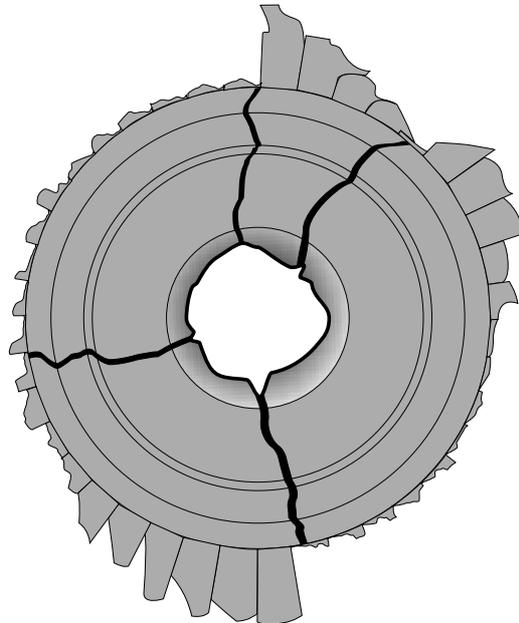


8. Gehäusebelastung durch Rotorbruchstücke

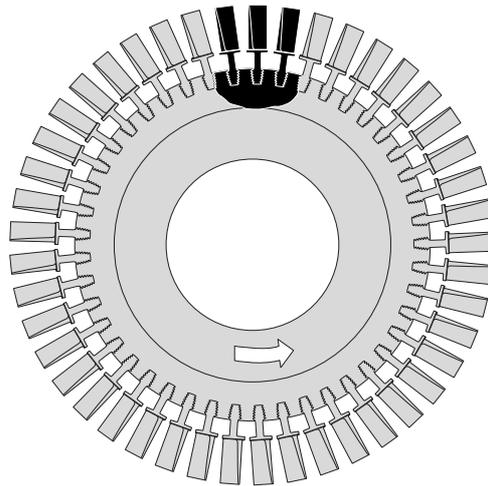
8.1 Grundlagen und Schäden bei der Entstehung von Rotorbruchstücken

8.2 Empfehlungen zur Schadensverhütung bei Rotorbruchstücken



Der **Bruch von Rotorbauteilen**, wie Scheiben und Schaufeln, lässt sich erfahrungsgemäß nicht vollständig ausschließen. Schaufelbruchstücke müssen im Triebwerk gehalten werden (contained). Dabei kommt den Gehäusen die entscheidende Rolle zu. Man spricht von einem **Containment**, das **für Schaufelbruchstücke** konstruktiv zu gewährleisten ist. Ein **Containment für Scheibenbruchstücke** ist wegen Masse und Energieinhalt mit den Gewichtsforderungen an Flugtriebwerke **nicht realisierbar**. **Bruchstücke von Rotorscheiben** (Bild 8.1-1.2, Bild 8.1-3 und Bild 8.1-4) bedeuten deshalb eine **unmittelbare Gefahr für die Sicherheit des Flugzeugs** („Hazard“, Bild 8.1-1.1). Aus diesem Grund muss die Häufigkeit von Scheibenbrüchen deutlich niedriger als die von Schaufelbrüchen gehalten werden. Wird z.B. eine Fehlstelle, die eine potentielle Gefahr für den Bruch einer Scheibe darstellt, gefunden, führt dies zu umfangreicheren Sofortmaßnahmen als bei Schaufeln.

8.1 Grundlagen und Schäden bei der Entstehung von Rotorbruchstücken



Bruchstücke:

Es gibt eine Vielzahl von Ursachen für den Bruch von Rotorbauteilen. Am Ende dieses Kapitels sind einige ausgewählte Beispiele mit unterschiedlichen Schadensursachen und Folgeschäden dargestellt. Einige Primärschäden gingen durch Festigkeitsmängel vom gebrochenen Rotorbauteil selbst aus (Band 1). Typische Primärschäden anderer Bauteile, die Rotorbrüche auslösen, sind Wellenbrüche (Überdrehzahl) und Dichtungsversagen (Überhitzung).

Ursachen für Scheiben- und Schaufelbrüche (Kein Anspruch auf Vollständigkeit, Reihenfolge bedeutet keine Wertung und zeigt nicht die Häufigkeit an):

- **Überlastung:** Extreme Überdrehzahlen, die zum spontanen Versagen einer Rotorscheibe führen (bei Turbinen wegen Gefahr des Durchgehens) müssen über den, der Auslegung zu Grunde gelegten sicheren Überdrehzahlen (ca. 30% über der 100% -Drehzahl) liegen. Dann wird mit einem Drehzahlabfall (Regler, Schaufelschaden) gerechnet, bevor mit einem Scheibenbruch oder mit einer Ausschauflung zu rechnen ist. Bei Verdichterrotoren ist die Gefahr eines Durchgehens bei einem Wellenbruch nicht gegeben. Ein weitgehender Verlust der Beschauflung des Fan könnte jedoch auch die Fanscheibe und gegebenenfalls den Booster auf hohe Überdrehzahlen bringen. In den meisten Fällen eines Fanschadens werden Folgeschäden am Verdichter die Antriebsleistung der Turbine sofort abfallen lassen.

Typische Ursachen für Überdrehzahlen von Rotoren sind:

- Versagen des Reglers führt zu gefährlich hoher Kraftstoffzufuhr
- Ansaugen von Kraftstoff über den Verdichter (z.B. aus offenem Tankstutzen, frei werdende Kraftstoffreste bei der Betankung)
- ungenügende Drainage der Brennkammer bei Startabbruch
- Trennung der Rotorwelle durch Bruch oder Versagen einer Verbindung (Flansch, Spannbolzen)

• **Ermüdungsbrüche durch zyklische Beanspruchung** im LCF (in erster Linie Start/Abstell -Zyklen) und/oder HCF-Bereich (z.B. durch hochfrequente Schwingungen). Ursache können ungewöhnlich hohe Betriebsbeanspruchungen und/oder Fehlstellen in den Bauteilen sein. Zu den LCF-Schäden gehören auch Brüche durch **Thermoermüdung** (Thermo Mechanical Fatigue = TMF), wie sie als „Kranzrisse“ bei integralen Turbinenrädern typisch sind (Bild 8.1- 1.2). Die Berstsicherheit von Rotorkomponenten hängt entscheidend von einem ausreichend betriebsnahen Lebensdauernachweis und einer zuverlässigen Technik und Logistik der Lebensdauerüberwachung ab.

• **Überhitzung:** Rotorscheiben können auf unterschiedliche Weise gefährlich hohe Betriebstemperaturen erfahren:

- Kühlluftmangel
- Heißgaseinbruch durch versagende Dichtungen im Kranzbereich von Turbinenscheiben
- Ölfeuer nach einem Lager- oder Dichtungsschaden oder dem Versagen einer Ölleitung
- bei einem Strömungsabriss im Verdichter (mangelnde Kühlluft und/oder hohes Kraftstoffangebot)
- Anstreifvorgänge (z.B. im Bereich von Dichtungen)
- Titanfeuer
- Fehlfunktion der Brennkammer und/oder des Kraftstoff-Einspritzsystems
- Reglerversagen

• **Querschnittsschwächung** durch Anstreifvorgänge (z.B. im Bereich von Dichtungen)

• **Ungenügende Festigkeit:** Typische Schadensursachen sind

- Fehler der Halbzeugherstellung: z.B. Schmiedefehler, Gussfehler,
- Fehler der Bearbeitung: z.B. Kommarisse, Schleifrisse, Kerben
- Fehler aus Fügeverfahren: z.B. Schweißrisse, Bindefehler
- Beschichtungsfehler: z.B. Anrisse in Beschichtungen, Versprödungen
- Handlingschäden: z.B.: Kerben, Kratzer

• **Gewalteinwirkung:**

- Beschädigung von Scheiben durch abgebrochene Schrauben von Flanschverbindungen
- Wellenbruch nach Unwuchten durch Vogelschlag

Art der Bruchstücke:

Rotoren werden durch die Betriebsbeanspruchungen in typischen Bauteilzonen auf spezifische Weise belastet. Dabei handelt es sich bei Rissbildung in erster Linie um dynamische Lasten (LCF und HCF), die auf Fliehkraftänderungen, hochfrequenten Schwingungen und Temperaturgradienten beruhen. Bruchstücke von Rotorkomponenten lassen sich in folgende Gruppen einteilen (Bild 8.1-1.2):

- **Bruchstücke einzelner Schaufeln:** Solche Bruchstücke entstehen z.B. durch Schwingbrüche im Blatt oder im Fußbereich (z.B. an den Auflageflächen), durch Abschleudern bei Überdrehzahlen und/oder bei Versagen der Fußbefestigung z.B. infolge einer Überhitzung des Kranzbereichs der Scheibe. Von Vogelschlag oder Eisschlag ausgelöster Schaufelbruch.

- **Mehrere Schaufeln:** Schaufelblätter bei einer Überhitzung der Turbine. Folgeschäden nach einem Fremdkörperschaden oder einem Schaufelbruch. Abschleudern eines Schaufelpaares bei Konfigurationen, wo zwei Schaufeln einen Tannenbaumfuß bilden.

- **Bruch der gesamten Beschauelung (Haircut)** nach einer extremen Überhitzung, hoher Überdrehzahl oder einem Haircut als Folgeschaden (z.B. eines Fremdkörperschadens oder dem Bruch einer einzelnen Schaufel).

- **Mehrere Schaufeln mit zugehörigem Teil des Scheibenkranzes:** Von Kranzrissen ausgehender Bruch in integralen Turbinenrädern. Scheibenbruch durch Schwingungen, Werkstofffehler oder Überdrehzahl.

- **Scheibensektoren:** infolge LCF- oder HCF-Rissbildung, Überdrehzahl, Werkstofffehler, Anstreifvorgänge, Überhitzung. Im Extremfall entstehen zwei Scheibenhälften. Die größte Durchschlagswirkung ist von 1/3-Scheibensektoren zu erwarten (Bild 8.1-4).

- **Gesamte Rotorscheibe:** z.B. nach einem Wellenbruch, dem Bruch einer Flanschverbindung oder eines zentralen Spannbolzens (bei kleinen Maschinen). Dabei entsteht erst dann eine gefährlich hohe Gehäusebelastung, wenn die Scheibe bereits eine große Unwucht aufweist oder infolge einseitiger Abbremsung eine merkliche translatorische Bewegungskomponente erhält („Herausschleusen“).

Durchschlagsgefährlichkeit von Rotorbruchstücken:

Triebwerke sollen vorschriftsgemäß so ausgelegt sein, dass Schaufelbruchstücke nicht aus dem Gehäuse austreten und das Triebwerk keinen unbeherrschbaren Schaden als Folge eines Schaufelbruchs erleidet (z.B. Überlastung durch Unwuchten oder Zerstörung der Aufhängung durch Momente aus einer Abbremsung des Rotors). Diese Eigenschaft ist im Rahmen der Zulassung des Triebwerkstyps in einem sog. Containmentversuch nachzuweisen (siehe Kapitel 8.2).

In erster Näherung nimmt die durchschlagbare Gehäusewandstärke mit der Masse eines Rotorbruchstücks, entsprechend dessen kinetischer Energie, linear zu. Der Containmentnachweis konzentriert sich bei Fantriebwerken auf den Bruch einer Fanschaufel, weil so die größten Gehäusebelastungen auftreten (dünnwandige Gehäuse, schwere Schaufelbruchstücke).

Der Bruch von Rotorscheiben kann gewöhnlich von den Gehäusen nicht aufgefangen werden. Entsprechend massive Gehäuse würden das Leistungsgewicht der Triebwerke zu sehr verschlechtern. Für Rotorbruchstücke besteht keine Containmentforderung. Aus diesem Grund muss die Häufigkeit des Entstehens solcher Bruchstücke deutlich niedriger liegen als diejenige von Schaufelbrüchen.

Bei Schaufelbruchstücken kann ein Bruch der gesamten Beschaukelung einer Stufe („Haircut“) und ein Schaufelstau oder ein Abschleudern von Schaufeln bei hohen Überdrehzahlen (z.B. in der Turbine nach einem Wellenbruch) zu gefährlich hohen Gehäusebelastungen mit Bruchstückaustritt führen.

Bruchstückform:

Die Bruchstückform hat Einfluss auf das Durchdringungsvermögen. Dünne Bruchstücke aus hochfesten Stählen zeigen einen „**Schneideffekt**“, wenn sie mit der Schmalseite auftreffen. Dieser Effekt kann durch die Gefährlichkeit von Leichtbaurotoren steigern, obwohl die Bruchstückmasse relativ klein ist. Ein Beispiel sind gefügte hohle Radialverdichterräder in Blechbauweise mit einer dünnwandigen rückwärtigen Scheibe.

Schussversuche haben wider Erwarten gezeigt, dass bei einem duktilen Gehäusewerkstoff Bruchstücke mit **sphärischer oder abgeschrägter** (angefaster) Auftrefffläche ein höheres Durchdringungsvermögen aufweisen als **spitze** Projektile. Eine Erklärung für dieses Verhalten gibt die durchschlagene Gehäusewand. Bei sphärischen Aufprallflächen und **zähen (duktilen) Gehäusewerkstoffen** entsteht in erster Linie ein Loch durch **Scherung ohne große plastische Verformungszonen** um den Einschlag. Die von spitzen Projektilen durchschlagene Wand ist in einem größeren Bereich plastisch verformt, d.h. dem Projektil wird relativ viel kinetische Energie entzogen (Lit 8.1-7). Dünne, zähe Zielplatten können eine mehrfach größere Verformungsenergie als Stanzenergie aufweisen (Lit 8.1-7). So werden spitze Projektile besser als stumpfe aufgehalten. Bei **spröden Gehäusewerkstoffen** ist ein umgekehrtes Verhalten zu beobachten. Hier weisen spitze Projektile ein besseres Durchdringungsvermögen auf.

Bruchstückwerkstoff:

Besonders gefährlich sind Bruchstücke aus schlagzähen, hochfesten Werkstoffen mit hoher Dichte. Relativ gut beherrschbar sind dagegen Bruchstücke aus Werkstoffen, die beim Auftreffen zersplittern (zerfasern, pulverisieren), somit die Energieeinwirkung auf eine größere Fläche verteilen und kinetische Energie aufzehren. Hierzu gehören Faserwerkstoffe und Keramiken. Die zu erwartenden relativ geringen Folgeschäden sind u.a. ein Argument für den Einsatz von Faserwerkstoffen in Verdichtern.

Bruchstückgeschwindigkeit:

Die Auftreffgeschwindigkeit des Bruchstücks bestimmt die Verformungsgeschwindigkeit der Gehäusewand und damit die Hochgeschwindigkeitsversprödung (Bild 8.1-13). Zusätzlich wird mit steigender Geschwindigkeit und damit wachsender kinetischer Energie der „**Schereffekt**“ (geringer Energieaustausch entspricht einem Stanzvorgang) bei der Gehäusedurchdringung immer größer. Eine **Kenngröße für die Durchschlagsfestigkeit** eines Gehäusewerkstoffes bei hohen Auftreffgeschwindigkeiten ist deshalb die **Stanzarbeit**, die durch einen Stanzversuch ermittelt werden kann.

Die Tragfähigkeit und Steifigkeit der Gehäusewand ist bei dem Versuch von besonderer Bedeutung. Je niedriger die Auftreffgeschwindigkeit, um so mehr nehmen plastische Verformungen in den zum Aufschlagort benachbarten Zonen zu. Je höher die Geschwindigkeit des Bruchstücks, um so geringer ist die Energieabgabe beim Durchschlag der Gehäusewand. Dies hat mehrere Gründe:

- Zunahme des Schereffekts (Stanzen)
- Größere Massenkräfte der Gehäusewand, d.h. die Gehäusewand wirkt steifer
- Versprödung des Gehäusewerkstoffes bei hoher Verformungsgeschwindigkeit

Versuche haben gezeigt, dass mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit die durchschlagene Gehäusewandstärke der kinetischen Energie des Bruchstücks proportional ist. Damit steigt umgekehrt die „erforderliche“ Durchschlagsgeschwindigkeit mit der Quadratwurzel aus der Wanddicke.

Verhalten der Bruchstücke nach dem Durchschlagen der Gehäusewand:

Es hat sich gezeigt, dass Rotorbruchstücke beim Durchschlagen der Gehäusewand unter einem Winkel bis $\pm 30^\circ$ zur Rotorebene abgelenkt werden können. Dabei fällt die verbleibende kinetische Energie bei Ablenkwinkeln über 5° schnell ab.

Der Ablenkwinkel nach dem Austritt aus dem Gehäuse ist stark von der Bruchstückmasse abhängig. Ab einer bestimmten Bruchstückmasse tritt, abhängig von der Gehäusekonfiguration, keine merkliche Ablenkung auf (Bild 8.1-3).

Einfluss des Gehäusewerkstoffes auf das Durchschlagsverhalten (Lit 8.1-19):

Härte allein ist kein ausreichendes Kriterium für das Durchschlagsverhalten eines Gehäusewerkstoffes. Es kommt vielmehr auf ein optimales Verhältnis von **Festigkeit und plastischem Verformungsvermögen** während des Belastungsvorganges an. Werkstoffe, die eine ausgeprägte Hochgeschwindigkeitsversprödung zeigen (z.B. niedrig legierte Baustähle), sind wegen ihrer geringeren

Energieaufnahme beim Einschlag als Containmentwerkstoff weniger geeignet (Bild 8.1-13). So kann z.B. mit Hilfe besonderer Wärmebehandlungen bei Vergütungsstählen die Durchdringungsfestigkeit deutlich verbessert werden.

Einen besonders hohen Durchschlagswiderstand weisen nach Lit. 8.1-7 die Co-Legierung „HS 25“ (Bild 8.1-13 und 8.1-14) und die Ni-Legierung „Waspaloy“ auf, obwohl Waspalloy zur interkristallinen Rissbildung neigt. Beurteilt man jedoch die Durchdringungsfestigkeit von Gehäusewänden gleicher Masse, so haben Al-, Mg- und Ti-Legierungen deutliche Vorteile (Bild 8.1-14). Diese Werkstoffe zeichnen sich durch ein besonders günstiges Verhalten während des Durchdringungsvorganges aus, wobei relativ viel kinetische Energie des Bruchstücks verbraucht wird. Es ist bekannt, dass sich gewöhnlich Bruchfestigkeit und Fließgrenze metallischer Werkstoffe mit steigender Belastungsgeschwindigkeit erhöhen (Bild 8.1-13). Die plastische Verformbarkeit nimmt dabei in der Regel ab, d.h. der Werkstoff zeigt ein sprödes Verhalten (Bild 8.1-13). Niedrig legierte Stähle, wie Baustähle, haben diesen Versprödungseffekt ausgeprägter als austenitische Stähle, Nickellegierungen, Co-Legierungen und Leichtmetalle. Mit dem Versprödungseffekt kann sich die Bruchart ändern. So erfolgt z.B. bei einer bestimmten Verformungsgeschwindigkeit ein Übergang von einer Bruchfläche mit zähen Merkmalen zu einer typischen Spröbruchfläche. Leider lässt sich dieses Verhalten bisher nicht immer in der Praxis mit den Beobachtungen an Fremdkörpereinschlägen befriedigend in Einklang bringen. Dies weist darauf hin, dass Bauteilform und Steifigkeit am Einschlagsort berücksichtigt werden müssen.

Oberflächenhärtung (Nitrieren) hat sich bei steilem Auftreffwinkel eher als negativ (versprödend) erwiesen. Bei flachem Auftreffwinkel sind jedoch Vorteile denkbar. Die Temperatur der Gehäuseteile wirkt sich mit Änderungen in Festigkeits- und Zähigkeitsverhalten auf den Durchdringungswiderstand aus (Bild 8.1-14).

Einfluss der Gehäusekonstruktion:

Die **aufsummierten Durchschlagsenergien** für die einzelnen, in der Bruchstückbahn liegenden Gehäusewände ergeben den Gesamtdurchschlagswiderstand. Dabei sind mehrere Gehäusewände widerstandsfähiger als eine Gehäusewand mit der gleichen Gesamtwandstärke. Es kann also davon ausgegangen werden, dass Triebwerkskonstruktionen mit mehreren konzentrisch um den Rotor angeordneten Wänden ein günstiges Containmentverhalten zeigen. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass mit dem radialen Abstand der Aufschlagwinkel steiler wird (Bild 8.2-4). Damit ist die Durchschlagswirkung des Bruchstücks größer als bei einem flachen Auftreffen („Streifschuss“). Solche Bedingungen sind z.B. bei Umkehrbrennkammern für den Turbinenrotor gegeben. Auch an Fantriebwerken wurde schon beobachtet, dass Schaufelbruchstücke, die aus dem Kerntriebwerk austraten und damit einen großen Teil ihrer kinetischen Energie verloren hatten, vom Bypassmantel aufgefangen wurden. Über besondere Containment- Konstruktionen wird in Kapitel 8.2 berichtet.

Steife und schwere Gehäusewände sind von ihrem Durchschlagswiderstand her nicht optimal, weil sie eher zur Ausbildung eines „**Schermodus**“ beim Durchschlag neigen und so weniger Energie aufnehmen können als **mehrere dünne Gehäusewände, die unter plastischer Verformung nachgeben** können.

