

Akustische Metamaterialien für die Anwendung als Schalldämpfer

Der Beitrag berichtet über akustische Metamaterialien (AMM) und deren Anwendung in der Kanalakustik als Schalldämpfer. AMM stehen auch in diesem Kontext im Fokus aufgrund ihrer vielversprechenden Eigenschaften. In der Literatur finden sich theoretische Betrachtungen und einige Demonstratoren, aber aufgrund der oft schwierigen Fertigung wenig praktische Umsetzungen. Durch die Zunahme additiver und anderer Fertigungstechniken lassen sich mittlerweile einige, vor allem kleinformatige Resonatorstrukturen herstellen, die aber nicht den in raumluft- und prozesslufttechnischen Anlagen wichtigen Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 500 Hz adressieren können. Daher wurden im Projekt „MetaVib“ Varianten untersucht und entwickelt, die sich auf diesen Frequenzbereich fokussieren. Die Ergebnisse zeigen ihre Wirksamkeit und Umsetzbarkeit gleichermaßen.

Stichworte FEM; Innovation; Kanalakustik; Metamaterial; Raumluftechnik; Resonatoren; Schalldämpfer; Prozesslufttechnik; Wellenleiter

Acoustic metamaterials for the application as silencer

The article reports about acoustic metamaterials AMM and their application in duct acoustics as silencers. AMMs are also in focus in this context due to their promising properties. There are theoretical considerations and some demonstrators in the literature, but few practical implementations due to the often-difficult production. Due to the increase in additive and other manufacturing techniques, it is now possible to produce some resonator structures, especially small ones, but these cannot address the frequency range between 100 Hz and 500 Hz, which is important in ventilation and air-conditioning systems. Therefore, variants were developed and investigated in the project “MetaVib” that focus on this frequency range. The results validate their effectiveness and feasibility.

Keywords duct acoustics; FEM; innovation; metamaterial; process air handling; resonators; silencers; ventilation; waveguides

1 Stand der Technik und Wissenschaft

1.1 Recherche zu akustischen Metamaterialien

Als Vorgänger der akustischen Metamaterialien (AMM) gelten die sogenannten Sonic Crystals in Anlehnung an kristalline Strukturen, die aber künstlich hergestellte periodische Strukturen sind, welche die Ausbreitung akustischer Wellen in Fluiden gezielt mittels Bragg-Reflexion beeinflussen [1]. Der Begriff Metamaterial bezeichnet dagegen eine künstlich hergestellte Struktur, deren Eigenschaften von den in der Natur üblichen abweichen, wie z.B. Strukturen mit negativer Brechung [2]. Die Abgrenzung zwischen einem akustischen Metamaterial und einem Sonic Crystal ist definitionsgemäß nicht zwingend eindeutig und wird in Fachveröffentlichungen nicht immer einheitlich verwendet. Dies fällt insbesondere dadurch auf, dass der Begriff „akustisches Metamaterial“ im Zusammenhang mit beliebigen Resonator-basierten Strukturen genannt wird.

Ein prominentes Beispiel, das als „Metamaterial-Schalldämpfer“ bezeichnet wird, ist die in Bild 1 dargestellt Struktur. Dieser additiv gefertigte Ring stellt einen $\lambda/2$ -Resonator dar, mit λ [m] der Wellenlänge, und wurde am MIT [3] entwickelt und patentiert [4]. Der Ring wird in einen runden Kanal eingesetzt, wodurch sich der Querschnitt verringert. Die einlaufende Schallwelle teilt sich auf in einen Teil, der durch den freien Querschnitt läuft und ein weiterer Teil, der durch den Resonator läuft. Dieses Prinzip ist bekannt als Herschel-Quincke-Röhre [5]. Auch wenn

die Umsetzung für bestimmte Zwecke sinnvoll sein kann, scheint die Bezeichnung als Metamaterial für diesen einzelnen Resonator unpassend.

Der Schalldämpfer in Bild 2a basiert auf einem Array von unterschiedlich abgestimmten $\lambda/4$ -Resonatoren und umfasst einen Wirkbereich von ca. 700 Hz bis 2500 Hz [6]. Weil die einzelnen Resonatoren jedoch sehr klein sind, besitzen sie keine große Wirkung hinsichtlich der erreichbaren Pegelminderung. Durch die Verwendung von vielen Resonatoren kann man diesem Effekt entgegenwirken und darüber hinaus Dämpfungsverläufe gezielt erzeugen. Nach dem gleichen Prinzip werden auch Schalldämpfer mit Helmholtz-Resonatoren aufgebaut, häufig mit gleich abgestimmten Resonatoren. Neben der Integration vieler Resonatoren wurden auch Veröffentlichungen zur Nutzung der

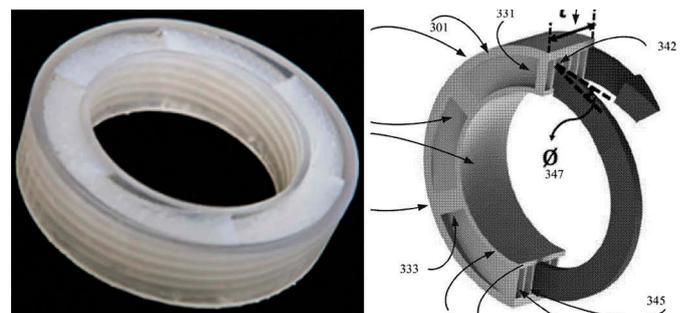


Bild 1 Als Metamaterial bezeichneter additiv gefertigter $\lambda/2$ -Resonator; a) Foto [3], b) Zeichnung [4]
An additive-manufactured $\lambda/2$ -resonator labeled as metamaterial; a) photo [3], b) drawing [4]



Bild 2 a) Rohrschalldämpfer mit einem Array von $\lambda/4$ -Resonatoren [6] und b) periodische Anordnung von Expansionskammer-Schalldämpfern [8]
 a) Tubular silencer with an array of $\lambda/4$ -resonators [6] and b) periodic arrangement of expansion chamber silencers [8]

Bragg-Streuung durch periodische Anordnung von Schalldämpfern identifiziert [7]. Seitdem gibt es zahlreiche Veröffentlichungen zur Ausbreitung von Schall in periodischen Wellenleitern, die das Phänomen aber meist nur theoretisch behandeln. Im speziellen Anwendungsfall eines tieffrequent wirksamen Schalldämpfers wird in [8] eine experimentelle Untersuchung veröffentlicht. Bild 2b zeigt den dabei verwendeten Versuchsaufbau.

