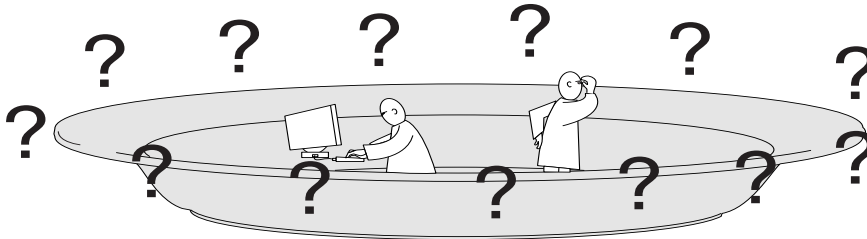


15.2.3 Minimierung des Entwicklungsrisikos



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

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

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

Entwicklungsrisiko:

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

Ursachen für das Entwicklungsrisiko:

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

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

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

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

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

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

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

Die Risiken bzw. der Aufwand für die Fehlerbeseitigung bei einem „**wissensbasierten Ansatz**“ (Lit 15.2-19) zeigt das mittlere Diagramm. Die Anwendung erfolgt **Computer gestützt**. Damit ist es mit Simulationen und Animationen eher möglich, verborgene Fehler in der frü-

hen Konstruktions- bzw. Entwicklungsphase zu entdecken und die **FMEA** (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, engl. **Failure Mode Effects Analysis**, Lit 15.2-28) zu verbessern. So bewegt sich die Wahrscheinlichkeit, Fehler bereits in der Entwicklungsphase zu entdecken auf der Zeitachse nach vorne und reduziert das Risiko.

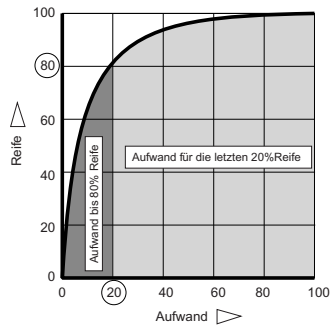
Die Kosten steigen mit dem Fortschritt der Entwicklung zur Serienanwendung exponentiell an

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

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

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

Das Pareto-Prinzip ermutigt und sollte vorsichtig machen



Verbesserte Fehlerkorrektur bei wissensbasierter Vorgehensweise

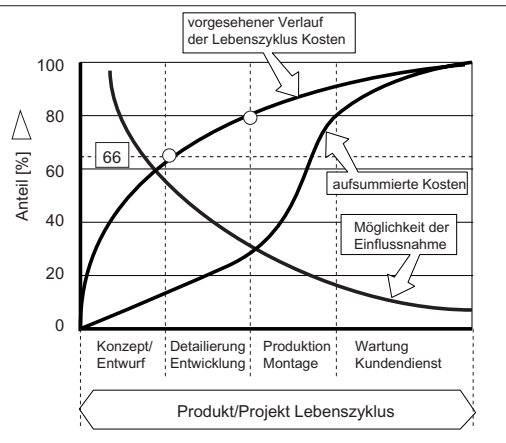
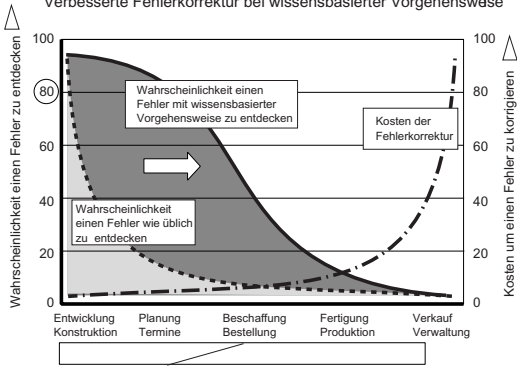


Bild 15.2-17

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

Beispiel 15.2-4.1 (Lit 15.2-30):

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

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

Kommentar: Es handelte sich um den Absturz einer großen zivilen Rakete (Ariane 5). Der Schaden liegt im Milliarden EUR-Bereich und ist mit großem Prestigeverlust sowie hohen Folgekosten (z.B. Versicherungsprämien, Zeitverzug) verbun-

den. Man ging **scheinbar nur sehr wenig über den Erfahrungshorizont** mit dem Vorläufer (Ariane 4). Insbesondere scheinen die Computergestützten Berechnungen nicht ausreichend sichere Schlussfolgerungen ermöglicht haben. Es ist fraglich, ob man ein solches Desaster noch als Teil einer „normalen Lernkurve“ bezeichnen kann.

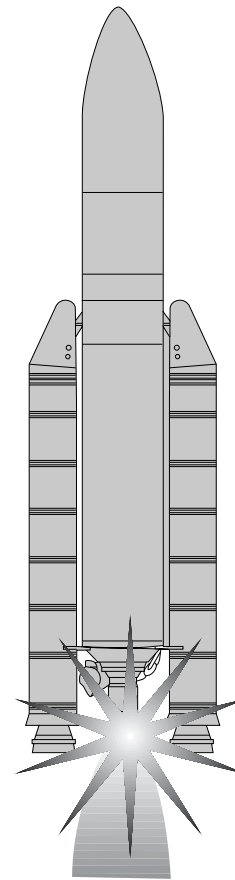


Bild 15.2-18: Eine angewandte technologische Entwicklung muss bestimmten Forderungen genügen, um das **Entwicklungsrisiko zu minimieren**. Die Tabelle enthält typische Beispiele ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Eine Realitätsbezogenheit ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwicklung. Dies bedeutet, dass bei einem Anwender der Serieneinsatz das letztendliche Entwicklungsziel sein muss. D.h. **Halbzeug- und Grundlagentechnik** (Bild 15.2-21) sind „natürlichen“ **Partnern** (z.B.

Hochschulen, Halbzeuglieferanten) zu übertragen. Der **Anwender** konzentriert sich auf Aufgaben wie:

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

Wichtige Forderungen an eine angewandte technologische Entwicklung:

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

das bedeutet:

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

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

das bedeutet:

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

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

das bedeutet:

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

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

das bedeutet:

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

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

das bedeutet:

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

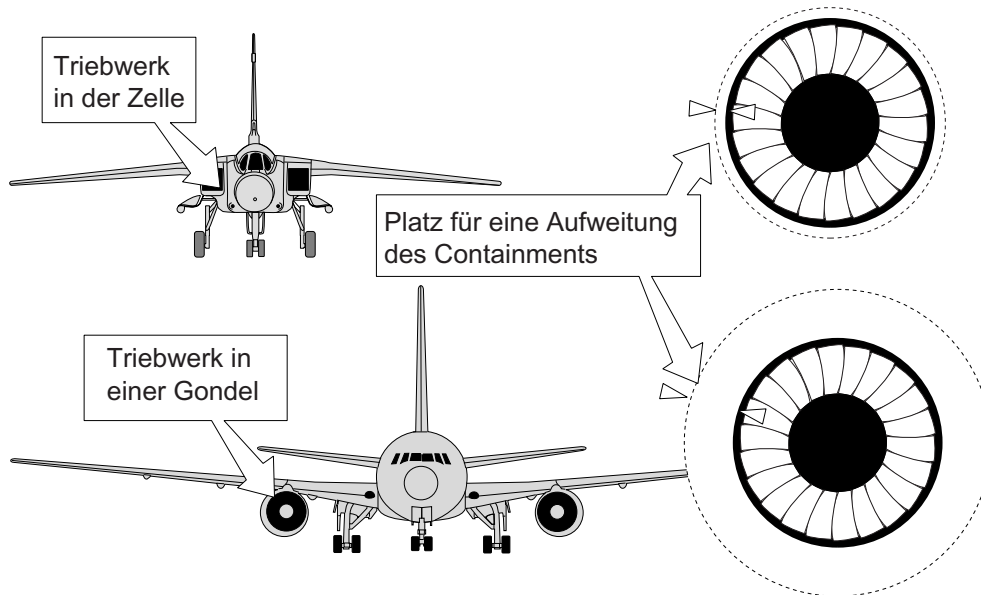
- Die absehbaren Kosten müssen abschätzbar sein.

