

Entwicklung und Charakterisierung einer programmierbaren vibroakustischen Einheitszelle zum gezielten Einstellen von Dämpfungseigenschaften

L.S. Kollmannsperger^{1,2,*}, W. Kaal^{1,3}, M.M. Becker^{1,2}, S.C.L Fischer^{1,2,*}

¹ Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien,
Wöhlerstraße 11, 79108 Freiburg, Deutschland.

² Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP,
Campus E3.1, 66123 Saarbrücken, Deutschland.

³ Fraunhofer Institute für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF,
Bartningstraße 47, 64289 Darmstadt, Deutschland.

* Korrespondierender Autor: lea.sophie.kollmannsperger@izfp.fraunhofer.de, sarah.fischer@izfp.fraunhofer.de

Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine programmierbare vibroakustische Einheitszelle entwickelt und hinsichtlich der akustischen und vibromechanischen Eigenschaften charakterisiert. Beim Design der Einheitszelle wurde Wert darauf gelegt, Holz als nachwachsenden Rohstoff als Grundmaterial zu verwenden.

Einleitung

In Zeiten, in denen Sicherheits-, Komfort- und Umweltaforderungen eine große Bedeutung haben, stehen Ingenieure vor der Herausforderung, Bauteile gemäß diesen Anforderungen zu entwickeln. Gerade im Bereich der Lärmreduktion besteht ein großer Bedarf an anwendungsspezifisch maßgeschneiderten Lösungen. Die einfachste Methode zur Reduzierung von Lärm und Strukturschwingungen besteht darin, eine geeignete Werkstoffauswahl zu treffen und Bauteile möglichst groß und schwer zu dimensionieren. Dabei sollte jedoch die Ressourcenschonung nicht vernachlässigt werden. Abhilfe können hierbei die vibro-akustischen Metamaterialien (VAMM) schaffen, welche durch negative Interferenz sowie negative Steifigkeiten oder Massen die Körperschallausbreitung und Schallabstrahlung in einen vorgegebenen Frequenzbereich beeinflussen. Diese bestehen entweder aus einem Array an verteilten Masselementen (Braggeffekt) oder aus einer Grundstruktur mit periodischen lokalen Resonatoren [1], wodurch eine Überdimensionierung von Bauteilen nicht mehr notwendig ist und Material eingespart werden kann. Typische Resonatorbauformen sind membranartige Strukturen [2], Biegebalken oder Säulen [3]. Die Wechselwirkung der Strukturschwingung mit der Resonanzschwingung der lokalen Resonatoren führt zu spezifischen Stoppbändern [1]. Lage und Breite der Stoppbänder im Frequenzbereich können durch die Größe der Einheitszelle, die effektive Resonatormasse, das verwendete Material und die Struktureigenschaften beeinflusst werden, was eine große Flexibilität für eine anwendungsspezifische Anpassung ermöglicht.

Typischerweise werden VAMM so ausgelegt, dass sie in einem bestimmten Frequenzbereich ihre schwingungsmindernde Wirkung zeigen. Hierzu werden die Stoppbänder auf der Basis von Material und Dimensionierung des VAMMs berechnet und danach experimentell mit akustischen Charakterisierungsmethoden verifiziert. Urban et al. [4] beschäftigten sich in ihrer Studie mit der Bestimmung der akustischen Eigenschaften von membranartigen

