

## **Vogelschlag – eine Stoßbelastung in der Auslegung von Flugtriebwerken**

### **Bird Strike – an Impact Load in the Design of Aero Engines**

von J. FRISCHBIER, München

**Zusammenfassung:** Der Einschlag eines Vogels in die vorderen Verdichterstufen von Flugtriebwerken kann zu sehr hohen impulsartigen Belastungen führen. Bei hohen Einschlaggeschwindigkeiten auf die rotierenden Verdichterlaufschaufeln können dabei kurzzeitig Impulskräfte auftreten, die das 10.000-fache des Eigengewichts des Vogels übersteigen und massive bleibende Deformationen an den getroffenen Schaufeln hinterlassen. Insbesondere die Verdichterlaufschaufeln der Triebwerksfrontstufe (Fan) müssen auf diese Belastung ausgelegt werden. Ins Kerntriebwerk einschlagende Vogelmassen können aber auch in den hinteren Verdichtersektionen Strömungsinstabilitäten mit temporären oder bleibenden Schubverlusten auslösen. Analytische Vogelschlagsimulationen und Belastungstests über Beschussversuche sind deshalb weltweit gängige Praxis in der Triebwerksentwicklung. Die Vogelmassen werden dazu in den Rechenmodellen physikalisch als ein Gemisch aus 85-90% Wasser und 10-15% Luft beschrieben. Wie auch für andere Vogelarten wird derzeit eine Zunahme der Kanadagansbestände registriert, und die aus statistischen Erhebungen abgeleiteten Prognosen sagen für das Jahr 2010 im Vergleich zu 1999 eine deutlich höhere Rate an Einschlägen großer Vögel in Turbofantriebwerke voraus.

**Summary:** A bird impact into the compressor front stages of aero engines may create extreme high dynamic momentum loads. At high normal velocities onto the rotating compressor blades short-time forces are generated exceeding 10,000 times the equivalent bird weight. The affected blades can suffer major residual damage. Especially the blades of the engine front stage (Fan) have to be designed against these loads. As well, bird slurry ingested into the core engine may cause aerodynamic instabilities and associated temporary or permanent thrust loss in the compressor rear stages. Therefore analytical simulation of bird impact and shooting tests are standard procedures in aero engine industry. In these simulations the bird masses are modeled as a mixture of 85-90% water content and 10-15% air content. An increase of the world goose population has been observed in the last 15 years. The statistical data indicate that the year 2010 ingestion rate for large birds into turbofan engines will be substantially higher than the year 1999 rate.

## 1. Einleitung

Flugtriebwerke weisen eine hohe Betriebszuverlässigkeit auf. Im Luftverkehr mit modernen Turbofan-Antrieben ist es extrem unwahrscheinlich, dass ein ursächlicher Triebwerksdefekt einen Schadensablauf auslöst, der einen sicheren Weiterflug und Landung gefährden könnte. Spezielle Aufmerksamkeit wird demgegenüber den nicht ursächlich vom Triebwerk selbst ausgehenden Vorgängen gewidmet, die einen simultanen Schubverlust in mehreren Triebwerken auslösen können. Dazu zählen Vorgänge, die durch Fremdkörpereinschlag aus der Umgebung (Vogelschwärme, Eis, Vulkanasche oder andere extreme Wetterverhältnisse) ausgelöst werden können. Flugtriebwerke werden gegen Fremdkörpereinschlag ausgelegt und müssen in der Musterzulassung diesbezüglich harte Belastungsversuche durchlaufen. Der vorliegende Beitrag behandelt Aspekte des Vogelschlags in der Auslegung, Erprobung und Zulassung von Flugtriebwerken.

Der Hauptimpulsaustausch findet in der Regel in der ersten Verdichterstufe (Fan) eines Triebwerks statt. Aufgeteilte und im Niederdruckverdichter beschleunigte Vogelfragmente können aber auch im Hochdruckverdichter Strömungsinstabilitäten mit Schubverlusten auslösen. Klassifizierte Schussversuche mit realen Vögeln in laufende Versuchstriebwerke sind deshalb fester Bestandteil in jedem Zulassungsprozess ziviler Flugtriebwerke. In der militärischen Triebwerkszulassung sind Nachweisversuche zum Vogelschlagpotential nach Einzelfallspezifikationen des Kunden durchzuführen.

Bei der MTU Aero Engines GmbH wurden im Rahmen der militärischen Verdichtertentwicklung und -zulassung für die Triebwerke RB199 (Tornado) und EJ200 (Eurofighter) umfangreiche analytische Untersuchungen und Beschussversuche auf Verdichterbeschaufelungen und in laufende Versuchstriebwerke durchgeführt. Nach der Kundenspezifikation musste dabei im Jahr 1999 für das EJ200 Flugsicherheit für den Einschlag eines 450 Gramm Einzelvogels und eines Schwarms von 85 Gramm Vögeln nachgewiesen werden. Typische Deformationen an den Verdichterlaufschaukeln der ersten Triebwerksstufe zeigt Abb. 7.

Im Jahr 2006 wurde bei der MTU Aero Engines die Auslegung des Mitteldruckverdichters für das Turboproptriebwerk TP400 abgeschlossen, das den 4-motorigen europäischen Militärtransporter Airbus A400M antreiben soll. Die Vogelschlagerprobung und -zulassung mit Triebwerksversuchen sollen in diesem Jahr (2007) anlaufen, wobei Versuche mit zwei mittleren Vögeln (2 x 450 Gramm) mit Nachweis der Weiterbetriebstauglichkeit (Schubnachweis) und ein Versuch mit einem Großvogel (1,8 kg) durchgeführt werden sollen.

Im Bereich ziviler Turbofanantriebe war die MTU Aero Engines zuletzt an der Vogelschlagzertifizierung des Triebwerks PW6000 für den Airbus A318 im Jahr 2004 beteiligt. Der MTU Entwicklungsanteil umfasst hier den Hochdruckverdichter und die Niederdruckturbine. Für den Hochdruckverdichter war dabei der so genannte Medium Flocking Bird Test (3 x 700 Gramm und 1 x 1,14 kg) von besonderem Interesse. Der 1,14 kg schwere Vogel muss dabei auf einer zentral ins Kerntriebwerk zielenden Linie geschossen werden, so dass auch Teilmassen des Vogels ins Kerntriebwerk gelangen können. Dieser Aspekt wird in Kapitel 5 behandelt.

## **2. Statistische Daten zu Vogelschlag in Triebwerke**

Vogelschlagereignisse in der Zivilluftfahrt werden u. a. von internationalen Flugaufsichtsbehörden (DOT/FAA, EASA) registriert und statistisch ausgewertet. Für große Turbofantriebwerke weist die Statistik für den Zweijahreszeitraum von 1989-91 weltweit 381 registrierte Vogelschlagereignisse aus (BANILOWER & GOODALL 1992). In 52 Fällen kam es dabei entweder zu einem Abbruch des Startvorgangs noch auf der Startbahn, zu einer Rückkehr zum Flughafen nach erfolgtem Start oder zu einer Flugumleitung zum nächstgelegenen Flughafen mit insgesamt 10 Vorfällen, in denen das oder die getroffenen Triebwerke im Flug abgestellt werden mussten. In der militärischen Luftfahrt liegen die Vogelschlagraten noch etwas höher als in der Zivilluftfahrt. Mögliche Erklärungen können die geophysikalischen Unterschiede der Flughafenstrukturen und die weitergefassten Flugbedingungen für militärische Luftfahrzeuge (bodennahe Einsätze) sein. Im Jahr 2000 wurden allein von der Bundeswehr 371 Vogeleinschläge für das gesamte fliegende Gerät registriert – davon 54 mit Schäden (RUHE 2001).

