

Rechnerische Vogelschlagsimulation an Strukturkomponenten von Verkehrsflugzeugen

(Numerical Bird Strike Simulation on Aircraft Structures)

von THOMAS KERSTEN, Kassel und
JOSEF MENDLER, Bad Feilnbach

Zusammenfassung: Der folgende Bericht behandelt die rechnerische Simulation von vogelschlaginduzierten Schäden am Tragflügel des Regionalflugzeuges Do328 von Fairchild/Dornier. Der Einsatz von expliziten Finiten-Elemente Programmen (FEM) ermöglicht die Berechnung von kurzzeitdynamischen Prozessen, wie z.B. den Vogelschlag innerhalb einer Prozessdauer von 4 msec. Dabei erhält man einerseits einen Eindruck über die inelastischen (zurückbleibenden) Deformationen der Zielstruktur (Flügel) sowie eine Aussage über die Vogelschlagresistenz in Form des Energieabsorptionsvermögens (EAC). Dies ermöglicht einen aussagekräftigen Vergleich mit theoretisch, bzw. empirisch ermittelten Daten zur Durchdringungsgeschwindigkeit und zum Energieabsorptionsvermögen (EAC) sowie einen Vergleich mit durchgeführten Zulassungsversuchen. Das Materialverhalten der Zielstruktur (Aluminium) wurde als elastisch-idealplastisch angenommen, d.h. die Verfestigung und Geschwindigkeitsabhängigkeit bleibt in dem verwendeten Materialmodell zunächst unberücksichtigt und ist im weiteren Optimierungsverfahren anzupassen. Die Idealisierung des Vogels findet standesgemäß nach Bird Strike Design Manual statt, d.h. es wurde ein Zylinder mit den Geometriedaten von Länge zu Durchmesser gleich 2 und wasserähnlicher Dichte verwendet sowie elastisch-idealplastisches Materialverhalten mit sehr geringem Elastizitätsmodul und sehr geringer Fließgrenze angenommen, so dass unmittelbar nach dem Auftreffen auf die Struktur ein Zerfließen des Zylinders (Vogels) zu erwarten ist.

Die gezeigten Simulationsergebnisse geben einen guten Eindruck über die Auswirkung des Vogelschlagereignisses auf die Struktur wieder, insbesondere im Hinblick auf die Deformationen und das Energieabsorptionsvermögen, welches qualitativ auch mit den empirischen Daten im Einklang ist.

Es bleibt festzuhalten, dass man neben theoretischen Werten und Zulassungsversuchen ein weiteres Werkzeug in Form eines expliziten FE-Codes (hier ABAQUS/explicit) zur Verfügung hat, um ein Vogelschlagereignis zu bewerten. Dies ist insbesondere in der Vorentwurfsphase von Strukturkomponenten im Flugzeugbau interessant, zwecks Reduzierung von Versuchen und Einsparung der dadurch entstehenden Kosten.

Summary: The following report deals with the numerical simulation of Bird Strike induced damages on a wing leading edge of Fairchild/Dornier's regional aircraft Do328. The ABAQUS/explicit finite element code was used to simulate such kind of impact within a 4msec period of time, namely the before mentioned bird strike event. On the one hand we get an impression about the inelastic structural deformations and on the other hand we get a prediction about the bird strike resistance represented by the energy absorption capability (EAC). Thus it is possible to compare the empirical data of the EAC and the velocity of penetration with theoretical and experimental facts. The material behaviour of the leading edge structure (aluminium) was expected as elastoplastic, e.g. hardening and rate dependent effects were omitted first and could be included within further cycles of optimisation. The idealisation of the bird is straight forward according to the Bird Strike Design Manual, this means it is modelled as a cylinder with a relation between length L and diameter D : $L/D=2$. Further more we assumed for the bird idealisation a water-like density and a constitutive model of elastoplasticity without hardening. The material parameter E (Young's modulus) and the yield stress were set to low values to allow for an immediate yield after the beginning of the impact. The presented simulations give a quite good impression about the effect of a bird strike impact on an airplane structure, in particular with respect to the inelastic deformations and the EAC which is in qualitative good agreement with the empirical data. We can conclude that the numerical simulations based on ABAQUS/explicit perform an additional tool (together with experiments and the theoretical data) for the investigation and evaluation of bird strike impact. Regarding the predesign phase of an airplane, this method is of special interest to perform more simulations and less experiments which reduces the costs.

