

Modellierung des dynamischen Verhaltens und der Schalldämmung von einfach gekrümmten Faserverbundschalen mit hohem Leichtbaugrad

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Werner A. Hufenbach, Dr.-Ing. Bernd Grüber,
Dipl.-Ing. Martin Dannemann, Dipl.-Ing. Stefan Friebe

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Technische Universität Dresden,
Holbeinstraße 3, 01307 Dresden, E-Mail: martin.dannemann@ilk.mw.tu-dresden.de

Einleitung

Aufgrund des einstellbaren Eigenschaftsprofils von faserverstärkten Werkstoffen werden Faserverbundleichtbaustrukturen zunehmend in vielen Hochtechnologieanwendungen eingesetzt. Insbesondere für anspruchsvolle Anwendungen im Bereich der Luft- und Raumfahrt wird dabei ein minimales Strukturgewicht bei hoher Steifigkeit in Verbindung mit einer hohen Werkstoffdämpfung sowie geringer Schallabstrahlung angestrebt. Hierbei bieten anisotrope Faserverbundwerkstoffe ein hohes Leichtbaupotential, da eine maßgeschneiderte steifigkeits- und dämpfungsoptimierte Lösung durch intelligente Wahl der zahlreichen Entwurfsvariablen wie etwa Faserwinkel, Schichtdicken und Materialkombinationen realisiert werden kann.

Das vibroakustische Verhalten von faserverstärkten Mehrschichtverbundschalen ist durch eine Überlagerung von Materialanisotropie und Strukturgeometrie gekennzeichnet. Das entwickelte analytische Modell trägt diesem komplexen Verhalten Rechnung und beinhaltet neben der Berechnung der Modalparameter Eigenfrequenz und Eigenform auch die Berechnung der Schalldämmung bzw. -abstrahlung bei einer Anregung durch ein Diffusfeld. Die analytische Formulierung des Problems ermöglicht eine schnelle Bewertung und einen Vergleich der zahlreichen Varianten im Rahmen von Parameterstudien.

Analytisches Berechnungsmodell

Im Rahmen des hier entwickelten analytischen Berechnungsverfahrens wird ein mathematisches Ersatzmodell für ein ideal diffuses Schallfeld definiert. Das Diffusfeld ist charakterisiert durch eine unendliche Zahl inkohärenter ebener Schallwellen mit gleicher Energie, die mit selber Wahrscheinlichkeit aus allen Richtungen in einem Punkt des Raumes einfallen. Für das analytische Modell wird hier ein derartiges diffuses Schallfeld nach dem Prinzip der Superposition konstruiert. Das Feld wird aus einer endlichen Anzahl ebener Wellen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln erzeugt, die sich gegenseitig überlagern. Dabei wird die resultierende Strukturantwort des betrachteten Bauteils für jede einfallende Welle berechnet und anschließend zu einer resultierenden Strukturantwort überlagert.

Dementsprechend wird zur Berechnung der Schalldämmung der Transmissionsgrad $\tau(\phi)$ bei einer unter dem Winkel ϕ einfallenden ebenen Schallwelle bestimmt

$$\tau(\phi) = \frac{\Pi_t}{\Pi_i},$$

wobei Π_i der einfallenden Schalleistung und Π_t der transmittierten Schalleistung entspricht. Im Fall der Diffusfeldanregung wird $\tau(\phi)$ über alle verwendeten Einfallswinkel ϕ gemittelt, um den Gesamttransmissionsgrad

$$\tau_d = \frac{\Pi_t}{\Pi_i} = \int_0^{\phi_L} \tau(\phi) \sin 2\phi d\phi$$

zu erhalten. Das gebräuchliche Schalldämmmaß wird dann aus dem Transmissionsgrad τ_d berechnet:

$$TL = -10 \lg \tau_d \text{ in dB [2].}$$

Anhand einer einfach gekrümmten Schalenstruktur (siehe Abbildung 1) wurde der Einfluss verschiedener Entwurfsvariablen, wie etwa Laminataufbau oder Schalenkrümmungsradius untersucht. In Abbildung 1 ist das verwendete Schalenmodell dargestellt.

