

Angepasstes numerisches Simulationskonzept zur vibroakustischen Optimierung von Faserverbundpropellern mit integrierten viskoelastischen Zwischenlagen

Dipl.-Ing. Martin Dannemann¹, Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Werner A. Hufenbach¹,
Dipl.-Ing. Jens Friedrich¹, Dipl.-Ing. Axel Paul²

¹ Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Technische Universität Dresden,
Holbeinstraße 3, 01307 Dresden, E-Mail: martin.dannemann@ilk.mw.tu-dresden.de

² Howaldtswerke-Deutsche Werft GmbH, Werftstraße 112-114, 24143 Kiel

Einleitung

Das ursprüngliche Ziel bei der Auslegung von Schiffs- und U-Boot-Propellern – die Erzeugung von Vorschub mit höchstmöglicher Effizienz – wird verstärkt zugunsten guter akustischer Eigenschaften modifiziert. Für diese geänderten Anforderungen bieten Faserverbundwerkstoffe aufgrund des in weiten Bereichen einstellbaren Eigenschaftsprofils ein hohes Potential. Die große Vielfalt faserverbundspezifischer Entwurfsvariablen wie etwa Faser-Matrix-Kombination und Verbundaufbau erfordert für eine zielgerichtete vibroakustische Auslegung leistungsfähige Optimierungsstrategien auf Basis effizienter Simulationsmodelle, die insbesondere das anisotrope Dämpfungsverhalten des Faserverbundwerkstoffes als auch die Wirkung hochdämpfender viskoelastischer Zwischenschichten im Verbundaufbau berücksichtigen müssen.

Berechnung der modalen Verlustfaktoren

Kommerziell verfügbare Finite Elemente (FE) Programmsysteme erlauben die Berücksichtigung von Dämpfungseffekten über steifigkeits- bzw. masseproportionale Faktoren. Das richtungsabhängige Dämpfungsverhalten mehrschichtiger Verbunde kann in diesen Programme derzeit nicht werkstoffgerecht abgebildet werden. Eine Möglichkeit der Berechnung ist die numerische Modellierung der Dämpfung nach dem Energiekonzept (vgl. z.B. [1, 2]). Die Berechnung des modalen Verlustfaktors d basiert in dieser Vorgehensweise auf der spezifischen Dämpfungskapazität ψ , die sich aus der in einer Schwingungsperiode dissipierten Energie ΔU und der maximalen Formänderungsenergie U nach

$$\psi = 2\pi d = \frac{\Delta U}{U}$$

bestimmt. Die modale Dämpfung von anisotropen Mehrschichtverbundstrukturen wird dann bei Anwendung der Finite Elemente Methode ausgehend von den „Richtungs-komponenten“ der Formänderungsenergien ermittelt. Bei Verwendung einer Dichteformulierung der Verzerrungsenergien lässt sich der modale Verlustfaktor d_n der n -ten Mode aus den Komponenten der Werkstoffdämpfungen d_{ij} und der Formänderungsenergiedichte $\bar{U}_{ij} = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}$ (ohne Einsteinsche Summenkonvention) nach folgender Beziehung berechnen:

$$d_n = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 d_{ij}^{(k)} \left(\bar{U}_{ij}^{(k)(m)} \right)_n}{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left(\bar{U}_{ij}^{(k)(m)} \right)_n} \quad (1)$$

Hierin bezeichnet M die Gesamtanzahl der finiten Elemente und K die Anzahl der Einzelschichten. Die in (1) enthaltenen richtungsabhängigen Werkstoffdämpfungen d_{ij} werden in geeigneten Experimenten bestimmt (vgl. z.B. [3]). Der Berechnungsablauf wurde durch ein eigens entwickeltes Skript in die Softwareumgebung des FE-Programmpaketes ANSYS implementiert.

Optimierungsszenario

Abbildung 1 zeigt die Struktur und den Lagenaufbau der untersuchten abstrahierten Propellerstruktur. Für die Deckschichten (Index DS) und die Kernschicht (Index KS) wurde ein unidirektional kohlenstofffaserverstärkter Verbund gewählt. Die Zwischenschichten (Index ZS) bestehen aus einem speziellen Dämpfungsmaterial.