Bild 15.2-18

das bedeutet:

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

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



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

Bild 15.2-19

Ein Aramidcontainment benötigt Platz für die radiale Aufweitung. Der steht in der Zelle eines Kampfflugzeugs nicht zur Verfügung.

Bild 14-19:

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

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

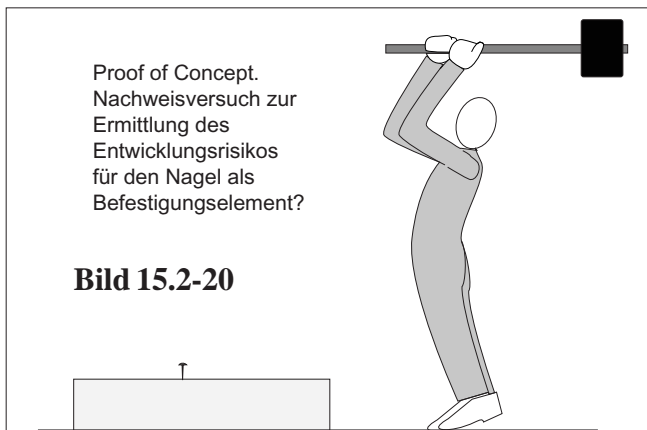
Die entscheidende Frage ist deshalb:

Warum hat eine Realisierung (noch) nicht stattgefunden?

Erst wenn diese Frage plausibel beantwortet ist, sollte die Entscheidung über eine Entwicklung getroffen werden.

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

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



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

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

Nicht selten ähnelt ein solcher Demonstrationsversuch eher einem mittelalterlichen Gottesurteil, bei dem z.B. ein gerissenes Seil die Unschuld des aufzuhängenden Deliquenten beweist. Ein typisches Beispiel ist der Nachweis des Potenzials der besseren **zyklischen Lebensdauer** einer höchstbelasteten Rotorscheibe mit einem **Berstscheuderversuch**. Hier wird zyklische Ermüdung durch Zerreißen ersetzt. Beide Schadensabläufe unterscheiden sich fundamental und werden von unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften gesteuert. Das Ergebnis des Ermüdungsversuchs (Schwingfestigkeit) hängt entscheidend von einer vorhandenen Fehlergröße ab. Beim Berstversuch wird die Bruchfestigkeit und Bruchdehnung (Spannungsumlagerung durch plastische Verformung) geprüft. Das Ergebnis hängt gewöhnlich nur unwesentlich von den relativ kleinen Fehlern ab. Es ist durchaus möglich, dass ein besonderer, weniger plastisch verformbarer Werkstoff (z.B. mit fasertechnischer Verstärkung) keine merkliche Verbesserung der Bruchdrehzahl ge-

genüber der konventionellen Version zulässt. Spannungskonzentrationen können von einem Werkstoff mit großer Duktilität ausgeglichen werden. Bei der niedrigeren Betriebsdrehzahl kann jedoch ein weniger plastisch verformbarer faserverstärkter Werkstoff deutlich längere zyklische Lebensdauer ermöglichen. In diesem Fall könnte der Versuch den Vorteil nicht demonstrieren. Aber auch der umgekehrte, gefährlichere Fall ist denkbar, wenn der Versuch einen Vorteil suggeriert der später nicht realisierbar ist.

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



Bild 15.2-21:

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

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

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

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

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

Die maximal zulässige Schwachstelle ist von der für die Festigkeit verantwortlichen Stelle zu definieren. Die Auslegungsliebensdauer wird entsprechend den Betriebsanforderungen, festgelegt.

Qualitätssicherung muss mit geeigneter **ZfP** und/oder mit **Verfahrenskontrolle** gewährleistet sein (Lit 15.2-21). Dabei gilt:

Eine ZfP ist einer Verfahrenskontrolle vorzuziehen.

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

Die Qualitätssicherung muss die Auslegungsbasis im Serienprodukt garantieren

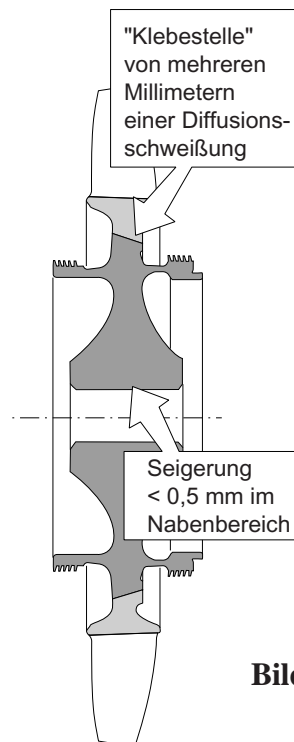


Bild 15.2-22

Vorsicht beim "Extrapolieren von Technologien" bzw. zulässigen Beanspruchungen über den "Erfahrungshorizont"!

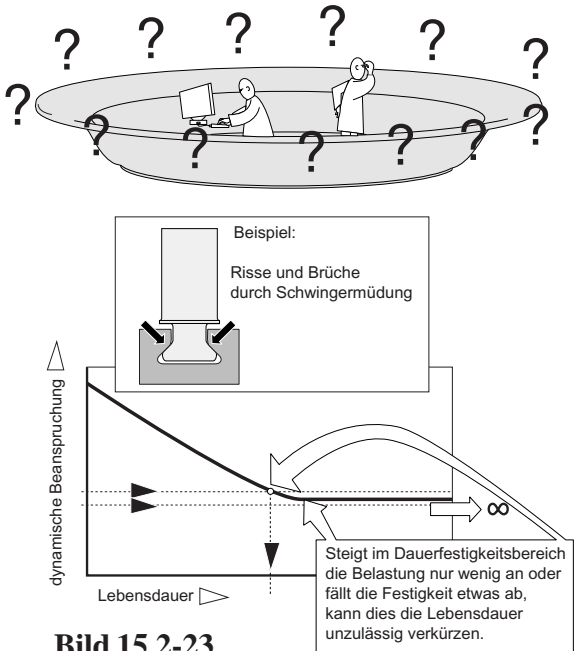


Bild 15.2-23

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

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

Beispielsweise kann eine auslegungsgemäße Flächenpressung, welche die in Betriebserfahrungen abgesicherten Grenzen übersteigt, nach inakzeptabel kurzen Laufzeiten zu Schwingbrüchen führen (Diagramm). Dies ist der Fall, wenn die dynamische Beanspruchung auf

Beispiel 15.2-4.2 (Lit 14-22):

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

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

Grund der Belastungsänderung und/oder einem Schwingfestigkeitsabfall, die Dauerfestigkeit übersteigt. Eine bereits gefährliche Erhöhung der dynamischen Beanspruchung kann mit der Betriebszeit auf einen Anstieg der Reibkräfte an den Auflageflächen zurückzuführen sein. Selbst wenn sich die Belastung nicht erhöht hat, kann ein Abfall der nutzbaren Schwingfestigkeit durch Einflüsse wie Fretting oder Mittelspannungserhöhung zu einem gravierenden Lebensdauerverlust beitragen.

