

BETRIEBSFESTIGKEIT VON LEICHTBAU- VERDICHTERSCHAUFELN AUS CFK

Dipl.-Ing. Siegfried Sikorski, Dr. Jörg Frischbier

MTU Aero Engines GmbH & Co. KG

Zusammenfassung: Leichtbau Verdichterbeschaufelungen aus CFK (Carbon Faser verstärkter Kunststoff) sind bei technologisch fortschrittlichen Flugtriebwerken in Serie eingeführt worden. Die Bewertung der Betriebsfestigkeit erfolgt anhand eines Goodman Diagramms. Dazu wurden Untersuchungen an verschiedenen CFK – Verbundwerkstoffen mit hohen Biegeelastizitätsfrequenzen um 500 Hz durchgeführt. Untersucht wurden rein unidirektionale Faseraufbauten und „quasi-isotrope“ Faseraufbauten mit unterschiedlichem Faservolumenanteil und unterschiedlichen Matrixharzen. Die Versuche wurden mit Ergebnissen aus dem Verdichterbetrieb und an Bauteilen verifiziert.

Stichwörter: Verdichterschaufeln, CFK, Ermüdung, Goodman Diagramm

OPERATIONAL STRENGTH OF LIGHT-WEIGHT COMPRESSOR BLADES IN CFRP

Abstract: Light-weight compressor blades in CFRP (Carbon fibre reinforced plastic) are now being used in technologically advanced production engines. Their operational strength is assessed on the basis of a Goodman diagram. For the purpose, a number of CFRP composite materials was subjected to tests at high vibratory bending frequencies of about 500 Hz. The investigations included purely unidirectional laminates and “quasi-isotropic” laminates featuring different fibre volume fractions and matrix resins. The investigation results were then verified by comparing them with compressor operating data and the results of CFRP blade tests.

Keywords: Compressor Blades, CFRP, Fatigue, Goodman Diagram

Einleitung – CFK als Werkstoff für Verdichterschaufeln

Die Verwendung von CFK als Werkstoff für Verdichterbeschaufelungen stellt die Ingenieure vor neue Herausforderungen bei der Bewertung der Bauteilfestigkeit und Lebensdauer anhand von Werkstoffdaten. CFK Werkstoffe verringern das Strukturgewicht und bieten bei optimierter Herstelltechnologie Kostenvorteile. Probleme bereiten die geringe Erosionsbeständigkeit und die im Vergleich zu Titan geringe Bruchdehnung. Die Serieneinführung von Schaufeln aus CFK beim Triebwerk GE 90 (General Electric), dem schubstärksten zivilen Triebwerk, zeigt

aber die Beherrschbarkeit dieser Probleme für bestimmte Anwendungen. Die GE 90 Triebwerke werden seit 1996 an der Boeing 777 von verschiedenen Airlines eingesetzt.

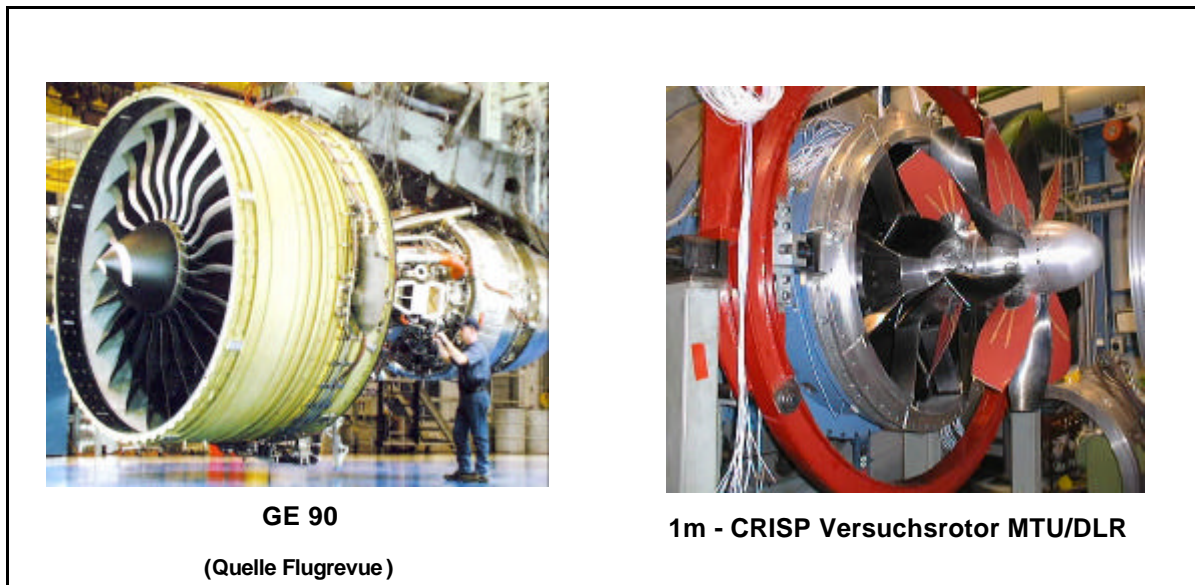


Bild 1: GE 90 Triebwerk und MTU Versuchsverdichter mit Fanschaufeln aus CFK

MTU Aero Engines hat im Rahmen der Technologie-Entwicklung Versuchsverdichter wie den 1 m - CRISP (Counter Rotating Integrated Shrouded Propfan) aufgebaut und erprobt /3/. Für einen sicheren Betrieb über eine lange Lebensdauer sind zuverlässige Vorhersagen über die Ermüdungsfestigkeit von Verbundwerkstoffen unter Triebwerksbedingungen notwendig.

