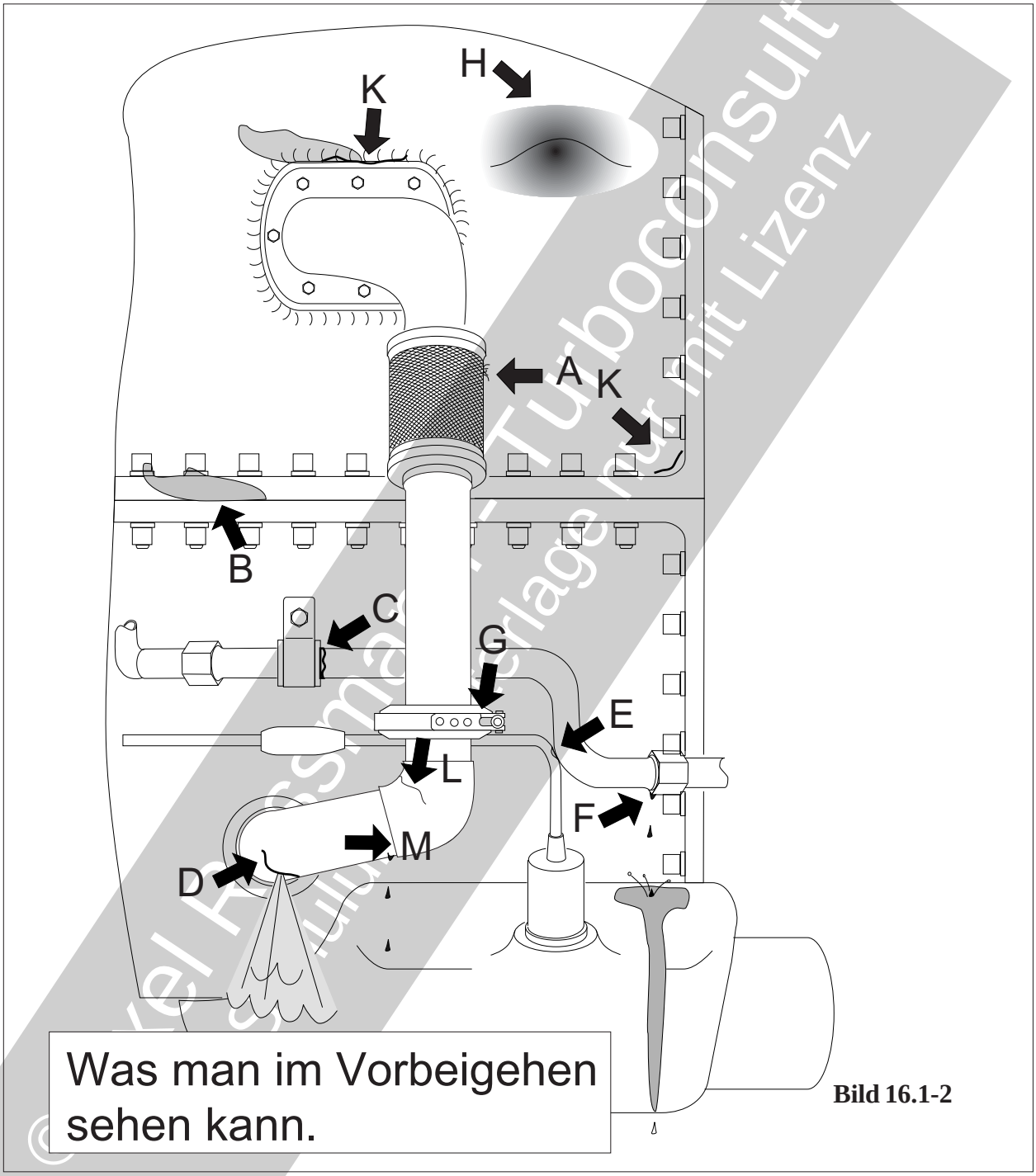
*Flanschverbindungen **(B)** von druckführenden Gehäusen, wie die des hinteren Verdichters oder von Brennkammer und Turbine, können unzulässige Leckagen (z.B. infolge versagender Verschraubung oder durch Rissbildung) aufweisen, die sich mit örtlichen Verfärbungen der Gehäusewand anzeigen.*

***Auf ungewöhnliche Verfärbungen und Deformationen der Gehäuse** im Flanschbereich achten!*

*Bei Rohrleitungen im Bereich von Befestigungsschellen **(C)** besteht bei zu lockerem Sitz der*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Erfahrung, Kenntnisse und Fähigkeiten



Was man im Vorbeigehen sehen kann.

Bild 16.1-2

© Axel Rossmann - Turboconsult
Verlage nur mit Lizenz

Schellen eine erhöhte Gefahr von Scheuerstellen und Rissbildung (Band 2, Beispiel 6.11.1.2-2) . Zusätzlich wird die schwingungsdämpfende Wirkung einer Schelle auf die Rohrleitung durch einen lockeren Sitz vermindert.

Auf Scheuerstellen im Bereich von Schellen achten!

*Rissbildung an verspannten und schwingenden Rohrleitungen **(D)** treten immer wieder auf (Band 2, Bild 6.11.1.2-6).*
Deshalb ist bei der Montage auf unverspannten Einbau der Rohrleitungen besonders Wert zu legen!
*Undichte Lötung oder Schweißung **(M)**.*
*Spröder Riss durch Gewaltüberlastung eines (gegossenen) Krümmers **(L)**.*

*Scheuerstellen an Anlageflächen von Leitungen **(E)** können der Anfang eines Funktionsversagens sein, deshalb:*

Scheuerstellen der Bauteile erkennen und vermeiden!

*Austritt von Öl, Kraftstoff, Hydraulikflüssigkeit insbesondere im Bereich von Verschraubungen **(F)**.*

Auf austretende Medien achten!

*An Flanschschellen **(G)** sind die aufgenieteten Laschen anrissempfindlich (Band 2, Bild 6.11.1.2-10 und Band 1 Bild 5.6.3.1.2-2). Aber auch Brüche der Schließschrauben im Zusammenhang mit Korrosion oder Versprödung sind nicht auszuschließen (Band 1 Bild 5.6.3.1.2-1).*

Spannschlösser an Flanschschellen beachten!

*Ausbeulungen **(H)** an druckführenden Gehäusen. Bei Heißteilen können örtliche Anlauffarben oder örtlich verstärkte Oxidation Anzeichen für Probleme im Inneren der Bauteile (z.B. Gehäuse der Brennkammer und der Turbine, Lit. 16.1-19) sein.*

Bei Ausbeulungen an Gehäusewandungen den Hersteller informieren!

*Schweißstellen und verformungsbehinderte Bereiche wie Gehäuseecken **(K)** sind gegenüber Thermoermüdung und Druckzyklen besonders empfindlich (Band 1 Bild 5.4.2.1-5). Örtlich auffällige Veränderungen, wie Verfärbungen, können in diesen Bereichen Hinweise auf ausströmendes Heißgas durch einen Riss sein.*

Auf Anzeichen für Rissbildung im Gehäusebereich achten!

***Bild 16.1-4** (Lit. 16.1-8): Dieser Flugunfallist in Lit. 16.1-18 ausführlich beschrieben. Auslösend war die Problematik einer **Identifikation von Schadensursachen und -abläufen sowie deren Einfluss auf die Bauteileigenschaften**. Über die **Schädigung von Heißteilen,** wie Brennkammerwänden nach langen Laufzeiten, sollte eine ausreichende Vorstellung bestehen (Lit. 16.1-20). Beispielsweise lassen hohe Betriebstemperaturen und **Thermoermüdungsbeanspruchung** eine Schädigung des Werkstoffs erwarten, die keinen Neuteilzustand nach einer Reparatur ermöglicht.*

*Grundkenntnisse über das **Risswachstum** sollten auch die Überlagerung mit anderen bauteiltypischen Betriebsbelastungen (HCF, Innendruck) einschließen. Das dürfte im vorliegenden Fall davor schützen, allein **TF** (Thermal Fatigue) und nicht **TMF** (Thermal Mechanical Fatigue) zu betrachten (siehe hierzu Band 1, Kapitel 5.4.2).*

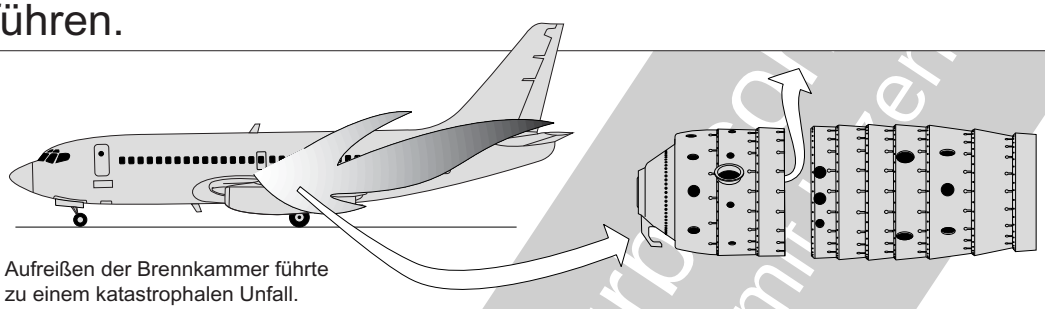
*Die **Kennzeichnung eines Schadensausmaßes**, z.B. als 'severe' erfordert die Übertragung auf das Bauteil. Dafür ist auch bei vorliegendem Bildmaterial Erfahrung notwendig.*

*Über **Rissbildung** sollte soviel Kenntnis bestehen, dass die **Charakterisierung durch eine Rissbreite statt einer Risslänge zumindest problematisch** ist (Lit. 16.1-18). Eine Bewertung auf dieser Basis widerspricht den Erkenntnissen der Bruchmechanik. Sie ist, wenn überhaupt, nur bei ausreichend fallspezifischer Erfahrung denkbar.*

© Aero Research - Turbosoft
Nur für Schulungszwecke verwendbar

Erfahrung, Kenntnisse und Fähigkeiten

Nicht voll verstandene Schadensmechanismen und Schadensabläufe können zu fürchterlichen Irrtümern führen.



Aufreißen der Brennkammer führte zu einem katastrophalen Unfall.

Zitat: "Solution heat treatment of AMS5536 (Hastelloy X) at 1900 °F- 2050°F (1027-1121°C) **can restore original material properties** used to extend the useful service life of...combustors, sometimes by as much as one-third".

Von der Wärmebehandlung eines Heißteilwerkstoffs (z.B. Brennkammerliner) mit mehreren Tausend Betriebsstunden im Grenzbereich seiner Einsatztemperatur ist nicht mit der Wiederherstellung der Original-Werkstoffdaten (des Neuteils) zu rechnen. Hierzu gehören auch die Schweißeigenschaften! Verwirrend in der Angabe ist dann, dass offenbar die Lebensdauer der Brennkammer maximal um 30 % verlängert werden kann. Das legt den Schluss nahe, dass von einer Schweißreparatur auch nach einer Wärmebehandlung höchstens ein Drittel der Lebensdauer unter Betriebsbelastung zu erwarten ist.

Das OEM Engine Manual kommentiert die Rissgefährlichkeit: "**Cracks in combustion chamber surfasces are usually of a stress relieving nature and, as such, are not serious in that the rate of growth decreases as the crack lengthens ".**

Zwar ist es richtig, dass bei reiner Thermoermüdung (Thermal Fatigue = TF) der Riss entlastend wirkt und sich der Fortschritt bis zum Stillstand verlangsamen kann. Wenn jedoch das Bauteil zusätzlich eine nennenswerte statische und/oder dynamische Belastung erfährt (TMF), mit der eigentlich immer zu rechnen ist, kann sich der Riss auch wieder beschleunigen und zum Versagen des Bauteils führen.

Das Engine Manual des OEM gibt als Werkstoffbeurteilung für die Grenzen einer Schweißreparatur der Brennkammern folgendes Kriterium an: "**Severe local distortion and/or oxidation** in liners is not acceptable and is not repairable."

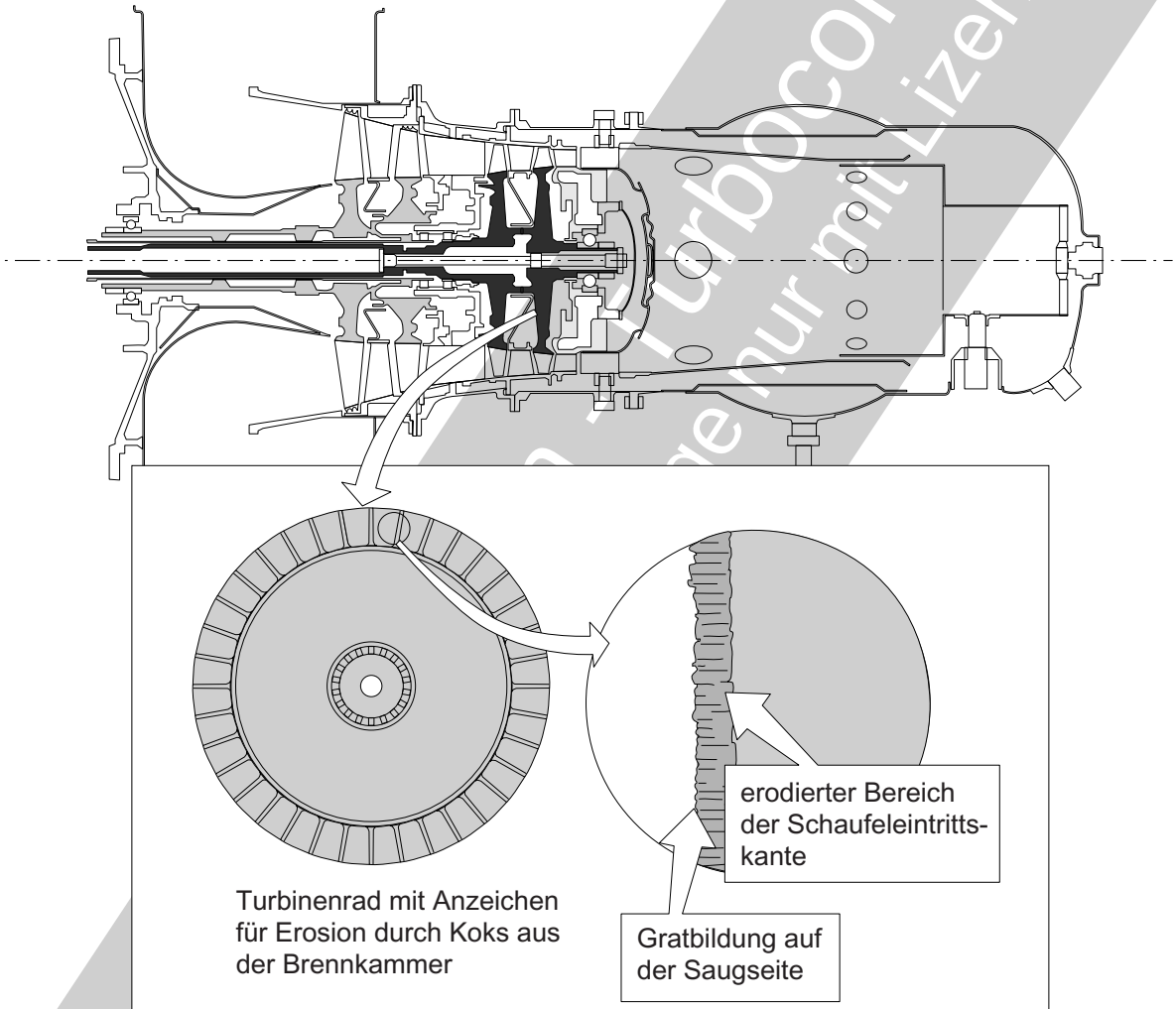
Der Begriff "severe" wird erfahrungsgemäß in der Praxis unterschiedlich eingeschätzt. Darüber hinaus sind die Merkmale einer "severe oxidation" durchaus nicht jedem Praktiker geläufig. So besteht die erhöhte Gefahr einer Fehleinschätzung dieses Kriteriums.

Das Engine Manual des OEM gibt als Kriterium der Grenzen einer Rissbildung für eine Schweiß-reparatur der Brennkammern an: "Any circumferential or axial crack not exceeding 0,030 inch (0,75 mm) **wide** may be repaired."

Im Englischlexikon findet man "breit" unter dem Begriff "wide". Das kann zumindest bei Übersetzungen zu Miss-verständnissen führen und als klaffende(?) Breite eines Rissspalts verstanden werden. Damit wäre die Risslänge nicht angesprochen. Die Breite des Spalts ist in erster Linie vom Oxidationsabtrag und damit von einem langsamen Risswachstum abhängig. Wenn sich aber ein Riss wieder beschleunigt, d.h. gefährlich wird, ist mit geringer Spaltweite zu rechnen, was dann als reparabel misinterpretiert werden kann.

Bild 16.1-4

Eine teure Unsicherheit in der Identifikation und Beurteilung eines Schadens.



Die reparierbare Erosionsschädigung wurde mit einem schweren Überhitzungsschaden verwechselt, der in vielen Fällen die Verschrottung beider Gaserzeugerturbinenräder erzwang.

Bild 16.1-5

© Turbocon
nur mit Lizen

Bild 16.1-5: *Bei der Inspektion oder Überholung des Heißteils (Skizze oben) eines Hubschraubertriebwerks bestand der* ***Verdacht einer Übertemperatur*** *im Betrieb. Die* ***Weiterverwendbarkeit*** *der Räder der Gaserzeugerturbine (Skizze unten) wurde entsprechend dem* ***optischen Befund*** *beurteilt. Dieser stützte sich auf spärliche* ***Angaben im Überholhandbuch****: Anzeichen* ***schwerer Überhitzung an den Schaufeln des Turbinenrads der ersten Stufe*** *schließen die Weiterverwendung dieses Bauteils und des folgenden Rades der 2. Stufe aus. In diesem Fall waren also beide Teile zu verschrotten.*

Leider ***fehlte im Überholhandbuch die ausreichende Beschreibung****, was unter schwerer Überhitzung zu verstehen ist. Insbesondere war unklar, in welchem* ***Schadensbild*** *sich dieser Schaden manifestiert. So wurden die Schaufelvorderkanten auf Überhitzungsanzeichen vorschriftsgemäß mit dem* ***Binokular*** *überprüft. Dabei ließ sich in vielen Fällen ein Bild wie im Detail als Überhitzungsschaden bewerten, das die Aussonderung der Turbinenräder fordert. Nachdem über einen längeren Zeitraum die Kosten solcher Heißteilschäden unakzeptabel anstiegen, wurden Werkstofffachleute mit einer Bewertung der Schäden beauftragt.*

Die optische Untersuchung ergab, dass die ***Schaufelvorderkanten einen Grat und Erosionsriefen aufwiesen,*** *was nicht mit einer Überhitzung erklärbar ist. Offenbar handelte es sich um* ***Erosion****, wahrscheinlich durch Kokspartikel aus der Brennkammer (Lit. 16.1-20).*

Eine zerstörende Laboruntersuchung (Metallografie, Band 1 Bild 2.2.2.4-2) bestätigte diesen Befund. Sie ergab ***keine Anzeichen einer überhitzungsbedingten, bedenklichen Werkstoffschädigung****. Die vorliegende Schädigung hätte mit* ***einfacher mechanischer Nacharbeit den Austausch der Räder verhindert****.*

Über Jahre aufgelaufene hohe Reparaturkosten waren also nicht notwendig. Das bewertende Personal hätte das Schadensbild, insbesondere den Grat und die Riefen in Umfangsrichtung als untypisch für eine schwere Überhitzung bei ausreichender Fachkenntnis erkennen müssen. Als Abhilfe wurden ***in das Überholungshandbuch entsprechende Bilder*** *aufgenommen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Die Fehleinschätzung der Betriebsschädigung eines Bauteils kann gravierende Folgen haben.

Kurz nach dem Abheben trat ein Turbinenschaden mit Bruchstückaustritt ein.
Das Flugzeug schlug noch auf dem Rollfeld auf.

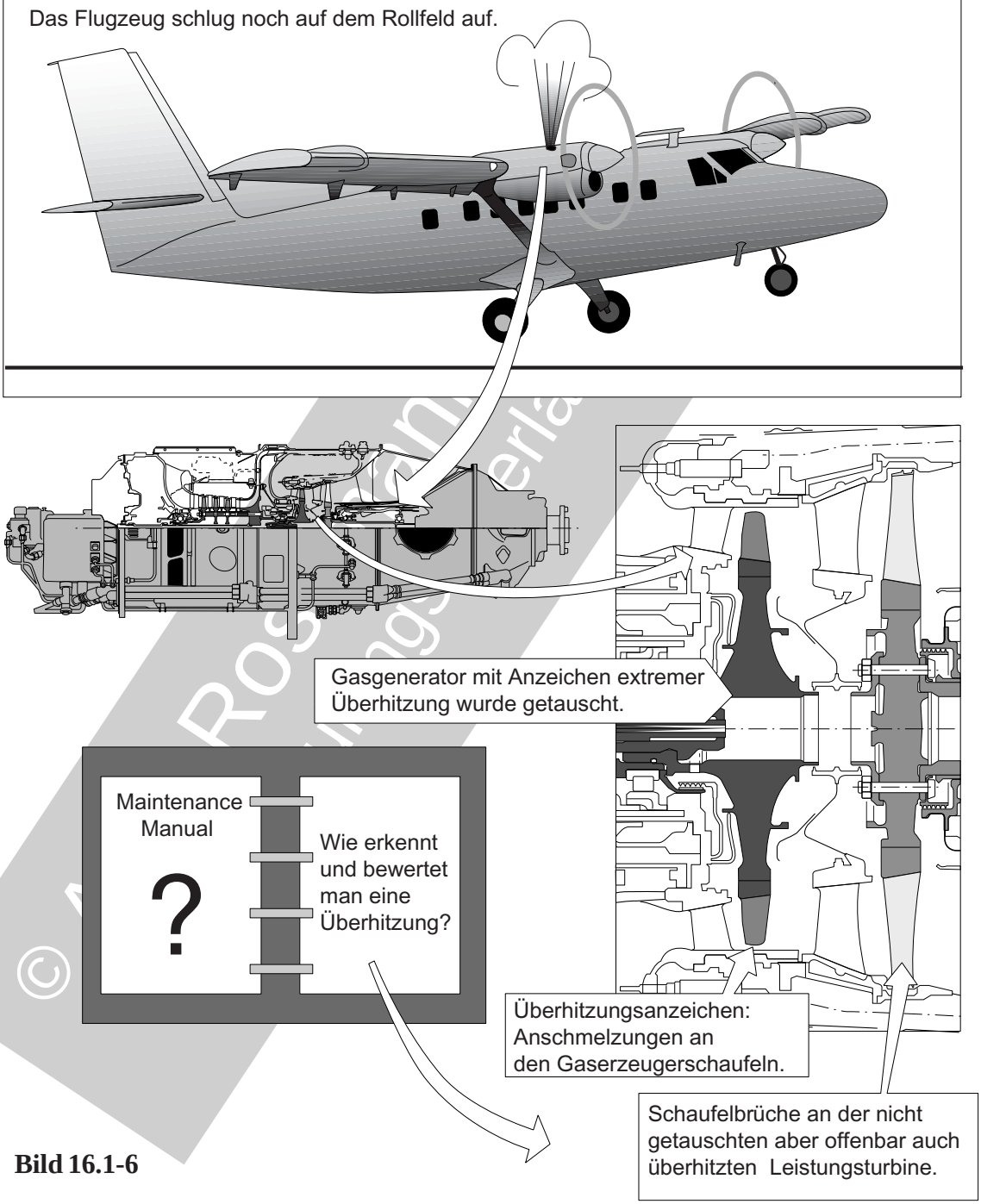


Bild 16.1-6

Bild 16.1-6 *(Lit. 16.1-10): Kurz nach dem Start, in etwa 50 m Höhe, hörte der Pilot einen* ***lauten Knall, den er als Verdichterpumpen identifizierte*** *und ein brüllendes Geräusch. Das Flugzeug kippte nach rechts ab. Der Pilot stellte den Propeller auf Federstellung. Die Fluggeschwindigkeit fiel ab. Das Flugzeug machte eine Notlandung und wurde dabei schwer beschädigt. Nach der im Folgenden beschriebenen Fehlfunktion, wurde das rechte Triebwerk in der Nacht vor dem Unfall repariert.*
Bei einem früheren Startversuch „saß das Triebwerk fest“ und die Turbineneintrittstemperatur erreichte ca. 10 Sekunden 800°C. Danach wurde es abgestellt und ca. 10 weitere Sekunden vom Anlasser durchgedreht. Dabei traten aus dem Abgasrohr Rauch und Flammen. Ein zweiter Startversuch musste ebenfalls abgebrochen werden. Der sonst frei drehende Propeller ließ sich nicht mehr drehen. Eine Zerlegung zeigte, dass die ***Schaufelspitzen des Gaserzeugerturbinenrads „verbrannt“ bzw. abgeschmolzen*** *waren. Sie spritzten auf Leitapparat und Rad der Leistungsturbine. Hierfür ist nach Einschätzung des OEM eine Gastemperatur von ca. 1700°C erforderlich.* ***Das vorliegende Überholhandbuch enthielt keine ausreichenden Kriterien*** *um festzustellen, ob im Triebwerk Übertemperatur auftrat. Lediglich die Instrumentenanzeige des Piloten wies darauf hin. Anschließend wurden die betroffenen* ***Teile mit Glasperlen gestrahlt. Diese Vorgehensweise war weder vom OEM empfohlen, noch im Überholhandbuch vorgesehen****. Daraufhin wurden die komplette Gaserzeugerturbine, Brennkammeraustritt, Thermoelemente und Einspritzdüsen ersetzt, nicht jedoch die Leistungsturbine. Beim anschließenden Prüflauf waren alle Instrumentenanzeigen normal und es gab keine Besonderheiten.*
Auf Fragen nach dem Unfall, welche Kriterien zu einer Weiterverwendung der Leistungsturbine führten, war die Antwort des Verantwortlichen: ***Es gab keine Information im OEM-Überholhandbuch zur Reinigung der Teile****. So erkundigte man sich bei einer großen zertifizierten Reparaturwerkstatt. Nach diesen Informationen beurteilte er die* ***Leistungsturbine als betriebsfähig, weil beim Reinigen keine Anzeichen für eine Überhitzung, wie Verfärbungen und Verformungen an den Schaufeln, festgestellt wurden*** *(Lit. 16.1-20). Vergleiche mit anderen Triebwerken zur Beurteilung der Teile waren nicht möglich. Der OEM wurde nicht zu Rate gezogen.*

Das Abgasgehäuse des rechten Unfalltriebwerks war von innen hinter dem Gaserzeuger, neben dem Containmentring (!), aufgerissen. Fünf Schaufeln der Leistungsturbine waren gebrochen, andere beschädigt.
Zusätzlich wies die Betätigungsstange des Propellerreglers am Ende einen Schwingbruch im Gewinde zum Kugelgelenk auf. Bruchursächliche Fehler wurden nicht gefunden.

Schlussfolgerungen*: Eine Schaufel der* ***Leistungsturbine*** *versagte bereits beim Start. Die entstandene* ***Unwucht überlastete deren bereits von der Übertemperatur bis zum Anschmelzen geschwächten Schaufeln****. Es kam zum Bruch mehrerer Schaufeln. Der noch laufende Gasgenerator trieb die beschädigte Leistungsturbine weiter an. Die an den Propeller abgegebene Leistung reichte jedoch nicht mehr aus. Heftige Vibrationen führten auch zum Bruch der Reglerstange. Das verhinderte als Folgeschaden die angewählte Federstellung des Propellers.*

Zusammenfassung: Die ***Beurteilung der Heißteilschäden durch das Wartungspersonal war falsch****. Von ihm* ***muss genügend Erfahrung erwartet werden*** *um zu erkennen, ob in einem Triebwerk Gastemperaturen oberhalb der für 2 Sekunden zulässigen Gerenze von 1090 °C auftraten und die Leistungsturbine schädigten. (Bild 16.1-5). Damit hätten sie,* ***unabhängig von fehlenden Beurteilungsunterlagen, erkennen müssen****, dass Übertemperaturen einen Tausch der Nutzturbine notwendig machten. Trotz des Triebwerksschadens hätte der Pilot bei richtigem Handeln eine Notlandung vermeiden können.*

© Aerospheric - Turbocons
ursprungsunterlagen urheberrechtlich

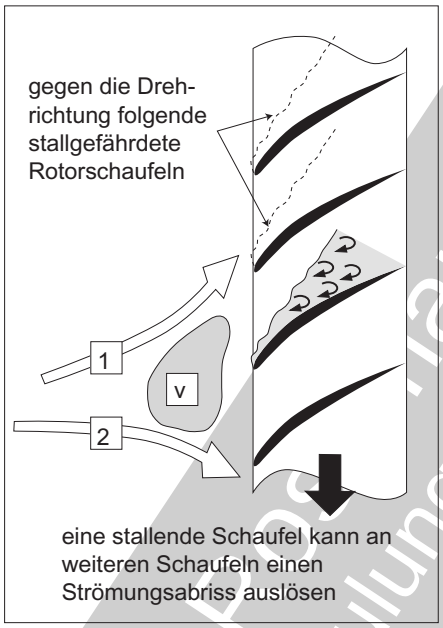
Fehlendes Verständnis des Hintergrunds von Fachbegriffen und Begriffsverwirrung beim Wartungspersonal ist sicherheitsrelevant und kann schwere Schäden auslösen.

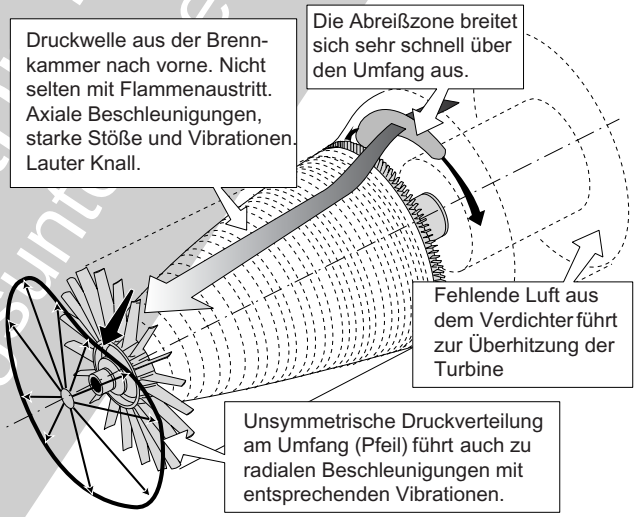
Rotierende Ablösung = Rotating Stall

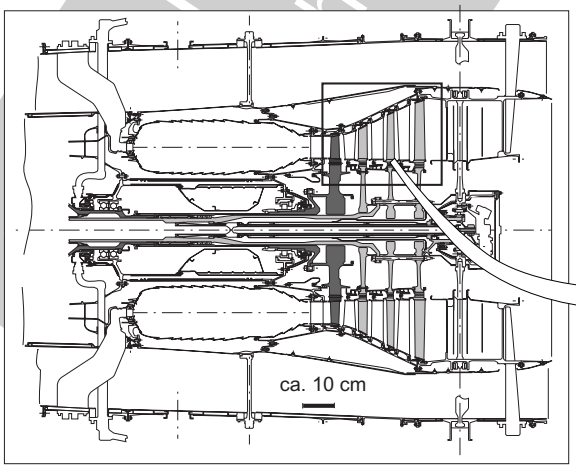
Merkmale und Schäden:
Von außen kaum erkennbar.
Leichte Verschlechterung des Verdichterverhaltens.
Typische Folgen: Kann Schwingermüdung in der Beschaufelung auslösen.

Verdichterpumpen = Surge

Merkmale und Schäden:
Von außen durch laute, aufeinander folgende Knalle erkennbar. Starke stoßartige Vibrationen.
Typische Folgen:
Bleibende deutliche Verschlechterung des Verdichterverhaltens bzw. der Triebwerksleistung durch Spaltausrieb.-
Gefahr des spontanen Schaufelversagens im Verdichter und der Heißteilüberhitzung mit Schaufelschäden in der Turbine.







Beschreibung eines Incidents:
Die Turbineneintrittsleitschaufeln zeigten Überhitzungsanzeichen im Bereich der Austrittskante. Die Rotorschaufeln der Hochdruckturbine waren ab 30 % der Länge abgeschmolzen. Die Schaufeln aller drei Stufen der Niederdruckturbine waren in unterschiedlicher Höhe abgeschmolzen und erzeugten Schmelzbäder im Abgasrohr.

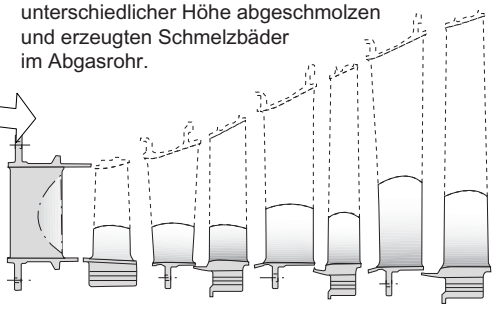


Bild 16.1-7

***Bild 16.1-7**: **Strömungsstörungen im Verdichter** können auf unterschiedlichste Weise entstehen und schadenswirksam werden. Deshalb sollte das Wartungspersonal von Triebwerken die Grundlagen dieser Mechanismen verstanden haben. Diese Themen werden in Lit. 16.1-20 ausführlich behandelt und sollen hier nur kurz angesprochen werden.*

***Rotierende Ablösung = Rotating Stall** ist ein Vorgang, bei dem sich die Strömung an einzelnen beschädigten oder profilveränderten Rotorschaufeln ablöst (Rahmen oben links). Diese Ablösung wandert dann gegen die Drehrichtung am Umfang des Rotors. Die Schaufeln werden dabei kurzzeitig entlastet, was heftige Schwingungen anregen kann.**Dieser hochfrequente Vorgang ist äußerlich nicht erkennbar** und kann deshalb über gefährlich lange Zeit bis zum Schwingbruch anhalten.*

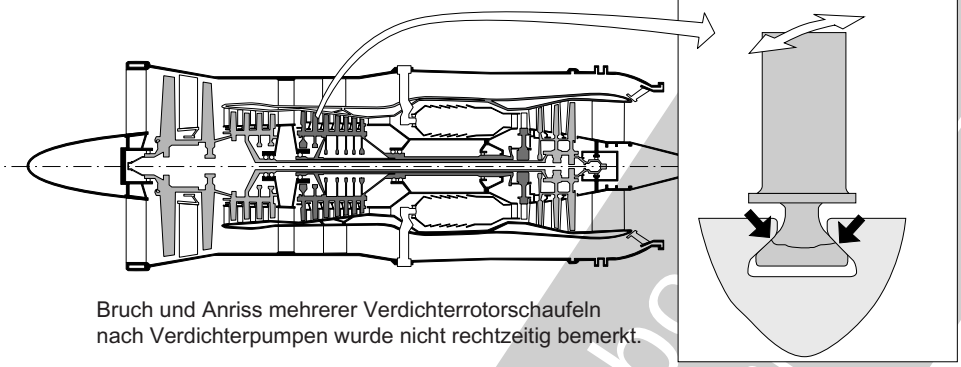
***Verdichterpumpen = Surge** ist der **vollständige Strömungsabriss** der sich von der betroffenen Stufe axial ausbreitet (Skizze oben rechts). Dabei kommt es zur wiederholten stoßartigen Belastung der Verdichterkomponenten. Mit **Kurzzeitüberlastungen ist bei diesen Pumpstößen zu rechnen**. Im Extremfall können Rotor- und Statorschaufeln so stark auslenken, dass sie sich berühren. Dabei sind LCF-Brüche (Band 1, Bild 5.4.1.1-2 und Lit. 16.1-20) der Schaufeln (Beispiel 16.1-1) und Gewaltbrüche an Hauptlagern möglich.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Merksatz:

Häufig wird in der Literatur nicht sauber zwischen den Begriffen **Stall** (Strömungsablösung an einzelnen Schaufeln) und **Pumpen (=Surge) unterschieden.**

Ein Beispiel für fehlendes Problembewusstsein



Bruch und Anriss mehrerer Verdichterrotorschaufeln nach Verdichterpumpen wurde nicht rechtzeitig bemerkt.

Beispiel 16.1-1 (Lit. 16.1-11): Kurz nach dem Start im Steigflug hörte die Besatzung eines Verkehrsflugzeugs einen **lauten Knall** wie er für einen **Verdichter-Pumpstoß** (**Surge**) typisch ist. Die Cockpitinstrumente zeigten einen schnellen **Drehzahlabfall des Nieder- und Hochdruckverdichters** eines Triebwerks. Die **Gasaustrittstemperatur überstieg dabei die Skala des Anzeigeinstruments**. Der Pilot stellte das Triebwerk sofort ab und führte eine Notlandung durch.
Die nachfolgende Untersuchung der Luftfahrtbehörde fand, dass alle Betriebsdaten des betroffenen Triebwerks bis zum lauten Knall normal waren. Die **Turbine zeigte jedoch Merkmale extremer Überhitzung** (Bild unten rechts). Die Turbineneintrittsleitschaufeln wiesen lediglich leichte Überhitzungsspuren an der Austrittskante auf. Die darauf folgenden Rotorschaufeln der Hochdruckturbine waren wie auch alle Schaufeln der Niederdruckturbine zum Teil **abgeschmolzen**. Die erstarrte Schmelze hatte sich im Abgasrohr gesammelt.
Am Tag vor dem Unfall war **beim Hochfahren des Triebwerks auf Leerlauf Pumpen aufgetreten,** das sich beim Rollen des Flugzeugs mindestens 5 mal wiederholte. Darauf wurden entsprechend dem Wartungshandbuch die **Abblasventile getauscht**. **Eine Inspektion des Verdichters verlangte das Wartungshandbuch nicht** (Trouble Shooting Guidelines) und sie erfolgte auch nicht. Ein nachfolgender Triebwerksstart schien die erfolgreiche Fehlerbeseitigung zu bestätigen.
Das Flugzeug ging wieder in Betrieb und flog vor dem Schaden 3 Stunden. Es wurde jedoch beobachtet, dass die **Turbineneintrittstemperatur (EGT) um 20°C angestiegen und die Hochdruckdrehzahl gegenüber früheren Werten um 2 % gefallen** war. Daraus wäre der Schluss zu ziehen, dass sich **ungünstige aerodynamische Bedingungen auf Grund eines Schadens in Verdichter und/oder Turbine** eingestellt hatten.
Eine Untersuchung ergab, dass **mehrere Verdichterrotorschaufeln durch Schwingbrüche in den Füßen versagt hatten.** Bei einer Mehrzahl anderer Verdichterschaufeln waren die Füße angerissen. Die dafür ursächlichen extremen **Biegeschwingungen sind für Verdichterpumpen typisch** (Lit. 16.1-20).

Einschätzung der untersuchenden Behörde:

- Obwohl vom OEM in seinen „Trouble Shooting Guidelines“ nicht gefordert, wäre eine Leistungsanalyse (Performance Analysis) im Rahmen eines Bodenlaufs mit hoher Leistung geboten. Eine anschließende **Boroskopinspektion** hätte dann die beschädigten Verdichterschaufeln entdecken müssen.

- Das Wartungs- und Prüfpersonal muss über die **Erkennungsmerkmale** und Auswirkungen von Strömungsabrissen (Stall und Surge) ausreichend informiert sein.

- **Betreiber haben ihr Personal darüber zu unterrichten, wie man die Folgen eines Verdichterpumpens erkennt**.

© Axel Possmann - Turbo
als Schulungsunterlage nur m

Literatur zu Kapitel 16.1

© Axel Rossmann - Turboconsult
Ausschlungsunterlage nur mit Lizenz

16.1-1 Civil Aviation Authority (CAA), CAP 716, „Aviation Maintenance Human Factors (JAA JAR 145)“, First edition 7.January 2002 , ISBN 0 86039 832 3, Appendix 1 „Shiftwork “ Seite 1-4.

16.1-2 U.S. Office of Personnel Management, „Federal Wage System Job Grading Standard for Aircraft Engine Mechanic, 8602“, WCPS 1 May 2000, Seite 1-9.

16.1-3 Occupational Information Network „Summary Report for: 49-3011.02-Aircraft Engine Specialists“, Seite 1-5.

16.1-4 „Standard Occupational Classification (SOC), Aircraft Mechanic and Service Technician 49-3011“, 8.1.2001, www.cdr.state.tx.us, Seite 1.

16.1-5 „Aircraft Mechanics“, www.todaysmilitary.com, Seite 1-2.

16.1-6 Michigan Department of Civil Service, „Job Specification, Aircraft Mechanic“, Seite 1-5.

16.1-7 „Airframe-And-Power-Plant Mechanic“, www.stepfour.com, Seite 1.

16.1-8 Aircraft Incident Report No: 8/88 „Report on the accident to Boeing 737-236. G-BGJL at Manchester International Airport on 22 August 1985“, www.aaib.dft.gov.uk., Seite 1-167.

16.1-9 P.König, A,Rossmann „Ratgeber für Gasturbinenbetreiber“, ASUE-Schriftenreihe, Vulkan-Verlag.Essen, ISBN 3-8027-2545-X., 1999, Seite 157.

16.1-10 National Transportation Safety Board , Aircraft Accident Report NTSB-AAR-79-10, „Rocky Mountain Airways, Inc., DeHavilland DHC-6-300, Cheyenne, Wyoming, February 27, 1979“, Seite 1-28.

16.1-11 Transport Canada, Service Difficulty Advisory, AV-2004-05, „Pratt & Whitney Canada, JT8D-17 Series Engine Compressor Failures“, 2004-12-01,Seite 1 und 2.

16.1-12 Luftfahrt-Bundesamt, „Informationsschrift über die europäischen Vorschriften JAR 66 und JAR 147“, 03.05.1999, Seite 1 und 15.

16.1-13 Luftfahrt-Bundesamt, „Prüfer von Luftfahrtgerät Klasse 2“, 15. August 1995, Seite 1 und 3.

16.1-14 „AMT & JAR66“, Turbine Engines JAR-66 Module 15 Study Books & Syllabus“, Stand 4.10.2007, Seite 1 und 7.

16.1-15 „EASA Teil 66 B1 & B2 Lizenz beim LBA erwerben“, jartraining.de, Stand 4.10.2007, Seite 1 und 6.

16.1-16 „EASA Teil 66 B1 & B2 Lizenz beim LBA erwerben“, jartraining.de, Stand 4.10.2007, Seite 1 und 6.

16.1-17 Transports Canada, Zeitschrift „feedback, Canadian Aviation Service Difficulty Reports“, Issue 1/2003, Seite 25-30

16.1-18 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Torbo-Flugtriebwerken“, Band 5, 2008, Turboconsult, ISBN 978-3-00-025780-3, Bild 19-4 bis 19-11, Bild 19.1-6, Bild 19.2.1-12 , Bild 19.2.1-13, Bild 19.2.1-14, Bild 19.2.1-15, Bild 21.2.1-9, Bild 25.2.2.1-1.

16.1-19 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Torbo-Flugtriebwerken“, Band 2, 2001, Turboconsult, ISBN 978-3-00-008429-0, Bild 9.3-3 und Bild 9.3-5

16.1-20 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Torbo-Flugtriebwerken“, Band 3, 2000, Turboconsult, ISBN 978-3-017733-7, Kapitel 11.2.1.1, Kapitel 11.2.1.2, Bild 11.2.1.2-1, Bild 11.2.1.3-9, Bild 11.2.2.2-1, Bild 11.2.2.3-3, Bild 12.6.1-6.

16.1.-21 D.Wagner, J.A. Birt, M.Snyder,, J.P. Duncanson, „Human Factors Design Guide“, For Acquisition of Commercial-Off-The- Shelf Subsystems, Non Development Items and Development Systems, January 15 (1996, US Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA) und Office of the Chief Scientific and Technical Advisor for Human Factors (AAR 100), National Technical Information Service, Springfield, Virginia 22161, zum freien Down Load im Internet. erhältlich.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Arbeitsübergabe und Kommunikation

16.1.1 Schicht- und Personalwechsel als Risikofaktor. Die Kommunikation als bedeutender Einfluss.

Besonders kritische Momente entstehen offenbar wenn Arbeiten übergeben werden müssen. Hier spielen **Human Factors** eine nicht zu unterschätzende Rolle. Es handelt sich in erster Linie um **Schichtwechsel** (engl. shift handover). In diesem Kapitel dient beispielhaft die Wartung und Überholung von Verkehrsflugzeugen. Betroffen sind Mechaniker, Prüfer und die fachliche Aufsicht. Mehrere Informationen, für die eine mündliche Übertragung offenbar nicht ausreicht, benötigen deshalb eine schriftliche, sicherheitsrelevante Dokumentation :

- Abgeschlossene Arbeiten .
- Begonnene, nicht abgeschlossene Arbeiten die weitergeführt werden müssen.
- Eingeleitete Maßnahmen wie eine Ersatzteilbeschaffung.
- Informationen die an andere weitergegeben werden müssen.
- Informationen über Vorkommnisse und Besonderheiten.

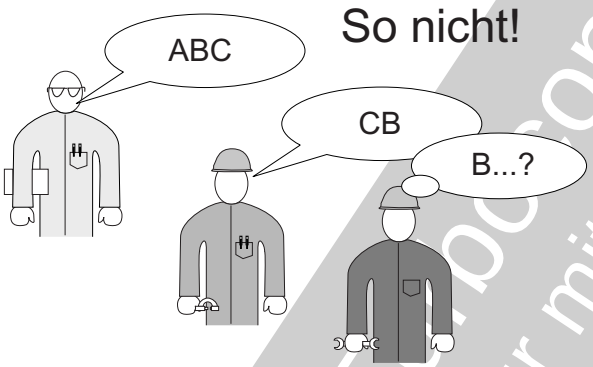
Eine ähnliche, jedoch längerfristig angelegte Situation kann auch beim **Wechsel von Personal** auftreten. Typisch sind „Job rotation“, Neueinstellungen oder ein Krankheitsfall. Die spezifische **Erfahrung und Fachkenntnis mit der Aufgabe und dem Umfeld** sind bedeutende Human Factors. Ebenso die **Sozialkompetenz und das Teamverhalten**. In diesen Fällen hängt die Effektivität der Personalmaßnahme von der anforderungsspezifischen Einschätzung ab. Mängel in Erfahrung und Fachkenntnis können beispielsweise schnell zu sicherheitskritischen Situationen führen.

Besonders bedenklich ist es, wenn in der Organisation wichtige Stellen, wie **Führungspositionen**, z.B. Verantwortliche der Qualitätskontrolle, zeitweise nicht besetzt werden. Auch mit **Einsparungen beim durchführenden Wartungspersonal** vor Ort wird zusammen mit erhöhter Arbeitsbelastung ein Anstieg potenziell gefährlicher Situationen wahrscheinlicher.

Lit. 16.1.1-2, „**Aviation Maintenance Human Factors**“ (JAA JAR145) bietet eine sehr gute Zusammenstellung der Probleme mit den Ursachen bei Schichtwechseln. Darüber hinaus werden absichernde Maßnahmen behandelt. Die folgende Zusammenfassung soll einen Überblick geben.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Arbeitsübergabe und Kommunikation



Im Rahmen des **Schichtwechsels** erfolgt eine **Schichtübergabe** (engl. shift handover). Bei diesem Vorgang, aber auch getrennt davon, kann eine **Aufgabenübertragung** (engl. task handover) erfolgen. Eine Schichtübergabe sollte grundsätzlich mit einer Besprechung (engl. shift handover meeting) ablaufen. Diese hat in erster Linie die aufgabenspezifische Information der betroffenen Schichten zu gewährleisten und hat bei Schichtbeginn zu erfolgen. Während der Schicht sind notwendige Informationen für die folgende Schicht oder die ausführende Person der nächsten Aufgabe zu sammeln.

Auswertungen kommunikationsbedingter Schäden und Unfälle lassen auf **typische Mängel** schließen und bilden so die Basis, um **Regeln für eine sichere Kommunikation** aufzustellen (Bild 16.1.1-2).

Es gibt Fälle, in denen eine direkte **mündliche Kommunikation nicht möglich** ist. Das ist im nicht durchgehenden **Zweischichtbetrieb** (nur Früh- und Spätschicht), deren Zwischenschicht ausfiel, zu erwarten. Hier besteht erhöhte Gefahr einer unzureichenden Kommunikation.

Neben den für die Tätigkeit notwendigen Informationen können weitere im **Treffen zur Schichtübergabe** erforderlich werden. Hierzu gehören Auslastung, Autorisierung zu bestimmtem Vorgehen , krankheitsbedingte Ausfälle und Überstunden.

Das Shift Handover Meeting sollte zumindest aus 2 Teilen bestehen: Einem **Treffen ohne Zeitdruck durch die Aufsichtspersonen** der Schichten. Typische Themen sind in Bild 16.1.1-2, 16.1.1-3.1 enthalten. Eine **Besprechungsnotiz** mit allen bedeutenden Problemen, insbesondere ungelösten, ist obligatorisch. Einem anschließenden **Rundgang** (engl. walkthrough) der Aufsichts- und Zulassungspersonen (engl. certyfying staff), der dazu dienen soll, die Informationen vor Ort abzusichern (Bild 16.1.1-3.2). Der Rundgang erfolgt am besten entsprechend den Arbeitskarten an den Arbeitsplätzen.

Ein Task Handover findet zwischen zwei Personen statt. Das ist besonders bei Aufgaben und Verfahren außerhalb der Routine erforderlich. Typisch sind zwei unterschiedliche Situationen. Eine persönliche oder eine indirekte Übergabe. Wenn die Aufgabe unterbrochen wird und die weiterführende Person noch nicht festgelegt ist.

Die **persönliche Übergabe einer Aufgabe** sollte wie ein Walkthrough schriftlich und mündlich erfolgen. Die Aufgabe muss mit entsprechenden Hinweisen zu allen Abweichungen von der Routine angepasst sein und den Stand der Arbeiten eindeutig aufzeigen. Die weiterführende Person hat Abweichungen während des Walkthrough zu notieren. Läuft die Situation nicht entsprechend ab, besteht erfahrungsgemäß eine erhöhte Gefahr, dass fälschlicherweise angenommen wird, die Aufgabe wurde entsprechend den Vorschriften (Handbuch, Zeichnungen, Vorgehen) durchgeführt (Bild 16.1.1-6.1, -6.2, -6.3 und Bild 16.1.1-7).

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Arbeitsübergabe und Kommunikation

Die **indirekte Übertragung einer Aufgabe für eine spätere Wiederaufnahme** ist keine ungewöhnliche Situation. Derjenige der die Aufgabe weiterführt wird sie als abgeschlossen abzeichnen. Ein solcher Vorgang ist sehr viel riskanter als die direkte Information bei der Übergabe einer Aufgabe. Die Information als Schriftstück ist nicht redundant, wenn eine Nachfrage zur Klärung nicht möglich ist. **Arbeitskarten/-blätter** (engl. task cards) sind nicht speziell für eine solche Situation hergestellt. Sie sind von den jeweiligen Umständen abhängig und deshalb nicht immer als übertragendes Dokument optimal. Dies gilt insbesondere, wenn die Arbeit aus einem **von der Routine abweichenden** Grund unterbrochen wurde (Bild 16.1.1-4). In einem solchen Fall ist ein zusätzliches Dokument (z.B. als Zusatzkarte) mit eindeutiger Zugehörigkeit zum Arbeitsschritt notwendig. Unterbleibt eine solche Ergänzung der Dokumente, kann das erfahrungsgemäß zu gefährlichen Situationen bis hin zu Flugunfällen führen. Aus diesem Grund ist in solchen Fällen die Führungsebene verpflichtet, **ausreichend Zeit für die Dokumentation** bereitzustellen.

Zur Problematik **Kommunikation** gibt die Literatur „Aviation Maintenance Human Factors (JAA JAR145, (Lit. 16.1.1-2 im Internet zugänglich) der Civil Aviation Authority (CAA) hervorragende Hilfestellung. Darauf stützen sich die folgenden Seiten, deren Bilder unter didaktischen Gesichtspunkten gestaltet wurden. Will man sich mit der Problematik tiefer beschäftigen, ist die genannte Literatur geeignet. Hier finden sich weitere wichtige Literaturhinweise. Bedeutende Arbeiten zum Thema wurden offenbar vom DOE (Department of Energy der USA) initiiert. Diese gelten natürlich für einen weiteren Kreis als die Triebwerkstechnik. Deshalb besteht eine gewisse Allgemeingültigkeit, zumindest für Energieanlagen. In den Bildern 16.1.1-2, 16.1.1-3.1 und 16.1.1-3.2 sind Richtlinien für verantwortliche Hierarchieebenen einer Schichtübergabe zusammengestellt.

Grundsätzlich gibt es drei **Voraussetzungen einer befriedigenden Schichtübergabe**:

- Die **ausscheidende Person** ist in der Lage wichtige **Nachrichten zu erkennen** und der **übernehmenden** Person **mitzuteilen**.
- Die übernehmende Person kann die Nachricht der ausscheidenden aufnehmen und **im vorgesehenen Sinn verstehen.** Dabei sollte man sich klar sein, dass Kommunikationsprobleme **trotz dem aufgenommenen Wort** auftreten können. Das ist der Fall, wenn der **nicht verstandene Sinn unbeabsichtigte bzw. unvorhergesehene Reaktionen** auslöst. Dabei spielt das individuelle, **subjektive Verständnis** vor dem Hintergrund von Erwartungen, Hoffnungen und Ängsten eine entscheidende Rolle (Bild 16.1.1-1).
- Die Kommunikation findet an einem dafür vorgesehenen **geeigneten Ort** statt.

Als weitere wichtige Bedingungen für eine befriedigende Kommunikation wurden das „**Besitzgefühl**“ und die **Form** (engl. formality) erkannt. Die Ausübung einer Aufgabe erfordert die persönliche Übernahme der Verantwortung. Geschieht das, ist der richtige und vollständige Abschluss ein persönliches Anliegen, selbst wenn die Aufgabe in einer anderen Schicht von einem Anderen abgeschlossen wird. Im Gegensatz zu dieser positiven Einstellung steht „es ist ja nicht in meiner Schicht passiert...“. Damit wird jegliche Verantwortung abgewiesen. Formalitäten erfordern eine definierte Schichtübergabe hinter der die **Führungsebene** erkennbar steht. Ein ungenügendes Engagement der Führung erkennt das Wartungspersonal schnell. Typische Symptome sind **ungenügende Zeit** für eine befriedigende Schichtübergabe sowie **unzureichende Hilfe** und **fehlende Einrichtungen** (z.B. Raum) für eine Schichtübergabe.

© Axel Rossmann – Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Das Umfeld einer Kommunikation beeinflusst deren Effektivität und damit die Flugsicherheit.

Berichte von Flugunfalluntersuchungen (accident investigations) und Vorkommnissen (incident reports) lasssen drei Hauptgründe erkennen.

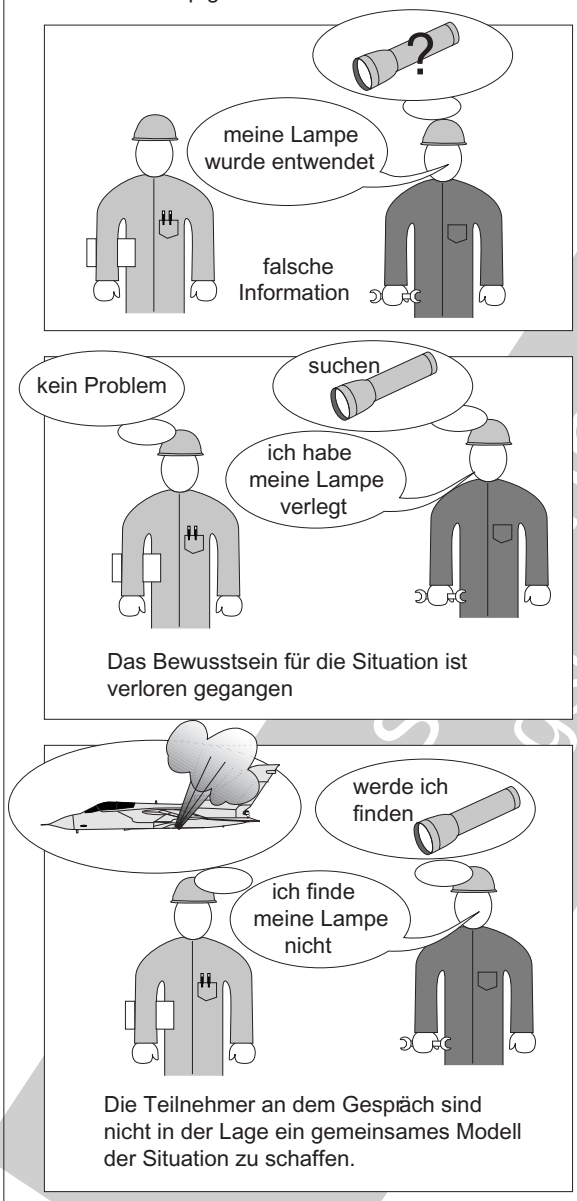


Bild 16.1.1-1

Bild 16.1.1-1 *(Lit. 16.1.1-2 und Lit. 19.1.1-12): Die beidseitig übereinstimmend verstandene Nachricht einer Kommunikation ist für die Wartungsarbeiten und so die Sicherheit des Fluggeräts wichtig (Bild 16-7 und Bild 16.1.1-5). Accident- und Incident-Berichte lassen drei typische Situationen für schadensursächliche Kommunikationsprobleme erkennen:*

Eine ***falsche Information*** *(Skizze oben) kann bewusst oder unbewusst, z.B. missverständlich, erfolgen. Im Beispiel wird nach einem Wartungsvorgang eine Handlampe vermisst. Es ist denkbar, dass die Lampe verlegt wurde, was aber nicht eingestanden wird.*

Ist man sich ***der Situation nicht bewusst,*** *kann dies zu falschen Einschätzungen und Handlungen führen. Beispielsweise denkt derjenige, der die Lampe vermisst, primär daran, diese zu suchen. Die potenzielle Gefahr eines folgenschweren Fremdkörperschadens wird von ihm nicht erkannt oder unterschätzt. Auch der Vorgesetzte sieht in einem Diebstahl das Problem katastrophaler Folgeschäden verständlicherweise nicht.*

Die Information führt zu ***unterschiedlichen Situationseinschätzungen bzw. Modellen****: Der Hoffnung/Überzeugung die vermisste Lampe zu finden, steht die Erkenntnis der Gefahr eines Fremdkörperschadens im Triebwerk entgegen.*

Lizenzausgabe für Turbocosult - Turbocosult

Arbeitsübergabe und Kommunikation

Bild 16.1.1-2 *(Lit 16.1.1-2): Diese Zusammenstellung zeigt Abhilfen bzw.* ***Verhaltensregeln bei Kommunikationsproblemen*** *im technischen Bereich, insbesondere im Rahmen eines Schichtwechsels.*

Es gibt sehr unterschiedliche Möglichkeiten eine Nachricht zu übermitteln. Dazu gehören ***Dokumente*** *wie Schriftstücke,* ***Diagramme*** *oder Zeichnungen und Skizzen,* ***Sprache*** *und* ***Gesten*** *(Bewusst und/oder Körpersprache). Diese Möglichkeiten lassen sich auch kombinieren. Werden Informationen auf mehr als eine Weise getauscht, erhöht diese Redundanz die Sicherheit ungemein.*

Eine Information muss aufgenommen und verarbeitet werden, um die ***Bedeutung zu erfassen****. Das benötigt Zeit und erfordert die* ***Beschränkung auf Schlüsselinformationen*** *(„**a**“). Die Möglichkeit von* ***Rückfragen*** *fördert das Verständnis („**b, c**“). Das gilt sowohl für den Zuhörer als auch für denjenigen der informiert. So merkt er, ob die Information aufgenommen und richtig verstanden wurde.*

Der Prozess der Schichtübergabe, insbesondere Abweichungen von der Routine, benötigt eine ***gemeinsame Modellvorstellung,*** *die Wartungsaufgabe, Stand der Arbeiten, betroffenes Gerät und Umfeld beinhalten. Eine solche Modellvorstellung kann bei Veränderungen während längerer Abwesenheit (z.B. Krankheit) oder mit neuen Kollegen ohne spezifische Erfahrung verloren gehen. In solchen Situationen muss das Management ausreichend Zeit für die Schichtübergabe bereitstellen.*

Nicht zu unterschätzen sind Kommunikationsprobleme als Folge ***unterschiedlicher Sprachen und Kulturkreise****. Hierzu gehören abweichende Vorstellungen von* ***Fachbegriffen,*** *die zu Interpretationsfehlern führen. Diese Möglichkeiten sind mit geeigneten, gut verständlichen und präzisen* ***Handbüchern*** *vermeidbar (Kapitel 16.2).*

Einige Regeln für eine effektive Kommunikation beim Schichtwechsel.

