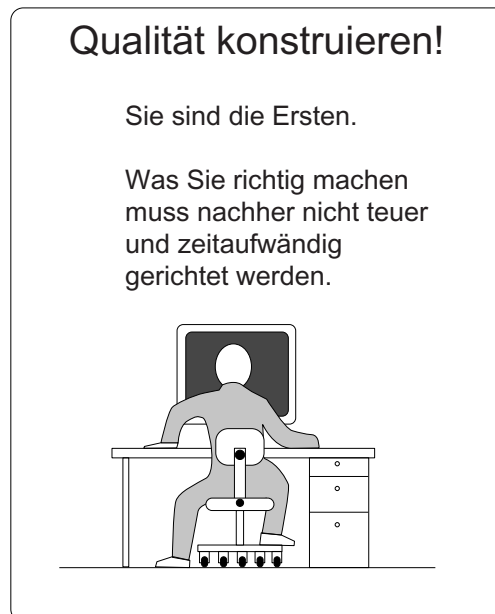


# 15. Firmenkultur und Arbeitsklima

## 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. Das 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 erkaufte. 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).

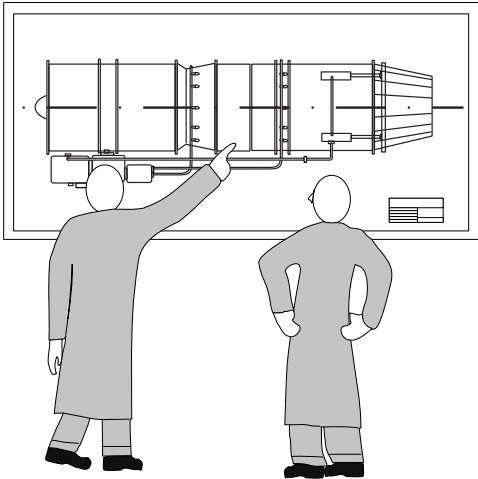
Ein weiterer Aspekt schadensminimierender Konstruktion ist die Berücksichtigung von **Gestaltungsregeln** (z.B. Bild 15-16), die zwar meist trivial erscheinen, aber durchaus nicht immer bewusst sind und deshalb mit katastrophalen Folgen übersehen werden können.

**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, 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***

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 vorneher ein erfolversprechende Lösungswege zu beschreiten. Die Fragestellung, „**wie machen es andere?**“ kann dabei immer im Vordergrund stehen. Aus diesem Grund sollten **Bibliotheks-**

**besuche** 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 Technologien** 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 Technologien und Konstruktionsprinzipien gewährleistet und so in entscheidendem Maße Erfahrungen konserviert und überträgt.

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

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

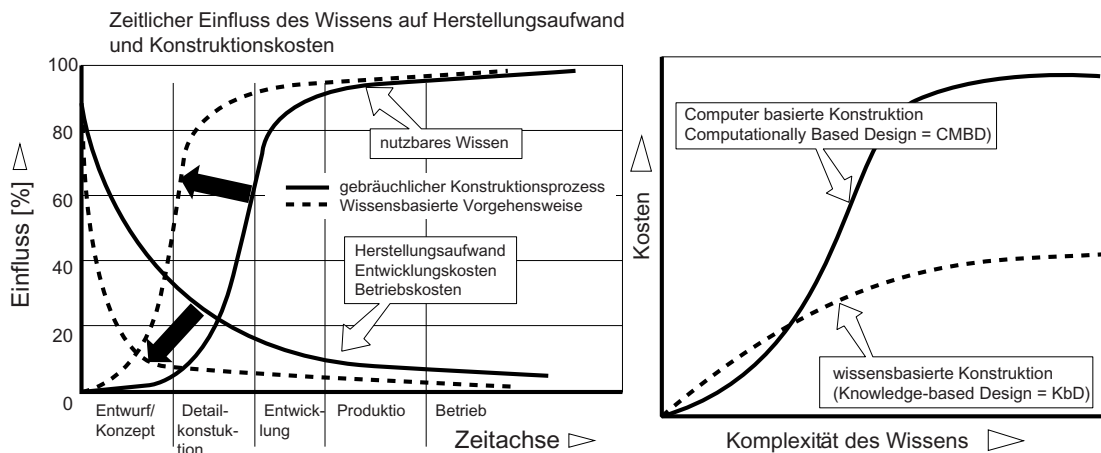


Bild 15-1.2

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 Konstrukteursgeneration 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 Vorgehensweise klar zu werden und gegebenenfalls Korrekturen vorzunehmen.

Können Vorgehensweisen, wie sie zum Teil in früheren Konstrukteursgenerationen praktiziert wurden dem Konstrukteur Schwachstellen und Lösungsansätze aufzeigen? Das sog. wissensbasierte Konstruieren (engl. **Knowledge-based Design = Kbd**) wird heute als Alternative zum computerbasierten Konstruieren (engl. **computationally based design/Computer Modelling Based = 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**

*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 **Expertensystemen** (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 **Wissensmanagements** 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 Zeitpunkt 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.*

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 Nachfolgers**. Dem Nachfolger sollte ca. 1 Jahr Einarbeitung ermöglicht werden.

- **Auswahl des Nachfolgers unter Mitsprache des Erfahrungsträgers**. Auf keinen Fall darf ein Nachfolger kontrovers bestimmt werden. Eine effektive Einarbeitung 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 Problembereich um einen Erfahrungsträger bilden auch Personalpolitik und Firmenkultur:

- **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 Maschinensicherheit, 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.

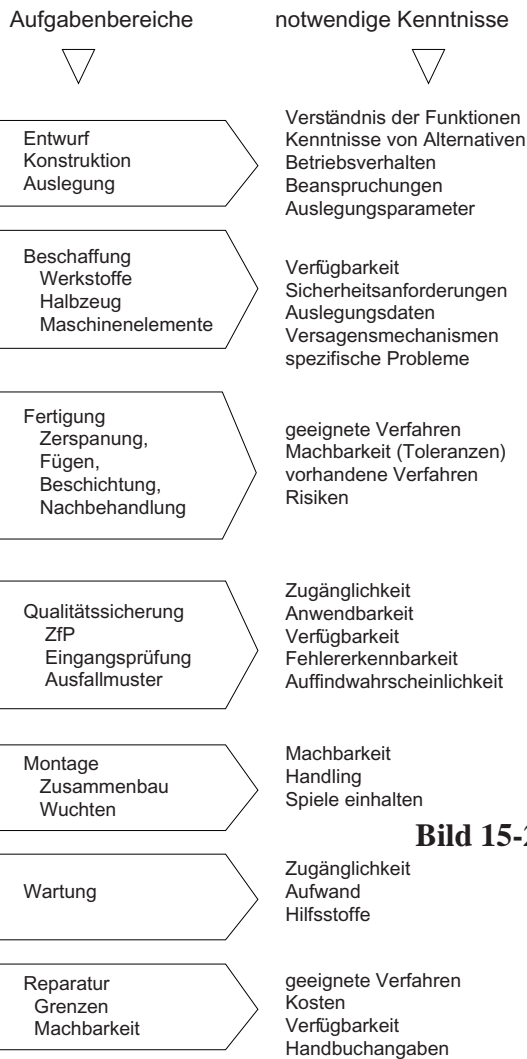
**Bild 15-2:** Versteht sich der Konstrukteur als verantwortlich für den letztendlichen Erfolg seines Werks, benötigt er einen über die eigentliche Konstruktionsarbeit hinausgehenden technischen Horizont, der dafür ausreichen muss, um die an der Realisierung Beteiligten zu verstehen, gegebenenfalls Aktionen 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 und Technologien 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 serieneigneten 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 Werk-

Ganzheitliches Denken ist eine Voraussetzung für Sicherheit. Der Konstrukteur sollte sich gesamtverantwortlich fühlen. Ihm steht dafür eine Koordinationsfunktion zu.



**Bild 15-2**

stoffe, wie z.B. Titanlegierungen gegenüber Rissen und scharfen kanten (Band 2, Bild 6.11.1.2-9.1 und Bild 6.11.1.2-9.2), sind so anzuwenden, dass die Gefahr von **Handlingbeschädigungen** minimiert ist. **Modulbauweise** ist z.B. an den Trennstellen (Lager, Labyrinth) zu berücksichtigen, um Montage-schäden 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. **Klebstoffe 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** (Band 3, Kapitel 14.1). 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).

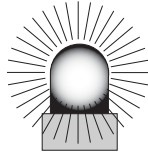
**Bild 15-3:** Der Konstrukteur erhält bereits frühzeitig „Warnsignale“ verschiedenster Art, die ihn auf **konstruktive Risiken und Mängel** hinweisen. Zu unterscheiden sind natürlich Vorentwicklungen und Serienanwendungen. Zu Warnsignalen der Serienanwendung gehören:

**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 (vielleicht 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 Guss-



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**

*toleranzen 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) in der Maschine erwarten. Ein typisches Beispiel sind Werkstofffehler in Verdichterrotoren aus Titanlegierungen. Diese Probleme scheinen die Triebwerkstechnik bereits seit Anfang der 70er- Jahre zu beschäftigen (Band 3 Bild 11.2.2.1-4, Bild 11.2.2.1-5 und Bild 11.2.2.1-6).*

*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 Maschinentyp 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.*

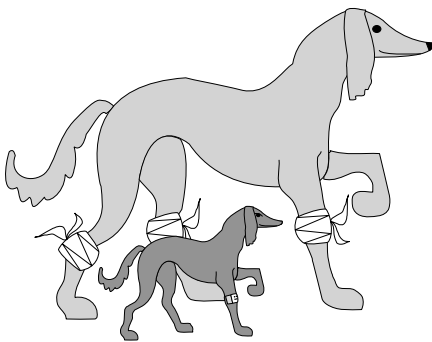
### Beispiel 15-1 (Lit 15-12):

**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 of 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 (Verdichterpumpen, Strömungsabriss) 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.

## Der Entwurf entscheidet bereits über viele Schwachstellen im gesamten "Triebwerksleben".

Die Erfahrung lehrt: charakteristische Konstruktionsschwächen bleiben ein Leben lang erhalten, sie können sich mit zunehmendem Alter ausprägen.

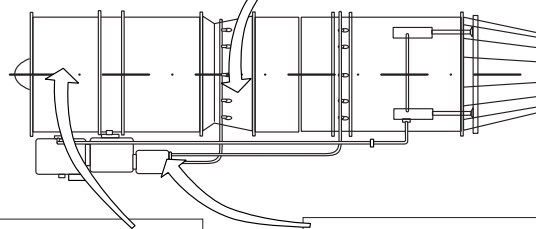


**Bild 15-4**

Beispiele für typische Schwachstellen mit denen man bereits in der Entwicklungsphase lebt.

