

Passive Reduktion der Schallabstrahlung von Oberflächen durch Anwendung von Metamaterialstrukturen

Peter Schrader¹, Fabian Duvigneau², Martin Trübe¹, Hermann Rottengruber¹, Ulrich Gabbert²

¹ O.-v.-G.-Universität, Institut für Mobile Systeme, 39106 Magdeburg, E-Mail: peter.schrader@ovgu.de

² O.-v.-G.-Universität, Institut für Mechanik, 39106 Magdeburg, E-Mail: fabian.duvigneau@ovgu.de

Einleitung

Lärm- und schwingungsreduzierende Werkstoffe finden heute in der Fahrzeugtechnik breite Anwendung. Dabei kommt es darauf an, die gewünschte breitbandige akustische Wirkung mit möglichst geringer Zusatzmasse darzustellen, was insbesondere im Hörfrequenzbereich < 500 Hz eine technische Herausforderung darstellt. Deshalb werden in diesem Beitrag Materialkonzepte untersucht, die eine Abweichung vom Bergerschen Massengesetz versprechen, d. h. bei geringer Masse niedrige Transmissionsgrade im genannten Frequenzbereich ermöglichen.

Für **Masse-Resonanz-Materialstrukturen** konnte in verschiedenen Beiträgen eine deutliche Erhöhung des Absorptionsgrades bzw. eine Absenkung des Transmissionsgrades in niedrigen Frequenzbereichen nachgewiesen werden [1-3]. In [2] zeigt sich eine Abhängigkeit der Frequenz maximaler Absorption von der Masse der Körper, die in das dämpfende Material eingelagert werden, während in [1] eine Dämpfung akustisch dominanter Moden von Plattenstrukturen durch die gezielte Beeinflussung des Gewichts und des Einbringungsortes der Massen diskutiert wird. Mit der Verwendung verschiedener Massen und damit unterschiedlicher Feder-Masse-Resonanz-Systeme könnte in einem Material eine breitbandigere akustische Wirkung erzielt werden. Dies wird im ersten Teil des Beitrags numerisch und experimentell untersucht.

Im zweiten Teil des Beitrags wird die Wirkung von **Akustik-Membran-Strukturen** untersucht. Diese besitzen einen oder mehrere Hohlräume an der Oberfläche des dämpfenden Materials. Die Hohlräume sind durch eine Membran mit regelmäßig eingebrachten Mikroperforationen von der umgebenden Luft getrennt. Dieses Konzept setzt neben Schallreflexion an der Membran und Reabsorption im Dämmmaterial v. a. auf die Energiedissipation an den Mikroperforationen – ein Effekt, der mit Absorberfolien in der Raumakustik bereits genutzt wird.

Masse-Resonanz-Materialstrukturen

Der akustische Effekt einer regelmäßigen Einlagerung von Massen in einen schwingungsdämpfenden Werkstoff wurde zunächst numerisch untersucht. Das verwendete Modell orientierte sich am späteren Versuchsaufbau und bestand aus einer rechteckigen Aluminiumplatte mit applizierter PUR-Schaumschicht (hexaedrisch), in die verschiedene Konfigurationen von Kugeleinschlüssen eingebracht wurden (Material, Radius, Anzahl, Verteilung). Es wurden Massen aus Stahl, Aluminium und PVC in regelmäßigen und

zufälligen Verteilungen untersucht. Die Simulationen zeigten, dass der Einfluss der Materialdämpfung der eingeschlossenen Massen vernachlässigbar klein ist. Das Strukturmodell wurde mit einem Luftmodell mit absorbierenden Randbedingungen gekoppelt, welches in Abbildung 1 dargestellt ist.