1. Einleitung

Das Vogelschlagereignis stellt aus der Sicht eines Entwicklungsingenieurs im Flugzeugbau eine besondere Herausforderung dar. Die generelle Aufgabe besteht dabei darin, die Resistenz für eine Strukturkomponente, wie z.B. die Tragwerksnase, in bezug auf den Vogelschlag gemäß der Flugtüchtigkeitsanforderungen FAR bzw. JAR 25.631 nachzuweisen. Diese Forderungen bestehen u.a. darin, die Nasenkästen der Leit- und Tragwerke eines Flugzeugs so zu dimensionieren, dass der strukturelle Schaden, der durch den Aufprall eines 4 lbs (1,81 kg) schweren Vogels bei einer Geschwindigkeit von $0,85 v_c$ (in 8000ft Flughöhe) verursacht wird, die Fortführung des sicheren Fluges und die Landung nicht gefährdet.

Im Rahmen der Zulassung der Do328 wurden u.a. bei der Firma Aermacchi in Italien experimentelle Nachweise an repräsentativen Nasenteilen des Tragwerks erbracht. Dabei galten die zulassungsrelevanten Forderungen als erfüllt, wenn beim Aufprall des Vogels auf den Nasenkasten der dahinterliegende Vorderholm nicht durchschlagen wurde. Die Aufprallgeschwindigkeit lag dabei bei 290 kts (139 m/s)

für einen 4 lbs schweren Vogel. Zusätzlich wurden im Verlauf der Vorentwurfsphase zeit- und kostenintensive Versuche mit konstruktiv unterschiedlich gestalteten Nasenteilen durchgeführt. Diese wurden mit Hilfe empirischer Formeln und Daten nach Bird Strike Design Manual grob dimensioniert.

Die Entwicklung expliziter Rechenprogramme auf Basis der Finite-Elemente Methode (FEM) in den letzten Jahren ermöglicht nunmehr die Simulation bzw. Berechnung von kurzzeitdynamischen Prozessen, wie z. B. den Vogelschlag. Damit wurde für den Berechnungsingenieur ein Werkzeug geschaffen, um impactbelastete Strukturen schnell und sicher zu bewerten. Die folgenden Simulationsergebnisse wurden mit dem Programm ABAQUS/explicit erzeugt und beziehen sich auf die Tragwerksnase des Regionalflugzeuges Do328.

2. Problemstellung

Die analysierte Struktur ist der in der Abb. 1 dargestellte Tragwerksnasenkasten mit sich anschließendem Flügelkasten des Regionalflugzeuges Do328-300. Hierbei ist die Frage zu erörtern inwieweit sich ein Vogelschlagereignis auf die Zielstruktur auswirkt, wobei zunächst einmal die konservative Annahme getroffen werden kann, dass der Aufprall des Vogels auf die Tragwerksnase frontal erfolgt,

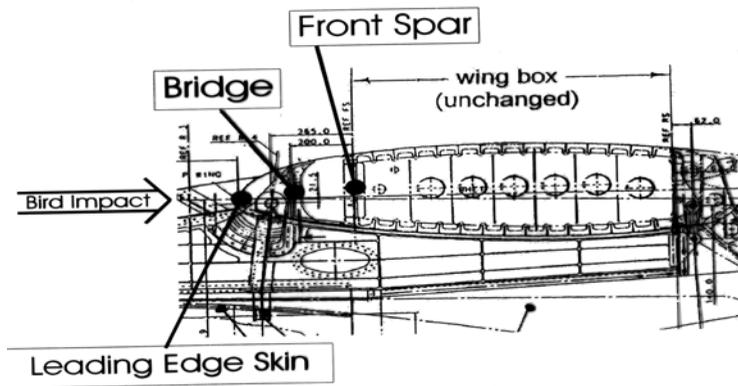


Abb. 1: Nasen- und Flügelkasten

welches den Fall eines größtmöglichen Schadens darstellt. Bei der Verwendung des „Standardvogels“ nach JAR 25.631 mit einer Masse von 1,81 Kg und einer Aufprallgeschwindigkeit von 139m/s ergibt sich eine kinetische Energie von

