

Vibroakustische Metamaterialien

Metamaterialien zur Beeinflussung der Vibroakustik mittels Resonatoreffekt

Heiko Atzrodt, Daria Manushyna, Sebastian Rieß, Moritz Hülsebrock, Jan Troge, Andreas Lühring, Peter Brandstätt, Jens Rohlfing, Agostino Troll, Georg Fischer, Jan Küller, Daniel Beer

Vibroakustische Metamaterialien (VAMM) stellen einen neuartigen Lösungsansatz zur Minderung akustischer und struktureller Schwingungen dar. Sie bilden Stoppbänder – Frequenzbereiche, in denen keine freie Wellenübertragung stattfindet. Dies ermöglicht die Umsetzung neuer Konzepte für die Lärm- und Schwingungsminderung, die mit konventionellen Lösungen aufgrund z. B. Leichtbauanforderungen nicht realisierbar wären. Ziel des Fraunhofer-Projekts „MetaVib“ war die Umsetzung der wissenschaftlich notwendigen Arbeiten für die industrielle Nutzbarmachung von vibroakustischen Metamaterialien. Das Potential von VAMM wurde an mehreren anwendungsnahen Demonstratoren aufgezeigt. Bei einem VAMM-Schalldämpfer konnte eine Reduktion von mehr als 20 dB in breiten Frequenzbereichen erreicht und bei einer Fahrzeugtür mit VAMM konnte der abgestrahlte Schall um 10–15 dB bei vergleichbaren Masseneinsatz gemindert werden. Dafür war die Erarbeitung eines ganzheitlichen Prozesses zur effizienten Auslegung von VAMM unter Berücksichtigung wirtschaftlicher, fertigungstechnischer und anwendungsbezogener Randbedingungen notwendig. Die Bewertung und Weiterentwicklung von Herstellungsverfahren zur seriennahen Fertigung von VAMM war eine weitere Herausforderung, die im Rahmen des Projektes bearbeitet wurde.

Entwicklung der Metamaterialien

Im Jahre 1968 beschrieb der russische Physiker Victor Veselago in einem theoretischen Aufsatz [1] ein Material mit negativem Brechungsindex. David R. Smith [2] konnte 1999 einen solchen negativen Brechungsindex im Experiment aufzeigen. Für ein Material mit Eigenschaften, die in der Natur nicht auftreten, setzte sich der Name Metamaterial durch. In den letzten 20 Jahren entwickelte sich das Thema rasant und Metamaterialien wurden in verschiedenen physikalischen Domänen (u. a. elektromagnetische, optische, thermische, mechanische oder akustische Metamaterialien) entwickelt. Metamaterialien haben einen bisher nicht gebremsten Hype erschaffen, so dass die Verwendung des Begriffes mittlerweile sehr inflationär ist und nicht immer wirklich ein Metamaterialeffekt erzeugt wird. In vielen Anwendungen stehen Metamaterialien kurz vor der Industria-

Vibroacoustic metamaterials

Vibroacoustic metamaterials (VAMM) represent a novel approach to reduce acoustic and structural vibrations. They create so called stop bands – frequency ranges where no free wave propagation can occur. This enables the implementation of new concepts for noise and vibration reduction that are unachievable with conventional solutions due to, e. g., lightweight construction requirements.

The goal of the Fraunhofer project „MetaVib“ was to implement the scientifically necessary work for the industrial utilization of VAMM. This required the development of a holistic process for the efficient design of VAMM, considering economic, manufacturing, and application-related boundary conditions. The evaluation and further development of manufacturing processes for the near-series production of VAMM was a further challenge addressed within the project’s scope. The potential of VAMM and the design process were validated on several application-oriented prototypes. In the case of the VAMM muffler, a reduction of more than 20 dB was achieved in broad frequency ranges, and in the case of a vehicle door with VAMM, the emitted sound could be reduced by 10–15 dB for a comparable mass input.

lisierung oder sind schon kommerziell zu erwerben. Marktstudien [3], [4], [5], [6] zeigen ein enormes Wachstumspotential auf und schätzen eine jährliche Umsatzsteigerung zwischen 33 und 42 Prozent ab.

Für die Beeinflussung der Ausbreitung von Wellen – beispielsweise optischen, elektromagnetischen, akustischen – durch Metamaterialien wird auf die physikalischen Grundlagen der jeweiligen Wellentheorie aufgesetzt, die vielfach Ähnlichkeiten aufweist. Die betrachteten akustischen Wellen, beispielsweise von Maschinengeräuschen, haben, gegenüber den anderen Wellenarten, oft die größeren Wellenlängen und ermöglichen somit auch die größeren Substrukturen zur Beeinflussung der Welle. Trotz der meist mit dem Auge sichtbaren Substrukturen wird in der Literatur auch hierfür der Begriff akustisches Metamaterial verwendet. Vibroakustische Metamaterialien (VAMM) sind ein Teilaspekt

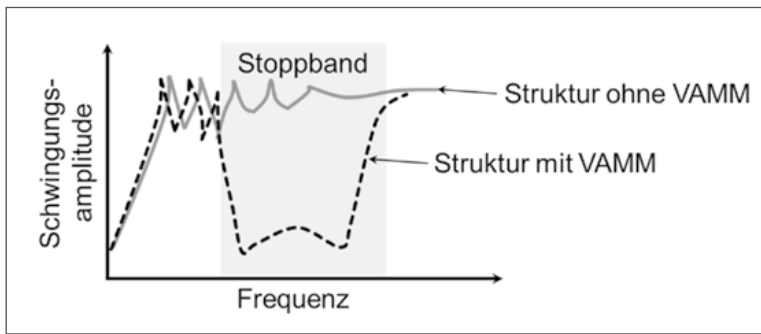


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Stoppbands im Frequenzbereich

der akustischen Metamaterialien und beeinflussen die Körperschallausbreitung sowie die Abstrahlung von Strukturen durch negative Interferenz, negative effektive Steifigkeiten oder Massen, in einem vorgegebenen Frequenzbereich.

Vibroakustische Metamaterialien

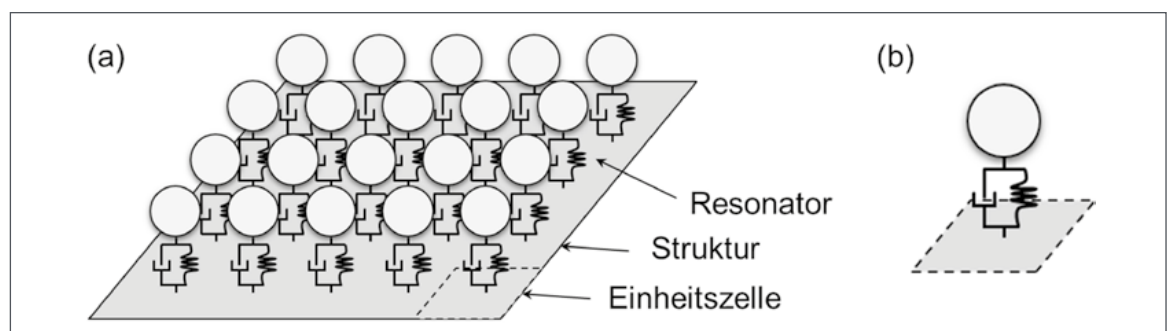
Vibroakustische Metamaterialien (VAMM) dienen der Beeinflussung des Schwingverhaltens von Strukturen. In der Regel sollen Schwingungen bestimmter Frequenzbereiche unterdrückt werden. Das Metamaterial wird so ausgelegt, dass es die Wirkung eines Bandstopp-Filters aufweist. Innerhalb des Stoppband-Frequenzbereichs wird so die Ausbreitung mechanischer Schwingungen und Vibrationen in hohem Maße unterdrückt. Eine schematische Darstellung eines Stoppbandes kann Abbildung 1 entnommen werden. Vor dem Stoppband ähnelt sich das Verhalten von Strukturen mit und ohne VAMM, meist sind die Eigenfrequenzen mit VAMM etwas niedriger als ohne VAMM. Im Stoppband selbst sind die Schwingungsamplituden bei Strukturen mit VAMM deutlicher reduziert. Das Verhalten nach dem Stoppband ist abhängig vom Dämpfungsverhalten der VAMM.

Die Realisierung von VAMM kann basierend auf dem Bragg-Effekt oder mit Hilfe lokaler Resonatoren erfolgen. Der Bragg-Effekt beschreibt die Interferenz von Wellen an einem Kristallgitter. Treffen zwei gleichphasige elektromagnetische Wellen auf ein solches Gitter, so reflektieren diese an den Git-

teratomen. Aufgrund eines Gangunterschieds nach der Reflexion, der von der Gitterkonstante abhängt, kommt es zu einer Auslöschung oder Verstärkung der elektromagnetischen Wellen. Im Falle der Auslöschung spricht man von destruktiver Interferenz. Dieser Effekt ist auch für die Auslöschung mechanischer oder akustischer Schwingungen nutzbar. Beispielsweise kann zur Reduktion von mechanischen Schwingungen die zu beruhigende Struktur mit einem regelmäßigen Array verteilter Massenelemente versehen werden, welche anschaulich den Gitteratomen eines Kristallgitters entsprechen. Das Gitter führt zu einer Streuung der mechanischen Wellen und infolgedessen zu destruktiven Interferenzen in einem bestimmten Frequenzbereich. Innerhalb dieses Frequenzbereichs kommt es zu einer starken Reduktion der Wellenausbreitung – ein Stoppband entsteht. Wie bei einem Kristallgitter muss die Gitterkonstante genau auf die Wellenlänge der Schwingung abgestimmt sein. Bezogen auf mechanische Schwingungen, die je nach Wandstärke und Material der zu beruhigenden Struktur und dem zu beeinflussenden Frequenzbereich Wellenlängen im Zentimeterbereich aufweisen, ist eine Realisierung eines oben beschriebenen Gitters manchmal nicht möglich, da das zu bearbeitende Bauteil nicht die hierfür erforderlichen Dimensionen aufweist.

