

Mikroperforierte Schallabsorber für die Anwendung in strömungsakustischen Problemstellungen

Felix Czwielong, Sebastian Floss, Paul Maurerlehner, Florian Toth, Manfred Kaltenbacher, Stefan Becker, Stefan Schoder

Mikroperforierte Schallabsorber weisen eine Vielzahl an Eigenschaften auf, aufgrund welcher sich die Anwendung dieser Absorberkonzepte besonders im Bereich der Strömungsakustik eignet. So weisen diese neben den frequenzspezifischen Absorptionseigenschaften hygienisch reinigbare Oberflächen, Feuerfestigkeit, geringen Platzbedarf, und bei richtigem Einbau einen geringen Druckverlust auf. Auf Basis von praxisrelevanten Problemstellungen wie Wärmepumpen, Lüftungsanlagen und HVAC-Systemen wird gezeigt, wie mikroperforierte Schallabsorber in industriellen Produkten integriert werden können und somit die Schallabstrahlung der Gesamtsysteme reduziert wird. Bei den entworfenen Konzepten lag neben hohen Absorptionseigenschaften eine hohe aerodynamische Effizienz im Fokus. Zusätzlich lassen sich über die entwickelte Simulationsmethodik die Absorptionseigenschaften der Schalldämpfer simulieren und somit bereits im ersten Designprozess von Produkten akustische Optimierungen durchführen.

Einleitung

Mikroperforierte Schallabsorber (engl. Micro-perforated sound absorber – MPA) setzen sich aus einer mikroperforierten Platte (engl. Micro-perforated plate – MPP) und einem dahinterliegenden Rückvolumen zusammen. Die Eigenschaften der mikroperforierten Platten, welche hauptsächlich durch die Perforation bestimmt werden, und die Tiefe der entstehenden Kavität können genutzt werden, um anwendungsspezifische Absorptionskoeffizienten zu erhalten. So ermöglichen diese, dass ungewollter Schall bei ausgewählten Frequenzen reduziert werden kann. Mikroperforierte Schallabsorber können aus feuerfesten Materialien hergestellt werden und weisen niedrige Druckverluste, geringen Platzbedarf und hygienisch reinigbare Oberflächen auf. Diese Eigenschaften der mikroperforierten Schallabsorber sind vorteilhaft im Vergleich zu standardmäßigen offenporigen Schäumen, weshalb sich die Anwendung von MPAs vor allem im Bereich von strömungsakustischen Problemstellungen eignet. In vielen strömungsakustischen Bereichen, wie zum Beispiel der

Micro-perforated sound absorbers for application in aeroacoustic problems

Microperforated sound absorbers have a wide range of properties that make these absorber concepts particularly suitable for use in the field of aeroacoustics. Besides the frequency-specific absorption properties, they have hygienically cleanable surfaces, fire resistance, low space requirements, and, when installed correctly, a low pressure drop. Based on practical problems such as heat pumps, air conditioning ducts and HVAC systems, it is shown how microperforated sound absorbers can be integrated into industrial products, thus reducing the sound emissions of the overall systems. The designed concepts focused on high aerodynamic efficiency along with high absorption properties. In addition, the developed simulation methodology can be used to simulate the absorption properties of the sound absorbers, allowing acoustic optimization to be carried out during the initial design process.

Raum- und Fahrzeugklimatisierung, müssen Hygienevorschriften bei der Luftzufuhr in Kombination mit geringer Lärmbelästigung und kleinem Bauraum erfüllt sein. Aus diesem Grund können standardmäßige Schalldämpfer in diesen Anlagen oftmals nicht eingesetzt werden, weil diese zusätzlichen Bauraum benötigen, den Druckverlust erhöhen oder durch offenporige Schäume Viren und Bakterien anreichern können. Auch die Belastung von Mikrofasern in der Frischluftzufuhr stellt hier ein Problem dar [1]. Im Zuge von mehreren praxisbezogenen Anwendungsbeispielen, wie zum Beispiel HVAC-Systemen und Wärmepumpen, wird in diesem Beitrag gezeigt, wie mikroperforierte Schallabsorber verwendet werden können, um Strömungsgeräusche zu reduzieren. Dabei stehen eine platzsparende Bauweise und ein möglichst hoher aerodynamischer Gesamtwirkungsgrad zusätzlich im Fokus der MPA-Auslegung. Ein hoher Wirkungsgrad der Anlage wird in der Regel durch geringe Druckverluste und optimierte Strömungsführung innerhalb des Systems erreicht. Zusätzlich wird ein Vorgehen vorgestellt, wie die mikroperfo-

rierten Schallabsorber vorab ausgelegt und akustisch simuliert werden können. Dies ermöglicht es bereits in den ersten Entwurfsphasen von strömungsakustischen Anlagen, mikroperforierte Schallabsorber zu integrieren und Optimierungen hinsichtlich der Positionierung und des gewünschten Schallabsorptionskoeffizienten durchzuführen.

MPAs in der Strömungsakustik und Simulationsmethodik

Die Simulation von Schallabsorbern bietet die Möglichkeit, dass ohne aufwändige Experimente bereits von vornherein optimierte Varianten von Versuchsanlagen getestet werden können. So kann Zeit und Material in der Entwicklungsphase eingespart werden. Da im Allgemeinen MPAs aufgrund der großen Abmessungen des Rückvolumens akustisch nicht lokal reagieren (siehe Abbildung 1), ist eine Modellierung mittels Oberflächenimpedanz nicht möglich. Es ist stattdessen eine räumliche Auflösung der MPP und des Rückvolumens erforderlich. Im Regelfall ist bei Anwendungen von MPAs der relevante Frequenzbereich deutlich über der Phasenentkopplungsfrequenz und MPAs können als steif angesehen werden. Das bedeutet, dass die Struktur nicht mit der umgebenden Luft, dem akustischen Fluid, koppelt [2]. Dies lässt eine Modellierung des perforierten Materials als sogenanntes äquivalentes Fluid zu, welches die akustischen Eigenschaften mittels eines homogenisierten, isotropen akustischen Materials mit verschmierten Materialparametern beschreibt. Durch die komplexwertige effektive Dichte $\tilde{\rho}$ und den Kompressionsmodul $\tilde{K}$ kann der dissipative Charakter von porösen bzw. perforierten Materialien beschrieben werden.

In der entwickelten Methodik wird das Johnson-Champoux-Allard-Lafarge-Modell (JCAL) [2, 3, 4] verwendet, um diese frequenzabhängigen Materialparameter zu bestimmen, welche in der Helmholtz-Gleichung (im Frequenzbereich)

$$\frac{\omega^2}{\tilde{K}} p_a + \nabla \cdot \left(\frac{1}{\tilde{\rho}} \nabla p_a \right) = 0 \quad (1)$$

enthalten sind. In dieser ist ω die Kreisfrequenz und p_a der Schalldruck, nach dem gelöst wird. Die partielle Differentialgleichung beschreibt die Schallausbreitung in einem inhomogenen Medium, wie es bei einem Übergang von Fluiden (z. B. von Luft zu einem äquivalenten Fluid eines porösen Absorbers) der Fall ist.

Die Lösung der Helmholtz-Gleichung erfolgt mit der Finite-Elemente-Methode (FEM), im Speziellen mit der Simulationssoftware openCFS [5, 6]. Aufgrund der geringen Dicke der MPP im Vergleich zu den restlichen Abmessungen des Anwendungsgerätes sind hier-

