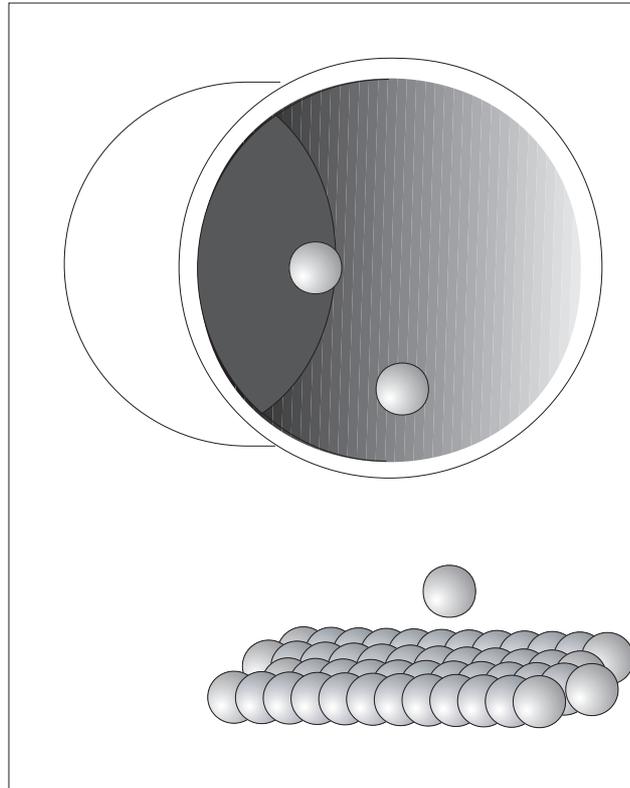


5.2.1.2 Ansaugen von Fremdkörpern



Triebwerke können Fremdkörper die sich in der Luft befinden ansaugen. Vom Fahrwerk aufgewirbelte Gegenstände auf der Start- bzw. Landebahn oder Teile des Fahrwerks selbst (z.B. Reifenstücke) sind relativ häufig angesaugte Fremdkörper (Bild 5.2.1.2-1 und 2). Dieser Gefahr versucht man durch geeignete konstruktive Maßnahmen zu begegnen. Bei Schubumkehrbetrieb besteht ebenfalls die Gefahr, dass aufgewirbelte Gegenstände und Partikel gefährlich nahe an die Triebwerkseinlässe gelangen (Bild 5.2.1.2-3).

Weniger einsichtig ist die Tatsache, dass auch massive Körper wie Steine oder Metallteile vom Boden angesaugt werden können (z.B. Schrauben). Eine derartig intensive Ansaugwirkung wird durch Ansaugwirbel („Vortexbildung“) möglich (Bild 5.2.1.2-5 bis 8). Um dieses Risiko zu minimieren, werden bei modernen Verkehrsflugzeugen mit großen Fantriebwerken am Flügel, deren Einlass sich relativ nah über dem Boden befindet (Bild 5.2.1.2-7), konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung der Vortexbildung getroffen (Bild 5.2.1.2-9).

Manche russische Kampfflugzeuge haben eine sehr effektive Vorrichtung um das Ansaugen von Fremdkörpern in der Start- und Landephase zu vermeiden (Bild 5.2.1.2-10). Es handelt sich um einen Klappenmechanismus im Einlaufkanal, der in Bodennähe geschlossen werden kann.

Der Trend zu immer höheren Wirkungsgraden und Leistungskonzentrationen macht neben einer Drehzahlerhöhung auch die Optimierung der Schaufelblattprofile notwendig. Damit werden die Schaufeln mechanisch (statisch und dynamisch) und aerodynamisch höher belastet. Der Trend

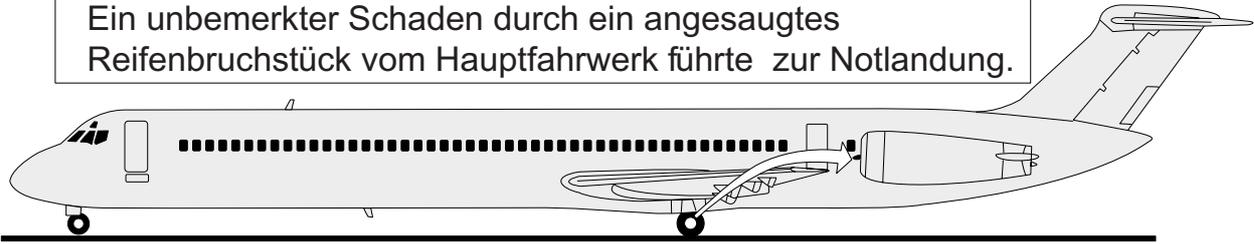
Fremdkörperschäden: Ansaugen

zu Überschallprofilen führt zu schärferen und dünnen Kanten. So machen sich im Vergleich zu Beschaukelungen älterer Triebwerke kleine Schäden (Aufrauhung, Profilveränderung, Deformation) bereits unzulässig stark bemerkbar und können deshalb nicht mehr toleriert werden (Lit. 5.2.1.2-2).

Äußere Einflüsse

Fremdkörperschäden: Ansaugen

Ein unbemerkter Schaden durch ein angesaugtes Reifenbruchstück vom Hauptfahrwerk führte zur Notlandung.



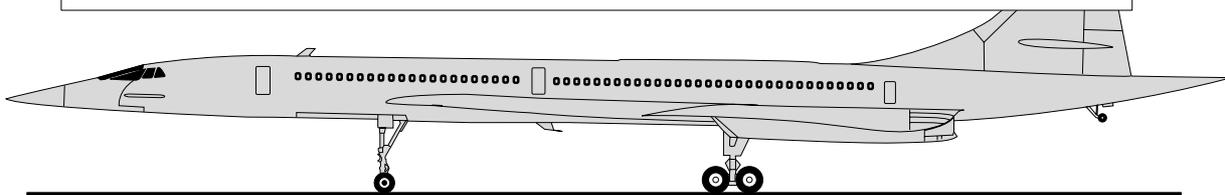
Beispiel 5.2.1.2-1 (Lit . 5.2.1.2-1):

Zitat: „...The take off roll progressed normally until a point 4 200 feet from initiation. The crew reported a vibration and the left engine power diminished. The take off was aborted, but the aircraft speed at the time of the abort and runway distance remaining was insufficient to avoid departing the end of the runway. The aircraft became mired in the rain soaked terrain up to the axle. Post-incident examination of the **left main gear tires indicated a failure of the carcass**....The cause of the initial power loss on the left engine was from the ingestion of the tire debris.“

Kommentar: Es handelt sich um einen kleineren Verkehrsflugzeugtyp mit zwei **hinten am Rumpf angeordneten Triebwerken** (ähnlich Bild 5.2.1.2-1 oben) mit niedrigem Bypassverhältnis. Diese Triebwerksanordnung scheint erfahrungsgemäß den Eintritt von aufgewirbelten oder abgeschleuderten Fremdkörpern in die Triebwerke zu begünstigen (Beispiel 5.2.1.2-2).

Der unten dargestellte Fall steht im Zusammenhang mit einem Reifenschaden der von einem scharfen Fremdkörper auf der Startbahn ausgelöst wurde. **Bruchstücke gerieten in ein Triebwerk und führten in der kritischen Startphase (Bild 2-13) zum Schubverlust.** Zusätzlich kam es zu einem Kraftstofffeuer weil offenbar ein größeres Reifenbruchstück den Flügel tank leck schlug. Den folgenden katastrophalen Schaden überlebte keiner der Mitfliegenden.

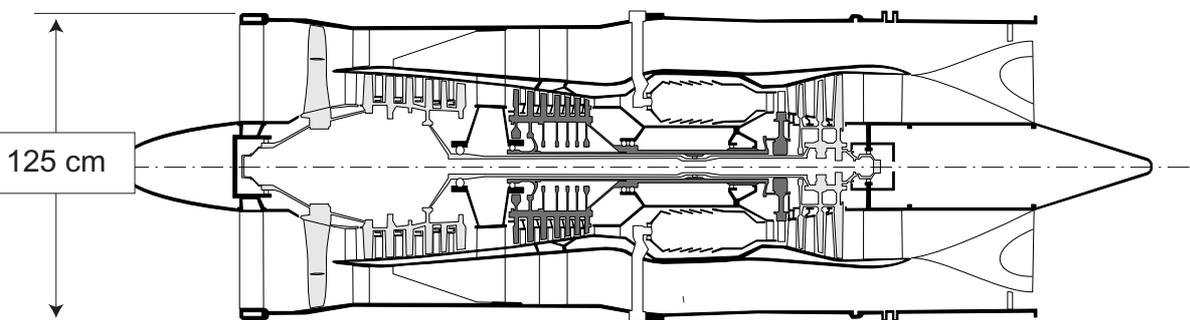
In diesem Fall führte ein Reifenbruchstück vom Hauptfahrwerk zur Katastrophe. Auch ein Triebwerk war betroffen.