Auf die Flugbewegung umgelegt wurde im Jahr 1990 zivil eine Vogelschlagrate (pro Flug) von  $4,6 \times 10^{-5}$  (mittlere und große Vögel) registriert, d. h. 1,15 Vorfälle pro 25.000 Flüge (CHESTER & TERRANCE 2003). Bei Flugzeugen im Kurz- und Mittelstreckeneinsatz mit üblichen Triebwerkslebensdauern von 25000 Flügen und mehr bedeutet das, dass jedes Triebwerk in seiner Gesamtbetriebszeit etwa einen Vogelschlag von mindestens mittlerer Größe erleidet. Abb. 1 zeigt eine Auswertung nach Vogelgröße, die besagt, dass bereits ab einem Einschlag einer Taube die Wahrscheinlichkeit für einen signifikanten Triebwerksschaden bei 0,3 liegt. Signifikanter Triebwerksschaden bedeutet dabei, dass unmittelbar anschließend Triebwerkskomponenten repariert oder ausgetauscht werden müssen.

In Hinblick auf die Flugsicherheit sind dabei die Vorfälle von besonderem Interesse, bei denen der Schaden einen unmittelbaren bleibenden Schubverlust im Triebwerk auslöst. Abb. 2 zeigt dazu die Wahrscheinlichkeit eines simultanen Schubverlustes für den Fall, dass zwei Triebwerke gleichzeitig (Vogelschwärme) betroffen

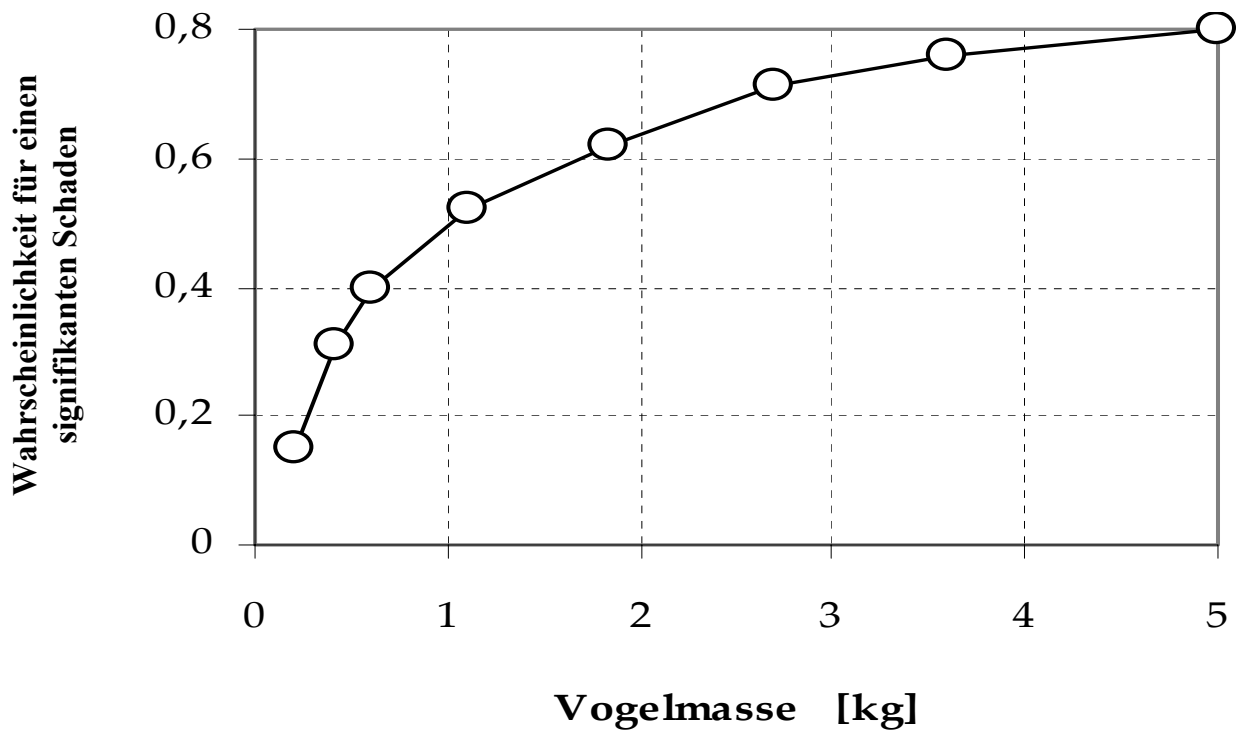
werden. Für Kanadagänse (3 - 4 kg) liegt die Wahrscheinlichkeit hierzu bei knapp 0,2. Dies ist vor allem für zweimotorige Flugzeuge von Bedeutung. Speziell für Kanadagänse wird seit längerem weltweit eine deutliche Zunahme der Population beobachtet, und die aus den Statistiken abgeleiteten Prognosen sagen für das Jahr 2010 eine 1,34 mal höhere Rate an Großvogelschlägen in große Turbofantriebwerke als für das Jahr 1999 voraus (CHESTER & TERRANCE 2003).

Absolut gesehen ist die Wahrscheinlichkeit eines simultanen Mehrfachschlags in zwei oder mehr Triebwerke aber relativ gering. Eine Auswertung von 1982 – 1991 für bestimmte Triebwerkstypen (ALGE & MOEHRING 1994) weist für diese 10 Jahre eine Gesamtzahl von 3219 Vogelschlagfällen für die gesamte Flotte aus. Darin waren nur 125 Vorfälle enthalten, in denen mehrere Triebwerke jeweils simultan betroffen waren. Dementsprechend niedrig ist auch die prognostizierte Absolutrate von  $7,09 \times 10E-8$  (Wahrscheinlichkeit pro Flug) für Einschläge großer Vögel in mehrere Triebwerke gleichzeitig (Turbofantriebwerke mittlerer Größe) für das Jahr 2010 (CHESTER & TERRANCE 2003).

