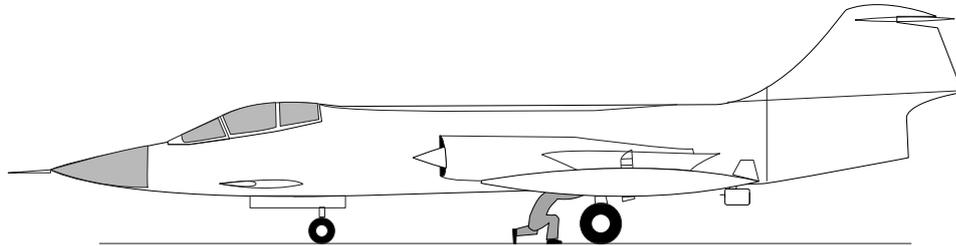


## 19.1.4 Wartungsfreundliche Konstruktion



**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 19.1.4-7 und Bild 25.2.2.1-4) 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 (Kapitel 19.2.1) 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 19.1.4-3.1 bis -3.3), um die Wartbarkeit zu optimieren (Bild 19.1.4-1 bis Bild 19.1.4-4.2, Lit. 19.1.4-4 und Lit. 19.1.4-7). Der Wartungsfreundlichkeit muss ein besonderes Augenmerk des Konstrukteurs gelten. Ein wichtiges Hilfsmittel kann dabei das **Handbuch „Human Factors Design Guide“** (Lit. 19.1.4-1) 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 Beschaukelung 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 19.1-8).

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 19.1.4-2 und Bild 19.1.4-4.1 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. 19.1.4-7).

Nicht zuletzt sind **gesundheitsgefährdende Materialien** und Verfahren zu vermeiden (Bild 19.1.4-8 und Bild 19.1.4-9). Dies kann die Gestaltungsfreiheit erschweren.

**Bild 19.1.4-1** (Lit. 19.1.4-3): 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 Rumpfliegen, ist jedoch die Zugänglichkeit der Anbaugeräte von der Unterseite günstiger (Bild 19.1.4-2).

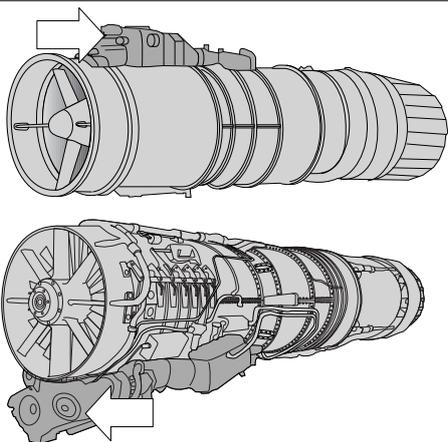
In diesem Zusammenhang ist die Positionierung der Anbaugeräte insbesondere bei **zivilen Fantriebwerken** zu erwähnen. Hier geht es darum, das **gleichzeitige Ausfallrisiko beider Triebwerke einer zweistrahligen Maschine bei Bruchstückaustritt zu minimieren**. Man bringt Aggregate, die potenziell gefährliche Medien führen (Ö, Kraftstoff), auf der sog. „**Wet Side**“ an (Band 2 Bild 8.2-3.2).

**Bild 19.1.4-2** (Lit. 19.1.4-2 und Lit. 19.1.4-3): 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**.

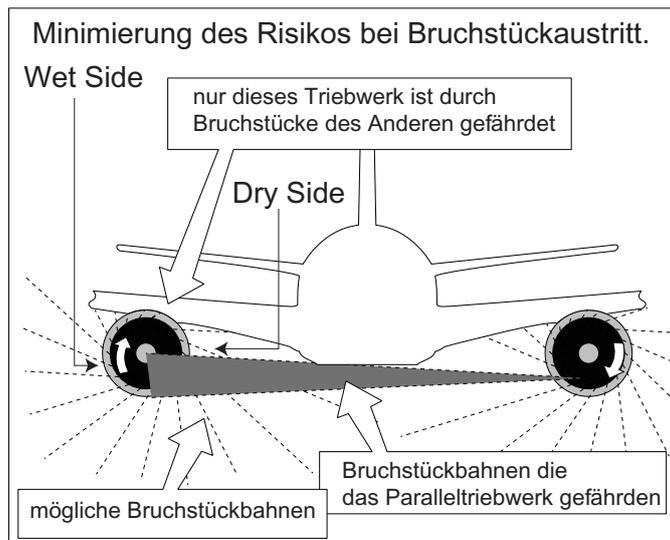
Im Vordergrund stehen Erfahrungen, insbesondere des **Betreibers, im praktischen Betrieb** (Bild 19.1.3-8 und Bild 19.1.3-9). Sie sind eine Basis für die Definition der Forderungen aus **Wartung und Überholung**. Daraus lässt sich das **Wartungs- bzw. Überholungskonzept** entwickeln.

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.

## 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



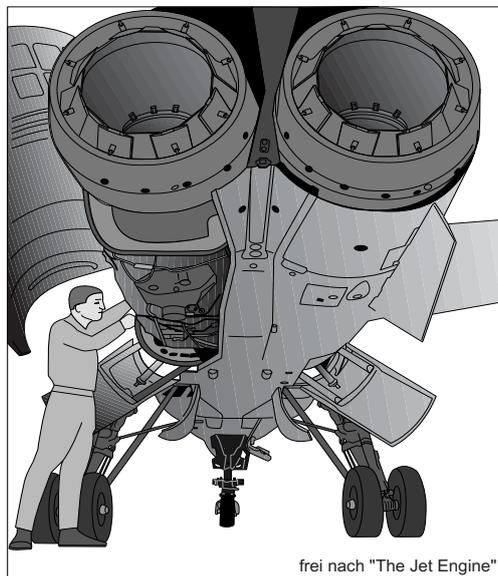
**Bild 19.1.4-1**

## Wartung: „Human Factors“ Konstruktionseinfluss

Die Berücksichtigung einiger Richtlinien ermöglichen dem Konstrukteur bereits eine wartungsgerechte 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.



### 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 LRU's
- 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 LRU's sind mit Drainagevorrichtungen zu versehen, die zu starkes Austreten beim Ausbau verhindern.

**Bild 19.1.4-2**

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 (Bild 19.2-5). **Öl- und Kraftstoffreste können an umliegenden Bauteilen Schädigungen** wie Quellen oder Versprödung von Elastomeren oder die Entstehung lästiger bzw. gefährlicher Dämpfe (Bild 19.2-11) bis zur Rissbildung an Metallteilen (Bild 19.2-15), 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 Flansch- oder Rohrleitungsver schraubungen.

