

Sensitivität der abgestrahlten Schalleistung bezüglich amplitudenabhängiger Dämpfung

Mario Wuehrl, Matthias Klaerner, Lothar Kroll

Technische Universität Chemnitz, Institut für Strukturleichtbau, 09107 Chemnitz

Einleitung

Die numerische Berechnung der abgestrahlten Schalleistung spielt bei der Optimierung von Bauteilen eine große Rolle. Dazu ist die Modellierung der Dämpfung erforderlich. Jedoch zeigen gerade komplexere Werkstoffsysteme wie Metall-Kunststoff-Verbunde ein amplitudenabhängiges Dämpfungsverhalten. Diese Materialien mit schubweichen viskoelastischen Kernen bieten gute akustische Eigenschaften und verringern den Einsatz von schweren Dämpfungsbelägen wie Bitumen.

Bei dem hier untersuchten Werkstoff handelt es sich um ein Material, dessen 0.75 mm dicke Stahldecklagen von einem 0.050 mm dicken Kern getrennt werden. Der polymere Kernwerkstoff besitzt mit einem E-Modul von 5 MPa eine sehr geringe Steifigkeit. Die daraus resultierende schubweiche Eigenschaft ermöglicht eine Relativbewegung der Decklagen zueinander, wobei ein Teil der kinetischen Energie dieser Relativbewegung durch die viskoelastischen Eigenschaften des Kernmaterials dissipiert. Hierdurch werden die Schwingungen im Vergleich zu einem monolithischen Blech stärker gedämpft, was wiederum eine geringere Schallabstrahlung bewirkt.

In dieser Studie wird die gesamte abgestrahlte Schalleistung sowie die Frequenzverläufe der Schalleistung eines monolithischen Stahlblechs und des genannten Verbundwerkstoffes für verschiedene Dämpfungswerte verglichen. Eine experimentelle Bestimmung der Amplitudenabhängigkeit des Dämpfungsverhaltens soll die Praxisrelevanz nicht-linearer Dämpfungsmodelle unterstützen.

Ermittlung der Schalleistung

Für die Ermittlung der abgestrahlten Schalleistung P der numerischen Modelle existieren verschiedene Berechnungsverfahren. Die harmonischen Analysen der modal reduzierten Modelle wurden in einem Frequenzbereich von 20 bis 2000 Hz durchgeführt. Das lumped parameter model (LPM) zeigt exakte Lösungen für Dipolmoden und weist eine gute Genauigkeit für niedrige und mittlere Frequenzen auf, weshalb es für diese Studie gewählt wurde [1].

Das Model nutzt hierzu die Normalengeschwindigkeit der Oberfläche $v_n = \vec{v} \cdot \vec{n}$. Mit Hilfe der Dichte der Luft ρ_f und der Schallgeschwindigkeit c_f ergibt sich als Näherung für den Schalldruck an der Oberfläche

$$p \approx \rho_f c_f v. \quad (1)$$

Die Schalleistung ergibt sich weiterhin aus dem Integral

der Schallintensität I in Normalenrichtung über die geschlossene Oberfläche Γ des schwingenden Körpers [2].

$$P = \int_{\Gamma} \vec{I} \cdot \vec{n} \, d\Gamma \quad \text{mit} \quad \vec{I} = \frac{1}{2} \Re(p\vec{v}) \quad (2)$$

Die Schalleistung der LPM ergibt sich nun aus der Summation über die diskreten Elemente der Modelle mit der Fläche A jedes Elements und dem Imaginärteil der GREENSchen Funktionen, der die Interaktion der Quellen wichtet.

$$\Im(G_{ij}) = \frac{\sin(k|x-y|)}{2\pi|x-y|} \quad (3)$$

$$P_{LPM} = \frac{1}{2} \rho_f c_f \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_e} A_i A_j \Im(G_{ij}) \Re(v_i v_j^*) \quad (4)$$

Die gesamte abgestrahlte Schalleistung ergibt sich aus der Integration der Schalleistung über alle Frequenzstützstellen [1].

Berechnung der Schalleistung an Rechteckplatten

Die Schalleistung wurde anhand von allseitig kräfte- und momentenfrei gelagerten Rechteckplatten mit den Maßen 172x242x1.5 mm berechnet. Es wurden neben dem genannten Verbund auch Stahlplatten mit identischer Masse simuliert. Die Ergebnisse dieser Rechnung sollen den grundlegenden Zusammenhang zwischen der Dämpfung des Materials und der Schalleistung verdeutlichen. Die Stahlplatten wurden mit 5607 Schalenelementen diskretisiert. Die viskose Dämpfung wurde zwischen 0.0005 und 0.01 variiert [3].