Aufgrund des absehbaren Fertigungsaufwands für derartige Strukturen sind im Bereich der Schalldämpfer bisher keine industriellen oder großserientauglichen Anwendungen akustischer Metamaterialien bekannt. Eine Ausnahme bildet die labyrinthartige Struktur in Bild 3, bestehend aus vielen unterschiedlich abgestimmten $\lambda/4$ -Resonatoren [9]. Dabei handelt es sich um die rückseitige Abdeckung eines Lautsprecher-Chassis der Firma KEF. Die $\lambda/4$ -Resonatoren sind im Gegensatz zu Schalldämpfern nicht seriell, sondern parallel angeordnet. Dadurch wirken alle Resonatoren auf einen Punkt. In diesem Beispiel dienen die Resonatoren dazu, das rückseitige Stehwellenfeld zwischen Hochtöner und Lautsprecherabschluss zu minimieren, wodurch der Frequenzgang des Hochtöners entzerrt und ein möglichst linearer Frequenzgang erzeugt wird.

1.2 Bauformen und Wirkprinzipien von Schalldämpfern

Schalldämpfer haben die Aufgabe, den sich über Kanäle und Öffnungen ausbreitenden Luftschall zu mindern, ohne

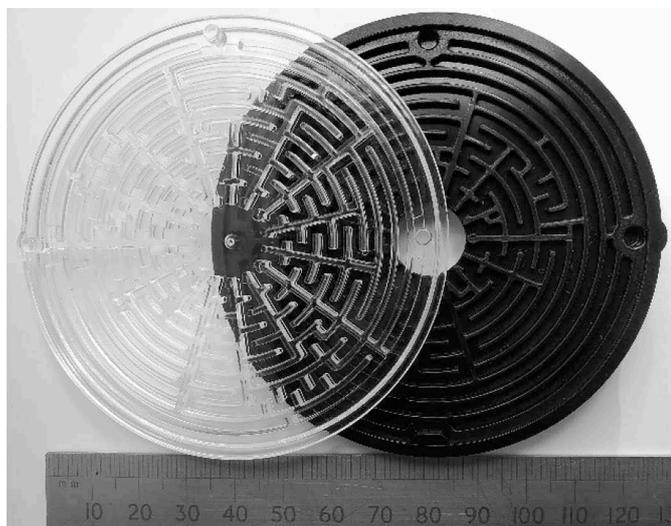


Bild 3 Platte mit integriertem Labyrinth aus $\lambda/4$ -Resonatoren [9]
 Plate with integrated labyrinth of $\lambda/4$ -resonators [9]

dabei die Fortleitung strömender Medien wesentlich zu behindern. Man unterscheidet nach den Wirkprinzipien zwischen Absorptionsschalldämpfern und reaktiven Schalldämpfern, sowie nach Bauform zwischen Kulissen- und Rohrschalldämpfer (Bild 4). Beide Wirkprinzipien können in beiden Bauformen auftreten, auch Kombinationen sind möglich.

Absorptionsschalldämpfer besitzen poröse oder faserige Auskleidungen, an denen die Schallwellen im Spalt streifend vorbeilaufen und die Schallenergie teilweise dissipieren. Typischerweise besitzen Absorptionsschalldämpfer einen Dämpfungsverlauf, der eine ansteigende Flanke bei tiefen Frequenzen, ein Plateau im Bereich des Dämpfungsmaximums und eine abfallende Flanke bei hohen Frequenzen aufweist. Als reaktive Schalldämpfer bezeichnet man alle Arten von Schalldämpfern, deren Wirkung durch Resonanz oder Reflexion entsteht mit lediglich geringem dissipativen Anteil. Reflexionsschalldämpfer erzeugen durch Änderungen des Kanalquerschnitts oder Verzweigung in Kanalabschnitte mit verschiedenen Längen einfache oder mehrfache Schallreflexionen, wodurch die Schallwelle im Kanal zurückreflektiert und so deren Weiterleitung reduziert wird. Resonatorschalldämpfer bestehen aus passiven oder aktiven Resonatoren, die im Bereich ihrer Resonanzfrequenz auf das anliegende Kanalschallfeld rückwirken und somit den Schalldruck mindern (Bild 5). Resonatorschalldämpfer werden vorwiegend für die Dämpfung tiefer Frequenzen eingesetzt.

Bild 6 zeigt die exemplarischen Dämpfungsverläufe von Absorptions- und Resonatorschalldämpfern im Vergleich zum Bereich des Schalldruckpegels (SPL) typischer technischer Schallquellen wie z. B. Ventilatoren.