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 Lager spiels (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 19.1.4-3.1** (Lit. 19.1.4-2 und Lit. 19.1.4-3): Das Beispiel eines modernen Triebwerkstyps für den Einsatz in großen Verkehrsflugzeugen zeigt neben der Einhaltung grundsätzlicher Richtlinien (Bild 19.1.4-2 und Bild 19.1.4-4.1 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.

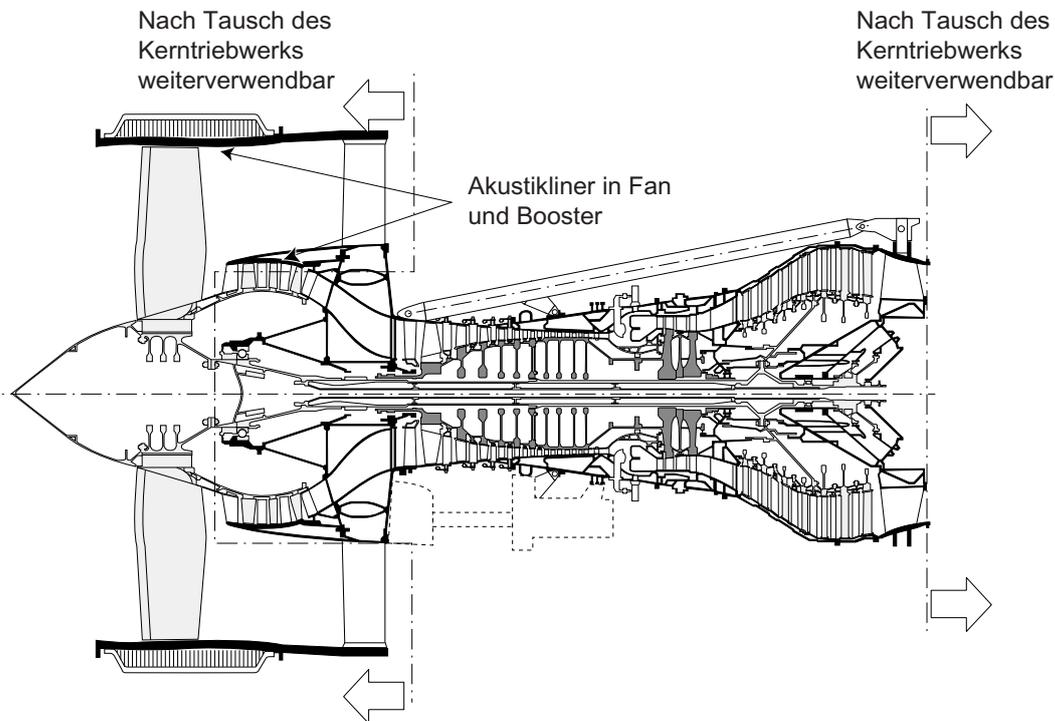
Bei **Rohrschellen** kommt es darauf an, dass diese nicht zur Montage auf- / oder zugebogen werden müssen (Bild 19.1.4-3.2).

Um **Probleme eines Modultauchs** 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.

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 integrealem Kraftstoffanschluss.
- Kraftstofffilter integraler Bestandteil der Kraftstoffpumpe.

**Bild 19.1.4-3.1**

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.

Eine kleine Arbeitserleichterung mit großen Folgen.

