

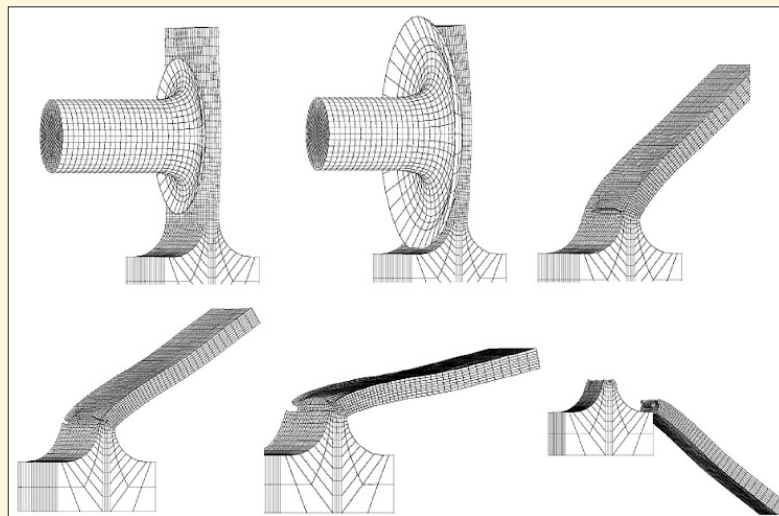
Auslegungsaspekte bei Flugtriebwerken

## Neue Werkstoffe für Verdichterschaufeln

*Rotierende Bauteile von Flugtriebwerken unterliegen hohen Anforderungen sowohl an die Werkstoffausnutzung als auch an die Zuverlässigkeit. Dies führt zu einem Spagat zwischen einer Bauteilauslegung bis an die Grenzen der Werkstofffestigkeit und der für eine zuverlässige analytische Voraussage notwendigen Datenbasis an Werkstoffkennwerten.*

Numerische Verfahren ermöglichen zwar eine sehr genaue optimierte Auslegung hoch belasteter Bauteile, entsprechend verfügbare Werkstoffdaten sind jedoch die Grundvoraussetzung. Weitere Leistungs- und Effizienzsteigerungen im Flugtriebwerksbau erfordern den Einsatz neuer Werkstoffe, die zunächst ausreichend charakterisiert werden müssen.

Siliciumkarbidfaserverstärkte Titanlegierungen sind Werkstoffe, in denen ein hohes technologisches Potential für zukünftige Flugtriebwerke gesehen wird. Sie weisen hohe spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten auf, jedoch nur in Verbindung mit einer im Vergleich zu etablierten Titanlegierungen deutlich reduzierten Duktilität. Aufgrund dieser geringeren Dehnfähigkeit muss insbesondere das Verhalten bei irregulären Schadensfällen, wie Impact-Belastungen (Vogelschlag, Abriss einer Verdichterlaufschaukel) unter hohen Dehnraten, näher untersucht werden, um faserverstärkte Titanlegierungen mit ihren positiven Eigenschaften für Verdichterlaufschaukeln in zukünftigen Triebwerksgenerationen einsetzen zu können. Die Ergebnisse der zu diesem Zweck durchgeführten Versuche werden verwendet, um Materialmodelle zu entwickeln und Bauteilauslegungen näher am Limit durchführen zu können. Bei faserverstärkten Titanlegierungen muss neben der Auswirkung der geringen Duktilität als negativer Effekt auf das Verhalten der Gesamtstruktur im Schadensfall auch der positive Effekt der erhöhten Zugfestigkeit bei sehr hohen Dehnraten berücksichtigt werden.



**Bild 1**

Auszüge aus der expliziten FEM-Simulation des Aufschlags eines Plastilin-Zylinders auf eine faserverstärkte Titanprobe mit 450 m/s.

### Neue Werkstoffe und Bauweisen für Verdichter

Eine Steigerung der Gesamtleistung von Gasturbinen für Luftfahrzeuge geht mit einer Erhöhung der aerodynamischen und mechanischen Belastung der einzelnen Stufen einher. In einer Kooperation zwischen dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und dem Triebwerkshersteller MTU Aero Engines wird im Rahmen eines Technologieprogramms am Beispiel eines dreistufigen Niederdruckverdichters untersucht, inwieweit die gleiche Verdichterleistung auch durch einen zweistufigen Verdichter mit sehr hohem Stufendruckverhältnis realisiert werden kann. Es wird offensichtlich, dass dies zu einer erhöhten Belastung der Einzelstufen führt, was auch erhöhte Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe stellt [1].

