

VOGELSCHLAGRISIKO BEI KAMPFFLUGZEUGEN UND TECHNISCHE MAßNAHMEN ZU
SEINER REDUZIERUNG

von GERHARD FUSSMANN, München

Zusammenfassung: Die Bewertung des Vogelschlagrisikos - hier der mögliche Verlust von Menschen oder Flugzeugen - erfolgt unter Berücksichtigung der Gefahrenklasse und der Treffwahrscheinlichkeit. Dieses Risiko kann durch Erhöhung der Vogelschlagfestigkeit des Flugzeuges reduziert werden. BWB-ML ist für die Einleitung der dazu erforderlichen Maßnahmen zuständig. Grundsätzliche Richtlinien für die Einleitung technischer Verbesserungsmaßnahmen werden angegeben. Zu den am stärksten bedrohten Flugzeugbaugruppen zählen Canopy, Antrieb und Flügel. Für sie werden Gefahrenklasse, Sicherheitsforderungen und mögliche Verbesserungsmaßnahmen wie Materialwahl, Entwurfsvarianten und analytische Testmethoden aufgeführt.

Summary: Birdstrike risk is defined as possible loss of lives or aircraft in terms of birdstrike severity and birdstrike probability. It can be reduced by taking corrective actions to improve bird impact resistance of aircraft structure. BWB-ML is the responsible government agency to initiate such actions. Some basic guidelines for corrective actions are discussed. Canopy, propulsion system, and wing belong to the most hazardous sections of the aircraft. For these sections hazard severity, bird strike requirements, and corrective actions such as material selections, design variants, and analytical test methods are given.

1. Vogelschlagrisiko

Der Trend im Flugzeugbau zu immer höheren Fluggeschwindigkeiten hat im Flugbetrieb zu einem bemerkenswerten Anstieg der durch Vogelschlag verursachten Schäden geführt.

Besonders ausgeprägt ist diese Entwicklung im militärischen Bereich und hier wiederum vor allem bei den Kampfflugzeugen, für die heute höchste Geschwindigkeiten im extremen Tiefflug gefordert werden.

Da der dabei benutzte untere Luftraum ebenfalls der bevorzugte Lebensraum unserer Vogelwelt ist, werden Kollisionen zwischen Flugzeugen und Vögeln teilweise unvermeidbar.

Deshalb sind technische Maßnahmen am Flugzeug erforderlich, die dazu dienen, durch Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Vogelschlag die Verkehrssicherheit des Flugzeuges sicherzustellen.

Der durch Vogelschlag gefährdete Bereich erstreckt sich über die gesamte angeströmte Flugzeugfläche (Vorderansicht) mit den wesentlichen Baugruppen Cockpit, Antrieb, Radom, Bug, Rumpf, Tragflächen, Leitwerke, Außenlasten und im Lande- bzw. Startfall das Fahrwerk mit Klappen.

Die Gefährdung des Flugzeuges - die mögliche Schadensauswirkung des Vogelschlages hinsichtlich der weiteren Flugfortsetzung - ist jedoch je nach betroffener Baugruppe unterschiedlich. Unter Verwendung der üblichen Gefahrenklassen (1) I = katastrophal, II = kritisch, III = marginal und IV = vernachlässigbar können die Baugruppen in entsprechende Gefahrenzonen eingeteilt werden.

Die Beurteilung des Vogelschlagrisikos für die Baugruppen oder das gesamte Flugzeug erfolgt unter Berücksichtigung der Gefahrenklasse und der Trefferwahrscheinlichkeit.

Heute übliche Grenzwerte für das akzeptierbare Risiko hinsichtlich Menschen- bzw. Flugzeugverlust liegen in der Zivilluftfahrt bei 1 pro 10^9 Flugstunden und in der militärischen Fliegerei bei 1 pro 10^6 Flugstunden.

Zur Reduzierung des Vogelschlagrisikos stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Im technischen Bereich sind sowohl Maßnahmen, die zur Verminderung der Treffwahrscheinlichkeit führen oder mit denen die Schadensauswirkungen auf Flugzeug und Besatzung abgeschwächt werden, durchführbar.