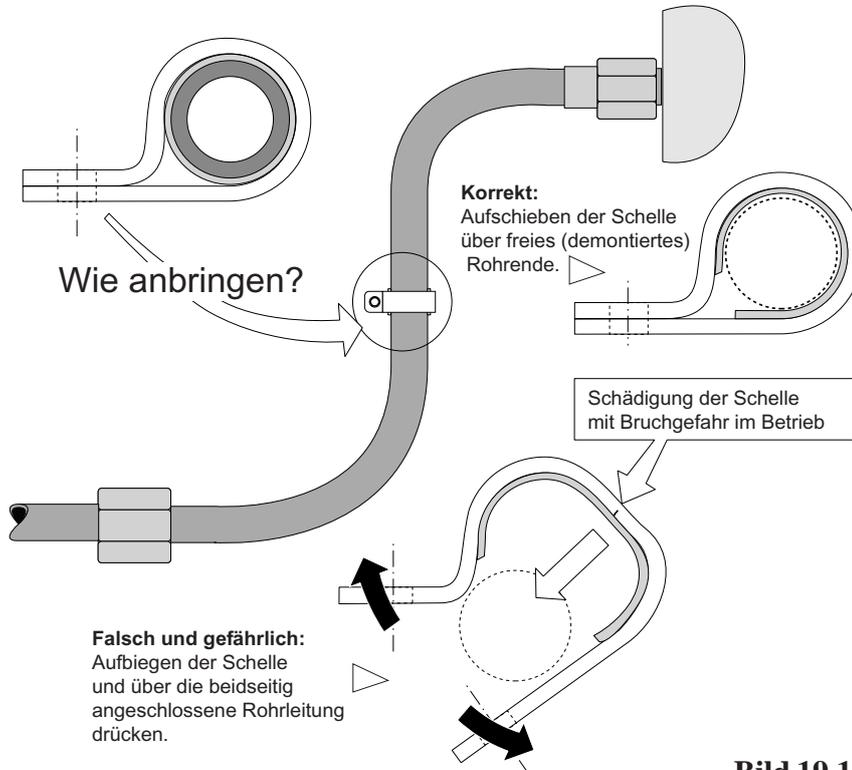


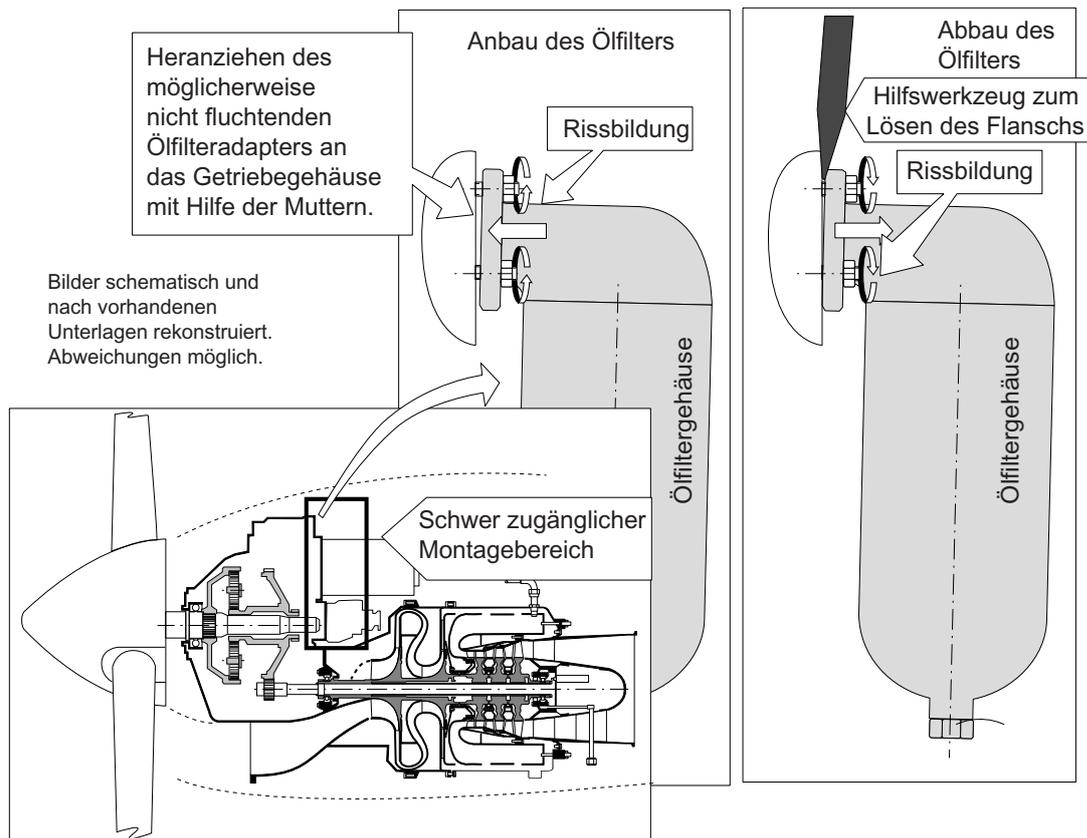
Bild 19.1.4-3.2

**Bild 19.1.4-3.2:** 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 19.1.4-3.1), die nicht aufgebogen werden müssen („Überwurfrohrschellen“).

**Bild 19.1.4-3.3** (Lit. 19.1.4-17): Dies ist ein eindruckvolles 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 19.1.4-5.2). Auch der Abbau des Flanschs ist erschwert. Das kann dazu motivieren, **ungeeignetes Werkzeug, wie einen Schraubenzieher, für das Lösen** anzuwenden (Rahmen

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 Befestigungsflanschs des Ölfilters am Getriebegehäuse einen Riss aufwies. Dieser verlief bis in die benachbarte O-Ringnut und führte zum Verlust des halben Ölvrorts.

Bild 19.1.4-3.3

rechts). 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.

## Wartung: „Human Factors“ Konstruktionseinfluss

**Bild 19.1.4-4.1 und Bild 19.1.4-4.2** (Lit. 19.1.4-4 und Lit. 19.1.4-5): **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 abzubauenen bzw. auszutauschenden Komponenten** verständlich.

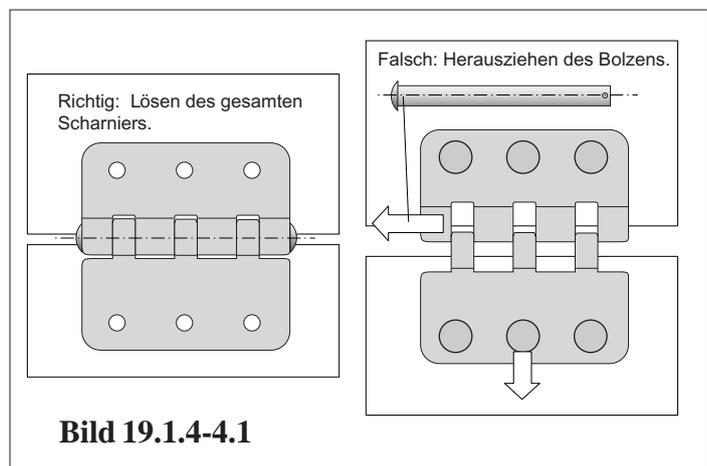
Eine besonderer Wert wird offensichtlich auf **klare, eindeutige und übersichtliche Dokumente** gelegt. Daraus ergibt sich, dass die Darstellung den gesamten erforderlichen Arbeitsbereich umfasst. Dabei spielen die eindeutige Identifikation der Lage zu einem Bezugspunkt bzw. einer Bezugslinie sowie die 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 militärischen 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).

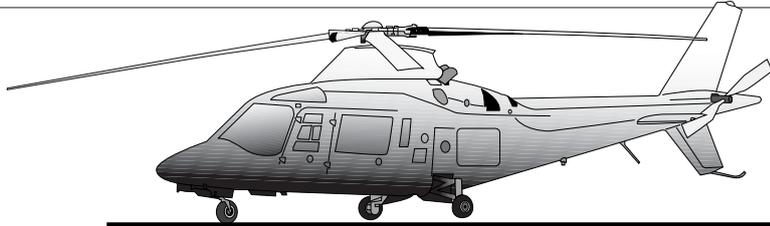
Anschlüsse/Kupplungen für Betätigungen bzw. Rückmeldungen wie Kabel und Stangen müssen leicht identifizierbar, einstellbar und tauschbar sein. Die Forderung nach einer **sicheren und einfachen Einstellbarkeit** ist bei der mechanischen Übertragung von Regelsignalen besonders augenfällig. Voraussetzungen 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 Herauspringen 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 19.1.1-7). Wird von den Klappen die Aerodynamik beeinflusst, müssen diese ausreichend genau positionierbar sein, um wirbelbildende Konturen zu vermeiden.



**Bild 19.1.4-4.1**

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 Messgeäße gewährleisten.
- Geeignete Zeichnungsgröße mit dem Ausschnitt 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

- An Wartungsorten
- Klebebänder nicht für die Kennzeichnung wo mit Benetzung von Kraftstoff oder Öl zu rechnen ist.

**Bild 19.1.4-4.2**

(Kein Anspruch auf Vollständigkeit, es gelten die jeweiligen Vorschriften!)

**Bild 19.1.4-5.1 und -5.2 (Lit. 19.1.4-9):** 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 zusammengefügte 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 1 Bild 4.3-6). 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 wur-

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."



"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 19.1.4-5.1

den. Die Rekonstruktion ergab, dass dabei die Pumpe **unter schlechter Zugänglichkeit montiert** werden musste. Offenbar kam es beim Aufschieben des Pumpengehäuses auf die Stehholzen („B“) zu einem Aufliegen der Zähne. Obwohl vor dieser Situation, wahrscheinlich aus ähnlichen einschlägigen Erfahrungen, explizit im Handbuch gewarnt wurde (Bild 19.1.4-5.1) ist es naheliegend, dass **mit Hilfe der Muttern „C“ der Montagewiderstand überwunden** und dabei die Pumpenritzelwelle verbogen wurde.

Schlechte Zugänglichkeit erfordert besondere  
Vorsicht und Sorgfalt!

