

# Einfluss von Nebenwegen auf die Schalldämmung von akustischen Metamaterialien

Felix Langfeldt\*, Wolfgang Gleine

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 20099 Hamburg, Deutschland

\* E-mail: felix.langfeldt@haw-hamburg.de

## Einleitung

Akustische Metamaterialien besitzen ein großes Potential zur Verbesserung der Schallisolationseigenschaften konventioneller Schallschutzmaßnahmen, insbesondere im Bereich tiefer Frequenzen. Diese Metamaterialien zeichnen sich durch einen periodischen Aufbau aus mehreren im Vergleich zur akustischen Wellenlänge kleinen Einheitszellen mit lokal resonantem Verhalten aus. Solche Strukturen können in bestimmten Frequenzbereichen ein für eine einfallende Schallwelle effektiv wirksames Materialverhalten aufweisen, das sich deutlich von den tatsächlichen Materialparametern der eingesetzten Werkstoffe unterscheiden kann (z. B. negative Dichte oder negativer Brechungsindex) [1]. Von den so genannten Membran-Metamaterialien ist z. B. weitgehend bekannt, dass diese Strukturen trotz ihrer prinzipiell sehr geringen Masse und Bauhöhe in ihren akustischen Eigenschaften Frequenzbereiche aufweisen können, in denen das Schalldämmmaß das zugehörige Massegesetz deutlich übersteigt [2]. Aufgrund dieser positiven Eigenschaften ist der Einsatz von Membran-Metamaterialien auch in Anwendungsfällen mit strengen Anforderungen an den Schallschutz denkbar, z. B. in Flugzeugseitenwänden [3].

In den meisten praktischen Anwendungsfällen ist es oftmals nicht möglich, auf Metamaterialien basierende Schallschutzmaßnahmen vollflächig zu verteilen. Im Flugzeug stellen z. B. die Fensteröffnungen und andere so genannte Cut-outs unvermeidliche akustische Nebenwege dar, durch die Luftschall am Metamaterial vorbei transmittiert werden kann. Auch lassen sich Körperschallbrücken (z. B. Befestigungspunkte) oftmals nicht verhindern, da die Metamaterialien an der akustisch zu verbessernden Struktur fixiert sein müssen.

Bei konventionellen Schallschutzmaßnahmen ist der Einfluss von Nebenwegen über Luft- und Körperschallpfade bekannt [4]. Aufgrund des zum Teil deutlich unterschiedlichen akustischen Verhaltens von akustischen Metamaterialien im Vergleich zu homogenen Wänden und fehlender entsprechender Untersuchungen in der Literatur ist der Einfluss solcher Nebenwege bei Metamaterialien eine offene Fragestellung. Der vorliegende Beitrag stellt erste Untersuchungsergebnisse zur Klärung dieser Frage vor. Diese Untersuchungen wurden am Beispiel eines leichtgewichtigen Metamaterial-Films, der im folgenden Abschnitt näher beschrieben wird, durchgeführt. In den darauffolgenden Abschnitten werden der Einfluss eines Spalts sowie der Einfluss einer Körperschallbrücke auf die akustischen Eigenschaften des Metamaterials mit Hilfe von Experimenten, sowie analytischen und numerischen Berechnungsverfahren untersucht.

## Beschreibung des Metamaterials

Das in dieser Arbeit untersuchte akustische Metamaterial ist ein dünner und leichtgewichtiger Film mit periodisch aufgesetzten Massen, basierend auf den Untersuchungsergebnissen von Kurtze [5]. Es wurde ein 100  $\mu\text{m}$  dicker PET-Film mit einer Flächenmasse von  $m''_{\text{Film}} = 150 \text{ g/m}^2$  und Abmessungen von 50 cm  $\times$  50 cm verwendet, auf den in einem quadratischen Raster mit der Gitterweite  $a = 35 \text{ mm}$  insgesamt 169 Polyamid-Ringmassen (je  $M = 0,39 \text{ g}$ , Außendurchmesser  $d_{M,a} = 18 \text{ mm}$ , Innendurchmesser  $d_{M,i} = 6,4 \text{ mm}$ ) aufgeklebt wurden. Abb. 1 zeigt den generellen Aufbau sowie eine detailliertere Ansicht der Einheitszellen des Metamaterial-Films. Die Gesamtflächenmasse des Metamaterials ergibt sich damit zu  $m''_{\text{Meta}} = 420 \text{ g/m}^2$ , was 2,8-mal so groß ist wie die Flächenmasse des PET-Films alleine.