Für die Deckbleche des Verbundes wurden Schalenelemente, für den Kern Volumenelemente genutzt. Somit ergibt sich hier eine Elementanzahl von 16821. Der dünne Kern wurde hierbei in Dickenrichtung mit einem Element berücksichtigt. Alle verwendeten Elemente besitzen quadratische Ansatzfunktionen. Die viskose Dämpfung wurde für den Kern in drei Stufen (0.015, 0.150 und 1.500) variiert [4, 5]. Um den Einfluss der Deckblechdämpfung auf die Schalleistung aufzuzeigen wurden hier die Werte 0.001 und 0.01 [3] untersucht. Weiterhin wurden folgende Materialkennwerte genutzt:

- E-Modul: $E_{Stahl} = 200 \text{ GPa}$, $E_{Kern} = 5 \text{ MPa}$
- Querdehnzahl: $\nu_{Stahl} = 0.3$, $\nu_{Kern} = 0.495$
- Dichte: $\rho_{Stahl} = 7.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, $\rho_{Kern} = 1.5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.

In Abb. 1 ist der Schalleistungsverlauf der simulierten Stahlplatten für verschieden Dämpfungen dargestellt. Es ist die zu erwartende Erhöhung der Halbwertsbreiten mit steigender Dämpfung zu erkennen. Diese führt zu einer signifikanten Reduktion der gesamten abgestrahlten Schalleistung (s. Tab. 1).

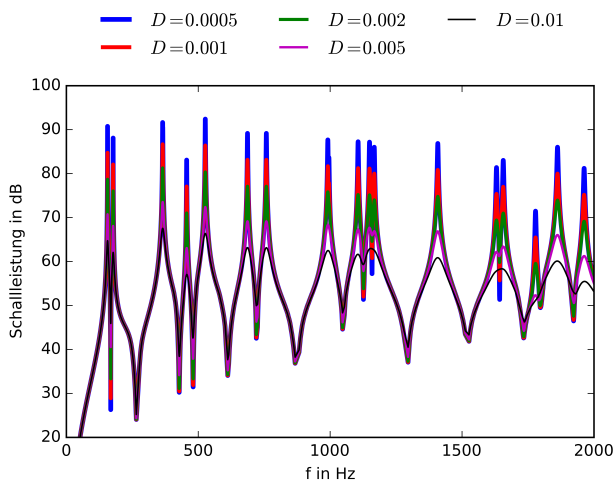


Abbildung 1: Schalleistungsverlauf für Stahl

Tabelle 1: Schalleistungswerte der Stahlplatten

Dämpfung	Schalleistung in dB
0.0005	70.9
0.0010	67.7
0.0020	65.6
0.0050	60.3
0.0100	56.9

Für den Verbundwerkstoff zeigt die Dämpfung des Kernwerkstoffs den deutlichsten Einfluss auf die abgestrahlte Schalleistung. Beim Stahlblech führte eine Erhöhung der Dämpfung um eine Dekade zu einer Reduzierung der Schalleistung um etwa 10 dB. Betrachtet man die gleiche Änderung der Dämpfung beim Kernwerkstoff, so erhält man etwa die gleiche Verringerung der Schalleistung. Wird bei konstanter Kerndämpfung die Dämpfung der Randschicht verändert, so verringert dies die Schalleistung lediglich um 1.2 dB (s. Tab. 2). Auch der in Abb. 2 dargestellte Verlauf der Schalleistung im Frequenzbereich zeigt deutlich, dass die Dämpfung des Kerns den signifikanten Einfluss auf Höhe und Breite der Resonanzen hat. Die allgemein höhere Schalleistung des Verbunds kann durch die höhere Zahl an Moden im betrachteten Frequenzbereich erklärt werden.