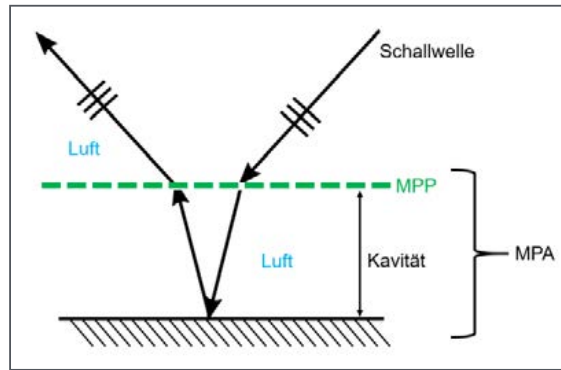


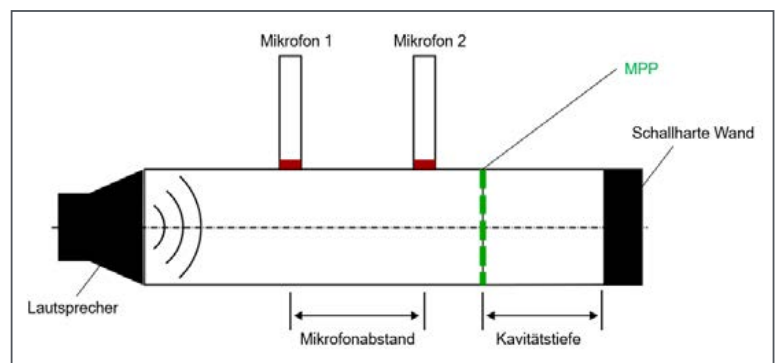
Abb. 1: Akustische Reaktion eines MPA

bei nicht-konformer Rechengitter vorteilhaft, um eine gleichmäßige Diskretisierung und gute Elementqualität zu gewährleisten [6]. Für die Absorption des Fluids ist in Gleichung (1) die äquivalente Dichte ausschlaggebend, weshalb für den äquivalenten Kompressionsmodul der (reelle) Kompressionsmodul der Luft verwendet werden kann. In der angrenzenden Luftregion werden die Dichte und der Kompressionsmodul bei Umgebungsbedingung als Materialparameter verwendet. Die frequenzabhängige äquivalente Dichte des Absorbermaterials wird nach dem semi-empirischen JCAL-Modell durch Gleichung (2) bestimmt:

$$\tilde{\rho}(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[1 + \frac{8\eta_0}{j\omega \rho_0 \alpha_\infty r^2} \sqrt{1 + j \frac{4\alpha_\infty^2 \eta_0 \rho_0 \omega}{\sigma^2 r^2 \phi^2}} \right] \quad (2)$$

Die Eingabeparameter sind dabei die Perforationsrate Φ , die viskose charakteristische Länge r , der statische Strömungswiderstand σ , die Windigkeit im oberen Frequenzlimit α_∞ , sowie die dynamische Viskosität η_0 und die Dichte des Umgebungsmediums (Luft) ρ_0 [3, 4, 7]. Dieser Satz an Parametern ist für MPP üblicherweise nicht vollständig bekannt, weshalb die unbekannten Parameter mittels numerischer Optimierung des frequenzabhängigen Reflexionskoeffizienten einer Impedanzrohrmessung (siehe Abbildung 2) ermittelt werden müssen. Zur Parameteridentifikation

Abb. 2: Schematische Skizze der Impedanzrohrmessung zur Charakterisierung der MPP-Eigenschaften



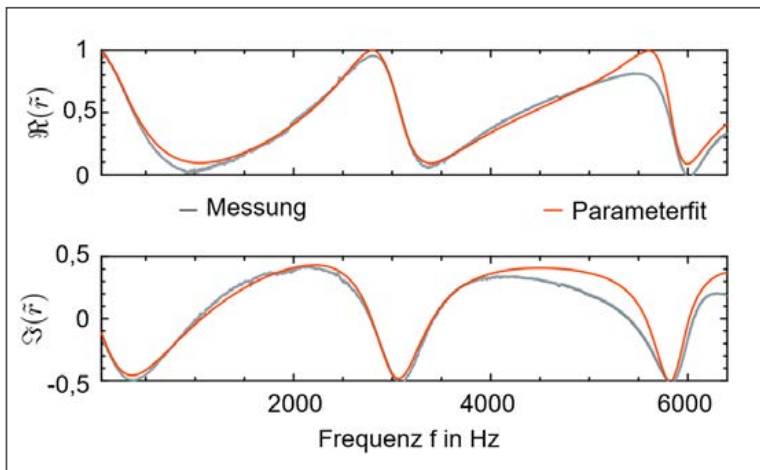


Abb. 3: Vergleich des gemessenen Reflexionskoeffizienten und des identifizierten Modells

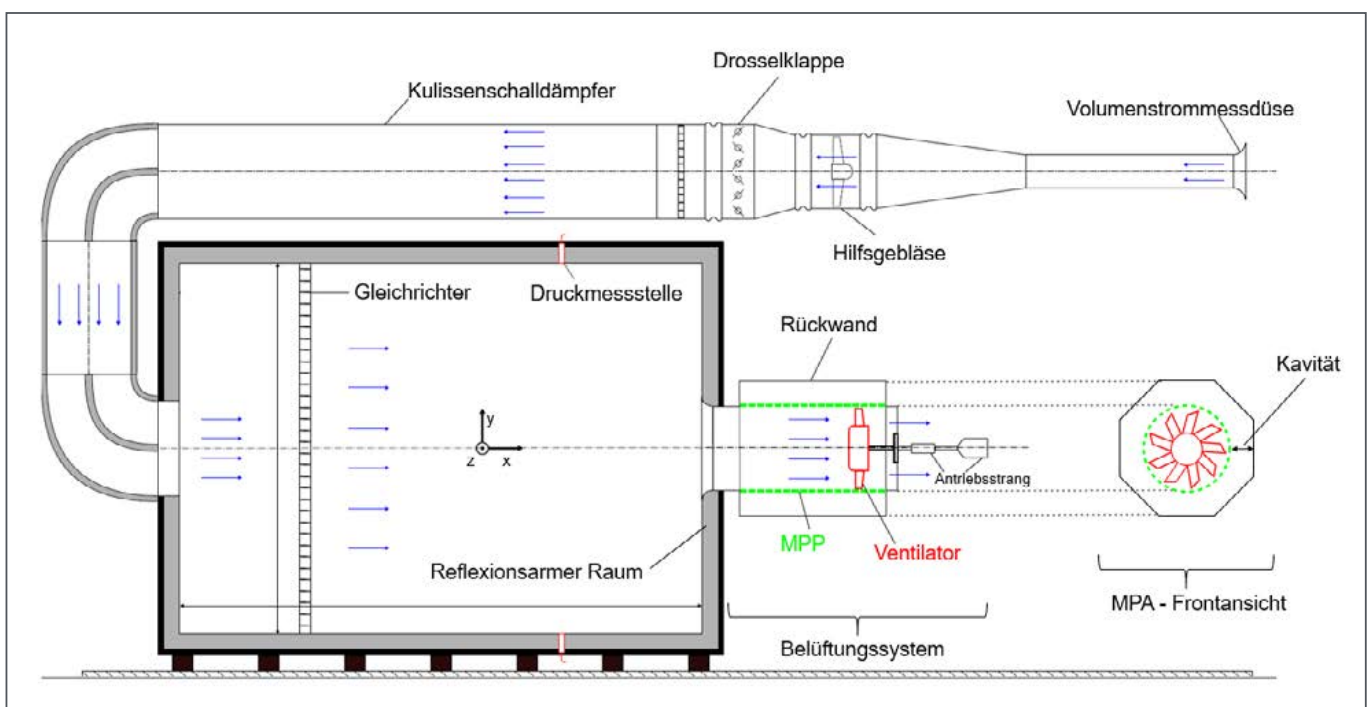
wird ein generischer Optimierungsalgorithmus aus der MATLAB Toolbox [8] verwendet, welcher die Abweichung zum gemessenen Reflexionskoeffizient über die Frequenzen minimiert. Für die Optimierung ist die Angabe von Wertebereichen der zu optimierenden Parameter wesentlich, um physikalisch sinnvolle Parameter zu erhalten und um die Rechenzeit zu beschränken. Abbildung 3 zeigt den Real- und Imaginärteil des gemessenen sowie des berechneten Reflexionskoeffizienten für die identifizierten Parameter. Bis zu einer Frequenz von 4 kHz stimmen die Kurven sehr gut überein. Es wird angenommen, dass die Abweichung im oberen Frequenzbereich durch zusätzliche viskose Absorptionseffekte der MPA-Konfiguration hervorgerufen wird, welche durch das äquivalente

Fluid nicht abgebildet werden. Für eine detaillierte Beschreibung der Materialcharakterisierung wird auf [9] verwiesen. Mit dem charakterisierten äquivalenten Fluid können mittels FE-Simulation komplexe Konfigurationen mit dreidimensionalen Schallfeldern simuliert werden, wie in den folgenden Anwendungsbeispielen gezeigt wird.

