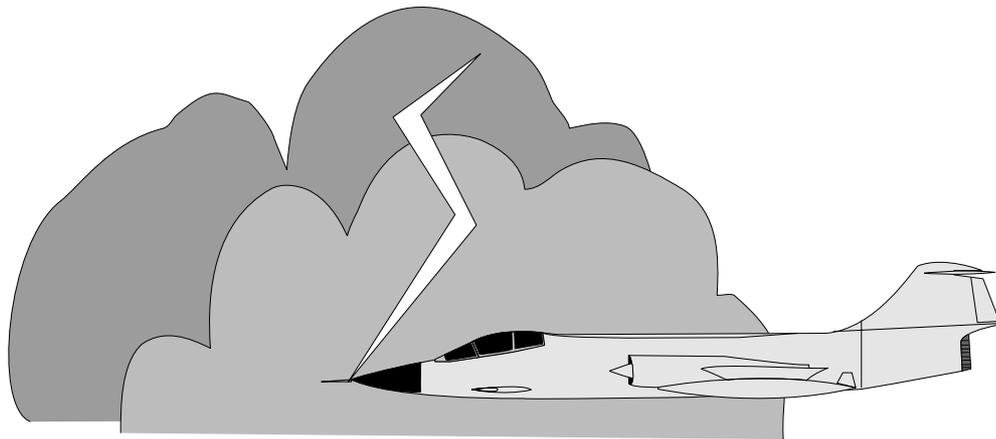


5.1.3 Blitzschlag



Unter Blitzschlag wird der Einschlag eines Blitzes in ein Luftfahrzeug verstanden. Luftfahrzeuge erleiden durchschnittlich etwa alle 10^4 Flugstunden einen Blitzschlag (Lit. 5.1.3-4). Warum ein Blitz in ein Flugzeug einschlägt, ist offenbar noch nicht vollständig geklärt (Lit. 5.1.3-4). Die vorherrschende Meinung ist, dass der Blitz nur einschlägt, wenn sich das Flugzeug zufällig in der Nähe oder in einem Gewitter befindet. Die Wahrscheinlichkeit eines Blitzschlags in Abhängigkeit von der Flughöhe zeigt Bild 5.1.3-1. Blitzschläge treten auch in Höhen von über 12 000 Metern auf, die meisten liegen jedoch unter ca. 6000 Metern. Eine besondere Blitzschlaggefahr besteht offenbar im Temperaturbereich von $0\text{ }^\circ\text{C}$, also im bevorzugten Vereisungsbereich. Blitzeinschläge können in Wolken erfolgen, die mit keinem Gewitter in Zusammenhang stehen (Lit. 5.1.3-2). In seltenen Fällen wurden auch Blitzschläge registriert, ohne dass Wolken vorhanden waren. In der Literatur wird sogar angegeben, (Zitat) „dass die Wahrscheinlichkeit eines Blitzschlags in ein Luftfahrzeug um so größer ist, je geringer die Anzahl von Gewittern ist. Der Blitzschlag erfolgt in der Regel in solchen Wolken, die weder die Meteorologen noch die Flugzeugführer für gewittergefährlich halten.“ Blitzschlag ist ein relativ häufiges Ereignis. Flugzeuge mit Strahltriebwerken sind offenbar gefährdeter als solche mit Kolbenmotoren (Lit. 5.1.3-3). Die Erklärung wird in der, durch den heißen Abgasstrahl erzeugten Ladungsträgerwolke gesehen die (Zitat) „ das Flugzeug in Form einer ionisierten Gasblase hinter sich herschleppt. Bei der hohen Fluggeschwindigkeit und der nicht unendlich kurzen Rekombinationszeit der in dieser Beziehung trägen Ladungsträger beim Abkühlen, ergibt sich eine quasi leitende Gasblase, die in ihrem Volumen und Abmessungen die des Flugzeugs (gilt zumindest für Kampfflugzeuge mit kleinem Rumpf und großer Triebwerksleistung) um ein Vielfaches übertrifft. Die ionisierte Abgasschleppe gibt so zusammen mit dem Flugzeug eine beträchtliche Kapazität, wodurch das elektrische Feld gestört wird, und unter Umständen Blitzentladungen beim Einfliegen in Gewitterzonen durchaus ausgelöst werden können.“

Hubschrauber können auf Grund ihrer unterschiedlichen Einsatzmissionen und der Komplexität des System sogar höher blitzgefährdet sein als Tragflächenflugzeuge (Lit. 5.1.3-4).

Fortsetzung auf Seite 5.1.3-3

Wettereinflüsse: Blitzschlag

Blitzschläge kommen bis in große Höhen vor.

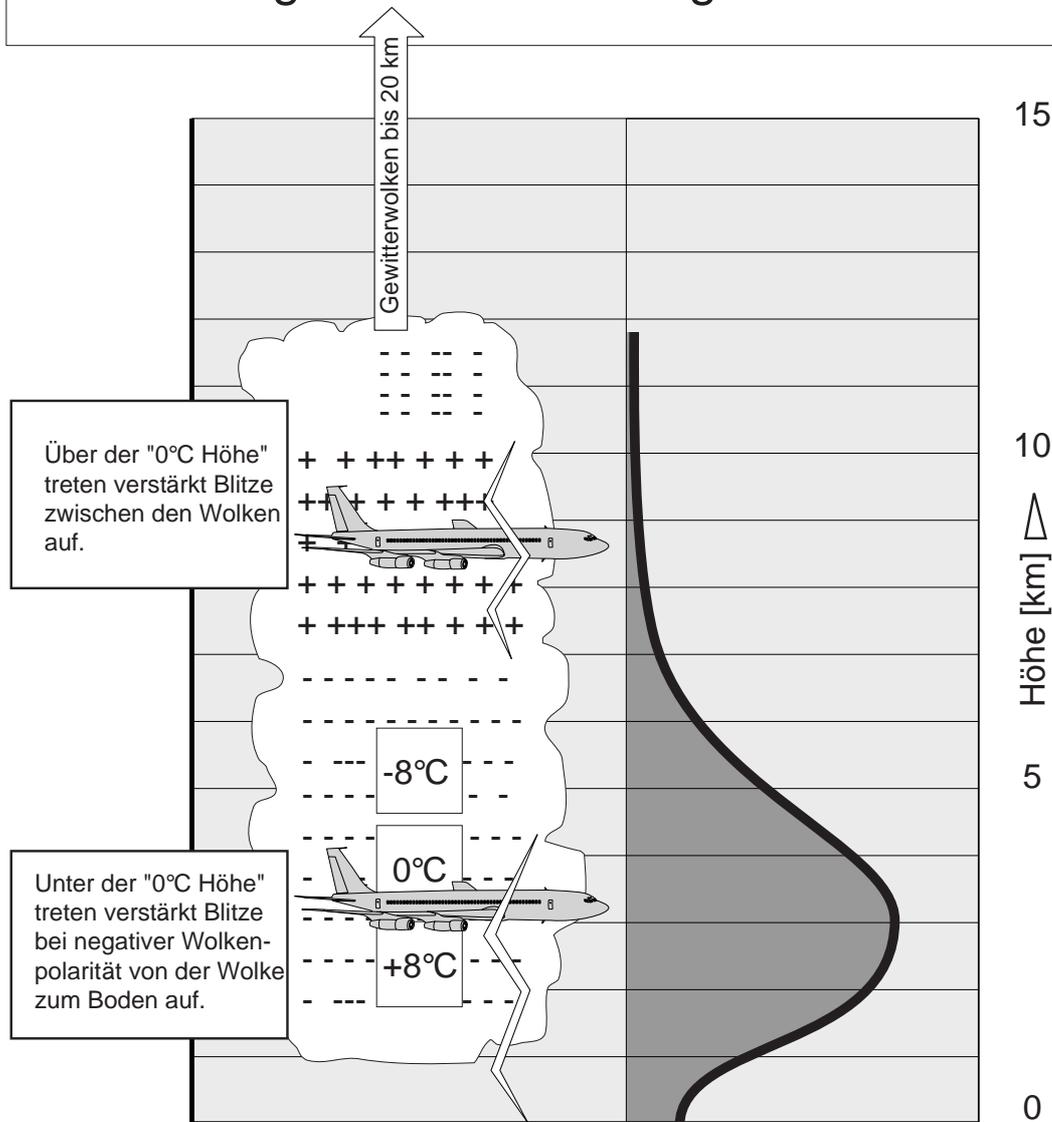


Bild 5.1.3-1

Blitzschläge bei Flugzeugen nach fünf Studien

Bild 5.1.3-1 (Lit. 5.1.3-5): Dieses Bild fasst vereinfacht das Ergebnis von fünf Studien aus dem Zeitraum 1950 bis 1975 zusammen, die in USA, Europa und der UDSSR durchgeführt wurden. Diese Ergebnisse unterscheiden sich von einer NASA-Studie zu Beginn der 80er Jahre:

Die mittlere Blitzschlaghöhe war 8,7 km bei -32°C. Die höchste Blitzschlaghäufigkeit lag

bei ca. -40°C und nicht bei 0°C!

In Gewittergebieten wurden Blitzschläge bei allen Temperaturen und in allen Höhen beobachtet. Meistens waren es Bereiche mit relativ leichter Turbulenz und geringen Niederschlägen.

Fortsetzung von Seite 5.1.3-1

Schadensmechanismen bei Blitzschlägen (Lit. 5.1.3-1)

Elektrische und magnetische Mechanismen:

Weil sich ein Blitz aus einer Folge kurzer elektrischer Impulse zusammensetzt, erzeugt er um den Leiter ein entsprechend pulsierendes Magnetfeld, das in benachbarten isolierten und abgeschirmten elektrischen Leitern Spannungen von über 100 Volt induzieren kann.

Die Magnetfelder magnetisieren die stromdurchflossenen, ferromagnetischen Bauteile und ebenso alle benachbarten. Bei Triebwerken kann eine Magnetisierung von Wälzlagern erfolgen und an diesen durch magnetische Messungen (Bild 5.1.3-4) nachgewiesen bzw. erkannt werden.

Thermische Mechanismen:

Schlägt ein Blitz vor dem Triebwerkseinlass entsteht dort eine **Plasmawolke**. Wird diese angesaugt kann sie zu kurzzeitigem Leistungsverlust oder im Extremfall zum Verlöschen der Brennkammer führen (Lit 5.1.3-12, Beispiel 5.1.3-5).

Beim Eindringen des Blitzes auf Grund des Übergangswiderstands entstehen kurzzeitig hohe örtliche Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes der Konstruktionswerkstoffe, die sich gewöhnlich aber auf einen relativ eng begrenzten Bauteilbereich beschränken. Bei Funkenüberschlag und Lichtbögen an schlechten Masseverbindungen treten ebenfalls extreme Temperaturen auf. Werden relativ begrenzte Querschnitte wie Drahtlitzen durchflossen, können sich diese stark aufheizen, so dass organische Werkstoffe (Kunststoffe) in deren Nähe deutlich geschädigt werden.

