

## Numerische Untersuchung eines neuartigen Kabinenwandkonzeptes

Christiane Gillner<sup>1</sup>, Boris Dilba<sup>1</sup>, Sören Keuchel<sup>1</sup>, Olgierd Zaleski<sup>1</sup>

Christian Wischmann<sup>2</sup>, Daniele Usai<sup>2</sup>, Wolfgang Gleine<sup>2</sup>

Adam Dzierbinski<sup>3</sup>, Pascal Vöpel<sup>3</sup>, Kai Steffens<sup>4</sup>, Danny Bialuschewski<sup>4</sup>, Barbara Milow<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Novicos GmbH, 21079 Hamburg, Deutschland, Email: gillner@novicos.de

<sup>2</sup> HAW Hamburg, 20099 Hamburg, Deutschland, Email: Wolfgang.Gleine@haw-hamburg.de

<sup>3</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 51147 Köln, Deutschland, Email: pascal.voepel@dlr.de

<sup>4</sup> Universität zu Köln, 50939 Köln, Deutschland, Email: bmilow@uni-koeln.de

### Einleitung

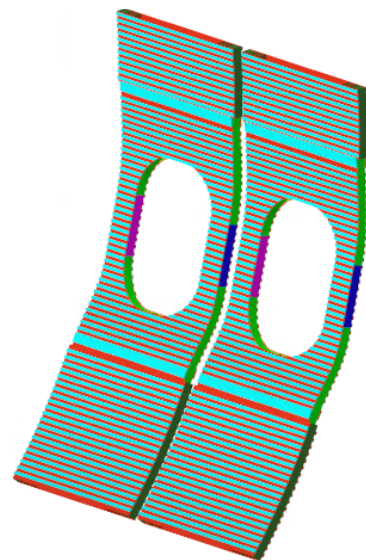
Für zukünftige, energieeffizientere Antriebssysteme von Flugzeugen wie z.B. Turbopropantrieben werden im Vergleich zu den heutigen Turbinentriebwerken speziell im unteren Frequenzbereich Schalldruckspektren mit einer stärker ausgeprägten Tonhaltigkeit erwartet. Im Rahmen des Luftfahrt-Forschungsvorhabens Multikabin wurde daher ein neuartiges Kabinenwandkonzept mit speziellen akustischen Eigenschaften entwickelt, das den höheren vom Triebwerk induzierten Schalldruckpegeln insbesondere im unteren Frequenzbereich entgegenwirken und zu einem verbesserten Komfort innerhalb der Kabinen zukünftiger Flugzeuge führen soll.

In diesem Beitrag wird zunächst das von der HAW entwickelte, neuartige Kabinenwandkonzept vorgestellt. Anschließend werden die von Novicos durchgeführten numerischen Untersuchungen des vibro-akustischen Verhaltens diskutiert. Die Simulationen eines Flugzeugrumpfssegmentes werden anhand von Prototypmessungen des Projektpartners HAW validiert. Neben der üblicherweise verwendeten Glaswolle kommt mit Aerogelen eine weitere Klasse von Isolationsmaterialien zur Anwendung. Die Aerogele werden beim Projektpartner UzK speziell für die akustischen und thermischen Anforderungen entwickelt und im DLR skaliert. Aerogele sind hoch poröse Festkörper, die in einem Sol-Gel Prozess [1] hergestellt werden und aufgrund einer Porosität von bis zu 95 Prozent eine sehr geringe Dichte besitzen. Weiterhin weisen sie gute Eigenschaften in der Schallabsorption und eine geringe thermische Leitfähigkeit auf.

### Neuartiges Kabinenwandkonzept

Als Referenzkabinenwand dient die aktuell verbaute Kabinenwand eines A320 Passagierflugzeuges. Dabei wird die Rumpfstuktur, die dahinter liegende Primärisolierung aus 80 mm dicker Glaswolle und das Seitenwandpaneel betrachtet. Für die Luftzufuhr in der Kabine wird standardmäßig ein Belüftungsrohr verwendet. Die Idee des neuen Kabinenwandkonzeptes ist es, das klassische Belüftungssystem durch einen zwischen den Rumpfspanten montierten breitflächigen Luftkanal zu ersetzen, um damit die in die Kabinenwand eindringende und auch vorhandene Luftfeuchtigkeit wieder zurück in die Kabine zu transportieren. Zusätzlich wird der Luftkanal als Träger von Schallisolationselementen verwendet, die eine erhöhte Schallisolation unterhalb von 1000 Hz gegenüber der Referenzwand erzeugen sollen [2]. Für einen