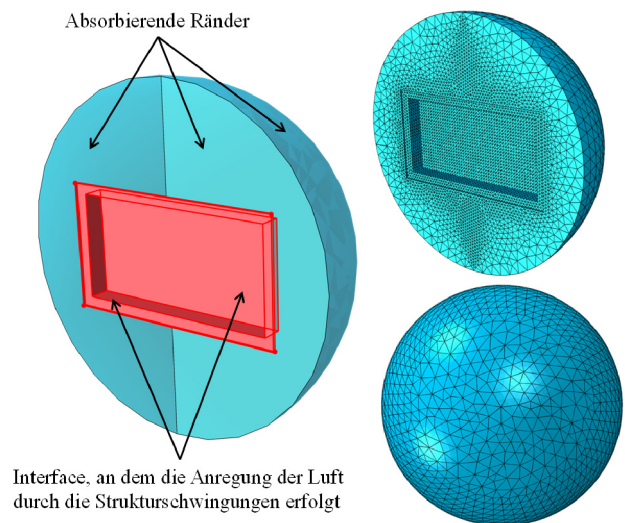


Abbildung 1: FE-Modell der Umgebungsluft der Platte mit absorbierenden Randbedingungen und Struktur-Schnittstelle (rot)

Die verschiedenen Masse-Resonanz-Strukturen wurden hinsichtlich der auf der Halbkugelfläche berechneten abgestrahlten Schalleistung verglichen.

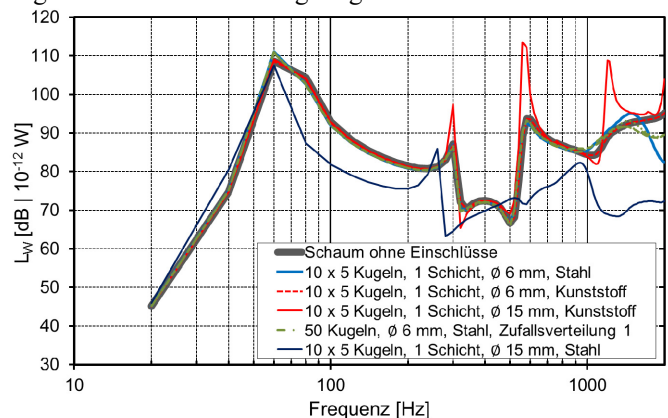


Abbildung 2: Berechnete Schalleistung beim Einsatz verschiedener Masseneinschlüsse

Die Abbildung 2 zeigt die berechnete Schalleistung für vier regelmäßige Anordnungen und zwei Zufallsverteilungen. Blaue Graphen repräsentieren 40 mm dicke PUR – Schäume mit Stahlkugeln verschiedener Größe in der Mittelebene, während die roten Graphen die PVC-Einschlüsse repräsentieren (zufällige Stahlkugelverteilungen sind grün).

Der dicke, graue Graph zeigt als Referenz die abgestrahlte Schalleistung eines 40 mm-PUR-Schaums ohne Einschlüsse. Gegenüber dem Schaum ohne Einschlüsse zeigt der Schaum mit 50 regelmäßig angeordneten, 6 mm großen Kunststoffkugeln mit einer zusätzlichen Masse aller Kugeln von 0,85 g keine Veränderung der abgestrahlten Schalleistung. Werden diese Kugeln als Stahlkugeln modelliert (Zusatzmasse von 43,9 g), zeigt sich beim ersten Peak bei 60 Hz eine leichte Erhöhung des Schalleistungspegels um 2,3 dB. Eine Absenkung des Schalleistungspegels unter das Niveau des Schaumes ohne Masseneinschlüsse ist erst ab einer Frequenz von etwa 1,5 kHz zu beobachten. Außerdem zeigt sich, dass die Verteilung der Masseneinschlüsse einen Einfluss hat und in diesem Fall eine zufällige Masseanordnung gegenüber der regelmäßigen zu einer Reduktion des abgestrahlten Schalls führt (grüne Graphen). In zukünftigen Studien soll das sich daraus ergebende Optimierungspotential ausgeschöpft werden, um sowohl eine große als auch breitbandige Reduktion der abgestrahlten Schalleistung zu erreichen. Dazu wird eine vollautomatisierte evolutionsbasierte Optimierung zum Einsatz kommen.

