

# TOPOLOGISCHE UNTERSUCHUNG EINER FAN RETAINER DISC IN FASERVERBUNDBAUWEISE

S. Lindner, Diplomand

O. Lenk, Rolls-Royce Deutschland

R. Grothaus, EAST-4D Carbon Technology GmbH

M. Gräber, Rolls-Royce Deutschland

## Zusammenfassung

Aktuelle Entwürfe der Fan Retainer Disc an Strahltriebwerken der Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG sind auf die Verwendung metallischer Werkstoffe abgestimmt. Ziel der topologischen Untersuchung ist es, die Fan Retainer Disc als Faserverbundkonstruktion auszuführen. Dabei sollen die Materialvorteile der Faserverbundwerkstoffe optimal ausgenutzt werden. Um dies umzusetzen, wurde im Rahmen einer Diplomarbeit, eine Strukturoptimierung durchgeführt. Diese besteht im Wesentlichen aus zwei Schritten. Schritt 1 - eine Topologieoptimierung, ist in der Lage ideale Lastpfade in einem Entwurfsraum abzubilden. Schritt 2 - eine Dimensionsoptimierung, wurde im Anschluss daran angewendet, um einen Lagenaufbau in Wandstärke und Faserorientierung lokal den wirkenden Lasten anzupassen. In Zusammenarbeit mit der EAST-4D Carbon Technology GmbH wurde, unter Verwendung der Ergebnisse der Strukturoptimierung, ein Bauteilentwurf realisiert. Dies geschah unter Beachtung möglicher Fertigungstechniken.

Das Ergebnis ist die Fan Retainer Disc als Faserverbundkonstruktion. Sie weist eine erhebliche Massereduzierung gegenüber der herkömmlichen metallischen Bauweise auf. Dargestellt werden Vorgehen und Ergebnisse der Strukturoptimierung sowie deren konstruktive Umsetzung. Zudem erfolgte eine Analyse der Festigkeit unter Beachtung der verschiedenen Versagensarten der Faserverbundwerkstoffe. Des Weiteren wird auf die Fertigungstechnologie eingegangen. Festigkeitsanalyse und Berechnung der Bauteilmasse erlauben letztendlich eine Bewertung der Konstruktion sowie einen Vergleich mit der herkömmlichen metallischen Bauweise.

## 1. EINLEITUNG

Die Einsparung von Gewicht ist eine der wichtigsten Vorgaben im Entwurfsprozess für Bauteile in der Luft- und Raumfahrt. Sie ist gleichbedeutend mit einer Effizienzsteigerung durch Treibstoffeinsparung, wodurch sich die Wirtschaftlichkeit des Triebwerks deutlich erhöhen lässt.

Fan Retainer Discs an Strahltriebwerken der Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG sind in der aktuellen Konstruktion auf die Verwendung metallischer Werkstoffe abgestimmt. Im Rahmen einer angestrebten Reduzierung des Bauteilgewichts wurde der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen verfolgt. Durch eine reine Werkstoffsubstitution ist man jedoch nicht in der Lage Material und Kostenvorteile der Faserverbundwerkstoffe optimal zu nutzen. Erst eine lastpfadgerechte Konstruktion, angepasst an Materialeigenschaften und Fertigungstechniken, ist in der Lage, deren Vorteile optimal herauszustellen. Die Umsetzung einer solchen Konstruktion erfolgt auf Basis einer Strukturoptimierung.

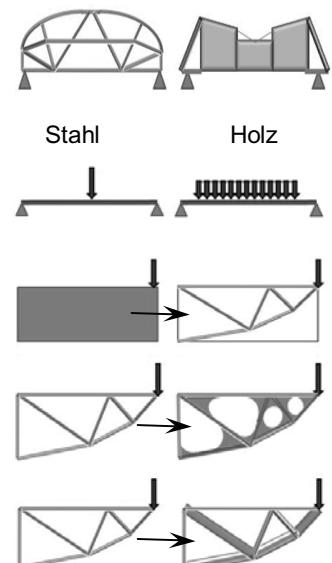
## 2. OPTIMIERUNG MECHANISCHER STRUKTUREN

Unter der Optimierung mechanischer Strukturen versteht man die Veränderung der Eigenschaften einer Struktur, um diese optimal an die Erfüllung spezifischer Vorgaben anzupassen. Jene Eigenschaften, die während der Optimierung verändert werden, sind Entwurfsvariablen.

### 2.1. Klassifizierung der Strukturoptimierungsprobleme

Strukturoptimierungsprobleme lassen sich laut Eschenauer [1] und Schumacher [2] auf Grundlage von Schmit [3] unter Betrachtung der Entwurfsvariablen klassifizieren:

- Wahl der Bauweise
- Wahl des Materials
- Art der Belastung und Einleitung in die Struktur
- Topologieoptimierung
- Gestaltoptimierung
- Dimensionsoptimierung



## 2.2. Behandlung von Strukturoptimierungsproblemen

Die an der Fan Retainer Disc durchgeführte Strukturoptimierung erfolgte auf Basis von FE-Modellen über das Programm OptiStruct<sup>1</sup>. Die im Programm realisierte Behandlung des Optimierungsproblems lässt sich an Hand des Drei-Säulen Konzepts darstellen (siehe Eschenauer [1] und Kress [5]).

Die Vorgabe, die eine optimierte mechanische Struktur erfüllen soll, muss durch die Zielgröße  $f$  beschrieben werden. Zielgrößen sind häufig Eigenschaften der Struktur oder Reaktionen auf äußere Belastungen.

Die *Entwurfsvariablen*  $x$  sind Eigenschaften der Struktur, die variiert werden, um ein Optimum für  $f$  zu erreichen.

Zielgröße und Entwurfsvariable bilden in ihrer Abhängigkeit voneinander die Zielfunktion  $f(x)$ .

Als *Optimierungsproblem* wird die Berechnung des Minimums der Zielfunktion definiert (Schumacher [2]).

$$(1) \quad \min f(\bar{x})$$

Der Vektor der Entwurfsvariablen  $\bar{x}$  beschreibt den *Entwurfsraum*. Dieser wird durch Restriktionen beschränkt (Schumacher [2]).

Der durch Restriktionen begrenzte Entwurfsraum wird als *zulässiger Entwurfsraum* bezeichnet.

In ihm erfolgt die Berechnung des Minimums der Zielfunktion durch schrittweises Variieren der Entwurfsvariablen.

Die Behandlung von Strukturoptimierungsproblemen nach dem Drei-Säulen Konzept ist in Bild 1 dargestellt. Speziell benannte Methoden in Säule 2 werden von OptiStruct zur iterativen Lösung des Optimierungsproblems eingesetzt.