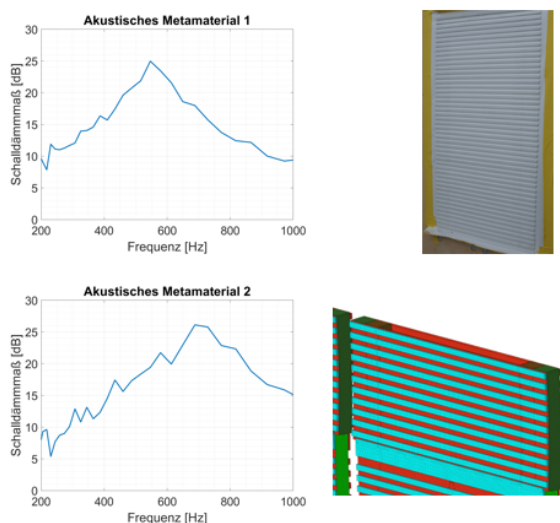
Prototypen wird ein Teil eines original A320 Rumpfssegmentes bestehend aus zwei Hautfeldern verwendet. Das Simulationsmodell des Luftkanals ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Luftführung ist dabei um die Fenster herum gebaut und das klassische Belüftungsrohr wurde entfernt. Die Gesamtdicke des Luftkanals beträgt 40 mm. Im Gesamtwandaufbau wurden daher 40 mm Glaswolle zwischen Rumpf und Seitenwandpaneel herausgenommen. Zwei Arten von Schallisolationsmaßnahmen wurden



**Abbildung 1:** Simulationsmodell des Luftkanalkonzeptes für eine Flugzeugkabinenwand mit akustisch wirksamen Komponenten

in den Luftkanal integriert. Zum Einen wurden akustische Metamaterialien verwendet [3]. Diese bestehen aus Streifenmassen, die auf einer Folie mit einer darauf abgestimmten Biegesteifigkeit aufgebracht sind. Sowohl auf der Vorder- und Rückseite des Luftkanals werden Metamaterialien angebracht. Der wirksame Frequenzbereich ist für die Vorder- und Rückseite separat ausgelegt, um einen breitbandigen Frequenzbereich abzudecken. Dazu ist die Höhe der Massen und deren Abstände angepasst. Die Wirksamkeit wurde mit Schalldämmmaßnahmen in einem Transmissionsprüfstand, bestehend aus Hallraum, Schalltransmissionsfenster und Freifeldraum im Labor für Technische Akustik an der HAW nachgewiesen. Ein Bild des Luftkanals unterhalb des Flugzeugfensters, ein Ausschnitt des Simulationsmodells und die

Messergebnisse des Schalldämmmaßes der einzelnen Metamaterialien sind in Abbildung 2 dargestellt. Als zwei-

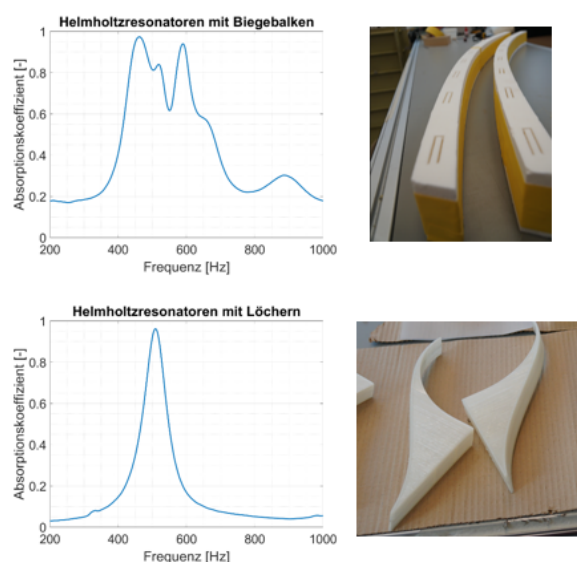


**Abbildung 2:** Akustische Metamaterialien als Komponenten des Luftkanals. Wirksamer Frequenzbereich anhand von Schalldämmmaßnahmen im Transmissionsprüfstand validiert [HAW].