Risikobaum für Rotorbruch

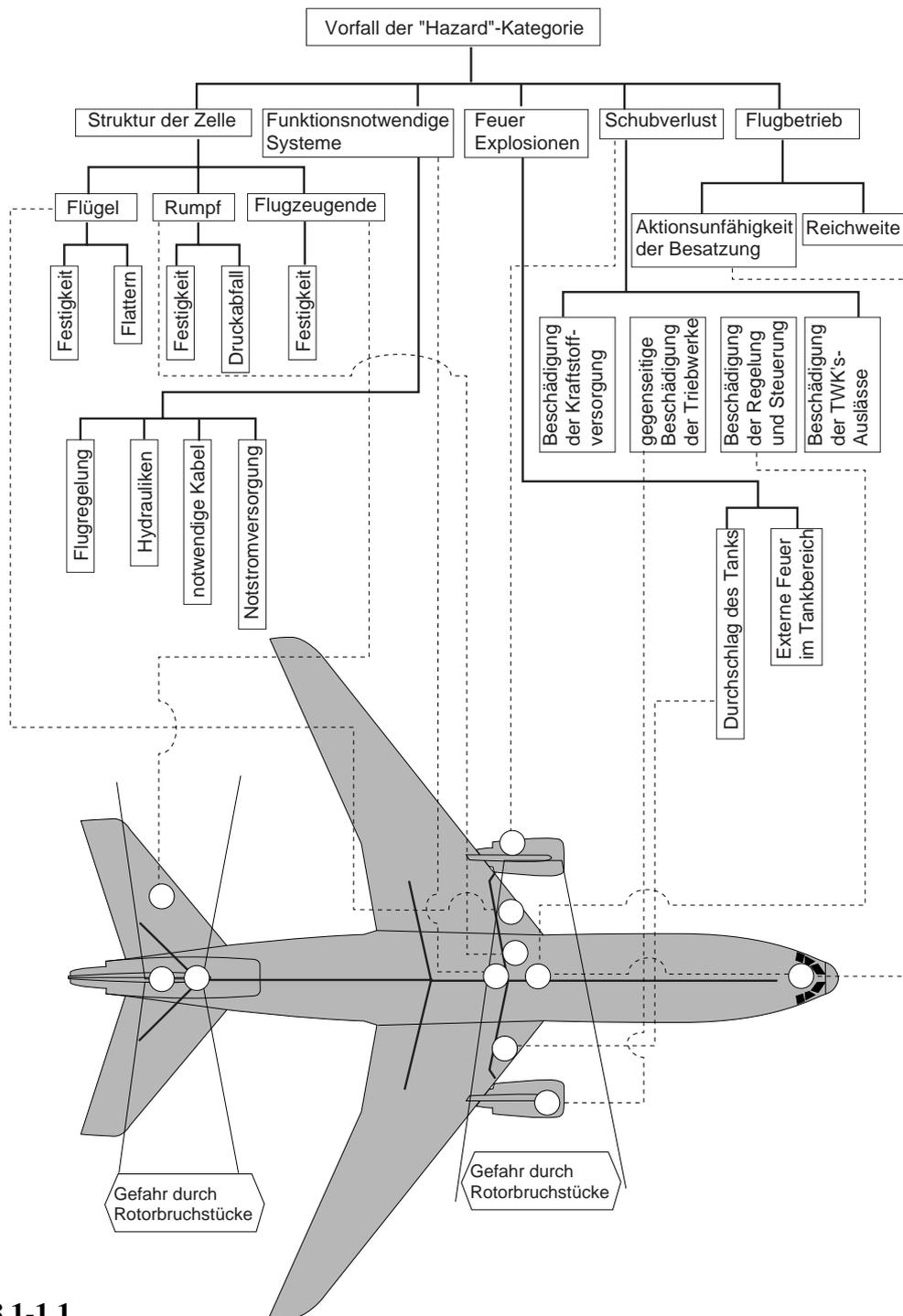


Bild 8.1-1.1

Bild 8.1-1.1 (Lit 8.1-1): Diese Darstellung gilt für **technische Risiken und Schadensabläufe**. Natürlich können Personenschäden durch direkte Bruchstückeinwirkung eintreten. Werden Rotorbruchstücke (Bild 8.1-2) nicht im Triebwerk gehalten, sind sehr unterschiedliche Bereiche und Komponenten des Flugzeugs potentiell gefährdet („Hazard“). Im ungünstigsten Fall besteht Absturzgefahr.

Wird die **Struktur** des Flugzeugs durch Beschädigung tragender Querschnitte geschwächt, besteht auch bei normalen Betriebslasten die Gefahr des Versagens der Teile. Darüber hinaus können auf Grund des Steifigkeitsabfalls selbsterregende Schwingungen von Luftkräften („Flattern“) angefacht werden. Dies führt zur **dynamischen Überlastung** der geschwächten Struktur mit unmittelbarer Bruchgefahr. Wird die Druckkabine durchschlagen, ist mit gefährlichem Druckabfall zu rechnen (im Extremfall wurden Passagiere aus der Kabine gerissen). Für den sicheren Flugbetrieb **notwendige Systeme**, wie Flugregelung, Hydraulik (z.B. zur Verstellung der Klappen) und Kabel, können in ihrer Funktion beeinträchtigt, leck geschlagen oder unterbrochen werden. Fällt die Notstromversorgung aus, besteht Absturzgefahr. Wird der **Tank durchschlagen** oder wirken externe Feuer auf den Tank ein, ist mit Kraftstoffverlust und /oder Bränden zu rechnen.

Die Beschädigung der **Kraftstoffzufuhr** führt zum **Schubverlust**. Dies ist dann besonders bedrohlich, wenn davon alle Triebwerke betroffen sind oder deren Schaden in der kritischen Startphase auftritt.

Bruchstücke aus einem Triebwerk können auch andere Triebwerke direkt beschädigen (Bild 8.2-3.2). Bei **zweimotorigen Kampfflugzeugen**, deren Triebwerke im Rumpf parallel dicht nebeneinander liegen, ist diese Gefahr verständlicherweise besonders groß. Ein besonderes Risiko liegt vor, wenn die Triebwerke über ein gemeinsames **Getriebe zu Hilfsaggregaten** verbunden sind.

Es traten aber auch Fälle bei Verkehrsflugzeu-

gen auf, in denen mehrere Triebwerke durch Bruchstücke ausfielen. So wurde z.B. das **zweite Triebwerk** am anderen Flügel von Bruchstücken **getroffen**, die von der Startbahn abprallten (Bild 8.1-19).

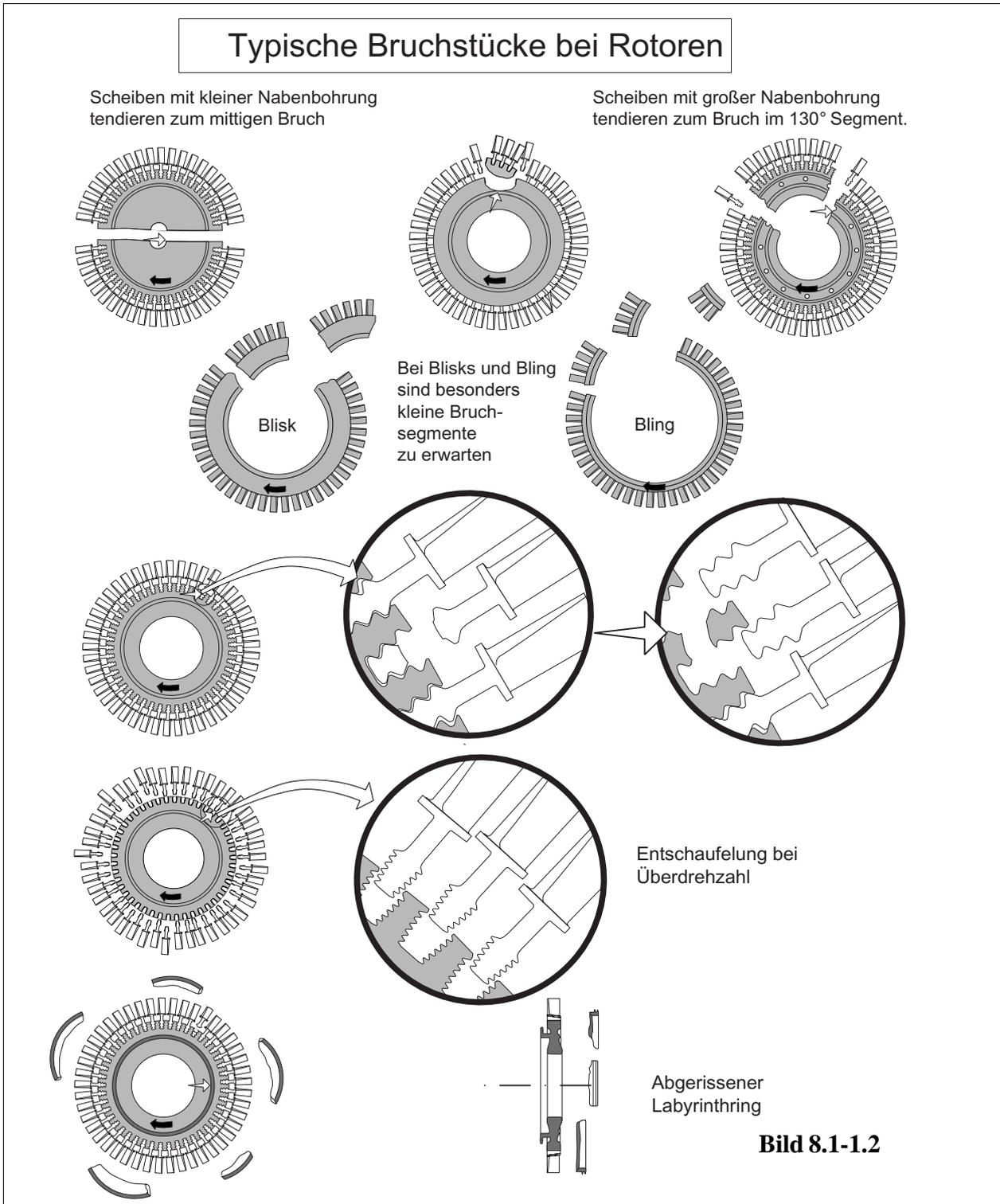
Tritt eine Schädigung wichtiger Systeme für den Triebwerksbetrieb ein, ist auch mit einem Schubverlust der nicht unmittelbar betroffenen Triebwerke zu rechnen.

Auch eine Beschädigung des **Triebwerksauslasses** kann den Schub vermindern und/oder Heißgas ablenken.

Der weitere Flugbetrieb ist dann in Gefahr, wenn die **Aktionsfähigkeit der Besatzung** wegen Unterbrechung von Steuersystemen oder Brand nicht mehr gegeben ist oder der Kraftstoffvorrat nicht mehr ausreicht.

Bild 8.1-1.2 (Lit 8.1-2 und 8.1-4): Gewöhnlich befindet sich die durch LCF (Start/Abstellzyklen) am höchsten beanspruchte Scheibenzone an der **Nabenbohrung** (Skizze oben links). Diese Beanspruchung ergibt sich aus einer Überlagerung von Spannungen aus Fliehkraft- und Temperaturgradienten. Andere anrissgefährdete Scheibenbereiche entstehen durch geometrische Besonderheiten, wie Steifigkeitsprünge an Wellenansätzen oder in Axialbohrungen der Wellenverbindung (Skizze oben rechts; Beispiel 8.1-1.1). Im **Nabenbereich** führt ein Anriss zu beschleunigtem Rissfortschritt und auf Grund des hohen Spannungsniveaus und niedrigen Gradienten bereits bei kleinen kritischen Risslängen zum Scheibenbruch in zwei Hälften.

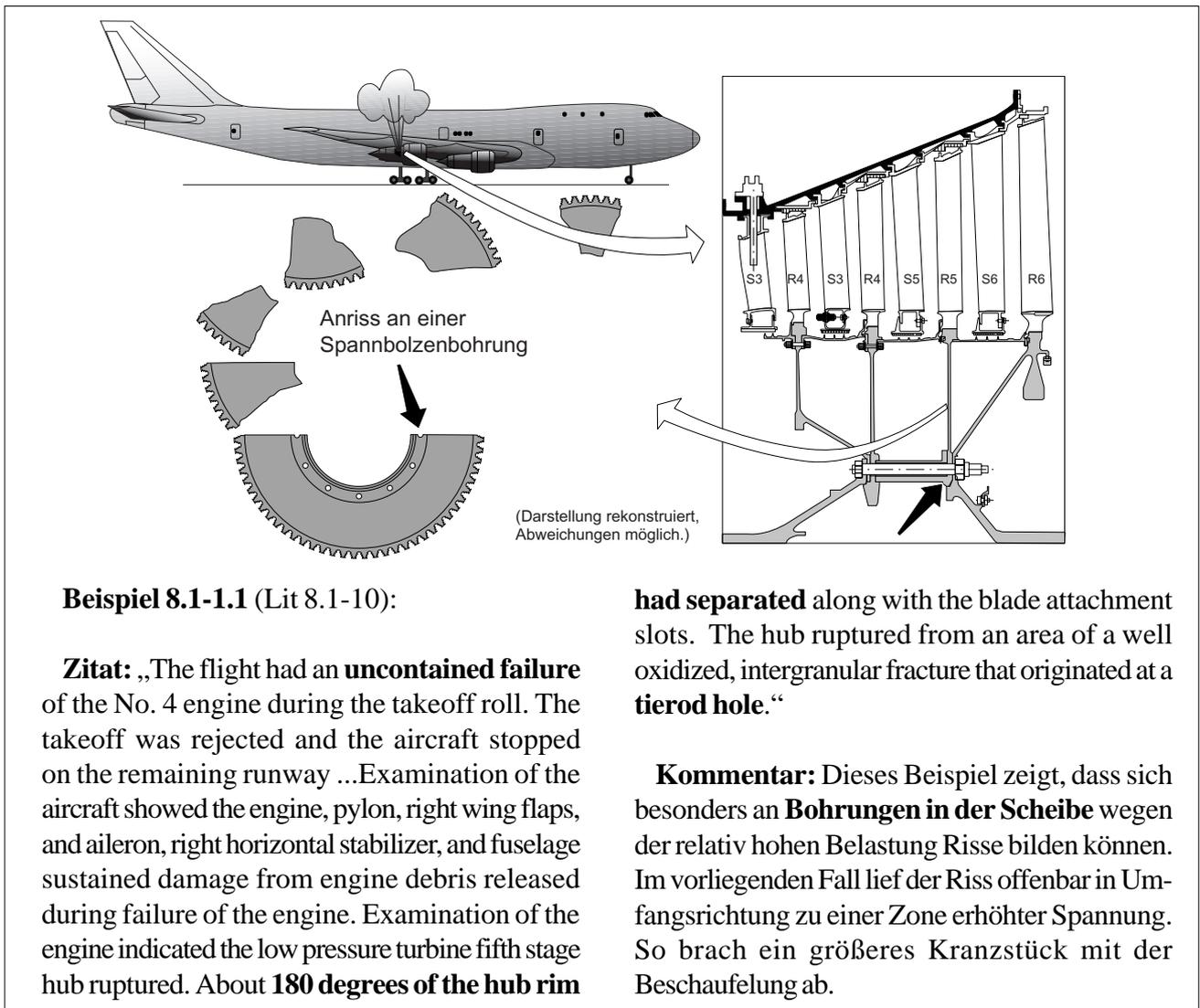
Scheiben mit kleinen Nabenbohrungen bilden sehr biegesteife Bruchstücke und tendieren so zum **mittigen Bruch** mit zwei symmetrischen Scheibenhälften. Scheiben mit großer Nabenbohrung erfahren nach dem radialen Aufreißen eine hohe Biegebeanspruchung. Die Spannung steigt mit dem Abstand vom Primär-riss an, bis es nach ca. 130 ° zum Bruch kommt. **Kranzbrüche** (Skizze oben rechts) stehen gewöhnlich im Zusammenhang mit hohen ther-



mischen Spannungen oder/und Überhitzungen des Kranzbereichs. Kranzbrüche können aber auch von Scheibenschwingungen ausgelöst werden, insbesondere wenn ein hohes Mittelspannungsniveau vorliegt. Im Extremfall kommt es zur Ablösung der gesamten Kranz-

partie. Eine Umfangszone mit hohem Spannungsniveau (z.B. am Übergang eines Wellenansatzes) kann einen Riss in diese Zone ablenken.

Die Fußbefestigung von Turbinenrotorschaukeln hat üblicherweise Tannenbaum-



form. Ein Fußbruch liegt meist im radial äußersten Zahn (zweite Skizzenreihe). Bei Containmentnachweisen ist zu berücksichtigen, dass bei einem Fußbruch das Bruchstückgewicht deutlich höher als bei einem Blattbruch ist.

Turbinenrotoren können im Gegensatz zum Verdichter beim **Bruch der Rotorwelle** „durchgehen“ und nicht beherrschbare Überdrehzahlen erreichen. Deshalb spielt das Versagensverhalten des Turbinenrotors bei Überdrehzahl eine wichtige Rolle für die zu erwartenden Folgeschäden (siehe Beispiele in Band 1).

Um ein Bersten der auf **Überdrehzahl** gekommenen Turbinenscheibe zu verhindern, kann das frühzeitige Ausschaukeln genutzt werden.

So wird das Schadensrisiko begrenzt. Hier zeigt sich eine besondere Eigenschaft von **Schaukeln mit „feiner Verzahnung“** (dritte Skizzenreihe), wie man sie besonders bei älteren Triebwerkstypen OEM-spezifisch findet. Kleinere Zähne kommen infolge einer Aufweitung der Scheibe vor dem Bruch außer Eingriff. Die Schaukeln werden abgeschleudert und die Drehzahl der Turbine sinkt, zumindest bei einer einstufigen Turbine, spontan ab.

Funktionsbedingt können durch einen Anstreifvorgang an **Labyrinthstegen** Anrisse entstehen, die zum Bruch des Rings führen (Skizzen unten). Solche Bruchstücke weisen eine vergleichsweise geringe Bewegungsenergie auf und lassen sich mit dem darüber liegenden statischen Labyrinthring abbremsen.

Bild 8.1-2: Die Obere Skizzenreihe zeigt **typische Bruchstellen von Fanschaufeln** älterer Triebwerkstypen. Die Blätter dieser Schaufeln haben eine relativ kurze Sehnenlänge und werden durch Nasen (Clapper) abgestützt. Diese Nasen versteifen den Schaufelkranz örtlich beträchtlich, so dass bei Vogelschlag im **Blattspitzenbereich** ein Schaufelblattbruch oberhalb des **Clappers** mit einem kleinen Bruchstück zu erwarten ist. Die typischen Lagen von Brüchen durch Schwingerermüdung liegen im Bereich des Clappers und im Auflagebereich des **Schwalbenschwanzfußes** (Flatterschwingungen). Durch die abstützende und dämpfende Wirkung des Clappers sind Blattbrüche im Übergang zur Fußplattform nicht typisch.

Für alle Fanrotorschaukeln gilt, dass die hohen axialen Luftkräfte auf die Beschaukelung bei einem Versagen der Fixierung (Beispiel 8.1-1.2) zum Herausrutschen mehrerer Schaufeln aus der Scheibe führen. Diese Schaufeln können dann auch nach vorne aus dem Containmentbereich heraustreten, womit die Gefahr großer Schäden für benachbarte Flugzeugbereiche besteht.

Die mittleren Skizzen zeigen die häufigsten Bruchbereiche von Verdichterschaukeln mit großen Sehnenlängen (**Wide Chord Schaufeln**). Wegen der fehlenden Clapper können Blattbiegeschwingungen, welche den Übergang zur Fußplattform gefährden, leichter auftreten. Die unteren Skizzen stellen Fanschaufeln moderner großer Triebwerke dar. Diese Schaufeln werden entweder in Hohlbauweise aus einer Titanlegierung durch Fügen hergestellt oder sie bestehen aus mit Kohlefaser verstärktem Kunstharz (CFK). Diese Schaufeln werden ohne Fußplattform ausgeführt. Die Nabenkontur wird durch Zwischensegmente gebildet. Bei großer Verbiegung der Schaufelblätter (z.B. bei einem **Vogelschlag**) liegen diese an den Zwischensegmenten an. Sind die Segmente steif, kann es dann zu einer erhöhten Belastung der Blätter und zum Bruch in dieser Zone kommen. Hohle Titanstrukturen oder Kunststoffbruchstücke lassen auf Grund ihres nied-

rigen Gewichts und/oder besonderen Versagenscharakteristik eine günstigere Gehäusebelastung erwarten.

Für **Schaufeln aus CFK** dürfte für Containmentnachweise die typische Bruchzone an der Nabenkontur gelten. Dies führt zu niedrigeren Bruchstückgewichten. Zum anderen muss aber berücksichtigt werden, dass die restliche Beschaukelung durch einen Blattbruch nicht auch überlastet wird und es zu einem unbeherrschbaren multi-blade-Fehler kommt. Dies erfordert eine besondere Abstimmung und Gestaltung von Gehäuse und Containment.

Die Einführung integral beschaukelter Fanscheiben (**Blisk**=bladed disk) schließt die besondere Gefahr von Fußbrüchen an den Schwalbenschwanzauflagen aus. Es ist jedoch mit einem erhöhten Schwingbruchrisiko am Blattübergang zur Scheibe zu rechnen. Der Vorteil dieser Konfiguration ist, dass das Containment nur für den Blattbruch und nicht wie bei den anderen Versionen für den Fußbruch mit einem entsprechend schweren Bruchstück

Beispiel 8.1-1.2 (Bild 8.1-15.2, Lit 8.1-2):

Zitat: „...Two No. 3 engine blades hit and stuck into the upper right side of the fuselage but did not penetrate completely into the passenger cabin.

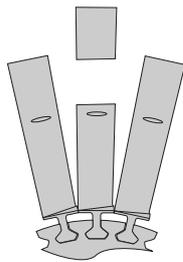
...Damage to the engine was reported as:

- Spinner cone, inlet cowl from the No. 3 engine are missing along with a 180-deg. segment of fan stator case and compressor discharge pressure rig.
- First stage fan disk remained intact **with only five of the 38 blades still in place**. All blades had been dislodged from the second fan stage disk....“

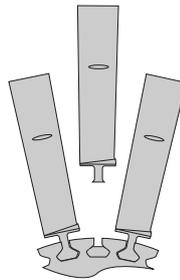
Kommentar: Bei diesem Typ eines großen Fantriebwerks mit hohem Bypassverhältnis werden die Rotorschaukeln des Fan von dem verschraubten rotierenden Nasenkonus (Spinner) axial fixiert. Das Versagen der Verschraubung führte dazu, dass die **Schaufeln axial nach vorne aus der Scheibe wanderten** und abgeschleudert wurden.

Typische Bruchstücke von Fanrotorschaukeln

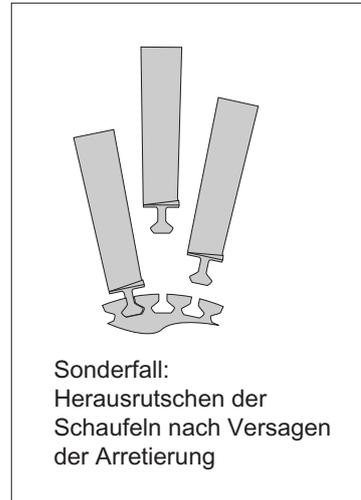
Fan-Schaukeln mit Clappern



Blattbruch oberhalb des Clappers

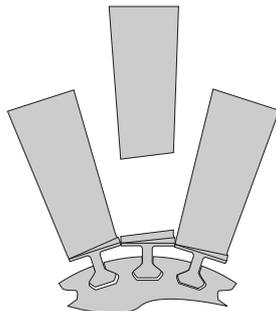


Blattfußbruch

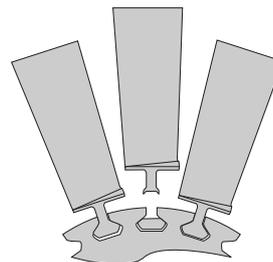


Sonderfall:
Herausrutschen der
Schaufeln nach Versagen
der Arretierung

Wide Chord Fanschaukeln mit Fußplattform

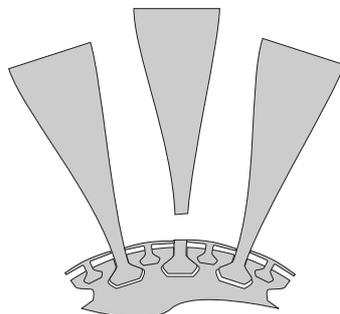


Blattbruch in der Nähe der Fußplattform



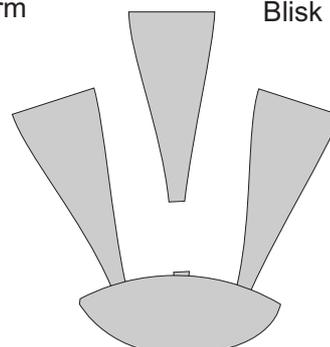
Blattfußbruch

Wide Chord Fanschaukeln ohne Fußplattform



Bruch an der Anlage des Zwischensegments

Blisk



Bruch am Scheibenübergang

Bild 8.1-2

auszulegen ist. Dann wären Aramid-Containments in Kampfflugzeugen denkbar. Bilder neuer Triebwerksmuster die auf ein Aramid-Containment (gelbe Bandage) schließen lassen, scheinen dies zu bestätigen.