Im weiteren werden für die Baugruppen Cockpit, Antrieb und Tragflächen deren Vogelschlagproblematik und dazu einige wesentliche technische Gegenmaßnahmen angesprochen.

2. Zuständige Dienststelle

Die Einleitung technischer Maßnahmen zur Sicherstellung der Verkehrssicherheit des Musters - der technischen Betriebssicherheit - aller in der Bundeswehr betriebenen Luftfahrzeugtypen erfolgt durch den "Leiter für das Musterprüfwesen der Bundeswehr für Luftfahrtgerät (ML)", eine Abteilung des Bundesamtes für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB).

Bei Flugzeugneuentwicklungen bedeutet das auch hinsichtlich des Vogelschlagproblems:

- Festlegung der Sicherheitsforderungen an den Flugzeugentwurf unter Berücksichtigung des Entwurfskonzeptes und des vorgesehenen Einsatzspektrums.
Grundlagen sind z. B. Militärspezifikationen
- Prüfen der Erfüllung dieser Forderungen im Rahmen der Musterprüfung anhand von Nachweisversuchen oder Berechnungen.

Die Verwirklichung einer vollkommenen Sicherheit gegenüber sämtlichen einem Flugzeug drohenden Gefahren ist unmöglich. Die dominierenden Forderungen wie Leistungskennwerte und Einsatzverwendbarkeit erfordern oft Konstruktionslösungen, die nicht im Einklang mit den Sicherheitsforderungen stehen. Die Folge sind Kompromisse und das Akzeptieren eines verbleibenden, unvermeidlichen Restrisikos.

3. Grundsätzliche Richtlinien für technische Maßnahmen

3.1 Ziel

Durch Vogelschlag darf weder die Besatzung noch das Luftfahrzeug selbst gefährdet werden. Es darf nur geringer Schaden entstehen.

Dies versucht man zu verwirklichen, indem man den von der gefährdeten Konstruktion aufzunehmenden Energiebetrag auf ein Minimum abbaut. Das bedeutet, daß die Konstruktion selbst so auszu-
legen ist, daß sie die Zusatzkräfte nach Vogelaufprall derart absorbiert (z.B. Knautschzonen) und weiterleitet, daß ein möglicher daraus resultierender Schaden zu keiner wesentlichen Funktionsbeeinträchtigung führen kann (fail-safe-Prinzip).

3.2 Zeitpunkt

Aus Sicherheits- und Kostengründen müssen derartige konstruktive Maßnahmen, die ja Sicherheitsmaßnahmen darstellen, so früh wie möglich, d.h. bereits in der Phase der Flugzeugentwicklung, eingeleitet werden.

Die Anwendung neuer Technologien, die Verwendung neuentwickelter Materialien oder sich ändernde Einsatzbedingungen für das Flugzeug lassen Strukturschwachstellen in ihrem tatsächlichen Ausmaß häufig erst im späteren Einsatz erkennen. Für risikoerhöhende Schwachstellen sind dann sofort Gegenmaßnahmen einzuleiten.

3.3 Wirksamkeit

Die Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen ist durch Test- bzw. Nachweisversuche zu prüfen. Den Versuchen sind echte Einsatzbedingungen zugrunde zu legen, und es sollten nur Originalteile verwendet werden.

Unvollständige Kenntnisse der Problemzonen eines Neuentwurfes und die große Anzahl der möglichen Vogelschlagvariationen machen zahlreiche Versuche für die Bewertung der Wirksamkeit notwendig.

Da hierbei jedoch eine zerstörende Prüfung vorliegt, wird die Versuchsanzahl wegen der hohen Objektkosten (Triebwerk, Canopy) äußerst stark begrenzt. Die Ergebnisse dieser "Versuchsreihen" sind deshalb häufig nur mit Einschränkungen als repräsentativ zu bewerten.

Im Regelfall zeigt erst der spätere Einsatzbetrieb des Flugzeuges, wie gut die Maßnahmen tatsächlich zur Risikominderung beitragen.