## 2.3. Topologieoptimierung

Bei der klassischen Topologieoptimierung soll eine ideale Materialverteilung oder auch der optimale Lastpfad innerhalb eines Bauraums ermittelt werden (Bendsoe [8]). Wird eine Struktur entlang optimaler Lastpfade belastet, besitzt sie eine besonders hohe spezifische Steifigkeit. Es wird also ein Zusammenhang zwischen der Steifigkeit und der Reaktion der Struktur auf äußere Belastungen gesucht. Dieser Zusammenhang muss zudem in der Lage sein, Lastpfade in Form von Materialverteilungen abzubilden. Ein solcher Zusammenhang lässt sich über die *Formänderungsenergie* herleiten.

Die Formänderungsenergie  $N$  der Struktur, ergibt sich aus Spannungen und Dehnungen im Strukturvolumen. Es gilt (Eschenauer [1], Altair [7]):

$$(2) \quad F\partial u = \sigma\partial\varepsilon dV = \partial N$$

Die FE-Analyse berechnet aus Lasten am Bauteil die Verschiebungen der Struktur (siehe Bathe [6], Altair [7]).

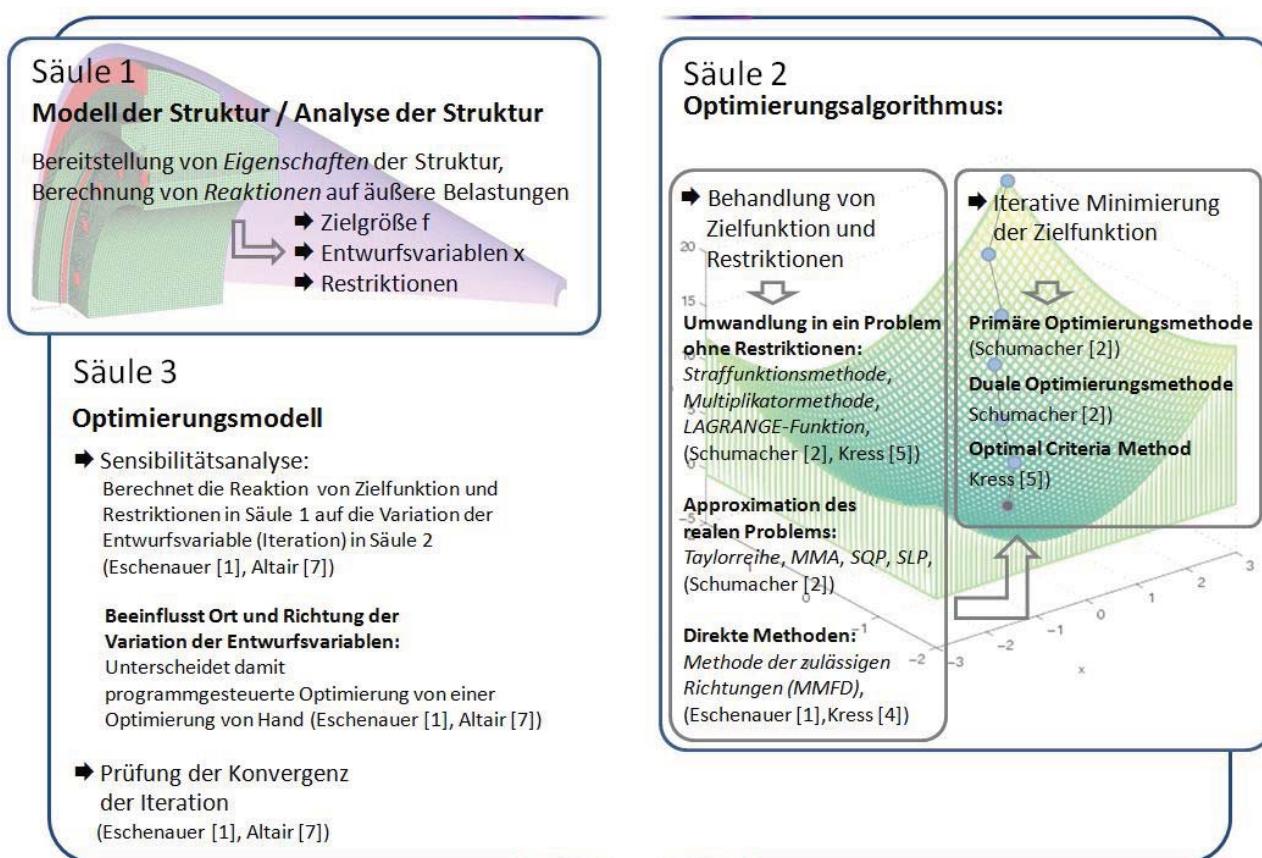


BILD 1. Behandlung von Strukturoptimierungsproblemen, Drei-Säulen Konzept

<sup>1</sup> Komponente von HyperWorks, Altair Engineering, Inc.

$$(3) \quad \bar{K}\bar{u} = \bar{f}$$

Die Steifigkeitsmatrix der Struktur  $\bar{K}$  ist die Summe aller Elementsteifigkeiten  $E_e$ . Die Formänderungsenergie wird nach Gleichung (4) berechnet (Altair [7], Bendsoe [8]):

$$(4) \quad N = \frac{1}{2} \bar{u}^T \bar{K} \bar{u}$$

Gleichung (4) stellt den Zusammenhang her zwischen der Formänderungsenergie als Reaktion auf äußere Lasten (2) und der Steifigkeit der Struktur (3).

Ist der Lastpfad optimal und die Steifigkeit hoch, sinken die Verschiebungen  $u$  bei gegebener Belastung  $f$ . Man kann daher das Ziel der Topologieoptimierung angeben mit (Bendsoe [8]):

$$(5) \quad \min \bar{f}^T \bar{u}$$

Mit den Gleichungen (3) und (4) kann daher das Ziel nach Gleichung (5) als Minimierung der Formänderungsenergie ausgedrückt werden (Altair [7]).

$$(6) \quad \min \bar{N} = \frac{1}{2} \bar{u}^T \bar{f}$$

Man spricht in bei diesem Zusammenhang von der Minimierung der *Nachgiebigkeit* (Altair [7], Bendsoe [8]).

Die Steifigkeitsmatrix  $\bar{K}$  stellt den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Struktur und der Nachgiebigkeit her. Die Dichte  $\rho_e$  jedes Elementes  $e = 1, \dots, N$  des FE-Modells, wird nun verwendet, um über die Steifigkeitsmatrix gezielt Einfluss auf die Nachgiebigkeit zu nehmen (Altair [7], Bendsoe [8]).

$$(7) \quad \bar{K} = \sum_{e=1}^N \rho_e^p \bar{K}_e (E_e)$$

Die Dichte jedes Elements ist demnach eine Entwurfsvariable. Gleichung (4) als Zusammenhang zwischen Zielgröße  $N$  und Entwurfsvariable  $\rho_e$  stellt die Zielfunktion dar.

Die Abbildung der Lastpfade erfolgt nun über die Dichtewerte der Elemente. Im Laufe der Optimierung werden die Dichtewerte zwischen Null und Eins variiert. Elemente mit  $\rho_e = 1$  sind für die Aufnahme von Lasten im Bauraum essentiell. Elemente mit Werten  $\rho_e = 0$  sind dagegen für die Lastaufnahme irrelevant. Bereiche mit Werten zwischen Null und Eins sind Auslegungssache seitens des Ingenieurs. Der Exponent  $p$  in Gl. (7) kann genutzt werden um diesen Bereich zu verkleinern (siehe Altair [7], Bendsoe [8]).