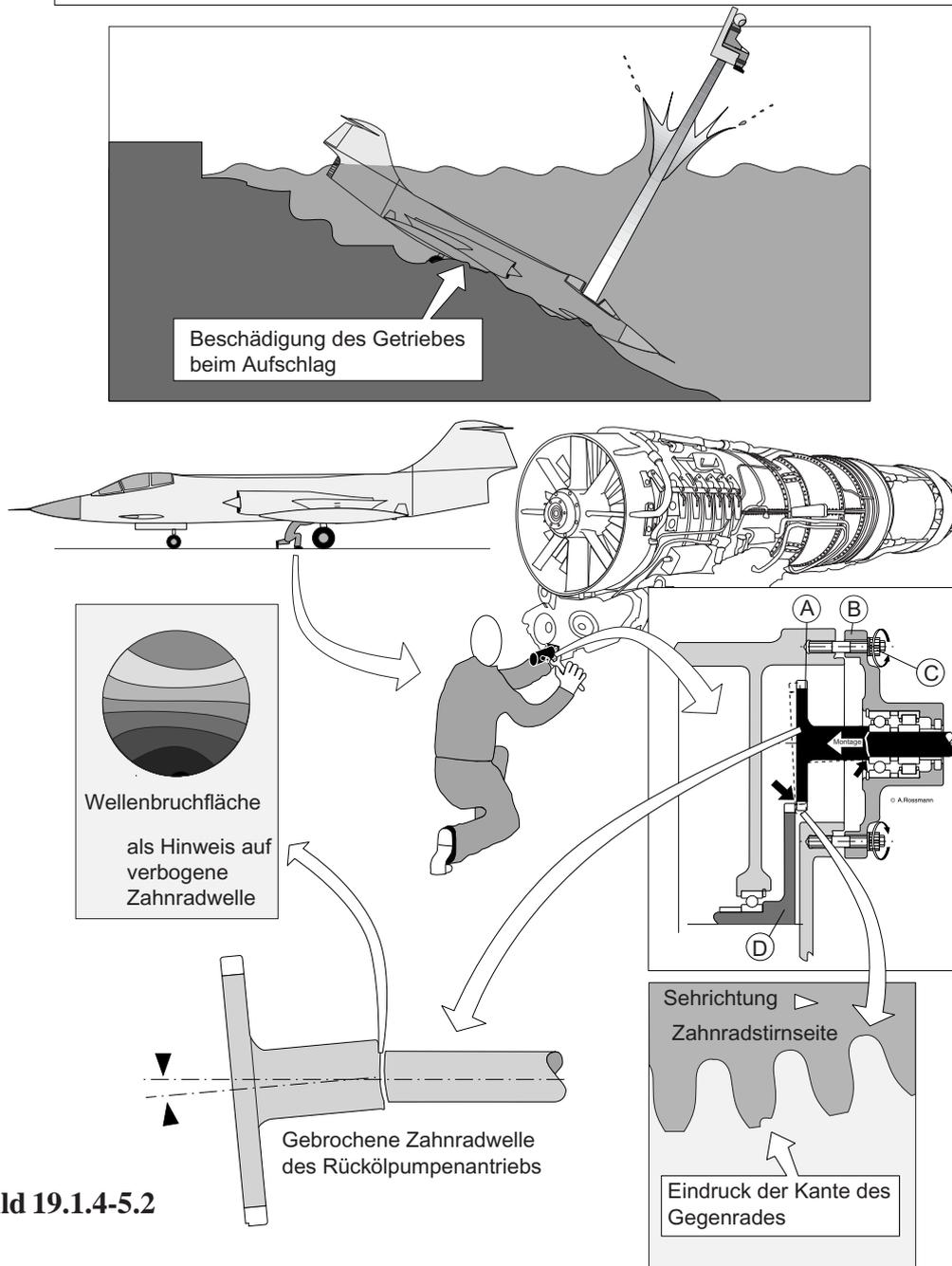
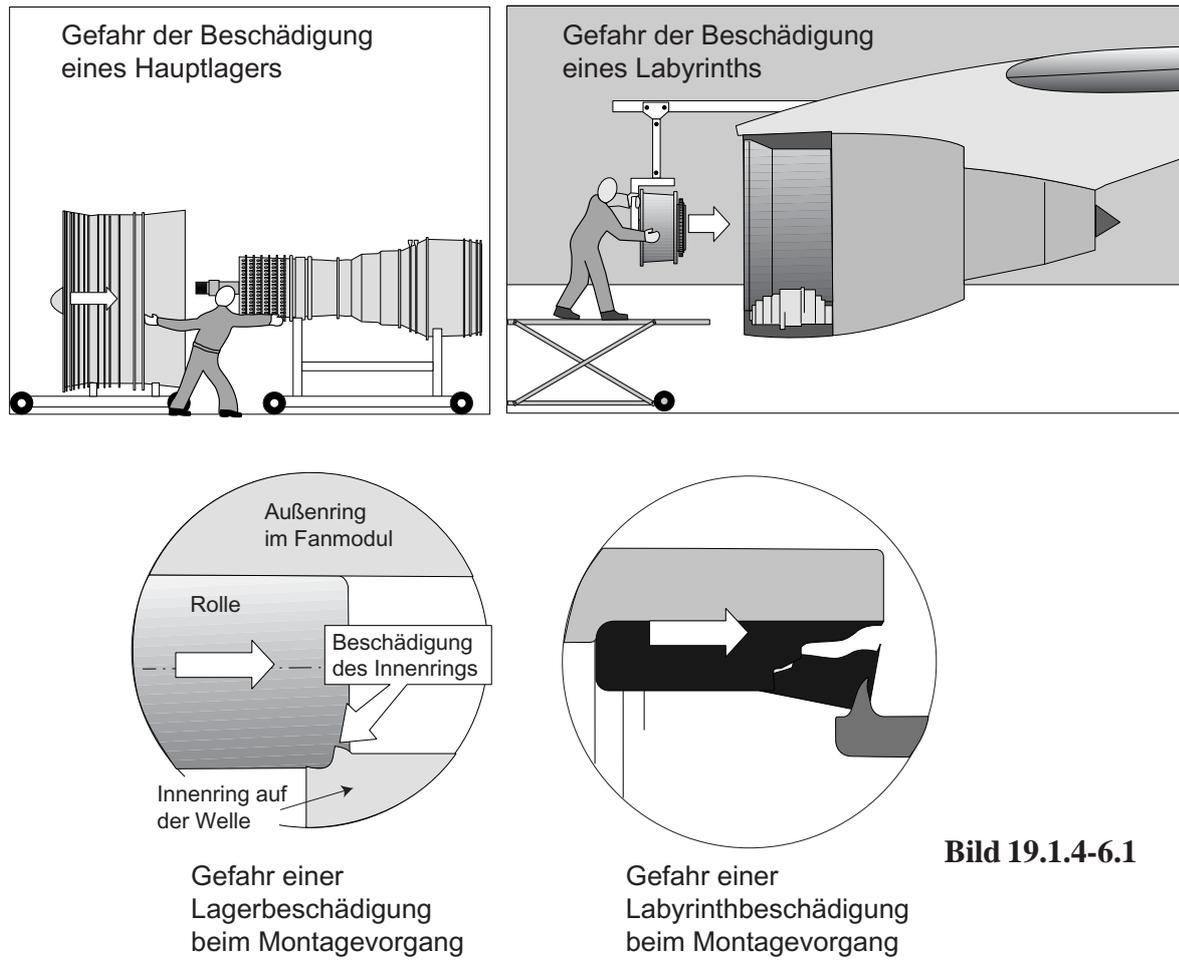