MPAs in Lüftungs- und Klimatisierungsanlagen

Lüftungs- und Klimatisierungsanlagen sind ein wesentlicher Baustein für das Raumklima moderner Gebäude. Dabei bestehen diese in der Regel aus einem langen, verzweigten Rohrnetz und aus einem oder mehreren Ventilatoren. Je nach Druck- und Volumenstrom-Anforderungen werden in diesen Systemen Radialventilatoren bei hohen Druckverlusten im System und Axialventilatoren bei geringen Druckverlusten und hohen Volumenströmen eingesetzt [10]. Die in diesen Anlagen eingesetzten Turbomaschinen erzeugen entsprechend ihres aktuellen Betriebspunktes Lärm. Über das Rohrsystem können die Schallwellen bis in die Räumlichkeiten gelangen, die klimatisiert werden sollen. Dies führt zu schlechter Konzentration beim Arbeiten und induziert lärmbedingte Stresssituationen [11]. Schalldämpfer, wie zum Beispiel Kulissenschalldämpfer, können oftmals in diesen Anlagen nicht eingesetzt werden, weil diese einen zu hohen Druckverlust haben und durch die eingebauten Schaumstoffe zur Anreicherung von Schadstoffen oder Viren neigen. Ein zusätzlicher Druckverlust müsste von den Ventilatoren durch eine höhere Dreh-

Abb. 4: Axialventilatorprüfstand nach DIN EN ISO 5801 [15] mit reflexionsarmen Raum und eingebautem MPA-Belüftungssystem



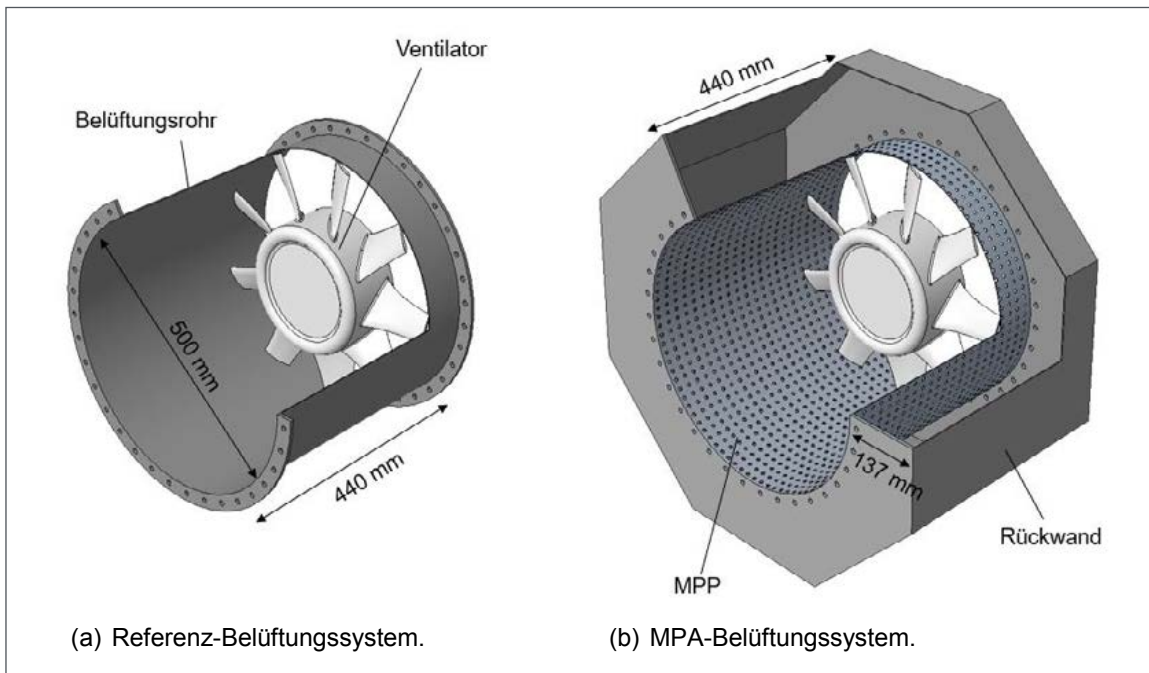


Abb. 5: Detaildarstellung der untersuchten Belüftungssysteme mit charakteristischen Abmessungen der Systeme

zahl ausgeglichen werden, was wiederum zu einer gesteigerten Schallabstrahlung und einem erhöhten Energiebedarf führen würde. Mikroperforierte Schallabsorber eignen sich aufgrund ihrer selbstreinigenden Eigenschaften und der Verwendung von metallischen Werkstoffen besonders für den Einsatz in Klimatisierungsanlagen. Auch die Einbringung der mikroperforierten Platten als Rohrauskleidung führt dazu, dass keine verblockenden Elemente in der Strömung sind und der Druckverlust dadurch gering gehalten werden kann [12, 13]. Um die Effekte von mikroperforierten Schallabsorbern auf die Strömung und die Schallabstrahlung von Belüftungssystemen abschätzen zu können, wurde ein Referenz-Rohrsystem mit Axialventilator aufgebaut. Dieses System stellt ein relativ kurzes und einfaches System dar, welches zum Beispiel für die Bewetterung von technischen Hallen eingesetzt wird. Das System wurde vorab im Axialventilatorprüfstand des LSTM-Erlangen an der FAU Erlangen-Nürnberg hinsichtlich des Druckverlustes und der Schallabstrahlung untersucht. Auf der Saugseite des Belüftungssystems befindet sich ein reflexionsarmer Raum, in dem mit Freifeldmikrofonen die Schallabstrahlung des Gesamtsystems, bestehend aus Axialventilator und Rohrsystem, bestimmt werden kann. Ausgehend von den Referenzuntersuchungen wurde ein neuartiger MPA-Rohrschalldämpfer numerisch mittels Akustiksimulationen ausgelegt. Dieser ersetzt ein Rohrsegment des untersuchten Belüftungssystems. Dabei wird kein weiterer Bauraum für den Schalldämpfer in axialer Richtung benötigt. Es wird lediglich zusätzlicher Platz für das achteckige Rückvolumen in radialer Richtung beansprucht. In Abbildung 4 ist eine sche-

matistische Darstellung des Versuchsstandes mit eingebautem MPA-Rohr dargestellt [14].

In Abbildung 5 ist eine Detaildarstellung des Referenz-Belüftungssystems und des Belüftungssystems mit eingebautem MPA abgebildet. Die verwendete mikroperforierte Platte verfügt über eine Dicke von circa 1,5 mm mit einer Perforationsrate (Verhältnis offene Fläche zur Gesamtfläche) von 1 %. Die Mikrolöcher in der Platte sind als Schlitz ausgeführt und verfügen über eine Länge von 2 mm und eine Breite von 0,074 mm. Als Versuchsventilator wird ein vorwärtsgesicherter Axialventilator mit 9 Schaufelblättern verwendet. Dieser wird mit einer Drehzahl von 1 486 U/min betrieben und besitzt in dem Rohr einen Kopfspalt von 2,5 mm. Im Fall des MPA-Belüftungssystems wird der Ventilator direkt über der MPP betrieben. Beide Varianten verfügen über den gleichen Rohrdurchmesser von 500 mm [16, 17].

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass der MPA-Schalldämpfer keinen zusätzlichen Druckverlust im System verursacht (siehe Abbildung 6a). Dies ist die erste positive Eigenschaft, welche den MPA-Rohrschalldämpfer für die Anwendung in Lüftungssystemen empfiehlt. Dadurch, dass keine Störkörper in die Strömung eingebracht werden müssen und die MPP durch die lediglich geringen Öffnungen eine strömungsführende Eigenschaft aufweist, wird nahezu kein zusätzlicher Druckverlust in das System eingebracht. Der Wirkungsgrad des Ventilators (siehe Abbildung 6b) sinkt aufgrund des MPA-Schalldämpfers leicht ab. Dadurch, dass der Ventilator innerhalb der MPP rotiert, wird durch die raue Oberfläche eine turbulente Scherschicht induziert, welche dazu führt,