3.4 Belastungsfall

Der dem Nachweis zugrundegelegte Belastungsfall sollte die denkbar ungünstigsten Einsatzbedingungen und Umwelteinflüsse abdecken.

Dies auch bei Vorgabe eines Restrisikos.

Wesentliche Belastungskriterien beim Versuch sind:

Vogel:	Vogelgewicht, Vogelart, Vogelzustand, Vogelausrichtung, Vogelanzahl
Aufschlaggeschwindigkeit:	Höchste zugelassene Flugzeuggeschwindigkeit im Luftraum bis 1000 m über Grund plus Vogelgeschwindigkeit

Aufschlagort	Verwendung der Größe, die die Festigkeit des Testobjektes am stärksten belastet.
Aufschlagwinkel	
Aufschlagfrequenz	
Materialtemperatur	
Materialbetriebsbelastung	

4. Cockpit

4.1 Gefahrenklasse

Die Cockpitverglasung wird der Gefahrenklasse I - katastrophal - zugerechnet, da ein mögliches Durchschlagen der Scheibe zu tödlichen Verletzungen der Besatzung oder zum Flugzeugverlust führen kann.

Unfälle dieser Art traten bisher sowohl in der zivilen als auch in der militärischen Fliegerei wiederholt auf.

4.2 Sicherheitsforderung

Zur Verhütung derartiger Unfälle dient eine Sicherheitsforderung, nach der bei Vogelschlag weder Vogelreste noch scharfkantige Verglasungssplitter in den Kabinenraum gelangen dürfen.

Der Vogelschlag entwickelt sich heute wegen der laufend höheren Fluggeschwindigkeiten immer mehr zum beherrschenden festigkeitsbestimmenden Belastungsfall für die Cockpitverglasung.

Die Verwirklichung der Festigkeitsforderungen darf jedoch selbstverständlich nicht zur Beeinträchtigung der anderen Hauptforderungen (optische Eigenschaften, Sichtverhältnisse und Notausstiegskapazität) führen.

4.3 Maßnahmen zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen Vogelschlag

4.3.1 Materialwahl

Acrylglas gegossen, (ungereckt und gereckt) ist heute der meistverwendete Scheibenwerkstoff. Gerecktes Acrylglas splittert und zerbricht nicht in scharfkantige Bruchstücke. Gerecktes Acrylglas hat eine höhere Festigkeit gegen Vogelschlag als ungerecktes Acrylglas.

Dieser Vorteil wird jedoch bei hohen Betriebstemperaturen der Scheiben (durch Rückschrumpfung) wieder aufgehoben. Die Vogelschlagfestigkeit wird durch die Scheibenstärke maßgeblich bestimmt. Die Anwendungsgrenzen für Acrylglas liegen heute bei den technischen Formgebungsverfahren, mit denen Scheiben bis zu einer Stärke von ca. 20 mm verarbeitet werden können. Festigkeitsmindernd wirkt auch die Fähigkeit des Materials, Feuchtigkeit aufzunehmen.

Polycarbonatglas hat gegenüber Acrylglas bei bestimmter Konstruktion eine höhere Vogelschlagfestigkeit, eine höhere Temperaturbeständigkeit und eine höhere Verformbarkeit. Die höhere Verformbarkeit erlaubt die Ausführung großer Cockpitverglasungen aus

einem Stück (Canopy der F-16). Die Nachteile des Polycarbonatglases gegenüber dem Acrylglas sind eine schlechtere Optik (Lichtdurchlässigkeit), ein geringerer E-Modul (höhere Elastizität) und eine weitaus geringere Kratzfestigkeit.

Damit bekommt man sehr weiche und somit hochverschleißbare Oberflächen, die die optischen Eigenschaften zusätzlich sehr stark beeinträchtigen können. Auch die Oberflächenbehandlung mit Härtinglacken führte bisher nur zu kurzen Lebensdauern, was letztlich zu hohen Nachfolgekosten führen kann.