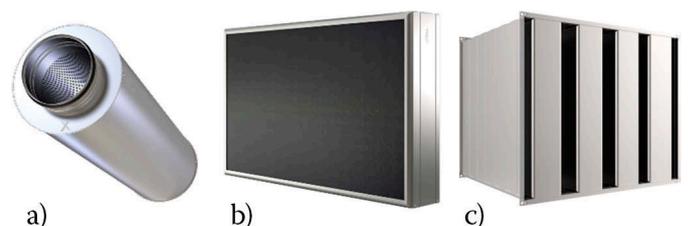


Bild 4 a) Rohrschalldämpfer [10], b) Kulisse [11], c) Kulissenschalldämpfer [12], jeweils gefüllt mit porösem Absorbermaterial
 a) Tubular silencer [10], b) splitter [11], c) splitter-type silencer [12], each filled with porous absorber material

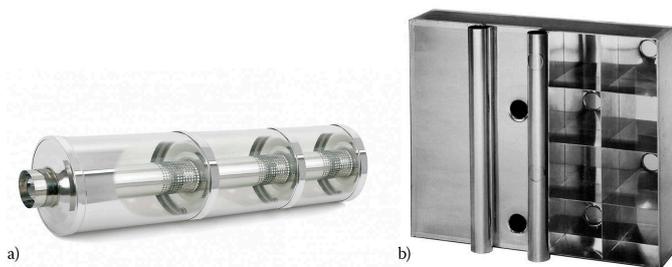


Bild 5 Beispiele von Resonator-Schalldämpfern; a) Mehrkammer-Tiefenschalldämpfer (Kutzner + Weber [13], IBP-Patent [14]), b) Membranabsorber (Schako in Ref. [15])
 Examples of resonator silencers. a) multi-chamber low tone silencer (Kutzner + Weber [13], IBP patent [14]); b) Membrane absorber (Schako in Ref. [15])

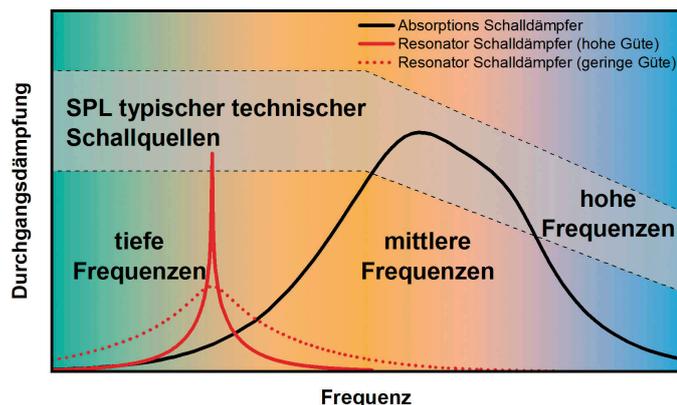


Bild 6 Typische Dämpfungsverläufe von porösen Schalldämpfern (schwarze Kurve) und Resonator-Schalldämpfern mit unterschiedlicher Resonator-Güte (rote Kurven) im Vergleich zum Bereich der Schalldruckpegel typischer technischer Schallquellen (graue Fläche)
 Typical attenuation characteristics of porous silencers (black curve) and resonator silencers with different resonator sharpness (red curves) in comparison to the range of sound pressure levels of typical technical sound sources (gray area)

2 Prinzipien akustischer Metamaterialien

2.1 Akustische Einheitszelle

Die akustische Einheitszelle wird von einem einzelnen akustischen Resonator gebildet. Aus der Literatur bekannte und für den praktischen Einsatz verfügbare Resonator-Konzepte, die auf dem Feder-Masse-Prinzip basieren, sind z. B. Helmholtz-Resonator (HR) und Membranabsorber (MA) [15] sowie der auf dem Interferenzprinzip basierende $\lambda/4$ -Resonator und $\lambda/2$ -Resonator. Mit Fokus auf Fertigbarkeit und Verhältnismäßigkeit bzgl. des Aufwandes konzentrierten sich die Untersuchungen im Projekt auf den Helmholtz-Resonator und den $\lambda/4$ -Resonator. Aus den verfügbaren Berechnungsverfahren wurde ein analytischer Ansatz, auf Basis von konzentrierten Elementen in Kombination mit der Transfer-Matrix-Methode (TMM) [5], und ein numerischer Ansatz auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) für die rechnerische Auslegung verwendet. Ziel dabei war es durch den experimentellen und numerischen Abgleich möglichst genaue und einfach handhabbare analytische Berechnungsmethoden abzuleiten. Die Zielgröße für die Anwendung der Resonatoren als Schalldämpfer in Kanälen ist die nach Gl. (1) definierte Durchgangsdämpf-

fung (bzw. Durchgangsdämpfungsmaß D_t oder engl. Transmission Loss TL). Sie beschreibt die Differenz des Schalleistungspegels L_{wi} , der auf das Prüfobjekt auftrifft, und des Schalleistungspegels L_{wt} , der durch das Prüfobjekt hindurchgelassen wird. Die Durchgangsdämpfung ist frequenzabhängig und beschreibt die Performance eines Schalldämpfers als dessen Vermögen den Schallpegel im Kanal zu vermindern.

$$TL = D_t = L_{wi} - L_{wt} \quad (1)$$

Typischerweise werden die akustischen Eigenschaften in der eindimensionalen stationären Kanalakustik mit der TMM berechnet. Die mathematische Formulierung findet elementweise für jedes Subsystem, wie z. B. ein Schalldämpfer oder ein Kanalstück, statt. Mit diesen Transfermatrizen T können die charakteristischen Impedanzen $Y = \frac{p}{v \cdot S}$ mit p [Pa] dem Schalldruck, v [m/s] der Schallschnelle und S [m²] der Kanalquerschnittsfläche auf der Eingangsseite (Y_E) und auf der Ausgangsseite (Y_A) eines Kanalabschnitts miteinander verknüpft und daraus z. B. die Dämpfung berechnet werden [5].