"a" **Beschränkung auf "Schlüsselinformationen"**.
Begründung: Wenn die Nachricht viele nicht notwendige und unerwünschte Nebensächlichkeiten enthält, können die Hauptpunkte verloren gehen.

"b" **Um eindeutige Aussagen bemühen**.
- Information genau zuordnen, z.B. dem betroffenen Bauteil, Werkzeug oder Dokument.
- "Zweibahn-Kommunikation" mit klärenden Nachfragen.

Begründung: Der Umgangssprache mangelt es gewöhnlich an Eindeutigkeit.

"c" **Mit Missverständnissen rechnen**.
Bereits beim Gespräch bemühen Missverständnisse zu erkennen und zu korrigieren. Alle Gesprächspartner müssen dazu beitragen.

"d" Das **Problem einer Kommunikation wird oft unterschätzt**.
- Potenzielle Gefahr von Kommunikationsfehlern bewusst machen.
- **Kommunikationsübungen/-schulungen**.

Begründung: Aus einer Unterschätzung entsteht trügerische Sicherheit und Selbstzufriedenheit.

Bild 19.1.1-2

© AeroRespain - Das Schulungsmaterial

Auf was ein Manager bei einem Schichtwechsel zu achten hat.

Bereich	zu beachten
Anlage	- Arbeitsplätze - Besucher - Vorbereitungen - Arbeitssicherheit
Arbeit	- An welchem Gerät - Ein- und Auslieferung - Termine /Deadlines - Stand der Arbeiten
Mitarbeiter	- Zulassungen - Zulassungsstellen - Identifikation (Zahl, Namen) der Mitarbeiter mit Überstunden - Identifikation (Zahl, Namen) der Mitarbeiter von Vertragspartnern - Krankenstand - Arbeitssicherheit/Verletzungen - Schulungen
Probleme	- Stand der Arbeiten: ausstehende Arbeiten abgeschlossene Arbeiten
Informationen/ Dokumente	- Anweisungen wie Airworthiness Directives (ADs) und Service Bulletins (SBs) - Firmeninterne Dokumentation Technisch Firmenpolitisch

Bild 16.1.1-3.1

Auf was Aufsicht und Prüfer bei einem Schichtwechsel zu achten haben.

- Laufende Arbeiten und Aufgaben
- Anzuwendende Arbeitskarten
- Letzte abgeschlossene Arbeitsschritte
- Aufgetretene Probleme
  Stand ausstehender Arbeiten
  Gelöste Probleme
- Ungewöhnliche Ereignisse
- Ungewöhnliche Schäden
- Benötigte und vorhandene Ressourcen
- Aufbewahrungsorte: ausgebaute Teile, Werkzeuge usw.
- Voraussichtliche Bereitstellung angeforderter Teile und Werkzeuge.
- Teilemangel
- Vorgesehene nächste Schritte
- Kommunikation mit Planern, technischen Diensten und Werkstätten
.
- Kommunikation in der Hierarchie (z.B. Manager)

Bild 16.1.1-3.2

Bild 16.1.1-3.1 *(Lit. 16.1.1-2): Bei der* ***Übergabebesprechung*** *im Rahmen eines Schichtwechsels (Shift Handover Meeting, Seite 16.1.1-2 und -3) hat die leitende Ebene (Management) auf spezifische Punkte zu achten. Diese müssen die* ***organisatorischen Voraussetzungen*** *für Ablauf und Sicherheit der Wartungsarbeiten gewährleisten.*

© Axel Rossmann - Turbocons.it
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Arbeitsübergabe und Kommunikation

Was man von Arbeitskarten/ -plänen für Aufgaben außerhalb der Routine erwarten sollte.

Merkmale der Aufgabe	Gründe und Ziele
Komplexität	- Strukturieren der Arbeitsfolgen - Identifikation der wichtigen Stufen im Ablauf - Hinweise und Dringlichkeiten - Fehler vermeiden: Je mehr Informationen ein Arbeitsschritt enthält, um so wahrscheinlicher werden welche übersehen. Besteht keine zwingende Verbindung zum vorherigen Arbeitsschritt, werden die folgenden leichter übersehen.
Mehrere Disziplinen	- Identifikatiion der Aufgaben der Spezialisten für Durchführung und Kontrolle erforderlich sind. - "Bereitstellung" der Spezialisten im richtigen Arbeitsschritt. - Erkennungsmerkmale der abgeschlossenen Arbeit.
Benötigt mehrere Schichten	- Klare Merkmale für den Stand der Arbeiten und noch ausstehende Arbeiten. - Empfehlungen zur Aufgaben- oder Schicht-übergabe. - Vermeidung von Fehlern bei denen etwas übersehen wurde. Mit der Zahl der Einzelschritte im Arbeitsablauf steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schritt übersehen wird.
Übliche Routineaufgaben deren Risiko-potenzial zu hoch ist.	- Leicht ausführbare Aufgaben oder Routine-aufgaben sind für Flüchtigkeitsfehler und Versäum-nisse anfällig. Diese führen bei der Wiederauf-nahme zu übersehenen Schritten die vergessen werden. Vorschneller Wechsel von einer Arbeit die nicht vollendet ist. Der letzte Arbeitsschritt wie eine Drahtsicherung oder ein Dichtlauf, neigt insbesondere unter Zeitdruck dazu, vergessen zu werden. - Geschriebene Arbeitskarten schützen beim Abschweifen der Gedanken einen Arbeitsschritt zu vergessen.
Enthält die Dokumentation von Messwerten oder Berech-nungen	- Die Dokumentation von Messungen wird mit Formblättern gewährleistet und einfacher. - Gewährleistet die unverzügliche Dokumentation. - Bei Berechnungen wie zur Auswahl von Beilagen auf Grund von Messwerten unterstützt die Dokumentation und ein Arbeitsplatz für die Berechnung das bereits beanspruchte Gedächtnis.

Bild 16.1.1-4

Bild 16.1.1-4 *(Lit. 16.1.1-2): Arbeiten* ***außerhalb der Routine*** *haben erfahrungsgemäß ein hohes Potenzial für Probleme und Schäden (Seite 16.1.1-3). Diese Zusammenstellung soll dem Ersteller der* ***Arbeitskarten*** *für solche Fälle Hilfestellung geben. Enthalten Arbeiten Merkmale der linken Spalte, werden* ***bei Nichtroutinearbeiten*** *geeignete* ***Vordrucke mit ausreichend vielen Schritten*** *empfohlen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Beeinflussen Sprachbarrieren die Wahrscheinlichkeit von Wartungsfehlern?

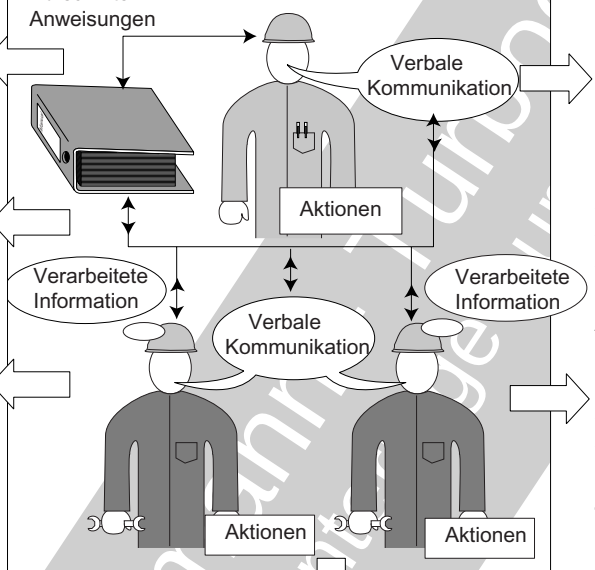
Schema des Informationsumfelds beim Wartungsprozess.

Probleme mit Schriftstücken (asynchron):

1. Die Ausführenden sind nicht in der Lage Sicherheitsaufkleber zu verstehen.

2. Die Ausführenden sind nicht in der Lage schriftliche Dokumente zu verstehen.

3. Schriftliche Dokumente wurden schlecht übersetzt.



Verbale (synchrone) Probleme:

1. Die Ausführenden sind nicht in der Lage auf dem notwendigen Level zu kommunizieren.

2. Sehr unterschiedliche, schlecht passende Fremdsprachenfähigkeit zwischen Führungspersonal und Ausführenden.

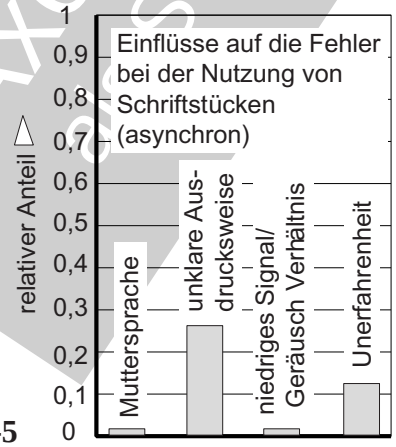
3. Dialekte in der Fremdsprache verhindern eine geeignete Kommunikation

4. Die Ausführenden sind nicht in der Lage Sicherheitsanweisungen zu verstehen

Die Möglichkeiten der Auswirkungen von Kommunikationsproblemen sind vielfältig:

- Missverständnisse
- Fehlinterpretationen
- Falsche Handlungen
- "Ersatzhandlungen"

Alle Angaben beziehen sich auf Wartungsarbeiten am gesamten Flugzeug, nicht nur auf das Triebwerk!



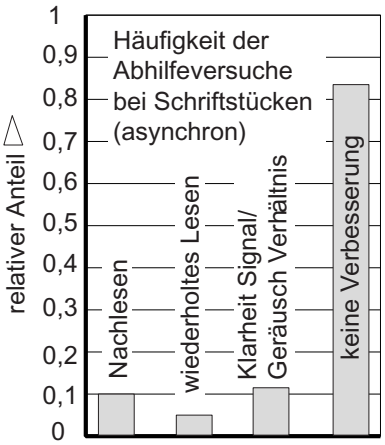


Bild 16.1.1-5

© Axel Rossmann Fachübersetzungen

Arbeitsübergabe und Kommunikation

Bild 16.1.1-5 *(Lit. 16.1.1-12):* ***Outsourcing*** *von Wartungs-, Überholungs- und Prüfarbeiten (Inspektionen) dient in erster Linie der Kostenminimierung und/oder als Verkaufsunterstützung von Fluggerät. Das führt zu immer mehr* ***Beschäftigten, deren Muttersprache nicht der des OEM entspricht****, insbesondere nicht der* ***englischen Sprache****. Diese ist die eigentliche Sprache der Luftfahrt, auch in Wartung und Überholung. Flugzeugtechniker (Aviation Maintenance Technicians = AMT) müssen ihre Prüfungen in Englisch ablegen. Die Dokumentation von der FAA anerkannter Betriebe erfolgt ebenfalls in Englisch. Das kann für Anderssprechende eine zusätzliche Arbeitsbelastung, höheren Zeitbedarf und mehr Irrtümer bedeuten. Bisher gibt es jedoch* ***kaum Beweise****, dass dieser Mangel in der Praxis zu Fehlern führte (Diagramm unten links). Bereits 1997 ließ jedoch eine Auswertung von Flugunfallberichten erkennen, in welcher Weise eine ungenügende Kommunikation sich sicherheitsrelevant auswirken kann (Bild 16.1.1-1):*

- Verwendung einer falschen ***Information****.*
- Falsche Einschätzung einer ***Situation****.*
- Ein gemeinsames ***Situationsmodell*** *der Beteiligten wird verhindert.*

Um Klarheit zu schaffen, wurde ein Untersuchungsprojekt gestartet, dessen erste Ergebnisse in den Diagrammen enthalten sind. Möglichkeiten der Kommunikation bis zur Umsetzung in Aktionen im Wartungsprozess und deren Probleme zeigt die obere Skizze. Die häufigste Form der Kommunikation bei der Arbeit ist ***informierend*** *(informal), d.h.* ***nicht aufgezeichnet****, ja sogar* ***ungesprochen*** *(Gesten). Sie erfolgt* ***synchron****. In der Skizze sind typische Probleme dieser Kommunikationsform für Wartungsarbeiten am gesamten Flugzeug zusammengestellt. Eine dokumentierte Kommunikation, d.h. schriftliche, wird als* ***formal*** *bezeichnet. Ihre Probleme zeigt der linke Rahmen. Üblicherweise dient sie einer zeitlich versetzten Nachrichtenübertragung (****asynchron****). Diese kann* ***schriftlich oder über Sprachaufzeichnung*** *erfolgen. Das Diagramm unten links zeigt die Fehlerursachen, unten rechts Abhilfen. Das „****Geräuschverhältnis****“ dürfte sich auch auf Sprachdokumente beziehen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
Ausschnittsunterlage nur mit Lizenz

Schichtwechsel kann ein riskanter Vorgang sein.

Während des Abhebens (Rotierens) in der Startphase trat ein lauter Knall auf. In einer Höhe von ca. 500 Metern begann das elektronische Überwachungssystem eine Vielzahl Fehler am linken Triebwerk auf dem Monitor anzuzeigen. Die Besatzung erklärte den Notfall und kehrte zum Flugplatz zurück. Beide Gondeltüren des linken Triebwerks im Bereich des Fan waren abgerissen. Sie hatten den Pylon und die Flügelvorderkante beschädigt. Die Türen waren für vorherige Wartungsarbeiten geöffnet worden. Ein Schichtwechsel hatte offenbar Einfluss darauf, dass das Schließen der Türen nicht ordnungsgemäß erfolgte.

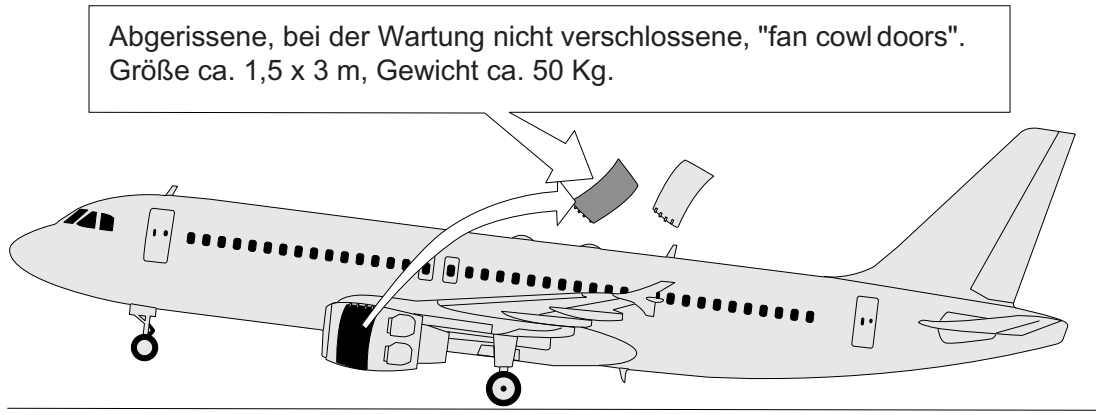


Bild 16.1.1-6.1

Bild 16.1.1-6.1, -6.2 *(Lit. 16.1.1-1): Dieses, vergleichsweise glimpflich ausgegangene Vorkommnis (Incident) mit hohem Schadens- und Gefahrenpotenzial, steht exemplarisch für die Gefahren in ursächlichem Zusammenhang mit Schichtwechseln. Eine besondere Gefahr besteht im Zusammenhang mit* ***Wartungsöffnungen und -klappen*** *(Bild 16.1.1-7), die nach Nutzung nicht ausreichend gesichert werden und sich im Betrieb ablösen.*
Im vorliegenden Fall lassen sich Mängel der Human Factors der Schichtwechsel auf folgenden Gebieten erkennen:

- *Dokumentation der Arbeiten*
- *Kommunikation/Information*
- *Ergonomie für Kontrollen*
- *Logistik / Bereitstellung*

In Bild 16.1.1-6.2 ist der Ablauf des letzten Wartungsvorgangs vor dem Incident mit den ***sicherheitskritischen Phasen*** *dargestellt. Diese Angaben wurden, soweit vom Autor verstanden, dem vorliegenden Unfallbericht entnommen.*
Was das Triebwerk anbetrifft, war in der ersten Schicht eine Rückölleitung auszutauschen. Das beinhaltete auch den Tausch der Befestigungsschellen. Der Wechsel der Rohrleitung machte natürlich die Öffnung der später abfliegenden Wartungsklappe notwendig. Die Rohrleitung konnte zwar getauscht werden, die offenbar notwendigen neuen Schellen waren aber nicht vor Ort und mussten angefordert werden. Sie konnten frühestens in der nächsten Schicht montiert werden. Daraus ergab sich das erste Problem:

© Axel Ross als Schulungsprogramm

Arbeitsübergabe und Kommunikation

*„**1a**“: Um zu gewährleisten, dass die Schellen montiert werden, hätte eine neue **Arbeitskarte für die nächste Schicht** erstellt werden müssen („**1c**“). Dies geschah jedoch nicht. Stattdessen wurde auf der vorhandenen Arbeitskarte der gesamte Rohrleitungstausch als abgeschlossen abgezeichnet („**1b**“). Auch in das für die Schichtübergabe notwendige „**Handover Book**“ wurde der ausstehende Arbeitsgang nicht eingetragen („**1d**“). Somit war kein dokumentierter Hinweis vorhanden. Bei Schichtübergabe wurde **lediglich mündlich** auf die Notwendigkeit der Schellenmontage hingewiesen . Die bewusste Aufnahme dieses Hinweises wurde offenbar von einer **Ablenkung bei der Kommunikation** während der Schichtübergabe beeinträchtigt. So wurden die Schellen nicht mehr angebracht. Damit war auch die Chance vergeben, die ungesicherte Wartungsklappe zu entdecken bzw. das Verschließen nach dem Anbringen der Schellen vorzunehmen.*

*Die ausstehende Montage der Rohrleitungsschellen wurde zwar in der 3. Schicht, der letzten vor der Flugfreigabe, erkannt. Weil die Schellen aber immer noch nicht angeliefert waren, wurde diese Arbeit wieder zugunsten anderer Wartungstätigkeiten verschoben. Später wurde sie nicht mehr durchgeführt („**1e**“). Nach der unvollständigen Rohrleitungsmontage wurde die **Wartungsklappe zugeschlagen, jedoch nicht mit den Verschlüssen gesichert** („**2a**“). Aus dem Gesichtspunkt der **Human Factors waren dabei die Klappenverschlüsse und ein Warnaufkleber problematisch**:*

*Im zugeklappten Zustand konnte die **Verschlusssicherung nur sehr ungünstig mit einer Sichtprüfung kontrolliert** werden (Bild 16.1.1-6.3).*

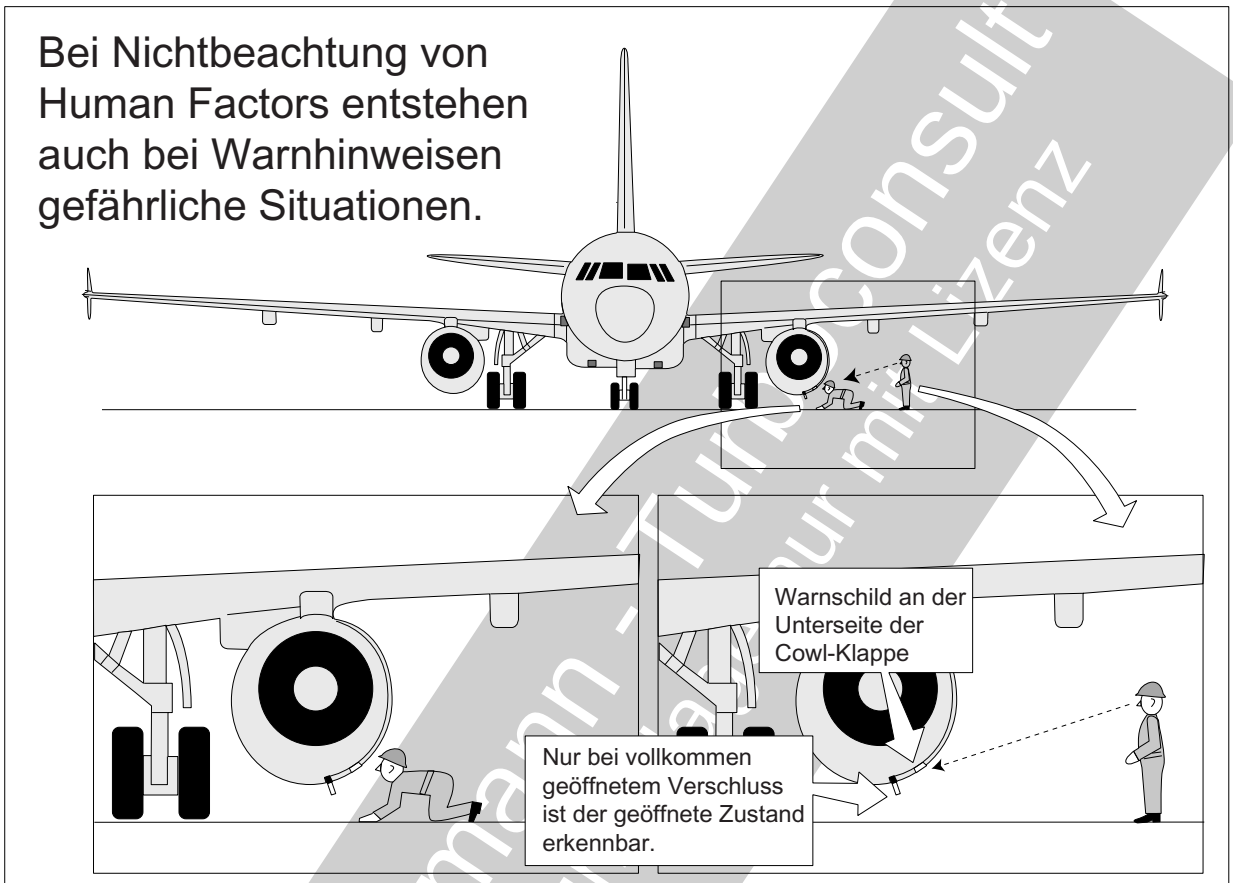
*Bei der Übergabe zur 2. Schicht (Nachtschicht) wurde die **ungesicherte Klappe nicht erwähnt** („**2b**“).Wahrscheinlich wurde angenommen, dass für die Montage der fehlenden Schellen die Klappe wieder geöffnet werden muss. Dann wäre das Verschließen erfolgt. Schriftliche Unterlagen waren, wie beschrieben, zu diesem Mangel nicht vorhanden und die Schellen wurden noch nicht angeliefert. Sie wurden damit nicht mehr montiert und so die ungesicherte Klappe nicht entdeckt („**2c**“).*

*Auch in der 3. Schicht wurde wegen der immer noch nicht angelieferten Schellen (siehe „**1c**“)*

Der Ablauf eines Wartungsproblems mit Folgen im Rahmen eines Schichtwechsels.

Bild 16.1.1-6.2

© Axel Bernmann - Technoconsult
Arbeitsunterlage nicht zitierfähig


Bei Nichtbeachtung von Human Factors entstehen auch bei Warnhinweisen gefährliche Situationen.

Um den Zustand der Cowl-Verschlüsse sicher zu erkennen, muss der Wart sich auf den Knien hinbewegen.

Aus 3 Metern Abstand ist der Zustand der Cowl-Verschlüsse nicht erkennbar. Das Warnschild ist bei eingeklappter Cowl-Klappe aus dem Stand nur schlecht sichtbar.

Bild 16.1.1-6.3

*eine Chance vergeben, die unverschlossene Klappe zu erkennen („**2d**“). Wegen dem ungünstigen Human Factor im Klappenbereich wurden auch bei zwei weiteren Kontrollgängen des Wartungspersonals („**2e**“) und dem vorgeschriebenen Kontrollgang des Piloten vor dem Flug die unverschlossene Klappe nicht erkannt. Dass diese letzte Chance nicht genutzt werden konnte, steht auch im Zusammenhang mit einer **fehlenden Eintragung im „Journey Logbook**“. Dieses hätte eigentlich unvollendete Arbeiten zur Information des Piloten enthalten müssen („**2f**“).*

***Bild 16.1.1-6.3** (Lit. 16.1.1-1): Hierzu wird der Hintergrund in Bild 16.1.1-6.1 beschrieben. Die nur zugeschlagene aber unverschlossene **Montageklappe/-tür** der Triebwerksgondel wurde **beim Start weggerissen**. Sie beschädigte die Zelle und Steuerflächen. Zu dem Unfall trug bei, dass es **nur unter Mühen** (auf den Knien, Skizze unten links) möglich war, den **Verschlussmechanismus zu kontrollieren**. Im Stehen, etwa bei einem Kontrollgang des Warts oder Piloten, war es bei eingeklappter Klappe nicht möglich zu erkennen, ob der Verschluss ordnungsgemäß betätigt ist. Lediglich bei nach unten geöffnetem Verschlusshebel (ca. 10 cm lang) war dies möglich. Ein **Warnschild** auf der Klappe über dem Verschluss, das auf dieses Problem hinwies, war **nur an der aufgeklappten Montagetür sicher lesbar** (Skizze unten rechts). Ein solcher **ergonomischer Mangel** dürfte beispielsweise gegen die Regeln des „**Human Factors Design Guide**“ (Lit. 16.1.1-1.9) verstoßen.*

© Axel Rossmann - Turbo consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Arbeitsübergabe und Kommunikation

Ein Schichtwechsel mit einem nicht vollendeten Wartungsvorgang ist ein potenzielles Risiko.

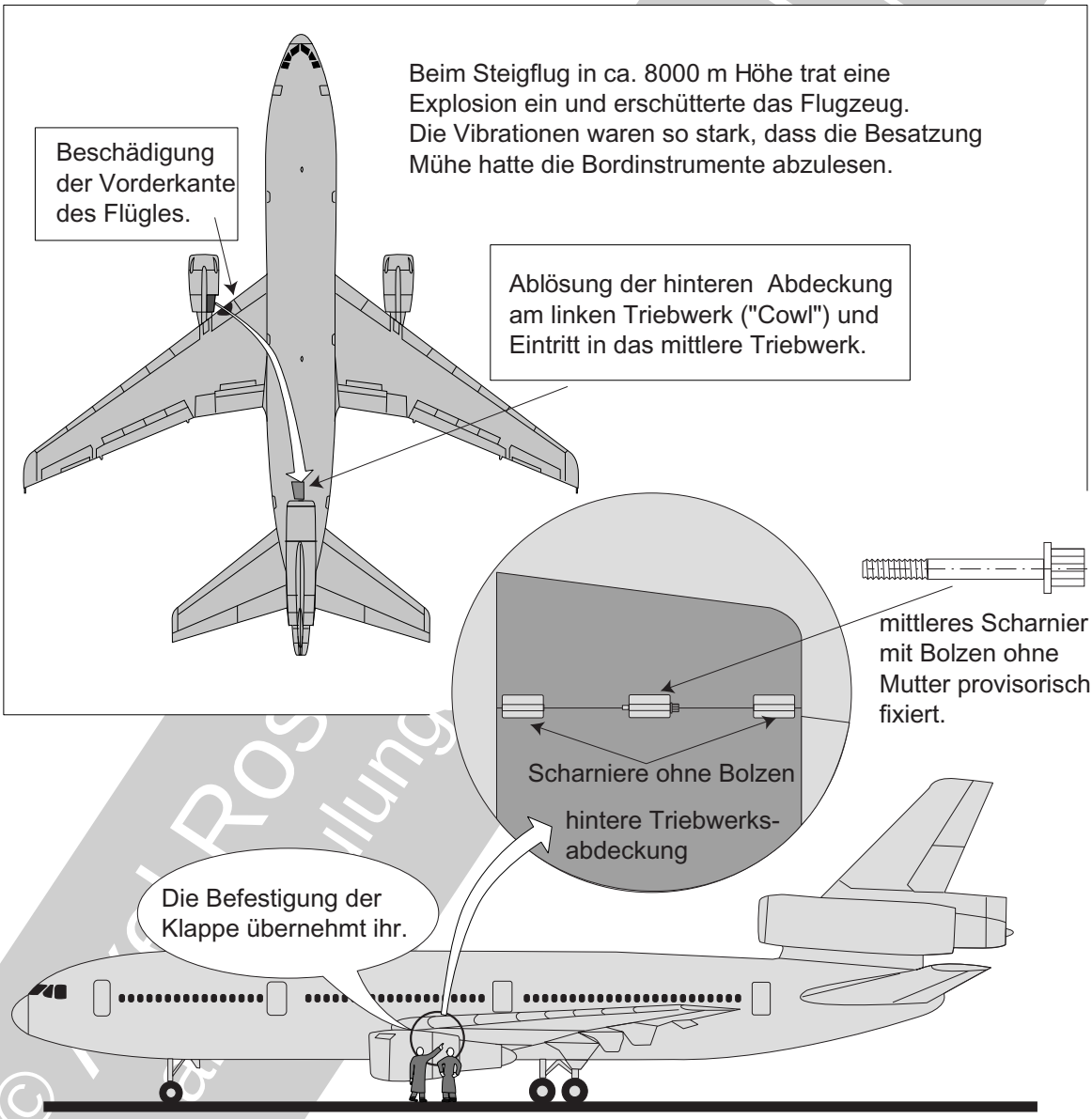


Bild 16.1.1-7

Bild 16.1.1-7 *(Lit. 16.1.1-8): Für* ***Probleme im Rahmen von Schichtwechseln*** *bei Wartungsarbeiten scheinen* ***Wartungsöffnungen*** *und -klappen besonders anfällig zu sein (siehe auch Bild 16.1.1-6.1). In diesem Fall riss die abgeflogene rumpfseitige* ***Klappe der Gondel*** *des linken Triebwerks ein großes Loch in die Vorderkante der zugehörigen Tragfläche. Sie wurde dann vom mittleren Triebwerk angesaugt, das dabei innen und außen schwer beschädigt wurde. Wahrscheinliche Ursache war ein* ***Fehler des Wartungspersonals*** *des Betreibers.*
Zwei Tage vor dem Unfall wurde an dem Flugzeug wegen einer Anzeige des Verriegelungslichts für den Schubumkehrer eine Wartung mit folgenden Besonderheiten durchgeführt:

*- Der Schubumkehrer wurde ausgetauscht, was den **Abbau der Wartungsklappe** der Gondel erforderte.*
*- Nach dem Tausch wurde die **Klappe wieder provisorisch angebracht**. Dabei wurde der Bolzen des mittleren Scharniers lediglich eingesteckt. Eine **Sicherung mit der zugehörigen Mutter erfolgte nicht**.*
*- Die folgende Schicht wurde **mündlich von der nicht abgeschlossenen Arbeit informiert**.*
*- Diese Schicht konnte sich aber **nicht sofort** dieser Aufgabe widmen, weil andere Flugzeuge für die Wartung vorgezogen werden mussten. Bei der Rückkehr **nahmen die Warte trotz der früheren Information an**, dass alle drei Scharnierbolzen eingebaut und gesichert waren. Sie schlossen die Klappe und sicherten den Verschluss.*
*- Ein **Eintrag** über die Arbeiten am Schubumkehrer und der Klappe **in den Wartungslisten erfolgte offensichtlich nicht**. Das wurde auch **bei der Freigabe des Flugzeugs nicht nachgeholt**. Es ging mit den in den Formblättern als offen aufgelisteten Arbeiten in den Flugbetrieb.*

*Dieser Ablauf **widersprach dem vom Betreiber** für Inspektionen, Wartung und Änderungen **festgelegten Vorgehen**. Es sollte verhindern, dass ein Flugzeug vor dem Abschluss aller Arbeiten in den Flugbetrieb geht:*
*- Das Organisationshandbuch für die Wartung (**Maintenance Administration Manual**) definiert eindeutig **Verantwortlichkeiten** beim Schichtwechsel.*
*- Das Prüfungshandbuch (**Base Check Manual**) des Betreibers verlangt die **Überprüfung von Abweichungen** um eine Beeinträchtigung der Flugsicherheit auszuschließen. Insbesondere sind nicht normal geöffnete **Klappen und Verkleidungen zur Sicherheit erneut zu öffnen**. Dies ist in einen Wartungsanhang (**Maintenance Supplement**) **einzutragen**. Trotz der klaren Anweisung erfolgte ein solcher Eintrag nicht.*

Merksatz:

- Keine provisorischen Zustände hinterlassen bzw. bei einer Schicht übergeben.

Mündliche Informationen an die folgende Schicht sind erfahrungsgemäß nicht ausreichend sicher. Selbst offene Arbeiten in den Wartungspapieren können die Freigabe für den Flugbetrieb nicht sicher verhindern.

© A. Rossmann - TU
als Schulungsunterlage nur

Brand eines Anbaugeräts (Constant Speed Drive) auf Grund ungenügender Wartungsdokumentation und Schichtübergabe.

Der "Constant Speed Drive" (CSD) des Generators eines Triebwerks fing während des Rollens (taxi) nach der Landung Feuer. Es wurde vom Bodenpersonal gelöscht. Dieser CSD war bei einem Flug am Tag vorher vom Antrieb getrennt worden als sein Öldruckwarnlicht aufleuchtet. Er sollte vor dem letzten Flug getauscht werden.

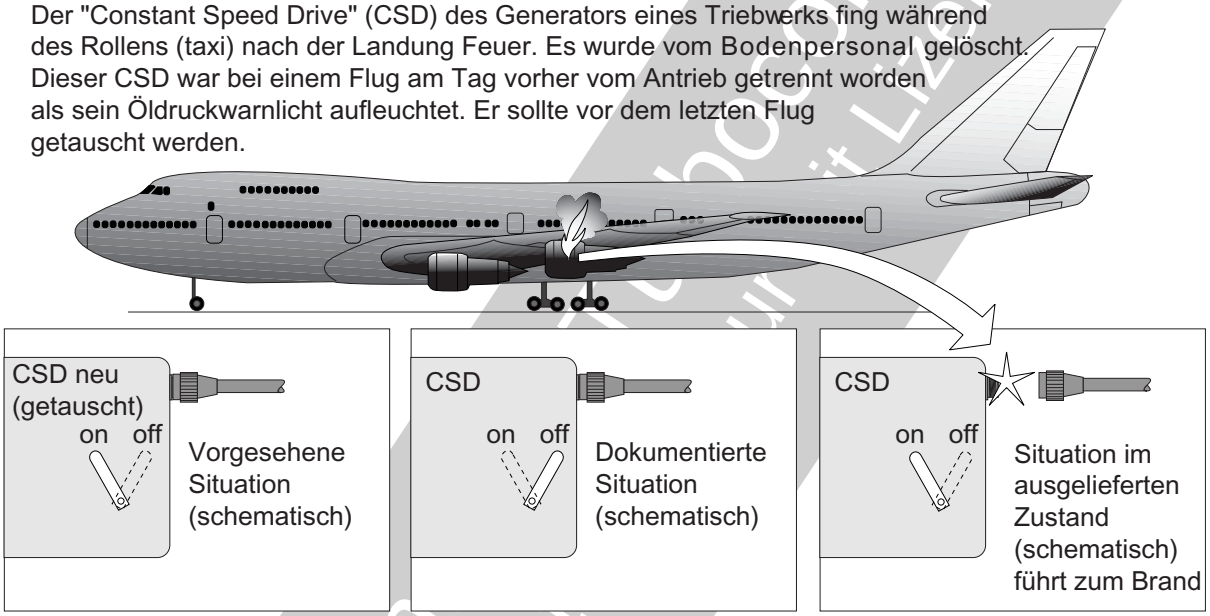


Bild 16.1.1-8

Bild 16.1.1-8 *(Lit. 16.1.1-6): Einen Tag vor dem Unfall war der* ***Constant Speed Drive*** *(CSD) abgekoppelt worden, nachdem die Öldruckwarnlampe aufleuchtete. Ein nachfolgender Flug wurde wegen einer anderen Wartungsabweichung abgesagt. Ein leitender Mechaniker wies die Mechaniker der zweiten Schicht ein. Der* ***Austausch des CSD*** *sollte nach 24:00 Uhr vorgenommen werden. Die Mechaniker entschlossen sich, die Schadensursache zu ermitteln (troubleshooting). Dazu wurde der CSD vor dem Triebwerksstart wieder mechanisch eingekuppelt. Das Licht des Startventils verlöschte dabei nicht wie notwendig. Nach dem Abstellen des Triebwerks wurde deshalb das Ventil gewechselt, der Lauf wiederholt und der Ventilwechsel abgezeichnet. Nachdem das „****Fault Isolation Handbook****" zu Rate gezogen wurde, entschloss man sich für die Untersuchung den* ***Stecker der Verkabelung zu ziehen****. Der Austausch-CSD war jedoch noch nicht eingetroffen.* ***Der eingekuppelte CSD und der abgezogene Stecker wurden nicht dokumentiert*** *(Skizze unten rechts). Die Aufzeichnungen bei der Schichtübergabe enthielten die verschobene CSD-Wartung, jedoch nicht den eingekuppelten Zustand. Eine* ***mündliche Information*** *soll jedoch erfolgt sein. Der leitende Mechaniker wollte für den CSD-Tausch sorgen, was aber nicht erfolgte. Die eingekuppelte CSD mit dem abgezogenen Kabelstecker führte zu Überhitzung, Feuer und Anschmelzungen im CSD-Bereich.*

Merksatz:

*- **Mündliche Informationen** an die folgende Schicht sind nicht ausreichend sicher.*

*- **Nicht dokumentierte Arbeiten** neigen erfahrungsgemäß dazu über mehrere Schichten „verloren" zu gehen.*

Bild 16.1.1-9 *(Lit. 16.1.1-10, und Lit. 16.1.1-13): Der Triebwerkshersteller (OEM) hatte bereits* ***seit längerer Zeit Probleme mit Thermoermüdungsschäden*** *an Eintrittsleitschaufeln der Hochdruckturbine. Wenn die Rissbildung nicht rechtzeitig mit einer regelmäßig wiederholten Boroskopinspektion erkannt wurde, bestand die Gefahr, dass ein Teil des* ***Leitschaufelblattes*** *ausbricht. In diesem Fall sind umfangreiche Folgeschäden in den Turbinen zu erwarten.*

Parallel zu den Inspektionen wurde an einer verbesserten Konstruktion der Leitschaufeln gearbeitet. Sie sollte die Boroskopinspektionen überflüssig machen. Für die ausgebauten rissbehafteten Leitschaufeln wurde eine Lötreparatur (Lit. 16.1.1-13) mit einer Modifikation entwickelt, welche der neuesten Konstruktion entsprach.

*Der OEM beteiligte den Betreiber an einer Betriebserprobung zweier reparierter Leitapparate. Die Teile wurden vom OEM entsprechend gekennzeichnet. Alle 800 Betriebs****zyklen*** *sollte eine Boroskopinspektion, insbesondere der* ***gefährdeten Blattbereiche****, nach Möglichkeit im* ***Beisein eines OEM-Ingenieurs*** *erfolgen. Diese Anweisung wurde vom OEM-Repräsentanten in eine Boroskopinspektion alle 800 Betriebs****stunden*** *(!), was nur 400 Zyklen entspricht, verändert. Besondere Hinweise auf kritische Bauteilzonen entfielen.*

Die Ingenieure des Betreibers entschieden auf Grund ihrer Erfahrungen, die ***800 Stunden Inspektion nicht zu fordern*** *und setzten die Anweisung nicht um. So sollte für die Erprobungsteile auch die bisherige regelmäßige Boroskopinspektion entfallen. Stattdessen wurde, unabgesprochen mit dem OEM,* ***erst alle 1600 Zyklen*** *(entsprechend ca. 3200 Betriebsstunden)* ***eine Boroskopinspektion*** *vorgesehen.*

In dieser Zeit sandte der für das Testprogramm verantwortliche OEM-Ingenieur zwei Nachrichten an den OEM-Repräsentanten beim Betreiber. Die Nachrichten bekräftigten eine Boroskopinspektion alle ***800 Zyklen*** *(entsprechend ca. 1600 Betriebsstunden) mit der Dokumentation des Befunds. Zu dieser Zeit* ***wechselte der OEM-Repräsentant****. Die erste Nachricht traf direkt vor dem Wechsel, die zweite kurz nach dem Eintreffen des Neuen ein:*

Die Bedeutung der Anweisung wurde bei der Aufgabenübergabe nicht erkannt und eine Weiterleitung an die Technikabteilung des Betreibers ist nicht nachweisbar.

So blieb es für die Erprobungsteile beim Inspektionsintervall von 1600 Zyklen das zweimal auftrat. Dabei wurde die ***kritische Schaufelzone*** *(konvexe Blattseite, Skizze unten rechts)* ***nicht gezielt beachtet****. Eine* ***Dokumentation der Befunde unterblieb*** *ebenfalls.*

Eine dem Schaden folgende Analyse zeigt, dass ein ***Ausbruch auf der konvexen Blattseite zu einer gefährlichen Strömungsstörung führt*** *(Skizze unten links). Diese löst an den nachfolgenden Turbinenrotorschaufeln bereits bei kleinen betriebsbedingten Schwachstellen* ***Schwingbrüche*** *mit katastrophalen Folgen aus.*

Merksatz:

*- **Ein Wechsel im technisch verantwortlichen Personal** ist mit einem besonderen Risiko behaftet.*

*Eine **ausreichende Einarbeitung** (Zeit, Umfang) der an Fachkenntnis und Erfahrung geeigneten Ersatzperson ist zu gewährleisten.*

*- Bei Sonderaktionen ist unbedingt das dokumentierte **Einverständnis des OEM** mit Anweisungsinterpretationen einzuholen.*

© Weingrassmann - Turbosoft
alle Schulungsunterlagen nur mit Zustimmung

Arbeitsübergabe und Kommunikation

Wechsel des verantwortlichen Personals ist eine Phase mit hohem Risikopotenzial für die unzureichende Umsetzung von Vorschriftenänderungen.

Start und Abflug verliefen normal. Während des Steigflugs trat ein lauter Knall auf. Die Besatzung bemerkte sofort einen Drehzahlabfall des rechten Triebwerks und einen Anstieg der Abgastemperatur. Darauf wurde das Triebwerk abgestellt. Die einmotorige Landung erfolgte am Bestimmungsflugplatz ohne Probleme.

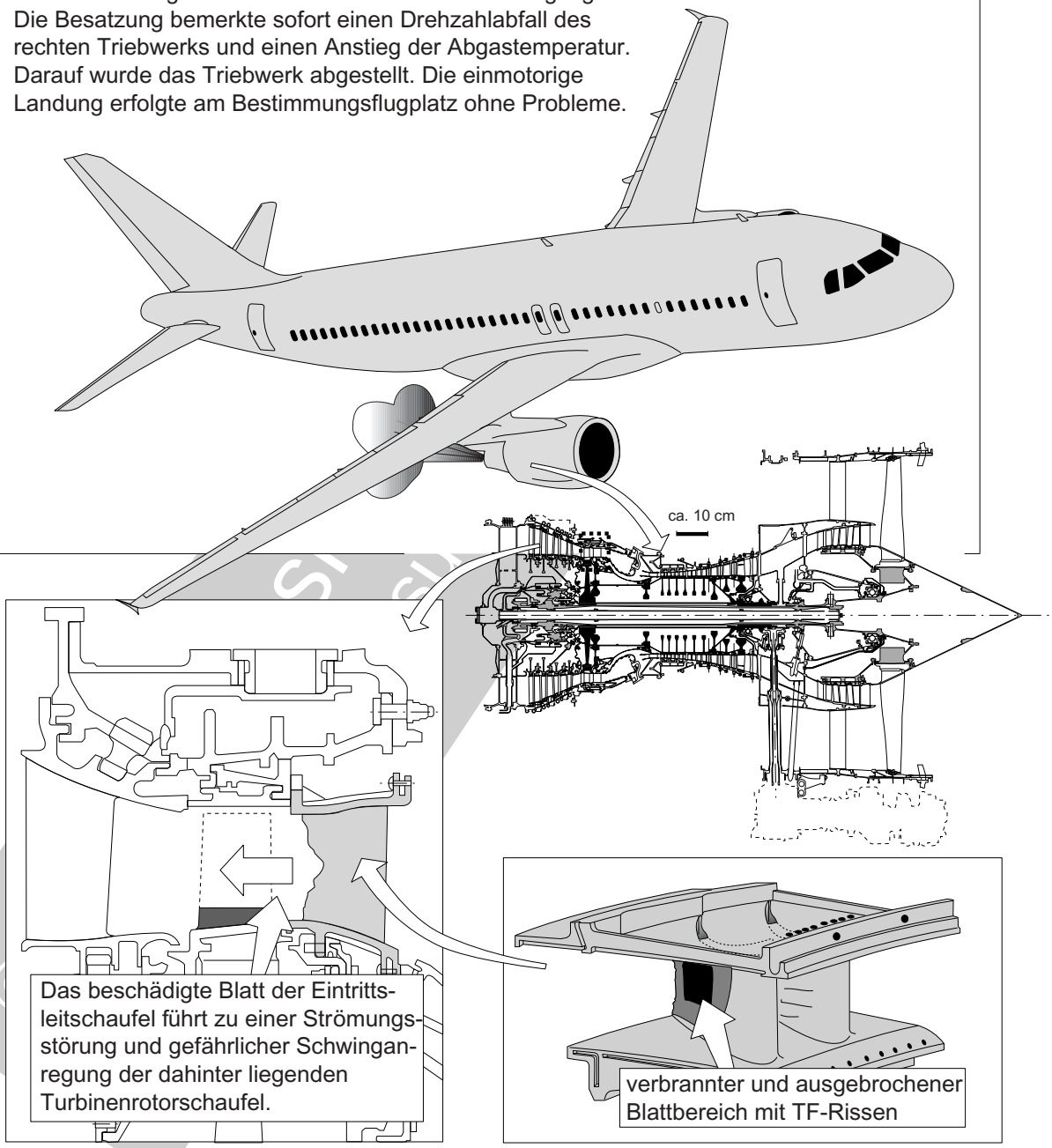


Bild 16.1.1-9

Literatur zu Kapitel 16.1.1

16.1.1-1 Transportation Safety Board (TSB) of Canada, Aviation Investigation Report Number A00O0199, „Fan Cowl Separation“, Toronto am 13. Sept. 2000, Seite 1-13.

16.1.1-2 Civil Aviation Authority (CAA), CAP 716, „Aviation Maintenance Human Factors (JAA JAR 145)“,First edition 7.January 2002 , ISBN 0 86039 832 3, Appendix 1 „Shiftwork “ Seite 1-4.

16.1.1-3 B.J.Crotty, „Unplugged, a maintenance error caused oil to be lost from all four engines...“ Zeitschrift „Flight Safety Australia“, Nov.-Dec. 1999, Seite 43.44.

16.1.1-4 CAA, Safety Regulation Group, Ref 9/97/CtAw/261, „Letter to the Owners/Operators...“, „Multi Engine Maintenence Practice“, 23.Jan. 2004, Seite 1.

16.1.1-5 National Transportation Safety Board (NTSB), Aircraft Accident Report NTSB/AAR-84/04 (PB84-910404), „Eastern Air Lines, Inc., Lockheed L-1011, N334EA Miami, Florida, May 5, 1983“, Seite 1-46.

16.1.1-6 National Transportation Safety Board (NTSB) Identification: CH195IAo28, Aircraft Boeing 747-251B, registration:N631US, Incident Nov. 02,1994 in Chicago, Il. Seite 1.

16.1.1-7 B.Alexander, „Serious Flawed Security - An Object for Maintenence Malpractice?“, Zeitschrift „Air Safety Week“, 13. Dec. 2004, Seite 1-3.

16.1.1-8 National Transportation Safety Board (NTSB), Aircraft Accident Report NTSB-AAR-74-09 (PB84-910404), „National Airlines Inc. McDonnell - Douglas DC 10-10, N60NA, Near Tampa Florida, July 8, 1074“, Seite 1-6.

16.1.1-9 TD.Wagner, J.A.Birt, M.Snyder, J.P.Duncanson, FAA Technical Center, „Human Factors Design Guide“, DOT/FAA, CT-96/1, January 15, 1996, zu beziehen durch „National Technical Information Service“, Springfield, Virginia 22161, Abschnitt 6.15.1.

16.1.1-10 Transportation Safety Board (TSB) of Canada, Aviation Investigation Report Number A95o0232, „Aviation Occurrence Report Engine Failure“, Quebec am 14. Nov. 1995, Seite 1-6.

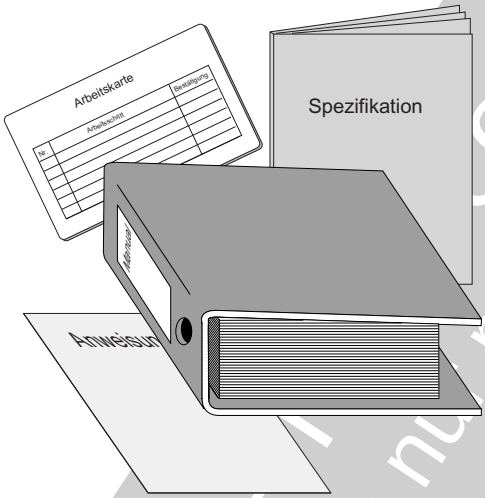
16.1.1-11 A.Chaparro, B.Rogers, C.Hamblin, B.Chaparro, FAA Technical Center, „Final Report: A Comparison of Three Evaluative Techniques for Validating Maintenance Documentation“, DOT/FAA/AR-xx/xx , February 2004, zu beziehen durch „National Technical Information Service“, Springfield, Virginia 22161.

16.1.1-12 .G.Drury, J.Ma „Do Language Barriers Result in Aviation Maintenance Errors“, Proceedings of the „Human Factors and Ergonomics Society 47th Annual Meeting - 2003“.

16.1.1-13 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Torbo-Flugtriebwerken“, Band 5, 2008, Turboconsult, ISBN 978-3-00-025780-3, Bild 21.2.2-4, Bild 25.2.2.1-8.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

16.2 Handbücher, Arbeitsunterlagen, Vorschriften und Spezifikationen.



Eindeutige, dokumentierte Arbeitsanweisungen und Informationen, meist in Handbüchern und Arbeitskarten, sind für eine zweifelsfreie Ausführung von entscheidender Bedeutung. Dabei spielen neben einer klaren, übersichtlich gegliederten, möglichst unkomplizierten **Ausdrucksweise,** weitere Hilfen eine wichtige Rolle. Gewöhnlich handelt es sich um **erklärende Skizzen, Bilder und Tabellen**. Sie beschreiben und sichern Arbeiten ab. Typisch sind:

- Angaben zu **Tätigkeiten**: Vorgehensweisen, Abläufe, Hilfsmittel (Werkzeuge, Vorrichtungen), besonders zu beachtende Punkte, Warnhinweise.
- Beschreibungen der **Lage von Bauteilen**, z.B. von Filtern und Sensoren.
- Aufbau von zerlegbaren Bauteilen und Baugruppen.
- **Prüfbereiche** und die Wertung von **Prüfbefunden**.
- **Grenzen der Nacharbeit** oder Reparierbarkeit.

Mängel in diesen Dokumenten (Bild 16.2-1) haben das Portenzial schwerer Schäden. Aus diesem Grund wird optimal gestalteten Handbüchern große Aufmerksankeit geschenkt.

Potenzielle Probleme von Wartungs- und Überholhandbüchern
(Bild 16.2-2, Bild 16.2-7, Bild 16.2-8, Bild 16.2-9, Bild 16.2-10).

- Missverständliche oder nicht eindeutige Anweisungen (Bild 16.2-2, Bild 16.2-2).
- Fehlerhafte Anweisungen.
- Das Problem wird nicht behandelt (Bild 16.2-3.1)
- Erklärende Bilder fehlen (Bild 16.2-2, Bild 16.1-5).
- Missverständliche Bilder.
- Fehler bei Übersetzungen (Bild 16.2-2) oder Übertragungen.
- Nicht mehr aktuelle Übernahmen aus älteren Manuals.
- Fehlende Warnungen bzw. Hinweise auf Probleme.

Bild 16.2-1

Rossmann - Consult
Arbeitsunterlage nur mit Lizenz

Es hat sich gezeigt, dass die Fehlerquote bei der praktischen Ausführung ansteigt, wenn die üblicherweise englische Sprache nicht die Muttersprache der Ausführenden ist. Die folgenden Erkenntnisse entsprechen der Literatur 16.2-7 von 2005.

Hinweise auf die **Möglichkeiten von Irrtümern und Fehlern bei der Wartung**, die für eine Bewertung der „Übertragungsqualität" dienen. Die Häufigkeit und deren Reihenfolge entspricht etwa den Aufzählungen. Sie sind offenbar auch von den „Weltregionen" (Sprachkenntnisse, Mentalität) deutlich abhängig (Bild 16.2-2).

Erkennungsmerkmale für ein **unzureichendes Verständnis**

A1 Der Mechaniker (Mechanic, Aviation Maintenance Technician = AMT) oder der Prüfer **bittet um Hilfe oder Klärung**.
A2 Der Mechaniker oder der Prüfer **wirkt verblüfft** (perplexed).
A3 Der Tätigkeitsfehler aus dem **sprachbedingten Irrtum** wurde erkannt.
A4 Der Mechaniker oder der Prüfer **stimmte allem Gesagten** zu.
A5 Der Mechaniker oder der Prüfer **versteht die an ihn gestellte Frage nicht**.
A6 Der Mechaniker oder der Prüfer **bricht das Gespräch ohne Antwort ab**.

Typische **Einflüsse die Irrtümer begünstigen**. Reihenfolge entspricht näherungsweise der Häufigkeit:

B1 Die **Komplexität der Aufgabe**.
B2 Die Aufgaben**beschreibung ist komplex**.
B3 Der Mechaniker oder der Prüfer hat **ungenügende Kenntnis des geschriebenen Englisch**.
B4 Der Mechaniker oder der Prüfer hat **ungenügende Kenntnis des gesprochenen Englisch**.
B5 **Zeitnot** führt zu hastiger Arbeit.
B6 **Störung der Kommunikation** durch die Umgebung wie Gespräche oder Funkanrufe.
B7 Der **Zeitdruck** hält den Mechaniker oder Prüfer von einer Nachfrage bei anderen ab.
B8 Der Mechaniker oder der Prüfer fällt unter **Stress** in seine Muttersprache.
B9 Der Mechaniker oder der Prüfer will seine **mangelnden Englischkenntnisse** nicht zeigen.

Faktoren die zur **Vermeidung eines Missverständnisses** beitragen. Aufzählung entspricht etwa der Wirksamkeit.

C1 Das Dokument ist in die **Muttersprache** des Mechanikers oder Prüfers übersetzt.
C2 Das Dokument ist **gut gestaltet**.
C3 Das Dokument verwendet von anderen Dokumenten **gewohnte Begriffe**.
C4 Der Mechaniker oder der Prüfer **nutzt die Hardware** zur Klärung in der Kommunikation.
C5 Der Mechaniker oder der Prüfer ist mit der **Aufgabe vertraut**.
C6 Dem Mechaniker oder dem Prüfer steht ein **Übersetzer** zur Verfügung.
C7 Dem Mechaniker oder dem Prüfer werden die Aufgaben unter Berücksichtigung seiner **Englischkenntnisse** übertragen.
C8 Der Mechaniker oder der Prüfer arbeitet im **Team** mit einem der Englisch als Muttersprache hat.
C9 Der Mechaniker oder der Prüfer wurde für die besondere **Aufgabe zugelassen**.
C10 Der Mechaniker oder der Prüfer hat einen **Verständnistest** durchlaufen.