Gefährliche Bruchstücke sind nicht nur in der Rotationsebene zu erwarten.

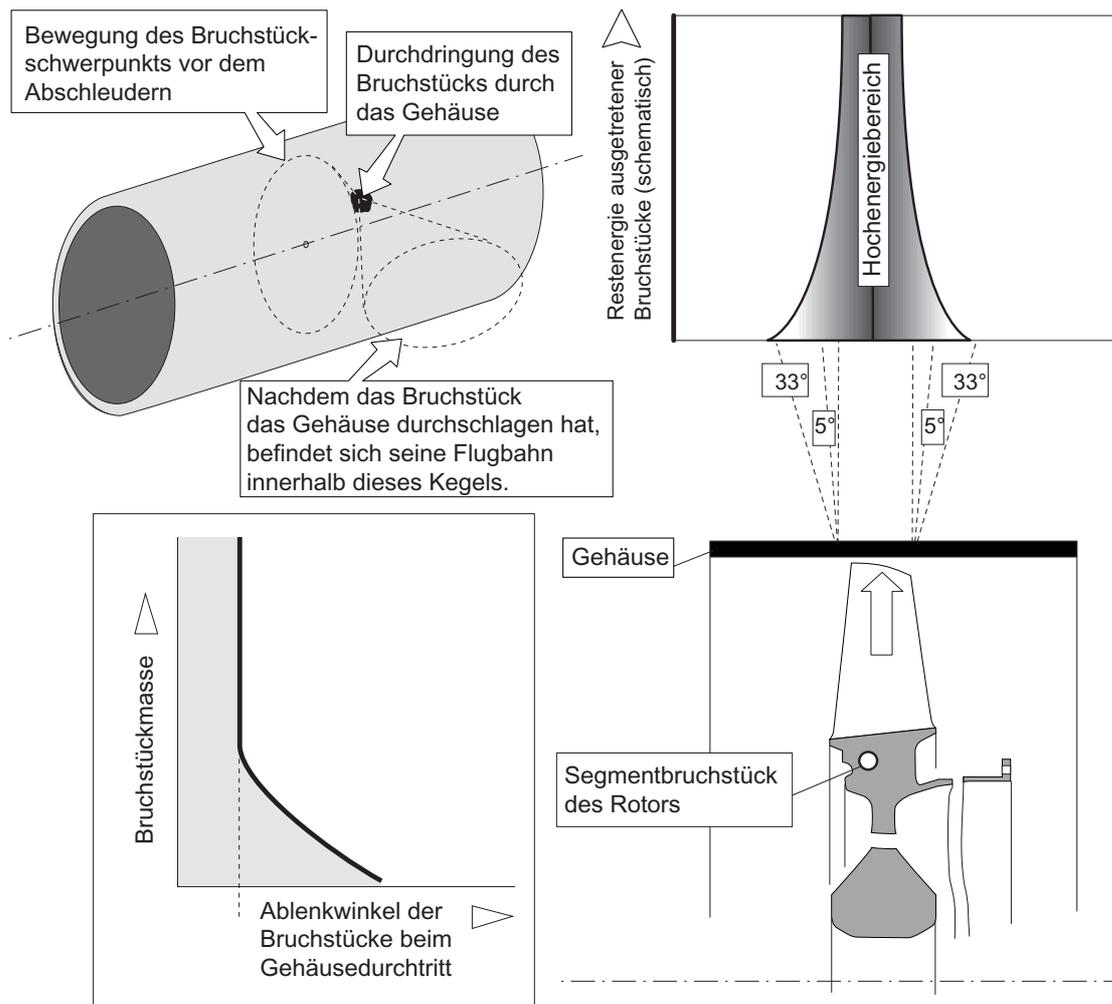


Bild 8.1-3

Bild 8.1-3 (Lit 8.1-1 und 8.1-4): Durchschlägt ein Bruchstück ein Gehäuse, tritt es unter einem bestimmten Winkel aus. Die Bruchstückbahnen liegen innerhalb eines Kegels (Skizze oben). Von besonderem Interesse ist die axiale Ablenkung. Weil die Wahrscheinlichkeit des Bruchstückaustritts am Umfang nahezu gleich ist (abgesehen von örtlich unterschiedlichen Wandstärken und Anbauaggregaten), bestimmt in erster Linie die axiale Ablenkung den durch das Bruchstück gefährdeten Bereich. **Hoch-**

energetische Bruchstücke werden nur wenig (ca 5 °), **Bruchstücke mit niedriger Energie** bis 33° abgelenkt (Skizzen rechts). Damit ergibt sich auch die notwendige axiale Mindesterstreckung eines Containments. Es ist leicht einzusehen, dass mit dem Abstand eines außen liegenden Containments von der Gehäusewand dessen axiale Länge wachsen muss.

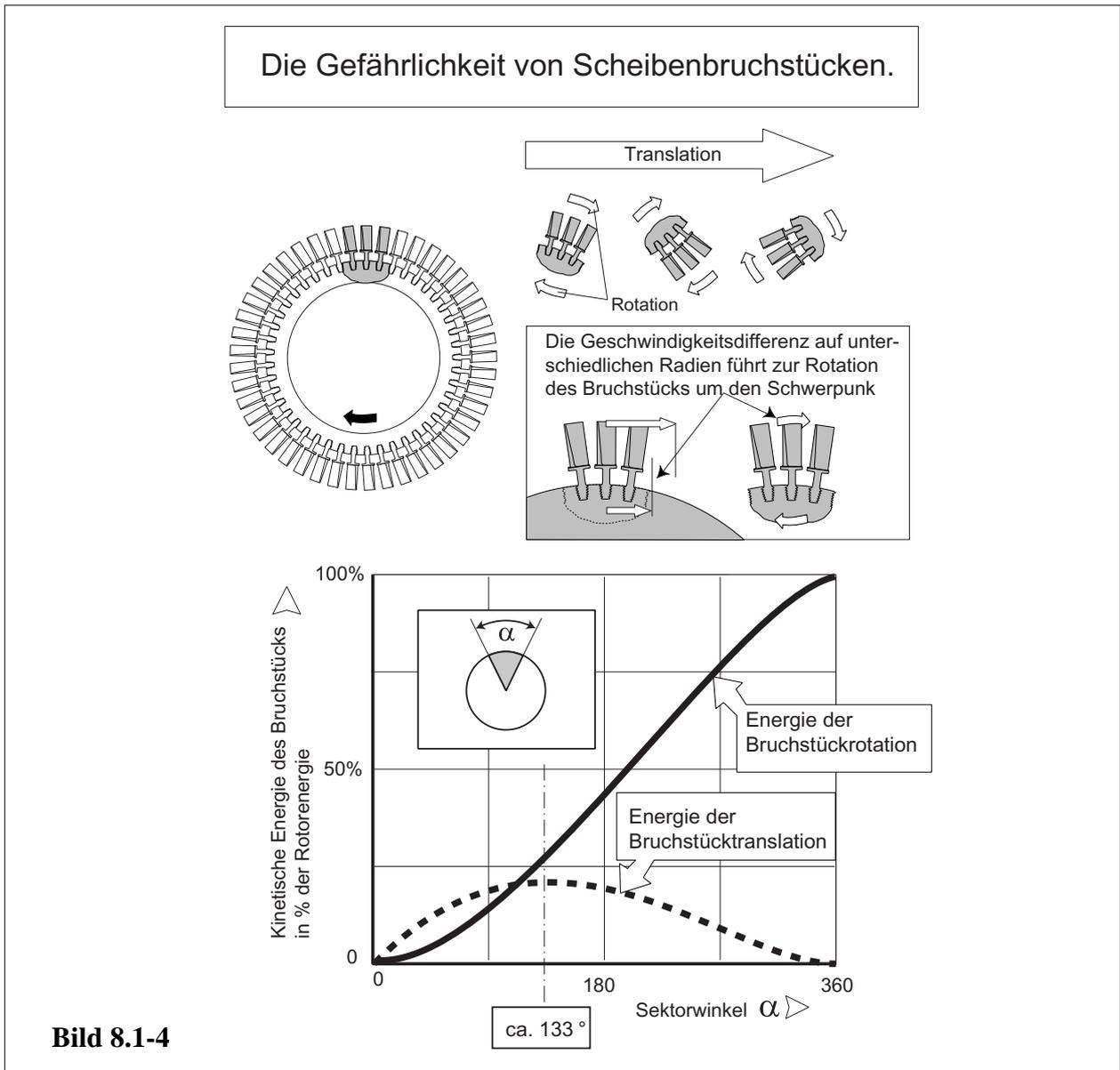


Bild 8.1-4 (Lit 8.1-1 und 8.1-4): Die kinetische Energie eines abfliegenden Bruchstücks setzt sich aus zwei Anteilen zusammen: Das Rotorbruchstück bewegt sich auf seiner Flugbahn und hat dadurch eine **translatorische Energie**. Gleichzeitig rotiert es um seinen Schwerpunkt im Drehsinn des Rotors, weil dessen Außenzonen eine höhere Umfangsgeschwindigkeit als die radial weiter innen liegenden Bereiche haben. Das Bruchstück verfügt damit zusätzlich über **rotatorische Energie** (Skizze oben). Die **Durchschlagswirkung** wird von der translatorischen Energie eines

Bruchstücks bestimmt. Eine nicht gebrochene Scheibe (Sektorwinkel 360 °) hat ihre gesamte kinetische Energie in der Rotationsbewegung gespeichert. Sie ist damit aus dem Gesichtspunkt der Durchschlagfähigkeit „harmlos“. Bei geborstenen Scheiben hängt die Energieaufteilung vom Sektorwinkel ab (Diagramm unten). Am gefährlichsten, weil mit dem höchsten translatorischen Energieanteil versehen, sind Segmentstücke mit einem Sektorwinkel von ca. 133 °.

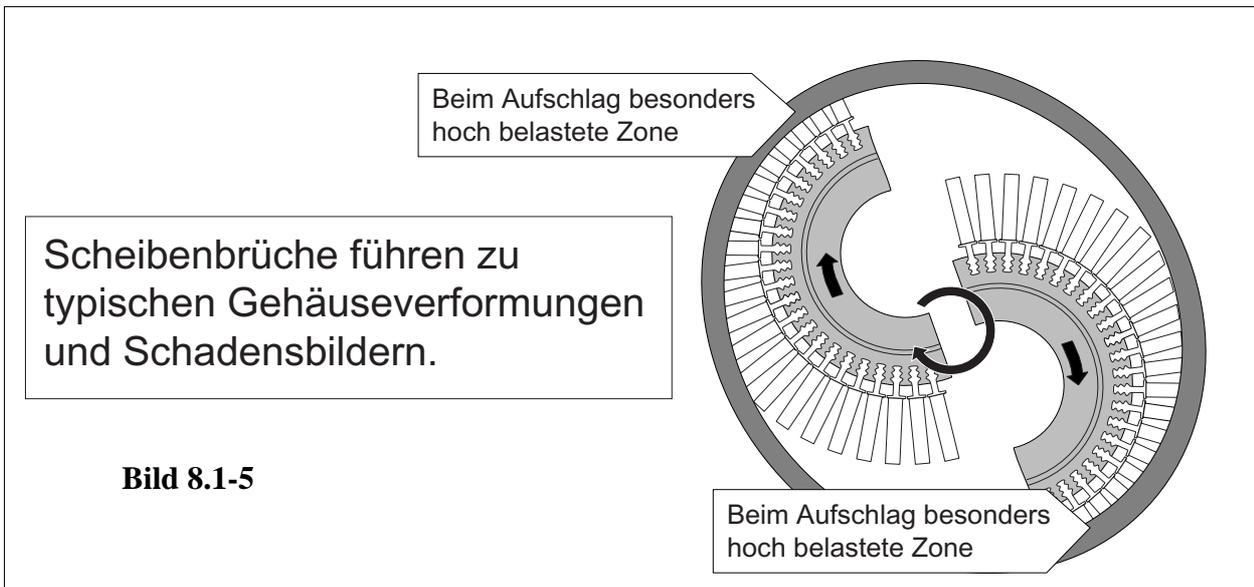


Bild 8.1-5 (Lit 8.1-3): Turbinenräder mit einer relativ schweren Nabe und kurzen Schaufeln hinterlassen nach einem **Nabenbruch ein typisches Schadensbild**. Die in Drehrichtung vordere Bruchstückzone wird beim Kontakt mit dem Gehäuse über die Schaufeln abgebremst. Die Schaufeln werden so im Kontaktbereich überlastet und brechen meist über dem Fuß. Das Gehäuse wird ovalisiert und reißt symmetrisch auf.

Bild 8.1-6 (Lit 8.1-7): Neben der translatorischen Bewegung in der Flugbahn führt ein Bruchstück um seinen Schwerpunkt eine **rotierende Bewegung** aus (Bild 8.1-4). Beim Ablösen aus dem Rotorverband hat das Bruchstück zumindest anfangs den gleichen Drehsinn wie der Rotor (siehe Bild 8.1-4). Zusätzlich erfährt das Bruchstück durch Aufschlags- und Luftkräfte rotatorisch wirkende Impulse, die auch gegen die anfängliche Bewegung gerichtet sein können und **das Durchschlagsverhalten merklich beeinflussen**. Ein Beispiel sind lange Rotorschaukeln, wie sie für den Fan typisch sind. Reißt die Rotorschaukel im Fuß ab, wird die Schaufelspitze am Gehäuse abgebremst (Skizze oben). Dabei wird der **Blattspitzenbreich eingerollt** (Bild 8.2-16.1) was kinetische Energie verzehrt. Diesen Effekt macht man sich bei **Containments** bewusst oder unbewusst (Aramidcontainment) zu nutze (Bild 8.2-14.1). Der radial weiter innen liegende, relativ schwere Schaufelfuß hat eine niedrigere Umfangsgeschwindigkeit als die Schaufelspitze. Er wird von den folgenden Schaufelblättern beschleunigt und gegen das Gehäuse geschleudert. In diesem Fall rotiert das Schaufelbruchstück gegen den Drehsinn des Rotors. In Bauteilversuchen im Schleuderstand muss also **das Abschleudern eines Bruchstücks mit dem gleichen Drehsinn wie im Triebwerk erfolgen**.

Gehäusebelastung beim Aufschlag durch eine gebrochene (Fan-) Schaufel.

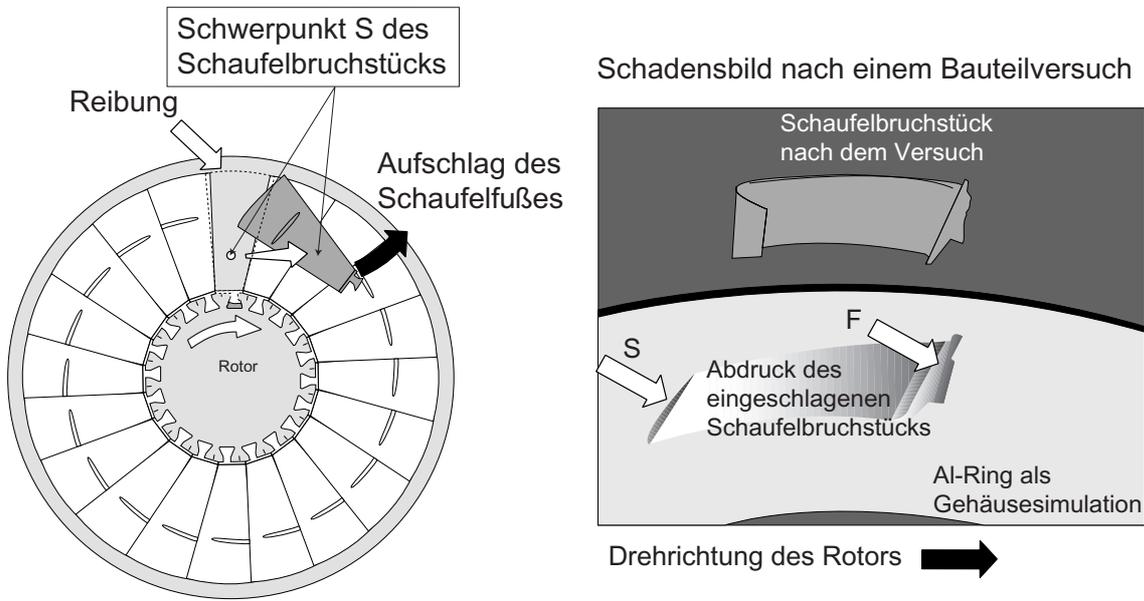


Bild 8.1-6

schematische Blattansichten

Spitze

Kante

Blattseite

Fuß

Die (nach Thor-Verfahren) berechnete Dicke eines Containmentrings aus einer Titanlegierung ist bei typischen Fanschaufeln von Serientriebwerken von der Auftreffzone der Schaufel näherungsweise wie folgt abhängig:

Spitze : Fuß : Blattseite = 3 : 2 : 1

Die untere Skizze zeigt das Verhältnis (Lit 8.1-18) berechneter, für ein Containment erforderlicher Wanddicken aus einer Titanlegierung in Abhängigkeit von der auftreffenden Blattzone. Nach dieser Berechnung durchschlägt die Schaufel beim Auftreffen der Blattspitze eine ca. dreifach dik-

kere Gehäusewand als beim Auftreffen des Übergangs zur Fußplattform. Dies scheint dem in der oberen Skizze beschriebenen Effekt zu widersprechen, der offenbar von der Rechnung nicht berücksichtigt wurde. Hier wird deutlich wie stark die Durchschlagswirkung streuen kann und auch von Zufälligkeiten abhängig ist.

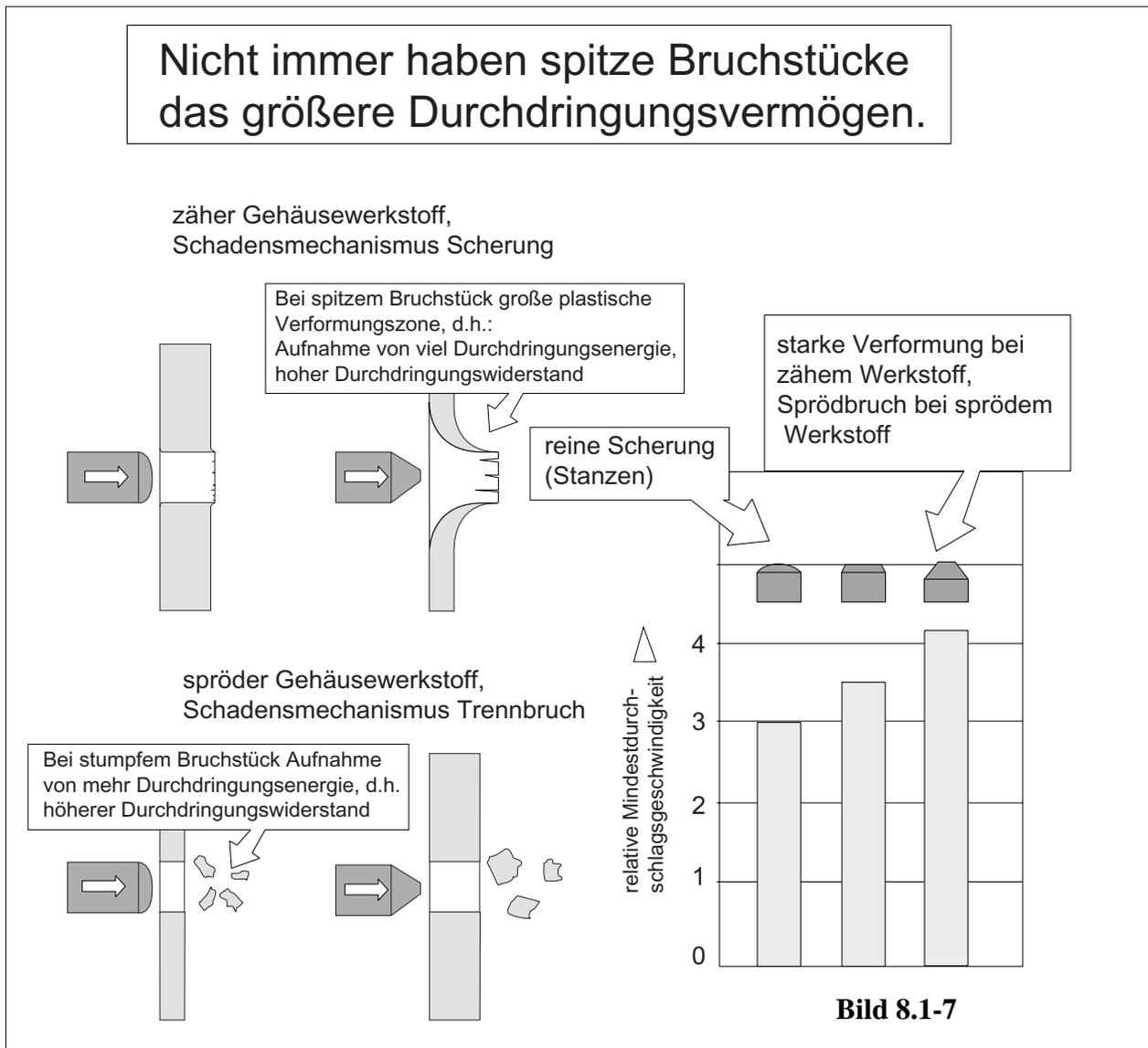


Bild 8.1-7 (Lit 8.1-7): Die Form der **Aufschlagfläche des Bruchstücks** spielt eine merkliche Rolle für die Durchschlagfähigkeit (vergleiche Bild 8.1-6). Bruchstücke mit gleicher Masse und **unterschiedlicher Kontur können sehr verschiedene Mindestdurchschlagsgeschwindigkeiten** aufweisen (Skizze oben rechts) die sich um ein Mehrfaches unterscheiden. Dabei spielt auch das Zähigkeitsverhalten des Gehäuses eine Rolle, die wiederum von der Auftreffgeschwindigkeit beeinflusst ist (Skizze links). Es handelt sich also um einen komplexen Vorgang, der analytischen Ansätzen schwer zugänglich ist. Weil bei einem **Rotorbruchstück kaum die Form der auftreffenden Fläche vor-**

hergesagt werden kann, sollte in der Auslegung oder Abschätzung des Durchschlagswiderstands von Gehäusen immer **vom ungünstigsten Fall ausgegangen werden**. Bei versuchstechnischen Nachweisen im Volltriebwerk oder in Baugruppen sollte deshalb die begrenzte Aussagefähigkeit zum Containmentverhalten bewusst bleiben. Diese **eingeschränkte Nachweissicherheit** dürfte auch dazu beitragen, dass immer wieder Bruchstücke aus Triebwerken austreten, von denen man dies eigentlich auf Grund der Nachweise bei der Zulassung nicht erwartet hätte (Beispiel 8.1-4).