Die Betriebslasten der Verdichterschaufeln sind einerseits durch die monotone Fliehkraftbelastung aber auch durch Schwingungen aufgrund der turbulenten Verdichterströmung gegeben. Zusätzlich durchlaufen die Schaufeln während der Hoch- und Runterfahrt Resonanzfrequenzen. Dabei sind meist die Auslenkungen und Schwingbelastungen in Resonanzen der Grundmoden (Biegung und Torsion) am höchsten /1/.

Die Amplituden der Verdichterschaufeln beim Betrieb des Verdichters werden mit optischen Verfahren oder kapazitiven Coulombsonden gemessen. Anhand eines Goodman Diagramms kann bei bekannter Amplitude und berechneter statischer Belastung entschieden werden, ob die auftretenden Belastungen im gesamten Betriebsbereich des Verdichters zulässig sind und eine ausreichende Lebensdauer erwarten lassen. Im Goodman Diagramm wird auf der Ordinate die Spannung für die statische Festigkeit abgetragen und auf der Abszisse die Spannung für die Schwingfestigkeit, bei der für eine bestimmte Lastspielzahl („Dauerfestigkeit“) gerade keine strukturmechanisch relevante Schädigung auftritt. Die beiden Punkte werden durch eine Gerade verbunden. Der sichere Betrieb der Bauteile ist dann gewährleistet, wenn die dauerhaft auftretenden Betriebsspannungen im Bauteil unterhalb der Verbindungsgeraden liegen und genügend Reserven für kurzzeitige Spitzenbelastungen vorhanden sind (Bild 2).

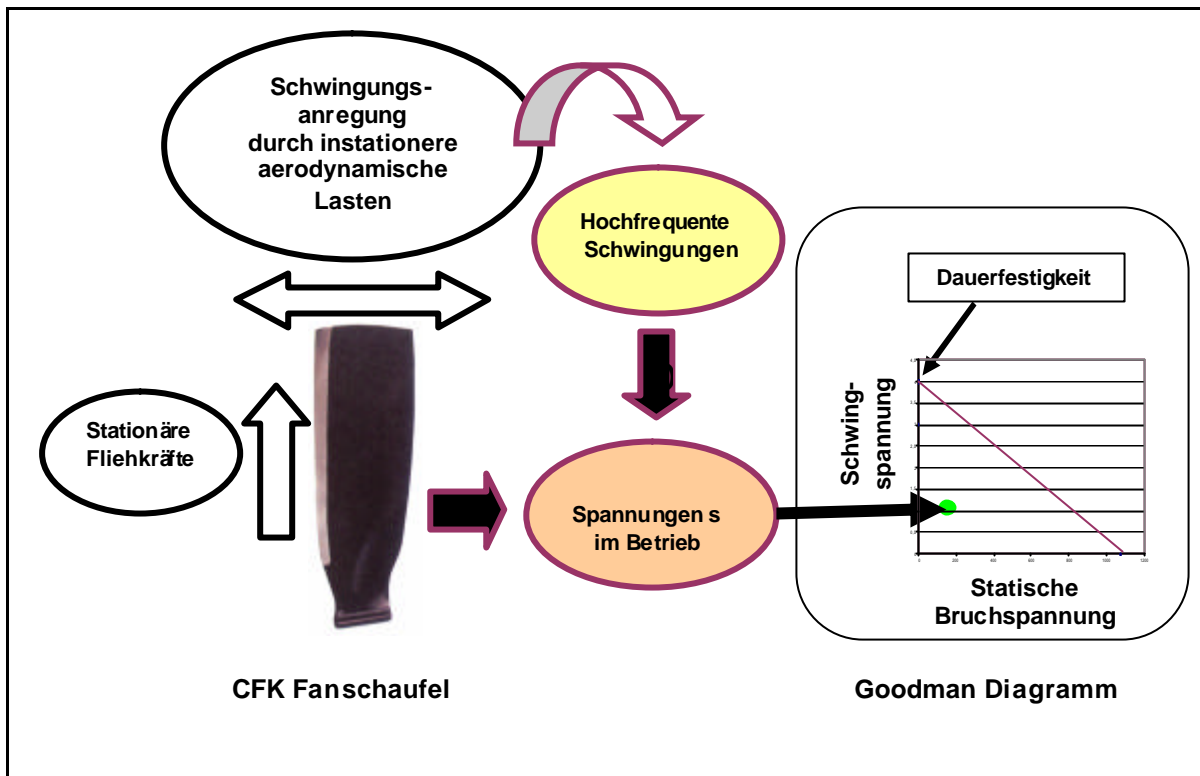


Bild 2 : Darstellung der Betriebsbelastungen im Goodman-Diagramm

Die Werte für die „dauerfest“ ertragenen Spannungen im Goodman Diagramm werden in Proben- oder Bauteilversuchen ermittelt. Die Versuche werden möglichst betriebsnah durchgeführt. Die statische Festigkeit kann z.B. in einem Schleuderversuch ermittelt werden /2/. Die Drehzahl wird dabei gesteigert, bis das Bauteil versagt. Die zulässige Grenzspannung für Ermüdung durch Schwingungen wird in einem Biegeschwingversuch bestimmt. Das Bauteil wird dazu auf einem elektrodynamischen Rüttler in der ersten Biegeeigenfrequenz zu Schwingungen angeregt. Durch Variation der Schwingungsamplitude können verschieden hohe Spannungen an der Wurzel der Schaufel eingestellt werden.