Strukturelementen durch Auswertung von Oberflächenverschiebungen. Für die Messungen in dieser Studie wurde ein akustisches Messrohr verwendet, in dem die Membran mit einem durch einen Lautsprecher erzeugten Signal angeregt wurde. Die Oberflächenverschiebung konnte mittels Laservibrometrie bestimmt und daraus charakteristische akustische Parameter abgeleitet werden. In der Studie von Manushyna et al. [5] wurden VAMM charakterisiert, die aus einer Grundplatte mit periodisch aufgetragenen Säulen- oder Balkenstrukturen bestehen. Die Dämpfungseigenschaften wurden bestimmt, indem die VAMM mit einem Hammer zu Strukturschwingungen angeregt und die Beschleunigungen an verschiedenen Stellen der Struktur aufgezeichnet wurden. Die Charakterisierung wurde in dieser Studie durch die optische Erfassung der Strukturschwingungen erweitert. In einer Studie von Droste et al. [6] wurde eine VAMM-Struktur mit einem elektrodynamischen Schwingerreger angeregt und die Strukturantwort über Luftschall mit Richtmikrofonen erfasst. Zusätzlich wurde die Strukturantwort mit Hilfe von Beschleunigungssensoren ermittelt. Anhand der gezeigten Studien lässt sich erkennen, dass bereits eine Vielzahl von VAMM entwickelt wurden. Diese werden in aller Regel für einen speziellen Anwendungsfall ausgelegt, sodass in dem spezifischen Frequenzbereich ein Stoppband auftritt. Allerdings ist aus der Literatur bekannt, dass die akustische Emission und die Strukturschwingung stark von externen Faktoren wie der Art der Belastung und der Temperatur abhängig sind. Abhilfe könnten hierbei aktive Dämpfungsstrukturen schaffen, wie eine Studie von Kaal et al. [7] zeigt. Sie konnten in ihrer Studie ein veränderliches Dämpfungsverhalten eines mechanischen Metamaterials unter dynamischer Last aufzeigen. Die Zelle zeigte bei geringeren Dehnraten eine geringere Dämpfung, wohingegen die Dämpfung bei höheren Dehnraten deutlich anstieg.

Aus diesem Grund fokussiert sich diese Studie auf das Design eines programmierbaren VAMMs (PVAMM), dessen Wirkungsbereich sich durch Anlegen eines äußeren Triggers, wie der Änderung des Innendrucks der Zelle, verschiebt. Zudem soll als Grundmaterial Holz als nachwachsender Rohstoff verwendet werden. Um den Einfluss der Änderung der Druckverhältnisse und des Materials umfassend zu verstehen, ist es wichtig, sowohl die strukturdynamische Reaktion als auch die daraus resultierende akustische Abstrahlung zu charakterisieren. Zu diesem Zweck werden die Proben in dieser Studie mit verschiedenen Anregungsmodi (mechanisch oder akustisch) angeregt und

die strukturelle Reaktion aufgezeichnet, sowohl als Strukturschwingung als auch als akustische Emission.

Design und Herstellung der PVAMM-Einheitszelle

Um die Nutzbarkeit von Holz als nachwachsenden Rohstoff im Bereich der vibro-akustischen Metamaterialien und die Einstellbarkeit von Dämpfungsbereichen durch einen externen Trigger nachzuweisen, wird eine Demonstrator-Einheitszelle aufgebaut. Das Grundgerüst dieser Zelle besteht aus einer 9 mm dicken Holzplatte, in deren Mitte sich eine Aussparung befindet. In diese Aussparung wird eine konische Stahlmasse mit einem Gewicht von 27,9 g konzentrisch eingelegt. Die einzelnen Bestandteile werden durch die Verklebung mit einer 1 mm dicken Silikonmatte miteinander verbunden. Die zusätzliche Anbringung eines Ventils, welches direkt mit der Aussparung verbunden ist, ermöglicht die Regulierung des Drucks innerhalb der Einheitszelle.

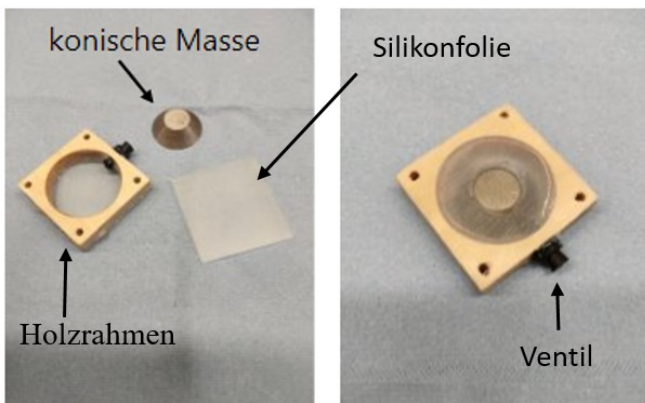


Abbildung 1. Darstellung der PVAMM Probe: links: Darstellung der einzelnen Komponenten (konische Stahlmasse, Holzrahmen und Silikonfolie), rechts: Zusammengesetzte Probe.

Experimentelle Validierung

Experimentell wurden die akustischen Eigenschaften bzgl. der Schall-Transmission sowie die vibromechanischen Eigenschaften der Einheitszelle in Abhängigkeit vom Innendruck der Zelle untersucht.