Lamine aus mehreren Acrylschichten werden inzwischen abgelöst durch Acryl/Polycarbonat Lamine, mit denen eine Steigerung der Vogelschlagfestigkeit durch eine festigkeitsbestimmende innere Polycarbonatschicht erzielt wird. Die äußere Acrylschicht bietet die Vorzüge der verschleiß- bzw. kratzfesten Oberfläche. Die Scheiben werden durch eine plastische Mittelschicht getrennt, die u.a. die temperaturbedingten Spannungssprünge absorbieren muß, und in die die Heizdrähte zur Enteisung verlegt sind.

Anorganisches Glas wird bisher nur bei Hochgeschwindigkeitsflugzeugen verwendet, bei denen die Scheibenbetriebstemperatur den Gebrauch der anderen Materialien ausschließt. Neben einer höheren Temperaturbeständigkeit bietet anorganisches Glas eine erhöhte Festigkeit gegenüber Vogelschlag, allerdings ist seine Verformbarkeit beschränkt.

4.3.2 Konstruktionsauslegung

Durch Aufteilung der Gesamtverglasung in selbsttragende Bereiche (Windshield, Canopy) kann die Vogelschlagfestigkeit dieser Teilbereiche entsprechend ihrem Gefahrenpotential durch Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe, Scheibenstärken, Verformungsgrade, Rahmenkonstruktionen und Befestigungsarten individuell ausgeführt werden. Der "Windshield"-Bereich - und hier besonders die Frontpartie - zählt zum höchstgefährdeten Bereich.

Durch Formgebung der Cockpitkontur (langgezogene, flach ansteigende Verglasung) wird der Aufschlagwinkel beeinflusst. Dies ermöglicht eine Reduzierung des von der Konstruktion aufzunehmenden Energiebetrages. Zu große Elastizität des Materials kann diesen Vorteil jedoch wieder zunichte machen.

Jeder Rahmen führt zu Festigkeitssprüngen, wodurch rahmennahe Scheibenbereiche besonders gefährdet sind.

Man versucht deshalb, große örtliche Elastizitäts- und Festigkeitssprünge in der gesamten Verglasungskonstruktion damit zu vermeiden, daß man gegossene oder mit CFK verstärkte Rahmen entwickelt.

Temperaturschwankungen im Scheibenmaterial dürfen nicht zu festigkeitsüberschreitenden Spannungsspitzen führen. Besonders der Bereich der Scheibenfestigung im Rahmen ist davon betroffen. Die Scheibenbefestigung muß einen konstruktiv gestalteten Dehnungsausgleich ermöglichen. Die Vogelschlagfestigkeit kann hier, besonders im Eckenbereich, durch Klemmverbindungen anstelle von Bolzenverbindungen erhöht werden.

4.3.3 Anwendung rechnerischer Hilfsmittel bei Testversuchen

Ein äußerst nützliches Hilfsmittel zur Verbesserung der Vogelschlagfestigkeit stellt z.B. das MAGNA-Programm (Materially and Geometrically Nonlinear Analysis (2)) dar, das an der University of Dayton/Ohio/USA entwickelt wurde.

Mit diesem Rechnerprogramm, das sich auf die Finite-Elemente-Methode stützt, können Vogelschläge auf größere dreidimensionale Strukturen (Canopy) sehr wirklichkeitsgetreu simuliert werden. Ergebnis dieser Simulation ist der zeitliche Spannungs- und Verformungsablauf in der untersuchten Konstruktion.

Da die Ausgangsparameter von Vogel und Konstruktion variabel sind, besteht die Möglichkeit, in kurzer Zeit ohne großen finanziellen Aufwand das gesamte Vogelschlagspektrum durchzurechnen. Damit kann man sehr schnell die tatsächlichen Schwachstellen der Konstruktion ermitteln und Verbesserungsvarianten auf ihre Wirksamkeit hin untersuchen.

Bei der Verwendung solcher Hilfsmittel ist eine beachtliche Reduzierung der erforderlichen Anzahl der Versuche möglich, ohne daß dadurch die Aussagefähigkeit ihrer Ergebnisse eingeschränkt wird.