Bild 19.1.4-5.2

*Eine sofort eingeleitete Überprüfung der Triebwerke anderer suspekter Flugzeuge ergab weitere fünf Parallelfälle, die jedoch noch nicht zum Ausfall geführt hatten.*

Die Modulbauweise hat viele Vorteile. Sie birgt aber auch potenzielle Gefahren bei der Wartung, die der Konstrukteur berücksichtigen und minimieren muss.



**Bild 19.1.4-6.1** (Lit. 19.1.4-10): 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 er-

schwert. Je schwerer die zu fügenden Module sind, um so größer ist die Gefahr einer unmerkten gewaltsamen Beschädigung des Fügebereichs. Es handelt sich erfahrungsgemäß um **Wälzlager** (Laufflächen, Käfig und Wälzkörper, Bild 20.1-25 und Band 1, Bild 4.3-6), **Labyrinthe** (Spitzen, weiche und/oder spröde Anstreifbeläge). Auch filigrane Passdurchmesser, wie an relativ dünnwandigen Blechgehäusen (Bild 19.1.4-6.2, Skizze unten bzw. Beispiel 19.1.4-1), gehören dazu. Das gilt insbesondere für den **Fan-Modul** großer Triebwerke (Skizze oben links).

## Beispiele für kritische Modul-Trennzonen

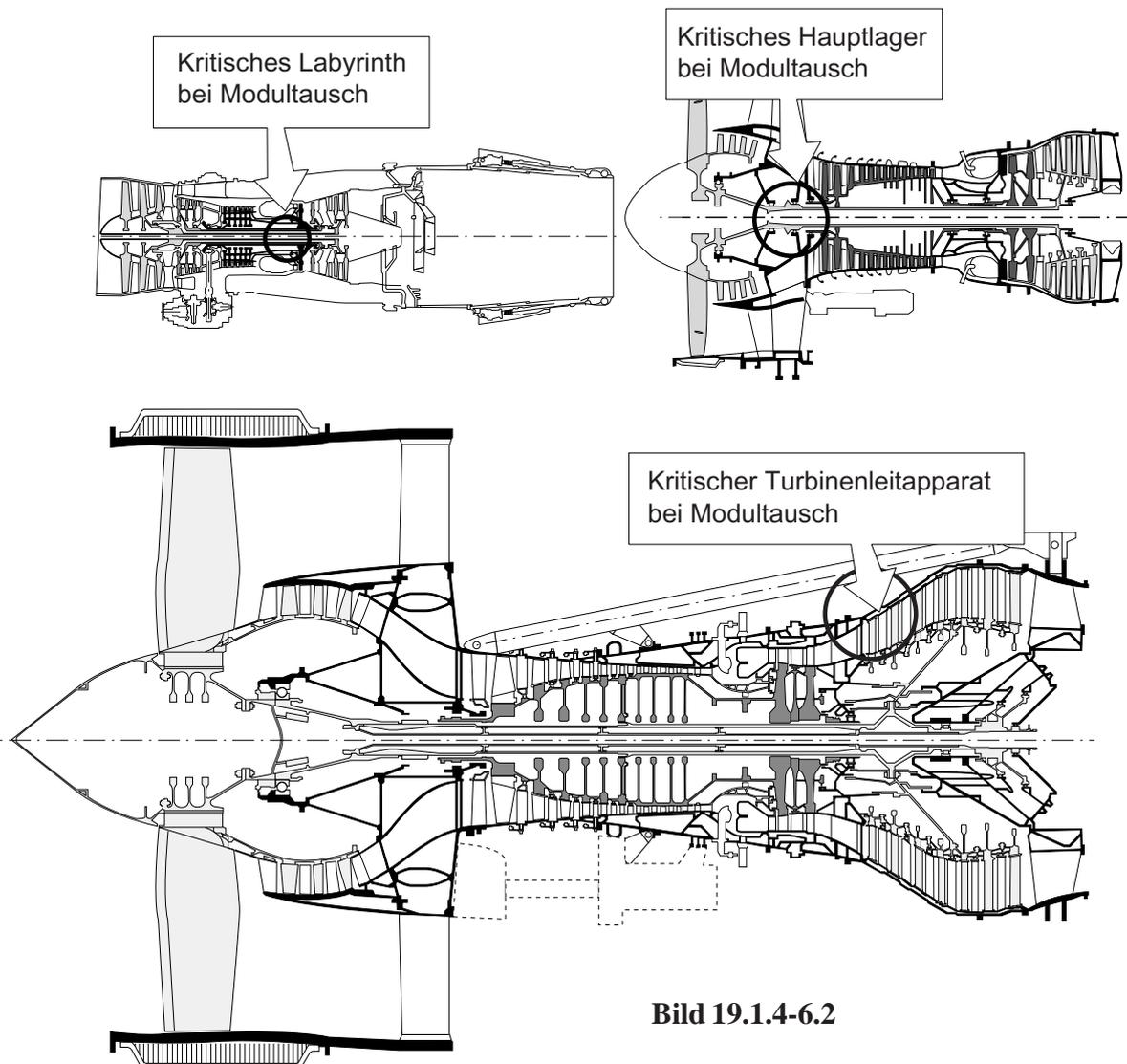


Bild 19.1.4-6.2

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.