Häufig, müssen im Rahmen einer Topologieoptimierung, verschiedenartige Lastfälle untersucht werden. OptiStruct bietet dazu die Möglichkeit, einzelne Lastfälle über die sogenannte *Gewichtete Nachgiebigkeit* zu einer Zielgröße zusammen zu führen (Altair [7]).

$$(8) \quad \bar{N}_w = \sum \bar{w}_i \bar{N}_i = \frac{1}{2} \sum \bar{w}_i \bar{u}_i^T \bar{f}_i$$

Die Formulierung nach Gleichung (8) bietet zudem die Möglichkeit, über die Wertungsfaktoren  $w_i$ , Lastfälle mit unterschiedlich starker Gewichtung eingehen zu lassen.

## 2.4. Dimensionsoptimierung

Im Rahmen einer Dimensionsoptimierung werden geometrische Größen eines bereits vorhandenen Entwurfs variiert, um das Optimum der Zielfunktion zu erreichen. Die Variation der Größen beeinflusst maßgeblich die Steifigkeitsmatrix  $\bar{K}$  der Struktur. Die über Gleichung (3) ermittelten Reaktionen auf äußere Belastungen können dabei sowohl als Zielgröße oder auch Restriktionen dienen (Altair [7]).

## 3. DIE FAN RETAINER DISC AM TRIEBWERK

Der erste Teil der topologischen Untersuchung besteht darin, aus der Aufgabe des Bauteils und seiner Montagesituation am Triebwerk, *Lasteinleistungsbereiche* zu identifizieren. Anschließend erfolgt die Zusammenstellung der zu untersuchenden Lastfälle sowie die Ableitung von *Lastannahmen* für die jeweiligen Lasteinleistungsbereiche.

### 3.1. Aufgabe und Montage, aktueller Entwurf

Die Fan Retainer Disc befindet sich im Bereich des Triebwerkseinlaufs. Sie dient als axialer Rückhalt der Fanschaufeln, sowie zur Befestigung des Nasenkonus an der Fanscheibe. Bild 2 zeigt die Position am Triebwerk.

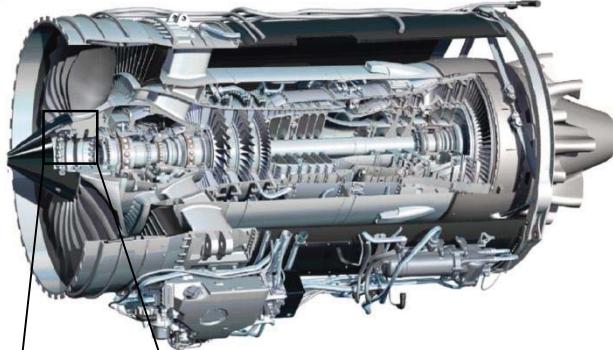


BILD 2. Strahltriebwerk BR725, Schnittansicht

Der aktuelle Entwurf der Fan Retainer Disc ist auf die Verwendung metallischer Werkstoffe abgestimmt. Bild 3 zeigt eine Gesamtansicht des aktuellen T-förmigen Entwurfs.

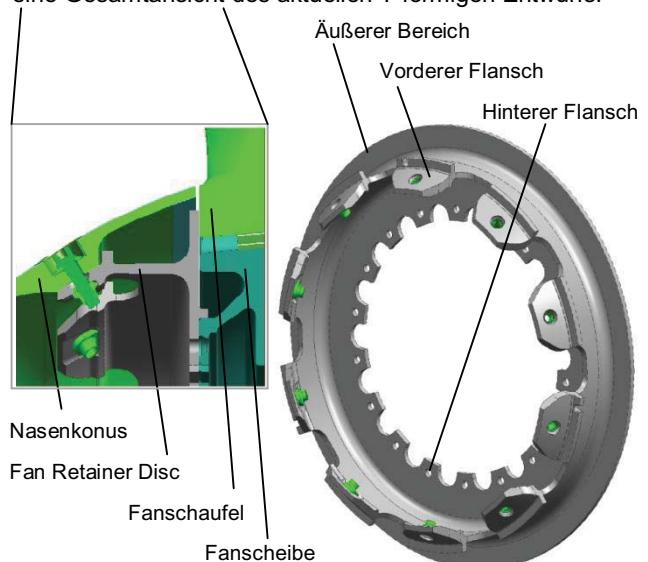


BILD 3. Montagesituation, Fan Retainer Disc  
Links: Schnittansicht, rechts: Gesamtansicht

### 3.2. Lastfälle und abgeleitete Lastannahmen

Folgende Lastfälle müssen für die Fan Retainer Disc betrachtet werden.

#### 1) Flugzyklus

Ein Flugzyklus besteht aus allen dazugehörigen Betriebszuständen des Triebwerks. Die höchsten Lasten werden hier durch Zentrifugalkräfte aufgrund der Rotation der Niederdruckwelle verursacht.

#### 2) Vogelschlag, groß / mittel / klein

Kollidiert ein Vogel mit Fanschaufeln, führt dies zu signifikanten Schäden aufgrund hoher impulsartiger Lasten in der Struktur sowie aerodynamischen Instabilitäten, wie Strömungsabriß (stall) und damit Rückströmen der Luft. Schnittkräfte und Rückströmung verursachen Kräfte der Fanschaufelfüße gegen den äußeren Bereich der Fan Retainer Disc.

Kollidiert der Vogel mit dem Nasenkonus, verursacht dies hohe Kräfte und Momente an den Verbindungspunkten mit der Fan Retainer Disc.

#### 3) Verlust einer Fanschaufel

Bei Verlust einer Fanschaufel kommt es zu hohen Beschleunigungen. Der Nasenkonus wird radial ausgelenkt.

Für die Lastfälle 1 bis 3 müssen nun anhand der Montagesituation Lastannahmen für die Fan Retainer Disc abgeleitet werden.

## 4. STRUKTUROPTIMIERUNG DER FAN RETAINER DISC

Nach Identifizierung von Lasteinleitungsbereichen und der Festlegung von Lastannahmen erfolgt nun die Strukturowptimierung als nächster Teil der topologischen Untersuchung.

Es soll zunächst die grundlegende Form der Fan Retainer Disc innerhalb des Bauraums ermittelt werden. Zur optimalen Materialausnutzung und damit zur Minimierung des Bauteilgewichts, sollte sich diese Form an Lastpfaden orientieren. Die Abbildung der Lastpfade kann durch eine *Topologieoptimierung* erfolgen. Sie stellt *Schritt 1* der Strukturowptimierung der Fan Retainer Disc dar.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Topologieoptimierung erfolgt die Ableitung eines Entwurfs. Unter Beachtung möglicher Fertigungstechniken und Kosten wird dieser als Faserverbundkonstruktion ausgeführt. Die richtungsabhängigen Materialeigenschaften der Faserverbundwerkstoffe sollten zur optimalen Materialausnutzung den wirkenden Lasten angepasst werden. Eine Anpassung richtungsabhängiger Materialeigenschaften an wirkende Lasten kann durch eine *Dimensionsoptimierung* erfolgen. Sie stellt *Schritt 2* der Strukturowptimierung der Fan Retainer Disc dar.