$W_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = 17,5kJ$. Dieser Energiebeitrag muss von der Zielstruktur

absorbiert werden und zwar ohne dass der Vorderholm einen Schaden davonträgt. Unmittelbar nach dem Auftreffen des Vogel auf die Tragwerksnase wird diese erst in geringem Maße elastisch und danach plastisch (bleibend) deformiert, wobei schon ein wesentlicher Energieanteil abgebaut wird. Dabei ist es durchaus möglich, dass der Vogel in den Nasenkasten eindringt und die Struktur aufgerissen wird. Dementsprechend stellt sich die Frage, ob die dahinterliegende Brücke in der Lage ist die restliche kinetische Energie abzubauen, so dass keine Schäden an der Brücke bzw. am dahinterliegenden Vorderholm entstehen.

3. Zulassungsversuche

Zur Erlangung der Zulassung für die Do328 wurden an der Tragwerksnase Versuche durchgeführt. Die Abb. 2 zeigt eine Auswahl von zwei Zulassungsversuchen (Shot 2 und 4), welche einen guten Eindruck über die plastischen Deformationen, die in der Größenordnung 10^{-1} m liegen, liefern. Diese Versuche beziehen sich auf den zylindrischen Teil der Tragwerksstruktur, d.h. auf den Bereich zwischen Rumpf und Triebwerk. Zusammenfassend ist für diese beiden Versuche folgendes festzuhalten:

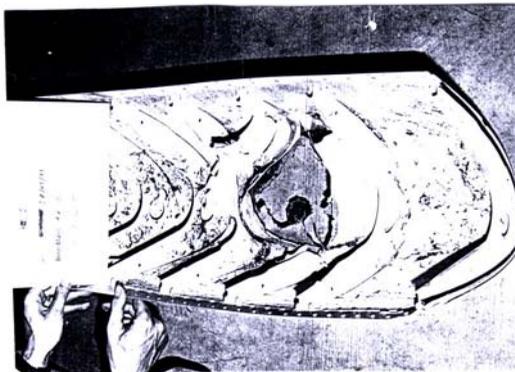


Abb. 2 Ausgewählte Zulassungsversuche, Shot 2

i) Shot 2:

- Eindringen in den Nasenkasten
- Haut: Versagen der Verbindung mit einer Rippe im Bereich des Aufschlagpunktes

- Vorderholm: Einriss in einem Stringer und plastische Deformation; **kein** Durchdringen
- Große plastische Deformation im Außenbereich bzw. Komplettersagen der Rippen im Aufschlagpunkt

ii) Shot 4:

- Kein Eindringen in den Nasenkasten
- Kein Versagen der Haut
- Plastische Deformation der Haut und der Rippen
- Kein Schaden an der für diesen Schot montierten „mock up“ Ausrüstung (Triebwerkskontrolle etc.)

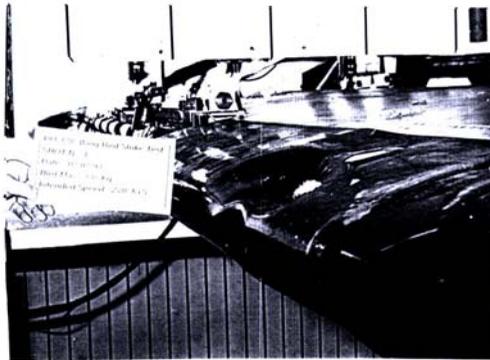


Abb. 3 Ausgewählte Zulassungsversuche, Shot 4

4. Simulationsrechnungen

4.1 Idealisierung

Die Berechnung eines Vogelschlagereignisses im Hinblick auf die Strukturauslegung und Strukturoptimierung stellt aus vielerlei Hinsicht eine besondere Herausforderung dar, da viele Aspekte, die ohnehin schon für eine Berechnung Schwierigkeiten bereiten können, miteinander gekoppelt sind. Zu nennen sind hier die folgenden Problemkreise:

- Berechnung von Kontaktproblemen
- Große inelastische Deformationen von Zielstruktur und Vogel
- Modellierung des Materialverhaltens.

Mit den entsprechenden Schwierigkeiten:

- Stabilität und Genauigkeit des Kontaktalgorithmus
- Große Verzerrungen in den Finiten Elementen führen zum Versagen

- Verwendung von geeigneten Materialmodellen (insbesondere für den Vogel).