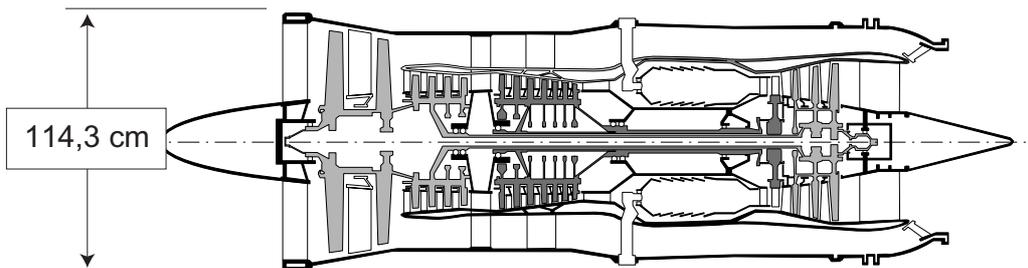
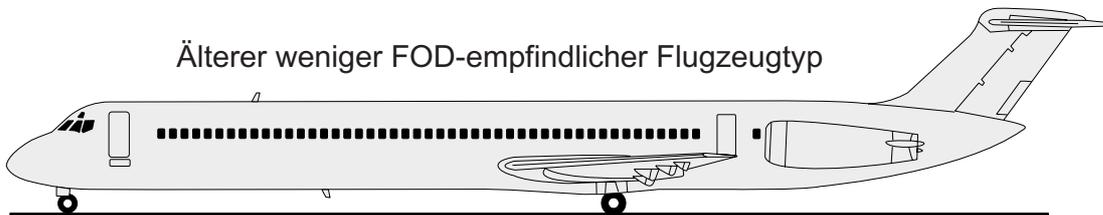
Fremdkörperschäden: Ansaugen

Beide Flugzeugtypen sehen gleich aus, trotzdem unterscheidet sich die Häufigkeit der Fremdkörperschäden in den Triebwerken deutlich. Grund ist die höhere Leistung bzw. der größere Eintrittsdurchmesser/-querschnitt für den höheren Durchsatz.

Neuerer Flugzeugtyp mit stärkeren Triebwerken



Älterer weniger FOD-empfindlicher Flugzeugtyp

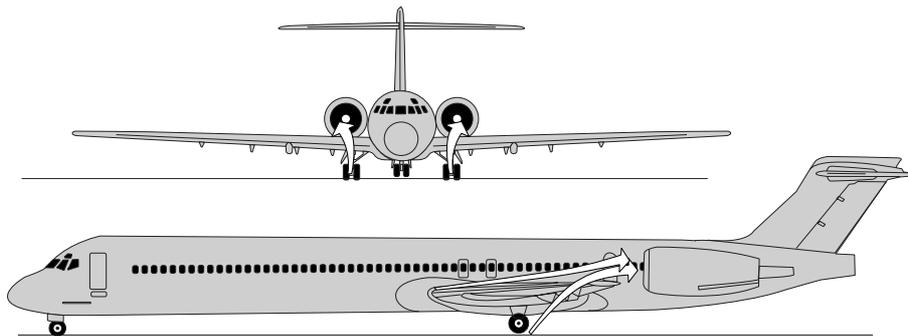


Beispiel 5.2.1.2-2 (Lit. 5.2.1.2-2):

Zitat: „...Two obvious contributors to the increased FOD-rate in the (transport aircraft with two engines at the end) were increased airflow and approximately 30% larger air inlet compared with (a former type).“

Kommentar: Der Wahrscheinlichkeit eines erhöhten FOD-Risikos bei größerem Einlassquerschnitt wird auch in den Abnahmevorschriften für Triebwerkszulassungen Rechnung getragen (siehe Tabelle in Kapitel 5.1.1).

Unterschiedlichste Triebwerksanordnungen können FOD's begünstigen.



Beispiel für hoch über der Startbahn befindliche Triebwerkseinlässe

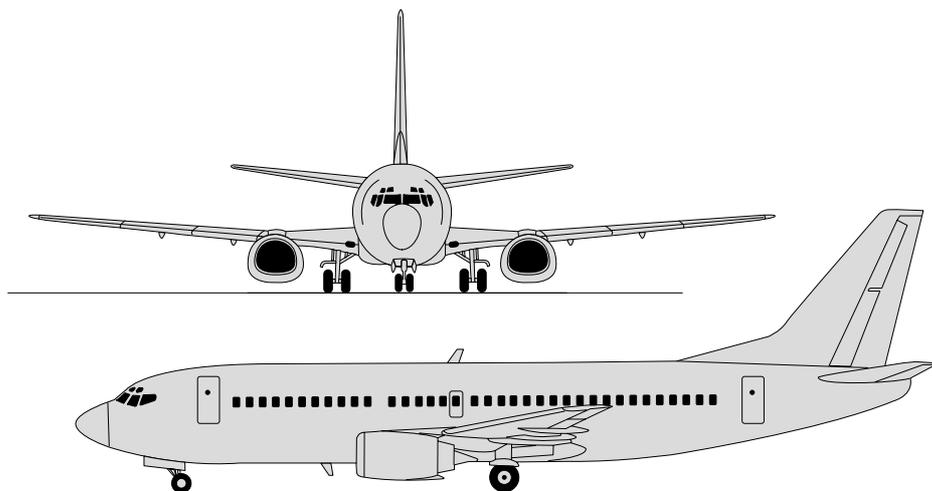


Bild 5.2.1.2-1

Beispiel für extrem niedrig über der Startbahn befindliche Triebwerkseinlässe

Bild 5.2.1.2-1: Die Anordnung der Triebwerke beeinflusst die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten bzw. Ansaugen von Fremdkörpern (siehe auch Bild 5.2.1.1-5). Ganz allgemein kann gesagt werden, dass die Wahrscheinlichkeit des Ansaugens von Fremdkörpern vom Boden mit der Nähe des Einlasses über dem Boden wächst. Die Wahrscheinlichkeit steigt auch mit der Größe des Einlassquerschnitts (Beispiel 5.2.1.2-2).

Die Erfahrung zeigt jedoch, dass dies nur für

ähnlich am Flügel angeordnete Triebwerke gilt. Triebwerke, die sich hinten am Rumpf in relativ großer Höhe befinden, zeigen eine hohe Schadensrate durch FOD (Lit.5.2.1.2-4). Eis das sich vom Rumpf löst, abgelöste Teile des Rumpfes (z.B. Bruchstücke des Radoms oder der Windschutzscheiben, Beispiel 5.1.2-1) geraten leicht in den Triebwerkseinlauf. Auch vom Hauptfahrwerk aufgewirbelte oder abgeschleuderte Fremdkörper gefährden die hinten angeordneten Triebwerke wie Beispiel 5.2.1.2-1 zeigt.

Fremdkörperschäden: Ansaugen

Die Position des Bugrads zum Triebwerkseinlauf ist entscheidend für die FOD-Empfindlichkeit.

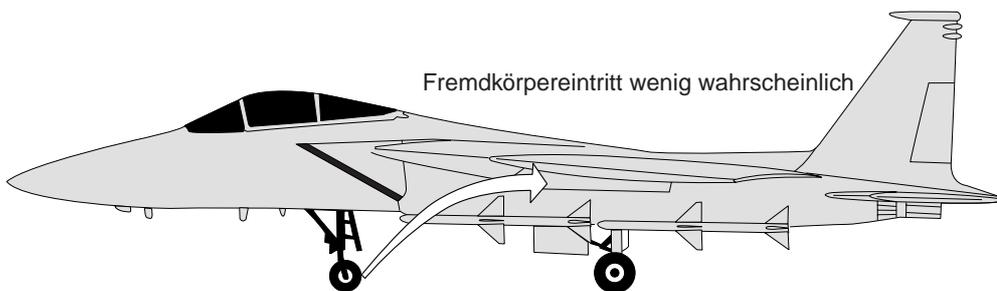


Bild 5.2.1.2-2

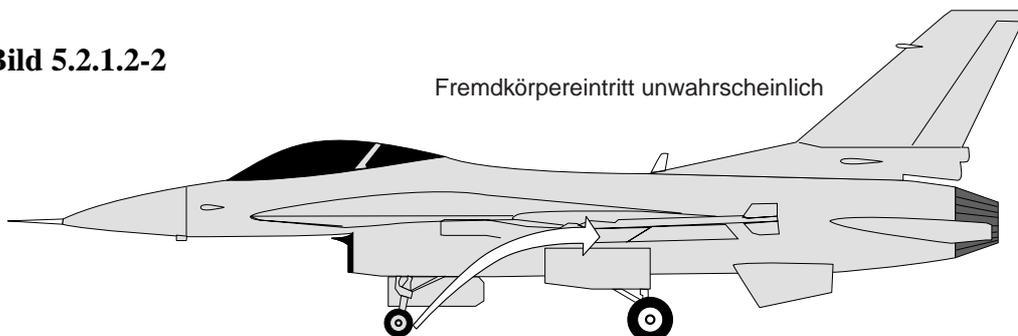


Bild 5.2.1.2-2: Bei Kampfflugzeugen ist das Bugrad nicht selten die Ursache dafür, dass aufgewirbelte Fremdkörper in das Triebwerk gelangen. Die Neigung für das Ansaugen von Fremdkörpern steht im Zusammenhang mit dem Verhältnis von Einlassgröße (Durchmesser, Diagonale, Querschnitt) und Höhe des Einlasses über dem Boden (Bild 5.2.1.2-6). Je größer dieses Verhältnis ist, um so wahrscheinlicher sind angesaugte Fremdkörper. Nach diesem Gesichtspunkt sind die Triebwerkseinlässe un-

ter dem Rumpf moderner Kampfflugzeuge besonders kritisch zu sehen (siehe hierzu Bilder 5.2.1.2-5 bis -8).