Vibromechanische Charakterisierung

Um die Einheitszelle vibromechanisch zu charakterisieren, wurde die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit des Innendrucks ermittelt. Dazu wurde die Einheitszelle mit einem Adapter auf einem Impedanzmesskopf montiert und mit einem elektrodynamischen Schwingerreger breitbandig mit weißem Rauschen in vertikaler Richtung zu Schwingungen angeregt (siehe Abbildung 2). Der Innendruck wurde über eine Handpumpe zwischen 0 und 0.75 bar variiert.

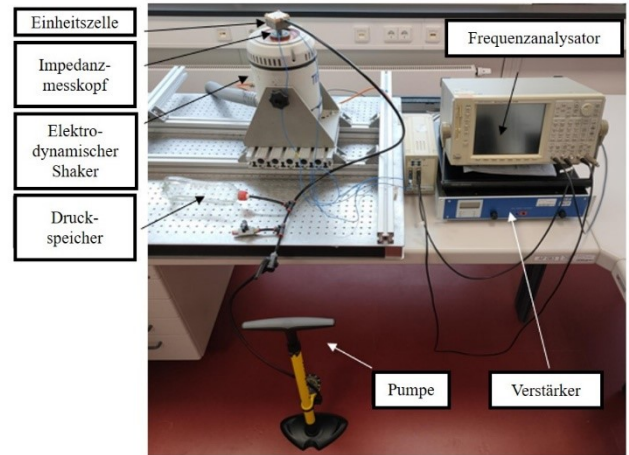


Abbildung 2. Experimentelles Set-up der vibromechanischen Messungen, bestehend aus den Komponenten Frequenzanalysator, Verstärker, elektrodynamischer Shaker mit Impedanzmesskopf und Druckregulierungssystem (Druckspeicher und Pumpe).

Durch die Auswertung der Kraft- und Beschleunigungssignale im Frequenzbereich wurde für jeden Innendruck die charakteristische Übertragungsfunktion der Zelle ermittelt (vgl. Abbildung 3). Sowohl aus der Betrachtung der Amplitude als auch aus der Betrachtung der Phase lässt sich eine Verschiebung des Maximums und des Minimums der Messkurven zu höheren Frequenzen bei steigendem Innendruck der Zelle erkennen. Mit dieser Verschiebung geht direkt eine Verschiebung des Stoppbands zu höheren Frequenzen einher. Anhand der Schärfe des Übergangs des Maximums zum Minimum der Amplitude und anhand der Tiefe und Breite des negativen Peaks in der Betrachtung der Phase, lassen sich bereits qualitativ die Dämpfungseigenschaften erkennen. Je unschärfer der Übergang des Maximums zum Minimum der Amplitude der Übertragungsfunktion und je flacher der negative Peak der Phase, desto größer ist die effektive Dämpfung des PVAMMs.

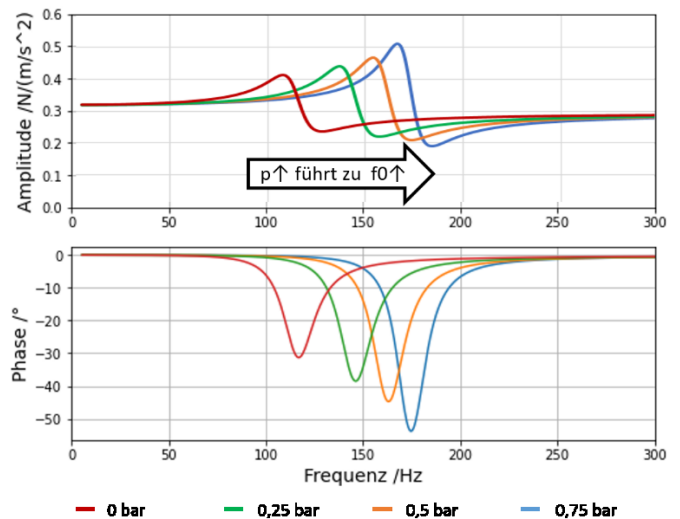


Abbildung 3. Experimentelle Messergebnisse der vibromechanischen Messung. Oben: Amplitude in Abhängigkeit der Frequenz, unten: Phase in Abhängigkeit der Frequenz.

Die experimentell bestimmte Übertragungsfunktion der Einheitszelle wurde zum Abgleich mit einem analytischen Vier-Parameter-Modell verwendet (siehe Abbildung 4). Dieses Modell besteht aus einer Feder mit Steifigkeit k , einem Dämpfer mit Dämpfungskonstante d und zwei Massen (m_1 und m_2).