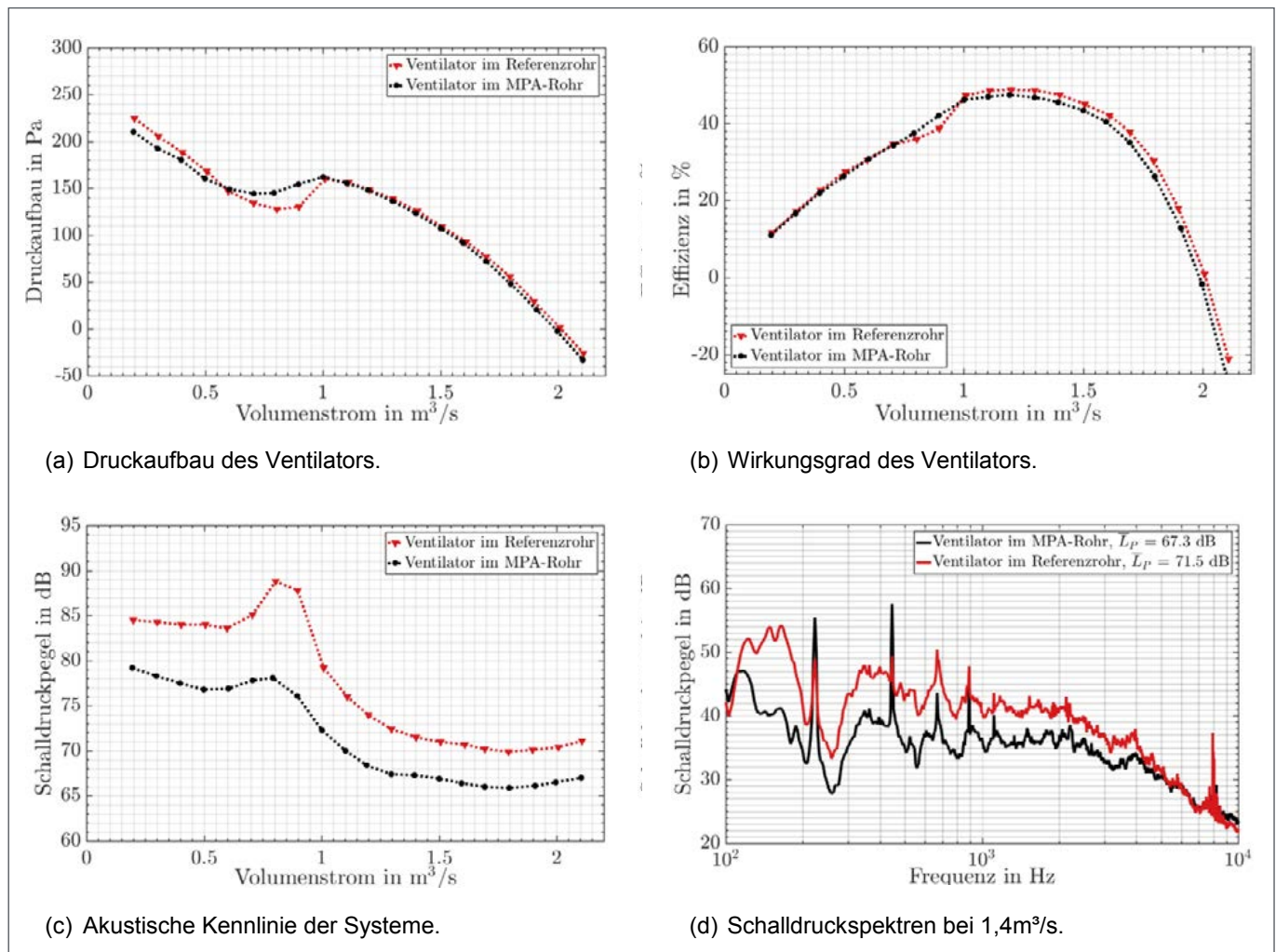
dass der Wirkungsgrad geringfügig reduziert wird. Über die gesamte akustische Kennlinie des Ventilators (siehe Abbildung 6c) kann der Gesamtschalldruckpegel um mindestens 4 dB abgesenkt werden. Bei niedrigen Volumenströmen, im Teillastbereich, sind noch höhere Reduktionen des Gesamtschalldruckpegels von bis zu 10 dB möglich. Anhand der Schalldruckspektren (siehe Abbildung 6d) lässt sich erkennen, dass der MPA in einem breiten Frequenzbereich von 100 bis 5 000 Hz Breitbandschall reduziert. Allerdings werden durch die raue Oberfläche der MPP auch gestörte Zuströmbedingungen induziert, welche dazu führen, dass die tonale Komponente der Blattfolgefrequenz (222 Hz) erhöht wird. Nachdem tonale Schallanteile als sehr störend wahrgenommen werden [18], zeigt dies, dass der MPA-Rohrschalldämpfer in Zukunft noch weiter optimiert werden kann. Strömungsuntersuchungen würden hier neue Erkenntnisse über die Wechselwirkung zwischen MPA und der Strömung des Ventilators liefern. Eine Erhöhung des Abstandes zwischen MPA und Axialventilator wirkt sich positiv auf die tonalen Komponenten aus [16]. Zusammenfassend kann die Schallreduktion des

MPA-Rohrdämpfers in Kombination mit den gegen null gehenden Druckverlusten, dem geringen Platzbedarf in Strömungsrichtung und den hygienischen Eigenschaften als positiv beurteilt werden. In zukünftigen Lüftungsanlagen kann der Schalldämpfer für Lärmschutzmaßnahmen mit gleichermaßen hohen Ansprüchen an Luftqualität eingesetzt werden.

MPAs in Wärmepumpenanwendungen

Im Zuge der Energiewende nehmen Wärmepumpen eine entscheidende Rolle beim Erreichen der CO₂-Ziele ein. Diese werden im Bereich der Gebäudebeheizung eingesetzt, um dezentral mit Strom die Heizwärme für die Bewohner zur Verfügung zu stellen. Der verwendete Strom soll dabei aus regenerativen Energien wie Solar-, Wasser- oder Windkraft gewonnen werden, wodurch fossile Energieträger eingespart werden können. Vor allem die Nachfrage nach Luft-Wasser-Wärmepumpen ist in den letzten Jahren gestiegen [19]. Dies begründet sich in den geringeren Investitionskosten und der einfachen Installation, welche auch an Altbauten durchgeführt werden kann. In den meisten Fällen werden diese

Abb. 6: Aerodynamische und akustische Eigenschaften des MPA-Rohrschalldämpfers im Vergleich zum Referenzrohr





Ingenieur (m/w/d) – Schwerpunkt Schallimmissionsschutz

Für unseren Hauptsitz in Gilching bei München suchen wir einen Kollegen mit Charakter, der Lust hat Fragen zu stellen und nicht nur Antworten gibt. Jemand der mutig genug ist, den Status Quo in Frage zu stellen und Freude daran hat unsere Softwareplattform weiterzuentwickeln.

Wir sind ein Team von 15 Leuten und pflegen eine offene und interdisziplinäre Gesprächskultur. Unsere Ideen tauschen wir häufig auf ausgedehnten Spaziergängen oder bei einem mittäglichen BBQ auf der sonnigen Dachterrasse aus. Wir planen gemeinsam unsere Strategien, arbeiten selbständig an unseren jeweiligen Projekten und feiern zusammen unsere Erfolge. Dadurch sind wir zum Weltmarktführer für Software zur Berechnung von Umgebungslärm und Schall in Räumen geworden.

Ihr Profil:

- Gut abgeschlossenes technisches Studium
- Vertraut mit den einschlägigen Normen und Richtlinien des Immissionsschutzes
- Erfahrung mit der Lärmprognose unter Anwendung von Software
- Sie sind weder im deutsch- noch im englischsprachigen Raum auf den Mund gefallen
- Sie sind mit Begeisterung dabei, abwechslungsreiche Projekte durchzuführen
- Qualitätsbewußt, kundenorientiert und technikbegeistert

Ihre Aufgaben:

- Sie identifizieren technologische Trends und beraten unsere Softwareentwickler an der Schnittstelle zwischen Anwender und Entwicklung (für die Produkte CadnaA, CadnaR und CadnaB)
- Sie bringen Ideen für hilfreiche Funktionen und deren Umsetzung mit ein

- Sie helfen unseren Kunden bei komplexen technischen Problemstellungen
- Sie unterstützen bei der Softwareanwendung im Rahmen verschiedenster nationaler und internationaler Projekte
- Bei Interesse unterstützen Sie in diversen Fachgremien und bei der Normungstätigkeit
- Durch Produktdemonstrationen vermitteln Sie Ihr Expertenwissen (z. B. via Webpräsentation oder in Beratungsgesprächen)

Unser Angebot:

- individuelle Weiterbildungsmöglichkeiten und die Chance, eigene Ideen in einem angenehmen Betriebsklima zu verwirklichen
- attraktives, leistungsgerechtes Gehalt, flexible Arbeitszeiten und 30 Tage Urlaub
- modernes Büro mit stilvollem Ambiente und lockerer Atmosphäre, z. B. gelegentlichem Feierabendbier
- ob Radfahrer (Duschmöglichkeit vorhanden), Hundebesitzer, Kaffee- oder Teetrinker – bei uns fühlt sich jeder wohl
- exklusive Events & Sportaktionen im Team

Haben wir Sie neugierig gemacht?