2.2 Akustischer Zellverbund in periodischer Anordnung

Die rechnerische Modellierung des periodischen Verbundes, der durch Anordnung mehrerer Resonatoren mit konstanten Abständen entsteht, kann mit der TMM und der FEM sowohl finit als auch infinit erfolgen. Bei der Modellierung finiter periodischer Verbünde müssen die Gesamtmodelle aufgebaut werden, welche die Eigenschaften für die jeweilige konkrete Anzahl der Elemente angeben. Um Speicher und Rechenzeit zu sparen, kann eine Modellierung des periodischen Verbundes im infiniten Fall sinnvoll sein. Als Ergebnis erhält man die sogenannte Bandstruktur, welche das Verhalten der Einheitszelle im Unendlichen angibt. Die dabei auftretende Bragg-Reflexion ist eine phasengleiche Mehrfachreflexion, wodurch ein Stehwellenfeld erzeugt wird und kein Energietransport stattfindet. Die Bragg-Reflexion wird durch die periodische Anordnung von Streukörpern, hier Resonatoren, mit einem Abstand (Gitterkonstante) von einer halben Wellenlänge der Zielfrequenz erzeugt. Bild 7 zeigt eine experimentelle Validierung mit einer periodischen Resonator-Anordnung aus sieben $\lambda/4$ -Resonatoren, die auf eine Resonanzfrequenz von



Bild 7 Versuchsaufbau zur Validierung des periodischen Einheitszellenverbundes mit sieben $\lambda/4$ -Resonatoren
 Experimental setup for the validation of the periodic unit cell cluster with seven $\lambda/4$ -resonators

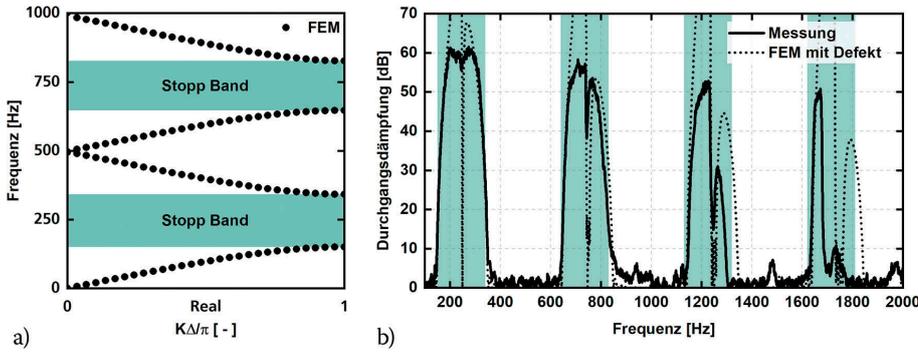


Bild 8 a) Berechnete Bandstruktur des infiniten Falls einer Einheitszelle aus dem Versuchsaufbau in Bild 7; b) gemessene und berechnete Durchgangsdämpfung des finiten Versuchsaufbaus im Vergleich zur den berechneten Stoppbändern
 a) Predicted band structure of the infinite case of a unit cell from the setup acc. to Figure 7; b) measured and predicted transmission loss for the finite setup compared to the computed stop bands

250 Hz ausgelegt und im Bragg-Abstand angeordnet wurden, 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.

Bild 8 zeigt links den Realteil der zugehörigen Bandstruktur mit den zugehörigen Stoppbändern über der normierten Bloch-Wellenzahl $K\Delta/\pi$. Die Stoppbänder stellen die maximal erreichbare Dämpfungsbreite der Schalldämpferanordnung aus Bild 7 dar. Im rechten Diagramm sind die gemessene und die berechneten Durchgangsdämpfungen sowie die Stoppbänder dargestellt. Die Übereinstimmung ist bei tiefen Frequenzen ausreichend gut. Bei hohen Frequenzen wird der relative Fehler der Abstände im Vergleich zur Wellenlänge so groß, dass die Wirkung einbricht. Dies zeigt, dass für praktische Anwendungen das Verhältnis von Abmessungen und Wellenlängen entscheidend sind.

2.3 Akustischer Zellverbund in aperiodischer Anordnung

Periodische Anordnungen wirken nur schmalbandig bei ausgewählten Frequenzen. Für Dämpfungen in einem größeren Frequenzbereich werden Array-Anordnungen von Resonatoren mit unterschiedlicher Resonanzfrequenz benötigt. Die Anordnung ist in diesem Fall aperiodisch (siehe Bild 9), sodass die Anordnung und der Abstand der Resonatoren untereinander einen erheblichen Einfluss auf das resultierende Dämpfungsspektrum haben.

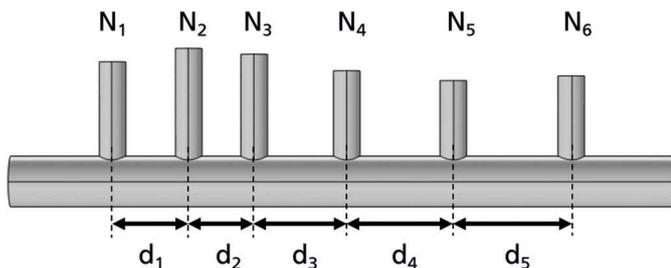


Bild 9 Aperiodische Resonatoranordnung mit unterschiedlich abgestimmten akustischen Resonatoren
 Aperiodic resonator arrangement with differently tuned acoustic resonators

Bild 10 zeigt die berechneten Durchgangsdämpfungen zweier unterschiedlicher Anordnungen mit identischen Resonatoren. Die schwarze Kurve gibt die Durchgangsdämpfung der optimalen Anordnung nach [16] wieder, welche eine breitbandige Dämpfung zwischen 250 Hz und 350 Hz ohne Einbrüche aufweist. Die rote Kurve stellt die Durchgangsdämpfung einer alternativen, zufälligen, Anordnung der gleichen Resonatoren dar. Dabei kommt es zu Einbrüchen im Dämpfungsverlauf, wodurch diese Anordnung für eine praktische Anwendung ungeeignet ist. Das Ziel bei aperiodischer Anordnung mit unterschiedlich abgestimmten Resonatoren ist es derartige Einbrüche im Dämpfungsverlauf zu vermeiden.