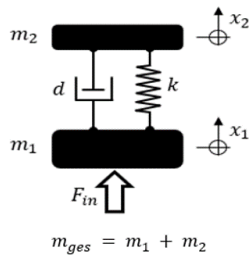


Abbildung 4. Beschreibung eines Vier-Parametermodells bestehend aus einer Feder mit Federsteifigkeit k , einem Dämpfer mit Dämpfungskonstante d und 2 Massen m_1 und m_2 zum Abgleich mit den experimentellen Messwerten.

Auf diese Weise konnten die effektive Steifigkeit k sowie die effektive Dämpfung D der Einheitszelle für jede Messung als physikalischer Parameter quantitativ ermittelt werden. Über eine geeignete Interpolation kann schließlich jedem Innendruck ein Wert für die Steifigkeit und Dämpfung zugeordnet werden. Aus Abbildung 5 lässt sich ableiten, dass die effektive Dämpfung mit steigenden Innendruck von 8 % bei 0 bar auf 4% bei 0,75 bar abnimmt, wohingegen die effektive Steifigkeit von 13 Nmm^{-1} auf 32 Nmm^{-1} zunimmt. Durch den Abgleich der Messwerte mit dem analytischen Modell lässt sich zudem die Frequenzverschiebung quantifizieren, sodass sich bei Erhöhung des Innendrucks um 0,75 bar eine Frequenzverschiebung von 57 Hz ergibt.

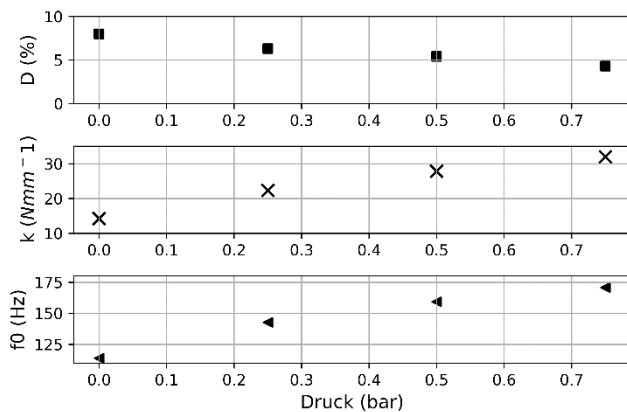


Abbildung 5: Bestimmung der effektiven Dämpfung, effektiven Steifigkeit und der Resonanzfrequenz durch Abgleich der Messergebnisse mit dem analytischen Modell.

Akustische Charakterisierung

Die akustischen Reflexions- und Transmissionseigenschaften wurden mit einem an ein Impedanzrohr angelehnten Messaufbau charakterisiert (siehe Abbildung 6). Dieser besteht aus reflexionsarmen Schaumstoffblöcken (30 cm x 30 cm x 10 cm, Basotec®), in deren Mitte sich ein Schallkanal mit einem Durchmesser von 6 cm befindet. Durch diesen Kanal wird der Schall von einem senkrecht zur Kanalrichtung

einschallenden Lautsprecher zur Probe in der Mitte des Aufbaus eingeleitet. Die Anregung der Probe erfolgt mit weißem Rauschen. Zur Signalgenerierung und Aufnahme wird die open-source-Software Audacity (das Audacity Entwickler Team, Deutschland) verwendet. Die Messungen werden jeweils für Innendrucke von 0 bis 0,75 bar in 0,25 bar Schritten durchgeführt. Das Einstellen des Drucks erfolgte mit einem pneumatischen Systems.

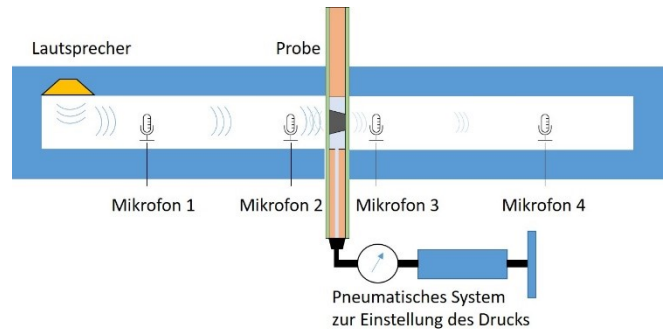


Abbildung 6: Messaufbau zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften der PVAMM Einheitszelle in Abhängigkeit des Innendrucks.