### 4.1. Schritt 1: Topologieoptimierung

Ziel der Topologieoptimierung ist die Minimierung der Nachgiebigkeit. Über die Dichtewerte der Elemente im Bauraum werden die Lastpfade identifiziert.

#### 4.1.1. Modellbildung und Lastannahmen

Der zur Verfügung stehenden Bauraum wird für die Topologieoptimierung als FE-Modell abgebildet. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wird die Symmetrie der

Fan Retainer Disc ausgenutzt. Ein 90° Ausschnitt genügt, um alle Elemente der Konstruktion abzubilden. Der Nasenkonus, eine Faserverbundkonstruktion, wurde in das Modell integriert um, dessen komplexes Verhalten unter Last bestmöglich zu simulieren. Eine Darstellung des FE-Modells findet sich in Bild 4.

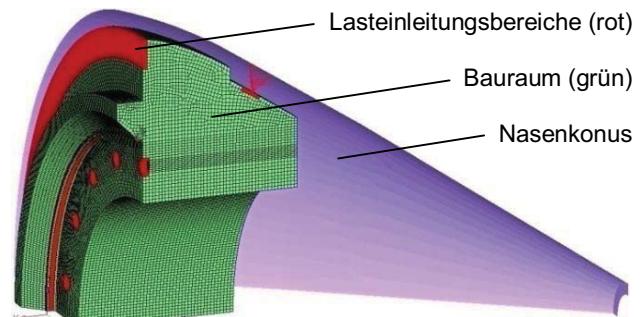


BILD 4. FE-Modell des Bauraums inkl. Nasenkonus

Wirkende Lasten müssen an den entsprechenden Lasteinleitungsbereichen rotationssymmetrisch aufgebracht werden. Der genaue Wert einer Last hat keinen Einfluss auf den Lastpfad. Art, Ort, Richtung und Verhältnis zueinander müssen der Realität entsprechen.

Die Topologieoptimierung erfolgt auf Grundlage der in Kapitel 3 getroffenen Lastannahmen.

#### 4.1.2. Ergebnisse der Topologieoptimierung

Die Topologieoptimierung wurde zunächst für alle Lastannahmen getrennt durchgeführt. So kann deren Einfluss auf das Ergebnis der Lastkombination betrachtet werden. Bild 5 zeigt die Lastpfade einzelner Lastannahmen (Flansche / äußerer Bereich siehe Bild 3).

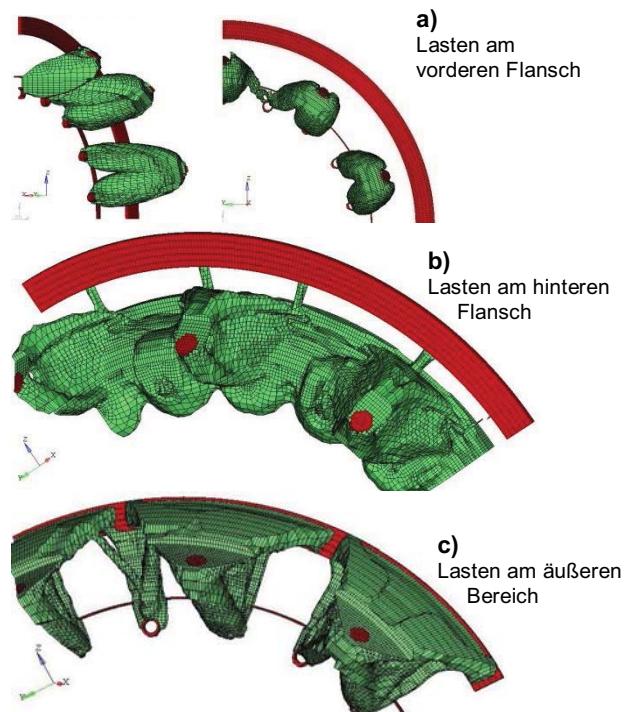


BILD 5. Lastpfade einzeln,  $p_e > 0,25$

Nach getrennter Betrachtung der Lastannahmen erfolgt schließlich deren Kombination nach Gleichung 8. Die Bilder 6 bis 8 zeigen Ansichten der Lastpfade für die Kombination der Lastannahmen.

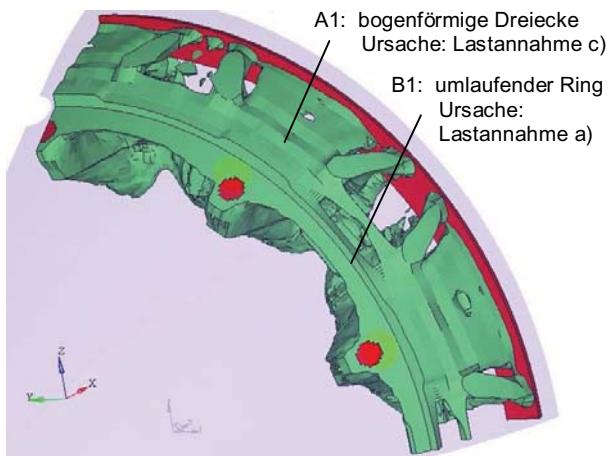


BILD 6. Kombination der Lastannahmen, Ansicht oben,  $p_e > 0,25$

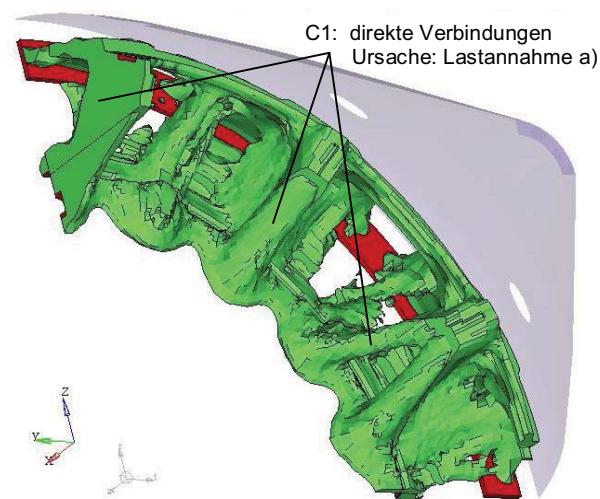


BILD 7. Kombination der Lastannahmen, Ansicht unten,  $p_e > 0,25$

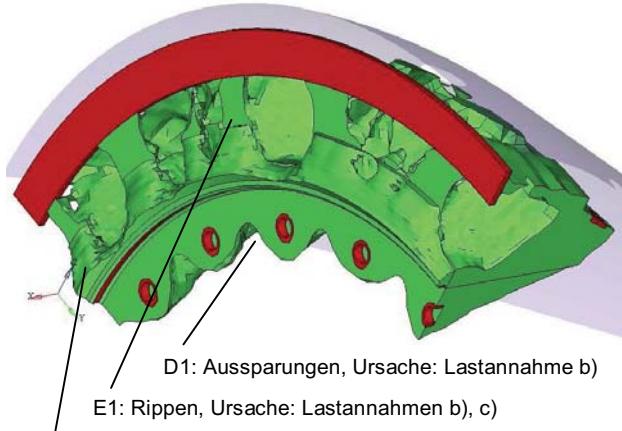


BILD 8. Kombination der Lastannahmen, Ansicht hinten,  $p_e > 0,25$

Die Ergebnisse der Topologieoptimierung können Grundlage sein für Konstruktionen auf Basis metallischer Werkstoffe oder auch Faserverbundwerkstoffe.