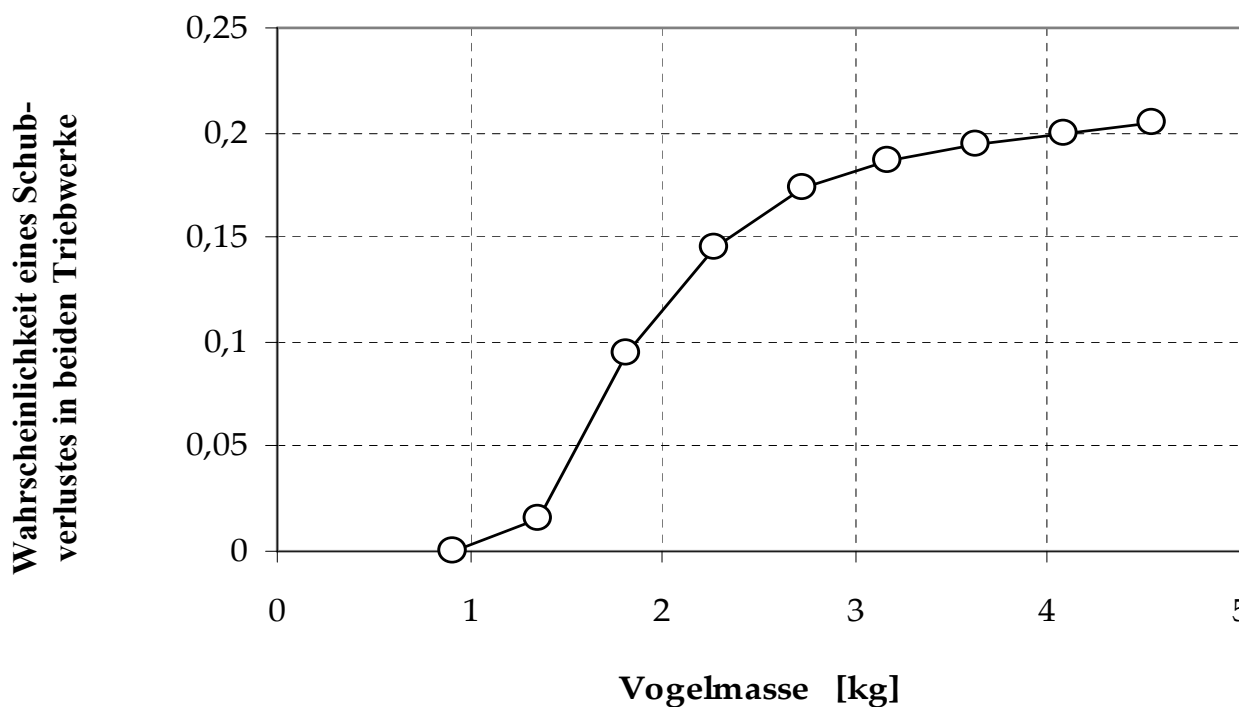
Die Auslegung, Erprobung und Zulassung von Flugtriebwerken auf ausreichendes Vogelschlagpotential ist ein Aspekt. Ein anderer ist die Verhinderung bzw. die Verringerung der Zahl der Vorfälle. Die Statistiken sagen hierzu, dass 98% aller registrierten Vogelschlagfälle in Triebwerke direkt im Bereich der Flughäfen (Taxi, Start, Landung) und in niedrigen Höhen im Flughafenumfeld (frühe Steigflugphase und Landeanflug) vorkommen, also nicht im Reiseflug in großer Höhe. Dies erklärt die große Bedeutung, die den Vogelvergrämungsmaßnahmen in der Flughafenbewirtschaftung zukommt. Militärisch wird darüber hinaus in Mitteleuropa eine Radar gestützte Vogelzugüberwachung mit Höhenidentifikation zur Verhinderung von Vogelschlag eingesetzt. Dies ist aber nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrags.

### Typische Vogelmassen

Buchfink	20 g	Kormoran	1,8 – 2,3 kg
Star	75 g	Kanadagans	3-4 kg
Amsel	100 g	Kranich	7-8 kg
Ringeltaube	0,5 kg	Höckerschwan	10-13 kg



**Abb.1:** Wahrscheinlichkeit eines signifikanten Triebwerksschadens bei Vogelschlag in großen Turbofantriebwerken in Abhängigkeit von der Vogelmasse (BANILOWER & GOODALL 1978)



**Abb. 2:** Wahrscheinlichkeit eines Schubverlustes in beiden Triebwerken (Zivilflugzeuge mit zwei Triebwerken) im Falle eines gleichzeitigen Vogelschlags (Chester & Ter-Rance 2003)

### 3. Druckverlauf beim Aufprall eines Vogels

Physikalisch kann Vogelschlag in guter Näherung als impulsartige Wechselwirkung eines kompressiblen Fluids mit einer festen Struktur behandelt werden. Entsprechende analytische Simulationen dieser Vorgänge sind in der Triebwerksindustrie mittlerweile weltweit gängige Praxis (TEICHMANN & TADROS 1991, MOFAT & CLEGHORN 2001, NIERING 1990, MCCALLUM & CONSTANTINOU 2004, FRISCHBIER 1994, 1997, 2005).

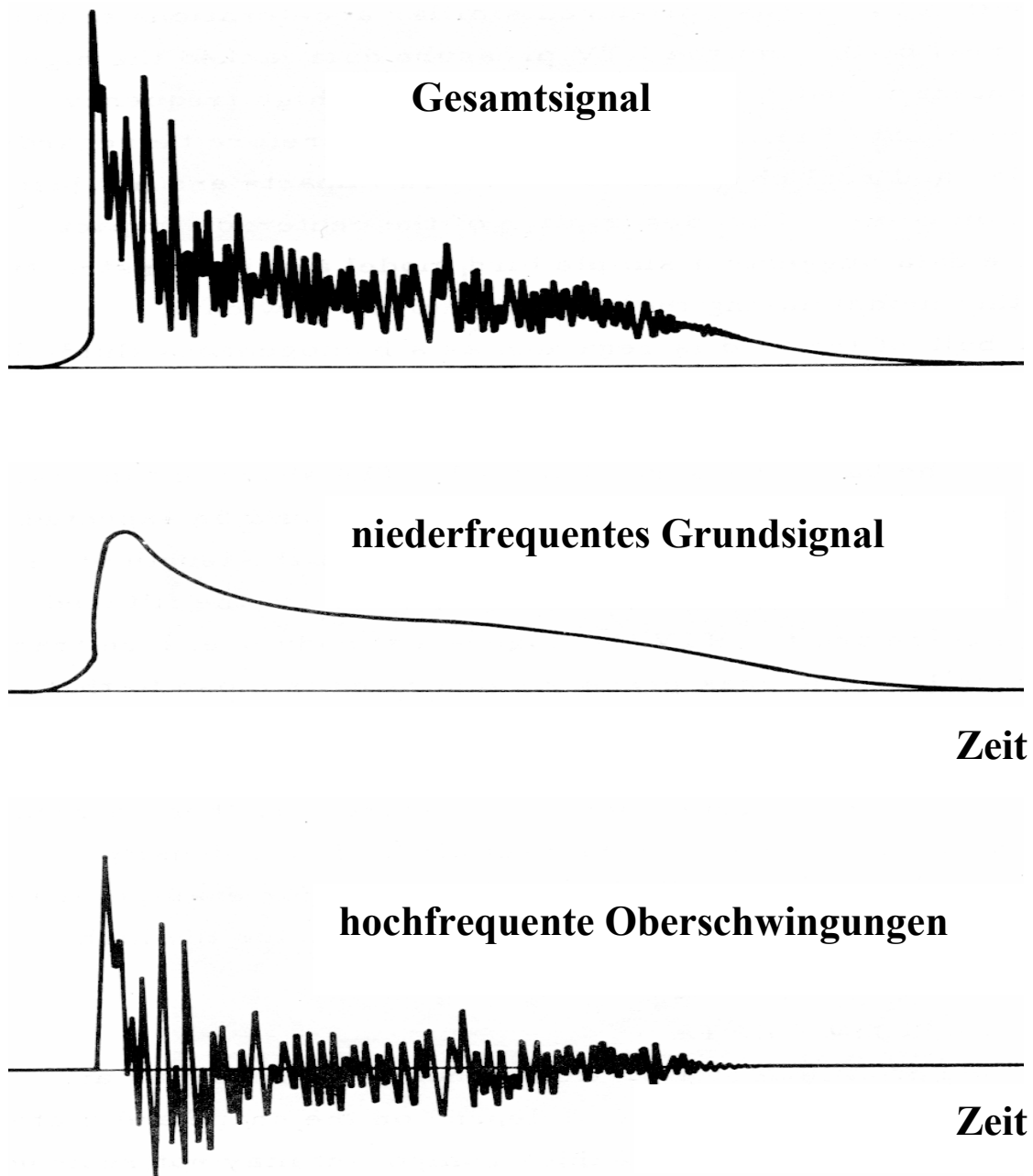


Abb. 3: Typische Messdruckverläufe bei einem Vogelaufprall auf eine Wand (Messung im Stoßzentrum) – (BARBER & WILBECK 1975)

Die bei einem Aufschlag im Stoßzentrum von einem Vogel auf einen Festkörper übertragenen dynamischen Drücke wurden in umfangreichen Schussversuchsreihen unter Leitung des Wright-Patterson Air Force Flight Dynamics Laboratory, Ohio Mitte der siebziger und Anfang der achtziger Jahre gemessen (BARBER, WILBECK et. al. 1975, 1976, 1981). Diese Messreihen wurden mit realen Vögeln zwischen 60 Gramm und 4 kg bei Schussgeschwindigkeiten bis 300 m/s (1080 km/h) durchgeführt. Die Druckverläufe im Stoßzentrum wurden mit druckempfindlichen Sensoren gemessen.