Das Schalldämmmaß  $R$  dieser Probe wurde gemäß ISO 15186-1 [6] in einem Transmissionsprüfstand im Akustiklabor der HAW Hamburg ermittelt. Hierfür wurde in einem Hallraum ein diffuses Schallfeld erzeugt und der resultierende räumlich gemittelte Schallpegel mit einem rotierenden Mikrofon gemessen. Der Metamaterial-Film wurde mit Klebeband auf einem schweren Holzrahmen im Transmissionsfenster befestigt. Dabei wurde dar-

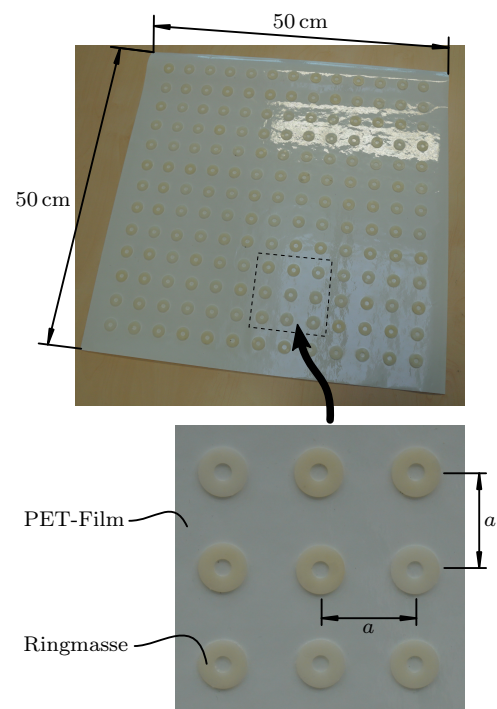


Abbildung 1: Aufbau des untersuchten Metamaterial-Films.

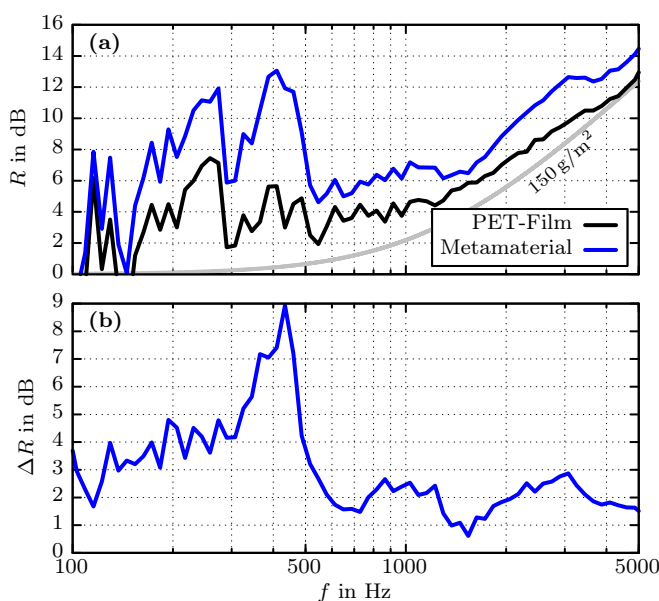
auf geachtet, dass der Film bei der Befestigung nicht unter Vorspannung stand. Die durch die Probe transmittierte Schalleistung wurde im Empfangsraum, einem reflexionsarmen Halbraum, mit Hilfe einer Schallintensitätssonde gemessen. Alle Messungen wurden in 1/12-Oktavbändern zwischen 100 und 5000 Hz durchgeführt.