5. Antriebsanlage

5.1 Gefahrenklasse

Bedingt durch seine strömungsbestimmende Bauweise ist der Antrieb bei Vogelschlag die schadenanfälligste Baugruppe am Luftfahrzeug. Zur Antriebsanlage zählen Einläufe, Einlaufkanäle und Triebwerke. Da ein nichtbehebbarer Antriebsausfall zwangsläufig zum Verlust des Flugzeuges führt, ist die Antriebsanlage der höchsten Gefahrenklasse I - katastrophal - zuzuordnen.

Einmotorige Flugzeuge sind, so zeigt es die Vogelschlag-Unfallstatistik, besonders stark gefährdet. Das Triebwerk ist in aller Regel der vogelschlagempfindlichste Teil der Antriebsanlage. Ursachen eines Funktionsausfalls können sowohl innere Strukturschäden als auch Störungen im Arbeitsmedium sein. So kann bereits eine Störung des Luftstromes vor oder im Triebwerk zum Unfall führen, wenn damit eine plötzliche Reduzierung des benötigten Luftdurchsatzes und somit ein Abfall der Triebwerksleistung unter den erforderlichen Wert verbunden ist. Weitere mögliche Folgen einer solchen Strömungsstörung sind ein gefährlicher Temperaturanstieg im Heißteil (Materialverbrennungen in Brennkammer und Turbine) oder ein Triebwerkserlöschen. In jedem Fall erfordert die Behebung solch einer Strömungsstörung, soweit dies überhaupt möglich ist, eine gewisse Triebwerksregelzeit, die sogenannte Leistungsrückgewinnungszeit.

Bei extremem Tiefflug führt dies zu einem sehr hohen Unfallrisiko.

5.2 Sicherheitsforderungen

Zur Verhütung o.g. Unfälle werden an ein modernes Triebwerk z.B. folgende Sicherheitsforderungen gestellt:

Der Vogelschlag darf nicht

- zum Triebwerkerlöschen,
- zu einer längeren Leistungsrückgewinnungszeit
oder
- zu einer bleibenden und 50 % überschreitenden Leistungsminderung
führen.

Die Erfüllung dieser Forderungen ist durch Versuch für die kritischen Betriebsbedingungen (z.B. Flugzeuggeschwindigkeit, Triebwerksdrehzahl) nachzuweisen für:

- Vogelschlag mit einem großen Vogel (4 lbs)
- multiplen Vogelschlag mit 4 - 11 Vögeln (ca. 100 gr), wobei die Anzahl durch die Größe der Verdichtereintrittsfläche bestimmt wird.

5.3 Konstruktive Maßnahmen zur Risikominderung

5.3.1 Verdichter

Der Verdichter ist die Hauptproblemzone des Triebwerkes. Bleibende Verformungen oder Brüche von Leit- und Laufschaufeln können zu einer nichtbehebaren Strömungsstörung (Leistungsverlust) führen. Schaufelbrüche führen zusätzlich in ungünstigen Fällen zu Lager-schäden, Wellenbrüchen oder Bränden und bilden darüber hinaus ein hohes Zerstörungspotential für den das Triebwerk umgebenden Zellenbereich.

Der Trend in der Triebwerks-Entwicklung führt zu immer höheren Schub/Gewichts-Verhältnissen und zum Bau von Triebwerken mit immer kleineren Abmessungen. Dies wird erreicht durch die Verwendung von Titanlegierungen und Faserverbundwerkstoffen (langfristig angestrebt) anstelle der bisherigen hochbeanspruchbaren Spezialstahl- und Alulegierungen für Verdichterschaufeln. Die neuen Materialien besitzen jedoch gegenüber den bisher verwendeten Stahllegierungen bemerkens-

wert schlechtere Festigkeitseigenschaften bezüglich Vogelschlag. Abgebrochene Ti-Schaufeln können außerdem zu gefährlichen Verdichterbränden führen.

Deshalb ist heute aus Sicherheitsgründen die Verwendung der Spezialstahllegierungen als Schaufelmaterial für vogelschlagkritische Verdichterbereiche (Fan, Hochdruckverdichter) nach wie vor erforderlich.