Eine weitere Realisierungsform von VAMM basiert auf der Nutzung lokaler Resonanzen. Dadurch können die Nachteile des auf den Bragg-Effekt-basierten Ansatzes verhindert werden und gleichzeitig ist ein größerer Gestaltungsfreiraum bei der Auslegung und Gestaltung gegeben. Ein derartiges VAMM besteht aus einem Array verteilter mechanischer Resonatoren, die auf einer Struktur angebracht sind. In der einfachsten Konfiguration sind alle Resonatoren auf die gleiche Frequenz abgestimmt, welche die Startfrequenz des Stoppbandes definiert. Oberhalb dieser Frequenz bildet das VAMM bestehend aus dem Resonator-Array und der Zielstruktur eine virtuelle negative Masse aus, welche dazu führt, dass die Ausbreitung mechanischer Schwingungen in

Abb. 2: (a) VAMM basierend auf lokalen Resonanzen; (b) Einheitszelle, bestehend aus einem Resonator und einem Ausschnitt aus der Struktur



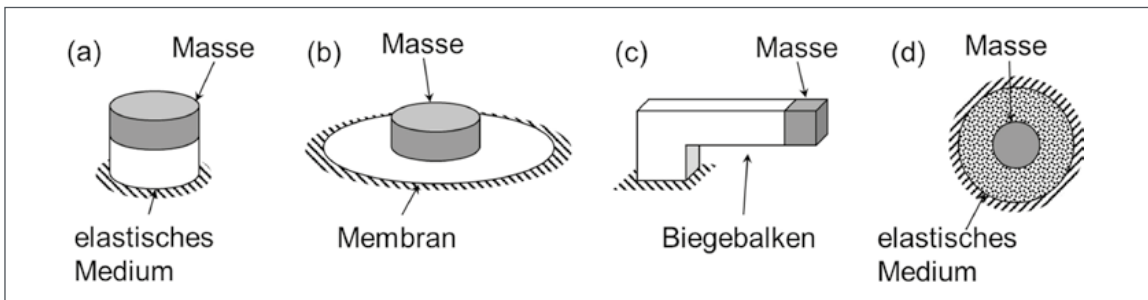


Abb. 3: Resonator-Bauformen: a) Säulen-Resonator, b) Membran-Resonator, c) Biegebalken-Resonator, d) Masse in elastischem Medium

diesem Frequenzbereich stark unterbunden wird. Die Resonatoren müssen in einem Abstand kleiner oder gleich der halben Wellenlänge der zu beeinflussenden Schwingung zueinander angeordnet werden. Abbildung 2a zeigt den schematischen Aufbau eines VAMM mit lokalen Resonatoren.

Die kleinste, unteilbare Einheit eines VAMM wird als Einheitszelle bezeichnet. Sie besteht aus einem Ausschnitt aus der Struktur und einem Resonator (siehe Abbildung 2b).

Die Breite, bzw. die Endfrequenz (f_{Ende}) des Stoppbandes, ergibt sich aus der Startfrequenz (f_{Start}) des Stoppbandes und dem Verhältnis der schwingenden Resonator-Massen (m_R) zu der Masse der Zielstruktur (m_0). Die Startfrequenz des Stoppbandes ist hierbei durch die Frequenzabstimmung der Resonatoren (f_R) gegeben. Folgende Formel stellt die Beziehungen dar:

$$f_{\text{Start}} = f_R$$

$$f_{\text{Ende}} = f_R * \sqrt{1 + m_R/m_0}$$

Eine Verbreiterung des Stoppbandes kann neben der Erhöhung der Resonator-Masse auch durch Dämpfung der Resonatoren oder durch Streuungen in den Parametern der Resonatoren (Steifigkeit, Masse, Positionierung) erreicht werden [7]. Hierbei reduziert sich jedoch die Tiefe des Stoppbandes.

Zur Realisierung von VAMM eignen sich verschiedene Resonatorbauformen. Entsprechend der in der Literatur umgesetzten VAMM können diese in die vier grundlegenden Bauformen – Säulen-Resonator, Biegebalken-Resonator, Membran-Resonator und Resonatoren – basierend auf einer in ein elastisches Medium eingebetteten Masse, eingeteilt werden (siehe Abbildung 3).

Die Resonatoren können aus den unterschiedlichsten Materialien gefertigt werden. Abhängig von dem Anwendungsszenarium können Stoppbänder mit VAMM aus Halbzeugen oder genormten Bauteilen, aus metallischen Werkstoffen, aus Elastomeren und Kunststoffen erzeugt werden (siehe Abbildung 4). Durch den Einsatz von recycelten oder biologisch

Abb. 4: Umsetzung von Resonatoren aus verschiedenen Materialien und Bauformen zur Erzeugung von Stoppbändern



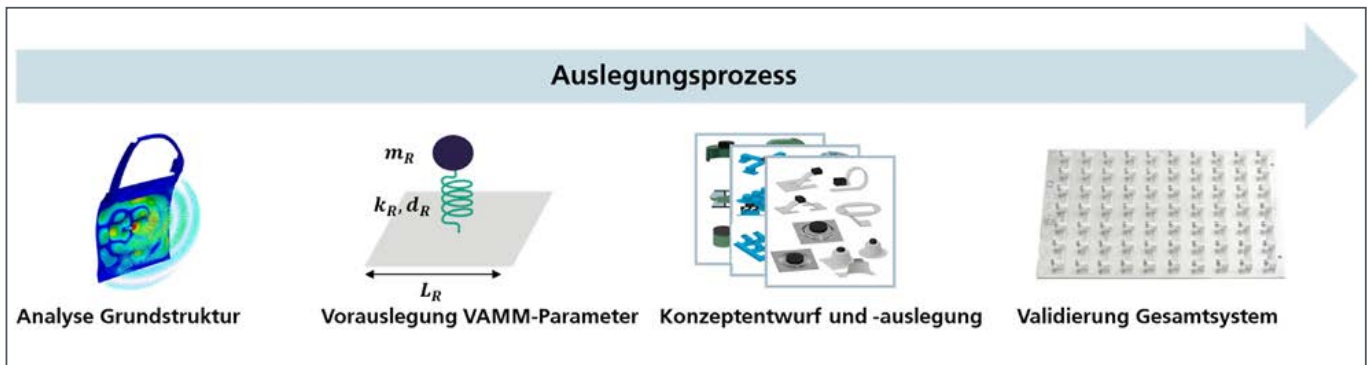


Abb. 5: Auslegungsprozess zur ganzheitlichen Auslegung von strukturdynamischen VAMM

abbaubaren Materialien werden die VAMM besonders nachhaltig.

Neben der Unterteilung von VAMM mit lokalen Resonatoren hinsichtlich der Resonator-Bauformen, kann eine weitere Unterteilung hinsichtlich der Integrationstiefe der Resonatoren in das Zielbauteil erfolgen. Weitere Informationen hierzu können [8] entnommen werden, und eine Vertiefung der Grundlagen zu VAMM ist in [9] zu finden.

Aktive Metamaterialien bieten gegenüber den passiven Ausführungsformen Gewichts-, Größen- und Flexibilitätsvorteile, da die erforderliche Abstimmung der Resonatoren nicht allein über eine Masse- oder Volumensteifigkeitsänderung stattfindet. So können aktive vibroakustische Metamaterialien bei gleicher Schwingungsbedämpfung leichter ausgelegt werden, was beispielsweise im Leichtbau interessant ist. Ebenso ermöglichen aktive Metamaterialien kompaktere Tieftonabsorber. Damit kann dem permanenten Bauraumproblem beispielsweise in Lüftungsanlagen begegnet werden. Der Vorteil, dass die Eigenschaften aktiver Metamaterialien elektronisch regelbar sind, ist für Anwendungen interessant, wo

mit einem universellen Basismodul unterschiedliche oder auch sich ändernde Wirkbereiche bedient werden sollen [10].

Auslegung und Optimierung

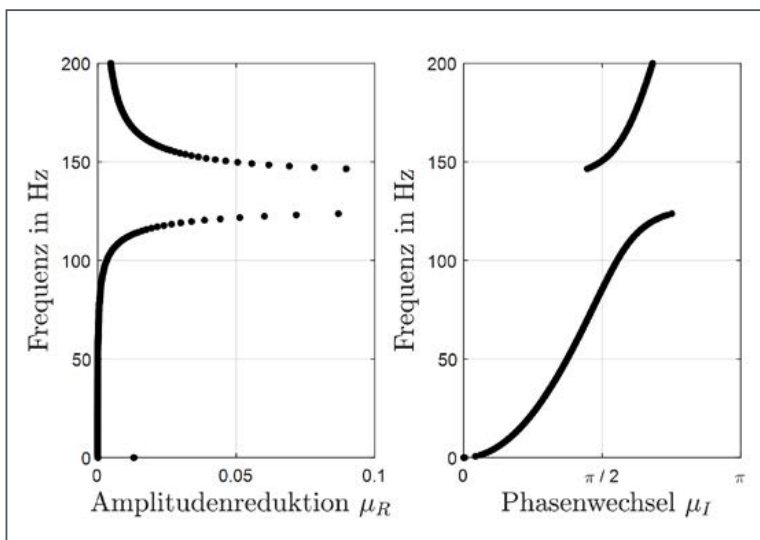
Zu Beginn ist eine Analyse der Grundstruktur zur Identifikation der Anregungsmechanismen und Übertragungspfade erforderlich (siehe Abbildung 5, Analyse Grundstruktur). Anschließend werden die VAMM-Parameter Einheitszellengröße (L), effektive Resonator Masse (m_R), Resonanzfrequenz (f_R) und Dämpfungsgrad (D_R) hinsichtlich der Wellenlänge und der erforderlichen Stoppbandcharakteristik ausgelegt.