#### 4.1.3. Ableitung eines Entwurfs

Die abgebildeten Lastpfade, dargestellt als konstruktive Elemente A1 bis E1 in Bild 6 bis 8, müssen nun in einer Faserverbundkonstruktion umgesetzt werden. In Zusammenarbeit mit der EAST-4D Carbon Technology GmbH, wurden dazu folgende fertigungstechnische Festlegungen getroffen:

- Fertigung erfolgt auf Basis eines Fasergewebes
- Gewebelagen werden trocken drapiert
- Infiltration einer duroplastischen Matrix erfolgt nach dem VARTM Verfahren (siehe Kapitel 5)

Bild 9. zeigt eine Schnittdarstellungen des Entwurfs.

Neue Grundform:  
S-Förmig, bestehend aus:

- A1: bogenförmige Dreiecke
- C1: direkte Verbindungen

Verbindung zur Fanscheibe:

- F1: Absatz
- Bolzen-Verbindung

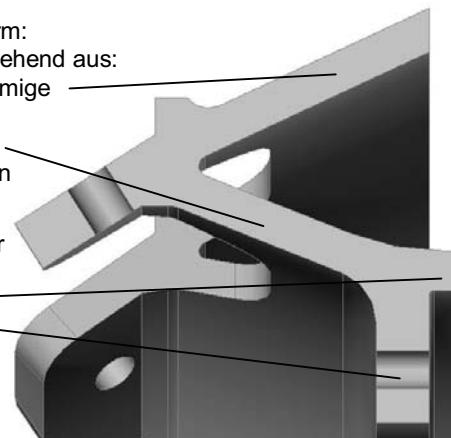


BILD 9. Faserverbundentwurf, Fan Retainer Disc, Schnittansicht

Die lasttragende Grundform, bestehend aus A1, C1 und F1 in Bild 9, ist S-Förmig ausgeführt. Wirkende Lasten werden direkt von Lasteinleitungsbereichen zu Verbindungspunkten durch das Bauteil geleitet.

Nicht alle konstruktiven Elemente der Bilder 6 bis 8 werden im Entwurf umgesetzt. Bild 10 zeigt den Entwurf in der Gesamtansicht.

A1: bogenförmige Dreiecke

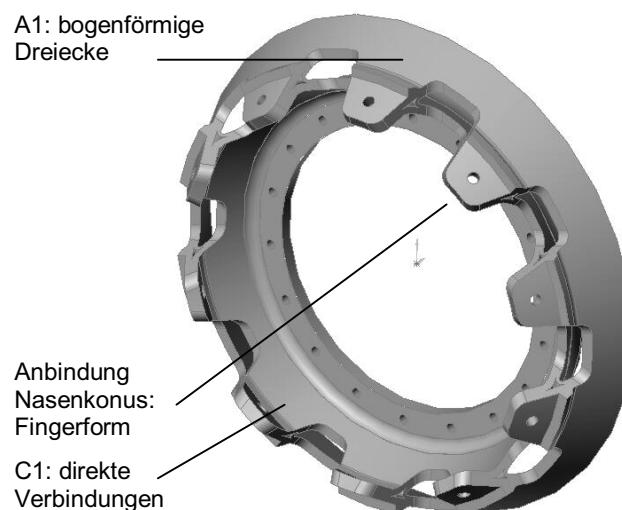


BILD 10. Faserverbundentwurf, Fan Retainer Disc, Gesamtansicht

Die Aussparungen D1 sind für eine Faserverbundkonstruktion nicht sinnvoll. Sie müssten ausgespannt werden, was ein Durchtrennen von Fasern zur Folge hätte.

Auch die Rippen E1 werden im Entwurf nicht umgesetzt. Deren Fertigung wäre Aufwändig und würde eine Erhöhung der Kosten bedeuten.

Der Umlaufende Ring B1 wird nicht umgesetzt. Die Verwendung fingerförmiger Anbindungen für den Nasenkonus wird aus dem aktuellen Entwurf (Bild 3) übernommen.

#### 4.2. Schritt 2: Dimensionsoptimierung

Als Ziel der Dimensionsoptimierung wird die Minimierung der Nachgiebigkeit definiert. Mit geringerem Gewicht als Restriktion, wird die optimale Anordnung der Wandstärken des Laminats erzwungen. Dabei dient die Wandstärke jeder Einzellage des Laminats an jedem Element als Entwurfsvariable.

Grundlage für die Dimensionsoptimierung ist der Entwurf auf Basis der Ergebnisse der Topologieoptimierung.

Aus fertigungstechnischen Gründen werden nur wenige Gewebeorientierungen verwendet. Einige werden hier mit Orientierung A und B bezeichnet. Die Optimierung der Faserorientierung erfolgt indirekt über die lokalen Wandstärken der Einzellagen.

##### 4.2.1. Modellbildung und Lastannahmen

Als FE-Modell für die Dimensionsoptimierung dient ein Schalenmodell. Es beinhaltet einen detaillierten Lagenaufbau als Materialdefinition. Die Berechnung der Spannungen und Dehnungen erfolgt nach der klassischen Laminattheorie (siehe Altair [7] und Kaw [9]).

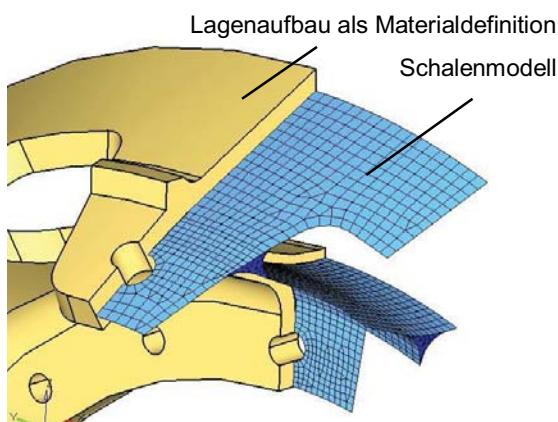


BILD 11. FE-Modell, Dimensionsoptimierung

Das FE-Modell nach Bild 11 ist als 90° Ausschnitt des Entwurfs nach Bild 9 und 10 ausgeführt. Die Vorteile sind schnellere Rechenzeiten und geringerer Speicherbedarf.