Dann senden Sie uns bitte Ihre aussagekräftigen Bewerbungsunterlagen mit möglichem Eintrittstermin und Gehaltsvorstellungen ausschließlich per E-Mail an: bewerbung@datakustik.com

Wenn Sie Rückfragen zu der Position haben, melden Sie sich gerne bei Frau Tina Hahn unter Tel. 08105/77467 0.

Alle personenbezogenen Formulierungen in dieser Stellenanzeige sind geschlechtsneutral zu betrachten.

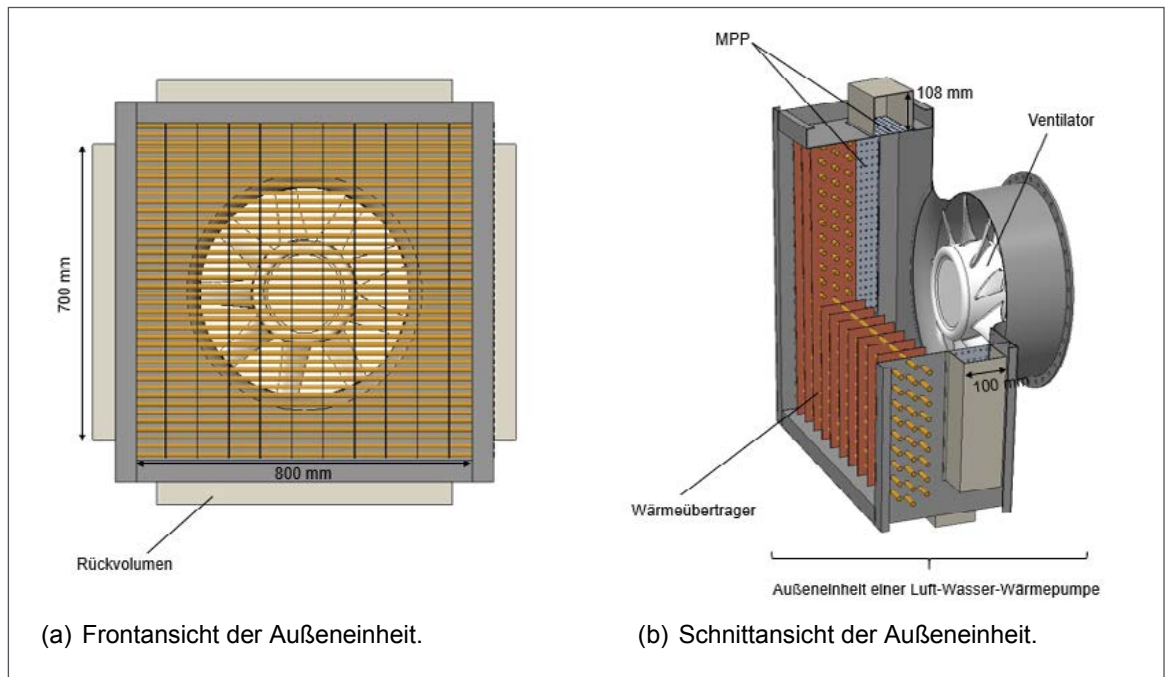


Abb. 7: Außeneinheit einer Wärmepumpe mit integriertem MPA in den Wärmeübertragerwänden

Wärmepumpen als Teilgeräte eingesetzt, was bedeutet, dass es eine Innenanlage im Wohnhaus und eine Außenanlage im Außenbereich gibt. In Wärmepumpen sind Kompressoren und Ventilatoren, als bewegte Bauelemente, als lärmkritische Elemente einzustufen. Dabei stellt die Außeneinheit im Garten ein besonderes Konfliktpotenzial zwischen Nachbarn, aber auch in Bezug auf die TA-Lärm [20] dar. In der Außeneinheit sind Wärmeübertrager und Ventilatoren verbaut. Der Wärmeübertrager induziert gestörte Zuströmbedingungen für den Axialventilator und es entsteht eine gesteigerte Schallabstrahlung [21]. Die Positionierung und die richtige Auswahl der einzelnen Komponenten nimmt entscheidenden Einfluss auf den am Ende resultierenden Gesamtschallleistungspegel der Anlage. Die Außenanlagen sollten aus energieeffizienten und ästhetischen Gründen möglichst klein und kompakt gehalten werden. Dabei ist der Druckverlust entscheidend. Auch sollte die Wärmepumpe das Gartenbild möglichst nicht negativ beeinträchtigen. Aus diesen beiden Gründen werden zwar die Außeneinheiten von Wärmepumpen über eine möglichst gute Kapselung geräuscharm und ästhetisch gestaltet, aber Schalldämpfer finden hier nur wenig Anwendung. Klassische Schalldämpfer würden den Druckverlust erhöhen und zusätzlichen Bauraum benötigen. Somit liegen für die Anlagen ähnliche aerodynamische und akustische Systemvoraussetzungen vor wie in einer Lüftungsanlage, und die Vorteile von MPA-Schalldämpfern können positiv eingebracht werden. In diesem Anwendungsfall ist eine räumliche Ausdehnung der MPA auf die Abmessungen der Wärmepumpe beschränkt. In Ab-

bildung 7 ist eine schematische Außeneinheit mit integriertem MPA in den vier Seitenflächen des Wärmeübertragergehäuses dargestellt. Durch die Kavitäten hinter den MPP sind die seitlichen Abmessungen des Wärmeübertragers um jeweils 108 mm vergrößert worden. Die seitlichen Abmessungen stellen in der Regel keinen limitierenden Faktor, wie die axiale Länge der Anlage, dar. Die akustischen und aerodynamischen Eigenschaften eines unmodifizierten Referenzsystems und des MPA-Systems wurden im Axialventilatorprüfstand des LSTM-Erlangen (siehe Abbildung 4) untersucht. Die MPP verfügte über eine Dicke von 1,5 mm und einer Perforationsrate von 2,5 % [22]. Die Abmessungen des MPA wurden so dimensioniert, dass dieser im Teillastbereich des Ventilators die subharmonischen Komponenten des Blattspitzenlärms dämpft. Dabei hat eine analytische 1D-Auslegung auf Basis des JCAL-Modells und eines $\lambda/4$ -Resonators die Grundlage gebildet. Das Blattspitzengeräusch stellt im Teillastbereich eine dominante Schallquelle dar [23]. Diese Schallquelle kann ein unangenehmes Dröhnen verursachen. Die vier einzelnen, in die Außeneinheit der Wärmepumpe integrierten MPAs, erzeugen keinen signifikanten zusätzlichen Druckverlust. Dies kann aus der aerodynamischen Systemkennlinie geschlossen werden (siehe Abbildung 8a). Die akustische Kennlinie (siehe Abbildung 8b) zeigt die Wirksamkeit des MPAs. Dabei findet die höchste Schallreduktion im Teillastbereich des Axialventilators, bei Volumenströmen kleiner $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$, statt. Anhand des auf Basis des JCAL-Modells berechneten Absorptionskoeffizienten für die verwendeten MPAs (sie-