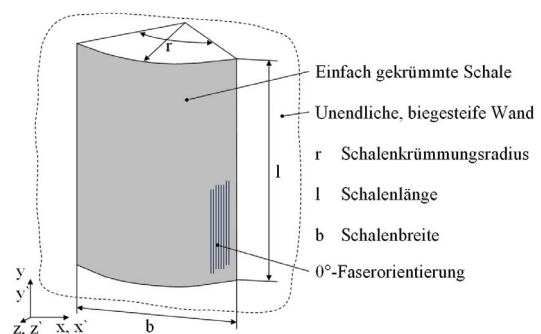


Abbildung 1: Modell der einfach gekrümmten Schale

Die einfach gekrümmte Schale ist in eine unendlich ausgedehnte ideal biegesteife Trennwand eingebettet (Transmissionsaufbau). Die Schale mit der Länge l, der Sehnenlänge b und dem Krümmungsradius r besteht aus einem Mehrschichtverbund mit jeweils unidirektional faserverstärkten Einzellagen

Mit Hilfe des entwickelten Berechnungsmodells können sowohl die Eigenfrequenzen und Schwingformen als auch das Schalldämmmaßspektrum von Faserverbundstrukturen bestimmt werden.

Vibroakustische Parameterstudien

Am Beispiel einer leicht gekrümmten Schalenstruktur ($r = 2 \text{ m}$) aus einem symmetrisch aufgebauten Kreuzverbund

wurden umfangreiche Parameterstudien durchgeführt, um den Einfluss des Lagenaufbaus auf die strukturdynamischen und akustischen Eigenschaften zu untersuchen. In Abbildung 2 ist die erste Eigenfrequenz der Faserverbundschale für verschiedene Lagenaufbauten dargestellt.

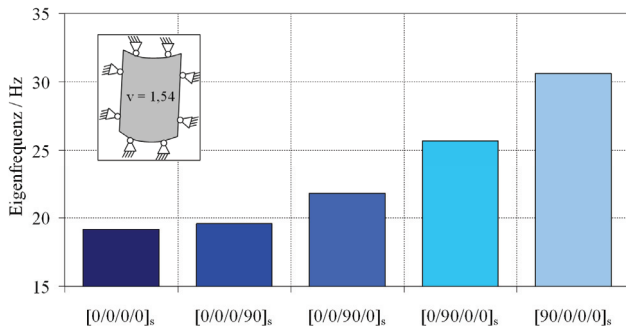


Abbildung 2: Erste Eigenfrequenz verschiedener Laminatschalen

Die Schale mit rein unidirektionaler Faserverstärkung weist die geringste erste Eigenfrequenz aller berechneten Varianten auf. Dies ist auf das Zusammenwirken der werkstoffseitigen und der geometriebedingten Steifigkeiten zurückzuführen. Durch den Einsatz von möglichst außen liegenden 90°-Einzelschichten kann die Eigenfrequenz und damit die Steifigkeit der Verbundschale deutlich erhöht werden.

In weiteren Untersuchungen wurde der Einfluss des Seitenverhältnisses bei konstanter Schalenoberfläche und -krümmungsradius auf die erste Eigenfrequenz untersucht (siehe Abbildung 3).

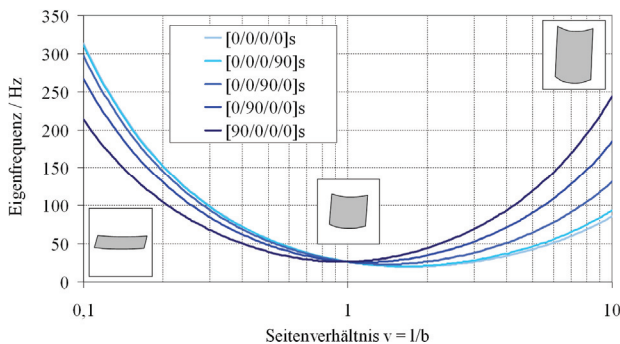


Abbildung 3: Eigenfrequenz in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses für verschiedene Laminataufbauten