Abb. 2 zeigt die Messergebnisse für den Metamaterial-Film (blau) und den PET-Film ohne Massen (schwarz) als Referenz. Die graue Kurve stellt das Schalldämmmaß nach dem Massegesetz für diffuse Schallfeldanregung, abgeschätzt nach der Formel

$$R_{\text{masse}} \approx 10 \lg \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\pi f m''}{\rho_0 c_0} \right)^2 \right] \quad [7] \quad (1)$$

bei der Flächenmasse des PET-Films, dar. Die beiden in Abb. 2(a) gezeigten Messkurven nähern sich bei hohen Frequenzen dem Verlauf des Massegesetzes an. Dabei ist die Schalldämmung des Metamaterials aufgrund der größeren Masse höher als die des PET-Films. Bei tiefen Frequenzen sind insbesondere unterhalb 500 Hz deutliche Abweichungen vom Verlauf des Massegesetzes zu erkennen. Diese sind auf die im Vergleich zur Wellenlänge kleinen Abmessungen der Proben und (aufgrund der vergleichsweise geringen Schalldämmung der Filme) modale Kopplungen zwischen den Messräumen zurückzuführen.

Das in Abb. 2(b) gezeigte Einfügeschalldämmmaß, d. h. die Differenz aus den Schalldämmmaßwerten von Metamaterial und PET-Film, wird nicht so stark von diesen Messraumbedingungen beeinflusst. Dort ist zu erkennen, dass das Metamaterial bei etwa 410 Hz eine gegenüber dem PET-Film um bis zu 9 dB verbesserte Schalldämmung aufweist. Dies ist auf die Anti-Resonanz des Metamaterials zurückzuführen und wird im Folgenden auf mögliche Einflüsse durch akustische Nebenwege untersucht.



**Abbildung 2:** Messergebnisse für den PET-Film und Metamaterial-Film. (a) Schalldämmmaß; (b) Einfügeschalldämmmaß gegenüber dem PET-Film.

## Einfluss eines Spalts

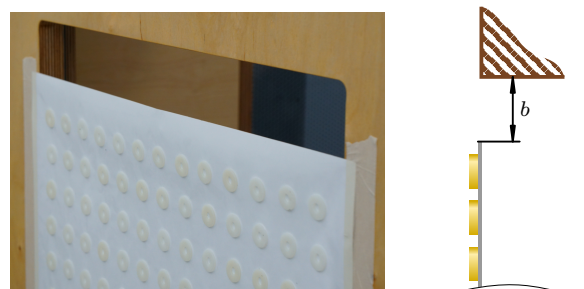
Die Anti-Resonanz des Metamaterials führt zu einer vergleichsweise hohen Schalldämmung und damit verbunden zu einer starken Reduktion der transmittierten Schallwellen. Dadurch entsteht zwischen Ober- und Unterseite des Metamaterials eine große Druckamplitudendifferenz. Wird ein Spalt in das Metamaterial eingefügt, stellt sich die Frage, ob diese Druckdifferenz möglicherweise durch einen akustischen Kurzschluss ausgeglichen und dadurch dieser Anti-Resonanzeffekt wieder aufgehoben wird. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass in diesen vergleichsweise tiefen Frequenzen Beugungseffekte und Interferenzen der durch das Metamaterial und den Spalt transmittierten Schallfelder zu einer weiteren Beeinflussung der akustischen Eigenschaften des Metamaterials führen. Diese Hypothesen sollen mit dem folgenden Experiment überprüft werden.

