

Experimentelle Untersuchungen des dynamischen Verhaltens von rotierenden Faserverbundstrukturen

Dipl.-Ing. Sebastian John, Dipl.-Ing. Angelos Filippatos, Dr.-Ing. Martin Dannemann, Dr.-Ing. Pawel Kostka, Prof. Dr.-Ing. Niels Modler

Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), 01307 Dresden, E-Mail: sebastian.john2@tu-dresden.de

Einleitung

Auf Grund ihrer hohen spezifischen Festigkeit und Elastizität nimmt die Bedeutung faserverstärkter Kunststoffe (FVK) im Maschinenbau stetig zu. Insbesondere bei rotierenden Strukturen können durch massereduzierende Maßnahmen die auftretenden dynamischen Kräfte erheblich minimiert und folglich Größe, Umfang und Masse von Lager- und Haltevorrichtungen reduziert werden. Vor allem bei FVK-Strukturen kann es jedoch, bedingt durch Fertigungsungenauigkeiten, zu signifikanten Abweichungen von Materialeigenschaften gleicher Bauteile kommen [1, 2]. Weiterhin führt das unterschiedliche Materialverhalten einzelner Verbundbestandteile, wie z.B. von Fasern und Matrix, innerhalb des Faser-Kunststoffverbundes zu einem äußerst komplexen und schwer vorhersehbaren Versagensverhalten. Bedingt durch ihren charakteristischen Lagenaufbau bieten Faserverbunde die Möglichkeit, messtechnische Komponenten (Piezoelemente, Dehnmessstreifen, ferromagnetische Inlays) zur Funktions- und Betriebsüberwachung in das Bauteil zu integrieren. Allerdings können zusätzlich applizierte Massen zu einer erheblichen Veränderung des Rotations- und Schwingungsverhaltens führen. Im Vergleich zu isotropen Materialien verstärkt das orthotrope Werkstoffverhalten von FVK-Strukturen zusätzlich den Einfluss drehzahlabhängiger Nebeneffekte, wie beispielsweise Spannungsversteifungen, welche sich in einem vergleichsweise komplexeren Schwingungsverhalten widerspiegeln und bisher an entsprechenden Strukturen noch nicht ausreichend erforscht wurden. Zur dennoch möglichst genauen Untersuchung des Rotationsverhaltens erfolgt am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der Technischen Universität Dresden die Überwachung und Analyse von rotierenden Bauteilen berührungs- und rückkopplungsfrei mit Hilfe eines optischen Messverfahrens auf Basis der Laser-Doppler-Interferometrie. Ziel ist es, durch die Analyse des charakteristischen Schwingungsverhaltens eines Bauteils Rückschlüsse auf dessen Betriebsverhalten zu erhalten sowie unerwünschte Sonderereignisse, wie strukturelle Schädigungen, frühzeitig zu diagnostizieren.

Definition modaler Parameter als repräsentative Schädigungsgrößen

Wie schon von Cawley et al. [3] postuliert, hat eine Schädigung innerhalb einer Faserverbundstruktur in der Regel eine lokale Änderung des Steifigkeits- und Dämpfungsverhaltens zur Folge, welche zu einer Beeinflussung des dynamischen Verhaltens und folglich zu einer Veränderung der modalen Parameter führt. Ziel ist es, diesen Effekt zu nutzen, um Rückschlüsse auf Ausmaß und Ort der

Schädigung ziehen zu können. Diesbezüglich wurden am ILK bereits umfangreiche Versuche durchgeführt, wobei unter anderem an ruhenden Strukturen der Ort lokal eingebrachter Störungen durch eine Analyse der Eigenfrequenzen detektiert wurde. Auf Grundlage eines Vergleichs von Antwortsignalen bauteilintegrierter Dehnmessstreifen in unterschiedlich stark geschädigten Probekörpern wurden die drei ersten Eigenfrequenzen der Strukturen betrachtet. Abhängig von der Frequenzänderung (Verringerung oder Erhöhung) sowie unter Berücksichtigung der Amplituden wurde ein entsprechender Auswertalgorithmus entworfen, welcher auf Basis eines Abgleichs mit zuvor gespeicherten Referenzwerten den Ort der eingebrachten Schädigung eingrenzt und anzeigt. Fortführend wurde das erarbeitete Verfahren für rotierende FKV-Strukturen weiterentwickelt, simulativ getestet und ausgewertet. Unter Berücksichtigung von Ort und Größe der eingebrachten Schädigung entstand eine Parameterstudie, in welcher die Auswirkungen auf die Modalparameter berechnet und verarbeitet wurden.