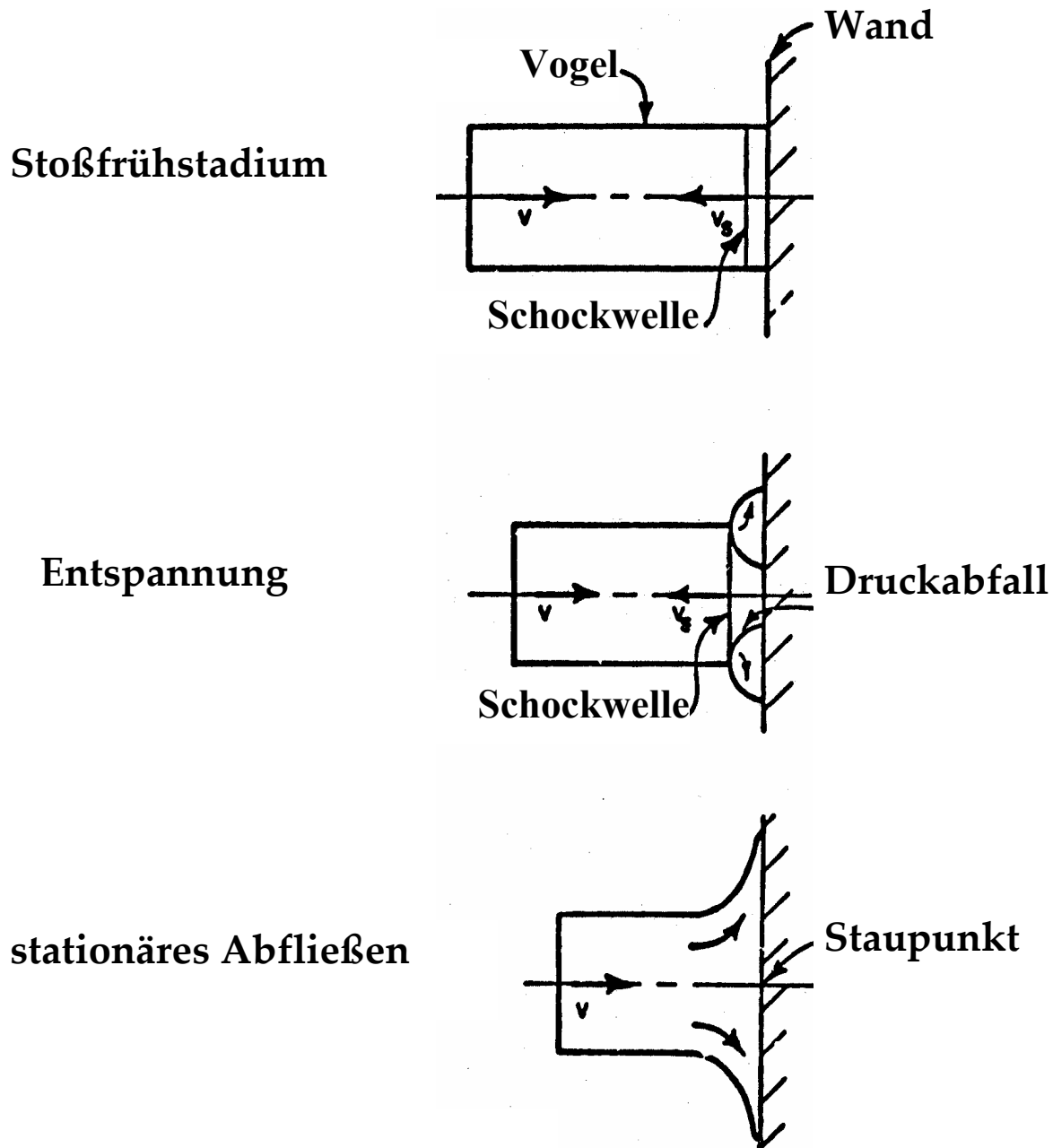


Abb. 4: Phasen eines Vogelaufschlags (BARBER, TAYLOR, WILBECK 1976)

Für den Fall eines senkrechten Schusses auf eine feste Wand zeigt Abb. 3 qualitativ einen typischen Druck-Zeitverlauf im Stoßzentrum. Die Dauer des Stoßsignals entspricht der Zeit, die sich aus der Länge des Vogels in Schussrichtung und seiner Geschwindigkeit berechnet. Das von den hochfrequenten Oberschwingungen bereinigte Grundsignal zeigt die charakteristischen Merkmale des Stoßvorgangs. Das Stoßfrühstadium (s. Abb. 4) wird von der vom Stoßzentrum ausgehenden Schockwellenausbreitung bestimmt, was sich im ersten Maximum des Druckverlaufs von Abb. 3 äußert. Auf der Vogelvorderseite werden alle Partikel des Vogels blockiert und eine Stoßwelle läuft zurück in den Vogel. Hinter der Stoßfront herrscht dabei der so genannte Hugoniot Schockdruck (HEYMANN 1968), der proportional zur Dichte, zur Geschwindigkeit des Vogels und zur Schockwellengeschwindigkeit im Vogel ist. Mit der in den Vogel zurücklaufenden Schockwelle kommt es an den Rändern zu großen Druckgradienten. Diese Druckgradienten verursachen Partikelbeschleunigungen zum Rand, was zu einem Druckabfall im Inneren führt (s. Abb. 4 Mitte). Mit diesem Druckabfall entwickeln sich Schubspannungen im Vogel, die die übertragbaren Schubkräfte im Vogelfluid übersteigen und das „Abfließen“ einleiten. Von diesem Moment an verhält sich der Vogel als Fluid. Nach mehreren Wellenreflektionen stabilisiert sich ein konstantes Druck- und Geschwindigkeitsfeld (s. Plateau im mittleren Zeitbereich von Abb. 3). Dieser für einen kurzen Zeitraum konstante Abfließdruck (s. Abb. 4 unten) ist proportional zur Dichte und zum Quadrat der Vogelgeschwindigkeit.

Vergleiche berechneter Drücke mit den Messdaten aus Schussversuchen mit realen Vögeln haben gezeigt, dass Vögel bei Stoßvorgängen physikalisch in guter Näherung als ein kompressibles Fluidgemisch aus 85-90% Wasser und 10-15% Luft beschrieben werden können (WILBECK & BARBER 1978, WILBECK & RAND 1981).

Die numerische Simulation von Vogelschlag erfolgt bei der MTU Aero Engines, wie auch bei anderen Triebwerksherstellern, mit dem kommerziellen Programmsystem LS-DYNA. Die Numerik basiert auf einem Zeitintegrationsverfahren für Finite Element Netze, das mit der nichtlinearen Berechnung großer Verformungen auch eine Vielfalt nichtlinearer Materialmodelle anbietet. LS-DYNA wird deshalb auch in der Automobilindustrie für Crash-Simulationen und verwandte Problemsimulationen, wie Funktionalität von Rückhaltegurten und Airbag-Systemen, eingesetzt.

Für den hier betrachteten Anwendungsfall kann gezeigt werden, dass die in diesem Kapitel zuvor angesprochenen Druckverläufe mit LS-DYNA in guter Näherung berechnet werden können (FRISCHBIER 2002). Als Materialmodell bietet LS-DYNA eine reibungsfreie hydrodynamische Beschreibung an, die im wesentlichen auf den Euler Gleichungen der Strömungsmechanik beruht. Einzelheiten hierzu können dem LS-DYNA Theory Manual (HALLQUIST 1998) entnommen werden.



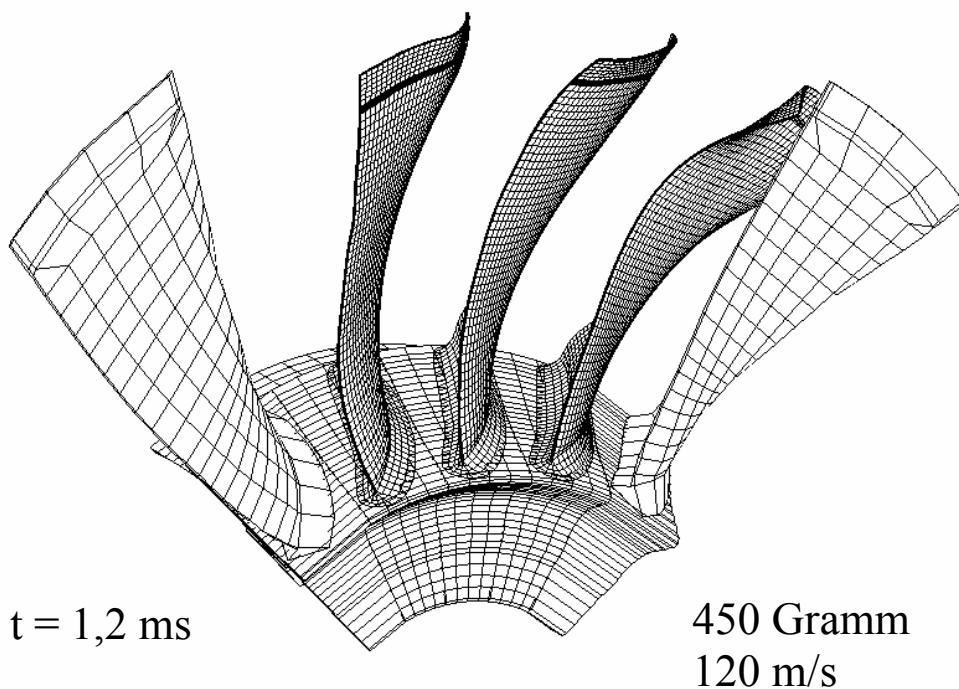
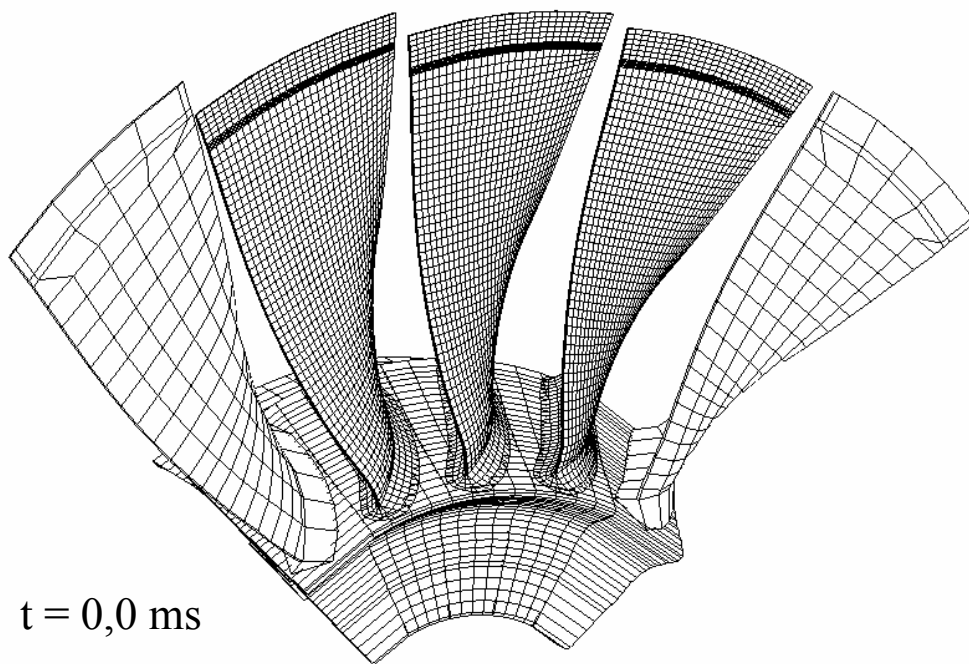
#### **4. Die Vogel-Struktur-Wechselwirkung mit den rotierenden Laufschaufeln**

Ein Standardfall in der Auslegung von Flugtriebwerken ist die Dimensionierung der Schaufelprofile der ersten Verdichterlaufstufe (Fanfrontstufe) in Hinblick auf das geforderte Vogelschlagpotential. Am Beispiel des EJ200 Verdichters bedeutete dies Auslegung gegen den Einschlag eines einzelnen 450 Gramm Vogels. Bei einem derartigen Einschlag dürfen an den getroffenen Laufschaufeln zwar bleibende plastische Deformationen auftreten, es darf aber kein Schaufelblatt abreißen, und das Triebwerk muss mit spezifiziertem Mindestschub weiterbetreibbar sein.

Die Laufschaufeln des EJ200 Niederdruckverdichters sind konstruktiv in integraler Schaufel-Scheibe Bauweise, so genannter Blisk Bauweise (Bladed Disk), ausgeführt. In der Frontstufe werden die Schaufelblätter dazu per linearem Reibschweißen integral mit der Rotorscheibe verbunden.

Die höchste Beanspruchung der Laufschaufeln tritt bei einem so genannten Niedergeschwindigkeitsvogelschlag in einer typischen Startsituation auf. Das Triebwerk rotiert bei voller Nenndrehzahl während sich das Flugzeug noch in der Beschleunigungsphase des Startvorgangs befindet, d. h. die Eintrittsgeschwindigkeit des Vogels ist klein im Verhältnis zur Umfangsgeschwindigkeit der rotierenden Laufschaufeln. Diese Situation ergibt den maximalen Fluid-Struktur-Biegeimpuls und verursacht die größten Biegeauslenkungen der Laufschaufeln. Im Fall des EJ200 wird der größte Impuls übertragen, wenn der einschlagende Vogel eine Eintrittsgeschwindigkeit von 120 m/s (430 km/h) relativ zum Flugzeug besitzt. Auf diesen Fall wurde die Laufbeschaufelung der ersten Verdichterstufe ausgelegt und getestet. Abb. 5 zeigt das Finite Element Teilmodell zur numerischen Simulation in LS-DYNA.

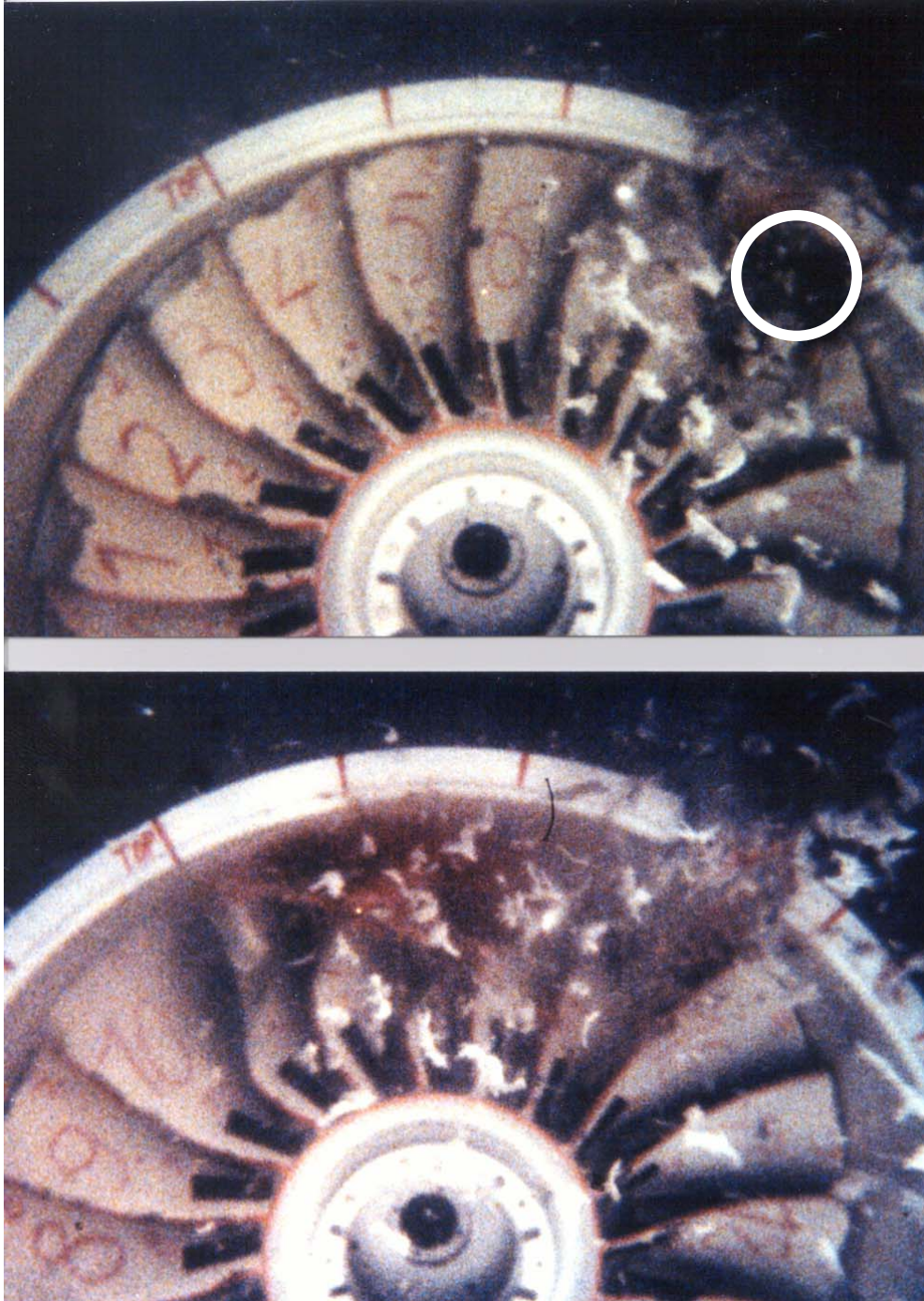
Im vorliegenden Fall des 450 Gramm Vogels von etwa 16 cm Länge durchläuft der mit 120 m/s einfallende Vogel die Laufstufe in etwas mehr als 1,5 Millisekunden. Dabei werden 3 rotierende Schaufelblätter getroffen, die im Rechenmodell entsprechend fein vernetzt wurden. Die nicht ganz 20 cm hohen Laufschaufeln werden von den blockierenden Vogelfragmenten an den Blattspitzen um mehr als 10 cm entgegen der Drehrichtung ausgelenkt (kurzzeitige Blockage der betroffenen Blattbereiche bei weiterdrehender Rotorscheibe). Etwa 1,2 Millisekunden nach Aufschlagbeginn bekommt die dritte getroffene Laufschaufel Kontakt zu ihrem nachfolgenden – nicht getroffenen – Nachbarblatt. Nach dem Abfließen der blockierenden Vogelteilmassen setzt das nachlaufende Ausschwingen der ausgelenkten oberen Blatthälften ein, wobei die wiederaufrichtende Wirkung der Fliehkraft beschleunigend wirkt. Kurzzeitig erreichen die Blattspitzen Umfangsgeschwindigkeiten von über 700 m/s (2500 km/h), wobei die Blattnabenbereiche kurzzeitig mehr als dem Dreifachen der Fliehkraft bei Nominaldrehzahl standhalten müssen.



**Abb. 5: Finite Elemente Modell eines Rotorsektors zur Vogelschlagsimulation (LS-DYNA)  
– berechneter Verformungszustand 1,2 ms nach Kontaktbeginn**

Dieser berechnete Ablauf kann in der Versuchsaufzeichnung verifiziert werden. Abb. 6 zeigt dazu zwei Momentaufnahmen, die beim Einschuss einer 450 Gramm Taube in die rotierende Laufstufe 1 von einer Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Aufzeichnungsrate von 6000 Bildern pro Sekunde gemacht wurden. Der Hauptimpulsaustausch findet mit den drei Schaufelblättern 11-13 statt – Restfrag-

mente des Vogels treffen noch Blatt 14. Abb. 6 unten zeigt deutlich die großen Biegeauslenkungen der getroffenen Schaufeln. Bleibende plastische Eindrücke an den Eintrittskanten von Blatt 13 und 14 belegen, dass ein kräftiger metallischer Kontakt zwischen beiden Schaufelblättern stattgefunden haben muss.



**Abb. 6.:** Momentaufnahme der Hochgeschwindigkeitskamera vom Vogelschlagversuch (450 g, 120 m/s)

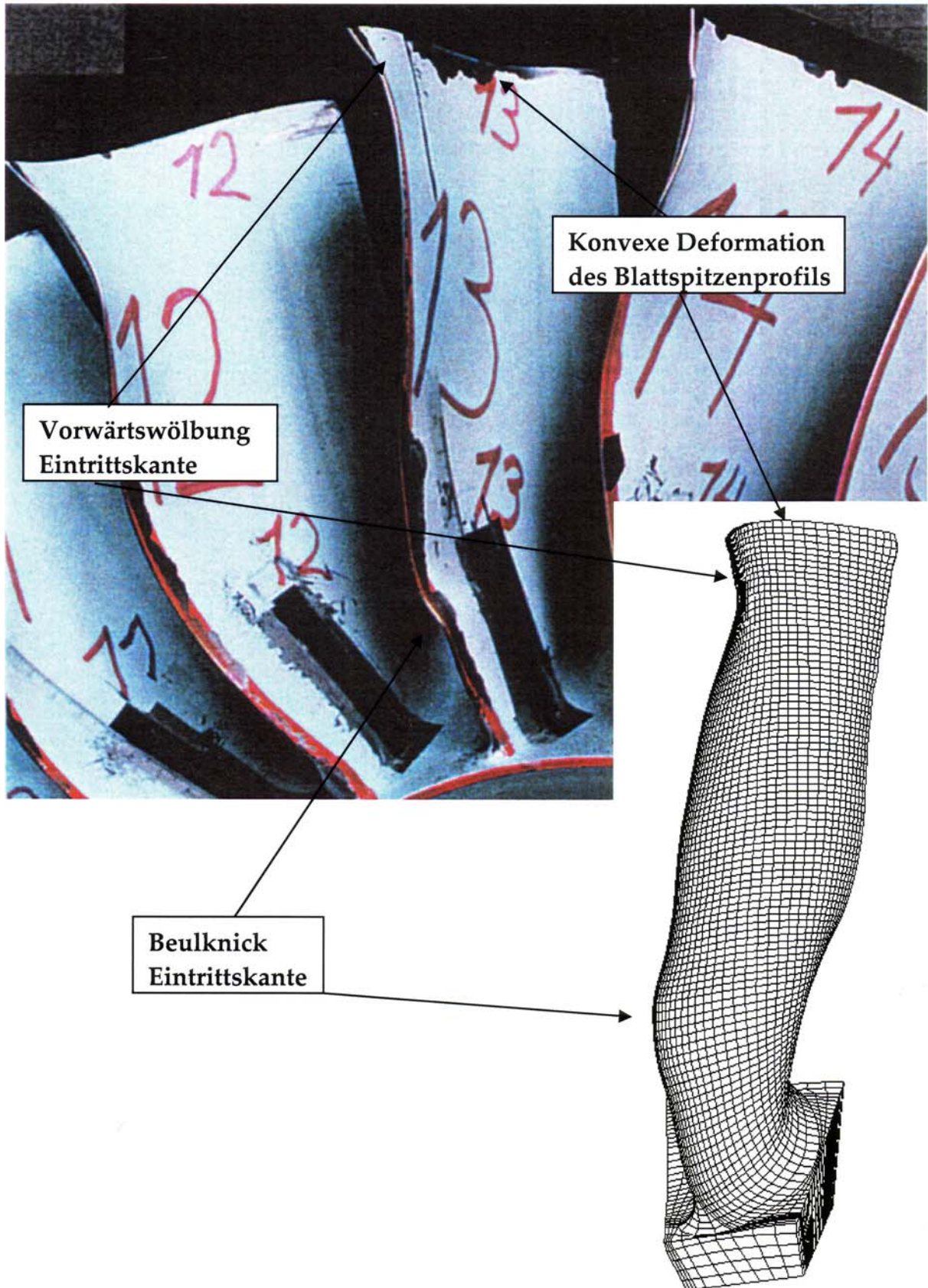


Abb. 7: Aufnahme des Rotors nach dem Versuch und berechnete bleibende Deformationen nach LS-DYNA

Der in Abb. 7 gezeigte qualitative Vergleich der bleibenden plastischen Deformationen im Rechenmodell mit dem tatsächlichen Zustand der Schaufelblätter nach dem Versuch zeigt ebenfalls gute Übereinstimmung. Die ursprünglich druckseitig konkaven Profile von Blatt 13 sind im Außenbereich des Blattes in Profilschneckenrichtung massiv konvex durchgebogen. Die ursprünglich radial gerade Eintrittskante zeigt an der Blattspitze eine charakteristische Vorwärtswölbung und auf etwa 1/3 Blatthöhe einen markanten Beulknick.

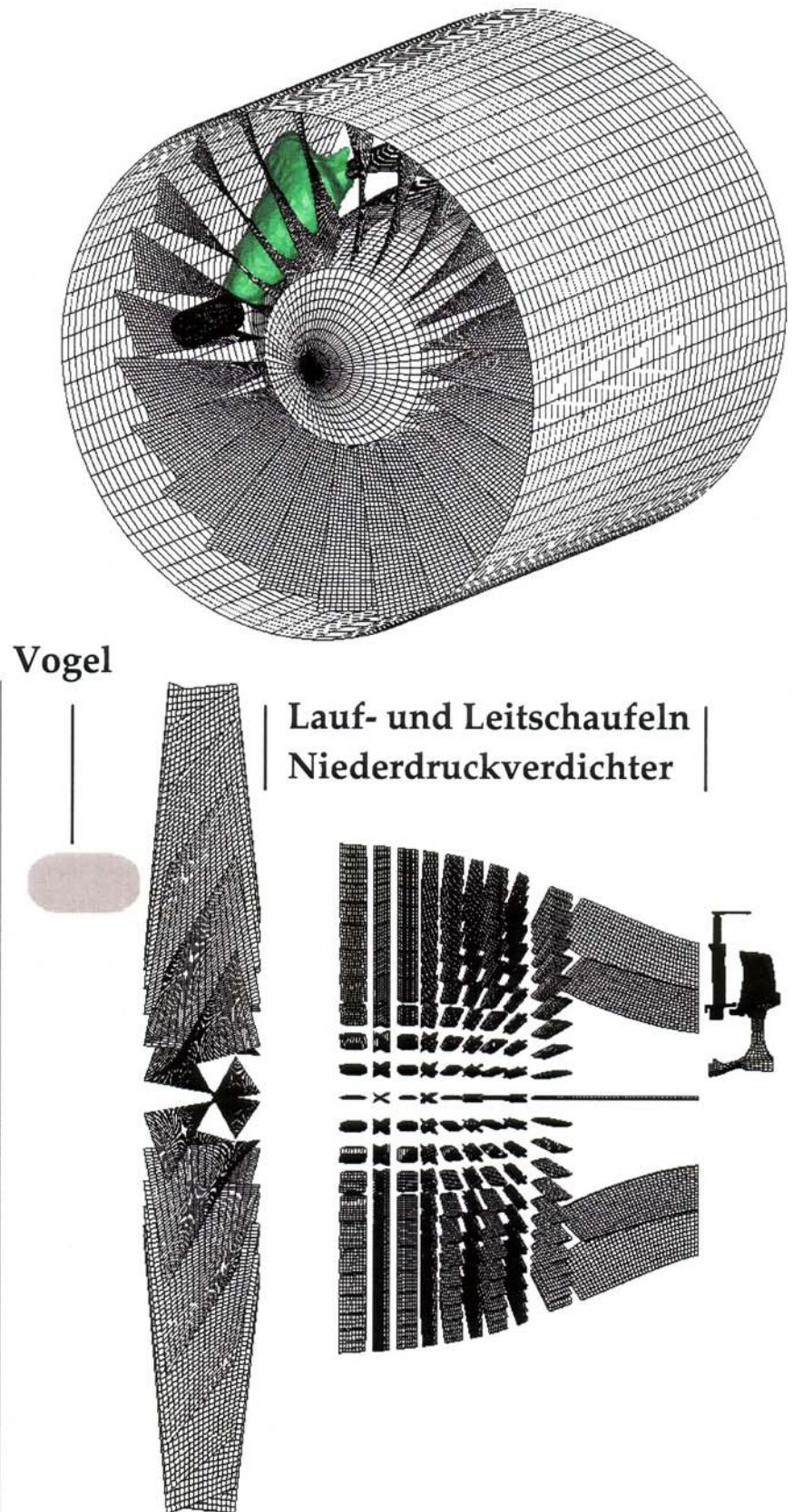
## **5. Auswirkung von Vogelmassen im Kerntriebwerk**

Durch den heftigen Impulsaustausch in der Frontlaufstufe des Fans werden die Vogelteilmassen in Drehrichtung beschleunigt und auszentrifugiert, so dass bei zivilen Turbofantriebwerken die Vogelmassen in den meisten Fällen das Triebwerk mit dem Nebenstrom wieder verlassen. Nur bei relativ zentral (Triebwerksmitte) einschlagenden Vögeln kann es vorkommen, dass Teilmassen des Vogels auch ins Kerntriebwerk gelangen.

In der Zulassung ziviler Triebwerke muss auch der Versuchsnachweis erbracht werden, dass das Triebwerk das Einsaugen eines ganzen Vogelschwarms (mehrere Vögel spezifizierter Größe und Anzahl) übersteht und nach einer wenige Sekunden dauernden, erlaubten Stabilisierungsphase wieder mit einem nachzuweisenden Mindestschub weiterläuft. Einer der Vögel muss dabei relativ mittig auf einer zentral ins Kerntriebwerk zielenden Linie geschossen werden.

In Rahmen des entsprechenden Zulassungsversuchs für das Turbofantriebwerk PW6000 (für Airbus A318) im Jahr 2004 wurde in diesem Zusammenhang ein 1,14 kg schwerer Vogel relativ mittig zusammen mit drei weiter außen platzierten 700 Gramm schweren Vögeln geschossen (Versuchsdurchführung Pratt & Whitney, East Hartford, Connecticut, USA).

Der Entwicklungsanteil der MTU Aero Engines GmbH am Triebwerk PW6000 umfasst den Hochdruckverdichter und die Niederdruckturbine. In Hinblick auf den 1,14 kg schweren so genannten 'Core Bird' wurde erstmalig für die MTU eine aufwendige vertiefende Finite Element Analyse (s. Abb. 8) durchgeführt, mit der der ins Kerntriebwerk einschlagende Massenanteil vorausberechnet wurde. Mit einem erweiterten Modell mit der gesamten Lauf- und Leitbeschaufelung des Niederdruckverdichters (s. Abb. 8 unten) wurde außerdem der Zustand der Vogelfragmente beim Durchlaufen des 4-stufigen Niederdruckverdichters bis zum Eintritt in den Hochdruckverdichter simuliert (FRISCHBIER & KRAUS 2005).



**Abb. 8:** Finite Element Modelle zur Simulation des Vogeldurchgangs durch die Triebwerksfrontstufe (oben) und zur Weiterverfolgung der ins Kerntriebwerk einschlagenden Teilmassenströme im Niederdruckverdichter

Im Fall der getesteten Startsituation und einer Vogeleintrittsgeschwindigkeit von 88 m/s (317 km/h) werden laut der Rechnung rund 80% des 'Core Birds' in den Nebenstrom auszentrifugiert, und 20% (etwa 230 Gramm) werden in den Niederdruckverdichter des Kerntriebwerks eingesaugt. Die nach dem Zulassungsversuch im Nieder- und Hochdruckverdichter gefundenen Verunreinigungen mit Vogelmasse - am Eintritt in den Hochdruckverdichter im Umfangsrichtung verteilt über 120° - belegen dieses Analyseergebnis, wonach ein substantieller Anteil an Vogelmasse in das Kerntriebwerk eingesaugt worden sein muss.

Im Fall der PW6000 Startsituation durchlaufen die vom Fan bereits beschleunigten Fragmentmassen den Niederdruckverdichter (NDV) ohne starke Impulswechselwirkung, wobei sie am Austritt aus dem NDV auf Strömungsgeschwindigkeit gebracht worden sind. Im Übergangskanal zum Hochdruckverdichter verlieren die Fragmentmassen dann durch die Umlenkung nach innen an Axialgeschwindigkeit und treffen relativ langsam auf die mit hoher Geschwindigkeit rotierende erste Laufstufe des Hochdruckverdichters. Hier findet wegen der im vorangegangenen Kapitel bereits erwähnten Niedergeschwindigkeitseinschlagbedingung, wie im Fan, wieder ein massiver Fluid-Struktur-Impulsaustausch statt - diesmal mit weniger Fragmentmasse aber auch mit deutlich kleineren Triebwerksschaufelblättern.

Wie der Fan muss die Laufbeschaufelung der ersten Stufe des Hochdruckverdichters auf diese Belastung ausgelegt sein. Um die Weiterbetriebsanforderungen zu erfüllen, dürfen keine oder nur geringe bleibende Deformationen entstehen, wobei diesmal alle Schaufelblätter der Laufstufe vom aufgefächerten Vogelfragmentteilstrom beaufschlagt werden. Auch der Abstand zu den Hinterkanten des vor der Laufstufe stehenden Eintrittsleitgitters muss ausreichend ausgelegt sein, so dass die rotierenden Schaufelblättern den einschlagenden Vogelmassen nach vorne ausweichen können ohne mit ihrer Eintrittskante gegen die Hinterkanten der feststehenden Leitschaufeln zu schlagen.

## **6. Schlussbemerkungen**

Im Rahmen der in Kapitel 3 beschriebenen experimentellen Grundsatzuntersuchungen wurden von WILBECK & RAND (1981) auch zahlreiche Versuche mit synthetischen Vogelersatzmassen, wie Kautschuk, Plastilin oder Gelatine mit verschiedensten Beimischungen, durchgeführt. Zweck der Untersuchungen war es, Versuche mit echten Vögeln in Hinblick auf Versuchsaufwand, Reproduzierbarkeit und Interpretierbarkeit durch synthetische Vogelersatzmassen ersetzen zu können. Alle untersuchten Kombinationen zeigten dabei aber entweder beim Hugoniot Schockdruck oder, wenn dort die Übereinstimmung zufrieden stellend war, beim Abfließdruck deutliche Abweichungen im Vergleich mit echten Vögeln. Bei Versuchen in der Entwicklungsphase von Triebwerkskomponenten wird trotzdem

allgemein mit künstlichen Vogelersatzmassen, z. B. Plastilin oder Gelatine je nach Schussgeschwindigkeit, gearbeitet. Nachweisversuche für die internationalen Zulassungsbehörden werden allerdings aufgrund des teilweise deutlich abweichenden Verhaltens von Ersatzmassen nach wie vor mit echten Vögeln durchgeführt.

## **Literatur**

ALGE, T. L. & MOEHRING, J. T. (1994): Modern Transport Engine Experience with Environmental Ingestion Effects, AGARD Conference on Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage in Gas Turbines, Rotterdam, The Netherlands

BANILOWER, H. & GOODALL, C. (1992): Bird Ingestion Into Large Turbofan Engines, DOT/FAA/CT-91/17

BARBER, J. & TAYLOR, H. P. & WILBECK, J. S. (1976): Bird Impact Forces and Pressures on Rigid and Compliant Targets, Technical Report AFFDL-TR-77-60

BARBER, J. & WILBECK, J. S. (1975): Characterization of Bird Impacts on a Rigid Plate, Part 1, Technical Report AFFDL-TR-75-5

CHESTER, M. L. & TERRANCE, G. T. (2003): Study of Bird Ingestions Into Aircraft Turbine Engines, DOT/FAA/AR-TN03/60

FRISCHBIER, J. (1994): Impact Loading of Compressor Stator Vanes by Hailstone Ingestion, AGARD Conference on Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage in Gas Turbines, Rotterdam, The Netherlands

FRISCHBIER, J. (1997): Birdstrike Capability of a Transonic Fan Blisk, Proceedings of the ASME TURBOEXPO 1997, Orlando, Florida

FRISCHBIER, J. (2002): Vogelschlag in Flugtriebwerken: eine impulsartige Fluid-Struktur-Wechselwirkung in der Triebwerksauslegung, VDI-Berichte Nr. 1682

FRISCHBIER, J. & KRAUS, A. (2005): Multiple Stage Turbofan Bird Ingestion Analysis with ALE and SPH Methods, ISABE-2005-1016, International Symposium on Air Breathing Engines 2005

HALLQUIST, J. O. (1998): LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation

HEYMANN, F. J. (1968): On the Shock Wave Velocity and Impact Pressure in High-Speed Liquid-Solid Impact, ASME Journal of Basic Engineering, Series D, Vol. 90

MCCALLUM, S. C. & CONSTANTINOU (2004): The Influence of Bird-Shape in Bird-Strike Analysis, 5<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference



MOFFAT, T. J. & CLEGHORN, W. L. (2001): Prediction of Bird Impact Pressures and Damage Using MSC/DYTRAN, Proceedings of the ASME TURBOEXPO 2001, New Orleans, Louisiana

NIERING, E. (1990): Simulation of Bird Strikes on Turbine Engines, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 112

TEICHMANN, H. C. & TADROS, R. N. (1991): Analytical and Experimental Simulation of Fan Blade Behavior and Damage under Bird Impact, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 113

RUHE, W. (2001): Die Vogelschlagstatistik der Bundeswehr 1999 – 2000, Vogel und Luftverkehr, 21, 2001

WILBECK, J. S., BARBER, J. P. (1978): Bird Impact Loading, The Shock and Vibration Bulletin, Vol.48, Part 2, pp. 115-122

WILBECK, J. S. & RAND, J. L. (1981): The Development of a Substitute Bird Model, Journal of Engineering Power, Vol.103

***Anschrift des Verfassers:***

Dr. Jörg Frischbier  
MTU Aero Engines GmbH  
Dachauer Str. 665  
80995 München  
mailto: [joerg.frischbier@muc.mtu.de](mailto:joerg.frischbier@muc.mtu.de)