Daraus ergibt sich:

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

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

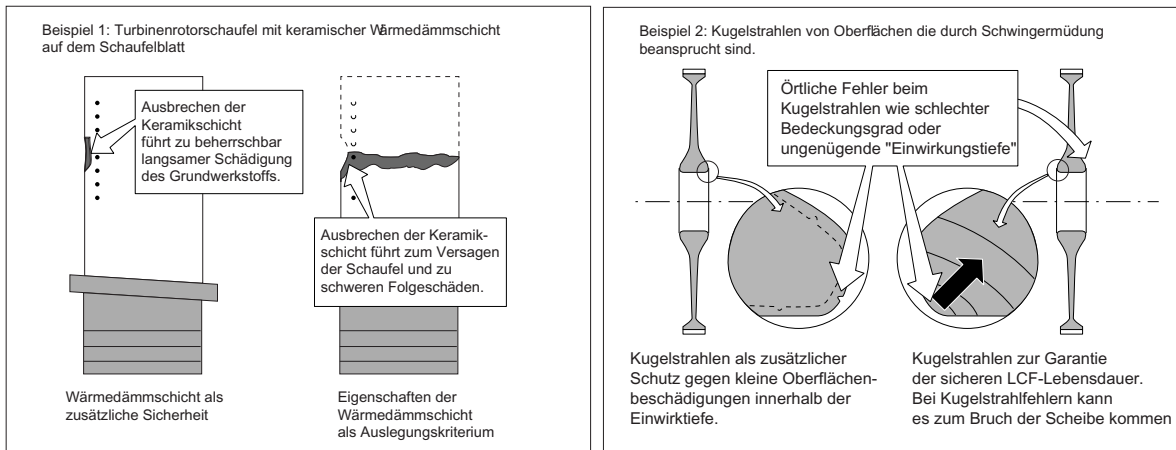


Bild 15.2-24

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

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

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

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

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

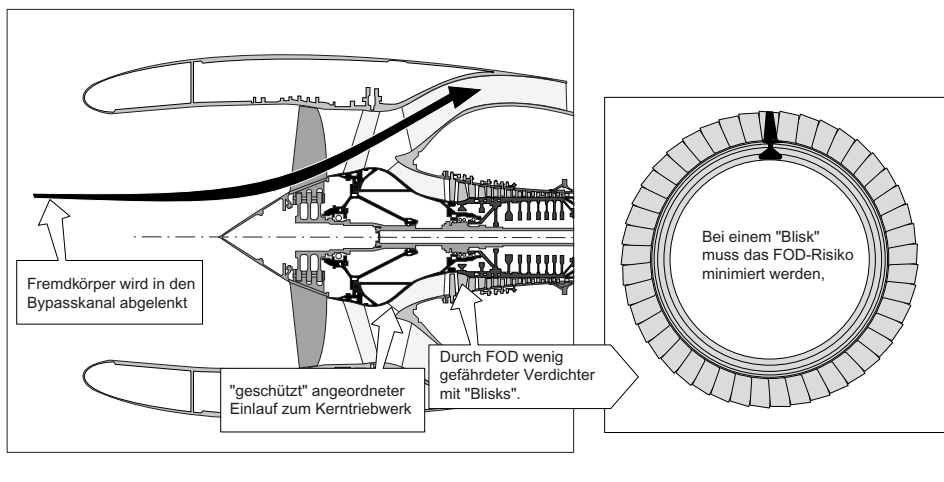
- Alle Auslegungs-, Gestaltungsspezifikationen und Richtlinien müssen erarbeitet und abgesichert sein. Die Qualität als Basis der Auslegung muss gewährleistet sein.

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

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

Der erfolgreiche Einsatz neuer Technologien erfordert die Anpassung des Gesamtkonzepts!

Beispiel A: "Blink"



Beispiel B: Fanschaufeln aus FVK für Kampfflugzeuge

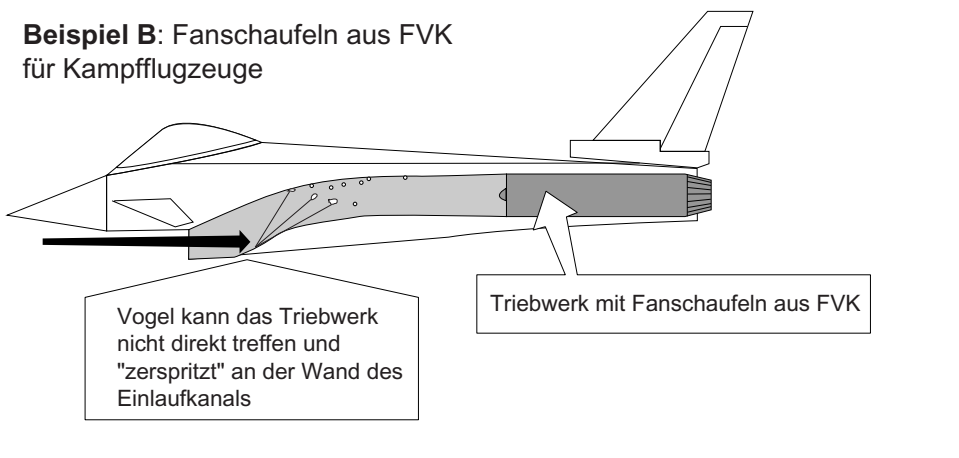


Bild 15.2-25

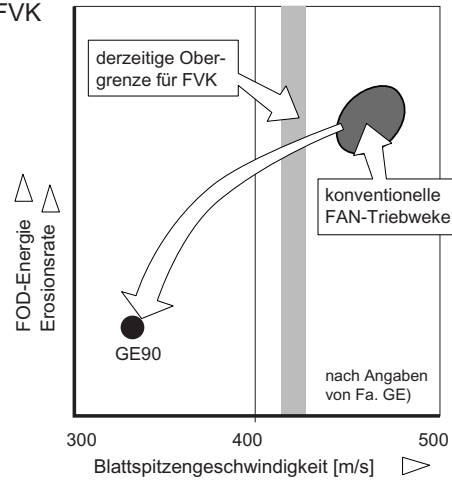
Sie muss **bereits vor einer Projektphase erarbeitet** sein. In der Anfangsphase ist Technologieentwicklung in eine langfristige Strategie, unabhängig von einem bestimmten Projekt, einzubinden. Die folgenden Beispiele zeigen die Notwendigkeit dieser Forderungen:

Beispiel A: Die Reparatur- und Logistikproblematik eines Blink erfordert eine möglichst geringe FOD-Schadensrate. Diese lässt sich mit einer geeigneten Gestaltung des Fanbereichs und HDV-Eintritts erreichen. Der zum

Bypasskanal schräg angeordnete HDV-Eintritt lenkt angesaugte Fremdkörper ab (Lit. 15.2-33).

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

Beispiel C: Fanschaufeln aus FVK für Ziviltriebwerke



Beispiel D: Fasertechnisches Containment

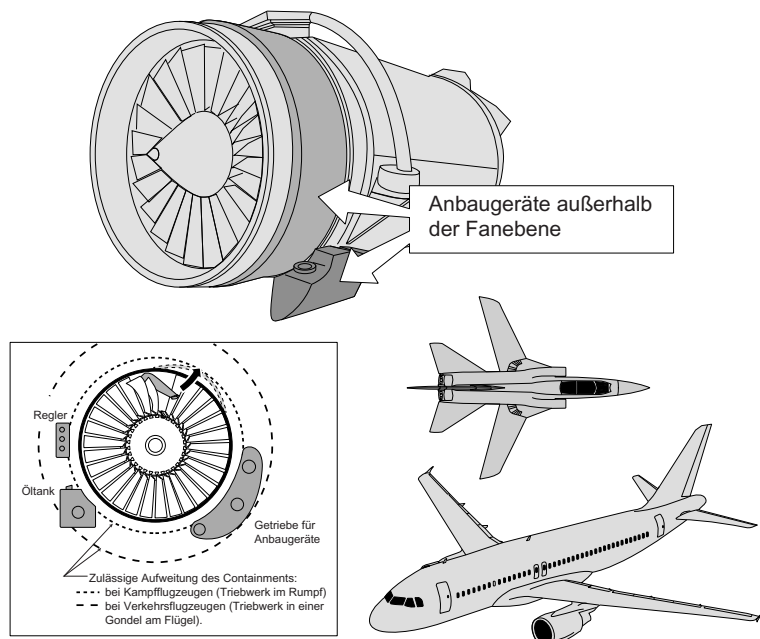


Bild 15.2-26

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

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

staltung des Fan zu berücksichtigen (Bild 15.2-14 und Lit. 15.2-34).