Aufbau eines Versuchstandes sowie Durchführung erster Messungen

Zur Gewährleistung einer rückkopplungsfreien messtechnischen Erfassung aller relevanten Schwingungsgrößen und zur Verifizierung der mittels Simulation ermittelten Erkenntnisse wurde ein Prüfstand entwickelt, welcher alle relevanten modalen Parameter der rotierenden FVK-Struktur mittels Laser-Doppler-Interferometrie-Messverfahrens in Echtzeit erfasst. Der aufgebaute Rotorprüfstand besteht aus einer Anordnung von Messinstrumenten, dessen Herzstück die Derotatoreinheit, bestehend aus einem Einpunkt-Laservibrometer (ELV) sowie einem Laserscanningvibrometer (LSV) inklusive dazugehöriger Rotationsoptik bildet. Mit Hilfe der, mit dem Messobjekt drehzahl-synchronisierten Rotationsoptik kann mittels LSV die oberflächennormale Geschwindigkeitskomponente der Messpunkte auf der rotierenden Struktur ermittelt und in ein ruhendes Bezugssystem überführt werden. Zur eindeutigen Bestimmung der Schwingformen ist es darüber hinaus erforderlich, simultan den Phasenreferenzwert mittels ELV zu ermitteln. Neben Steuer- und Regelungseinheiten bilden der zu vermessende Rotor inklusive Rotoraufnahme und Antriebseinheit sowie ein mechanischer Anregungsmechanismus weitere Bestandteile des Versuchstandes. Entsprechend des bereits in der Simulation verwendeten Modellaufbaus wurde ein identischer scheibenförmiger Probekörper aus glasfaserverstärkten Epoxidharz (GF/EP) gefertigt, welcher einen Außendurchmesser von $D = 500$ mm besitzt und aus einem 16-schichtigen Lagen-

aufbau besteht (vgl. Abbildung 1). Die Strukturangeregung erfolgt über einen elektrodynamischen Schwingerreger, mittels einer auf den Rotor auftreffenden Polypropylen-Kugel.

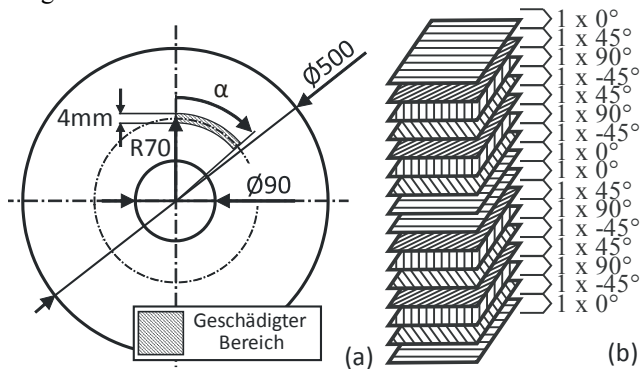


Abbildung 1: Abmaße und Parameter des GF/EP Scheibenrotors (a) sowie Aufbau und Faserorientierung der einzelnen Lagen (b)

Erste Vermessungen der rotierenden Struktur zeigten eine deutliche Drehzahlabhängigkeit der Eigenfrequenzen wobei mit zunehmender Drehzahl eine Frequenzerhöhung auf Grund der lokalen Spannungsversteifung deutlich wurde. Weiterhin wurde der Einfluss einer eingebrachten Schädigung auf die Eigenfrequenzen in Abhängigkeit von der Drehzahl untersucht. Die verwendete Rotorstruktur wurde in Form eines Spaltes geschädigt, wobei die Größe der Schädigung variierte (vgl. Abbildung 1a; Schädigungsstufen bei $R = 70$ mm mit $\alpha = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$). Nach Auswertung der Messdaten wurde ersichtlich, dass insbesondere bei Eigenfrequenzen höherer Ordnung eine deutliche schädigungsabhängige Frequenzveränderung auftritt. Exemplarisch zeigt Abbildung 2 das Verhalten der 4. und 5. Eigenfrequenz von Strukturen unterschiedlicher Schädigungsstufen bei einer Drehzahl von $n = 500 \text{ min}^{-1}$. Bei geringstem Schädigungsgrad ist zunächst eine Erhöhung, mit zunehmender Schädigung jedoch ein deutlicher Abfall der Eigenfrequenzen im Vergleich zur ungeschädigten Struktur zu beobachten.

