

Kombination von Metallen und faserverstärkten Kunststoffen

## Hybride Werkstoffe und Strukturen für Luftstrahlantriebe

Die Leistung von Flugtriebwerken, insbesondere dargestellt durch das Schub-Gewichts-Verhältnis und den Gesamtwirkungsgrad, nimmt stetig zu. Um jedoch einen deutlichen Sprung in der Triebwerkstechnik zu erreichen, sind neue Konstruktionsprinzipien und Werkstoffe erforderlich. Zur Erarbeitung der hierzu erforderlichen Technologien werden im DLR interdisziplinäre Projekte in enger Zusammenarbeit mit der Industrie durchgeführt.

Ein Erfolg versprechendes Konzept, das nicht nur zu einer Gewichtsreduktion, sondern auch zur Realisierbarkeit neuer Konstruktionsprinzipien verhilft, sind hybride Werkstoffe und Strukturen. Bei Komponenten für Gasturbinenverdichter sind dies vor allem Kombinationen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff mit Titanlegierungen. In Bereichen extremer Bauteilbelastung kann auch eine Verstärkung des Titans mit Keramikfasern sinnvoll sein [1].

Der Verdichter eines Flugtriebwerks ist eines der Schlüsselemente für Fortschritte in der Gasturbinentechnologie. Die spezifische Energiedichte je Stufe hat seit den ersten Gasturbinen der 1950er Jahre von 21 kJ/kg bis auf etwa 75 kJ/kg für die neueste Generation von Flugtriebwerken zugenommen. Dennoch ist eine weitere Leistungssteigerung möglich und erforderlich.

Deutliche Sprünge in der Leistungsentwicklung von Fluggasturbinen wurden bisher nur durch die Einführung von neuen Werkstoffen erzielt, wie zum Beispiel in den 1960er Jahren, als Titanlegierungen als Triebwerkswerkstoff eingesetzt wurden. Zusätzlich sind jedoch auch die Kriterien von neuen Technologien an kostengünstige Fertigung und numerische Abbildbarkeit der Struktur zu beachten. Das Hauptaugenmerk liegt auf den Verdichterschaufeln und hierbei auf den größeren Fanschaufeln, die einer hohen Fliehkraftbelastung und aerodynamischen Last ausgesetzt sind und zudem aufgrund ihrer Dimensionen die größten Leichtbaupotentiale bieten.

Im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) werden an Instituten der Disziplinen

Antriebstechnik, Aeroelastik, Bauweisen- und Konstruktionsforschung und Werkstoff-Forschung fortschrittliche Verdichterkonzepte entwickelt, die aufgrund der höheren Belastung der einzelnen Stufen nur mit neuen Werkstoffen und Bauweisen realisierbar sind.

### Anforderungen an Verdichter von Fluggasturbinen

Hohe mechanische Spannungen aufgrund hoher Blattspitzengeschwindigkeiten in Verbindung mit strengen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Widerstand gegen Erosion und Impact-Belastungen stellen die Herausforderungen für den Ingenieur dar. Zudem sollen die Triebwerkskomponenten leicht und kostengünstig in Herstellung und Wartung sein. Bisher werden Verdichterkomponenten weitgehend aus Titanlegierungen hergestellt. Lediglich einzelne Anwendungen bei Fanschaufeln wurden bisher aus faserverstärkten Kunststoffen realisiert. Hierbei musste man jedoch Einbußen bei der Blattspitzengeschwindigkeit in Kauf nehmen, um den Anforderungen hinsichtlich der Resistenz gegenüber Fremdkörpereinschlag gerecht zu werden [2].

Werden die Werkstoffanforderungen näher betrachtet, gelangt man schnell zu dem Schluss, dass es nicht den einen Werkstoff gibt, der alle Anforderungen erfüllt. Den consequenten Weg stellt die sinnvolle Kombination verschiedener Werkstoffe zu einer hybriden Struktur dar, bei der jeder der Werkstoffe entsprechend seiner Stärken eingesetzt wird und die Schwächen des anderen ausgleicht.