Gesamtsystem:  
- Deterioration  
- Wartung

Turbine:  
- Schaufellebensdauer  
- Dichtungen  
Brennkammer:  
- Rissbildung  
- Temperaturprofil  
- Rußbildung



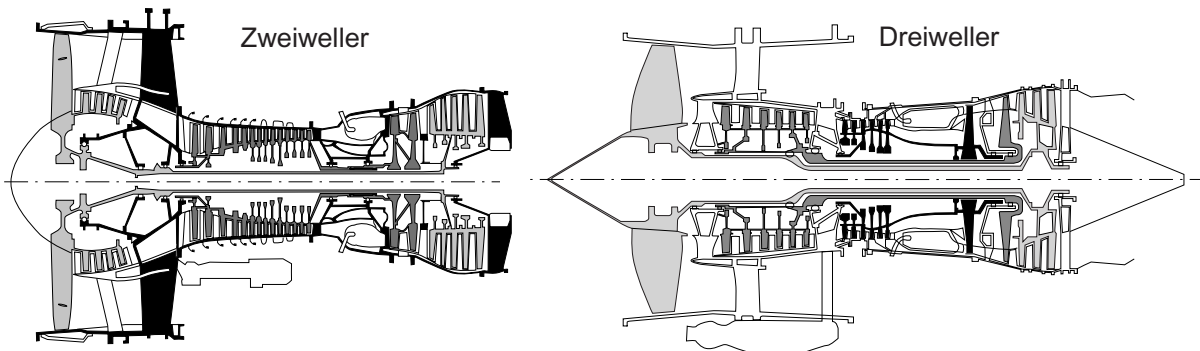
Verdichter:  
- Betriebsverhalten  
- Schwingermüdung  
- Spalthaltung

Öl/Luftsystem:  
- Temperaturen  
- Verkokung  
- Leckagen

**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 Maschinen 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 späten 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 am Beispiel eines militärischen Triebwerks in der nebenstehenden Skizze zusammengestellt. Hierzu gehört die Neigung zum Verdichterpumpen (Beispiel 15-1), z.B. beim Abfeuern der Kanone (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).

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



**Bild 15-5**

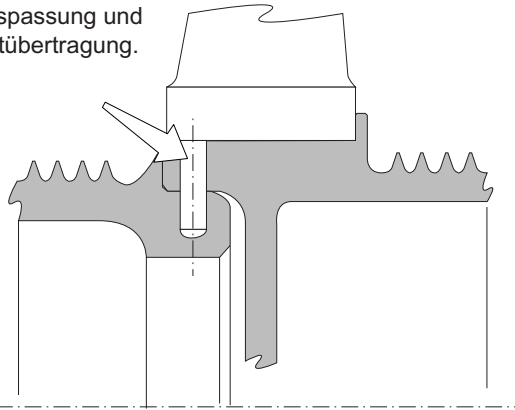
**Bild 15-5:** Komplexe Anlagen und/oder Großserien mit möglichst geringen Ausfallraten (z.B. im Automobilbau) erfordern ein sehr vorsichtiges Vorgehen bei der Entwicklung, um das Risiko akzeptabel niedrig zu halten. Es hat sich als äußerst riskant erwiesen, neue oder gar **revolutionäre Technologien 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.

## Nur verstandene Konstruktionsprinzipien übernehmen!

Verdichterrotorwelle mit Presspassung und Radialstiften zur Drehmomentübertragung.



**Bild 15-6**

**Bild 15-6: Ein Konstruktionsprinzip zu verstehen bedeutet nicht nur die Funktion zu durchschauen und die Auslegung entsprechend vorzunehmen. Der erfahrene Konstrukteur 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.**

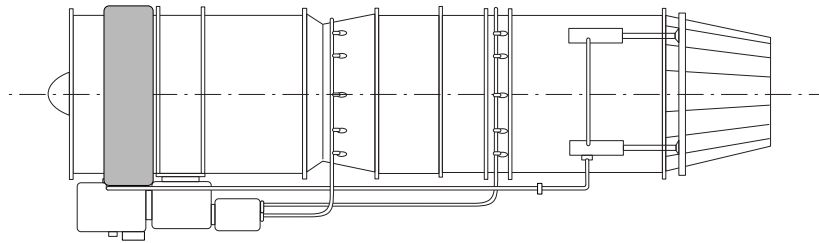
Als Beispiel wurde ein Konstruktionsdetail eines Triebwerks gewählt (Lit. 15-1), das die Verbindung von Verdichterrotorstufen mit Hilfe einer Schrumpfpassung und Radialstiften zur Übertragung des Drehmoments zeigt. Diese scheinbar einfache und kostengünstige Lösung dürfte einige Erfahrung benötigen und kann mit Sicherheit nicht einfach 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 (Strömungsabriss) 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. Im gezeigten Fall ist offenbar eine zerstörungsfreie Zerlegung zumindest problematisch.

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“ (Lit 15-17). 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 Laufzeitgarantien für den OEM inakzeptabel hoch werden.

## 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 berechnete 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.

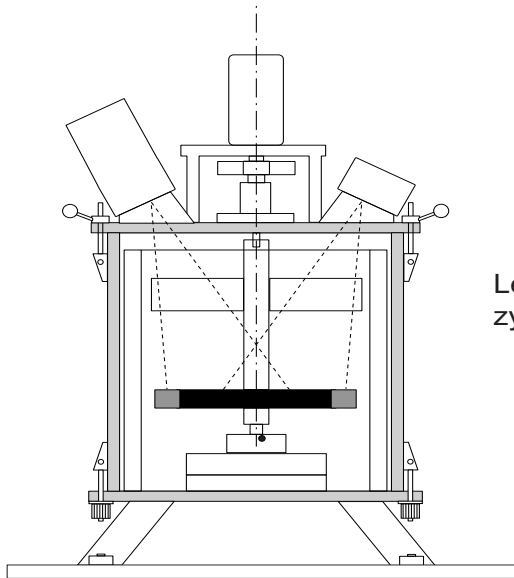
15-17). Dieser Raum ist jedoch in den beengten Verhältnissen im Rumpf meist nicht gegeben oder muss bereits in der Konzipierung des Flugzeugs und des Triebwerks (Anbringung der Anbaugeräte, Lit. 15-17) berücksichtigt worden sein.

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.

Interessant ist, dass etwa 2010 offenbar Anwendungen von Containmentringen in Fasertechnik auch an Triebwerken innerhalb des Rumpfes bekannt wurden. Dies mag im Zusammenhang einem **neuen Konstruktionsprinzip** des Rotors (Blisk-Bauweise) stehen. Hier sind die Schaufeln direkt mit der Scheibe integriert. So sind wegen des fehlenden schweren Schaufelfußes nur leichtere Bruchstücke zu erwarten.

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

## Das eigene Sicherheitskonzept durchhalten.



Lebensdauernachweis mit  
zyklischen Schleuderversuchen

**Bild 15-8**

**Bild 15-8:** Ein OEM hat für seine Konstruktionen 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 Halbzug, 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 der Rotorkomponenten in Triebwerken 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.

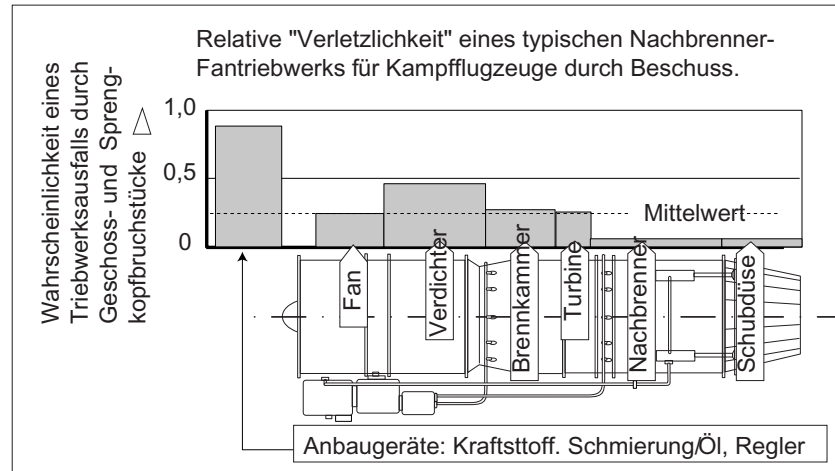
**Merksatz:** Das eigene zugelassene Sicherheitskonzept ist bei Bauteilen unter Selbstverantwortung einzuhalten.

Eine Mischung von Sicherheitskonzepten ist zu vermeiden.

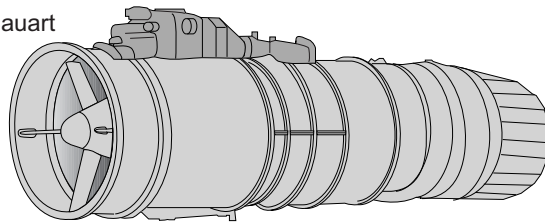
**Bild 15-9:** Bei jedem OEM lassen sich typische, **charakteristische Konstruktionsmerkmale** entdecken. Dies kann natürlich auch mit Auflagen des Betreibers, etwa von Amtsstellen bei militärischen Anwendungen, in Zusammenhang stehen.

Das Schaubild oben zeigt die Wahrscheinlichkeit eines Triebwerksausfalls durch Beschuss,

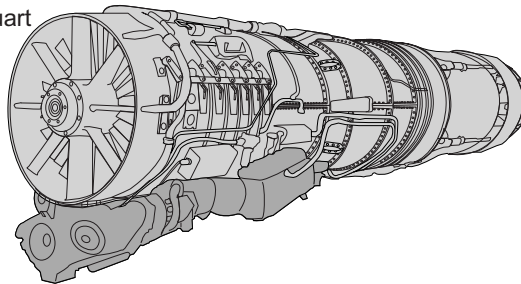
Auch die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Triebwerks bei Beschuss wird vom konstruktiven Grundkonzept beeinflusst.



Triebwerk russischer Bauart mit Anbaugeräten oben



Triebwerk westlicher Bauart mit Anbaugeräten unten



**Bild 15-9**

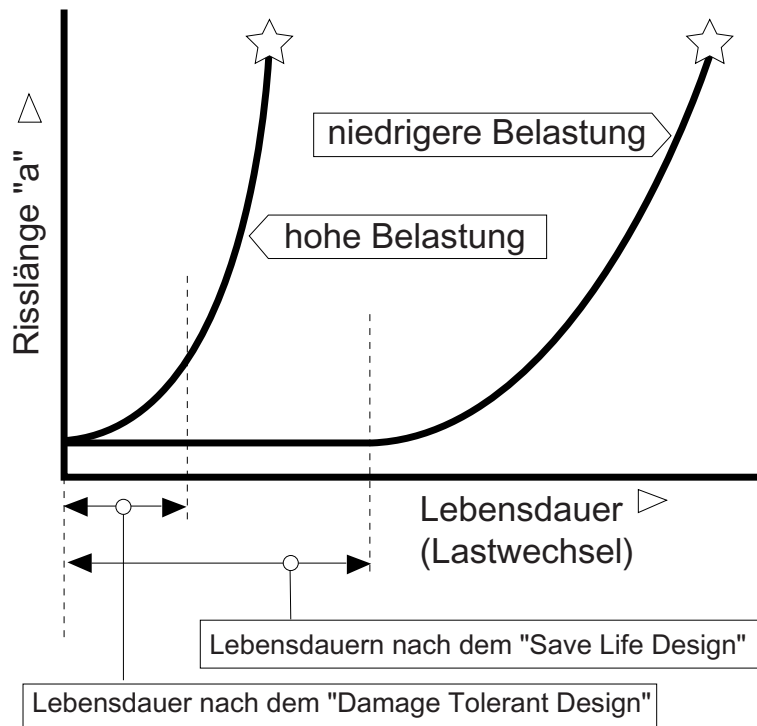
wenn die Anbauaggregate unten am Triebwerk angebracht sind (Lit 15.1-2). Man erkennt, dass eine Beschädigung der Anbaugeräte zu einem hohen Anteil für Triebwerksausfälle im Kampfeinsatz verantwortlich ist.

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 vorgege-

ben. 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).