Generell erhöht sich das Risiko einer nichtbehebaren Strömungsstörung bei Triebwerken mit kleinen Abmessungen sowohl bei Kollision mit einem großen Vogel als auch mit einem Vogelschwarm, da die Vogelreste leichter Teile der Strömungsquerschnittfläche im Triebwerk verstopfen können.

Wirksame konstruktive Verbesserungsmaßnahmen erfordern eine Vertiefung des heutigen Kenntnisstandes über die Belastungsvorgänge im Verdichter und an seinen Komponenten.

Als ein sehr vielversprechendes Hilfsmittel erscheint auch hier die rechnergestützte Vogelschlagsimulation. Ein entsprechendes Programm wird gegenwärtig z.B. von der USAF (3) entwickelt.

Mit Hilfe variabler Eingangsgrößen kann damit ein vorliegender Entwurf untersucht werden u.a. auf:

- Einfluß der Betriebsbedingungen (z.B. Triebwerk-Drehzahlen, Flugzeuggeschwindigkeit) auf den auslegungskritischen Belastungsfall für die Beschau felung.
- Einfluß der Vogelschlagvariablen, wie z.B. Masse, Ausrichtung, Aufschlagwinkel auf die Schaufelfestigkeit (kritische Belastung).
- Dynamisches Verhalten der Schaufeln (Schaufelspitzenamplituden in axialer und radialer Richtung).
- Wirksamkeit von Verbesserungsmaßnahmen.

5.3.2 Einlauf

Die Einlauföffnung sollte so klein wie möglich sein. Durch Anordnung der Einläufe auf der Flugzeugoberseite (Draufsicht) und entsprechender Pilotreaktion (Hochziehen des Lfz) könnte durch Ausnutzen des generellen Vogelverhaltens bei Kollisionsgefahr (Ausweichen nach unten) eine Reduzierung der Trefferhäufigkeit erzielt werden.

Denselben Effekt bewirkt die Anordnung der Einläufe/Triebwerke am Rumpfhinterteil. Auswertungen haben gezeigt, daß tragflächeninstallierte Triebwerke viermal häufiger getroffen werden als Triebwerke, die am Rumpheck installiert sind.

Mit räumlich gekrümmten Einlaufkanälen kann ein unerwünschter, direkter Vogeldurchgang in das Triebwerk verhindert werden, wenn (Idealfall) die Einlaufeintrittsöffnung und die Verdichtereintrittsöffnung räumlich so versetzt sind, daß beide Flächen keine gemeinsame Deckungsfläche mehr aufweisen. In einem solchen Falle wird zuerst ein energieabbauender Aufschlag des Vogels an der Einlaufkanalwand erzeugt, bevor die Vogelreste in die Verdichtereintrittsebene gelangen. Die damit verbundene Gefahr, daß durch eine Kanalwandbeschädigung abgerissene Nieten und Blechteile in den Verdichter gelangen und evtl. noch stärkere Schäden (Folgeschäden) verursachen, muß durch konstruktive Maßnahmen unterbunden werden.

5.3.3 Zweikreistriebwerk (Bypass-Triebwerk)

Zweikreistriebwerke besitzen den Vorteil, daß die Eintrittsöffnung für den äußerst bedrohten inneren Kreis (kleinste Dimensionen, höchste Festigkeitsbeanspruchungen) sehr klein gehalten werden kann und damit auch die Trefferhäufigkeit für diesen Bereich entsprechend reduziert ist. Dazu kommt, daß die Eintrittsöffnung des inneren Kreises hinter der Verdichtereintrittsebene liegt, was für den inneren Kreis im Falle eines Treffers zu einem schützenden Abbau der Aufschlagsenergie führt.

Zusätzlich versucht man durch Verwendung gekrümmter Einlaufkanäle und in die Kanalwand integrierter Zerkleinerungs- und Ablenkmechanismen die Vogelmassen in den robusteren Bypass-Kreis zu lenken. Damit wird eine weitere Risikoreduzierung erreicht.