Die Dimensionsoptimierung erfolgt auf Grundlage der in Kapitel 3 getroffenen Lastannahmen.

##### 4.2.2. Ergebnisse der Dimensionsoptimierung

Ergebnisse sind die Wandstärken des Laminats sowie jeder einzelnen Lage.

Bild 12 zeigt die Wandstärken des Laminats und die daraus abgeleiteten Änderungsvorschläge.

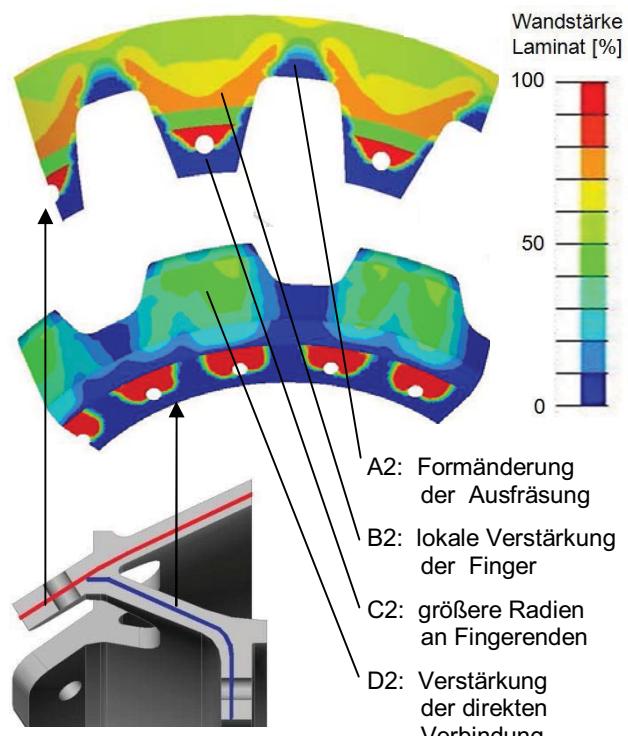


BILD 12. Wandstärke des Laminats, dimensionsoptimiert

Abbildung 13 zeigt einen Teil der Ergebnisse für die Wandstärken einzelner Lagen. Aus ihnen erfolgt die Ableitung von Änderungen im Lagenaufbau.

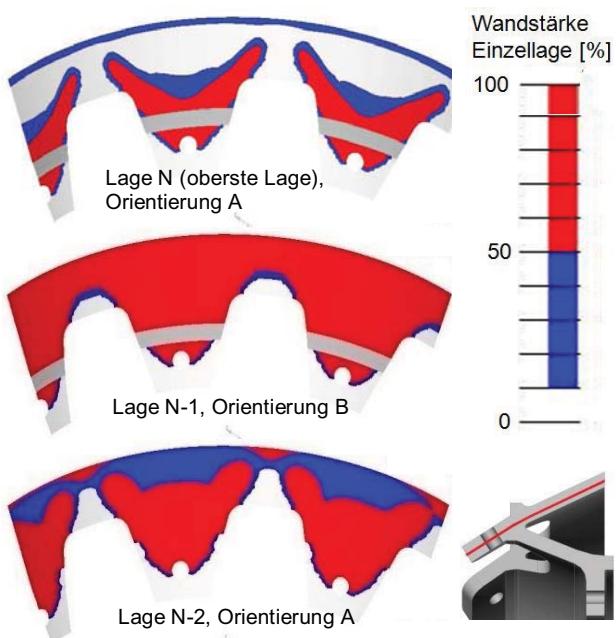


BILD 13. Wandstärken der Einzellagen

Aus Bild 13 ist zu entnehmen, dass eine lokale Verstärkung der Finger (B2, Bild 13) mit einem höheren Anteil an Lagen der Orientierung A erfolgen sollte.

##### 4.2.3. Anpassung des Entwurfs

Bild 14 zeigt die Fan Retainer Disc als Faserverbundkonstruktion. In enger Zusammenarbeit mit der EAST-4D Carbon Technology GmbH, wurde der Entwurf an die Ergebnisse der Dimensionsoptimierung angepasst.

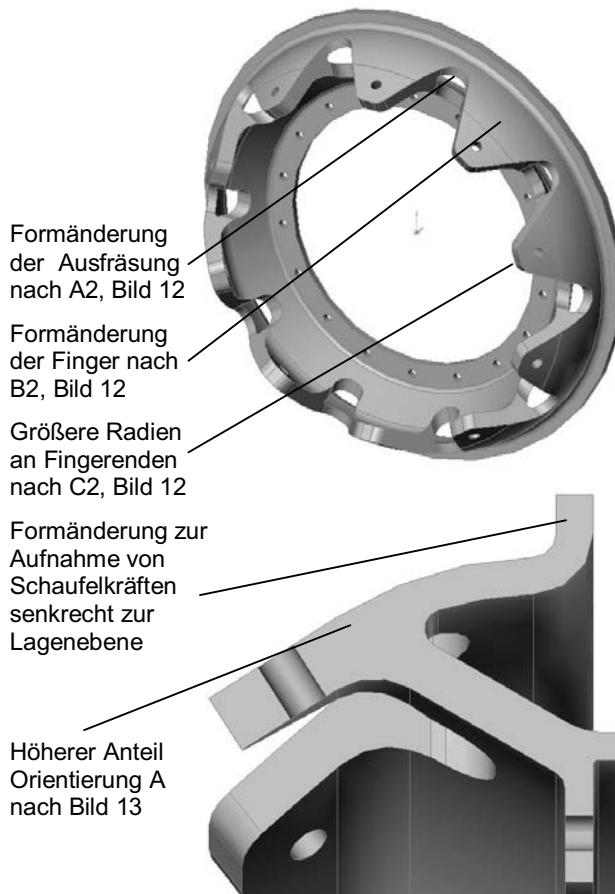


BILD 14. Fan Retainer Disc als Faserverbundkonstruktion

## 5. FERTIGUNGSTECHNIK

Die Fertigung der Fan Retainer Disc in Faserverbundbauweise erfolgt bei der EAST-4D Carbon Technology GmbH. Es wird das sogenannte *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM)* angewendet (siehe Neitzel [10] und Flemming [11]). Durch geschickte Festlegung der Prozessparameter, wird die Fertigung hochwertiger Faserverbundbauteile für den Luftfahrt Einsatz ermöglicht.

Bild 15 zeigt eine schematische Darstellung eines für das VARTM Verfahren benötigten Werkzeugs.