Im Innern von Hohlkörpern (z.B. Strömungskegel) kann durch einen solchen Funkenüberschlag die Luft kurzzeitig stark erhitzt werden und sich explosionsartig expandieren, sodass die Bauteile mechanisch überlastet werden.

Mechanische Mechanismen:

Die magnetischen Kräfte, insbesondere an den Ein- und Austrittsstellen, können filigrane Bauteile plastisch verformen. Versuche zeigten, dass in Werkstoffen, die mit elektrisch leitenden Fasern (z.B. C-Faser, Borfaser) verstärkt sind, bei Stromdurchgang explosionsartige Zerstörungen entstehen.

Triebwerksbezogene Schäden/Folgen durch Blitzschläge

- Verlöschen des Triebwerks durch Eintritt aufgeheizter Luft (Plasma) und Auslösen eines Strömungsabrisses (Surge) im Verdichter (Beispiel 5.1.3-5 und Beispiel 5.1.3-7).
- Ausfall elektrischer (Bild 5.1.3-5 und -6) und elektronischer Geräte wie Digitale Regler
- Ausfall von elektrischen Generatoren und Anlassern

Wettereinflüsse: Blitzschlag

- Zerstörung von faserverstärkten Kunststoffteilen wie Propellerblätter, Fan-Leit- und Lauf-schaufeln
- Blockieren von Gleitflächen an Kulissen, Führungen und Gelenken (z.B. Triebwerks-aufhängung und Schubdüsenverstellung)
- Schädigung der Hauptlager des Triebwerks durch örtliche Anschmelzungen auf den Laufflächen der Ringe und Wälzkörper und/oder Magnetisierung der Lagerkomponenten, so dass sich Späne im Öl ansammeln können. Diese können Grübchen auslösen, die letztendlich zum Ausfall des Lagers führen.
- Schädigung von Gleitlagern in Planetengetrieben von Propellertriebwerken (Bild 5.1.3-3 und 5.1.3-4)
- Schädigung von Getrieben durch Aufschmelzungen an den Zahnflanken mit der Gefahr nachfolgender Grübchenbildung. Gefährdete Getriebe sind vor allem die Propellergetriebe (meist Planetengetriebe). Denkbar sind aber auch Schädigungen an Nebengetrieben.
- Die bei einem Blitzschlag auftretende Druckwelle kann zum Strömungsabriss im Verdichter (compressor stall) und/oder zum Flammabriss (Flamme out) in der Brennkammer führen (Beispiel 5.1.3-3.1,2 und 5.1.3-4.1,2).
- Explosion von Außentanks oder anderer kraftstoffführender Teile mit der Gefahr eines Strömungsabrisse im Verdichter auf Grund eines FOD durch Bruchstücke oder der Druckwelle (Beispiel 5.1.3-3.2)
- Induzierte Spannungen können elektronischen Geräten (mit Halbleitern, integrierten Schaltkreisen, funktechnische Anlagen) gefährlich werden (Lit. 5.1.3-2, Beispiel 5.1.3-3.1).

Der Vorstellung, dass die Zelle eines Ganzmetallflugzeugs als Faraday'scher Käfig vor schädlichen Auswirkungen eines Blitzschlags ausreichend schützt wird, zumindest was militärische Kampfflugzeuge betrifft, in Lit.5.1.3-3 widersprochen. Erfahrungsgemäß besteht für schädigende Ströme zwischen den auf der Außenhaut fließenden Strömen und dem Zelleninneren eine ausreichende Verbindung. Die mangelnde Abschirmung liegt an der Vielzahl von Öffnungen, Klappen und Fenstern.

Die Problematik dürfte sich bei einer immer stärkeren Einführung faserverstärkter Werkstoffe für die Zellenbeplankung weiter verstärken, obwohl hier Anstrengungen unternommen werden (z.B. Einbringung elektrisch leitender Drahtgewebe), das Risiko zu minimieren.

Identifizierung eines Blitzschlags

Nicht alle Schädigungen durch einen Blitzschlag zeigen sich durch den spontanen Ausfall

Fortsetzung auf Seite 5.1.3-8

Äußere Einflüsse

Wettereinflüsse: Blitzschlag

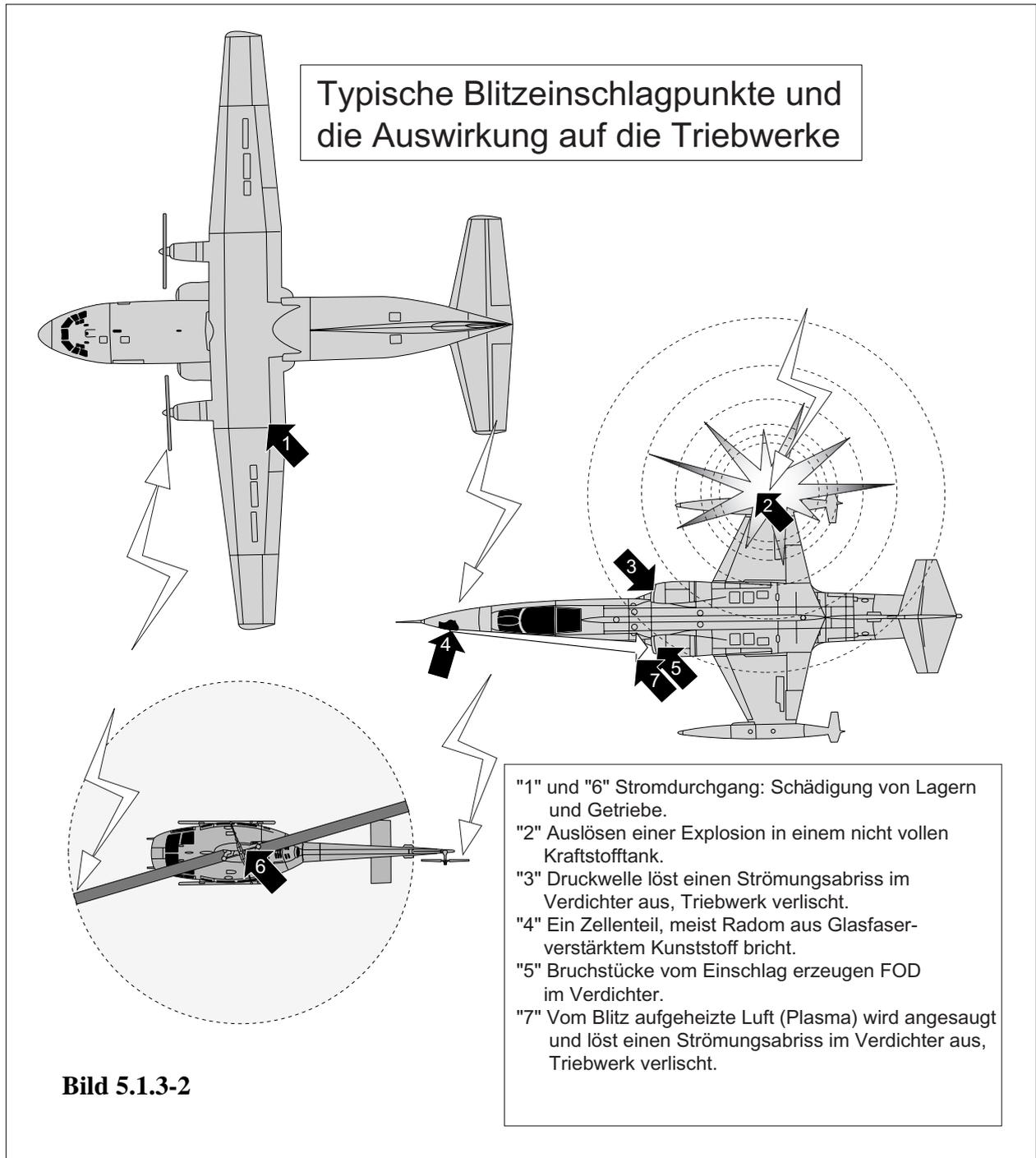


Bild 5.1.3-2: Dieses Bild zeigt in der Literatur beschriebene Schäden im Triebwerksbereich verschiedener Fluggeräte. Die schwarzen Pfeile („1“, „3“, „5“) deuten auf das betroffene Triebwerk hin, die Blitze auf die Einschlagstelle.

Direkte Blitzeinwirkung auf das Triebwerk: Dazu gehört die Schädigung von Lagern und Zahnrädern (Bild 5.1.3-3) durch Lichtbögen

beim **Stromdurchgang** („1“ Bild 5.1.3-4.1 und Bild 5.1.3-4.2). Der Schaden am unten dargestellten Hubschrauber („6“) kann Beispiel 5.1.3-2 zugeordnet werden.

Ein weitere sehr wichtige direkte Beeinflussung ist die Auslösung eines **Strömungsabriss im Verdichter** (Surge, (Bild 5.1.3-2.1, Beispiel 5.1.3-5 und Beispiel 5.1.3-7, Band 3 Bild 11.2.1.1-11 und Bild 11.2.1.1-13) mit **Verlö-**

*schen des Triebwerks („7“). Ähnliche Effekte beobachtet man beim **Ansaugen von Heißgas** (Rezirkulation, Bild 11.2.1.2-11 und Bild 11.2.1.2-12).*

*Zusätzlich besteht der Verdacht, dass die **Druckwelle**, als Folge der Luftaufheizung um einen Blitzkanal, zu einem Surge beiträgt. Diesen Effekt findet man bei Kampfflugzeugen wenn Kanonen oder Raketen in Nähe des Triebwerkseinlasses abgefeuert werden (Band 3 Bild 11.2.1.2-10 und Bild 11.2.1.2-11).*

Indirekte Beeinflussung des Triebwerks: *Bruchstücke der Zelle eie des getroffenen Raddoms „4“ gelangen in das Triebwerk „5“. Der dort erzeugte Fremdkörperschaden führt zum mechanischen und/oder strömungsbedingten Triebwerksausfall. Die **Explosion eines Außentanks** („2“, „3“) bei einem Kampfflugzeug können sowohl gefährliche Bruchstücke entstehen, als auch eine intensive **Druckwelle**. Beide sind in der Lage das Triebwerks zum Verlöschen zu bringen (Beispiel 5.1.3-3.2).*

Bild 5.1.3-2.1 (Lit. 5.1.3-14): *Eine Auswertung von 40 Fällen mit Blitzschlägen an 'Business Jets' mit Triebwerken hinten am Rumpf seit 1970 ergab interessante Tendenzen und Zusammenhänge. Diese Flugzeuge zeichnen sich durch das Merkmal aus, dass Ihre Triebwerke und damit auch deren **Luftleinläufe relativ nah am Rumpf** angeordnet sind (Skizze unten, Beispiel 5.1.3-7).*

In 20 Fällen kam es zum Verlöschen von Triebwerken, die jedoch in den meisten Fällen im Flug wieder gestartet werden konnten. In einem Fall kam es zum Verlöschen beider Triebwerke in nahezu 12000 (!) Metern Höhe (Beispiel 15.1.3-6).