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

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

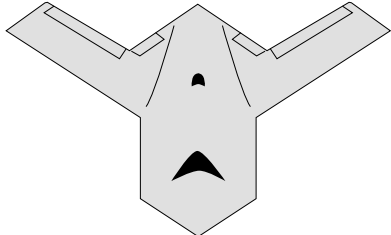
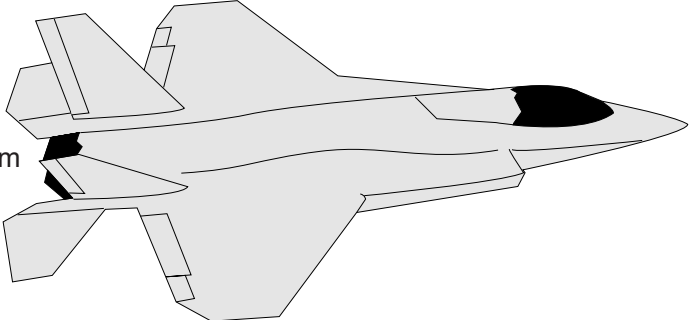
	<p>Unbemannte Kampfflugzeuge (UAV):</p> <p>Betriebszeit: Größenordnung 10^2 Stunden Vogelschlag: nicht relevant Erosion: nicht relevant Wartung: möglichst keine Reparatur: keine</p> <p>Technologien: revolutionär (z.B. Keramik, Fasertechnik)</p>
<p>Kampfflugzeuge:</p> <p>Betriebszeit: Größenordnung 10^3 Stunden Vogelschlag: Auslegungskriterium Erosion: Lebensdauerrelevant Wartung: großer Aufwand Reparatur: großer Aufwand Technologien: evolutiv</p>	

Bild 15.2-27

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

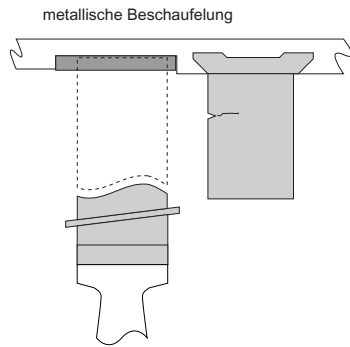
Ausnahmsweise besteht damit die die **Möglichkeit revolutionärer Entwicklungsschritte**, die bei Antrieben bemannter Kampfflugzeuge nicht gewagt werden können..

Bild 15.2-28:

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

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

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

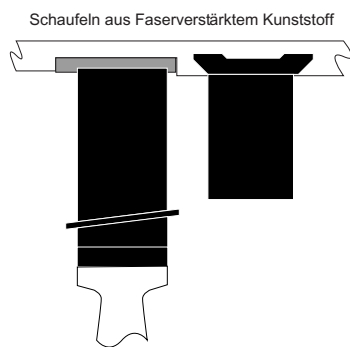


Vorteile

- Zäh (duktil)
- Schlagunempfindlich
- Erosionsfest
- bei Impact geringe Auslenkung
- Warmfestigkeit

Nachteile

- schwer
- Schwingermüdung
- kerbempfindlich
- große Folgeschäden
- geringe Dämpfung



Vorteile

- gutmütiges Verhalten gegenüber Schwingbeanspruchung
- hohe Dämpfung
- leicht
- geringe Folgeschäden
- Kerbunempfindlich
- Werkstoffdaten im Bauteil optimierbar

Nachteile

- bei Impact große Auslenkung
- impactempfindlich
- erosionsempfindlich
- niedrige Warmfestigkeit

Bild 15.2-28

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

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

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

Erfolgreiche Konstruktionsphilosophien nutzen spezifische Vorteile der Werkstoffe.

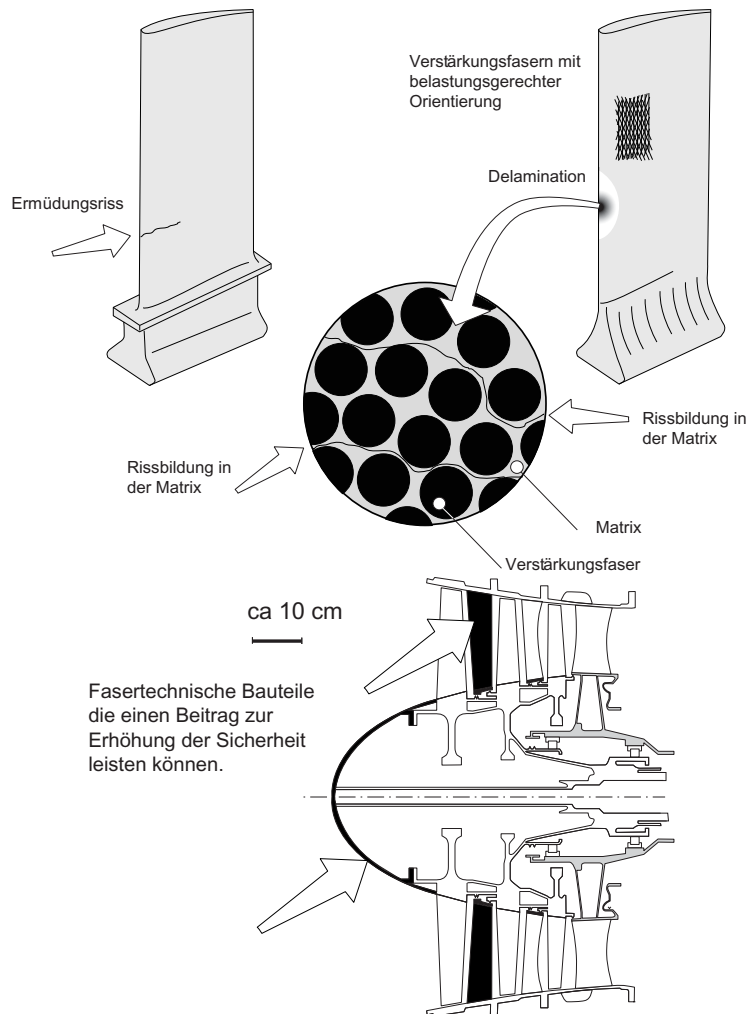


Bild 15.2-29

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

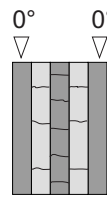
Der **Versagensmechanismus bei Schwingermüdung** erfolgt nicht wie bei Metallen mit einem kaum beherrschbar schnellen Rissfortschritt. Die Ermüdung führt bei FVK zur **Delamination** (Auflösung entlang der Faserlagen, Bild 15.2-30) ohne gefährliche Faserbrüche. Damit erhöht sich die Dämpfung, während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

Das Versagensverhalten von faserverstärkten Werkstoffen bei dynamischer Beanspruchung ist besser beherrschbar als das von Metallen.

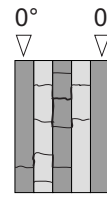
Vorteile der Faser-Verbund-Werkstoffe gegenüber Metallen:

- "1" größeres Zeitintervall für Inspektionen
- "2" größeres Zeitintervall zwischen kritischer Schadensgröße und katastrophalem Versagen
- "3" größere Fehlstellen bei gleicher Schädigung (bessere Erkennbarkeit: Dämpfung, Verformung)

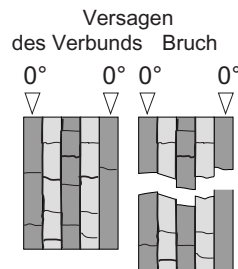
Phase I
Matrixrisse
Faserbrüche



Phase II
Risskopplung
Faserablösung
Delamination
Faserbrüche



Phase III
großflächige
Delamination
lokale Faserbrüche



Schadensgröße:

- bei Metallen:
 - Risslänge
- bei faserverstärkten Werkstoffen:
 - gebrochene Fasern
 - Delamination
 - Matrixrisse
 - Brüche des Faserverbunds