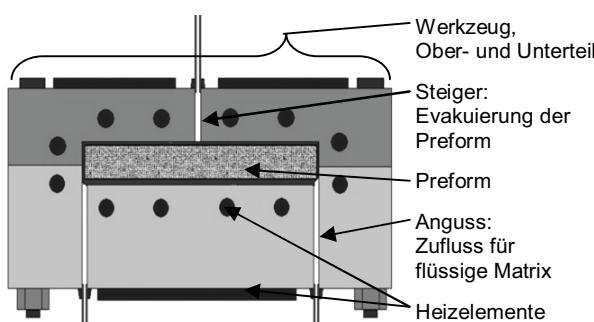


BILD 15. Prinzipskizze VARTM-Werkzeug

Bei dem VARTM-Verfahren infiltriert eine flüssige Matrix die trockenen Fasern, hier *Preform* genannt. Zur Unterstützung des Infiltrationsvorgangs, wird die Preform vor und während der Infiltration evakuiert.

Die Preform zur Fertigung der Fan Retainer Disc besteht aus einem Laminat, hergestellt aus einzeln zugeschnittenen Gewebelagen.

Nach Einlegen der Preform und Verschließen des Werkzeugs erfolgt die Evakuierung. Matrix und Preform werden erwärmt. Die Steiger werden geöffnet, die Matrix wird, beaufschlagt mit leichtem Druck, in die Preform gepresst und gleichzeitig vom Vakuum angesaugt. Fließt die Matrix in den Steiger, ist der Infiltrationsvorgang abgeschlossen. Danach, erfolgt das Härteln der Matrix unter hohem Druck und Temperatur.

Mit der optimalen Einstellung von Druck und Temperatur ermöglicht dieses Verfahren die Fertigung hochwertiger Bauteile für den Luftfahrt Einsatz.

## 6. FESTIGKEITSANALYSE

Auf Basis des Entwurfs nach Bild 14 wird nun eine Festigkeitsanalyse der Lastfälle vorgenommen. Mit Unterstützung durch das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU-Dresden erfolgt die Bewertung der Belastungssituation durch eine Betrachtung der Versagensmodi der Faserverbundwerkstoffe nach dem CUNTZE-Kriterium.

Das CUNTZE-Kriterium ist eine auf Spannungs invarianten basierende Berechnung von Anstrengungen für die verschiedenen Versagensmodi von Faser-Matrix Verbunden. Detaillierte Informationen zu Grundlagen und Berechnungsvorschriften des Kriteriums finden sich in Cuntze [12].

Bild 16 zeigt die Versagensmodi eines transversal isotropen Materials mit jeweiligem Spannungszustand.

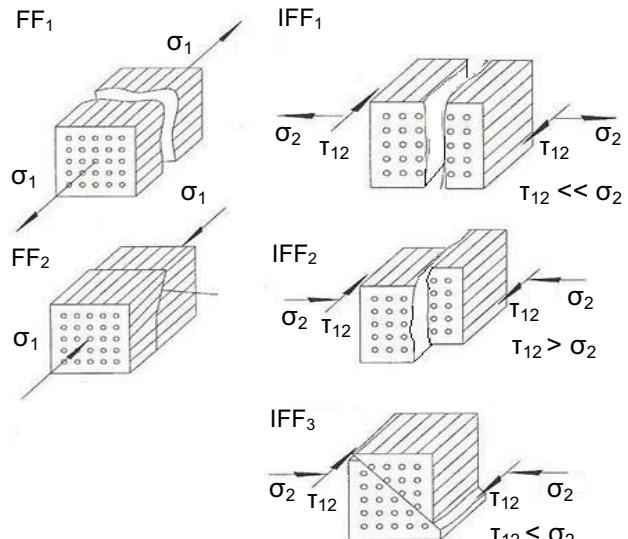


BILD 16. Versagensmodi, transversal isotropes Material

Man unterscheidet dabei zwei Arten des Faserversagens FF (fibre fracture) sowie drei Arten des Zwischenfaserbruchs IFF (inter fibre fracture).

Das CUNTZE-Kriterium bietet zudem die Möglichkeit der Berechnung einer globalen Belastung durch Kombination der Versagensmodi. Nähere Informationen finden sich in Cuntze [12].

Werkstoffsubstitution (T-Form, Bild 3):  
großflächig  
Überlastet

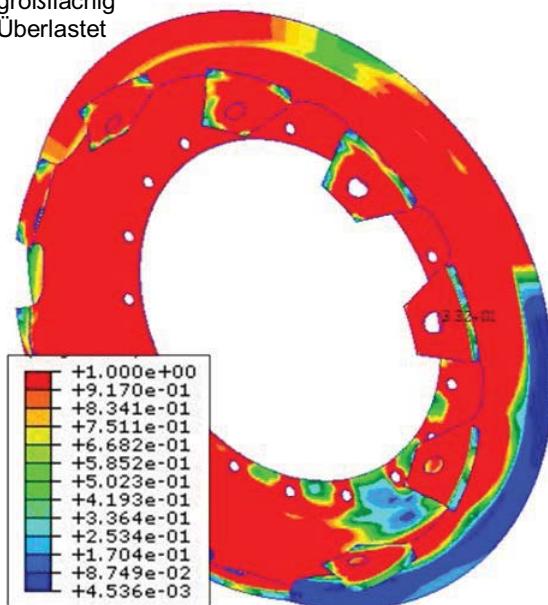


BILD 17. Globale Belastung nach dem CUNTZE-Kriterium,  
links: Werkstoffsubstitution

Bild 17 zeigt die globale Belastung der Fan Retainer Disc nach dem CUNTZE-Kriterium als Werkstoffsubstitution und als strukturoptimierter Entwurf. Während bei der Werkstoffsubstitution großflächiges Versagen eintritt, ist der strukturoptimierte Entwurf an keiner Stelle überbeansprucht. Es zeigt sich, dass die lastpfad- und werkstoffgerechte Konstruktion den Belastungen deutlich besser standhält.

Bild 18 zeigt die Belastungen im äußeren Bereich (Bild 3) getrennt nach  $FF_{1,k}$  und  $FF_{2,k}$  bei Vogelschlag auf den Fan. Zu sehen sind die Maximalwerte aller Lagen.

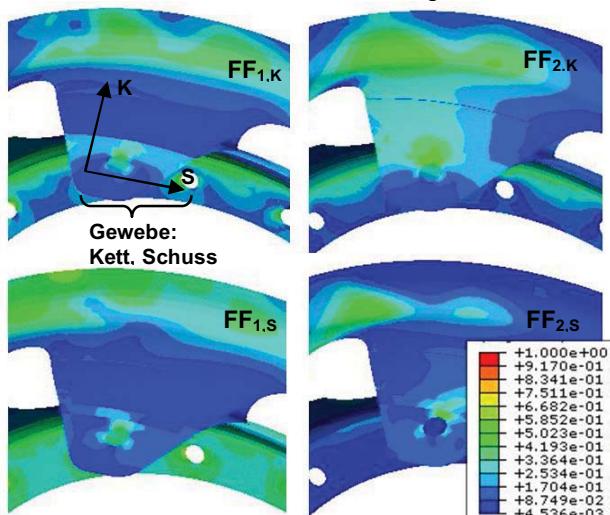
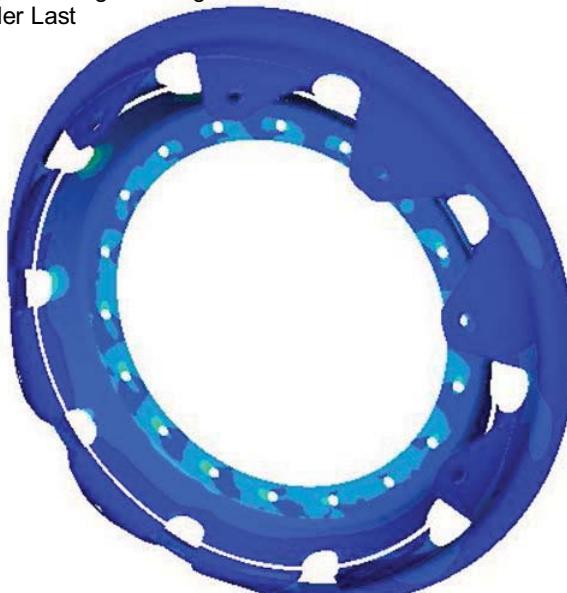