*In einem neueren Fall erlitt ein solches Flugzeug in der Nacht einen Blitzschlag der **beide Triebwerke zum Verlöschen** brachte. Wegen einem schnellen Abfall der Batterieleistung konnte kein Neustart vorgenommen werden. In diesem Fall besaßen die Triebwerke, anders als im Beispiel 5.1.3-7, keinen elektronischen Regler (FADEC).*

*Auch **Kampfflugzeuge** sind durch ein Verlöschen eines Triebwerks durch Heißluftwirkung gefährdet (Bild 5.1.3-2). Hier liegen die **Luftleinlässe an den Seiten des Rumpfes** (Skizze oben).*

*In einer anderen Statistik von 14 Vorfällen an Verkehrsflugzeugen verschiedener Konfiguration hat man ebenfalls eine besondere Empfindlichkeit kleiner Flugzeuge mit hinten am Rumpf angebrachten Triebwerken festgestellt. Es gab aber auch Triebwerksausfälle an großen **3-strahligen Verkehrsflugzeugen, zwei-strahligen Flugzeugen und Turbopropflugzeugen**.*

*Der zum **Verlöschen eines Triebwerks führende Mechanismus eines Blitzschlags** wird wie folgt erklärt:*

*Gewöhnlich schlägt der Blitz in ein Ende des Rumpfes ein und läuft dann an den Rumpfseiten zum anderen Ende um dort auszutreten. Um diesen Strompfad wird die Luft bis zum Plasmazustand aufgeheizt (Aero-thermische Effekte). Liegen die Triebwerkseinlässe wie bei den dargestellten Typen nahe am Rumpf, kann die aufgeheizte Luft angesaugt werden (Beispiel 5.1.3-5 und Bild 5.1.3-7). Eine solche **Störung der Ansaugluft** kann einen **Strömungsabriss (Surge) im Verdichter** auslösen (Band 3 Bild 11.2.1.2-12). Das Triebwerk kann dann wegen **Luft-/Sauerstoffmangel in der Brennkammer verlöschen**. Die reduzierte Luftmenge ist in der Lage bei gleicher oder gar ansteigender Kraftstoffzufuhr (Regler reagiert auf Drehzahlabfall) eine gefährliche **Überhitzung der Heißeile** auszulösen. Offenbar sind besonders Triebwerke mit FADEC infolge einer ungeeigneten Reaktion auf die Symptome besonders betroffen.*

Empfohlene Maßnahmen:

- Die Piloten sollten sich bewusst sein, dass gefährdete Flugzeugtypen, insbesondere Business Jets, die mit einem elektronischen Regler (FADEC) ausgerüstet sind, einem besonderen Risiko (Potential Hazard, Bild 2-3.2) unterliegen.

Äußere Einflüsse

Wettereinflüsse: Blitzschlag

Flugzeugkonfigurationen bei denen eine besondere Gefahr des Verlöschens der Triebwerke durch Blitzschlag besteht.

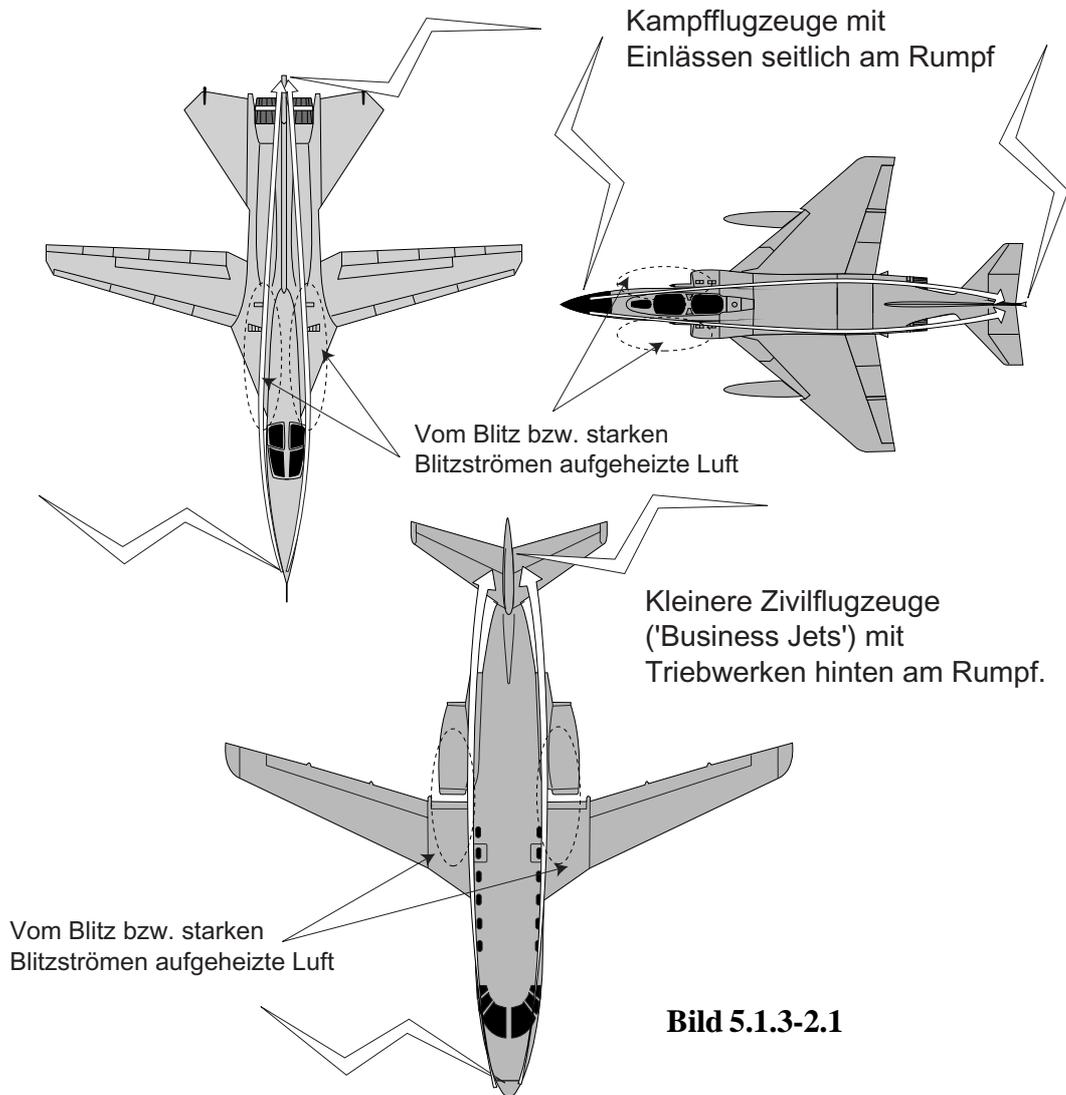


Bild 5.1.3-2.1

- Nähert sich das Flugzeug einer **Wetterzone mit Blitzschlagrisiko** ist die **APU** zu starten. So ist bei Ausfall beider Triebwerke ausreichend **Leistung und Hydraulikdruck für einen Wiederstart im Flug** gewährleistet. Verfügt ein Flugzeug über einen **ausschwenkbaren fahrtwindgetriebenen Generator (Ram Air Turbine = RAT)** kann dieser bei ausgefallenen Triebwerken wenigstens die elektrische Versorgung sicher stellen um die Chance einer kontrollierten Notlandung zu verbessern.

Wettereinflüsse: Blitzschlag

Fortsetzung von Seite 5.1.3-4

eines Bauteils oder einer Fehlfunktion an, die dem Pilot angezeigt werden. Hierzu gehören z.B. Schädigungen an Lagerungen. Es ist deshalb wichtig festzustellen, ob ein möglicherweise schädigender Blitzschlag stattgefunden hat.

Meistens wird der Blitzschlag von der Besatzung gehört oder gesehen. Vor dem Blitzschlag zeigen sich häufig Lichterscheinungen wie Elmsfeuer oder Entladungen. Es ist jedoch auch möglich, dass die Besatzung überhaupt nicht merkt, von einem Blitz getroffen worden zu sein. Deshalb ist es Aufgabe des Wartungspersonals, geeignete Inspektionen durchzuführen. Typische Anzeichen für einen Blitzschlag sind Einschlaganzeichen wie Brand- bzw. Schmelzlöcher, Anschmelzgrübchen Abblättern und /oder Blasenbildung und langgezogene Brandspuren an organischen Lack- und Schutzschichten. Solche Anzeichen sind an bevorzugten Stellen des Flugzeugs zu erwarten; hinzu kommen Fehlfunktionen von Geräten. Falls Anzeichen für einen Blitzschlag, der das Triebwerk schädigend beeinflussen könnte (siehe z.B. Wartungsvorschriften) gefunden werden, ist im Zweifelsfall das Triebwerk genauer inspizieren und gegebenenfalls zu zerlegen. Dabei gilt den Hauptlagern ein besonderes Interesse.

Für einen Blitzschlag bevorzugte Zellenbereiche und deren Überprüfung

- Niet- und Schraubenköpfe
- Ablösungen bei Honeycombstrukturen (Abklopfen)
- Nichtmetallische Strukturen, insbesondere an den Extremitäten des Rumpfs (Rissbildung, Delaminationen/weiche Bereiche)
- Verbindungslitzen und Ableiter für statische Aufladungen
- Elektrische Systeme (Fehlfunktionen)
- Staurohre
- Überprüfung von Luftauslässen auf Anzeichen von Rußablagerungen, die auf Überhitzungen innerer Anlagen hinweisen können
- Vermessung der Magnetisierung bestimmter Komponenten (insbesondere im Bereich des magnetischen Kompass) mit einer Magnetsonde („Fluxmeter“)

Für einen Blitzschlag bevorzugte Triebwerksbereiche:

- Propellerblätter an der Spitze und der Austrittskante (Propeller sind bei Triebwerken die häufigste Einschlagstelle). Hier sind bei metallischen Propellerblättern bereits kleine Anschmelzkrater ein Hinweis auf einen schädigenden Blitzschlag. Auch die Triebwerksverkleidung ist auf einen Überschlag vom Propeller her zu überprüfen. Propellerblätter aus faserverstärkten Kunststoffen sind auf Überhitzungsspuren (Verfärbung, Blasenbildung, Abblätternungen) im Bereich innen verlegter Leiter (Masseverbindungen) zu überprüfen.
- Triebwerksaufhängung, häufig handelt es sich um Gleitflächen an sphärischen Lagern und Bolzenverbindungen
- Lufteintrittskanäle der Triebwerke

Äußere Einflüsse

Wettereinflüsse: Blitzschlag

"Die Triebwerke merkten trotz elektronischer Regler nichts vom Blitzeinschlag."