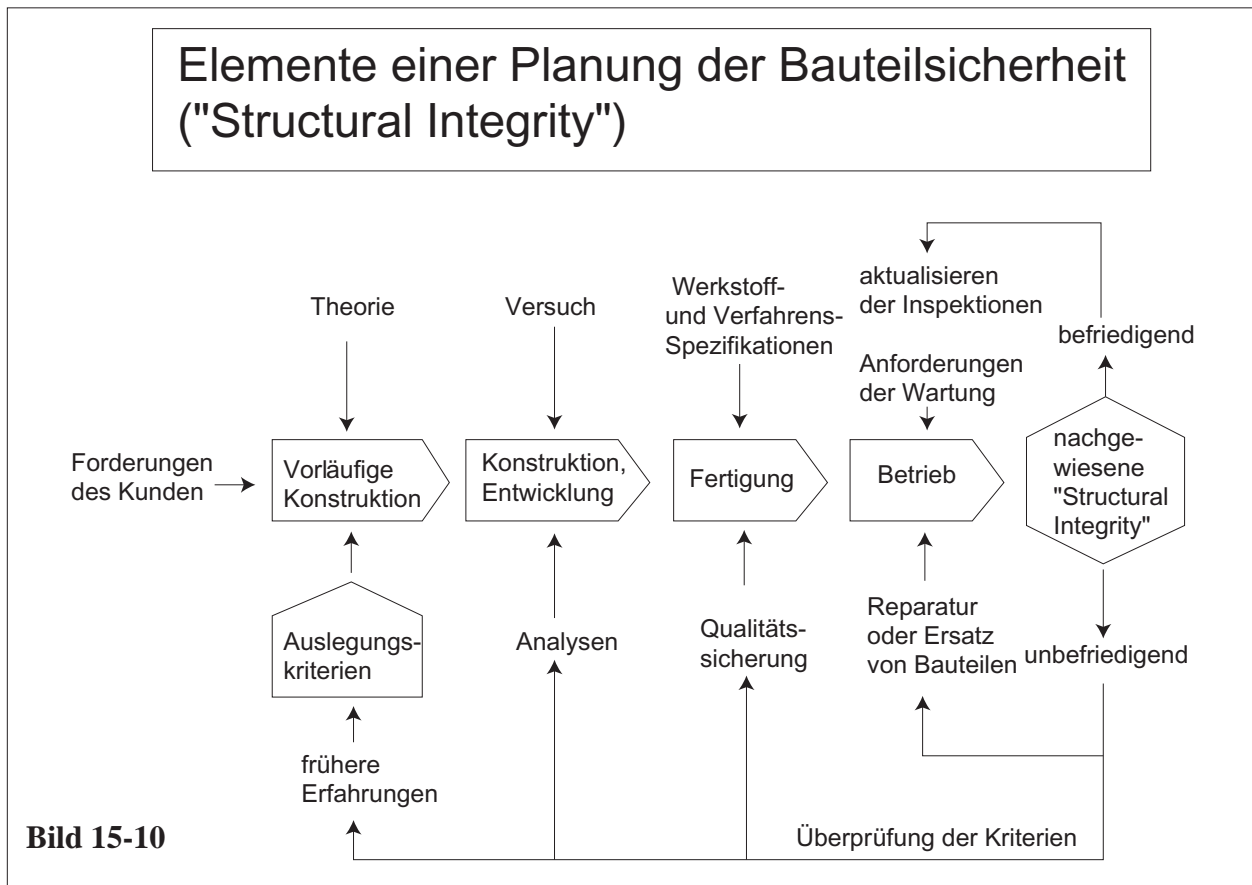
## 15.1 Sichere Lebensdauer



In diesem Kapitel werden einige Grundprinzipien zu **schadenstoleranter (Schaden-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 '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** (Band 1, Bild 3-17 bis 3-19) 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** (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.

*extremely remote, Band 1, Bild 2.3-1) 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 **schadens-toleranten 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:

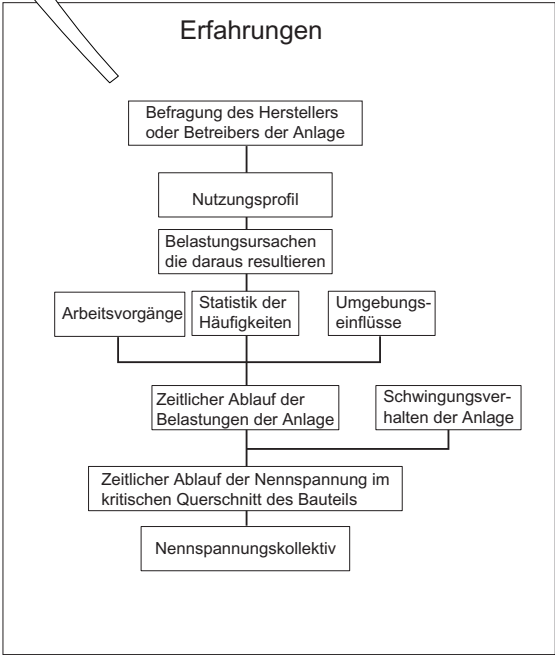
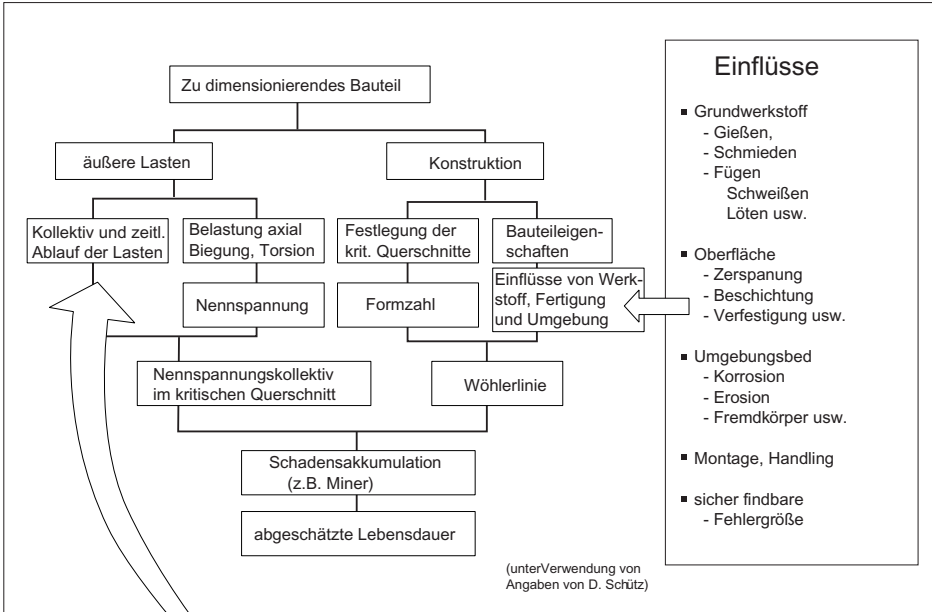
- **Identifikation kritischer Komponenten** bzw. deren kritischer Bereiche.
- **Mehrfache Belastungseinleitungen** bzw. Aufnahmen (Redundanz, Bild 15-12).
- **Risstopper** (Band 1, Bild 5.4.2.2-2 und Bild 5.4.2.2-4)
- **Proof-Tests**: Hierzu gehören Überlastungstests wie Überdrehzahltests bei rotierenden 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 not-

wendigen 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 (einachsige, mehrachsige), 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.

## Vorgehensweise und zu berücksichtigende Einflüsse bei der Lebensdauerabschätzung.

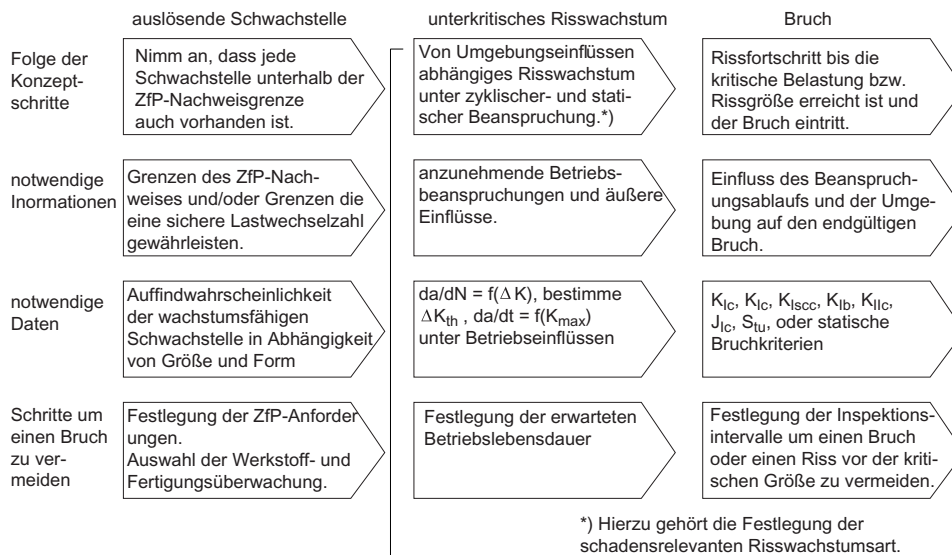


**Bild 15-11**

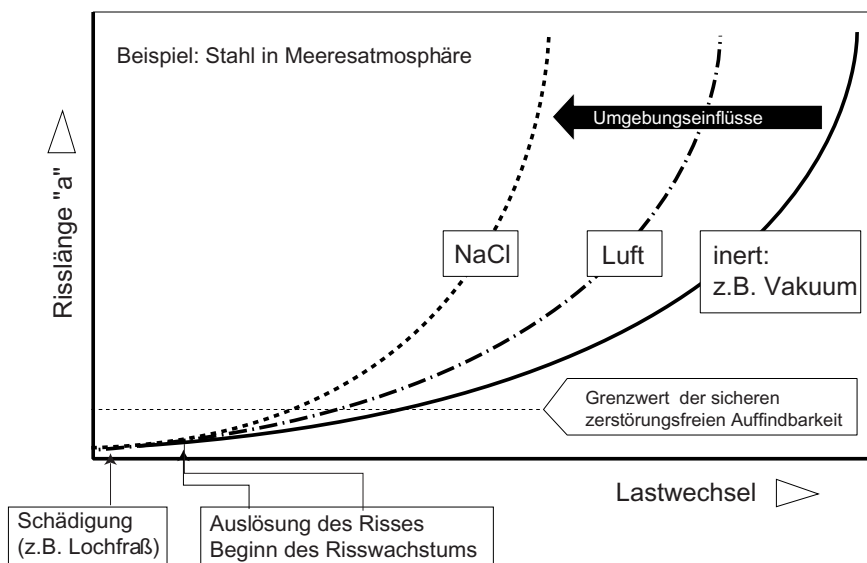
**Bild 15-11** (Lit 15-9): Diese Schaubilder geben einen Eindruck vom Vorgehen und den zu berücksichtigenden Einflüssen bei einer Lebensdauerabschätzung für das „Save-Life Design-Konzept“ (Bild 15-14). In diesem Fall ist das die Lebensdauer bestimmende Kriterium der erste Anriss. Die **Lebensdauer liegt 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.

## Was beim Konzept der "Damage Tolerance" zu berücksichtigen ist.



### Einfluss der Umgebungsatmosphäre auf das Risswachstum



**Bild 15-12**

**Bild 15-12:** Beim Damage-Tolerant-Konzept sind eine Vielzahl von Einflüssen auf Riss-häufigkeit (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.

Berücksichtigung von Versagensmechanismen bei "erweiterten" Betriebsbelastungen.