5.3.4 Redundanzkonzept

Die wirkungsvollste Maßnahme zur Verringerung des Vogelschlagrisikos ist die Wahl zweier oder mehrerer Triebwerke mit separaten Einläufen. Damit wird ein Flugzeugverlust durch Kollision mit einer großen Vogelart nahezu unmöglich, da diese Vögel in Mitteleuropa selten in dichtfliegenden Schwärmen auftreten. (Ausnahme Zugvogel-Reisezeit). (Diese Feststellung ist biologisch nicht vertretbar, da mit Ausnahme der Zugzeit - z.B. 30000 Kraniche über der Bundesrepublik - auch in anderen Jahreszeiten z.B. regional massierte Züge von großen/schweren Vögeln erfolgen - z.B. Brandenten-Mausezug u.ä., Redaktion.)

Dennoch besteht bei einer solchen Konzeption die Gefährdung durch die Kollision mit Vogelschwärmen kleinerer Vogelarten. Hier handelt es sich jedoch um Vogelarten mit kleinen Eigengewichten. Das bedeutet wesentlich kleinere, vom Triebwerk aufzunehmende Energiebeträge.

Auch mit dem Redundanzkonzept verbleibt ein Restrisiko. Die Unfallstatistik zeigt, daß mehrmotorige Flugzeuge durch multiplen Vogelschlag in die Antriebsanlage so stark beschädigt werden können, daß dies zum Flugzeugverlust führt.

5.3.5 Schutzvorrichtung

Die immer wieder diskutierte Möglichkeit der Anbringung von Schutzgittern im Einlauf ist wegen der damit verbundenen negativen Einflüsse auf die Triebwerksleistung (Druckverluste, Strömungsbeeinflussung), zusätzlichem Aufwand an Gewicht und Mechanik und nicht zuletzt durch das damit verbundene zusätzliche Sicherheitsrisiko, wie z.B. Vereisungsgefahr, bisher von wenigen Ausnahmen abgesehen nicht verwirklicht worden.

6. Flügel- und Leitwerkvorderkanten

6.1 Gefahrenklasse

Die Beschädigung von Vorderkanten kann, je nach ihrem Aufbau (z.B. integrierte Flaps) oder den dahinter verlaufenden Teilen wichtiger Untersysteme zum Abbruch des Fluges mit unverzüglicher Landung zwingen. Gefahren dieser Art werden der Gefahrenklasse II - kritisch - zugeordnet.

6.2 Sicherheitsforderungen

Die Verlegung flugsicherheitskritischer Flugzeuguntersysteme (Hydraulik, Kraftstoff, Sauerstoff, Steuerung) hinter vogelschlaggefährdete Flugzeugflächen (z.B. Vorderkanten) ist zu vermeiden, da bei Durchschlagung der Flugzeugbeplankung ein Funktionsausfall dieser Systeme droht. Andernfalls sind konstruktive Schutzmaßnahmen vorzusehen.

Eine Vorderflügelklappenanlage ist so auszulegen, daß bei Ausfall einer Klappenhälfte ein asymmetrisches Ausfahren unmöglich ist, daß ein Vogelschlag auf die Vorderkanten nicht den Ausfall der gesamten Klappenanlage eines Flügels verursachen kann (Aufteilung), und daß keine abgebrochenen Teile in den Triebwerkeinlauf gelangen können.

6.2 Maßnahmen zur Erhöhung der Vorderkanten-Vogelschlagfestigkeit

Die Vogelschlagfestigkeit einer konventionellen Flügelnasenkonstruktion (Nietverbindungen aus Rippen, Spanten, Beplankungsblech) wurde beim Royal Aircraft Establishment/RAE (4) eingehend untersucht.

Als bestimmendes Kriterium für die Vogelschlagfestigkeit wurde bei den Versuchen die Vogelaufprallgeschwindigkeit ermittelt, bei der das Nasenbeplankungsblech durchschlagen wurde, da nach Durchschlag die dahinterliegende Struktur jeweils starke Beschädigungen aufwies. Dieses Kriterium wird im weiteren als die Durchschlaggeschwindigkeit bezeichnet.