Die höchsten Pegelreduktionen werden durch Stahlkugeln mit 15 mm Durchmesser bewirkt, welche dem 160 g schweren Schaummaterial eine Masse von 687 g hinzufügen. Mit dieser Zusatzmasse zeigt sich eine deutliche Reduktion der Schalleistung im gesamten untersuchten Frequenzbereich (dunkelblauer Graph). Die Verwendung von Kunststoff anstelle von Stahl bei Kugeln der Größe 15 mm (roter durchgezogener Graph) verursacht eine Zusatzmasse von nur 13,2 g. Hier zeigt die Berechnung Resonanzeffekte bei den Peak-Frequenzen 300 Hz, 560 Hz und 1220 Hz, welche zu einer deutlichen Pegelerhöhung führen. Deshalb erscheint nach der Simulation die Einbettung großer, leichter Kunststoffmassen in einen Schaumwerkstoff insgesamt wenig sinnvoll, während große Massen, z. B. aus Stahl, bessere Ergebnisse versprechen.

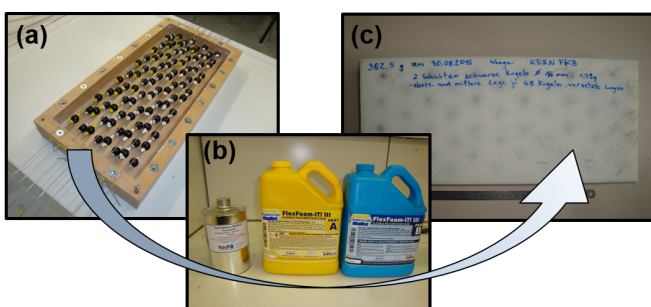


Abbildung 3: Herstellung von Schäumen mit Masseneinschlüssen

Da hohe zusätzliche Massen für den Leichtbau unattraktiv sind, werden in den nachfolgend dargestellten experimentellen Untersuchungen die akustischen Wirkungen von Masseneinschlüssen mit maximal 140 g zusätzlicher Masse untersucht.

Abbildung 3 veranschaulicht den Herstellungsprozess des Kunststoffschlams mit den Masseneinschlüssen. Dieser fand in einer aus vier Rahmen und einer Boden- und Deckplatte bestehenden Holzform statt. Zwischen den Rahmen konnten Schweißdrähte gelagert werden, auf welchen die

kugelförmigen Massen frei angeordnet werden konnten. Die Form wurde aus vier Rahmen mit 10 mm Dicke aufgebaut, so dass Masseneinschlüsse auf drei Ebenen (Trennfugen) angeordnet werden konnten und die Materialdicke 40 mm betrug. Die Fotografie (a) zeigt 96 Kunststoffkugeln à 1,4 g des Durchmessers 14 mm in versetzter Anordnung auf der oberen und mittleren Trennfuge der zusammengesetzten Form. Im nächsten Schritt wurde in die Form mit den Innenmaßen 360 x 160 x 40 mm ein Gemisch aus 100 ml der Komponente A und 200 ml der Komponente B des Produktes FlexFoamIT!® III der Firma KauPo gegeben (Foto (b)), welches bei 20°C innerhalb weniger Sekunden begann, zu einem PUR-Schaum aufzuschäumen und sich um mehr als das zehnfache seines Ausgangsvolumens auszudehnen. Dabei war der Deckel mit der Form verschraubt. Die Deckplatte hat regelmäßig verteilte Austrittslöcher. Aus ihnen trat der überschüssige Schaum aus und wurde nach der Aushärtung abgeschnitten. Die Drähte, auf welchen die Kugeln befestigt waren, wurden aus dem Schaum herausgezogen, wobei die lose angebrachten Kugeln im Material verblieben. Den Schaum mit Masseneinschlüssen zeigt das Foto (c).