© Axel Rossmann – Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

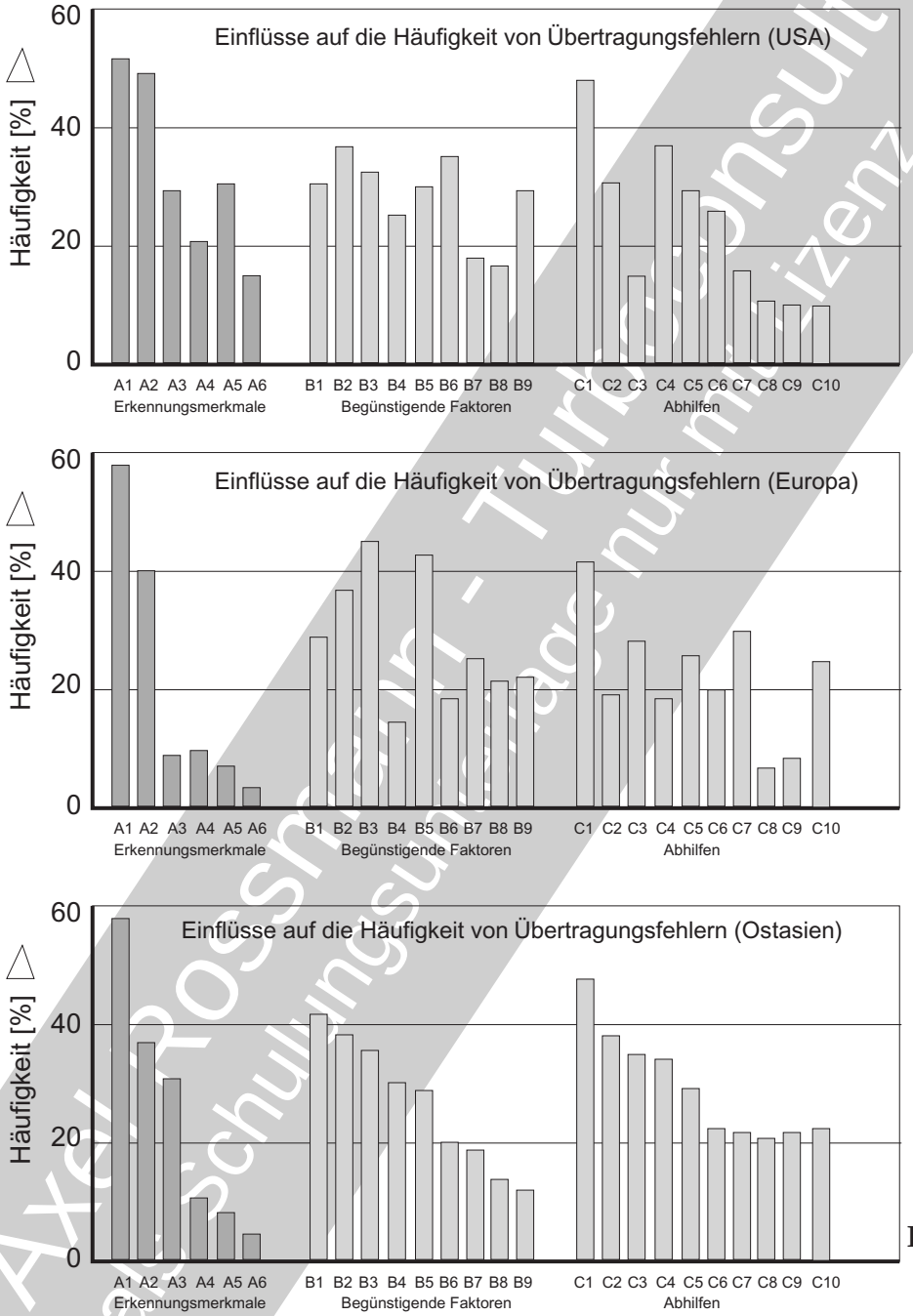


Bild 16.2-2

Bild 16.2-2 *(Lit. 16.2-7): In den Diagrammen sind interessante Unterschiede der Einflüsse auf Kommunikationsprobleme unter Personal aus verschiedenen Regionen erkennbar. Das gilt besonders für die „menschlichen" Faktoren der Erkennungsmerkmale A2-A6 (siehe vorhergehende Seite). Dagegen ist das* ***wichtigste Erkennungsmerkmal*** *bei allen die* ***Bitte um eine Hilfe*** *(A1). Es kann das Kennzeichen für einen Mangel, den der Betroffene möglicherweise nicht zeigen will, sein.*

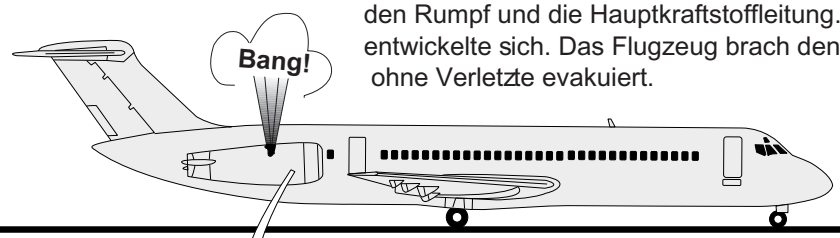
Erstaunlich ist, dass ungenügendes verbales Englisch (B4) in Europa auch im Vergleich zu den USA, ein geringeres Kommunikationsproblem darstellt.

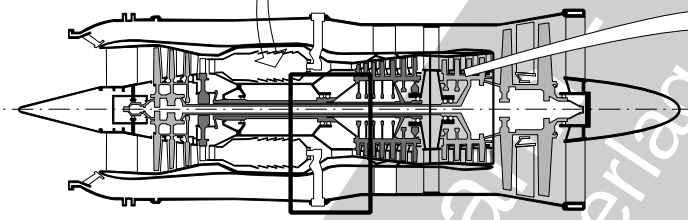
Zur Vermeidung von Kommunikationsproblemen ist in allen Fällen eine Übersetzung am effektivsten (C1). Eine konsistente Terminologie (C3) ist außerhalb der USA offenbar besonders wichtig.

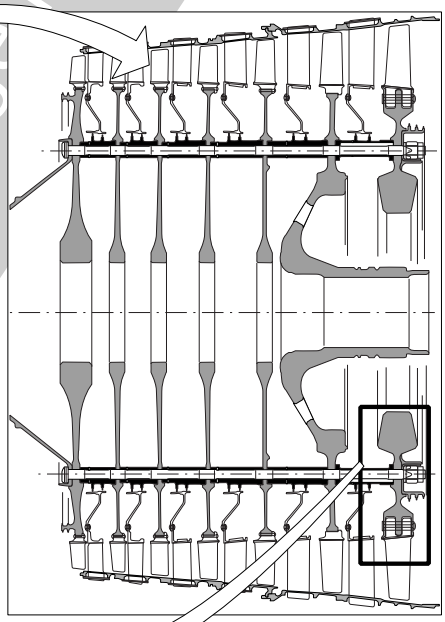
© Axel Rossmann - Turbosonsult
Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

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

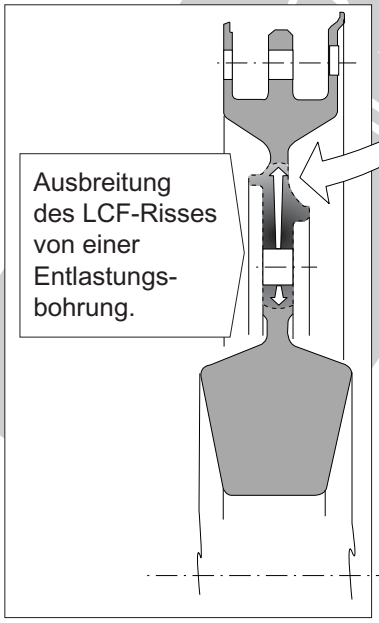
Während des Anrollens trat ein lauter Knall am rechten Triebwerk auf und dieses begann zu brennen. Bruchstücke aus dem Triebwerk durchschlugen den Rumpf und die Hauptkraftstoffleitung. Ein Kabinenfeuer entwickelte sich. Das Flugzeug brach den Start ab und wurde ohne Verletzte evakuiert.



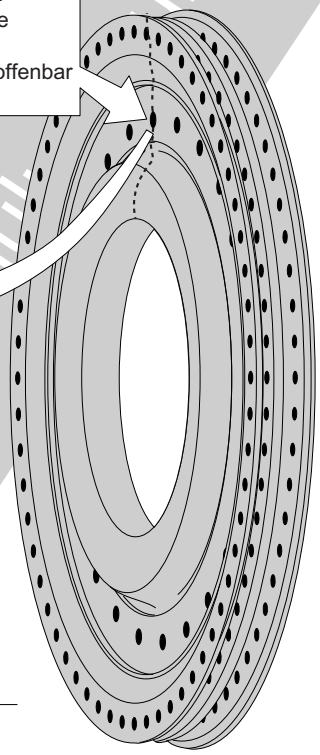




Bei der letzten Prüfung der Scheibe im Rahmen der Überholung vor 4400 Zyklen (ca. 4 Jahre) dürfte bereits ein Riss von ca. 12 mm vorhanden gewesen sein, der offenbar nicht erkannt wurde.



Ausbreitung des LCF-Risses von einer Entlastungs-bohrung.



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

Bild 16.2-3.1

Bild 196.2-3.1 *und* ***Bild 196.2-3.2*** *(Lit. 16.2-1): Dieser Unfall ging auf* ***ungenügende Arbeitsdokumente*** *bei der Überholung zurück. Es handelt sich um ein Fantriebwerk mit kleinem Bypassverhältnis, wie für ältere Triebwerkstypen üblich. Die Verdichterrotorscheiben bestehen aus einem nicht korrosionsfesten Stahl. Dieser ist für Lochfraßkorrosion (Band 1 Bild 5.6-2 und Bild 5.6.1.1-1) empfindlich. Als Korrosionsschutz wird eine Nickel-Cadmiumschicht aufgebracht, bei der die Ni-Schicht eine schädigende direkte Berührung der CD-Schicht mit dem Grundmaterial verhindern soll (Bild 18.3-11). Kommt es trotzdem zu Korrosionsgrübchen (engl. corrosion pits, Bild 19.1.3-4) haben diese eine hohe Kerbwirkung und senken die Schwingfestigkeit gerade in lebensdauerbestimmenden Bohrungen unzulässig ab. Sie müssen deshalb bei der Überholung vor einer erneuten Schutzbeschichtung geeignet entfernt werden.*

Die Untersuchung nach dem Unfall ergab, dass die 7. Hochdruckverdichterstufe (Skizze Mitte rechts) mehrfach gebrochen war. Von den Bruchstücken wurden aber nur zwei, zu denen eine Hälfte der Scheibe gehörte, im zerstörten Gehäuse des Anbaugetriebes gefunden. Der auslösende Riss startete offenbar von einer Entlastungsbohrung "SR1" (Stress Redistribution hole = SR hole, Bild 16.2-3.2). Der Ermüdungsriss (LCF) breitete sich von bis zu ca. 0,1 mm tiefen Korrosionsgrübchen, die mit einer Ni-Cd-Schicht bedeckt sind, aus. Das beweist, dass die ***gemäß dem Überholhandbuch des OEM unzulässigen Anfressungen*** *bereits* ***bei der letzten Überholung vorhanden*** *waren. Der Riss verläuft radial nach innen und außen bis zur rechnerisch nachvollziehbaren kritischen Gesamtrisslänge (Band 1 Bild 4.3-3 und Bild 4.3-7) von ca. 40 mm aus (Detail unten links). Die Bruchauswertung ergab anhand der Bruchfortschrittslinien (engl. striations, Band 1 Bild 4.3-6.2), dass bereits bei einer Überholung vor ca. 4 Jahren bei 4 400 Start-Abstellzyklen ein ca. 12 mm langer Riss vorhanden gewesen sein muss, der damit als auffindbar gelten muss. Aus diesen Befunden wurde der frühere Überholvorgang beim Betreiber (Fluglinie) wie folgt bewertet:*

- Die bei der Inspektion vorhandene Rissgröße zeigt, dass ***keine geeignete Prüfung vorgenommen*** *wurde. Der Verantwortliche für die Überholung führte dies ursprünglich darauf zurück, dass eine Prüfung gemäß dem Handbuch des OEM, nur die Bolzenbohrungen auf dem gleichen Lochkreis, nicht aber die Entlastungsbohrungen anspricht (siehe „Mängel im Überholhandbuch). Später wurde angegeben, dass die Entlastungsbohrungen zwar geprüft wurden, aber* ***nach einem anderen Standard*** *als die Spannbolzenbohrungen. Dieser lässt vereinzelte Oberflächenbeschädigungen bis 0,075 mm ohne Reparatur zu.*

Dagegen verbietet das Überholhandbuch des OEM ***unreparierte Oberflächenbeschädigungen in den Bohrungen und 3 mm um benachbarte Oberflächen****. Bei einer Unklarheit zu den Entlastungsbohrungen hätte der Betreiber beim OEM rückfragen müssen.*

Aber auch das ***Überholhandbuch des OEM wies Mängel auf****:*

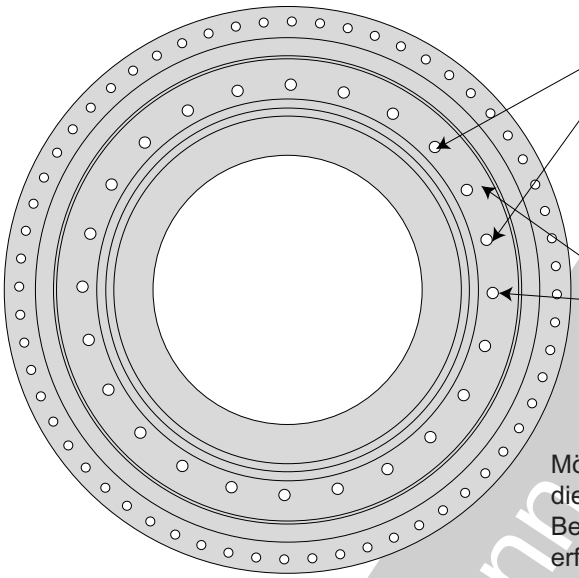
Dort ist eine ***Scheibe mit nur 12 statt der tatsächlich vorhandenen 24 Bohrungen abgebildet****.*

Texte im Handbuch lassen sich so ***interpretieren, dass Beschädigungen bis 0,075 mm keiner Nacharbeit bedürfen****. Trotz dieser Schwäche bleibt die* ***eindeutige Anweisung im Handbuch****, dass keine Beschädigungen in oder um die Bohrungen erlaubt sind.*

- Die Scheibe aus einem Vergütungsstahl wird bei einer Überholung magnetisch mit fluoreszierenden Partikeln unter UV-Licht rissgeprüft. Dabei werden unweigerlich die oberflächennahen Bereiche der Bohrungen mitgeprüft. Die geringen Abstände der verschiedenen Bohrungen erzwingen geradezu deren ausnahmslose Berücksichtigung bei der Prüfung. Der Riss in der Bohrung und an der Scheibenoberfläche hätte dabei ausreichend sichtbar werden müssen. Das lässt den Schluss zu, dass der Betreiber ***bei der letzten Überholung keine geeignete Rissprüfung*** *durchführte.*

© Axel Bossmann, TU Braunschweig, Lehrstuhl für Luftfahrzeugtechnik

Der "Human Factor" verlangt, dass auch mögliche Restzweifel bei sicherheitsrelevanten Vorschriften ausgeschlossen werden.



Jedes zweite Loch dient der Durchführung eines Spannbolzens. Diese Bohrungen sind im Überholhandbuch bezüglich der Bewertung für eine Nacharbeit explizit genannt. Hier ist keine Betriebsschädigung (z.B. Korrosionsangriff) in der oder um die Bohrung zulässig.

Jedes dazwischen liegende Loch dient dem Spannungsabbau. Diese Bohrungen sind im Überholhandbuch bezüglich der Nacharbeitsgrenzen nicht explizit angesprochen, obwohl für sie das Gleiche gilt wie für die Bolzenbohrungen.

Möglicherweise verunsichernde Anweisungen, wie die Angabe an anderer Stelle des Handbuchs, dass Beschädigungen von 0,075 mm Tiefe keine Nacharbeit erfordern, sind mit einer Klarstellung zu vermeiden.

Bild 16.2-3.2

Weil das Triebwerkshandbuch in englisch vorliegt, forderte der OEM bereits bei der Überholung vor 4 Jahren ***Arbeitskarten (process sheets) in der Sprache des Betreibers*** *(siehe auch Bild 16.2-2 und Bild 16.2-3.3).*

Bild 16.2-3.3 *(Lit. 16.2-1): Gewöhnlich werden die* ***Angaben des Handbuchs in Arbeitskarten*** *(Arbeitsblätter, Process Sheets) übertragen. Sie sollten* ***in der Muttersprache*** *verfasst sein. Eine solche Vorgehensweise gilt für Wartungsaufgaben und, wie in diesem Fall, für Reparaturen im Rahmen einer Überholung. Die Karten weisen detailliert die einzelnen Arbeitsschritte an. Dabei beschreiben sie die spezifischen,* ***ausreichend detailgenauen Abläufe****,* ***Reparaturverfahren*** *und die vorhandene, für die Arbeiten* ***notwendige Werkstattausrüstung****. Jeder dieser Schritte erfordert ein* ***Abzeichnen durch das Wartungspersonal****. Die Schritte der Arbeitskarten sollten auch* ***Verweise*** *auf die jeweiligen Stellen im Überholhandbuch enthalten. So kann auch die richtige Anwendung der Verfahren gewährleistet werden.*

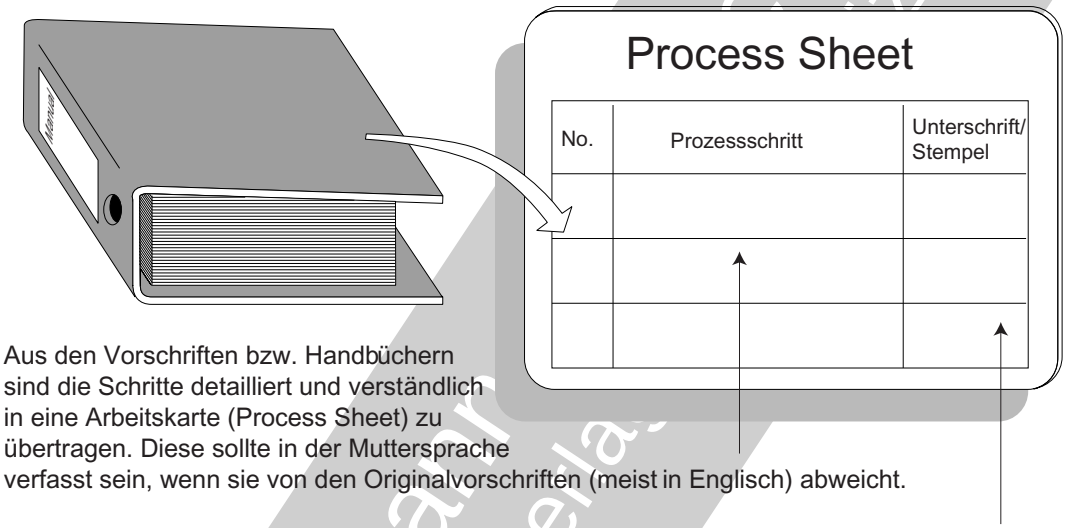
Eine solche Dokumentation verbessert auch den Lufttüchtigkeitsnachweis (engl. airworthiness) der Teile für den Einbau.

Für die letzte Überholung vor dem Unfall (Bild 16.2-3.1) wurden diese Forderungen nicht um-

© Axel Rossmann - Turbo Consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Handbücher, Arbeitsunterlagen und Vorschriften

Kleine Unklarheiten und Dokumentationsmängel einer Überholung können zu katastrophalen Betriebsschäden führen.



Aus den Vorschriften bzw. Handbüchern sind die Schritte detailliert und verständlich in eine Arbeitskarte (Process Sheet) zu übertragen. Diese sollte in der Muttersprache verfasst sein, wenn sie von den Originalvorschriften (meist in Englisch) abweicht.

Wenn man mit einer Unterschrift seine Tätigkeit beglaubigen muss, kann dies die Sicherheit eines Prozesses gewährleisten.

Die Prozessschritte in der Arbeitskarte müssen nachvollziehbar und zuordenbar von der verantwortlichen Person dokumentiert sein. (Unterschrift, Stempel). Die Erfahrung zeigt, dass dadurch das Verantwortungsgefühl deutlich steigt und Fehlverhalten vermieden werden kann.

Bild 16.2-3.3

gesetzt. Die Untersuchung geht davon aus, dass eine größere ***persönliche Verantwortung in Form von Unterschriften*** *für die einzelnen Schritte es wahrscheinlicher macht. Das motiviert eine vollständige Durchführung bis zum Ende.*

Das Review im Rahmen der Schadensklärung zeigte auch, dass einige andere Teile mit einem grünen Draht als eindringgeprüft ***gekennzeichnet waren, an denen eine solche Prüfung nicht durchgeführt*** *worden war. Ähnliches galt auch für die magnetische Rissprüfung.*

Ein solcher Schluss war möglich, weil diese Teile keine, nach der Prüfung zu erwartenden, fluoreszierenden Magnetpartikel aufwiesen.

Es fehlte also die für einen schrittweisen Überholprozess notwendige ***detaillierte Dokumentation****.*

An solchen Verdichterscheiben war offenbar, bis auf einen ungeklärten Fall eines anderen Betreibers, ***nie ein Schaden bekannt geworden****. Dieser Fall könnte aus aktueller Sicht ein Parallelfall gewesen sein. Auch* ***Risse wurden anscheinend nie gefunden****. Damit könnte eine gewisse* ***Frustration beim Prüfpersonal*** *entstanden sein (Bild 17.3.1-9). Es stellt sich so die Frage nach einem* ***geeigneten, motivierenden Training*** *für dieses Verfahren. Der Betreiber hatte dafür keine überzeugenden Nachweisunterlagen.*

© AxtPosch and Partner GmbH
Schulungsunterlagen

Fachbezeichnungen müssen eindeutig beschrieben und für den Prozessverantwortlichen identifizierbar sein.

Z.B. kann die Bezeichnung "Corrosion Pits" bei einem nicht ausreichend geschulten Mitarbeiter die Vorstellung eines falschen Schadensbilds bedingen. Es ist also wichtig, dass das typische Schadensbild bekannt und in einer geeigneten Beschreibung, möglichst mit deutlichem Bildmaterial, dokumentiert ist. Auch sollte der Schadensmechanismus sowie seine potenzielle Auswirkung auf die Bauteilsicherheit ausreichend verstanden sein, um die Sensibilität zu erhöhen. Hierzu sind regelmäßige Schulungen vorzusehen.

Beispiel für unterschiedliche "Pittingursachen" an Wälzlagern

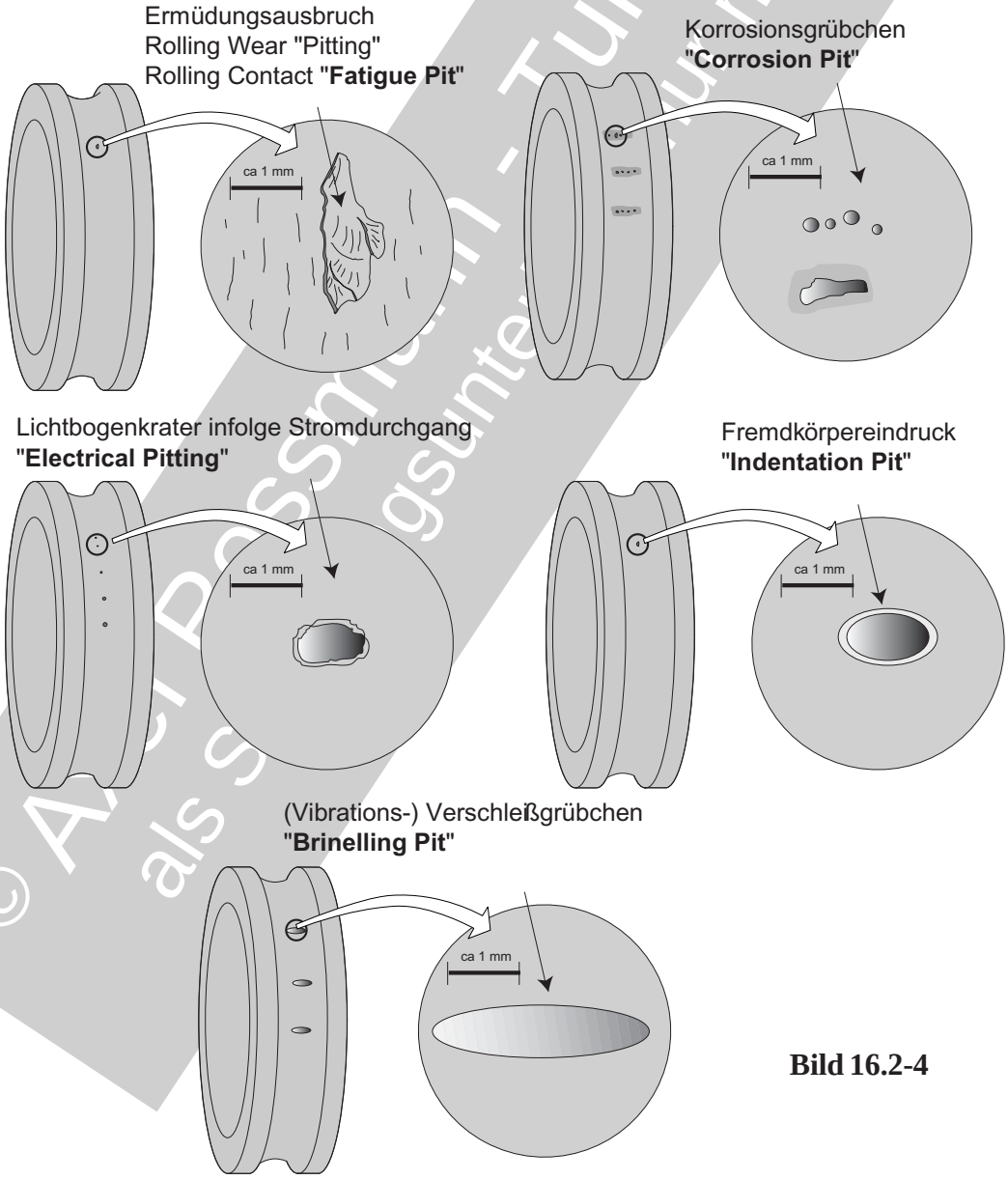


Bild 16.2-4

© Axel Rossmann - Turbo Consult als Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Bild 16.2-4 *(Lit. 16.2-12 und Lit. 16.2-13): Von Mechanikern und Prüfern wird die* ***Identifikation und Bewertung von Schädigungen*** *erwartet (Bild 16-5 und Bild 16.1-1).*
Die Bedeutung dieser Kenntnisse soll am Beispiel grübchenartiger Oberflächenschädigungen gezeigt werden. Solche ***Grübchen oder Löcher*** *(engl. pits, pittings) können an einem Bauteil, hier z.B. einem Wälzlagerinnenring wie in den Skizzen, auf* ***sehr unterschiedlichen Schadensmechanismen*** *beruhen (Band 2, Kapitel 6.3.1.1). Damit können auch* ***gänzlich unterschiedliche Abhilfemaßnahmen*** *erforderlich werden. Eine Zuordnung, z.B. zu Handbuchangaben, kann die Unterscheidung erfordern. Das benötigt ein nicht zu unterschätzendes Maß an* ***Begriffssicherheit und Fachkunde****. Der Ausdruck Grübchen oder Pit/Pitting ist also für eine Zuordnung nicht ausreichend und sollte immer* ***mit einem kennzeichnenden Zusatz*** *verwendet werden.*

Ermüdungsausbruch, Ermüdungsgrübchen, Fatigue Pit *(oben links): Sie entstehen auf Laufflächen (Abwälzflächen) durch Überrollungen. Ein typisches Schadensbild zeigt Merkmale einer Ermüdungsbruchfläche. Es entstehen flache Metallpartikel (Späne). Sie sind für Lager- oder Zahnradschäden ein wichtiger Frühindikator. Bei Wartungsarbeiten gefundene Filterrückstände oder Magnetstopfenablagerungen zeigen die Schäden häufig vor einem katastrophalen Bauteilversagen ausreichend früh an (Band 2, Kapitel7.2).*

Korrosionsgrübchen, Lochfraß, Corrosion Pit *(oben rechts): Es handelt sich um örtliche Anfressungen mit ihrer Kerbwirkung. Der Grund zeigt deshalb keine Bruchfläche, sondern eine von Reaktionsprodukten* ***belegte oder angeätzte Struktur****. Sie senken die Schwingfestigkeit des betroffenen Bauteils deutlich ab und sind deswegen Ausgangspunkt von Schwingbrüchen (Bild 16.2-3.1).*

Schmelzkrater, Electrical Pitting *(Mitte links): Diese Schäden sind auf Wälzflächen häufig die Folge eines Stromdurchgangs bei einem Blitzschlag (Band 1, Kapitel 5.1.3). Auch unvorschriftsmäßige Schweißarbeiten können solche Schäden auslösen. Von Ihnen können sich Ermüdungsschäden ausbreiten. Die Anordnung und das typische Aussehen ist das eines Kraters mit Merkmalen einer Aufschmelzung (Bild 18.6-7, Band 1, Kapitel 5.12).*

Fremdkörpereindruck, Indentation Pit *(Mitte rechts): Diese Schädigung entsteht gewöhnlich durch Fremdkörper, die zwischen die Wälzflächen geraten. Fremdkörper können vom Öl in den Schmierspalt transportiert oder als Staub und Labyrinthabrieb eingeblasen worden sein. Solche Eindrücke sind der Ausgang von Ermüdungsausbrüchen (Band 2, Bild 4.6.2.1.1-9 und Bild 6.3.1.1-4). Typisches Merkmal ist eine plastisch verformte Ringzone um den Eindruck. Es handelt sich um den plattgewalzten Aufwurf.*

(Vibrations-) Verschleißgrübchen, Brinelling Pit *(unten): Diese glatten Vertiefungen in Wälzkörperabstand werden von Mikrobewegungen (Fretting) im Stillstand, beispielsweise beim Transport (Band 2, Bild 63.1.1-12 und Bild 6.3.1.1-13; Band 3, Bild 13-10) produziert. Auch sie können Ermüdungsbrüche auslösen.*

© AvoPresenT Turbocopt
Als Schulungsunterlage nutzbar

Die richtige Interpretation einer Vorschrift hängt von ihrer Verständlichkeit und Eindeutigkeit ab. "Mehrfach bestimmende Angaben" sind potenziell missverständlich.

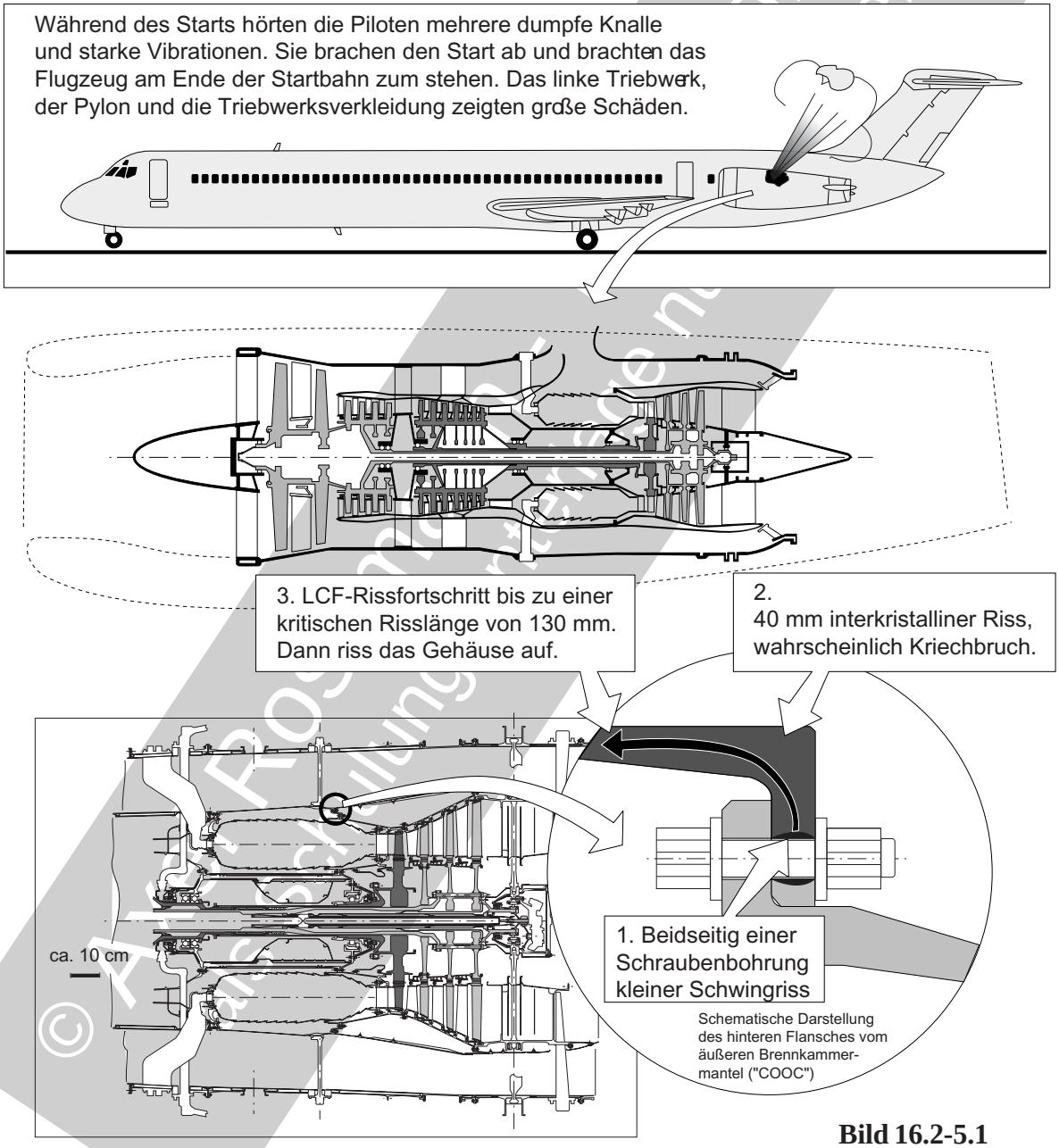


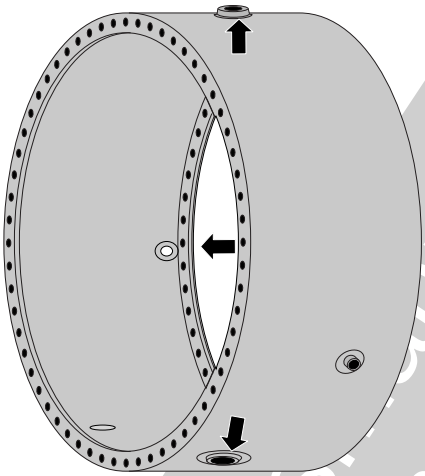
Bild 16.2-5.1

Bild 16.2-5.1 und Bild 16.2-5.2 *(Lit. 19.1.3-14): Die Untersuchung ergab, dass ein Riss das* ***Brennkammergehäuse*** *(combustion chamber outer case = CCOC, mittlere Skizze) zum Aufreißen brachte. Derartige Schäden sind für den betroffenen Triebwerkstyp kein Einzelfall (Lit. 16.2-10, Band 3, Bild 14-10 und Band 1 Bild 5.4.2.1-5). Die Explosion entstand bei einer kritischen Risslänge unter den hohen Betriebsbelastungen beim Start (Innendruck, Wärmespannungen). Der Riss begann im Bereich einer Bohrung im hinteren, nach innen weisen-*

Handbücher, Arbeitsunterlagen und Vorschriften

Die Möglichkeit einer Fehlinterpretation von Wartungsvorschriften und Sicherheitsanweisungen ist unbedingt zu vermeiden, wie das folgende Beispiel zeigt.

Eine überarbeitete AD (Airworthiness Directive) der FAA forderte:
"..wiederholte Inspektionen nach Rissen im hinteren Flansch des äußeren Brennkammergehäuses und den eingeschweißten Anschlussaugen für Sonden und Drainage" des dargestellten Triebwerkstyps.
Diese AD war von Berichten über sich häufende Explosionen von Gehäusen ausgelöst worden.
Ein solcher Schaden bedeutet die Gefahr des Bruchstückaustritts und einer Beschädigung der Zelle mit Unfallgefahr.



Die Inspektionsintervalle richten sich nach der Zahl der Start-/Abstellzyklen (engine cycles).
Unter einer "Shop Visit" wird ein Besuch in einer Reparaturwerkstatt verstanden, bei dem ein Hauptflansch gelöst oder eine Rotorscheibe von Verdichter oder Turbine ausgebaut wird.
- Einerseits beschreibt die AD verschiedene **Prüfintervalle von 1000 bis 12 000 Zyklen** in Abhängigkeit des Prüforts am Teil und von der Prüfmethode.
- **Zusätzlich** fordert die AD **Inspektion bei jeder "Shop Visit"** (Werkstattbesuche). Wird ein Riss gefunden, muss das Gehäuse vor dem nächsten Flug aus dem Betrieb genommen werden.

Bei der Übertragung wurde von der Arbeitsvorbereitung (engineering staff) ein **Arbeitsblatt erstellt**. In diesem war das **Kriterium der Werkstattbesuche nicht enthalten**. Erschwerend kam hinzu, dass in der betroffenen Werkstatt kein Mechanismus bestand, der Inspektions- und Abnahmeforderungen eines Triebwerks im Licht veränderter Anforderungen überprüfte.

Diese Angaben führten dazu, dass nur die Rissprüfungen der 12 000-Zyklen-Intervalle durchgeführt wurden. So konnte ein Anriss am hinteren Flansch nicht rechtzeitig erkannt werden. Es kam zur Explosion des Gehäuses.

Bild 16.2-5.2

den Gehäuseflansch (Detail unten) als (LCF?) Schwingbruch. Dann wuchs er ca. 40 mm interkristallin. Darauf folgte ein ca. 90 mm langer LCF-Ermüdungsbruch von dem der zähe Restgewaltbruch ausging. Bis auf den Restgewaltbruch war die Rissfläche stark oxidiert.
Bereits früher traten vergleichbare Schäden auf. Deshalb wurden mehrere Lufttüchtigkeitsanweisungen (Airworthiness Directives = AD) von der US- Luftfahrtbehörde FAA im Zeitraum von 5 Jahren vor diesem Unfall herausgegeben. Sie legten die ***Inspektionsintervalle auf der Basis von Start-Abstellzyklen*** *fest (Zusammenstellung rechts).* ***Zusätzlich waren die Gehäuse bei jedem Werkstattbesuch des Triebwerks zu überprüfen****. Betroffen waren neben den Flanschen die, als kritische Bauteilzonen erkannten, Einschweißaugen für die Befestigung von Leitungen. Die Prüfung musste in der Reparaturwerkstatt erfolgen (shop visit) weil umfangreiche Demontagearbeiten erforderlich waren. Wirbelstrom, Ultraschall, Eindringprüfung, Magnetische Rissprüfung und visuelle Prüfung waren vorgesehen. Gehäuse mit einem Rissbefund mussten ausgesondert werden. Etwa fünf Jahre und ca. 7500 Zyklen vor dem dargestellten Schaden war eine Inspektion erfolgt. Dazwischen war das Triebwerk* ***zweimal***

© Axel Bossert, Turbomotor, Bossert Ausbildungsunterlagen nur mit Verlag

***in der Reparaturwerkstatt**. In beiden Fällen erfolgte wegen ausreichend Zyklen bis zum Ende des Inspektionsintervalls **keine Überprüfung des hinteren Flanschs** auf Risse. Dies, obwohl beim zweiten Werkstattbesuch die Einschweißaugen überprüft wurden. Nach ca. 2000 weiteren Zyklen trat der Schaden ein.*

***Durchführung der AD im Reparaturbereich**: Die Mechaniker arbeiteten nach Arbeitskarten (engineering orders = EO). Sie wurden vom Betreiber unter Aufsicht der zuständigen Behörde an Hand der ADs ausgestellt. Die Karten **enthielten Angaben zu den fälligen Reparaturarbeiten sowie den periodischen Prüfungen. Nicht jedoch die Anweisung zur Überprüfung der Flansche bei jedem Werkstattbesuch** des Triebwerks. Die Prüfer und Mechaniker **zeichneten zwar die Arbeitskarten für die Notwendigkeit einer Prüfung ab. Es fehlten jedoch darauf Angaben zum Umfang der Inspektion und der anzuwendenden Methode**. Ein EDV-Vermerk bestätigte lediglich, dass eine Prüfung stattgefunden hatte und die Zyklenzahl bis zur nächsten. Im vorliegenden Fall gab es **keinen Mechanismus, der die Prüfungsforderungen nochmals auf aktuelle Erfordernisse** kontrollierte.*

*Die **falsche Interpretation der AD** führte also dazu, dass die vorhergehenden beiden Werkstattbesuche, die den Schaden hätten verhindern können, nicht für die eigentlich vorgeschriebene Rissprüfung genutzt wurden.*

***Bild 16.2-6** (Lit. 16.2-15): Nach dem Unfall zeigte eine erste Untersuchung einen **trockenen Ölsumpf der Leistungsturbine**. Leider wurden deshalb keine Stahlspäne vom Öl zu den Magnet-Spänedetektoren transportiert. Sie hätten vor einem Triebwerksschaden gewarnt. Der **Ölmangel** führte zum **Trockenlauf der Lager** Nr. 6 und 7 (Skizze unten). Diese überhitzten die benachbarten Bauteile. Das führte zur Trennung von Gaserzeugerturbine und Verdichter.*

*Die konstruktive Gestaltung des T-Verzweigungsstücks (Detail Mitte) und der Verlauf der radialen Frischölleitung durch die heißen Streben des Turbinenzwischengehäuses, begünstigt Ölkoks. Dieser wird mit einem Bohrverfahren bei der 300-Stunden-Inspektion so gut wie möglich entfernt. Im vorliegenden Fall hatte sich offenbar **Koks gelöst und die Öldüsen verstopft**. Die Ölkoksbildung schien zu schnell für die vorgesehenen Betriebsstunden seit der Triebwerksüberholung (heavy maintenance). Das weist darauf hin, dass bei der Überholung Koks zurückgeblieben war. Die Untersuchungsbehörde folgerte daraus die folgenden ursächlichen Einflüsse:*

- Bei der Überholung wurde zwar, wie vorgeschrieben, die Kohledichtung des Lagers Nr. 5 ersetzt und Ölkohle aus der Rückölstrebe und dem Rückölsumpf entfernt. Dann wurde das Triebwerk durchgedreht, um den Ölfluss zu gewährleisten.

*Die Öldüsen der Lager 6 und 7 und das **T-Verteilerstück** wurden jedoch, **entgegen dem Betriebs- und Überholhandbuch des OEM, nicht abgebaut und von Ölkoks gereinigt**.*

*- Die **ungünstige konstruktive Gestaltung** der Frischölzufuhr begünstigt eine gefährliche Koksbildung. In der Leitung vor den Öldüsen ist kein geeigneter Filtereinsatz. Spätere Varianten wurden entsprechend nachgerüstet.*

*- Der vom OEM angegebene Reinigungsprozess beschreibt die **Prüfung auf Koksbildung und dessen Entfernung in der Leitung nicht ausreichend**.*

© Axel Grossmann - Turbocons
als Schulungsunterlagen mit Lizenz

Handbücher, Arbeitsunterlagen und Vorschriften

Flugunfall durch Wartungsmängel in Verbindung mit einer verbesserungswürdigen Überholanweisung.

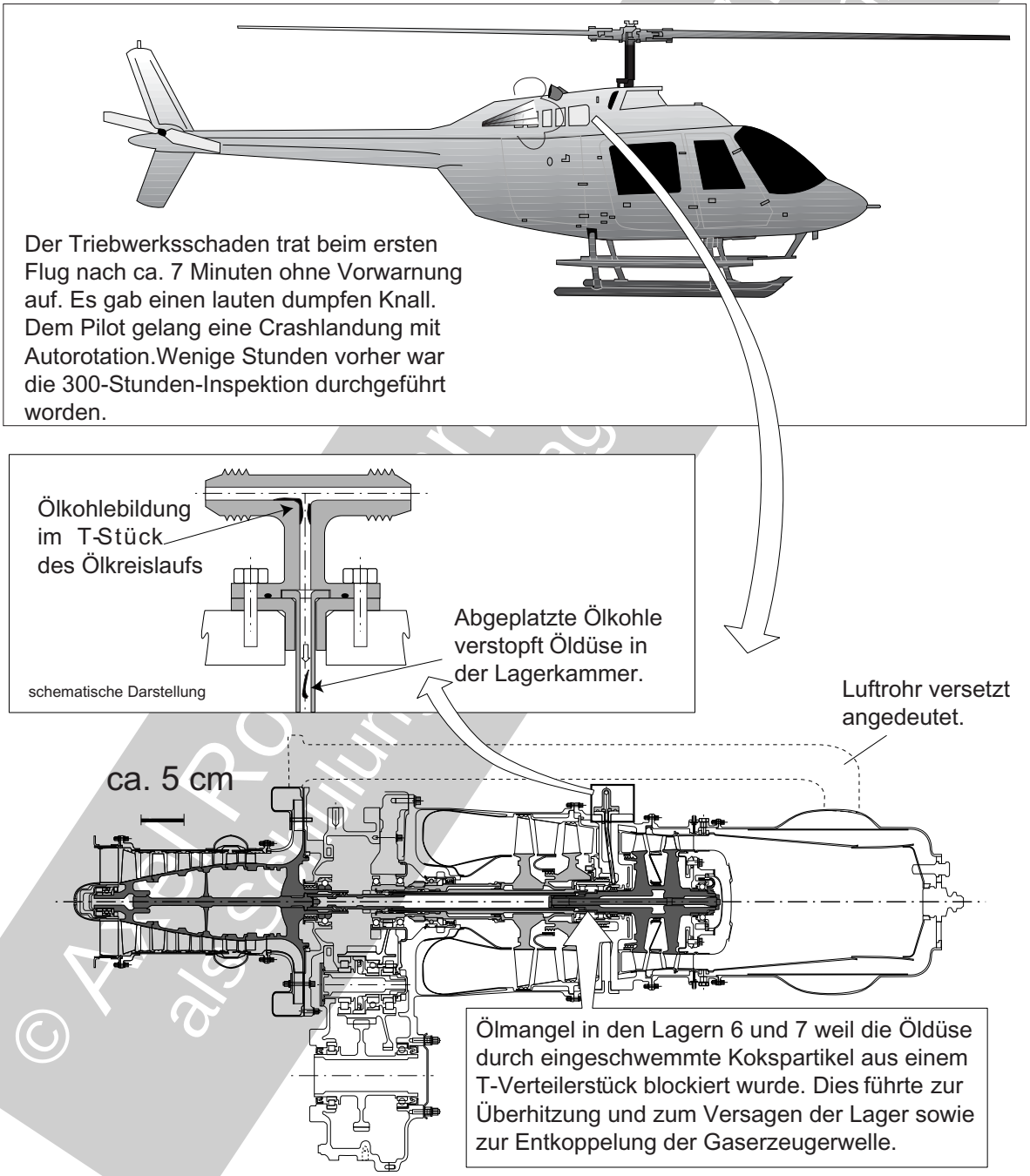


Bild 16.2-6

Ungeeignete Reinigung *des T-Verteilerstücks bei der* ***Überholung*** *und bei zwei nachfolgenden* ***Feldinspektionen****.*

Der Entstehungsprozess eines Wartungshandbuchs (Maintenance Manual) für Flugzeuge.

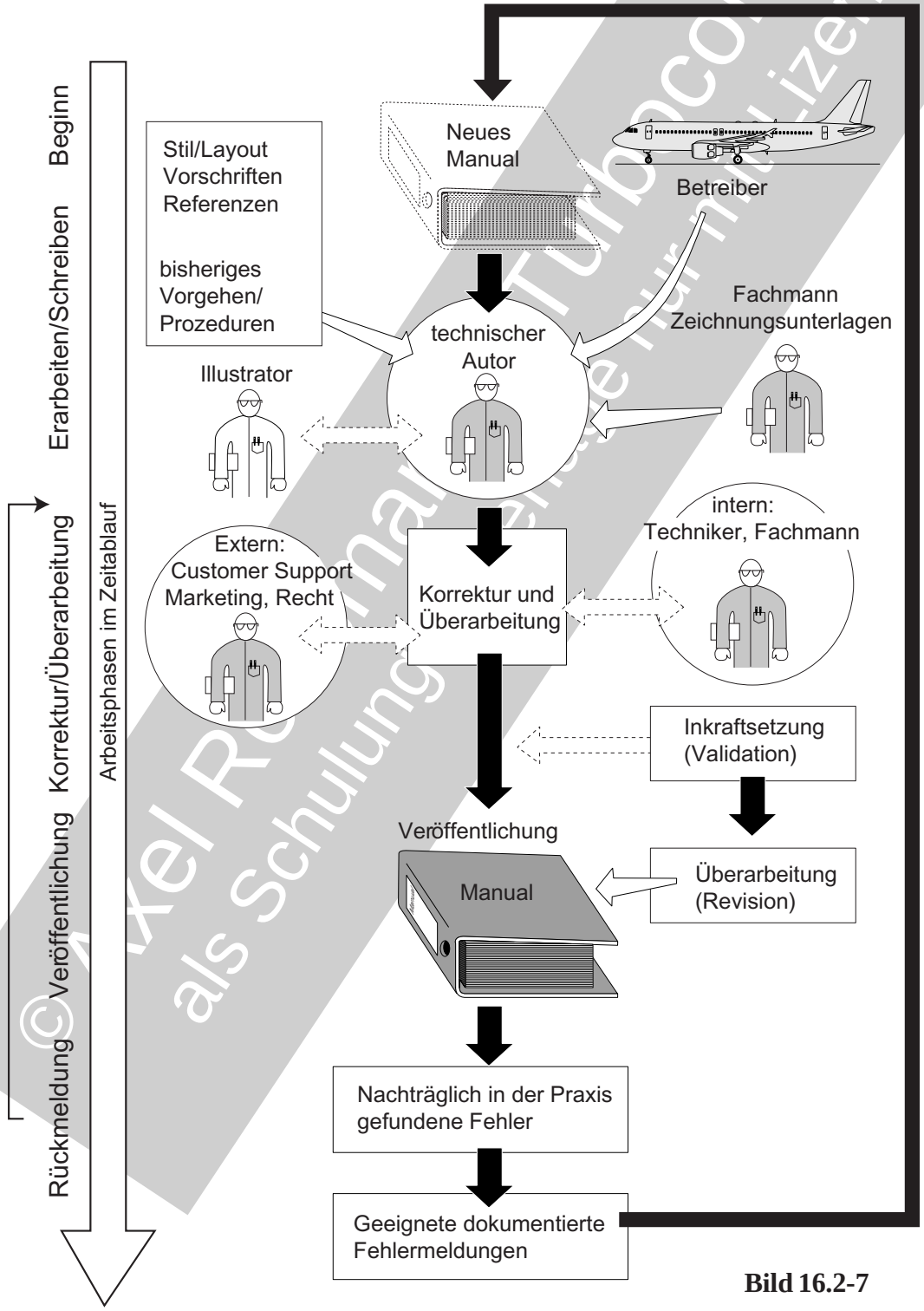


Bild 16.2-7

© Axel Rohrmann Turbocontrolt
als Schulungsmaterialien nur mit Lizenz

Handbücher, Arbeitsunterlagen und Vorschriften

Bild 16.2-7 *(Lit. 16.2-4): Dem Thema der* ***Erstellung von technischen Handbüchern*** *(engl. manuals) sind Fachbücher gewidmet (Lit. 16.2-8). Das hier dargestellte Schema zeigt den typischen Prozess und dessen Phasen. Es handelt sich um einen iterativen Prozess, dessen bedeutender Schritt die* ***Rückmeldung von Problemen*** *der Nutzer mit der Dokumentation darstellt. So lassen sich Missverständnisse zwischen der Intention technischer Autoren und den danach arbeitenden Mechanikern (Aircraft Maintenance Technicians = AMT) aufdecken und korrigieren: Zusätzliche Absicherungen sind:*

- Überprüfung der ***Ausführungen vor Ort****.*

- ***Gedanklicher Gang*** *durch die Aufgaben und deren Ausführung (cognitive walkthrough, Kapitel 16.1.1).*

Die Fehler und Schwächen der Dokumentation werden dabei auf unterschiedliche Weise entdeckt:

*-****Erfahrung und Schulung****. Die Ergebnisse hängen von Erfahrung und Ausbildung der Teilnehmer (Ingenieure, Mechaniker, Bild 16.1-1) ab.*

-Fehler bei ***Vorgehensweise*** *(z.B. Folge, Ablauf).*

- Fehler als Folge von ***Sprachproblemen*** *(z.B. Klarheit und Sinn, Bild 16.2-2).*

Der Entstehungsprozess von Handbüchern *(Wartungshandbuch, Überholhandbuch, Reparaturhandbuch).*

Das ***neue Handbuch****: Handbücher beruhen wegen ihrer Bedeutung für die Betriebs- bzw. Flugsicherheit in erster Linie auf* ***Erfahrung****. Deshalb entsteht ein Handbuch* ***evolutionär****, d.h. es nutzt die bewährte Form und den passenden Inhalt von Handbüchern vorhergehender Serientypen. Entscheidend ist dabei, dass die Betriebsbelastungen und das Bauteilverhalten zum neuen Gerät ausreichend bekannt und vergleichbar sind. Insbesondere bei Flugtriebwerken handelt es sich bereits hier um eine oft nur schwer erkennbare Hürde. Das Verhalten des Triebwerks und seiner Komponenten in Erprobung und Betrieb (siehe Band 1, Bild 3-2) steht unter dem Grundsatz:*

„The engine will tell us!“

Das bedeutet, dass die Haltbarkeit und auch die Wartung und Reparatur mit ihren Grenzen in engem Rahmen nur für den jeweiligen Triebwerkstyp und seine spezifische Anwendung gelten. Diese Grenzen sind nicht ausreichend analytisch zugänglich und bekannt. Man denke nur an tolerierbare oder reparierbare Fremdkörpereinschläge von Verdichterschaufeln (Lit. 16.3-16 und Lit. 16.3-17). Bereits Varianten desselben Triebwerkstyps können sich in Bauteilbelastungen, wie Schwingungen, Temperaturen bzw. Wärmespannungen oder Verschleiß unerwartet deutlich unterscheiden. Das gilt entsprechend für Handbuchangaben. Die Tendenz eines Anstiegs der Betriebsbelastungen mit Drehzahlen, Temperaturen (Lit. 16.3-18), aerodynamischer Belastung bzw. Druckverhältnissen und garantierter Laufzeiten macht diese Übertragung immer riskanter. Sie werden anfangs, bei der ***Einführung eines neuen Triebwerkstyps, sehr eng gefasst*** *sein und können mit zunehmender Erfahrung aus Rückmeldungen erweitert werden. Hierzu dienen die „Fleetleader“, Triebwerke mit den längsten Betriebszeiten.*

Grundsätzlich sollten Handbuchautoren geschult sein. Dabei ist gerade auch die Erprobung des Handbuchs beim Nutzer zu üben.

Technischer Autor, Handbuchautoren*: Handbücher werden gewöhnlich* ***in Verantwortlichkeit der OEMs*** *erstellt. Diese benötigen für die notwendigerweise evolutionäre Erstellung eines neuen Manuals große Erfahrung und Fachkenntnis. Das ist Voraussetzung, um ausreichend sichere Angaben zu Fehlerarten und deren Grenzen zu machen. Der Autor muss über* ***ausreichendes fachliches Grundlagenwissen*** *zu dem von ihm zu behandelnden Fachgebiet verfügen.* ***Intensive Kontakte*** *zu den Fachab-*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

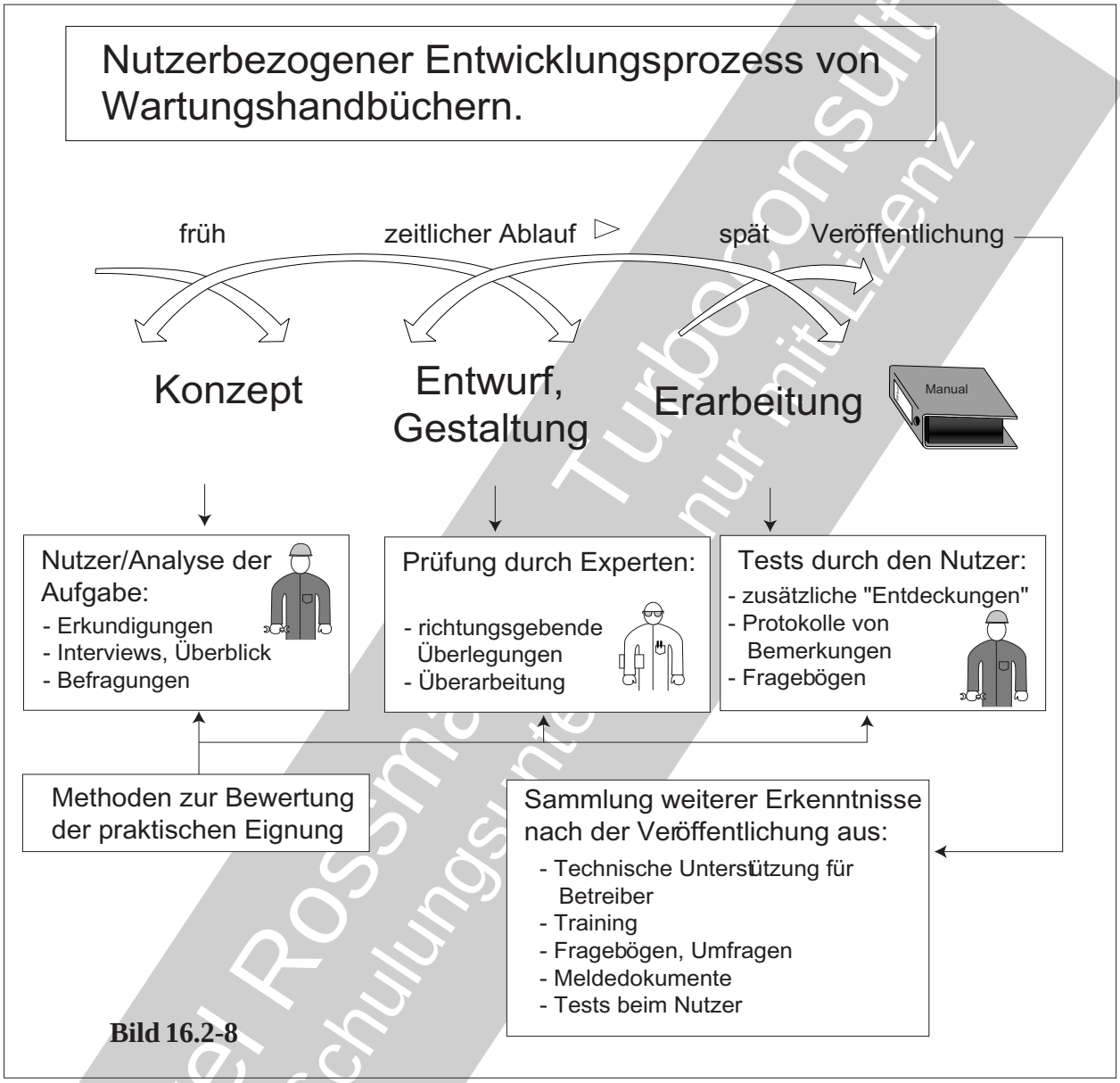


Bild 16.2-8

teilungen wie Konstruktion, „Festigkeit“, Werkstoff- und Verfahrenstechnk, Fertigung/ Reparatur, Wartung und Kundendienst erscheint unerlässlich.