Äußere Einflüsse

Fremdkörperschäden: Ansaugen

Schutzbleche am Bugrad eines Kampfflugzeugs für den Start von unbefestigten Pisten

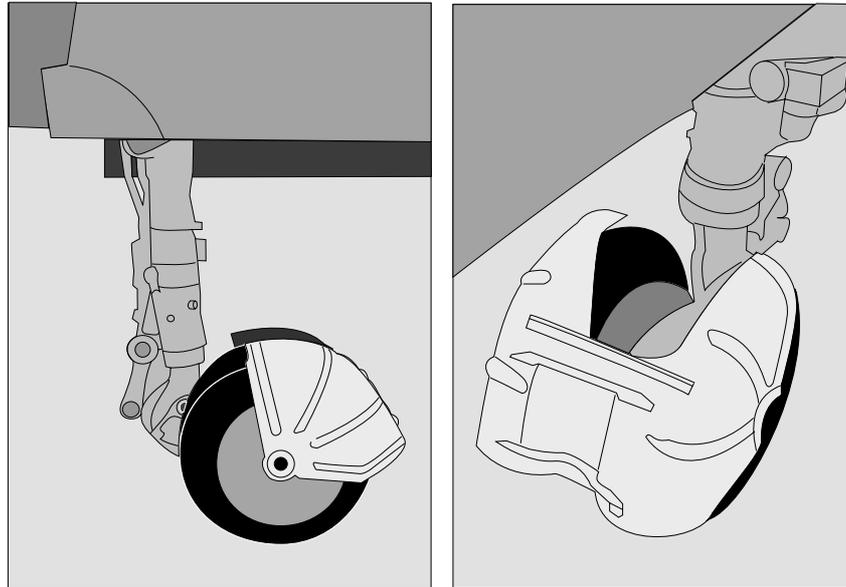
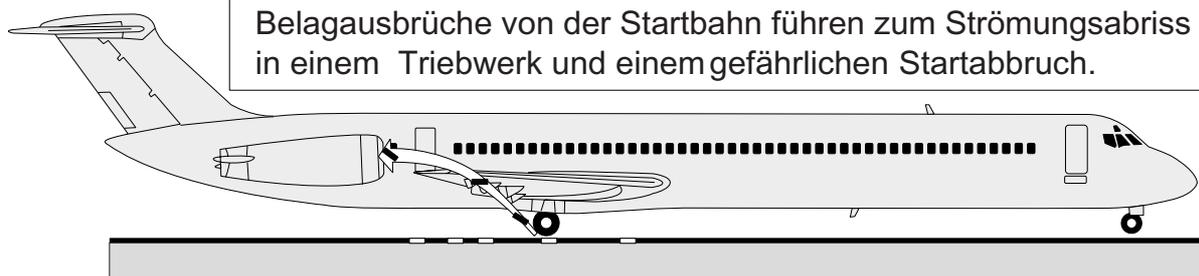


Bild 5.2.1.2-2.1

Bild 5.2.1.2-2.1 (Lit. 5.2.1.2-2): Kampfflugzeuge, die von unbefestigten Pisten starten sollen, werden häufig mit Abweisern bzw. Schutzblechen am Bugfahrwerk versehen (im Bild ist eine russische Konstruktion dargestellt).



Beispiel 5.2.1.2-3 (Lit. 5.2.1.2-3):

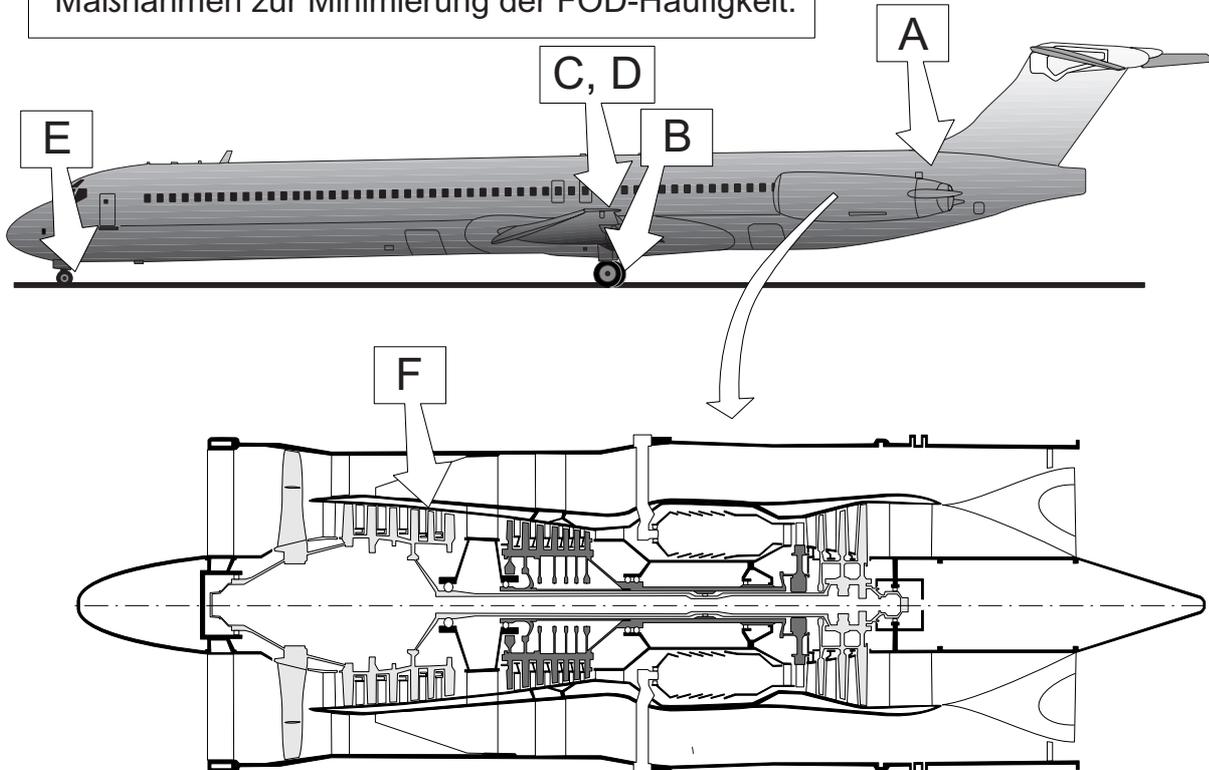
Zitat: „.....(The aircraft type with two rear engines) aborted a take off...after having a **compressor stall on the right engine**. The aircraft returned to the terminal and deplaned normally...The aircraft received only minor damage...The examination of the engine

revealed it had ingested bituminous-polymer sealant that had been recently applied on the runway.“

Kommentar: Es ist naheliegend, dass ein offenbar **schlecht haftender Startbahnbelag** vom Fahrwerk aufgewirbelt und von dem Triebwerk angesaugt wird. Um so verwunderlicher ist, dass die für den Zustand der Startbahn Verantwortlichen diesen Mangel übersehen haben.

Fremdkörperschäden: Ansaugen

Maßnahmen zur Minimierung der FOD-Häufigkeit.



Beispiel 5.2.1.2-4 (Lit 5.2.1.2-2):

Zitat: „...the following modifications releases in the 1988 to 1990 timeframes:

- repositioning (rotation) the thrustreverser doors („A“),
- improved main wheel water/debris deflector („B“),
- blocking plate between flap and wing trailing edge („C“),
- debris curtain on wing aft spar („D“),
- improved nose gear water deflector („E“)

In addition the engine manufacturer... introduced new improved fifth stage (compressor) blades („F“) and a new sixth stage anti flutter bleed system to reduce seventh stage blade flutter and-induced stresses.

...all modifications mentioned (were implemented) without seeing the anticipated improvements on the engine deterioration rate.

The only aircraft **modification that has proven to reduce the amount of debris entering the engines are the improved debris deflector on the main wheels**, even though the improvement is marginal.

Kommentar: Dieses Beispiel zeigt wie schwer es ist, das Ansaugen bzw. den Eintritt von Fremdkörpern zu reduzieren, wenn die **Triebwerksanordnung** prinzipiell für dieses Kriterium ungünstig ist. Auch wirksame **Deflektoren an den Rädern** erfordern viel Know How. Hier wurde besonders bei den Fahrwerken russischer Kampfflugzeuge erfolgreiche Pionierarbeit geleistet (Bild 5.2.1.2-2.1).

Äußere Einflüsse

Fremdkörperschäden: Ansaugen

Unter ungünstigen Bedingungen können auch hoch angebrachte Triebwerke viel Staub ansaugen.