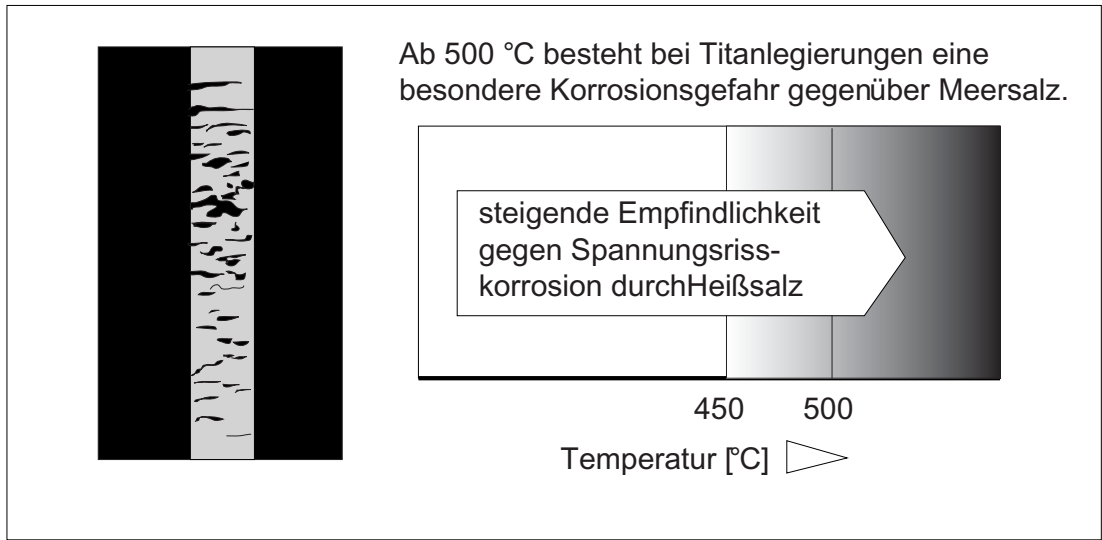
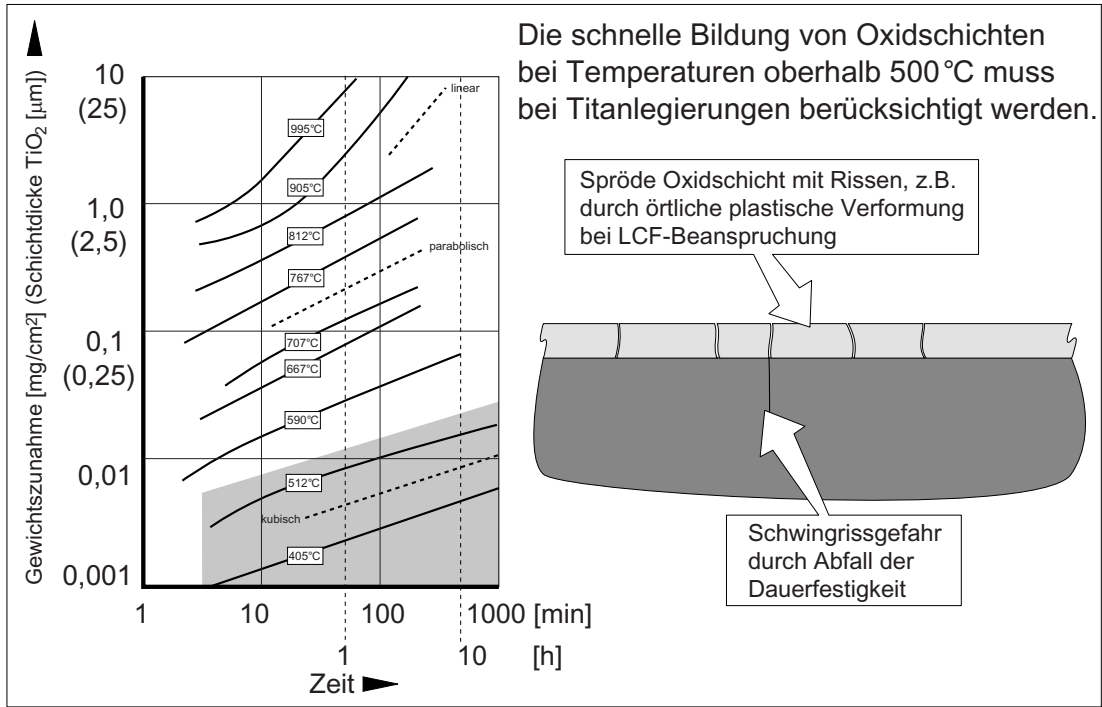


Bild 15-13

**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 serieneigneten 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 **Spannungsrissskorrosion** 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).

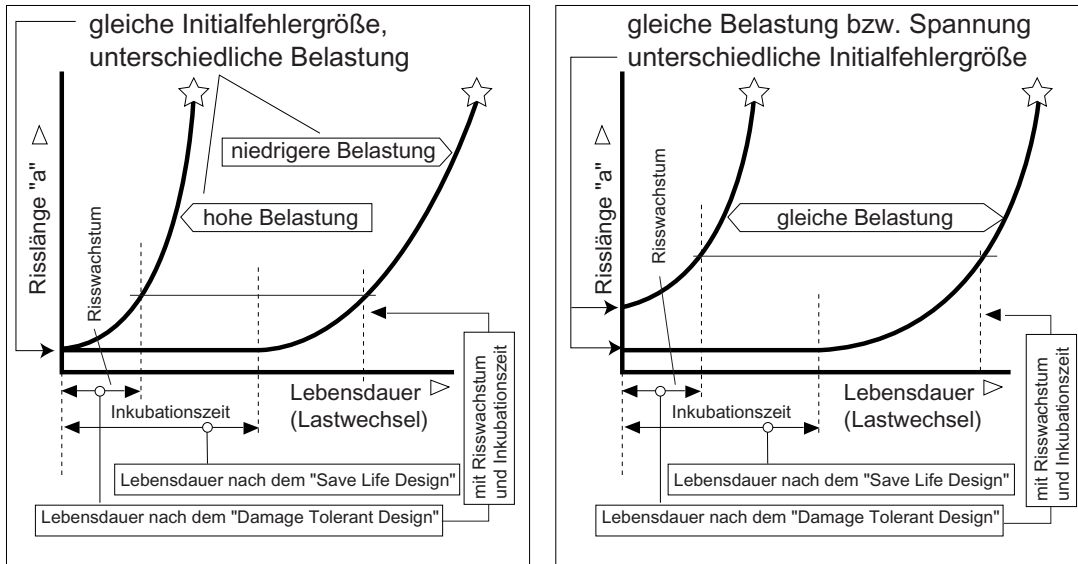
Für **neuere Triebwerkstypen** mit hoch belasteten Bauteilen muss deshalb das **Damage-Tolerant-Design-Konzept** angewendet werden. Es **begrenzt die zyklische Lebensdauer unter Berücksichtigung einer wachstumsfähigen Fehlergröße**. Weil die Inkubationslebensdauer sonst für die üblichen Anwendungen zu 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.**

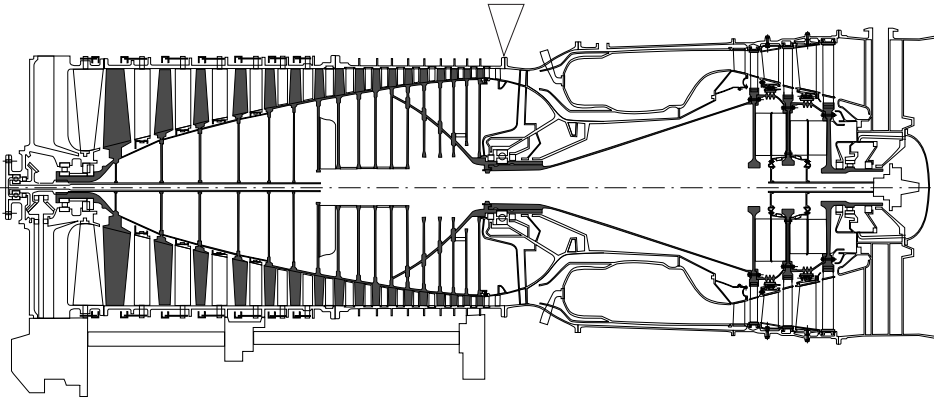
Natürlich beeinflussen diese Konzepte auch **Wartung und Reparatur**. So sind die **Inspektionsintervalle** bei hoch belasteten Bauteilen moderner Triebwerke im akuten Fall kürzer, die Gefahr von Schäden bei Beschädigungen größer als für ältere Triebwerkstypen.

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

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.

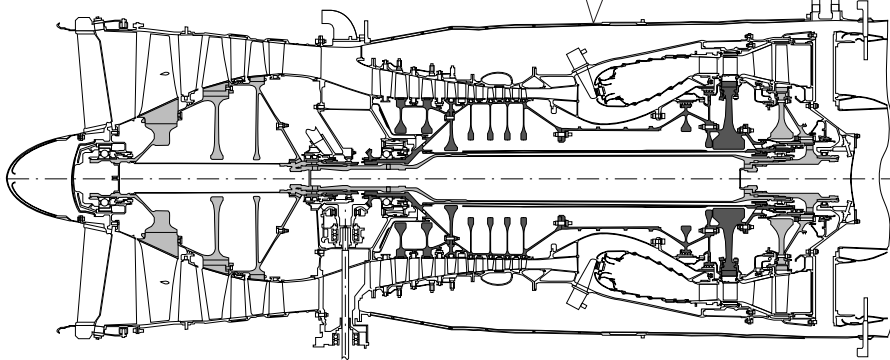
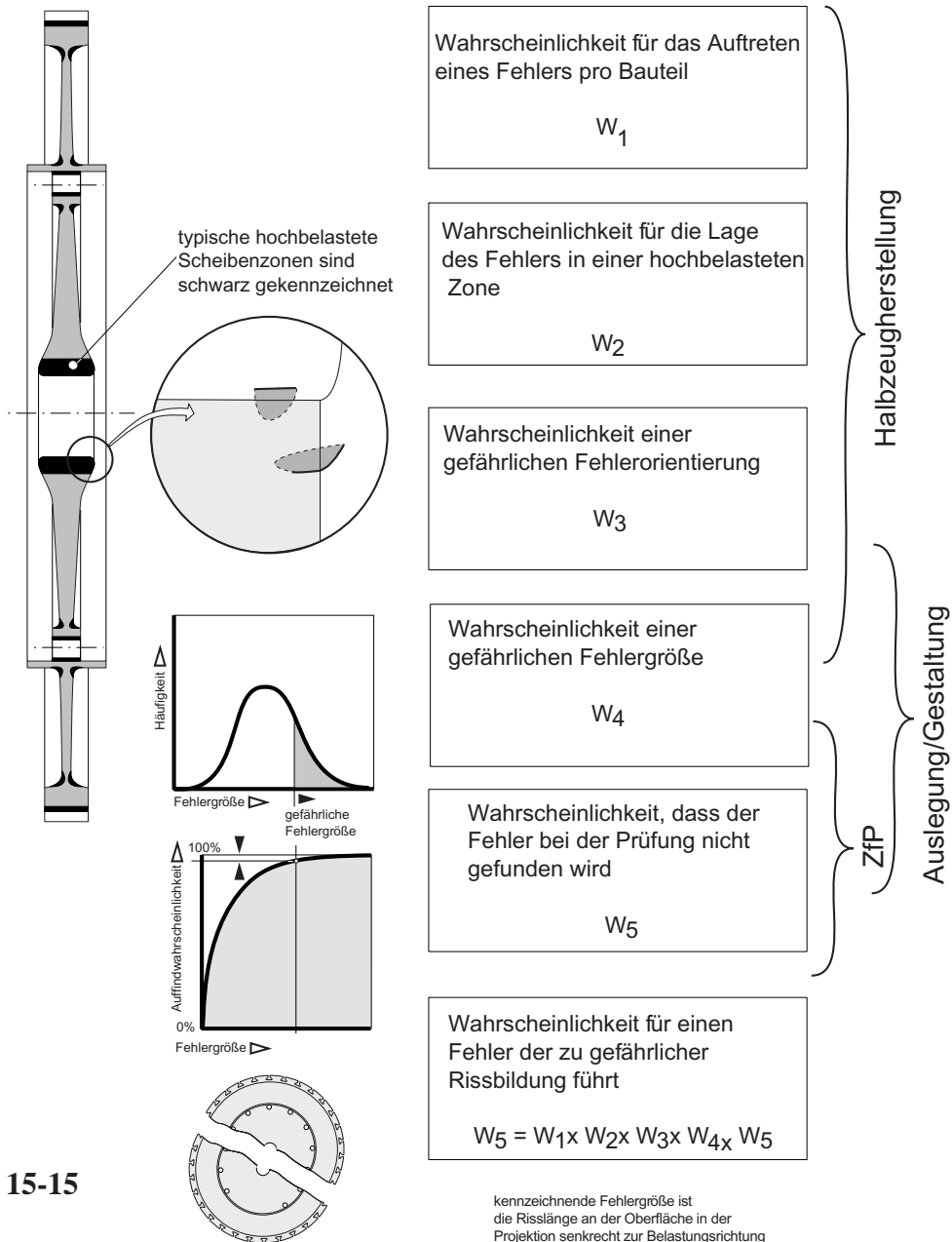