***Korrektur und Überarbeitung** ist von den tangierten Fachabteilungen durchzuführen. Sogar eine **juristische Prüfung** (Produkthaftung) ist anzuraten. Auch ohne eine Konsultation des Betreibers (Nutzers, Bild 16.2-8) wird es kaum gehen. Entwurf und Gestaltung notwendiger **technischer Skizzen** und Auswahl des Bildmaterials (z.B. für die Identifikation typischer Schäden) sind eine weitere Aufgabe.*

*Die **Veröffentlichung des Handbuchs** erfolgt mit seiner Inkraftsetzung (Validation).*
***Revisionen des Handbuchs** entstehen überwiegend aus der **Rückmeldung von Erfahrungen im Serienbetrieb,** insbesondere in Wartung und Reparatur. Eine besondere Bedeutung haben bei diesem Prozess die **Betreiber** (Nutzer). Deren systematische Einbeziehung in die Manualentwicklung zeigt Bild 16.2-8. Der Ablauf notwendiger **Iterationsschritte** ist festgelegt und führt zu Überarbeitungen in Form von **Revisionen**. Eine besondere Aufgabe ist es, die jeweils gültige **Handbuchausgabe** bei allen Anwendern zu dokumentieren bzw. zu aktualisieren.*

© Axel Rossmann Turbo Consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Handbücher, Arbeitsunterlagen und Vorschriften

Bild 16.2-8 *(Lit 16.2-4): Der Nutzer als Betreiber und Ausführender von Wartung und Reparatur/Überholung hat eine* ***Schlüsselposition*** *in der Entwicklung von entsprechenden Handbüchern. Bereits vor der Einführung und dem* ***Sammeln von Erfahrungen*** *mit der Anwendung des Handbuchs, ist die* ***Einbindung*** *des Nutzers zu gewährleisten. Ein entscheidender Schritt ist in allen Phasen die* ***Bewertung im praktischen Test****. Erkenntnisse daraus müssen in den Erstellungsprozess zurückfließen und gegebenenfalls eine* ***iterative Optimierung*** *ermöglichen.*

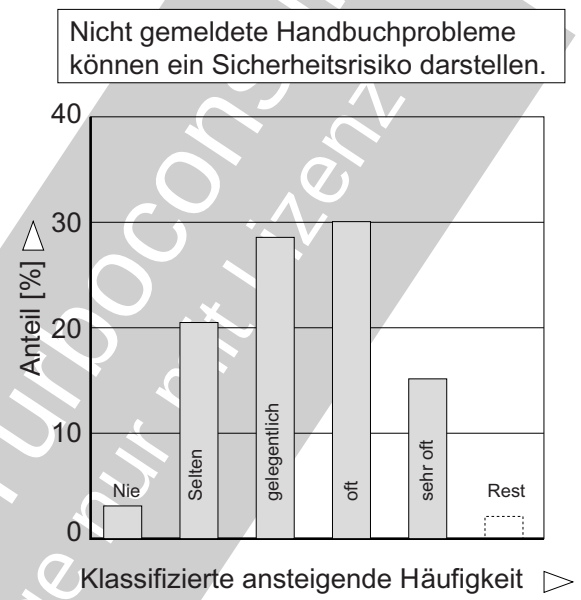
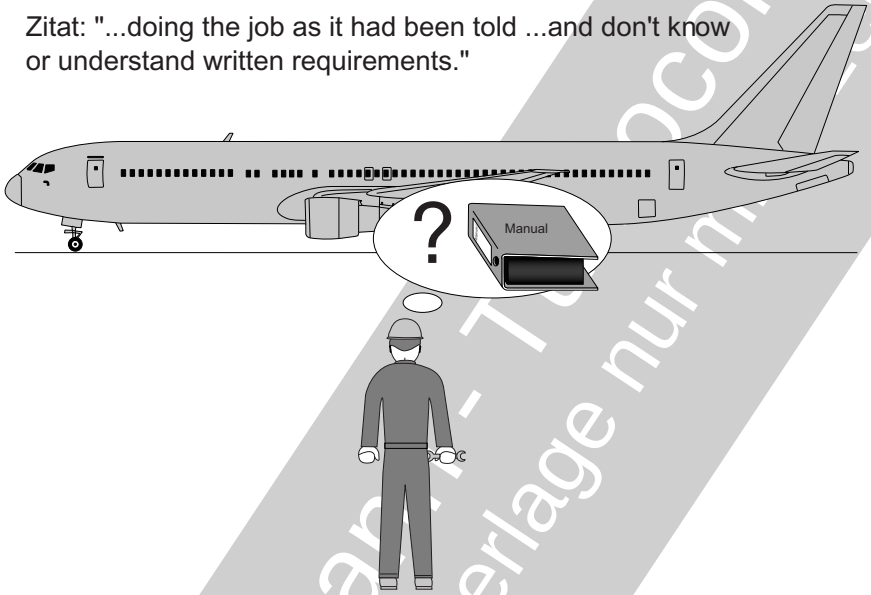


Bild 16.2-9

Bild 19.1.3-9 *(Lit. 19.1.3-5): Die sichere Anwendung der Handbücher hängt entscheidend von der* ***iterativen Verbesserung*** *als Reaktion auf* ***Rückmeldungen*** *der Anwender ab. Deshalb ist es von Interesse, wie häufig diese Chance genutzt wird. Dass lediglich in 15 % aller Fälle ausreichend sicher eine Rückmeldung erfolgt, ist bedenklich (Bild 16.2-13). Die Information der Anwender über die Bedeutung ihrer Stellungnahmen verlangt gerade für ihre Arbeit nach Schulung und Motivation. Auf Gründe für* ***unterbliebene Rückmeldungen*** *lassen Angaben in den Bildern 16.2-10, - 11, -12 schließen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Was Mechaniker und Prüfer über ihre Handbücher denken.



© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lenz

Wer wurde nicht schon in seinem privaten Umfeld mit dieser Problematik konfrontiert? Man denke nur an unverständliche Montageanweisungen zerlegbarer Möbel. Missverständnisse können hier zum Frust bis zur Zerstörung des Neueinkaufs führen. Ein weiteres Ärgernis bieten komplexe Bedienungsanweisungen elektronischer Geräte. Ein Beispiel ist die Einstellung des neuen Fernsehers oder die Handhabung einer Digitalkamera. Die Problematik wächst mit katastrophalen Übersetzungsversuchen, die ein Verständnis der Anweisungen nahezu unmöglich machen. Man fragt sich in solchen Fällen, ob das Echo des Kunden hier überhaupt Beachtung findet.

Die **Rückmeldung der anwendenden Praktiker** wie Mechniker und Prüfer, über Schwächen ihrer Arbeitsunterlagen, insbesondere der Wartungs- und Überholhandbücher, ist also durchaus aussagekräftig für deren Qualität. In Bild 16.2-12 sind **hilfreiche Kommentare** von Praktikern zusammengestellt. Kritisch ist zu werten, wenn Rückmeldungen ausbleiben (Bild 16.2-9). Im Vordergrund steht die möglichst einfache, eindeutige und sichere **Anwendbarkeit**. Oft sind die Ergebnisse von Rückmeldungen, die auf Umfragen zurückgehen, eher subjektive Einschätzungen (Bild 16.2-10).

Bild 16.2-13 zeigt die **Auswirkungen von Problemen mit Handbüchern** auf die Reaktionen der Mechaniker, sicherheitsrelevante Vorkommnisse und spontane Abhilfen.

Um ein für die Triebwerkstechnik typisch anspruchsvolles und umfangreiches Handbuch problemlos zu handhaben, ist eine geeignete **Schulung** zu empfehlen. Diese sollte die Nutzung praxisbezogen üben. Dafür bieten sich Aufgaben im praktischen Betrieb an, die nach dem Handbuch unter Aufsicht bzw. Unterstützung zu bearbeiten sind.

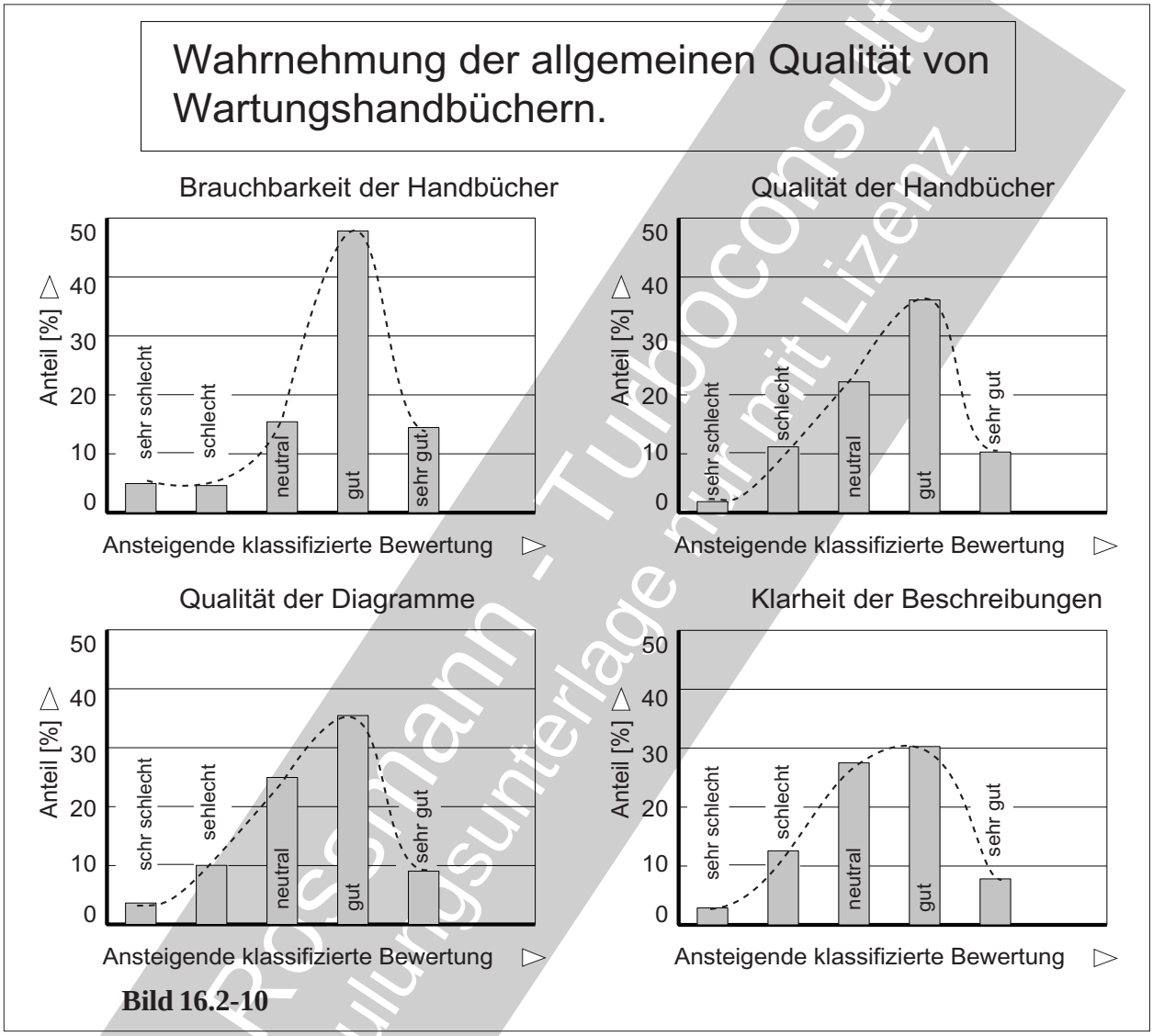


Bild 16.2-10

Bild 16.2-10 *(Lit. 16.2-5): Dieser eher allgemeine* ***Eindruck des Nutzers*** *gilt für* ***Wartungshandbücher*** *die von vier großen Flugzeugherstellern erstellt wurden. Die Diagramme, insbesondere der von den unterbrochenen Kurven dargestellte Beurteilungsverlauf, lassen auf eine eher* ***positive Bewertung der allgemeinen Qualität*** *der Wartungshandbücher schließen. Das detaillierte, kritischere Urteil der Mechaniker (AMTs) wird in Bild 16.2-11 deutlich. Beim Vergleich von großen und kleinen Flugzeugherstellern erkennt man durchausUnterschiede (Details siehe angegebene Literatur).*
Es handelt sich also nicht um Triebwerkshersteller. Trotzdem kann die Auswertung auch für diese wichtige Hinweise geben.

Informationen zu den bewerteten Parametern:

Brauchbarkeit *(usability): Enthalten sind die Einfachheit der Nutzung, die Übereinstimmung mit den Aufgaben, die Klarheit der Angaben sowie die Tiefe der Informationen.*

Qualität*: Obwohl unterschiedliche Entwicklungsstrategien zur Erstellung der Handbücher angewandt wurden, ist deren Bewertung doch sehr ähnlich. Die* ***Übersetzung*** *eines Handbuchs in die englische Sprache scheint dagegen problematisch und ergab deutlich schlechtere Beurteilungen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
Abschulungsunterlage nur mit Lizenz

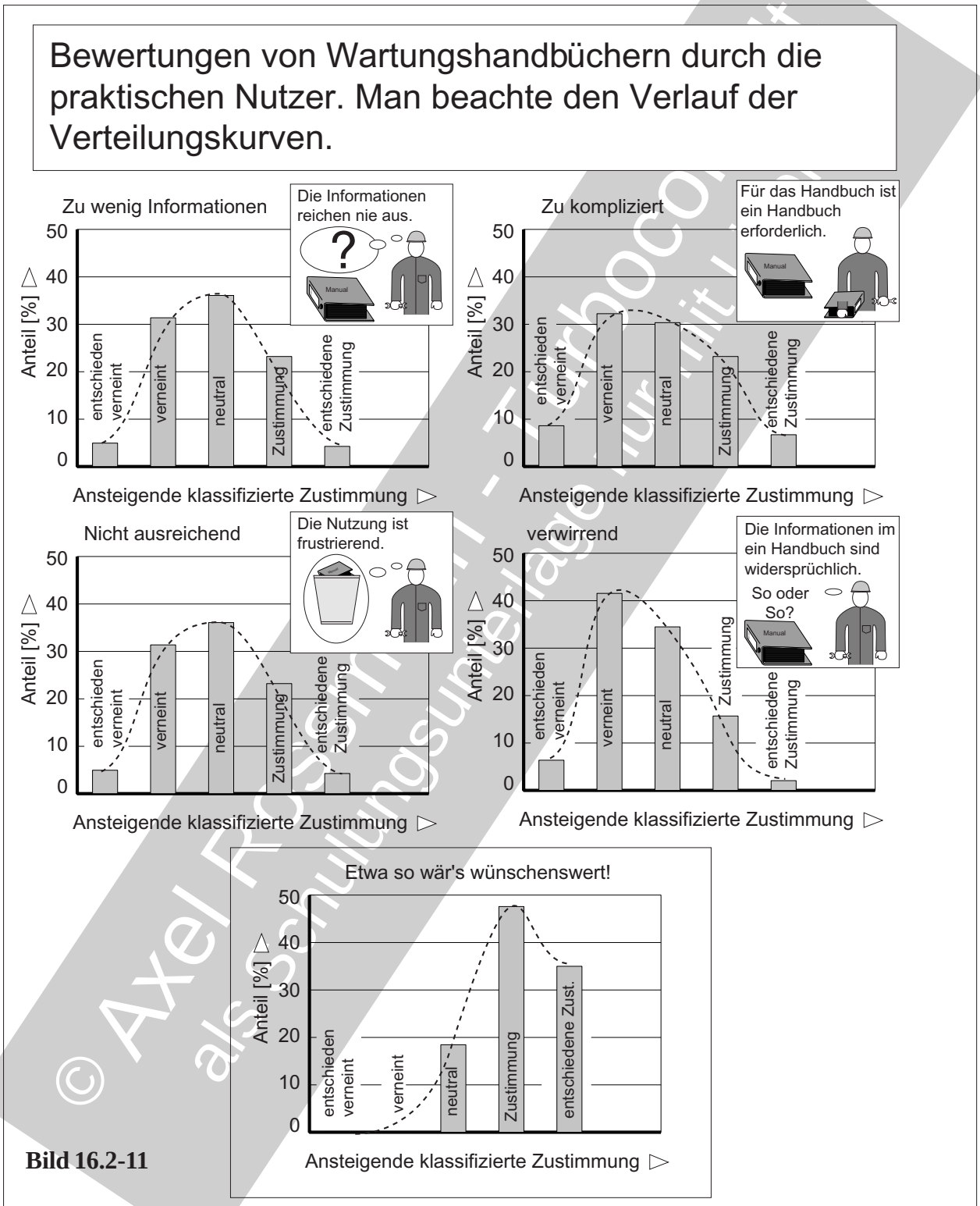


Bild 16.2-11

Bild 16.2-11 *(Lit. 16.2-5, Lit. 16.2-11): Neben der allgemeinen, erstaunlich positiven Qualitätsbewertung von Wartungshandbüchern in Bild 16.2-10 enthält dieses Bild die Wertung der hauptsächlich angegebenen* ***Mängel****. Das Diagramm unten soll für eine anzustrebende optimale Bewertung stehen. Die unterbrochenen Kurven dienen dazu, einen Vergleich zu erleichtern.*

© Axel Rossmann - Fachbücher als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Handbücher, Arbeitsunterlagen und Vorschriften

Es sei davor gewarnt, die Bewertungen unkritisch zu übernehmen. Die Erfahrung in ähnlichen Situationen, z.B. wenn nach Informationen durch vorgesetzte Stellen im Büroalltag gefragt wird, zeigt eine ähnliche Bewertung. Ist diese zu gut, kann dies auch für den Bewerter problematisch sein. Sie würde eine Fehlleistung im Zusammenhang mit einem Handbuch gravierender erscheinen lassen. Deshalb wären Bewertungen die im Detail begründet sind hilfreicher. Solche Angaben fehlen jedoch in der vorliegenden Literatur.

Bild 16.2-12 *(Lit. 16.2-5): Es handelt sich um* ***Empfehlungen befragter Wartungsmechaniker****, die hier sinngemäß wiedergegeben sind. Sie können für die praxisgerechte Erstellung durchaus hilfreich sein.*

Empfehlungen von Technikern zur Verbesserung von Wartungshandbüchern.

- Alle Dokumente (Diagramme, Zeichnungen, Skizzen, Bilder, Teilekatalog) auf die Bezug genommen wird über EDV (Datenträger) mit geeignetem Suchprogramm zugänglich machen.
- Eine Möglichkeit, die Teile mit Verfahren verknüpft.

- Arbeitsschritte leichter verständlich machen und in Bezug auf die Arbeit in logischer Reihenfolge.
- Einbeziehung der Mechaniker in den Entwurfsprozess des Handbuchs, um die Ausdrucksweise verständlicher zu machen.
- Zusammenarbeit von erfahrenen Mechanikern mit den technischen Autoren des Handbuchs, um Arbeitsschritte besser gegliedert zu beschreiben.
- Praktische Prüfung des Arbeits-/Zeitaufwands für bestimmte Handbuchanweisungen.
- Organisatorisch die Realisierung von Verbesserungsvorschlägen gewährleisten.
- Praktische Tätigkeit der Autoren vor der Erstellung des Handbuchs.

- Skizzen und Bilder übersichtlich/leicht erfassbar gestalten. Ausreichend große Hinweispfeile und Beschriftungen, die eine gute Lesbarkeit auch in der Praxis gewährleisten.
- Mehr hilfreiche (z.B. zum Verständnis notwendige) Details der Komponenten und Systeme zeigen.
- Hinweise in den Arbeitskarten sind dem Handbuch leicht auffindbar zuzuordnen.

- Im Falle eines Fehlers im Handbuch prompte Korrektur.
- Illustrationen und Diagramme sowie technische Daten auf den neuesten Stand bringen.
- Beachtung wenn ein Fehler gemeldet wird.

Bild 16.2-12

© Axel Rossmann - Turbocomsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Auswirkungen von Problemen mit Handbüchern insbesondere bei Unklarheiten.

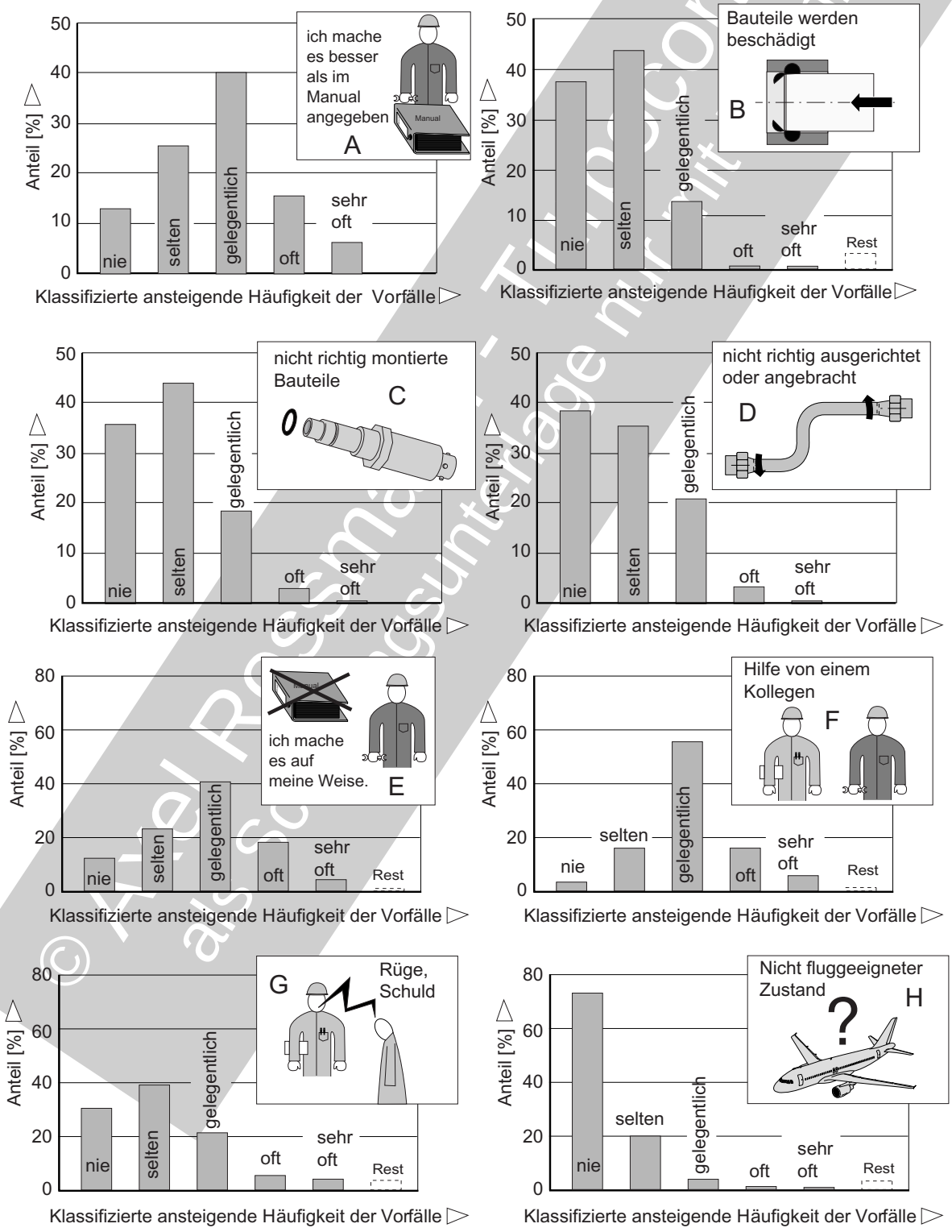


Bild 16.2-13

© Axel Rossmann - Trinoconsult als Schulungsunterlage nur mit Genehmigung

Bild 16.2-13 *(Lit. 16.2-5): Probleme mit Handbüchern haben bei den anwendenden Praktikern unterschiedliche Auswirkungen. Die Diagramme zeigen die Auswertung der Antworten einer Befragung von Wartungspersonal. Für eine Wertung muss man sich im Klaren sein,* ***wie selten ein IFSD*** *auftreten sollte. Deshalb ist nur eine* ***sehr kleine Wahrscheinlichkeit für sicherheitsrelevante Probleme*** *akzeptabel (Lit. 16.3-16 und Lit. 16.3-17). Beispielsweise dürfen Scheibenbrüche nicht häufiger als einmal in 1 000 000 000 Flugstunden auftreten.*

„A“ *(ich mache es besser als im Manual angegeben): Offenbar wurden* ***Schwächen des Handbuchs durchaus erkannt, jedoch nicht korrigiert****. Die Vermutung liegt nahe, dass nicht zuletzt die notwendigen Rückmeldungen ausblieben. Der Kommentar lässt auch auf eine gewisse Überheblichkeit schließen, die bei Unerfahrenheit durchaus gefährlich werden kann.*

„B“ *(Bauteile werden beschädigt): Es kann sich hier nur um* ***erkannte Fälle*** *handeln, bei denen eine* ***rechtzeitige Gegenmaßnahme*** *erfolgt ist. Eine solche Situation tritt offenbar zwar selten auf, hat aber ein besonders hohes Gefahrenpotenzial (Band 2, Kapitel 6.10.2 und Lit. 16.3-16).*

„C“ *(nicht richtig montierte Bauteile): Diese Probleme sind besonders sicherheitsrelevant, weil ein relativ hoher Prozentsatz dieser Fälle erst bei einer* ***Fehlfunktion entdeckt*** *werden dürfte (Lit. 16.3-16). Wird der gleiche Fehler aufeinanderfolgend gemacht, kann das den Ausfall mehrerer Triebwerke an einem Flugzeug zur Folge haben (Lit. 16.3-16). Um diese Gefahr zu minimieren, werden entsprechende Wartungsarbeiten zu unterschiedlichen Wartungsterminen an jeweils nur einem Triebwerk eines Flugzeugs ausgeführt (Lit. 16.3-16).*

„D“ *(Bauteile wurden nicht richtig ausgerichtet oder angebracht): Diese Problematik ist, gemessen am Gefahrenpotenzial, durchaus beachtenswert. Beispielsweise gilt das für eine verspannte oder reibende Leitung, je nach ihrer Funktion.* ***Rohrleitungen neigen bei Verspannung und/oder Reibverschleiß*** *(Fretting) zu Schwingbrüchen und katastrophalen Folgeschäden (Band 2, Kapitel 6.11.1). Durch Verschleiß beschädigte elektrische Leitungen können funktionsnotwendige Signale nicht mehr übertragen, über Funkenbildung andere Bauteile schädigen oder bei austretenden brennbaren Medien Feuer zünden.*

„E“ *(ich mache es auf meine Weise): Diese Häufigkeitsverteilung kommt „A“ sehr nahe. Es erscheint auch logisch, dass derjenige, der* ***glaubt die Aufgabe besser zu machen*** *als das Handbuch angibt, auch dazu neigt, diese Aufgabe auf seine Weise durchzuführen. Die Risiken bei diesem Verhalten ähneln wohl den in „A“ beschriebenen.*

„F“ *(Hilfe von einem Kollegen): Diese vorgehensweise ist positiv zu werten. Minimiert sie doch potenzielle Risiken. Deshalb würde man sich die Häufigkeit des Anteils „oft“ und „sehr oft“ höher wünschen. Die Nutzung einer solchen Chance hängt nicht zuletzt von der* ***Firmenkultur und dem Selbstbewusstsein*** *bei gesunder Selbstkritik des Personals ab (Bild 16.2-2). In diesem Fall dürften geeignete motivierende Schulungen Verbesserungen bringen.*

„G“ *(Rüge, Schuld): Es darf als Erfahrung gelten, dass ein* ***„strafendes Management“ eher negativ motiviert****. So entsteht die Gefahr, dass aus Furcht vor Bestrafung für Abhilfe und Maßnahmen wichtige Informationen unterbleiben. Ein modernes Management muss also die „Gratwanderung“ beherrschen, bei Fehlleistungen positiv zu motivieren ohne einem Schlendrian mit Nachgiebigkeit Vorschub zu leisten. Das Diagramm zeigt ein positiv zu wertendes Verhalten. Offenbar steht die Lösung des Problems im Vordergrund (der Anteil von „oft“*

© Axel Rossmann - Turbopropsoft
abschulungsunterlagen nur mit Lizenz

und „sehr oft“ ist relativ niedrig), nicht die Bestrafung.

„H“ *(Nicht fluggeeigneter Zustand): Diese Probleme sind als äußerst schwerwiegend zu betrachten. Selbst wenn sie rechtzeitig gefunden werden, ist dies alarmierend. Muss man doch mit einem „Durchschlupf“ rechnen. Das heißt, es ist von, wenn auch wenigen, Fehlern auszugehen, die ihren Weg bis in den Flugbetrieb finden. Darauf weist hin, dass die Häufigkeit unter „oft“ und „sehr oft“ zwar niedrig, aber nicht Null ist.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 16.2

© Axel Rossmann - Turbconsult
alle Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

16.2-1 National Transportation Safety Board, Aircraft Accident Report PB96-910403, NTSB/AAR-96/03, „Uncontained Engine Failure/Fire, Valujet Airlines Flight 597,“,June 8, 1995, Seite 1-117.

16.2-2 Transportation Safety Board of Canada, Report Number A94C0034, „Uncontained Engine FailureAir Canada, McDonnell Douglas DC-9-32 C-FTMG, Regina, Saskatchewan“, 05 March 1994, Seite 1-19.

16.2-3 G.Drury, J.Ma, „Do Language Barriers Result in Aviation Maintenance Errors“, Proceedings of the „Human Factors and Ergonomics Society 47th Annual Meeting - 2003“.

16.2-4 A.Chaparro, B.Rogers, C.Hamblin, B.Chaparro, „Final Report: A Comparison of Three Evaluative Techniques for Validating Maintenance Documentation“, Report No. DOT/FAA/AR-(ohne weitere Angabe) , National Technical Information Service (NTIS), Springfield, Virginia 22161, 05 March 1994, Seite 1-16.

16.2-5 A.Chaparro, L.S.Groff, „Survey of Aviation Maintenance Technical Manuals Phase 2, Evaluation of Maintenance Documents“, Final Report No. DOT/FAA/AR-02/34,Type of Report (Interim Report) 01/11/01-11/06/01 , National Technical Information Service (NTIS), Springfield, Virginia 22161, May 2002, Seite 1-34.

16.2-6 A.Chaparro, L.S.Groff, „Survey of Aviation Maintenance Technical Manuals Phase 3, Final Report and Recommendations“, Final Report No. DOT/FAA/AR-02/123,Type of Report 07/01/00-06/30/02, National Technical Information Service (NTIS), Springfield, Virginia 22161, December 2002, Seite 1-26.

16.2-7 G.Drury, J.Ma, „Language Error in Aviation Maintenance“, Final Report, www.hf.faa.gov/docs/MaintLanguageYr2.pdf., August 2005, Seite 1-99.

16.2-8 „Guidelines for Writing Operating and Maintenance Procedures“, Center for Chemical Process Safety/AIChE, ISBN 0-8169-0658-0, 1996, Release Sept 4 2003, Seite 1-144.

16.2-9 D.Bond, „FAA Faults Boeing For Quality Failures“, Zeitschrift: „Aviation Week & Space Technology“, November 6, 2000, Seite 43-44.

16.2-10 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.

16.2-11 B.Rogers, C.Hamblin, A.Chaparro, „A Comparison of Two Evaluation Techniques for Technical Documentation“, Proceedings „13th International Symposium on Aviation Psychology“, (TSAP), Oklahoma City, OK, April 18-21, 2005, Seite 1-4.

16.2-12 L.Engel, H.Klingele, „An Atlas of Metal Damage“, Wolfe Science Books in association with Carl Hanser Verlag, Munich Vienna, 1981, ISBN 0 7234 0750 9, (Deutscher Original-titel „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden“ 1974.

16.2-13 „Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11 Failure Analysis and Prevention“, American Society for Metals (ASM), Metals Park, Ohio.1996, ISBN 0-871170-007-7. Seite 490-523.

16.2-14 Canadian Aviation Safety Board, Aviation Occurrence Report No. A94C0034, „Uncontained Engine Failure, Air Canada, McDonnell Douglas DC-9-32 C-FTMG, Regina, Saskatchewan“,05 March, 1994, Seite 1-19.

16.2-15 Canadian Aviation Safety Board, Aviation Occurrence Report No. A95C0149, „Engine power loss, mechanical malfunction Skyteck Aviation Ltd., Bell 206B JETRANGER, Drydec, Ontario 4 “,07 July, 1995, Seite 1-6.

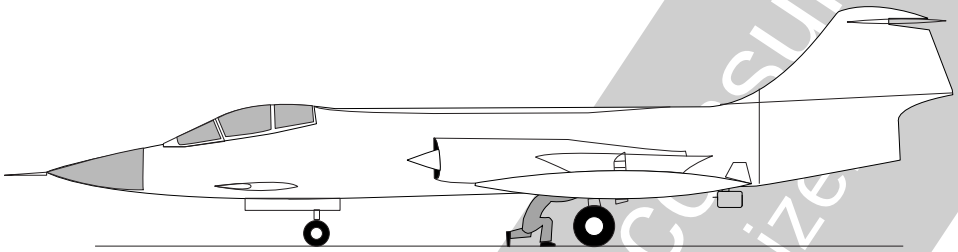
16.2-16 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Torbo-Flugtriebwerken“, Band 5, 2008, Turboconsult, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 19, Seite 19.2-1, Bild 19.2-2.2, Bild 19.2-2.3, Bild 19.2-3.1, Bild 19.2-4.2, Bild 21.2-6.

16.2-17 Axel Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“, Band 1, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Bild 2-7, Bild 5.2.1.1-9.

16.2-18 Axel Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“, Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Bild 11.1-6.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

16.3 Wartungsfreundliche Konstruktion



Wartungsfreundlichkeit kann auf vielfältige Weise vorteilhaft genutzt werden. Sie ermöglicht **Kostenminimierung** durch **geringeren Zeitaufwand**. Nicht zu vergessen ist eine Erhöhung der **Sicherheit** mit der Anwendung geeigneter Überwachung und Prüfung. Hierzu gehört auch **einfache Zugänglichkeit** einer Boroskopprüfung (Bild 16.3-7, Lit. 16.3-18) für wichtige Bauteile. Der Trend zu immer mehr Überwachungssensoren, angetrieben von „Health Monitoring“ und „Condition Monitoring“ (Kapitel 25) kann sich positiv auswirken. Wartungsarbeiten werden **besser vorausplanbar**. Die nicht zu unterschätzende Neigung von Sensoren und der Messwertübertragung zum Ausfall oder zu Störungen (Lit. 16.3-18) kann einen Vorteil jedoch teuer erkaufen.

Die Wartungsfreundlichkeit eines Triebwerks beginnt bereits weit vor der eigentlichen **Konstruktionsphase**. Zuerst sind Überlegungen für eine vorbeugende Minimierung des Wartungsaufwands notwendig. Schon während der Entwicklung von Bauteilen und Komponenten ist an die Wartung und Überholbarkeit zu denken. So sind Werkstoffe für Labyrinthdichtungen (z.B. bestimmte hochwarmfeste Nickellegierungen), die eine Schweißreparatur der beim Anlaufen verschlissenen Spitzen wegen Warmrissbildung nicht zulassen, für diese Anwendung ungeeignet. Konstruktionen bzw. Technologien mit einem **Fail Safe Verhalten** bei bauteiltypischen Schädigungen sollten ausreichende Intervalle für Inspektionen im Rahmen einer Wartung zulassen.

Bei der Konstruktion ist auf eine Vielzahl von Merkmalen zu achten (Bild 16.3-3.1 bis -3.3), um die Wartbarkeit zu optimieren (Bild 16.3-1 bis Bild 16.3-4.2, Lit. 16.3-4 und Lit. 16.3-7). Der Wartungsfreundlichkeit muss ein besonderes Augenmerk des Konstrukteurs gelten. Ein wichtiges Hilfsmittel kann dabei das **Handbuch „Human Factors Design Guide“** (Lit. 16.3-1) sein. Nicht selten sind Kompromisse (Bild 19.1.4-1) zwischen **Wartbarkeit und Betriebsverhalten** erforderlich. Ein Beispiel sind längsgeteilte Verdichtergehäuse. Sie lassen gegebenenfalls den gegenüber ungeteilten Gehäusen einfacheren Tausch FOD-geschädigter Schaufeln zu, andererseits können sie das Dehnverhalten im instationären Betrieb ungünstig beeinflussen. Wenn der Spitzenspalt an der Beschaufelung zu groß wird, neigt beispielsweise der Verdichter zum Pumpen.

Natürlich verlangt die Wartung der Triebwerke **im eingebauten Zustand** die besondere Aufmerksamkeit des Konstrukteurs. Hier ist die Abstimmung mit dem Flugzeughersteller besonders wichtig. Ungünstig angeordnete bzw. zu erreichende und/oder zu öffnende Montageklappen fordern das „Interface“ mit dem Triebwerkshersteller (Bild 16-8).

Die günstige Lage und Gestaltung der **Verbindungen** zur Zelle (z.B. Kraftstoff und Zapfluft) muss das Handling im Rahmen der Wartbarkeit bei **ausreichender Sicherheit** erleichtern. Die **Austauschbarkeit von Anbauelementen** sowie deren **Zugänglichkeit** muss mit geringstmöglichem Aufwand möglich sein. Dafür sind auch gewisse Konstruktionsregeln zu berücksichtigen (Bild 16.3-2 und Bild 16.3-4.1 und -4.2). Sowohl die Montage von Komponenten bis zum ganzen Triebwerk als auch die Wartungs- bzw. Montageeignung lässt sich heute mit dem Einsatz geeigneter EDV-Programme, oft in CAD integriert, überprüfen und optimieren (Lit. 16.3-7).

Nicht zuletzt sind **gesundheitsgefährdende Materialien** und Verfahren zu vermeiden (Bild 16.3-8 und Bild 16.3-9). Dies kann die Gestaltungsfreiheit erschweren.

© Neubert Triebwerke - Turbocosult
Unbenutzte Fläche nur mit Lizenz

„Human Factors“ Konstruktionseinfluss

Bild 16.3-1 *(Lit. 16.3-3): Die* ***Wartbarkeit*** *von Triebwerken muss in* ***Kompromissen*** *mit übergeordneten Forderungen abgestimmt werden. So ist für* ***militärische Triebwerke*** *die Unempfindlichkeit gegen Beschuss vom Boden von besonderer Bedeutung. Das erfordert die* ***Anordnung der Anbaugeräte*** *mit den vielfältigen Leitungen auf der* ***Oberseite*** *der Triebwerke. Bei Kampfflugzeugen deren Triebwerke im Rumpf liegen, ist jedoch die Zugänglichkeit der Anbaugeräte von der Unterseite günstiger (Bild 16.3-2).*

In diesem Zusammenhang ist die Positionierung der Anbaugeräte insbesondere bei ***zivilen Fantriebwerken*** *zu erwähnen. Hier geht es darum, das* ***gleichzeitige Ausfallrisiko beider Triebwerke einer zweistrahligen Maschine bei Bruchstückaustritt zu minimieren****. Man bringt Aggregate, die potenziell gefährliche Medien führen (Ö, Kraftstoff), auf der sog.* ***„Wet Side“*** *an (Lit. 16.3-19).*

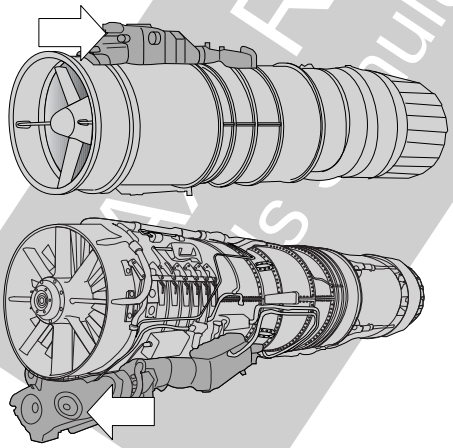
Bild 16.3-2 *(Lit. 16.3-2 und Lit. 16.3-3): Eine* ***Zusammenstellung wichtiger Gesichtspunkte und Richtlinien*** *(ohne Anspruch auf Vollständigkeit) lässt Maßnahmen erkennen, die dem Konstrukteur zur Verfügung stehen, um die* ***Wartbarkeit von Triebwerken zu optimieren****.*

Im Vordergrund stehen Erfahrungen, insbesondere des Betreibers, ***im praktischen Betrieb*** *(Bild 16.2-8 und Bild 16.2-9). Sie sind eine Basis für die Definition der Forderungen aus Wartung und Überholung. Daraus lässt sich das Wartungs- bzw. Überholungskonzept entwickeln.*

Um typspezifische Probleme rechtzeitig zu erkennen, stehen heute bereits in der Konstruktionsphase 3-D Computerprogramme zur Verfügung. Damit lassen sich Probleme an Montage- und Einbaubedingungen erkennen. Trotzdem ist auch heute noch ein ***frühzeitiger Aufbau des Triebwerksmodells in Hardware*** *vorteilhaft.*

Wilhelm Rosmann - Turboconsult
Nur zur Unterlage nur mit Lizenz

Der Konstrukteur muss bei der Wartbarkeit Kompromisse eingehen.



Die Anordnung der Anbaugeräte muss die Gefährdung im Einsatzfall durch Bodenbeschuss aber auch die günstige Wartung berücksichtigen

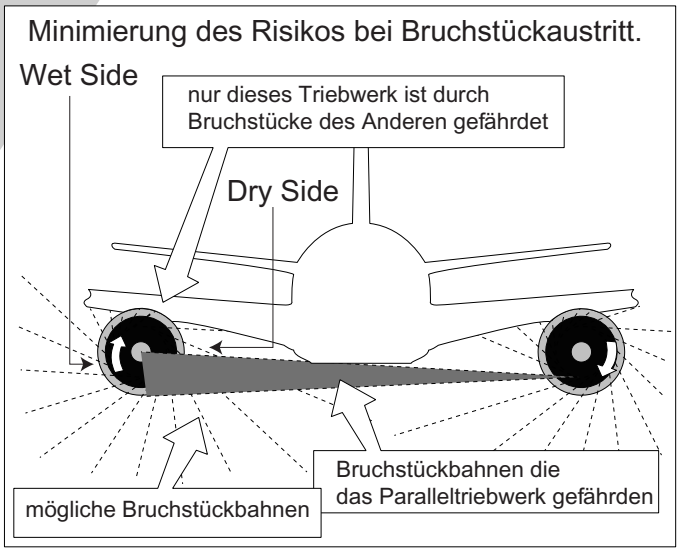
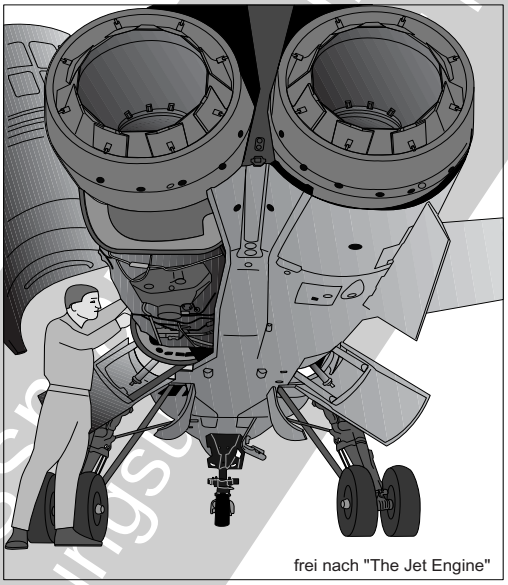


Bild 16.2-1

„Human Factors“ Konstruktionseinfluss

Die Berücksichtigung einiger Richtlinien ermöglichen dem Konstrukteur bereits eine wartungsgeeignete Konfiguration. Im Zentrum der Überlegungen stehen die ***austauschbaren Einheiten*** *(„Line Replaceable Units“ = LRU). Hier sind Anbaugeräte mit ihren Rohr- und Kabelanschlüssen von besonderer Bedeutung. Es gilt, den Aufwand häufig wiederholter Wartungsaufgaben wie Ölkontrolle, Magnetstopfenkontrolle und Filterwechsel zu minimieren. Eine Voraussetzung ist bestmögliche Zugänglichkeit, was gerade auch die* ***visuelle Kontrollmöglichkeit*** *einschließt.*

Überhol- und Wartungsfreundlichkeit lässt sich konstruieren. Hier einige wichtige Gesichtspunkte.


frei nach "The Jet Engine"

Übergeordnete Gesichtspunkte:

- Auswertung und Berücksichtigung aller Erfahrungen mit bisherigen relevanten Triebwerken
- Frühzeitiger Aufbau (vor der ersten echten Versuchsmaschine) des Triebwerksmodells (mockup)
- Zusammenarbeit aller für eine Synergie notwendigen Disziplinen
- Einbeziehung des Betreibers
- Definition der Forderungen von Wartung und Überholung
- Entwicklung des Wartungs- bzw. Überholungskonzepts

Richtlinien für die Umsetzung in der Konstruktion eines modernen Triebwerks:

- Um eine vor Ort austauschbare Einheit ("Line Replaceable Unit" = LRU) zu ersetzen, darf es nicht notwendig sein, anschließende / benachbarte Komponenten zu entfernen.
- Die LRU's sind für beste Zugänglichkeit am Triebwerk zu platzieren
- Keine Verschiebung der Teile und Anschlüsse für den Wechsel der LRU's
- Nur Standardwerkzeuge für An- und Abbau der LRUs
- Für den Werkzeugeinsatz ist ausreichend Platz vorzusehen
- LRU's dürfen keine Toleranzbeilagen benötigen.
- Wichtige Kennzeichnungen (Part Number) der LRU müssen in montiertem Zustand erkennbar sein.
- Keine Verwendung von Sicherungsdrähten an den Befestigungselementen der LRU.
- Standardisierung der Verschraubungen (12-Kant) für den LRU Einbau.
- Alle flüssigkeitsführenden LRUs sind mit Drainagevorrichtungen zu versehen, die zu starkes Austreten beim Ausbau verhindern.

Bild 16.2-2

© Axel Rossmann Consult als Schulungsunterlagen Lizenz

Ist ein Tausch von Aggregaten notwendig, sollten die ***zu trennenden Anschlüsse möglichst in einer Ebene*** *liegen. So führt beispielsweise ein Rohrleitungsanschluss an einer weiter entfernten Stelle zu einem langen sperrigen Tauschteil, wo* ***Montagekomplikationen*** *zu erwarten sind. Das könnte eine Verschiebung anderer Teile notwendig machen und sowohl den Montageaufwand erhöhen als auch potenziell die Sicherheit beeinflussen (Lit. 16.3-18).* ***Öl- und Kraftstoffreste können an umliegenden Bauteilen Schädigungen*** *wie Quellen oder Versprödung von Elastomeren oder die Entstehung lästiger bzw. gefährlicher Dämpfe (Lit. 16.3-18) bis zur Rissbildung an Metallteilen (Lit. 16.3-18), hervorrufen. Um einen unkontrollierten Austritt von Flüssigkeiten (Öl, Kraftstoff) bei der* ***Lösung von Verbindungen*** *zu vermeiden, sind deshalb geeignete* ***Drainagevorrichtungen*** *vorzusehen.*

Die Forderung nach der ausschließlichen Verwendung von ***Standardwerkzeug*** *für Arbeiten, insbesondere den Tausch von LRUs, vereinfacht die Logistik und vermeidet eher eigenmächtige Abweichungen. Voraussetzung ist natürlich eine geeignete konstruktive Gestaltung. Sie berücksichtigt nicht zuletzt ausreichend Platz und Zugänglichkeit für die* ***Handhabung des Werkzeugs****.*

Standardwerkzeug verlangt auch nach ***Standardverbindungselementen*** *wie Flanschoder Rohrleitungsverschraubungen.*

Eine ***Sicherung*** *der Verschraubungen mit Drähten wird bei modernen Triebwerken mit selbstsichernden Systemen umgangen.*

Toleranzbeilagen wie Einstellscheiben*, z.B. an Verbindungen von Betätigungs-/ oder Rückmeldekabeln oder zur Einstellung eines Lagerspiels (z.B. an Radialwellen) bedeuten nicht nur einen erhöhten Montageaufwand. Sie sind auch eine Quelle potenzieller Fehler. Deshalb sollten Toleranzbeilagen vom Konstrukteur nicht vorgesehen werden.*

Der Sicherheit dient auch die gute visuelle ***Erkennbarkeit von Kennzeichnungen*** *im eingebauten Zustand.*

Bild 16.3-3.1 *(Lit. 16.3-2 und Lit. 16.3-3): Das Beispiel eines modernen Triebwerkstyps für den Einsatz in großen Verkehrsflugzeugen zeigt neben der Einhaltung grundsätzlicher Richtlinien (Bild 16.3-2 und Bild 16.3-4.1 und -4.2) viele* ***Maßnahmen für eine gute Wart- und Überholbarkeit****. Hierzu gehört die Forderung, dass ein Tausch von Anbaugeräten innerhalb 130 Minuten möglich sein muss.*

Eine wichtige Maßnahme ist die ***Standardisierung von Verbindungselementen*** *wie Schrauben, Rohrverbindungen und Rohrschellen (Kapitel 23.5).* ***Rohrleitungsverbindungen sind in der Ebene der Modulhauptflansche anzuordnen****. Damit beschränkt sich die Wartungsaktivität auf einen begrenzten Raum und die Größe des auszutauschenden Moduls ist minimiert.*

Deshalb ist auch ein Anschluss einer Kraftstoffleitung an Anbaugeräten wie Getriebe oder Kraftstoffpumpe zu integrieren.

Um das Lösen oder Anziehen nur einseitig zugänglicher Verschraubungen sicher zu gewährleisten, sind die nicht zugänglichen Muttern entsprechend zu fixieren.

Verschraubungen/Verschlüsse *für Flüssigkeiten oder Boroskopstopfen sind* ***selbstsichernd*** *zu gestalten. Dies entspricht dem* ***Verbot von Sicherungsdrähten****. Natürlich ist bei Selbstsicherungen die* ***Wiederverwendbarkeit*** *eindeutig zu klären.*

Bei ***Rohrschellen*** *kommt es darauf an, dass diese nicht zur Montage auf-/ oder zugebogen werden müssen (Bild 16.3-3.2).*

Um ***Probleme eines Modultauschs*** *zu vermeiden, darf die Befestigung der Geräte nicht an den Hauptflanschen der Module erfolgen.*

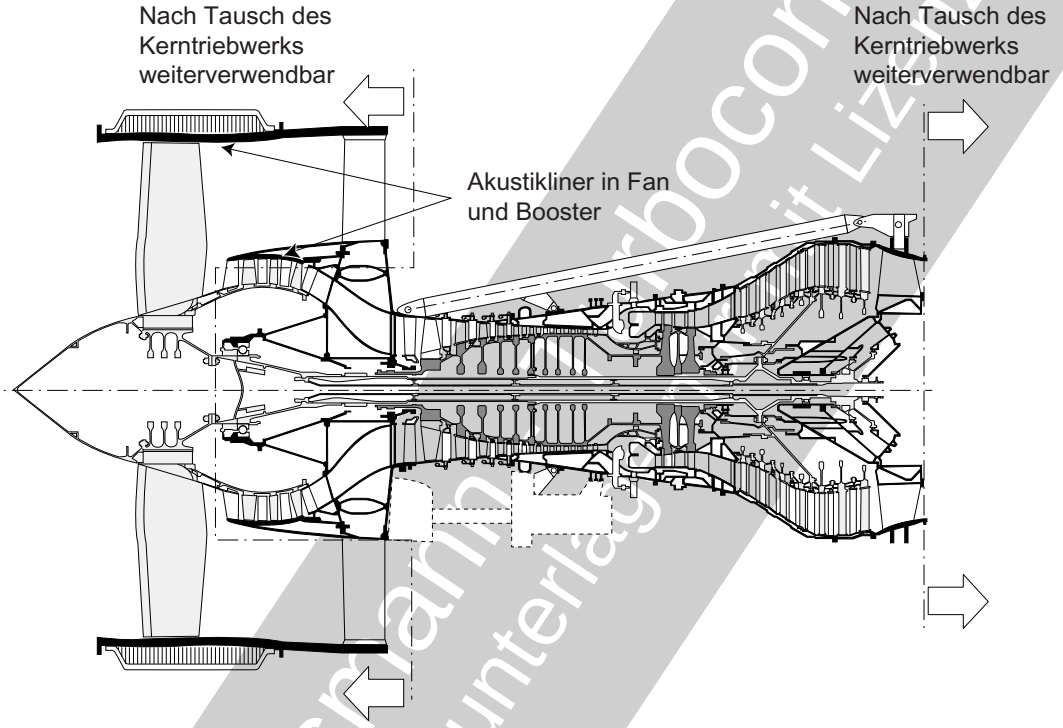
Häufig ***auszuwechselnde Komponenten****, wie Akustikeinsätze bzw. Anstreifringe im Fan- und Boosterbereich (siehe Skizze), müssen am eingebauten Triebwerk („am Flügel“) austauschbar sein.*

Die Ausrüstung moderner Triebwerke mit einer ***„Full Authority Digital Engine Control“ (FADEC)*** *als Anbaugerät ist für die Wartung und Überholung geeignet zu berücksichtigen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

„Human Factors“ Konstruktionseinfluss

Maßnahmen für die ergonomische Wartungsfreundlichkeit am Beispiel eines modernen Triebwerkstyps.



- Zwölfkant-Schrauben und -Muttern aus dem gleichen Werkstoff (IN 718) an allen externen Komponenten.
- Standard-Rohrschellen und -Rohrverbindungen.
- FADEC-Kabel als "Line Replacement Units" (LRUs) konstruiert, d.h. Austausch in 130 Minuten.
- Zugsichere FADEC- Kabelverbindungen, geeignet für den Austausch der Stecker.
- Farbcodierte elektrische Kabel.
- Schraubenlose Kabelklemmen.
- Überwurfrohrschellen, keine Schlaufen-Rohrklemmen (Bild 19.1.4-3.2).
- Alle Verbindungen von flüssigkeitsführenden Leitungen gekennzeichnet.
- Fixierte Muttern für einseitiges Lösen der Schraube bei der Demontage.
- Selbstsichernde Verschraubungen für Flüssigkeiten und bei Boroskopstopfen.
- Alle externen Befestigungen/Abstützungen unabhängig von Hauptflanschen der Module.
- Die akustischen Einsätze (Panels) des Fan und Boosters am Flügel tauschbar.
- Anstreifeinsätze für die Fanschaufelspitzen am Flügel tauschbar.
- Alle Rohrleitungsverbindungen in Flanschebene der Module angeordnet.
- Anbaugetriebe mit integralem Kraftstoffanschluss.
- Kraftstofffilter integraler Bestandteil der Kraftstoffpumpe.