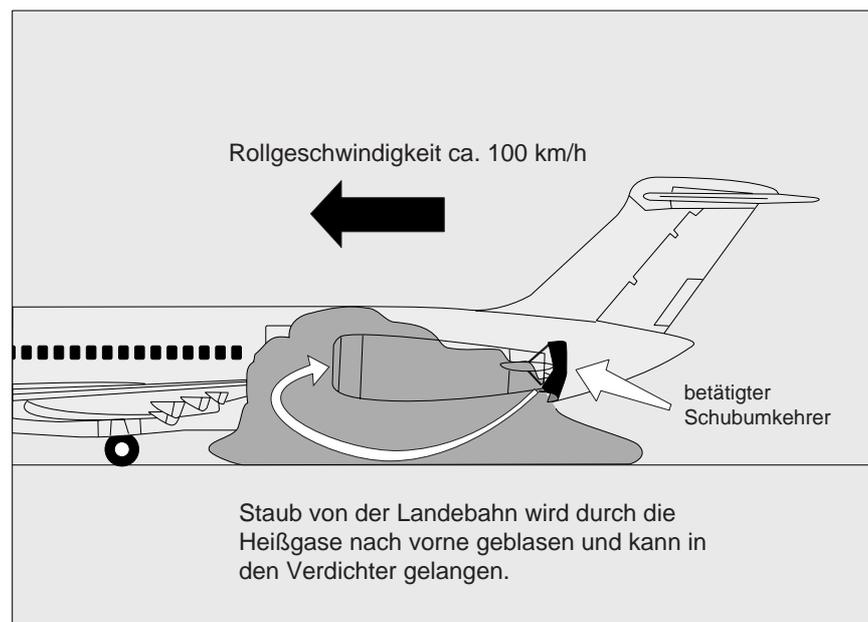
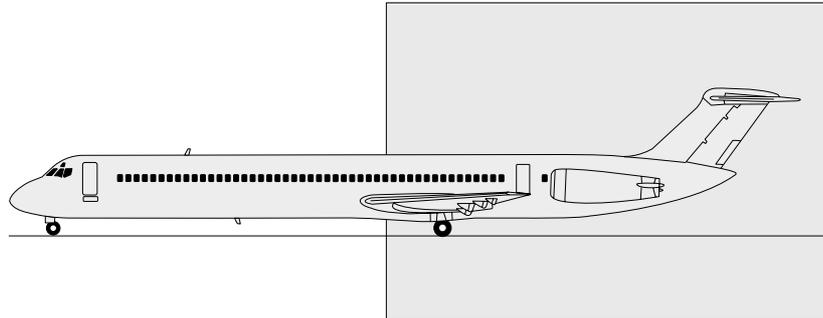


Bild 5.2.1.2-3

Bild 5.2.1.2-3: Die Betätigung des Schubumkehrers kann Fremdkörper von der Landebahn aufwirbeln, die vom Triebwerk angesaugt werden (Lit. 5.2.1.2-2 und 5.2.1.2-3). Dabei ist die Richtung des Gasstrahls bzw. des Ablenk-systems von Bedeutung. Nach Möglichkeit sollte der Gas- bzw. Luftstrahl so gerichtet sein, dass er vom Triebwerkseinlass wegweist. Die Anordnung der Triebwerke hinten seitlich am Rumpf schränkt diese Möglichkeit gegenüber der Anbringung am Flügel deutlich ein.

Fremdkörperschäden: Ansaugen

Vortexbildung (Bildung eines Einlaufwirbels bzw. „Einlaufstrudels“) **bei Triebwerken**

Unter einer Vortex wird ein Wirbel verstanden, in dem die Luft schnell rotiert und der eine schlauchartige Unterdruckzone bildet (Band 3 Bild 11.2.1.2-15). Der Wirbel orientiert sich zum Boden und/oder zu Wänden welche die Ansaugströmung behindern. In der Natur tritt diese Erscheinung in Tornados auf. Ein Analogon kann in dem Wirbel einer ausströmenden Flüssigkeit gesehen werden (Bild 5.2.1.2-4). Bei Flugzeugen tritt er nicht selten im Flug im Bereich von Flügelkanten auf und kann an Kondensationserscheinungen in diesem Bereich beobachtet werden.

Je größer der Eintrittsquerschnitt eines Triebwerks ist und je näher sich dessen Mittellinie zum Boden befindet um so größer ist die Gefahr einer Vortexbildung, die gefährliche Fremdkörper ansaugen kann. Damit wächst diese Gefahr bei höheren Bypassverhältnissen und/oder bodennäheren Einlaufanordnungen der Triebwerke (Lit. 5.2.1.2-5 und 5.2.1.2-6).

Bei Triebwerken ist die Vortexbildung am Boden („ground vortex“) unerwünscht. Der Unterdruck in dem Luftstrom auf Grund der hohen Rotationsgeschwindigkeit **kann massive Körper wie Steinen und Schrauben vom Boden aufwirbeln, die dann durch den „Unterdruckschlauch“ der Vortex transportiert werden** (Lit. 5.2.1.2-6). Das Aufwirbeln der Fremdkörper erfolgt impulsartig. Es können also auch Fremdkörper aus Startbahnritzen, vom Startbahnrand oder aus weichem Boden gesaugt werden. Eine Vortex bildet sich nicht immer. Für das Entstehen einer Vortex sind „günstige“ Bedingungen wie ausreichende Strömungsgeschwindigkeit und der herrschende Wind (Stärke und Richtung zur Triebwerksachse) notwendig (Bild 5.2.1.2-8). So ist z.B. die Roll- und Startprozedur gegebenenfalls von besonderer Bedeutung für die Häufigkeit von FOD's. Wenn diese Bedingungen z.B. durch die Erhöhung der Triebwerksleistung erreicht sind, kann eine Vortex plötzlich auftreten (Lit. 5.2.1.2-6). Sie breitet sich vom Lufteinlass zum Boden hin aus. Je größer der Durchmesser der Vortex um so schwerere Fremdkörper können angesaugt werden (Bild 5.2.1.2-6, Lit. 5.2.1.2-6). Der Vortexdurchmesser geht dabei in der dritten Potenz ein. Wie groß die Ansaugfähigkeit von Fremdkörpern ist, kann ein Beispiel aus Lit. 5.2.1.2-5 zeigen:

Ein Triebwerkseinlass von ca. zwei Meter Durchmesser dessen Mittellinie sich ca. zwei Meter über dem Boden befindet ist in der Lage, eine Betonkugel bis zu 30 cm (!) Durchmesser anzusaugen.

Eine Vortex lässt sich als schlauchartiges Gebilde erkennen, wenn in ihrem Bereich Kondensation durch Temperatur- bzw Druckabfall auftritt. Das Innere der Vortex ist gewöhnlich im Gegensatz zu den Außenzonen klar ohne Kondensation (Lit. 5.2.1.2-7). Damit erhält die Vortex die typische schlauchartige Erscheinungsform. Diese Erscheinungsform wird mit der geringeren relativen Luftfeuchtigkeit im Vortexinneren, einer entsprechenden Neigung zur Dampfbildung (Dampf ist unsichtbar!) und der Zentrifugalwirkung auf kondensierte Tröpfchen, welche diese aus der Innenzone befördert, erklärt. Bei feuchter Startbahn kann man gegebenenfalls in Wasserpfützen die bodennahe Unterdruckzone an aufspritzendem Wasser erkennen. **Die Vortex und damit auch ihr Ende kann sich am Boden und auch in andere Richtungen schnell bewegen. Damit ist auch Wartungspersonal, das sich in der Nähe des laufenden Triebwerks befindet, gefährdet.** Dies gilt besonders für Kampfflugzeuge auf Flugzeugträgern.

Triebwerke können bei ausreichender Leistungseinstellung ausgeprägte Vortexbildung im Einlaufbereich zeigen (Bild 5.2.1.2-5). Befinden sich die Triebwerkseinlässe (abhängig vom Einlaufdurchmesser) in genügender Nähe zum Boden sind gefährliche Bedingungen für das Ansaugen von Fremdkörpern am Boden gegeben. Der Trend sowohl bei Verkehrsflugzeugen als auch bei Kampfflugzeugen geht eher zu kleineren H/D Verhältnissen und damit zu erhöhter FOD-Empfindlichkeit (Bild 5.2.1.2-8).

! Ein sauberer Ansaugbereich ist Pflicht!
(Auch kompakte Körper wie Steinchen und Drähte können angesaugt werden).

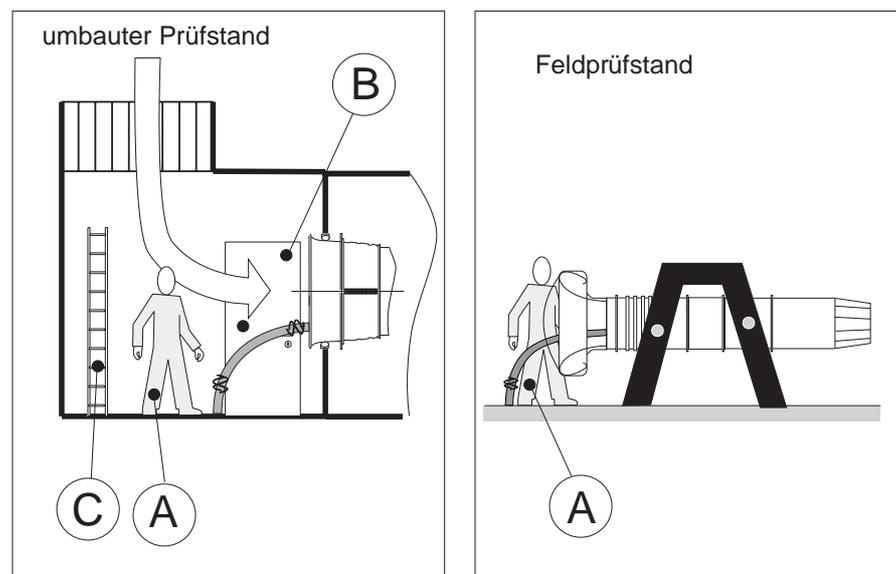
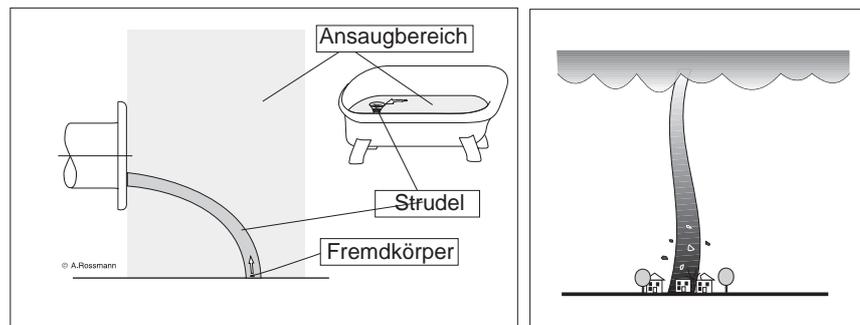


Bild 5.2.1.2-4

Bild 5.2.1.2-4 (siehe vorhergehende Seite): Die beiden oberen Skizzen sollen den Begriff der Vortex durch allgemein bekannte natürliche Phänomene anschaulich machen.