Für 1D-periodische, 2D-periodische und hexagonal-periodische VAMM beginnt die Auslegung mit der Berechnung der Dispersionskurve der Einheitszelle (siehe Abbildung 5, Vorauslegung VAMM-Parameter). Dabei wird die Charakteristik der Wellenausbreitung durch die Einheitszelle, welche durch mögliche Kombinationen aus Wellenlänge und Wellenfrequenz gegeben ist, analysiert.

So können Stoppbänder als Frequenzbereiche, in denen keine freie oder nur stark gedämpfte Wellenausbreitung möglich ist (siehe Abbildung 6), identifiziert werden. Dabei sollten Modelle mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden berücksichtigt werden, um eine recheneffiziente Vorgehensweise sicherzustellen.

In einem ersten Schritt wird der Resonator der Einheitszelle als diskretes Feder-Masse-Dämpfer-System betrachtet, sodass eine Festlegung der notwendigen diskreten Parameter stattfinden kann. Anschließend gilt es dann, unter Berücksichtigung anwendungs- und herstellungsrelevanter Randbedingungen, ein geeignetes Konzept zu entwerfen und ein parametrisiertes FE-Modell zu erstellen (siehe Abbildung 5, Konzeptentwurf und -auslegung). Dieses ermöglicht die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen den Geometrieparametern des FE-Modells und den diskreten Feder-Masse-Dämpfer-Eigenschaften des Resonators. Dieser Zusammenhang kann, abhängig von der Anzahl maßgeblicher Parameter, entweder

Abb. 6: Beispiel einer Dispersionskurve mit Stoppband im Bereich von 125 bis 150 Hz



graphisch oder tabellarisch dargestellt werden. Durch Berücksichtigung notwendiger diskreter Parameter ergibt sich so eine Eingrenzung möglicher Geometrieparameterkombinationen. Die Auswahl eines konkreten Parametersets kann entweder manuell durch den Anwender oder automatisch erfolgen. So ist eine Automatisierung des Auslegungsprozesses möglich. Nachdem auf Einheitszellenebene optimiert wurde, gilt es das Verhalten im Gesamtsystem zu bewerten (siehe Abbildung 5, Validierung Gesamtsystem). Dazu müssen die notwendige Anzahl der Resonatoren sowie die Positionierung untereinander und auf der Grundstruktur ermittelt werden. Um eine effiziente Auslegung, Validierung und Optimierung von Bauteilen mit VAMM zu ermöglichen, können Methoden zur parametrischen Modellordnungsreduktion (PMOR) eingesetzt werden. Diese Methoden ermöglichen eine Reduktion der Modellgröße durch eine Transformation der Systemmatrizen in einen reduzierten Unterraum. Dabei bleibt die Möglichkeit Parameter des Modells im reduzierten Zustand zu ändern. Somit können viele Modellauswertungen für geänderte Parametersätze effizient durchgeführt werden. Dies ermöglicht z.B. den Einsatz von Verfahren zur Optimierung, zum Modellabgleich oder zur Untersuchung von Unsicherheiten für Bauteile mit VAMM.

Serienfertigung

Für die Herstellung von VAMM stehen verschiedene Verfahren, z.B. aus den Bereichen Kunststoff- und Metallverarbeitung, zur Verfügung.

Im Bereich der Kunststoffverarbeitung eignet sich die additive Fertigung im 3D-Druck gut für die Prototypenfertigung oder auch die Herstellung von Einzelteilen. Für eine Serienfertigung ist die additive Fertigung meist nicht wirtschaftlich, da der 3D-Druck in der Regel langsamer, teurer und unpräziser ist als andere Fertigungsverfahren. Es gibt auch Einschränkungen bei der Auswahl der Materialien, der Oberflächenqualität und der mechanischen Festigkeit der gedruckten Teile.

Für die serienmäßige Herstellung von VAMM kann das Tiefziehen von Thermoplasten eingesetzt werden. Mit dem in der Industrie weit verbreiteten Verfahren zur Herstellung von Napfstrukturen lassen sich z.B. Federelemente für Masse-Feder-Dämpfer-Systeme herstellen.

Der Kunststoffspritzguss, welcher eines der am häufigsten eingesetzten Verfahren zur vollautomatischen Herstellung von Kunststoffformteilen ist, stellt eine weitere Möglichkeit für die Serienfertigung von VAMM dar. Mit dem Verfahren lassen sich komplexe Strukturen für VAMM in nahezu jeder Größe wirt-

FIT FÜR DIE LEBENSZYKLUSBETRACHTUNG PRODUKTE DER ACOUSTICS DIVISION



akustik@regupol.de
www.regupol.com

Schallschutz ✓
Erschütterungsschutz ✓
Ressourcenschutz ✓

Mit dem Cradle to Cradle-Zertifikat und der Umweltproduktdeklaration (EPD) schaffen wir Transparenz für das Nachhaltige Bauen.



Was sind Ihre Schutzziele?



Abb. 7: Fahrzeugtürdemonstrator

schaftlich und in kurzer Zeit herstellen.

Im Bereich der Metallverarbeitung eignet sich das Feingussverfahren besonders für die Herstellung von Klein- und Kleinstteilen mit hoher Maßhaltigkeit und Oberflächengüte. Mit dem Verfahren lassen sich sowohl in Klein- als auch in Großserien feine und komplexe Konturen mit geringer Wandstärke herstellen. Für die Serienfertigung größerer metallischer Bauteile kann das Druckgussverfahren eingesetzt werden, welches eines der wichtigsten Verfahren für die Großserienfertigung von Gussteilen ist.

Etablierte Fertigungsverfahren für den Zuschnitt von Blechteilen sind Stanzen, Wasserstrahl- oder Laserschneiden. Zum Umformen von Blechteilen können Verfahren, wie Biegen, Tiefziehen und Rollformen eingesetzt werden. Mit den Verfahren ist es möglich verschiedenartige VAMM zu fertigen. Es können sowohl Konzepte für ein differentielles Design realisiert werden, die eine spätere Integration des VAMM in bestehende Bauteile erlauben, als auch Konzepte für integrale Bauweisen, bei denen VAMM in bestehende Grundstrukturen integriert werden. Die integrale Bauweise kann jedoch eine Schwächung der Grundstruktur zur Folge haben, weshalb das Einbringen von Resonatoren bereits bei der Bauteilentwicklung berücksichtigt werden muss.

Um Masse-Feder-Dämpfer-Systeme zu schaffen, müssen die einzelnen Elemente aus Kunststoff oder Metall meist untereinander und mit dem eigentlichen Grundkörper verbunden werden. Als Fügeverfahren bietet sich hier das Kleben an, da mit dem Verfahren unterschiedliche Werkstoffe zuverlässig gefügt werden können. Zum Fügen können Haftklebstoffe oder chemisch härtende Systeme verwendet werden. Die Klebstofftypen unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Handhabbarkeit als auch in der Steifigkeit und der Dämpfungseigenschaften, was für die VAMM eine wichtige Rolle spielt. Zu beachten ist, dass der ein-

gesetzte Klebstoff nicht zu stark dämpfend wirkt, da die Schwingungen sonst nicht auf das Feder-Masse-Dämpfer-System übertragen werden können.

Die Planung der Fertigung sollte möglichst parallel zur Auslegung der VAMM erfolgen. Dadurch können Einschränkungen der eingesetzten Methoden frühzeitig berücksichtigt werden. Bei der Auswahl der Konzepte sind VAMM, die ohne Zusatzstoffe auskommen und nach Möglichkeit aus dem gleichen Material wie die Grundstruktur bestehen, hinsichtlich der Herstellungskosten und des Recyclings zu bevorzugen.