Im Messaufbau wurde ein Luftspalt der Breite  $b$  eingefügt, indem, wie in Abb. 3 gezeigt, der Metamaterial-Film auf der Öffnung im Messrahmen verschoben wurde. Abb. 4 zeigt für verschiedene Spaltbreiten von 5 bis 50 mm das gemessene Einfügeschalldämmmaß  $\Delta R$  gegenüber dem PET-Film. Generell ist in allen vier Ergebnissen zu erkennen, dass ein Spalt – wie bei konventionellen Schallschutzwänden auch – zu einer Reduktion des Schalldämmmaßes führt. Man sieht aber auch, dass diese Reduktion für sehr kleine Spalte deutlich weniger ausgeprägt ist als bei großen Spaltbreiten. So ist die Anti-Resonanz bei  $b = 5$  mm noch deutlich zu erkennen, während beim 50 mm breiten Spalt das  $\Delta R$ -Maximum stark abgeflacht ist.

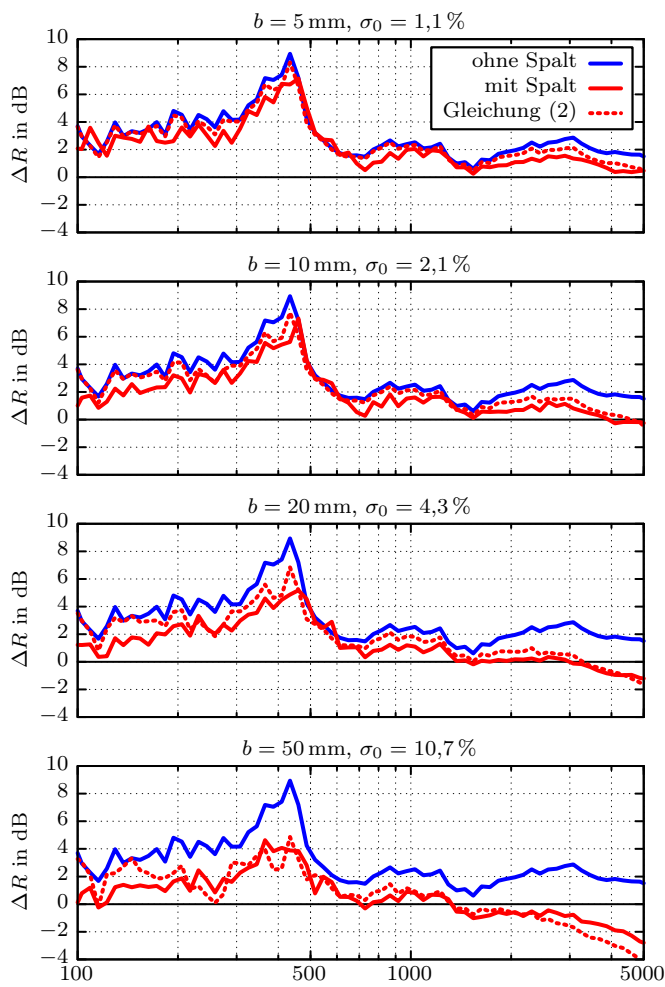
Für Trennwände, die aus Teilflächen mit unterschiedlichen Schalldämmmaßen zusammengesetzt sind, lässt sich bekannterweise ein Gesamtschalldämmmaß  $R_{\text{ges}}$  abschätzen, indem die Transmissionsgrade der einzelnen Teilflächen gewichtet aufsummiert werden [4]. Nimmt man als erste Näherung für den Spalt ein Schalldämmmaß von  $R_{\text{Spalt}} \approx 0$  an, so erhält man folgende Abschätzungsformel für das Gesamtschalldämmmaß des Metamaterials mit Spalt:

$$R_{\text{ges}} = -10 \lg \left[ (1 - \sigma_0) 10^{-\frac{R_{\text{Meta}}}{10}} + \sigma_0 \right], \quad (2)$$

worin  $R_{\text{Meta}}$  das Schalldämmmaß des Metamaterials ohne Spalt und  $\sigma_0 = b/(0,47 \text{ m})$  der Spaltflächenanteil ist.