Im Rahmen einer Parameterstudie [17] konnte eine einfache händisch handhabbare Designregel nach Gl. (2) für den optimalen Abstand d_{opt} von zwei Resonatoren, mit den Wellenlängen $\lambda_{R,1/2}$ der gewählten Resonanzfrequenzen, abgeleitet werden, die bereits zu guten Ergebnissen führt.

$$d_{opt} = \frac{2n - 1}{4} \underbrace{(\lambda_{R,1} + \lambda_{R,2})}_{\lambda_{1,2}} \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}_+ \quad (2)$$

Die optimale Auslegung mehrerer Resonatoren ist kompliziert und wird deshalb oft algorithmisch gelöst. Weil das

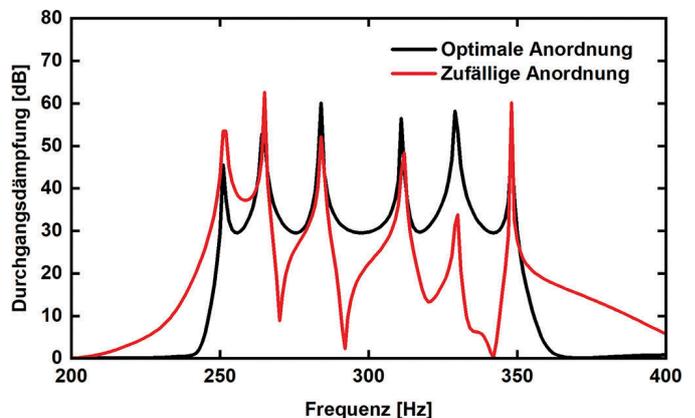


Bild 10 Optimale und nachteilige Dämpfung für zwei verschiedene Anordnungen gleicher Resonatoren
 Optimal and disadvantageous attenuation for two different arrangements of equal resonators

Problem viele lokale Extremstellen besitzt, werden überwiegend evolutionäre oder statistische Optimierungsmethoden eingesetzt. Mit handelsüblichen PCs können aufgrund der vorhandenen Speicher- und Rechenkapazitäten Anordnungen mit ca. 6 Resonatoren ausgelegt werden. In Bild 11 ist die gestellte Anforderung (Zieldämpfung) als schwarze durchgezogene Linie dargestellt. Die grauen Linien zeigen die berechneten Varianten, von denen die durchgezogenen die vorab definierte Anforderung nicht erfüllen und die gestrichelte hingegen die Lösung darstellt.

3 Fertigung von Prototypen

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Ansätze für die Umsetzung von akustischen Metamaterialien in Verbindung mit fertigungstechnischen Ansätzen vorgestellt, die im Projekt untersucht, umgesetzt und messtechnisch charakterisiert wurden. Dabei kamen Konzepte für Rohr- und für Kulissen-Schalldämpfer zum Einsatz. Die größte Herausforderung bei der industriellen Umsetzung von Metamaterial-Schalldämpfern ist die günstige und automatisierte Herstellung von ausreichend dichten Resonatorräumen, die nur dann ihre optimale Wirkung entfalten. Der Fokus bei der Entwicklung von AMM-Konzepten lag daher auf der Möglichkeit akustische dichte Hohlräume möglichst einfach herzustellen.

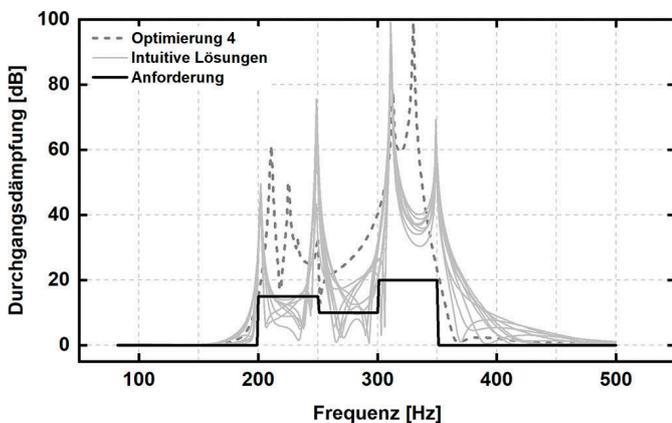


Bild 11 Mit dem Algorithmus berechnete Durchgangsdämpfungen (grau) im Vergleich zur Anforderung (schwarz)
Calculated transmission loss using the algorithm (gray) compared to the requirement (black)

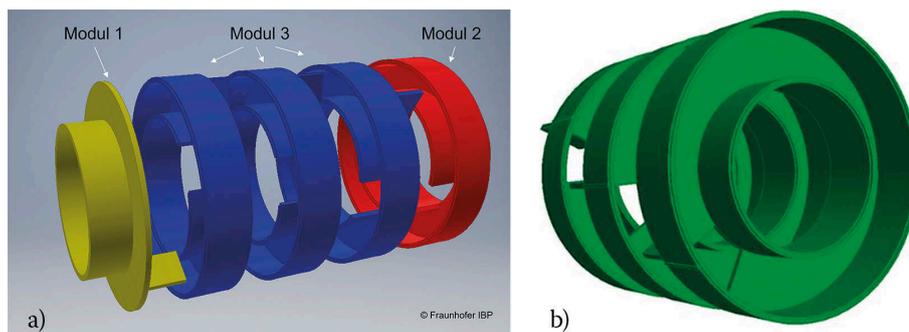


Bild 12 a) Modularer Ringresonator und b) Erweiterungsmodul für die Bedämpfung tiefer Frequenzen
a) Modular ring resonator and b) expansion module for the treatment of low frequencies