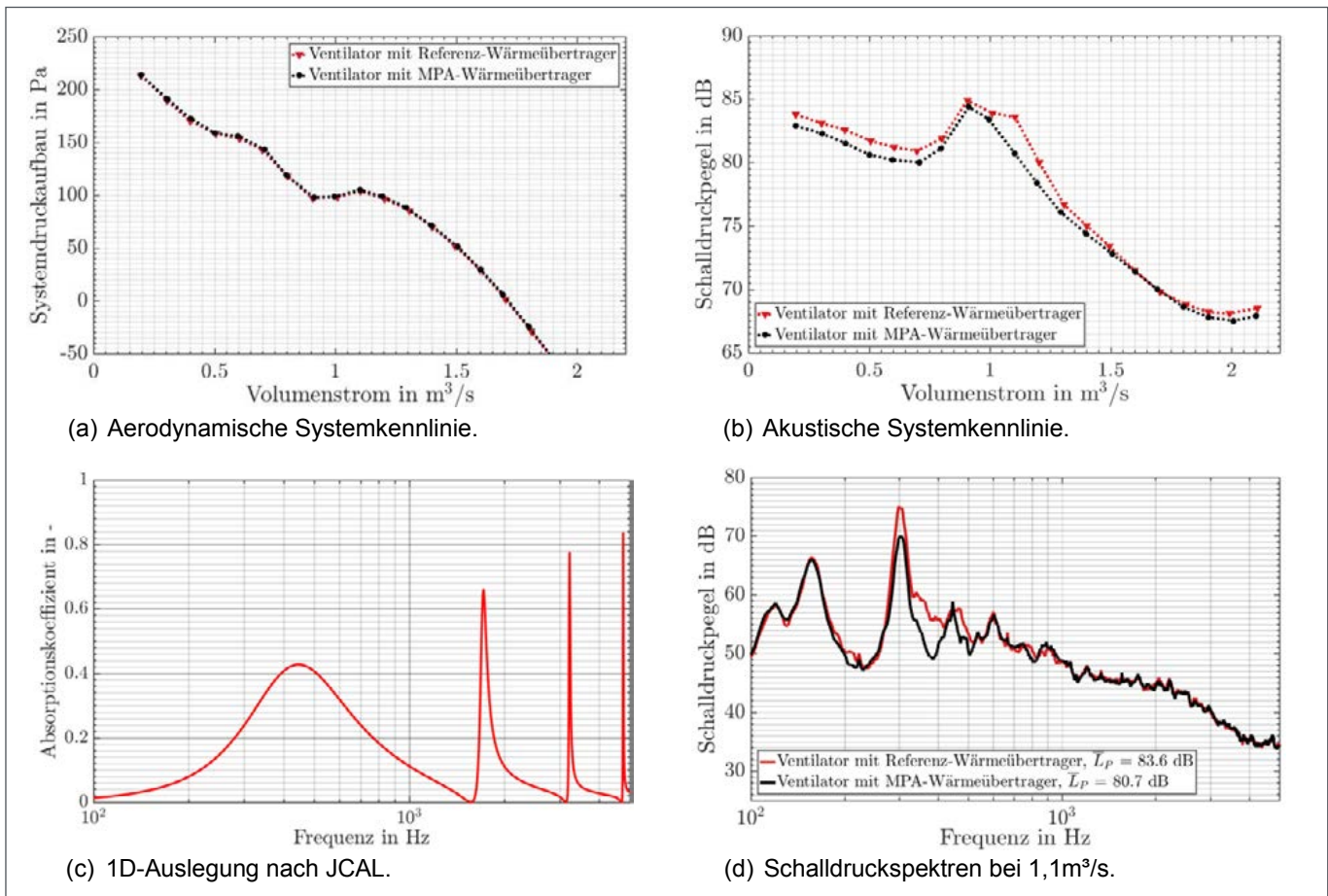


Abb. 8: Vergleich der unmodifizierten und der mit MPAs modifizierten Außeneinheit einer Wärmepumpe und der berechneter Absorptionskoeffizient der MPAs

he Abbildung 8c) und den Schalldruckspektren im Teillastbereich (siehe Abbildung 8d) zeigt sich, dass die Auslegungsstrategie funktioniert und die zweite subharmonische Komponente bei 300 Hz reduziert werden kann [22]. Je nach vorhandenem Bauraum können Wärmepumpen mit MPAs erweitert werden und in Zukunft zu einer geringeren Schallabstrahlung im Wohngebiet beitragen. Durch die Einstellmöglichkeiten des Frequenzbereichs, mit Hilfe der Tiefe der Kavität und der Eigenschaften des verwendeten MPPs, können gezielt störende Geräusche reduziert werden. Dadurch, dass kein zusätzlicher Druckverlust durch die MPAs erzeugt wird, kann die Drehzahl des Ventilators bei gleichem Betriebspunkt auf gleichem Niveau gehalten werden und somit Energie und Schall reduziert werden im Vergleich zu Schallabsorbern, welche den Druckverlust der Anlage erhöhen würden.

MPAs in HVAC-Systemen

Auch im Personentransport sind Klimaanlage systeme unerlässlich. In der Arbeit [24] werden vielversprechende Möglichkeiten zur Reduktion von Schall in Klimaanlage system von Zügen untersucht, welche hier zusammenfassend präsentiert werden. Die

Strömung des Systems wird durch einen Kompressor erzeugt und eine Turbine sorgt für entsprechende Energierückgewinnung im Auslassbereich. Diese beiden Aggregate stellen dabei die Hauptlärmquellen des Systems dar. Um die geltenden Regularien zu erfüllen, muss eine breitbandige Schallreduktion erzielt werden, während die Funktionsweise (geringer Druckverlust, Langlebigkeit, Robustheit, Hygiene) und Sicherheit (Feuerfestigkeit) gewährleistet werden müssen. Um die Außenabmessungen beizubehalten, sind zusätzlich kompakte Lösungen erforderlich. Aufgrund der Vorgaben sind MPPs als Absorbermaterial porösem Material wie Fasern oder Schäumen überlegen.

In Voruntersuchungen werden unterschiedliche Konzepte zur Schallreduktion, welche auf bekannte Interferenzmechanismen und Absorptionsmechanismen beruhen, mit Hilfe von FE-Simulationen basierend auf dem oben beschriebenen äquivalenten Fluid-Ersatzmodell untersucht. Hierbei ist anzumerken, dass aufgrund der niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten ein ruhendes Fluid ohne Konvektionsgeschwindigkeit betrachtet werden kann. Mit diesen Simulationen ist es möglich, die Wirkprinzipien auf den Einsatz im Klimakanal (siehe Abbildung 9) zu adaptieren.

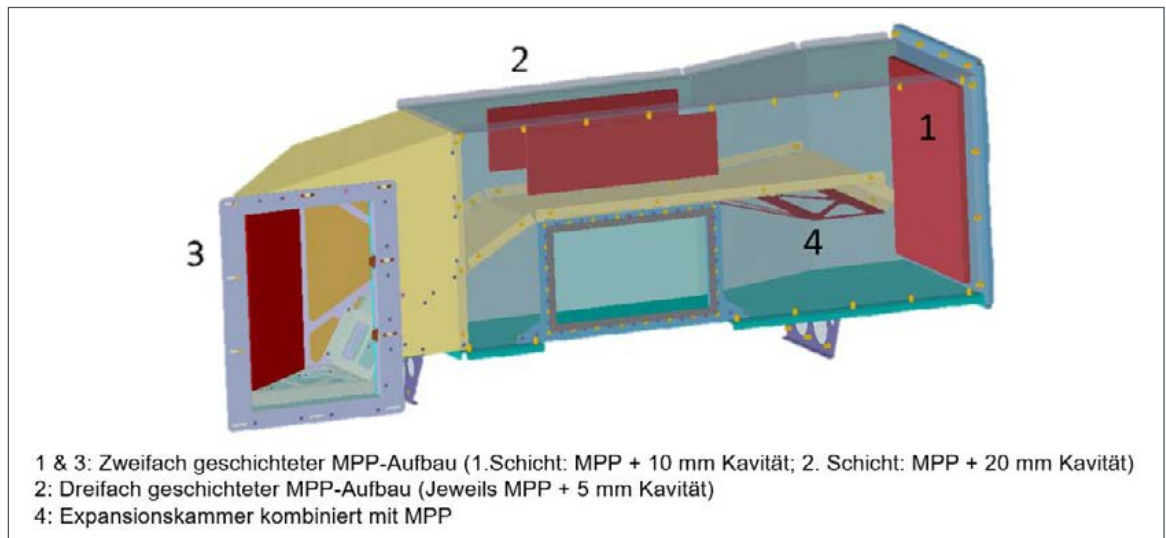
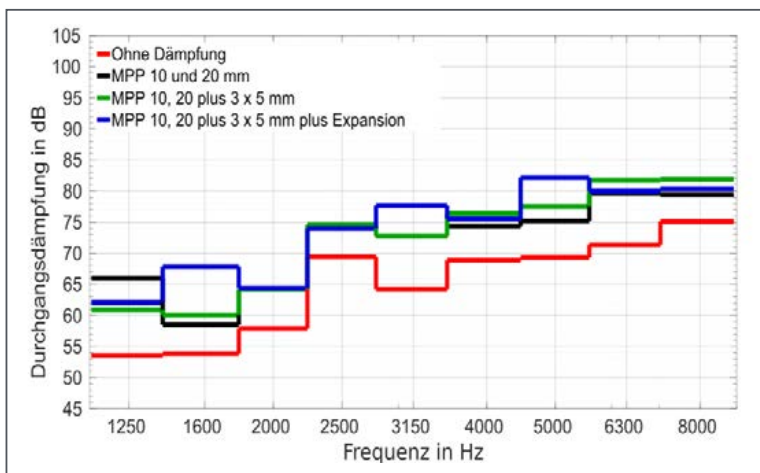


Abb. 9: Klimakanal mit der Anbringung von Absorberelementen (rot)