Anfangsfehlergröße

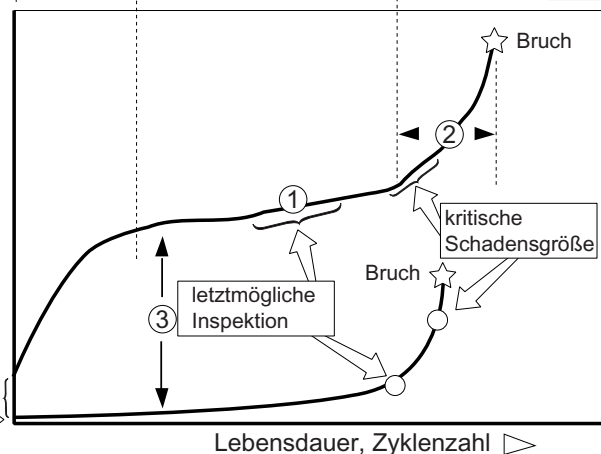


Bild 15.2-30

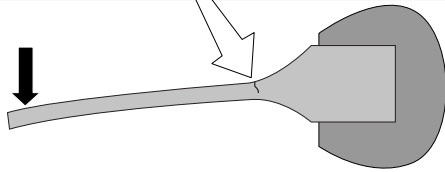
Bild 15.2-30 (Lit 15.2-24): Der „gutmütige“ Versagensmechanismus von faserverstärkten Kunststoffen (FVK) unter dynamischer Belastung (Bild 15.2-29) ist ein wichtiger Vorteil gegenüber homogenen metallischen Werkstoffen. Bei FVK-Werkstoffen ist wegen der geringen Kerbempfindlichkeit bereits eine Anrisschwachstelle relativ zu Metallen groß (obere Kurve). Davon ausgehend sind mehrere Schädigungsmodi (Matrixrisse, Delaminationen, Faserbrüche) möglich. Sie verteilen die eingeleitete dynamische Energie auf ein größeres Volumen. Das endgültige Versagen des Bauteils mit beschleunigtem Wachstum der Schädigung tritt erst bei einer relativ großen Schädigung ein. Entsprechend gut ist die Erkennbarkeit einer Schädigung wie Delamination mit deutlichem Steifigkeitsabfall (Bild 15.2-31). In ho-

mogenen metallischen Werkstoffen ist der Fehler, an dem der Anriss beginnt, vergleichsweise klein (untere Kurve). Typischer Schadensmodus ist der Rissfortschritt. Der Riss bleibt lange klein, um dann beschleunigt anzuwachsen. Die Zeitspanne bis zum Erreichen der kritischen Rissgröße und Bruch des Querschnitts ist im Vergleich zu FVK kurz. Insgesamt benötigt der Schadensfortschritt bei vergleichbarer Belastung im FVK länger als im metallischen Werkstoff. Dieses Verhalten bedeutet für FVK-Teile eine größere Chance ein Versagen unter dynamischer Beanspruchung rechtzeitig abzufangen.

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

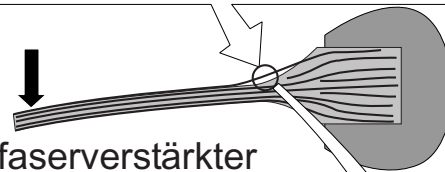
Werkstoffe versagen spezifisch und das kann sehr unterschiedlich sein.

Im Bereich höchster Zugbeanspruchung erfolgt eine plastische Verformung und Rissbildung. Der Riss verläuft in den Querschnitt und führt zu plötzlichem Bruch.



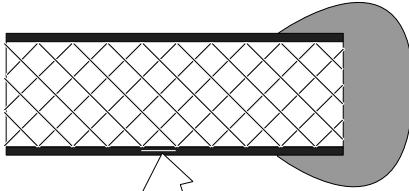
homogener metallischer Werkstoff

Im Bereich höchster Zugbeanspruchung erfolgt eine Schädigung durch Delamination, die auch in die Zone niedrigerer Normalspannung verläuft. Der Bruch "kündigt sich an".



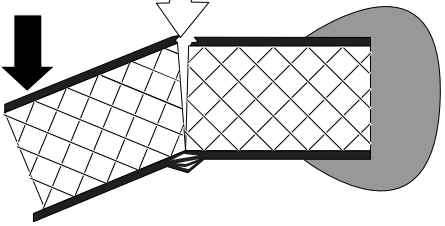
faserverstärkter Werkstoff "1"

faserverstärkter Werkstoff "2"

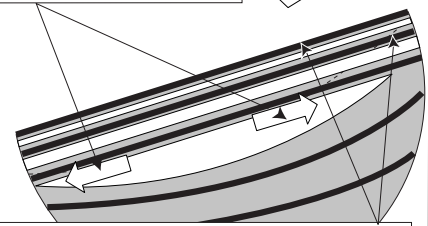


Delamination/Beschädigung auf der Druckseite bedeutet eine weitaus gefährlichere Schwächung als auf der Zugseite. Die Folge ist ein oft unerwartetes Versagen der gesamten Struktur.

Auch ohne Beschädigung ist die Druckseite beim faserverstärkten dünnwandigen Biegeträger besonders gefährdet.



Risswachstum durch Delamination längs der Oberfläche bzw. der Faserlagen



Oberflächennahe Faserlagen werden gestreckt und heben ab.

Überlastungstest eines Flügels

Ausknicken auf der Druckseite

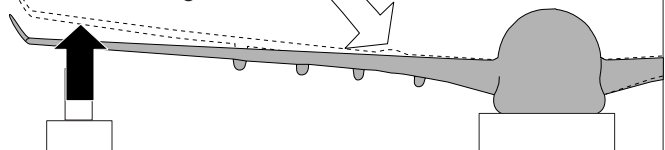


Bild 15.2-31

tallischer Träger mit aufgedicktem Einspannquerschnitt statisch biegebelastet (Skizze oben) erfolgt plastische Verformung und Rissbildung quer zur Oberfläche. Der Riss führt zu beschleunigtem Festigkeitsverlust und zum Bruch. Ein Biegebalken aus faserverstärktem Kunststoff (FVK) mit einer **Verstärkung an der Einspannung** (Skizze: faserverstärkter Werkstoff „1“) wird zwar in der gleichen Bauteilzone wie der metallische versagen. Der **Versagensmodus** läuft jedoch mit einem **Abheben der oberflächennahen Lagen**, also einer Rissbildung längs

der Oberfläche ab. Dabei ist der Festigkeitsabfall vergleichsweise moderat, denn die delaminierten Faserlagen können Zugkräfte übernehmen. So **kündigt sich der Bruch rechtzeitig an und kann somit abgefangen werden**. Besonders gefährdet sind **hohle Biegeträger**, z.B. Sandwichstrukturen oder Rohre aus FVK. Sie sind empfindlich für ein **Ausknicken auf der Druckseite** (Lit. 15.2-32). Dies gilt besonders bei **örtlicher Beschädigung**. Das ist auch bei **Reparaturen** zu beachten.

Typische werkstoffabhängige Schadensbilder eines rotierenden Nasenkonus nach einem größeren Vogelschlag