Einsatz vibroakustischer Metamaterialien in einer Fahrzeugtür

Das Potential vibroakustischer Metamaterialien zur Schall- und Schwingungsminderung im Automobilbau kann an einer Fahrzeugtür gezeigt werden (Fahrzeugtürdemonstrator, siehe Abbildung 7). Der Aufbau einer modernen Pkw-Tür entspricht einer Schalenbauweise. Dabei sind die Hauptkomponenten der Tür die Außen- und die Innenschale, welche zusammen mit einigen weiteren Karosseriebauteilen die tragende Struktur der Tür bilden. Je nach Art und Größe der äußeren Belastung eines Bauteils kommen entsprechende Materialien und Blechdicken zum Einsatz. Typischerweise werden für die Schalen Stahl oder Aluminium verwendet. An den Elementen der tragenden Struktur sind zahlreiche Anbauteile, wie z. B. Fensterheber, Schließsystem, Lautsprecher und Führungsschienen, befestigt, die Körperschallenergie in die Struktur einleiten können. Bei einer Pkw-Tür treten dynamische Körperschallanregungen durch den Fensterheberantrieb, bestehend aus einem Elektromotor und Getriebe, auf, die insbesondere im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 800 Hz zu einer wahrnehmbaren Schallabstrahlung im Fahrzeuginnenraum führen. Häufig sind in einer Pkw-Tür mehrere geräuschmindernde Maßnahmen zur Steigerung des akustischen Komforts umgesetzt, wie z. B. mehrschichtige Anordnungen von Metallen und Kunststoffen, Entdröhnbeläge, Schäume oder Absorberschichten. Gerade im Anregungsfrequenzbereich des Fensterheberantriebs stoßen konventionelle Maßnahmen zur Schwingungsreduktion an ihre Grenzen. Deshalb wurden für den Frequenzbereich ab ca. 500 Hz verschiedene Resonatorkonzepte entwickelt und in eine Rohkarosserietür integriert. Bei der Wahl von Resonatormaterial und -geometrie wurde zusätzlich zur vibroakustischen Wirkung Augenmerk auf die Eignung zur späteren Fertigung mit Großserien-Produktionstechnologien gelegt. Die Auslegung der VAMM-Konzepte erfolgte durch Integration diskreter Resonatormodelle in ein validiertes FE-Modell der Fahrzeugtür. Es wurde eine Variante mit Metall-Biegebalken-Resonator und eine

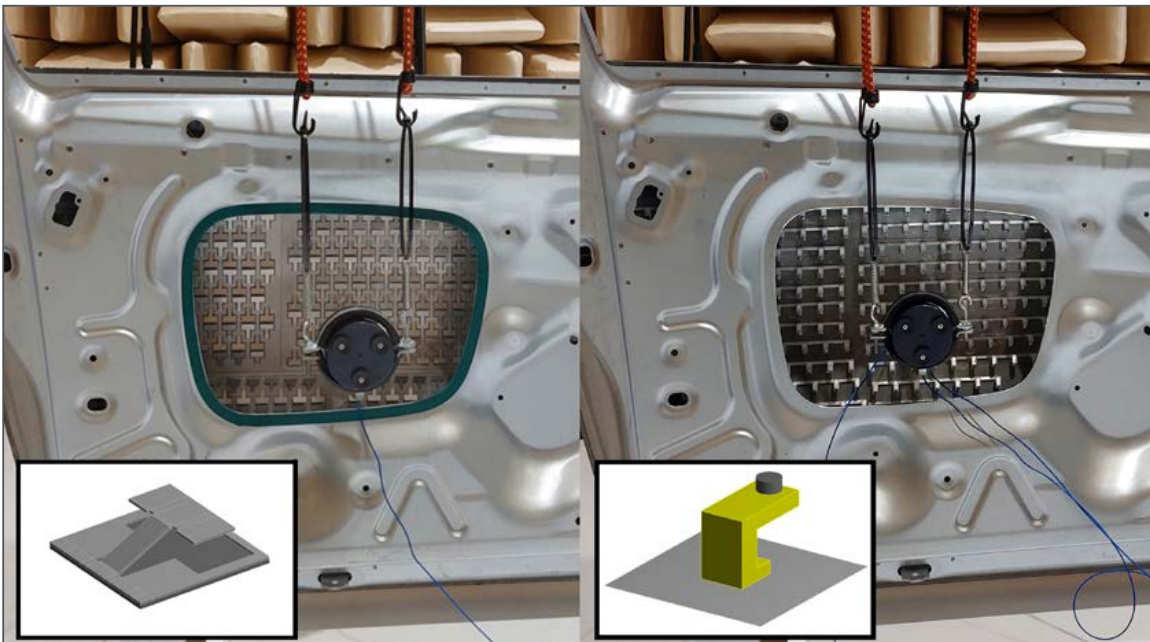


Abb. 8: Fahrzeugtürdemonstrator mit VAMM; links: Konzept Metall, rechts: Konzept Kunststoff

Variante mit Kunststoff-Biegebalken-Resonatoren, die jeweils auf die Innenseite des äußeren Karosserieblechs geklebt wurden, ausgelegt und umgesetzt (siehe Abbildung 8). Die Metallvariante verursacht eine Erhöhung der Bauteilmasse um 6 %, wohingegen die Kunststoffvariante nur mit ca. 3,7 % zur Masseerhöhung beiträgt.

Die Tür-Varianten wurden hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften in einem halbreflexionsarmen Raum vermessen. Zur idealisierten Körperschallanregung wurde ein elektrodynamischer Shaker eingesetzt. Die Anregungspositionen innerhalb der VAMM-Struktur sind in Abbildung 8 ersichtlich. Der abgestrahlte Luftschall wurde mit jeweils drei Mikrofonen auf der Innen- und Außenseite der Tür aufgezeichnet. Die Bewertung des Körperschalls er-

folgte mit Hilfe von sieben Beschleunigungssensoren, die verteilt auf der Außenseite der Tür befestigt wurden (siehe Abbildung 9).

Zur Bewertung der Wirksamkeit der beiden VAMM-Konzepte wurden entsprechende Übertragungsfunktionen des abgestrahlten Schalldruckes und der Oberflächenschwingschnelle zur eingeleiteten Kraft berechnet und diese mit einer Referenztür verglichen. Die Messergebnisse der Rohkarosserietür mit VAMM aus Metall und aus Kunststoff sind für den Körperschall in Abbildung 10 (siehe folgende Seite) und für den Luftschall in Abbildung 11 dargestellt. Die Referenzvariante ist eine Rohkarosserietür ohne jegliche Zusatzmaßnahme. Als seriennahe Akustikmaßnahme kam eine Schwerdämmmatte (SDM) zum Einsatz, deren Größe und Gewicht sich an der Serienmaßnahme

Abb. 9: Messaufbau zur vibroakustischen Charakterisierung der Rohkarosserietüren



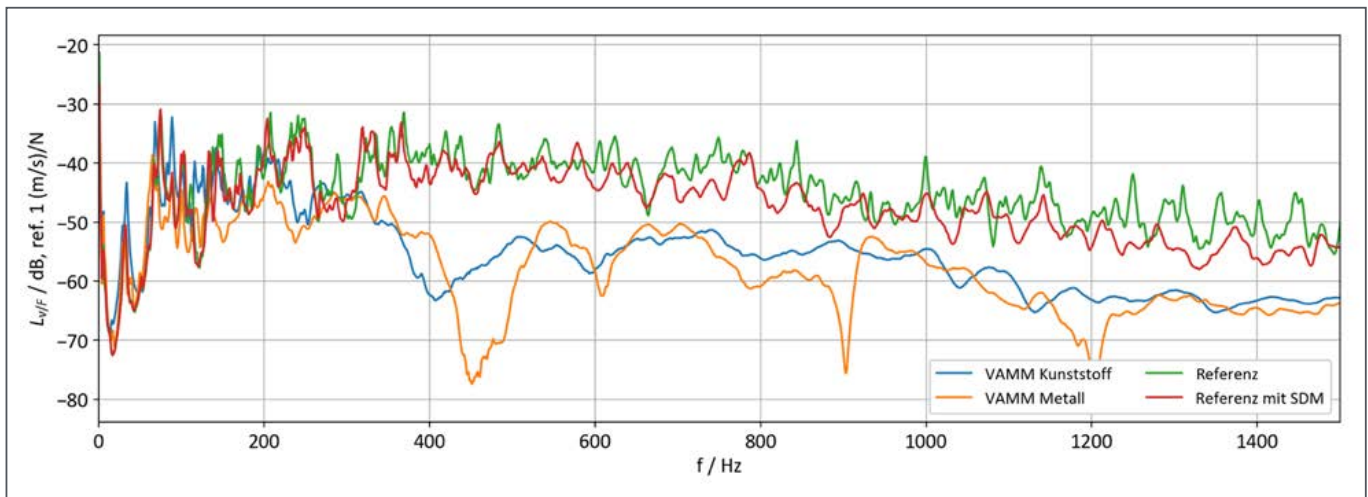


Abb. 10: Messergebnisse Körperschall VAMM-Türen, über alle Körperschallsensoren gemittelte Übertragungsfunktion Schnelle zu anregender Kraft

für die Türen orientierte (Referenz mit SDM).

In der Körperschallübertragungsfunktion der Oberflächenschwingschnelle zur eingeleiteten Kraft ist eine deutliche Reduktion des Körperschalls bei den VAMM-Türen im Vergleich zu den Referenztüren ab ca. 300 Hz erkennbar. Die Referenztür mit der Schwerdämmmatte zeigt leicht reduzierte Pegel bei tiefen Frequenzen und eine breitbandige Pegelabsenkung im hohen Frequenzbereich im Vergleich zur Tür ohne Maßnahme. Die VAMM-Türen hingegen weisen eine Pegelreduktion von teilweise bis zu 30 dB im Vergleich zu beiden Referenztüren auf. Insbesondere im Bereich der Stoppbänder ist diese Reduktion signifikant. Aber auch im höherfrequenten Bereich wird eine breitbandige Dämpfungswirkung erzielt, die nochmal deutlich unter der Wirkung des Schwertschichtbelages liegt. Die Reduktion im Körperschall wirkt sich direkt auch auf die Luftschallabstrahlung aus. Auch hier zeigt sich eine deutliche Minderung der Schallabstrahlung für beide VAMM-Varianten ab ca. 300 Hz. Im Vergleich

zur Referenz mit Schwerdämmmatte wird insbesondere im Bereich der Stoppbänder eine Reduktion der Schallabstrahlung von bis zu 20 dB erreicht.