Beispiel 5.1.3-1 (Lit. 5.1.3-6):

Zitat: „An actual (lightning) strike occurred during a test flight...about a mile from a thunderstorm. Lightning struck the nose and exited the tail. The **nose dome was split open and weather radar antenna destroyed**. Several flight test instrumentation transducers also were destroyed. There was no indication that the engines even knew it happened...(the manufacturer assured) that both engines could not be inadvertently shut down simultaneously in flight due to shorted wiring or a lightning strike. Measures to insure that **engine controls are isolated from lightning hazards include:**

-**Right engine instrumentation wiring** is installed on the **right side** of...the cabin, while left engine wiring is on the left side of the cabin.

-Engine **instrumentation wiring is separated** by at least a quarter of an inch from all other wiring.

-All other **wires penetrating the fuselage are routed away from electronic engine control wiring**.

Each electronic engine control consists of **two independent computers mouted on a single box** on the engine fan housing. The two computers, known as channels, are **powered by independent permanent magnet alternators**.

Each channel can sense all relevant engine parameters separately and feed such information as fuel flow back to the cockpit.“

Kommentar: Offenbar lassen sich schädigende Auswirkungen eines Blitzschlags auch bei modernen Verkehrsflugzeugen mit elektronischen Triebwerksreglern vermeiden.

Ob dies auch langfristig bei Betriebseinflüssen wie Korrosion oder Verschleiß der Verkabelung (Band 5 Bild 19.2.1-1.2) gewährleistet ist wird die Erfahrung zeigen.

Wichtig scheint zu sein, dass kein Plasma (heiße Luft) in die Triebwerkseinläufe gelangt und einen Strömungsabriss im Verdichter (surge, Band 3 Bild 11.2.1.2-12) auslöst. Das ist im vorliegenden Fall anders als im Beispiel 5.1.3-5 auszuschließen, weil der **Blitzein- und austritt ausreichend weit von den Triebwerkseinlässen** liegt.

Bild 5.1.3-3: Bei Propellertriebwerken stellt der Propeller eine bevorzugte Blitzeinschlagstelle dar. Der Blitz läuft durch die Propellerwelle in das Untersetzungsgetriebe (üblicherweise ein Planetengetriebe) und über die Gehäuse zur Triebwerksaufhängung. Dabei können unterschiedliche Wege genommen werden und somit verschiedene Komponenten geschädigt werden (Bild 5.1.3-4). In jedem Fall aber wird ein Wellenlager („1“) durchflossen. Der Strom kann z.B. direkt in das Nasengehäuse laufen oder über die Planetenräder („6“, „7“, „8“) und deren Verzahnung in die Gehäuse. In diesem Fall sind die hochempfindlichen Gleitlager („2“, „4“) der Planetenräder betroffen. Der Strom kann auch von den Planetenrädern in das Sonnenrad und damit in die Niederdruckwelle geleitet werden. Um diese unerwünschten Stromübergänge mit der Gefahr von Anschmelzungen zu vermeiden, sollten kritische Übergangsbereiche nach Möglichkeit gegen Stromdurchgang geschützt werden. Dies kann bei nicht umlaufenden Teilen mit Massekabeln erfolgen.

Äußere Einflüsse
Wettereinflüsse: Blitzschlag

Blitzschlag kann ein Triebwerk schädigen.

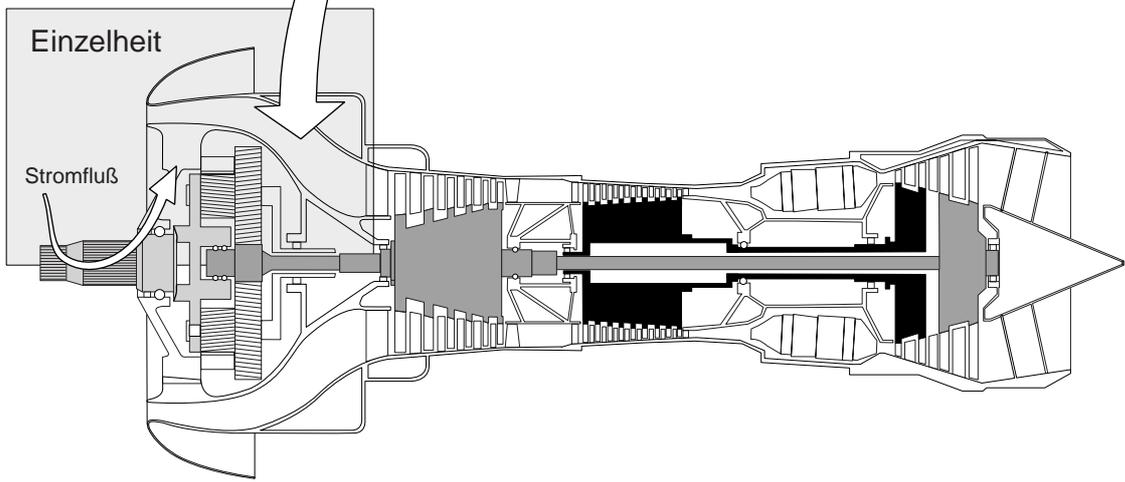
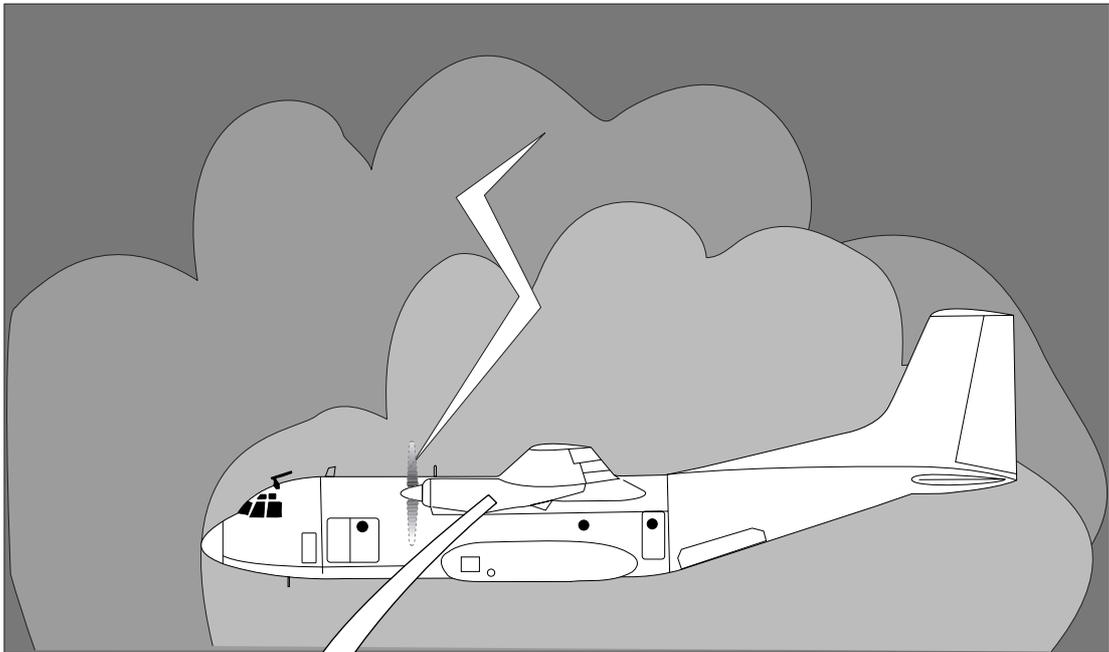
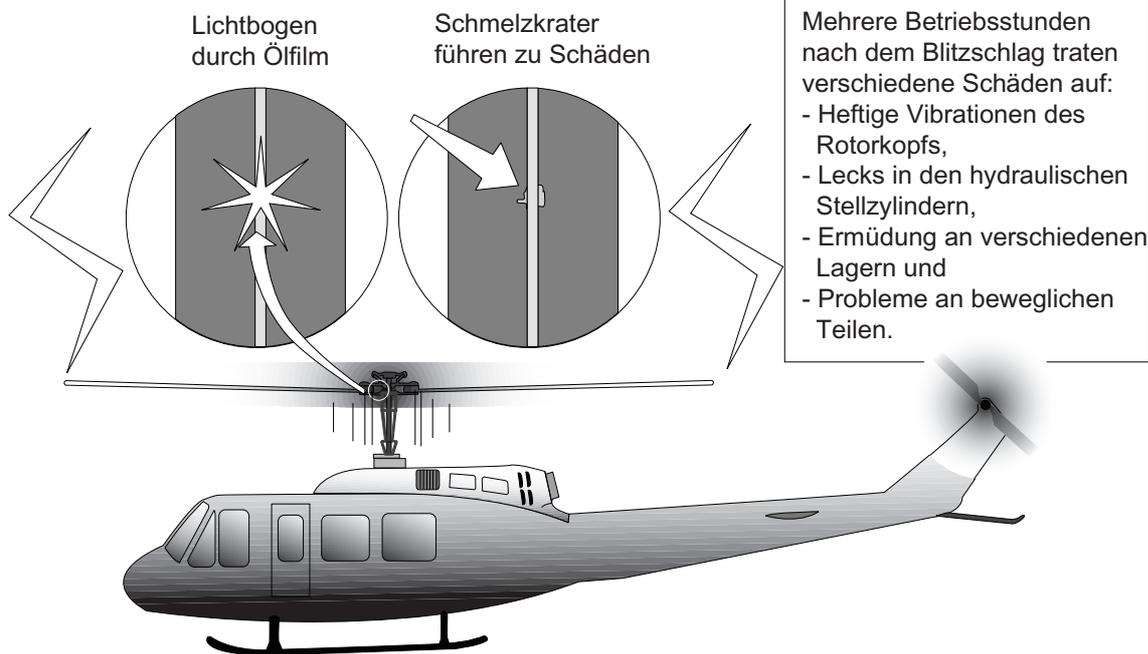


Bild 5.1.3-3

Wettereinflüsse: Blitzschlag



Beispiel 5.1.3-2 (Lit. 5.1.3-7):

Zitat: „...Bei Hubschraubern finden sich scharfe Ecken und Kanten (in die der Blitz bevorzugt einschlägt) hauptsächlich an den **Rotoren**. Der Blitz war im vorliegenden Fall **hier ein,- und auch wieder ausgetreten**; die Folgen wurden als nicht besonders schwer eingestuft. Nach Auswechseln der schadhaften Teile wurde der Hubschrauber wieder für den Flugbetrieb freigegeben.