Bei der Auswahl von Werkstoffen für Flugtriebwerke sind Dichte, Festigkeit und Temperaturbeständigkeit entscheidende Eigenschaften. Bei der Entwicklung neuer Ma-

terialien geht es in der Regel um die Verbesserung von mindestens einer dieser Eigenschaften. Neue Titanlegierungen, insbesondere intermetallische Titanaluminide, erweitern die Einsatztemperatur für titanbasierte Werkstoffe. Dies wird dann schrittweise zu einer Gewichtsreduktion des Gesamttriebwerkes führen, wenn Nickelbasislegierungen durch die bis zu 50 % leichteren Titanlegierungen und Titanaluminide ersetzt werden können.

Zur Reduktion der Dichte können einzelne Bauteile auch durch kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe ersetzt werden. Dies ist jedoch erheblichen Einschränkungen bezüglich der Einsatztemperatur und Erosionsbeständigkeit unterworfen, so dass der Einsatz auf wenige Baugruppen im Flugtriebwerk beschränkt bleibt.

Leichte Festigkeitssteigerungen können bei etablierten metallischen Legierungen durch Legierungsmodifikationen, optimierte Fertigungsverfahren oder Wärmebehandlungen erreicht werden. Eine deutlich höhere

Steigerung der Festigkeit ist jedoch durch Faserverstärkungen erreichbar. Hierzu werden zum Beispiel Siliciumkarbidfasern in eine Titanlegierung als Matrix

### Autoren

Dr.-Ing. Joachim Hausmann  
Gruppenleiter Hybride Werkstoffsysteme und Intermetallics  
DLR- Institut für Werkstoffforschung  
Tel. 02203/601-2054  
joachim.hausmann@dlr.de  
Dr.-Ing. Jörg Frischbier  
Referent CAE Methoden  
Strukturmechanik, TESB  
MTU Aero Engines GmbH München  
Tel. 089/1489-4758  
joerg.frischbier@muc.mtu.de  
Prof. Dr.-Ing. Heinz Voggenreiter  
Leiter Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung, Stuttgart, und DLR-Institut Werkstoffforschung, Köln  
Tel.:0711/6862-444  
heinz.voggenreiter@dlr.de



**Bild 2**

Verstärkte und unverstärkte Titanproben nach dem Schussversuch. Die faserverstärkten Proben weisen zwar eine größere Durchbiegung auf als die unverstärkten, die Integrität bleibt jedoch erhalten.

eingebracht. Das Ergebnis ist ein Titanmatrix-Verbundwerkstoff, der äußerlich die gleichen Erosions- und Oxidationseigenschaften wie die Titanlegierung aufweist. Die Festigkeit als auch die Steifigkeit können jedoch um über 100 % gegenüber der unverstärkten Titanlegierung gesteigert werden, während die Dichte aufgrund der leichteren Fasern um ca. 10% reduziert wird. Die keramischen Fasern haben allerdings auch zur Folge, dass Duktilität und Zähigkeit des Werkstoffs deutlich reduziert werden. Dies muss bei der Auslegung von Verdichterschaufeln berücksichtigt werden.

**Auslegung von Verdichterschaufeln**

Zunächst werden Verdichterschaufeln bezüglich der statischen Belastung resultierend aus dem Fliehkraftfeld und den aerody-

namischen Lasten ausgelegt. Unter Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeiten des Werkstoffs können hierdurch Aussagen hinsichtlich der Betriebssicherheit und Lebensdauer der Schaufeln getroffen werden. Um Sicherheitsanforderungen bei irregulären Schadensereignissen, wie dem Einschlag von Fremdkörpern (foreign object damage – FOD) oder dem Verlust einzelner Schaufelblätter erfüllen zu können, sind weiterführende Festigkeitsanalysen und Werkstoffuntersuchungen erforderlich. Zunächst erfolgt eine Analyse des FOD-Verhaltens durch Simulationen mit expliziten FEM-Codes. In **Bild 1** sind Auszüge aus der analytischen FOD-Simulation an einer einseitig eingespannten Biegeprobe dargestellt, die von einem Plastilin-Zylinder getroffen wird. Diese Rechnung simuliert typische Vogelerschlagbelastungen, die beim Aufschlag eines Vogels auftreten. Bei der hier dargestellten Aufschlag-

geschwindigkeit von 450 m/s reißt die Probe aus faserverstärktem Titan ab. Dabei wurden auch die spröden Keramikfasern berücksichtigt, die in die duktile Titanmatrix eingebettet sind.