3.1 Rohrschalldämpfer

Im Projekt wurden unterschiedliche geometrische Ansätze zur Herstellung von $\lambda/4$ - und Helmholtz-Resonatoren verfolgt, die sich als Prototypen beispielsweise mit einem 3D-Drucker realisieren lassen. Bild 12 zeigt dafür eine Variante für den $\lambda/4$ -Resonator. Die messtechnische Untersuchung ergab, dass beide Resonatorarten die prognostizierte Wirkung zeigen. Weiter verfolgt wurde jedoch nur das Konzept des $\lambda/4$ -Resonators, weil die Herstellung einfacher und die Effektivität aufgrund harmonischer Anteile höher ist als beim Helmholtz-Resonator. Die grundlegende Idee des Konzeptes „Ringresonator“ besteht darin, die Resonator-kammer in zwei Halbschalen aufzuteilen, die einfach im Spritzgussverfahren herstellbar sind. Anschließend lassen sich die beiden Halbschalen verkleben und erreichen so eine ausreichende Dichtigkeit.

Bei dem in Bild 12 dargestellten Ringresonator sind die Trennwand auf eine Halbschale und die Hohlkammer auf die andere Halbschale aufgeteilt. Wie Bild 13 zeigt, kann dadurch die Resonanzfrequenz des Resonators durch gegenseitiges Verdrehen der Halbschalen in einem Frequenzbereich von ca. 200 Hz bis 600 Hz eingestellt werden.

Anhand der drei in Bild 12a dargestellten Basismodule können beliebig kombinierte Kammern als modularer Schalldämpfer aufgebaut werden. Durch die Hinzunahme von Modulen mit einem Durchgang (Bild 12b) sind größere Resonatorlängen realisierbar, die zu tieferen Frequenzen abstimbar sind. In Bild 14 ist als beispielhafte Anwendung ein Ringresonator aus 15 Modulen dargestellt, sowie der Vergleich von berechneter und gemessener Durchgangsdämpfung. Der Schalldämpfer wurde so ausgelegt, dass er den Bereich um 250 Hz und 500 Hz abdeckt.

3.2 Kulissenschalldämpfer

Das bevorzugte Material zur Herstellung von Schalldämpfer-Kulissen ist nach wie vor Metall. Um dichte Hohlkammern herstellen zu können, benötigt es üblicherweise Schweiß- oder Klebprozesse, die sehr anfällig in Bezug auf die akustische Dichtigkeit sind. Daher sollten möglichst andere Verfahren zum Einsatz kommen. Eine Alternative stellt das Verformen des Blechs durch Biegen oder Abkan-

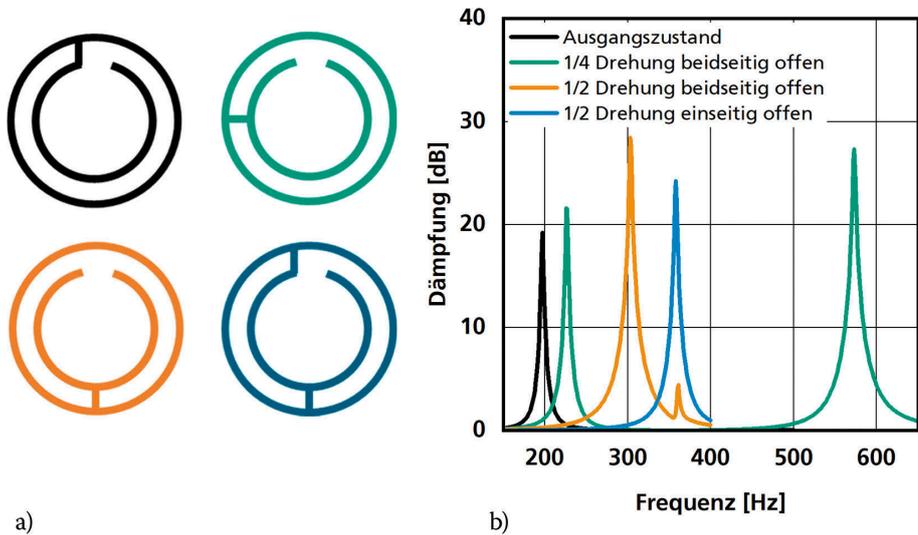


Bild 13 a) $\lambda/4$ -Resonatoren mit einstellbarer Resonanz durch Stellung des Rings mit der Trennwand, b) Dämpfung bei den jeweiligen Resonanzfrequenzen
 a) $\lambda/4$ -resonators with adjustable resonance by the position of the ring with the partition, b) Attenuation at the respective resonance frequencies

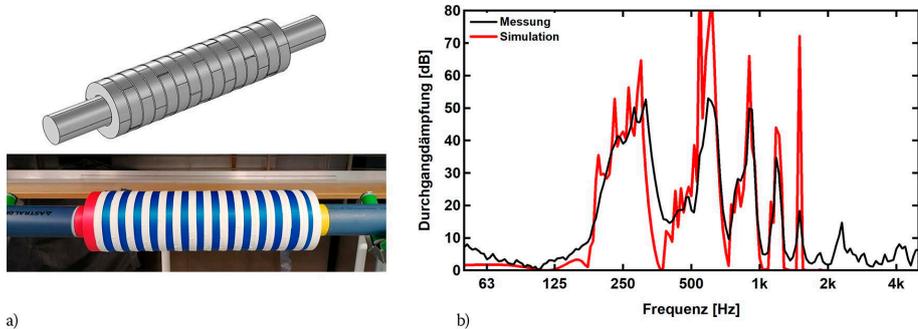


Bild 14 a) Ringresonator mit 15 Modulen, b) der Vergleich der gemessenen und berechneten Dämpfung
 a) Ring resonator with 15 modules, b) comparison of measured with predicted attenuation