Um den Druckverlust zu beschränken, wird die Strömungsführung durch Einbringung von Leitstrukturen verbessert, wodurch der Druckverlust im Vorfeld reduziert werden kann. Dabei wird darauf geachtet, dass die Strömungsführung eine Kombination mit MPAs zulässt. Die zu erwartenden Druckverluste und deren Reduktion werden mittels (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) RANS-Strömungssimulation evaluiert. Die Platzierung der mikroperforierten Platten erfolgt basierend auf den Voruntersuchungen und wird so ausgewählt, dass sich eine möglichst große Absorptionsfläche ergibt. An den Positionen 1 bis 3 wird eine mehrfache Schichtung von MPAs angebracht, während an Position 4 das Prinzip der Expansionskammer angewendet wird. In Position 1 ist ein zweifach geschichtetes Panel angeordnet, da an dieser Position ausreichend Platz besteht und der Strömungsquerschnitt ausreicht. An dieser Position treffen ebene Schallwellen nahezu senkrecht ein und es ist deshalb mit einer erhöhten Absorption auch im niedrigeren

Frequenzbereich zu rechnen [25, 26]. An Position 3 wird derselbe Aufbau eines zweifach geschichteten MPAs installiert. Der Einfallswinkel ist hier zwar geringer, aber die Absorptionsfläche ist groß. An Position 2 werden dreifach geschichtete MPAs verbaut. Hier sind die perforierten Platten parallel zur Ausbreitungsrichtung der ebenen Wellen ausgerichtet, was speziell die akustische Quermoden oberhalb der Cut-Off Frequenz von ungefähr 600 Hz bedämpft. An Position 4 wird das Prinzip einer Expansionskammer, deren schalldämpfende Wirkung auf Reflexion basiert, mit der absorbierenden Wirkung einer MPP kombiniert. Zur Überprüfung der Wirksamkeit der akustischen Dämpfungsmaßnahmen wird ein vom Klimaanlagenhersteller zur Verfügung gestelltes Funktionsmuster (siehe Abbildung 9) basierend auf der 4-Mikrofon-Methode vermessen. Die Messergebnisse verschiedener MPA-Anordnungen zeigen im Vergleich mit der Referenzmessung des originalen Funktionsmusters ("ohne Dämpfung"), dass sich mit den MPAs bis zu 10 dB an Reduktion bei den Mittenfrequenzen von 3 150 Hz, 4 000 Hz und 5 000 Hz erreichen lassen (siehe Abbildung 10).

Abb. 10: Gemessene Durchgangsdämpfung der unterschiedlichen MPA-Kombinationen an Position 1–4



In [24] werden zusätzlich Kombinationen von MPAs mit Wabenstrukturen experimentell untersucht, um weitere Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Messergebnisse zeigen, dass keine relevante Verbesserung hinsichtlich der Absorption erreicht wird. In einem weiteren Vergleich mit den MPAs werden standardmäßig verwendete Schäume und faserartiges Material als Absorbermaterial herangezogen. Es kann gezeigt werden, dass die MPAs in den wichtigsten Frequenzbereichen qualitativ vergleichbare Ergebnisse liefern, wie die vom Hersteller standardmäßig verwendeten Materialien. Ein direkter Vergleich des Schalldruckpegels der MPA-Varianten mit der Faserabsorber-Variante zeigt, dass Fasern besonders

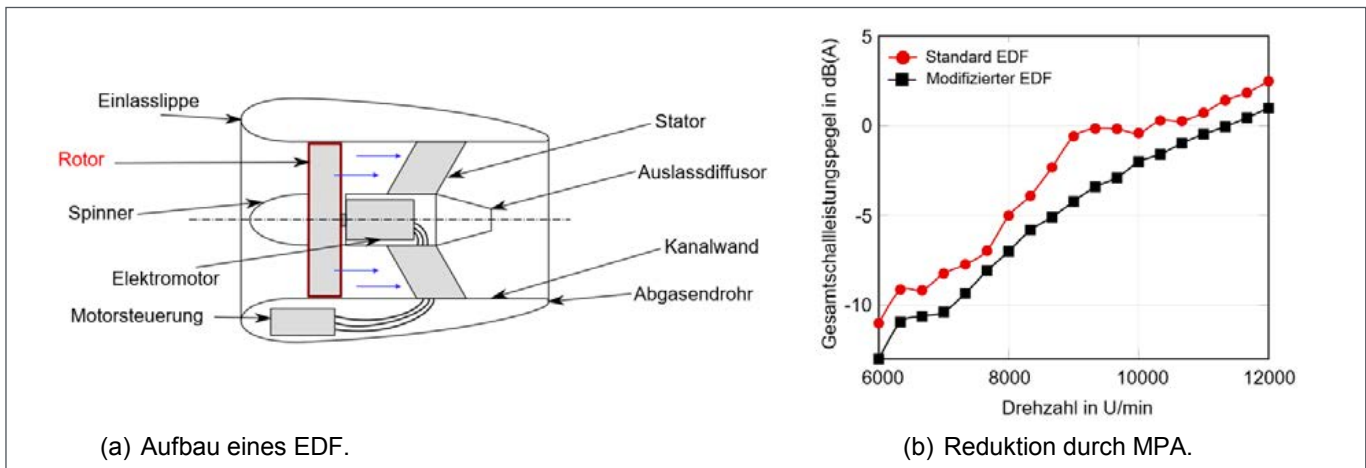


Abb. 11: Aufbau eines elektrischen Mantelpropellers mit elektrischen und aerodynamischen Komponenten (a) und die erreichte A-bewertete Gesamtschallleistungspegelreduktion durch Einbringung von MPA in den Mantelflächen (b)

ab der Mittenfrequenz von 8 000 Hz stärker absorbieren als MPAs. Die MPAs sind im Gegensatz zu Schäumen oder Fasern robuster und erlauben durch die Partitionierung des Rückvolumens auch eine Kombination mit Schäumen oder Fasern und können ebenso als Leitbleche fungieren. Außerdem ist zu beachten, dass in der Praxis Schäume bzw. Fasermaterialien oft durch für die Befestigung erforderliche Halterungen abgedeckt werden, was die effektive Absorptionsfläche im Vergleich zu MPAs reduziert.

Anwendung von MPAs bei elektrisch angetriebenen Senkrechtstartern

Elektrische Antriebe sind in der Luftfahrt bei elektrisch angetriebenen Senkrechtstartern (engl. electrically powered vertical take-off and landing – eVTOL) zu einem wichtigen Bestandteil geworden. Die primären Schallquellen dieser eVTOL-Flugzeuge sind ihre Antriebseinheiten, insbesondere während des vertikalen Flugbetriebs, wo der Schub der Antriebseinheiten Auftriebskräfte erzeugt. Typischerweise werden Mantelpropeller (engl. electric ducted fan – EDF) als Antriebseinheit eingesetzt, welche als einstufige Axialventilatoren konzipiert sind (siehe Abbildung 11a). Es wurde der gesamte elektrische Antriebsstrang akustisch in einem reflexionsarmen Messraum mit reflektierendem Boden nach DIN EN ISO 3744:2011-02 untersucht. Dafür wurden 10 Mikrofone auf einer Halbkugelhüllfläche, in der für die Messung beliebiger Schallquellen vorgeschlagenen Konfiguration, positioniert. Die EDF-Einheit wurde zentral im Messraum platziert, um die Auswirkungen der umgebenden Wände auf das Strömungsfeld der EDF-Einheit zu minimieren. Es konnten jedoch keine freien Strömungsbedingungen erreicht werden, da der Abgasstrom in einem Abstand von 1,5 m auf die Rückwand des Messraums trifft. Die Messkampagne führte zu zuverlässigen Ergebnissen, da das übergeordnete Ziel darin

bestand, die Lärmmechanismen und eine mögliche Reduktion durch den Vergleich zweier hergestellter Varianten zu verstehen. Auf Basis dieser Messmethodik wurden akustische Verbesserungsmaßnahmen mit MPA geplant und bewertet [27]. Als Messobjekt für die nachfolgende Untersuchung wird eine einstufige, axial durchströmte EDF-Einheit im Unterschallbereich im verkleinerten Maßstab betrachtet. Diese EDF-Einheit verfügt über aeroakustische Schallquellen, die für Axialventilatoren charakteristisch sind. Im Hinblick auf die vorangegangenen Messkampagnen [27] wurde das Design der EDF-Einheit durch die Anbringung von akustischen Auskleidungen zu akustischen Linern geändert, die die innere Kanalseite teilweise abdecken [28]. Das Rückvolumen der Auskleidungen wurde entsprechend den in [9] beschriebenen Erfahrungen behandelt.