Eingehend untersucht wurde der Einfluß der Konstruktionsvariablen Beplankungsblechstärke, Beplankungsblechradius (Nasenradius), Flügelpfeilwinkel, Nasenrippen-Stärke, Nasenrippen-Abstand und Vogelgewicht auf die Durchschlaggeschwindigkeit.

Die Versuche zeigten, daß Änderungen in der Rippenstärke und im Rippenabstand einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Durchschlaggeschwindigkeit haben.

Die restlichen Variablen konnten in einen empirisch ermittelten, mathematischen Zusammenhang gebracht werden. Aus der in (4) aufgeführten Formel geht hervor, daß die Durchschlaggeschwindigkeit (Vogelschlagfestigkeit) steigt mit:

- Erhöhung der Blechstärke (stärkste Einflußmöglichkeit, da Blechstärke direkt proportional der Durchschlaggeschwindigkeit ist).
- Erhöhung des Flügelpfeilwinkels.
- Verkleinerung des Nasenradius (reduzierte Schadensbildung bei einem Nasenradius unter 28 cm).
- Sinkendem Vogelgewicht.

Zusätzlich kann die Durchschlaggeschwindigkeit durch folgende konstruktive Maßnahmen erhöht werden:

- Anwendung der Klebetechnik anstelle der konventionellen Nietverbindungen.
- Beplankungsblech aus Ti-oder Ni-Legierung anstelle der verwendeten Alu-Legierung. Dabei ist jedoch auch die Reststruktur mit den Nietverbindungen zu verstärken.
- Beplankungsblechverstärkung durch aufgeklebte CFK-Folien.
Hier zeigten sich jedoch noch erhebliche Klebprobleme.

Die Schwachstelle von Konstruktionen dieser Art sind die Nietverbindungsreihen von Beplankungsblech und Nasenrippen. Hier reißt das Blech entlang der Nietverbindung auf. Da die Rippenanzahl

keinen wesentlichen Einfluß auf die Größe der Vogelschlagfestigkeit hat, sollte ihre Anzahl auf das erforderliche Minimum (Belastung durch aerodynamische Kräfte) beschränkt bleiben.

7. Schlußbetrachtung

Die Anforderungen an die Vogelschlagfestigkeit von Flugzeugen hat in der Vergangenheit nur einen unbedeutenden Einfluß auf die Konstruktionsauslegung besessen.

Die bisherige Schadensbilanz zeigt jedoch, daß zukünftig dem Vogelschlagproblem festigkeitsmäßig ein höherer Stellenwert eingeräumt werden muß.

Die Grundvoraussetzungen für wirkungsvolle Maßnahmen sind dabei problemorientierte Sicherheitsforderungen. Diese müssen laufend überprüft und überarbeitet werden.

Die hier beispielhaft aufgeführten Maßnahmen reichen selbstverständlich nicht aus, das Vogelschlagproblem vollkommen in den Griff zu bekommen.

Es müssen deshalb zukünftig verstärkt weitere Maßnahmen entwickelt und dazu laufend die Grundkenntnisse über den Ablauf der Vogelschlagbeanspruchung in der Konstruktion verbessert werden.

Literatur:

- (1) MIL-STD-882 A, Military Standard
28. Juni 1977 : System Safety Program Requirements.
- (2) ROBERT A. BROCKMANN, MAGNA: A Finite Element Programm for the
Januar 1981 : Materially and Geometrically Nonlinear
Analysis of Three-Dimensional Structures
Subjected to Static or Transient Loadings.
- (3) L. Mc KENNY, : NOSAPM: Nonlinear Structural Analysis
Mai 1982 Program Modified, 15th Meeting BSCE.
- (4) J.J. McNAUGHTAN : The Design of Leading-Edge and Intake
Wall Structure to Resist Bird Impact
Recal Aircraft Establishment Technical
Report 72056.

Anschrift des Verfassers:

Gerhard Fußmann, BWB - ML , Dachauer Str. 128, 8000 München 19