Die unteren Skizzen zeigen bei Versuchen (Lit. 5.2.1.2-5) festgestellte Erscheinungen, die von Wichtigkeit für das Verständnis verschiedener Umgebungseinflüsse auf die Vortexbildung sind. Diese Einflüsse sollten zur Schadensverhütung insbesondere dem Wartungs- und Prüfstandspersonal bewusst sein.

So wurde z.B. beobachtet, dass die Vortex verstärkt wurde, wenn man die Hand zwischen Ein- und Austritt des Fans eines Versuchsaufbaus

hielt und damit die Ansaugströmung beeinflusste. Allein das Öffnen einer Tür zum Versuchsraum oder die Bewegung des Versuchspersonals in der Nähe des Versuchsaufbaus konnte eine Vortex anregen, die Fremdkörper aufsaugte.

Es ist also davon auszugehen, dass Störungen wie Geräte (C), Personen (A) oder geöffnete Türen (B) in einem geschlossenen Prüfstand die Aufnahme von Fremdkörpern beeinflussen. Dies könnte auch der Fall sein, wenn z.B. Wartungspersonal im Triebwerksbereich am Flugzeug oder das an einem Feldprüfstand tätig ist.

Fremdkörperschäden: Ansaugen

Ansaugen von Fremdkörpern durch eine "Vortex" (rotierende Unterdruckströmung- Strudel)

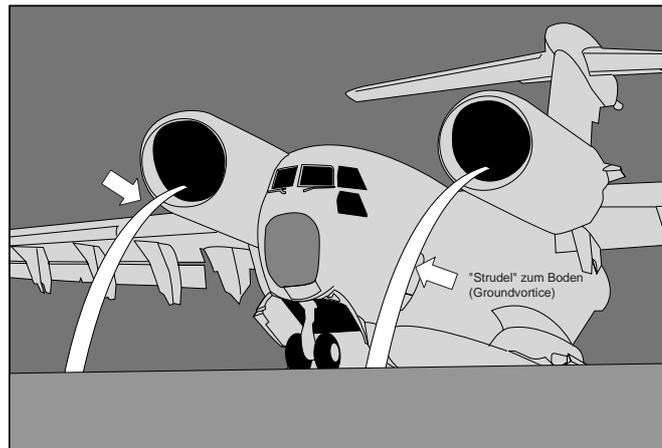


Bild 5.2.1.2-5

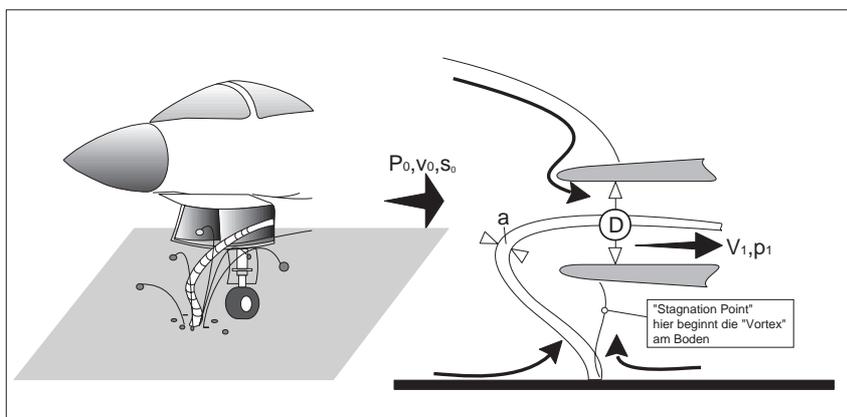


Bild 5.2.1.2-5: Dieses Bild zeigt oben die deutliche Vortexerscheinung bei einem militärischen (Versuchs-) STOL-Transportflugzeug (Lit. 5.2.1.2-7). Erstaunlich ist, dass trotz der sehr hoch angeordneten Triebwerke die Unterdruckschläuche bis zum Boden reichen und so für die Triebwerke erhöhte FOD-Gefahr zu erwarten ist. Dies ist im dargestellten Fall um so bedenklicher, als es sich um ein Flugzeug für besonders kurze Start- und Landestrecken handelt. Von diesen Orten ist nicht die für Startbahnen übliche Fremdkörperfreiheit zu erwarten.

Die untere Skizze gibt nach Lit. 5.2.1.2-6 und Lit. 5.2.1.2-12 die Parameter an, welche die Vortexbildung beeinflussen. Die Größen mit dem Index „0“ gelten für die umgebenden Windbedingungen, die mit „1“ gelten für die Strömungsbedingungen im Einlauf. Die ansauggefährdete Fremdkörpermasse ist proportional der dritten Potenz des Vortextdurchmessers „a“.

Diese Darstellung soll einen Eindruck von der Fähigkeit eines Triebwerks Fremdkörper anzusaugen vermitteln.

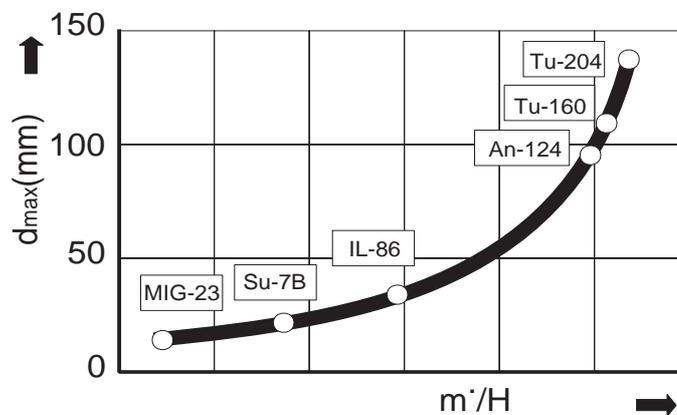
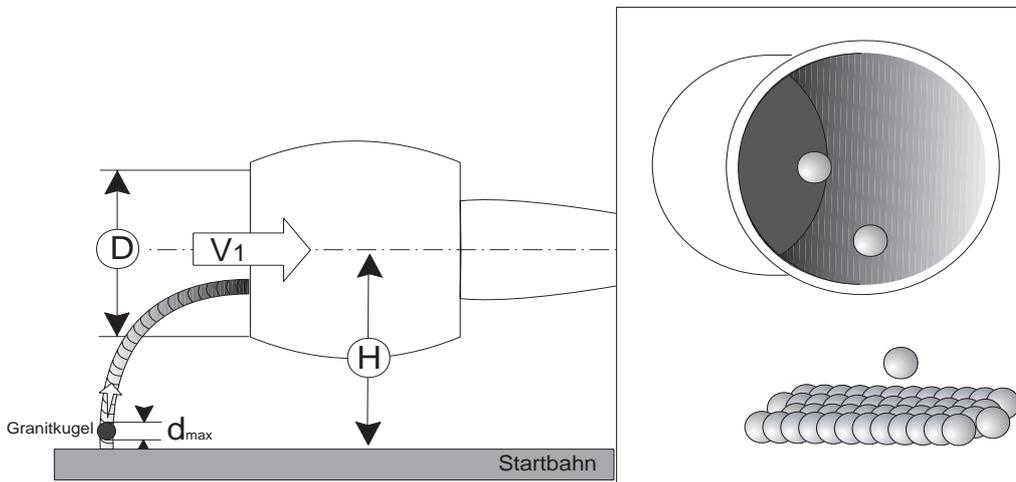


Bild 5.2.1.2-6

Luftdurchsatz $m^3 = k(V_1 * D)$

Bild 5.2.1.2-6 : Das Bild rechts oben zeigt einen in Lit. 5.2.1.2-5 beschriebenen Versuchsaufbau mit einem H/D von 1,2, bei einem Einlassdurchmesser D von 30 cm, bei dem Glaskugeln von 25 mm Durchmesser angesaugt wurden.

Das Diagramm unten zeigt für die in der Skizze links oben dargestellten Verhältnisse nach Lit. 5.2.1.2-8 die maximal ansaugbaren Fremdkörpergrößen (Granitkugeln) und zuge-

ordnete (russische) Flugzeugtypen. Wie zu erkennen ist, können in Abhängigkeit vom Luftdurchsatz im Extremfall auch Steine mit deutlich über 10 cm Durchmesser angesaugt werden.