Für Schaufeln aus CFK Verbundwerkstoff müssen bei der Bewertung der Betriebsfestigkeit die Auswirkungen von verschiedenen Faktoren berücksichtigt werden, die aus dem variablen Aufbau der Verbundwerkstoffe resultieren /3/. Bei CFK Werkstoffen kann der Konstrukteur in Grenzen die Orientierung der Fasern vorgeben. Aus der Herstelltechnik ergeben sich Grenzwerte für den Volumengehalt der Fasern, die auch bei der Qualitätssicherung berücksichtigt werden müssen. Die Forderungen nach Kosteneffizienz und höheren Betriebstemperaturen erfüllt man durch die Wahl eines entsprechenden Harzsystems, das ebenfalls einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben kann.

Ermittlung von statischen Festigkeitskennwerten an Flachproben

Die Probekörper für die statischen Versuche wurden aus den Schwingprobekörpern entnommen. Für den Dreipunkt Biegeversuch nach DIN 53452 und den ILS Scherversuch nach DIN EN 2563 werden die Probekörper in den nach Norm

vorgesehen Abmessungen aus der 4 mm dicken Schwinglippe der Schwingproben herausgearbeitet. Für die Zug-Versuche wurden die Proben auf 20 mm Breite geschliffen. Die elastischen Konstanten der Materialien wurden mittels eines US-Resonanzverfahrens richtungsabhängig bestimmt. Die Biegefestigkeit wurde im 3-Punkt Biegeversuch gemessen. Die Abmessungen der Probekörper waren 80x20x4. Der Auflagerabstand betrug 60 mm und lag somit etwas unter der Norm. Es wurde darauf geachtet, dass nur Proben herangezogen wurden, die tatsächlich aufgrund von Biegung im Mode I gebrochen sind. Als Biegespannung wurde die Spannung bezeichnet, bei der ein erstes Versagen im Material auftritt. Das erste Maximum der Spannungslinie im Spannungs-Dehnung Diagramm zeigt dies an/6/.

Untersuchungen an Flachproben zur Ermüdung durch hochfrequente Schwingbelastung

Die Eigenfrequenzen typischer CFK Schaufeln in der ersten Biegeschwingung liegen im Bereich von bis zu 500 Hz. Bisherige Ermüdungsuntersuchungen an CFK sind fast ausschließlich mit niedrigen Frequenzen zwischen 1-20 Hz mit Zug und / oder Druckbelastung durchgeführt worden /6/ /7/. Werkstoffdaten für Biege-Schwingbelastung bei etwa 500 Hz Belastungsfrequenz waren für CFK-erbundwerkstoffe aus der Literatur nicht verfügbar. Bei der Ermittlung der Grenzwerte wurden keine Versuche in DIN/EN oder ASTM gefunden, die realitätsnah die Belastung von Verdichterschaufeln widerspiegeln. Es wurde auch keine Definition von Grenzwerten gefunden, die das Versagen des Bauteils definieren. Für die Verdichterschaufeln wurde die Schädigung über den Frequenzabfall der Eigenfrequenz definiert.

Die Proben oder Bauteile werden dazu bei geregelter Amplitude mit der ersten Biegeeigenfrequenz angeregt. Für die Schwingfestigkeitsprüfung wurde ein elektrodynamischer Rüttler eingesetzt. Die Amplitude wurde für jede Laststufe konstant gehalten. Die Versuche wurden bis maximal 10^8 Lastwechsel durchgeführt