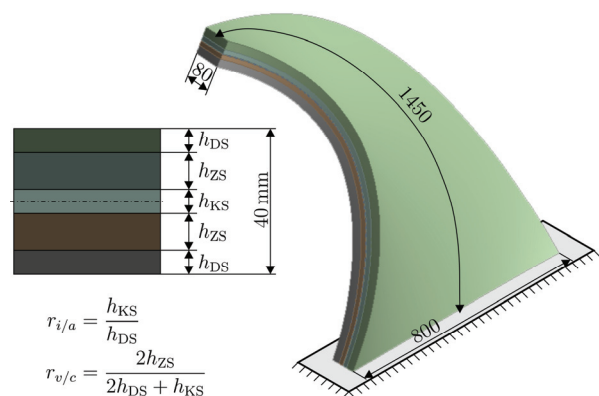


Abbildung 1: Struktur und Lagenaufbau des abstrahierten Propellers

Das eigens für den abstrahierten Faserverbundpropeller erarbeitete Optimierungsszenario enthält zum einen die faserverbundspezifischen Entwurfsvariablen des Lagenaufbaus (Faserwinkel der Deck- bzw. Kernschichten φ_{DS} bzw. φ_{KS}). Zum anderen werden Dickenverhältnisse $r_{v/c}$ und $r_{i/a}$ definiert, wobei $r_{v/c}$ den Anteil der Dicken der Zwischenschichten bezogen auf den Anteil der Dicken des Verbundwerkstoffes in Deck- und Kernschichten und $r_{i/a}$ das Verhältnis aus Kern- zu Deckschichtdicke und damit die Position der Zwischenschicht im Verbund darstellt. Das Optimierungsziel bildet sowohl die Maximierung des modalen Verlustfaktors

als auch die Minimierung des abgestrahlten Schalls. Für die Abschätzung der abgestrahlten Schallleistung wurde dabei das Integral der Oberflächenschnellen (equivalent radiated power, ERP) in Luft berechnet und herangezogen.

Ergebnisse und Gestaltungsrichtlinien

Für das entwickelte Optimierungsszenario wurden umfangreiche Parameterstudien durchgeführt, um den Einfluss der Entwurfsvariablen auf die Zielgrößen zu ermitteln. In Abbildung 2 ist die Eigenfrequenz und modale Dämpfung des Faserverbundpropellers in Abhängigkeit des Schichtdickenverhältnisses $r_{v/c}$ dargestellt. Dabei fällt die Eigenfrequenz erwartungsgemäß mit zunehmendem Anteil an viskoelastischem Material ab. Demgegenüber zeigt die Dämpfung ein ausgeprägtes Maximum bei einem Schichtdickenverhältnis $r_{v/c} \approx 1,6$.

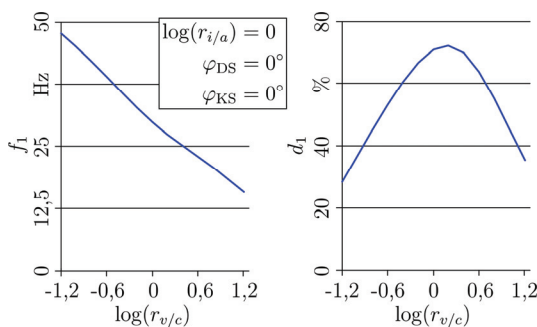


Abbildung 2: Eigenfrequenz und Dämpfung der ersten Eigenform in Abhängigkeit des Dickenverhältnisses $r_{v/c}$

Abbildung 3 zeigt den Verlauf der maximalen Frequenz und Dämpfung der ersten Eigenform in Abhängigkeit des Faserwinkels der Deckschichten. Sowohl die Frequenz als auch die Dämpfungswerte zeigen einen starken Abfall im Bereich von $0^\circ \leq \varphi_{DS} < 45^\circ$. Ab einem Faserwinkel von etwa 45° treten lediglich noch kleine Änderungen der Eigenfrequenz und Dämpfung auf. Die Parametersätze, die zu den jeweiligen Maximalwerten führen unterscheiden sich kaum. Eine maximale Frequenz wird stets für einen Verbundaufbau mit möglichst wenig Zwischenschichten ($\log(r_{v/c}) = -1,2$) berechnet, wohingegen die Dämpfung für einen großen Faserwinkelbereich bei einem Anteil der Zwischenschichten von $\log(r_{v/c}) = 0,2$ bei gleichzeitig möglichst innenliegenden Zwischenschichten ($\log(r_{i/a}) = -1,2$) maximal wird.