Fremdkörperschäden: Ansaugen

Das Verhältnis H/D ist eine wichtige Größe für die Neigung des Ansaugens von Fremdkörpern.

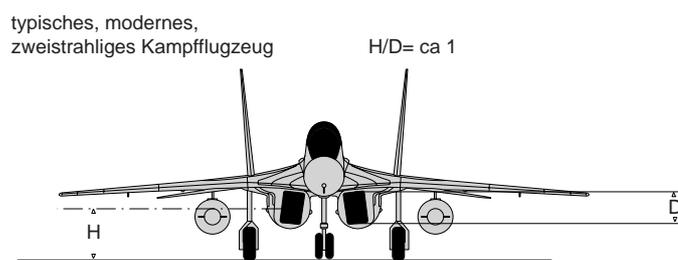
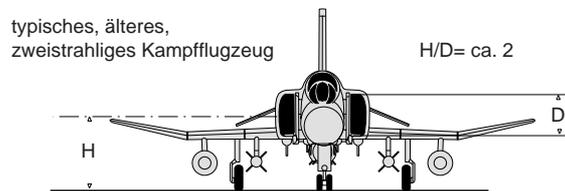
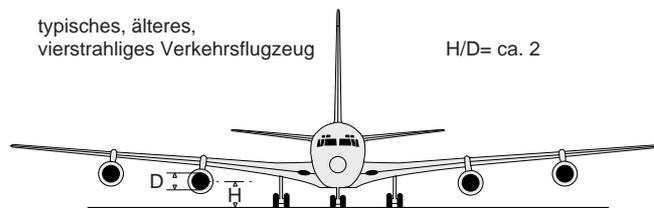


Bild 5.2.1.2-7

Bild 5.2.1.2-7: Für die Ansaugwirkung eines Triebwerks auf Fremdkörper am Boden ist besonders das Verhältnis der Höhe über dem Boden zur Größe des Einlaufs (bzw. des Durchsatzes) von Bedeutung. Je kleiner dieses Verhältnis ist, um so FOD-gefährdeter ist das Triebwerk. Der Trend geht sowohl für Verkehrsflugzeuge als auch für Kampfflugzeuge zu niedrigeren H/D Verhältnissen. Dies hat z.B. bei dem unten dargestellten Kampfflugzeugtyp zu

besonderen Maßnahmen im Einlauf geführt: Ein Klappenmechanismus (Bild 5.2.1.2-10) schließt in der Startphase den Einlauf, die Luft wird in diesem Fall über Öffnungen auf der Flügeloberseite angesaugt.

Der betreiberspezifische Betrieb kann das FOD-Risiko merklich beeinflussen.

'Taxiing'



Die Reihenfolge der Schubumkehrerbetätigung.

Beispiel 5.2.1.2-5 (Bild 5.2.1.2-9, Lit . 5.2.1.2-9):

Zitat: „.....engines that power the carrier’s reengineed (Aircrafts)...have encountered sand and particle ingestion problems.

Changes are being considered seriously by the carrier and the manufacturer... in a continuing analysis of the engines...Aim of the redesign and the vortex dissipator would be to reduce particle ingestion that has been causing high levels of erosion and has necessitated a higher engine removal rate ‘than we would like to see’ ...

The vortex dissipator under consideration would be a tube inserted at the bottom of the cowling that would blow the engine bleed air downward to disrupt vortices that develop under the engine.

... the ingested dirt was **clogging high-pressure turbine blade cooling holes.**

..taxiing procedures...probably helped

cause more vortices and contributed to the particle ingestion problem.

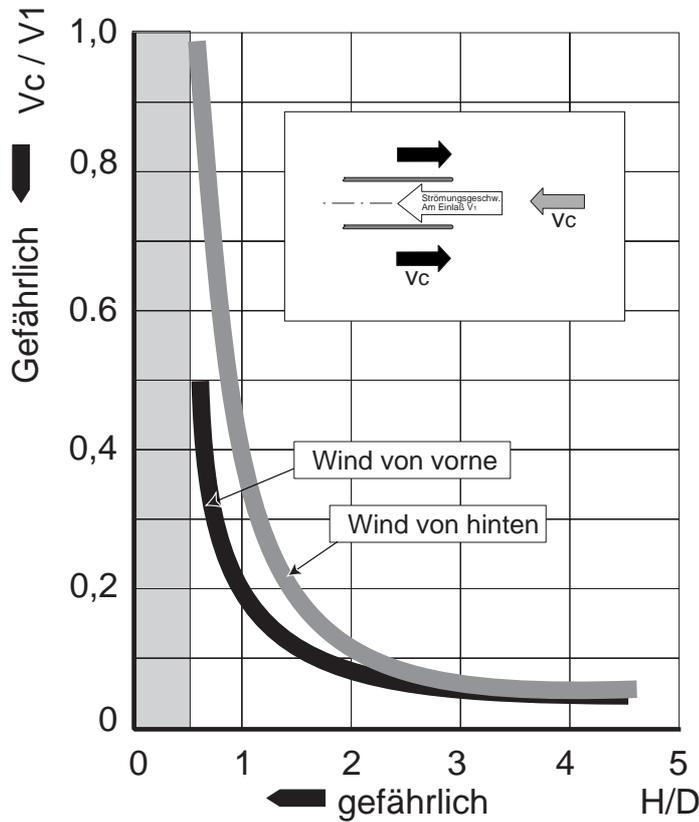
The procedure borrowed from the carrier’s previous practices....involved the **activation of thrust reversers on outboard engines** to slow taxiing speeds.

(The carrier)... has revised the procedure to use the inboard engines only, one engine at a given power setting at idle and the other at varying speeds.“

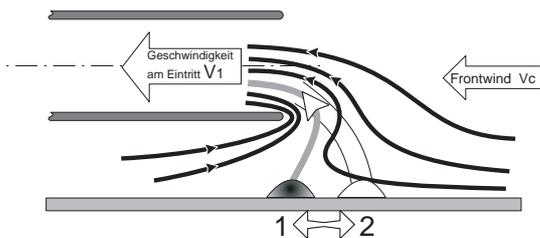
Kommentar: Bei dem betroffenen Flugzeugtyp handelt es sich um ein vierstrahliges Verkehrsflugzeug älterer Bauart das **mit moderneren Fantriebwerken mit höherem Bypassverhältnis nachgerüstet** wurde. Interessant ist, dass die Strömung bei Betätigung des Schubumkehrers eine Vortexbildung begünstigt (siehe Bild 5.2.1.2-9) und so ein zusätzliches FOD-Risiko auftritt.

Fremdkörperschäden: Ansaugen

Einflüsse des Windes auf die Vortexbildung



V_c = Geschwindigkeit des Seitenwindes
 V_1 = Windgeschwindigkeit am Eintritt
 H = Höhe der Einlaufmitte über Grund
 D = Einlaufdurchmesser



Die größte Wahrscheinlichkeit der "Vortexbildung" und damit die Gefahr für das Ansaugen von Fremdkörpern besteht bei großem v_1 und kleinem V_c .

senkrecht auf die Startbahn gesehen.

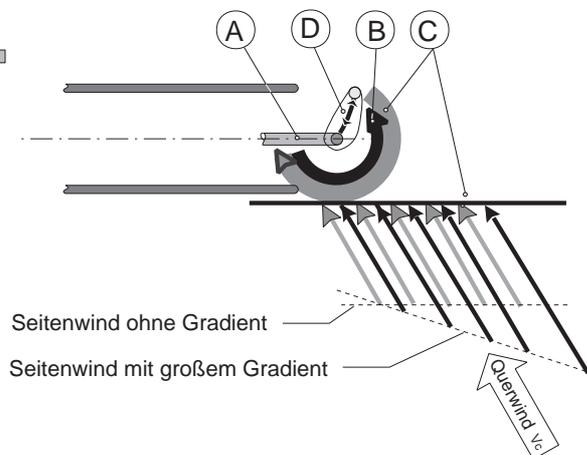


Bild 5.2.1.2-8

Bild 5.2.1.2-8 (Lit. 5.2.1.2-5): Die Windverhältnisse im Bereich des Lufterinlaufs spielen bei der Vortexbildung eine besondere Rolle. Dieser Effekt nimmt mit kleinerem H/D und abnehmendem Seitenwind zu (oberes Diagramm). Der Bereich der Vortexbildung liegt unterhalb der Kurven für Wind von vorne (obere Kurve) und Wind von hinten (untere Kurve). Eine Vortexbildung ist demnach bei kleinerem H/D auch bei deutlich stärkerem Seitenwind möglich. Am gefährlichsten ist es, ein Triebwerk mit hoher Leistung bei Windstille zu betreiben.