**Abbildung 3:** Messaufbau für den Metamaterial-Film mit einem Spalt (Spaltbreite  $b$ ).



**Abbildung 4:** Mess- und Berechnungsergebnisse für das Einflügeschalldämmmaß vom Metamaterial gegenüber dem PET-Film bei unterschiedlichen Spaltbreiten  $b$ .

Das mit Gleichung (2) abgeschätzte Gesamtschalldämmmaß ist in Abb. 4 für die verschiedenen Spaltbreiten als gepunktete Linien dargestellt. Man erkennt, dass es trotz dieses einfachen Ansatzes eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen  $\Delta R$ -Werten gibt. Dies lässt den Schluss zu, dass der Spalteinfluss beim Metamaterial (wie auch schon von konventionellen Schallschutzwänden bekannt) von der Transmission von Schalleistung durch den Spalt beeinflusst wird. Der vermutete Einfluss vom Druckausgleich sowie Beugung und Interferenzen am Spalt kann anhand dieser Ergebnisse als von untergeordneter Bedeutung erachtet werden.

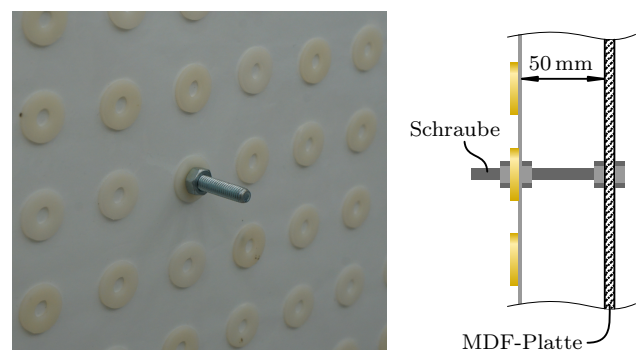
### Einfluss einer Körperschallbrücke

Von Doppelwänden ist z. B. bekannt, dass strukturelle Kopplungen wie Bolzen oder Leisten zu einer deutlichen Reduktion der Luftschalldämmung einer Doppelwand führen können [8]. Da die Anti-Resonanz von Metamaterialien zu einer starken Luftschallentkopplung führen kann, stellt sich die Frage, ob dies in Aufbauten mit Befestigungspunkten für ein Metamaterial durch Schallnebenwege über Körperschallbrücken beeinträchtigt werden kann. Um den Einfluss einer Körperschallbrücke zu untersuchen wurde der Versuchsaufbau wie in Abb. 5 dar-

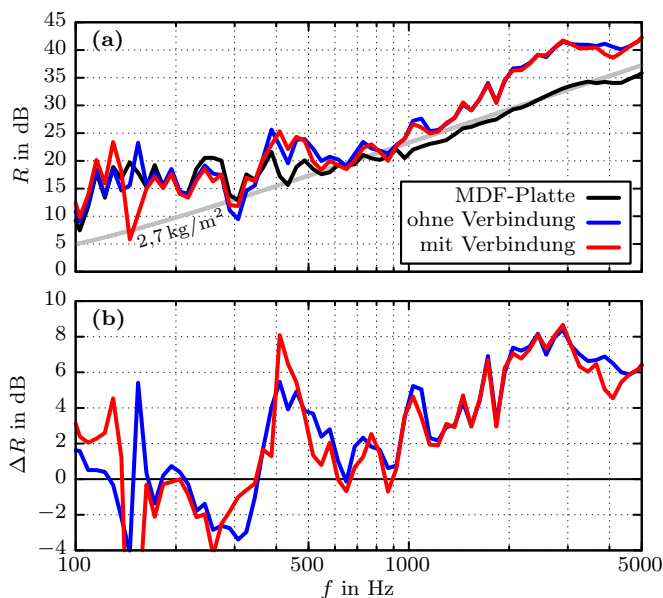
gestellt abgeändert. Der Metamaterial-Film wurde in einem Abstand von 50 mm vor eine MDF-Platte ( $m''_{\text{MDF}} = 2,7 \text{ kg/m}^2$ ), die als Grundplatte dienen soll, eingebaut. Als Körperschallbrücke wurde eine M6-Schraube in der Mitte der Platte verwendet, die mit Hilfe von Muttern fest mit der Platte und einer Masse des Metamaterials verbunden war.