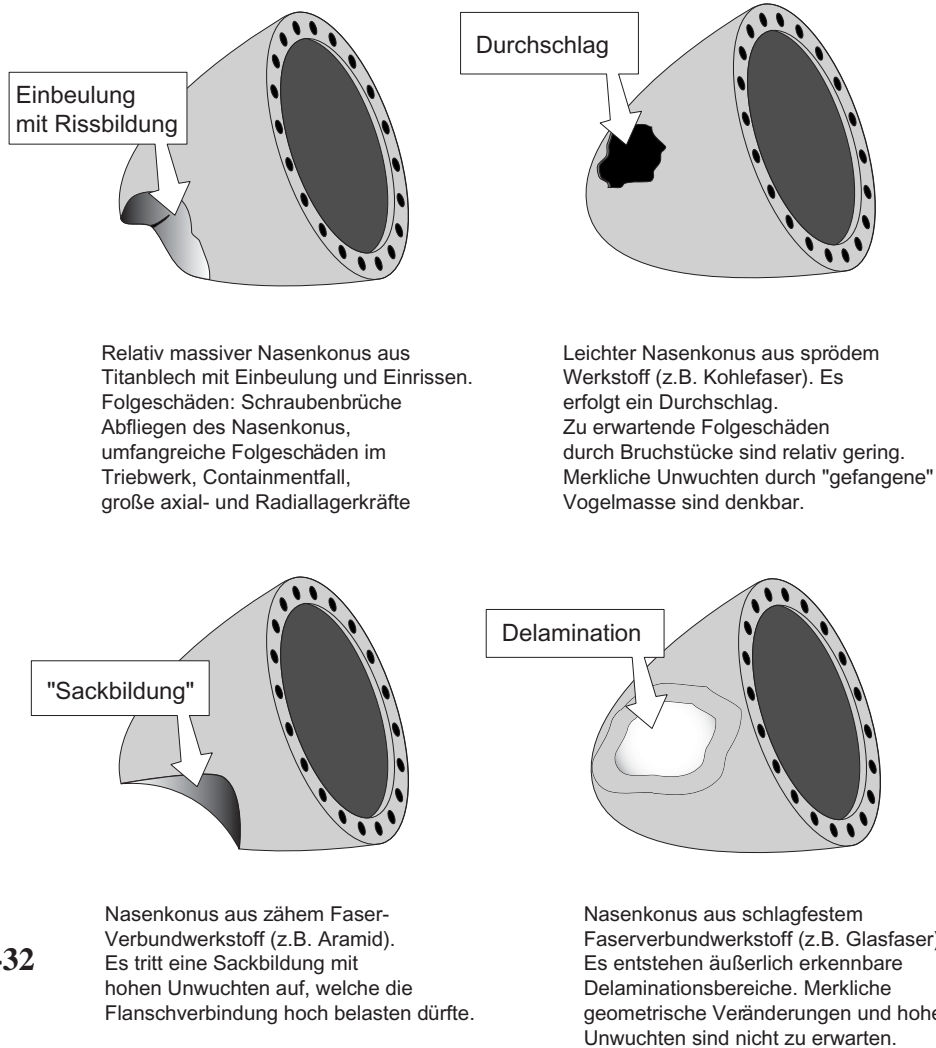


Bild 15.2-32

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

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

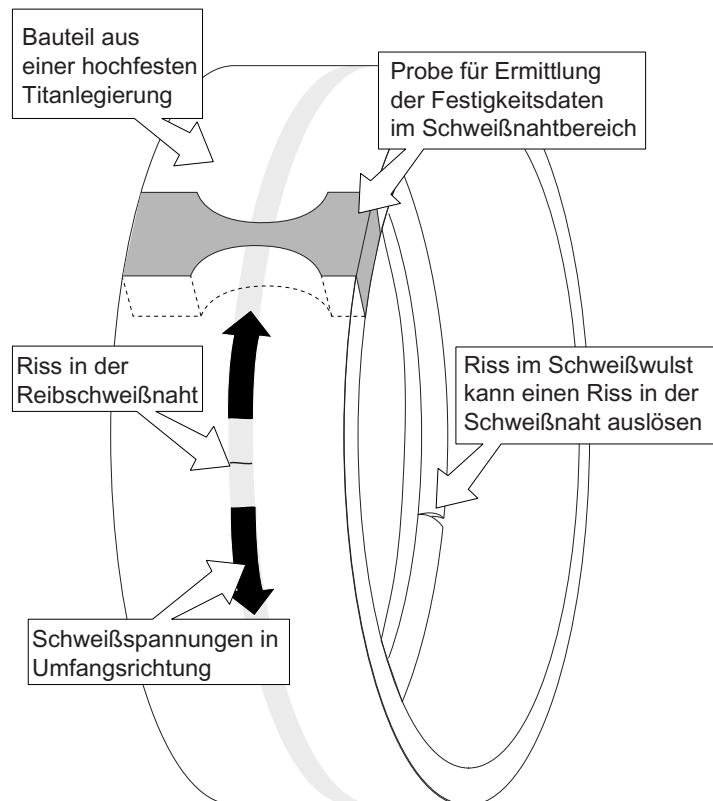
Merksatz:

Erst ausreichend betriebsnahe Versuche lassen Probleme und Vorteile einer Technologie erkennen. Grundsätzlich gilt:

Was man nicht **selbst entwickelt oder zumindest nachvollzogen** hat, ist wahrscheinlich **nicht ausreichend verstanden**. Das führt zu einem hohen Risiko der Serieneinführung.

Eine Grundregel der technologischen Entwicklung:

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



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

Bild 15.2-33

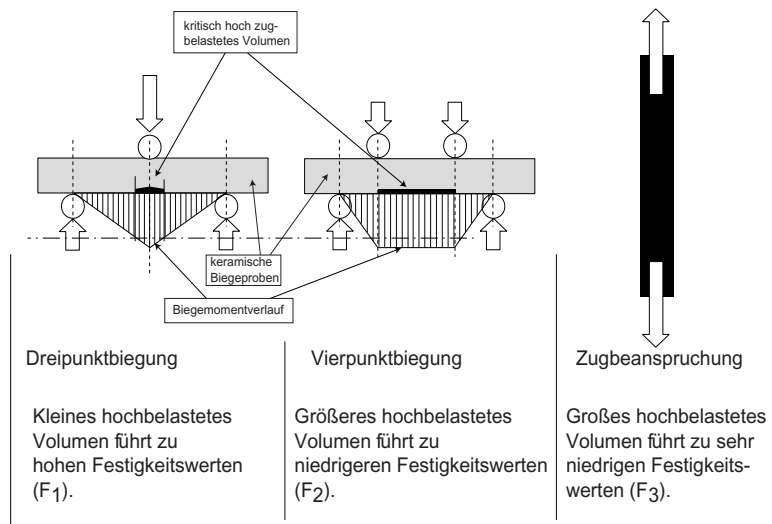
Bild 15.2-33: *Werkstoffdaten* sind die Basis der Auslegung und somit entscheidend für die Sicherheit des Bauteils. Aus diesem Grund

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

Siehe hierzu auch Band 1 Bild 5.4.2.2-5 und Bild 5.4.3.2-3. **Separat hergestellte Proben** un-

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

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



Nach Weibull ergibt sich bei gleicher Ausfallwahrscheinlichkeit:

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

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

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

daraus folgen prüfungsabhängige Festigkeitswerte:

$$F_1 > F_2 > F_3$$

Bild 15.2-34

Bild 15.2-34 (Lit 15.2-25 und Lit 15.2-31): Spröde Werkstoffe wie Keramiken sind besonders kerbempfindlich und reagieren bereits auf sehr kleine Fehlstellen mit Rissbildung und Bruch. Dieses Verhalten führt zu einer merklichen Abhängigkeit der Festigkeit von der Fehlerwahrscheinlichkeit. **Je größer das kritisch hoch belastete Volumen bzw. die Oberfläche (abhängig von der Fehlerlage), um so kleiner ist die nutzbare Festigkeit.** Die Messwerte werden merklich von Größe und Spannungsverteilung in der Probe beeinflusst (Band 1, Bild 5.2.1-9 und Bild 5.2.1-10). Selbst bei gleicher Probengeometrie ergibt eine Dreipunktprüfung höhere Werte als eine Vierpunkt-

prüfung. Die niedrigsten Werte lässt die Zugprobe erwarten. Bei dominierendem Oberflächeneinfluss wirken sich bereits kleine Unterschiede in Bearbeitung und Behandlung auf die Festigkeit aus. Aus diesem Grund gilt:

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

Wer neue Technologien entwickelt ist auch für die problemlose Einführung in der Praxis verantwortlich. Der Konstrukteur gehört auch in die Fertigung und Montage.