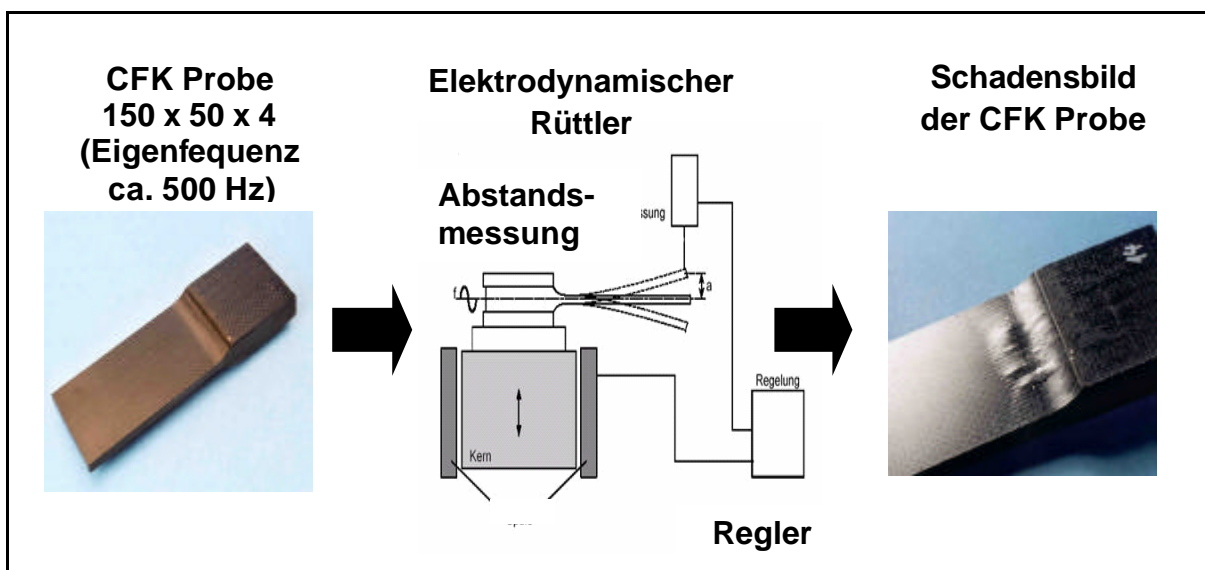


Bild 3: Schwingfestigkeitsprüfung an Proben

Die Probekörper weichen von den in Normen beschriebenen Probenformen ab (Bild 3). Eine als Rechteckquerschnitt geformte Schwinglippe geht über einen Radius in eine Aufdopplung über, die zur Einspannung der Probe dient. Mit der Aufdopplung konnten die Einspanneinflüsse auf den schwingenden Probenabschnitt reduziert werden. Das Verhältnis von 1:2 Breite (50mm) zu freier Länge der Schwinglippe (100 mm) minimierte ein vorzeitiges Versagen von freien Kanten („Free Edge Effect“). Diese Probenform ermöglichte neben den günstigen Herstellkosten eine einfache mathematische Erfassung der Spannungsverhältnisse. Die Orientierung der Fasern in der Schwinglippe wurde zwischen „unidirektional“ (alle Fasern in Längsrichtung (0°) der Probe) und „quasi – isotrop“ variiert (gleiche Anteile von Fasern in 0°, +/- 45°, 90°).

Der Frequenzverlauf ist bei Proben und Bauteile sehr ähnlich.

Ein charakteristischer kurzer Frequenzabfall zu Beginn der Belastung wird als Einschwingen mit Umordnungsvorgängen und erster Mikrorißbildung erklärt. Die Eigenfrequenz bleibt dann für eine gewisse Lastwechselzahl konstant. Eine signifikante weitere Veränderung stellt sich erst ein, wenn Wachstum der Ermüdungsrisse stattfindet (Bild 4). Dies ist im Vergleich zu Metallen aufgrund des inhomogenen Aufbaus des Faserverbundwerkstoffs kein linearer Vorgang, wie sich an dem stufenförmiger Abfall der Eigenfrequenz ablesen lässt /5/.

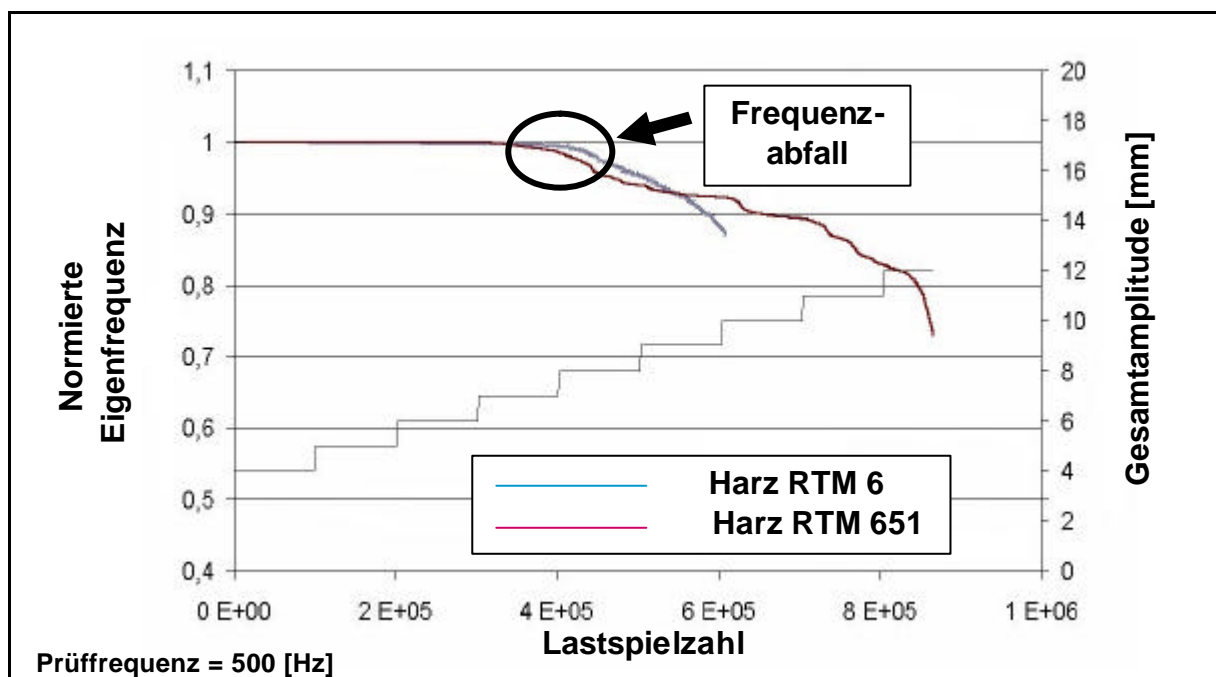


Bild 4: Frequenzabfall bei Schädigung durch Schwingermüdung

In der Zusammenfassung aller Frequenzverläufe bei verschiedenen Laststufen ist es möglich einfache Lebensdauerlinien nach Art eines Wöhlerdiagramms zu erstellen (Bild 5). Im Wöhlerdiagramm für Metalle werden lediglich zwei Linien dargestellt, die die Versagenswahrscheinlichkeit von 0% -100% eingrenzen. In dieser Art Diagramm für Verbundwerkstoffe werden die Lebensdauerlinien als Kurven gleichen Frequenzabfalls eingetragen. Der Frequenzabfall korreliert direkt mit dem Schadenausmaß, was sich in Restfestigkeitsuntersuchungen zeigen lässt. Die

Aufstellung dieser Grenzlinien macht nur Sinn bis etwa 15% Frequenzabfall. Bei höheren Werten werden nur noch wenige Lastspiele ertragen und es erfolgt eine gänzliche und schnelle Zerrüttung. Mit den gemessenen Werten der Restfestigkeit und dem Ergebnissen der mikrofraktographischen Untersuchungen kann für CFK ein Frequenzabfall bis 5 % als unbedenklich für die strukturmechanische Integrität angesehen werden. Dieser Wert scheint nicht vom Materialaufbau abhängig zu sein. Für die Erstellung der Goodman Diagramme wurde aber der bei Titan übliche Wert < 1% Frequenzabfall zugrunde gelegt, um auf der sicheren Seite zu sein.