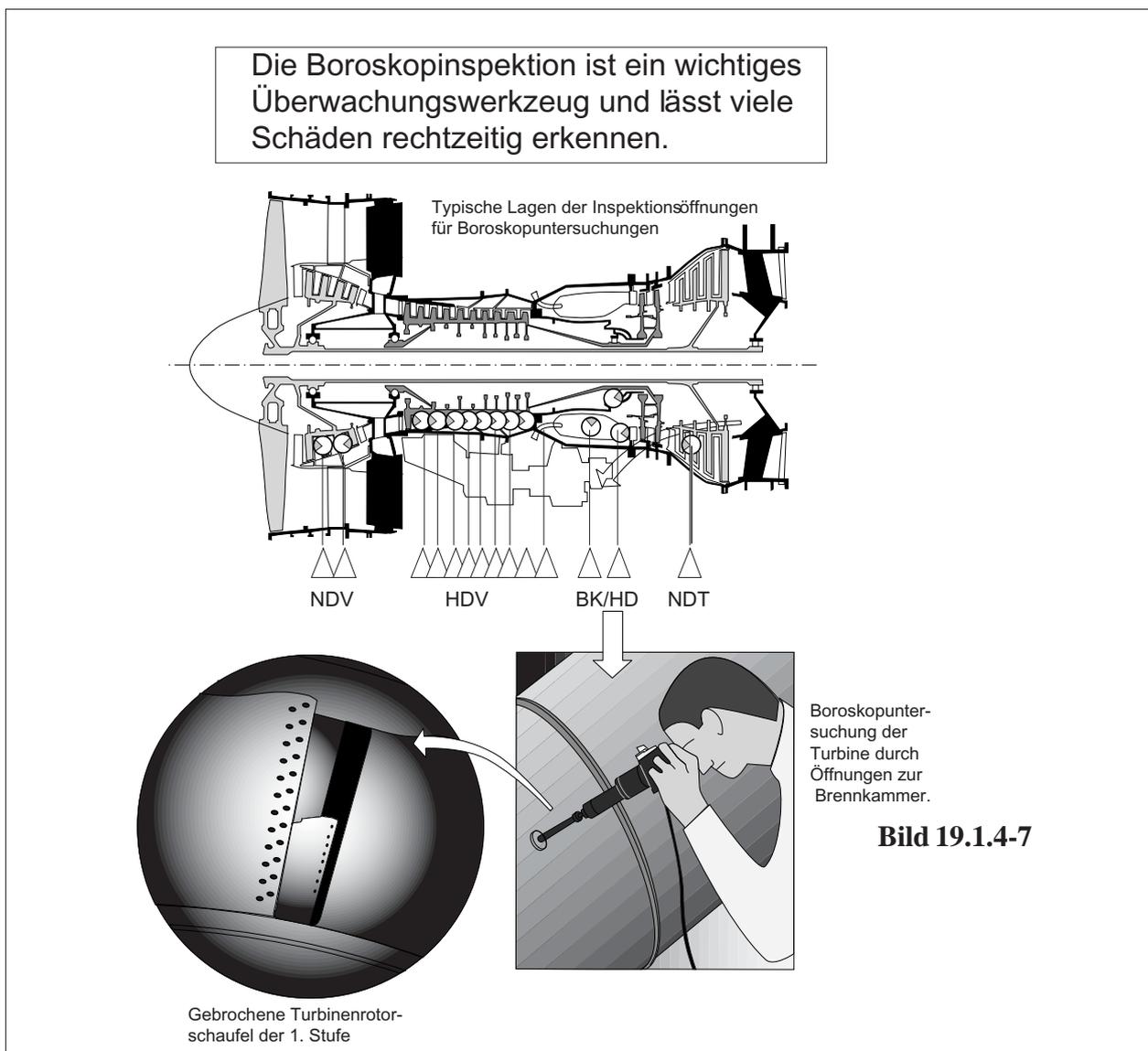
**Bild 19.1.4-6.2** (Lit. 19.1.4-10): In den Trennebenen der Module befinden sich die bei der Montage potenziell **beschädigungsgefährdeten Bauteilzonen**. Die dargestellten Beispiele beruhen auf Erfahrungen und Vorkommnissen. Skizze oben links zeigt ein militärisches Dreiwelientriebwerk mit ausgeprägter 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

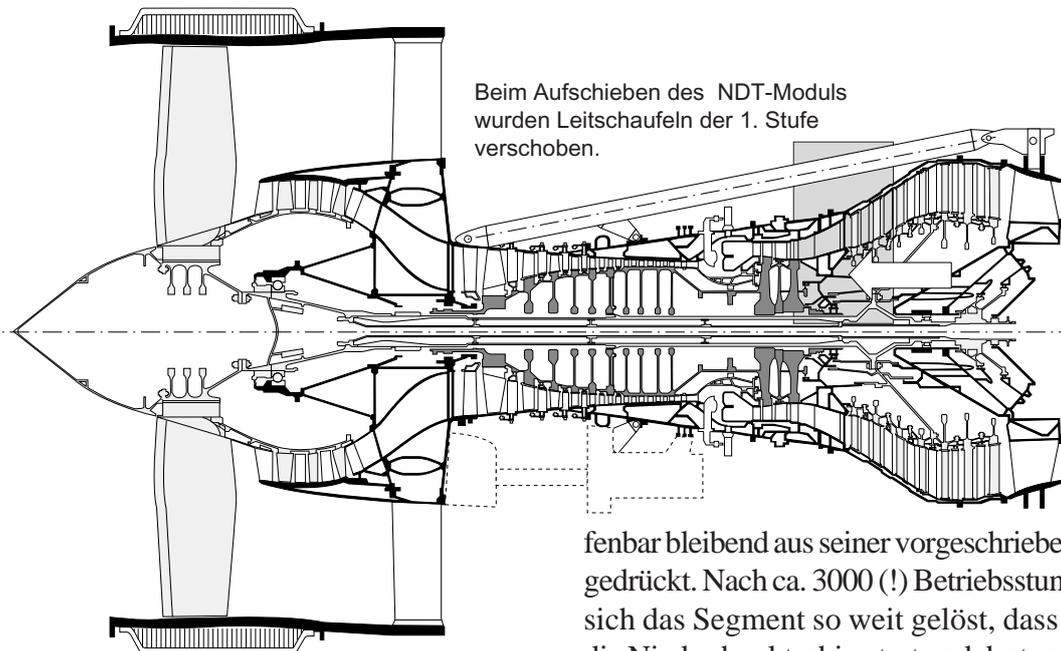
neuen, d.h. nicht abgeschliffenen Labyrinthspitzen bedingen deutlich kleinere Spalte als bei der vorhergegangenen Demontage. Das dürfte bei nicht optimalen Montagebedingungen im militärischen Einsatz die Problematik erhöhen (Band 2, Bild 7.2.2-6).

Die Skizze oben rechts zeigt den Fall eines schweren **Lagerschadens** mit Triebwerksausfall beim Start eines großen Verkehrsflugzeugs (Bild 19.1.4-6.1, Bild 20.1-25 und Band 1, Bild 4.3-6).

Die Skizze unten bezieht sich auf das Beispiel 19.1.4-1. In diesem Fall kam es bei der Montage des Moduls der Niederdruckturbinen zu einer **Beschädigung eines Turbinenleitapparates** mit umfangreichen Folgeschäden.