Vibroakustische Metamaterialien zeigen am Demonstrator Fahrzeugtür ein hohes Potential zur Schall- und Schwingungsreduktion im Vergleich zu herkömmlichen Maßnahmen. Um eine effiziente Wirkung bei möglichst geringer Masseerhöhung zu erreichen, ist eine großflächige Applikation von VAMM, wie in diesem Demonstrationsbeispiel, nicht in jedem Fall zielführend. Vielmehr sollte versucht werden, die VAMM im Designprozess der Tür möglichst nah um Körperschalleinleitungsstellen zu platzieren, um somit eine Übertragung von eingeleiteter Körperschallenergie in die gesamte Struktur zu vermeiden.

Akustische Metamaterialien für einen Schalldämpfer

Im Fall akustischer Metamaterialien für die Anwendung als Schalldämpfer in Kanälen wird die Einheits-

Abb. 11: Messergebnisse Luftschall VAMM-Türen, über alle Mikrofone gemittelte Übertragungsfunktion Schalldruck zu anregender Kraft

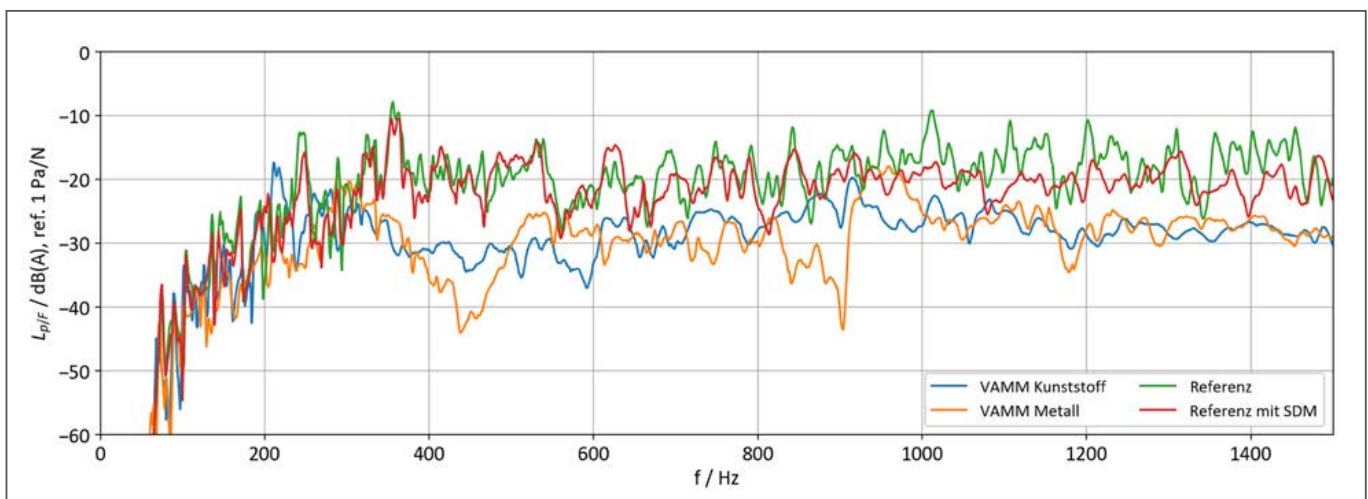




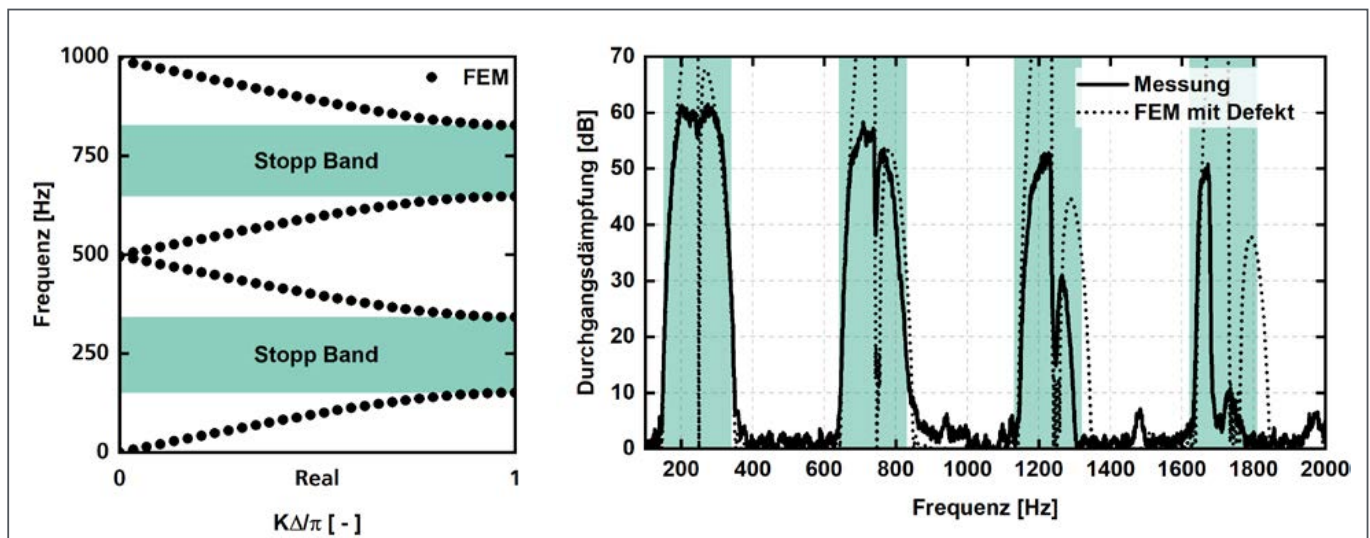
Abb. 12: Versuchsaufbau zur Validierung des periodischen Einheitszellenverbundes mit sieben $\lambda/4$ -Resonatoren

zelle von einem einzelnen akustischen Resonator gebildet. Durch Anordnung mehrerer Einheitszellen aus gleich abgestimmten Resonatoren mit konstanten Abständen entsteht ein periodischer Verbund. Ein aperiodischer Verbund ist dann vorhanden, wenn sowohl die Abstände als auch die Abstimmung der einzelnen Resonatoren variieren. Mit beiden lassen sich Stoppbänder erreichen, bei denen die Schallweiterleitung in einem Kanal stark reduziert wird. Als Beispiel für einen runden Schalldämpfer zeigt Abbildung 12 einen experimentellen Aufbau mit einer periodischen Resonator-Anordnung aus sieben $\lambda/4$ -Resonatoren. Sie sind auf eine Resonanzfrequenz von 250 Hz ausgelegt und im Bragg-Abstand angeordnet, sodass die Resonanzfrequenz und die Bragg-Frequenz zusammenfallen. Dadurch wird die maximale Bandbreite erreicht, welche durch die Periodizität breiter ist als die Summe der einzelnen Resonatoren.

Abbildung 13 zeigt den Realteil der zugehörigen Bandstruktur sowie die gemessene und die berechnete Durchgangsdämpfung mit den Stoppbändern. Die periodische Anordnung weist zwar eine gute, aber nur schmalbandige Wirkung bei ausgewählten Frequenzen auf.

Für eine breitbandigere Dämpfung werden Arrays von Resonatoren mit unterschiedlicher Resonanzfrequenz und Abständen angeordnet und sind in diesem Fall aperiodisch, wie Abbildung 14 auf der folgenden Seite zeigt. Dargestellt ist weiterhin die mit der Transfermatrix-Methode berechnete Durchgangsdämpfung zweier unterschiedlicher Anordnungen mit identischen Resonatoren. Die schwarze Kurve gibt die optimale Anordnung wieder, die rote Kurve eine zufällige Anordnung der gleichen Resonatoren. Die Einbrüche im Dämpfungsverlauf disqualifizieren diese Anordnung für eine praktische

Abb. 13: links: Berechnete Bandstruktur des infiniten Falls einer Einheitszelle aus dem Versuchsaufbau in Abbildung 12 (K = Wellenzahl, Δ = Abstand); rechts: gemessene und berechnete Durchgangsdämpfung des finiten Versuchsaufbaus im Vergleich zu den berechneten Stoppbändern