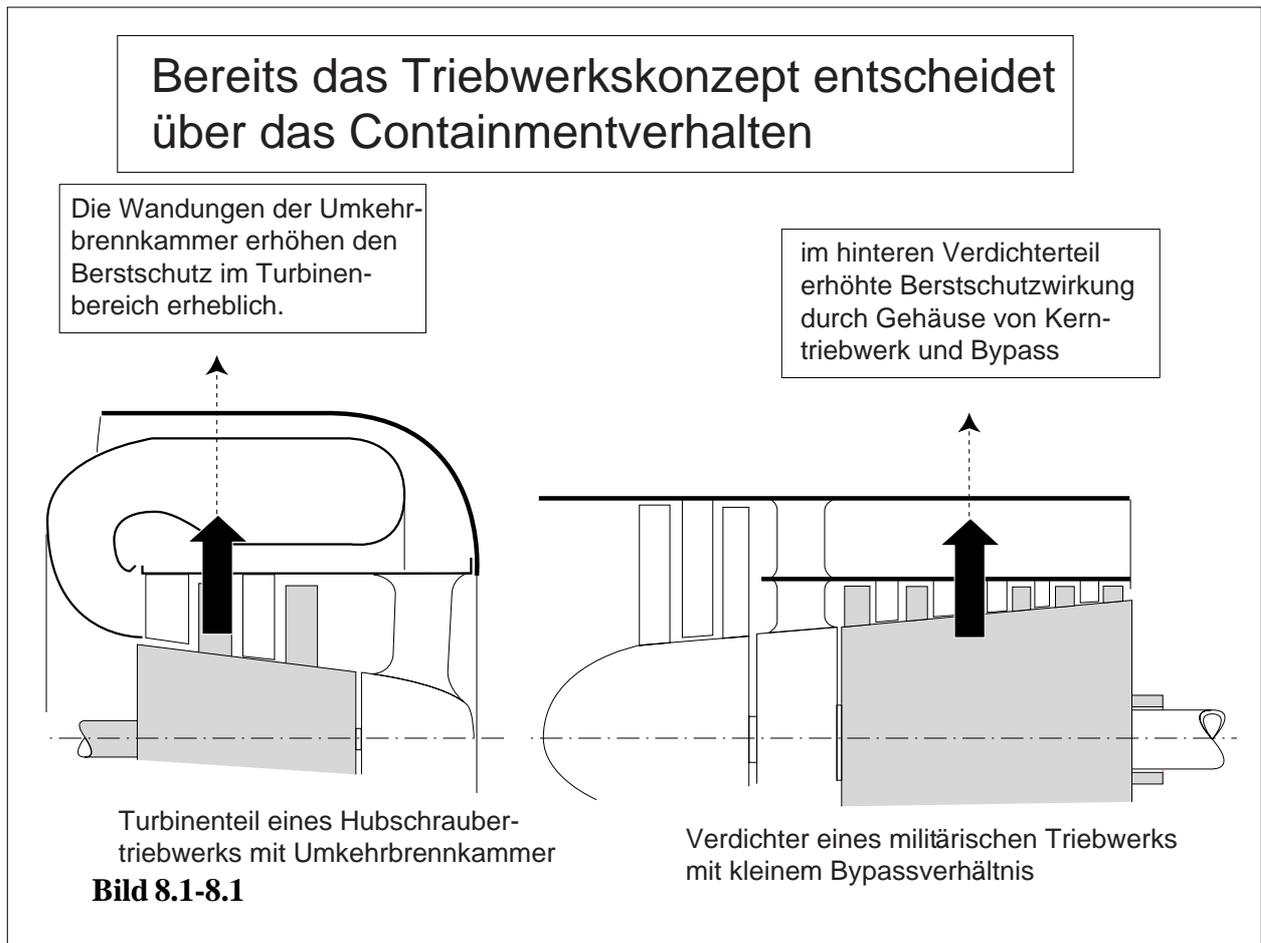
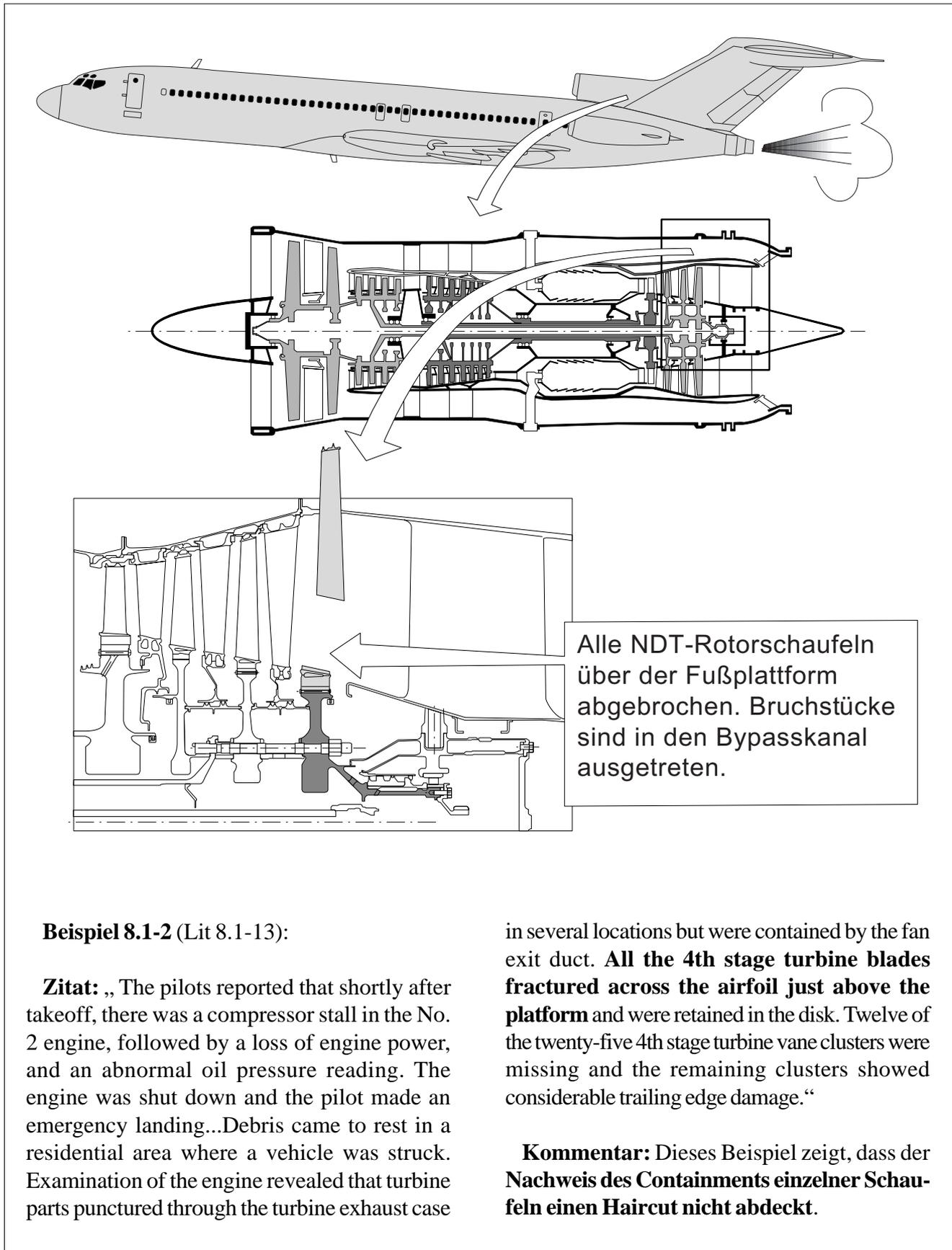
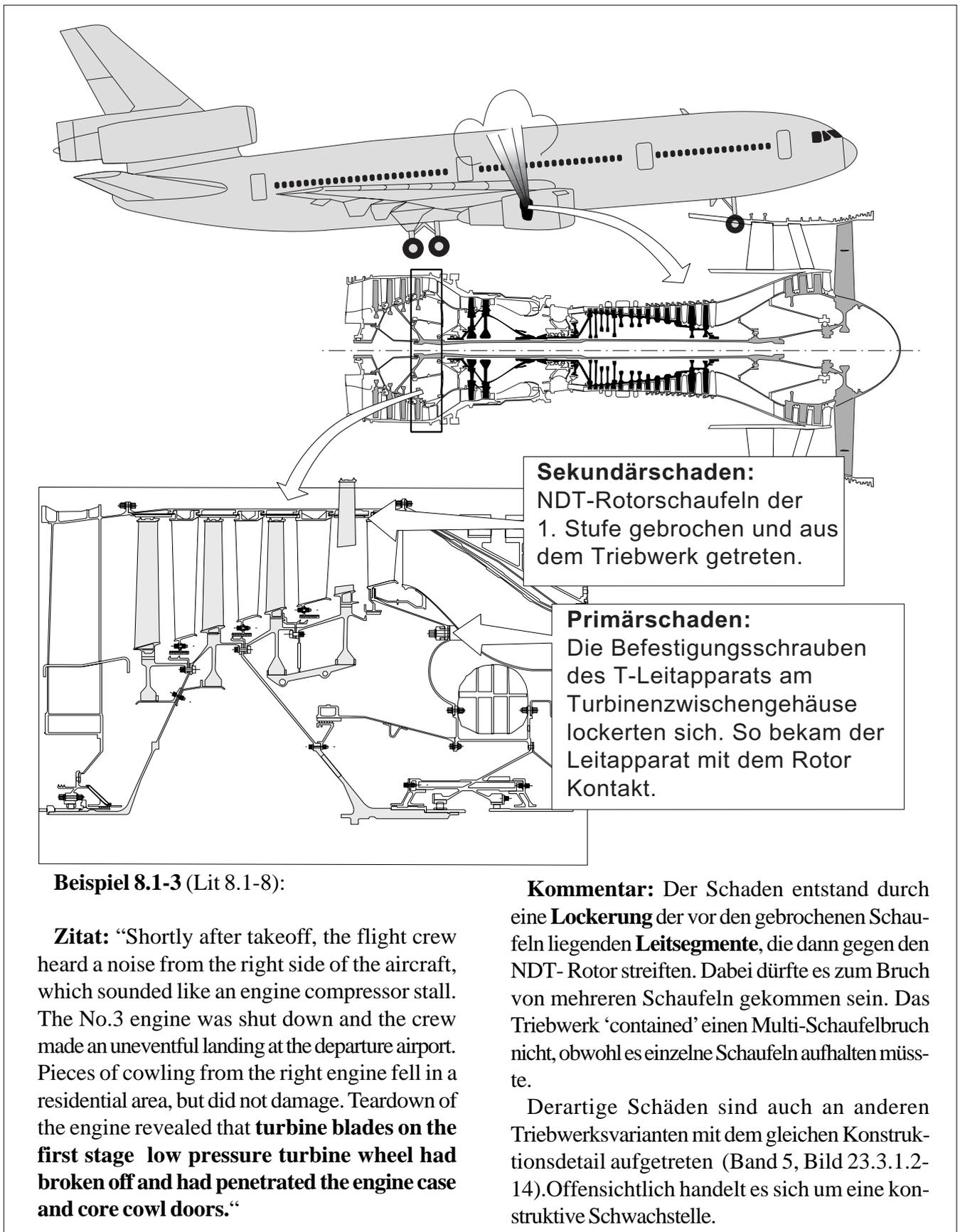


Bild 8.1-8.1: Erfahrungsgemäß ist der Durchschlagswiderstand mehrerer hintereinander liegender Gehäusewände höher als der einer Gehäusewand mit derselben Gesamtdicke (Lit 8.1-1). Deshalb lassen Konfigurationen, bei denen **mehrere Gehäusewandungen** von einem abfliegenden Rotorbruchstück durchschlagen werden, ein gutes Containmentverhalten erwarten.



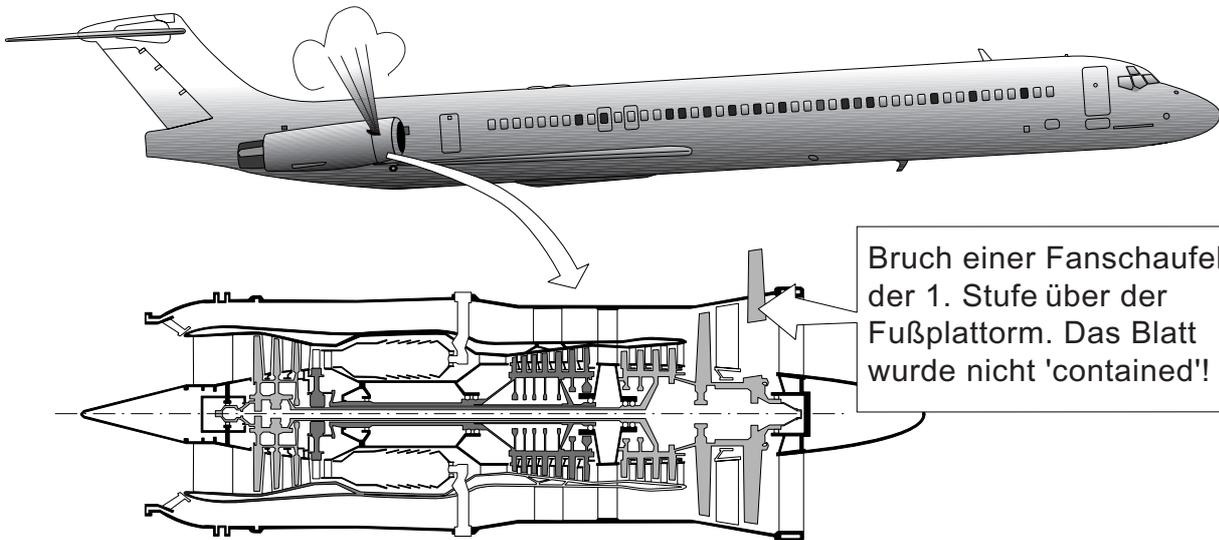


Beispiel 8.1-3 (Lit 8.1-8):

Zitat: “Shortly after takeoff, the flight crew heard a noise from the right side of the aircraft, which sounded like an engine compressor stall. The No.3 engine was shut down and the crew made an uneventful landing at the departure airport. Pieces of cowling from the right engine fell in a residential area, but did not damage. Teardown of the engine revealed that **turbine blades on the first stage low pressure turbine wheel had broken off and had penetrated the engine case and core cowl doors.**“

Kommentar: Der Schaden entstand durch eine **Lockerung** der vor den gebrochenen Schaufeln liegenden **Leitsegmente**, die dann gegen den NDT- Rotor streiften. Dabei dürfte es zum Bruch von mehreren Schaufeln gekommen sein. Das Triebwerk ‘contained’ einen Multi-Schaufelbruch nicht, obwohl es einzelne Schaufeln aufhalten müsste.

Derartige Schäden sind auch an anderen Triebwerksvarianten mit dem gleichen Konstruktionsdetail aufgetreten (Band 5, Bild 23.3.1.2-14). Offensichtlich handelt es sich um eine konstruktive Schwachstelle.



Beispiel 8.1-4 (Lit 8.1-12):

Zitat: „... (the aircraft) **had an uncontained failure** of the No. 2 engine during climb to cruise after departingThe flightcrew reported vibration and loss of power in the No. 2 engine while climbing through 15,000 feet after departure. The engine was shut down and the flight returned ...without further incident. Postincident examination of the

engine ... showed a fan blade on the first stage of the fan had separated about one inch from the root. The blade exited through the engine cowling at about the 12 o'clock position.“

Kommentar: Es handelt sich um einen älteren Triebwerkstyp mit kleinem Bypassverhältnis. Trotz vergleichsweise kleiner Schaufelgröße ist offenbar ein **Containment nicht gewährleistet**.



Beispiel 8.1-5 (Lit 8.1-9):

Zitat: „While climbing through 38 000 feet, the aircraft experienced an **uncontained fan blade separation** in the No. 2 Engine. Investigation revealed that one of the first-stage compressor fan blades had separated about 8 inches above the blade platform. Fragments from the blade had exited through the left fan cowl in three places and had penetrated the vertical stabilizer.“

Kommentar: Es handelt sich um ein großes Fantriebwerk älterer Bauart. Da der Bruch ca. 20 cm über der Fußplattform liegt, handelt es sich bei weitem nicht um eine vollständige Fanschaufel mit Fuß. Es stellt sich damit die Frage, warum für diesen Triebwerkstyp die heutigen **Containmentforderungen für ganze Schaufelblätter offenbar nicht eingehalten werden**.

Auch Rotorschaukeln können trotz Containmentnachweisen austreten.

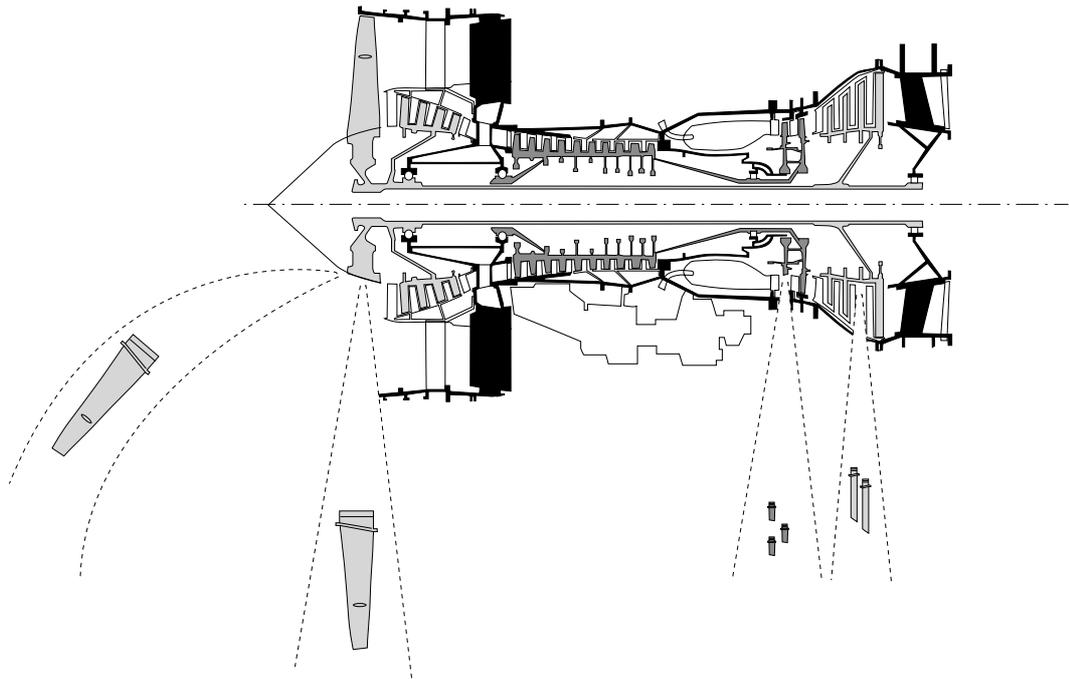


Bild 8.1-8.2

- Ältere Triebwerkstypen, für die noch nicht die strengen Containmentnachweise erbracht werden mussten.
- Abschleudern von Schaufeln bei „durchgehenden“ Turbinen (z.B. nach einem Wellenbruch)
- Bruch mehrerer benachbarter Schaufeln im Fuß (z.B. bei Überhitzung des Scheibenkranzes durch einen Heißgaseinbruch).
- Schaufelstau nach einem „Haircut“
- Vor dem Containmentfall geschwächte Gehäuse (z.B. durch Überhitzung oder Verschleiß bei einem Anstreifvorgang)
- Sonderfälle bei denen Schaufeln extrem axial abgelenkt wurden (z.B. Farschaufeln die sich auf Grund der Luftkräfte nach vorne aus dem Triebwerk „schrauben“)

Bild 8.1-8.2: Das Bild zeigt eine Zusammenstellung der Ursachen von Schadensfällen, bei denen Schaufelbruchstücke austraten. Von solchen Fällen wird immer wieder berichtet, obwohl eigentlich zu erwarten wäre, dass die Containmentvorschriften zumindest einen großen Teil dieser Gehäusedurchschläge verhindern (Beispiele 8.1-3, 8.1-4 und 8.1-5).

Bemerkenswert ist, dass offenbar gerade in der Niederdruckturbinen relativ häufig Fälle austretender Schaufelbruchstücke bekannt werden. Hierfür sprechen typische Besonderheiten dieser Komponente:

- Relativ große Rotorschaukeln mit entsprechender Masse.