Bild 15-14

## Abschätzung der Wahrscheinlichkeit eines Scheibenbruchs als Folge eines Werkstofffehlers.



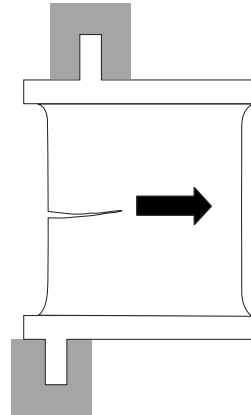
**Bild 15-15**

**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



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 (Band 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 fliehkraft-induzierter Spannungen ausrichten. Auch deshalb werden pulvermetallurgische (HIP) Teile nachgeschmiedet (Band 3, 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. Labyrinth (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. Anstreichende Schaufelspitzen werden ebenfalls aufgeheizt und können dabei so geschädigt werden, dass Rissbildung eintritt (Lit. 15-17).

Die **breiten Schaufelprofile** (große Sehnenlänge, engl. 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 15.2-28) oder hohe innere Dämpfung und damit Sicherheit gegen HCF-Versagen (Bild 15.2-29).

**Bild 15-16** (Lit 15-4): Die **Konstruktionsphilosophie** spielt für Rissverhalten und Versagensablauf eine wichtige Rolle.

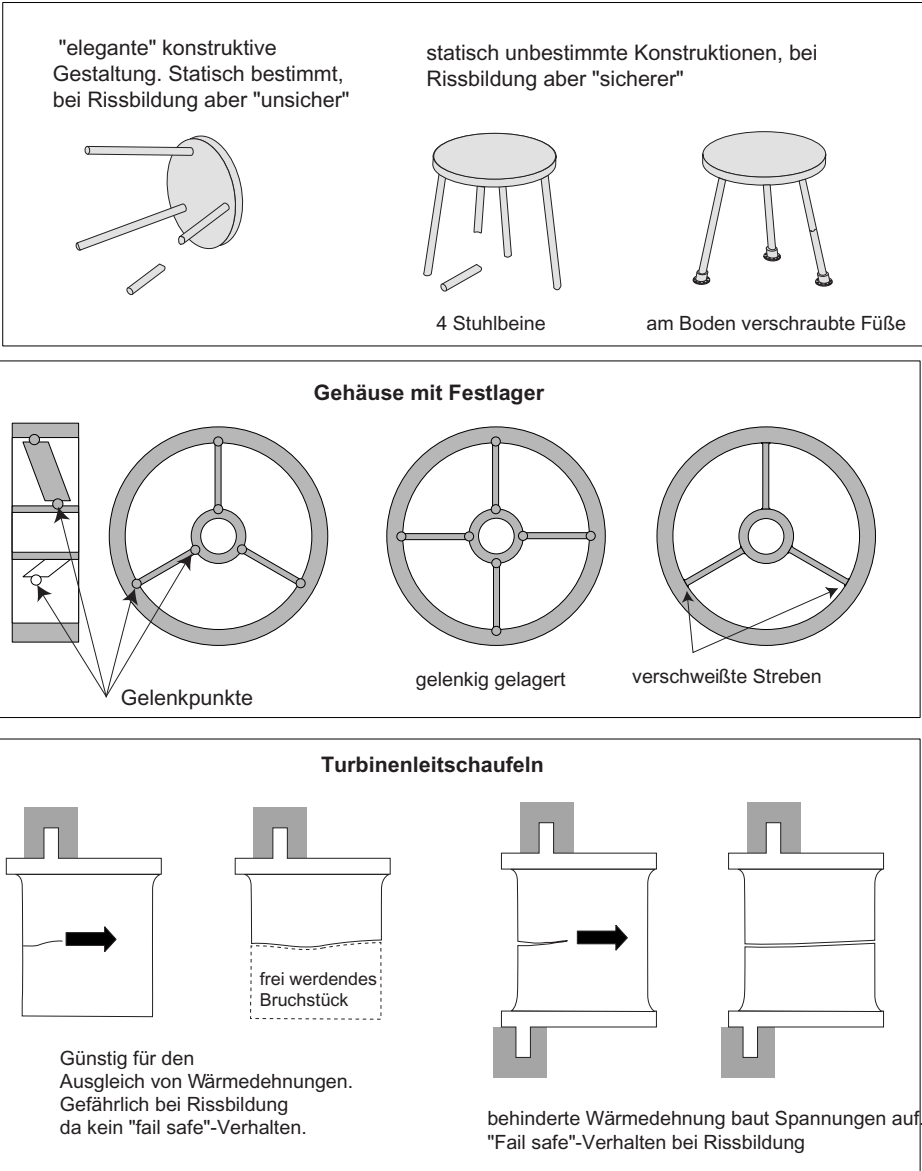
- **Statisch bestimmte Bauweisen**, insbesondere wenn ein einziges Element die Betriebslasten überträgt, lassen meist keine Risse zu. Solche Konstruktionen weisen kein Fail-Safe-Verhalten auf, weil der Bruch eines tragenden Elements das gesamte System sofort versagen lässt. Zusätzlich führt das Risswachstum 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 Lebensdauer- auslegung 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.

Mit 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.

**Einfluss von Konstruktionsphilosophien auf das Bauteilversagen bei Rissbildung.**



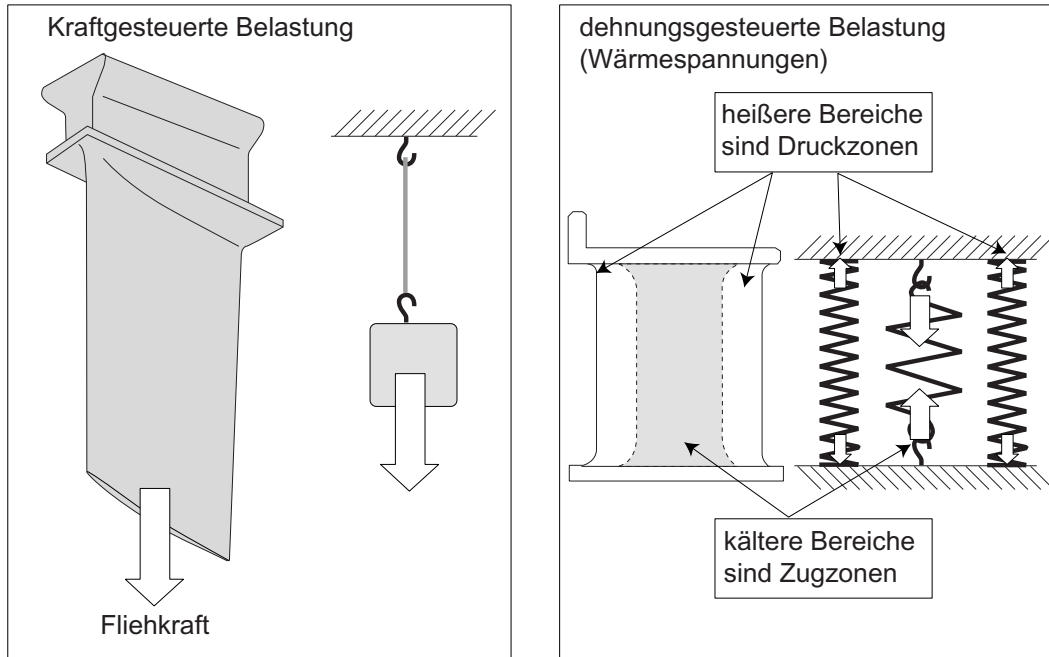
**Bild 15-16**

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

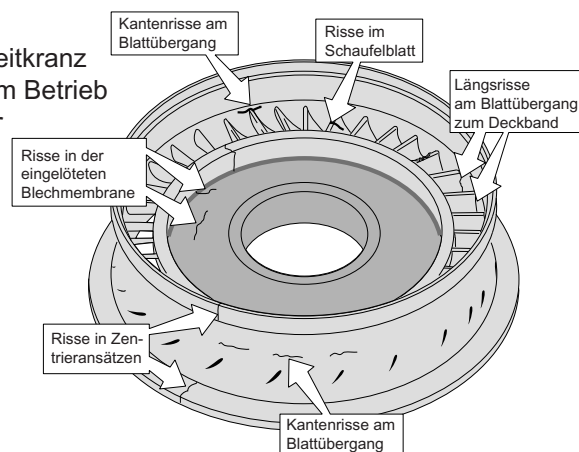
Wärmespannungen. Bei einem Riss kommt es jedoch zum Abbrechen eines Blattstücks und umfangreichen Folgeschäden. Die rechte Variante führt zwar zu einer unübersichtlichen Belastung. Reißt das Blatt jedoch durch, ist nicht mit einem sofortigen Funktionsausfall und Folgeschäden zu rechnen. Eine Boroskopinspektion hat in diesem Fall die Chance, den Schaden rechtzeitig zu erkennen.

Auf diese zwei Belastungsformen reagiert ein Bauteil sehr unterschiedlich.



Thermoermüdung ist ein typischer dehnungsgesteuerter Vorgang

Ein integral gegossener Turbinenleitkranz unterliegt beim Gießprozess und im Betrieb hohen Thermospannungen die zur Rissbildung führen können.



**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 Dauerfestigkeits-

ermittlung 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 Heißeilen in Wartungshandbüchern als zulässig spezifiziert. Hierzu gehören Thermoermüdungsrisse (Band 1, Kapitel 5.4.2). Auch **Spannungsarmglühen und Relaxation** (Band 1, Bild 4.5.1-2) 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 (Bild 18.4-15.1 und Bild 18.4-15.2) 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.