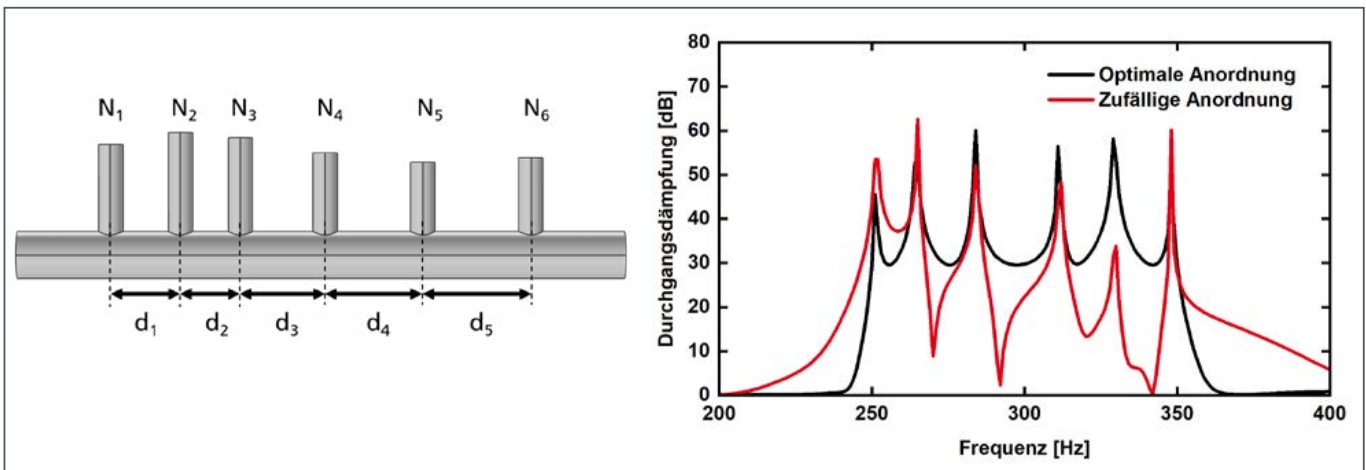


Abb. 14: Aperiodische Resonatoranordnung mit unterschiedlich abgestimmten akustischen Resonatoren, sowie optimale und nachteilige Dämpfung für zwei verschiedene Anordnungen gleicher Resonatoren

Anwendung. Das Ziel und Potenzial aperiodischer Anordnung mit unterschiedlich abgestimmten Resonatoren ist die Vermeidung derartiger Einbrüche im Dämpfungsverlauf.

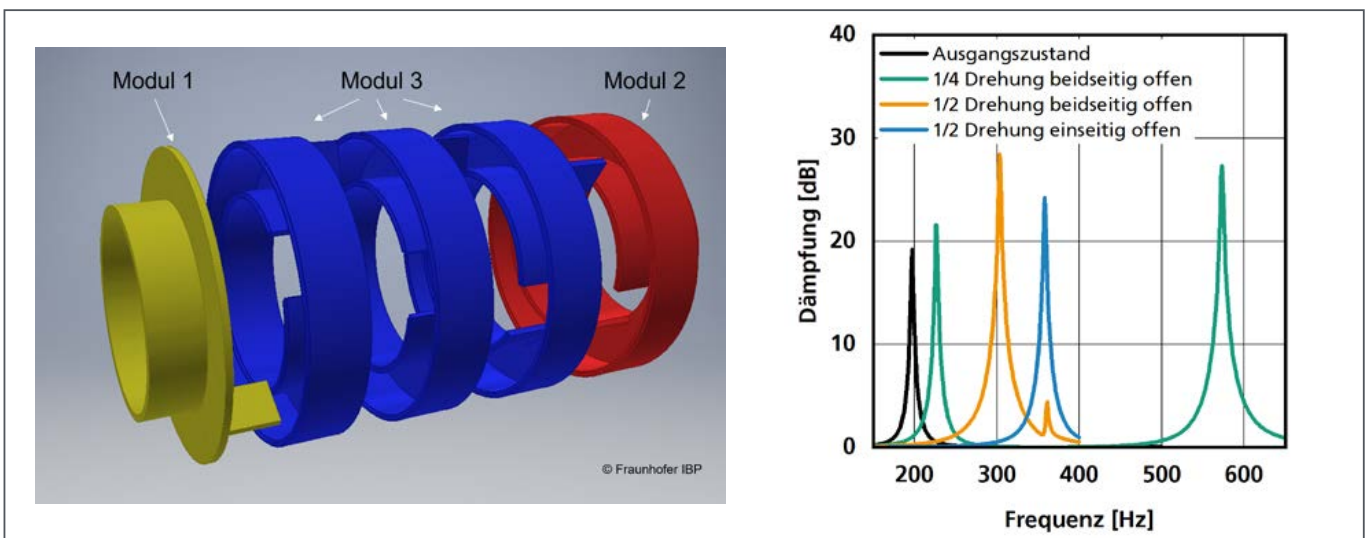
In realen Kanalnetzen stellen verteilt angeordnete Resonatoren eine Herausforderung dar. Es wurden daher weitere Bauformen untersucht, die sich an klassischen Abmaßen orientieren und als Rohr- oder Kulissen-Schalldämpfer darstellbar sind. Die größte Herausforderung bei der industriellen Umsetzung derartiger Metamaterial-Schalldämpfer ist die günstige und automatisierte Herstellung von ausreichend dichten Resonatorräumen, die nur dann ihre optimale Wirkung entfalten.

Abbildung 15 zeigt den Prototypen für einen abstimmbaren $\lambda/4$ -Resonator als Rohrschalldämpfer, der zunächst mit einem 3D-Drucker realisiert wurde. Die grundlegende Idee des Konzeptes „Ringresonator“ besteht darin, die Resonatorraum in zwei Halbschalen aufzuteilen, die einfach im Spritzguss-

verfahren herstellbar sind. Anschließend lassen sich die beiden Halbschalen verkleben und erreichen so eine ausreichende Dichtigkeit.

Bei dem in Abbildung 15 dargestellten „Ringresonator“ sind die Trennwand auf eine Halbschale und die Hohlkammer auf die andere Halbschale aufgeteilt. Wie die Messungen in Abbildung 15 (rechts) zeigen, kann durch das Verdrehen der Halbschalen gegeneinander die Resonatorlänge variiert und dadurch die Resonanzfrequenz des Resonators in einem Frequenzbereich von ca. 200 bis 600 Hz eingestellt werden. Anhand der drei in Abbildung 15 dargestellten Basismodule können beliebig kombinierte Kammern als modularer Schalldämpfer aufgebaut werden. Durch die Hinzunahme von Modulen mit einer Durchgangsöffnung sind größere Resonatorlängen realisierbar, die zu tieferen Frequenzen abstimmbare sind. Abbildung 16 zeigt die Anwendung eines Ringresonators bestehend aus 15 Modulen, sowie den Vergleich von berechneter und gemessener Durchgangsdämpfung.

Abb. 15: Modularer Ringresonator (links) und Erweiterungsmodul (rechts) für die Bedämpfung tiefer Frequenzen



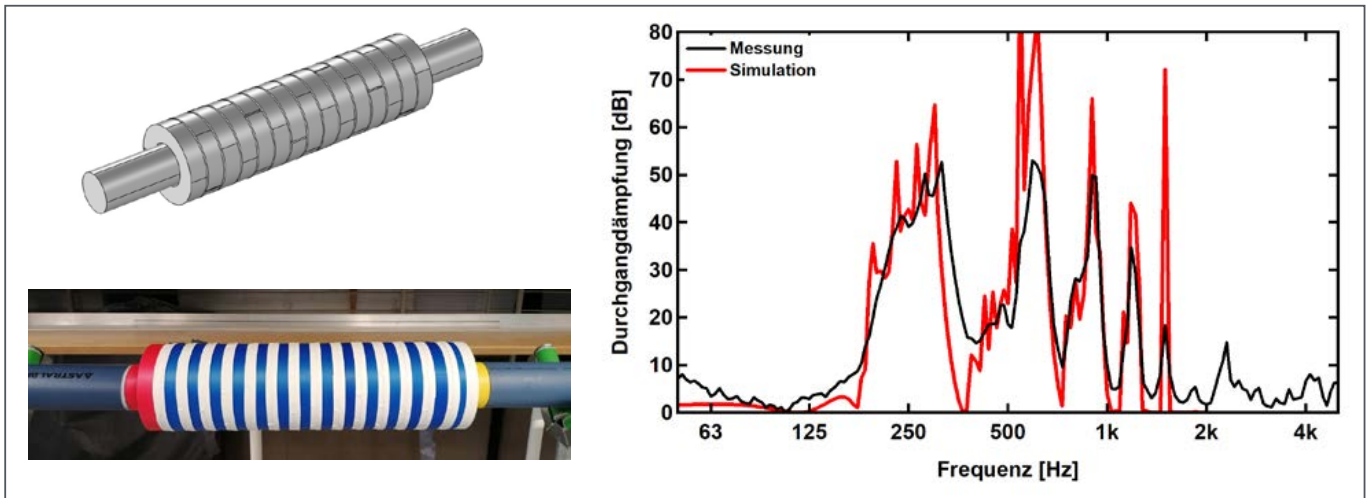


Abb. 16: Ringresonator mit 15 Modulen (links) sowie der Vergleich der gemessenen und berechneten Dämpfung (rechts)

Der Schalldämpfer wurde so ausgelegt, dass er den Bereich um 250 Hz und 500 Hz abdeckt.