**Bild 1**

Das Demonstratormodell der hybriden Fanschaufel (links) besteht aus Ti-6Al-4V und einer Endfahne aus CF-PEEK. Das CAD-Modell (rechts) zeigt den Aufbau des gesamten Rotors.

### Hybride CFK-Titan-Strukturen

Aufgrund der Abschattungseffekte, die durch die enge Beschauung der Verdichterroten entstehen, unterliegt hauptsächlich der vordere Teil der Schaufeln einer Belastung durch Impact-Fälle und Erosion. Hier haben sich Titanlegierungen seit Jahrzehnten bewährt. Auf dieser Basis können Konstruktionsprinzipien entwickelt werden, die im vorderen Teil die Eigenschaften einer Titanschaufel beibehalten und den hinteren Teil der Schaufel zur Gewichtseinsparung durch kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe ersetzen.

In Bild 1 ist die Umsetzung dieses Prinzips ersichtlich. Auf der Druckseite besteht die Oberfläche noch zu rund zwei Drittel aus Titan, während die saugseitige Oberfläche nur zu einem Drittel Titan aufweist. Der restliche Schaufelteil ist durch kohlenstofffaserverstärktes Polyetheretherketon (PEEK) ersetzt. Dieser Verbundwerkstoff weist eine thermoplastische Matrix auf, die zu Vorteilen bei der Herstellung und Reparatur führt. Die einzelnen Prepreg-Lagen aus C-Faser-PEEK werden zusammen mit dem Titanteil der Schaufel in einer Negativform in einem Arbeitsgang konsolidiert und an der Fügefläche zwischen Titan und CFK mit-

einander verschweißt. Schäden, die im Betrieb innerhalb des CFK-Teils der Schaufel auftreten, können mit dem gleichen Verfahren problemlos repariert werden.

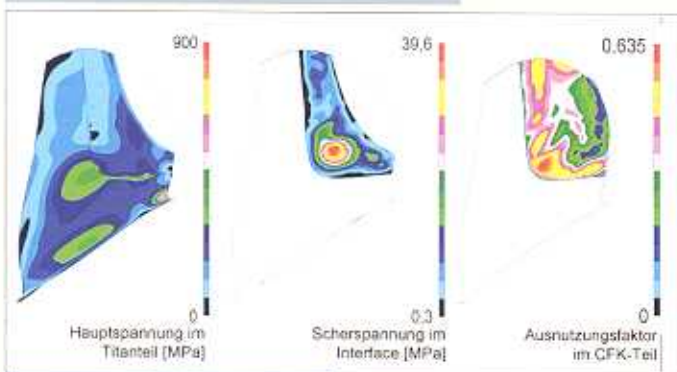
Um die Zuverlässigkeit dieses hybriden Verbundes sicher zu stellen, wurden umfangreiche Ermüdungsversuche an hybriden Flachproben durchgeführt. Sowohl die frisch her-

### Autoren

Dipl.-Ing. Frank Kocian  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter und  
Projektleiter, Institut für Bauweisen-  
und Konstruktionsforschung, DLR  
Stuttgart; Tel. 0711/6862-664  
frank.kocian@dlr.de

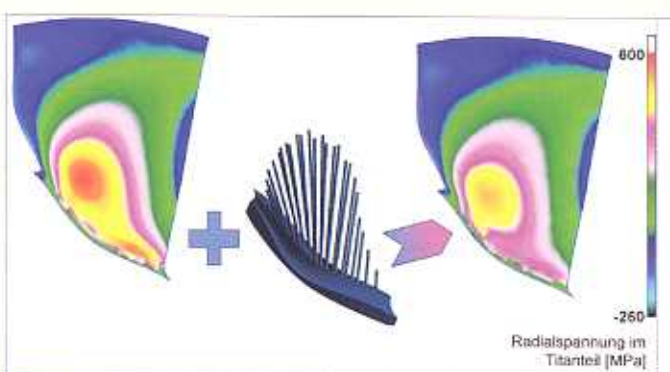
Dr.-Ing. Joachim Hausmann  
Gruppenleiter Hybride  
Werkstoffsysteme und Intermetallics  
Institut für Werkstoff-Forschung  
DLR Köln, Tel. 02203/601-2054  
joachim.hausmann@dlr.de