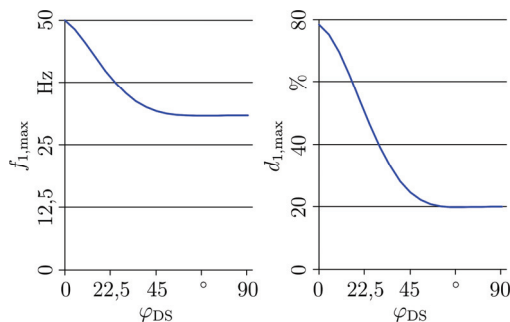


Abbildung 3: Maximale Eigenfrequenz und Dämpfung der ersten Eigenform in Abhängigkeit der Faserorientierung der Deckschichten φ_{DS}

Für die Entwicklung eines Faserverbundpropellers mit möglichst hoher Dämpfung und somit niedriger modaler

Schallabstrahlung ist daher ein ausreichend hoher Anteil viskoelastischen Materials an der Gesamtdicke vorzusehen. Diese Zwischenschichten sind im Verbundaufbau möglichst in der Nähe der neutralen Faser zu positionieren und mit hochsteifen Deckschichten (entspr. 0° Faserorientierung) zu versehen.

Die Analyse der Oberflächenschnellen ergibt bei den hier berechneten modalen Dämpfungen von bis zu 80 % ein Spektrum ohne resonanzbedingte Maxima (vgl. Abbildung 4a). Im Gegensatz zur Berechnung bei wenig gedämpften Strukturen ist hier eine Betrachtung des gesamten Spektrums zur Bewertung des Gesamtpegels (bei frequenzunabhängiger Kraftanregung) erforderlich. Die in Abbildung 4b dargestellten Summenpegel (0-200 Hz) zeigen einen zur Dämpfung gegenläufigen Verlauf (vgl. Abbildung 2).

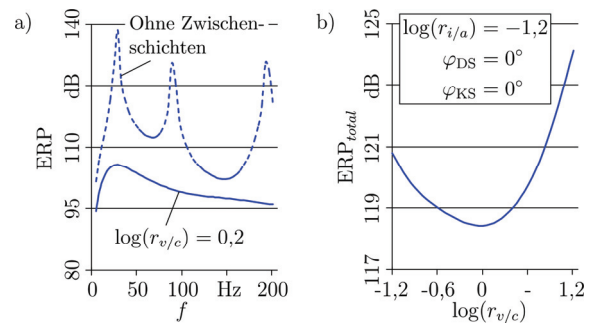


Abbildung 4: a) ERP-Spektren von Verbundaufbauten mit und ohne Zwischenschichten; b) Summenpegel der Oberflächenschnellen in Abhängigkeit des Dickenverhältnisses $r_{v/c}$

Zusammenfassung

Basierend auf einem für Faserverbundstrukturen mit viskoelastischen Zwischenschichten angepassten Formänderungsenergiekonzept und dessen Umsetzung mit Hilfe kommerzieller FE-Software wurde ein Optimierungsszenario für einen Faserverbundpropeller erarbeitet. Im Rahmen umfangreicher Parameter- und Optimierungsstudien wurde der Einfluss der Entwurfsvariablen auf die Zielfunktion identifiziert, um daraus Richtlinien zur dämpfungs- und abstrahlungsgerechten Auslegung von Faserverbundpropellern abzuleiten sowie eine gezielte Ausnutzung des vibroakustischen Potentials von derartigen Verbundwerkstoffen vorzunehmen.

Literatur

- [1] Zhang, S.H.; Chen, H.L.: A study on the damping characteristics of laminated composites with integral viscoelastic layers. *Composite Structures* 74 (1), 2006, pp. 63-69
- [2] Berthelot, J.-M.; Assarar, M., Sefrani, Y. Mahi, A.E.: Damping analysis of composite materials and structures. *Composite Structures* 85, 2008, pp. 189-204
- [3] Hufenbach, W.; Täger, O; Dannemann, M.: Comparative Study on the Influence of Textile Architecture on Dynamics and Sound Radiation of Composites. *Proceeding of the XIV International Conference MCM 2006*, Riga, Latvia