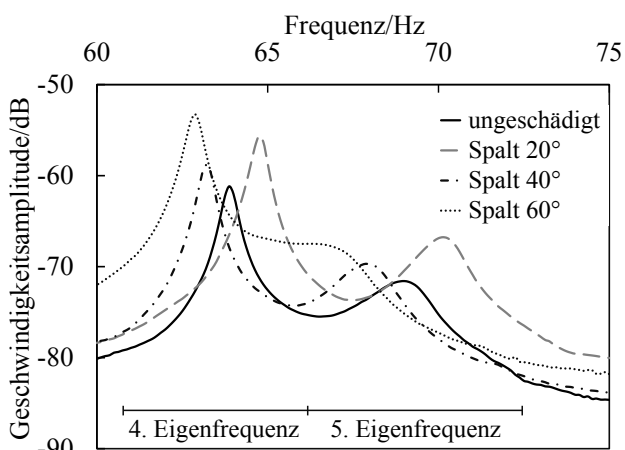


Abbildung 2: Vergleich der 4. und 5. Eigenfrequenz unterschiedlicher Schädigungsstufen ($n = 500 \text{ min}^{-1}$)

Ein identisches Muster weisen die Messergebnisse aus weiteren Versuchen bei Drehzahlen von $n = 0 \text{ min}^{-1}$, 250 min^{-1} , 750 min^{-1} und 1000 min^{-1} auf. Jedoch wird deutlich, dass die aufgezeigte schädigungsbedingte Eigenfrequenzverschiebung bei steigender Drehzahl, bedingt

durch die zunehmenden Rotationskräfte und den damit einhergehenden Versteifungseffekten, minimiert wird.

Weiterhin erfolgte eine Analyse der Schwingformen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Schädigungsstufen. Dabei konnte bei allen gefahrenen Drehzahlen eine deutliche Verringerung der Out-of-plane-Amplituden im Bereich der Schädigung nachgewiesen werden.

Parallel zum Versuch wurden auch numerische Berechnungen auf Grundlage anisotroper Materialmodelle durchgeführt. Zusätzlich zu den messtechnisch basierten Erkenntnissen wurde bei der Betrachtung der Schwingformen eine verstärkte, nach außen gerichtete, radiale Verformung im Schädigungsbereich der Struktur beobachtet. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Simulationsergebnisse ist bei Strukturen mit stärkerer Anisotropie eine Verstärkung der hier aufgezeigten Effekte, insbesondere bezüglich der Schwingformen, zu erwarten.

Zusammenfassung und Ausblick

Auf Grund der am ILK geleisteten Vorarbeiten konnte ein Prüfstand zur Untersuchung faserverstärkter Rotoren erfolgreich aufgebaut und getestet werden. Untersucht wurden Einflüsse von Schädigung und Drehzahl auf die modalen Eigenschaften eines GF/EP-Rotors. Die gewonnenen Messergebnisse lieferten Erkenntnisse einer schädigungsabhängigen Verschiebung von Eigenfrequenzen, insbesondere bei höheren Ordnungen. Unter Berücksichtigung der Drehzahl wurde weiterhin der Einfluss unterschiedlicher Schädigungsstufen auf die Ausprägung der Schwingformen untersucht. Für eine Abschätzung von Ausmaß und Ort der Schädigung wurden bei ausgewählten Schwingformen Betrag und Verteilung der Amplituden als repräsentative Größen herangezogen. Ziel ist es nun, durch Vermessung weiterer FVK-Rotoren die gewonnenen Erkenntnisse zu verifizieren sowie die Anzahl relevanter und aussagekräftiger Eigenfrequenzen und Schwingformen einzugrenzen. Des Weiteren sollen Untersuchungen an Strukturen mit stärkerer Anisotropie und komplexerer Geometrie die gewonnenen Erkenntnisse ausbauen sowie eine Erweiterung der zu untersuchenden Parameter, beispielsweise durch den Einbezug faserverbundtypischer Schädigungsarten, erfolgen. Mit Hilfe eines angepassten Auswertalgorithmus könnte schließlich eine automatisierte Schadensdetektion im Rahmen eines aktiven Health-Monitoring erfolgen.

Literatur

- [1] Barbero, E.; Fernandez-Saez, J.; Navarro, C.: Statistical analysis of the mechanical properties of composite materials. *Composites Part B: Engineering* 31 (2000), 375-381
- [2] Hufenbach, W; Gude, M.; Böhm, R.; Thieme, M.: Theoretical approaches for a probabilistically based material model for textile-reinforced thermoplastic composites made of hybrid yarns. *Transactions on mechanics* 55 (2010), 36
- [3] Doebeling, S.; Farrar, C.; Prime, M.: Summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and Vibration Digest* 30 (1998), 91-105