Prof. Dr.-Ing. Heinz Voggenreiter  
Institutsleiter, Institut für Werkstoff-  
Forschung, Köln, und Institut für  
Bauweisen- und Konstruktionsfor-  
schung, Stuttgart.  
Deutsches Zentrum für Luft- und  
Raumfahrt e.V.  
Tel. 0711/6862-444  
heinz.voggenreiter@dlr.de



**Bild 2**

Die Spannungsanalyse der hybriden Fanschaufel mittels FEM erfordert Volumenelemente für den metallischen Teil und Schalenelemente für das CFK-Laminat. Für den Übergangsbereich mussten Interface-Elemente eingeführt werden, die die Schubspannungen liefern.



**Bild 3**

Das Konzept der SiC-faserverstärkten Fanschaufel (rechts) weist lokale Verstärkungselemente (Mitte) auf, die die Maximalspannung im Titankörper um rund 100 MPa gegenüber dem unverstärkten Bauteil (links) aus Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo reduzieren.

gestellten als auch reparierte Proben weisen ausgezeichnete Festigkeitswerte der Fügung auf. Zudem war es erforderlich für die FEM-basierte Auslegung Berechnungsmethoden zu erarbeiten, die Volumenelemente für den metallischen Teil, Schalenelemente für den Verbundwerkstoffteil und Interface-Elemente für den Fügebereich berücksichtigen. Ergebnisse dieser Analysen sind in **Bild 2** wiedergegeben. Die Spannungen liegen alle auf einem moderaten Niveau. Die Fügung weist in Scherversuchen Festigkeiten von fast 60 MPa auf. Die Maximalspannung liegt in der Analyse mit weniger als 40 MPa deutlich darunter.

### Faserverstärkte Titanlegierungen

Während die zuvor dargestellte hybride Bauweise primär der Gewichtsreduktion dient, können zur Erhöhung von Festigkeit und Steifigkeit Titanlegierungen direkt mit Keramikfasern verstärkt werden. Diese Titanmatrix-Verbundwerkstoffe (engl.: titanium matrix composites – TMC) können in hoch belasteten Bauteilen lokal eingesetzt

werden, um auftretende Spannungsspitzen aufzufangen. Mittels des Verfahrens der matrixbeschichteten Fasern [3] werden Verstärkungselemente hergestellt, die durch Diffusionsschweißen oder Hochtemperatur-Vakuumlöten in das Bauteil eingebracht werden. Hierdurch lassen sich Spannungsreduktionen im Grundbauteil realisieren, wie dies in **Bild 3** dargestellt ist.

Grundsätzlich können durch das Einbringen von Siliciumkarbidfasern Steifigkeit und Festigkeit unverstärkter Titanlegierungen um bis zu 100 % gesteigert werden. Konkret bedeutet dies E-Moduln von rund 210 GPa und Zugfestigkeiten von 2200 MPa bei Raumtemperatur und einem Faservolumengehalt von 45 %. Abhängig von der als Matrix eingesetzten Titanlegierung werden Einsatztemperaturen von bis zu 550 °C erreicht.