ten dar. Das Resultat der damit gebildeten Einheitszelle zeigt Bild 15a als sogenannter „Spiralresonator“. Bei diesem Konzept sind zwei gleiche $\lambda/4$ -Resonatoren ineinander gewickelt, sodass die gleiche Dämpfung auf beiden Seiten erzeugt wird, die für eine symmetrische Anordnung von Schalldämpfer-Kulissen zwingend notwendig ist. Für die Herstellung eines Musters wurde ein spezielles Abkantwerkzeug gefertigt, das auch für mehrere Spiralen in einem Zug anwendbar ist. Im prototypischen Aufbau konnte der Spiralresonator in einer Größe von 125 mm \times 125 mm hergestellt werden. Für eine Serienfertigung ist die Produktion

solcher Profile auch durch Walzprofilieren denkbar. Das druckdichte Verschließen der Elemente an den offenen Enden erfordert die Herstellung entsprechender Deckel. Diese können z. B. aus einer profilierten Kunststoffplatte mit eingebrachter Dichtung bestehen und wäre für die Serienfertigung im Spritzgussverfahren möglich.

Bild 15b zeigt vier Einheitszellen des Spiralresonatoren als Verbund für eine Schalldämpferkulisse, eingebaut in einem 250 mm breiten Kanal zur Messung der Durchgangsdämpfung. Das Ergebnis der Messung ist in Bild 16 dargestellt.

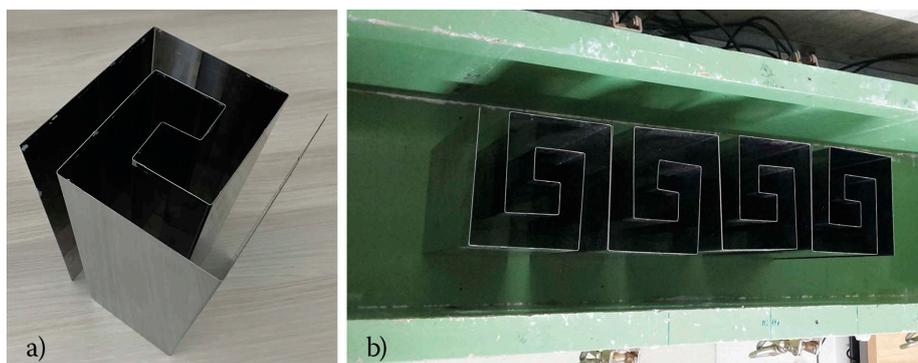


Bild 15 a) Einheitszelle des Spiralresonators, b) Verbund von 4 Resonatoren in einem kleinen Schalldämpfer-Kanal
 a) Unit cell of the spiral resonator, b) array of 4 resonators in a small silencer test duct

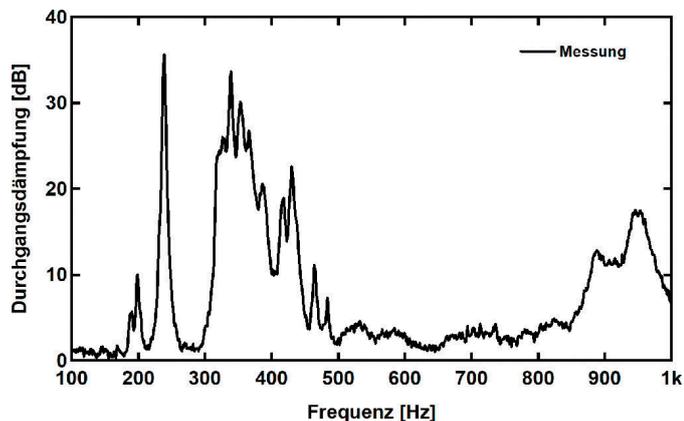


Bild 16 Gemessene Dämpfung des Spiralresonators aus Bild 15b
Measured attenuation of the spiral resonator from Figure 15b

Das Konzept zeigt sein Potenzial 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.

4 Zusammenfassung

Beim **Rohrschalldämpfer** konnten durch eine gezielte Auslegung und die vorzugsweise aperiodische Anordnung mehrerer Resonatoren eine signifikante Performancesteigerung erreicht werden. Das kompakte Schalldämpferkonzept der modularen Ringresonatoren lässt sich durch die wenigen Basiskomponenten an die jeweiligen akustischen Erfordernisse anpassen und wurde als Patent angemeldet. Für den jeweiligen Anwendungsfall ist das dafür geeignete Material zu verwenden. Die Fertigung aus Kunststoff in Spritzguss ist problemlos und bei hohen Stückzahlen kosteneffizient möglich. Für die Integration periodischer An-

ordnungen wird mehr Länge, dafür weniger kompakter Bauraum benötigt. Anwendungsspezifische Integrationskonzepte werden benötigt, um die Resonatoren gut in die Zielstruktur zu integrieren. So lassen sich z. B. längere Kanalstrecken problemlos dafür verwenden.

Beim **Kulissenschalldämpfer** ist der Einsatz von Resonatoren nach wie vor praxisrelevant, vor allem zur Bedämpfung tiefer Frequenzanteile im Geräuschspektrum, die bei konventionellen Kulissenschalldämpfern in der Regel hohen Aufwand bedeuten oder Bauraum erfordern. Die Herausforderung ist dabei eine kostengünstige Herstellung von dichten Resonatoren. Das entwickelte Konzept des Spiralresonators stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, der in verschiedenen Ausprägungen weiterverfolgt wird und für den ebenfalls ein Schutzrecht beantragt ist. Nächste Schritte 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 in dem hier vorgestellten Projekt wissenschaftliche Potentialanalysen sowie die Entwicklung und experimentelle Validierung von akustischen Metamaterialien in industriellen Anwendungen erarbeitet werden. Ihre prototypische Umsetzung führte jeweils zu einer hohen Dämpfung von mehr als 20 dB in einem breiten, tieffrequenten Frequenzbereich.