Als geeignetes Werkzeug für derartige Probleme haben sich explizite Finite-Elemente Programme wie z. B. ABAQUS/explicit erwiesen, mit dem zwar nicht alle Probleme (wie z.B. die Materialmodellierung des Vogels) optimal aber dennoch zufriedenstellend gelöst werden können. Dies bezieht sich zumindest auf eine erste Einschätzung hinsichtlich der Vogelschlagresistenz. Im folgenden soll kurz auf die Diskretisierung und Idealisierung der Tragwerksnase und des Vogels eingegangen werden. Die Abb. 3 zeigt die Diskretisierung des Vogels (Zylinders) und der Tragwerksstruktur mit Finiten Elementen. Für den Zylinder wurden Solidelemente mit 8 Knoten (C3D8R) verwendet während die Aluminiumstruktur mit vierknotigen Schalenelementen (S4R) vernetzt wurde. Bei den Rechnungen wurde sowohl für die Zielstruktur als auch für den Vogel ein Materialmodell der Elastoplastizität ohne Verfestigung verwendet, welches in erster Näherung das Strukturverhalten hinreichend genau beschreiben kann. Mit Sicherheit sind dies zunächst primitive Annahmen, die in weiteren Iterationschritten der Strukturoptimierung (Anpassung der Materialparameter) verbessert werden müssen. Jedoch sind die o. g. Annahmen für die vorliegende Arbeit ausreichend, um allgemein zu zeigen, dass das Vogelschlagereignis mit Hilfe der FEM simulierbar ist. In den Simulationsrechnungen wurden die folgenden Materialparameter verwendet:

- Vogel
 - Wasserähnliche Dichte (Gelatine mit 10% Porosität):

$$\rho = 1,05 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$$
 - Elastizitätsmodul: $E = 100 \text{MPa}$
 - Querkontraktionszahl (Isotropie): $\nu = 0.3$
 - Fließspannung: $\sigma_y = 1 \text{MPa}$
 - Plastische Dehnung bei Beginn der Schädigung: $\overline{\varepsilon}_0^{pl} = 0,05$
 - Plastische Dehnung bei Ende der Schädigung: $\overline{\varepsilon}_f^{pl} = 0,1$
- Tragwerksstruktur
 - Dichte von Aluminium: $\rho = 2,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$
 - Elastizitätsmodul: $E = 72000 \text{MPa}$
 - Querkontraktionszahl (Isotropie): $\nu = 0.3$

- Fließspannung: $\sigma_y = 303\text{MPa}$
- Plastische Dehnung bei Beginn der Schädigung: $\overline{\varepsilon}_0^{pl} = 0,9$
- Plastische Dehnung bei Ende der Schädigung: $\overline{\varepsilon}_f^{pl} = 1$

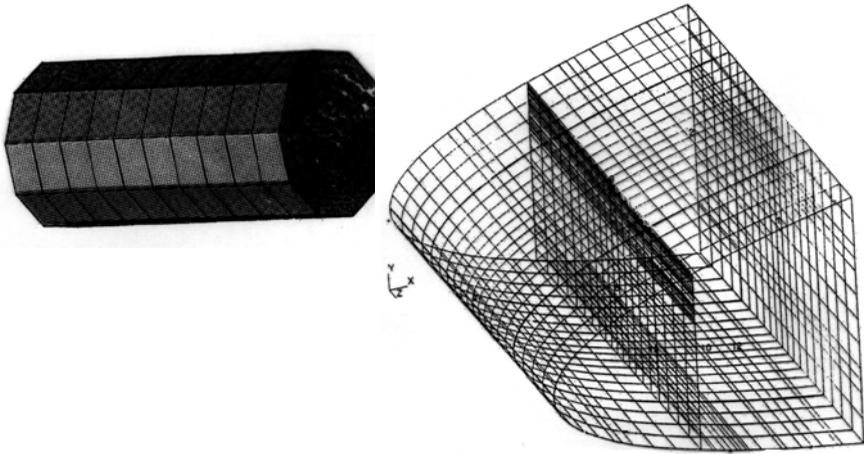


Abb. 3 Diskretisierung von Vogel (links) und Zielstruktur (rechts)