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

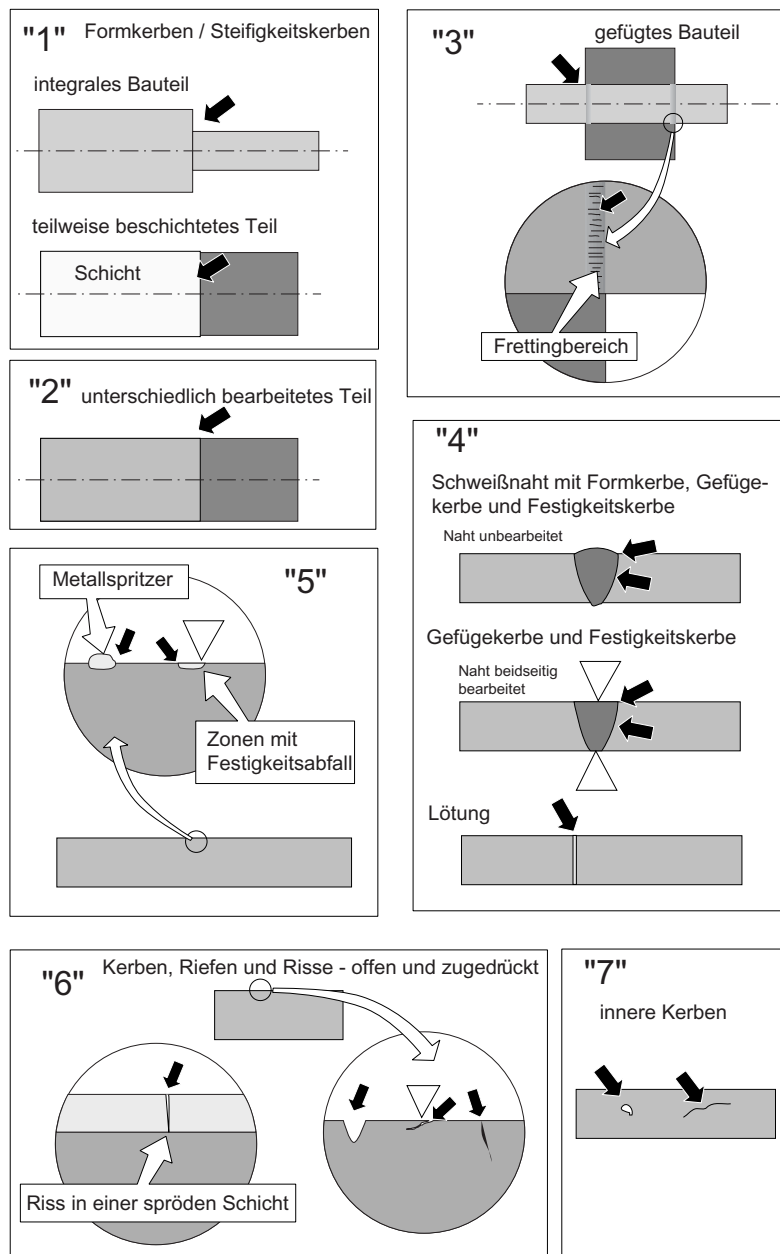


Bild 15-18

**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 Titan tropfen 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 Hochdruckturbinen 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

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 niedri-

gere Scheibenbelastungen ermöglicht und damit auch entscheidend zur Fehlertoleranz und einer niedrigeren Rissfortschrittsgeschwindigkeit beiträgt. Das verringert auch die Lifecycle-Kosten und verlängert die Inspektionsintervalle. So wird ein Vorgehen nach der „**Retirement for Cause**“-Philosophie (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 Lebensdauererhaltung 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 Fixieringringe für die Schaufeln infolge hoher Thermoermüdungsbeanspruchung lebensdauerbegrenzte Bauteile. Im dargestellten Beispiel sind diese **Ringe formschlüssig aufgesetzt** und von kolbenringartigen

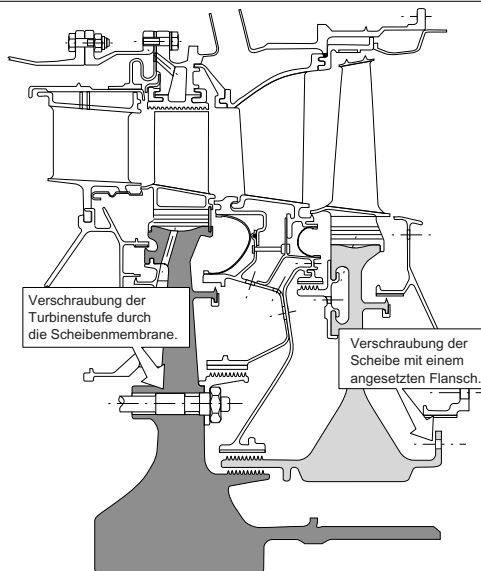
Befestigungen fixiert. Diese Fixierungen werden von der Fliehkraft verspannt. Damit ist eine gute Dichtwirkung ohne Verschraubung oder Niete gewährleistet.

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.

Die Verschraubung einer Scheibe mit dem Rotor kann aus der Sicht der LCF-Scheibenbelastung sehr unterschiedlich erfolgen.



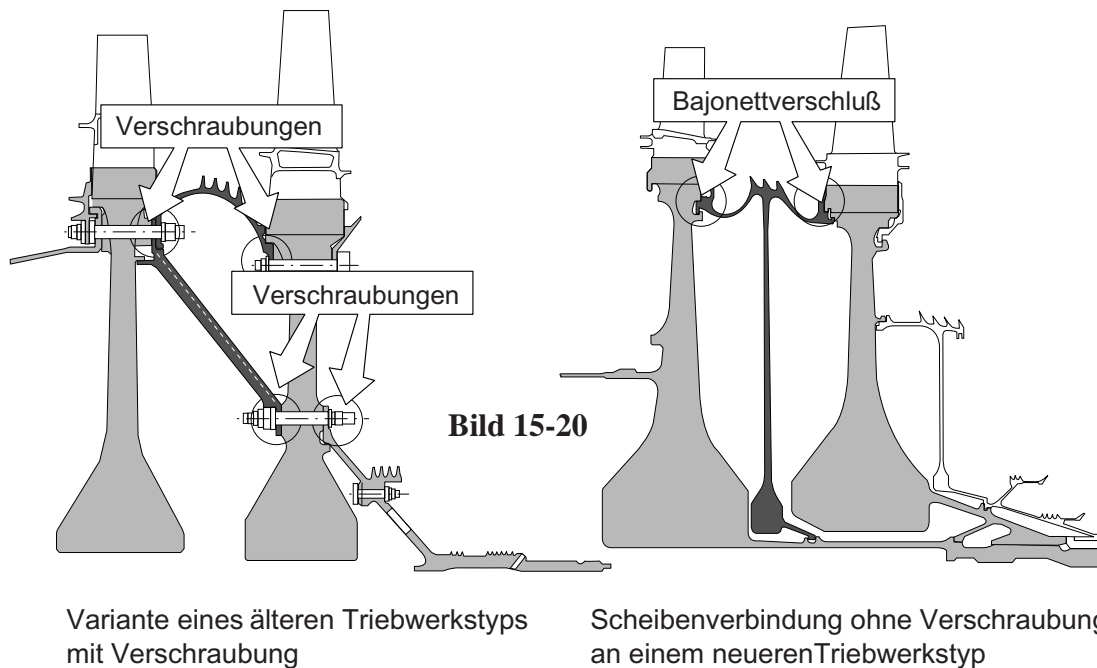
**Bild 13-19.2**

**Bild 15-19.2:** Diese jeweils einstufige Hochdruck- und Niederdruckturbinen eines Kampfflugzeugtriebwerks zeigen zwei **sehr unterschiedliche Scheibenverschraubungen** mit dem jeweiligen Rotor. Die Hochdruckturbinenscheibe ist **durch die Scheibenmembran** verschraubt. Diese Scheibenzone steht unter re-

lativ 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 Niederdruckturbinen sind 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.

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

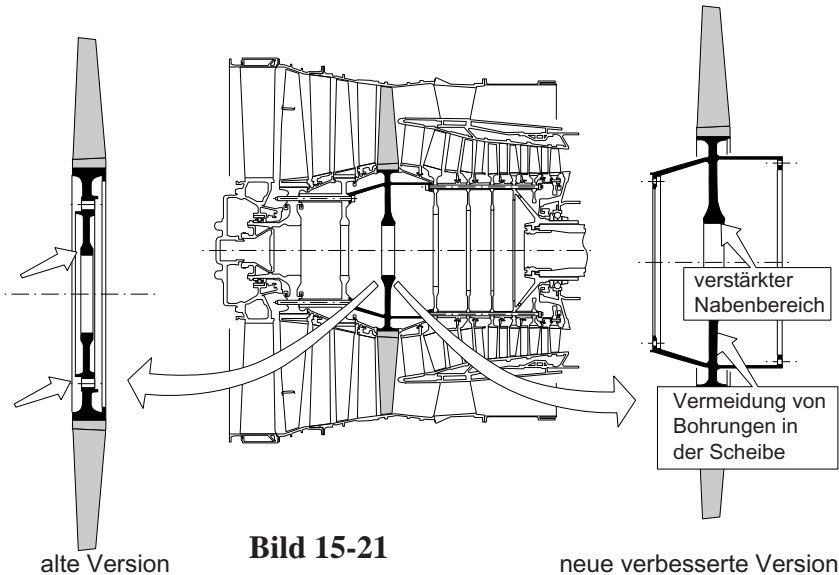


**Bild 15-20:** Die linke Skizze zeigt den zwei-stufigen Turbinenrotor eines großen zivilen Fan-Triebwerks der „ersten Generation“. An beiden Scheiben sind die Schaufelfixierungen und Labyrinthringe sowie der Kranz von **Bohrungen** der Verschraubung geschwächt. Zusätzlich erzeugt die, für die Kühlluftzufuhr 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 zwei-stufige Hochdruckturbinen 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 lebensdauer kritisches 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.

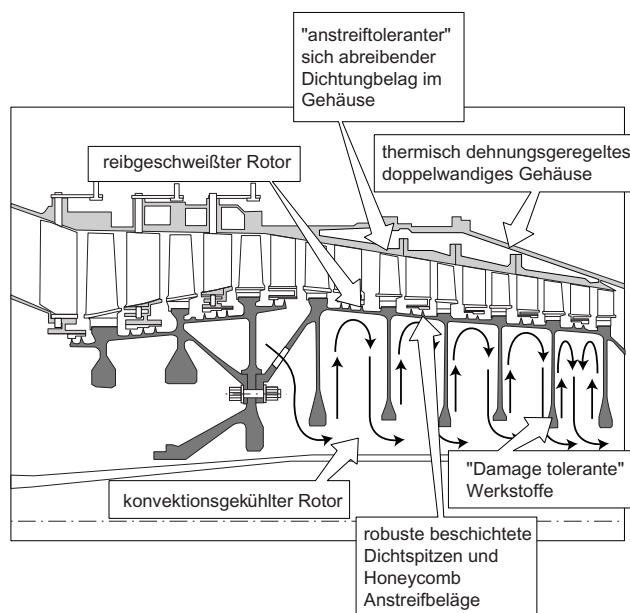
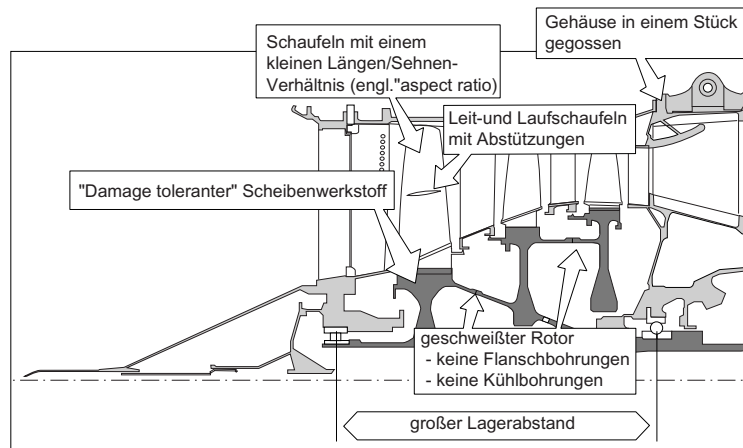
Verbesserung der LCF-Lebensdauer durch  
Umkonstruktion.