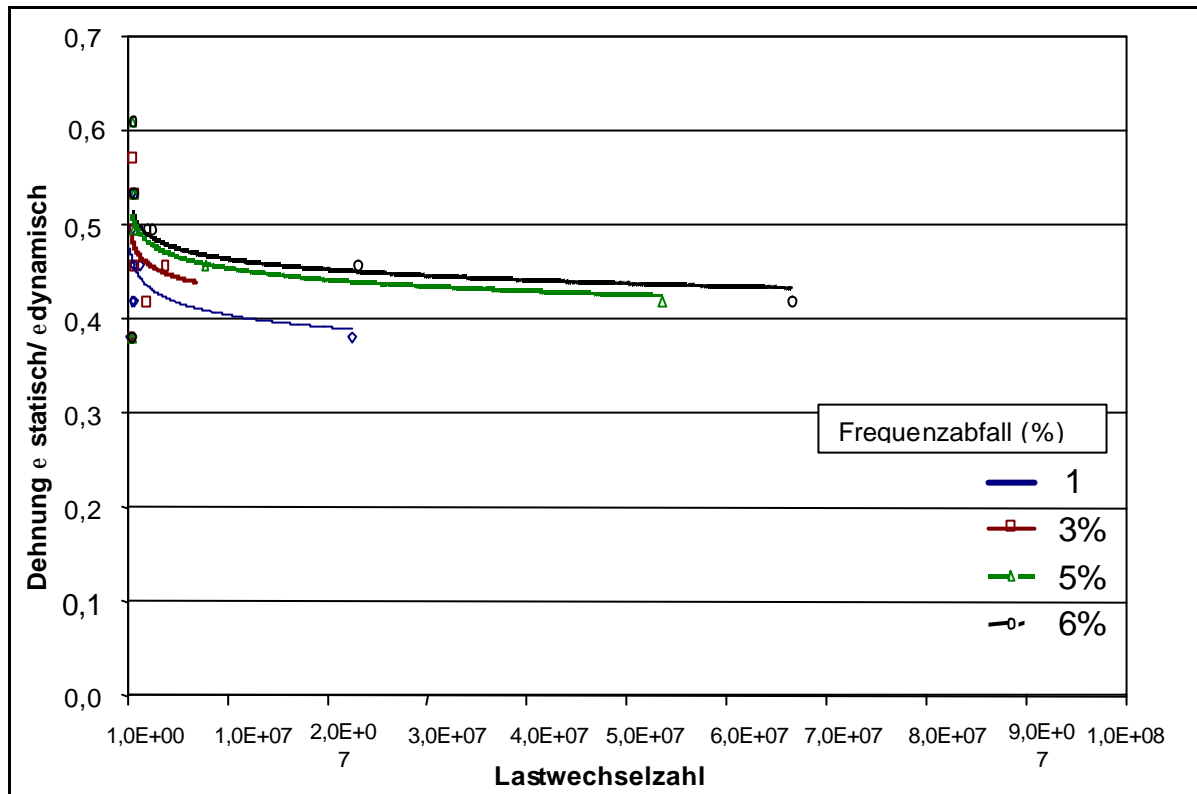


Bild 5: Grenzkurven für Frequenzabfall bei Schwingermüdung

Einflußfaktoren auf die Schwingfestigkeit

Die geometrische Form der Schaufeln ist durch eine effiziente aerodynamische Wirksamkeit in engen Grenzen vorgegeben. Damit werden die Eigenfrequenzen des Bauteils weitgehend festgelegt. Die Anwendung von CFK Verbundwerkstoff erlaubt aber durch die Wahl der Faserorientierung noch einen weiteren Freiheitsgrad bei der Abstimmung der Eigenfrequenz. Kenntnisse über die Auswirkungen der Faserorientierung auf die Ermüdungsfestigkeit sind deshalb wichtig. Die Grenzen bei der Faserorientierung stellen die „unidirektionale Faseranordnung“ und die „quasi-isotrope“ Faseranordnung dar. Die Untersuchungen (Bild 6) zeigen den Abfall der zulässigen Spannungen bei Reduzierung der Faseranteile in „0° Richtung“.