Bild 16.3-3.1

*Die umfangreichen **Kabelverbindungen** für ein- und ausgehende Regel-/ und Überwachungsimpulse verlangen geeignete **Steckverbindungen und farbcodierte Kabel**. Diese sind mit Kabelklemmen ohne die Anwendung von Schrauben zu sichern.*

*Auch die Verbindungen **flüssigkeitsführender Leitungen sind geeignet zu kennzeichnen**. Damit wird der Wart vor „Überraschungen“ bewahrt.*

© AMT Bossmann Aerobconsult
Ausbildungsunterlagen mit Lizenz

Bild 16.3-3.2

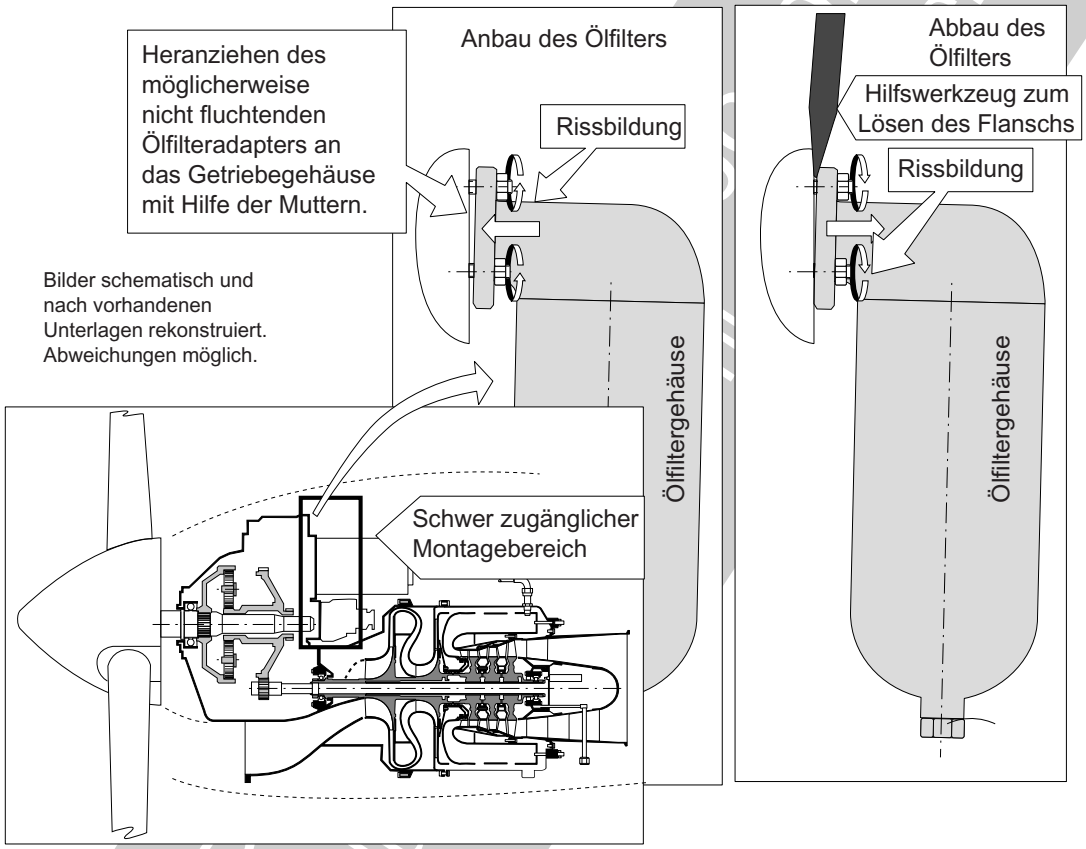
***Bild 16.3-3.2**: Um eine sog. „**P-Klemme**“ (engl. P-clamps) zu montieren, erfordert dies zumindest die einseitige Lösung der Rohrleitung, damit die Klemme aufgeschoben werden kann. Bei einer **montierten Leitung** muss die **Klemme aufgebogen** werden (Skizze unten). Eine derartige Vorgehensweise im Rahmen von Wartungsarbeiten führte offenbar in mehreren Fällen zum Versagen der Rohrschelle im Betrieb. Dem werden beim Versagen einer Luftleitung an zwei Kampfflugzeugen offenbar zwei tödliche Flugunfälle zugeordnet. Damit bestand die Gefahr eines Schwingbruchs der betroffenen Rohrleitung. Es ist also durchaus sinnvoll, dass für neue Triebwerkstypen die **ausschließliche Anwendung von Rohrschellen** vorgeschrieben wird (Bild 16.3-3.1), die nicht aufgebogen werden müssen („Überwurfrohrschellen“).*

***Bild 16.3-3.3** (Lit. 16.3-17): Dies ist ein eindrucksvolles und hoffentlich lehrreiches Beispiel, wie eine **mangelhafte Berücksichtigung der Human Factors** gefährliche Situationen heraufbeschwören kann.*
*Der **Ölfilter** ist in einem **sehr beengten Bereich** angebracht. Das macht seine Ausrichtung äußerst schwierig (Rahmen links). Beim Einbau wird der **Befestigungsflansch** (Adapter) **mit gleichmäßigem Anziehen der flanschseitigen Muttern bis zur Auflage am Gehäuse herangezogen** (Rahmen Mitte). Ein kleines Problem, wie die nicht ausreichende Fluchtung des Flanschs, kann die Anzugskräfte bereits gefährlich anwachsen lassen und den Flansch überlasten. Dies ist **bei der großen Kraftübersetzung der Muttern kaum zu bemerken** (Bild 16.3-5.2). Auch der Abbau des Flanschs ist erschwert. Das kann dazu motivieren, **ungeeignetes Werkzeug, wie einen Schraubenzieher, für das Lösen** anzuwenden (Rahmen rechts).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlagen mit Lizenz

„Human Factors“ Konstruktionseinfluss

Ungünstige Montagebedingungen, wie schlechte Einsicht und behinderte Zugänglichkeit, können gefährliche Schäden geradezu provozieren.



Während des Reiseflugs leuchtete das Warnlicht für niedrigen Öldruck eines der beiden Triebwerke auf. Dieses wurde daraufhin vorsorglich abgestellt. Das Wartungspersonal stellte nach der Landung fest, dass der Befestigungsflansch des Ölfilters am Getriebegehäuse einen Riss aufwies. Dieser verlief bis in die benachbarte O-Ringnut und führte zum Verlust des halben Ölvorrats.

Bild 16.3-3.3

*Ein größerer Betreiber mit Überholshop hat bereits **mehrere solche Vorkommnisse gemeldet**. Bei einer vorsichtshalber durchgeführten Inspektion der Triebwerke in seinen Flugzeugen wurden zwei weitere gerissene Teile gefunden. Risse sollen nun mit einer **zerstörungsfreien Prüfung** gefunden werden. Zusätzlich werden Filtergehäuse eines empfindlicheren älteren Modells gegen eine **neue, vom OEM entwickelte Variante** getauscht.*

um bei einem Modultausch probleme zu vermeide

***Bild 16.3-4.1** und **Bild 16.3-4.2** (Lit. 16.3-4 und Lit. 16.3-5): **Hubschrauber für den militärischen Einsatz** können als besonders anspruchsvoll für optimale Wartungs- und Überholungsarbeiten gelten. Müssen doch derartige Arbeiten auch in einer ungünstigen Umgebung durchführbar sein. Dabei ist eine Lage des Triebwerks im Rumpf in einem nicht ohne Hilfsmittel zugänglichen Bereich (**hoch über dem Boden**) besonders anspruchsvoll. In diesem Zusammenhang wird auch die **Gewichtsbegrenzung der abzubauenden bzw. auszutauschenden Komponenten** verständlich.*

*Eine besonderer Wert wird offensichtlich auf **klare, eindeutige und übersichtliche Dokumente** gelegt. Daraus ergibt sich, dass die Darstellung den gesamten erforderlichen Arbeitsbereich umfasst. Dabei spielten die eindeutige Identifikation der Lage zu einem Bezugspunkt bzw. einer Bezugslinie sowie die Grenzwerte für Einstellungen eine wichtige Rolle. Sie müssen die Einhaltung von Spielen und Positionen gewährleisten. Beispielsweise um eine Verspannung von Rohrleitungen (Schwingbruchgefahr!) oder den Kontakt und das Scheuern von Leitungen (Kapitel 23.5) zu vermeiden.*

*Natürlich sind ausreichend Spiele vorzusehen, um eine akzeptabel einfache Montage zu ermöglichen. Um diese Forderungen zu erfüllen, sind **vor Ort verfügbare Lehren, Messgeräte und Vorrichtungen** notwendig. Der Tausch der Leitungen muss mit einfachen, auch in militärtypischen Situationen verfügbaren Hilfsmitteln möglich sein.*

*Alle für Wartungsarbeiten notwendigen **Kennzeichnungen** sind an geeigneten Orten gut lesbar mit einem sicheren Verfahren anzubringen. Ungeeignet sind z.B. Kennzeichnungen, die von austretender Leckflüssigkeit beschädigt werden können. Dazu gehören Klebebänder, die für Kraftstoff oder Öl empfindlich sind.*

Der Militäreinsatz ist mit einer günstigen Anordnung und Gruppierung schussempfindlicher Rohrleitungen zu berücksichtigen (Bild 19.1.4-1).

*Anschlüsse/Kupplungen für Betätigungen bzw. Rückmeldungen wie Kabel und Stangen müssen leicht identifizierbar, einstellbar und tauschbar sein. Die Forderung nach einer **sicheren und einfachen Einstellbarkeit** ist bei der mechanischen Übertragung von Regelungssignalen besonders augenfällig. Voraussetzungen sind gute Sichtbarkeit und sichere Identifizierung, um Verwechslungen (z.B. gegenüber der Dokumentation) mit katastrophalen Folgen zu vermeiden. Oft werden die anschließenden Verbindungskabel über Rollen umgelenkt. Diese Funktion ist bei entsprechenden Wartungsarbeiten zu berücksichtigen. Das Herausspringen aus einer Führung oder ein Blockieren muss vermieden werden.*

*Werden **Scherverbindungen als Kupplungen** verwendet (Gabelverbindungen mit Querbolzen), müssen die Komponenten gegen Lösen (z.B. Herausfallen des Bolzens, Bild 19.2.2-8) gesichert sein. Für die Zugänglichkeit der Triebwerke notwendige Türen und Abdeckungen sind einfach abbaubar oder tauschbar zu gestalten. Dabei dürfen die **Scharniere nur als Ganzes gelöst** werden. Das Trennen eines Scharniers in sich (z.B. durch Ziehen des Bolzens) darf nicht möglich sein (Bild 16.1.1-6.1 und -7). Wird von den Klappen die Aerodynamik beeinflusst, müssen diese ausreichend genau positionierbar sein, um wirbelbildende Konturen zu vermeiden.*

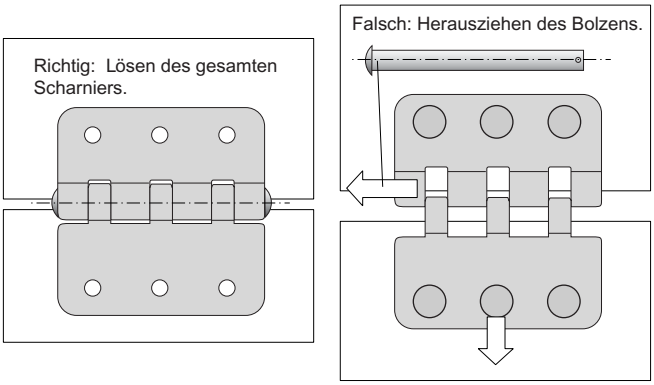
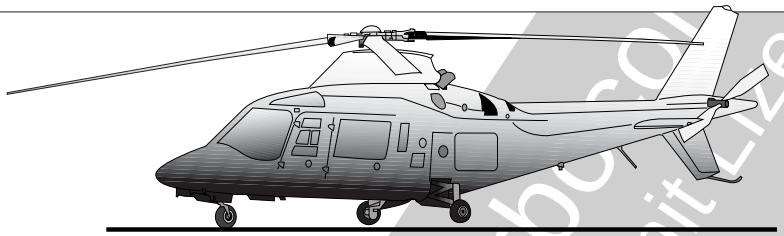


Bild 16.3-4.1

© Axel Rosemann - Turboconsult als Schulungsunterlagen mit Lizenz

„Human Factors“ Konstruktionseinfluss

Was der Konstrukteur für eine optimale Wartbarkeit und Überholbarkeit zu beachten hat, zeigt das Beispiel von Hubschraubertriebwerken.



Austausch/Ausbau/Einbau des Triebwerks:

- Mechanismen zum schnellen Trennen oder möglichst wenig Befestigungselemente wie Schrauben.
- Bei zusammenwirkenden Aufhängungen/Befestigungspunkte (datum hinges) sind in Dokumenten / Zeichnungen jeweils die Abstände zur Mittellinie anzugeben. Dabei ist auf möglichst kleine Spiele zu achten. Es darf keine Gefahr bestehen, dass andere Teile beeinflusst werden.

Scharnierverbindungen dürfen nicht in sich getrennt werden. Angabe an welchem Teil das gesamte Scharnier verbleibt.

- Bei Steckverbindungen ist innerhalb der Toleranzen ausreichendes Montagespiel zu gewährleisten.
- Schnell lösbare Kupplungen für alle Leitungen, Betätigungen, elektrische und elektronische Kabel zur Zelle.
- Grenzwerte sind für alle Größen, die den Zusammenbau und die Funktion der Teile beeinflussen, deutlich auf Dokumenten bzw. Zeichnungen anzugeben.
  Anwendung von Dokumenten (data sheets) die Toleranzen und Spiele der Verbindungen angeben.
  Für Ausgleichsscheiben und Büchsen sind dazu Details erforderlich.
  Einstellarbeiten müssen ohne Veränderungen am Triebwerk selbst erfolgen können.
- Verwendung geeigneter Vorrichtungen, Lehren und Messgeräte gewährleisten.
- Geeignete Zeichnungsgröße mit dem Aussschnitt des Arbeitsbereichs und benötigte Bezugslinien/-punkte.

Rohrleitungen:

- Einfache Hilfsmittel zum Tausch von Leitungen
- Beim Gruppieren von Leitungen ist auf die Empfindlichkeit beim Militäreinsatz zu achten

Betätigungsanschlüsse :

- Leichte und sichere Identifizierung, Einstellbarkeit und Tauschbarkeit.
- Die Verbindungen/Anschlüsse gut sichtbar und zugänglich positionieren. Umlenkungen berücksichtigen.
- Besonders sicherheitsrelevante Scherverbindungen müssen entweder dauernd geschlossen sein oder eine zusätzliche automatisch (keine vom Wartungspersonal durchzuführende Sicherung, wie ein anzubringender Sicherungsdraht oder abzubiegende Sicherungsnase) wirkende Sicherung aufweisen, die beim Ausfall der üblichen Sicherung wirksam bleibt.

Elektrische Anlagen:

- Geeignete Kennzeichnung der Kabel für einfache Identifizierung und Tausch.
- Einfache Austauschbarkeit, auch von defekten Systemen.
- Das Handling soll einer Person möglich sein (Gewicht, Griffpositionen).

Verkleidungen, Türen und Abdeckungen:

- Tauschbarkeit gewährleisten-
- bereits früh in der Konstruktionsphase ist auf die praktikable Ausrichtung der Befestigungen zu achten.

Aerodynamisch wirksame Bereiche

- Veränderungen der Kontur minimieren
- Ausreichend genaue Positionierung mit Toleranzen und Lageangaben sowie geeigneten Vorrichtungen gewährleisten.

Markierungen, Kennzeichnungen

Bild 16.3-4.2

- An Wartungsorten
- Klebebänder nicht für die Kennzeichnung wo mit Benetzung von Kraftstoff oder Öl zu rechnen ist.

(Kein Anspruch auf Vollständigkeit, es gelten die jeweiligen Vorschriften!)

© Axel Grossmann Turbosoft
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

„Human Factors“ Konstruktionseinfluss

Bild 16.3-5.1 und -5.2 *(Lit. 16.3-9): Bei einem Trainingsflug im Mittelmeerraum in den späten Sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts, bemerkte der Pilot anhand der Cockpitinstrumente einen gravierenden* ***Ölverlust*** *des Triebwerks. Dies führte zum* ***Öffnen der Schubdüse*** *und damit für diesen extremen einmotorigen Flugzeugtyp zu einem gefährlichen* ***Schubverlust****. Darauf erfolgte eine Notlandung auf einem, für diesen Zweck eigentlich zu kurzen, zivilen Inselflugplatz. Das Flugzeug überlief die Landebahn und stürzte mit dem Rumpfvorderteil kopfüber ins Meer (Skizze oben). Der Pilot schoss sich mit dem Schleudersitz aus ca. 3 Metern Wassertiefe aus der Maschine. Er überlebte schwer verletzt.*

Das Triebwerk wurde nach der Bergung des Flugzeugs ausgebaut und die Problemursache untersucht. Auf das ursächliche Versagen der Rückölpumpe ließen die Beobachtungen des Piloten und Anzeigen der Bordinstrumente schließen. Die Untersuchungen wurden durch die Tatsache erschwert, dass die vordere Unterseite des Triebwerks, insbesondere die Rückölpumpe, vom Aufschlag schwer beschädigt waren.

Es zeigte sich, dass das Antriebsritzel („A“ in Skizze unten rechts) als Folge eines ***einseitigen Biegeschwingbruchs*** *(Details unten links) versagt hatte. Zusätzlich ließen die zusammengefügten Bruchflächen eindeutig erkennen, dass die* ***Ritzelwelle plastisch verbogen*** *war. Damit ließ sich die Biegeschwingüberlastung erklären. Doch wie kam es zu der Verbiegung der Welle?*

Eine mikroskopische Untersuchung des Ritzels ließ auf der Stirnseite an einem Zahn eine plastische Verformung erkennen (Band 2 Bild 6.4.1-21). Deren Form war mit dem Kontakt eines axial bewegten Teils, dem getriebeseitigen Antriebsrad, erklärbar.

Eine Nachfrage beim militärischen Betreiber ergab, dass wenige Stunden vor dem Unfallflug an einer Vielzahl von Flugzeugen in einer Sonderaktion ***Arbeiten an der Rückölpumpe am eingebauten Triebwerk*** *durchgeführt wurden. Die Rekonstruktion ergab, dass dabei die Pumpe* ***unter schlechter Zugänglichkeit montiert*** *werden musste. Offenbar kam es beim Aufschieben des Pumpengehäuses auf die Stehbolzen(„B“) zu einem Aufliegen der Zähne. Obwohl vor dieser Situation, wahrscheinlich aus ähnlichen einschlägigen Erfahrungen, explizit im Handbuch gewarnt wurde (Bild 16.3-5.1) ist es naheliegend, dass* ***mit Hilfe der Muttern „C“ der Montagewiderstand überwunden*** *und dabei die Pumpenritzelwelle verbogen wurde.*

Auch ein expliziter Warnhinweis im Überholhandbuch genügt offenbar bei schlechter Wartungszugänglichkeit nicht!

"Die Pumpe über die Stiftschrauben bis an das Getriebe schieben und darauf achten, dass das Pumpenantriebsrad mit dem Ritzel des Getriebes im Eingriff steht. Zu gleicher Zeit ist darauf zu achten, dass der Flansch des Filtersiebs nicht die Dichtung überlappt und damit ein bündiges Anliegen der Pumpe am Getriebe verhindert."

ACHTUNG

"Die Pumpe **nicht unter Kraftaufwand an das Getriebe anbauen**. Darauf achten, dass das Pumpenantriebsrad vorschriftsmäßig mit dem entsprechenden Ritzel im Getriebe in Eingriff steht. Wenn die zwei Zahnräder vorschriftsmäßig in Eingriff stehen, *kann die Pumpe durch leichten Druck von Hand völlig angebaut werden*. Falls erforderlich, sind das Rückölpumpenzahnrad oder die Getriebezahnräder zu drehen, um die beiden Zahnräder in Eingriff zu bringen".

(Zitate aus dem Wartungshandbuch)

Bild 16.3-5.1

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

„Human Factors“ Konstruktionseinfluss

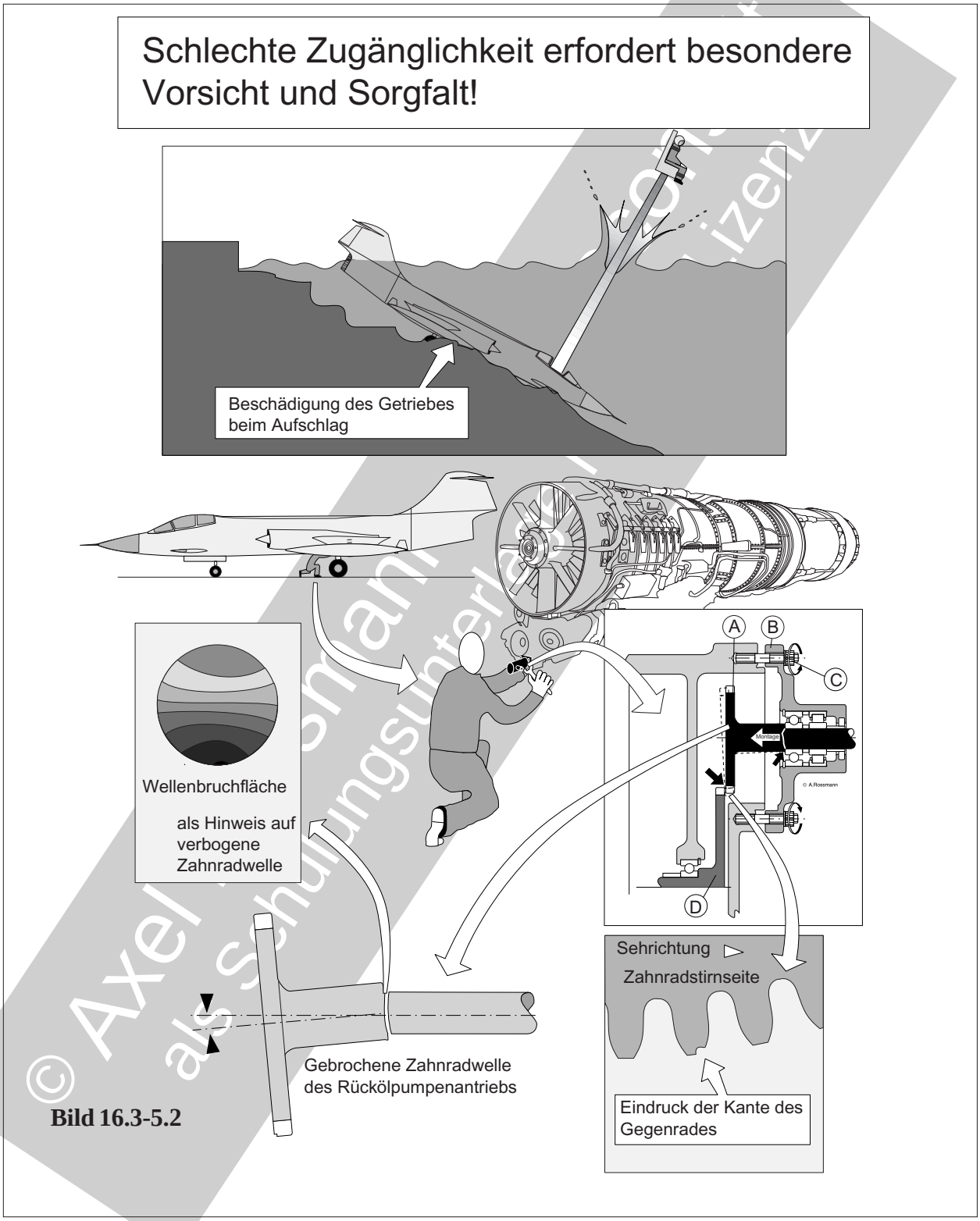


Bild 16.3-5.2

Eine sofort eingeleitete Überprüfung der Triebwerke anderer suspekter Flugzeuge ergab weitere fünf Parallelfälle, die jedoch noch nicht zum Ausfall geführt hatten.

© Axel Rossmann als Schulungsunterlage

Die Modulbauweise hat viele Vorteile. Sie birgt aber auch potenzielle Gefahren bei der Wartung, die der Konstrukteur berücksichtigen und minimieren muss.

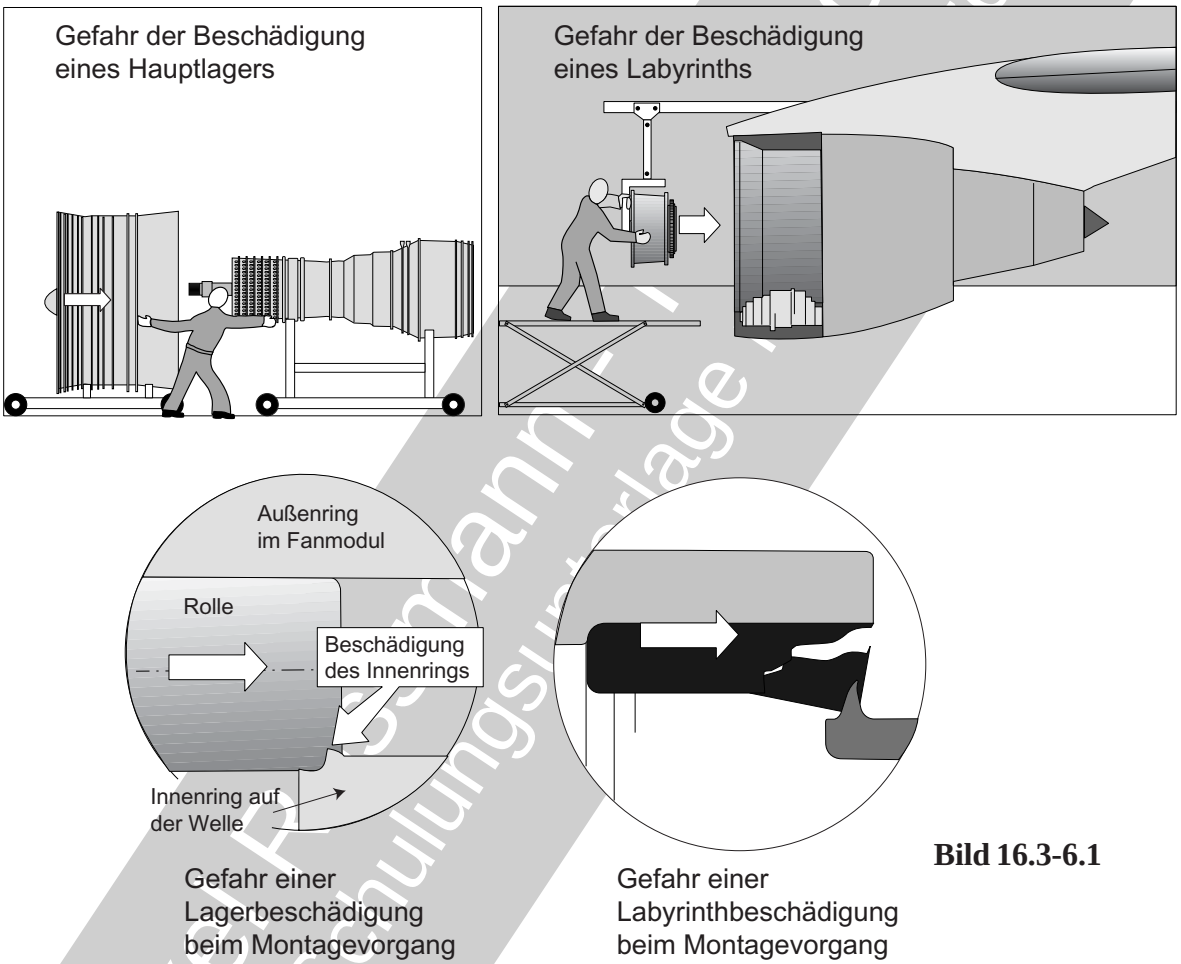


Bild 16.3-6.1

Bild 16.3-6.1 *(Lit 16.3-10): Eine* ***Modulbauweise*** *hat viele Vorteile wie vereinfachte Logistik sowie Zeit- und Kostenersparnis. Sie birgt aber auch Risiken. Ein besonderes Problem sind* ***Beschädigungen beim Zusammenschieben der Modulverbindungen****. Üblicherweise erfolgt die Trennung der Module im Bereich eines* ***Rollen-Hauptlagers****. Dabei wird gewöhnlich der Innenring abgezogen, d.h. vom Außenring mit dem Käfig und den Wälzkörpern getrennt. Das Aufschieben des Tauschmoduls wird oft von schlechter Einsicht zum Fügebereich und engen Spalten zwischen beschädigungsempfindlichen Bauteilzonen erschwert. Je schwerer die zu fügenden Module sind, um so größer ist die Gefahr einer unbemerkten gewaltsamen Beschädigung des Fügebereichs. Es handelt sich erfahrungsgemäß um* ***Wälzlager*** *(Laufflächen, Käfig und Wälzkörper, Band 2, Kapitel 6.3-1), Labyrinthe (Spitzen, weiche und/oder spröde Anstreifbeläge, Band 2, Kapitel 6.10.3.1.1). Auch filigrane Passdurchmesser, wie an relativ dünnwandigen Blechgehäusen (Bild 16.3-6.2, Skizze unten bzw. Beispiel 16.3-1), gehören dazu. Das gilt insbesondere für den* ***Fan-Modul*** *großer Triebwerke (Skizze oben links).*

© Axel Fussmann – Lehrer als Schulungsunterlage

„Human Factors“ Konstruktionseinfluss

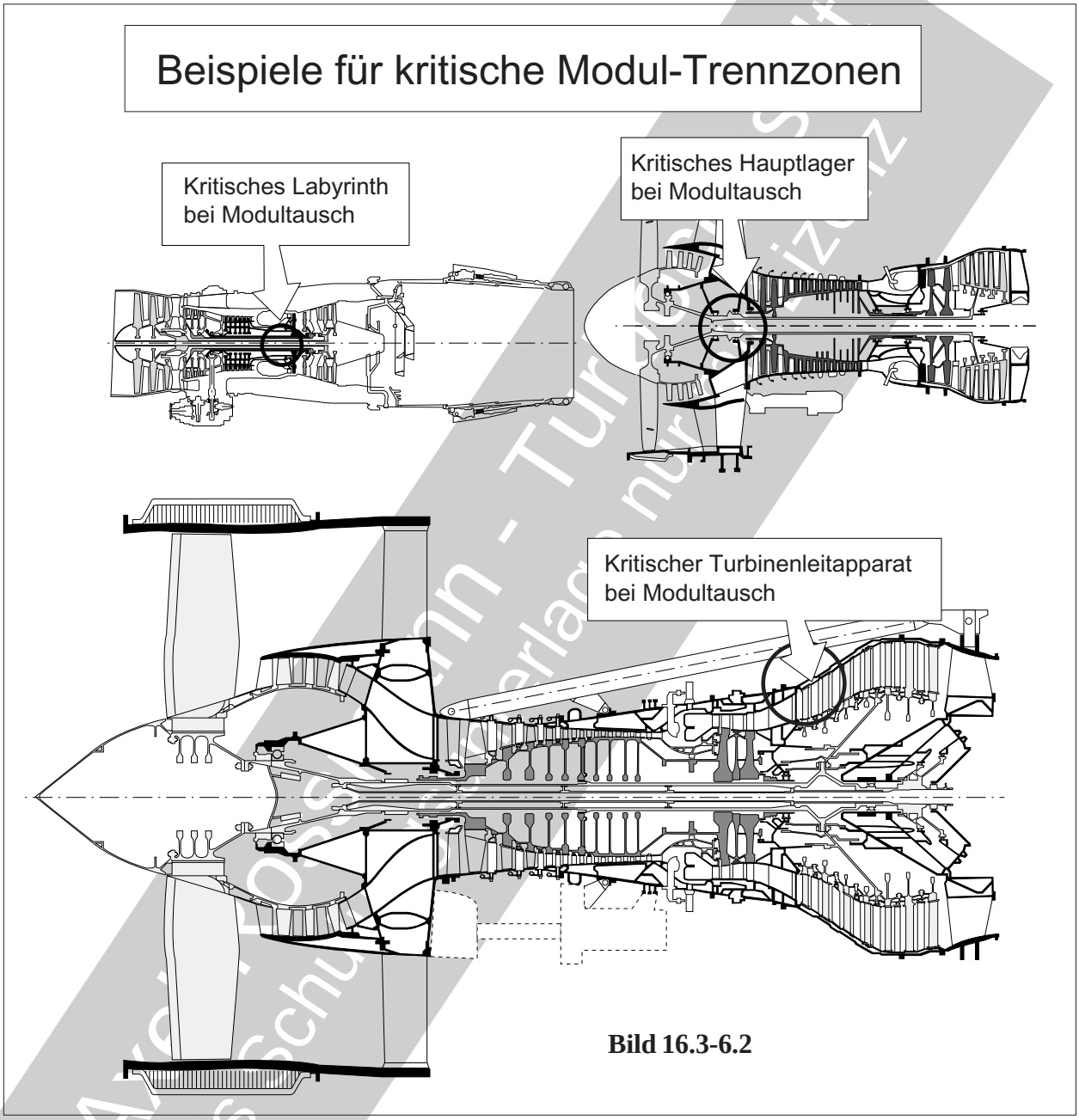


Bild 16.3-6.2

Selbst die scheinbar leichte Beschädigung eines Hauptlagers, die sich an Eindrücken der Rollen am Innenring erkennen ließ, führte in sehr kurzer Zeit nach der Montage zu einem katastrophalen Lagerversagen.

*Die **Beschädigung der empfindlichen Spitzen eines Labyrinths** und/oder **Ausbrüche am Einlaufbelag** (Skizze unten rechts) kann einen katastrophalen Schaden auslösen. Selbst mit einem Durchschmelzen benachbarter Wellen und dem Durchgehen der betroffenen Turbine ist dann zu rechnen.*

***Bild 16.3-6.2** (Lit. 16.3-10): In den **Trennebenen der Module** befinden sich die bei der Montage potenziell **beschädigungsgefährdeten Bauteilzonen**. Die dargestellten Beispiele beruhen auf Erfahrungen und Vorkommnissen. Skizze oben links zeigt ein militärisches Dreiwellentriebwerk mit ausgeprägter Modulbauweise. Im Bereich der gekennzeichneten Trennebene befindet sich die **Lagerkammer mit mehreren konzentrischen und/oder axial versetzten Labyrinthdichtungen,** die beim Zusammenbau gleichzeitig eingeschoben werden. Die*

neuen, d.h. nicht abgeschliffenen Labyrinthspitzen *bedingen deutlich kleinere Spalte als bei der vorhergegangenen Demontage. Das dürfte bei nicht optimalen Montagebedingungen im militärischen Einsatz die Problematik erhöhen (Band 2, Bild 16.10.3.1.2-6).*
Die Skizze oben rechts zeigt den Fall eines schweren ***Lagerschadens*** *mit Triebwerksausfall beim Start eines großen Verkehrsflugzeugs (Bild 16.3-6.1, Band 2, Kapitel 6.3.1, Lit. 16.3-18) .*
Die Skizze unten bezieht sich auf das Beispiel 16.3-1. In diesem Fall kam es bei der Montage des Moduls der Niederdruckturbine zu einer ***Beschädigung eines Turbinenleitapparates*** *mit umfangreichen Folgeschäden.*

Bild 16.3-7 *(Lit. 16.3-2 und Lit. 16.3-12): Die* ***visuelle Überprüfung und Überwachung*** *des Zustands von Bauteilen (Detail unten links) im montierten Zustand, insbesondere auch am Flügel, ist von großer Bedeutung für die Sicherheit (Lit. 16.3-18). Diese Kontrollen werden im Rahmen der Wartung mit Hilfe optischer Lichtleiter (****Boroskop****) durch geeignet positionierte Öffnungen in den Gehäusen vorgenommen (Skizze oben). Der Konstrukteur legt auf Grund relevanter Erfahrungen und der verfügbaren Boroskopvarianten Zahl und Lage der Boroskopöffnungen fest (Skizze oben).*

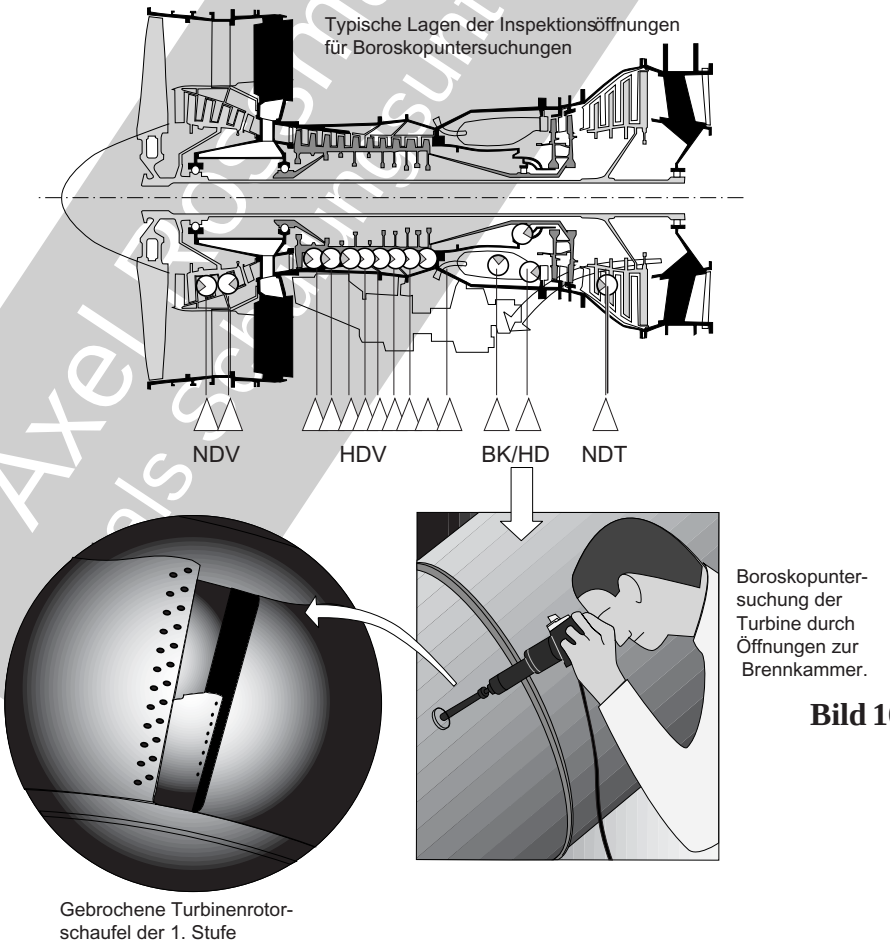
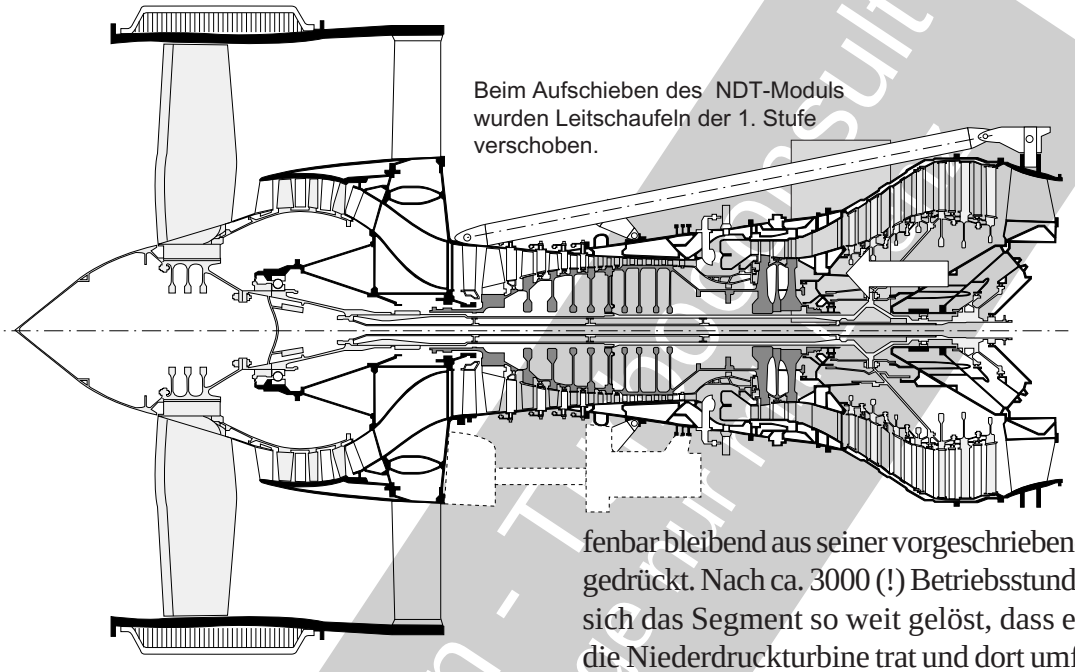


Bild 16.3-7

© Axel Kossmann - Turbopedia
nur als Studienunterlage nutzbar

„Human Factors“ Konstruktionseinfluss



Beispiel 16.3-1 (Lit. 16.3-10): An diesem modernen Typ eines großen Fantriebwerks kam es zum **Schaden in der Niederdruckturbine** mit Bruchstückaustritt auf der Startbahn.

Ursache des Schadens war ein Problem beim Fügen des **großen und schweren Moduls der Niederdruckturbine** an das Triebwerk. Das Problem entstand beim Aufstecken des Gehäuses auf das Turbinenzwischengehäuse (Center Frame). Dabei wurde ein Segment des ersten Niederdruckturbinenleitapparates in der 12-Uhr Position offenbar bleibend aus seiner vorgeschriebenen Lage gedrückt. Nach ca. 3000 (!) Betriebsstunden hatte sich das Segment so weit gelöst, dass es durch die Niederdruckturbine trat und dort umfangreiche Schaufelschäden erzeugte.

Dieser Vorfall überraschte den **OEM, der das Problem bereits in der Entwicklungsphase bermerkt hatte**. Daraufhin wurde der **Montageprozess geändert,** jedoch offenbar nicht ausreichend unter dem Gesichtspunkt „Human Factors“ des Modultauschs beim Betreiber erprobt. Nach diesem Schaden wurden sofort 28 weitere suspekte Triebwerke mit einer Boroskopinspektion am Flügel auf versetzte Turbinenleitschaufelsegmente überprüft.

Bild 16.3-8 *(Lit. 196.3-1, Lit. 16.3-14 und Lit. 16.3-16): Diese Anwendungsbeispiele für* ***gesundheitsbedenkliche Triebwerkskomponenten*** *bzw. deren Werkstoffe (Bild 16.3-10) sind heute nur noch an älteren Triebwerkstypen zu erwarten. Eine besondere Gefährdung ist bei Reparatur- oder Wartungsarbeiten mit der Entstehung von Stäuben (z.B. Schleifen, Bild 16.3-9) gegeben. Ersatzwerkstoffe für die Zwischenlagen auf* ***Asbestbasis*** *von Rohrschellen (Skizze oben links) oder isolierenden Befestigungselementen haben sich in einigen Fällen in ihrer Funktion als problematisch erwiesen. So entsprechen* ***Gleiteigenschaften und Verformbarkeit*** *(Sprödigkeit) des Ersatzes nicht ausreichend denen des Originals.*

Neben Schrauben (Skizze oben rechts), werden auch viele andere Bauteile aus ***korrosionsgefährdeten Stahlteilen*** *wie Verdichtergehäuse und -scheiben* ***kadmiert****. Bei erhöhten Betriebstemperaturen muss eine Nickelzwischenschicht (Ni-Cd-Beschichtung) eine Schädigung des Grundwerkstoffs (Band 3, Bild 14.1-15, Bild 12.2.1.1.8.3-6 und Bild 12.2.1.1.8.3-8) durch Diffusionsvorgänge im Betrieb verhindern. Auch hier können Ersatzbeschichtungen (z.B. Verzinkung) nicht immer den Korrosionsschutz bei gleich guten Gleiteigenschaften bieten.*

Die Verwendung ***dispersionsgehärteter Magnesiumgusslegierungen mit radioaktivem Thoriumoxid*** *war früher im Gehäuse von Anbaugetrieben (Skizze unten links) und im vor-*

© Axel Rossmann - Transitionsunterlage nur für Ausbildungsunterlage

Gesundheitsrisiken durch „Hazardous Materials“

Beispiele für Bauteile von Triebwerken aus potenziell gesundheitsschädlichen Materialien.

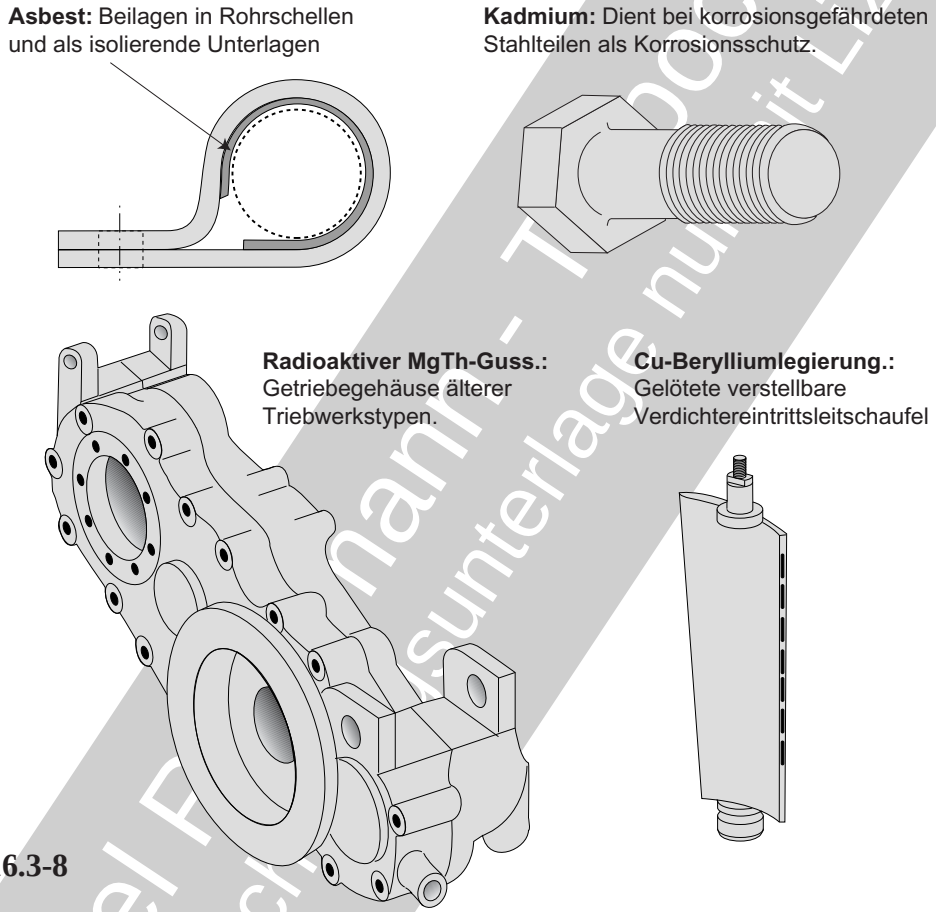


Bild 16.3-8

deren Verdichterbereich bei alten Triebwerkstypen beliebt. Man nutzte das niedrige spezifische Gewicht, bei einer für Leichtmetalllegierungen hohen Kriechfestigkeit.

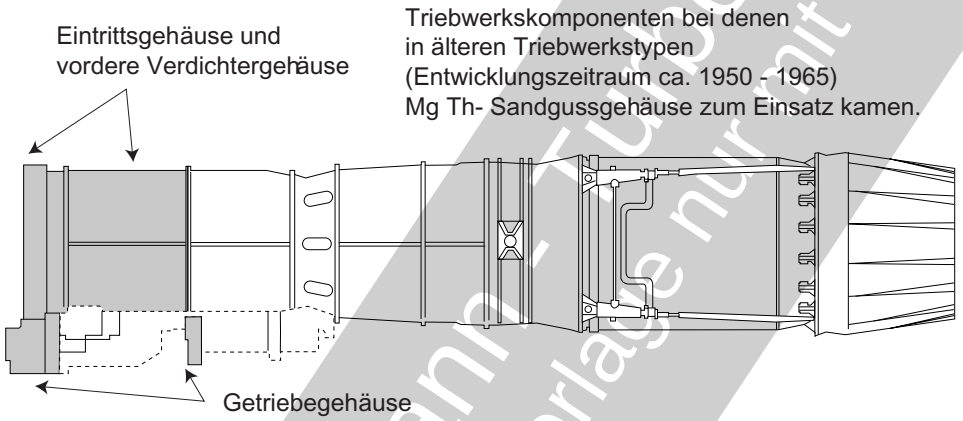
Verdichtereintrittsleitschaufeln (Skizze unten rechts) müssen für die Durchführung von erwärmter Enteisungsluft hohl ausgeführt werden. Dafür bieten sich leichte, gut wärmeleitende Bleche aus ***Kupfer-Beryllium-Legierungen*** *(Cu Be) mit guter Festigkeit und hoher Wärmeleitfähigkeit an. Diese Werkstoffe werden auch für* ***federnde Bauteile*** *in Reglern (z.B.* ***Druckmessdosen****) verwendet.*

Es kann vorekommen, dass die ***Giftigkeit eines Stoffes auf Verunreinigungen zurückgeht****. Man spricht devon, dass dies bei* ***Ni-Gafit Einlaufschichten*** *der Fall sein kann.*

© Axel Fromann - Topoconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

„Human Factors“ Konstruktionseinfluss

Bei Überholung, Reparatur (Zerspanen, Schleifen, Schweißen) und Wartung (Berühren, Nacharbeit) können manche Werkstoffe gesundheitsbedenklich wirken. Der Konstrukteur hat die Aufgabe diese Risiken mit einer geeigneten Werkstoff- und/oder Verfahrenswahl zu minimieren.



Typische Beispiele für potenziell toxische Stoffe bei Wartung und Überholung:

- Asbest an Rohrschellenbeilagen, elektrischen und thermischen Isolationen, Verschleißteilen.
- Radioaktive Werkstoffe wie Thoriumoxid-haltige Mg-Legierungen (gegossene Gehäuse).
- Giftige Metalle: Berylliumlegierungen wie CuBe-Legierungen (Verdichtereintrittsleitschaufeln, Federn)
- Kadmium-Bäder und -Beschichtungen (Schrauben, Beilagen, Federn)
- Cr_x-Ionen aus Verchromungsbädern.
- Cr- und Ni-Oxide die von Heißteilen abblättern.
- Lösungsmittel (Entfettungsbäder)
- Ätzmittel (z.B. chlorhaltige Bäder für Ni-Legierungen)
- Pulver aus Verfahren: Beschichten, Löten, thermisches Spritzen
- Ni-haltiges Hochtemperatur-Schmiermittel

Typische problematische Verfahren im Zusammenhang mit kritischen Stoffen beim Überhol- und/oder Wartungsvorgang:

- Bearbeitungsverfahren mit Staubentstehung: Schleifen, Polieren und Fräsen mit Handwerkzeugen.
- Schweißen und/oder ausreichend hohes Erwärmen beschichteter Bauteile oder mit radioaktiven Oxiden dotierten Elektroden.
- Reinigen und Entfetten mit Flüssigkeiten, Sprays.
- Abrasives Strahlen
- Thermisches Spritzen
- Austausch, insbesondere mit Beschädigung staubender Werkstoffe.
- Schutzgasschweißen (WIG) mit ThO_2 -lichtbogenstabilisierenden Wolframelektroden

Bild 16.3-9

Bild 16.3-9 *(Lit. 16.3-1 und Lit. 16.3-13, -14, -15,- 16): Dieses Bild zeigt eine Zusammenstellung* ***potenzieller Gesundheitsgefahren****. In Triebwerken können sich eine Vielzahl gesundheitsbedenklicher Materialien befinden (Bild 19.1.4-8). Darüber hinaus gilt dies für Wartungs- und Überholprozesse (Bild 19.1.4-10).*

© Axel Rossmann - Turbo
als Schulungsunterlage nur mit

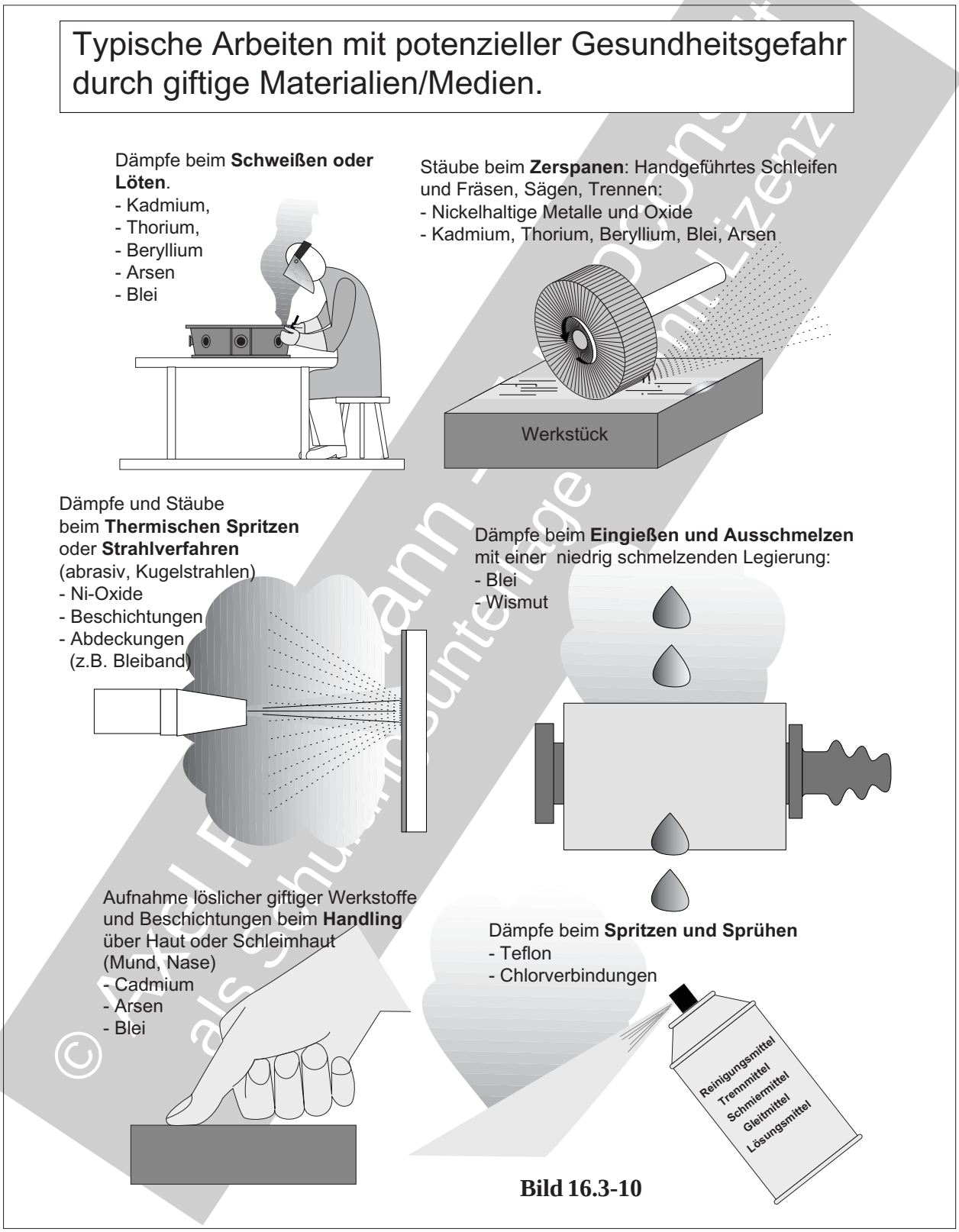


Bild 16.3-10

Bild 16.3-10 *(Lit.16.3-13, - 14, -15, -16): Werkstoffe können auf unterschiedliche Weise gesundheitsgefährdend* ***in den menschlichen Organismus*** *gelangen. Meist ist es das* ***Einatmen,*** *aber auch* ***Hautkontakt*** *oder der* ***Mund*** *sind Möglichkeiten. Die Gefährdung kann, je nach Entstehung, von Dämpfen, Stäuben, Tröpfchen bzw. Aerosolen, Flüssigkeiten und*

Feststoffen ausgehen. Nicht immer erkennt der Praktiker vor Ort die potenzielle Gefahr der Arbeitsbedingungen. Ausgewählte Beispiele sollen gegenüber den Risiken sensibilisieren.

Die gesundheitlichen Folgen können sich, je nach Medium, unmittelbar bzw. ***kurzzeitig*** *(z.B. inhalierte Gase von Lösungsmitteln) durch Unwohlsein in verschiedenen Stufen bemerkbar machen.* ***Mittelfristig*** *dürften sich Schädigungen innerer Organe wie Leber und Nieren zeigen. Von Radioaktivität sind eher* ***Langzeitschäden*** *zu erwarten. Im Extremfall kommt es zur Arbeitsunfähigkeit bis zum Tod.*

Grundsätzlich gilt, dass der Arbeitsplatz vorgeschriebene Hinweise sowie Schutzmaßnahmen wie Absaugungen und Lüftungen oder abgetrennte Räume/Kammern, aufweist. Zum persönlichen Schutz dienen Ausrüstungen wie ***Gesichtsmaske*** *bzw.* ***Atemfilter*** *oder* ***Handschuhe*** *(Lit 16.3-1).*

Schweißen *oder* ***Löten*** *erhitzt Metalle so hoch, dass es zum Abdampfen kommt. Diese Dämpfe können bei ungenügendem Schutz eingeatmet werden (Skizze oben links). Das ist besonders gravierend, wenn die Bauteile zusätzlich* ***leicht verdampfende Beschichtungen wie Kadmium, Blei oder Zink*** *aufweisen, die eigentlich vorher entfernt werden müssen.* ***In Loten*** *können auch äußerst giftige Bestandteile wie Arsen vorhanden sein.* ***Radioaktives Thoriumoxid*** *kann sowohl beim Schweißen von Magnesiumgusslegierungen (Bild 16.3-8) als auch als Bestandteil der* ***Wolframelektroden des Wig-Schweißens*** *(TIG) frei werden.*

Zerspanungsvorgänge*, insbesondere Schleif-,* ***Säge- und Fräsarbeiten*** *mit hochtourigen handgeführten Werkzeugen (Skizze oben rechts), können Stäube in die Atemluft bringen. Besonders bedenklich ist die Entstehung radioaktiver Stäube von Mg-Th-Legierungen (Bild 16.3-8) und Wolfram-Schweißelektroden. Diese Ablagerungen können über lange Zeit in der Lunge schädigend wirken. Werden die relativ spröden Magnesiumlegierungen* ***gebrochen****, z.B. bei der Prüfung von Wareneingangsproben, entstehen Staubwolken (sichtbar bei günstigem Lichteinfall) um die Bruchstelle, die das Prüfpersonal einatmen kann. Auch der Entstehung giftiger Stäube wie von* ***Berylliumlegierungen*** *und* ***Kadmiumbeschichtungen*** *ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen.*

Beim ***Thermischen Spritzen*** *entstehen auf Grund der extremen Temperaturen des Aufheizvorgangs (z.B. Lichtbogen) bzw. des Trägergases Metalldämpfe aus dem Spritzpulver. Abpraller bilden eine gesundheitsbedenkliche Partikelwolke um den Prozess. Beispielsweise gehören hierzu auch scheinbar unbedenkliche* ***Nickeloxide,*** *die im Verdacht stehen Langzeitschäden auszulösen.*

Abrasives Strahlen *und* ***Kugelstrahlen*** *können durch Abtrag Stäube entstehen lassen. Nicht nur die Werkstoffe der Bauteile selbst sind zu beachten. Auch eventuelle Hilfsmaterialien wie* ***Abdeckbänder aus Blei*** *sind problematisch. Werden stark* ***oxidierte Heißteile aus Ni-Legierungen*** *vor einer Rissprüfung abrasiv gestrahlt, ist mit einem besonders großen Anfall von* ***Ni-Oxid-Stäuben*** *zu rechnen. Das erfordert eine geeignete Arbeitsplatzgestaltung. Bei der Beschickung solcher Anlagen bzw. der Entnahme der Teile ist auf aufgewirbelte Stäube zu achten. Gegebenenfalls muss ein entsprechender Schutz getragen werden.*

Um komplex geformte Bauteile für einen Zerspanungsprozess sicher und genau zu positionieren, werden diese ***in eine niedrig schmelzende Legierung eingegossen*** *(Skizze Mitte rechts). Diese Legierungen können problematische Metalle wie* ***Blei und Wismut*** *enthalten. Beim Erschmelzen ist mit Dämpfen zu rechnen, deren Einatmen mittelfristig Organschäden auslösen kann. Beim* ***Ausformen*** *der Teile ist darauf zu achten, dass beim Bruch der oft spröden Eingussblöcke nicht Staub eingeatmet wird. Eine solche Staubentstehung bemerkt man oft erst bei günstigem Lichteinfall.*

Der ***Hautkontakt mit giftigen Metallen*** *(z.B. Kadmium) und/oder deren chemischen Verbindungen (z.B. wasserlösliche Salze) kann über die Blutbahn gesundheitsschädlich wirken.*

© MTU Aero Engines - Turbomeca - Die Schulungsunterlagen gehören uns

*Gefahr kann auch von **Sprayprozessen** ausgehen. Ein Risiko stellen beispielsweise die Trägergase/Flüssigkeiten dar. Aber auch der Wirkstoff selbst mag nicht unbedenklich sein. Beispielsweise muss ein Spray nicht toxisch sein um schädigend zu wirken. Auch das langfristige Zusetzen der Lunge mit Medien wie PTFE (**Trennmittel**) ist zu bedenken. Grundsätzlich sollten die Dosen Schilder mit allen notwendigen Warnungen und Sicherheitshinweisen tragen, die unbedingt zu befolgen sind.*

*Gesundheitsgefährdende Gase und Nebel sind auch bei vielen **galvanischen und chemischen Prozessen und Bädern** zu erwarten. Diesen ist mit geeigneten Anlagen, entsprechend einschlägiger Vorschriften, Rechnung zu tragen. Besonders riskante Prozesse wie **Kadmieren** wurden weitmöglichst verboten.*

*Das gilt auch für **Entfettungsbäder** auf der Basis von Chlorkohlenwasserstoffen („**Tri**“, „**Per**“), die neben einer Organschädigung auch eine Abhängigkeit (Suchtgefahr) erzeugen können. Andere Verfahren wie das **galvanische Verchromen**, bei dem mit bedenklichen Chromoxiden zu rechnen ist, werden nach Möglichkeit mit weniger kritischen Prozessen (z.B. HCOF) ersetzt.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 16.3

16.3-1 TD.Wagner, J.A.Birt, M.Snyder, J.P.Duncanson, FAA Technical Center, „Human Factors Design Guide“, DOT/FAA, CT-96/1, January 15, 1996, zu beziehen durch „National Technical Information Service“, Springfield, Virginia 22161.