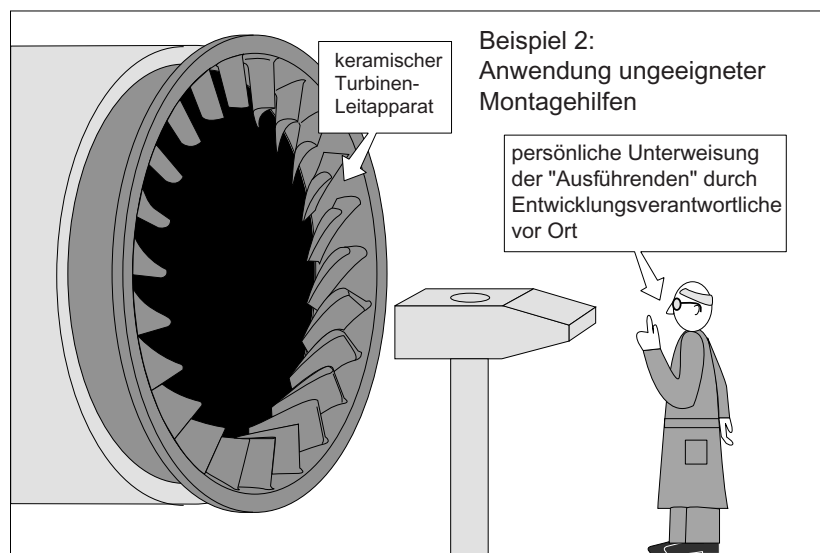
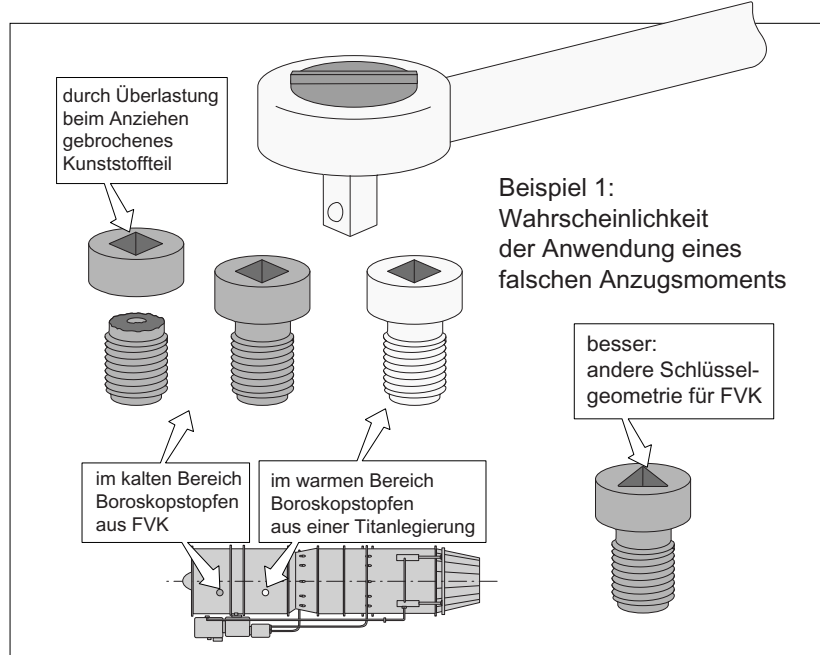


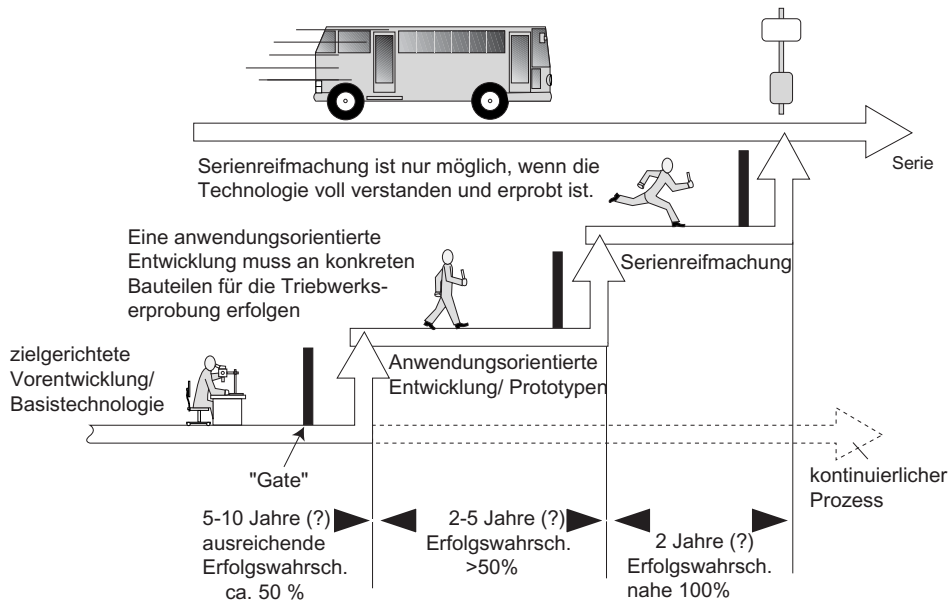
Bild 15.2-35

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

zeptablen Grenzen zu halten, müssen **Vorgehensweisen und Konstruktionsmerkmale** entwickelt, erprobt und spezifiziert werden.

Um das Risiko besonderer Eigenschaften wie niedrigere Festigkeit oder Sprödigkeit in ak-

Um eine Technologie bis zum Serieneinsatz zu bringen sind Jahre konstanter Beschäftigung mit dem Problem erforderlich.



Bis zur Serienentwicklung müssen alle Auslegungsdaten und Gestaltungsregeln vorliegen. An dieser Forderung müssen sich die "Gates" orientieren!

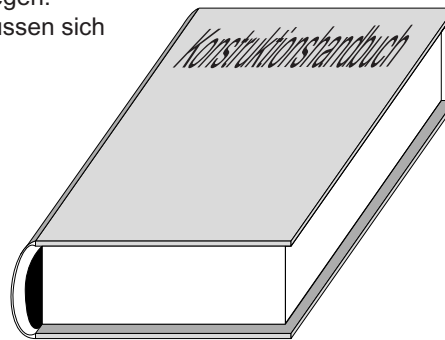


Bild 15.2-36

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

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

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

Bild 15.2-37: Auch vergleichbar kurze **Prüfläufe** können zur Haltbarkeit von Komponenten und Technologien in Triebwerken wichtige Hinweise geben (Lit. 15.2-35). Voraussetzung ist eine **sehr genaue Untersuchung potentieller Problemzonen**. Um diese zu identifizieren

Der Wert eines Versuchs hängt entscheidend von einer möglichst genauen Auswertung ab.