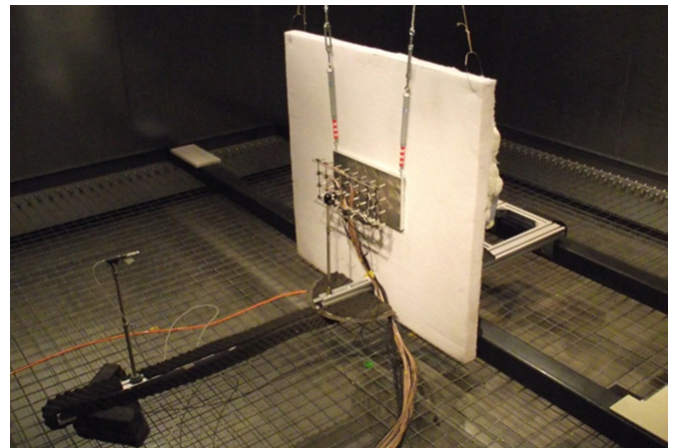


Abbildung 4: Versuchsaufbau im Vollfreifeldraum mit Aluminiumplatte, Mikrofonarray im Nahfeld, und schwenkbarem Einzelmikrofon im Abstand von 95 cm

Die hergestellten Materialien wurden an einem der simulativen Untersuchungen ähnlichen Versuchsaufbau untersucht. Er ist in Abbildung 4 dargestellt. Zentral ist eine Aluminiumplatte mit den Maßen 400 x 200 x 18 mm, welche in einem Vollfreifeldraum an einen gekapselten elektrodynamischen Schwingungserreger gekoppelt ist und von diesem mit weißem Rauschen einer gleichbleibenden und definierten Amplitude zu Schwingungen angeregt wird. Der Vollfreifeldraum absorbiert alle Geräusche mit einer Frequenz über 100 Hz vollständig. Die Kraft des Shakers wird an der Rückseite exakt an der Plattenmitte eingebracht und gemeinsam mit den Schalldrucksignalen des Mikrofonarrays und des Fernfeldmikrofons aufgezeichnet. Dieses hat einen Abstand von 0,95 m zur Plattenoberfläche. Das Fernfeld wird somit oberhalb von 350 Hz erfasst.

In den folgenden Betrachtungen wurde das Fernfeldmikrofon in 10°-Schritten von 0°-180° um die Platte geschwenkt und die aufgenommenen Signale über den gesamten Winkelbereich gemittelt. Die unterschiedlichen Masse-Resonanz-Strukturen wurden, wie in Abbildung 5

gezeigt, mithilfe eines Stahlrahmens der Masse 454 g auf die Oberfläche der Platte gespannt, so dass zwischen Material und Platte gerade kein Luftspalt mehr zu sehen war.

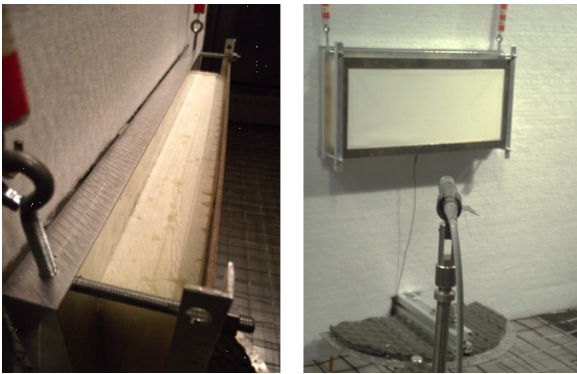


Abbildung 5: Befestigung der Dämpfungsmaterialien auf der Aluminiumplatte mit einem Rahmen

In Abbildung 6 sind im oberen Teil der über den Schwenkwinkel von 180° gemittelte Schalldruck im Fernfeld und im unteren Teil die Schalldruckpegelreduktion gegenüber der Platte ohne montiertes Dämpfungsmaterial dargestellt. Die rot gefärbten Terzpegel zeigen das Ergebnis für einen PUR-Schaum ohne jegliche Einschlüsse. Die verschiedenen blauen Terzpegel zeigen Resultate für Schäume mit verschiedenen Masseneinschlüssen auf der Außenlage.