16.3-2 F.R.Szecskay, „Engine Design for Maintainability“, Zeitschrift „Aerospace Engineering“, March 25, 1944, Seite 34-39.

16.3-3 F.R.Szecskay, „The GE90-Engine Designing for Maintainability“, SAE-940022, , Seite 73-78.

16.3-4 DEF STAN 00-970 Part 7/1 Section 8, „Maintenance“, Leaflet 800 bis 806.

16.3-5 R.A.LeyesII, W.A.Fleming, „North American Small Gas Turbine Aircraft Engines“, AIAA Smithsonian Institution 1999, ISBN 1-56347-332-1, Seite 701.

16.3-6 S.G.Arunajadai, „A Function Based Design Tool for Failure Mode Identification and Failure-free Design“, Thesis to get the Degree ‘Master of Science in Mechanical Engineering’ 2002, Seite 1-85.

16.3-7 T.Fernando, L.Marcelino, P.Wimalarantne, „Interactive Assembly Modelling within a CAVE Environment“, Zeitschrift „9“ Encontro PortuguCEs de Computa*oGr/Efica“, Marinha Grande, 16-18. 2.2000. Seite 43-49.

16.3-8 Rolls-Royce Ltd., „The Jet Engine“, Publication REF.T.S.D. 1302,July 1969, 3rd Edition, Seite 189.

16.3-9 G.Fischbach., „916 Deutsche F-104 Starfighter, ihre Bau- und Lebensgeschichten“, unveröffentlicht Seite 566.

16.3-10 G.Norris, „GE90 inspections continue after 777 Heathrow surprise“, Zeitschrift „Flight International“, 1-7 April 1998, Seite 10.

16.3-11 NTSB Aircraft incident report, „American Airlines, Inc., Boeing 747-121, N7443PA, San Francisco, California, September 18, 1970“, Report Nr.: NTSB-AAR-71-7, 1971, , 1-7 April 1998, Seite 1-25.

16.3-12 A.R.Oberg, „Design Features for Maintainability in the Pratt and Whiney Aircraft JT9D Gas Turbine Engine“, Proceeding ASE Nr. 680337 der Konferenz: „Air Transportation Meeting New York, N.Y. April 29-May 2, 1968“, Seite 1-8.

16.3-13 V.van Kampen, T.Menting, P.Welge, K.Straif, T.Brüning, „Bewertung der Toxizität und Kanzerogenität von Beryllium für die MAK-Kommission“, BGFA-Info 02/2004, Seite 1-4.

© Axel Rossmann - Turbocoresult
Ausschließlich gestattet nur mit Lizenz

16.3-14 Beryllium Sicherheitsdatenblatt gemäß EG-Richtlinie 91/155/EWG Erstellt 09.01.1996, Ausgabe 07.01.2000, Fa. Heraeus, Seite 1-5.

16.3-15 Wolfram-Thorium Produkte, „Sicherheitsdatenblatt WTh-01“, Ausgabe 03.12.2001, Fa. Plansee, Seite 1

16.3-16 Oak Ridge Associated Universities, Radioactive Consumer Products, „Magnesium-Thorium Alloy (ca. 1980s)“, 1999, Update 04/23.2004, Seite 1-2. www.orau.org/ptp/collection/consumer%20products/magthor.htm.

16.3-17 Transport Canada, Service Difficulty Advisory, AV 2005-01, „Honeywell (Garrett) TPE 331-10UA, Engine Oil Filter Cracks“, 6. April 2005, Seite 1 und 2.

16.3-18 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Torbo-Flugtriebwerken“, Band 5, 2008, Turboconsult, ISBN 978-3-00-025780-3, Bild 19.2-1, Bild 19.2-5, Bild 19.2-11, Bild 19.2-15, Bild 20.1-25, Kapitel 25, Kapitel 25.2.2.1, Bild 25.2.2.1.

16.3-19 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Torbo-Flugtriebwerken“, Band 2, 2001, Turboconsult, ISBN 978-3-00-008429-0, Bild 8.2-3.2.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

16.4 Vermeidung von Arbeitsfehlern mit Hilfe systematischer Analysen

Fehleranalyse als wichtiges Werkzeug zur Fehlervermeidung.

© Weber-Ingenieure - Turboconsult
Verwendung nur mit Lizenz

Dieses Kapitel befasst sich beispielhaft mit **Wartungsfehlern**. Sie beeinflussen die Sicherheit von Maschinen und Anlagen. Hier werden Flugzeuge betrachtet die anwendungsbedingt ein ein hohes Schadenspotenzial haben. Bis zu 30% der Triebwerksabschaltungen im Flug (IFSD) und 15 % der Flugunfälle von Fluglinien gehen auf Wartungsfehler zurück (Lit. 16.4-3). Auf jeden menschlichen Fehler, der zu einem ernsten Vorkommnis (engl. serious incident) führte, kommen schätzungsweise 600 weitere, jedoch weniger gravierende Irrtümer.

Die **Definition von Fachbegriffen** wie Fehler/Irrtümer (engl. errors), Verstöße (engl. violations) enthält Bild 16.4-1 (Lit. 16.4-5). Eine **Statistik der häufigsten Ursachen** zeigt Bild 19.2.5-2.

Um die Fehler zu vermeiden, kann **eine vorbeugende Analys**e dienen. Dabei werden Wartungsvorgänge bzw. deren **Abläufe auf Schwachstellen untersucht**. Sind diese erkannt, folgen Maßnahmen um sie auszuschließen. Zu dieser Art der **Schwachstellenanalysen** gehört die sog. **FMEA** („Failure Mode and Effects Analysis", Band 1, Bild 2.1). Zur Ursachenermittlung dient eine sog. **Problemanalyse** (PA**,** Band 1, Kapitel 2.2). Ist das gelungen, besteht hohe Erfolgswahrscheinlichkeit einer erfolgreichen gezielten Abhilfe. Eine PA ist auf technische und nichttechnische Probleme anwendbar und lässt eine **nachvollziehbare Dokumentation** zu. Für den Fall die Schadensursache bzw. die technische Ursache des Problems im Wartungsbereich ist geklärt, wurde eine besondere Form der Problemanalyse entwickelt und eingeführt, der sog. „**Maintenance Error/Event Decision Aid**" (**MEDA**, Bild 16.4-6). Die Besonderheit dieses Verfahrens ist, **beitragende Einflüsse auf Wartungsfehler** (engl. contributing factors) zu ermitteln. Dafür ist es von entscheidender Bedeutung, **betroffene Personen zu finden, um sie zu befragen**. Es hat sich gezeigt, dass etwa **80 - 90 % der beitragenden Einflüsse im Zusammenhang mit dem Management** stehen. **Nur 10-20% sind vom Wart** (engl. technician) oder dem Prüfer (engl. inspector) zu verantworten. Sind die beitragenden Einflüsse erkannt, ist die Voraussetzung für nachhaltige Abhilfen, insbesondere in **Schwachstellen der Organisation bzw. des Managements**, geschaffen.

Dieses, von der Fa. Boeing für die Luftfahrt entwickelte Verfahren nutzt **Formblätter,** um den richtigen Ablauf und die Vollständigkeit zu gewährleisten (Bild 16.4-2, Lit. 16.4-4). Die Formblätter sind über das Internet (siehe Lit. 16.4-4) zu beziehen. Darin spielt das Gebiet der **Human Factors** (Kapitel 16) eine besondere Rolle. Weil die zufriedenstellende Beantwortung der Formblätter anspruchsvoll ist, hat Fa. Boeing eine **Anleitung** („**Users Guide**", Lit. 16.4-4) erstellt, die ebenfalls über das Internet erhältlich ist.

Vermeidung von Problemen und Schäden mit Hilfe von Fehleranalysen

Fachbegriffe im Zusammenhang mit Überholungs- bzw. Wartungsproblemen/-fehlern.

Irrtum (Error): Ist eine menschliche Tätigkeit oder ein Verhalten, das **unbeabsichtigt** vom vorgesehenen Vorgehen oder Verhalten abweicht.

Beispiele:

- Nicht ordnungsgemäß eingebautes Bauteil,
- Vergessenes Bauteil,
- Ungenügender Ölwechsel,
- Aufsicht übersah den Fehler,
- Im Triebwerk verbliebenes Werkzeug.

ansteigende Häufigkeit

Klassifikation von Irrtümern (Errors) nach einem, von der ICAO empfohlenen Modell

- Unzureichende Aufsicht.
- Falsche Vorgehensweise (incorrect procedure).
- Unzureichende Erfahrung/Training.
- Handbücher nicht richtig angewendet oder es fehlen Vorgehensschritte.
- Fehlende Übereinstimmung mit Regeln und Vorgehensweisen.
- Fehlstellen an Bauteilen, z.B. falsche Kennzeichnung.
- Anwendung einer nicht zugelassenen Modifikation.
- Stress oder Ermüdung des Personals.
- Kommunikationsproblem.

Verstoß (Violation): Ist eine menschliche Tätigkeit oder ein Verhalten, das **beabsichtigt/bewusst** vom vorgesehenen Vorgehen oder Verhalten abweicht.

Beispiele:

- Abweichung von OEM-Angaben (z.B. Handbücher, Verfahrensvorschriften).
- Ignorieren von Anweisungen der Aufsichtsbehörden (z.B. AD-Notes).
- Bewusstes nutzen nicht zugelassener Bauteile.

Die US Navy unterscheidet **drei Arten von Verstößen:**

- **Routine:** Der Ausführende ist an Praktiken gebunden, die Vorschriften brechen und vom Management gebilligt werden.

- **Übertretung (Infraction):** Der Ausführende weicht von der genehmigten Vorgehensweise bzw. den Vorschriften ab, um Zeit zu sparen.

- **Ausnahme (Exception)**: Der Ausführende bricht bewusst bestehende Vorschriften (Regeln) ohne Rücksicht auf die Folgen.

Bild 16.4-1

Vermeidung von Problemen und Schäden mit Hilfe von Fehleranalysen

Auswertung der Ursachen von "Maintenance Mishaps" des UK Flight Safety Committee.

ansteigende Häufigkeit

- **Keine Anwendung von Daten aus Veröffentlichungen oder lokalen Anweisungen.**
- **Anwendung ungenehmigter Verfahren/ Abläufe ohne Bezug auf Vorschriften.**
- Aufsichtspersonal genehmigt das Übergehen technischer Angaben oder von Überholungs-/Wartungsvorschriften.
- **Ungenügende Dokumentation der Arbeiten in den Unterlagen** (maintenance records, work package).
- Unachtsamkeit gegenüber Details/ Selbstgefälligkeit.
- Falsch eingebaute Hardware.
- **Anwendung einer nicht zugelassenen Modifikation.**
- Versäumte Überprüfung des Werkzeugs nach Abschluss der Aufgabe.
- **Nicht ausgebildetes oder nicht zugelassenes Personal führt die Arbeit aus.**
- Die Ausrüstung vor Ort ist für die Aufgabe ungeeignet angeordnet.

Bild 16.4-2

Bild 16.4-1 *(Lit 16.4-5): Beschäftigt man sich mit* ***Problem- und Fehleranalysen*** *ist die* ***Definition der üblichen Fachbegriffe*** *Voraussetzung. In der Fachliteratur kann man Einteilungen in unterschiedliche* ***Irrtumsvarianten*** *finden. Es handelt sich um Irrtümer/Versehen durch*

- ***Unterlassung*** *(engl. omission),*
- ***Anweisung*** *(engl. commission) oder*
- ***Versehen*** *(engl. slip),*
- ***Versäumnis*** *(engl. lap) und*
- ***Verwechslung*** *(engl. mistake).*

In ***MEDA*** *werden dagegen* ***gezielte Beschreibungen der unterschiedlichen Irrtümer*** *verwendet (Beispiele im oberen Rahmen). Angegeben sind auch nach Auswertungen der ICAO* ***Ursachen für Irrtümer entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeit*** *.*

Um eine Verwirrung auszuschließen, werden in MEDA ***Irrtümer/Versehen*** *(engl. errors) von* ***Verstößen*** *(engl. violations)* ***unterschieden*** *(unterer Rahmen). Typische Verstöße sind unter Beispiele aufgezeigt. Die* ***US Navy*** *kennt in einem eigenen MEDA-ähnlichen Verfahren (Human Factors Analysis and Classification System = HFACS) drei Hauptarten von Verstößen:* ***Routine, Übertretung*** *(Infraction) und* ***Ausnahme*** *(Exception). Das* ***United Kingdom Flight Safety Committee*** *teilte im Rahmen eines sog. Mandatory Occurrence Report sog. Wartungsunglücke (engl. maintenance mishaps) zehn* ***Ursachen unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit*** *zu (Bild 19.2.5-2).*

Bild 16.4-2 *(Lit 16.4-5): Ergebnis einer systematischen Auswertung von Vorfällen durch das* ***United Kingdom Flight Safety Committee****.* ***Verstöße*** *(Violations) sind wegen besonderer Sicherheitsrelevanz mit Fettdruck gekennzeichnet.*

Ursachen für solche „Mishaps“ sind im sog. ***„Dirty Dozen“*** *zusammengestellt (Bild 16-1.2).*

© Axel Possmann - als Schulungsunterlagen

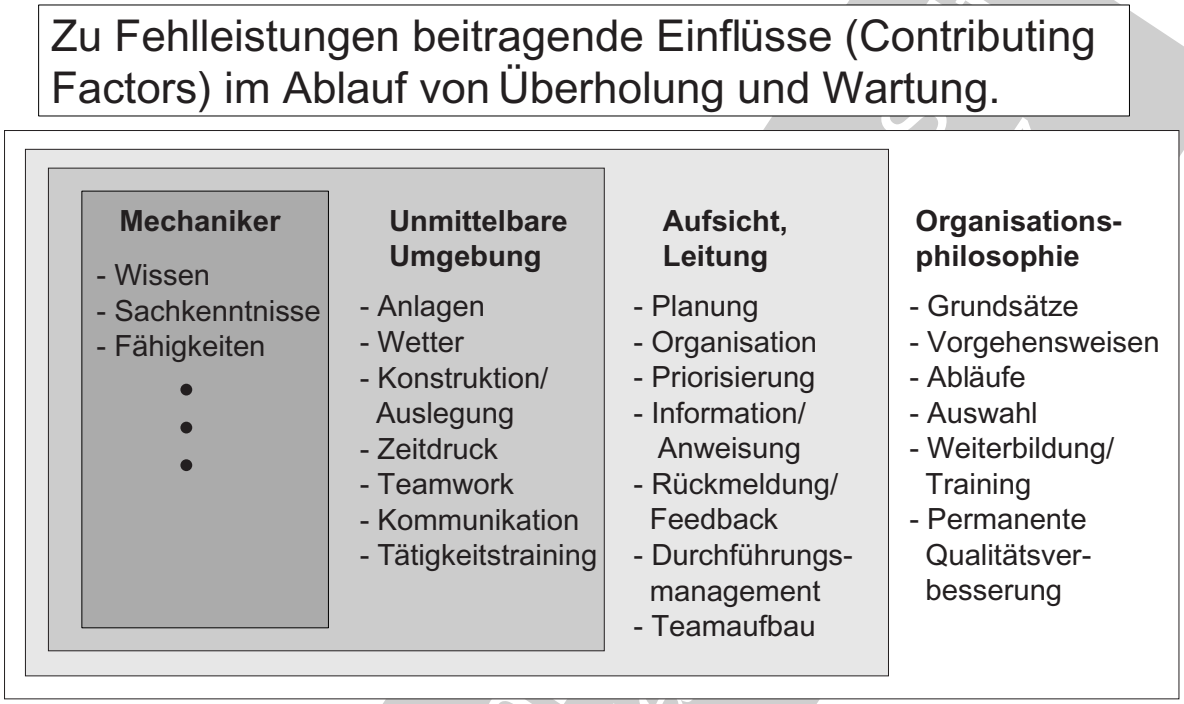


Bild 16.4-3

Bild 16.4-3 *(Lit 16.4-5): Ein beitragender Einfluss begünstigt Irrtümer oder Verstöße. In der technischen englischsprachigen Literatur spricht man etwas umständlicher von einem „Performance Shaping Factor". Unter einem* ***beitragenden Einfluss*** *(engl.* ***Contributing Factor****) wird alles verstanden, was die Arbeit eines Warts oder einer Wartungs-Aufsichtsperson (engl. inspector) beeinflusst. Hierzu gehört eine schlechte Beleuchtung des Arbeitsplatzes (Bild 16-8), unvorschriftsmäßiges Werkzeug und die Unterbrechung des Arbeitsablaufs (Bild 16.1.1-7 und Lit. 16.4-7). Weniger auffällig sind unklare Informationen von Vorgesetzten (Bild 16.1.1-1), längere Zeit zurückliegende Managemententscheidungen oder die Bestätigung der Arbeit eines nicht zugelassenen Warts (Bild 19.2-2.2). Die Darstellung gilt für einen* ***Wart in üblicher Wartungsumgebung und Aufsicht****. Die verschiedenen Rahmen stehen für* ***Organisationsebenen,*** *die als beitragende Einflüsse auf seine Arbeit wirken können.*
*Der Leitfaden in der angegebenen Literatur gibt Hinweise, wie sich diese Einflüsse in den auszufüllenden MEDA-****Formblättern*** *auswirken.*

Bild 16.4-4 *(Lit 16.4-4): Bei* ***MEDA*** *handelt es sich um eine* ***formblattgestützte Untersuchung von Wartungsfehlern****. Eine besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der* ***Ermittlung beitragender Einflüsse****. Diese haben sich als besonders wichtig gezeigt und sind der Schlüssel für effektive Abhilfen.*
Formblätter *können über das Internet bezogen werden. Ebenso der „Maintenance Error Decision Aid (MEDA, Bild 16.4-6)* ***Users Guide****" (Lit. 16.4-5), welcher die* ***Vorgehensweise*** *erklärt. Im Vordergrund steht* ***weniger die Frage nach dem Verursacher als 'Warum das Problem auftrat'****.*
Der Ablauf des MEDA ist in seinen einzelnen Schritten genau geregelt (Schema oben links und Bild 16.4-5).
Die Formblätter führen den Anwender auf diesen Schritten, deren Fragestellungen fünf Teilen zugeordnet werden. Sie sind in den Rahmen kurz dargestellt.

©Axel Bossemann
aus Sicherheitsunterlagen

Vermeidung von Problemen und Schäden mit Hilfe von Fehleranalysen

Es gibt Strategien um Wartungsfehler zu vermeiden Dazu gehört der "Maintenance Error Decision Aid" (MEDA), eine strukturierte systematische Untersuchung.

Die Vorgehensweise erfolgt in Schritten:

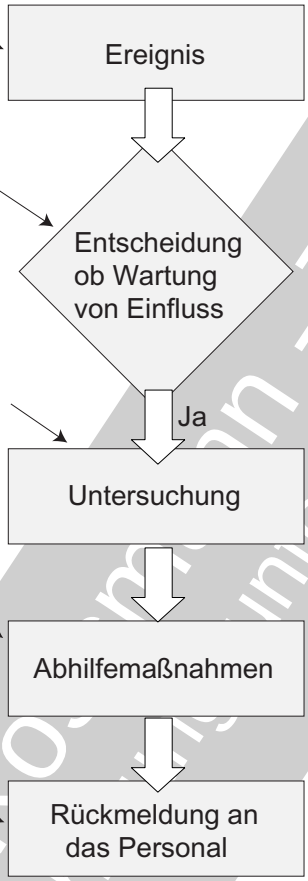
Ein Ereignis kann in sehr unterschiedlicher Form auftreten

Nachdem das Problem gelöst wurde und der Betrieb weiterläuft, wird entschieden, ob das Ereignis im Zusammenhang mit der Wartung zu sehen ist. Wenn ja, erfolgt eine MEDA.

Die Untersuchung erfolgt unter Anwendung der MEDA- Formulare. Damit werden die Art des Fehlers der das Ereignis verursachte sowie beitragende Einflüsse ermittelt. Daraus ergibt sich eine Aufstellung möglicher Abhilfen.

Der Betroffene bzw. Betreiber priorisiert die Abhilfemaßnahmen. Er führt sie ein, um in Zukunft ähnliche Fehler zu vermeiden.

Der Betroffene bzw. Betreiber sorgt für eine Rückmeldung an die Ausführenden (Praktiker). So werden die Werker über gezielte Veränderungen in der Wartung unterrichtet.



MEDA-System

Vorgehen entsprechend Formblättern die im Internet zugänglich und wie folgt strukturiert sind. Hier verkürzt triebwerksbezogen angegeben:

Teil I: **Allgemeine Informationen** und relevante Identifikationsdaten zum Vorgang

Teil 2: **Ereignis** entsprechend Merkmalen und Ablauf **einordnen**. Beschreibung des Vorgangs der das Ereignis auslöste.

Teil 3: **Wartungsfehler,** die das Ereignis verursachten, **einordnen und beschreiben** .
- Montage
- Wartung
- Reparatur
- Fehlereingrenzung: Inspektion, Test
- FOD
- Ausrüstung, Werkzeug, äußere Einflüsse
- Auswirkungen auf das Personal
- Andere

Teil 4: **Beitragende Einflüsse und Beschreibung des Zusammenhangs** bzw. wie diese zum Fehler beitrugen, werden mehreren Abschnitten zugeordnet:

A. **Informationen** wie
- Arbeitskarten
- Wartungshandbücher
- Service Bulletins
- Montagehinweise
- Vorgehen außerhalb der Routine

B. **Ausrüstung**, Werkzeug, Sicherheitsvorkehrungen.

C. **Konstruktion,** Konfiguration, Bauteile/Komponenten.

D. Besonderheiten des **Berufs** /der **Aufgabe**.

E: **Persönliche Anforderungen** wie technisches Wissen/besondere Kenntnisse/Geschick/Erfahrung.

F. **Individuelle (persönliche) Faktoren**.

G. **Umwelteinflüsse**.

H. **Einflüsse der Organisation**

I. **Führung/Beaufsichtigung**

J. **Kommunikation**

K. Andere **beitragende Faktoren**.

Teil 5: **Strategien zur Fehlervermeidung:**

A. Welche **Vorgehensweisen und Prozesse** sind vorgesehen um Fehler zu vermeiden, haben aber nicht funktioniert?

B. **Auflistung der Strategien** zur Fehlervermeidung

Bild 16.4-4

Vermeidung von Problemen und Schäden mit Hilfe von Fehleranalysen

Bild 16.4-5 *(Lit 16.4-5): Im Folgenden werden die* ***Einzelschritte in einer MEDA-Analyse*** *zur Ermittlung und Einordnung (Irrtum/Versehen oder Verstoß, Bild 19.2.5-1) der* ***beitragenden Einflüsse*** *betrachtet.*

*„**1 und 2**“* ***Auftreten eines Ereignisses****: Zuerst werden mit einer* ***Problemanalyse*** *(Band 1,Kapitel 2) die technischen Ursachen des Problems/ Schadens, seine Mechanismen und Abläufe ermittelt. Lässt die Problemanalyse einen* ***Zusammenhang mit einem Wartungsvorgang*** *durch einen Wart (Technician) oder Prüfer (Inspector) erkennen, kann* ***MEDA sinnvoll eingesetzt werden****.*

*„**3**“ Im Gegensatz zur rein technisch orientierten Problemanalyse ist es im Fall einer MEDA von entscheidender Bedeutung die* ***betroffenen Personen*** *(Wart,Prüfer) zu* ***finden,*** *um sie zu befragen.*

*„**4**“* ***Befragung des betroffenen Wartungspersonals****: Es geht um zwei Zielrichtungen:*
- Ermittlung der zum Problem beitragenden Einflüsse und
- praxisbegründete Verbesserungsvorschläge.
Diese Aufgabe ist sehr anspruchsvoll. Deshalb sind ***hilfreiche Formblätter*** *(Lit. 16.4-4) und eine Anleitung dazu (Lit. 16.4-5) erarbeitet worden. Mit eigenen* ***Verbesserungsvorschlägen*** *lässt sich der Befragte,* ***anders als in einer Verursacherrolle, motivierend in den Prozess einbeziehen****.*

*„**5**“ Entsprechend dem Befragungsergebnis in „4“ kann die* ***Befragung auf ein erweitertes Umfeld*** *wie Planer der Wartungsverfahren, Verantwortliche für das Arbeitsumfeld (z.B. Beleuchtung, Werkzeug) oder der Ersatzteilversorgung ausgedehnt werden.*

*„**6**“ Nach Abschluss der Befragungen werden die Ergebnisse/ausgefüllte Formblätter in eine anzulegende* ***Datensammlung eingegeben****. Hier erfolgt eine Analyse auf mögliche Trends bei Vorkommnissen, Irrtümern, Verstößen und beitragenden Effekten. Eine solche Analyse wird um so erfolgreicher, je umfangreicher die* ***bereits vorhandenen Daten anderer Fälle*** *(>20) sind.*

*„**7**“ Bewertung und Entscheidung, um vorgeschlagene* ***Verbesserungen einzuführen****. Solche Vorschläge zur Vermeidung beitragender Einflüsse können aufwändig (Zeit, Kosten) sein. Sie müssen* ***vom Management genehmigt/beschlossen*** *werden. Möglicherweise müssen vor einer Entscheidung weitere Untersuchungen und Analysen erfolgen. Geeignet sind ‘Entscheidungsanalyse`(=EA) und ‘Analyse Potenzieller Probleme’ (= APP, siehe Band 1, Kapitel 2)*

„8“ ***Rückmeldung*** *der Abhilfen/Verbesserungen* ***an die betroffene Wartungsmannschaft****. Nicht nur der* ***Informationsgehalt*** *ist von* ***großer Bedeutung*** *für den Erfolg der Massnahmen. Entscheidend ist auch die* ***Motivation der Mannschaft*** *und die so gezeigte Demonstration der Zielrichtung auf* ***Verbesserungen und nicht in Richtung einer Bestrafung****.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Vermeidung von Problemen und Schäden mit Hilfe von Fehleranalysen

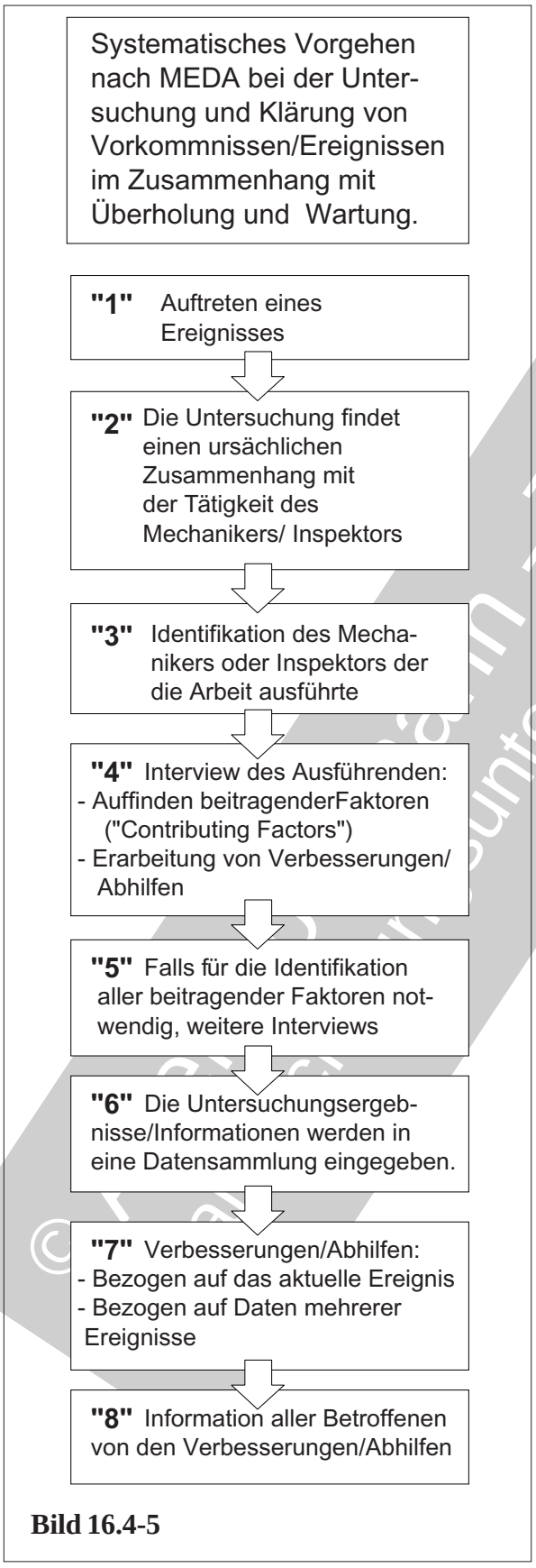
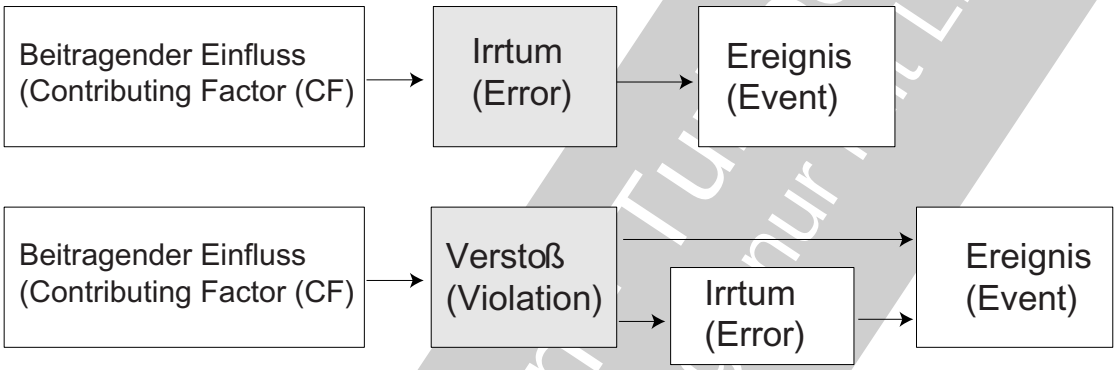


Bild 16.4-5

© Turboconsult
Lehrunterlage nur mit Lizenz

Modell nach MEDA des Zusammenwirkens der ursächlichen Faktoren die zu einem Ereignis (Problem, Event) führen.

Grundmodelle:



Detailliertes Modell:

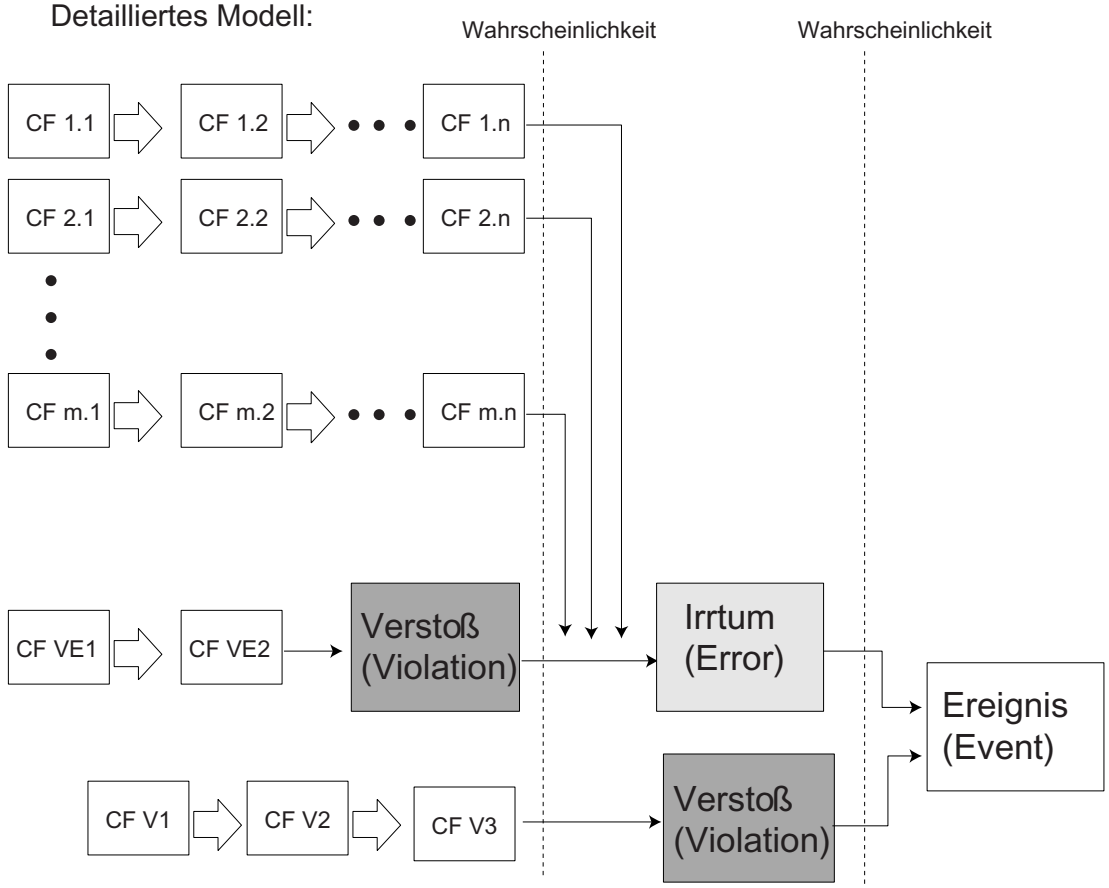


Bild 16.4-6

Bild 16.4-6 *(Lit. 196.4-5): In seiner einfachsten Form besteht* ***MEDA*** *aus den zwei oben dargestellten* ***Grundmodellen****. Im ersten Fall (oberes Grundmodell) entsteht* ***aus einem beitragenden Einfluss (CF) ein Irrtum*** *und aus diesem das Ereignis. In Fällen wie einer vergessenen O-Ring-Dichtung an einem Magnetstopfen im Ölkreislauf (Lit. 16.4-7) kommt es mit Sicherheit zum Ölaustritt bei Startleistung. In den meisten Fällen dürfte jedoch die Wahrscheinlichkeit der Kausalität zwischen den Schritten nicht bei 100 % liegen. Aus diesem Grund werden zwischen zwei Schritten* ***Wahrscheinlichkeiten eingeführt****. Häufig liegt nicht nur ein beitragender Einfluss vor. So kann ein solcher Einfluss auf einen weiteren wirken usw. Beispielsweise können Unklarheiten in Handbüchern und Anweisungen Probleme der Informationen in der Schichtübergabe intensivieren und diese von organisatorischen Schwachstellen verschärft werden (Bild 16.1.1-6.1). Es können sich auch mehrere, voneinander unabhängige Ketten aufeinander wirkender beitragender Einflüsse, auf den Irrtum und letztendlich das Ereignis auswirken.*

Ist ein ***Verstoß****, d.h. eine bewusste Abweichung von Vorschriften im Spiel, kann dies* ***direkt*** *das Ereignis beeinflussen (unteres Grundmodell). Das kann aber auch* ***indirekt über einen Irrtum*** *erfolgen, indem es diesen auslöst.*

Im Rahmen unten sind Zusammenhänge und Abfolgen für einen komplexen, jedoch durchaus realistischen Fall dargestellt.

© Axel Bossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 16.4

16.4-1 G.J.Fogarty, R.Saunders, R.Collyer, „Developing a Model to Predict Aircraft Maintenance Performance“, Beitrag zum „10th International Symposium on Aviation Psychology“, May 3rd - 6th, ColuSmbus Ohio, Seite 1-6.

16.4-2 E.G.Tripp, „Human Factors in Maintenance“, Zeitschrift „Business&Commercial Airlines“, April 1999, Seite 82-87.

16.4-3 V.P.McConnell, „Workforce Issues: Essential Human Factors“, Zeitschrift „Defense Daily Network“, www.aviationtoday.com, Mar 24, 2006, Seite 1-6.

16.4-4 „Maintenance Error Decision Aid (MEDA) Results Form“, www.chirp-mems.co.uk, March 24, 2006, Seite 1-6.

16.4-5 „Maintenance Error Decision Aid (MEDA) Users Guide“, Fa. Boeing, , 2006, Seite 1-51.

16.4-6 R.Hughes, Interview in der Zeitschrift „Aviation Today“, www.aviationtoday.com, Mar 24, 2006, Seite 1-3.

16.4-7 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Torbo-Flugtriebwerken“, Band 5, 2008, Turboconsult, ISBN 978-3-00-025780-3, Bild 19.1-8, Bild 19.2-2.1, Bild 19.2-2.2, Bild 19.2-3.1 und Bild 19.2-3.2.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Sachregister

A

Abblasem mit Druckluft 18.3-5
Abblättern von Schichten 18.3-29
Abdeckungen
für Diffusionsbeschichtung 18.3-43
gegen Metallspritzer 18.6-20, 18.6-22
gegen Oberflächenverunreinigungen 18.3-16
gegen Schweißspritzer 18.3-43
Strahlen 18.3-42
Verunreinigung durch 18.3-11, 18.3-42
Abfangen eines Bruchs 15.2.3-17
Abgase, Transport von Verunreinigungen 18.3-5
Abgasführung 18.9-4
Abhilfen, Abhilfemaßnahmen 17.1-7
gegen Scheibenverzug 18.9-17
Abkühlen, Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-31
Ablagerungen, ‘fouling’ 18.1-8
Ablenkung bei der Wartung 16-6
Ablösung einer Elastomerschicht 18.8-4
Abplatzen
kermaische Panzerung 18.8-4
von Wärmedämmschichten, Folgeschäden 18.8-3, 18.8-4
Spacerbelag 18.8-4
Abpraller, Thermisches Spritzen 18.3-43
Abrasives Strahlen
Druckspannungen 17.2-16
Entgraten 18.2-15
Gratbildung 18.2-7
Abrieb, Fe-haltig 18.3-6
Abschätzung, Rissfortschritt 15-18
Abweichung
Definition 17.1-11
Rückschlüsse 17.5-4
AD (Airworthiness Directive, Lufttüchtigkeitsanweisung), falsche Interpretation 16.2-12
Adhäsion, Definition 18.8-1, 18.8-4
Adiabatische Scherbänder 18.5-8
Aerodynamische
Anforderungen, Schaufelblatt 18.1-27
„Qualität“ einer Oberfläche 18.1-5
Aircraft engine mechanic. Siehe Triebwerksmechaniker: Berufsbild
Aircraft engine repairer.*Siehe* Triebwerksreparierer
Al-Diffusionsschichten, Sprödigkeit 18.7-4
Al-Legierungen 15.2.2-18
Almenintensität
Messung 17.3-34
Rückschluss auf Eigenspannungen 17.3-34, 18.4-40
Anbauelemente, Austauschbarkeit 16.3-1
Änderung von Fertigungsparametern, Auswirkung 18.4-7
Anlauffarben
auf Rissfläche 18.7-13
auf Silber 18.3-10
bei Titanlegierungen 18.6-19
Hinweis auf Übertemperatur 18.6-19
konzentrisch 18.6-20
Lage am Bauteil 18.6-20
Merkmale
Begrenzungen 18.6-20
Späne 17.1-18
Temperaturangaben 18.7-13
tiefergehende Schädigung 18.6-20
Werkstück 17.1-18
Werkzeugschneide 17.1-18
Anodisches Ätzen 18.5-8
Anriss
aus Bruchgefüge 18.7-13
Ort, Identifikation 18.7-13
Technischer 18.7-3
Ansaugen von Verunreinigungen 18.3-8
Anschlüsse, Wartbarkeit 16.3-4
Anschmelzungen
durch Bleiband 18.3-24
Fremdmetall Verunreinigungen 18.3-22
niedrig schmelzende Phasen 18.3-13
Anstreiffläche
Fertigungseonfluss 18.1-10
Nacharbeit 17.5-7
Anstreifschicht, Metallfilz 18.8-3
Anstreifverhalten
Labyrinth 18.1-10
Schaufelspitze 18.1-10
Anstrengung 18.1-18
Anweisung 16.4-3
Feedback 16-14
Folgen einer Abweichung 16-9
Verständnis 16.2-2
Anwendungsgrenzen 15-12
APP. Siehe Analyse potenzieller Probleme
Approved Maintenance Organisations 16.1-6
Arbeitsanweisungen 16.2-1
Arbeitsdokumente, ungenügende 16.2-5
Arbeitskarten 16.1.1-11, 16.2-6, 16.2-12
in Muttersprache 16.2-6
nach Handbuchangaben 16.2-6
Wartung 16.1.1-7
Arbeitsplatzgestaltung 17.1-8
Arbeitsumgebung 16-5
Mängel 16-18

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Arbeitsunterlagen 16-1
zu Rückmeldung 16.2-18
As HIP 15.2-10, 15.2.2-9
ASAP. *Siehe* Assessment of Aviation Safety Programs
Asbest, Gesundheitsgefahr 16.3-15
Assessment of Aviation Safety Programs 16-13
Atemfilter 16.3-19
Ätzen
als Kennzeichnung 17.4-9
anodisch 18.5-8
BEA an Titanlegierungen 18.3-30
Blue Etch Anodizing 18.5-8
Einfluss auf Rauigkeit 18.1-8
Topografie 18.1-18
zur Rissöffnung 17.3-16
Ätzmittel
Aufstehen von Graten 17.3-16
Reste im Triebwerk 18.3-30
Rückstand, Drahtbalg 18.3-34
im Kühlluftkanal 18.3-18
Aufbringung, Beschichtung 18.8-8
Auffindwahrscheinlichkeit 17.3-4
Einfluss der Fehlerart 17.3-6
Einfluss der Fehlereigenschaften 17.3-7
Einfluss der Fehlergeometrie 17.3-7
Einfluss der Fehlerlage 17.3-7
Einfluss der Korngröße 17.3-7
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit 17.3-19
Einfluss von Frustration 17.3-19
Einfluss von Werkstoffeigenschaften 17.3-6
Risse in der Fertigung 18.7-26
Röntgenprüfung 17.3-4
Ultraschallprüfung 17.3-5
von Fehlern in Bohrungen 17.3-5
Wirbelstromprüfungen 17.3-5
ZfP 17.3-2
Aufheizen
Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-31
von Kanten 18.2-1
Auflagefläche
Blechzwischenlage 18.1-25
Dichtwirkung 18.1-10
Reibbeiwert 18.1-25
Rissbildung 18.1-25
Tragverhalten 18.1-7
Wirkung von Gleitlack 18.1-25
Auflageschichten, Rissbildung 18.7-10
Aufnahme von Informationen 16-2
Aufpressen, Beschädigungsrisiko 18.5-2
Aufschieben, Zentrierflächen 18.5-2
Aufschmierungen 18.3-3
beim Schleifen 18.3-6
durch Vorrichtungen 18.3-6
Metallverunreinigung 18.3-22
Aufschrumpfen, Beschädigungsrisiko 18.5-2
Aufsicht 16-20
Aufwand für Verbesserungen 15.2-11
Ausbeulung, Gehäuse 16.1-10
Ausbildung 17.1-5
Mangel 17.3-19
Wartungspersonals 16.1-4
Ausfallmusterprüfung 15-9, 17.1-6
Ausfallsicherheit 17.1-3
Ausfallwahrscheinlichkeit eines Triebwerksbauteils 17.1-3
Aushärten, Maßänderung bei Nickellegierungen 18.9-15
Auslegung
Auswirkung auf Fertigung 17.2-4
Bauteile 15.2.2-7
eines Bauteils 15.2.2-5
geeignete Werkstoffdaten 15.2.3-19
Lebensdauer 15.2.3-10
Philosophie 15-14
Werkstoffgrenzen 17.2-4
Ausnahme (Definition) 16.4-3
Ausschussraten, hohe 15-8
Äußere Merkmale, Schaden 16.1-8
Austausch, Turbinenräder 16.1-13
Austauschbarkeit von Anbauelementen 16.3-1
Austretende Medien 16.1-10
Auswahl von Mitarbeitern 15.2.2-3
Auswertung von Prüflaufteilen 15.2.3-23
Aviation Maintenance Human Factors 16.1.1-1
axf-Prüfung, Verdichterschaufel 17.3-30

B

Bad (Prozessbad)
Gummiabdeckungen 18.3-43
Strömung, Einfluss auf Rauigkeit 18.1-8
Verunreinigung
Einfluss von Riefen 18.1-18
Hinweise 18.3-40
Bajonettverschluss, Scheibenverbindung 15-34
Base Check Manual (Prüfhandbuch) 16.1.1-14
Base Maintenance Certifying Engineer 16.1-8
Bauarbeiten, Oberflächenverunreinigungen 18.3-15
Bauteil
Auslegung 15.2.2-5, 15.2.2-7
Belastung, Einfluss auf Kennzeichnung 17.4-6
Dokumentation 16-12
Eigenschaften, Schäden 16.1-10
Lage 16.2-1
Sicherheit bei Rissbildung 18.7-2
Verhalten, Änderung durch Verbiegen 18.5-21
BEA. *Siehe* Blue Etch Anodizing
Bearbeitung, Oberflächenverunrenigung 18.3-3
Bearbeitungsfläche, Schwingermüdung 18.1-10

© Axel Rossmann - Turbosoft
als Schulungsunterlagen mit Lizenz

Bearbeitungsmaschine
Auswirkung eines Wechsels 18.4-4
Steifigkeit 17.1-14
Bearbeitungsmerkmale, Rissverlauf 18.7-9
Bearbeitungsrichtung, Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.1-14
Bearbeitungsriefen
an Rotorscheiben 18.1-15
in Umfangsrichtung 18.1-10
Bearbeitungsspuren,
Lage zu Orientierung von Bearbeitungsspuren 18.6-20
Orientierung zu Anlauffarben 18.6-20
Befestigungsschellen, Probleme 16.1-8
Befragung, Wartungspersonal bei Problemen 16.4-6
Befund, Optischer 16.1-13
Begriffssicherheit 16.2-9
Beherrschbare Schädigung 15-29
Beilagen, Einstellscheiben 16.3-4
Beispiele, praxisnah 16.1-4
beitragender Einfluss 16.4-4
Beladungseffekt durch Strahlpartikel 18.3-6, 18.8-11
Belastung
Dehnungsgesteuerte 15-29
Kraftgesteuert 15-28
Schaufelfuß 18.9-8
Beleuchtung, Montage 16-18
Benetzbarkeit/Benetzubg 17.3-16
Beeinflussung durch Oberflächenverunreinigung 18.3-11
ZfP 17.3-2
Berstschleuderversuch, Aussagegrenzen 15.2.3-7
Berufsbild 16.1-6
Prüfer 16.1-1
Triebwerksmechaniker 16.1-1
Berylliumlegierungen, Gesundheitsgefahr 16.3-19
Beschädigung
Bewertung 16.1-6
interpretieren 16.2-5
Oberfläche 17.2-2
Beschaffungskosten 17.2-4
Beschichtung 18.8-3
Abdeckung gegen Spritzer 18.6-22
Aufbringung 18.8-8
Einfluss auf Struktur 18.3-29
Einfluss der Prozessparameter 18.8-11
Einfluss des Grundmaterials 18.8-8
Fehler, Folgeschäden 18.8-3
Haftfestigkeit 18.8-4
Kennzeichnungen 17.4-6
Messung der Haftfestigkeit 18.8-13
Primer 18.8-8
Rissbuildung 18.7-10
Risse in 18.7-6
Schälvorgang 18.8-8
Schwingfestigkeit 17.2-11
Strippen 18.9-19
Temperaturführung 18.8-8, 18.8-12
Übergänge 15-29
Vorwärmung 18.8-12
Zugspannungen 17.2-11
Beschichtungsprozess/-vorgang
Einfluss der Umgebungsbedingungen 18.8-8
Veränderungen 18.8-10
Beschichtungspulver
als Oberflächenverunreinigung 18.3-14
Oberflächenverunreinigung 18.3-4
Besprechung zum Arbeitsablauf 16-6
Betreiber, Verstöße 16-9
Betrieb, Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-14
Belastung, Einfluss Fehlergröße 17.3-2
Eigenschaften, Einfluss von Eigenspannungen 18.4-4, 18.4-29
Einflüsse 16-11
Verhalten
bei Rissen 18.7-26
Einfluss der Rauigkeit 18.1-7, 18.1-12
Einfluss von Graten 18.2-11
Wirkung aggessiver Rückstände 18.3-37
Beurteilung,
Heißteilschäden 16.1-15
Unterlagen 16.1-15
Bewertung von Beschädigungen 16.1-6
Bibliotheksbesuche 15-3
Bildbearbeitung, Problematik als Dokumentation 17.3-26
Bilder 16.2-1
im Überholhandbuch 16.1-13
Bildschirmarbeit, /-arbeitsplatz 15-2
Problematik 17.1-9
Bindefehler 18.7-2
Diffusionsschweißen 18.9-12
durch Verkanten 18.2-4
Binokular 16.1-13
Blasenbildung
in einem Prozessbad, Einfluss auf Rauigkeit 18.1-8
von Schichten 18.3-29
Blech, Wandsttärkenabweichung 18.9-1
Blechkonstruktionen 15.2.2-18
Blechzwischenlage, Auflagefläche 18.1-25
Blei
Gesundheitsgefahr 16.3-19
Lötrissigkeit 18.3-27
Bleiband 18.3-4
Anschmelzung durch 18.3-24
Oberflächenverunreinigung 18.3-14
Blind Spots bei Ultraschallprüfung 17.3-9
Bling-Konstruktionen 15-37
Blisk

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Maßabweichung 18.9-1
Mistuning 18.9-6
Schwingung 18.9-6
Blue Etch Anodizing (BEA) 18.3-30, 18.5-8, 18.6-19
BMCE. Siehe Base Maintenance Certifying Engineer
Bohrlochmethode, Mesung von Eigenspannungen 18.4-40
Bohrung
Oberflächenbeschädigung 16.2-5
POD 17.3-5
Stromkontakt 18.6-3
Bohrverfahren
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 17.2-13
für Kühlluftführung 18.9-11
Bolzen von Kupplungen 16.3-8
Bombierung, Schaufelfußauflage 18.9-8
Bornitrid, Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Boroskop
Inspektion, Schaufelbeschäduigung im Verdichter 16.1-18
Überprüfung, Überwachung 16.3-14
Brennende Schmelztropfen 18.6-7
Brennkammer
Einfluss von Rauigkeit 18.1-12
Gehäuse
aufreißen 16.2-10
Flansch 16.2-12
Versprödung durch Ni-Cd 18.3-24
Brinelling 18.5-9
Brinelling Pit. *Siehe* Verschleißgrübchen
Bronzen, Lötrissigkeit 18.3-27
Bruch
abfangen 15.2.3-17
einer Welle, Vermeidung durch Lageranordnung 15-42
Bruchfläche
Auswertung, aufgebrochener Risse 18.7-13
Mikroskopische Untersuchung 18.7-13
Bruchgefüge, Anriss 18.7-13
Bruchmechanik 15-17
Bruchstückgröße, Eingfluss von Clappern 15-26
Brünieren 18.1-18
von Getriebezahnrädern 18.1-20
Büchsendeckeleffekt 18.9-17
Burr. *Siehe* Grat

C

C-Faser verstärkte Keramiken 15.2.2-3
CAD. *Siehe* Computerbasiertes Konstruieren
Ccarbon impact 15.2.2-19
Certifying Staff 16.1-6. *Siehe auch* Prüfer: Berufsbild
Chargen-Nr 17.4-1
Chargiergestelle, Wärmespannungen 18.4-37
Chatter marks. *Siehe* Rattermarken
Chemische Abtrag, Einfluss auf Rauigkeit 18.1-8
Chemische Auflösung, Rissbildung 18.7-2
Chemische Beschichtungen
Eigenspannungen 18.4-11
Messung 18.4-40
Wirkung von Druckeigenspannungen 18.4-25
Chemische Verfahren, Topografie 18.1-18
Chemische Bindung 18.8-4
Chlorhaltige Lösungsmittel, Bruch einer Stahlwelle 18.7-21
Chlorverunreinigung, Drahtbalg 18.3-34
Clapper, Einfluss auf Bruchstückgröße 15-26
CMB. *Siehe* Comuterbasiertes Konstruieren,
Commission. *Siehe* Anweisung
Complacency. *Siehe* Selbstüberschätzung
Computationally based design. *Siehe* Comuterbasiertes Konstruieren,
Computer Aided Design/Comuterbasiertes Konstruieren 15-2, 15-4
Constant Speed Drive 16.1.1-15
Containment, fasertechnisches 15-13, 15.2.3-12
Contributing Factor. *Siehe* beitragender Einfluss
Cr-Basis-Legierungen 15.2.2-3
Cr-Schicht
Eigenspannungen 18.4-11
Eigenspannungsmessung 18.4-42
Risse 18.7-6
Crack initiation life. *Siehe* Inkubationszeit: Rissbildung
CSD. *Siehe* Constant Speed Drive

D

Damage Tolerant Design 15-7, 15-16, 15-18, 15-22, 15-35, 17.2-1
Konzept 15.2.2-10
von Rotorscheiben 15-37
Dämpfung integraler Bauteile 15-25
Data-Matrix Kennzeichnung (2D-) 17.4-12
Datenbanken 15-3
Dauerfestigkeit, Einfluss der Rauigkeit 18.1-20
Definition
Abweichung 17.1-11
Adhäsion 18.8-1, 18.8-4
Eigenspannungen 18.4-2
Fähigkeitskennwert 17.1-11
Haftfähigkeit 18.8-1
Haftfestigkeit 18.8-1
Kohäsion 18.8-1, 18.8-4
Nacharbeit 17.5-1
Prozessbreite 17.1-11
Qualität 17.1-1
Riss 18.7-2
Rissanzeige 18.7-1

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

von Fachbegriffen 16.4-1
Dehnungsbehinderung 15-29
Eigenspannungen 18.4-34
Dehnungsgesteuerte Belastung 15-29
Delayed cracking. *Siehe* Verzögerte Rissbildung
Demonstrationsversuch 15.2.3-7
Zyklische Lebensdauer 15.2.3-7
Diagnose, Probleme 16.1-6
Dichtwirkung einer Auflagefläche 18.1-10
Diffusion
Versprödung durch Kadmium 18.3-24
von Oberflächenverunreinigunen 18.3-13
Diffusionsschicht/-beschichtung
Abdeckungen 18.3-43
Einfluss der Schichtdicke 18.7-4
Empfindlichkeit 18.7-4
Rissbildung 18.7-11
Schädigung durch Verschmutzung 18.3-20
Sprödigkeit 18.7-4
Diffusionsschweißen
Bindefehler 18.9-12
Einfluss der Rauigkeit 18.1-20
Einfluss von Maßänderungen 18.9-15
Verfahren 18.9-12
Diffusionsverbindung, Fehler 15-40
Diffusionsvorgänge, Fremdmetall Verunreinigungen 18.3-22
Direct Part Marking Identification 17.4-1, 17.4-12
Dirty Dozen 16.4-3
Dokumentation 16.2-7
in der Wartung 16-6
Problematik der Bildbearbeitung 17.3-26
visueller Befunde 17.3-26
von Schäden 15-4
ZfP-Befund 17.3-2
Dokumente 17.1-5
Eigenschaften 17.1-5
Interpretieren 16.1-6
Dokumentieren einer Wartung 16.1.1-15
DPM, DPMI. *Siehe* Direct Part Mark; Direct Part Mark Identification
Drehbearbeitung, Riefen 18.1-15
Drehmomentschlüssel, Zugänglichkeit 15-40
Drehriefen, Schwingbruch eines Spannbolzens 18.1-22
Druckeigenspannungen 17.2-9, 18.4-1
an der Oberfläche 18.4-19
Auswirkung bei dünnen Querschnitten 18.4-20
Bauteilverhalten sicherer 18.4-25
Einfluss des Abbaus auf Überholintervalle 18.4-33
Entschärfen einer Oberflächenbeschädigung 18.4-25
in konvexen Flächen 18.4-27
Schutz gegen Spannungsrisskorrosion 18.4-25
Schutz gegenüber Oberflächenschädigungen 18.4-19
Wirkung bei chemischer Beschichtungen 18.4-25
Wirkung bei galvanischer Beschichtung 18.4-25
Drücken (Blechverformung) 18.1-18
Druckluft, Abblasem mit 18.3-5
Druckrost. *Siehe* Fretting
Dual Property, Turbinenräder 18.9-12
Durchflussmessung 18.3-40
Durchschlupf, ZfP 17.3-2
Durchströmte Querschnitte, Verschmutzung 18.3-17