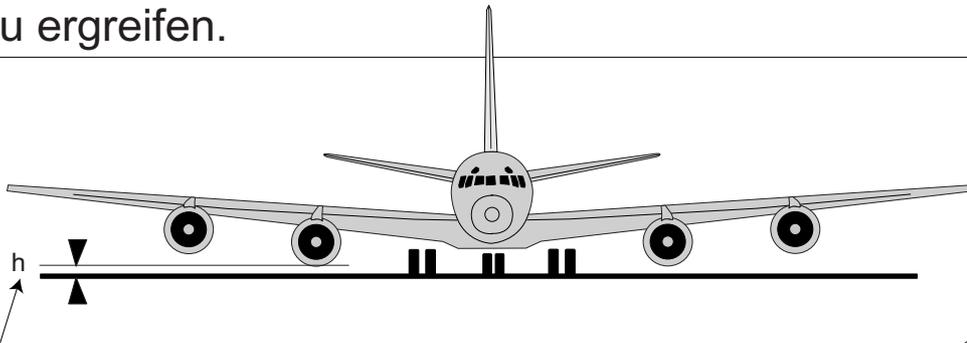
Da die größte Saugwirkung der Vortex bei „A“ im Bereich der „stagnation“ Stromlinie (SS) liegt, ist die Stärke des Frontwinds für ihre Lage von besonderer Bedeutung. Bei starkem Frontwind, also auch beim Rollen des Flugzeugs wird die SS nach hinten ausgelenkt („1“ in Skizze links unten) und verliert den Bodenkontakt. Bei Windstille befindet sie sich vor dem Lufterinlass („2“).

Bei Schubumkehrerbetätigung während des Rollens (taxiing) kann eine nach vorne gerichtete Strömung den vortexverhindernden Fahrtwind reduzieren und dadurch zusätzlich zur Aufwirbelung etwaiger Fremdkörper am Boden ein erhöhtes Ansaugrisiko von Fremdkörpern bewirken (siehe Beispiel 5.2.1.2-4).

Der Seitenwindgradient beeinflusst die Drehrichtung der Vortex (Skizze links unten).

Fremdkörperschäden: Ansaugen

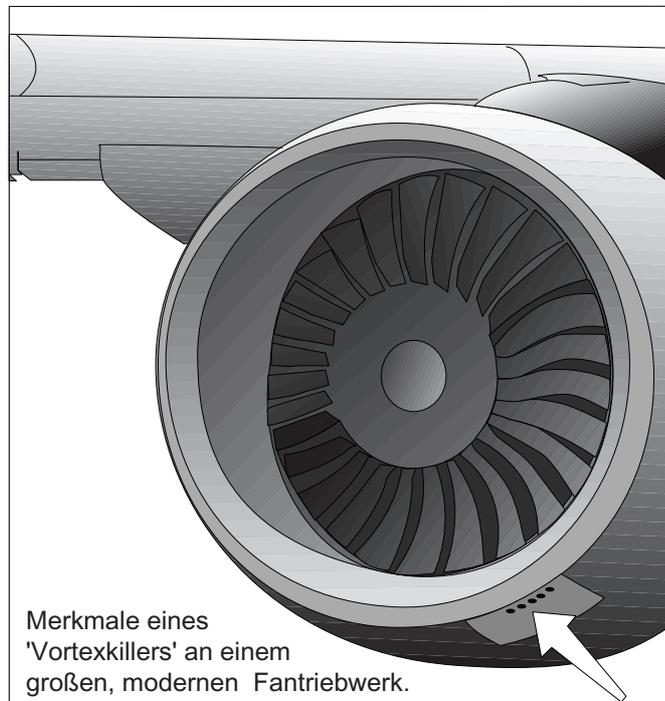
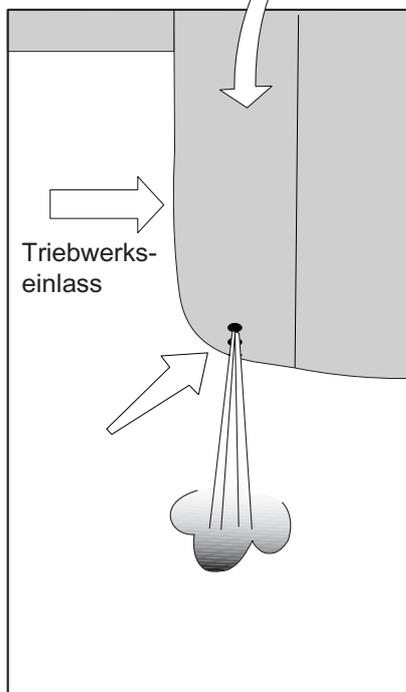
In staubiger Umgebung kann es notwendig werden, gegen eine "Vortexbildung" gezielte Maßnahmen zu ergreifen.



Geringe Bodenfreiheit wegen größerem Durchmesser der nachgerüsteten Triebwerke.



die Ausblasung von Luft durch mehrere mehrere Düsen (Pfeile) verhindert eine "Vortexbildung".



Merkmale eines 'Vortexkillers' an einem großen, modernen Fantriebwerk.

Bild 5.2.1.2-9

Reduzierung der FOD-Gefahr durch aufwendige konstruktive Maßnahmen im Einlaufkanal lassen den Stellenwert der Fremdkörperproblematik erkennen.

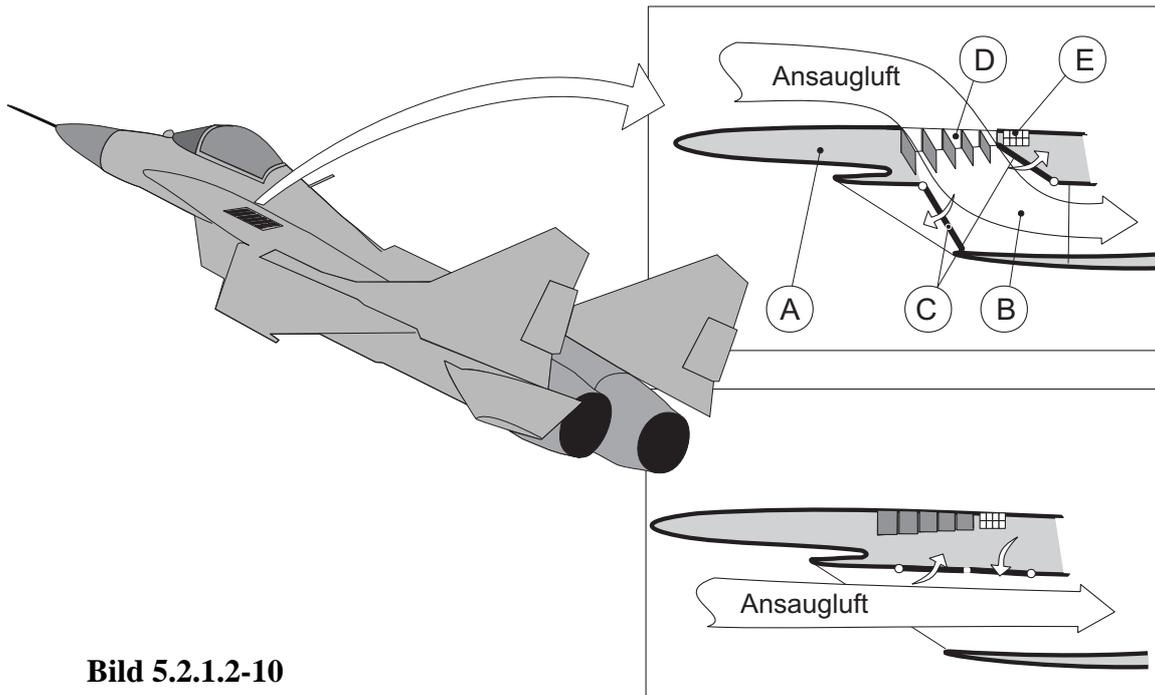


Bild 5.2.1.2-10

Bild 5.2.1.2-9: Um die Bildung einer gefährlichen Vortex zu unterdrücken, gibt es verschiedene Möglichkeiten. So z.B. durch strömungstechnisch geeignet im Einlaufbereich angebrachte, radial ausblasende Luftdüsen (engl. „Vortexkiller“, Beispiel 5.2.1.2-5, Lit. 5.2.1.2-9 und 5.2.1.2-10) oder kleine Flügel, die den Eintritt der Fremdkörper mechanisch behindern. Offenbar ist jedoch keine dieser Maßnahmen absolut sicher (Lit. 5.2.1.2-5). Da ausreichend starker Frontwind die Bildung einer Vortex verhindert und somit die FOD-Gefahr minimiert, erscheint bei hoher Triebwerksleistung eine genügend schnelle Vorwärtsbewegung die sicherste Maßnahme. Dies erfordert eine progressive Leistungssteigerung der Triebwerke beim Startvorgang.

Inwieweit dies überhaupt realisierbar ist dürfte von den jeweiligen Startbedingungen abhängen.

Bild 5.2.1.2-10: Dieser russische Kampfflugzeugtyp weist einen besonderen Klappenmechanismus im Einlaufkanal (vergleiche Bild 5.2.2.3-3) der Triebwerke auf (Lit. 5.2.1.2-12 und 5.2.1.2-13), weil die großen Einlauföffnungen sehr tief an der Unterseite des Rumpfes angeordnet sind (vergleiche Bild 5.2.1.2-7 unten), was das Ansaugen von Fremdkörpern von der Startbahn begünstigt. Weil dieses Flugzeug für den Start von Behelfsplätzen vorgesehen ist, wird dieses Risiko zusätzlich erhöht. Die Arbeitsweise des komplexen Lufteinlaufsystems zeigen die beiden rechten Skizzen: Beim Start am Boden (obere Skizze) bis zum Abheben des Bugfahrwerks sind die Hauptluft-einläufe durch das Klappensystem „C“ bis auf drei in die Hauptklappe eingelassene, dauernd geöffnete Jalousiefelder, geschlossen. Der Ansaugluftstrom wird von dem auf der Flügeloberseite „A“ liegenden Nebeneinlauf „D“,

Fremdkörperschäden: Ansaugen

Die komplexen Lufteinlässe mit verstellbaren Einbauten sind eine FOD-Quelle bei modernen Fightern.