tes Wirkprinzip wurden spezielle Helmholtzresonatoren mit Biegebalken im Resonatorhals verwendet, die an den schmalen Seitenwänden des Luftkanals zwischen den beiden breiten Luftkanalwänden aus Metamaterialien angebracht sind [4]. Durch den mitschwingenden Biegebalken weisen diese Resonatoren zwei Frequenzbereiche auf, in denen sie wirksam sind. Im Bereich eines Fensters ist der Luftkanal mit Hilfe von formangepassten Helmholtzresonatoren in zwei Teilkanäle aufgeteilt, die den unteren und oberhalb der Fenster fortlaufenden Luftkanal verbinden. Dies gewährleistet einerseits eine höchstmögliche Schallminderung und andererseits eine widerstandsarme Umströmung des Fensters. Zur genauen Frequenzabstimmung wurde in die Resonatoren eine definierte Anzahl von Löchern eingebracht. Die Wirkweise beider Resonatortypen wurde mithilfe von Impedanzrohrmessungen nachgewiesen. Bilder der originalen Bauteile und die Messergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

### Modellaufbau

Die Vibroakustik-Simulationen wurden basierend auf einem 3D-FEM Modell durchgeführt, das aus einem CAD-Modell der Kabinenwand mit Luftkanal des Projektpartners HAW abgeleitet wurde. Dabei wurden die Rumpfstruktur, das Isolationsmaterial sowie der Luftkanal und das Seitenwandpaneel berücksichtigt. Das Isolationsmaterial wurde als poröses Material mit dem Biot-Modell modelliert [5, 6], welches für die Modellierung vielseitiger poröser Materialien geeignet ist [7]. Zielgröße ist das Schalldämmmaß. Die dafür verwendete Anregung ist eine Diffusfeldanregung, vergleichbar mit dem Messaufbau. Das Modell wurde schrittweise durch einen Abgleich mit Messungen validiert. Dadurch konnten Erkenntnisse über den Einfluss der einzelnen Komponenten auf das Schalldämmmaß gewonnen werden.



**Abbildung 3:** Helmholtzresonatortypen als Komponenten des Luftkanals. Wirksamer Frequenzbereich anhand von Absorptionsmessungen im Impedanzrohr validiert [HAW].

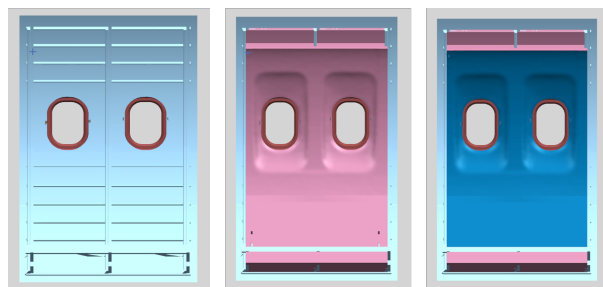
Neben der Glaswolle wurde Aerogel als Isolationsmaterial verwendet. Aufgrund der verringerten thermischen Leitfähigkeit gegenüber Glaswolle kann Aerogel mit verringerter Dicke verwendet und Bauraum eingespart werden. Aerogel kann ebenfalls als poröses Material mit dem Biot-Modell modelliert werden [8, 9]. Die verwendeten Biot-Parameter sind in Tabelle 1 und beide Isolationsmaterialien in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4:** Verwendete Dämmmaterialien. Glaswolle (links) und Aerogel (rechts).

### Modellvalidierung

Der schrittweise Aufbau des Simulationsmodells ist in Abbildung 5 und die Validierung in Abbildung 6 dargestellt. Für die Validierung wurden Prüfstandsmessungen

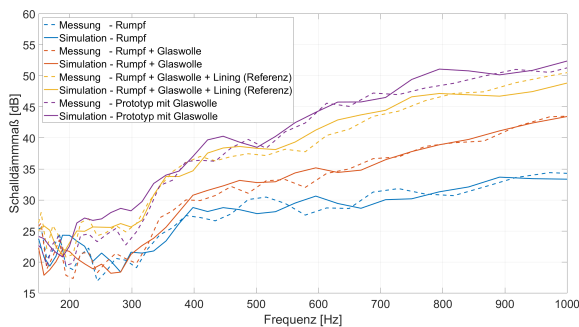


**Abbildung 5:** Schrittweiser Modellaufbau. Rumpfstruktur (links) mit Primärisolierung (Mitte) und Seitenwandpaneel (rechts).