E

E-Modul, Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-16
ε-Schicht, Nacharbeit 17.5-10
EA. *Siehe* Entscheidungsanalyse
EB-Schweißen, Fügespalt 18.9-17
ECM. *Siehe* Elektrochemische Bearbeitung
Nacharbeit, Einfluss auf die Schwingfestigkeit 17.2-13
Eddy Current Inspection. Siehe Wirbelstromprüfung
Edelrost. *Siehe* Fretting
EDM. *Siehe* Funkenerosion
EDV-Einsatz. 16-12
Effusionskühlung 15.2.2-19
Turbinenschaufeln 15.2.2-3
Eiffelturmeffekt 17.3-30
Eigenspannung/-en 18.4-1
Abbau durch Glühen 18.4-32
als Wärmespannungen 18.4-37
Arten. Mikro-, Makro- 17.3-34
aus den Schmiedeprozess 15.2.2-8
Auslösen von Maßänderungen 18.4-1
Auswirkung auf Turbinenrad 18.4-29
Auswirkung auf Zahnräder 18.4-29
Auswirkung in Gehäusen 18.4-29
Begrenzung beim Fertigungsprozes 18.4-35
bei Rückfederung 18.4-35
Chemische Schicht 18.4-11
Cr-Schicht 18.4-11
Definition 18.4-2
Dehnungsbehindertes System 18.4-34
durch Richten 18.5-22
durch Thermisches Spritzen 18.4-10
durch Verformungsverfahren 18.4-13
durch Verspannung 18.4-38
Einfluss auf Betriebseigenschaften 18.4-4, 18.4-29
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.4-7
Einfluss auf die Haftfestigkeit 18.4-26
Einfluss auf Passungen 18.4-2
Einfluss auf Spannungsrisskorrosion 18.4-26
Einfluss auf Wasserstoffversprödung 18.4-26
Einfluss der Festigkeit 18.4-16
Einfluss der Montage 18.4-14

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einfluss der Steifigkeit 18.4-9
Einfluss der Temperaturverteilung 18.4-31
einfluss der Verfestigung 18.4-16
Einfluss der Wärmedehnung 18.4-16
Eifluss der Wärmeleitfähigkeit 18.4-17
Einfluss der Werkstoffeigenschaften 18.4-16
Einfluss des Abkühlens 18.4-31
Einfluss des Aufheizens 18.4-31
Einfluss des Betriebs 18.4-14
Einfluss des E-Modul 18.4-16
Einfluss des Querschnitts 15.2.2-8
Einfluss von Gefügeveränderungen 18.4-17
Einfluss von Inhomogenitäten 18.4-17
Einfluss von Nachgiebigkeit 18.4-9
Entstehung bei Wärmebehandlung 18.4-12
Entstehungn durch Richtvorgänge 18.4-38
Funkenerosion 18.4-11
galvanische Schicht 18.4-11
galvanischer Beschichtung 17.3-34
Härteschicht 18.4-10
I.-, II.-, III.-Art 18.4-2
in faserverstärktem Titanl 18.4-14
in FVK 18.4-14
in Kanten 18.4-21
in Rohrleitungen 18.4-38
in Rotorscheiben 18.4-14
in Turbinenschaufel 18.4-14
in Umfangsrichtung 17.2-16
in Wärmedämmschicht 18.4-14
Keramische Schichten 18.4-10
Messung 17.3-27, 17.3-34, 18.4-1, 18.4-40
in chemischen Schichten 18.4-40
in Cr-Schicht 18.4-42
in Galvanischen Schichten 18.4-40
in Ni-Schicht 18.4-42
mit Bohrlochmethode 18.4-40
mit Neutronenbeugung 17.3-34
mit röntgenografischer Methode 17.3-34, 18.4-40
Modell 18.4-4
Ni-Schicht 18.4-11
Rückschluss aus Almenintensität 17.3-34
schädigende Wirkung 18.4-25
Segmentierungsrisse 18.4-10
sichereres Bauteilverhalten 18.4-25
Umlagerung 18.9-17
Umlagerung bei Abtrag 18.4-13
Verzug 18.4-2
vom Gießen 18.4-13
vom Kugelstrahlen 18.4-9
vom Strahlen 18.4-9
von Fertigungsverfahren 18.4-7
Wärmebehandlung 18.4-29
Warmfestigkeit 15.2.2-8
Wirkung
äüßerer Kräfte 18.4-2
von Wärmespannungen 18.4-9
Zerspanen 18.4-7
Zusammenhang mit Almenintensität 18.4-40
Zustand 15-29
Eigenspannungsabbau
durch Relaxation 18.4-2
durch Rissbildung 18.4-2
Spannungsarmglühen 18.4-34
Einatmen giftiger Medien 16.3-18
Einbetten, Oberflächenverunreinigung 18.3-3
Eindringprüfung 17.3-8
Benetzbarkeit 17.3-2
Einfluss der Fehlstelle 17.3-14
Einfluss von Handcreme 17.3-17
Einfluss von Silikonöl 17.3-17
Einfluss von Silkon 18.3-10
Einfluss von Sprays 17.3-17
Hintergrundfluoreszenz 17.3-19
Hintergrundfluoreszenz durch Riefen 18.1-18
Nachweis eines übersehen Risses 18.7-13
Remover 17.3-20
Rissöffnung durch Temperaturzyklus 17.3-16
Eindrücke
Späne 18.5-1
Ursachen 18.5-19
Einfluss
auf Spannungsrisskorrosion 18.7-17
beitragender (Definition) 16.4-4
Eingießen 18.5-2
Eingussmasse, Rissbildugnin Turbinenschaufel 18.3-32
Einkristallwerkstoff, Schlagzähigkeit 15.2.2-14
Einlaufbelag/-schicht 18.8-3
Beschädigung bei Montage 16.3-13
Elastomere 18.8-3
Lot 18.8-3
Metallfilze 18.8-3
Silikongummi 18.8-3
Thermische Spritzschichten 18.8-3
Einsatzhärtung/-schicht 18.9-13
Schwingriss 18.7-6
Einsparungen, Wartungspersonal 16.1.1-1
Einzelfall 15.2.2-10
Eisen. *Siehe* Fe-haltiger Abrieb
Elastische Bälge, Probleme 16.1-8
Elastizitätsmodul. *Siehe* E-Modul, Einfluss auf Rissbildung 18.7-6
Elastomere
Einlaufschichten 18.8-3
Schichtablösung 18.8-4
Electrical arc-out. *Siehe* Lichtbogen
Electrical Pitting. *Siehe* Schmelzkrater
Electro Chemical Milling (ECM) 18.5-13
Elefant Tail (Gratbildung) 18.4-22

© Axel Rossmann - Turbconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Elektrische Funken 18.6-13
schädigende Wirkung 18.6-13
Überhitzung 18.6-3
Elektrische Verfahren, Überhitzung 18.6-3
Elektrochemische Bearbeitung/Verfahren
Entgraten 18.2-15
Kurzschluss 18.6-14
Funkenbildung 18.6-17
Schwingermüdung 18.5-13
Elektrodenbefestigung, Überhitzung 18.6-3
Elektronenmikroskopische Untersuchung. *Siehe* REM
Elektronenstrahl, Schädigung durch Schmelzperlen 18.6-13
Elephant Tail (Grattyp) 18.2-7
Engineering orders. *Siehe* Arbeitskarten
Englische Sprach, Kenntnisse 16.1.1-9
Enschäumungsmittel 17.3-17
Entfettungsbad
Gesundheitsgefahr 16.3-20
Rissbildung 18.7-17
Spannungsrisskorrosion an Titanlegierungen 18.3-35
Verschleppung 18.3-5
Entgraten 18.2-2, 18.2-15
Abrasives Strahlen 18.2-15
Elektrochemische Verfahren 18.2-15
Kosten 18.2-8
ungünstig 18.2-9
Verfahren 18.2-15
Entlackungsbad, Rissbildung 18.7-19
Entlastungsbohrungen 15-29
Entlüftungen, Verunreinigungsquelle 18.3-5
Entschäumungsmittel, Oberflächenverunreinigung 18.3-10
Entscheidungsfindung, Technologieentwicklung 15.2.3-2
Entscheidungsträger 15.2-10
Entstaubungsbohrung, Verschmutzung 18.3-18
Entwicklung
Aufgaben des Anwenders 15.2.3-4
der Tiebwerkstechnik 15.2-6
Militärische 15.2-1
Risiken 15.2-4
Risiko 15.2.2-1
Sicherung durch Revisionen 15.2.3-22
Technologische 15.2-1
Übertragung in die Serie 18.7-25
von Grundlagen 15.2.3-4
von Halbzeug 15.2.2-2, 15.2.3-4
zeitlicher Verlauf 15.2-9
Entwicklungspartner 15.2.3-4
Entwicklungsprozess 15.2-5
Entwicklungsrichtung 15.2-3
Entwicklungsrisiko 15.2.3-1
Erfahrungshorizont 15.2.3-9
FVK-Bauteile 15.2.3-11
minimieren 15.2.3-4
Entwicklungsschritte, revolutionäre 15.2-1
Entwicklungsstrategie 15-15
Entwicklungszyklus, Aufwandsverlauf 15.2.3-3
EO. *Siehe* Arbeitskarten
Erfahrung 16-5, 16.1.1-1
als Voraussetzung 16.1-6
bei ZfP 17.3-20
Lebensdauerabschätzung 15-19
Übertragung von 15-2
Wartungspersonal 16.1-15
Erfahrungshorizont, Entwicklungsrisiko 15.2.3-9
Erfahrungsmangel 17.3-19
Erfahrungsträger 15-6
Ausscheiden 15-6
Bestimmung des Nachfolgers 15-6
ErgoNomic Audit Programme (ERNAP) 16-13
Formblätter 16-13
Erkennbarkeit
Kennzeichnungen 16.3-4
Nabenriss 15-37
Ermächtigung von Personal 16.1-6
Ermüdung
Auswirkung auf Wartung 16-6
Personal 16-10
ERNAP. *Siehe* ERgoNomic Audit Programme
Erosion
Einfluss der Rauigkeit 18.1-11
T-Schaufel 16.1-13
Erprobung
Fertigung 17.1-10
von Verfahren 18.7-25
Zerspanungsvorgänge 17.1-14
Errors. *Siehe* Irrtümer
Erwartungshorizont, Einfluss auf ZfP 17.3-19
ES. *Siehe* Expertensytem
Evolution einer Technologie 15.2-11
Evolutionäre Verbesserungen 15.2.2-1
Exception. *Siehe* Ausnahme
Expert systems. *Siehe* Expertensytem 15-5

F

Facharbeiter
Beitrag zur Qualität 17.1-8
Motivation 17.1-8
Prozessüberwachung 17.1-8
Fachbegriffe
Begriffssicherheit 16.1-2
Fehler, Probleme 16.4-3
Fachbibliothek 15-3
Fachkenntnis/Fachkunde 16.1.1-1, 16.2-9
Fachliche Anforderungen 16-4
Fachliteratur für freigabeberechtigtes Personal 16.1-8

© Axel Rossmann - Turbocomsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Fachpersonal 15.2.2-18
FADEC. *Siehe* Full Authority Digital Engine Control
Fähigkeiten
des Personals 16-1
Kennwert 17.1-11
Definition 17.1-11
Fail Safe Verhalten 15.2.3-15, 16-19, 16.3-1
durch aufteilen von Funktionen 15-42
Fail-Safe-Design 15-16
Failure Mode and Effects Analysis 15.2.3-2. *Siehe* Schwachstellenanalysen
Falsches Brinelling (False Brinelling) 18.5-9, 18.5-15, Siehe auch Fretting
Falte (Fehlstelle) 18.7-2
Fan-Modul, Problem beim Anbauen 16.3-12
Fanrotor
fixieren 16.1-2
Schaufeln aus faserverstärktem Kunststoff (FVK) 15.2-10, 15.2.2-15
Farben
Kennzeichnung mit 17.4-9
Oberflächenverunreinigung 18.3-13
Fasen von Kanten 18.2-3
Faserrichtung in metallischem Werkstoff 18.1-8
Fasertechnische/faserverstärkte Werkstoffe 15.2-7
Kunststoff 15.2.2-3
Metalle 18.9-19
Schadenstoleranz 15-26
Verzug 18.9-19
Fault Isolation Handbook 16.1.1-15
Fe-haltiger Abrieb, Schädigung durch 18.3-6
Fehler
Eigenschaften, POD 17.3-7
Geometrie, POD 17.3-7
Größe
Einfluss der Betriebsbelastung 17.3-2
Wachstumsfähige 15-22
in Diffusionsverbindung 15-40
Lage, POD 17.3-7
nicht gefundene 17.3-19
rechtzeitig finden 17.1-7
Risiko minimieren 17.1-6
wachstumsfähig 15.2.2-4
werkstofftypische 15-25
Fehler melden 17.5-6
Fehleranalysen 16.4-3
Wartung 16.4-3
Fehlerart, Einfluss auf POD 17.3-6
Fehlerbeseitigung, wissensbasierter Ansatz 15.2.3-2
Fehlerhafte Montage 16-16
Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. *Siehe* FMEA
Fehlertolerante Konstruktion 15-18
Fehlstelle
Einfluss auf die Eindringprüfung 17.3-14
an Kanten 18.2-3
Rissfortschrittsfähige 15.2.2-8
ZfP 17.3-1
zulässige 15-21
Fertigung
auf eine Anstreiffläche 18.1-10
Auswirkung der Auslegung 17.2-4
beeinflusste Rissbildung 18.7-1
Einflüsse, schadensrelevante 18.1-3
Einfluss auf eine Gleitfläche 18.1-10
Einfluss auf Festigkeit 18.7-4
Planung 17.1-20
Risiko bei Optimierung 18.9-2
Schäden
Klärung 18.1-4
Reproduktion 18.7-26
Schwingberlastung 18.5-1
Schwingermüdung 18.5-10
Verbiegen 18.5-1
Verfahren, Eigenspannungen 18.4-7
vorhergehende visuelle Kontrolle 18.3-40
Fertigungsgerechte Konstruktion 17.1-20
Fertigungsparameter, Auswirkung von Änderungen 18.4-7
Fertigungsprozess
Auswahl mit Schwingversuchen 17.2-14
Einfluss auf die Oberfläche 17.2-9
Risiko der Umstellung 18.2-12
Stabiler 17.1-7
Überhitzungen 18.6-2
Überwachung 17.1-16
Werkstückeigenschaften 17.2-7
Festigkeit
belastetes Volumen und Oberfläche 15.2.3-20
Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-16
Einfluss der Fertigung 18.7-4
Einfluss der Probengröße 15-21
Einfluss der Ultraschallprüfung 15.2.2-7
Einfluss von Maßabweichungen 18.9-2
Oberflächenabhängigkeit 15.2-7
Volumenabhängigkeit 15.2-7
Festigkeitsabfall, Überhitzung von Kanten 18.2-2
Festigkeitsausnutzung 15-21, 15.2.2-7
Fett, Oberflächenverunreinigung 18.3-4, 18.3-9
Fingernagel als Prüfwerkzeug 18.6-25
Fingerringe, Lötrissigkeit durch Gold 18.3-27
Fingerspitzen ala Prüfwerkzeug 18.6-25
Firmenklima 16-3
Firmenkultur 15-2, 15-3, 15.2.3-2, 16.1-2, 16.2-23
Flansch
Brennkammergehäuse 16.2-12
18.3-4
Verschraubung
Überlastung 16.3-6
Überwindung des Montagewiderstands 16.3-10

©Axel Rossmann - Turbomasult
aus Schulungsunterlagen mit Lizenz

Flanschbohrungen, Versprödung durch Ni-Cd 18.3-25
Fließspuren von Flüssigkeit 18.6-20
Flugsicherheitsbehörden, Homepage 15-3
Flugunfall, Wahrscheinlichkeit 17.1-1
Flüssigkeiten, Oberflächenverunreinigung 18.3-4
Flussmittelreste
im Triebwerk 18.3-31
Korrosion 18.3-37
FMEA 15.2.3-2. *Siehe auch* Schwachstellenanalysen
Folgeschäden
Abplatzen von Wärmedämmschichten 18.8-4
Beschichtungsfehler 18.8-3
Formblätter
ERgoNomic Audit Programme 16-13
MEDA 16.4-4, 16.4-6
Formschale entfernen (Guss) Schwingermüdung 18.5-14
Fouling 18.1-8
Freigabe
berechtigtes Personal 16.1-6
des Flugzeugs 16.1.1-14
einer Nacharbeit 18.6-27
Fremde Technologien, Problematik 15-9
Fremdkörpereindruck 16.2-9
Fremdmetalle
Oberflächenverunreinigung 18.3-13
Reaktionen mit Grundwerkstoff 18.3-18
Fremdpartikel, Untersuchung 18.7-13
Fressen. *Siehe* Kaltverschweißen
durch Silbersulfid 18.3-10
Ursachen 18.5-19
Fretting 18.1-10, 18.4-25
an Steckverbindungen 18.1-12
Schaufelfuß 18.9-8
Steckverbindung 18.1-13
Frettingmarken beim Gleitschleifen 18.5-9
Frustration bei Prüfpersonal 16.2-7
Fügebewegungen, Gratbildung 18.2-7
Fügekraft beim Verkanten 18.5-2
Fügespalt, Löten und EB-Schweißen 18.9-17
Führungspositionen, unbesetzt e 16.1.1-1
Führungsverhalten 16-14
Full Authority Digital Engine Control 16.3-4
Funken
Bildung
an Kontaktierung 18.6-14
bei magnetischer Rissprüfung 18.6-14
beim Verchromen 18.6-16
durch Elektrochemische Sonde 18.6-17
Galvanischen Prozesse 18.6-14
Scheibenbruch
nach Verchromung 18.6-16
von Kontaktierung 18.6-19
schlechter Kontakt 18.6-17
Stromdurchgang 18.6-13
von Titanlegierungen 18.6-7
Bildung
an Kontaktierung 18.6-14
bei magnetischer Rissprüfung 18.6-14
beim Verchromen 18.6-16
durch Elektrochemische Sonde 18.6-17
Funkeneinwirkung, Nacharbeit 17.5-3
Funkenerosion
Eigenspannungen 18.4-11
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 17.2-13
Funkenschreiber
Kennzeichnung 17.4-9
Schädigung durch 18.6-14
Funktion verstehen bei Entwicklung 15.2-2
FVK. *Siehe* Faserverstärkter Kunststoff
Bauteile, Entwicklungsrisiko 15.2.3-11
Eigenspannungen 18.4-14
Fanschaufeln 15.2.2-15
Verdichterschaufeln, Vorteile 15.2.3-15
Versagensmechanismus 15.2.3-16Verdichter-schaufeln, Vorteile 15.2.3-15

G

Galling. *Siehe* Kaltverschweißung/Fressen
Galvanik, Luftverunreinigungen aus 18.3-8
Galvanische Beschichtung
Eigenspannungen 17.3-34
Wirkung von Druckeigenspannungen 18.4-25
Galvanische Prozesse
Einfluss der Rauigkeit 18.1-18
Funken an Kontaktierung 18.6-14
galvanische Schicht
Eigenspannungen 18.4-11
Messung 18.4-40
Haftung 18.8-6
Gate (im Entscheidungsprozess) 15.2-1
Gefüge
Änderung
Massänderung 18.9-13
Volumenänderungen 18.9-13
Besonderheiten im Oberflächenbereich 17.2-2
Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-17
Gefügekerbe 15-31
Gehäuse
Ausbeulung 16.1-10
Auswirkung von Eigenspannungen 18.4-29
Probleme 16.1-10
Geräusche am Arbeitsplatz
bei Bearbeitungsvorgang 17.1-19
Kommunikation 16.1.1-9
Gerichtet erstarrte Werkstoffe 15.2.2-12
eutektische 15.2.2-3
Gerichtete Gefüge, Einfluss auf Rauigkeit 18.1-8
Geruch, ungewöhnlicher bei Zerspanung 17.1-19

© Wolf Rossmann - Turbocopilot
Ausbildungsunterlagen mit Lizenz

Geschlossenes System 18.4-34
Geschweißte Rotoren 15-25
Nachteile 15-37
Gesichtsmaske in der Fertigung 16.3-19
Gestaltung
Verschlüsse 16.3-4
Verschraubungen 16.3-4
Gesundheitsgefahr/-bedenklich
Asbest 16.3-15
beim Löten 16.3-19
beim Schweißen 16.3-19
Berylliumlegierungen 16.3-19
Blei 16.3-19
Entfettungsbäder 16.3-20
Hilfsstoffe 16-11
Kadmieren 16.3-20
Kadmium 16.3-15
Kupfer-Beryllium-Legierungen 16.3-16
Magnesiumgusslegierungen 16.3-15
Materialien 16.3-1
Nickeloxide 16.3-19
Niedrig schmelzende Legierung 16.3-19
Radioaktive Werkstoffe 16.3-15
Sprayprozesse 16.3-20
Thoriumoxid 16.3-15
Trennmittel 16.3-20
Verfahrensmedien 16-11
Verchromen 16.3-20
Werkstoffe 16-11, 16.3-15, 16.3-17
Wig-Schweißen 16.3-19
Wismut 16.3-19
Wolframelektroden 16.3-19
Getriebezahnräder, Gefahr durch Brünieren 18.1-20
Gewaltbruch 18.4-22
Gewalteinwirkung 18.7-9
Gewaltriss, Arten 18.7-2
Gewohnheiten 16-7
Gießen, Eigenspannungen 18.4-13
Giftige Metalle 16.3-19
Gitterschnitt, Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Glanz, Veränderung als Warnzeichen 17.1-19
Gläser 15.2.2-13
Spannungsrisskorrosion 15.2.2-13
Glasperlenstrahlen 16.1-15
als Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Gleitfläche
einer Leitschaufelverstellung 18.1-11
Fertigungseinfluss 18.1-10
Gleitlack an Auflageflächen 18.1-25
Gleitringdichtung
Schädigung durch Grate 18.2-12
Verschmutzung 18.3-17
Gleitschleifen 18.5-9
Gleitvorgänge, im Oberflächenbereich 17.2-2
Glühbehandlung/Glühen. *Siehe* Wärmebehandlung
Abbau von Eigenspannungen
Spannungsarm 18.4-1
Eigenspannungen 18.4-29
Gold, Lötrissigkeit durch Fingerringe 18.3-27
Grafiken in Handbüchern 16-18
Grafit, Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Gras (Ultraschallanzeige) 15.2.2-7
Grat 18.2-1, 18.2-7
Aufnahme von Wasserstoff 18.2-4
Aufstehen bei Ätzung 17.3-16
bei galvanischer Beschichtung 18.2-7
beim abrasiven Strahlen 18.2-7
beim Fügen 18.2-7
beim Kugelstrahlen 18.2-7
beim Punktschweißen 18.2-7
beim Reibschweißen 18.2-7
beim Stanzen 18.2-7
beim thermischen Schneiden 18.2-7
durch spanende Bearbeitung 18.2-7
Einfluss auf das Betriebsverhalten 18.2-11
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.2-2, 18.2-11
Einfluss des Kühlschmierstoffs 18.2-8
Entstehung von Unwuchten 18.2-11
Entstehungsarten 18.2-7
in Strömungen 18.2-12
Kerbwirkung 18.2-4
Kühlluftführung 18.9-11
Montageprobleme 18.2-11
Rissbildung 18.2-4
Rückschlüsse vom Aussehen 18.2-1
Schäden an Labyrinthen 18.2-11
Schädigung von Gleitringdichtungen 18.2-12
Strömungsstörung 18.2-11
verlegen von Kraftstoffdüsen 18.2-11
Verletzungsrisiko 18.2-1
Versprödung 18.2-4
Zugeigenspannungen 18.2-4
Grenzrautiefe, Abfall der Schwingfestigkeit 18.1-20
Grenzschnitttiefe 18.5-5
Ground Use Only (GUO) 17.4-2
Grundlagenentwicklung 15.2.3-4
Grundmaterial
Einfluss auf Beschichtung 18.8-8
Einfluss auf die Haftfestigkeit 18.8-11
Gummiabdeckungen in Bädern 18.3-43
Gusseigenspannungen 18.4-13
Gussteilherstellung, Schwingermüdung bei, 18.5-13

H

Haftfähigkeit 18.8-1, 18.8-4
Haftfestigkeit
Auswirkung von Verunreinigungen 18.3-29
Beschichtung 18.8-4
Definition 18.8-1
Einfluss der Bauteilkontur 18.8-9
Einfluss der Rauigkeit 18.1-11

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einfluss der Schichteigenschaften 18.8-8
Einfluss des Grundmaterials 18.8-11
Einfluss von Eigenspannungen 18.4-26
Galvanische Schichten 18.8-6
Klebeverbindungen 18.8-6
Kügelcheneffekt 18.8-11
Lötung 18.8-7
Messung 18.8-13
Prüfung durch Schälung 18.8-15
Prüfung 17.3-27, 17.3-34
Gitterschnitt 18.8-15
Glasperlenstrahlen 18.8-15
Ritzverfahren 18.8-15
Schlagbiegeversuche 18.8-15
Thermografie 17.3-36, 18.8-15
Thermozyklen 18.8-15
Ultraschallverfahren 18.8-15
Prüfung mit Thermografie
Prüfung mit Ultraschall 17.3-35
qualitative Prüfung einer Schicht 18.8-15
quantitative Messung 17.3-34
Schicht 18.7-6
Thermische Spritzschichten 18.1-17, 18.8-6
Haftfläche, gekrümmte 18.8-8
Halbzeug, Entwicklung 15.2.2-2, 15.2.3-4
Halogene, Wirkung auf Titanlegierungen 18.7-9
Handbuch 16.1-2
Auswirkung von Problemen 16.2-18
Autoren 16.2-15
Bewährung 16.2-17
Entstehungsprozess 16.2-15
Erstellen 16.2-15
iterative Verbesserung 16.2-17
Konstruktion 15-3
Mängel 16.2-20
Rückmeldungen zur Tauglichkeit 16.2-17
Schulung zur Nutzung 16.2-18
Schwächen im Gebrauch 16.2-23
Überholung 15-3
Wartung 15-3
Handcreme, Einfluss auf Eindringprüfung 17.3-17
Handling
Beschädigung von Kanten 18.2-3
Rissbidlung 18.7-22
Handover Book 16.1.1-11
Handschuhe 16.3-19
Handschweiß 18.7-17
Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Spannungsrisskorrosion an Ti 18.3-35
Handwaschpasten, Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Hardfacts 16-5
Härteanstieg durch Verfestigung 18.4-44
Härteschicht, Eigenspannungen 18.4-10
Härtung
der Oberfläche 17.2-11
von Stählen, Maßänderung 18.9-13
Häufigkeitskurven 17.1-12
Hautcreme, Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Hautkontakt, giftige Medien 16.3-18, 16.3-19
Hazardous materials (gefährliche Materialien) 16-11
HCF. *Siehe* Schwingfestigkeit 7.3-27
Verdichterschaufeln 17.3-30
HCOF 16.3-20
Heat Code/Suffix-Nr. *Siehe* Chargen-Nr
Heiße Partikel, Schädigung durch 18.6-7
Heißteil
Kühlwirkung 18.1-13
Schäden 16.1-10
Beurteilung 16.1-15
Verstopfung 18.3-30
Herausreißen aus Spannvorrichtung 18.5-2
Herstelleridentifikation 17.4-1
HFACS. *Siehe* Human Factors Analysis and Classification System
Hilfsstoffe
als Oberflächenverunreinigung 18.3-9
Gesundheitsschädlich 16-11
vertauschen 17.1-13
Hintergrundfluoreszenz 17.3-16, 17.3-19
Eindringprüfung 18.1-18
Hintergrundinformationen 17.1-6
HIP and forge 15.2-10
Hochdruckdrehzahl (Triebwerk) , Veränderung 16.1-18
Hochfahren des Triebwerks 16.1-18
Hochfrequente Felder, Überhitzung 18.6-5
Hochtemperaturschmiermittel, Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Hohlräume, Auffinden von Verunreinigungen 18.3-40
Homepage von Flugsicherheitsbehörden 15-3
Housekeeping 18.3-2, 18.3-14
Hubschrauber, Wartung 16.3-8
Human Factors 16-1, 16-4, 16-5, 16-20, 16.1.1-1, 16.1.1-11, 16.4-1, 17.1-2, 17.1-5, 17.3-19
nich ausreichend berücksichtigt 16.3-6
Schulungen 16-13
Wahrnehmung der Einflussfaktoren 16-13
Human Factors Analysis and Classification System 16.4-3
Human Factors Design Guide 16-11
Hybridbauweisen 15.2-7

I

Ideen, Realisierungsrisiko 15.2.3-6
Information im Rahmen einer Wartung 16.1.1-4
Informationen
Aufnahme 16-2
verlorene 16-5

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Infraction. *Siehe* Übertretung
Inhomogene Bauteile und Werkstoffe
Verzug 18.9-18
Inhomogenitäten, Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-17
Inkubationszeit
Rissbildung 15-22, 15-32
Rissfortschritt 17.2-14
Innere Kerben 15-31
Innere Spannungen. *Siehe* Eigenspannungen
Inspector 16.4-4
Inspektion 15-18
gegen Metallspritzer 18.6-25
Intervalle 15-22
Zyklen 16.1.1-16
Instabiler Rissfortschritt. *Siehe* Gewaltbruch
Integrale Bauteile, Dämpfung 15-25
Integrale Proben 17.3-27
Interkristalline Risse 18.7-8
Internal stresses. *Siehe* Eigenspannungen
Internet 15-3
Interpretieren technischer Dokumente 16.1-6
Irrtümer 16.4-3
Irrtumssichere Montage 15-41

J

JAR 66 16.1-8
JAR 145 16.1-6
JAR 147 (Approved Maintenance Training) 16.1-8
Jobrotation 15-7
Journey Logbook 16.1.1-12

K

K, alte Bezeichnung für Rautiefe 18.1-7
Kabel, schadhafte Isolation, Kurzschluss mit Werkstück 18.6-14
Kabelverbindungen 16.3-5
Kadmium /Kadmieren
Diffusion 18.3-24
Gesundheitsgefahr 16.3-15, 16.3-20
LME an Verschraubung 18.3-24
Lötrissigkeit 18.3-27
Versprödung von Titan 18.3-14
Kaltrollen 17.2-17
Einfluss bei Kratzern 17.2-15
Kaltverfestigung 18.4-42
Einfluss auf Schwingfestigkeit 17.2-15
Nachweis 18.4-43
Kaltverschweißen (Fressen) 18.1-10, 18.2-11, 18.5-2, 18.3-3
Kaminaufstieg (Karriere) 15-7
Kanten 18.2-1
Aufheizung bei Bearbeitung 18.2-1
Beeinflussung durch Bearbeitung 18.2-2
Beschädigung beim Handling 18.2-3
Eigenspannugnen 18.4-21
Fehlstellen 18.2-3
Festigkeitsabfall durch Überhitzung 18.2-2
Montageprobleme 18.2-4
Kanten runden 18.2-11
handgeführt 18.2-2
Verdichterschaufel 18.2-15, 18.9-9
KbD. *Siehe* wissensbasiertes Konstruieren
Kenntnisse
der Systeme 16.1-6
von Schadensabläufen 16.1-8
Kennzeichnung
durch Ätzen 17.4-9
Einfluss der Bauteilbelastung 17.4-6
Erkennbarkeit 16.3-4
für die Wartung 16.3-8
Halbzeug 17.1-14
im Bereich von Beschichtungen 17.4-6
Leitungen 16.3-5
Lesbarkeit 17.4-6
mit 2D-Data-Matrix 17.4-12
mit Farben 17.4-9
mit Funkenschreiber 17.4-9
mit Laserverfahren 17.4-9
mit Stiften 17.4-9
Probleme 17.4-5
Rissbildung 17.4-6
Schlagzahlen 17.4-8
Sicherheitsklassen 17.4-2
Verfahren 17.4-8
Vor- und Nachteile 17.4-11
Vibrograf 17.4-9
Vorgaben 17.4-5
Kennzeichnungsfeld 17.4-6
Keramik 15.2-7, 15.2.2-13
C-Faser verstärkte 15.2.2-3
Turbinenschaufeln 15.2-10
Keramische Schichten, Eigenspannungen 18.4-10
Kerbe 17.2-2
Auswirkungen 15-29
im Gefüge 15-31
Innere 15-31
konstruktionsbedingt 15-38
Wirkung 18.7-4
von Graten 18.2-4
Kerbempfindlichkeit 15.2.3-16
Kerbradius 15-29
Kernprodukte 15-15
Klappenverschlüsse 16.1.1-11
Klebebänder/-folie**n** , Abdeckung gegen Spritzer 18.6-22
Klebeverbindungen, Haftfestigkeit 18.8-6
Klebungen 15-40. *Siehe auch* Bindefehler (Kissing bonds) .
ZfP 15-40

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Knackfrosch-Effekt durch Verzug 18.9-17
Knallgeräusch, Verdichterpumpen 16.1-18
Knowledge-based Design. *Siehe* wissensbasiertes Konstruieren
Kohäsion, Definition 18.8-1, 18.8-4
Koks. *Siehe* Ölkoks
Bildung, Überprüfung 16.2-12
Kommarisse 18.7-9
Kommunikation 16-1, 16-14, 16.1.1-2, 16.1.1-11, 17.1-9
Geräusche am Arbeitsplatz 16.1.1-9
in der Konstruktion 17.1-9
Kulturkreise 16.1.1-5
Mangel 16-5
Missverständnisse 16-5
Probleme 16.1.1-5, 16-7
Schichtwechsel 16.1.1-3
Sprachen 16.1.1-5
Kondensation von Metalldampf 18.3-6
Konfliktverhalten 16-15
Konische Bohrungen, Kühlluft 18.9-11
Konstrukteur
Arbeitsumfeld 15-1
Selbstverständnis 15-1, 15-7
Konstruktion 17.1-20
Berücksichtigung der ZfP 17.3-14
Computerbasiert 15-2
fertigungsgerecht 17.1-20
Gestaltung, Ölzufuhr 16.2-12
Mangel, Warnsignale 15-8
notwendige Kommunikation 17.1-9
Schadensminimierende 15-1, 15-2
Wartungsfreundliche 16-1
Wissensbasiert 15-2
Konstruktionshandbuch 15-3, 15.2.3-9
Konstruktionskerben 15-38
Konstruktionsmerkmale, charakteristische 15-14
Konstruktionsphase 16.3-1
Konstruktionsphilosophie, Rissverhalten 15-26
Konstruktionsprinzip
ungewohnte 15-8
verstandene 15-11, 15-12
Kontakt, Kontaktierung
Funken bei Schweißverfahren 18.6-14
Funkenbildung 18.6-14, 18.6-17
Scheibenbruch durch Funken 18.6-19
Kontaktflächen
Einfluss auf Tragfähigkeit 18.1-5
Kugelstrahlen 18.1-10
Reibbeiwert 18.1-10
Schaufelfuß 18.1-9
Kontrolle, vorhergehende visuelle 18.3-40
Kontrolltätigkeit 16-12
Korngröße
Einfluss auf die Ultraschallprüfung 15.2.2-7
Einfluss auf POD 17.3-7
Rissfortschrittsgeschwindigkeit 15-25
Körperliche Vorgaben 16-2
Korrosion
bei Lagerung 17.3-24
durch Flussmittelreste 18.3-37
Kosten, Entgraten 18.2-8
anwendungsbezogen 17.2-4
Minimierung 16.3-1
Krafteinleitung 15.2-7
Kraftgesteuerte Belastung 15-28
Kraftstoffdüse, Verlegen von Graten 18.2-11
Kraftstoffreste, Schädigungsgefahr 16.3-4
Kraftstoffverbrauch 17.2-4
Kranzbereich (Rotorscheibe), Schwachstellen 15-34
Kratzer 17.2-2
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 17.2-15
Einfluss auf Titanlegierung 17.2-15
Einfluss des Kaltrollens 17.2-15
Einfluss des Kugelgestrahlens 17.2-15
Kreide, als Oberflächenverunreinigung 18.3-13
Kriechbeschichtung 18.7-10
Kristallgitter, Gleitvorgänge 17.2-2
Kritische Risszähigkeit 15.2.2-7
KSS. *Siehe* Kühlschmierstoff
Kügelcheneffekt /-problem (Metallspritzen) 18.3-4, 18.3-43, 18.8-11
Kugelstrahlen
Druckspannungen 17.2-16
Eigenspannungen 18.4-9
Einfluss bei Kratzern 17.2-15
Gratbildung 18.2-7
Kontaktflächen 18.1-10
Korrektur von Verzug 18.9-17
Rauigkeit 18.1-8
Regeneration 18.4-25
Kühlluftbohrungen
Konische Bohrungen 18.9-11
Versrtopfen durch Grate 18.2-11
Kühlluftführung 18.9-11
Einfluss von Bohrverfahren 18.9-11
Grate 18.9-11
Kühlluftkanal
Verschmutzung 18.3-18
Ätzmittelrückstände 18.3-18
Kühlluftschleier 18.9-11
Kühlschmiermittel /Kühlschmierstoff (KSS)
Haftung 18.1-20
Einfluss auf die Gratbildung 18.2-8
Oberflächenverunreinigung 18.3-10
Rissbildung 18.7-17
Kühlung
Effusion 15.2.2-19
von Turbinenschaufeln 15.2.2-19

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Wirkung, Heißteil 18.1-13
Kulturkreise, Kommunikation 16.1.1-5
Kupfer, Lötrissigkeit 18.3-27
Kupfer-Beryllium-Legierungen, Gesundheitsgefahr 16.3-16
Kupplungen, Verbindungsbolzen 16.3-8
Kurzschluss
Elektrochemische Abtragungsverfahren 18.6-14
Kabel mit Werkstück 18.6-14

L

Labyrinth
Anstreifverhalten 18.1-10
Beschädigung bei Montage 16.3-13
Schaden durch Grate 18.2-11
Labyrinthkegel/-konus 18.9-4
Maßabweichung 18.9-1
Labyrinthspitzen
Abplatzen der Panzerung 18.8-4
Nacharbeit 17.5-7
Lacknebel als Verunreinigung 18.3-8
Lager
Anordnung, Vermeidung des Bruchs einer Welle 15-42
Schaden, montagebedingt 16.3-14
Trockenlauf 16.2-12
Lagerkammer, Modulmontage 16.3-13
Lagerung (Aufbewahrung)
Ablösung von Schichten 17.3-24
ausgebaute Teile 16-18
Korrosion 17.3-24
Rissbildung durch Wasserstoffversprödung 17.3-23
Stress Relief Cracking 17.3-23
Verzug durch Relaxation 17.3-23
Verzug und Rissbildung 17.3-23
Lap. *Siehe* Versäumnis
Laserverfahren für Kennzeichnung 17.4-9
LCC. *Siehe* Life cycle costs
LCF- Beanspruchung, Einfluss der Scheibenverschraubung 15-33
LCF-Festigkeit 17.3-27
Learning by Doing 16.1-2
Lebensdauer
Abschätzung, Einfluss von Erfahrung 15-19
Auslegung 15.2.3-10
Sichere 15-1
bestimmender Schadensmechanismus 15.2.3-7
Nachweise 17.3-27
Lebenszykluskosten 15.2.3-3
Leerlauf 16.1-18
Legierungen
Cr-Basis- 15.2.2-3
Niob-Basis- 15.2.2-3
Lehranstalten, zugelassene 16.1-8
Lehre (Messgerät) 16.3-8
Lehrunterlagen 16.1-4
Leistungsturbine, Überhitzung 16.1-15
Leitschaufelverstellung, Gleitfläche 18.1-11
Leitung
Befestigung mit Klemme 16.3-6
Kennzeichnen 16.3-5
Lesbarkeit einer Kennzeichnung 17.4-6
Lessons learned bei Nacharbeit 17.5-4
Lichtbogen 18.6-17
Überhitzung durch 18.6-3, 18.6-4
Lieferanten, nicht zugelassene 17.1-14
Life cycle costs 15.2.3-2
Line Maintenance Certifying Mechanic 16.1-6
Line Maintenance Certyfying Technician 16.1-8
Liveware 16-2
LMCM. *Siehe* Approved Maintenance Organisations
LMCT. Siehe Line Maintenance Certyfying Technician
LME 18.3-21
LMIE 18.3-21. *Siehe auch* LME
Lochfraß an Turbindnscheiben 18.3-8
Logistikproblem 16-6
Lot als Einlaufschicht 18.8-3
Löten
Einfluss der Topografie 18.1-17
Fügespalt 18.9-17
Gesundheitsgefahr 16.3-19
Lotpulver /Lötpulver, als Oberflächenverunreinigung 18.3-4, 18.3-14
Lötrissigkeit 18.3-13, 18.3-21, 18.7-9
durch Blei 18.3-27
durch Bronzen 18.3-27
durch Gold 18.3-27
durch Kadmium 18.3-27
durch Kupfer 18.3-27
durch Messing 18.3-27
durch Silber 18.3-27
durch Silberlot 18.3-14
durch Wismut 18.3-27
Metallkombinationen 18.3-27
Lötung 15-31
Auslösen von Lötrissigkeit 18.3-14
Haftung 18.8-7
Low aspect ratio. *Siehe* Wide chord-Schaufeln
Luftfeuchtigkeit, SpRK an Gläsern 15.2.2-13
Luftverunreinigungen aus der Galvanik 18.3-8

M

Magnesiumgusslegierungen, Gesundheitsgefahr 16.3-15
Magnetische Rissprüfung (Magnetpulver Prüfung, Magnetic Particle Inspection.) 17.3-9
Funkenbildung 18.6-14
Maintenance Administration Manual 16.1.1-14
Maintenance Error Decision Guide 16-13

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Maintenance Error/Event Decision Aid 16.4-1
Maintenance mishaps. Siehe Wartungsunglücke
Maintenance Resource Management 16-13, 16-4, 16-14
Maintenance Supplement 16.1.1-14
Makroätzung 18.1-20
Makroeigenspannungen 17.3-34
Management
Einfluss auf Wartungsfehler 16.4-1
"strafend" 16.2-23
Mandatory Occurrence Report 16.4-3
Manuelle Prüfung auf Metallspritzer 18.6-25
Markierung. *Siehe* Kennzeichnung:
Forderungen an 17.4-4
Vorgaben 17.4-4
Verfahren, Vor- und Nachteile 17.4-11
Maschinentyp, Wechsel 18.7-25
Massabweichung
an einem Schaufelprofil 18.9-3
Labyrinthkegel 18.9-1
Massabweichungen 18.9-1
an Blisks 18.9-1
Einfluss auf die Bauteilfestigkeit 18.9-2
Verdichterschaufeln 18.9-8
Massänderung
durch Gefügeänderung 18.9-13
Auswirkung bei Reparatur 18.9-19
durch Eigenspannungen 18.4-1
durch Härtung von Stählen 18.9-13
durch Restaustenit 18.9-13
durch Wachsen bei Wälzlagern 18.9-14
Einfluss auf das Diffusionsschweißen 18.9-15
Gefügeänderung bei Ni-Legierung 18.9-13
Maßnahmen
gegen Oberflächenverunreinigungen 18.3-37
gegen Rissbildung 18.7-8
Materialumstellung, Risiken 17.3-9
MEDA 16.1-2, 16.4-3, 16.4-4, 16.4-9. *Siehe auch* Maintenance Error Decision Guide; Maintenance Error/Event Decision Aid
Analyse, Einzelschritte 16.4-6
Formblätter 16.4-4, 16.4-6
Grundmodelle 16.4-9
Users Guide 16.4-4
Merkmale
Anlauffarben 18.6-20
Fließspuren 18.6-20
von Spritzern 18.6-20
Messgeräte 16.3-8
Messing
Lötrissigkeit 18.3-27
Messung
Eigenspannungen 17.3-27, 17.3-34
quantitativ der Haftfestigkeit 17.3-34
Rauigkeits 18.1-6
von Eigenspannungen 18.4-1, 18.4-40
Metalldampf, Kondensation bildet Verunreinigung 18.3-6
Metalle
giftige 16.3-19
Kombinationen, Lötrissigkeit 18.3-27
Metallfilz
Anstreifschicht 18.8-3
Einlaufschicht 18.8-3
Enfluss von Verunreinigungen 18.3-13
Metallografie
Schliff 17.3-28
Untersuchungen 17.3-28
Metallschmelzen 18.7-9
Metallspritzer
Abdeckung gegen 18.6-20
Inspektion gegen 18.6-25
Metalltropfen
Aufschlag 18.3-22
Oberflächenverunreinigungen 18.3-16
Schädigung durch 18.6-9
Mikroeigenspannungen 17.3-34
Mikrofokus Röntgen 17.3-9
Mikrorissbildung, Nacharbeit 17.5-3
Mikroskopische Untersuchung, Bruchfläche 18.7-13
Militärische Triebwerke, Wartbarkeit 16.3-2
Militärischer Entwicklung 15.2-1
Mishaps 16.4-3
Missdeutung von Rissanzeigen 17.3-20
Missverständnisse
bei Kommunikation 16-5
Vermeidung 16.2-2
Mistake. *Siehe* Verwechslung
Mistuning, Blisk 18.9-6
Mitarbeiter, Auswahl 15.2.2-3
Mittelspannungeinfluss 18.1-22
Mittenrauwert Ra 18.1-7
Modellvorstellung einer Schädigung durch Schmelztropfen 18.6-9
Modul
Bauweise 15-8
Montageprobleme 16.3-12
Beschädigung der Niederdruckturbine 16.3-15
Beschädigung im Lagerkammerbereich 16.3-13
Gefahr beim Zusammenschieben 16.3-12
Tausch, Probleme 16.3-4
Trennebene 16.3-13
Montage 15-40
Beleuchtung 16-18
Beschädigung der Niederdruckturbine 16.3-15
Beschädigung eines Turbinenleitapparats 16.3-14
Beschädigung von Einlaufbelägen 16.3-13
Beschädigung von Labyrinthen 16.3-13
Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-14

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage für mit Lizenz

fehlerhaft 16-16
Information 15.2.3-21
Irrtumssicher 15-41
Modul, Lagerschaden 16.3-14
Positionskennzeichnung 17.4-2
Probleme
durch Grate 18.2-11
durch scharfe Kanten 18.2-4
Modulbauweise 16.3-12
Rückölpumpe 16.3-10
Rohrschellen 16.3-4
Wälzlager, Beschädigung 16.3-12
Montagebühne 16-18
Motivation 16-5
der Wartungsmannschaft 16.4-6
Facharbeiter 17.1-8
negativ 16.2-23
Positive 17.5-5
MRM. *Siehe* Maintenance Resource Management
Murphy Prinzip 16-3
Mutter, (Schraube) Sicherung 16.1.1-14
Muttersprache in Arbeitskarten 16.2-6

N

Nabe
Riss, Erkennbarkeit 15-37
Spannungsabsenkung 15-34
Nacharbeit 16.2-5, 18.5-1, 18.9-19
Anstreifflächen 17.5-7
Bedingungen bei Schweißen und Löten 15-40
bei Funkeneinwirkung 17.5-3
bei Mikrorissbildung 17.5-3
bei Rissen 18.7-27
bei Überhitzung 18.6-27
bei Verunreinigungen 17.5-3
Definition 17.5-1
Durchführung 18.6-27
einer e-Schicht 17.5-10
Erfolgsnachweis 18.6-27
Erstellung eines Konzepts 17.5-4
Festlegung 18.6-27
Freigabe 18.6-27
Grenzen 16.2-1
Lessons learned 17.5-4
Probleme 17.5-7
Risiken 17.5-4
Schaden an Turbinenschaufel 18.9-3
Schritte beim Vorgehen 17.5-3
von Labyrinthspitzen 17.5-7
von Oberflächen 17.5-7
von Schaufelspitzen 17.5-7
Voraussetzungen 17.5-3
Zulassung 17.5-4
Nachgiebigkeit, Wirkung auf Eigenspannungen 18.4-9
Nachhaltige Weiterbildung 15-3
Nachweis
einer Überhitzung 18.6-27
Kaltverfestigung 18.4-43
Nahtüberhöhung (Schweißung) 15-30
NDT. (Non Destructive Testing) *Siehe* ZfP
Nebensächlichkeiten, scheinbare 17.1-6
Negative Motivation 17.5-5
Nennmaß 17.1-11
Neutronenbeugung, Messung von Eigenspannungen 17.3-34
Ni-Cd
Versprödung eines Brennkammergehäuses 18.3-24
Versprödung in Flanschbohrungen 18.3-25
Ni-Legierung /Nickellegierung
Einfluss der Zerspanung auf die Schwingfestigkeit 17.2-16
Maßänderung beim Aushärten 18.9-15
Seigerungsätzungen 18.3-30
Volumenänderung 18.9-13
Ni-Schicht
Eigenspannungen 18.4-11
Eigenspannungsmessung 18.4-42
Nichtmetallische Bindung 18.8-4
Nickeloxide, Gesundheitsgefahr 16.3-19
Niederdruckturbine, Problem bei Modulmontage 16.3-15
Niedrig schmelzende Phasen, Anschmelzungen 18.3-13
Nietverbindung 16-19
Niob-Basis-Legierungen 15.2.2-3
Nitrierschicht
Rauigkeitseinfluss 18.1-22
Schwingriss 18.7-6
Non Destructive Testing. *Siehe* ZfP
Null Toleranz Prinzip 18.3-37

O

Oberfläche 18.1-7
Aerodynamische „Qualität“ 18.1-5
als Schwachstelle 17.2-2
belastete 15.2.3-20
Beschädigung 17.2-2
Bohrung 16.2-5
Entschärfen durch Druckeigenspannungen 18.4-25
Beschaffenheit, Auffindwahrscheinlichkeit von Fehlern 17.3-19
chemische Beeinflussung 17.2-9
Einfluss auf Schwingfestigkeit 18.1-5
Einfluss der Bearbeitung auf die Schwingfestigkeit 17.2-11
Einfluss der Rauigkeit auf die Reaktivität 18.1-11
Einfluss des Fertigungsprozesses 17.2-9

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einfluss spanender Verfahren 17.2-9
Gefügebesonderheiten 17.2-2
Härtung 17.2-11
Kerben 15-31
Mechanische Beeinflussung 17.2-9
Nacharbeit 17.5-7
Schädigungen, Schutz durch Druck-
eigenspannungen 18.4-19
Spannungen 17.2-2
Verunreinigungen 18.3-1
Maßnahmen 18.3-37
Oxidation durch Stift 18.3-13
Wirkung von Druckeigenspannungen 18.4-19
Oberflächenabhängigkeit der Festigkeit 15.2-7
Oberflächenverunreinigung
Arten 18.3-3
Ätzmitteln 18.3-4
Aufschmierungen 18.3-3
durch Bauarbeiten 18.3-15
durch Hilfsstoffe 18.3-9
durch Schmierstoffe 18.3-9
durch Verschleppung von Medien 18.3-5
Beschichtungspulver 18.3-4, 18.3-14
Bleiband 18.3-14
Bornitrid 18.3-11
Diffusion 18.3-13
durch Abdeckmittel 18.3-11
durch Reinigungsmittel 18.3-11
Einfluss auf die Benetzbarkeit 18.3-11
Entschäumungsmittel 18.3-10
Farben 18.3-13
Fett 18.3-4, 18.3-9
Flüssigkeiten 18.3-4
Fremdmetall 18.3-13
Grafit 18.3-11
Handschweiß 18.3-11
Handwaschpasten 18.3-11
Hautcreme 18.3-11
Hochtemperaturschmiermittel 18.3-11
im Vakuum 18.3-14
in er Umformtechnik 18.3-10
Kadmium auf Titan 18.3-14
Kreiden 18.3-13
Kühlschmierstoffe 18.3-10
Lotpulver 18.3-14
Lötpulver 18.3-4
Metalltropfen 18.3-16
Öl 18.3-9
Pasten 18.3-4
schützende Abdeckungen 18.3-16
schützende Transportbehälter 18.3-16
Silikonöle 18.3-10
Spritzpulver 18.3-4
Staub 18.3-4
Schleifstaub 18.3-16
Stifte 18.3-13
Trennmittel 18.3-11
vom Einbetten 18.3-3
vom Spannen 18.3-3
vom Strahlen 18.3-3
von Bearbeitung 18.3-3
Waschmittels 18.3-11
Oberflächenzustand. *Siehe* Surface Integrity
Ökonomische Überlegungen, Priorisierung 16.1-2
Öl, Oberflächenverunreinigung 18.3-9
Öldüsen, verstopft durch Ölkoks 16.2-12
Ölfilter, Zugänglichkeit 16.3-6
Ölkoks, verstopft Öldüsen 16.2-12
Ölleitung, Korrosion durch Rückstände 18.3-37
Ölmangel 16.2-12
Ölreste, Schädigungsgefahr 16.3-4
Ölverlust, öffenen der Schubdüse 16.3-10
Omission. *Siehe* Unterlassung
Optimierung, Risiko im Fertigungsprozess 18.9-2
Optischen Befund 16.1-13
Organisationsebenen der Wartung 16.4-4
Orientierung, einer Rauigkeit 18.1-5, 18.1-8
Örtliche Aufheizung, Mechanismus der Rissbildung
18.7-14
Outsourcing 15-7
Überwachungsaufwand 16-8
von Wartungsarbeiten 16-8
Warnzeichen und Symptome 16-8
Wartung 16.1.1-9
Oxidation durch Oberflächenverunreinigung mit
einem Stift 18.3-13

P

P-Klemme 16.3-6
PA. *Siehe* Problemanalyse
Panzerung
kermaisch
Abplatzen 18.8-4
Labyrinthspitzen 18.8-4
Paris-Diagramm 18.1-16
Partikel
Schädigung durch heiße 18.6-7
Ursache für Überhitzung 18.6-4
Passdurchmesser, Verkanten 18.2-4
Passflächenkorrosion/Passungsrost *Siehe* Fretting
Passungen
Veränderung durch Eigenspannugnen 18.4-2
Pasten, Oberflächenverunreinigungen 18.3-4
Patentrecherchen 15-3
Pensacolaunfall 18.5-6
Per. ***Siehe*** **Entfettungsbäder: Gesundheitsgefahr**
Spannungsrisskorrosion an Ti 18.3-35
Perchloräthan 18.7-17
Personal

©Axel Rossmann - Tuppobpsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Ermächtigung 16.1-6
Ermüdung 16-10
Wechsel 16.1.1-1
Personalpolitik 16-4
Pfeifen der Maschine beim Zerspanen 18.5-13
Phasen der Rissbildung 18.4-22
Planung einer Technologieentwicklung 15.2.3-22
Plastische Verformungen
Einfluss auf Schwingfestigkeit 18.5-19
Verbiegen, Auswirkungen 18.5-20
Plattenschwingungen 18.9-4
PN. *Siehe* Teilenummer
POD. *(*Probability of Detection**)** *Siehe* Auffindwahrscheinlichkeit: ZfP
Positionskennzeichnung für Montage 17.4-2
Positive Motivation 17.5-5
Potenzial einer Technologie 15.2.3-6
ppm 17.1-3
Primer, Beschichtung 18.8-8
Proben
Größe, Einfluss auf die Festigkeit 15-21
Integrale 17.3-27
Lage im Werkstück 17.3-28
repräsentative 17.3-30
separat hergestellt 15.2.3-19
Probenorientierung 17.3-28
Problemanalyse 16.4-1, 16.4-3, 16.4-6
Probleme
Befestigungsschellen 16.1-8
bei Kennzeichnung 17.4-5
Diagnose 16.1-6
einer Nacharbeit 17.5-7
elastische Bälge 16.1-8
Flanschverbindungen 16.1-8
Gehäuse 16.1-10
Kommunizieren 16-7
Modultausch 16.3-4
Rohrleitungen 16.1-8
Rückmelden für Handbücher 16.2-15
Spannschlösser 16.1-10
unlösbares 15.2.3-6
Verschraubungen 16.1-10
Zonen, potentielle 15.2.3-22
Process sheet. *Siehe* Arbeitskarte
Produkt, Reife 15.2.3-2
Proof of concept 15.2.3-7
Tests 15.2.2-10
Prooftest 17.3-27
Prospektangaben, Aussage 15.2.3-20
Prozessbäder, Veränderung 17.1-19
Prozessbreite, Definition 17.1-11
Prozessparameter
Risiko bei Änderung 17.3-32
Schwingermüdung durch falsche 18.5-16
Verfolgung 17.1-12
Prozessüberwachung durch Facharbeiter 17.1-8
Prüfbefunde 16.2-1
Prüfbereiche 16.2-1
Prüfen /Prüfung
axf an Verdichterschaufel 17.3-30
Haftfestigkeit qualitativ 18.8-15
Manuelle auf Metallspritzer 18.6-25
mit Fingernagel 18.6-25
als Prüfwerkzeug 18.6-25
mit Fingerspitzen 18.6-25
Technologischen 17.3-29
Thermoermüdung 17.3-29
Visuell auf Metallspritzer 18.6-25
von Ausfallmustern 15-9
Prüfer
Berufsbild 16.1-1
von Luftfahrtgerät 16.1-6
Prüfläufe
Aussage 15.2.3-22
Bewertung 15.2.3-22
Prüflaufteile, Auswertung 15.2.3-23
Prüfpersonal
Frustration 16.2-7
Training 16.2-7
Prüftätigkeit 16-12
PSEF. *Siehe* Strahlüberlappungen
PTFE. *Siehe* Trennmittel: Gesundheitsgefahr
als Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Pulvermetallurgische Scheiben 15.2-10
Pumpgrenze
Abstand, Wide-chord-Schaufeln 15-35
Rauigkeitseinfluss 18.1-8
Pumpstoß 16.1-17
Punktschweißen, Gratbildung 18.2-7
Pyrometer, Schaden durch SpRK 15.2.2-13