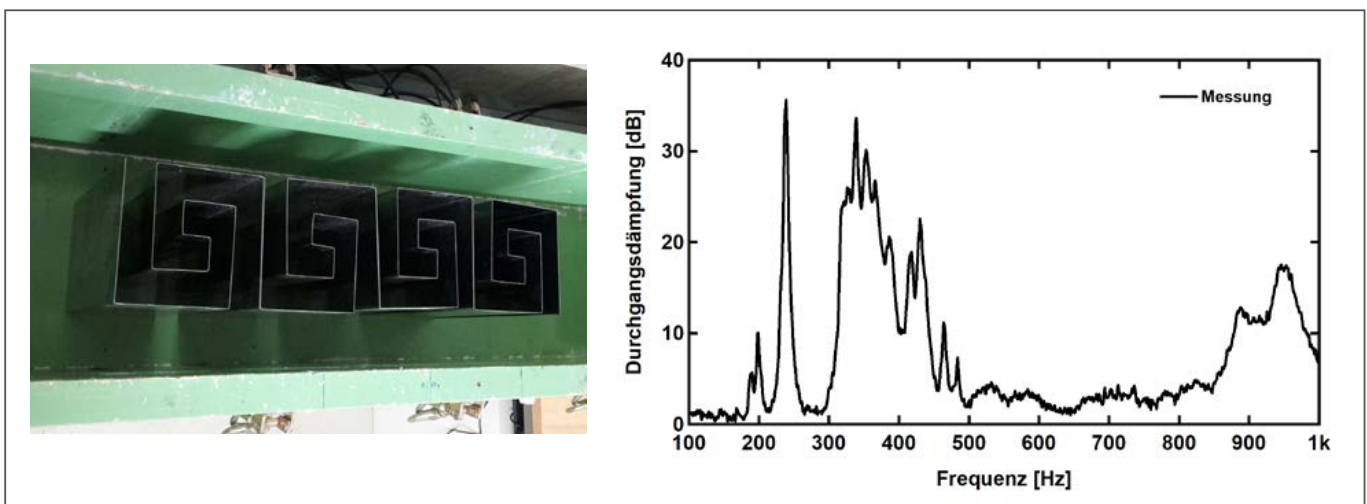
Das kompakte Schalldämpferkonzept der modularen Ringresonatoren lässt sich durch die wenigen Basis-komponenten an die jeweiligen akustischen Erfordernisse anpassen. Je nach Anwendungsfall ist ein dafür geeignetes Material zu verwenden. Die Fertigung aus Kunststoff in Spritzguss ist problemlos und bei hohen Stückzahlen kosteneffizient möglich.

Der Einsatz von Resonatoren ist bei Kulissenschalldämpfern vorteilhaft zur Reduktion tiefer Frequenzanteile im Geräuschspektrum, die bei konventionellen Schalldämpfern in der Regel hohen Aufwand bedeuten oder Bauraum erfordern. Die Herausforderung ist dabei eine kostengünstige Herstellung von dichten Resonatoren. Nach wie vor ist Metall das bevorzugte Ausgangsmaterial zur Herstellung der Rahmen von Schalldämpfer-Kulissen. Für dichte Hohlkammern werden üblicherweise Schweiß- oder Klebprozesse eingesetzt, die aber anfällig hinsicht-

lich der akustischen Dichtigkeit sind. Eine Alternative stellt das Verformen des Blechs durch Biegen oder Abkanten dar. Das Resultat der damit gebildeten und kombinierten Einheitszellen zeigt Abbildung 17 (links) als sogenannter „Spiralresonator“. Dabei sind zwei gleiche $\lambda/4$ -Resonatoren ineinander gewickelt, sodass die gleiche Dämpfung in den Spalten auf beiden Seiten erzeugt wird, die für eine symmetrische Anordnung von Schalldämpfer-Kulissen zwingend notwendig ist. Für die Herstellung des in Abbildung 17 gezeigten Musters wurde ein spezielles Abkantwerkzeug verwendet, mit dem auch mehrere Spiralen in einer Größe von 125 mm x 125 mm in einem Zug gefertigt werden können. Druckdichte Deckel zum Verschließen der Elemente an den offenen Enden können z. B. aus einer profilierten Kunststoffplatte mit eingebrachter Dichtung bestehen und wären im Spritzgussverfahren möglich.

Zur Messung der Durchgangsdämpfung wurden die vier Einheitszellen des Spiralresonatoren als Verbund

Abb. 17: Verbund von 4 Resonator-Einheitszellen in einem kleinen Schalldämpfer-Kanal (links); gemessene Dämpfung der Anordnung (rechts)



für eine Schalldämpferkulisse in einen 250 mm breiten Kanal eingebaut. Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 17 dargestellt. Das Konzept zeigt sein Potential mit hohen Dämpfungswerten von über 20 dB zwischen 300 Hz und 400 Hz auf einer Baulänge von ca. 1 m. Für die Anwendung und Abstimmung auf verschiedene Frequenzbereiche besteht noch Optimierungsbedarf in der Modellierung sowie für die praktische Fertigung in Form von handhabbaren Schalldämpferkulissen. Das entwickelte Konzept stellt einen vielversprechenden Ansatz dar. Nächster Schritt in der Weiterentwicklung für die industrielle Umsetzung ist die Herstellung unterschiedlich großer Spiralen, die auf verschiedene Frequenzen abgestimmt sind, sowie die Integration als Kulissen-Schalldämpfer unter Beachtung der Druckverluste und Strömungsgeräusche.

Damit konnten im Bereich der Schalldämpfer wissenschaftliche Potentialanalysen sowie die Entwicklung und experimentelle Validierung von akustischen Metamaterialien für industrielle Anwendungen erarbeitet werden. Ihre prototypische Umsetzung führte jeweils zu einer hohen Dämpfung von mehr als 20 dB in einem breiten, tieffrequenten Frequenzbereich.

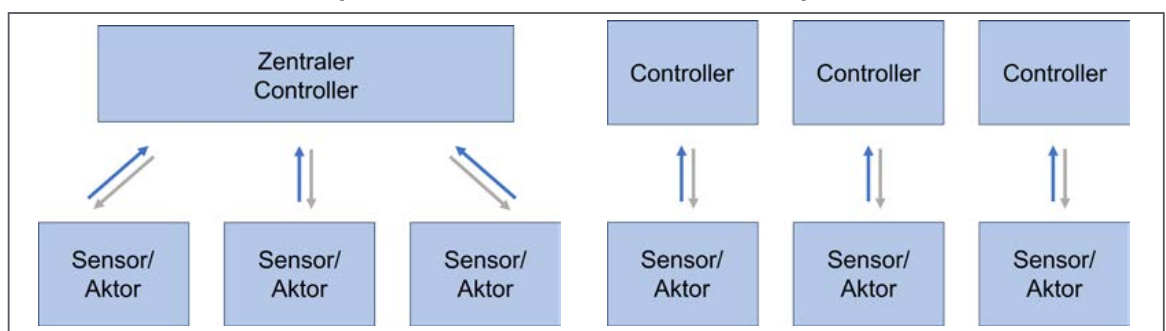
Aktive Metamaterialien

Ein aktives Metamaterial kann auf das betrachtete Schallfeld mit einem zusätzlich eingebrachten Schallanteil aktiv Einfluss nehmen. Es ist aber auch möglich, dass die Resonatoren des aktiven Metamaterials lediglich durch das vorhandene Schallfeld angeregt werden und diesem so Energie auf passive Weise entziehen. Gerade für eine dezentrale Ansteuerung des Metamaterials eignet sich die zuletzt genannte Variante, da hierbei ein ungewolltes Übersprechen zwischen den Resonatoren minimiert wird und somit keine zentrale Signalverarbeitungseinheit zur Systemstabilisierung nötig ist.

Gegenüber den passiven Ausführungsformen besitzen die Resonatorstrukturen der aktiven Metamaterialien Eigenschaften, die über Aktoren steuerbar sind. Entweder ist in der Struktur bereits ein Aktorprinzip integriert, beispielsweise das piezoelektri-

sche Prinzip in einem Biegebalkenresonator, oder es wird ein Aktor in die Struktur integriert, z. B. ein Lautsprecher in einen Helmholtzresonator. Da aktive Metamaterialien reaktiv auf das einfallende Schallfeld wirken, wird das zu beeinflussende Schallfeld i. d. R. mit Sensoren, typischerweise Mikrofonen, erfasst. Das erfasste Schallsignal wird verarbeitet und für die Steuerung der Aktoren in den Einheitszellen verwendet. Hierbei können unterschiedliche Signalverarbeitungsstrategien gewählt werden. Zum einen können die Einheitszellen im Verbund betrachtet werden. Die Signalverarbeitungseinheit ist dann zentral organisiert und bekommt alle Sensorsignale und steuert schließlich jeden Aktor an. Zum anderen kann jeder Aktor einzeln, also dezentral gesteuert werden. Hierbei besitzt jede Einheitszelle eine eigene Signalverarbeitungseinheit (siehe Abbildung 18). Der Vorteil liegt hierbei in der einfacheren und somit günstigeren Auslegung der Einheitszelle gegenüber der zentralen Variante. Außerdem können autarke Einheitszellen einfacher in eine Anwendung integriert werden, da elektronische Verbindungen zwischen den Einheitszellen nicht notwendig sind [11]. Die Auslegung eines aktiven Metamaterials erfolgt in ähnlichen Schritten wie bei einem passiven Metamaterial. Zunächst wird eine Einheitszelle hinsichtlich des Frequenzverhaltens definiert und auf die Zielanwendung abgestimmt. Zusätzlich zur Auslegung der Resonatorstruktur kommen die Aktoreigenschaften und die damit verbundene Aktoransteuerung. Mit einer geeigneten Filterung des Sensorsignals wird die Impedanz der Einheitszelle angepasst. Die restliche Auslegung erfolgt anhand der Transfermatrix-Methode. Für die gewünschte Stoppbandwirkung soll die Impedanz der Einheitszelle möglichst ein resonantes Verhalten aufweisen. Dies bedingt eine möglichst niedrige, rein reell wertige Impedanz im gewünschten Frequenzbereich. Die Filterfunktion, die nötig ist, um eine solche Impedanz zu erzeugen, lässt sich zum Beispiel aus den akustischen Ersatzschaltbildern der Einheitszelle ableiten [12]. Für die Reduzierung der Schall- bzw. Schwingungsübertragung ist die Ausbildung von Stoppbändern in