4.2 Simulationsergebnisse

Die Abb. 4 zeigt die von Mises Vergleichsspannung an der deformierten Struktur zu den Zeitpunkten von 1,2msec und 3,6msec. Bei 1,2msec ist die Fließspannung schon nicht mehr im unmittelbaren Aufprallbereich sondern im oberen und unteren Teil der Tragwerksnase vorhanden. Bei 3,6msec, bei dem der Endzeitpunkt des Impactvorganges erreicht ist, sieht man, dass der Deformationszustand der Tragwerksnase bereits erreicht ist. Darüber hinaus ist nun ein weiterer Kontakt mit der Brücke aufgetreten, in der nunmehr die Fließspannung erreicht ist. Dies ist aber nicht kritisch, da der Endzeitpunkt des Vogelschlages ja bereits vorliegt und im Vorderholm, wie zu sehen ist, kein plastischer Deformationszustand erreicht wird. Festzuhalten bleibt, dass die Deformationen in der Größenordnung der Experimente liegen, so dass das Vogelschlagereignis gut simuliert wird. Eine bessere Annäherung von Simulation und Experiment erhält man sogar noch bei der Berücksichtigung des Verfestigungsverhaltens in der Zielstruktur.

für die Struktur konservative Ergebnisse erzielt im Vergleich zu den entsprechenden Experimenten.

Für die Tragwerksstruktur erhält man dann nach MCNAUGHTON (1972) für gekrümmte metallische Strukturen, wie z. B. die Tragwerksnase die folgende empirische Beziehung für die Durchdringungsgeschwindigkeit:

$$v_p = \frac{50,41 \cdot t \cdot \exp\left(\frac{1234}{r^2 + 30r + 1000}\right)}{(w \cdot \cos^2 \alpha)^{1/3}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

mit dem Krümmungsradius r [mm], der Hautdicke t [mm], Vogelmasse w [kg] und dem Auftreffwinkel α [Grad]. Mit den entsprechenden Daten für die Tragwerksnase der Do328 ergibt sich dann eine Durchdringungsgeschwindigkeit von

$$v_p = 100 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Für die Brücke, die als flaches Paneel anzusehen ist und hier ebenfalls mit einbezogen wird, steht aus der Empirie die folgende Beziehung zur Verfügung:

$$v_p = \frac{79,94 \cdot \sqrt{t}}{w^{1/3} \cdot \cos \alpha} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right],$$

so dass man für den Fall der hier verwendeten Brücke zu einem $v_p = 114 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

gelangt.

Anhand dieser Durchdringungsgeschwindigkeiten, die beide unter der Aufprallgeschwindigkeit liegen, lässt sich nun noch keine Aussage hinsichtlich der Vogelschlagresistenz gewinnen, da ja beide Strukturkomponenten zusammenwirken. Zur Beurteilung der Vogelschlagresistenz werden daher diese Geschwindigkeiten nun in ein Energieabsorptionsvermögen umgerechnet, so dass schließlich eine Aussage über die Gesamtstruktur gemacht werden kann. Da der Wert von v_p der Tragwerksnase jedoch unter der Auftreffgeschwindigkeit des Vogels liegt und dieser ja hier die Struktur zuerst kontaktiert, ist diesbezüglich ein Eindringen zu erwarten. Es stellt sich also noch die Frage nach der Restgeschwindigkeit bzw. der Restenergie, mit welcher der Vogel auf die Brücke auftrifft. Diese Frage soll im Abschnitt der Energiebetrachtung geklärt werden.

- **Energieabsorptionsvermögen (EAC)**

Aus der Durchdringungsgeschwindigkeit für die Tragwerksnase ergibt sich, dass hier eine kinetische Energie von 9kJ kompensiert werden kann. Das bedeutet, dass bei einer kinetischen Anfangsenergie des Vogels von 17,5kJ die verbleibende Energie nach dem Aufprall auf die Tragwerksnase bei 8,5kJ liegt. Die ABAQUS/explicit Ergebnisse in Abb. 5 zeigen, dass dieses Energieniveau zu einem Zeitpunkt vorliegt (ca. 2msec), bei dem es noch keinen Kontakt mit der Brücke gibt. Des weiteren entnehmen wir dem Energieverlauf, dass zum Zeitpunkt des Kontaktes mit der Brücke (bei 3,5 msec), die verbleibende kinetische Energie des Vogels bei 4kJ liegt. Berechnet man aus der Durchdringungsgeschwindigkeit für die Brücke das entsprechende Energieabsorptionsvermögen, so erhält man hier einen Wert von 11,5 kJ, der also größer als 4kJ ist. Damit ist, gemäß der berechneten Werte für die Brücke, keine weitere Durchdringung zu erwarten.