Abb. 6 zeigt die Messergebnisse für diesen Aufbau. Die schwarze Kurve stellt den Schalldämmmaßverlauf der MDF-Platte dar (mit der in grau dargestellten zugehörigen Massegesetz-Kurve gemäß Gleichung (1)). Die blauen und roten Kurven entsprechen den Messergebnissen für die Kombination aus Metamaterial und MDF-Platte ohne und mit Körperschallbrücke. Es ist zu erkennen, dass diese beiden Kurven fast über den gesamten Messbereich hinweg nahezu gleich verlaufen. Um 410 Hz ist in Abb. 6(a) eine Verbesserung vom Schalldämmmaß der MDF-Platte durch die Anti-Resonanz des Metamaterials zu erkennen. Bei Frequenzen ab ca. 700 Hz verbessert sich das Schalldämmmaß zusätzlich, was auf einen Doppelwandeffekt zurückgeführt werden kann. Bei den in Abb. 6(b) dargestellten Schalldämmmaßdifferenzen wird noch einmal deutlich, dass die Körperschallbrücke in diesem Versuchsaufbau keinen Einfluss hat. Es ist sogar zu erkennen, dass das  $\Delta R$  mit der Körperschallbrücke im Bereich der Anti-Resonanz deutlich größer ist als ohne Körperschallbrücke. Dies wird aber vor allem auf eine mögliche Frequenzverschiebung durch den Masseintrag des Bolzens und ein besseres Treffen der 1/12-Oktavbänder zurückzuführen sein, als auf eine tatsächliche Verbesserung der Schalldämmung.

Um den geringen Einfluss der Körperschallbrücke qualitativ besser zu verstehen wurden zusätzlich Finite-Elemente-Simulationen des Messaufbaus für verschiedene Bolzenabstände  $d$  in Relation zur Einheitszellengröße  $a$  durchgeführt. Abb. 7 zeigt in einer Querschnittsdarstellung die simulierten Verformungen des Metamaterials und der MDF-Platte bei der Anti-Resonanzfrequenz. Im Fall ohne Bolzenverbindung ( $d/a = \infty$ ) ist zu erkennen, dass die MDF-Platte und das Metamaterial unabhängig von einander schwingen. Das Metamaterial weist dabei die für die Anti-Resonanz typische Schwingform auf. Wenn der Metamaterial-Film über Bolzen mit der MDF-Platte verbunden wird, dann ist eine Beeinflussung der

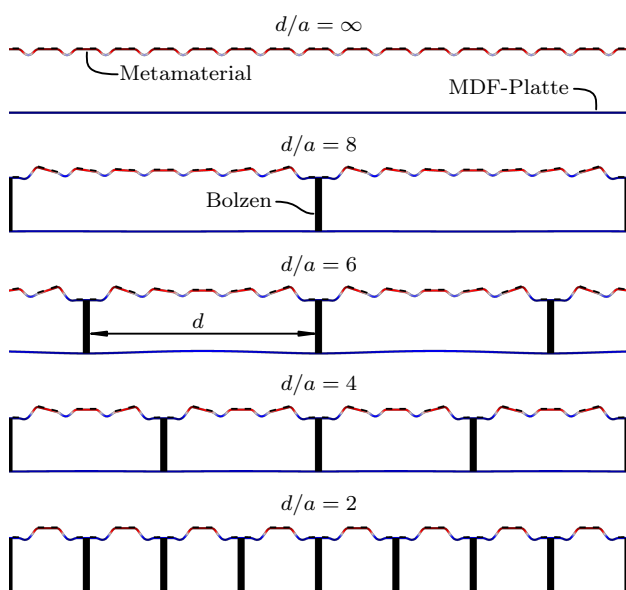


**Abbildung 5:** Messaufbau für den Metamaterial-Film mit MDF-Platte und einer Körperschallbrücke in der Mitte.



**Abbildung 6:** Messergebnisse für die MDF-Platte mit Metamaterial-Film und Körperschallbrücke. (a) Schalldämmmaß; (b) Einfügeschalldämmmaß gegenüber der MDF-Platte.