**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 „**Widchord-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.

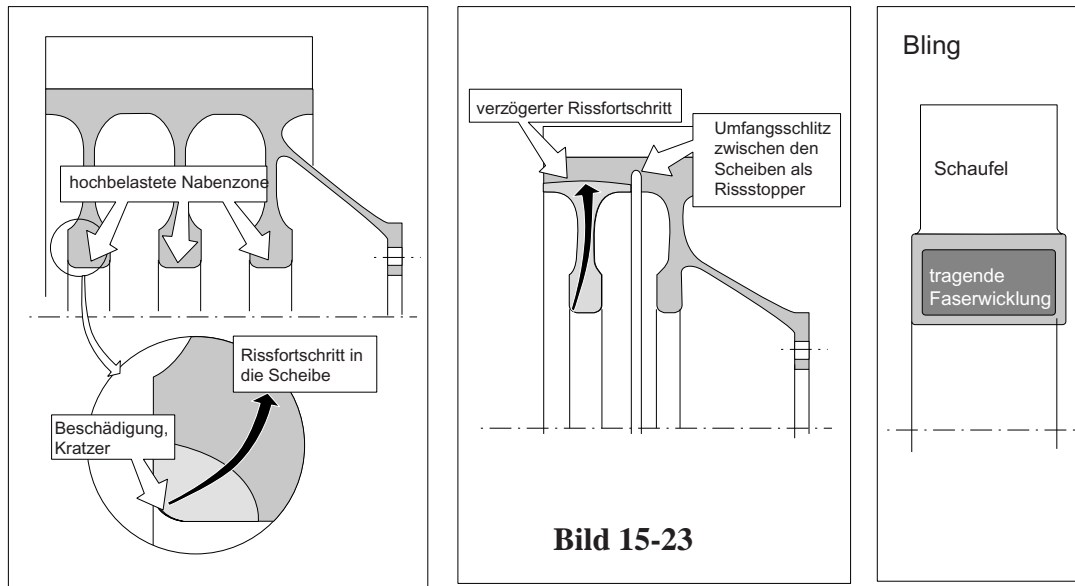


**Bild 15-22**

tens gegenüber der häufigen Grundbiegeschwingung (Band 1, Bild 5.4.3.3-10), Kampfeinwirkung und Erosion zum Einsatz. Aus den selben Gründen weisen die Statorinnendeckbänder 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 Dichtungsbälge** (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.

## Gestaltung von Scheiben zur Erhöhung der Ausfallsicherheit bei LCF-Beanspruchung.



**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 Zwischenstufenlabirynthen auf Trommelläufnern 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!

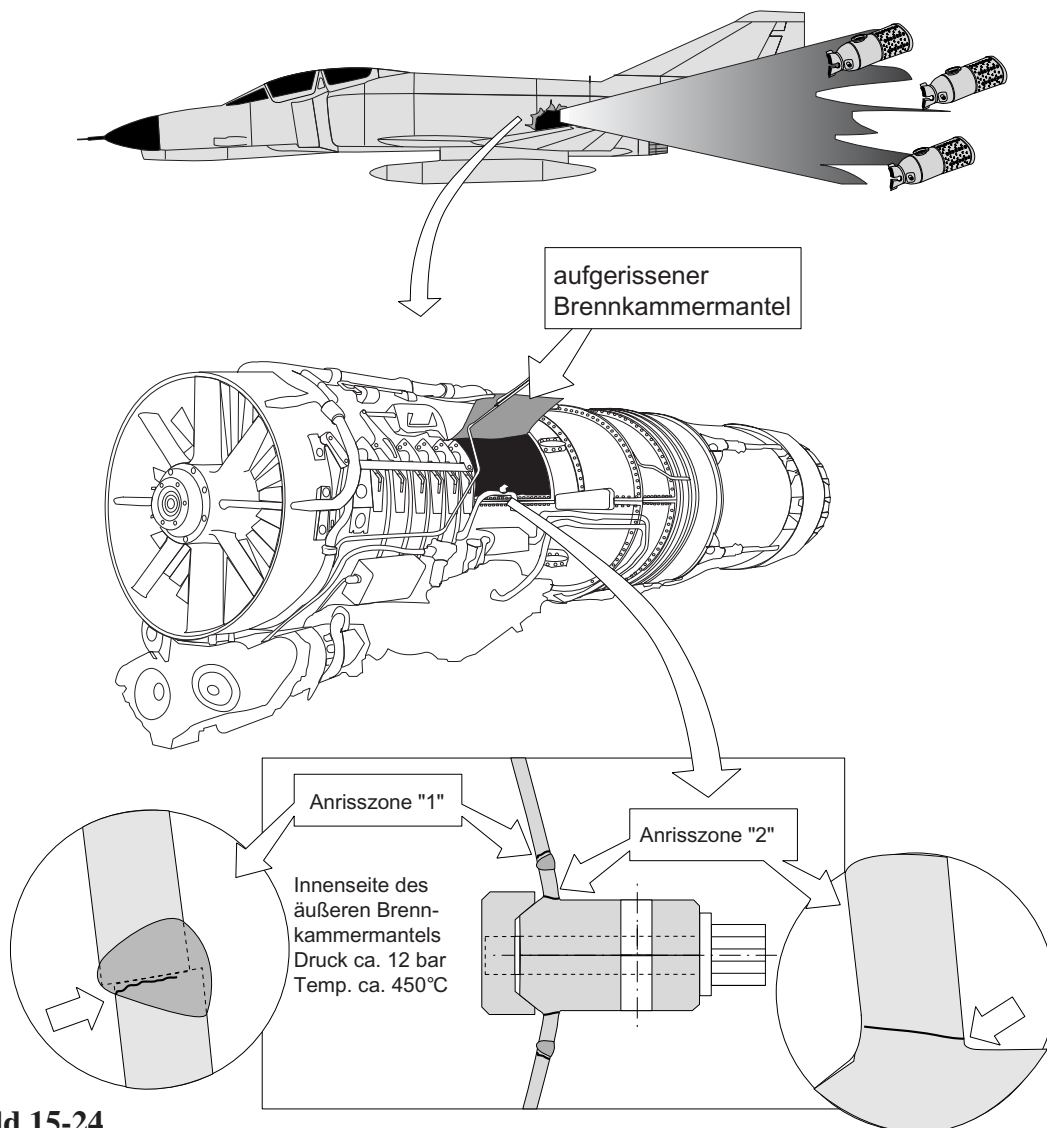


Bild 15-24

**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 **Konstruk-**

**tionskerben** 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.

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

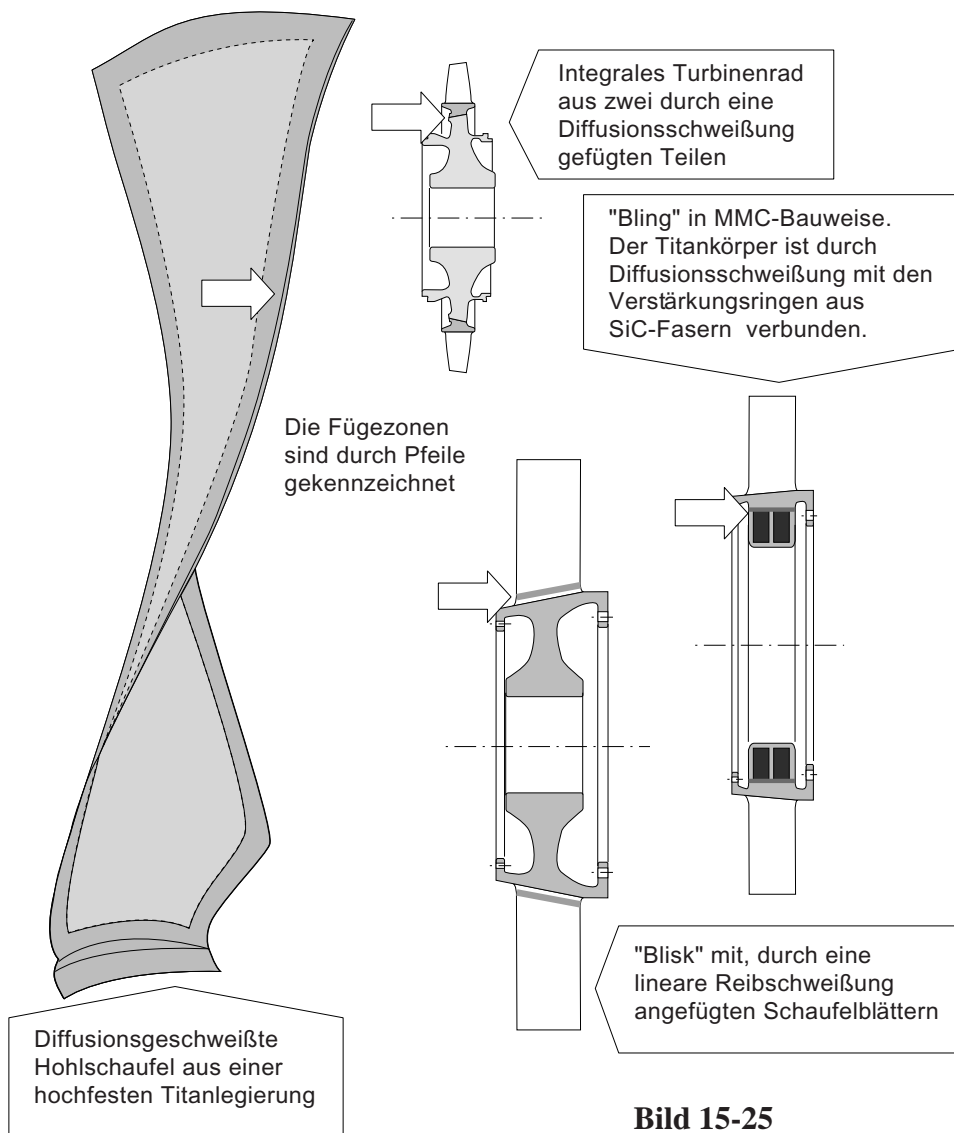


Bild 15-25

**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 Verbindungen

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 serieneigneter 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.