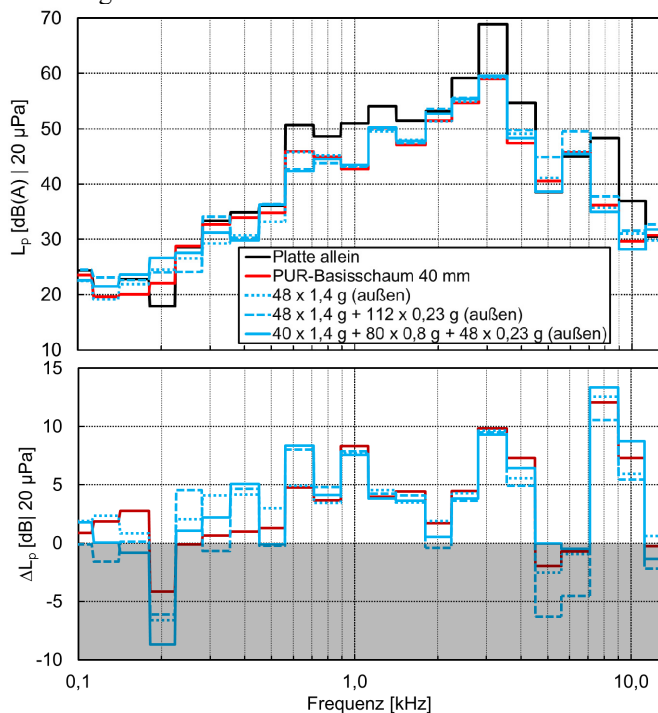


Abbildung 6: Terzpegel (oben) und Terzpegelreduktion (unten) von Materialien mit verschiedenen Masseneinlagerungen an der Materialoberseite

Die auf die Masseneinschlüsse zurückzuführenden Verbesserungen des Schalldruckpegels treten v. a. im Frequenzbereich zwischen 0,2 und 0,7 kHz auf. Unterhalb 560 Hz zeigen sich gegenüber dem einfachen Schaum bereits Pegelreduktion von bis zu 4 dB bei 48 identischen, gleichmäßig verteilten Kugeln in der obersten möglichen Kugellage (gepunkteter blauer Graph). Ähnliche Verbesserungen sind bei den beiden anderen Varianten zu erkennen, wo diese Massen *auch* verwendet werden,

allerdings in einer anderen Anordnung und Anzahl und mit den zusätzlichen Massen 0,23 g und 0,8 g. Diese Varianten zeigen im Terzband zwischen 560 und 700 Hz eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Material mit nur einer Kugelgröße. Bei höheren Frequenzen zeigen die zusätzlichen Massen keinen nennenswerten Einfluss mehr. In den Terzbändern zwischen 4,5 und 7 kHz zeigt sich bei der Variante mit 112 besonders leichten Masseneinschlüssen sogar eine deutliche Pegelerhöhung, die bei den anderen Varianten nicht beobachtet werden kann. Dieser Effekt ähnelt den in der Simulation festgestellten Pegelverstärkungen bei hohen Frequenzen bei der Verwendung vieler verhältnismäßig leichter Massen.

Abbildung 7 zeigt die Reduktion des Schalldruckpegels im Fernfeld beim Hinzufügen weiterer 48 Kugeln auf der Mittelebene gegenüber der Variante mit 48 Kugeln auf der äußeren Ebene. Die Kugeln in den Ebenen sind versetzt zueinander angeordnet. Der kürzere Abstand der Kugeln in der Mittellage zur Platte bewirkt eine steifere Feder und somit eine höhere Resonanzfrequenz. Entsprechend zeigt sich eine Verbesserung im Frequenzband zwischen 560 und 700 Hz.

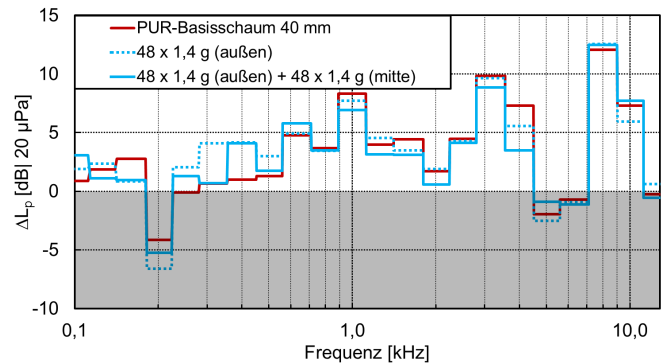


Abbildung 7: Terzpegelreduktion bei zusätzlicher Masseneinlagerung auf der Mittelebene