### CFK-Aluminium-Strukturen für funktionelle Optimierung

Hybride Werkstoff-Strukturen bieten nicht nur das Potential für optimalen Leichtbau sondern ermögli-

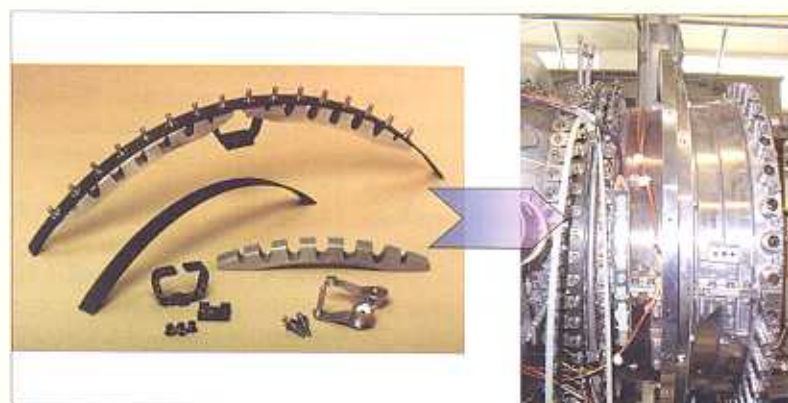
chen auch Funktionen, die mit monolithischen Werkstoffen nicht realisierbar sind. Ein Beispiel hierfür stellt der hybride Verstellring für Verdichter-Leitschaufeln dar. Bei monolithischer Ausführung in Titan und Stahl besteht das Problem in der Wärmeausdehnungs-Kompatibilität des Verstellrings mit dem Verdichtergehäuse, da ein radialer Temperaturgradient den verschiedenen Betriebszuständen vorhanden ist. Dies würde zu einer ungünstigen Spalthaltung zwischen den Auflagern des Verstellrings und dem Gehäuse führen. Durch Ausnutzung der großen Differenz des Wärmeausdehnungs-Koeffizienten von Aluminium und CFK in Kombination mit einem Bimetall ist es jedoch möglich, einen bezüglich des Ausdehnungsverhaltens optimierten Ring zu realisieren, der für unterschiedliche radiale Temperaturprofile die Spalthaltung verbessert (**Bild 4**). Dadurch können die Toleranzen enger eingestellt werden mit dem Resultat eines verbesserten Gesamtwirkungsgrads des Verdichters bzw. einer verbesserten Funktionalität. Fast nebenbei wird noch eine Gewichtsersparnis im Gesamtsystem erreicht.

Die Funktion des hybriden Uni-

son-Verstellrings wurde auf Prüfständen der Rolls-Royce Deutschland und des Institutes für Luftstrahltriebwerke der Universität Stuttgart erfolgreich nachgewiesen.

### Potentiale für hybride Bauweisen in Flugtriebwerken

Hybride Werkstoffe und Strukturen bieten das Potential widersprüchlich erscheinende Eigenschaften zu vereinen. Am Beispiel der Titan-Fanschaufel mit CFK-Endfahne wird deutlich, dass die Vorteile der klassischen Konstruktion aus Titan mit den Leichtbaueigenschaften moderner kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe kombiniert werden können. Dies ist nicht nur die Erosionsbeständigkeit des Titanteils sondern auch die bewährte Ausführung der Schaufelfußanbindung, die keine Neukonstruktion erfordert. So können in der Praxis bewährte Konstruktionslösungen beibehalten und gleichzeitig Leichtbaupotentiale genutzt werden. Dies verringert die Eintrittsschwelle für neue Technologien in Form von Substitutionsbauteilen, die aufgrund der immensen Kosten für Neuentwicklungen sonst nicht eingesetzt würden.



**Bild 4**

Dass hybride Konzepte nicht nur dem Leichtbau sondern auch der Funktionsverbesserung dienen können, zeigt die Realisierung eines Verstellrings für Statorschaufeln aus CFK und Aluminium, der auch im Triebwerkstest eingesetzt wurde.

### Literatur

- [1] Leyens, C.; Kocian, F.; Hausmann, J.; Kaysser, W. A.: *Materials and design concepts for high performance compressor components. Aerospace Science and Technology, Volume 7, Issue 3, April 2003, S. 201-210.*
- [2] Priellisch, R.J.: *Composites move into jet engine design. Aerospace America, July 1991, S. 18.*
- [3] Peters, M.; Leyens, C. (Hrsg.): *Titan und Titanlegierungen. Weinheim: Wiley-VCH.*