Nach einigen Flugstunden musste aber auf Grund wachsender **Vibrationen** auch der Rotorkopf ausgetauscht werden. Dann traten Lecks in den **hydraulischen Stellzylindern** auf. Nach und nach fielen schließlich immer mehr bewegliche Teile aus, besonders verschiedene Lager.

Wegen des seltsamen Ausfallverhaltens wurde nun die gesamte Mechanik untersucht. Es stellte sich dabei heraus, dass an den Kontaktflächen zwischen beweglichen und festen Teilen (Kugellager, Kolben, Führungen usw.) mehr oder weniger starke Krater durch Stromübergänge entstanden waren (Bild 5.1.3-4.2). Was für ein **hoher Strom geflossen sein muss, ließen die total magnetisierten Kugeln**

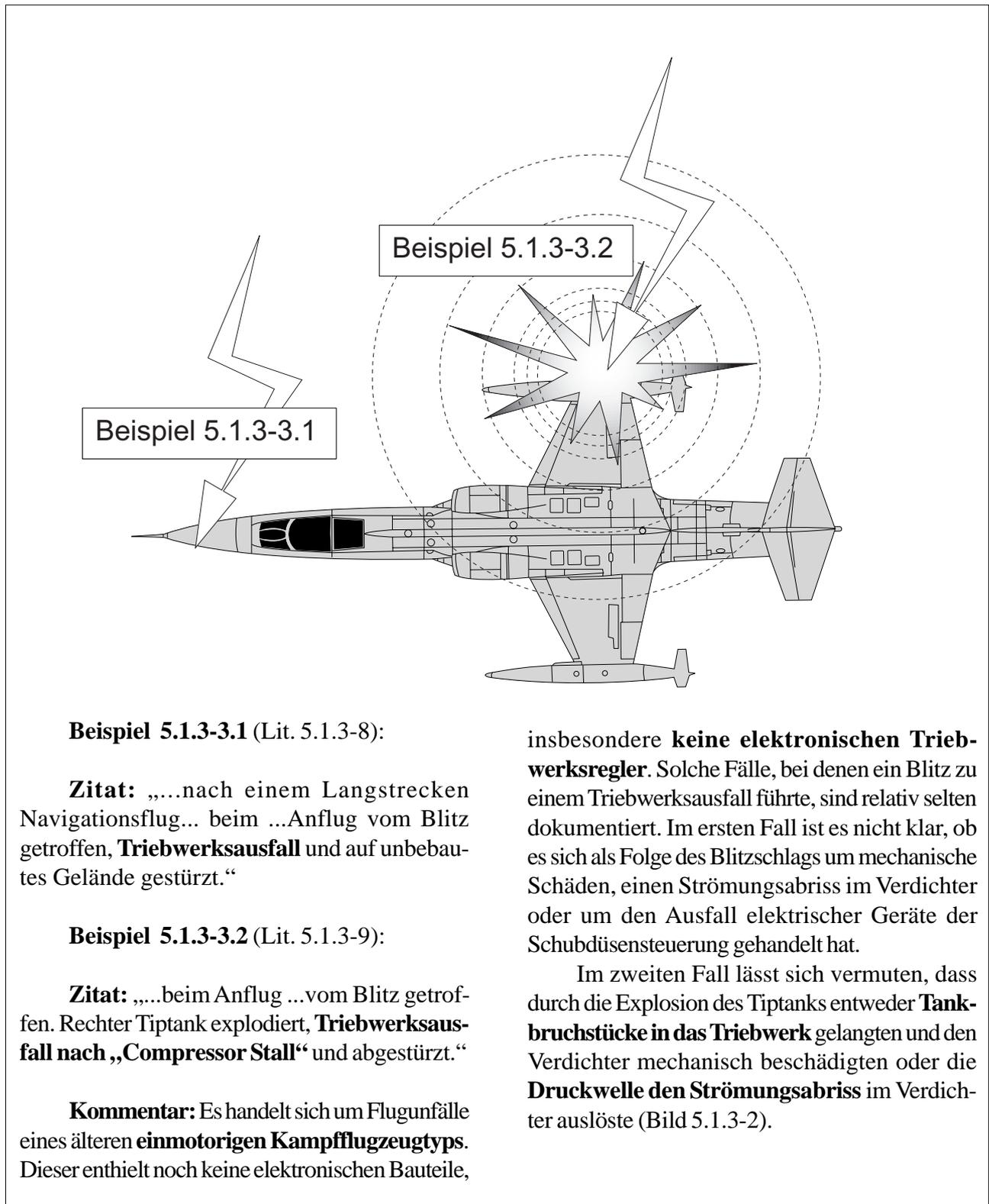
in der Taumelscheibe ahnen. Die Krater ließen Reibung und Verschleiß enorm ansteigen, stellenweise waren die Lagertemperaturen so hoch, dass das Metall in die Anlauffarben geriet. Hätte dieser ungewöhnliche Verschleiß nicht sofort stutzig gemacht, wäre nach nur wenigen Flugstunden ein Totalausfall nicht ausgeschlossen gewesen.

Obwohl der Schaden äußerlich als gering angesehen wurde, war in Wirklichkeit doch erheblicher Schaden eingetreten. **Wenn Hubschrauber auch nur einen leichten Blitzschlag erleiden, sollten daher die nächsten Flugstunden mit extremer Achtsamkeit überwacht werden.** Ölanalysen, in kurzen Zeitabständen, durchgeführt, helfen Lager Schäden frühzeitig zu erkennen.“

Kommentar: Obwohl im beschriebenen Fall das Triebwerk anscheinend nicht betroffen war, ist dies auch bei Hubschraubern nicht auszuschließen. Hier sollten bei Blitzschlagverdacht vermehrt regelmäßige Ölproben für Analysen entnommen werden um einen eventuellen Späneanfall (Grübchen in den Lagerlaufbahnen und den Zahnflanken der Getriebezahnräder, Bild 5.1.3-4.1) rechtzeitig zu erkennen.

Äußere Einflüsse

Wettereinflüsse: Blitzschlag



Beispiel 5.1.3-3.1 (Lit. 5.1.3-8):

Zitat: „...nach einem Langstrecken Navigationsflug... beim ...Anflug vom Blitz getroffen, **Triebwerksausfall** und auf unbebautes Gelände gestürzt.“

Beispiel 5.1.3-3.2 (Lit. 5.1.3-9):

Zitat: „...beim Anflug ...vom Blitz getroffen. Rechter Tiptank explodiert, **Triebwerksausfall** nach „Compressor Stall“ und abgestürzt.“

Kommentar: Es handelt sich um Flugunfälle eines älteren **einmotorigen Kampfflugzeugtyps**. Dieser enthielt noch keine elektronischen Bauteile,

insbesondere **keine elektronischen Triebwerksregler**. Solche Fälle, bei denen ein Blitz zu einem Triebwerksausfall führte, sind relativ selten dokumentiert. Im ersten Fall ist es nicht klar, ob es sich als Folge des Blitzschlags um mechanische Schäden, einen Strömungsabriss im Verdichter oder um den Ausfall elektrischer Geräte der Schubdüsensteuerung gehandelt hat.

Im zweiten Fall lässt sich vermuten, dass durch die Explosion des Tiptanks entweder **Tankbruchstücke in das Triebwerk** gelangten und den Verdichter mechanisch beschädigten oder die **Druckwelle den Strömungsabriss** im Verdichter auslöste (Bild 5.1.3-2).

Blitze können an Triebwerksteilen charakteristische Spuren hinterlassen.

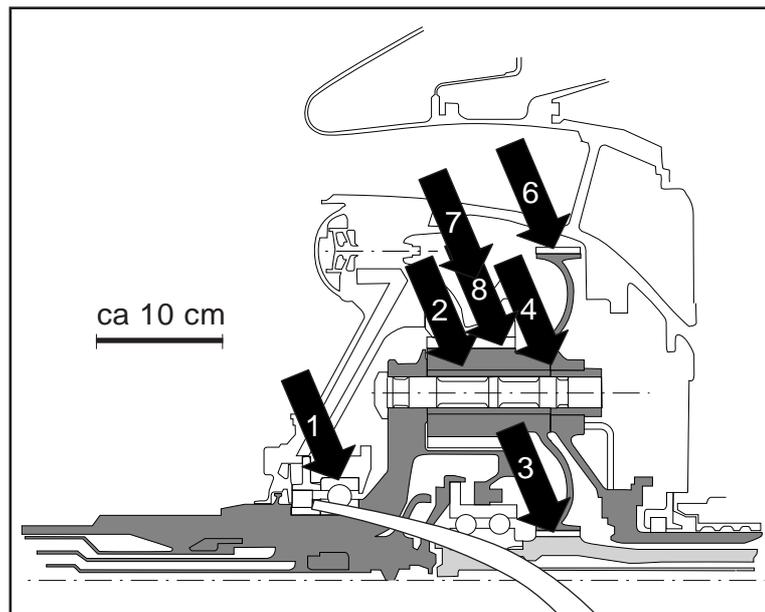
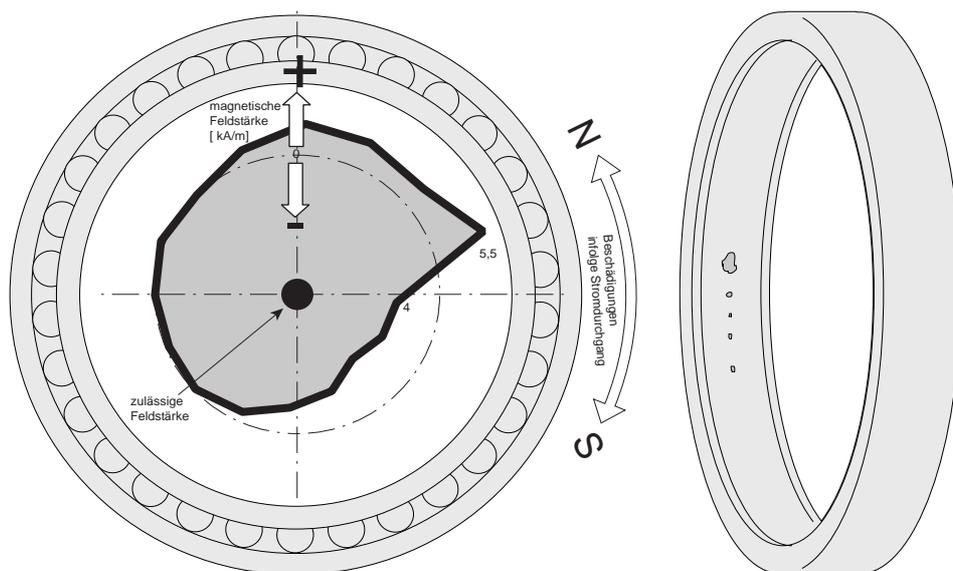