**Werkstoffprüfung**

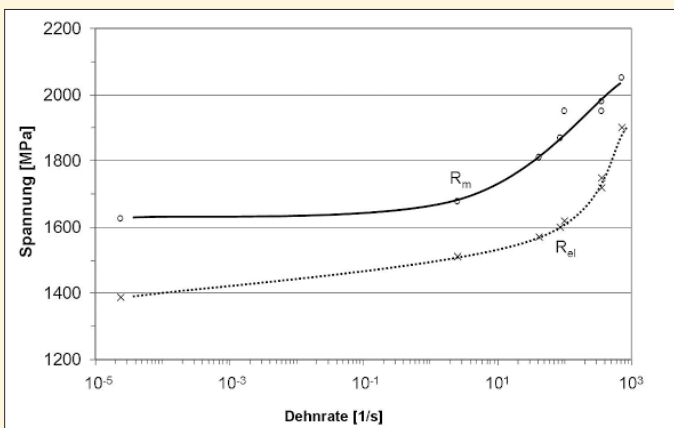
Die in der FEM-Rechnung simulierten Vorgänge wurden auch im realen Versuch dargestellt. Hierzu wurden sowohl faserverstärkte als auch unverstärkte Flachproben hergestellt und mit Plastilin-Zylindern beschossen. Bei Schussgeschwindigkeiten von über 380 m/s rissen die faserverstärkten Proben ab. Bei geringeren Belastungen trat kein Bruch jedoch teilweise eine große plastische Verformung auf (**Bild 2**). Die Proben mit Faserverstärkung weisen eine größere Durchbiegung als die unverstärkten Titanproben auf. Dies ist auf den Bruch der Fasern und den dadurch verringerten Spannungsquerschnitt zurückzuführen. Die Schussversuche und die expliziten FEM-Rechnungen wurden bei dem in das Projekt involvierten Industriepartner MTU Aero Engines durchgeführt. Künftig können diese auch mit den neu installierten Gaskanonen und Software-Tools des DLR durchgeführt werden [2].

Die beschriebenen Schussversuche stellen eine qualitative Prüfung dar, mit der die prinzipiellen Schadensmechanismen identifiziert und die Methoden der analytischen Schadenssimulation überprüft werden können. Die Vorhersagegüte der analytischen Simula-

tionen basiert dabei wesentlich auf der Verwendung von Werkstoffkennwerten zur Beschreibung der Materialduktilität (Bruchdehnung) und der Zugfestigkeit bei hohen Materialumformgeschwindigkeiten (Dehnraten). Um die Werte der dehnratenabhängigen Duktilität und Festigkeit näher quantifizieren zu können, wurden Versuche an Zugproben mit rundem Querschnitt durchgeführt. Diese Versuche wurden auf dem Rotationsschlagwerk der TU Chemnitz mit Dehnraten bis zu 740 s<sup>-1</sup> durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Bild 3** dargestellt. Es ist eine Zunahme der Festigkeit von über 25% bei hohen Dehnraten gegenüber der quasistatischen Belastung erkennbar. Bezüglich der Duktilität konnte kein signifikanter Einfluss der Dehnrate festgestellt werden. Die Festigkeitssteigerung erfolgt vollständig im elastischen Bereich. **Bild 4** zeigt die Bruchfläche einer schnell belasteten Rundprobe. Die Fasern brechen spröde und weisen einigen Pull-out (Herausziehen der Fasern aus der Matrix) auf. Die Matrix weist die Kennzeichen eines Duktilbruchs auf.

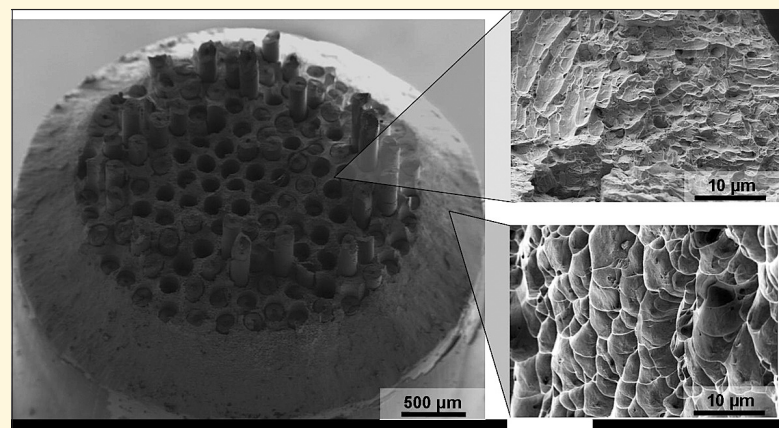
**Versuchsergebnisse und Relevanz für die Auslegung**

Die Ergebnisse der Schussversuche konnten das Modell bestätigen, bei dem angenommen wird, dass die Fasern spröde brechen und sich danach die Matrix weiter duktil verformt – entsprechend der bekannten Bruchdehnung der monolithischen Titanreststruktur. Auf-



**Bild 3**

Im Zugversuch an faserverstärkten Rundproben (25 Vol-% SiC/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo) ermittelte Dehnratenabhängigkeit der Festigkeit. Deutlicher Anstieg mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit ist erkennbar.