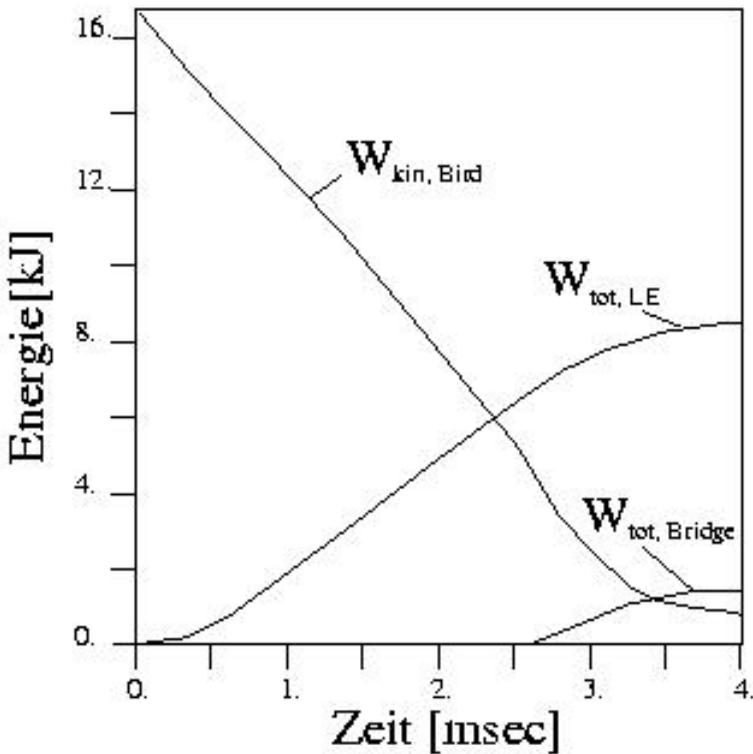


Abb. 5 Energieverlauf der FEM-Simulation

6. Schlussfolgerungen

Es wurde gezeigt, dass das Finite-Elemente Programm ABAQUS/explicit zur Beurteilung von vogelschlagbelasteten Strukturen im Flugzeugbau herangezogen und somit neben empirisch gewonnenen Daten und Experimenten als weiteres Werkzeug benutzt werden kann. Hierdurch werden in erster Linie in der Vorentwurfsphase Strukturkomponenten hinsichtlich der Vogelschlagtauglichkeit schnell und effizient beurteilt, so dass die Anzahl der zeit- und kostenintensiven Versuche auf ein Minimum reduziert werden kann. Bereits für die hier verwendeten (primitiven) Materialdaten und –modelle ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten. Zur besseren Beurteilung können diese jedoch noch angepasst werden, um genauere Ergebnisse zu erzielen. Weitere Optimierungsmöglichkeiten ergeben sich hinsichtlich der Kategorie des Materialmodells und der Idealisierung des Vogels sowie der Zielstruktur.

Literatur

McGovern, S.; 1984, Bird Strike Design Manual, British Aerospace, Bristol.

Kersten, Th., Mendler, J.; 1998, Rechnerische Simulation von vogelschlaginduzierten Schäden am Tragwerk der Do328, DGLR Jahrestagung, Bremen (Tagungsbeitrag).

Mendler, J., Kersten, Th.; 1998, Birdstrike Resistance of Aircraft Structures, A-BAQUS Anwendertreffen, Stuttgart (Tagungsbeitrag).

McNaughton, I.; 1972, The Design of Leading Edge and Intake Wall Structure to resist Bird Impact, RAE, TR72056.

Trozzi, L., Mantero, M.; Bird Strike Test on the Wing Leading Edges and Flaps, Lab. Test Rep. No. 485-328-020.

Wisnom, M.R.; Prediction of Penetration of Curved Metal Stiffened Panels due to Bird Strike, Department of Aerospace Engineering, University of Bristol, Aeronautical Journal, November 1990.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. Thomas Kersten
Mönchebergstr. 25
34125 Kassel
kersten@ifm.maschinenbau.uni-kassel.de

Dr.-Ing. Josef Mendler
Schwarzenbergstr. 23
83075 Bad Feilnbach
josef.mendler@m.eads.net