Bild 5.1.3-4.1



Außenring eines Propellerwellenrollenlagers nach einem Blitzschlag

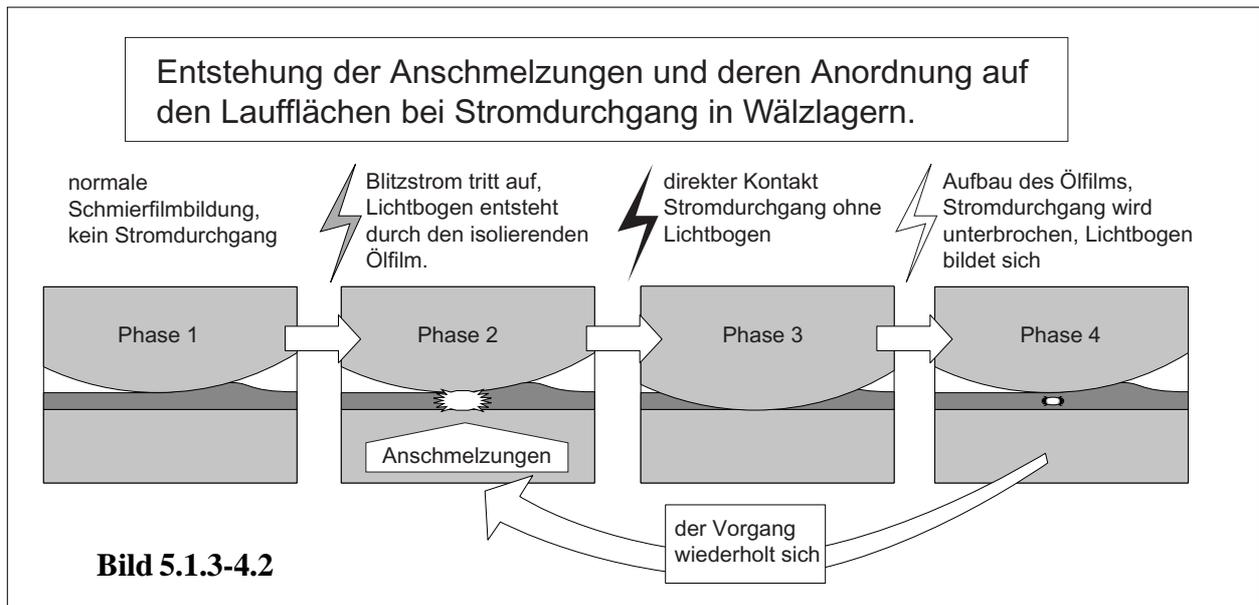


Bild 5.1.3-4.1 und Bild 5.1.3-4.2: Die obere Skizze zeigt die typischen Bereiche eines Planeten-Propellergetriebes, welches erfahrungsgemäß durch Stromdurchgang infolge eines Blitzschlags geschädigt werden können.

- Propellerwellenlager „1“ und „5“

- Planetenradlager (hier Gleitlager) „2“

- Verzahnungskette (Ritzel) der antreibenden Turbinenwelle „3“, Planetenradverzahnung „6“, Hohlradverzahnung „7“

- Momentenmesseinrichtung „8“

- Kontaktfläche zum Planetenträger „4“

Die unteren Skizzen zeigen den typischen Befund eines Lagers („5“) mit energiereichem (Blitz-) Stromdurchgang. Anschmelzspuren auf der Sitzfläche des Innenrings sowie punktförmige Anschmelzungen auf den Laufflächen (hier nicht dargestellt). Die **Anordnung der Anschmelzungen am Umfang entspricht gewöhnlich nicht dem Wälzkörperabstand**. Die Abstände ergeben sich aus einer wiederholten Lichtbogenbildung (**Bild 5.1.3-4.2**). Diese entsteht, wenn der Blitzstromübergang vom Wälzkörper zur Lauffläche durch den hydrodynamisch gebildeten Ölfilm unterbrochen wird.

Bricht der Schmierfilm im Lichtbogen zusammen, kommt es zum direkten Kontakt der Wälzkörper mit den Laufflächen und der Lichtbogen verlöscht. Dann baut sich der Schmierfilm wieder auf und der Vorgang kann sich wiederholen.

Die wirksam gewordene Magnetfeldstärke ergibt bei der Vermessung im Bereich des Stromdurchgangs einen charakteristischen Verlauf. Führt man einen Kompass über den Umfang kann man in diesem Bereich eine Umpolung (Drehung der Magnetnadel um 180°) beobachten. Dies dürfte eine relativ einfache Methode sein, bei Stromdurchgangsverdacht auch ohne Anschmelzungen einen, für Blitzschlag typischen starken Stromdurchgang an einem Wälzlager nachzuweisen.

Elektronik kann von Umwelteinflüssen stark beeinflusst werden.

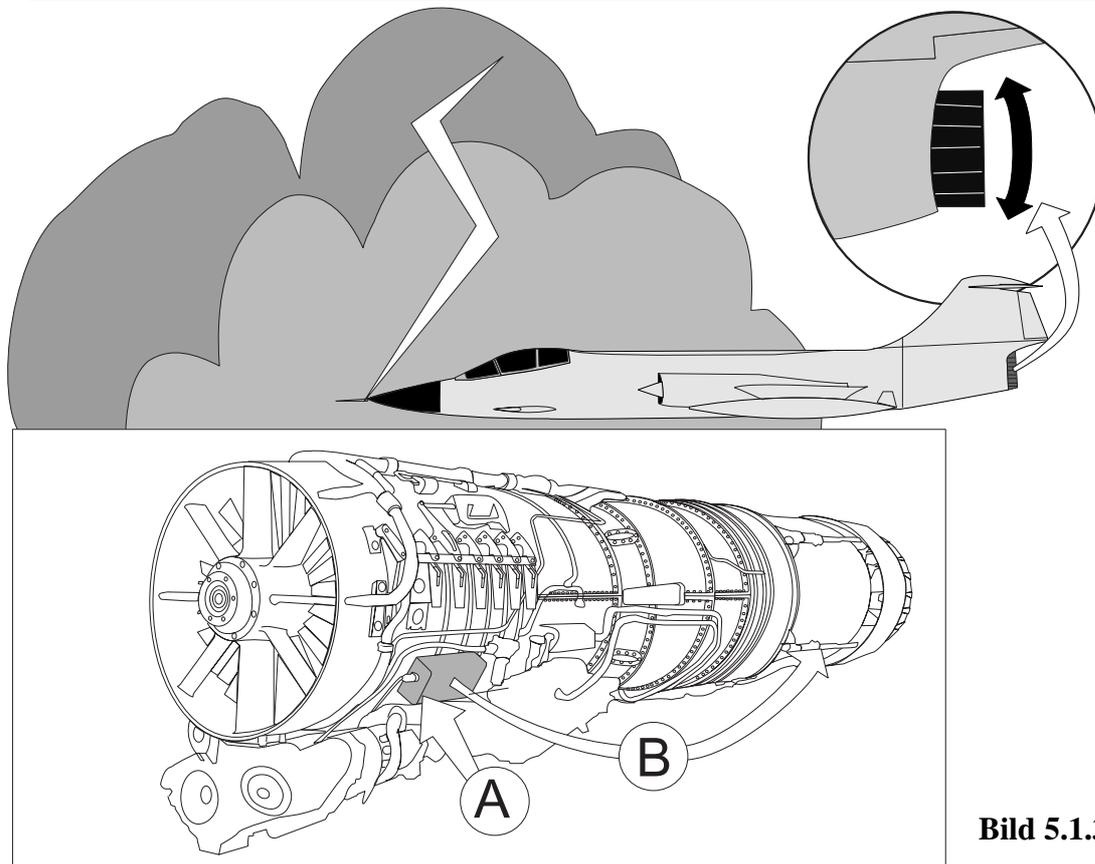


Bild 5.1.3-5

Bild 5.3.1-5: Elektronische Geräte wie Verstärker oder digitale Regler können durch Überspannungen als Folge von induzierten Strömen oder Teilströmen des Blitzes kurzzeitig fehlerhaft arbeiten und/oder bleibend geschädigt werden.

Ein Beispiel ist die Regelung der Schubdüsenverstellung („A“, „B“) bei einem älteren Kampfflugzeugtyp (Beispiel 5.1.3-3.1) dessen Schubdüse sich unter bestimmten Schlechtwetterbedingungen beim Flug durch Wolken plötzlich öffnete. Dabei wurde die Fehlfunktion sowohl auf die eindringende Feuchtigkeit (Bild 5.1.1-1.2, Beispiel 5.1.1-1, Band 5 Bild 19.2.1-4) in das nicht ausreichend abgedichtete Gerät („A“), als auch auf die Einwirkung elektrischer Fremdströme (Blitzschlag und Aufladungen, Beispiel 5.1.3-5) zurückgeführt.

Ohne Nachbrennerbetrieb bedeutete die offene Schubdüse dies einen entscheidenden Schubverlust mit Absturzgefahr (Beispiel 5.1.3-4.1 und Beispiel 5.1.3-4.2).