- *Dünne Gehäusewände. Als einschalig zu bewertende Bauweise (die innen liegende segementierte Gasführung kann keine Tangentialspannungen aufnehmen).*
- *Lange Schaufelblätter mit dünnen Querschnitten neigen zum Haircut und damit einer großen Gehäusebelastung*
- *Überdrehzahl beim Bruch der Fanwelle führt zu relativ energiereichen Bruchstücken*

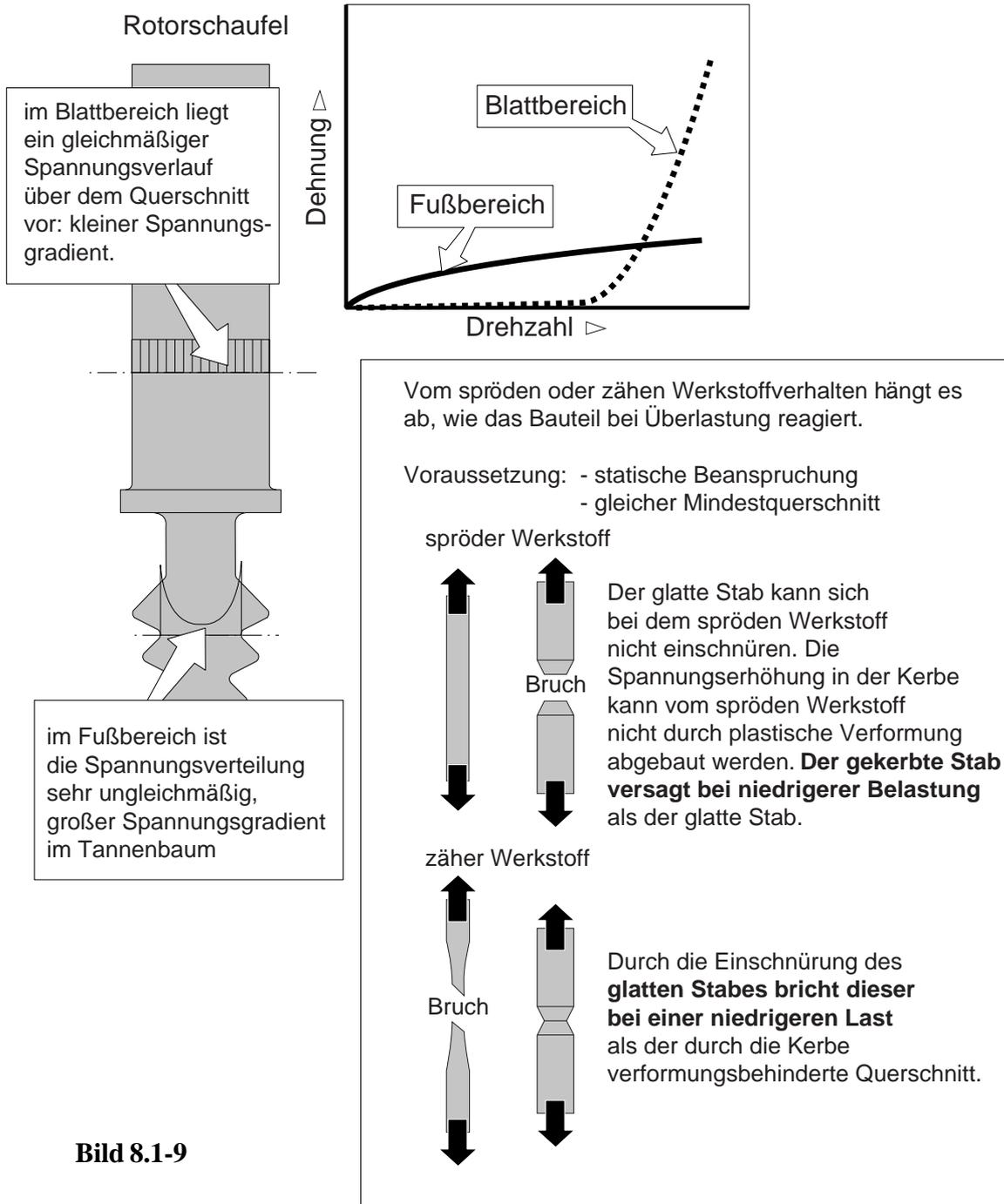
Bild 8.1-9: Bei **statischer Überlastung**, wie sie während hoher Überdrehzahlen (Zugbeanspruchung) oder bei extremen Anstreifvorgängen (Biegebeanspruchung) auftritt, hängt der Bruch eines Bauteils von der Zähigkeit des Werkstoffs und eventuellen Kerben bzw. Spannungsgradienten ab. Im Bereich des Schaufelfußes, insbesondere bei Tannenbaumfüßen (Skizze oben links) und am Blattübergang in die Fußplattform liegen das Bruchverhalten bestimmende Kerben vor. Spröde Werkstoffe reagieren empfindlicher auf Kerben (Skizzen unten) als zähe Werkstoffe, die einen Spannungsabbau und dadurch eine gleichmäßigere Belastung des höchstbeanspruchten Querschnitts ermöglichen.

Werkstoffwechsel müssen auch unter dem Gesichtspunkt einer Überlastung kritisch geprüft werden. Geschieht dies nicht, besteht die Gefahr, dass Bauteile bereits bei unvorhergesehenen kleineren Überlastungen versagen oder Schäden bei Überlast unakzeptabel groß werden.

Ein solcher Fall kann z.B. eintreten, wenn von einem **zähen vielkristallinen Turbinenschaufelwerkstoff auf einen unter hohen Verformungsgeschwindigkeiten spröder reagierenden Einkristall Werkstoff** übergegangen wird. Damit wird ein Bruch aller Schaufeln, der sog. „**Haircut**“, begünstigt (Bild 8.1-10).

Ob zuerst plastische Verformung im Fußbereich oder im Blatt erfolgt, hängt ebenfalls mit dem Spannungsverlauf im belasteten Querschnitt zusammen (Diagramm oben rechts). In einem gekerbten Querschnitt ist eine relativ kleine **plastische Längung** zu erwarten. Die zugehörige Kurve über der Drehzahl dürfte deshalb bis zum Bruch relativ flach verlaufen. Der gleichmäßiger und niedriger belastete Blattquerschnitt wird sich dagegen bei Erreichen der Fließgrenze progressiv plastisch längen. Der **Sicherheitsabstand** einer Turbinenschaufel **gegen Bruch** bei Überdrehzahlen **hängt also merklich von der Zähigkeit des Werkstoffs ab**. Verändert sich das Werkstoff-

Die Dehnungsverläufe unter Fliehkraft sind in den verschiedenen Schaufelzonen sehr unterschiedlich.



verhalten bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen merklich, sollte dies bei Containmentbetrachtungen oder einer

versuchstechnischen Berstdrehzahlermittlung berücksichtigt werden.

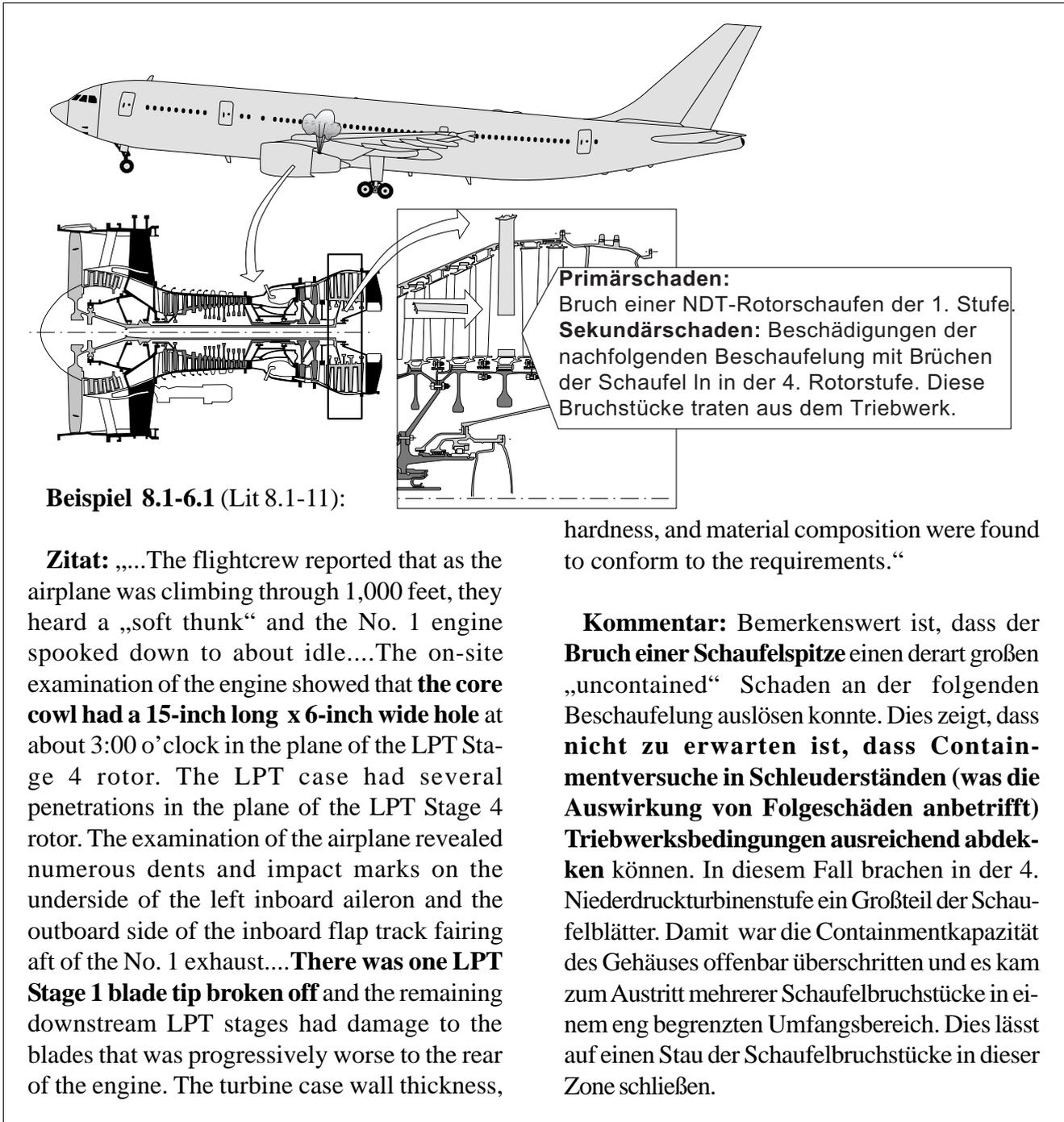


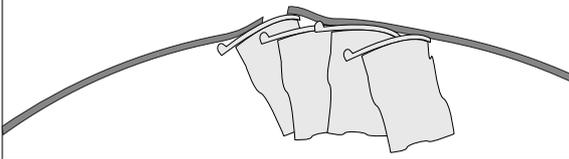
Bild 8.1-10 (Beispiel 8.1-2 und Beispiel 8.1-6.1): Der **Containmentnachweis** wird gewöhnlich für den Bruch einzelner Rotorschaufler geführt. Verklemmt sich eine gebrochene Schaufel jedoch ungünstig, kann dies zum Bruch der gesamten Beschaufelung, dem sog. „Haircut“ führen. Wenn sich die Bruchstücke in einem eng begrenzten Umfangsbereich stauen, konzentriert sich hier die frei werdende Bruchstück-

energie. So entstehen **verständlicherweise deutlich höhere Gehäusebelastungen als beim Einzelschaufelbruch.**

Die Erfahrung zeigt, dass die Gehäuse eher Merkmale aufweisen als ob sie durchgedrückt wurden. Das weist darauf hin, dass offenbar weniger die Schlagbeanspruchung einer einzelnen Schaufel als die sich aufbauende hohe Druckbelastung wirksam ist. So bleibt die „pri-

Ein Schaufelstau mit "Haircut" kann auch bei Blattbrüchen zur Überlastung des Gehäuses und Bruchstückaustritt führen.

Die Erfahrung zeigt, dass bei Schaufelstau das Gehäuse lediglich aufgedrückt und eingerissen ist, ohne dass energiereiche Bruchstücke austraten.



Austritt von Schaufelbruchstücken

Schaufelstau

Gehäuse

"Haircut"

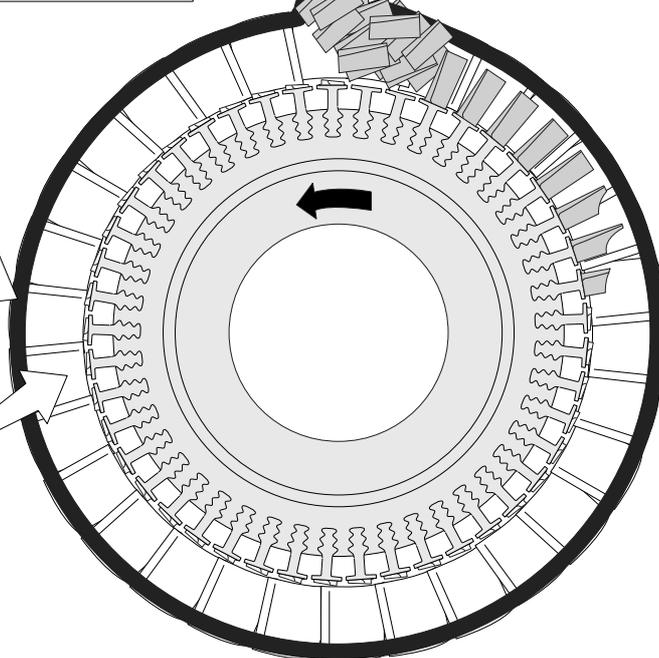


Bild 8.1-10

märe“ Schaufel bzw. das Bruchstück noch im Gehäuse stecken, kann es also nicht voll durchdringen (Skizze oben links). Falls es doch zum Durchtritt kommt ist die verbliebene Bruchstückenergie niedrig.

Wird die Gehäusewand durchbrochen kann eine größere Zahl von Bruchstücken an nahezu der selben Stelle austreten. Auf diese Weise kon-

zentrieren sich die Folgeschäden. Es ist also wichtig, zumindest bei der Werkstoffauswahl der Beschaukelung, einen „Haircut“ zumindest nicht zu begünstigen. Dabei spielt das zähe Verhalten des Schaufelwerkstoffs unter hohen Verformungsgeschwindigkeiten und typischen Betriebstemperaturen eine wichtige Rolle (siehe Bild 8.1-11).

Das "Haircut"- Verhalten einer Beschaufelung ist von vielen Einflüssen abhängig.

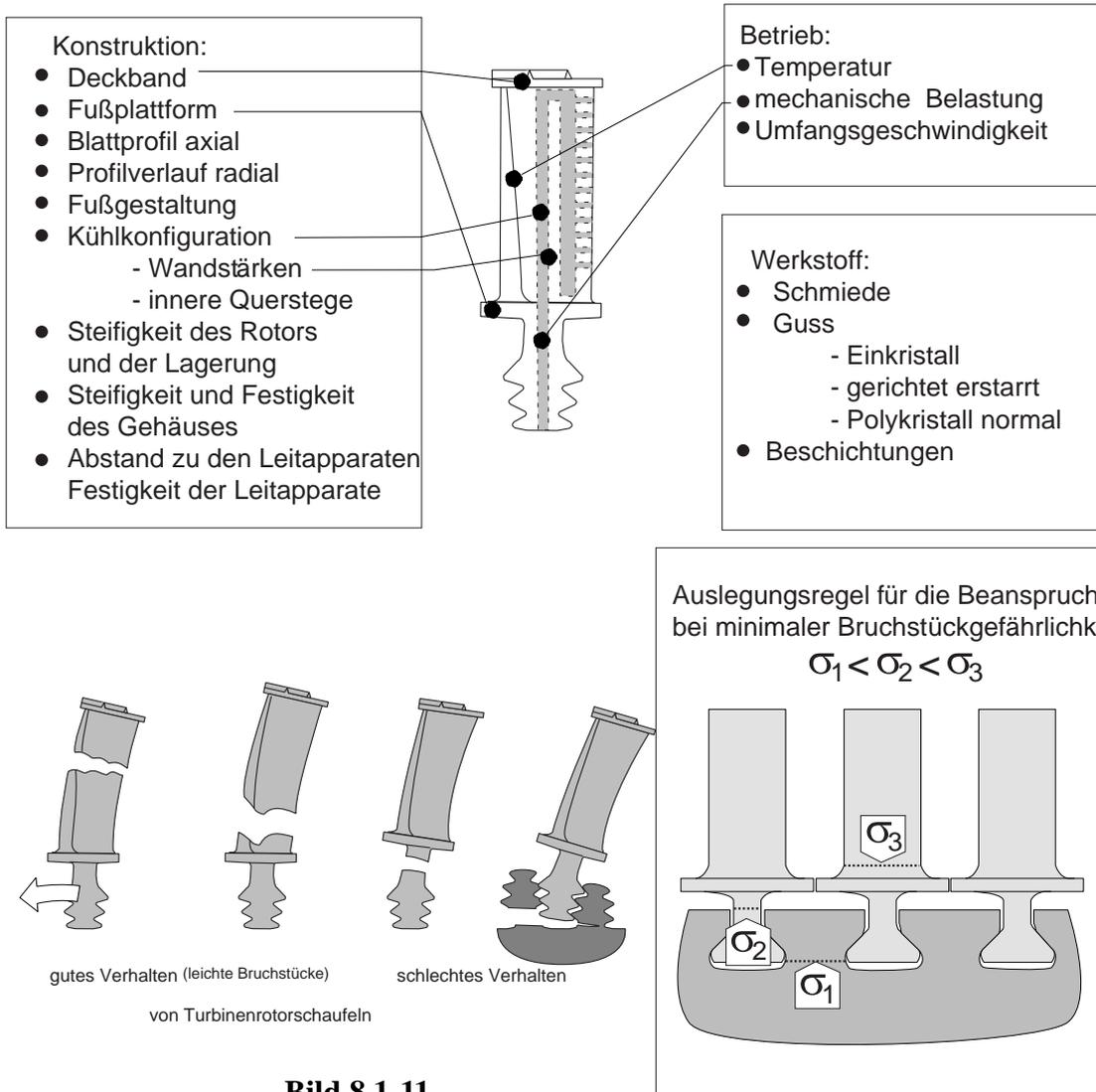


Bild 8.1-11 (Lit 8.1-4): Kommt es an einem Rotor zum **Bruch aller Schaufeln**, spricht man von einem „Haircut“. Bei einem solchen Vorgang ist von einer hohen Belastung des Gehäuses auszugehen. Man wird deshalb versuchen, **einen Haircut zu vermeiden**. Die Neigung einer Beschaufelung zu einem Haircut wird von vielen Faktoren beeinflusst, die sich in drei Hauptgruppen einteilen lassen:

Konstruktion: Damit bei einem Schaufelbruch möglichst nur leichte und energiearme Bruchstücke entstehen, wird bei einer Biegeüberlastung versucht, den Bruch einer Rotorschaukel möglichst weit außen entstehen zu lassen (Skizzen unten, Lit 8.1-4). Auf jeden Fall muss vermieden werden, dass die Beschaufelung mit den Tannenbaumverzahnungen der Scheibe ausbricht. Dieses Verhalten wird von

der konstruktiven Gestaltung der Schaufel beeinflusst. **Als Auslegungsregel kann gelten, dass die Beanspruchung im Scheibenhöcker kleiner als im Fußschaft der Schaufel und diese kleiner als am Blattübergang zur Fußplattform sein sollte.** Neben den Eigenschaften der Schaufeln, spielen auch die der umgebenden Bauteile, wie Leitapparate, Gehäuse, Rotoren und deren Lagerung eine Rolle (z.B. Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit und Festigkeit). Kommt das „**Intermesh-Prinzip**“ (Band 1, Bild 4.5-9) zur Anwendung um den Niederdruckturbinenrotor nach einem Wellenbruch durch gezielten Schaufelkontakt abzubremesen, ist das Haircutverhalten der Beschaukelung zu berücksichtigen.

Betrieb: Die Bauteiltemperatur ist von erheblicher Bedeutung für das Bruchverhalten (Bild 8.1-14). Üblicherweise mindert eine hohe Blatttemperatur die Festigkeit und erhöht die Duktilität. Bei Temperaturen im Bereich der Anschmelzungen (im Bereich der Solidustemperatur) beobachtet man jedoch an Nickellegierungen ein sprödes Verhalten mit spaltbruchähnlichen Erscheinungen. Diese Brüche sind leicht mit Spaltflächen von Schwingbrüchen zu verwechseln. Wurde der Scheibenkranz mit den Schaufelfüßen überhitzt, besteht die Gefahr eines Ausbrechens der Tannenbaumverzahnungen der Scheibe. Überdrehzahlen mit typisch hohen Fliehkräften und hohen Umfangsgeschwindigkeiten können das Bruchverhalten der Beschaukelung ebenfalls verändern. Dies beruht u.a. darauf, dass die Verformungsgeschwindigkeit ansteigt und sich dadurch Versprödungseffekte verstärken.

Werkstoff: Der Schaufelwerkstoff ist in erster Linie für das Bruchverhalten verantwortlich. Typisch grobkörnige Gusswerkstoffe neigen im Bereich der **Solidustemperatur und Schlagbeanspruchung zu Sprödbrüchen**. Dieses Verhalten ist bei **Einkristallschaufeln** besonders ausgeprägt. Erfahrungsgemäß ist daher die Gefahr des Haircuts einer Einkristall-

Beschaukelung höher als bei polykristallinem Werkstoff. Wird nun eine Beschaukelung **von Polykristall auf Einkristall umgestellt**, um höhere Betriebstemperaturen zu ermöglichen, muss dieses Verhalten berücksichtigt werden. Gegebenenfalls ist das **Containmentverhalten der Gehäuse erneut zu überprüfen**. Ein sprödes Verhalten der Schaufelblätter lässt durch **Zersplittern kleine Bruchstücke entstehen. Dabei wird ein Teil der kinetischen Energie aufgezehrt**. Diese Bruchstücke mit relativ niedriger Energie sind für das Containmentverhalten günstig. Bei einem Werkstoffwechsel oder der Bewertung eines Schaufelwerkstoffs sind auch Unterschiede der Werkstoffdichte zu berücksichtigen. Es gibt z.B. Einkristallwerkstoffe mit einem Wolframanteil der sie deutlich (ca. 10%) schwerer macht als die üblichen Nickellegierungen.

Wird über die Einführung „alternativer“ spröder Turbinenschaufelwerkstoffe wie **Keramik oder intermetallische Phasen (IP)** nachgedacht, ist auch deren Empfindlichkeit gegen einen plötzlichen Bruch der gesamten Beschaukelung ein wichtiges Kriterium. Intermetallische Phasen zeigen ein sprödes Verhalten bis zu mehreren hundert °C bevor sie duktil werden. Sie sind also während der niedrigen Betriebstemperaturen beim Start besonders bruchgefährdet. Damit steigt die Gefahr von Fremdkörperschäden. Ist erst ein Bruchstück entstanden, muss mit einer sich **lawinenartig selbstverstärkenden Zerstörung der Beschaukelung** gerechnet werden.

Bild 8.1-12: Der Bruch einer typischen großen Fanschaufel moderner Triebwerke mit hohem Bypassverhältnis **beansprucht die gesamte Triebwerksstruktur**. Diesen Vorgang zu beherrschen, ist eine äußerst anspruchsvolle konstruktive Aufgabe. In der Folge eines Fanschaufelbruchs treten u.a. hohe Unwuchten, Schwingungsanregungen der Gehäuse und Rotoren, große Torsionsmomente durch Anstreifen an den Gehäusen und Abbremsen der Rotoren, entzündlicher Abrieb, Durchbiegung der Rotoren und hohe Lagerkräfte auf. Solche Einflüsse können an den Triebwerkskomponenten zu typischen Überlastungen und Schäden führen:

Durchschlagsbeanspruchung der Gehäusewand des Fangehäuses. Bei Überlaufen des gebrochenen Blattstückes von den Schaufelspitzen der verbliebenen Schaufeln (wenn kein Nestingverhalten vorliegt, Bild 8.2-4) kommt es zu extremen **Gehäuseschwingungen** (Bild 8.1-15). Dadurch werden Flanschverbindungen besonders hoch dynamisch belastet (Bild 8.2-15).

Bei den großen Unwuchten als Folge des Schaufelbruchs besteht die Gefahr einer **Überlastung der Triebwerksaufhängung** und/oder der **Flugzeugzelle** bzw. der Flügelstruktur. Es wurde deshalb in Sonderfällen ein Absprengen des Triebwerks im Schadensfall vorgesehen (Bild 8.2-20).