Bei einem Seitenverhältnis von $\nu = 1,01$ weisen die unterschiedlichen Verbundaufbauten die gleiche Eigenfrequenz auf. Die Lagenaufbauten, die bei Seitenverhältnissen $\nu < 1,01$ die höchste Eigenfrequenz aufweisen, besitzen bei $\nu > 1,01$ die niedrigste Eigenfrequenz. Darüber hinaus ist der Unterschied bei $\nu = 0,1$ gering, während bei $\nu = 10$ ein deutlich größerer Unterschied zwischen den Lagenaufbauten zu erkennen ist. Eine mögliche Ursache hierfür ist die Überlagerung von Anisotropieeffekten des Werkstoffes und der Geometrieinflüsse. Demnach führt je nach Seitenverhältnis ein bestimmter Lagenaufbau zur höchsten Eigenfrequenz.

Neben den strukturdynamischen Eigenschaften wurde auch das Schalldämmmaß der verschiedenen Faserverbundschalen ermittelt. Für endliche Bauteile lässt sich das Schalldämmverhalten unterhalb der Grenzfrequenz in einen steifigkeits-

dominierten, eigenfrequenzdominierten und massedominierten Bereich unterteilen [3]. Abbildung 4 zeigt die Schalldämmmaßspektren der untersuchten Lamine.

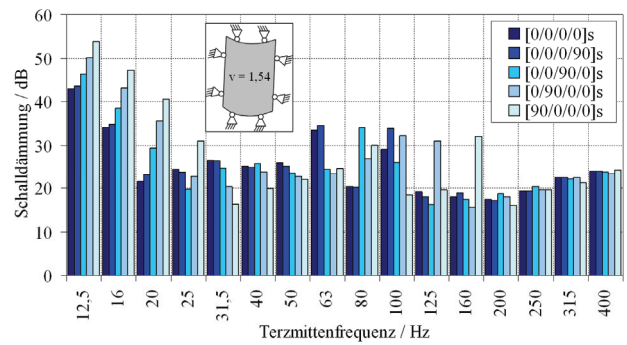


Abbildung 4: Schalldämmung (TL) in Abhängigkeit des Lagenaufbaus

Im hauptsächlich steifigkeitsdominierten Bereich der unteren Frequenzen ist die Erhöhung des Schalldämmmaßes durch die 90°-Lagen deutlich zu erkennen (vgl. auch Abbildung 2). Im mittleren Frequenzbereich (ca. 30-160 Hz) wird die Schalldämmung maßgeblich durch die Lage der Eigenfrequenzen bestimmt und zeigt somit keine eindeutige Tendenz. An diesen Frequenzbereich schließt sich ab ca. 160 Hz der massedominierte Bereich an, in dem sich die Schalldämmmaße der untersuchten Varianten angleichen.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem vorgestellten analytischen Modell können einfach gekrümmte Faserverbundschalen in umfangreichen Parameterstudien strukturdynamisch und akustisch charakterisiert werden. Das erarbeitete Modell erlaubt die Ermittlung der Modalparameter und der Schalldämmung unter Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens.

In den durchgeführten Parameterstudien konnte nachgewiesen werden, dass sowohl der Lagenaufbau als auch die Geometrie bei Schalenbauteilen einen signifikanten Einfluss auf die Eigenfrequenz besitzen. Damit muss zur Erzielung einer hohen Eigenfrequenz bei Verbundschalen je nach Seitenverhältnis ein geeigneter Lagenaufbau eingestellt werden, sodass für den jeweiligen Anwendungsfall stets ein vibroakustisch optimierter Verbundaufbau erzielt werden kann. Auch die akustischen Eigenschaften lassen sich durch Anpassung des Lagenaufbaus gezielt beeinflussen. Hierbei wirkt sich insbesondere die Steifigkeitsänderung auf das Schalldämmmaß im niederfrequenten Bereich bis ca. 160 Hz aus.

Literatur

- [1] Witting, M.: *Modelling of Diffuse Sound Field Excitations and Dynamic Response Analysis of Lightweight Structures*. Dissertation, TU München, 1999.
- [2] Fahy F.: *Sound and Structural Vibration. Radiation, Transmission and response*. Academic Press, London, 1985, S. 309.
- [3] Norton, M.P.: *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. Cambridge University Press, 1989.