Schwingung des Metamaterials nur innerhalb 1–2 Einheitszellen Entfernung von der Kopplungsstelle zu erkennen. Der Rest des Metamaterials schwingt nahezu genauso wie ohne Körperschallbrücken. Dies ist vor allem auf die geringe Biegesteifigkeit des verwendeten PET-Films zurückzuführen. An dieser Stelle sollte angemerkt werden, dass bei anderen Metamaterialien (z. B. den in [3] verwendeten Membran-Metamaterialien mit vergleichsweise biegesteifem Gitter) der Einfluss von Körperschallbrücken größer ausfallen kann.



**Abbildung 7:** Simulierte Verformungen des Metamaterials und der MDF-Platte bei verschiedenen Bolzenabständen  $d$  im Verhältnis zur Einheitszellengröße  $a$ .

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden erste Untersuchungen über den Einfluss von akustischen Nebenwegen auf die Schalldämmung von Metamaterialien vorgestellt. Aus Messergebnissen über den Einfluss eines Spalts wurde ersichtlich, dass die Schalldämmung des untersuchten Metamaterials in erster Linie durch die nahezu ungehinderte Schalleistungstransmission durch den Spalt reduziert wird. Dieser Effekt wird aber erst ab Spaltflächenanteilen um 5% signifikant. Ein zunächst vermuteter Einfluss durch Druckausgleich und Beugung am Spalt konnte nicht beobachtet werden. Bei der Kopplung einer MDF-Platte mit dem Metamaterial über eine Körperschallbrücke wurde in den Experimenten kein signifikanter Einfluss der Kopplung auf die Schalldämmung identifiziert. Mit Hilfe von numerischen Simulationen konnte dies mit der geringen Biegesteifigkeit des verwendeten Films und der damit verbundenen Entkopplung der umliegenden Einheitszellen erklärt werden.

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des deutschkanadischen Verbundprojekts „New Acoustic Insulation Metamaterial Technology for Aerospace“ (NAIMMTA), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, durchgeführt. Die Autoren danken dem Fördergeber für die finanzielle Unterstützung.

## Literatur

- [1] Cummer, S. A., Christensen, J. und Alù, A.: Controlling sound with acoustic metamaterials. *Nature Reviews Materials* 1 (2016), S. 16001.
- [2] Yang, Z., Mei, J., Yang, M., Chan, N. H. und Sheng, P.: Membrane-Type Acoustic Metamaterial with Negative Dynamic Mass. *Physical Review Letters* 101(20) (2008), S. 204301.
- [3] Langfeldt, F., Gleine, W. und von Estorff, O.: Enhancing the low-frequency noise reduction of a double wall with membrane-type acoustic metamaterials. *Proceedings of Inter-Noise 2016*. Hamburg, 2016, S. 7551–7562.
- [4] Bies, D. A. und Hansen, C. H.: *Engineering Noise Control: Theory and Practice*. 4th. Spon Press, London, 2009.
- [5] Kurtze, G.: Light-weight walls with high transmission loss. *Acta Acustica united with Acustica* 9(6) (1959), S. 441–445.
- [6] ISO 15186-1: *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity – Part 1: Laboratory measurements*. 2000.
- [7] Möser, M. und Kropp, W.: *Körperschall*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [8] Sharp, B. H.: *A study of techniques to increase the sound insulation of building elements*. Wyle Laboratories Report WR 73-5. 1973.