Die Radialkräfte und die Durchbiegung der Wellen und Gehäuse können **die Hauptlager überlasten**. Plötzlich auftretende große Radialkräfte induzieren z.B. auch hohe Axialkräfte im Lager und so den **Bruch der Lagerringe**. **Vertragen Dichtungen** im Lagerkammerbereich, als Folge großer Auslenkungen der Rotoren und Gehäuse, besteht die Gefahr des Austritts größerer Ölmengen und eines **Ölfeuers**.

Gehäusestreben zur Abstützung der Lager sind bei einem Fanschaufelbruch von radialen Kräften aus der Unwucht über die Hauptlager und von Torsionsmomenten beansprucht. Torsionsmomente treten z.B. beim Verkanten der Lager auf. Es muss sich nicht nur um Gehäuse in der Nähe des Fan handeln. Auch **Gehäuse am Triebwerksaustritt** können bei einem Fanschaden überlastet werden (Lit. 8.1-22).

Die **Belastung der Anbauaggregate** wie Getriebe, Regler oder Komponenten der Kraftstoff- und Ölversorgung hängt nicht zuletzt vom Triebwerkstyp ab. Sind die Geräte, wie bei Triebwerken von Kampfflugzeugen üblich, am Bypasskanal oder am Fangehäuse befestigt, so besteht die Gefahr, dass die **Schockbeanspruchung beim Schaufeleinschlag** oder/und starke Vibrationen des ND-Rotors die Befestigung überlastet. Auch ein Bruch von Kraftstoff- oder Ölleitungen mit der **Gefahr eines Feuers** kann als Folgeschaden eintreten.

Der Ausrieb von brennbaren Anstreifbelägen führt zu entzündlichem Staub. Damit besteht die Gefahr einer **Staubexplosion**. Eine solche Explosion kann Flanschverbindungen so überlasten, dass Gehäuse abgerissen oder aufgerissen werden.

Heftige Anstreifvorgänge im Verdichter sind in der Lage ein **Titanfeuer** zu zünden.

Von **Anstreifvorgängen ausgelöste** hohe Torsionsmomente können zum **Bruch des Rotorverbands** führen. Auch eine Rotortrommel kann durch **Überhitzung und/oder Querschnittsschwächung** bruchgefährlich geschädigt werden.

Typische Belastungen am Triebwerk im "Containmentfall" bei einem Fanschaufel-Bruch.

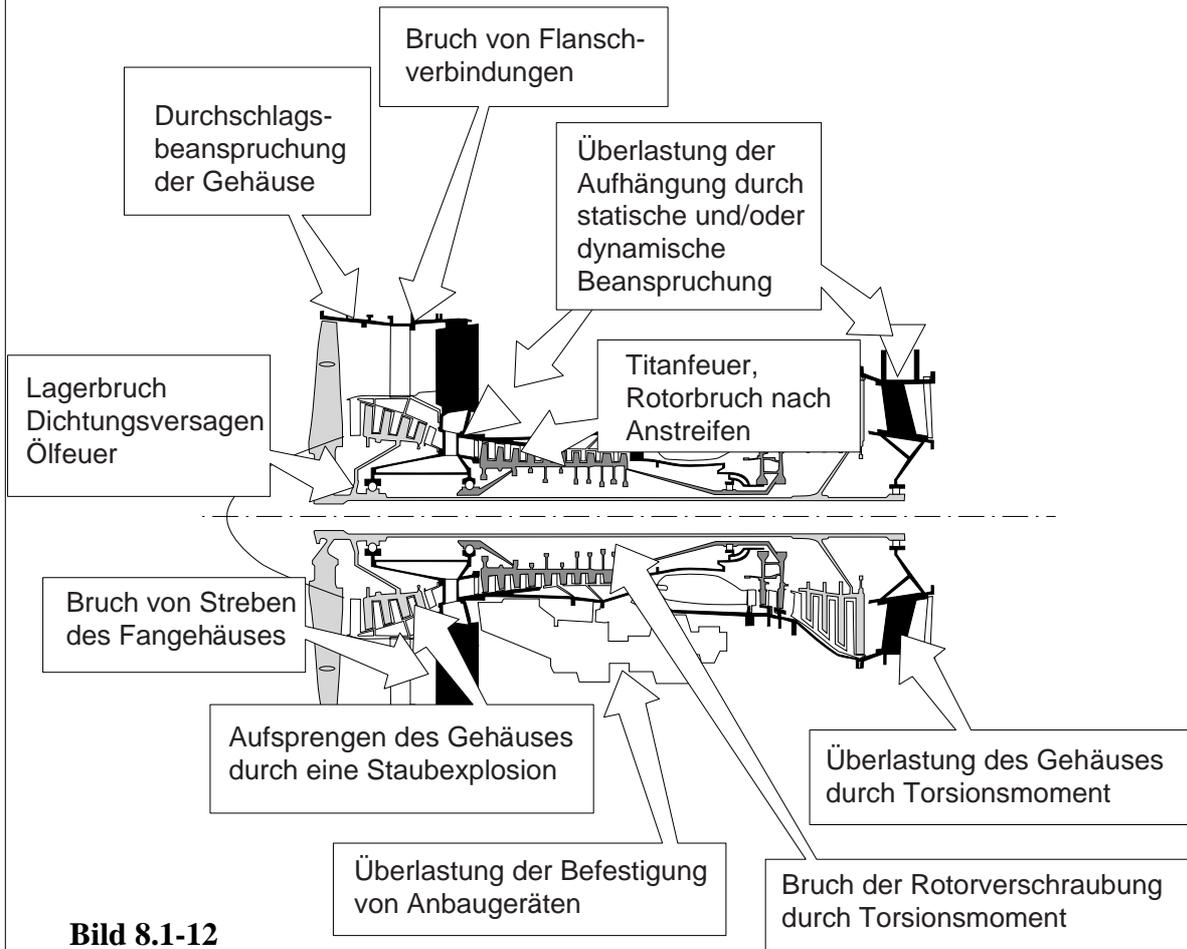
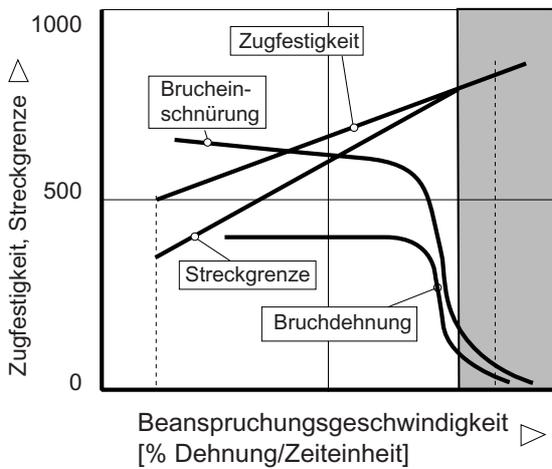


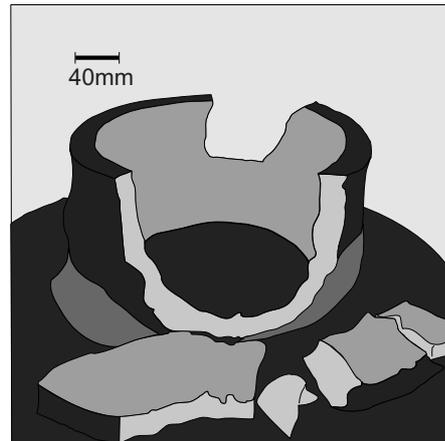
Bild 8.1-12

Bei Schlagbeanspruchung, d.h. hohen Dehnungsgeschwindigkeiten, verhalten sich viele zähe Werkstoffe spröde.

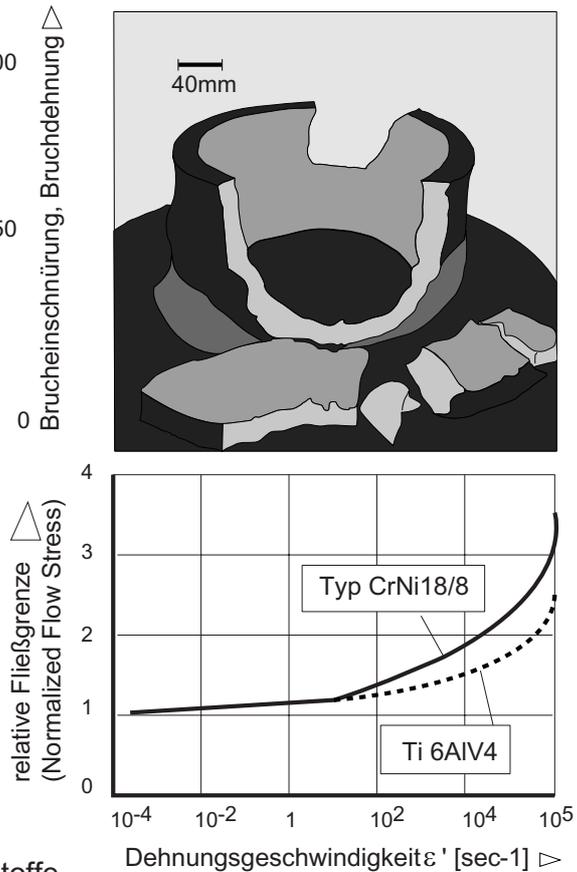
Verhalten eines Baustahls bei verschiedenen Beanspruchungsgeschwindigkeiten



Berstring aus Baustahl nach dem Bruchtest eines Turbinenrades



Interessanterweise hat ein rostbeständiger austenitischer Stahl mit relativ niedriger Zugfestigkeit bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten Vorteile gegenüber einer hochfesten Titanlegierung (ohne Berücksichtigung des Gewichts)..



Verhalten verschiedener Gehäusewerkstoffe

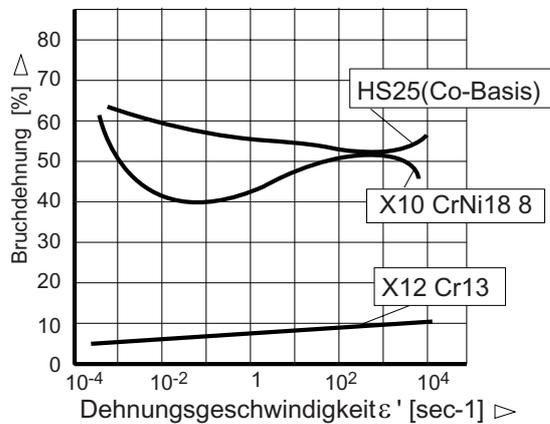
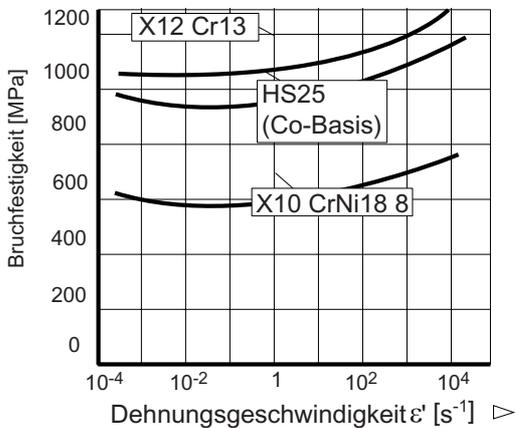


Bild 8.1-13

Bild 8.1-13 (Lit 8.1-7 und Lit.8.2-21): Im **Containmentfall** sind sowohl auftreffende Bruchstücke, Gehäuse und von Folgeschäden beeinflusste Bauteile hohen **Verformungsgeschwindigkeiten** unterworfen. Um Schadensabläufe mit hohen Belastungsgeschwindigkeiten, zu denen Containmentvorgänge zählen, richtig zu beurteilen, ist es wichtig, das Werkstoffverhalten zu kennen.

Die Skizze oben rechts zeigt ein ca. 20 mm starkes Rohr aus einem niedrig legierten Baustahl, der sich bei einem normalen Zerreiversuch ausgeprägt duktil verhält. In diesem Rohr wurde ein integrales Turbinenrad eines kleinen Hubschraubertriebwerks in einem Schleuderstand bei ca. 50 000 U/min zum Bersten gebracht. Der **Baustahl verhielt sich dabei äußerst spröd**. Es brachen mehrere größere Wandstücke ohne nennenswerte Verformung aus. Die aufgenommene Bruchstckenergie war dabei offenbar gering. Ein solcher Werkstoff eignet sich also nicht gut für einen Containmentring. Im Allgemeinen ist eine Schmiedeversion einer Gussversion des gleichen Werkstoffes in der Zähigkeit überlegen.

Schweißungen an Containmentringen haben sich als besonders problematisch herausgestellt, da sie selbst Kerben darstellen (Formkerbe- z.B. Einbrandkerbe, Steifigkeitskerbe z.B. bei starker Nahtüberhöhung und Gefgekerbe) und weil das Gussgefüge der Schweißnaht eher zu einem Sprödbruch neigt.

Das Diagramm oben lnks zeigt das beschriebene Verhalten. Man erkennt, dass mit steigender Verformungsgeschwindigkeit die Streckgrenze stärker ansteigt als die Zugfestigkeit und diese im Versprdungsbereich erreicht. **Wenn die Streckgrenze gleich der Zugfestigkeit ist, erfolgt der spontane Bruch** ohne dass es zu nennenswerter plastischer Verformung kam, **das Teil bricht spröd**. Offenbar erfolgt nicht eine gleichmäßige Abnahme der Bruchdehnung, sondern ein plötzlicher Steilabfall bei einer bestimmten Dehnungsgeschwindigkeit.

Dieses ausgeprägte Versprdungsverhalten zeigen viele Werkstoffe, zumindest bei den für den Containmentfall interessanten Verformungs-

geschwindigkeiten nicht (Diagramme unten), obwohl ein Festigkeitsanstieg durchaus zu beobachten ist (mittleres Diagramm). Diese Werkstoffe sind deshalb für Containmentringe geeigneter. Hierzu gehören **Superlegierungen und austenitische Sthle** bei denen der Effekt sogar ausgeprägter als bei der hochfesten Titanlegierung **Ti AlV4** ist. **13% Cr-Stahl** zeigt zwar noch keinen Steilabfall, seine Bruchdehnung ist jedoch vergleichsweise gering.

Bei **Kustharzen und Faserverstrkten Kunststoffen** kann die Versprödung der Matrix bei Hochgeschwindigkeitsbeanspruchung besonders ausgeprägt sein. So verhält sich Polyimid bei niedriger Verformungsgeschwindigkeit, z.B. einem Zugversuch, auerst zäh und nimmt viel Energie auf. Bei Vogelschlag mit hoher Aufprallgeschwindigkeit wie bei einem **Kampfflugzeug** zu erwarten, ist jedoch dieses Verhalten nicht nutzbar. Man beobachtet ein „glasprdes“ Verhalten. Das schränkt die Anwendung für einen **rotierenden Nasenconus** (spinners, Band 3 Bild 14-32) oder eine **Fanschaufel** deutlich ein.

Dass die Wandstärke einen großen Einfluß hat ist selbstverständlich, weniger Beachtung finden die Temperatur des Containments und die Einspannungsverhältnisse.

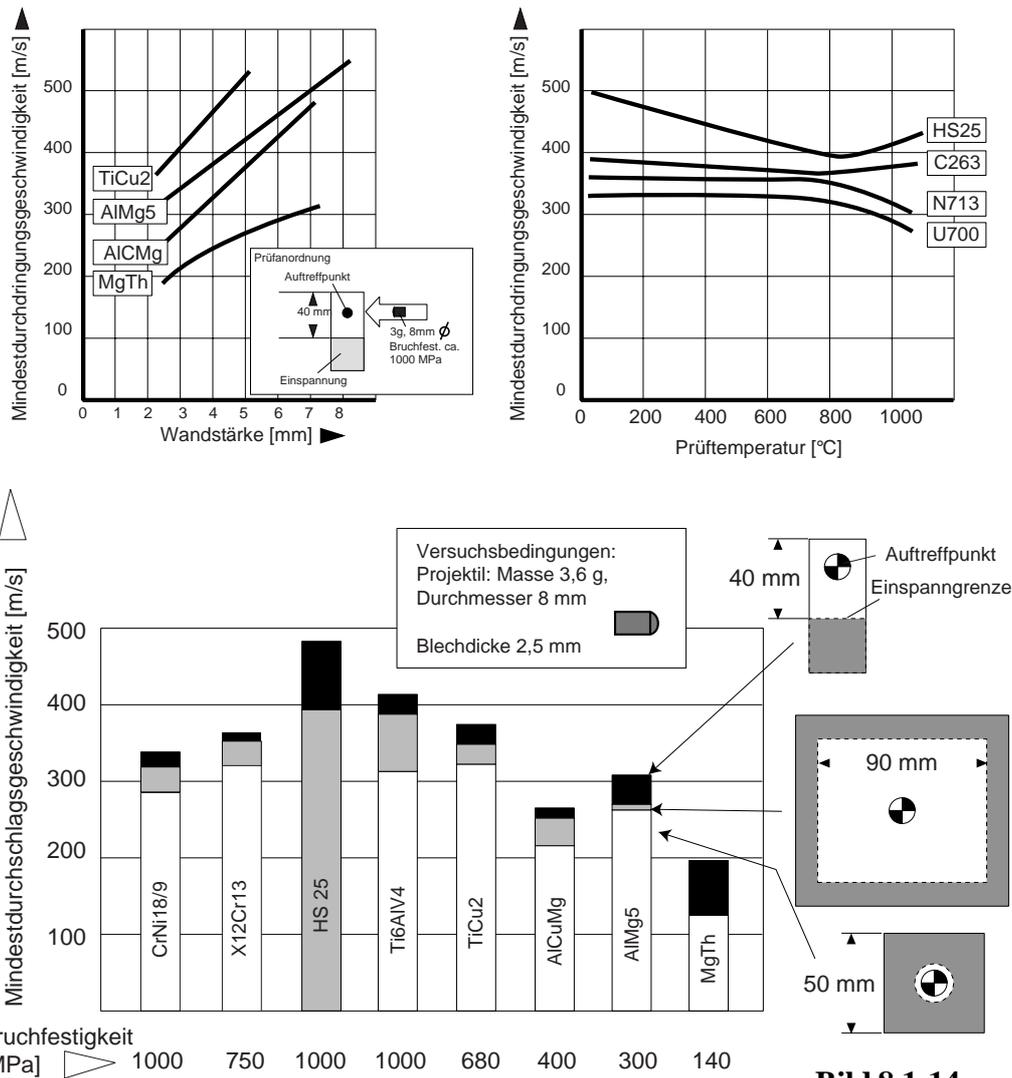


Bild 8.1-14

Bild 8.1-14 (Lit 8.1-7): Mit der **Wandstärke** steigt die **Mindest-Durchdringungsgeschwindigkeit** in erster Näherung linear an. Die Steigung dieser Geraden kann jedoch werkstoffabhängig durchaus unterschiedlich sein (Diagramm oben links). In erster Näherung steigt die **Mindest-Durchdringungsgeschwindigkeit**

mit der **Zugfestigkeit** des Gehäusewerkstoffs. Interessant ist, dass dies für manche Superlegierungen bei höheren Temperaturen offenbar nicht gilt (Diagramm rechts). Dieses Verhalten dürfte im Zusammenhang mit einer Festigkeitssteigerung im fraglichen Temperaturbereich und/oder einem Duktilitätsanstieg zu sehen sein.

Gehäuseschaden durch anstreifenden Rotor.

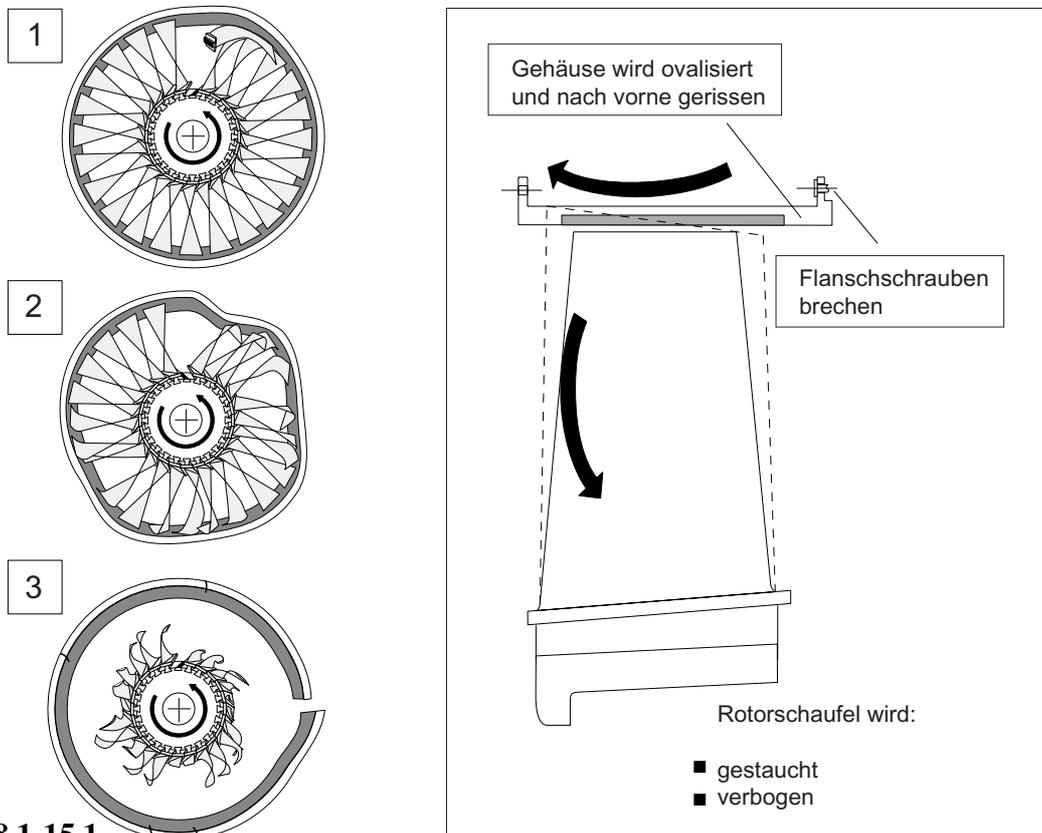


Bild 8.1-15.1

Bei oberflächlicher Betrachtung könnte der Eindruck entstehen, dass eine allseitig eingespannte, gut „abgestützte“ Gehäusewand einem auftreffenden Bruchstück mehr Widerstand entgegensetzt als eine flexibel aufgehängte Wand. Dem ist bei hohen Aufschlaggeschwindigkeiten nicht so.

Das Schaubild unten zeigt die Mindest-Durchschlagsgeschwindigkeit verschiedener Werkstoffe bei unterschiedlicher Einspannung. Diese Einspannungsbedingungen variieren die Nachgiebigkeit der Probe. Je weniger die Probe nachgeben kann (weiße Balken), um so kleiner ist die Durchschlagsgeschwindigkeit. Den höchsten Durchschlagswiderstand bzw. die höchste Mindest-Durchschlagsgeschwindigkeit hat die einseitig eingespannte Probe (schwarzer Balkenanteil).