an einem originalen A320 Rumpfsegment, bei dem ein

**Tabelle 1:** Biot-Parameter von Glaswolle, Aerogel und Aerogel mit reduzierter Dichte. Abkürzungen:  $\rho$  - Dichte,  $r_s$  - Strömungswiderstand,  $\Lambda'$  - Viskose Länge,  $\Lambda$  - Thermische Länge,  $\phi$  - Porosität und  $\alpha$  - Gewundenheit

	Glaswolle	Aerogel	Aerogel (red. Dichte)
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	6,7	112	86
$r_s$ [kNs/m <sup>4</sup> ]	23,8	170	101
$\Lambda'$ [ $\mu$ m]	59,3	18	25
$\Lambda$ [ $\mu$ m]	129	76	41
$\phi$ [-]	0.99	0.95	0.96
$\alpha$ [-]	1	4	4



**Abbildung 6:** Validierung des Simulationsmodells der Referenz und des Prototypen durch den Abgleich mit Messung an einem originalen A320 Rumpf.

Panel durch den Prototypen ersetzt wurde, verwendet. Zunächst wurde das Schalldämmmaß des Rumpfsegmentes validiert. Die Außenhautplatten weisen diverse Fügstellen auf. Variierende Plattendicken sind an Klebe- und Nietstellen miteinander verbunden. Dadurch ergeben sich verschiedenste Randbedingungen. Zusätzlich muss der Schallpfad durch die Fenster berücksichtigt werden. Abschließend ist ein solider Abgleich, der alle Punkte berücksichtigt, erreicht worden.

Im nächsten Schritt wurde die Glaswollisolierung zum Modell hinzugefügt. Hier ist zu erkennen, dass das Schalldämmmaß sich oberhalb von 400 Hz gegenüber dem reinen Rumpf erhöht. Bei 1000 Hz ist das Schalldämmmaß ca. 8 dB höher. Das bei niedrigeren Frequenzen keine Unterschiede erkennbar sind, liegt an der Wirkweise des absorbierenden Materials und der zu geringen Masseerhöhung.

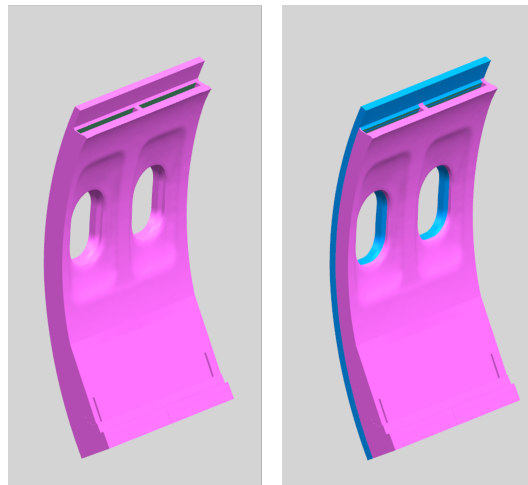
Im nächsten Schritt wurde das Seitenwandpaneel hinzugefügt. Dies führte zu einer weiteren Erhöhung des Schalldämmmaßes um ca. 8 dB. Die zusätzliche Schalldämmung resultiert primär aus dem Doppelwandaufbau und nicht durch ein poröses Material. Da das System ebenfalls eine höhere Masse aufweist, ist bereits bei niedrigen Frequenzen eine Erhöhung des Schalldämmmaß festzustellen. Alle Strukturmodelle mit verschiedenen Materialien, Anbindungen und Dämpfungen wurden erfolgreich validiert. Dieses Modell bildet die Referenz für

den Vergleich mit dem Prototypen.