**Bild 19.1.4-7** (Lit. 19.1.4-2 und Lit. 19.1.4-12): 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 (Kapitel 25.2.2.1). 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).





Beim Aufschieben des NDT-Moduls wurden Leitschaufeln der 1. Stufe verschoben.

**Beispiel 19.1.4-1** (Lit. 19.1.4-10): An diesem modernen Typ eines großen Fantriebwerks kam es zum **Schaden in der Niederdruckturbinen** mit Bruchstückaustritt auf der Startbahn.

Ursache des Schadens war ein Problem beim Fügen des **großen und schweren Moduls der Niederdruckturbinen** 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 of-

fenbar bleibend aus seiner vorgeschriebenen Lage gedrückt. Nach ca. 3000 (!) Betriebsstunden hatte sich das Segment so weit gelöst, dass es durch die Niederdruckturbinen trat und dort umfangreiche Schaufelschäden erzeugte.

Dieser Vorfall überraschte den **OEM, der das Problem bereits in der Entwicklungsphase bemerkt hatte**. Daraufhin wurde der **Montageprozess geändert**, jedoch offenbar nicht ausreichend unter dem Gesichtspunkt „Human Factors“ des Modultauchs beim Betreiber erprobt. Nach diesem Schaden wurden sofort 28 weitere suspektete Triebwerke mit einer Boroskopinspektion am Flügel auf versetzte Turbinenleitapparatsegmente überprüft.

**Bild 19.1.4-8** (Lit. 19.1.4-1, Lit. 19.1.4-14 und Lit. 19.1.4-16): Diese Anwendungsbeispiele für **gesundheitsbedenkliche Triebwerkskomponenten** bzw. deren Werkstoffe (Bild 19.1.4-10) 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 19.1.4-9) 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.

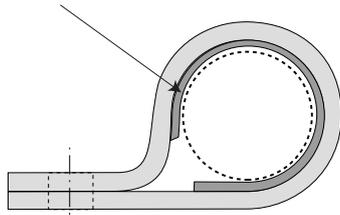
Neben Schrauben (Skizze oben rechts), werden auch viele andere Bauteile aus **korrosionsgefährdeten Stahlteilen** wie Verdichtergehäuse und -scheiben **kadmiiert**. Bei erhöhten Betriebstemperaturen muss eine Nickelzwichenschicht (Ni-Cd-Beschichtung) eine Schädigung des Grundwerkstoffs (Bild 21.1-5 und Bild 21.2.3-4) 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-

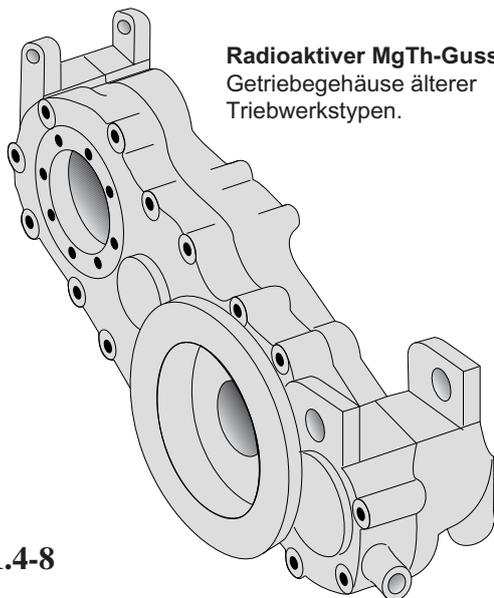
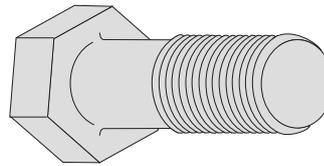
## Gesundheitsrisiken durch „Hazardous Materials“

Beispiele für Bauteile von Triebwerken aus potenziell gesundheitsschädlichen Materialien.

**Asbest:** Beilagen in Rohrschellen und als isolierende Unterlagen

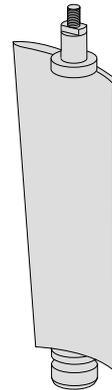


**Kadmium:** Dient bei korrosionsgefährdeten Stahlteilen als Korrosionsschutz.



**Radioaktiver MgTh-Guss:**  
Getriebegehäuse älterer  
Triebwerkstypen.

**Cu-Berylliumlegierung:**  
Gelötete verstellbare  
Verdichtereintrittsleitschaukel



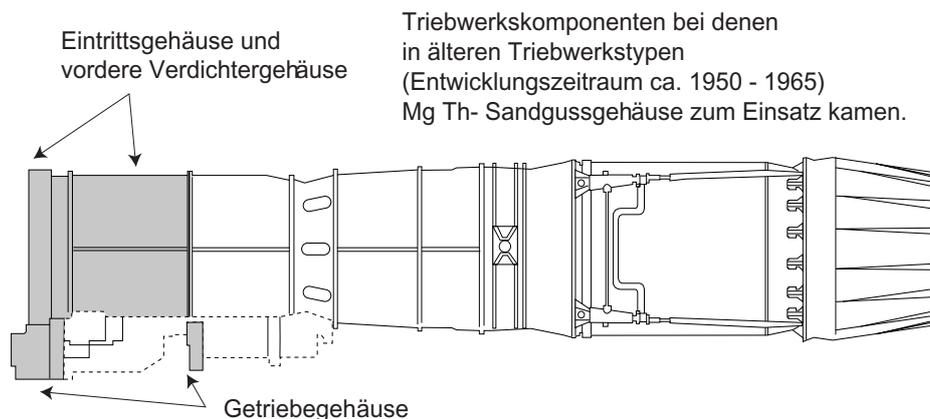
**Bild 19.1.4-8**

deren Verdichterbereich bei alten Triebwerkstypen beliebt. Man nutzte das niedrige spezifische Gewicht, bei einer für Leichtmetalllegierungen hohen Kriechfestigkeit.

Verdichtereintrittsleitschaukeln (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 vorkommen, dass die **Giftigkeit eines Stoffes auf Verunreinigungen zurückgeht**. Man spricht davon, dass dies bei **Ni-Gafit Einlaufschichten** der Fall sein kann.

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<sub>x</sub>-Ionen aus Verchromungsbädern.
- Cr- und Ni-Oxide die von Heißeilen abblättern.
- Lösungsmittel (Entfettungsbäder)
- Ätzmittel (z.B. chlorhaltige Bäder für Ni-Legierungen)
- Pulver aus Verfahren: Beschichten, Löten, thermisches Spritzen

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.

