

Zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Faserkunststoff-Verbunden mit thermoplastischer Matrix

Matthias Klärner¹, Patryk Nossol¹, Steffen Marburg², Lothar Kroll¹

1: Technische Universität Chemnitz, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, 09107 Chemnitz

2: Universität der Bundeswehr München, Institut für Mechanik -LRT , 85577Neubiberg

E-Mail: matthias.klaerner@mb.tu-chemnitz.de

Einleitung

Faserkunststoffverbunden (FKV) mit thermoplastischer Matrix eröffnen durch moderne großserienfähige Fertigungsverfahren zahlreiche Möglichkeiten der energie- und ressourceneffizienten Herstellung sowie einer masse- und belastungsoptimierten Bauteilgestaltung. Als eine besondere Eigenschaft der thermoplastischen Matrix ist neben der effizienten Herstellung insbesondere die hohe Materialdämpfung hervorzuheben, welche über die Parameter Lagenaufbau und Faservolumengehalt zudem eine hohe Variabilität bietet. Zur Simulation des dynamischen Bauteilverhaltens mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente gilt es, gültige Dämpfungsmodelle zu ermitteln, deren Parameter experimentell zu bestimmen und diese in der Simulation zu verifizieren. Im vorliegenden Beitrag werden diese Untersuchungen an verschiedenen thermoplastischen FVK durchgeführt und mit FEM-Simulationen verglichen. Die Ergebnisse zeigen die Gültigkeit der in der FEM verfügbaren Dämpfungsmodelle für die modernen Leichtbauwerkstoffe und ermöglichen qualitative und quantitative Bewertungen der dynamischen Eigenschaften von verschiedenen Verbunden anhand der Freiwerte.

Ermittlung der Materialparameter

Für unidirektional verstärkte Faser-Kunststoff-Verbunde werden unter Voraussetzung des ebenen Spannungszustandes vier und im allgemeinen Fall fünf elastische Materialkennwerte zur Beschreibung des elastischen Materialverhaltens benötigt.

Des Weiteren wurden die Dämpfungskennwerte mittels Ausschwing- und Resonanzbiegeversuchen an dünnen unidirektional verstärkten Kragbalken mit verschiedenen Faserausrichtungen ermittelt. Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau im Ausschwingversuch, wobei die Probe [3] in einer Prüfvorrichtung [2] unter Kontrolle der Einspannkraft mittels eines Drucksensors [1] einseitig eingespannt, ausgelenkt und die Geschwindigkeiten der Biegeschwingung am freien Ende mittels eines Laser-Doppler-Vibrometers [4] aufgezeichnet wurden.



Abbildung 1: Versuchsaufbau für Ausschwingversuche

Aus der Ausschwingkurve

$$\dot{q}(t) = C \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega t - \alpha) \quad (1)$$

oder deren Einhüllender

$$\dot{q}_E = \pm C \cdot e^{-\delta t} \quad (2)$$

wird unter Berücksichtigung der Eigenfrequenz das LEHRsche Dämpfungsmaß bestimmt.

$$\vartheta = \frac{\delta}{\omega_1} \quad (3)$$

Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine ermittelte Ausschwingkurve von einer Probe aus Kohlenstofffasern und Polyamidmatrix (CF-PA) mit Faserausrichtung entlang der Balkenachse. Das exponentielle Abklingverhalten wird durch die Übereinstimmung der Hüllkurven mit den lokalen Extrema der Abklingkurve deutlich. Im untersuchten Bereich von 0° bis 90° Faserausrichtung bezogen auf die Balkenachse konnte für alle Proben ein solch viskoses Dämpfungsverhalten nachgewiesen werden. Ferner wird deutlich, dass die Proben mit ihrer ersten Kreisfrequenz schwingen. Höherfrequente Anteile sind dabei auch im Frequenzbereich nicht erkennbar.

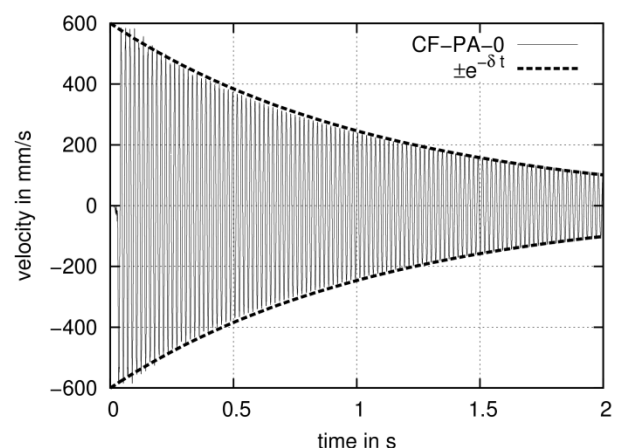


Abbildung 2: Experimentell ermittelte Ausschwingkurve

Dämpfungsmodelle in der FEM

Die Beschreibung der Dämpfung in der Methode der finiten Elemente erfolgt global, auf Materialebene oder, unter Verwendung modal reduzierter Systeme, basierend auf den Eigenmoden.

Ausgehend von der Grundgleichung

$$M\ddot{u} + D\dot{u} + Cu = f \quad (4)$$

wird bei Verwendung der RAYLEIGH-Dämpfung die Dämpfungsmatrix in einen massen- und einen steifigkeitsproportionalen Anteil aufgeteilt,

$$D = \alpha M + \beta C \quad (5)$$

wobei in modal reduzierten Systemen für alle Moden eine generalisierte Dämpfungskonstante

$$g_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (6)$$

zur Anwendung kommt. Die Parameter α und β werden nach (6) für zwei spezifische Frequenzen aus dem LEHRschen Dämpfungsmaß ermittelt, worin sich Ungenauigkeiten bei großen betrachteten Frequenzbereichen begründen.