Anschließend wurde der Prototyp mit Luftkanal validiert. Sowohl Messung als auch Simulation zeigen ab 500 Hz ein um bis zu 5 dB erhöhtes Schalldämmmaß. Das Projektziel einer verbesserten Schalldämmung unter 1000 Hz wurde somit erreicht und das Luftkanalmodell validiert. Zu berücksichtigen ist, dass der Luftkanal eine zusätzliche Masse von 2,4 kg in den Wandaufbau einbringt. Allerdings wird auch das herkömmliche Belüftungssystem entfernt. Das Rumpfsegment wiegt ca. 29 kg und das Seitenwandpaneel ca. 2 kg. Ein Großteil der Masse des Luftkanals resultiert aus den 3D gedruckten Bauteilen. Grundsätzlich können diese aus Materialien mit geringerer Dichte hergestellt werden. Im Zeitrahmen des Projektes war keine andere Herstellung möglich. Die Auswirkungen leichterer Materialien für die 3D gedruckten Bauteile auf das Gesamtschalldämmmaß des Prototypen werden im nächsten Abschnitt untersucht.

## Materialvariationen

Auf Basis der validierten Simulationsmodelle konnten nun numerische Experimente durchgeführt werden, um das Potenzial des Wandkonzeptes noch weiter zu untersuchen. Zunächst wurde die Primärisolierung aus Glaswolle durch Aerogel ersetzt. Der Bereich ist in Abbildung 7 und die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Durch Ae-



**Abbildung 7:** Primärisolierung vor dem Luftkanal aus Glaswolle (links) und Aerogel (rechts)

rogel erhöht sich das Schalldämmmaß um bis zu 5 dB. Diese Verbesserung wird insbesondere im unteren Frequenzbereich von 200 - 500 Hz erreicht. Im höheren Frequenzbereich wird durch die veränderte Primärisolierung keine weitere Verbesserung erzielt. Im Gegensatz zu einer Primärisolierung aus Glaswolle mit einem Gewicht von 0,75 kg, führt Aerogel zu einer Erhöhung der Masse auf 10 kg, wenn dies als Primärisolierung überall eingesetzt wird. Da im oberen Frequenzbereich nur ein sehr geringer Einfluss auf das Schalldämmmaß zu erkennen ist, zeigt sich, dass die Primärisolierung nicht der alleinige Faktor für eine Schallminderung über den gesamten Frequenzbereich ist. Ebenso sind Strukturpfade wie das Fenster und die Seitenwandpaneelanbindung relevant. Die Primärisolierung vollständig durch Aerogel zu ersetzen

ist daher nicht zielführend. An Stellen, an denen wenig Bauraum zur Verfügung steht und eine hohe thermische Isolation notwendig ist, bietet Aerogel eine vielversprechende Möglichkeit auch die akustische Dämmung zu erhöhen. Ein mögliches Beispiel wäre der Bereich um die Fenster.

Als nächstes wurde das Material der 3D gedruckten Bauteile des Luftkanals durch Rohacell mit einer sehr geringen Dichte ausgetauscht. Die Helmholtzresonatoren mit Biegebalken waren bereits aus Rohacell gefertigt. Damit reduziert sich das Gesamtgewicht des Luftkanals auf 0,7 kg und ist vergleichbar oder sogar leichter als die herkömmliche Luftführung. Das Schalldämmmaß zeigt nahezu keine Einbrüche. Hier zeigt sich ein Potential an Gewichtseinsparung ohne die akustischen Effekte zu reduzieren.

Im Rahmen des Projektes wurde von der UzK in kleinerem Maßstab ein weiteres Aerogel mit verringerter Dichte hergestellt. Eine Reduktion um 30% konnte erreicht werden, womit eine Primärisolierung aus dem leichteren Aerogel noch ca. 8 kg wiegen würde. Diese wurde mit dem bereits massereduzierten Prototyp getestet. Es zeigt sich ein vergleichbares Ergebnis wie mit dem zuvor getesteten Aerogel. Das Schalldämmmaß erhöht sich insbesondere im unteren Frequenzbereich. Eine weitere Gewichtsreduzierung von Aerogel ist Gegenstand aktueller Forschung. Somit ist Aerogel ein Material mit viel Potential in der Schalldämmung, wobei Baumraum gespart und eine hohe thermische Isolation erreicht werden kann.