- $D_{Decklagen}=0.001 D_{Kern}=0.015$
- $D_{Decklagen}=0.001 D_{Kern}=0.15$
- $D_{Decklagen}=0.001 D_{Kern}=1.5$
- $D_{Decklagen}=0.01 D_{Kern}=0.15$

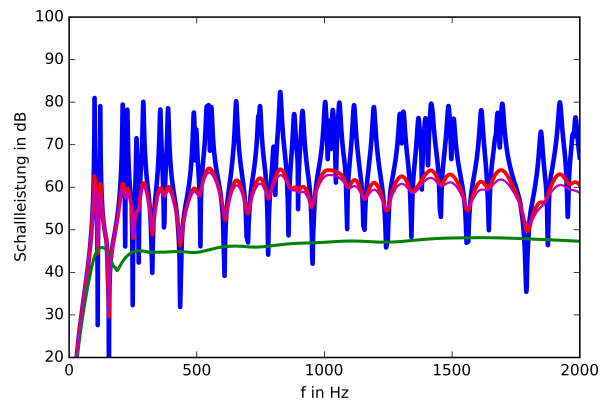


Abbildung 2: Schalleistungsverlauf für den Metall Kunststoff Verbund

Tabelle 2: Schalleistungswerte des Verbundmaterials

Dämpfung		Schalleistung in dB
Kern	Deckblech	
0.015	0.001	70.9
0.150	0.001	60.2
1.500	0.010	46.6
0.150	0.010	59.0

Experimentelle Dämpfungsermittlung

Die experimentelle Dämpfungsermittlung des Verbundmaterials erfolgte mit Hilfe eines Ausschwingversuchs. Hierbei wird eine Kragbalkenprobe genutzt und am freien Ende induktiv in der ersten Eigenfrequenz angeregt. Nach dem Erreichen eines stationären Schwingungszustandes wird die Anregung abgeschaltet und die Schwinggeschwindigkeit mit Hilfe eines Laser-Doppler Vibrometers aufgezeichnet.

Durch eine Parameteranpassung der exponentiellen Hüllkurve an den Maxima der abklingenden Geschwindigkeitskurve kann auf die Dämpfung des Materials geschlossen werden. Dieses Verfahren zeigt sowohl für monolithische Werkstoffe als auch für Faser-Kunststoff-Verbunde zuverlässige Ergebnisse [6].

In Abb. 3 ist der Verlauf der Schwingung und die berechnete Hüllkurve dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf der Kurvenanpassung nicht zufriedenstellend die Maxima der Schwingung abbildet. Für die große Amplitude zu Beginn der Schwingung ist die reale Dämpfung geringer als die ermittelte Dämpfung, wohingegen am Ende die ermittelte Dämpfung größer ist als die reale Dämpfung des Verbunds.

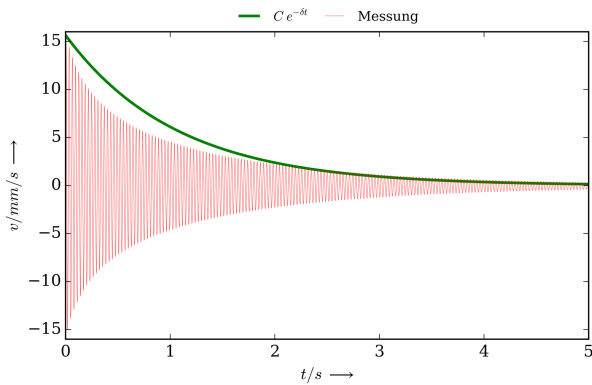


Abbildung 3: Geschwindigkeitsverlauf der abklingenden Schwingung

Um sicher zu stellen, dass es sich hierbei tatsächlich um einen Einfluss der Amplitude auf die Dämpfung handelt wurde der Versuch mit verschiedenen Anfangsamplituden durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abb. 4 dargestellt. Anhand des Mittelwertes lässt sich eine Steigerung der Dämpfung mit zunehmender Amplitude feststellen. Die Streuung der Proben ist in der gleichen Größenordnung wie die Amplitudenabhängigkeit, was durch die mangelnde Qualität der Anpassung erklärt werden kann.