Im Gegensatz dazu wird bei der Strukturdämpfung die Dissipation in einer komplexwertigen Steifigkeitsmatrix berücksichtigt.

$$M\ddot{u} + (C^{Re} + iC^{Im})\dot{u} = f \quad \text{mit} \quad C^{Im} = sC^{Re} \quad (7)$$

Für modal transiente Analysen lässt sich am Einmassenschwinger eine Berechnungsvorschrift für eine äquivalente LEHRsche Dämpfung nachweisen [1].

$$s = 2g \quad (8)$$

Die LEHRsche Dämpfung kann im Gegensatz dazu ausschließlich auf modaler Ebene

$$\tilde{M}\ddot{q} + \tilde{D}\dot{q} + \tilde{C}q = \tilde{f} \quad (9)$$

berücksichtigt werden, indem jedem Eigenmod eine generalisierte Dämpfungskonstante d_i zugewiesen wird.

$$\tilde{D} = \begin{cases} 0 & \text{für } i \neq j \\ d_i & \text{für } i = j \end{cases} \quad (10)$$

Ergebnisse der FEM-Simulationen

Abbildung 3 zeigt exemplarisch für eine 0°-CF-PA-Probe eine gute Genauigkeit der in der FEM ermittelten Abklingkurve bei Verwendung modaler LEHRscher Dämpfung im Vergleich zu den experimentell ermittelten Hüllkurven.

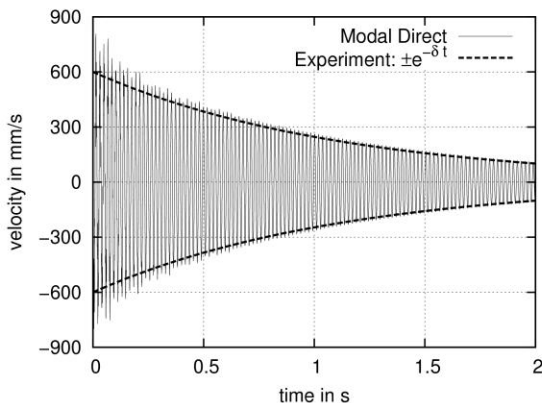


Abbildung 3: FEM: LEHRsche Dämpfung

Gleiche Ergebnisse wurden sowohl mit Struktur- und RAYLEIGH-Dämpfung als auch mit anderen Faserausrichtungen ermittelt. Auch ein Vergleich zwischen den FE-Programmen ABAQUS und RADIOSS zeigt vergleichbare Ergebnisse. Zu bemerken ist jedoch, dass die Charakteristik der FKV - die Abhängigkeit des Dämpfungsmaßes von der Faserausrichtung - in keinem kommerziellen FE-Programm entsprechend abgebildet werden kann.

Abbildung 4 zeigt diese Richtungsabhängigkeit für den untersuchten FKV für die erste und zweite Kreisfrequenz. Gemäß [2] und [3] lässt sich das Dämpfungsverhalten von FKV analog zu den orthotropen Steifigkeitskennwerten in einen faserdominierten, einen matrixdominierten und einen Anteil des Schubdeformationsverlusts aufteilen. Die dazu benötigten Kennwerte ermöglichen auch die Anwendung auf allgemeine Laminare und sollen in der Folge für die FEM nutzbar gemacht werden.

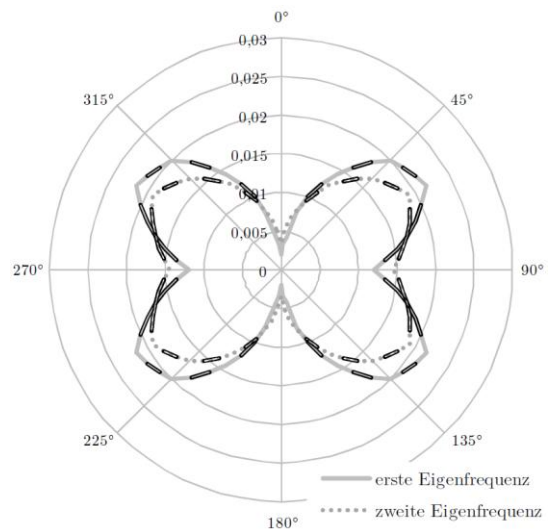


Abbildung 4: Dämpfungsmaß von unidirektionalem CF-PA in Abhängigkeit von der Faserausrichtung

Literatur

- [1] Nasdala, L.: FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik, Vieweg+Teubner 2010
- [2] Adams, R. D.; Maheri, M. R.: Damping in advanced polymer-matrix composites. In: Journal of Alloys and Compounds; 355 (2003), Nr. 1-2, S. 126-130
- [3] Maheri, M. R.; Adams, R. D.: Modal vibration damping of anisotropic frp laminates using the Rayleigh-Ritz energy minimization scheme. In: Journal of Sound and Vibration 259 (2003), Nr. 1, S. 17-29

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Spitzentechnologieclusters "Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik" eniPROD®. eniPROD wird gefördert von der Europäischen Union aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie aus Landesmitteln des Freistaates Sachsens.