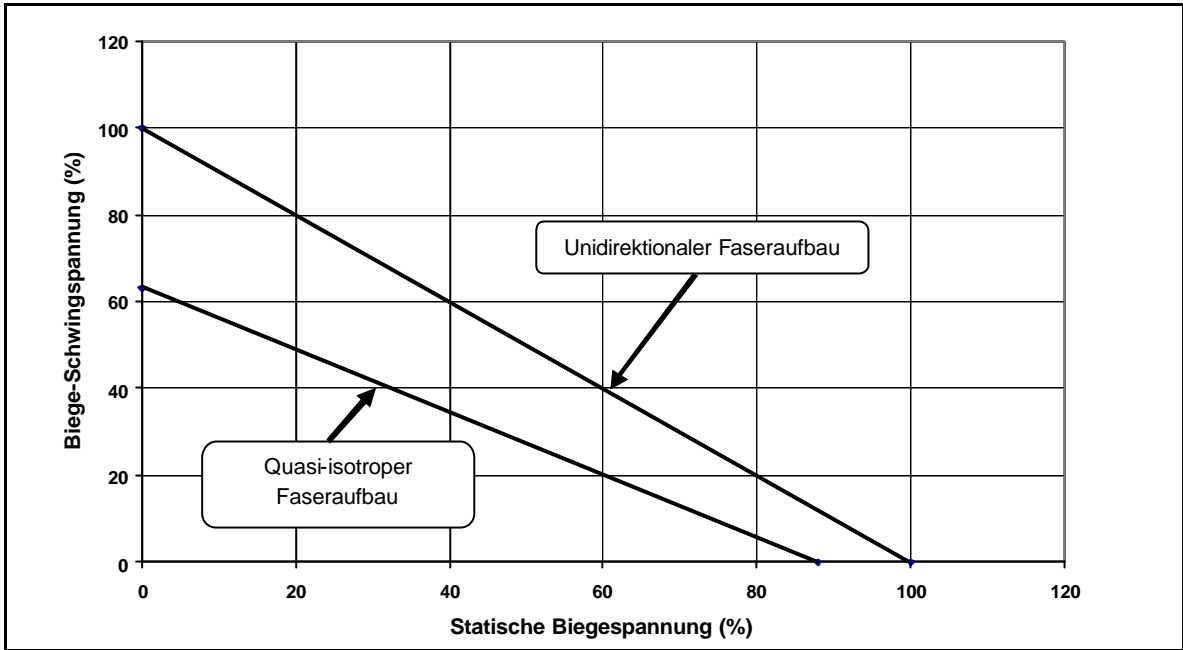


Bild 6: Auswirkung der Faserorientierung auf das Goodman Diagramm

Ein weiterer wichtiger Parameter bei CFK Bauteilen ist der Volumengehalt der Fasern im Werkstoff (Bild 7).

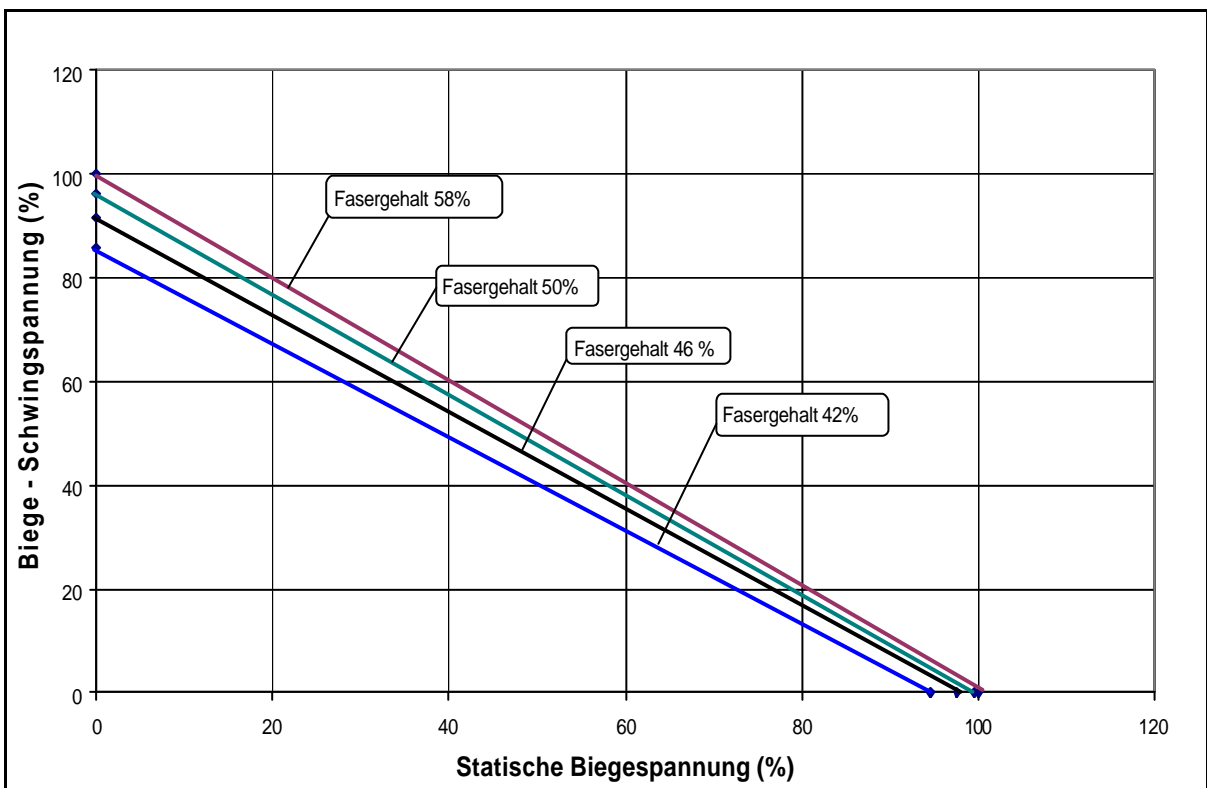


Bild 7: Auswirkung des Fasergehalts auf das Goodman Diagramm

Der Volumengehalt wird durch die Anzahl und Geometrie der Einzellagen im Bauteil gesteuert. Unterschiede zwischen 42 % und 58 % Volumenprozent sind merklich. Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass die Ermüdungsfestigkeit nicht linear mit dem Fasergehalt abfällt.