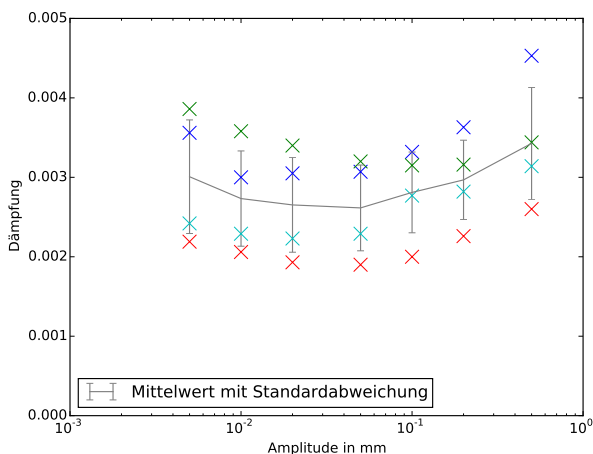


Abbildung 4: Geschwindigkeitsverlauf der abklingenden Schwingung

Zusammenfassung und Ausblick

Die Amplitudenabhängigkeit des Verbundmaterials konnte experimentell bestätigt werden. Die numerischen Ergebnisse zur Schalleistung zeigen, dass das Schwingungsverhalten des Verbundes primär von der Dämpfung des Kernwerkstoffes beeinflusst wird. Das heißt, dass die gefunden Amplitudenabhängigkeit der Verbunde maßgeblich im Kernwerkstoff zu suchen ist. Die bekannte Amplitudenabhängigkeit [7] der Deckbleche spielt für akustische Problemstellungen keine Rolle.

Bezüglich der Schalleistung konnte ein eindeutiger Einfluss der Kerndämpfung gezeigt werden. Um jedoch zu zeigen, ob die Amplitudenabhängigkeit einen Einfluss auf

die Schalleistung hat muss in einem weiteren Schritt die Größenordnung der Dämpfung des Kernwerkstoffes in Abhängigkeit einer Amplitude genau bestimmt werden. In der hier durchgeführten Charakterisierung wurde eine modale Dämpfung ermittelt, welche für das gesamte Werkstoffsystem gilt. Für die numerische Berechnung sind jedoch die Dämpfungswerte der einzelnen Materialien nötig. Hier könnten vergleichende Simulationen zwischen Einzelwerten für jede Schicht und einem gemittelten Werte für alle Schichten des Verbunds einen Anhaltspunkt liefern, wie die modale Dämpfung im Verhältnis zur Dämpfung des Kerns steht. Um eine Aussage über die tatsächliche Relevanz dieser Amplitudenabhängigkeit für numerische akustische Probleme treffen zu können, müssen außerdem die tatsächlichen Schwingungsamplituden in realen Problemstellungen quantifiziert werden. Hierzu ist es notwendig eine Vergleichsgröße zu finden, welche sowohl für die experimentelle Ermittlung der Dämpfung als auch für das reale Schwingungsverhalten der Struktur ermittelt werden können. Eine möglich Größe, welche bereits für den Vergleich unterschiedlicher Spannungszustände während der Dämpfungsermittlung genutzt wurde ist die im Material vorhandene Dehnungsenergie [8].

Im Anschluss kann ein nicht lineares Dämpfungsmodell, welches sich an der vorliegenden Dehnungsenergie an jedem Punkt im Material orientiert, entwickelt werden. Dieses ermöglicht dann eine genauere Berechnung akustischer und mechanischer Probleme für Materialien mit amplitudenabhängiger Dämpfung.

Förderhinweis

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektes DFG-KR 1713/18-1 ‘Schallabstrahlung bei nichtlinearem und lokal variierendem Dämpfungsverhalten von Mehrlagenverbunden’ erarbeitet, welches durch die *Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)* gefördert wird.

Literatur

- [1] Matthias Klaerner, Mario Wuehrl, Lothar Kroll, and Steffen Marburg. Fea-based methods for optimising structure-borne sound radiation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 89:37 – 47, 2017.
- [2] D. Fritze, S. Marburg, and H.-J. Hardtke. Estimation of radiated sound power: A case study on common approximation methods. *Acta Acustica united with Acustica*, 95(5):833–842, 2009.
- [3] Hans Dresig and Franz Holzweißig. *Maschinendynamik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [4] Thyssen Krupp Stahl AG. Bondal - körperschalldämpfender verbundwerkstoff, März 2001.
- [5] Thyssen Krupp Stahl AG. Produktinformation bondal - das stahl-sandwichblech zur effektiven reduzierung von körperschall, September 2008.

- [6] M. Klaerner, S. Marburg, and L. Kroll. Vibro-acoustic characterisation of thermoplastic fibre reinforced composites. In *20th International Congress on Acoustics 2010, ICA 2010*, volume 2, pages 1473–1478, 2010.
- [7] Cyril Harris and Allan Piersol. *Harris' Shock and Vibration Handbook*. McGraw-Hill Professional, 2001.
- [8] Mario Wuehrl, Matthias Klaerner, and Lothar Kroll. Fea-based design of experiment for the damping determination of thermoplastic-rubber compounds. *Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, 181:437–446, 2016.