**Bild 19.1.4-9**

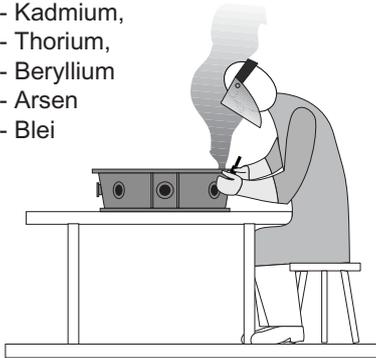
**Bild 19.1.4-9** (Lit. 19.1.4-1 und Lit. 19.1.4-13, -14, -15, -16): Dieses Bild zeigt eine Zusammenstellung **potenzieller Gesundheitsgefahren**. In Triebwerken können sich eine Vielzahl gesundheitsbedenklicher Materialien be-

finden (Bild 19.1.4-8). Darüber hinaus gilt dies für Wartungs- und Überholprozesse (Bild 19.1.4-10).

## Typische Arbeiten mit potenzieller Gesundheitsgefahr durch giftige Materialien/Medien.

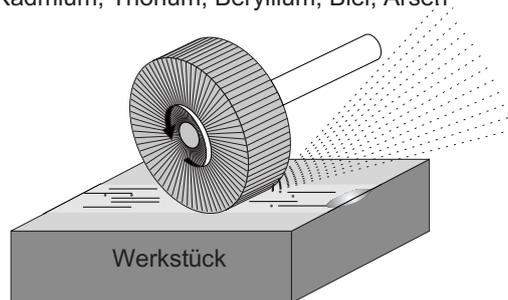
Dämpfe beim **Schweißen oder Löten.**

- Kadmium,
- Thorium,
- Beryllium
- Arsen
- Blei



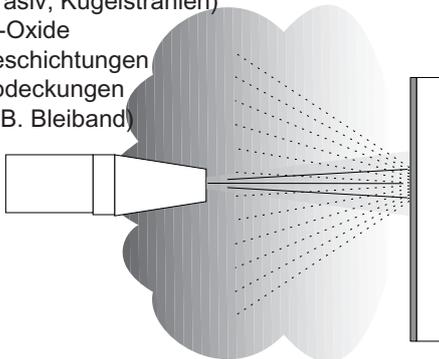
Stäube beim **Zerspanen**: Handgeführtes Schleifen und Fräsen, Sägen, Trennen:

- Nickelhaltige Metalle und Oxide
- Kadmium, Thorium, Beryllium, Blei, Arsen



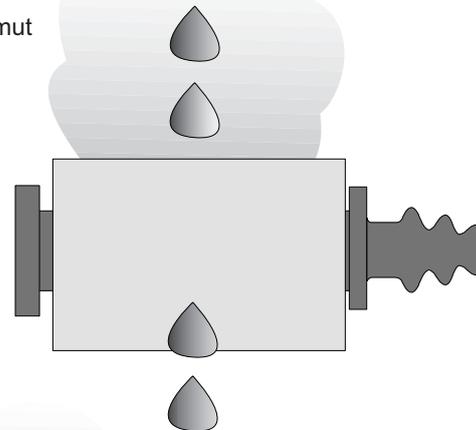
Dämpfe und Stäube beim **Thermischen Spritzen** oder **Strahlverfahren** (abrasiv, Kugelstrahlen)

- Ni-Oxide
- Beschichtungen
- Abdeckungen (z.B. Bleiband)



Dämpfe beim **Eingießen und Ausschmelzen** mit einer niedrig schmelzenden Legierung:

- Blei
- Wismut



Aufnahme löslicher giftiger Werkstoffe und Beschichtungen beim **Handling** über Haut oder Schleimhaut (Mund, Nase)

- Cadmium
- Arsen
- Blei



Dämpfe beim **Spritzen und Sprühen**

- Teflon
- Chlorverbindungen



**Bild 19.1.4-10**

**Bild 19.1.4-10** (Lit. 19.1.4-13, -14, -15, -16): Werkstoffe können auf unterschiedliche Weise gesundheitsgefährdend **in den menschlichen Organismus** gelangen. Meist ist es das **Einat-**

**men**, 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 19.1.4-1).

**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 19.1.4-8) als auch als Bestandteil der **Wolfram-elektroden 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 19.1.4-8) 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 Wareneingangs-

proben, 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 Aufheißvorgangs (z.B. Lichtbogen) bzw. des Trägergases Metaldämpfe 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 Heißeile 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 Staubenstehung 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.

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.

## Literatur zu Kapitel 19.1.4

- 19.1.4-1** 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.
- 19.1.4-2** F.R.Szecskey, „Engine Design for Maintainability“, Zeitschrift „Aerospace Engineering“, March 25, 1944, Seite 34-39.
- 19.1.4-3** F.R.Szecskey, „The GE90-Engine Designing for Maintainability“, SAE-940022, , Seite 73-78.
- 19.1.4-4** DEF STAN 00-970 Part 7/1 Section 8, „Maintenance“, Leaflet 800 bis 806.
- 19.1.4-5** R.A.LeyesII, W.A.Fleming, „North American Small Gas Turbine Aircraft Engines“, AIAA Smithsonian Institution 1999, ISBN 1-56347-332-1, Seite 701.
- 19.1.4-6** 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.
- 19.1.4-7** 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.
- 19.1.4-8** Rolls-Royce Ltd., „The Jet Engine“, Publication REF.T.S.D. 1302,July 1969, 3rd Edition, Seite 189.
- 19.1.4-9** G.Fischbach., „916 Deutsche F-104 Starfighter, ihre Bau- und Lebensgeschichten“, unveröffentlicht Seite 566.
- 19.1.4-10** G.Norris, „GE90 inspections continue after 777 Heathrow surprise“, Zeitschrift „Flight International“, 1-7 April 1998, Seite 10.
- 19.1.4-11** 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.
- 19.1.4-12** 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.
- 19.1.4-13** 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.

- 19.1.4-14** Beryllium Sicherheitsdatenblatt gemäß EG-Richtlinie 91/155/EWG Erstellt 09.01.1996, Ausgabe 07.01.2000, Fa. Heraeus, Seite 1-5.
- 19.1.4-15** Wolfram-Thorium Produkte, „Sicherheitsdatenblatt WTh-01“, Ausgabe 03.12.2001, Fa. Plansee, Seite 1
- 19.1.4-16** Oak Ridge Associated Universities, Radioactive Consumer Products, „Magnesium-Thorium Alloy (ca. 1980s)“, 1999, Update 04/23.2004, Seite 1-2. [www.ornl.gov/ptp/collection/consumer%20products/magthor.htm](http://www.ornl.gov/ptp/collection/consumer%20products/magthor.htm).
- 19.1.4-17** Transport Canada, Service Difficulty Advisory, AV 2005-01, „Honeywell (Garrett) TPE 331-10UA, Engine Oil Filter Cracks“, 6. April 2005, Seite 1 und 2.