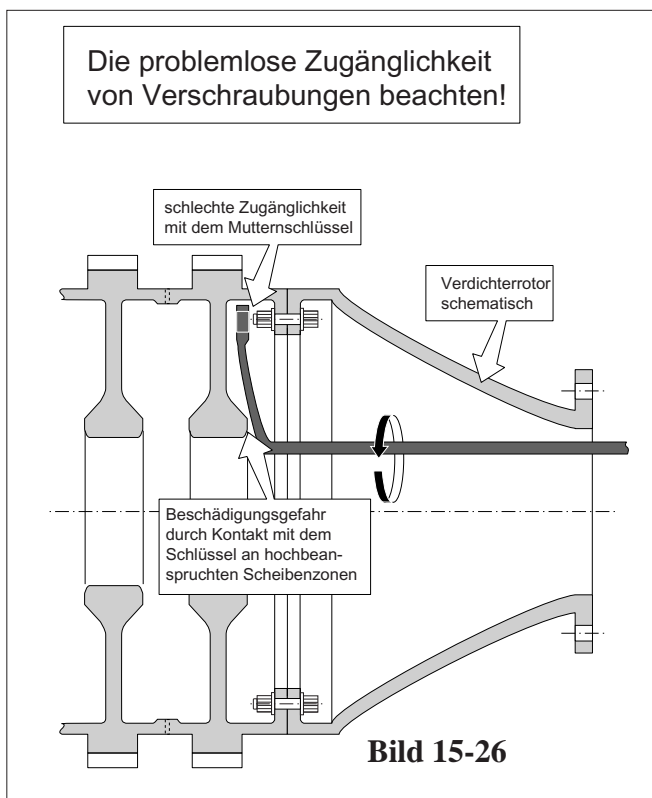


Bild 15-26

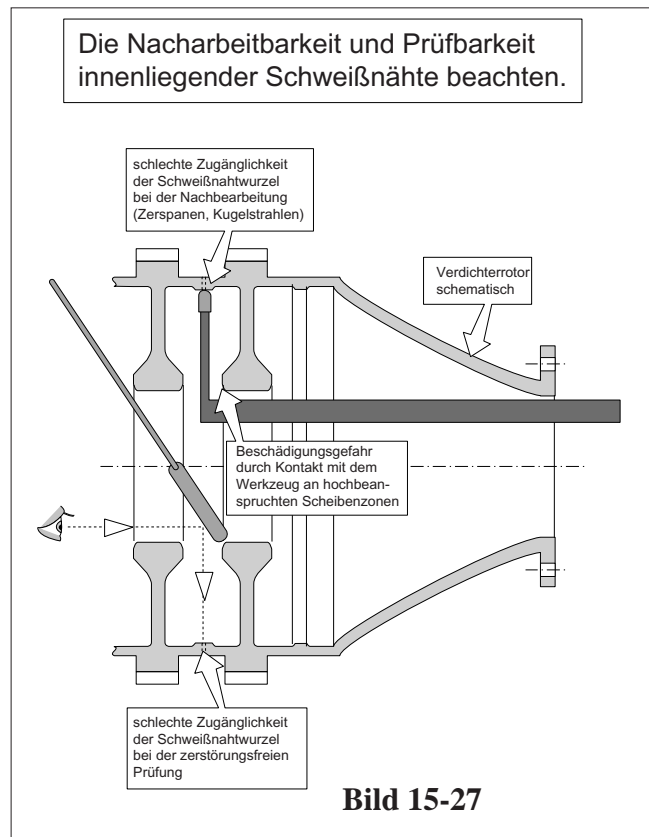
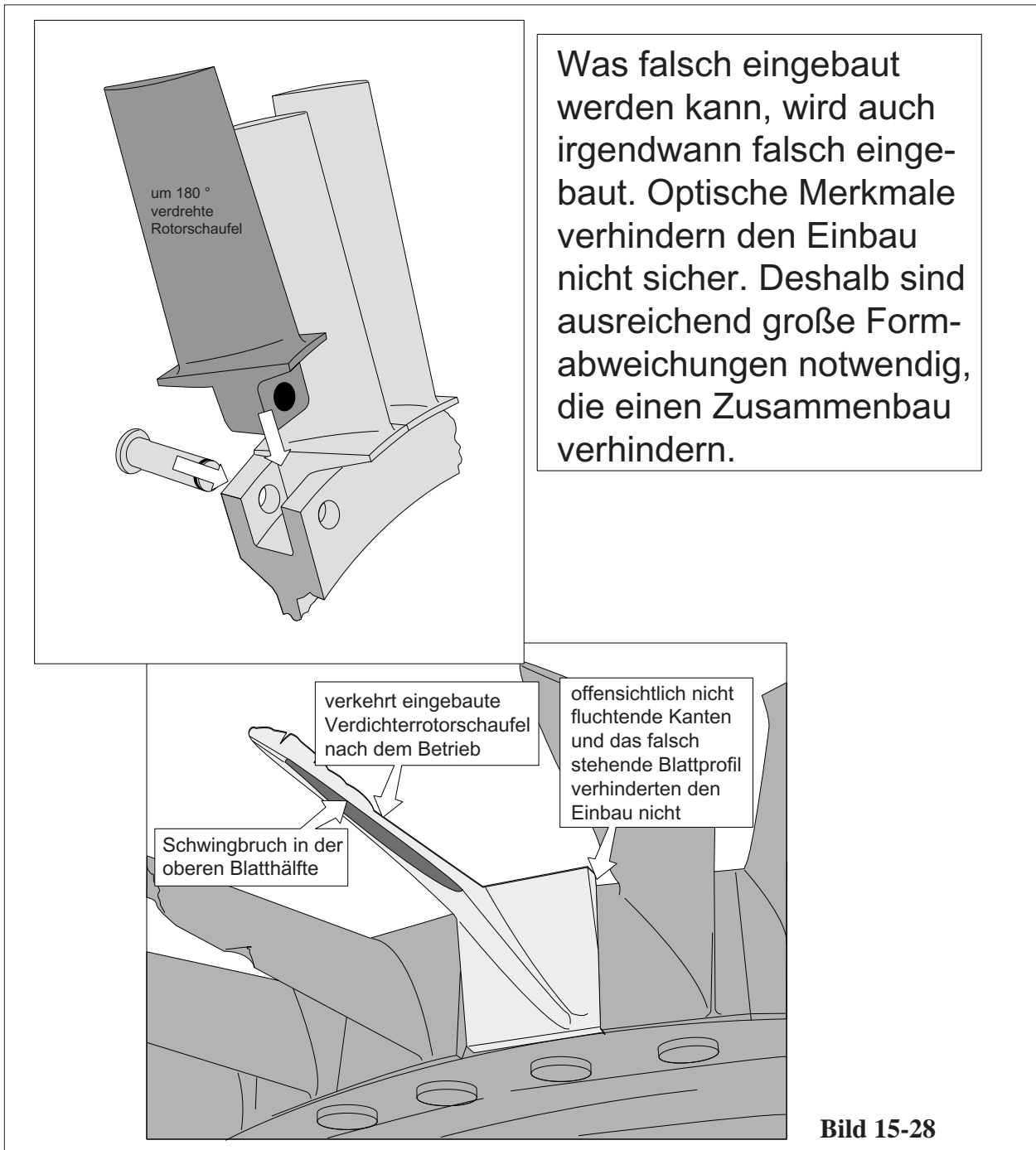


Bild 15-27

**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. electron 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 Prototyping hergestellten Teilen hilfreich sein.





**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 Technologien oder besonderer Montageabläufe das ausführende Personal zu informieren (Bild 14-35).

Ein Sicherheitskonzept kann auch in der  
Trennung von Funktionen beruhen.

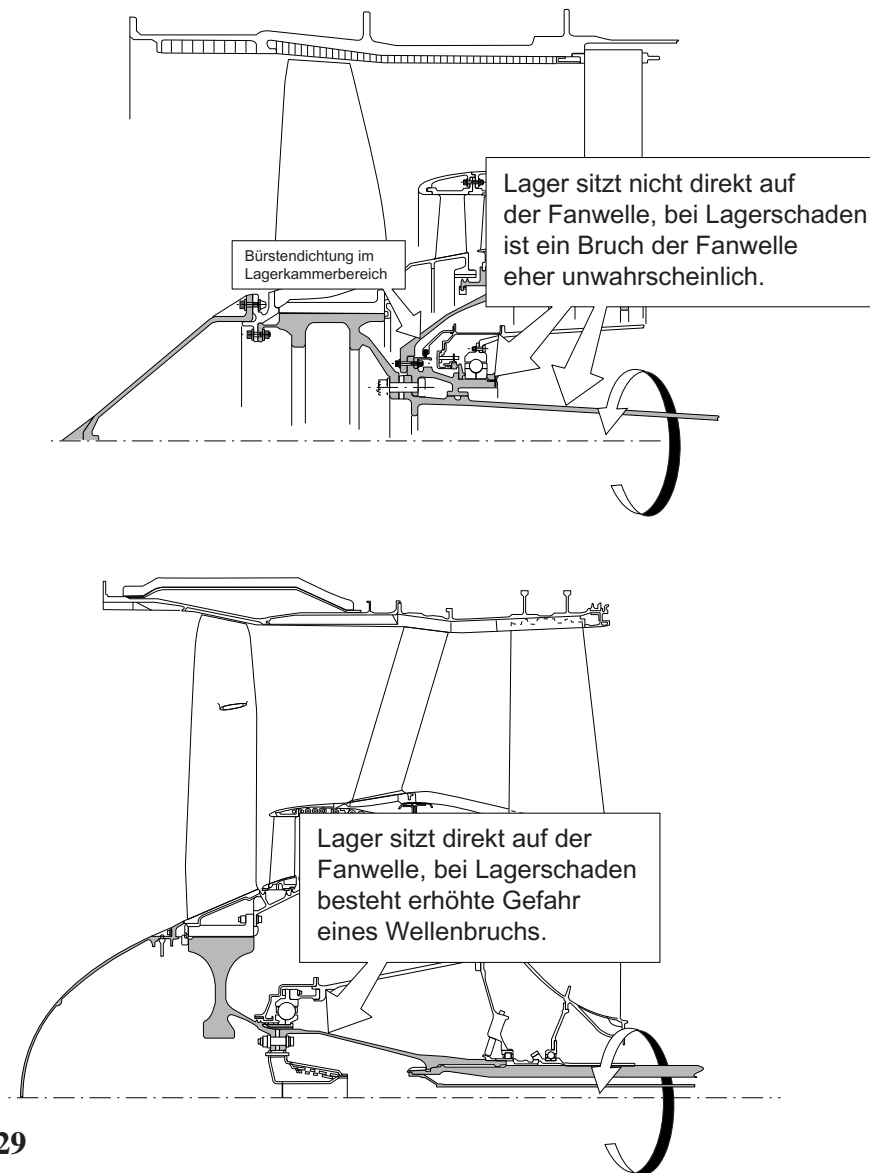
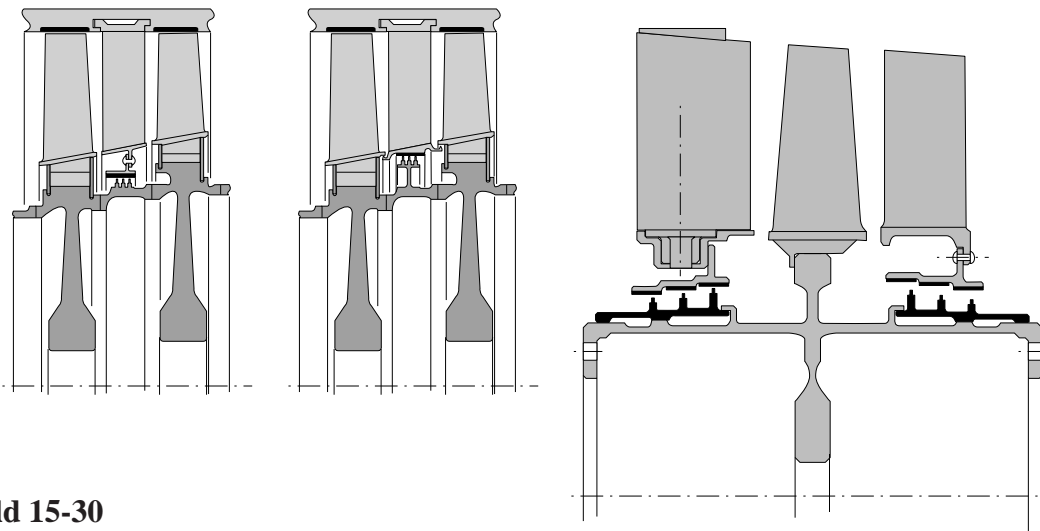


Bild 15-29

**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 über-

trägt. 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.

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).

## Literatur zu Kapitel 15

- 15-1** Z.S. Palley, I.M. Korolev, E.V. Rovinskiy, „Structure and Strength of Aircraft Gas-Turbine Engines“, Übersetzung aus dem Russischen, Foreign 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. Hoepfner, „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, Seite 25-30.
- 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 6.5.1.1-2, 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.