Diese Auskleidungen mit Rückvolumen wurden verwendet, um die abgestrahlte Schallleistung im gesamten Betriebsbereich zu reduzieren. Ausgehend von den beiden Varianten wurde der A-bewertete Gesamtschallleistungspegel gemessen, berechnet und für beide Varianten verglichen (siehe Abbildung 11b). Ohne die Positionierung und das Rotordesign hinsichtlich der Lärminderung zu optimieren, verringerte sich durch den Einbau der akustischen Maßnahme der abgestrahlte Lärm über einen breiten Betriebsbereich. Im Besonderen wurden die Schallemissionen im Motordrehzahlbereich um 9 000 U/min um bis zu 4 dB reduziert.

Ausblick

In den vorgestellten Arbeiten wurde der Optimierungsprozess im Design von MPAs durch Anpassung gewisser Geometrieparameter basierend auf den Erfahrungen aus verschiedenen Anwendungen und unter Berücksichtigung der Absorptionsprinzipien durchgeführt. Eine automatisierte numerische Op-

M. Sc.**Felix Czwiolong**

Universität Erlangen-
Nürnberg, Lehrstuhl
für Strömungs-
mechanik

Dipl.-Ing. Dr. techn.**Sebastian Floss**

TU Wien, Institut für
Mechanik und
Mechatronik

Dipl.-Ing.**Paul Maurerlehner**

TU Graz, Institut für
Grundlagen und Theo-
rie der Elektrotechnik

Assistant Prof.**Dipl.-Ing. Dr. techn.****Florian Toth**

TU Wien, Institut für
Mechanik und
Mechatronik

Prof. Dr. techn.**Dr. h. c. Manfred****Kaltenbacher**

TU Graz, Institut für
Grundlagen und Theo-
rie der Elektrotechnik

Prof. Dr.-Ing. habil.**Stefan Becker**

Universität Erlangen-
Nürnberg, Lehrstuhl
für Strömungs-
mechanik

Assistant Prof. Ing.**Dipl.-Ing. Dr. techn.****Stefan Schoder**

TU Graz, Institut für
Grundlagen und Theo-
rie der Elektrotechnik

timierung hat hier noch großes Potenzial, um auch Lösungen, welche der Intuition widersprechen, zu erhalten. Dabei liegt die Herausforderung in der Wahl der Kostenfunktion, der Parametrisierung des Modells (Berücksichtigung der Fertigbarkeit) und der Definition etwaiger Nebenbedingungen (z. B. Beschränkung des Druckverlustes). Darüber hinaus ist bei großen Geometrien der Rechenaufwand sehr schnell der limitierende Faktor, vor allem, wenn Strömungssimulationen erforderlich sind, um die Wechselwirkung zwischen Akustik und Strömung zu berücksichtigen. Weiteres Optimierungspotenzial liegt in den MPPs selbst (Eingangsparameter des JCAL-Modells), wobei hier ebenfalls die Fertigbarkeit eine entscheidende Rolle spielt. Neuartige metallische Gewebe beispielsweise verfügen über noch kleinere Abmessungen der Öffnungen. Auch der Einsatz von 3D-gedruckten Metamaterialien, welche zusätzliche Absorption innerhalb der Kavität ermöglichen, werden als neue Ansätze untersucht. Untersuchungen zur Beeinflussung des Strömungsfeldes durch die MPP würden weitere Designvorschriften hervorbringen und die Ursache von erhöhten tonalen Komponenten bei Axialventilatoren klären.

Literatur

- [1] Liu, J.; Herrin, D.; Seybert, A.: Application of micro-perforated panels to attenuate noise in a duct. SAE Technical Paper. 2007.
- [2] Allard, J.-F.; Gilles, D.: Propagation of sound in porous media: Modeling sound absorbing materials. J. Acoust. Soc. Am.: pp. 2785–2785, 1994.
- [3] Johnson, D. L.; Koplik, J.; Dashen, R.: Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. J. Fluid Mech. 176, pp. 379–402, 1987.
- [4] Champoux, Y.; Allard, J.-F.: Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. J. Appl. Phys. 70, pp. 1975–1979, 1991.
- [5] Schoder S.; Roppert, K.: openCFS: Open Source Finite Element Software for Coupled Field Simulation – Part Acoustics. 2022. arXiv preprint arXiv:2207.04443
- [6] Kaltenbacher, M.; Floss, S.: Nonconforming Finite Elements Based on Nitsche-Type Mortaring for Inhomogeneous Wave Equation. Journal of theoretical and computational acoustics 26(3), 1850028, 2018.
- [7] Lafarge, D.; Lemarinier, P.; Allard, J.-F.; Tarnow, V.: Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies. J. Acoust. Soc. Am. 102(4), pp. 1995–2006, 1997.
- [8] MathWorks (2020): <https://www.mathworks.com/discovery/genetic-algorithm.html>. Online. Accessed 25 December 2020.
- [9] Floss, S.; Czwiolong, F.; Becker, S.; Kaltenbacher, M.: Micro-perforated panels for noise reduction. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 138(3), 171–178, 2021.
- [10] Carolus, T.: Ventilatoren: aerodynamischer Entwurf – konstruktive Lärminderung – Optimierung. Springer-Verlag, 2020.
- [11] Bronzaft Arline, L.: Impact of noise on health: the divide between policy and science. Open journal of social sciences 5, no. 05: 108, 2017.
- [12] Liu, C.; Ji, Z.; Fang, Z.: Numerical analysis of acoustic attenuation and flow resistance characteristics of double expansion chamber silencers. Noise Contr Eng J 2013, 61, 2013.
- [13] Möser, M.; Müller, G.: Handbook of engineering acoustics. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
- [14] Floss, S.; Czwiolong, F.; Kaltenbacher, M.; Becker, S.: Design of an induct micro-perforated panel absorber for axial fan noise attenuation. Acta Acustica 5: 24, 2021.
- [15] I.O. f. S. DIN EN ISO 5801: Industrial fans-performance testing using standardized airways. 2007.
- [16] Czwiolong, F.; Floss, S.; Kaltenbacher, M.; Becker, S.: Influence of a micro-perforated duct absorber on sound emission and performance of axial fans. Applied Acoustics 174: 107746, 2021.
- [17] Zenger, F.; Herold, G.; Becker, S.: Acoustic characterization of forward- and backward-skewed axial fans under increased inflow turbulence. AIAA Journal 55, no. 4: 1241–1250, 2017.
- [18] Schneider, M.; Feldmann, C.: Psychoacoustic evaluation of fan noise. Proc. of Fan. 2015.
- [19] Pressemitteilung bwp (Bundesverband Wärmepumpen e. V.) vom 20.1.2022: <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/starkes-wachstum-im-waermepumpenmarkt/#content> (letzter Aufruf: 13.01.2023)
- [20] T. A. Lärm: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm). Technical Instructions on Noise Abatement. 1998.
- [21] Czwiolong, F.; Soldat, J.; Becker, S.: On the interactions of the induced flow field of heat exchangers with axial fans. Experimental Thermal and Fluid Science 139: 110697, 2022.
- [22] Czwiolong, F.; Floss, S.; Kaltenbacher, M.; Becker, S.: Sound reduction in heat exchanger modules by integrating plate absorbers with sub-millimeter openings. Acta Acustica 5: 35, 2021.
- [23] Moreau, S.; Sanjose, M.: Sub-harmonic broadband humps and tip noise in low-speed ring fans. The Journal of the Acoustical Society of America 139, no. 1: 118–127, 2016.
- [24] Floss, S.: Möglichkeiten zur Schallreduktion in einer Klimaanlage der Firma Liebherr: Simulation und Experiment. Diplomarbeit. Wien. 2017.
- [25] Yang, C.; Cheng, L.; Pan, J.: Absorption of oblique incidence sound by a finite micro-perforated panel absorber. The Journal of the Acoustical Society of America 133.1: 201–209, 2013.
- [26] Zhang, X.; Cheng, L.: Acoustic silencing in a flow duct with micro-perforated panel liners. Applied Acoustics 167: 107382, 2020.
- [27] Schmidt, J.; Kaltenbacher, M.; Furlinger, A.; Schoder, S.: Experimental Characterization of an Electric Ducted Fan Unit's Acoustic Emissions. In AIAA AVIATION 2021 FORUM, p. 2174, 2021.
- [28] Schoder, S.; Schmidt, J.; Furlinger, A.; Kaltenbacher, M.: Quantification of the Acoustic Emissions of an Electric Ducted Fan Unit. In DICUAM 2022. ■