Ausgewertet wurde das Gesamtniveau der Energie in einem Frequenzbereich (siehe Abbildung 7) hinter der Probe, d.h. des transmittierten Signals. Erkennbar ist, dass sich bei zunehmendem Druck das Maximum der Messkurve zu höheren Frequenzen verschiebt. Dies spiegelt die Beobachtungen der vibromechanischen Messungen wieder. Auch der Frequenzbereich in dem diese Verschiebung auftritt, liegt innerhalb des in den vibromechanischen Messungen ermittelten Frequenzbereichs.

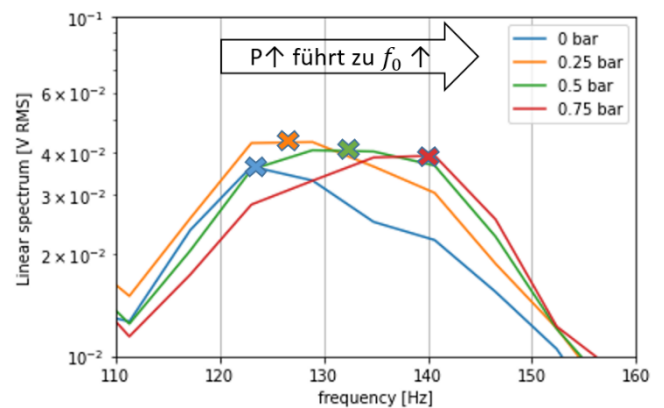


Abbildung 7 Veränderung der experimentell bestimmten Transmission von akustischen Signalen bei verschiedenen Drücken.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeiten wurde eine PVAMM Einheitszelle zur gezielten Einstellung von akustischen Eigenschaften ausgelegt, prototypisch hergestellt, die effektive Eigenschaften der Einheitszelle anhand vibromechanischer Untersuchungen identifiziert und hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften in Transmission charakterisiert. Untersucht wurden die Eigenschaften einer PVAMM-Einheitszelle in Abhängigkeit des Drucks innerhalb

der Zelle. Die Messergebnisse zeigen, dass Stoppbänder identifiziert werden konnten und diese sich mit Anlegen eines höheren Innendrucks zu höheren Frequenzen verschieben. Der Ansatz zeigt, dass es möglich ist, ein VAMM zu designen und durch externe Trigger auf sich ändernde Umwelteinflüsse anzupassen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde teilweise durch ein Fraunhofer-internes Programm mit der Förderkennziffer Attract 025-601314 finanziert, das an S.C.L. Fischer vergeben wurde. Diese Arbeit wurde auch teilweise vom Fraunhofer-Exzellenzcluster "Programmierbare Metamaterialien" finanziert.

Literatur

- [1] Claeys, C.: Design and Analysis of Resonant Metamaterials for Acoustic Insulation. KU Leuven, Dissertation (2014)
- [2] Langfeldt, Felix, et al. "A membrane-type acoustic metamaterial with adjustable acoustic properties." *Journal of Sound and Vibration* 373 (2016): 1-18.
- [3] Droste, Marvin, et al. "Vibroakustische Metamaterialien zur Reduktion der Schallabstrahlung einer elektrischen Antriebseinheit." *MTZ-Motortechnische Zeitschrift* 84.4 (2023): 44-47.
- [4] Urbán, D., Roozen, N. B., Jandák, V., Brothánek, M., and Jiříček, O., "On the Determination of Acoustic Properties of Membrane Type Structural Skin Elements by Means of Surface Displacements," *Applied Sciences*, V. 11, No. 21, 2021, p. 10357.
- [5] Manushyna, D., Hülsebrock, M., Kuisl, A., Vivo, A. de, Heloret, P., Atzrodt, H., and Rapp, S., "Application of vibroacoustic metamaterials for structural vibration reduction in space structures," *Mechanics Research Communications*, V. 129, 2023, p. 104090.
- [6] Droste, M., Manushyna, D., Rieß, S., Atzrodt, H., Druwe, T., Melzer, S., Struß, A., and Lühring, A., "Design and validation of production-suited vibroacoustic metamaterials for application in a vehicle door," *Fortschritte der Akustik-DAGA*, 2021, p. 1647.
- [7] Kaal W, Becker MM, Specht M, Fischer SCL. Design framework for programmable mechanical metamaterial with unconventional damping properties under dynamic loading conditions. *Programmable Materials*. 2023.