**Bild 4**

Bruchfläche einer bei  $\dot{\epsilon} = 357 \text{ s}^{-1}$  ( $v = 10 \text{ m/s}$ ) getesteten Probe. Maximalspannung 1950 MPa.

grund des um den Faservolumengehalt reduzierten Spannungsquerschnittes ist die bleibende Verformung jedoch größer als bei einer gleich stark belasteten Titanprobe ohne Faserverstärkung. Die maximal ertragbaren Spannungen bis zur Bruchinitialisierung der Fasern nehmen im Bereich der Faserverstärkung mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit zu. Diese Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass faserverstärkte Strukturen gezielt quantifizierbar auf große Schadensdeformationen auch weit über das lokale Versagen der spröden Fasern hinaus ausgelegt werden können, ohne dass die Struktur global versagt (z.B. kein Schaufelabriss im Falle von Vogelschlag).

Das ist eine der Grundvoraussetzungen, um Faserverstärkungen in Titanmatrix in Verdichterschaukelungen von Flugtriebwerken einsetzen zu können, und damit die eigentlichen Vorteile dieser Werkstofftechnologie in der Auslegung auf die regulären Betriebsanforderungen nutzen zu können. Im Fall der erwähnten Technologieuntersuchungen für einen 2-stufigen Niederdruckverdichter mit sehr hohem Stufendruckverhältnis würden die Abmessungen eines einzelnen Fanblattes höher ausfallen als bei konventionellen dreistufigen Konzepten. Dies führt dazu, dass die Deformationen bei Fremdkörpereinschlägen aufgrund der größeren Blattabmessungen geringer ausfal-

len und eine Konstruktion darstellbar erscheint, die die Sicherheitsanforderungen z.B. bei Vogelschlag erfüllen kann.

## Fazit

Die in Titanlegierungen eingebetteten spröden Siliciumkarbidfasern reduzieren zwar die ertragbaren schlagartigen Belastungen in irregulären Schadensfällen wie Vogelschlag im Vergleich zu unverstärkten Titanlegierungen. Lokales Versagen in den faserverstärkten Zonen führt aber nicht automatisch zu unkontrollierbarem Gewaltbruch der Gesamtstruktur, und das Schlagbeanspruchungsvermögen der Gesamtstruktur kann durch ge-

zielte Auslegung der Bauteile (Abstimmung des Verhältnisses zwischen verstärkten und unverstärkten Zonen) auf die zu erfüllenden Anforderungen abgestimmt werden.

## Literatur

- [1] Leyens, C., Kocian, F., Hausmann, J., Kaysser, W. A.: *Materials and design concepts for high performance compressor components. Aerospace Science and Technology* 7(2003), Nr.3, S.201-210.  
 [2] Pentecote, T.N.; Ritt, S.; Voggenreiter, H.: *Impact-tolerante Leichtbaustrukturen. Konstruktion* 58 (2006), Nr.9, S. IW19 - IW21.

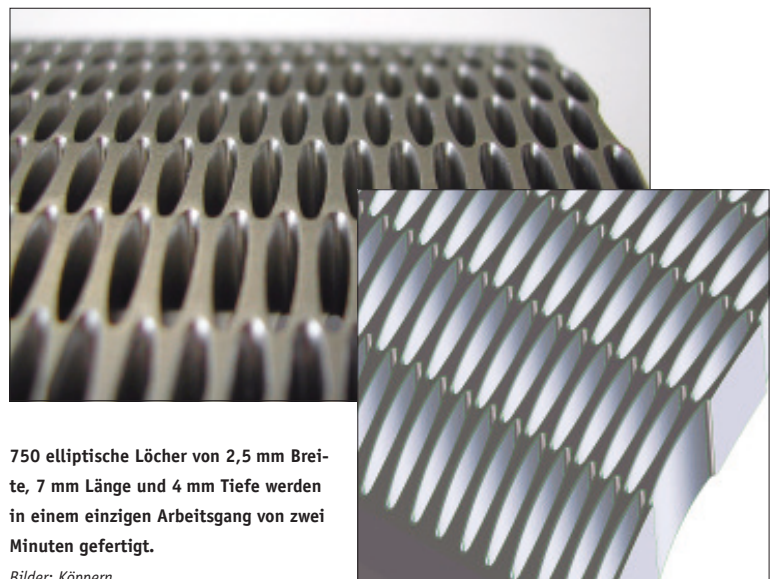
## Hunderte runde Durchbrüche in wenigen Minuten