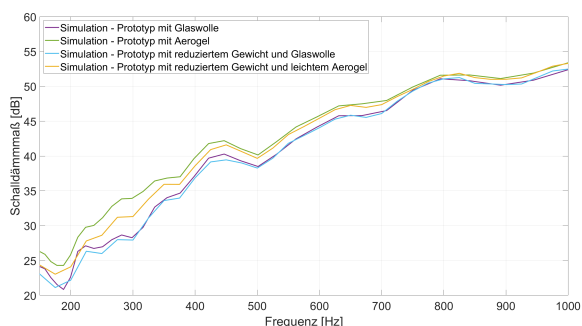


Abbildung 8: Materialvariationen in der Simulation

## Fazit

Der Beitrag stellt ein neuartiges Kabinenwandkonzept für Passagierflugzeuge, das einen Luftkanal für eine bessere Belüftung in der Kabine und Schallsolationskomponenten für die akustische Dämmung insbesondere unter 1000 Hz verwendet, vor. Mit dem Standardmaterial Glaswolle für die Primärisolierung kann eine Erhöhung des Schalldämmmaß um bis zu 5 dB oberhalb von 500 Hz erreicht werden. Mit Aerogel in der Primärisolierung kann auch der untere Frequenzbereich verbessert werden. Wird der Luftkanal anstatt einer Glaswollschicht eingesetzt, erhöht sich das Gewicht in der Wand um 2,4 kg. Dies liegt an den verwendeten Materialien. Numerische Experimente zeigen, dass diese Materialien ohne akustische Einbuße durch leichtere Materialien ersetzt werden

können. Es wird außerdem gezeigt, dass der Transferpfad nicht ausschließlich durch die Primärisolierung beeinflusst wird und eine gleichmäßige Erhöhung der Isolationsmasse nicht zielführend ist. Insbesondere die Fenster bilden einen Strukturschallpfad. Eine Reduzierung des Körperschalls an dieser Stelle würde das Schalldämmmaß weiter reduzieren. Hier könnte außerdem Aerogel eine gute Möglichkeit sein auf geringem Baumraum die akustische und thermische Isolierung zu verbessern.

## Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten sind im Projekt „Multifunktionaler Kabinenwandaufbau für Flugzeugkabinen mit Aerogelkomponenten für eine effiziente Schall-, Wärme- und Feuchteisolation“ (MULTIKABIN in LuFo VI-1) entstanden. Die Autoren danken dem Fördergeber Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die finanzielle Unterstützung.

## Literatur

- [1] Hayase, G., Kanamori, K., Nakanishi, K.: New flexible aerogels and xerogels derived from methyltrimethoxysilane/dimethyldimethoxysilane co-precursors. *J. Mater. Chem* 21 (2011), 17077-17079
- [2] Wischmann, C., Gleine, W., Usai, D.: Mögliche Potentiale mikroperforierter Absorber in einer neuartigen Flugzeugkabinenwand. *Tagungsband DAGA 2023*, S. 584-587
- [3] Langfeldt, F., Gleine, W.: Plate-type acoustic metamaterials with strip masses. *Journal of the Acoustical Society of America* 149 (2021), S.3727-3738. URL: <https://doi.org/10.1121/10.0005112>
- [4] Hoppen, H., Langfeldt, F., Gleine, W., von Estorff, O.: Optimierung eines Helmholtz-Resonators mit integriertem Biegebalken für Anwendungen in Doppelwänden. *Tagungsband DAGA 2020*, S. 1055-1058
- [5] Johnson, David Linton and Koplik, Joel and Dashen, Roger: Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics* (1987), Vol. 176, 379-402
- [6] Champoux, Yvan and Allard, Jean-F: Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *Journal of Applied Physics* (1991), Vol. 70, 1975-1979
- [7] Dilba B., Stehle F., Gillner, C., Keuchel, S., Zaleski, O., Herrmann, A.: Akustische Eigenschaften naturfaserverstärkter Kunststoffe. *Tagungsband DAGA 2023*, S. 502-505
- [8] Gillner, C., Marckmann, H., Zaleski, O., von Estorff, O.: Simulation von Aerogelen als Isolationsmaterial in der Flugzeugkabinenwand. *Tagungsband DAGA 2019*, S. 1291-1294
- [9] Gillner, C., Marckmann, H., Dilba, B., Zaleski, O., Vöpel, P., Dzierbinski, A., Okumus, E., Milow, B.: Aerogels as innovative insulation materials a range of acoustic properties. *Tagungsband DAGA 2021*, S. 120-123