Abb. 18: Schematische Darstellung einer zentral (links) und dezentral (rechts) organisierten Controllerstruktur



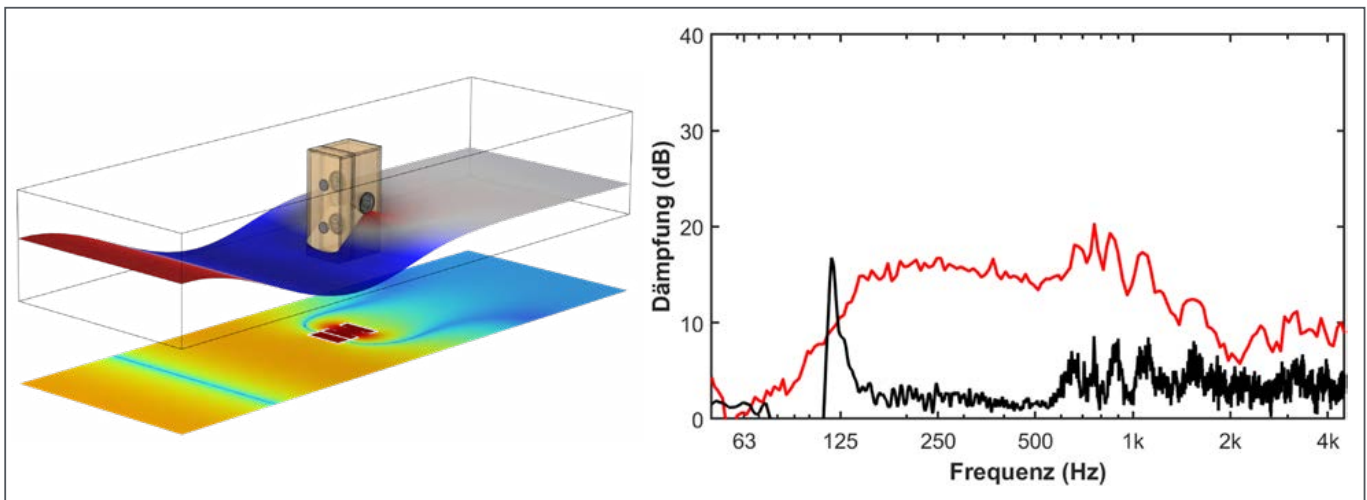


Abb. 19: Die entwickelte aktive Einheitszelle für den Aufbau einer aktiven Resonatorkassette besteht aus einem Helmholtzresonator mit zwei integrierten Lautsprechern (linke Abbildung). In der Simulation zeigt die aktive Einheitszelle bereits eine starke Schallfeldbeeinflussung. Die messtechnischen Untersuchungen haben gezeigt, dass bereits mit nur einer aktiven Einheitszelle (schwarz) eine höhere gemessene Durchgangsdämpfung als durch eine herkömmliche Absorberkulisse (rot) erzielt wurde (rechte Abbildung).

den betreffenden Störfrequenzbereichen nötig. Beim betrachteten Szenario eines Lüftungskanals betraf dies den Frequenzbereich von 50 Hz bis 500 Hz. Dieser sollte von einem hybrid aufgebauten Kulissenschalldämpfer aus passiven und aktiven Metamaterialien ausgebildet werden. Neben der Ausbildung der Stopp-

bänder sollten gleichzeitig die Abmessungen gegenüber den klassischen passiven Kulissenschalldämpfern reduziert werden. Für das aktive Metamaterial wurde das Konzept einer Resonatorkassette, bestehend aus mehreren aktiven Einheitszellen, verwendet. Für die aktive Einheitszelle wurden ein Helmholtzresonator

Light-weight, wireless & easy to use!

An omni-directional sound source for room acoustic measurements

- Complies with the ISO 3382 directivity pattern.
- Weighs only 1.5 kg.
- Connects via cable or AptX Bluetooth up to 30 m.
- Pre-installed rechargeable battery, providing 1.5 hours of continuous playback.

Odeon Omni
available for
purchase

Heiko Atzrodt*Fraunhofer LBF,
Darmstadt***Daria Manushyna***Fraunhofer LBF,
Darmstadt***Sebastian Rieß***Fraunhofer LBF,
Darmstadt***Moritz Hülse-
brock***Fraunhofer LBF,
Darmstadt***Jan Troge***Fraunhofer IWU,
Dresden***Andreas Lühring***Fraunhofer IFAM,
Bremen***Peter Brandstätt***Fraunhofer IBP,
Stuttgart***Jens Rohlfing***Fraunhofer IBP,
Stuttgart***Agostino Troll***Fraunhofer IBP,
Stuttgart***Georg Fischer***Fraunhofer IDMT,
Ilmenau***Jan Küller***Fraunhofer IDMT,
Ilmenau***Daniel Beer***Fraunhofer IDMT,
Ilmenau*

mit elektrodynamischen Lautsprechern gekoppelt und als Bandpasssystem umgesetzt (siehe Abbildung 19, links). Über Mikrofone in unmittelbarer Nähe der Resonatoröffnung wurde der Schalldruck gemessen. Dieser Schalldruckpegelverlauf wurde durch eine Signalverarbeitungseinheit so angepasst und den Lautsprechern zugeführt, dass eine Impedanzanpassung und damit eine Schallfeldbeeinflussung stattfand. Die aktive Einheitszelle wurde so auf das betrachtete Schallfeld im Lüftungskanal abgestimmt und ein Stoppband bei ca. 100 Hz erzeugt.

Die messtechnischen Überprüfungen haben gezeigt, dass bereits eine aktive Einheitszelle eine höhere Durchgangsdämpfung als ein passiver Resonator erzielen kann. In Abbildung 19 (rechts) weist die aktive Einheitszelle bei ca. 100 Hz eine höhere Durchgangsdämpfung als eine herkömmliche Schalldämpferkulisel auf. Unter Verwendung mehrerer aktiver Einheitszellen kann dieser Vorteil verstärkt werden.

Fazit

Im Rahmen des Fraunhofer Projektes „MetaVib“ wurden wichtige Grundlagen für die industrielle Nutzbarmachung von vibroakustischen Metamaterialien erarbeitet. Dabei wurden anwendungs- und herstellungsrelevante Anforderungen berücksichtigt. Darüber hinaus wurden wissenschaftliche Arbeiten im Bereich der numerischen Auslegung, Ansteuerung und Herstellungsverfahren von VAMM für strukturdynamische und akustische Problemstellungen fokussiert.

Die Wirksamkeit und Umsetzbarkeit von vibroakustischen Metamaterialien ist somit für unterschiedliche Anwendungsszenarien nachgewiesen. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass VAMM die Amplituden von schädlichen Strukturschwingungen und Lärm so tief und breitbandig reduzieren kann, wie das mit konventionellen Maßnahmen wie Absorbern oder Dämpfungsmaterialien praktisch nicht umsetzbar ist. Diese ermöglichen neue Gestaltungsfreiräume zur gezielten vibroakustischen Optimierung von Bauteilen unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Leichtbaukriterien.

Literatur

- [1] Veselago, V.G.: The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . 1968 Sov. Phys. Usp. 10:509. <https://doi.org/10.1070/PU1968v010n04ABEH003699>
- [2] Smith D.R.; Padilla W.J.; Vier D.C.; Nemat-Nasser S.C.; Schultz S.: Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity, Phys. Rev. Lett. 84, 4184 – Published 1 May 2000. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184>
- [3] Metamaterial Technologies Market Size, Share, Trend, Forecast, & Industry Analysis: 2021–2026, Stratview Research, SR1691.
- [4] Metamaterials Market Analysis, Coherent Market Insights, CMI3834, 2022.

- [5] Metamaterials Market – Global Industry Assessment & Forecast, Vantage Market Research, VMR-2056, 2022.
- [6] Metamaterials: Global Strategic Business Report, Global Industry Analysts, Inc, ID: 4805188, 2023.
- [7] Atzrodt, H.; Maniam, A.; Droste, M.; Rieß, S.; Hülsebrock, M.: A Power-Based Framework for Quantifying Parameter Uncertainties in Finite Vibroacoustic Metamaterial Plates, Materials 2023, 16. <https://doi.org/10.3390/ma16145139>
- [8] Rieß, S.; Droste, M.; Atzrodt, H.; Appel, N.; Córdor López, J.; Finger, K.; Erraji, A.; Troge, J.: Vibroacoustic metamaterials for noise and vibration reduction in the automotive industry. Aachen Acoustics Colloquium 2022, Aachen, Germany, 2022.
- [9] Claeys, C.: Design and Analysis of Resonant Metamaterials for Acoustic Insulation. Dissertation KU Leuven, 2014.
- [10] Chen, S.; Fan, Y.; Fu, Q.; Wu, H.; Jin, Y.; Zheng, J.; Zhang, F.: A review of tunable acoustic metamaterials, Applied Sciences, vol. 8, no. 9, 2018.
- [11] Frampton, K.D.; Baumann, O.N.; Gardonio P.: A comparison of decentralized, distributed, and centralized vibroacoustic control. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 128, no. 5, pp. 2798–2806, 2010.
- [12] Fischer, G.; Zhykhar, A.; Küller, J.; Troll, A.: Designing Active Acoustic Metamaterials, In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2023, 49. Jahrestagung für Akustik, Hamburg, 2023 S. 158–161. ■