**Nicht allein runde Durchbrüche, sondern auch hunderte von quadratischen, rechteckigen und hexagonalen Flächen oder elliptisch gekrümmten Löchern lassen sich mit dem abbildend abtragenden Fertigungsverfahren ECM (electrochemical machining) in kürzester Zeit herstellen.**

Das abbildend abtragende Fertigungsverfahren ECM ist nach Angabe nachweislich kostengünstiger als eine Erodier- oder Fräsbearbeitung. Zudem können die Löcher auch schräg zur Oberfläche eingebracht werden, was bei spanender Fertigung durch das Verlaufen der Werkzeuge immer zu Problemen führt. Anders als beim Erodieren wird jedoch kein Lichtbogen für den Abtrag benötigt. Es gibt auch keinerlei Werkzeugverschleiß. Durch die werkstoffschonende Bearbeitung entstehen weder Grat noch Spannungen und Oberflächenveränderungen wie Aufhärtungen oder die so genannten Recast Layer. So lassen sich mit ECM tausendfach Senkungen mit identischen Geometrien und Eigenschaften herstellen.

Im konkreten Fall wurden bei der Hattinger Köppern GmbH+Co. KG 750 elliptische Löcher von 2,5 mm Breite, 7 mm Länge und 4 mm Tiefe in einem einzigen Arbeitsgang von zwei Minuten Dauer gefertigt. Loch- und Oberflächenstrukturen dieser Art sind bei Komponenten für die Luftfahrt- und Kraftwerkstechnik verbreitet. Als Werkstoffe werden jeweils schwer zerspanbare Stähle und Sonderlegierungen auf Basis von Nickel eingesetzt. Die Oberflächenqualität betrug bei vorliegendem Werkstück  $R_a = 0,8$ , die Fertigungstoleranz  $\pm 0,1$  mm. Der Stundensatz der ECM-Anlage lag bei 210 Euro. Die erreichte Netto-Bearbeitungszeit von 2 min zugrunde gelegt, kostete jede Senkung – jeweils 750 Löcher – lediglich 7 Euro respektive 1 Cent je Loch.

Bei dem ECM-Verfahren liegen Werkzeug und Werkstück als Elektroden hier am positiven und negativen Pol einer Gleichstromquelle mit 8 bis 20 V. Tool und Teil haben zwischen 0,05 und 2 mm Abstand. Durch diesen Spalt strömt eine wässrige Elektrolytlösung. Wird das Werkzeug verfahren – üblich sind Vorschübe von 0,5 bis 10 mm/min – löst der im Bearbeitungsspalt ablaufende elektrochemische Prozess den Werkstoff örtlich auf und das Teil nimmt die Positivform des Werkzeugs an. Das Oberflächenge-



750 elliptische Löcher von 2,5 mm Breite, 7 mm Länge und 4 mm Tiefe werden in einem einzigen Arbeitsgang von zwei Minuten gefertigt.

Bilder: Köppern

füge des Werkstücks bleibt dabei unbeeinflusst. Maximale Prozesstemperatur ist 80 °C. Die Maschinenfabrik Köppern GmbH+Co. KG in Hattingen liefert seit 1965 vom Roh- bis zum Fertigteil komplett ECM-bearbeitete Werkstücke. Das Unternehmen verfügt über moderne ECM-Senkanlagen, auf denen Teile mit Einzelgewichten zwischen 20 g bis 4000 kg gefertigt werden. Zu den Kunden gehören Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau, aus der Gasturbinen- und Luftfahrtindustrie sowie deren Zulieferern. ECM ist insbesondere bei exotischen Werkstoffen sowie hohen Anforderungen an Rissfreiheit und Oberflächengüte anderen Bearbeitungsverfahren nach Angabe überlegen.

Maschinenfabrik Köppern GmbH+Co. KG  
 45525 Hattingen  
 Tel. 02324/207-264, [www.koeppern.de](http://www.koeppern.de)