BILD 18. FF1, FF2, Lastfall: Vogelschlag, rot: Überlastung

Das Laminat ist bei Vogelschlag auf den Fan nicht überlastet. Deutlich zeigen sich Unterschiede in Ort und Höhe der Belastung, je nach Versagensmodus. Bei Zugspannungen in Schussrichtung ( $FF_{1,s}$ ) zeigen sich die höchsten Beanspruchungen.

Nach Cuntze [12] ist es möglich Ort, und Art der Belastung für jede Einzellage festzustellen. Detaillierte Aussagen zur Belastungssituation können so getroffen werden.

Strukturoptimierter Entwurf (S-Form, Bild 14):  
großflächiges Ertragen  
der Last



Lastfall: Verlust einer Fanschaufel, rot: Überlastung  
rechts: strukturoptimierter Entwurf (Bild 14)

## 7. GEWICHTSERSPARNIS

Bild 19 zeigt einen Vergleich der Masse des aktuellen Entwurfs der Fan Retainer Disc auf Basis metallischen Werkstoffs mit diversen Neukonstruktionen.

Aktueller Entwurf (T-Form, Bild 3), metallischer Werkstoff

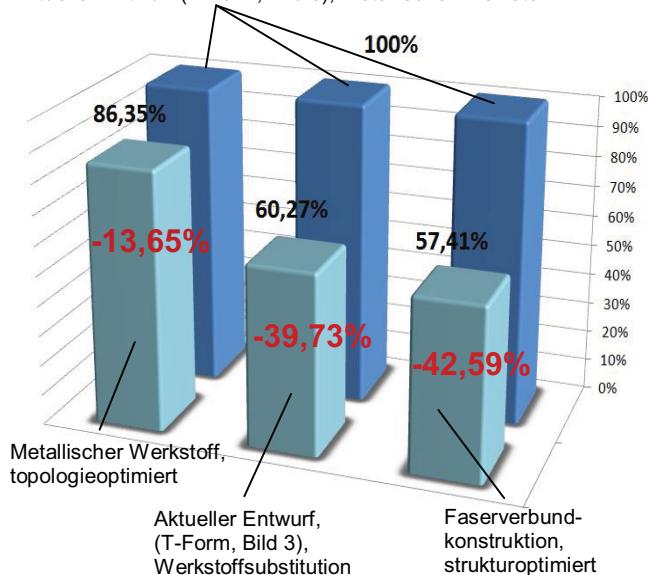


BILD 19. Fan Retainer Disc, normiertes Gewicht

Für eine Konstruktion auf Basis eines metallischen Werkstoffs bedeutet die Orientierung an den Ergebnissen der Topologieoptimierung eine Gewichtersparnis von 13,65%.

Ein Faserverbundentwurf auf Basis einer Strukturoptimierung unterschreitet das Gewicht einer reinen Werkstoffsubstitution deutlich.

Die Gewichtersparnis einer strukturoptimierten Faserverbundkonstruktion gegenüber der herkömmlichen metallischen Bauweise beträgt 42,59%.

## 8. FAZIT

Die topologische Untersuchung der Fan Retainer Disc für Strahltriebwerke der Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG führte in Zusammenarbeit mit der EAST-4D Carbon Technology GmbH zu einer Faserverbundkonstruktion mit einer Massereduzierung von 42,6%.

Die im Rahmen einer Diplomarbeit in zwei Schritten durchgeführte Strukturoptimierung erlaubt eine lastpfad- und werkstoffgerechte Ausführung der Konstruktion. Ergebnisse der Strukturoptimierung können für weitere Entwürfe, sowohl für metallische als auch faserverstärkte Werkstoffe, auch an unterschiedlichen Triebwerkstypen eingesetzt werden.

Die Vorteile der Strukturoptimierung gegenüber einer Werkstoffsubstitution konnten durch eine FE-Analyse nachgewiesen werden. Mit Unterstützung durch das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU-Dresden, erfolgte eine Betrachtung der Versagensmodi der Faserverbundwerkstoffe. Damit sind detaillierte Aussagen zur Belastungssituation möglich.

Die hohe Gewichtersparnis von 42,6% resultiert in einer erheblichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Triebwerks.

Ich bedanke mich für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung bei der Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG sowie der EAST-4D Carbon Technology GmbH und dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU-Dresden.

## 9. LITERATUR

- [1] Eschenauer H., Olhoff N., Schnell W. *Applied Structural Mechanics, Fundamentals of Elasticity, Load-bearing Structures, Structural Optimization*. Berlin : Springer, 1997
- [2] Schumacher A. *Optimierung mechanischer Strukturen, Grundlagen und industrielle Anwendung*. Berlin : Springer; 2005
- [3] Schmit L.A., Mallet R.H. *Structural Synthesis and Design Parameters: Hierarchy* Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE, 1963 Vol. 89, No. 4, 269 - 299
- [4] Bärwolff G. *Höhere Mathematik für Naturwissenschaftler und Ingenieure*, 2. Auflage. München: Elsevier Spektrum Akad. Verlag; 2006
- [5] Kress G., Keller D. *Structural Optimization*, Skript. Zürich: ETH-Zürich, Zentrum für Strukturtechnologien; 2007
- [6] Bathe K.-J. *Finite-Elemente-Methoden*, 2. Auflage. Berlin: Springer; 2002
- [7] Altair Engineering *OptiStruct User's Guide*. Altair Engineering Inc.; 2009
- [8] Bendsoe M. P., Sigmund O. *Topology Optimization*. Berlin : Springer; 2004
- [9] Kaw A. K. *Mechanics of Composite Materials*, 2. Auflage. Taylor & Francis; 2005
- [10] Neitzel M., Mitschang P. *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. Berlin: Hanser; 2004
- [11] Flemming M., Ziegmann G., Roth S. *Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*. Berlin: Springer; 1999
- [12] Cuntze R. G., Freund A. *The predictive capability of failure mode concept-based strength criteria for multidirectional laminates – Part A / B*. Composite Science and Technology; 64; 2004; 343-516