Bei der Betrachtung des über den Frequenzbereich von 0,1 bis 12,8 kHz addierten Summen-Schalldruckpegels zeigt keines der Masse-Resonanz-Systeme eine Verbesserung gegenüber dem PUR-Basisschaum, welcher gegenüber der Platte eine Pegelreduktion von 8,0 dB aufweist. Die Schäume mit Masseneinschlüssen weisen Summenpegel auf, die um weniger als 1 dB über dem des Basisschaums liegen. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen jedoch, dass auch mit geringen eingelagerten Massen in niedrigen Frequenzbereichen unter 500 Hz Pegelverbesserungen erzielt werden können, und dass – zumindest in Verbindung mit größeren Massekörpern im dämpfenden Material – auch kleine und leichte Einschlüsse Verbesserungen im mittleren Frequenzbereich bewirken können. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass die Einlagerungstiefe der Massekörper eine Rolle dabei spielt, ob sie bei tiefen oder mittleren Frequenzen wirksam werden.

Akustik-Membran-Materialstrukturen

Die Materialien wurden in derselben Holzkasten-Form hergestellt, wie zuvor die Masse-Resonanz-Materialien (Abbildung 3). Dabei wurden auf den Boden der Holzkasten-Form 10 und 15 mm dicke Aluminiumblöcke gelegt, welche als Platzhalter für die Aussparungen dienen.

Nach dem Aufschäumprozess und dem Entfernen des PUR-Schaums aus der Holzkastenform wurden die Aluminiumblöcke aus dem Schaummaterial gelöst und gaben so die Hohlräume frei.

Für die Messungen wurden vier verschiedene PUR-Schäume verwendet, die Abbildung 8 zeigt. Für einen Versuch wurde eine perforierte Akustik-Folie auf der Plattenseite des Stahlrahmens befestigt, mit welcher die Schäume entsprechend Abbildung 5 auf die Platte gedrückt wurden.



Abbildung 8: PUR-Schäume mit Vertiefungen. Links: 10 mm Tiefe; Rechts: 15 mm Tiefe.

Die verschiedenen Folien sind in Tabelle 1 mit ihren wichtigsten Daten angeführt. Die Folien wurden auf die Rahmenbreite von 180 mm zugeschnitten und auf dieser Länge mit einer Vorspannkraft von 11 N beaufschlagt, um einen einheitlichen Spannungszustand sicherzustellen.

Tabelle 1: Untersuchte perforierte Folien von Barrisol®

Variante	Parameter		
	Lochanzahl	Loch-Ø	Perforations-rate
Nanoperf	500.000 1/m ²	0,1 mm	ca. 1%
Acoperf	400.000 1/m ²	0,15 mm	ca. 0,8 %
Miniperf	30.000 1/m ²	0,5 mm	5 %

Aufgrund der geringeren Schaummasse zeigen die Schäume mit den 15 mm tiefen Kammern erst bei 1 kHz eine Pegelreduktion über 5 dB, welche die Schäume mit 10 mm Vertiefung bereits bei 600 Hz erreichen. Bei den tieferen Kammern lässt sich der akustische Effekt der perforierten Folie besser betrachten, da er etwas größer ausfällt. Deshalb zeigt Abbildung 9 den über 180° gemittelten Schalldruckpegel mitsamt Pegelreduktion im Fernfeld für den Schaum mit zwei 15 mm-Kammern.