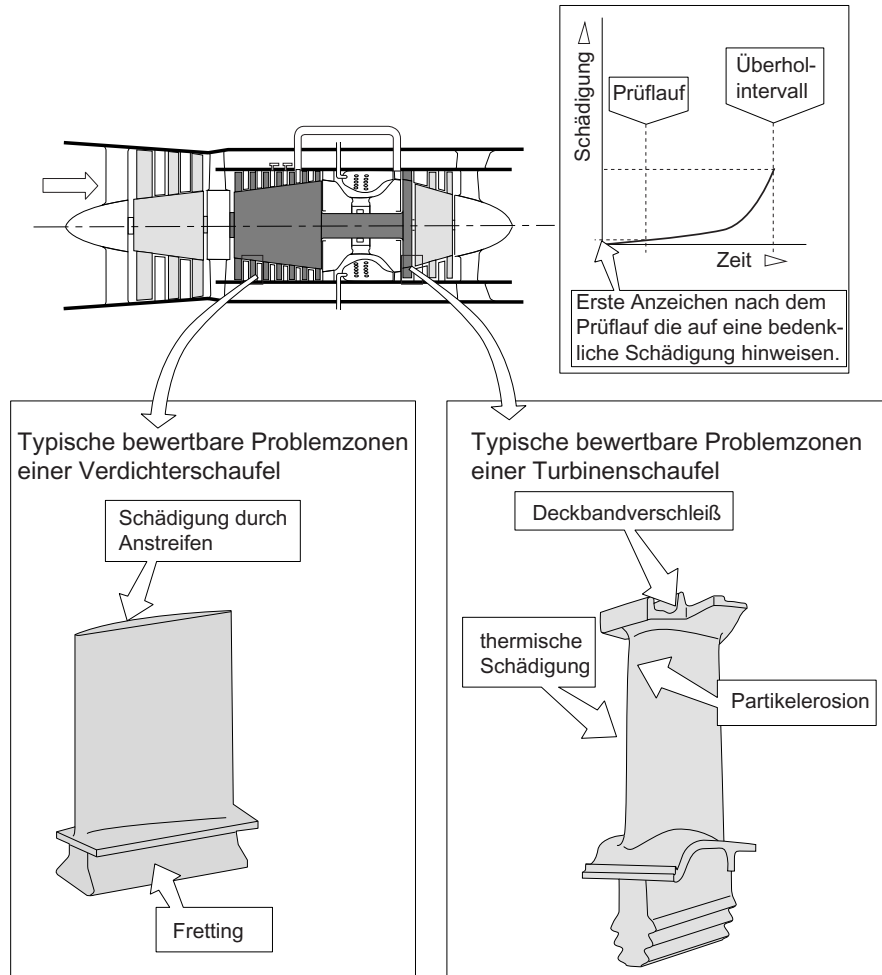


Bild 15.2-37

ist besonders Erfahrung erforderlich. **Erste Anfänge einer bedenklichen Schädigung** sollten erkannt werden. Entsprechend einem schädigungsspezifischen zeitlichen Ablauf können solche Anzeichen nach den relativ kurzen Laufzeiten sehr schwach sein (Skizze oben rechts). In dem vorgesehenen Überholintervall der Serienanwendung können sie sich aber gefährlich entwickeln. Damit besteht die Gefahr, dass sie unterschätzt werden. Nicht selten wird versucht, den erheblichen Aufwand ausreichender intensiver **Nachuntersuchungen** zu minimieren. Diese Kosten werden dann im Budget nicht vorgesehen. Auf diese Weise wird der Prüflauf lediglich zu einem Funktionsnachweis für Bauteile ohne typische

Betriebsschädigungen. So wird das Risiko von Langzeitschäden und hohen Folgekosten erhöht.

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

Literatur zu Kapitel 15.2

- 15.2-1** S.F. Powel IV, „On the Leading Edge: Combining Maturity and Advanced Technology on the F404 Turbofan Engine“, Paper No. 40-GT-149 des „35th International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition“, Brussels, Belgium, June 11-14, 1990, veröffentlicht in „Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, January 1991, Vol. 113, Seite 1-10.
- 15.2-2** J. Kumpfert, M. Peters, W.A. Kaysser, „The Potential of Advanced Materials on Structural Design of Future Aircraft Engines“, Proceedings des NATO-RTO Symposium on „Design Principles and Methods for Aircraft Engines“, 11-15 May 1998, Toulouse, France. Seite 42-1 bis 42-12.
- 15.2-3** S.W. Kandebo, „GE and Allison Probe Core Engine Failure“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“ May 17, 1999, Seite 30.
- 15.2-4** C.H. Cook, C.E. Spaeth, D.T. Hunter, R.J. Hill, „Damage Tolerant Design of Turbine Disks“, ASME Proceedings Paper 82-GT-311, 1982, Seite 1-8.
- 15.2-5** K.F. Mordoff, „General Electric Testing 404 Derivative Engine“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, April 12, 1982, Seite 59-61.
- 15.2-6** „F-18 Fighter Crashes in England“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, September 15, 1980, Seite 20.
- 15.2-7** J.L. Bartos, „P/M Superalloys for Military Gas Turbine Applications“, Proceedings Paper des „1979 P/M in Defense Technology Seminar“ der MPIF, Yuma, Arizona, Seite 81-112.
- 15.2-8** „DMS Market Intelligence Report“, Gas Turbine Engines, 1982, Seite 5.
- 15.2-9** „Interavia Air Letter“, No. 9649, December 12, 1980, Seite 1 und 2 .
- 15.2-10** Zeitschrift „PM Powder Metallurgy“, 12, 1980, 4 Seite 507.
- 15.2-11** D.N. North, „Changes to F404 Engine Urged by Design Review“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, December 8, 1980, Seite 24.
- 15.2-12** H.J. Coleman, „Rolls Studies Coatings to Cut Erosion of Carbon Fan Blades“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, May 27, 1968, Seite 74.
- 15.2-13** G. Warwick, „GE confident of fan blade answer“, Zeitschrift „Flight International“, 21-27 June, 1995, Seite 5.
- 15.2-14** S.W. Kandebo, „New Engine Test Rules Contested“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, October 10, 1994, Seite 33.

- 15.2-15** H.J. Coleman, „Rolls Nationalisation Clouds RB.211 Future“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, February 8, 1971, Seite 26.
- 15.2-16** P. Middleton, „RB.211: transatlantic bridgehead“, Zeitschrift „Flight International“, 5. November, 1970, Seite 709.
- 15.2-17** J.M.S. Keen, „Development of the Rolls-Royce RB.211 turbofan for airline operation“, Proceedings Paper 700292, des ASE „National Air Transportation Meeting“, New York, N.Y., April 20-23, 1970, Seite 5- 7.
- 15.2-18** E.M. Murman, M. Wallon, E. Rebentisch, „Challenges in the better, faster, cheaper era of aeronautical design, engineering and manufacturing“, Zeitschrift „The Aeronautical Journal“, October 2000, Seite 481-489.
- 15.2-19** S. Vajna, „Approaches of Knowledge-based Design“, Proceedings des „19th CAD-FEM Users' Meeting 2001, International Congress on FEM Technology“, 17-19 October 2001, Berlin, Seite 1-9.
- 15.2-20** K-D. Thoben, F. Waber, M. Wunram, „Pragmatic Approaches to Overcome Barriers in Knowledge Management“, Proceedings des „19th CAD-FEM Users' Meeting 2001, International Congress on FEM Technology“, 17-19 October 2001, Berlin, Seite 1-9.
- 15.2-21** D.R. Hinghton, W.J. Chrispin, „Future Advanced Aero-Engines - the Materials Challenge“, Proceedings AGARD CP-449 der Konferenz „Application of Advanced Material for Turbomachinery and Rocket Propulsion“, Seite 4-1 bis 4-10.
- 15.2-22** G. Polek, „Engine woes cast pall over first flight of A318“, Zeitschrift „Aviation International News“, February 2002, Seite 57.
- 15.2-23** S.W. Kandebo, „Upcoming Blade Tests Aimed at Growth GE90“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, May 31, 1999, Seite 40.
- 15.2-24** J.R. Schaff, „Fatigue and Life Prediction“, ASM Handbook, Volume 21, composites, Seite 252-258.
- 15.2-25** A. Rossmann, „Schadenuntersuchung und Schadenverhütung an Bauteilen der Ingenieurkeramik“, Buchreihe Kontakt & Studium, Expert Verlag, Band 308, H. Grosch, „Schadenskunde im Maschinenbau“, ISBN 3-8169-1202-8, 1990s, Seite 76-96.
- 15.2-26** W.H. Rentzsch, G. Willmann, „Ein einfaches Hilfsmittel zum Konstruieren mit Keramik“, Zeitschrift „Materialwissenschaft u. Werkstofftechnik“, 33, 2002, Seite 184-189.
- 15.2-27** „GE 90 Program Summary“, Vortrag an der TU-München, Seminar des Instituts für Flugantriebe, November 1995.

- 15.2-28** W. Hansen, G.F. Kaminske, „Praxishandbuch , Techniken des Qualitätsmanagements“ , Symposion Verlag, ISBN 3-933814-53-7, 2001, Seite 236-240.
- 15.2-29** M. Phelan, „NASA’s coating promises efficiency breakthrough“ , Zeitschrift „Flight International“, 11-17 March 2003, Seite 30.
- 15.2-30** M.A. Taverna, „Ariane 5 EC-A Upgrade Faces Long, Costly Flight Delay“ , Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, January 13, 2003, 402-403.
- 15.2-31** D.R. Bush, „Designing Ceramic Components for Structural Applications“ , Zeitschrift „Journal of Materials Engineering and Performance“ , Volume 2 (6), December 1993, Seite 851-862.
- 15.2-32** S. Steinke, „Flügelverstärkung nach Strukturproblemen, noch kein neuer Zeitplan für 787“ , Zeitschrift „Flug Revue“ , September 2009, Seite 32.
- 15.2-33** Axel Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“ , Band 1, 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 5.2.1.3, Bild 5.2.2.1-1, Bild 5.2.2.2-7, Bild 5.2.2.3-5.
- 15.2-34** Axel Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“ , Band 2, 2001, ISBN 3-00-008429-0, Bild 6.1-15.1, Bild 8.1-13, Bild 8.2-18,
- 15.2-35** Axel Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“ , Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Bild 11.2.3-10 und Bild 12.1-5.