Ein dritter wichtiger Parameter im CFK Verbundwerkstoff ist das Harz. Für die CFK Schaufeln in hinteren Verdichterstufen ist die Verwendung eines Harzsystems mit höheren Anwendungstemperaturen als Epoxydharz notwendig, da die Gastemperaturen mit jeder weiteren Verdichterstufe ansteigen. Es zeigen sich merkliche Unterschiede in der statischen Festigkeit und in der Ermüdungsfestigkeit bei verschiedenen Harzen (Bild 8). In den mikrofraktographischen Nachuntersuchungen wurden bisher keine Unterschiede bei den Versagensphänomenen gefunden.

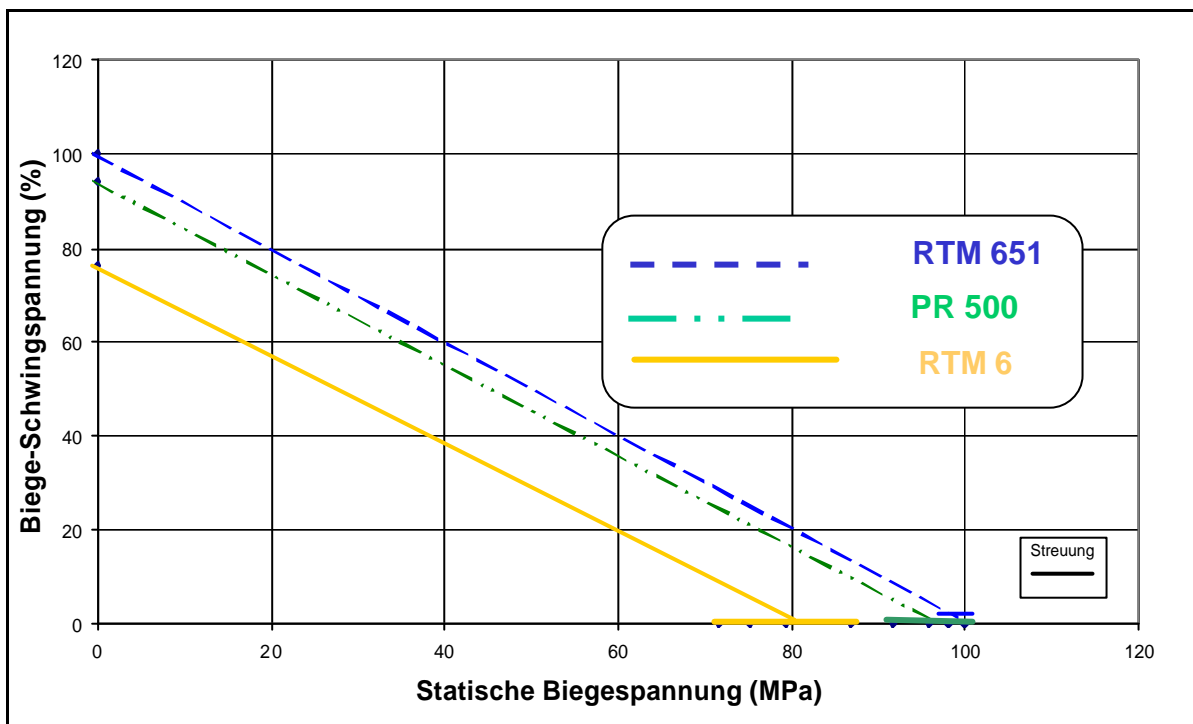


Bild 8: Auswirkung verschiedener Harze auf das Goodman Diagramm

Das Goodman Diagramm für eine CFK Verdichterschaufel

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Grundlagenuntersuchungen an CFK Flachproben beschrieben. In konkreten Entwicklungsprogrammen von CFK Beschauflungen wird darüber hinaus auch die Betriebsfestigkeit an kompletten Schaufelblättern ermittelt. Für eine CFK Verdichterschaufel wurde dazu die Bruchlast der Schaufel in einem Schleuderversuch bestimmt. Es wurden 32748 U/min erreicht. Dies entspricht dem 2,7 fachen Fliehkräften für den nominalen Betrieb bei 20000 U/min. Bei dem Schwingerermüdungstest wurden die Schaufeln in der ersten Biegefrequenz angeregt. Mit einer Amplitude von 2,5 mm wurde begonnen. In Stufen wurde die Amplitude alle 10^6 Lastwechsel durch Erhöhung der Anregungsenergie um 15 % gegenüber der Anfangsamplitude von 2,5 mm gesteigert, bis ein Frequenzabfall von 1% der Eigenfrequenz durch Ermüdung eingetreten war. Mit den

gemessenen Daten wurde ein Goodman-Diagramm erstellt (Bild 9). Der gemessene Betriebspunkt der Schaufel ist im Goodman-Diagramm zusätzlich eingetragen. Die Schaufeln wurden im Versuchsbetrieb im Verdichter erfolgreich erprobt /1//3/.