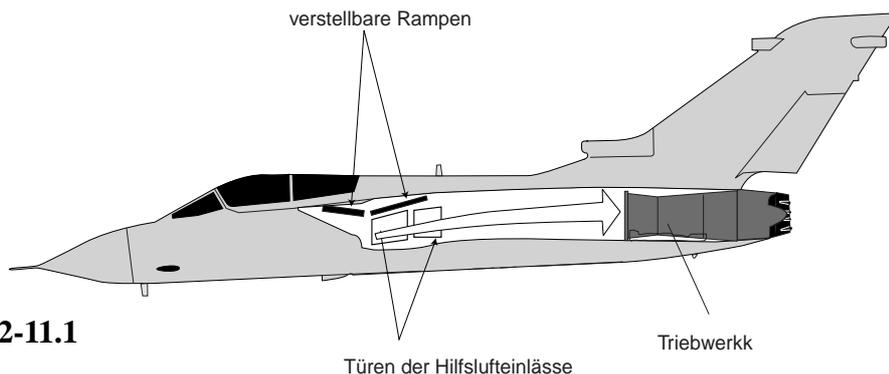


Bild 5.2.1.2-11.1

der durch eine Klappenjalousie geöffnet ist, zugeführt.

Im Flug mit Unterschallgeschwindigkeit (untere Skizze) sind die Hauptlufteinlässe geöffnet, die Nebeneinläufe durch Jalousie „D“ und Klappensystem „C“ geschlossen.

Im Überschallflug ist das Klappensystem „C“ als Einlauframpe teilweise geschlossen, und die überschüssige Luft wird durch die Überlauföffnungen „E“ abgeblasen.

Das Klappensystem schließt wieder beim Aufsetzen, wenn die Ölfederbeine des Hauptfahrwerks beim Aufsetzen komprimiert werden.

Dieses System hat sich in der Praxis offenbar gut bewährt und ermöglicht die extrem tief liegenden Lufteinläufe, die bei Flugsituationen mit hohem Anstellwinkel Vorteile bieten.

Bild 5.2.1.2-11: Die Lufteinlässe von Flugzeugen die Überschallgeschwindigkeiten fliegen können, insbesondere moderner Kampfflugzeuge, weisen ein kompliziertes verstellbares Klappen- bzw Rampensystem auf. Diese Systeme bestehen aus Komponenten wie Scharnieren, Verstellmechanismen (Aktuatoren) und gefügte Blechstrukturen mit Befestigungselementen wie Nieten und Schrauben. Damit sind eine Vielzahl potentieller FOD -Quellen für das Triebwerk gegeben. Auch Einbauten wie in Bild 5.2.1.2-10 beschrieben dürften dieses Risiko erhöhen.

Die Überprüfung dieser Systeme im Rahmen von Inspektions- und Wartungsarbeiten erfordert gegebenenfalls Hilfsgeräte wie Taschenlampen oder Werkzeug, die versehentlich in schlecht einsehbaren Einläufen verbleiben können und später zu umfangreichen Schäden führen.

"Popniete" sind eine potentielle FOD-Quelle!

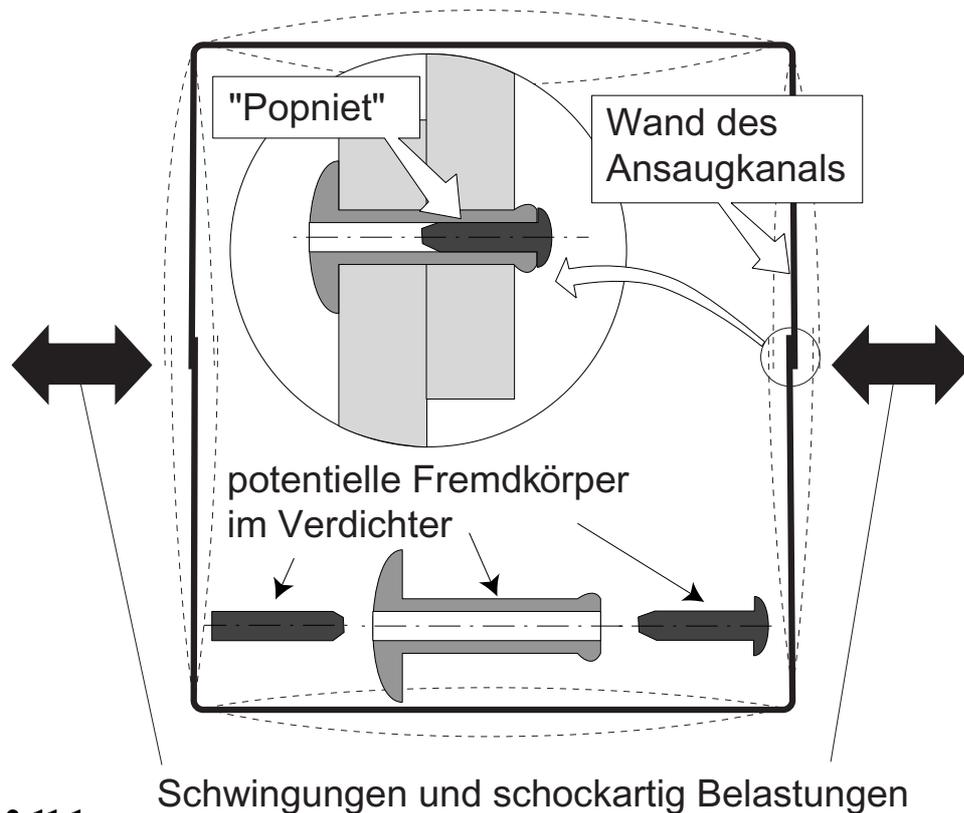


Bild 5.2.1.2-11.1

Bild 5.2.1.2-11.1: Beim Pumpen des Triebwerks kann es zu einem so plötzlichen Abbremsen des Luftstroms im Einlaufkanal kommen. Dabei entstehen intensive Schockwellen („Hammerschlag“, engl. „**Hammer Shock**“, siehe Band 3, Bild 11.2.1.1-17 und Bild 11.2.1.1-18). Diese Druckstöße beanspruchen die gesamte Struktur des Einlaufkanals sehr hoch. Als besonders gefährlich hat sich das **Lösen** sog. „**Popniete**“ (Ziehniete, Blindniete) **in provisorischen Einlaufkanälen** während der Entwicklungsphase gezeigt. Diese Fremdkörper erzeugen sehr kostspielige und gefährliche Schäden an der Beschaukelung des Verdichters.

Literatur zu Kapitel 5.2.1.2

- 5.2.1.2-1** NTSB Identification MKC89IA024, microfiche number 37058A, Index for Nov. 1988.
- 5.2.1.2-2** P. Stokke, „Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects on Gas Turbines“, AGARD-CP-558, Proceedings of the Conference „Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines“, Rotterdam, The Netherlands, 25-28 April 1994, Kapitel 7.
- 5.2.1.2-3** NTSB Identification SEA98WA086, microfiche number 37058A, Index for June 1998.
- 5.2.1.2-4** T.L. Alge, J.T. Moehring, „Modern Transport Engine Experience With Environmental Ingestion Effects“, AGARD-CP-558, Proceedings of the Conference „Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines“, Rotterdam, The Netherlands, 25-28 April 1994, Kapitel 9.
- 5.2.1.2-5** D.E. Glenny, „Ingestion of debris into intakes by vortex action“, U.D.C. No. 621-757: 533.697.2:532.527, N.G.T.E. Peyestock, G.P. 1114, December 1968.
- 5.2.1.2-6** C.L. Bore, „Scaling Laws For Vortex Induced Debris Ingestion Into Air Intakes“, Research Note BAe-KRS-N-GEN-274, March 1983.
- 5.2.1.2-7** „AMST: Tactical Airlift Into the 21st Century“, Boeing Co. und nicht zuordenbare Literaturstelle eines Proceedingsbeitrags.
- 5.2.1.2-8** A.K. Ivanyushkib, E.V. Pavlyukov, „Aerodynamic Problems of Propulsion System Operation Safety“, Proceedings der „Aircraft Flight Safety Conference“, Zhukovsky, Russia, August 31-September 5, 1993, Seite 148-162.
- 5.2.1.2-9** J. Jeffrey, M. Lenorovitz, „CFM56 Powerplant Fixes Based on DC-8 Operations“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, February 14, 1983, Seite 32.
- 5.2.1.2-10** „Delta Weighs Changes to CFM56-2“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, February 14, 1982, Seite 31.
- 5.2.1.2-11** V.I. Vasiliev, „Vortex Ingestion of Foreign Objects in Gas Turbine Engines of Aircraft“, Proceedings der „Aircraft Flight Safety Conference“, Zhukovsky, Russia, August 31-September 5, 1993, Seite 163-167.
- 5.2.1.2-12** MIG-29/Fulcrum, Zeitschrift „Soldat und Technik“, 8/1988, Seite 480.
- 5.2.1.2-13** Zeitschrift „Military Technology, MILTECH“, 4/87, Seite 124-128.