Bei allen vier Kammerformen konnten mit einer zusätzlichen Masse von 14 g höhere Pegelreduktionen erzielt werden als mit dem Schaum ohne Folie. Bei den Schäumen mit den tieferen Kammern wurde bereits im Frequenzbereich unter 200 Hz eine Reduktion festgestellt, insbesondere bei den Folien Acoperf und Nanoperf. Ein mittlerer bzw. großer Perforationsdurchmesser zeigt bei Frequenzen unter 1 kHz höhere Pegelreduktionen als ein kleiner. Im Bereich hoher Frequenzen erscheint hingegen ein kleiner Perforationsdurchmesser vorteilhafter. Auf den Schäumen mit 10 mm-Vertiefungen zeigt die Nanoperf-Folie fast bei allen Frequenzen die besseren Resultate. Hier werden in einzelnen Terzbändern Pegelreduktionen von bis zu 4 dB erzielt, während bei den 15 mm tiefen Kammern Verbesserungen von bis zu 5 dB gemessen wurden.

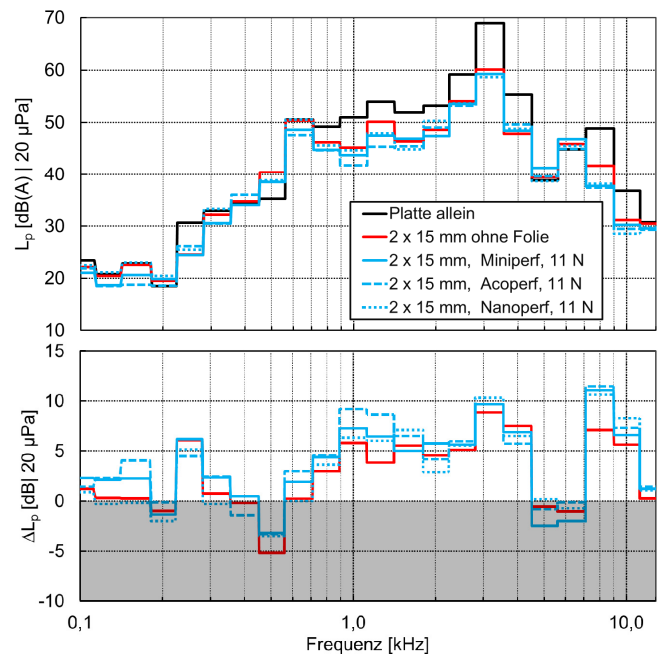


Abbildung 9: Terzpegel (oben) und Terzpegelreduktion (unten) des PUR-Schaumes mit zwei Vertiefungen (15 mm) mit verschiedenen perforierten Folien

Bei Betrachtung des Summenschalldruckpegels über dem gesamten Frequenzbereich wurden mit den Nanoperf- und Acoperf-Folien Pegelreduktionen gegenüber den jeweiligen Schäumen ohne Folie von 1 dB erzielt, wobei die Zweikammersysteme die besseren Resultate zeigten. Da diese Verbesserung mit einer zusätzlichen Masse von lediglich 14 g erzielt wurde, beträgt die massenspezifische Pegelreduktion hier über 71 dB/kg – ein vergleichsweise hoher Wert. Die besseren Pegelreduktionen der Folien mit mehr und kleineren Perforationen und einem vergleichsweise geringen Perforationsgrad sind vermutlich durch einen höheren Dissipationsanteil hervorgerufen, welcher auf höheren Strömungsgeschwindigkeiten in den Perforationen, mehr Reibung und Wirbelbildung basiert.

Für weitergehende Untersuchungen dieser Materialstruktur bietet es sich an, die Vorspannung der Folien zu variieren, bzw. Membranen mit höherer Impedanz, z. B. aus sehr dünnem Aluminiumblech, zu verwenden. Ebenfalls wird in zukünftigen Untersuchungen das Konzept mehrerer übereinander gelagerter Membranen untersucht werden.

Literatur

- [1] Kidner, M., Fuller, C., Gardner, B.: Increase in transmission loss of single panels by addition of mass inclusions to a poro-elastic layer: experimental investigation, *Journal of Sound and Vibration* 294 (2006), 466-472
- [2] Fuller, C., Saux, T., Sound absorption using poro-elastic acoustic meta materials, *Internoise 2012, conference proceedings*
- [3] Idrisi, K. et. Al.: Increase in transmission loss of a double panel system by addition of mass inclusions to a poro-elastic layer: A comparison between theory and experiment, *Journal of Sound and Vibration* 323 (2009), 51-66