Äußere Einflüsse

Wettereinflüsse: Blitzschlag

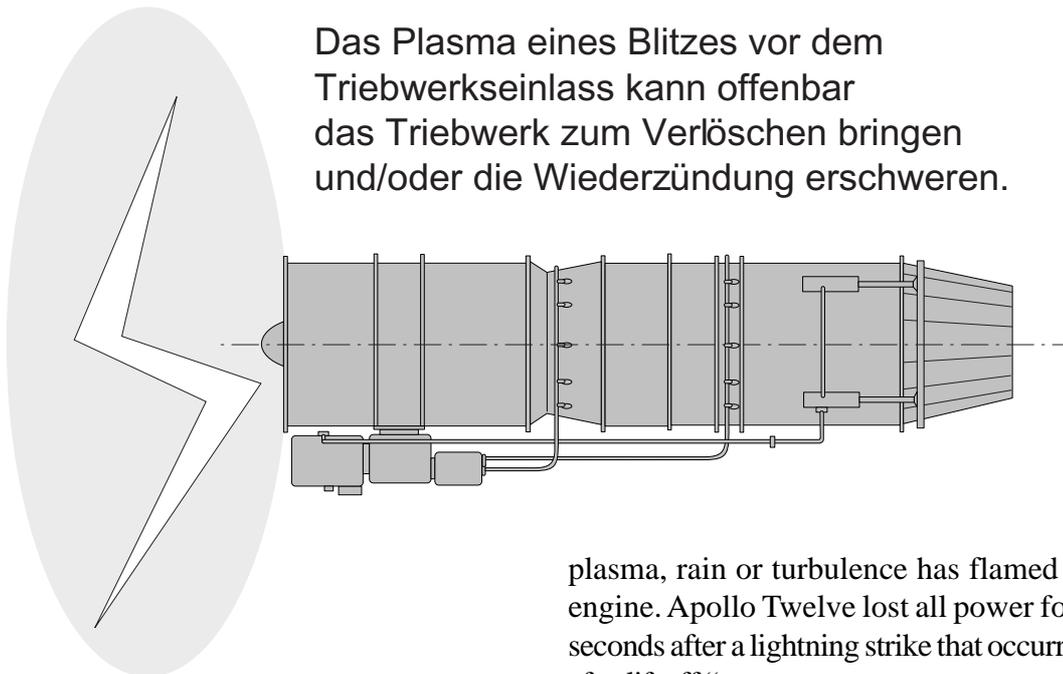
Beispiel 5.1.3-4.1 (Bild 5.1.3-5):

Zitat „1“ (Lit. 5.1.3-10): „...bei Anflug... in einem Unwetter mit offener Schubdüse auf freies Feld gestürzt.“

Beispiel 5.1.3-4.2:

Zitat „2“ (Lit. 5.1.3-11): „...Landung bei Schneegestöber um 21.48 Uhr mit offener Schubdüse, abgebrochen und durchgestartet. Pilot... anschließend aus Sicherheitsgründen ausgestiegen.“

Kommentar: Es handelt sich um ein einstrahliges Kampfflugzeug. Von diesem Flugzeugtyp wurde eine Vielzahl ähnlicher Vorkommnisse gemeldet. Die offene Schubdüse bedeutet einen entscheidenden Schubverlust (vergleiche Bild 5.1.3-5). Es ist nicht klar, inwieweit die elektrische Fehlfunktion durch Wassereinwirkung oder durch Fremdströme für die Schubdüsenprobleme ursächlich verantwortlich ist.



plasma, rain or turbulence has flamed out the engine. Apollo Twelve lost all power for seven seconds after a lightning strike that occurred soon after lift off.“

Beispiel 5.1.3-5 (Lit 5.1.3-12):

Zitat: „Most important: When a lightning strike occurs ahead of a turbine engine the resulting Plasma can cause short term power loss or flameouts. It has appeared to a... corporate Jet. The igniters on a jet engine are supposed in the or near thunderstorms to effect relights if

Kommentar: Das Plasma von einem Blitz kann offenbar ein Triebwerk bereits zum Verlöschen bringen ohne dass dieses selbst getroffen wird oder direkt von der elektrischen Wirkung beeinflusst ist. Wirksam wird in erster Linie die **heiße angesaugte Luft** (Lit 5.1.3-14, Bild 5.1.3-2.1). Sie löst einen **Strömungsabriss im Verdichter** aus (Surge, Band 3 Bild 11.2.1.2-12, Beispiel 5.1.3-7).

Wettereinflüsse: Blitzschlag

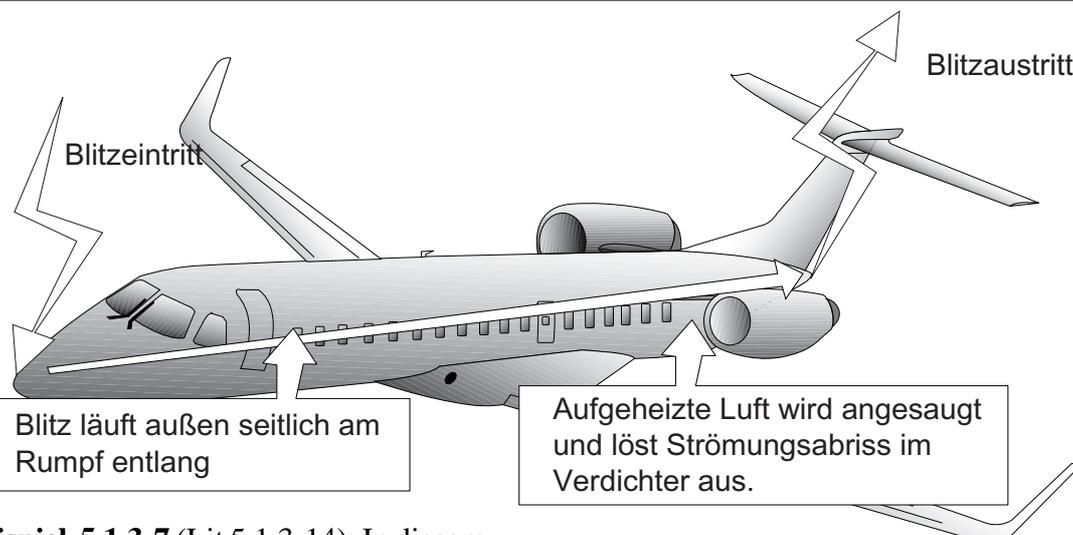


Beispiel 5.1.3-6 (Lit 5.1.3-13):

Zitat: „...The corporate jet, which was acquired.... two years ago, was **cruising 33 000 ft** when it encountered the thunderstorm and was subsequently **struck by lightning**, damaging its electrical system. **Both engines also failed**....The pilots were killed, but their two passengers survived the crash... According

to business aviation accident analyst ... there has never before been a fatal accident in a corporate aircraft attributed to a lightning strike...“

Kommentar: Der Blitzschlag in einer so **großen Höhe** erscheint ungewöhnlich und zeigt, dass auch oberhalb der Zone des üblichen Wettergeschehens noch mit Blitzschlag zu rechnen ist.



Beispiel 5.1.3-7 (Lit 5.1.3-14): In diesem Fall eines Business Jets fiel bei einem Blitzschlag in den Rumpf während des Abstiegs zur Landung ein Triebwerk aus. 5 bis 10 Sekunden nach dem Blitzschlag zeigte das linke Triebwerk eine hohe Turbinentemperatur. Die Drehzahl fiel schnell auf unter Leerlauf. Darauf wurde das **Triebwerk vom elektronischen Regler (FADEC) ohne Warnhinweise an das Cockpit abgeschaltet**. Die Landung mit einem Triebwerk gelang problemlos.

Als Ursache wurde ein **Strömungsabriss im Verdichter** der linken Triebwerks auf Grund die **Strömungs/thermische Beeinflussung** (aero-

thermal effects) durch den Blitz angegeben (Bild 5.1.3-2 und Beispiel 5.1.3-5).

Kommentar: Gerade bei ähnlichen Flugzeugtypen mit **Triebwerken hinten am Rumpf** beobachtet man eine Empfindlichkeit für Surge nach einem Blitzschlag in den Rumpf. Dies wird mit dem **Pfad des Blitzes an der Rumpfsseite** erklärt (Bild 5.1.2-2.1). Nicht selten kommt es zum Verlöschen beider Triebwerke. Ein weiteres Problem ist das Abschalten durch die FADEC.

Äußere Einflüsse

Wettereinflüsse: Blitzschlag

Es gibt viele äußere Einflüsse, die elektronische Bauteile eines Triebwerks schädigen können.

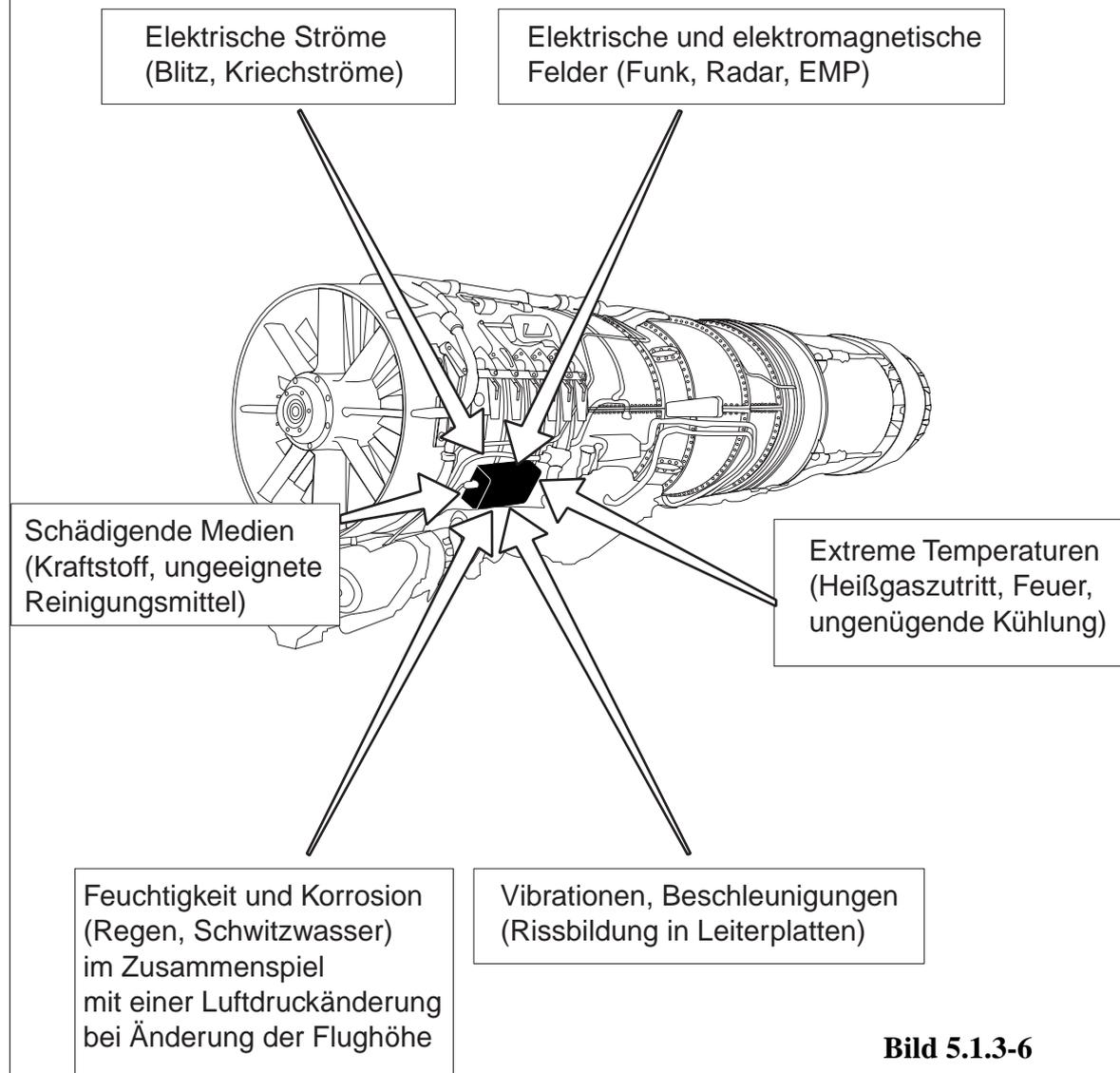


Bild 5.1.3-6

Bild 5.1.3-6: Die verstärkte Einführung elektronischer Bauteile in Reglern und elektrischen Aggregaten lenkt das Interesse auf schädigende Einflüsse für diese Bauteile. Dieses Bild zeigt eine Zusammenstellung:

Elektrische Ströme: Elektrische Ströme können durch direkten Kontakt mit (Blitz, siehe Beispiele 5.1.3-5 und -6) stromführenden Bauteilen oder indirekt durch induzierte Ströme auf Grund der fluktuierenden Charakteristik des Blitzstroms entstehen. Hierbei wurden Span-

nungen um 100 Volt gemessen, welche als Überspannung elektronische Bauteile zerstören können. Auch Gleichströme mit relativ niedriger Spannung können bei ungünstiger Stromrichtung (Polung) Halbleiter (Transistoren) zerstören. Eine weitere Möglichkeit ist das Löschen und/oder Zerstören von Speicherchips. Stärkere Blitzströme können auch elektrische Anbaugeräte wie Generatoren schädigen. Ähnliches gilt auch für Kriechströme auf Grund nicht ausreichender Isolation und/oder unzureichender Masseverbindungen von anderen stromführenden Aggregaten wie Startergeneratoren.