Bild 8.1-15.1: Ein Schaufelbruchstück, das beim Auftreffen selbst keine gefährliche Gehäusebelastung erzeugt, kann zum Bruch des Gehäuses führen und austreten. Die Gehäuse-ringe werden in diesem Fall beim „Containmentvorgang“ im **Bereich der Verschraubungslöcher** an den Flanschen überlastet und reißen ein. Die nachfolgende Rissausbreitung in die Gehäusewand führt zum **Ausbrechen größerer Wandstücke** (Lit. 8.1-21). Eine entsprechende konstruktive Verstärkung der Flanschverbindungen zur Vermeidung dieses Versagensmodus zeigt Bild 8.2-15.

Skizze 1 zeigt den Zeitpunkt des Abschleuderns eines größeren Schaufelbruchstücks einer Fanstufe. Diese wird **von den folgenden Schaufeln „überlaufen“**. Das **Aufdrehen der Schaufelblätter vergrößert die radiale Länge der Schaufeln**, sie werden dabei verbogen und ge-

staucht (Skizze rechts). So erfährt das Gehäuse **große pulsierende Radialkräfte**. Es wird ovalisiert und nach vorne gerissen.

Das **Gehäuse gerät in starke Schwingungen** (Skizze 2, siehe Beispiel 8.1-6.2, Bild 8.1-15.2), **die sich selbstverstärkend so weit aufschaukeln, dass die Rotorscheaufeln eine extreme Biegebeanspruchung erfahren**. In der Endphase (Skizze 3) kommt es zum Bruch der gesamten Rotorbeschaufelung. Um diesen Vorgang beherrschen zu können, ist zumindest eine massive Flanschverbindung und eine biegesteife Gehäusewand vorzusehen (Bild 8.2-15). Dieser **Schadensmechanismus wird durch nestingfähige Gehäuse vermieden** (Bild 8.2-14).

Bild 8.1-15.2 (Beispiel 8.1-6.2, Lit. 8.1-23): Der Schaden wurde durch das Anstreifen des Fan am Gehäuse ausgelöst (siehe Beispiel 8.1-6.2). Die Reibungskraften regten synchrone Schwingungen zwischen Fanggehäuse und Fanrotor an (Bild 8.1-15.1). Die so **vom Rotor in das Fanschaufelsystem eingeleitete Energie erzeugt in den Fanschaufeln derartig hohe dynamische Kräfte**, dass sich die Schaufeln aus den Schwalbenschwanznuten bewegten und frei wurden. Die folgenden Unwuchten führten dazu, dass sich der gesamte Fanrotor, das Fanggehäuse und der vordere Einlaufbereich (engl. „bellmouth“) vom Triebwerk lösten. Triebwerksversuche am Prüfstand haben diesen Schadensmechanismus bestätigt. So traten z.B. in einem Fall, der den Wuchtzustand des Fanrotors untersuchte, bei maximaler Leistungsabgabe Vibrationen auf. Nach 3 Minuten in diesem Zustand fand eine laute Explosion statt. **Alle Fanschaufelblätter hatten sich vom Rotor gelöst, der Einlauftrichter und der Austrittconus (!) hatten sich vom Triebwerk getrennt** und der Prüfstand war schwer beschädigt. Mehrere Schrauben des Einlauftrichters zeigten Schwingbrüche, die restlichen Schrauben brachen durch Überlastung kombinierter Zug/Biegespannungen. Offenbar hatte eine

gestörte Einlaufströmung den Fan zu starken Schwingungen mit starkem Anstreifen der Schaufelspitzen angeregt. Dabei kam es zum Überlappen der „Clapper“ („shingling“) und axialer Rissbildung an den Schaufelfüßen im Bereich der Aufnahmenuten in der Scheibe. Dies führte zu einer Vorwärtsbewegung (Bild 6.1-16 und Bild 6.2-5.3) welche die axialen Fixiernasen abscherte und den Rotorspinner axial überlastete. Damit konnten alle Schaufeln axial aus den Schaufelnuten austreten.

Von einem zweiten Fall des gleichen Triebwerkstyps am Prüfstand wurde berichtet, der zur Untersuchung des vorstehend beschriebenen Schadensmodus dienen sollte. Auch hier trat der Schaden beim Versuch einer **Beschleunigung des Fan** ein. Auch hier wurde der Schaden vom Anstreifen des Fanrotors mit dem Gehäuse eingeleitet und Energie aus dem Rotor in das synchron schwingende System Fanggehäuse/Fanrotor eingespeist. Die Folge war der Austritt aller Fanschaufeln und das Abfliegen des gesamten Fanrotors mit den umgebenden statischen Teilen. Es wurde als eine Schwingung („6-wave mode“) des Schaufelkranzes identifiziert, die sich mit halber Umlaufgeschwindigkeit in Rotationsrichtung des Fanrotors bewegte. Die synchron mit dem Gehäuse angeregte Schwingung des Rotors führte zu extremen Amplituden zwischen Rotor und Stator. Diese steigerte sich, bis die **Anstreifkräfte die Schaufeln derart in den Schwalbenschwanznuten nach vorne und hinten bewegten** (axial!), dass Haltenasen und Spinner überlastet wurden. **Das erste freiwerdende Schaufelblatt erzeugte dermaßen große Unwuchten**, dass die Befestigungsschrauben des Haltekonus vom vorderen Lagers versagten.

Schweres Anstreifen des Fan als Folge einer Überdrehzahl führte zu extremen Schaufel-schwingungen und dem Austritt der Schaufeln.

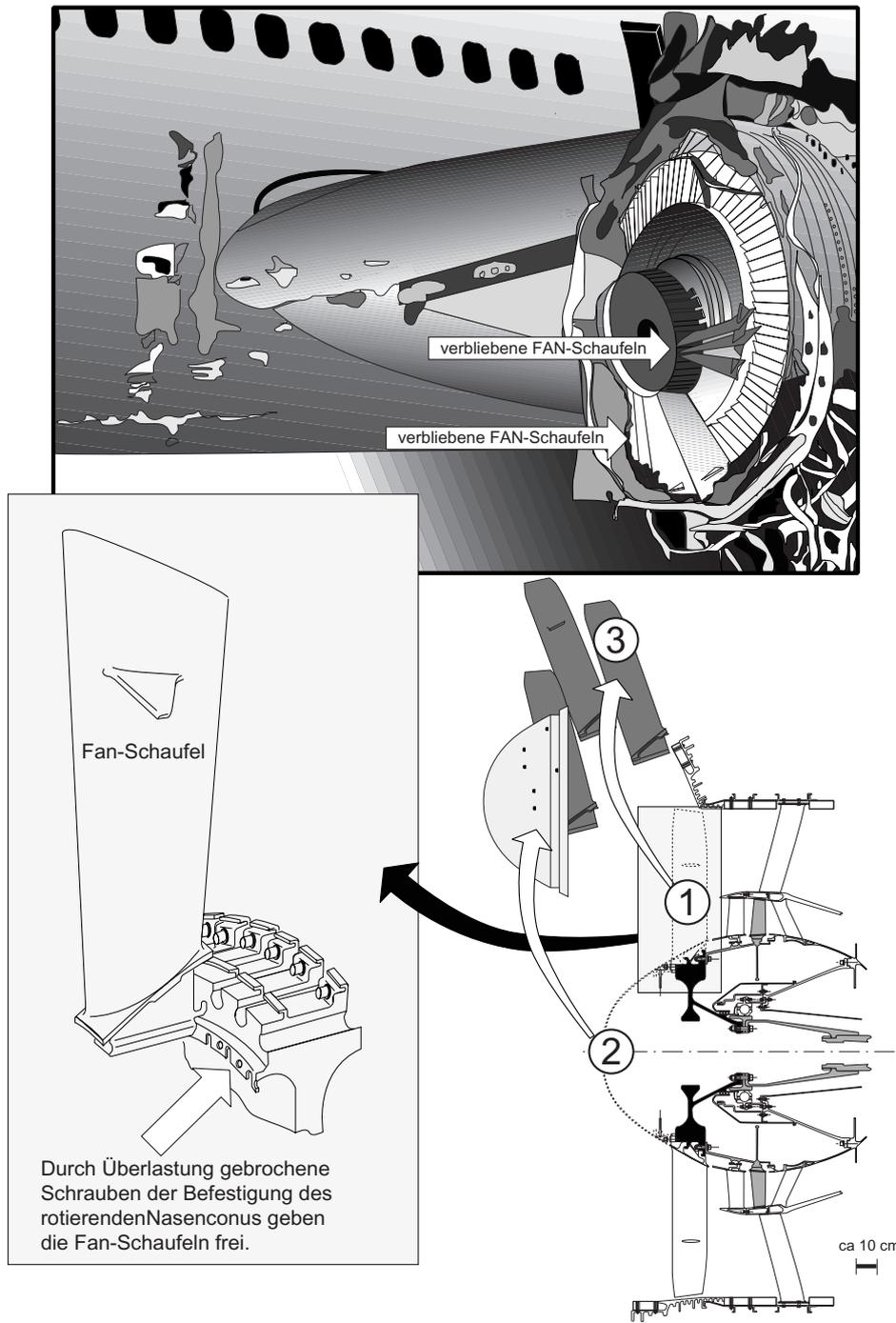
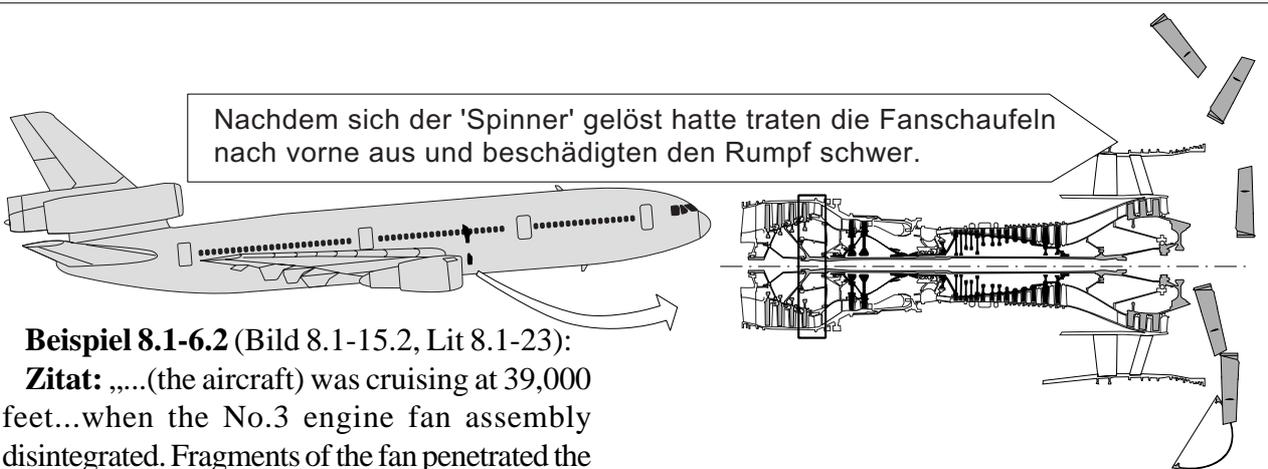


Bild 8.1-15.2



Beispiel 8.1-6.2 (Bild 8.1-15.2, Lit 8.1-23):

Zitat: „... (the aircraft) was cruising at 39,000 feet... when the No.3 engine fan assembly disintegrated. Fragments of the fan penetrated the fuselage, the Nos. 1 and 2 engine nacells, and the right wing. As a result, the cabin depressurized and one cabin window, which was struck by a fragment of the fan assembly, separated from the fuselage. **A passenger, who was sitting next to the window, was forced through the opening and ejected from the aircraft.** The body of the passenger had not been recovered. the aircraft was landed safely...

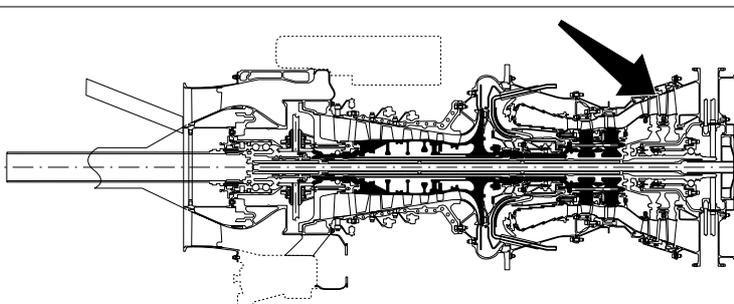
The NTSB determines that the probable cause of the accident was the desintegration of No. 3 engine fan assembly as a result of an **interaction between the fanblade tips and the fan case**. The fan-tip rub condition was caused by the **acceleration of the engine to an abnormally high fan speed which initiated a multiwave, vibratory resonance within the fan section** of the engine. The precise reason or reasons for the acceleration and the onset of the destructive vibration could not be determined conclusively.“

Kommentar: Dieser Schaden dürfte eine gewisse Allgemeingültigkeit haben, was das Auslösen von selbstverstärkenden Schwingungen beim Anstreifen von Fanschaufeln betrifft. Hier sind geeignete konstruktive Massnahmen vorzusehen um derartige katastrophale Schäden zu vermeiden (Bild 8,2-14 und Bild 8.2-15).

Im Zusammenhang mit dem Schaden könnten die folgenden Angaben aus dem Accident Report von Interesse sein.

„About 36 sec. before the initial explosion, the flightcrew pulled the N1 tachometer circuit breakers to determine how this disconnection would affect the automatic throttle system’s operation. The system circuitry is such that with these circuit breakers pulled, the autothrottle system’s N1 limiting authority is cancelled.

If the N1 circuit breaker were disengaged with the autothrottle system in use, the throttle could advance beyond normal authority limits.“



Beispiel 8.1-7 (Lit 8.1-14):

Zitat: „... (the customer) also had reported an uncontrolled overspeed problem in the engine... (the OEM) resolved the problem by modifying the engine, **giving it a redundant overspeed protection system.**

Kommentar: In diesem Fall handelt es sich um ein Wellenleistungstriebwerk, das ursprünglich für Hubschrauberantriebe zur Anwendung kam und hier einen Einsatz als Propellerturbine hat.

Wenn der Regler hinter einer Getriebekette am Rotor "hängt" besteht die Gefahr unkontrollierter Überdrehzahl

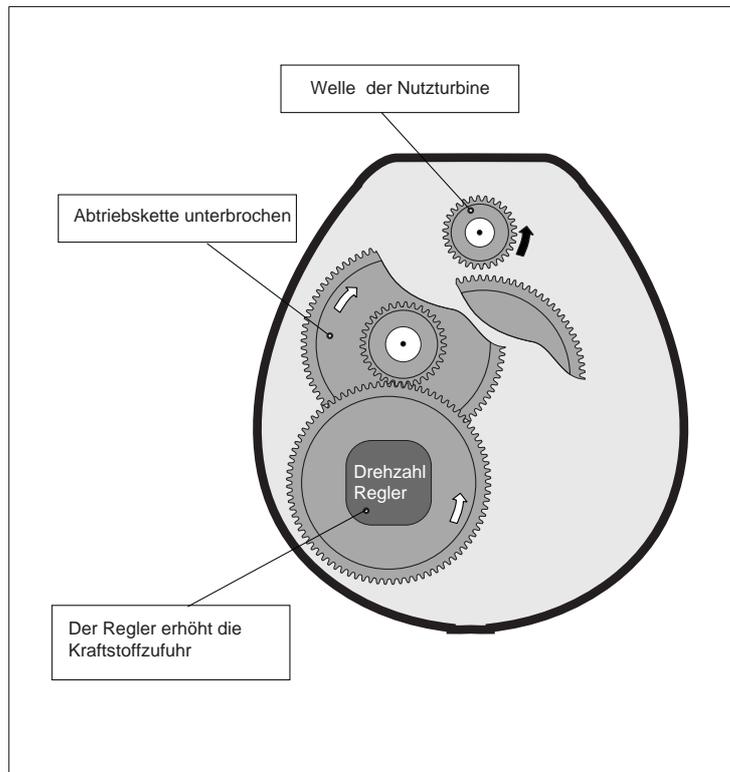
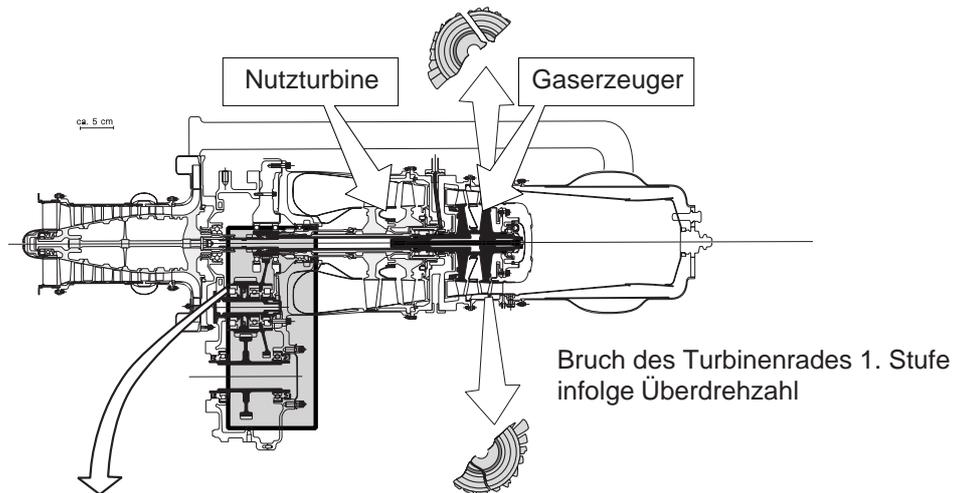
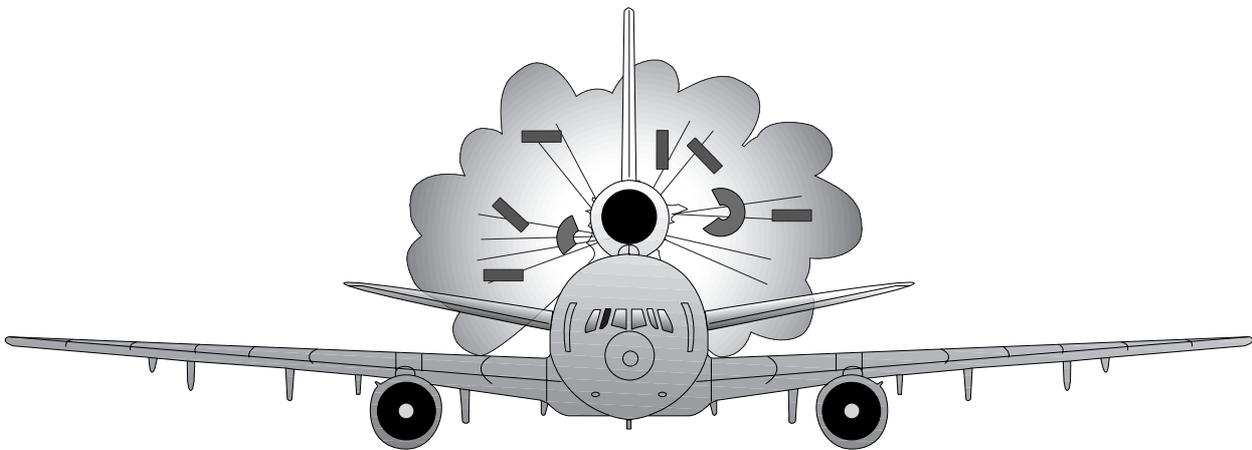


Bild 8.1-16

Bild 8.1-16: Die Entstehung von Rotorbruchstücken als Folge einer **unkontrollierten Überdrehzahl** ist offenbar trotz Vorkehrungen, wie einer Auslegung des Rotors auf Sicherheit für hohe Überdrehzahlen und einer geeignet

ausgelegten Regelung (Beispiel 8.1-7), nicht ganz zu vermeiden.

Im dargestellten Fall handelt es sich um ein zweiwelliges Hubschraubertriebwerk kleiner Leistung mit einem Gaserzeuger und einer



Beispiel 8.1-8 (Lit 8.1-15, Bild 8.1-17 und Band 4 Bild 16.2.1.1-8.2):

Zitat: „A burst of shrapnel that followed failure of the tail-mounted...engine...caused 50 hits on the empanage....**The first-stage fan disk** of the No. 2 engine is the prime suspect in the investigation....’The desintegration of the fan was of such magnitude that it tore all the lines not just in one place, and even in the side walls of the aircraft,’ one investigator said. Investigators are unsure whether any design of hydraulic systems could survive the desintegration that occurred on

the ...flight. Some aircraft are equipped with fuse links- devices that detect changes in flow of hydraulic fluids- which shut off and preserve fluids to retain some form of control. But such devices are not a perfect solution.“

Kommentar: Der Bruch der Fanscheibe war auf eine **Werkstoffinhomogenität der Titanlegierung** zurückzuführen. Von dieser Schwachstelle ging ein LCF-Riss aus. Derartige Scheibenbruchstücke lassen sich nicht im Triebwerk halten.

*Nutzturbine. Der mechanische Regler wird von der Nutzturbine über das Hauptgetriebe angetrieben. Beim Bruch eines Zahnrad „vor dem Regler“ (Skizze unten) registriert dieser einen Drehzahlabfall und versucht über eine erhöhte Kraftstoffzufuhr die Drehzahl wieder anzuheben. Dabei kommen Gaserzeuger und Nutzturbine auf Überdrehzahl, was zum Bruch eines Turbinenrades des Gaserzeugers führt. Man erkennt an diesem Fall, wie **wichtig in Ausnahmefällen der Ort der Drehzahlabnahme für einen sicheren Betrieb sein kann.***

Bild 8.1-17 (Lit 8.1-15, Beispiel 8.1-8 und Band 4 Bild 16.2.1.1-8.2): Die **Hydrauliksysteme** für die Betätigung der Höhen- und Seitenrudder waren mehrfach redundant. Trotzdem fielen sie alle durch Beschädigungen von den Fanscheibenbruchstücken aus. Interessant ist, dass auch die in einem Streuwinkel von 33° zu erwartenden weniger energetischen Bruchstücke (siehe Bild 8.1-3) für gefährliche Zerstörungen ausreichten.

Bei 33° Streuung können offenbar auch scheinbar redundante Systeme ausfallen.