Q

Qualität
Beitrag des Facharbeiters 17.1-8
Definition 17.1-1
Mängel, chronische 15-8
Qualitätssicherung 15.2.3-8
Querschnitt
Auswirkung von Druckeingenspannungen 18.4-20
Einfluss auf Eigenspannungen 15.2.2-8

R

Ra. *Siehe* Mittenrauwert
Radioaktive Werkstoffe, Gesundheitsgefahr 16.3-15
Rapid Protoyping 15-40
Rattermarken 18.5-5, 18.7-9
in Räumnuten 18.5-5
Rattern 18.5-1
Regeneratives 18.5-5
Rupfen 18.5-5

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Rauigkeit 18.1-5, 18.1-6
bei Spannungsgefälle 18.1-20
einer Kugelgestrahlten Oberfläche 18.1-8
Einfluss auf Betriebsverhalten 18.1-12
Einfluss auf das Betriebsverhalten 18.1-7
Einfluss auf das Diffusionsschweißen 18.1-20
Einfluss auf den Wärmeübergang 18.1-12
Einfluss auf die Dauerfestigkeit 18.1-20
Einfluss auf die Haftung von Kühlschmiermittel 18.1-20
Einfluss auf die Pumpgrenze 18.1-8
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.1-20
Einfluss auf die Wärmestrahlung 18.1-12
Einfluss auf die Zerspanung 18.1-20
Einfluss auf eine Brennkammer 18.1-12
Einfluss auf Erosion 18.1-11
Einfluss auf galvanische Prozesse 18.1-18
Einfluss auf Strahlung 18.1-11
Einfluss auf Verdichterschaufeln 18.1-12
Einfluss auf Verformungsverfahren 18.1-18
Einfluss auf Wärmeübergang 18.1-8
Einfluss auf Wirkung einer Nitrierschicht 18.1-22
Einfluss der Haftfestigkeit 18.1-11
Einfluss einer Badströmung 18.1-8
Einfluss von Ätzen 18.1-8
Einfluss von Blasen in einem Prozessbad 18.1-8
Forderungen an ein Schaufelblatt 18.1-7
Grenzen der Messung 18.1-8
Kühlwirkung im Heißteil 18.1-13
Messung 18.1-6
Messrichtung 18.1-7
Mittelspannungeinfluss 18.1-22
Orientierung 18.1-5, 18.1-8
von gerichtetem Gefüge 18.1-8
Wälzlagerlaufbahn 18.1-12
Zeichnungsangaben 18.1-7
zulässig am Schaufelblatt 18.1-27
Rauigkeitsprofil 18.1-6, 18.1-7
Rauigkeitsspitzen
Traglänge 18.1-5
Verklammerung 18.8-6
Räumnuten, Rattermarken 18.5-5
Rautiefe R (früher K)
Reaktionen
mit Fremdmetallen 18.3-18
Verunreinigungen mit Grundmaterial 18.3-4
Reaktivität einer Oberfläche 18.1-11
Reason-Modell 16-1
Recast Layer 17.2-13. *Siehe auch* Wiedererstarrte Zone
Regeneration durch Kugelstrahlen 18.4-25
Reibbeiwert
Auflagefläche 18.1-25
Silbersulfid 18.3-10
von Kontaktflächen 18.1-10
Reibkorrosion, Reibrost.. *Siehe* Fretting
Reibschweißen
Fehler durch Verunreinigung 18.3-30
Gratbildung 18.2-7
Reibverschleiß. *Siehe* Fretting
Reife
einer Technologie 15.2-10
eines Produkts 15.2.3-2
Reinigen, Einfluss von Riefen auf die Badverunreinigung 18.1-18
Reinigungsbäder
Rissbildung 18.7-19
Verschleppung 18.3-5
Reinigungsmittel
Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Rissbildung 18.7-17
Reißlackähnliche Rissbildung 18.5-20
Reißlänge. *Siehe* Spezifische Festigkeit
Rekristallisation 15.2.2-12
Relaxation 15-29, 18.4-1, 18.4-2, 18.4-26, 18.4-31, 18.9-18
bei Raumtemperatur 18.9-18
Druckeigenspannungsabbau in Titanlegierung 18.4-33
in dehnungsbehindertem System 18.4-35
REM 17.3-28, 18.7-13. *Siehe auch* Rasterelektronenmikroskop
Repairer 16.1-1
Reparatur, Auswirkung einer Maßänderung 18.9-19
Reparierbarkeit 15-12
Einschätzung 16.1-6
Reproduktion von Fertigungsschäden 18.7-26
Residual stresses. *Siehe* Eigenspannungen
Resonanz
Einfluss der Wandstärke 18.9-4
Frequenz, Verdichterschaufeln 17.3-30
Restaustenit, Maßänderung durch 18.9-13
Restspannungen. *Siehe* Eigenspannungen
Retirement for Cause-Konzept 15-33
Revision in einer Entwicklung 15.2.3-22
Revolutionäre
Entwicklungsschritte 15.2-1
Technologie 15.2-5
Einführung 15-11
Risiken 15.2.3-10
Verbesserungen 15.2.2-1
Richten /-vorgang 18.5-1, 18.7-4
bei Verbiegung 18.5-22
Eigenspannungen 18.4-38, 18.5-22
Rückfedern 18.5-24
von Titanlegierungen 18.5-22
Riefe
aerodynamische Wirksamkeit 18.1-27
an Schaufelkanten 18.1-15
an Wuchtentnahme 18.1-15
an Zuganker 18.1-15

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.1-17
Einfluss auf die Ultraschallprüfung 18.1-18
Einfluss auf ein Vakuum 18.1-17
Einfluss auf Lötung 18.1-17
Einfluss auf ZfP 18.1-18
geschliffene Schaufelfuße 18.1-15
von Drehbearbeitung 18.1-15
Risiko / Risiken
bei Änderung von Prozessparametern 17.3-32
bei "einleuchtenden" Ideen 15.2.3-6
bei Umstellung der Rohteilherstellung 17.3-32
beim Wechsel des Rohteillieferanten 17.3-32
der Unterlassung 15.2.2-1
des Versagens 15.2.2-4
einer Entwicklung 15.2-4, 15.2.2-1
minimieren 15.2.3-4
einer Materialumstellung 17.3-9
einer Nacharbeit 17.5-4
einer Verfahrensumstellung 18.1-9
einer Werkstoff-/Materialumstellung 15.2-4, 17.3-1
steigender Werkstofffestigkeit 15.2.2-6
Umstellung eines Fertigungsprozesses 18.2-12
Riss
Anrissort 18.7-13
Auffindwahrscheinlichkeit in der Fertigung 18.7-26
Betriebsverhalten des Bauteils 18.7-26
Bruchflächenauswertung 18.7-13
Cr-Schicht 18.7-6
Definition 18.7-2
durch Kennzeichnung 17.4-6
Eigenschaften 15-18
Entstehung
unter der Oberfläche 18.4-19
Verständnis des Mechanismus 18.7-26
Entstehungsphasen 18.4-22
Feld 18.7-9
Fortschritt 18.1-16
Abschätzung 15-18
fortschrittsfähiger Fehlstellen 15.2.2-8
Geschwindigkeit
B elastungseinfluss 17.3-2
Korngrößenbahängigkeit 15-25
Inkubationszeit 17.2-14
Spannungsgradient 15-29
stabil 18.4-22
Größe, ZfP-Grenze 18.7-2
in Auflagefläche 18.1-25
in Auflageschichten 18.7-10
in Bereich von Rauigkeitsänderungen 18.7-10
in Beschichtung 18.7-6, 18.7-10
in Diffusionsschicht 18.7-11
Interkristallin 18.7-8
Klaffend 18.7-9
Lage in Verfärbungen 18.7-10
Nacharbeit 18.7-27
Nachweis einer Eindringprüfung 18.7-13
Netzwerk 18.7-9
Prüfung, unterlassene 16.2-5
Schweißnaht 18.7-9
Segmentierungsriss 18.7-6
Transkristallin 18.7-8
Unter einer Spritzschicht 18.4-10
unter Schichten 18.4-26
Verfärbungen 18.7-13
Verhalten, Konstruktionsphilosophie 15-26
Verlauf 18.7-8
Bearbeitungsmerkmale 18.7-9
Wachstum 16.1-10
Einfluss des Umgebungsmediums 15-20
Modus 15-18
Schwellenwert 17.3-2
Threshold 18.1-17
zusammengepresst 18.5-20
zuzwicken 18.7-9
Rissanzeige,
Bewertung 17.3-20
Definition 18.7-1
Missdeutung 17.3-20
Netzwerk 18.7-9
Rissbildung
an Graten 18.2-4
beim Handling 18.7-22
bei Lagerung 17.3-23
bei örtlicher Aufheizung 18.7-14
durch chemische Auflösung 18.7-2
durch den Fertigungsprozess 18.7-1
durch Entfettungsbäder 18.7-17
durch Kühlschmierstoffe 18.7-17
durch Reinigungsmittel 18.7-17
Eigenspannungsabbau 18.4-2
Einfluss auf Bauteilsicherheit 18.7-2
Einfluss des Elastizitätsmoduls 18.7-6
Häufigkeit, Einflüsse auf 15-20
Inkubationszeit 15-22, 15-32
Kennzeichnung 16.1-10
Maßnahmen 18.7-8
Reißlackähnlich 18.5-20
Rückschlüsse 18.7-1
Schadensmechanismus 18.7-1
Spannungsrisskorrrosion in Stahl 18.7-20
Vermeidung 18.7-25
verzögert bei Wasserstoffversprödung 18.7-22
Verzögerte 18.7-22
Rissfeld 18.7-9
beim Verformen 18.1-18
Rissöffnung 18.7-9
durch Ätzen 17.3-16
durch Temperaturzyklus 17.3-16

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Prüfbarkeit mit Eindringstoff 18.3-10
Rissstopper 15-18
Risszähigkeit 18.1-16
Scheibenwerkstoff 15-37
Ritzverfahren, Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Rohrleitung
Eigenspannungen 18.4-38
Probleme 16.1-8
Verbindungen, Anordnung 16.3-4
Rohrschellen 16.3-6
Montage 16.3-4
Rohteil
Herstellung, Risiko bei Umstellung 17.3-32
Lieferanten, Risiko beim Wechsel 17.3-32
Rollnahtschweißen, Gratbildung 18.2-7
Röntgen
Auffinden von Verunreinigungen in Hohlräumen 18.3-40
Mikrofokus Verfahren 17.3-9
Röntgenografische Messung von Eigenspannungen 17.3-34, 18.4-40
Röntgenprüfung 17.3-9
POD 17.3-4
Rotating Stall (Rotierende Strömungsablösung) 16.1-17
Rotoren (Turbomaschine) , geschweißt 15-25
Rotorschaufel, Schwingung 18.9-6
Rotorscheiben
Bearbeitungsriefen 18.1-15
Büchsendeckeleffekt 18.9-17
Damage-Toleranz 15-37
Eigenspannugen durch Betieb 18.4-14
RPZ. *Siehe* Risikoprioritätszahl
Rückfedern 18.5-20
beim Richten 18.5-24
Entstehung von Eigenspannungen 18.4-35
von Titanlegierungen 18.5-24
Rückmeldung 16.4-6
Rückölpumpe
Montageproblem 16.3-10
Zugänglichkeit 16.3-10
Rückschlüsse
aus Abweichungen 17.5-4
aus einem Schadensbild 18.1-3
Rückstände
Korrosion an Ölleitung 18.3-37
Wirkung im Betreib 18.3-37
Rundgang bei Schichtübergabe 16.1.1-2
Rupfen 18.5-5
RZ. *Siehe* Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers; Risikozahlen, ***Siehe*** **Mittenrauwert**

S

SA. *Siehe* Situationsanalyse
/ Konzept 17.2-1
Safe Life 15-16
Design 15-17, 15-22
Konzept 15.2.2-10
Sauerstoffaufnahme, Titanlegierungen 18.7-10
Säuredämpfe 18.3-5
Scanning Electron Microscope (SEM) . *Siehe* Rasterelektronenmikroskop (REM)
Schaden
Abläufe, Kenntnisse 16.1-8
äußere Merkmale 16.1-8
Ausmaß, Kennzeichnung, Beschreibung 16.1-10
Ausgelöst im Triebwerk 18.3-30
Bauteileigenschaften 16.1-10
Dokumentation 15-4
Eigenspannungen 18.4-25
Fertigungseinflüsse 18.1-3
Heißteile 16.1-10
Ursachen, Identifikation 16.1-10
Verhütung, Teamgedanke 18.1-4
Schadensbild, Rückschlüsse 18.1-3
Mechanismus 16-11, 18.7-25
bei rissbildung 18.7-1
bei Überhitzung 18.6-7
lebensdauerbestimmender 15.2.3-7
neuer Technologien 15.2.2-2
Voraussetung für Schadensminimierung 18.1-3
Schadensminimierung 15.2.3-10
Konstruktion 15-1, 15-2
Voraussetzung 18.1-3
Schadenspotential 17.1-6
Schadensrisiko minimieren 15-25
Schadenstolerantes
Schadenstoleranz 15.2.2-10
Fasertechnischer Werkstoffe 15-26
Vorgehen 15-16, 15-18
Schädigung
Ausmass einer Überhitzung 18.6-27
beherrschbare 15-29
durch Funkenschreiber 18.6-14
durch heiße Partikel 18.6-7
durch Metalltropfen 18.6-9
durch Schmelzperlen von Schweißverfahren 18.6-13
durch Tropfen vom Trennen 18.6-9
durch Überhitzung 18.6-1, 18.6-7
elektrischer Funken 18.6-13
fertigungsbedingt im Triebwerk 18.3-30
Frühzeitig erkennen 15.2.3-23
Grate, Schäden an Wälzlagern 18.2-11
Identifikation, Bewertung 16.2-9
Im Bereich von Anlauffarben 18.6-20
Mechanismus idntifizieren 16.1-6

© Axel Rossmann - Turbocomsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Schälung
organische Beschichtung 18.8-8
Schichtprüfung 18.8-15
Scharniere lösen 16.3-8
Schaufel
Blatt
Aerodynamische Anforderungen 18.1-27
Rauigkeitsforderungen 18.1-7
zulässige Rauigkeit 18.1-27
Bruch, Änderung von Fertigungsparametern 18.4-7
Fuß
Auflageanforderungen 18.9-6
Belastung 18.9-8
Bombierung der Auflage 18.9-8
Fretting 18.9-8
Kontaktflächen 18.1-9
Kanten, Riefen 18.1-15
Profil, Einfluss einer Maßabweichung 18.9-3
Schleifriefen 18.1-15
Spitze,
Anstreifverhalten 18.1-10
Nacharbeit 17.5-7
Scheibe (Rotor)
Bruch
durch Kontaktierungsfunken 18.6-19
Funke bei Verchromung 18.6-16
pulvermetallurgische 15.2-10
Verbindung, Bajonettverschluss 15-34
Verschraubung, Einfluss auf die LCF- Beanspruchung 15-33
Verzug, Abhilfen 18.9-17
Werkstoff, Risszähigkeit 15-37
Scherbänder, adiabatische 18.5-8
Schicht
Abblättern 18.3-29
Ablösung
bei Lagerung 17.3-24
Schwingermüdung 18.5-14
Auswirkungen 18.5-20
Blasenbildung 18.3-29
Dicke
Schwingfestigkeit 18.7-7
Verhalten einer diffusionsschicht 18.7-4
Eigenschaften, Einfluss auf die Haftfestigkeit 18.8-8
Haftfestigkeit 18.7-6
organischer 18.8-7
Messung der Haftfestigkeit 18.8-13
Prüfung auf Schälung 18.8-15
qualitative Prüfung der Haftfestigkeit 18.8-15
Riss unterhalb 18.4-26
Übergabebesprechung 16.1.1-6
Schichtübergabe 16.1.1-2 /-wechsel 16-1, 16.1.1-1, 16.1.1-2
Kommunikation 16-14, 16.1.1-3
Rundgang 16.1.1-2
Wartungsöffnungen 16.1.1-13
Wiederaufnahme 16.1.1-3
Zeitmangel 16.1.1-3
Schlagbeanspruchung 15.2.2-14
Schlagbiegeversuche, Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Schlagzähigkeit von EK-Werkstoffen 15.2.2-14
Schlagzahlen 17.4-8
Schleierkühlung 18.9-11
Schleifen
Schwingermüdung 18.5-13
Titanlegierung 17.2-12
Schleifrisse 18.7-9
Schleifstaub, Oberflächenverunreinigungen 18.3-16
Schleuderversuche, zyklische 17.3-29
Schliff, metallografisch 17.3-28
Schmelzkrater 16.2-9
Schmelzperlen
auslösen von Schwingrissen 18.6-13
bei Schweißverfahren 18.6-13
Maßnahmen gegen 18.6-20
Schmelzschweißen, Schädigung durch Tropfen 18.6-9
Schmelztropfen
brennende 18.6-7
Überhitzung 18.6-5
Schmiedeprozess, Eigenspannungen 15.2.2-8
Schmierstoffe, Oberflächenverunreinigung 18.3-9
Schöpfendes Verhalten in Prozessbädern 18.6-20
Schrumpf, Sinterteile 18.9-18
Schubdüse, öffenen wegen Ölverlust 16.3-10
Schubverlust, öffnen der Schubdüse 16.3-10
Schulung
Human Factors 16-13
Programme, Wartung 16-8
Unterlagen 16-20
Wartungspersonal 16-17
Schwachstelle
Analyse 16.4-1
im Kranzbereich 15-34
Oberfläche 17.2-2
Schweißung 15-38
Vermeiden 15-10
ZfP 17.3-1
Schwarzfärbung, Silber 18.3-10
Schweißen /Schweißung
Abdeckung gegen Spritzer 18.6-22
Eigenspannungen, Verzug 18.4-9
Gesundheitsgefahr 16.3-19
Schwachstellen 15-38
Überhitzung 18.6-2
Zündstellen 18.6-14
Verfahren
Funken an Kontaktierung 18.6-14

© Axel Rossmann - Technoconsult
nur als Schulungsunterlage mit Lizenz

schädigende Schmelzperlen 18.6-13
Schweißnaht, Rissbildung 18.7-9
Schweißspritzer, Abdeckungen 18.3-43
Schwellenwert für Risswachstum 17.3-2
Schwingberlastung in der Fertigung 18.5-1
Schwingbruch
durch T-Leitschaufelschaden 16.1.1-16
eines Spannbolzens 18.1-22
Ölpumpenwelle 16.3-10
Verdichterrotorschaufeln 16.1-18
Schwingermüdung
Bearbeitungsfläche 18.1-10
bei elektrochemischer Bearbeitung 18.5-13
bei Gussteilherstellung 18.5-13
bei Ultraschallbearbeitung 18.5-14
bei Ultraschallreinigung 18.5-10, 18.5-15
bei Zerspanung 18.5-13
beim Schleifen 18.5-13
beim Überschleifen von Schaufelspitzen 18.5-13
beim Ultraschallreinigen 18.5-16
beim Vibrationshämmern 18.5-14
beim Wasserstrahlschneiden 18.5-14
beim Zerspanen 18.5-13
in der Fertigung 18.5-10
Riss 18.7-2
durch Schmelzperlen 18.6-13
durch schmelzperlen 18.6-13
Einsatzschichten 18.7-6
Nitrierschicht 18.7-6
Schichtablösung 18.5-14
Ultraschallreinigen von Turbinenschaufeln 18.5-17
Schwingfestigkeit
bearbeiteter Oberflächen 17.2-11
Beschichtung 17.2-11
ECM-Nacharbeit 17.2-13
Eiffelturmeffekt 17.3-30
einer Oberfläche 18.1-5
Einfluss der Bearbeitungsrichtung 18.1-14
Einfluss der Rauigkeit 18.1-20
Einfluss der Tiefe einer Riefe 18.1-17
Einfluss des Zerspanungsprozesses 17.2-15
Einfluss einer Kaltverfestigung 17.2-15
Einfluss einer Verfahrensänderung 17.2-12
Einfluss einerVerfestigung 18.4-19
Einfluss eines Grats 18.2-2
Einfluss plastischer Verformungen 18.5-19
Einfluss von Bohrverfahren 17.2-13
Einfluss von Eigenspannungen 18.4-7
Einfluss von Funkenerosion 17.2-13
Einfluss von Graten 18.2-11
Einfluss von Kratzern 17.2-15
Grenzrautiefe 18.1-20
im Bereich von Überhitzungen 18.6-1
Schichtdicke 18.7-7
Verdichterschaufeln 17.3-30
Zerspanung Ni-Legierung 17.2-16
Schwingung
Blisk 18.9-6
Mistuning 18.9-6
Verdichterrotorschaufel 18.9-6
Verhalten, Widechord-Schaufeln 15-26
Schwingverschleiß. Siehe Fretting
Schwingversuche, Auswahl von Fertigungsprozessen 17.2-14
Schwitzwasserbildung bei Stillstand 18.7-20
Seam weld. Siehe Rollnahtschweißen
Segmentierung
Risse 18.4-10, 18.7-6
Wärmedämmschicht 18.8-12
Seigerungsätzen 18.1-20
Ni-Legierungen 18.3-30
Selbstbewusstsein 16-7
Selbstmotivation 16-6
Selbstsichernde Elemente, Wiederverwendbarkeit 16.3-4
Selbstüberschätzung, Auswirkung 16-6
SEM. Siehe Rasterelektronenmikroskop (REM)
Sensibilisierung eines Werkstoffs 17.2-9
Serial Number. *Siehe* Stück-Nummer
Serientechnologie, Evolution 15.2-11
Service Bulletin 16-9
Service Letter 16-9
SHEL-Modell 16-1, 16-2
Shot Peening. *Siehe* Kugelstrahlen
Show Stopper 15.2.2-1, 15.2.2-3, 15.2.3-6
Show-Versuche 15.2.2-2
Sichere Lebensdauer 15-1, 15-17
Sicherheitsaspekt, Technologieeinsatz 15.2.3-13
Sicherheitsklasse, Kennzeichnung 17.4-2
Sicherheitskonzept 15-14
Sicherung, Mutter/Schraube 16.1.1-14
Sicherungsdraht, Verbot 16.3-4
Silber 18.3-4
Anlauffarben 18.3-10
Lötrissigkeit 18.3-27
Schwarzfärbung 18.3-10
Sulfidation 18.3-8
Silberlot, Auslösen von Lötrissigkeit 18.3-14
Silbersulfid
auslösen von Fressen 18.3-10
Reibbeiwert 18.3-10
Silikongummi, Einlaufschicht 18.8-3
Silikonöl
Einfluss auf Eindringprüfung 17.3-17
Oberflächenverunreinigung 18.3-10
Siliziumkarbid in Turbinenschaufel 18.3-18
Silkon, Einfluss auf die Rissprüfung 17.3-16
Sinterteile, Schrumpf 18.9-18
Situation
einschätzen 16.1-8, 16-14
erkennen 16-15
nicht bewusst 16.1.1-4

© Axel Grossmann - Turbomult
Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Skizzen 16.2-1
in Handbüchern 16.2-16
Slip. *Siehe* Versehen
SN. Siehe Stück-Nummer
Softfacts 16-5
Spacer (Zwischenring) , Belagabplatzung 18.8-4
Späne
Abfuhr, unzureichend 18.5-6
Anlauffarben 17.1-18
Aussehen 17.1-17
Brechen 17.1-17
Eindrücken 18.5-1
verschweißen 18.5-1
Spanende Bearbeitungn /Verfahren
Einfluss auf die Oberfläche 17.2-9
Grate 18.2-7
Überhitzung 18.6-2
Spänestau 18.5-6
Spannbolzen *(*Zuganker), Schwingbruch 18.1-22
Spannen 18.5-2
Oberflächenverunreinigung 18.3-3
Überlastung 18.5-1
Vorrichtung 18.5-2
Spannkräfte 18.7-4
Spannschlösser, Probleme 16.1-10
Spannungen in der Oberfläche 17.2-2
Spannungsabsenkung in Nabe 15-34
Spannungsarm Glühen 18.4-1
Spannungsarmglühen 15-29, 18.4-34
Vorgänge beim 18.4-38
Spannungsgefälle/ -gradient 15-28
Auswirkung der Rauigkeit 18.1-20
Einfluss auf Rissfortschritt 15-29
Spannungskonzentration 15-29, 18.1-16
Spannungsniveau, Auswirkung 17.2-4
Spannungsrisskorrosion 18.7-4
an Gläsern 15.2.2-13
an Titanlegierungen durch Entfettungsbad 18.3-35
Einfluss von Eigenspannungen 18.4-26
Einflüsse auf 18.7-17
Schutz durch Druckeigenspannungen 18.4-25
Stahlwelle 18.7-19
Titanlegierung 18.3-29
Wasserstoffinduziert 18.7-20
Spannvorrichtung, Herausreißen des Werkstücks 18.5-2
Spezifikationsangaben, Einfluss auf ZfP 17.3-22
Spezifische Festigkeit (Reißlänge) 15.2-7
Sprachen, Kommunikation 16.1.1-5
Sprayprozesse /Sprays
Einfluss auf Eindringprüfung 17.3-17
Gesundheitsgefahr 16.3-20
Spritzbedingungen, Geometrieeinflusss 18.8-3
Spritzer 18.6-20
Abdeckung gegen 18.6-20
Maßnahmen gegen 18.6-20
Merkmale 18.6-20
Spritzpulver, Oberflächenverunreinigung 18.3-4
Spritzschicht
darunter liegender Riss 18.4-10
Einfluss der Topografie auf die Haftfestigkeit 18.1-17
SpRK (Spannungsrisskorrosion) 18.1-20
Sprödbruch 15.2.2-7
Spröde Schicht
Auswirkung 18.5-20
Entstehung bei Titanlegierungen 18.5-25
Spröde Werkstoffe 15.2.3-20
Festigkeit 15.2.3-20
Sprödigkeit, Al-Diffusionsschichten 18.7-4
Spülen (Prozessbad), Einfluss von Riefen auf die Badverunreinigung 18.1-18
Stabiler Fertigungsprozess 17.1-7, 17.1-11
Stabiler Rissfortschritt 18.4-22
Stahl, Rissbildung durch Cl 18.7-19
Standardisierung, Verbindungselemente 16.3-4
Stanzen, Gratbildung 18.2-7
Statisch unbestimmte Bauweisen 15-26
Statistik, Ursachen von Wartungsfehlern 16.4-1
Staub
Ablagerungen durch Unachtsamkeit 18.3-6
als Oberflächenverunreinigung 18.3-4
Staubsauger, ausblasen von Staub 18.3-6
Steckverbindung
Fretting 18.1-12, 18.1-13
Kabel 16.3-5
Steifigkeit
einer Bearbeitungsmaschine 17.1-14
Einfluss von Eigenspannungen 18.4-9
Steifigkeitssprung 15-29
Stick-Slip-Effekt 18.5-5
Stifte
Kennzeichnung 17.4-9
Oberflächenverunreinigung durch 18.3-13
Strahlen
Abdeckungen 18.3-42
Beladung 18.8-11
Druckspannungen bei abrasivem 17.2-16
Eigenspannungen 18.4-9
mit Glasperlen 16.1-15
Oberflächenverunreinigung 18.3-3
Strahlenergie, Überhitzung 18.6-4
Strahlgut / -partikel
Beladungseffekt 18.3-6
Verunreinigung 18.3-6
Strahlüberlappungen 18.4-22
Strahlung (Wärme, Licht) , Einfluss der Rauigkeit 18.1-11
Strategisches Denken, Technologieentwicklung 15.2.3-22

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Streckgrenzenverhältnis 15.2.2-7
Stress (Personal) 16-7
Stress Relief Cracking 18.4-26
bei Lagerung/Aufbewahrung 17.3-23
Stress relief heat treatment. *Siehe* Spannungsarm Glühen
Strippen, Ablösen einer Beschichtung 18.9-19
Stromdurchgang, Funken 18.6-13
Stromführung, Kontaktierung 18.6-19
Stromkontakt, Überhitzung 18.6-3
Strömungsstörung
Ausbruch T-Leitschaufel 16.1.1-16
durch Grate 18.2-11
im Verdichter 16.1-17
Structural Integrity 15-7, 15-17
Stück-Nummer 17.4-1
Sulfidation 18.3-10
durch Silber 18.3-8
Surface Integrity 17.2-1
Surge. Siehe Verdichterpumpen
Symptome ungünstiger Wartungseinflüsse 16-6
Synergie, Chance für Verbesserungen 18.1-4
Systeme, Kenntnisse der 16.1-6

T

Tagesrhythmus 16-6
Teamarbeit 16-3, 16-14
Mängel 16-6
Teamgedanke, Schadensverhütung 18.1-4
Technischer Anriss 18.7-3
Technologie
abhängig von Verfahrenskontrolle 15.2.3-8
Aufwand 15.2-9
charakteristische Schwächen 15.2.3-13
Einführung revolutionärer 15-11
Entwicklung
Entscheidungsfindung 15.2.3-2
Planung 15.2.3-22
Strategisches Denken 15.2.3-22
Zulassungsbehörden 15.2.3-14
Evolution 15.2-11
fehlender Zwischenschritt 15.2.3-7
fehlendes Verfahren 15.2.3-7
Fremde 15-9
mit wachstumsfähigen Fehlstellen 15.2.3-8
Reife 15.2-10
revolutionäre 15.2-5
Risiken revolutionärer 15.2.3-10
Risiken v 15.2.3-10
Schadensmechanismen 15.2.2-2
verstandene 15.2.3-18
Warnzeichen bei der Einführung 15-13
Technologieeinsatz, Sicherheitsaspekt 15.2.3-13
Technologischen Prüfung 17.3-29
Technologischer Entwicklung 15.2-1
Teilemangel 16-6
Teilenummer 17.4-1
Temperatur
Anlauffarben 18.7-13, 18.6-19
Auslösen von Schäden im Triebwerk 18.3-30
Temperaturführung
bei Beschichtung 18.8-12
organische Beschichtung 18.8-8
Verteilung bei Wärmebehandlung 18.4-31
Temperaturzyklus vor Eindringprüfung 17.3-16
Textur (Werkstoffgefüge) 18.1-5
Thermische Spritzschichten
Einlaufschichten 18.8-3
Haftung 18.8-6
Thermisches Schneiden, Gratbildung 18.2-7
Thermisches Spritzen
Abpraller 18.3-43
Eigenspannungen 18.4-10
Haftfestigkeit 18.1-17
Thermoermüdung 18.7-9
Prüfung 17.3-29
Thermoermüdungsschäden 16.1.1-16
Thermografie 18.3-40
Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Prüfung der Haftfestigkeit 17.3-36
Thermozyklen, Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Thoriumoxid, Gesundheitsgefahr 16.3-15
Threshold. *Siehe* Schwellenwert
Risswachstum 18.1-17
Tiefkühlung (bei Wärmebehandlung) 18.9-13
Tiefziehen 18.1-18
TIG. (Tungsten Inert Gas), *Siehe* Wig-Schweißen
Titanhydride 18.7-19
Titanlegierung
Anlauffarben 18.6-19
BEA-Ätzen 18.3-30
Druckeigenspannungsabbau durch Relaxation 18.4-33
Druckspannungen beim Zerspanen 17.2-16
Einfluss von Kratzern 17.2-15
Entstehung spröder Schichten 18.5-25
faserverstärkt, Eigenspannungen 18.4-14
Funken 18.6-7
heißeTropfen 18.6-5
LME durch Kadmium an Verschraubung 18.3-24
Richten 18.5-22
Rissbildung 18.7-17
durch Entlackungsbad 18.7-19
Sauerstoffaufnahme 18.7-10
Schleifen 17.2-12
Spannungsrisskorrosion 18.3-29
Spannungsrisskorrosion durch Handschweiß 18.3-35
Versprödung 18.7-19
durch Kadmium 18.3-14
Schweißnaht, durch Fe 18.3-6

© Axel Rossmann - Turbocoaches
als Schulungsunterlage zur Kompetenz

Rückfedern 18.5-24
Warmfestigkeit 15-22
Wirkung von Halogenen 18.7-9
Titanrohre, Nachteile 15-31
Topografie 18.1-5, 18.1-7, 18.1-8, 18.1-17
durch Ätzen 18.1-18
durch Chemische Verfahren 18.1-18
einer Kugelgestrahlten Oberfläche 18.1-8
Einfluss auf das Löten 18.1-17
Einfluss auf die Belastbarkeit 18.1-25
Haftfestigkeit einer Spritzschicht 18.1-17
Zerspanung 18.1-14
Tragfähigkeit, Einfluss der Kontaktfläche 18.1-5
Traglänge von Rauigkeitsspitzen 18.1-5
Tragverhalten einer Auflagefläche 18.1-7
Training von Prüfpersonal 16.2-7
Transkristalliner Riss 18.7-8
Transportbehälter gegen Oberflächen-verunreinigungen 18.3-16
Transportvorrichtungen, Verschleppung von Verunreinigungen 18.3-5
Trennen, Entstehung von Tropfen 18.6-9
Trennmittel 17.3-17
Gesundheitsgefahr 16.3-20
Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Trennschleifen, Überhitzung 18.6-2
Trennung
Bindefehler 18.7-2
Falten 18.7-2
Überlappung 18.7-2
Tribokorrosion. Siehe Fretting
Trichloräthan / Tri 18.7-17. *Siehe* Entfettungsbäder
Spannungsrisskorrosion an Titanleg. 18.3-35
Triebwerk
fertigungsbedingte Schädigungen 18.3-30
Technik, Entwicklungen 15.2-6
Mechaniker, Berufsbild 16.1-1
Reparierer, Berufsbild 16.1-1
Triebwerkstyp, Wartbarkeitskontrolle 16.3-2
Trockenlauf, Lager 16.2-12
Tropfen
vom Schmelzschweißen 18.6-9
von Titanlegierungen 18.6-5
Tropfenschlag 18.3-22
Turbineneintrittstemperatur 16.1-18
Turbinenleitapparat, Beschädigung bei der Montage 16.3-14
Turbinenleitschaufel 16.1.1-16
Ausbruch 16.1.1-16
Turbinenrad
Austausch beiÜberhitzungsverdacht 16.1-13
Auswirkung von Eigenspannungen 18.4-29
Dual Property 18.9-12
Turbinenschaufel
Bruch durch Eingussmasse 18.3-32
Bruch durch Wismut 18.3-32
Effusionsgekühlte 15.2.2-3
Eigenspannungen durch Betreib 18.4-14
Einfluss der Rauigkeit 18.1-12
Erosion 16.1-13
Kühlung 15.2.2-19
Rauigkeitseinfluss 18.1-12
Schaden durch Nacharbeit 18.9-3
Schwingermüdung beim Ultraschallreinigen 18.5-17
Verschmutzung 18.3-18
Zinn-Wismut-Verunreinigung 18.3-21
Turbinenscheibe
Bruch an Zündstelle 18.6-17
Lochfraß 18.3-8
Ultraschallprüfung 17.3-13

U

Übergabebesprechung bei Schichtwechsel 16.1.1-6
Überhitzung
Ausmass einer Schädigung 18.6-27
Auswirkungen 18.6-1
bei elektrischen Verfahren 18.6-3
bei Schweißung 18.6-2
durch heiße Partikel 18.6-4
durch hochfrequente Felder 18.6-5
durch Lichtbogen 18.6-4
durch Schmelztropfen 18.6-5
durch Strahlenergie 18.6-4
Einfluss auf Schwingfestigkeit 18.6-1
Elektrodenbefestigung 18.6-3
Entstehung von Zugeigenspannungen 18.6-7
Fertigungsprozesse 18.6-2
Leistungsturbine 16.1-15
Nacharbeit 18.6-27
Nachweis 18.6-27
örtlich 18.6-1
Schadensmechanismus 18.6-7
Schädigende Wirkungen 18.6-1
Schädigung 18.6-7
Spanende Bearbeitung 18.6-2
Trennschleifen 18.6-2
Ursachen 18.6-1, 18.6-4
Werkstoffschädigung 16.1-13
ZfP-Nachweis 18.6-27
Überholbarkeit, Maßnahmen 16.3-4
Überholhandbuch 15-3, 15-8, 16.1-13, 16.2-5, 16.2-12
Bildmaterial 16.1-13
Mängel 16.1-15
Überholintervalle, Druckeigenspannungsabbau 18.4-33
Überlappung
durch spanende Bearbeitung 18.2-15,
Risswirkung 18.7-2

© Axel Rossmann - Turbocoast
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Überlastung
duch Spannen 18.5-1
durch Werkzeugbruch 18.5-1
Rattern 18.5-1
Überlastunge
in der Fertigung 18.5-1
Überprüfung
auf Koksbildung 16.2-12
Überprüfung,
mit Boroskop 16.3-14
Überschleifen von Schaufelspitzen
Schwingermüdung 18.5-13
Übertemperatur
Verdacht auf 16.1-13
Übertretung 16.4-3
Überwachung
eines Fertigungsprozesses 17.1-16
ultra-high tensile strength 15.2.2-9
Ultraschall 17.3-8
Prüfung der Haftfestigkeit 17.3-35
Ultraschallbearbeitung
Schwingermüdung 18.5-14
Ultraschallkontur 17.3-13
Ultraschallprüfung 17.3-8
Blind Spots 17.3-9
Einfluss auf die Festigkeitsnutzung 15.2.2-7
Einfluss der Korngröße 15.2.2-7
Einfluss von Riefen 18.1-18
geeignete Kontur 17.3-13
Gras 17.3-9
POD 17.3-5
Turbinenscheibe 17.3-13
Ultraschallreinigen
Schwingermüdung 18.5-16
Ultraschallreinigung
Schwingermüdung 18.5-10, 18.5-15
Ultraschallverfahren
Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Ultrasonic Inspection. ***Siehe*** **Ultraschallprüfung**
Umetikettieren 17.1-13
Umformtechnik
Oberflächenverunreinigung 18.3-10
Umfüllen
Medien 17.1-13
Umgebungsbedingungen
Einfluss auf Beschichtungsvorgang 18.8-8
Umgebungseinflüsse 15.2.2-7
Umgebungsmediums
Einfluss auf das Risswachstum 15-20
Unachtsamkeit
Staubablagerungen 18.3-6
Ungenauigkeiten
an Verdichterschaufeln 18.9-8
United Kingdom Flight Safety Committee 16.4-3
Unterlassung 16.4-3
Unterlassungsrisiko 15.2.2-1
Unterschriften 16.2-7
Untersuchung
von Fremdpartikeln 18.7-13
Untersuchung von Wartungsfehlern, formblatt-gestützt 16.4-4
Unwuchten
Verkanten 18.2-4
Zusammenhang mit Graten 18.2-11
Ursachen
für Überhitzung 18.6-4
für Überhitzungen 18.6-1
Ursachen für Wartungsprobleme, Wahrscheinlichkeit 16.4-3
Ursachenermittlung
Aussage von Häufigkeitskurven 17.1-12
Ursachenmodell 16-2, 16-3
Users Guide 16.4-1
MEDA 16.4-4

V

Vakuum
Einfluss von Riefen 18.1-17
Oberflächenverunreinigung 18.3-14
Verfahren im 18.1-17
Veränderung als Warnzeichen
Glanz 17.1-19
Prozessbäder 17.1-19
Verbesserungen
Aufwand 15.2-11
aus Synergie 18.1-4
bei Wartungsproblemen 16.4-6
Evolutionäre 15.2.2-1
Revolutionäre 15.2.2-1
Verbiegen 18.5-20
in der Fertigung 18.5-1
Richten 18.5-1, 18.5-22
Verbindungen zur Flugzeugzelle 16.3-1
Verbindungselemente
Standard 16.3-4
Standardisierung 16.3-4
Verchromen
Funkenbildung 18.6-16
Gesundheitsgefahr 16.3-20
Verdichter
Gehäuse, Verzug 18.9-17
Leitapparat, Schädigung durch Schmelzperlen 18.6-13
Leitschaufeln, verstellbare 18.9-6
Rotor, Abdeckung gegen Spritzer 18.6-22Rotorschaufeln, Schwingbruch durch Pumpen 16.1-18Strömungsstörungen 16.1-17
Schaufel
axf-Prüfung 17.3-30
Auswirkung von Ungenauigkeiten 18.9-8
Eiffelturmeffekt 17.3-30

© Axel Rossmann - Turbconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Einfluss der Rauigkeit 18.1-12
Einflüsse auf die Resonanzfrequenz 17.3-30
Einfluss der Zerspanungsrichtung 18.1-14
Kanten
Entgraten 18.2-15
V errundung 18.9-9
Kanten runden 18.2-15
Vorteile von FVK 15.2.3-15
Wareneingangsprüfung 17.3-30
Scheibe, Bruch an Kontaktierung 18.6-19
Verdichterpumpen (Strömungsabriss) 16.1-17
Bauteilüberlastung 16.1-17
Identifizieren 16.1-15
Knallgeräusch 16.1-18
Verfahren
Änderung, Einfluss auf Schwingfestigkeit 17.2-12
Entwicklung 17.1-10
Erprobung 18.7-25
bauteilspezifisch 17.1-14
fehlendes für eine Technologie 15.2.3-7
Kontrolle 15.2.3-8
Medien, gesundheitsschädlich 16-11
Umstellung, Risiken 18.1-9
zum Entgraten 18.2-15
Verfärbung
Risslage 18.7-10
Rissfläche 18.7-13
ungewöhnliche 16.1-8
Verfestigung 17.2-9
Einfluss auf
die Schwingfestigkeit 18.4-19
Eigenspannungen 18.4-16
entfernen 17.2-9
Härteanstieg 18.4-44
Mechanismus 18.4-42
Schwingfestigkeit 17.2-11
Zonen 15-29
Verformungen
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.5-19
Verformungsverfahren
Eigenspannungen 18.4-13
Einfluss der Rauigkeit 18.1-18
Verhalten von Vorgesetzten 17.5-5
Verhaltensnormen 16-7
Verkanten 18.5-2
entstehung von Bindefehlern 18.2-4
Entstehung von Unwuchten 18.2-4
Fügekraft 18.5-2
Passdurchmesser 18.2-4
Verlauf
Riss 18.7-8
Verletzungsrisiko
Grat 18.2-1
Vermeidung
von Rissbildung 18.7-25
Verrunden
Kontur 18.2-15
von Kanten 18.2-3
Versagen
Kriterium 15-18
Mechanismus
gutmütiger 15.2.3-16
von FVK 15.2.3-16
Risiko 15.2.2-4
in der Auslegung 15.2.3-10
Risiko 15.2.2-4
in der Auslegung 15.2.3-10
werkstoffspezifisches 15.2.3-16
Versäumnis (engl. lap) und - Verwechslung 16.4-3
Verschleißgrübchen 16.2-9
Verschleppung (von Medien)
durch Reinigungsbäder 18.3-5
Entfettungsbäder 18.3-5
mit Transportvorrichtungen 18.3-5
Oberflächenverunreinigungen 18.3-5
Verschlüsse
Gestaltung 16.3-4
Sicherung 16.1.1-11
Verschmutzung / Verunreinigung
Aufschmieren von Fremdmetall 18.3-22
Ansaugen vom Triebwerk 18.3-8
Anschmelzungen durch Fremdmetall 18.3-22
angesaugter Lacknebel 18.3-8
Ätzmittelrückstand 18.3-34
auffinden in Hohlräumen 18.3-40
Auswirkung
auf die Haftfestigkeit 18.3-29
auf Diffusionsschutzschicht 18.3-20
Diffusionsvorgänge durch Fremdmetall 18.3-22
durch Abdeckungen 18.3-42
durch Handschweiß 18.3-35
durch Kondensation von Metalldampf 18.3-6
durch Wismut 18.3-21
durch Zinn 18.3-21
Durchströmter Querschnitte 18.3-17
einer Entstaubungsbohrung 18.3-18
Enfluss auf Metallfilz 18.3-13
Entstehungsursachen 18.3-2
Fehler auslösen an Reibschweißung 18.3-30
Herkunft 18.3-1
identifizieren 18.3-39
Nacharbeit 17.5-3
Kühlluftkanäle 18.3-18
Transport durch Abgase 18.3-5
Turbinenschaufel 18.3-18
Siliziumkarbid in 18.3-18
von Gleitringdichtungen 18.3-17
von Oberflächen 18.3-1
von Strahlgut 18.3-6
von Wälzlagern 18.3-17

© Axel Rossmann - Turbo-Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Verschraubungen
Gestaltung 16.3-4
Probleme 16.1-10
Verschweißen (Kaltverschweißen, Fressen)**,** Späne 18.5-1
Versehen (Begriff) 16.4-3
Verspannung, Entstehung von Eigenspannungen 18.4-38
Versprödung
an Graten 18.2-4
Brennkammergehäuse durch Ni-Cd 18.3-24
Diffusion von Kadmium 18.3-24
Ti- Schweißnaht durch Fe 18.3-6
Titanlegierung 18.7-19
Titanlegierung durch Sauerstoffaufnahme 18.7-10
Verständnis von Anweisungen 16.2-2
Verstärkungen, Faserorientierung 3-D 15.2.2-4
Verstopfung von Heißteilen 18.3-30
Verstöße (Begriff) 16.4-3
Arten: Routine, Übertretung *Siehe* Wartungs-unglücke
Hauptarten 16.4-3
Versuch, ausreichend betriebsnah 15.2.3-18
Vertauschen
Medien, Bauteile, vorrichtungen. Werkstoffe 17.1-13
von Vorrichtungen 17.1-13
Verursacher bei Wartungsproblemen 16.4-4
Verwechslung 16.4-3
unsichere Identifikation 17.4-2
Verwendbarkeit, Entscheidung über 18.6-27
Verzögerte Rissbildung 18.7-22
Verzug 18.9-17
bei Lagerung 17.3-23
durch Schweißeigenspannungen 18.4-9
Eigenspannungen 18.4-2
Faservertärkter Metalle 18.9-19
Faserwerkstoffe 18.9-19
im Betrieb 18.4-38
Inhomogene Bauteile und Werkstoffe 18.9-18
Korrektur durch Kugelstrahlen 18.9-17
Relaxation bei Lagerung 17.3-23
Verdichtergehäuse 18.9-17
Vibrationshämmern, Schwingermüdung 18.5-14
Vibrografkennzeichnung 17.4-9
Violations. *Siehe* Verstöße
Visuelle Kontrolle/ Prüfung 17.3-8 /Befund
auf Metallspritzer 18.6-25
Dokumentation 17.3-26
vor Fertigungsschritt 18.3-40
Volumen
Ahängigkeit der Festigkeit 15.2-7
Änderung
durch Gefügeänderung 18.9-13
Nickellegierung 18.9-13
belastetes 15.2.3-20
Vorbereitung für ZfP 17.3-2
Vorgesetzte, Verhalten 17.5-5
Vorrichtung 16.3-8
Aufschmierungen 18.3-6
Spannen 18.5-2
vertauschen 17.1-13
Vorschriften 17.1-5
Angaben 17.3-22
Eigenschaften 17.1-5
Vorwärmung, Beschichtung 18.8-12

W

Wachstumsfähige Fehlstellen,/Fehlergröße 15-22
Technologie mit 15.2.3-8
Wahrscheinlichkeit
eines Flugunfalls 17.1-1
eines Werkstofffehlers 15-24
von Kausalitäten 16.4-9
von Ursacehn für Wartungsprobleme 16.4-3
Wälzlager
Beschädigung bei Montage 16.3-12
Laufbahnrauigkeit 18.1-12
Maßänderung durch Wachsen 18.9-14
Schäden durch Grate 18.2-11
Verschmutzung 18.3-17
Wandstärke
Einfluss auf Resonanz 18.9-4
Einfluss von Abweichungen 18.9-4
Wandsttärke
Abweichung bei Blechen 18.9-1
Wareneingangsprüfung 17.1-6, 17.3-27, 17.3-28
Verdichterschaufeln 17.3-30
Wärmebehandlung
Abbau von Eigenspannungen 18.4-32
Eigenspannungen 18.4-29
Entstehung von Eigenspannungen 18.4-12
Temperaturverteilung 18.4-31
Vorgänge beim Spannungsarmglühen 18.4-38
Wärmedämmschicht
Abplatzungen
Folgeschäden 18.8-3, 18.8-4
Eigenspannungen 18.4-14
Segmentierung 18.8-12
Segmentierungsriss 18.7-6
Wärmedehnung, Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-16
Wärmekapazität, Einfluss auf Zerspanung 17.1-15
Wärmeleitfähigkeit, Eifluss auf Eigenspannungen 18.4-17
Wärmespannungen 18.4-37, 18.7-4
Eigenspannungen 18.4-9
in Chargiergestellen 18.4-37
Wärmestrahlung, Einfluss der Rauigkeit 18.1-12
Wärmeübergang, Einfluss der Rauigkeit 18.1-8,

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18.1-12
Warmfestigkeit
Titanlegierungen 15-22
Warmfestigkeiten
Eigenspannungen 15.2.2-8
Warnaufkleber 16.1.1-11
Warnsignale
Konstriktionsmangel 15-8
Warnzeichen
Bei der Einführung einer Technologie 15-13
Wartbarkeit
Anschlüsse 16.3-4
Gesichtspunkte 16.3-2
Maßnahmen 16.3-4
militärische Triebwerke 16.3-2
Wartung 15-8
Ablenkung 16-6
Arbeitskarten 16.1.1-7
Auswirkung von Ermüdung 16-6
Beleuchtung 16-18
Dokumentationen 16-6
Fehleranalysen 16.4-3
Hubschrauber 16.3-8
Information 15.2.3-21, 16.1.1-4
Irrtümer, Fehler 16.2-2
notwendige Kennzeichnungen 16.3-8
Organisationsebenen 16.4-4
Outsourcing 16.1.1-9
Personal, Befragung bei Problemen 16.4-6
Schulungsprogramme 16-8
Verstöße 16-9
Wartungsfehler
Einfluss des Managements 16.4-1
Statistik der häufigsten Ursachen 16.4-1
Wartungsfreundliche Konstruktionen 16-1
Wartungshandbuch 16-18
Wartungshandbücher 15-3, 16.2-19
Brauchbarkeit 16.2-19
Empfehlungen aus der Praxis 16.2-21
Qualität für die Nutzung 16.2-19
Wartungsklappen 16.1.1-10
Wartungsliste 16.1.1-14
Wartungsmannschaft
Motivation 16.4-6
Wartungsöffnungen 16.1.1-10
Schichtwechsel 16.1.1-13
Wartungspersonal
Einsparungen 16.1.1-1
Erfahrung 16.1-15
Schulung 16-17
Weiterbildung 16.1-4
Wartungspersonals
Ausbildung 16.1-4
Wartungsprobleme
Rückmeldung von Abhilfeerfolg 16.4-6
Verbesserungen einführen 16.4-6
Verursacher 16.4-4
Wahrscheinlichkeit der Ursachen 16.4-3
Wartungsprogramms
Versagen 16-20
wartungstypische Einflüsse 16-1
Wartungsunglücke 16.4-3
Waschmittels
Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Wasserstoff
Aufnahme an Graten 18.2-4
Wasserstoffaufnahme 18.8-6
Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion 18.7-20
Wasserstoffversprödung 18.7-4, 18.7-9, 18.7-22
Einfluss von Eigenspannungen 18.4-26
Rissbildung bei Lagerung 17.3-23
verzögerte Rissbildung 18.7-22
Wasserstrahlschneiden
Schwingermüdung 18.5-14
Weiterbildung 17.1-5, 17.1-8
Wartungspersonal 16.1-4
Weiterverwendbarkeit 16.1-13
Einschätzung 16.1-6
Welle
Bruch durch Cl-einwirkung 18.7-19
Rissbildung durch Entlackungsbad 18.7-19
Zahnrad, verbogen 16.3-10
Werkstattausrüstung 16.2-6
Werkstoffdaten
für die Auslegung 15.2.3-19
Werkstoff
Eigenschaften, Einfluss auf POD 17.3-6
empfindliche 17.2-4
Festigkeit zu hoch, Risiko 15.2.2-6
Versagensverhalten 15.2.2-7
Gerichtet erstarrter 15.2.2-12
Gesundheitsgefahr bei Radioaktivität 16.3-15
Gesundheitsgefahren 16.3-17
Gesundheitsschädlich 16-11
Sensibilisierung 17.2-9
Spröde 15.2.3-20
Verhalten 15-18
Vertauschen 17.1-13
Werkstofffehler, Wahrscheinlichkeit 15-24
Werkstoffgrenzen, Auslegung 17.2-4
Werkstoffschädigung, Überhitzung 16.1-13
Werkstoffspezifisches Versagen 15.2.3-16
Werkstofftechnologie 15.2-3
Potenzial 15.2-7
Werkstofftypische Fehler 15-25
Werkstoffumstellung, Risiko 17.3-1
Werkstück
Anlauffarben 17.1-18
aus Spannvorrichtung reißen 18.5-2

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fressem mit Werkzeug 18.5-7
Werkstückeigenschaften, Auswirkung der Fertigung 17.2-7
Werkzeug
Bruch 18.5-1, 18.5-8
Fressem mit Werkstück 18.5-7
Handhabung 16.3-4
Standard 16.3-4
Schneide, Anlauffarben 17.1-18
ungeeignet 16.3-6
Wertanalyse 17.2-6
Wertschätzung 17.1-4
Wide chord-schaufeln
Schwingverhalten 15-26
Wide-Chord-Bauweise 18.9-6
Wide-chord-Schaufeln
Pumpgrenzabstand 15-35
Wiedererstarrte Zone 18.4-11
Wiedererstarrungszone. Siehe Recast Layer
Wiederverwendbarkeit
selbstsichernde Elemente 16.3-4
Wig-Schweißen 16.3-19
Gesundheitsgefahr 16.3-19
Wirbelstromprüfung 16-20, 17.3-10
automatisiert 17.3-5
POD 17.3-5
Scheibenprüfung 18.6-17
Wirbelstromprüfungen
POD 17.3-5
Wismut
Bruch einer Turbinenschaufel 18.3-32
Gesundheitsgefahr 16.3-19
Lötrissigkeit 18.3-27
Verunreinigung 18.3-21
Wissensbasierten Ansatz
Fehlerbeseitigung 15.2.3-2
wissensbasiertes Konstruieren 15-2
Wolframdraht verstärkten Nickellegierungen 15.2.2-3
Wolframelektroden, Gesundheitsgefahr 16.3-19
Wuchtentnahme, Riefen 18.1-15

X

X-Ray Inspection. *Siehe* Röntgenprüfung
X-Ray Micro Focus. *Siehe* Mikrofokus Röntgen

Z

Zahnräder, Aauswirkung von Eigenspannungen 18.4-29
Zahnradwelle, verbogen 16.3-10
Zeichnungsangaben zur Rauigkeit 18.1-7
Zeitdruck /Zeitmangel 16-7
Schichtübergabe 16.1.1-3
Zentrierflächen aufschieben 18.5-2
Zerspanen
Druckspannungen in Titanlegierung 17.2-16
Eigenspannugnen 18.4-7
Einfluss der Rauigkeit 18.1-20
Einfluss der Wärmekapazität 17.1-15
Erprobung 17.1-14
Geräuschentwicklung 17.1-19
Pfeifgeräusche 18.5-13
Prozess
eigenmächtig verändern 18.5-5
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 17.2-15
Richtung, Einfluss auf Verdichterschaufel 18.1-14
Schwingermüdung 18.5-13
Topografie 18.1-14
ungewöhnlicher Geruch 17.1-19
Verhalten, Rückschlüsse 17.1-17
Zugspannugnen 17.2-16
Zerstörende Prüfung 17.3-27
bei Wareneingang 17.3-28
Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) 17.3-1
auffindbare Rissgröße 18.7-2
Auffindwahrscheinlichkeit 17.3-2
Beeinflussung durch Riefen 18.1-18
bei Klebungen 15-40
Benetzbarkeit 17.3-2
Berücksichtigung von der Konstruktion 17.3-14
Bewertung von Anzeigen 17.3-20
Dokumentation des Befundes 17.3-2
Durchschlupf 17.3-2
Einfluss der Erfahrung 17.3-20
Einfluss der Zugänglichkeit 17.3-2
Einfluss des Erwartungshorizonts 17.3-19
Einfluss von Spezifikationsangaben 17.3-22
Erfahrung des Prüfers 17.3-20
Fehlstellen 17.3-1
Schwachstellen 17.3-1
Stärken und Schwächen 17.3-8
Überhitzung 18.6-27
Vorbereitung 17.3-2
Verfahrensauswahl 17.3-13
Zinn als Verunreinigung 18.3-21
Zugänglichkeit
Anbaugeräte 16.3-1
für Drehmomentschlüssel 15-40
für ZfP 17.3-2
Ölfilter 16.3-6
Rückölpumpe 16.3-10
Zuganker mit Riefen 18.1-15
Zugeigenspannungen 18.4-1
Entstehung bei Überhitzung 18.6-7
in der Oberfläche 17.2-2
in Graten 18.2-4
Zugspannungen
in Beschichtung 17.2-11
Zerspanung 17.2-16

© Axel Rossmann - Turbocoach als Schulungsunterlage mit Lizenz

Zulässigen Fehlstellen 15-21
Zulassung
Behörden, Technologieentwicklung 15.2.3-14
einer Nacharbeit 17.5-4
Prüfungen 17.3-27
Triebwerksteile 17.3-32
Zündstelle
Bruch einer Turbinenscheibe 18.6-17
Schweißung 18.6-14
Zusatzmaterial, Abweichungen 17.1-14
Zwischenmenschlicher Kontakt 16-3
Zwischenringe, rotierend. *Siehe* Spacer
Zwischenstufenlabyrinth, sichere Gestaltung 15-43
Zyklen bis zur Inspektion 16.1.1-16
Zyklische Schleuderversuche 17.3-29
Zyklischen Lebensdauer, Demoversuch 15.2.3-7

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz