

## **Triebwerk-Vogelschläge und der Fan mit Schaufeln großer Sehnenlänge von Rolls Royce**

(Bird Ingestion and the Rolls Royce Wide Chord Fan)

von I. MARTINDALE, Derby/UK

(Aus dem Englischen übertragen von K.-H. Hartmann/Oberursel mit terminologischer Beratung durch W. Mörig, DLH/Technik FRA)

(Erläuternde Abkürzungen und Begriffe am Schluß)

**Zusammenfassung:** In der vorliegenden Arbeit werden die Fan-Schaukel mit großer Sehnenlänge von Rolls Royce vorgestellt und deren Vorteile gegenüber der Fan-Schaukel mit hohem Seitenverhältnis und Dämpfungselementen erläutert. Die jüngste Generation der superplastisch geformten Fan-Schaukel wird mit anderen Fansystemen verglichen, und es werden die Konstruktionsprinzipien sowie die von ihr zu leistenden Aufgaben dargelegt.

Eines der vielen Erfordernisse für den Fan besteht darin, daß er dem Aufprall von Vögeln standhalten kann und dennoch ausreichenden Schub erzeugt. Die Konstruktionsarbeit und die Versuche bis hin zur vogelschlagbezogenen Triebwerkzulassung werden beschrieben.

**Summary:** This paper introduces the Rolls Royce wide chord fan and explains its advantages over high aspect ratio, snubbed fan blades. The latest generation superplastically formed fan blade is compared with other styles of fan, showing the principles of its construction and the duty it has to perform.

One of the many requirements for the fan is that it must be able to withstand the impact

of birds and still produce adequate thrust. The design work and tests which lead up into engine certification for bird ingestion are described.

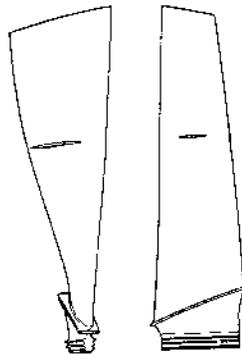
## **1. Einleitung - Warum haben Triebwerke große Fans mit Schaufeln großer Schnenlänge?**

Selbst auf die Gefahr hin, etwas Selbstverständliches zu sagen - das Funktionsprinzip eines Strahltriebwerkes besteht darin, daß an der Vorderseite Luft angesaugt und an der Rückseite mit stark erhöhter Geschwindigkeit wieder ausgestoßen wird. Die wachsende Beschleunigung der Luft ist es, die den Schub bewirkt. Bei einem gegebenen Schub ist dieser Prozeß wirksamer, wenn eine große Luftmasse bei geringer Geschwindigkeit statt umgekehrt eine kleine Luftmasse bei hoher Geschwindigkeit ausgestoßen wird. Dieser sogenannte Vortriebswirkungsgrad ist die treibende Kraft in der Entwicklung vom TL-Triebwerk zum ZTL-Triebwerk, bei dem der Schub nicht nur durch den Heißgasstrom aus dem Kerntriebwerk (core engine: d. Ü.) bedingt ist, sondern auch durch einen Teil des vom Fan kommenden Luftstroms, der über einen Nebenstromkanal um das Kerntriebwerk herum geführt wird. Die beiden Gasströme vermischen sich dann an der Schubdüse und bewirken bei geringerer Geschwindigkeit einen größeren Massenfluß als das beim TL-Triebwerk der Fall sein kann. Das Verhältnis der Massenflüsse über den Nebenstromkanal und über das Kerntriebwerk wird Nebenstromverhältnis genannt. Das Bemühen um einen immer größeren Vortriebswirkungsgrad führt ebenfalls zu immer höheren Nebenstromverhältnissen und schließlich zu dem charakteristischen Modell moderner ZTL-Triebwerke, bei denen dann ein sehr großer Fan durch ein verhältnismäßig kleines Kerntriebwerk angetrieben wird.

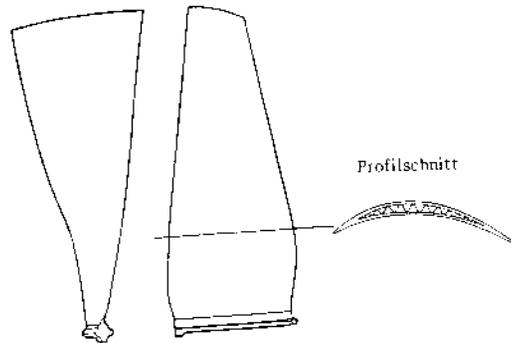
Der große Durchmesser moderner Fans (mehr als 3 m) wirkt sich sehr stark auf das Gewicht des Triebwerkes aus. Ganz allgemein gilt, daß das Fan-Gewicht durch eine große Anzahl relativ langer Fan-Schaukeln mit geringer Schnenlänge (d.i. die Distanz zwischen der Vorder- und der Hinterkante des Profils) klein gehalten werden kann.

Diese Schaufeln mit ihrem hohen Seitenverhältnis sind jedoch elastisch und besitzen Eigenschwingungsfrequenzen, die es möglich machen, daß bei normalen Betriebsgeschwindigkeiten des Triebwerkes Resonanzen auftreten. Dadurch kann Materialermüdung entstehen, falls ein bestimmtes Konstruktionsmaterial - nämlich das Dämpfungselement - außer Acht gelassen wird (Abb. 1). Das Dämpfungselement ist ein Steg, der auf beiden Seiten des Schaufelblattes hervorragt. Sobald der Fan rotiert, stützen sich die benachbarten Schaufeln über die Stege ab, bilden einen Versteifungsring um den gesamten Fan herum und bringen so die Eigenschwingungen der Schaufeln aus dem kritischen Störbereich heraus.

Leider vermindern die Dämpfungselemente aber auch den Wirkungsgrad des Fan (um etwa 4%), und verursachen außerdem auch Vogelschlagprobleme. Die falsche Vorstellung, das Dämpfungselement müsse bei Vogelaufprall das Vogelschlagverhalten verbessern, ist weit verbreitet. Tatsächlich aber muß das Profil um das Dämpfungselement herum verstärkt werden und soll unter Einwirkung des Vogelschlages entstehende Risse verhindern: die Leistungsverluste werden dabei vergrößert.



**Abb. 1** Fan-Schaukel mit Dämpfungselement



**Abb. 2** Fan-Schaukel mit großer Sehnenlänge

Man kann ohne weiteres erkennen, daß ein Fan-Modell, bei dem auf Dämpfungselemente verzichtet wird, einen deutlichen Leistungsvorteil bringen würde. Eine Möglichkeit dazu ist die wesentliche Versteifung der Länge der Schaufelsehne (Abb. 2). Jede Schaufel wird dann zwangsläufig steifer, und der aerodynamische Wirkungsgrad wird verbessert. Ein derartiger Fan würde dann aber auch unzulässig schwer sein. Die Lösung von Rolls Royce besteht darin, die Schaufel hohl zu machen.

Hohl konstruierte Fan-Schaukeln mit großer Sehnenlänge sind steif, leistungsstark und bei richtigem Fertigungsverfahren sind sie - gemessen an ihrer Größe - auch sehr leicht. Bei der ersten Generation von Fans mit hohl konstruierten Fan-Schaukeln von Rolls Royce besteht die Außenschale aus Titan, die mittels Titan-Wabenkern stabilisiert ist. Diese Schaufeln werden seit 1984 im RB211-535E4, IAE V2500 und im RB211-524C verwendet.

Die zweite Generation der Schaufeln mit großer Sehnenlänge besitzt diffusionsgeschweißte superplastisch geformte Innenkonstruktionen aus Titan, die für automatische Herstellung besser geeignet sind, und die bei der Aufnahme zentrifugaler Kräfte eine wirksamere Nutzung des Schaufelkerns ermöglichen. Das Ergebnis ist eine 15%ige Gewichtseinsparung sowie im Vergleich zu den Schaufeln mit Wabenkern

eine 30%ige Kosteneinsparung.

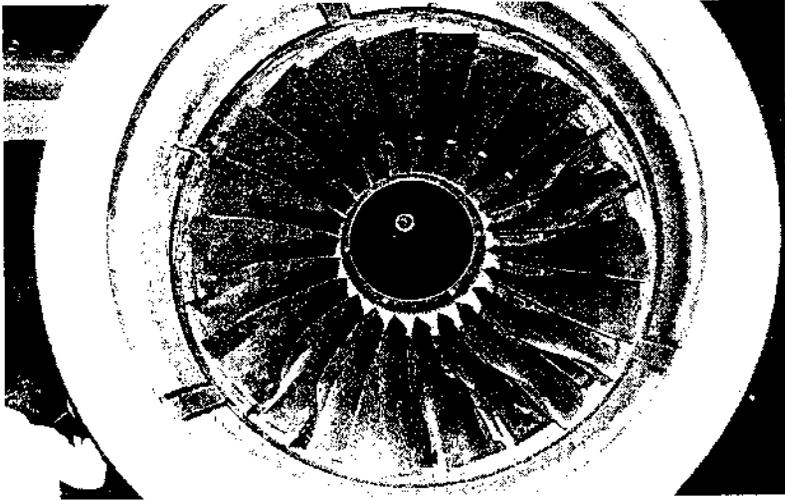
Die diffusionsgeschweißte superelastisch geformte Fan-Schaukel mit großer Schenkel­länge ist ein Merkmal der Triebwerkserie TRENT-700, die in dem A-330 in Betrieb genommen wurde, und des TRENT-800 für den Antrieb der Boeing 777.

Zusammenfassend kann man also sagen: die Fan-Schaukel des modernen Strahltrieb­werkes hat eine schwierige Aufgabe zu erfüllen. In einem Rolls Royce-Triebwerk, wie dem TRENT-700, ist die Fan-Schaukel etwa 1 m lang, und beim Start rotiert ihre Spitze mit nahezu 1,4-facher Schallgeschwindigkeit, der Fan übt dabei eine Kraft von mehr als 90 Tonnen auf den Schaufelkranz aus, jede Schaufel erzeugt reichlich mehr als den doppelten Schub von Frank Whittles erstem Strahltriebwerk; wird die Fan-Schaukel bei einem Vogelschlag getroffen, muß sie dennoch weiterlaufen.

## **2. Vogelschlag und Triebwerkskonstruktion**

Vogelschlag im Triebwerk - im Durchschnitt einmal pro 5000 Flüge - ist durchaus keine Seltenheit. Die weitaus meisten Vogelschläge verursachen überhaupt keinen Triebwerkschaden; doch gelegentlich - sobald z.B. schwere Vögel beteiligt sind - können die Folgen recht schwerwiegend sein. Abb. 3 zeigt einen RB211-534E4, der beim Start in Chicago von 3 oder 4 Kanada-Gänsen getroffen wurde. In diesem Fall lief das Triebwerk weiter und wurde durch die Besatzung erst nach Erreichen der Sicherheitshöhe abgeschaltet.

Dies ist gewiß ein ungewöhnliches Beispiel. Die Zulassungsbestimmungen von FAA und JAA sind mehr auf häufiger auftretende Situationen gerichtet und sollen sicherstellen, daß Triebwerke auch dann noch weiter Schub produzieren, wenn sie von Vogelarten getroffen werden, die mit aller Wahrscheinlichkeit in Schwärmen auftreten (d.h. mittelgroße Vögel, gegenwärtig 1,5 lbs- was für größere Triebwerke bald auf 2,5 lbs angehoben werden soll), und daß Triebwerke betriebsicher abgeschaltet werden können, wenn sie von einzelnen schweren Vögeln getroffen werden (große Vögel:



**Abb. 3** RB 211-535E4 nach Vogelschlag durch 3 bis 4 Kanada-Gänse

gegenwärtig 4 lbs, was für größere Triebwerke bald auf 6 bis 8 lbs angehoben werden soll).

Das Betriebsverhalten des Triebwerkes bei Vogelschlag im Vergleich zur Strenge der Vorschriften, nach denen sie zugelassen wurden, kann anhand der Ergebnisse von Untersuchungen, wie sie z.B. von der FAA 1982 bis 1983 und von 1989 bis 1991 durchgeführt wurden, beurteilt werden. Diese Untersuchungen sind höchst wertvolle Datenquellen zur Ergänzung firmeneigener Vogelschlag-Registrierungen bei Rolls Royce für den RB211, die über mehr als 20 Jahre gesammelt wurden, und die eine statistische Modellierung praktischer Vogelschlagereferenzen liefern.

Mit Hilfe statistischer Modelldarstellungen kann man quantitativ abschätzen, wie stark Triebwerksbauteile, z.B. der Fan, sein müssen, damit sie den Forderungen nach Betriebszuverlässigkeit genügen. Hierbei ist Rolls Royce zu folgendem Schluß gekommen: neue große Triebwerke sollten so konstruiert sein, daß sie dem Zusammenprall mit einem Schwarm von 2,5 lbs schweren Vögeln standhalten können: und

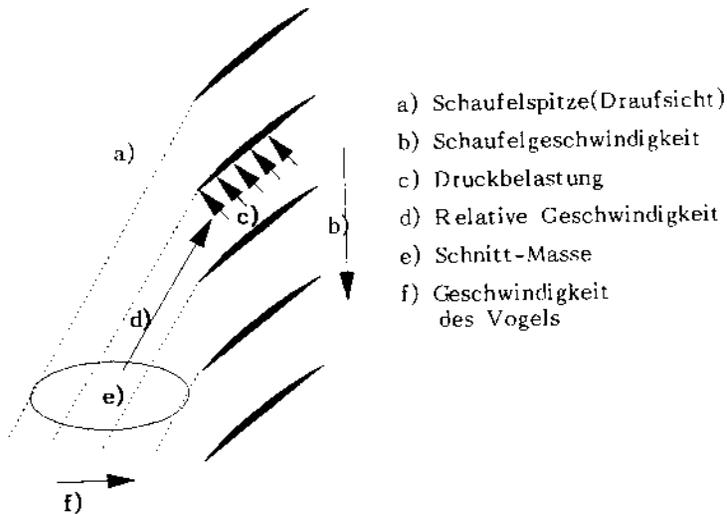
es ist gerade dieses Kriterium, das bei den neuen TRENT-Triebwerken angewendet wird, obwohl der TRENT-700 lediglich den 1,5 lbs-Zulassungstest bestehen muß.

Rolls Royce setzt gegenwärtig die Entwicklung seiner statistischen Analyse von Vogelschlägen fort und finanziert z.Zt. in Zusammenarbeit mit dem CAA (UK) Dr. John Allan vom Landwirtschaftsministerium des UK bei dessen Messungen der Schwärmdichten unter Verwendung einer neuartigen Stereo-Video-Technik.

Nach Festlegung einiger Grundregeln für die Betriebsbedingungen und die erforderliche Stärke einer neuen Fan-Schaukel kann also die Konstruktionsarbeit beginnen.

Die äußere Form der Fan-Schaukel wird von aerodynamischen Erfordernissen diktiert. Da jedoch die Fan-Schaukel hohl ist, gibt es innerhalb großzügiger Herstellungsbeschränkungen viel Spielraum für die Anpassung der Schaukelschalendicke und Kernstruktur, wobei sich herausstellt, daß für die Konstruktion der Schaukelspitze vogelschlagbedingte Erfordernisse ausschlaggebend sind. Da das Gewicht an der Schaukelspitze durch zusätzliches Metall am Schaukelfuß, am Schaukelkranz, an der Welle und am Vogeldurchschlagsystem ausgeglichen werden muß - 1 kg an den Spitzen führt zu einem Mehrgewicht am Triebwerk von 2,5 kg - ist es sehr wichtig, daß kein unnötiges Metall verwendet wird.

Abb. 4 zeigt den grundlegenden Aufprallmechanismus, der die Ursache für Schäden an Fan-Schaukeln ist. Wenn der Vogel in den Fan eindringt, wird er von jeder einzelnen Schaukel zerschnitten. Durch die Schaukeln wird die Masse jedes Stückchens sehr schnell beschleunigt und tritt dann auf der Rückseite des Fan bei stark erhöhter Geschwindigkeit wieder aus. Die auf die Vogelmasse übertragene Beschleunigung bewirkt eine hohe Druckbelastung an der Oberfläche der Fan-Schaukel - charakteristisch sind 15 MPa (1 tsi) - und verursacht an der Vorderkante eine Delle oder Beule.



**Abb. 4** Zerschneiden des Vogels

Falls die Fan-Schaukel nicht stark genug ist, besteht die Möglichkeit, daß die Vorderkante überdehnt wird und reißt, der Riß sich unter der zentrifugalen Belastung ausbreitet, und die ganze Schaufelspitze sich ablöst. Da die Schaufel mit großer Sehnenlänge ebenfalls hohl ist, können die Schaufelschalen reißen, wenn ihre Stärken zu gering oder falsch verteilt sind. Die Stärke der Kernstruktur beeinflußt ebenfalls die Reaktion der Schaufel auf den Druck des Aufpralls. Selbst wenn die Fan-Schaukel hierbei nicht zu Schaden kommt, sollte die Tiefe der Delle an der Vorderkante nicht allzu groß sein, da diese Dellen den durch den Fan gehenden Luftstrom stören und Schwingungen sowie Schubverlust hervorrufen, der gemäß den Lufttuchtigkeitsbestimmungen nach dem Aufprall (Einsaugen) mehrerer mittelgroßer Vögel 25% des Startschubs nicht übersteigen darf.

Das Eindringen eines großen Vogels darf einen gewissen Materialverlust am Schaufelblatt zur Folge haben, solange die entstandene Unwucht nicht größer ist als die Fähigkeit des Triebwerkes, diese zu absorbieren - was im allgemeinen mittels eines Unwuchtversuchs durch Absprengen von Schaufeln demonstriert wird - und solange

das Triebwerk betriebssicher abgeschaltet werden kann. Dies alles muß bei minimalem Gewichtsaufwand erreicht werden.

Die Struktur der diffusionsgeschweißten superplastisch geformten Spitze der Fanschaufel ist allmählich entwickelt worden und berücksichtigt die Ergebnisse der Vogelschlagforschung, die Erfahrungen mit Wabenschaufeln sowie die Bildung von Spannungsmodellen nach der Finite-Element-Methode. Heute können wir ein erstes Muster recht schnell durch Berechnung relativ einfacher Aufprallparameter erarbeiten; dieser Weg wird zur Festlegung des Grundmodells der Schaufel genutzt. Zur weiteren Verbesserung der Konstruktion wird jedoch in zunehmendem Maße von komplexen dynamischen Spannungsmodellen Gebrauch gemacht.

Das von Rolls Royce bevorzugte Analyseprogramm ist das Dyna3D. Dies ist ein Finite-Element-Code, der sich mit nicht-linearen geometrischen und Materialeigenschaften befassen kann und speziell im Hinblick auf Aufprallprobleme geschrieben wurde. Abb. 5 enthält ein typisches Modell, in welchem dargestellt wird, wie unter der Belastung von Vogelschlag die Schaufel verformt wird.

Nach der Konstruktionsphase muß dann die Schaufel ein hartes Testprogramm bis hin zum endgültigen Zulassungstest durchlaufen.

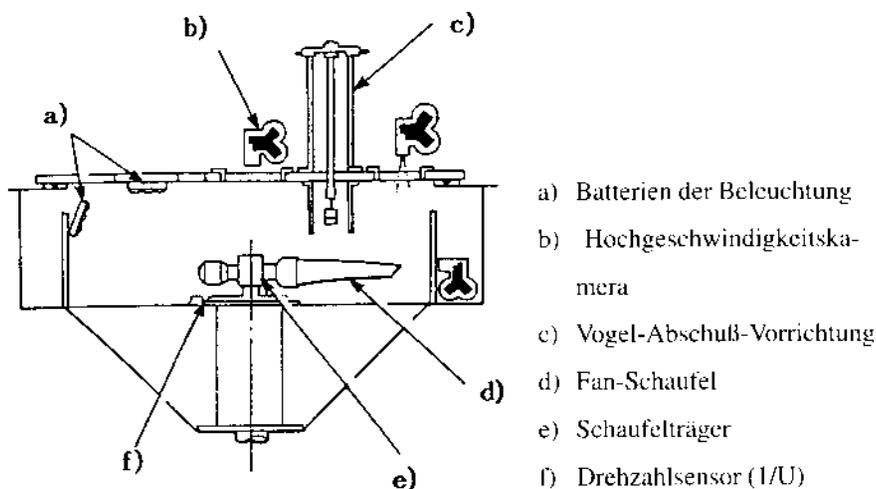


**Abb. 5** Modell DYNA3D für Vogelaufprall

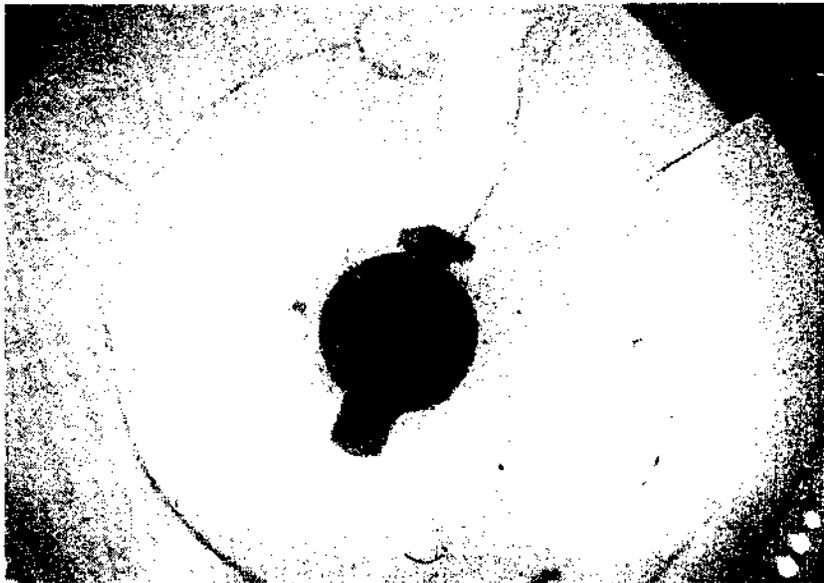
### 3. Versuche zum Vogelschlag am Triebwerk

Zunächst verwendet Rolls Royce eine vereinfachte Vogelschlagversuchsmethode, wobei eine Vogelattrappe (Gelatine) beim Eindringen in den Fan auf eine einzelne rotierende Schaufel trifft (Abb. 6). Das Zeitprogramm für die Vogelattrappe und die Rotation des Fan werden präzise gesteuert, so daß die Schaufel im richtigen Auftreffwinkel die richtige Masse abtrennt. Dadurch werden genau die Druckbelastungen und Schäden reproduziert, die an der Schaufel im Triebwerk auftreten würden. Die Schaufel in Abb.7 hat kurz zuvor eine simulierte 8-lbs-Vogelattrappe durchgeschnitten.

Da diese Versuchsmethode gegenüber dem anderen Weg - da Verwendung eines Fan mit vollständiger Beschaufelung - eine deutliche Kosteneinsparung bedeutet, wird sie ständig verbessert, nicht zuletzt auch hinsichtlich der Abmessungen der Vogelattrappe.



**Abb. 6**    Vorrichtungsaufbau für eine Einzelschaukel



**Abb. 7** Fan-Schaufel des TRENT beim Aufprall einer 8-1b-Vogelattrappe

Zur Vermeidung zu leichter oder zu strenger Versuchsbedingungen müssen Form, Abmessungen und Material für die Vogelattrappe stimmen. Rolls Royce möchte sich an Gemeinschaftsforschungen zu diesem Vorhaben beteiligen, nicht nur zur Verbesserung gegenwärtiger Versuchsmethoden, sondern auch mit dem möglichen langfristigen Ziel, echte Vögel völlig durch "Dummies" zu ersetzen - sogar für Zulassungstests.

Falls erforderlich, kann an diesem Punkt des Entwicklungsprogramms ein Rotor mit voller Beschaufelung erprobt werden. Im Laufe der Entwicklung des TRENT-700 wurde ein sehr frühes Versuchsmuster eines Fan des TRENT-700 im Komponentenversuch als voll beschaufelter Rotor unter Verwendung echter Vögel erprobt, um dadurch die Fähigkeit in Serie hergestellter Fans des TRENT-700 zu bestätigen, Vögel mittleren Gewichts "erfolgreich", d.h. ohne Beeinträchtigung, zu absorbieren.

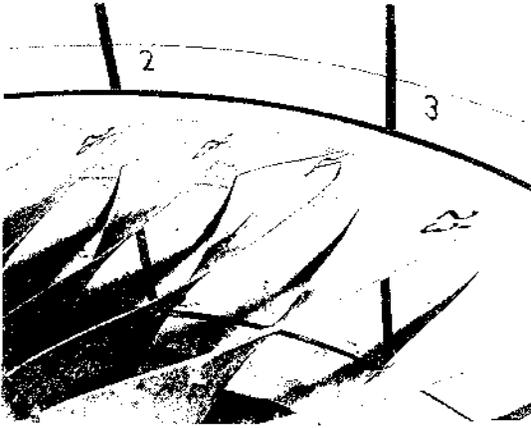
Abb. 8 enthält die Ergebnisse von Vogelschlägen an der Schaufelspitze mit einem 2.5-lbs-Vogel bei maximaler Startleistung. Man kann die typischen Vorderkantenschäden erkennen, doch die Schaufel blieb funktionsfähig, und die Verformung des Fan wäre also keine Gefahr für das 75%-Kriterium der Leistungserholung.

Nun ist alles bereit für den Zulassungstest eines laufenden Triebwerkes. Es wurde eine spezielle mehrläufige Luftkanone (Abb. 9) konstruiert, mit der gemäß den Festlegungen der Zulassungsbehörde bis zu 8 Vögel mit elektronischem Zeitprogramm und gezielt einzeln auf bestimmte kritische Stellen des Triebwerks abgeschossen werden können.

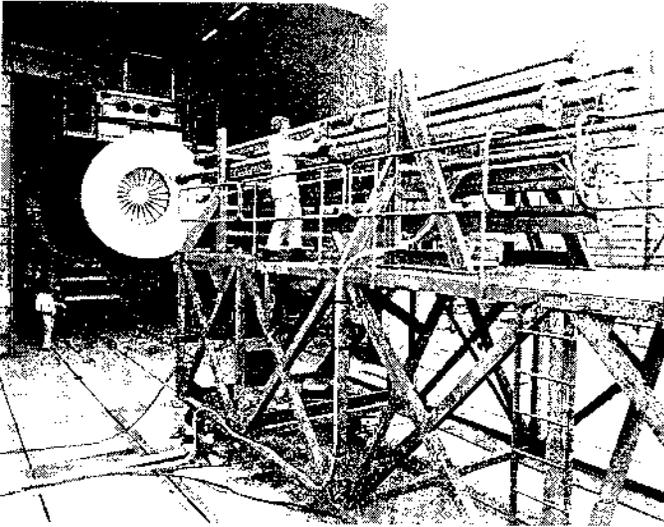
Hochgeschwindigkeits-Film- und Videoaufnahmen werden in großem Umfang zur Aufzeichnung der Versuche eingesetzt, wobei die Geschwindigkeit der Vögel und die genauen Aufschlagstellen festgehalten werden. Für diesen Versuch werden Enten verwendet; doch bevor sie für das Abschlußrohr passend in Glasfaser-Führungskäfige eingepackt werden, werden sie in humaner Weise getötet. Nach dem Abschluß wird der Führungskäfig durch ein am Ende des Abschlußrohres montiertes Auffanggerät entfernt, und nur der Vogel dringt dann in das Triebwerk ein.

Nach dem Aufprall des Vogels muß das Triebwerk eine Weiterlaufzeit - derzeit 20 Minuten - leisten, ausreichende Betriebseigenschaften garantieren und eine Platzrunde mit anschließender Landung simulieren.

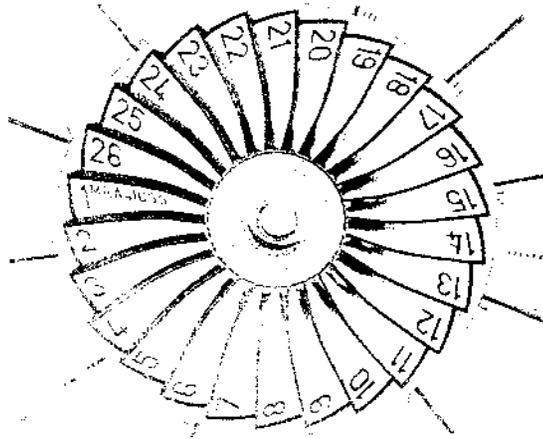
Der TRENT-700 hat kürzlich solch einen Zulassungstest abgeschlossen. Acht 1.5-lbs-Vögel wurden mit 170 kn in ein mit maximaler Startleistung laufendes Triebwerk hinein abgeschossen. Der am Fan entstandene Schaden wird in Abb. 10 dargestellt. Das Triebwerk verlor lediglich 2% des Schubs und bewies damit, daß die neue Generation der Fan-Schaukeln mit großer Sehnenlänge den guten Ruf der Robustheit bestätigt, wie er durch ZTL-Triebwerke von Rolls Royce in den vielen Jahren des Engagements mit dem Vogelschlagproblem begründet ist.



**Abb. 8** Fan-Schaufel des TRENT nach Aufprall (Einsaugen) eines natürlichen 2,5 lb-Vogels.



**Abb. 9** Prüfstand für Vogelschlag



**Abb. 10** Zulassungstest des TRENT-700 für einen mittelgroßen Vogel

### **Erläuterungen der Abkürzungen und Begriffe**

plc	public limited company
fan	Gebälse
TL-Triebwerk	Einwellen-Turboluftstrahl-Triebwerk (Turbojet)
ZTL-Triebwerk	Zweikreis-Turboluftstrahl-Triebwerk (Turbofan)
A-330	Airbus-Version
Frank Whittle	startete am 12.4.1937 ersten Testlauf einer Turbine (im UK)
FAA	Federal Aviation Authority (USA)
JAA	Joint Aviation Authority (UK)
lb/lbs	engl. Gewichtspfund(e)
CAA	Civil Aviation Authority (UK)
Mpa	Megapascal
tsi	tons per square inch
U	Umdrehung
UK	United Kingdom

#### **4. Literatur**

I. MARTINDALE (1994): Bird Ingestion and the Rolls Royce Wide Chort Fan.  
BSCE 22/WP 80. Wien.

*Anschrift des Verfassers:*

Ian Martindale  
Corporate Specialiste - Engine integrity  
Rolls Royce plc  
PO Box 31  
Derby/UK  
DE 24 8 BJ