Danksagung

Die Autoren danken dem Projektkonsortium für die hervorragende Zusammenarbeit und dem wissenschaftlichen Beirat für die kooperative Unterstützung. Das Projekt „MetaVib“ wurde gefördert im Rahmen der internen Programme der Fraunhofer-Gesellschaft, Fördernummer PREPARE-840224.

Literatur

- [1] Gupta, A. (2014) *A Review on Sonic Crystal, Its Applications and Numerical Analysis Techniques*. Acoustical Physics 60 (2), pp. 223–234.
- [2] Wikipedia (2022) *Metamaterial* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation Inc. <https://de.wikipedia.org/wiki/Metamaterial> [Zugriff am: 20. Okt. 2022].
- [3] Ghaffarivardavagh, R.; et al. (2019) *Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference*. Phys. Rev. B, Vol. 99, No. 2, 10.1103/PhysRevB.99.024302.
- [4] Zhang, X.; Ghaffarivardavagh, R.; Anderson, S. (2020) *Air-Transparent selective sound silencer using ultra-open metamaterial*. US Patent 20200043456, filed Aug. 02, 2019 and issued Feb. 06, 2020.
- [5] Munjal, M. L. (2014) *Acoustics of Ducts and Mufflers*. Hoboken: Wiley.
- [6] Deaconu, M.; Radulescu, D.; Vizitiu, G. (2018) *Acoustic study of different mufflers based on metamaterials using the black hole principle for aircraft industry*. Euronoise 2018, Crete, pp. 2271–2275.
- [7] Sommersel, B.; Kristiansen, U. R. (1976) *Reduction of sound in a low velocity flow duct by the use of Bragg reflections*. Applied Acoustics 9, No. 1, pp. 35–43.
- [8] de Lima, V. D.; Dos Santos, J. M. C.; Arruda, J. R. F. (2017) *Passive control of noise propagation in tube systems using Bragg scattering* in: Fleury, A.; Rade, D.; Kurka, P. [Hrsg.] DINAME 2017 – Proceedings of the XVII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics 2017. Cham: Springer, pp. 523–530.
- [9] Degraeve, S.; Oclec-Brown, J. (2020) *Metamaterial Absorber for Loudspeaker Enclosures* [online]. Audio Engineering Society Convention 148, Paper 1034. <https://www.semanticscholar.org/paper/Metamaterial-Absorber-for-Loudspeaker-Enclosures-Degraeve-Oclec-Brown/4b8134b3626729e542bea78eb01338-d81a7ecec6>.
- [10] TROX GmbH (2022) *Rohrschalldämpfer CA* [online]. Neukirchen-Vluyn: TROX GmbH. <https://www.trox.de/rohrschalldampfer/ca-7905b512b7f388f6> [Zugriff am: 20. Okt. 2022].

- [11] TROX GmbH (2022) *Schalldämpferkulisse XK* [online]. Neukirchen-Vluyn: TROX GmbH. <https://www.trox.de/schalldaempferkulissen/xk-4c4ee0c13c9e4f90> [Zugriff am: 20. Okt. 2022].
- [12] TROX GmbH (2022) *Kulissenschalldämpfer XS* [online]. Neukirchen-Vluyn: TROX GmbH. <https://www.trox.de/kulissenschalldaempfer/xs-2d96e452b1986894> [Zugriff am: 20. Okt. 2022].
- [13] Raab Gruppe (2022) *Tieftonschalldämpfer* [online]. Neuwied: Joseph Raab GmbH & Cie. KG. <https://www.raab-gruppe.de/portfolio-items/tiefton-schalldaempfer> [Zugriff am: 20. Okt. 2022].
- [14] Fuchs, H.; Brandstätt, P.; Heizmann, M.; Eckold, D.; Rambauck, N. (1997) *Reinigbarer Schalldämpfer für tiefe Frequenzen*. EP Patent 0798694 B1, eingetragen 20. März 1997.
- [15] Fuchs, H. V. (2010) *Schallabsorber und Schalldämpfer: Innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen*. Berlin: Springer.
- [16] Červenka M.; Bednařík, M. (2018) *Optimized reactive silencers with narrow side-branch tubes*. J. Acoust. Soc. Am. 144, 2015.
- [17] Troll, A.; Chavan, R. A.; Rohlfing, J. (2022) *Untersuchungen zur Durchgangsdämpfung seriell angeordneter Resonatoren als Basis für die Entwicklung von Metamaterial-Schalldämpfern* in: Leister, P. [Hrsg.] Fortschritte der Akustik – DAGA 2022: 48. Jahrestagung für Akustik 2022. Berlin: DEGA, S. 251–254.

Autor:innen

Dr. Peter Brandstätt (Korrespondenzautor:in)
peter.brandstaett@ibp.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Abteilung Akustik
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Dr. Jens Rohlfing
jens.rohlfing@mbbm.com
Vormals Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Müller-BBM Industry Solutions GmbH
Fritz-Schupp-Straße 4
45899 Gelsenkirchen

M.Ac. Agostino Troll
agostino.troll@bpt-ingenieure.de
Vormals Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Balaz Pfistner Troll – Ingenieurbüro für Bauphysik und Akustik
Untere Hauptstraße 3
73630 Remshalden

Zitieren Sie diesen Beitrag

Brandstätt, P.; Rohlfing, J.; Troll, A. (2023) *Akustische Metamaterialien für die Anwendung als Schalldämpfer*. Bauphysik.
<https://doi.org/10.1002/bapi.202300012>