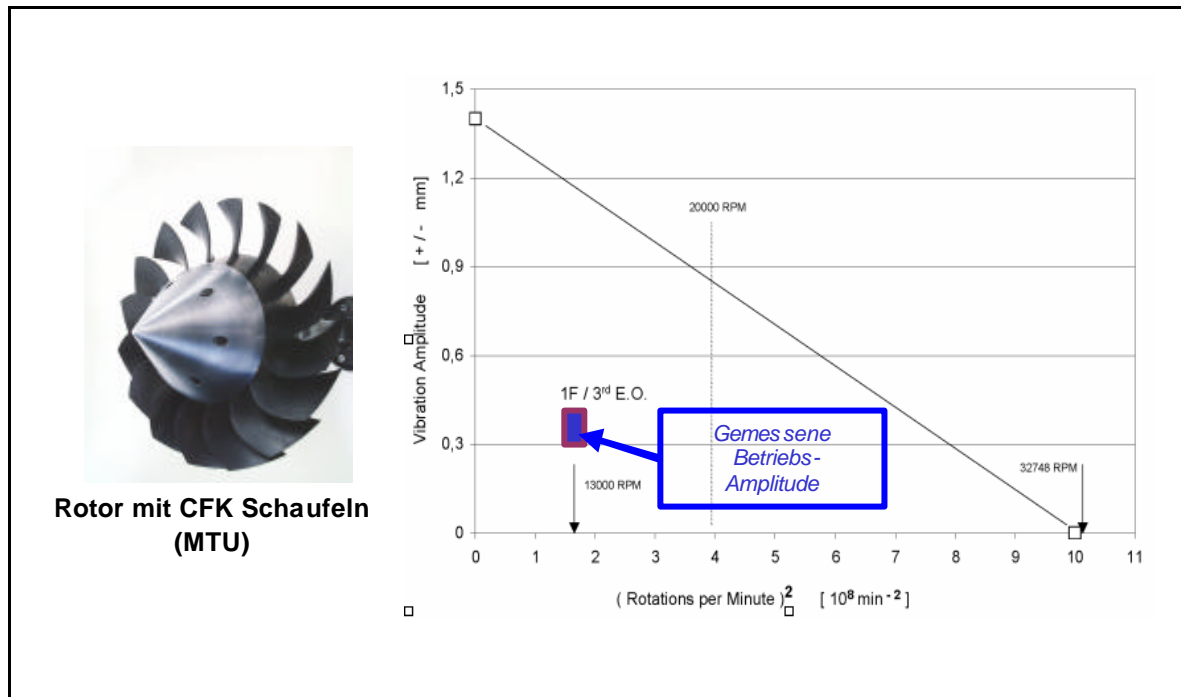


Bild 9: Goodman Diagramm einer CFK Leichtbauschaukel

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zur Ermüdung von CFK mit Biegewechselbelastung haben gezeigt, dass die Ermüdungsfestigkeit anhand des Frequenzabfalls bewertet werden kann. Eine Art „Wöhlerdiagramm“ für unterschiedliche Schädigungsgrade kann bis zu einem Abfall von 15 % der Eigenfrequenz aufgestellt werden. Der Frequenzabfall bei Belastungsbeginn muss bei der Auslegung für Resonanz-freien Betrieb mit berücksichtigt werden. Zusammen mit der statischen Festigkeit lassen sich Goodman Diagramme aufstellen. Die Einflüsse von Faserorientierung, Faservolumengehalt und Harz auf die Werkstoffdaten im Goodman Diagramm konnten beschrieben werden. Die Faserorientierung hat den erwarteten starken Einfluss. Bei Faservolumengehalten über 50% ist der Einfluss gering, nimmt aber nichtlinear mit sinkendem Fasergehalt rasch zu. Das Harz beeinflusst die Ermüdungsfestigkeit erheblich. Unterschiede bei den dabei wirksamen Versagensphänomenen im Werkstoff konnten bisher nicht gefunden werden. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine Basis für die Auslegung von CFK Leichtbauschaukeln und die Erstellung entsprechender Werkstoffspezifikationen. MTU hat CFK Verdichterschaufeln für die Technologieerprobung nach der beschriebenen Vorgehensweise ausgelegt, gefertigt und erfolgreich getestet. Der sichere Betrieb von Verdichtern mit CFK Leichtbauschaukeln kann mit den gezeigten Methoden gewährleistet werden.

Literatur

/1/ G.Schulze, D.K.Henneke, J.Frischbier, S.Sikorski,
„Development of Compressor Stator Vane in Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP)“, DGLR Jahrbuch 1994, Deutscher Luft und Raumfahrtkongress 1994, Erlangen, Germany

/2/ J:Frischbier ,S.Sikorski, “All Composite Fan Blade for Advanced Ducted Engines“, Proceedings of the Thenth International Symposium on Air Breathing Engines ISABE, pp. 780-787, September 1-6,1991, Nottingham , UK

/3/ Darmstadt Rotor Nr. 2-part I, K. Pirker,J. Frischbier,
”Design and Stress Analysis of a one Stage Transonic Composite Compressor”
ISROMAC_9, Honolulu, Hawaii, Feb. 2002

/4/ J.Frischbier, S.Sikorski, “Birdstrike and Fatigue Life Investigations of a Composite Fan Blade”, Proceedings of the 1993 European Propulsion Forum, pp. 18.1-18.12, June 1993, Bath, UK

/5/ Förtsch W., Franz H.E. and Friedrich K., "On the Failure Behaviour of a High-Frequency Loaded CFRP-Composite", Proceedings of the 11th European Conference on Composite Materials ECCM11. Rhodes, Greece: 31 May - 3 June 2004.

/6/ Reifsnider, K. L.(ed.), “Fatigue of Composite Materials”, Amsterdam, The Netherlands:Elsevier Science Publishers B. V. , 1991

/7/ Harris, B. (ed.), “Fatigue in Composites”, Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd., 2003

/6/ ASM Handbook Volume 21 Composites,
ASM International, 2001