Elektrische und elektromagnetische Felder: Bekannt geworden ist ein Fall, bei dem im Bereich von Sendemasten die Leitwerksfunktionen eines Kampfflugzeugs so stark beeinflusst wurden, dass es zum Absturz kam. Die Beeinflussung von Triebwerksregelungen scheint dagegen weniger wahrscheinlich.

Plasma im Blitzbereich: Das Beispiel 5.1.3-5 enthält Literaturangaben die das Verlöschen eines Triebwerks in ursächlichem Zusammenhang mit dem **Plasma eines Blitzes vor dem Einlauf** bringen. In wie weit dieser Effekt auch elektronische Komponenten moderner Triebwerke bedroht, ist nicht klar.

Extreme Temperaturen: Elektronische Systeme sind gegen extreme Temperaturen, die zu einer Schädigung von Bauteilen wie Prozessoren oder Speicherchips führen können, durch Kühlungen geschützt. In besonderen Fällen wird Kraftstoff als Kühlmittel verwendet.

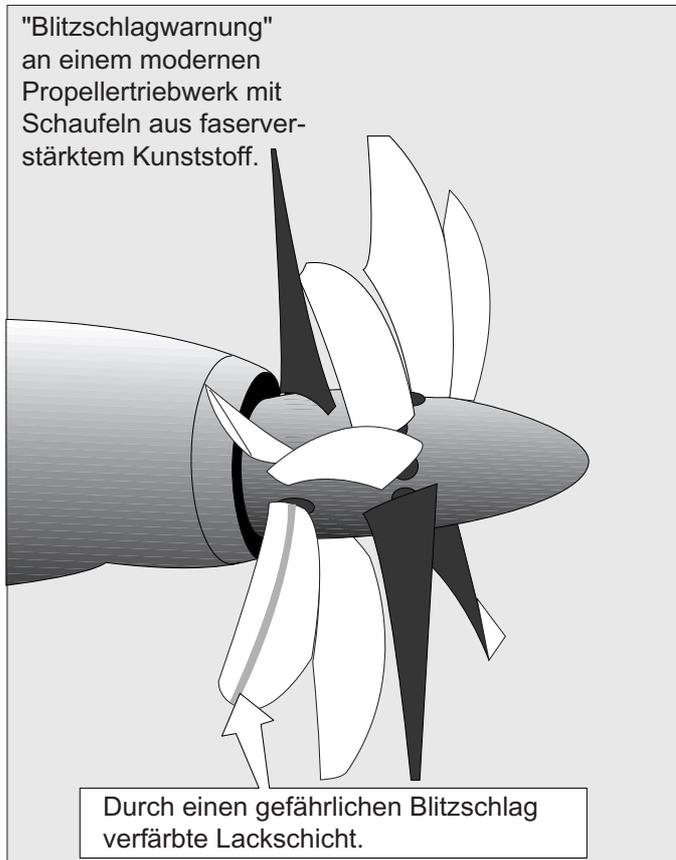
Vibrationen bzw. Beschleunigungen: Anbaugeräte, insbesondere elektronische Geräte sind durch geeignete Aufhängungen am Triebwerk gegen von außen einwirkende betriebsübliche Beschleunigungen geschützt. In besonderen Fällen wie einem Containmentfall (Abfliegen eines Schaufelblattes) und/

oder starken Rotorunwuchten können Überlastungen und Schwingbrüche auftreten.

Feuchtigkeit und Korrosion: Bei ungenügend dichten Gehäusen um elektronische Geräte kann direkt durch Feuchtigkeitseinwirkung (Flug durch Regen) oder durch Schweißwasser (insbesondere im Stillstand am Boden) Wasser bzw. Feuchtigkeit eindringen (Bild 5.1.1-1.2). Dieser Vorgang wird eventuell durch Luftdruckänderungen bei unterschiedlichen Flughöhen oder durch Temperaturänderungen in den Gehäusen (Veränderung des Innendrucks) unterstützt. Durch Feuchtigkeit, die zusammen mit atmosphärischen Verunreinigungen (Meeresatmosphäre mit Salzen) einen leitenden Elektrolyt bildet, kann die Funktion der Geräte kurzzeitig gestört werden (Bild 5.1.3-6). Über längere Zeiten kann Korrosion auftreten, z.B. an den Leiterbahnen der Platinen oder den Lötverbindungen. Es besteht auch die Möglichkeit, dass sich leitend Korrosionsprodukte bilden, die sich an anderen Stellen ablagern.

Schädigende Medien: Alle Anbaugeräte und Hilfsstoffe müssen im Zuge ihrer Zulassung ihre Eignung direkt oder indirekt nachweisen d.h. es darf zu keinen unzulässigen Beeinflussungen durch äußere Medien kommen. Die Verwendung ungeeigneter Hilfsstoffe wie aggressiver Reinigungsmittel oder von Werkstoffen die von den Zulassungsspezifikationen abweichen, kann Schädigungen durch einen chemischen Angriff begünstigen. Hilfsstoffe können direkt wirken, indem das Gerät durch eine Schädigung ausfällt oder indirekt, wenn z.B. eine Gehäusedichtung durch den Angriff versagt und Feuchtigkeit eindringen kann.

5.1.3.1 Maßnahmen gegen Langzeit-Folgechäden durch Blitzschlag



Warnung bei einem für Triebwerkskomponenten gefährlich intensiven Blitzschlag: Eine **Kupferlitze** unter dem hellern Lack wird so stark aufgeheizt, dass sich der **Lack darüber verfärbt**. Dies kann am Boden bei einem Rundgang erkannt und geeignete Maßnahmen ergriffen werden

- Besonders bei Turbopropantrieben ist darauf zu achten, dass für alle Lager und Zahnräder geeignete Leitungsbrücken, die den Blitzstrom um diesen Bereich führen, vorgesehen sind.
- Bei Verdacht auf Blitzschlag sind alle potentiellen Einschlagstellen wie Propellerblätter, exponierte Gondelbereiche und Triebwerksaufhängungen auf Blitzschlagspuren hin zu überprüfen.
- Bei Feststellung eines Blitzschlags ist nach den Wartungsvorschriften des Zellen- bzw. Triebwerks Herstellers vorzugehen. Im Zweifelsfall sind bei Triebwerken mit Hauptgetrieben wie Turboproptriebwerke oder Getriebefantriebwerke die Getriebe und Lager auf Blitzschädigungen (Anschmelzungen) zu überprüfen.
- Triebwerke mit Blitzschlagverdacht ohne äußere Anzeichen sollten über die nächsten Betriebsstunden besonders auf steigenden Abrieb im Öl (Hinweis auf Ermüdungsschäden an stromdurchgangsgeschädigten Wälzflächen) überwacht werden.
- Bauteile wie Lager und Zahnräder, die keine erkennbaren Schädigungen wie Anschmelzungen aufweisen, sollten im Zweifelsfall auch auf unzulässige Magnetisierung infolge von Stromdurchgang geprüft werden. Eine solche Magnetisierung erhöht die Gefahr, dass magnetische Fremtteilchen angezogen und in die Wälzflächen eingedrückt werden. Dies kann die Lebensdauer der Bauteile deutlich verkürzen.

Literatur zu Kapitel 5.1.3

- 5.1.3-1** G. Dietrich, „Die Gefährdung der Flugsicherheit durch Blitzschlag“, TIZL 12 (1976) Heft 3, Seite 129-141.
- 5.1.3-2** W. Hartmann, „Zuverlässigkeit und Systemsicherheit“, Zeitschrift „Industrielle Organisation“, 39 (1970) Nr. 2 Seite 79-81.
- 5.1.3-3** K. Hoffmann, „Blitzschlag in Flugzeugen“, Zeitschrift „Wehrtechnik“, Heft 1/74.
- 5.1.3-4** J. Marshall, „Lightning Strikes to Aircraft“, Zeitschrift „Aviation Mechanics Journal“, April 1989, No 4 Seite 32-34.
- 5.1.3-5** J.K. Bogard, „The hazard of lightning“, Zeitschrift „The International Journal of Aviation Safety“, September 1984, Seite 124-130.
- 5.1.3-6** „757 Engine Controls Survive Lightning Strike“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, August 20, 1984, Seite 22.
- 5.1.3-7** „Potz Blitz“, Zeitschrift „Flug Revue“, 2/1986 Seite 71.
- 5.1.3-8** G.Fischbach, „916 Deutsche Starfighter, ihre Bau- und Lebensgeschichten“, Seite 348.
- 5.1.3-9** G.Fischbach, „916 Deutsche Starfighter, ihre Bau- und Lebensgeschichten“, Seite 449.
- 5.1.3-10** G.Fischbach, „916 Deutsche Starfighter, ihre Bau- und Lebensgeschichten“, Seite 229.
- 5.1.3-11** G.Fischbach, „916 Deutsche Starfighter, ihre Bau- und Lebensgeschichten“, Seite 256.
- 5.1.3-12** W. McCormick, M.P. Papadakis, „Aircraft Accident Reconstruction and Litigation“, Lawyers & Judges Publishing Company Inc. ISBN 0-913857-678-19996, Seite 163
- 5.1.3-13** L. Burton Ricksk, „Lightning strike down Sabreliner“, Zeitungsartikel.
- 5.1.3-14** Civil Aviation Authority United Kingdom, „Aeronautical Information Circular AIC 29/2004“, 29 April.