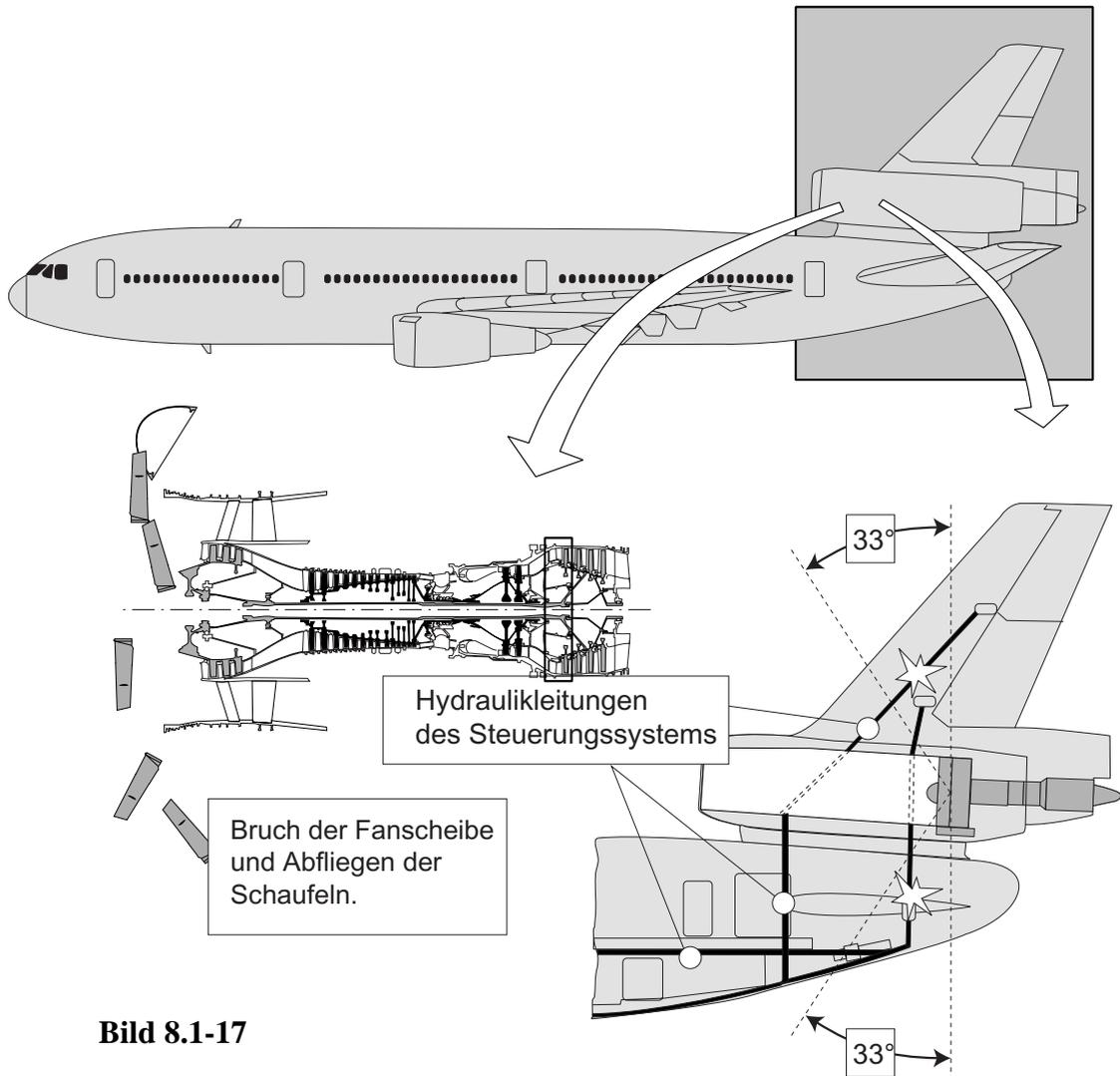
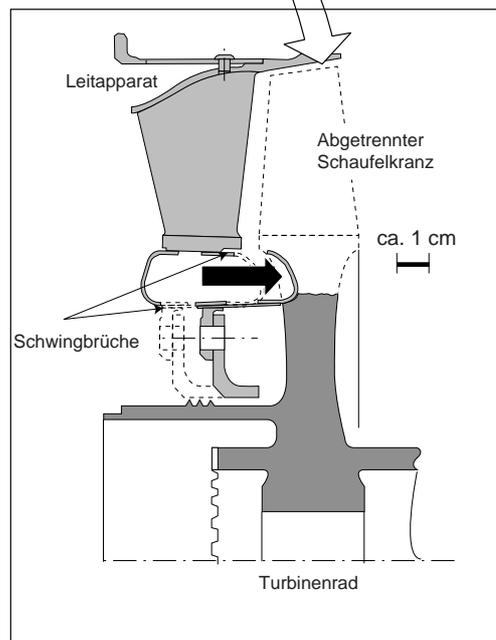
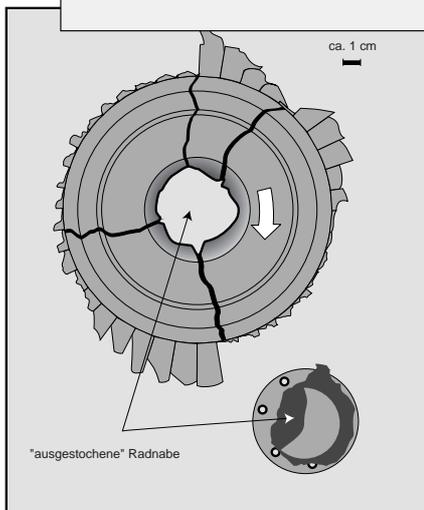
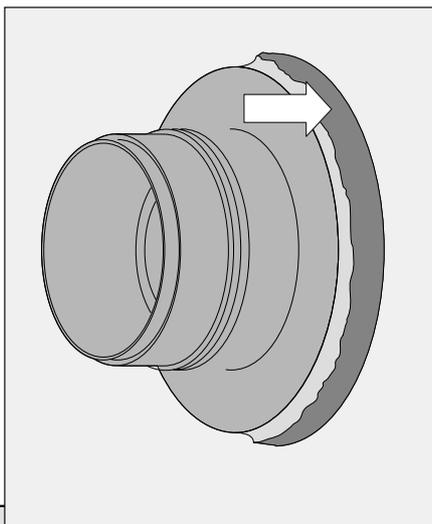
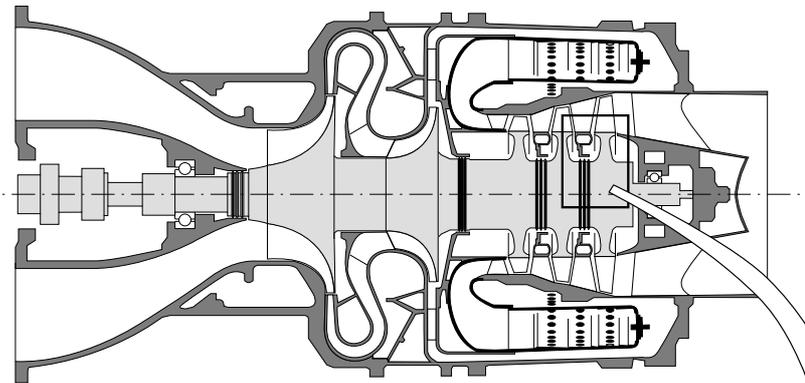


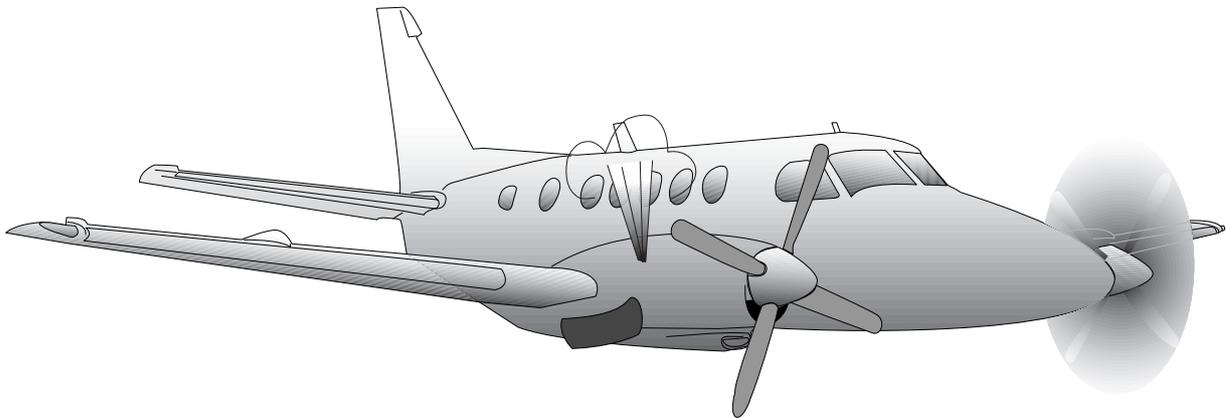
Bild 8.1-17

Erstaunlich dünne Bleche können beim Anstreifen massive Querschnitte durchtrennen.



Durch ein dünnes Blechteil ausgestochene Nabe eines Turbinenrads

Bild 8.1-18



Beispiel 8.1-9 (nach G. Lange, Lit 8.1-16, Bild 8.1-18):

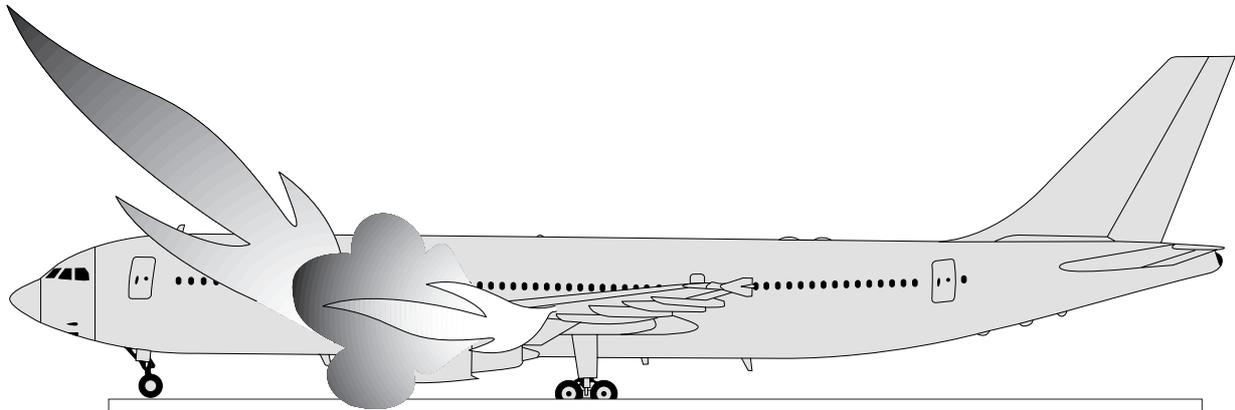
Zitat: „Infolge eines komplexen Schadensablaufes hatte sich ein Flugzeug-Triebwerk nach 5200 Betriebsstunden zerlegt... Wie aus der Prinzipskizze hervorgeht, ist das Leitrad mit einem Dehnungselement aus zwei eingelöteten, gewölbten Blechen zur Kompensation der Wärmedehnungen ausgestattet. Aufgrund der Low-Cycle-Beanspruchung beim An- und Abfahren war das anströmseitige **Dehnblech** auf dem gesamten inneren Umfang, das abströmseitige auf 85% des äußeren Umfangs **durchtrennt** worden (Steifigkeitssprünge an den Lötstellen). Die Wellendichtung und das abströmseitige Blech stellten sich darauf hin schräg und streiften am Lauf- rad der 3. Stufe an, wodurch sich die vorspringende Wölbung des Blechbogens auf ca. zwei

Dritteln des Umfangs abschliff. **Der dabei am inneren Stützring der Wellendichtung entstandene scharfkantige Blechkranz (Kobalt-Basislegierung) stach wie ein Fräswerkzeug eine 3 mm tiefe umlaufende Nut in das benachbarte Lauf- rad ein.** Für die Qualität dessen Werkstoffes (Nickel-Basislegierung) spricht, dass dieser Einstich nicht sofort zur Zerstörung führte. Erst nachdem sich an seinem Grund zahlreiche Schwingungsrisse entwickelt hatten (Kerbwirkung und Querschnittsschwächung), zerlegte der Restbruch das Lauf- rad. Anstelle der Inspektionsintervalle von 6000 Stunden hätte der Hersteller die Anzahl der Starts als Überprüfungs- kriterium heranziehen sollen.“

Kommentar: Dieser Schaden demonstriert auf eindrucksvolle Weise den typischen Effekt der Durchtrennung dicker Querschnitte beim Anstreifen an ein dünnes Blech.

Bild 8.1-18 (Lit 8.1-16, siehe Beispiel 8.1-9): Bei dem dargestellten Wellenleistungstriebwerk (Skizze oben) kam es durch das **Anstreifen eines dünnen Blechs im Scheibenbereich** (Skizzen Mitte) zum Bruch eines Turbinenrads. Der **Turbinenradbruch** durch das Anstreifen eines filigranen, **im Vergleich zum Radquerschnitt dünnen Blechquerschnitts**, ist erfahrungsgemäß ein typischer Schadensablauf. Diese Gefahr wird häufig unterschätzt. Offenbar verhält sich das Blech ähnlich wie eine

Schmelzbandsäge und kann massive Querschnitte trennen. Die Skizze unten links zeigt ein integral gegossenes Turbinenrad aus einem anderen Triebwerk, das auf ähnliche Art bis zum Bruch geschwächt wurde. Gerade membranartige Lötstrukturen haben sich als Auslöser für diese Schadensart erwiesen (Bild 8.2-22). Um derartige Schäden zu vermeiden, sind **geeignete konstruktive Vorkehrungen** zu treffen (Lit 8.1-4, Bild 8.2-21 und 8.2-22).



Beispiel 8.1-10 (Lit 8.1-17, Bild 8.1-19):

Zitat: „... It happened about 600 meters from the point of brake release...Aircraftspeed at that time was about 100 kt. The abort was initiated about 120 kt., and the aircraft came to a stop approximately 1,900 meters from the start of the takeoff roll. Leaking fuel from debris impact points on the lower right wing was ignited, and flames were fanned by a tailwind of about 8 kt. The fire spread below the fuselage to the forward part of the aircraft. Evacuation of the passengers and crew was made through the ...rear left-hand door.

Damage from flying engine debris was incurred to the right wing and flaps and slats. **Impacts also occurred on the left engine, which apparently resulted from pieces thrown by the right-hand powerplant, which bounced off the runway.** All four tires on the right main landing gear were blown.

Kommentar: Dies ist ein Fall bei dem ein Rotorbruchstück das zweite Triebwerk ebenfalls beschädigte.

Bild 8.1-19 (Beispiel 8.1-10, Lit 8.1-17): Dieser Fall zeigt, dass es durchaus vorkommen kann, dass ein Rotorbruchstück (Skizze unten) so von einem Triebwerk („A“) abgeschleudert wurde, dass es ein Triebwerk am anderen Flügel („C“) beschädigen kann. Im vorliegenden Fall prallte das relativ kleine **Kranz-Bruchstück** von der Startbahn („B“) ab. Es wurden jedoch auch andere Fälle bekannt, bei denen im Flug die Beschädigung eines Triebwerks am anderen Flügel eintrat.

Ein lehrreicher Turbinenscheibenschaden

LCF-Ausbruch am Scheibenkranz einer HDT-Scheibe. Das austretende Bruchstück wurde von der Startbahn reflektiert, zerstörte Reifen des Hauptfahrwerks und das gegenüberliegende Triebwerk.

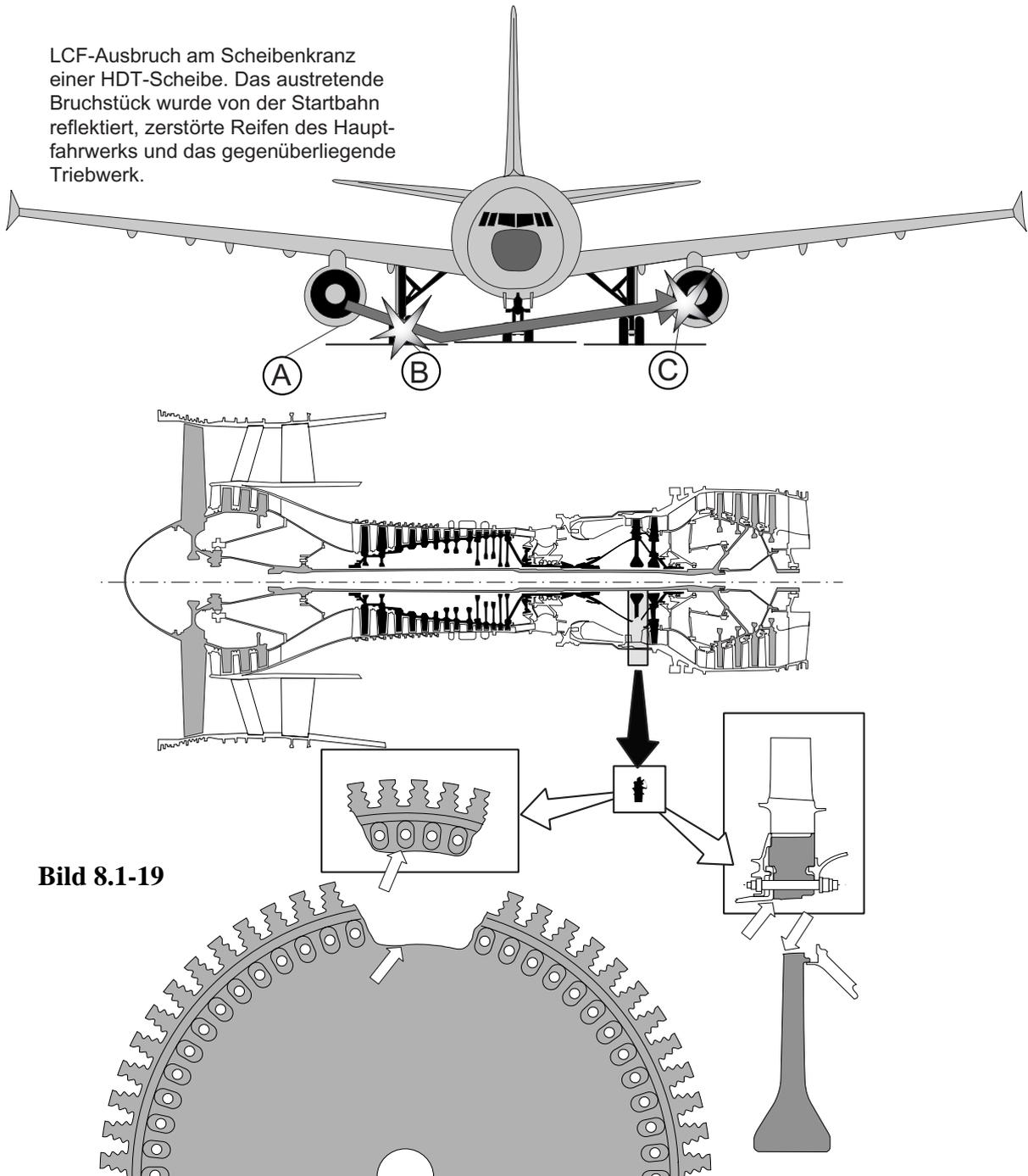


Bild 8.1-19

Literatur zu Kapitel 8.1

8.1-1 E.A. Wittmer, T.R. Stagliano, J.A. Rodal, „Engine Rotor Burst Containment/Control Studies“, Proceedings AGARD-CP-248 der AGARD Conference „Stress, Vibrations, Structural Integration and Engine Integrity“, Seite 15-1 bis 15-30.

8.1-2 „T.W. Combe, D.F. Vowles, „Structural Effects of Engine Burst Non Containment“, Proceedings AGARD-CP-248 der AGARD Conference „Stress, Vibrations, Structural Integration and Engine Integrity“, Seite 9-1 bis 9-10.

8.1-3 C.J. Mangano, „Studies of Engine Rotor Fragment Impact on Protective Structure“, Proceedings AGARD-CP-248 der AGARD Conference „Stress, Vibrations, Structural Integration and Engine Integrity“, Seite 10-1 bis 10-24.

8.1-4 D. Mc Carthy, „Definition of Engine Debris and Some Proposals for Reducing Potential Damage to Aircraft Structure“, Proceedings AGARD-CP-248 der AGARD Conference „Stress, Vibrations, Structural Integration and Engine Integrity“, Seite 7-1 bis 7-10.

8.1-5 J.J. DeLuca, B.C. Fenton, S.P. Petrie, J.T. Salvino, „Lightweight Aircraft Turbine Protection“, Paper AIAA 93-1815 der „AIAA/SAE/ASME/ASEE 29th Joint Propulsion Conference and Exhibition“, June 28-30, 1993/Monterey, CA, Seite 1-7.

8.1-6 J.T. Salvino, G.J. Mangano, R.A. DeLucia, „Rotor Burst Protection: Design Guidelines for Containment“, Proceedings AGARD-CP-248 der AGARD Conference „Stress, Vibrations, Structural Integration and Engine Integrity“, Seite 19-1 bis 19-16.

8.1-7 J Thiery, (übersetzt aus dem Französischen) „Festigkeit von Triebwerksgehäusen bei Schaufelbrüchen“ Proceedings AGARD-CP-248 der AGARD Conference „Stress, Vibrations, Structural Integration and Engine Integrity“, Seite 7-1 bis 7-10.

8.1-8 NTSB Identification: CHI851A032, microfiche number 27668

8.1-9 NTSB Identification: DCA891A066, microfiche number 39111A

8.1-10 NTSB Identification: MIA96FA013.

8.1-11 NTSB Identification: DCA96SA026.

8.1-12 NTSB Identification: MIA96SA157.

8.1-13 NTSB Identification: NYC96IA168.

8.1-14 R.W. Moormann, „Power degradation target of CT7 improvements“, Zeitschrift Air Transport World, 3 /88, Seite 108.

8.1-15 J.Ott, „Investigators Find Reconstructed Tail of DC-10 Riddled With Damage“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, August 7, 1989, Seite 22 und 23.

8.1-16 G. Lange, „Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle“, DGM Informationsgesellschaft, Verlag, Seite 177.

8.1-17 „A300 Damaged by Engine Fire“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, March 29, 1982.

8.1-18 A.D. Lane, „Development of an Advanced Fan Blade Containment System“, DOT/FAA/CT-89/20, Final Report, Oct. 1988-Apr. 1989, Seite 1-25.

8.1-19 Dr. S.S. Birley, Dr. R.S. Tracey, Dr. M. Kearns, „The Effect of Microstructure on the Penetration Resistance of Titanium Laminates“, Proceedings Volume 3 Der Konferenz „Ballistics ‘92 1-3 June, 1992, Stockholm-Sweden. Seite 145-152.

8.1-20 „DC-10 CF6 Engine Investigation Pressed“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, November 12, 1973, Seite 28 und 29.

8.1-21 J.M.S.Keen, „Development of the Rolls-Royce RB.211 turbofan for airline operation“, ASE-Paper 700292 des „National Air Transportation Meeting“, New York N.Y., April 20-23, 1970. Seite 1-13.

8.1-22 S.W. Kandebo, „New Engine Test Rules Contested“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, October 10, 1994, Seite 33 und 34.

8.1-23 NTSB „Aircraft Accident Report NTSB-AAR-75-2“, File No. 1-0043, January 15, 1975, Accident November 3, 1973,Seite 1-55.