

Untersuchungen zur Verbesserung der akustischen Eigenschaften im tieferen Frequenzbereich von Glaswollpaketen für Flugzeugkabinenisolierungen

Hannah Hoppen¹, Wolfgang Gleine², Otto von Estorff²

¹ HAW Hamburg, 20099 Hamburg, Deutschland, Email: Hannah.Hoppen@haw-hamburg.de

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

³ Technische Universität Hamburg-Harburg, 21073 Hamburg, Deutschland, Email: Estorff@tu-harburg.de

Einleitung

Die Entwicklung neuer Flugzeugkonzepte berücksichtigt zunehmend Triebwerke mit größer werdendem Nebenstromverhältnis. Einhergehend mit dieser Veränderung tritt in der Flugzeugkabine ein tonhaltiges Schallspektrum im Frequenzbereich unter 1000 Hz auf. Die derzeitige Isolierung besteht aus einer Doppelwand, aus der Flugzeugstruktur sowie der Kabinenwandverkleidung mit eingebetteten Glaswollpaketen. Sie liefert gute Schallisolationseigenschaften im höheren Frequenzbereich (ab 1000 Hz).

In der vorliegenden experimentellen Studie werden verschiedene Konzepte untersucht, um herauszufinden in wie weit diese die Eigenschaften der Glaswolle so verändern können, dass sie in der Doppelwand im Flugzeug auch im tieferen Frequenzbereich unter 1000 Hz verbesserte Schallisolationseigenschaften aufweist.

Poröse Absorber, wie Glaswolle oder Schäume, werden oft zur Schallreduktion verwendet. Ihre Wirkweise ist aber erst ab einer Frequenz effizient, deren Wellenlänge im Absorber kleiner als das Vierfache der Absorberdicke ist [6]. Dementsprechend müssten die Absorber eine große Dicke aufweisen, wenn tiefe Frequenzen absorbiert werden sollen. Platz- und Gewichtsgründe sind aber meist ein limitierender Faktor. Deshalb sind in der Vergangenheit viele Konzepte entwickelt worden, um tiefere Frequenzen effizient zu absorbieren. Die meisten Lösungen basieren auf dem Einfügen von Resonatoren oder Massen in die porösen Absorber.

Kidner [2] und Fuller [3] betten Kugeln in Melaminharzschaum bzw. in Polyimidschaum ein und betrachten das Einfügedämmmaß bzw. den Absorptionsgrad im Frequenzbereich bis 2 kHz. Lagarrigue [6] und Groby [4] untersuchen den Effekt von Resonatoren aus Aluminium in Melaminharzschaum und Glaswolle vor der harten Wand im Frequenzbereich bis 4 kHz bzw. 8 kHz. Sie erhalten Resonanzen bei ungefähr 2 kHz und 500 Hz. Doutres [7] untersucht den Einfluss von Helmholtzresonatoren, die in Melaminharzschaum eingebettet und auf eine Resonanzfrequenz von 144 Hz und 383 Hz abgestimmt sind. Boutin [5] bettet große Resonatoren in eine granulare Matrix ein und erhält damit Resonanzfrequenzen von 123 Hz und 314 Hz. Shrivage [1] untersucht die veränderten Schallabsorptionseigenschaften von Schäumen und Glaswolle vor der harten Wand im Frequenzbereich bis 1,6 kHz durch Einfügen einer undurchlässigen Schicht.

In der vorliegenden Studie werden die in obiger Literaturauswahl dargestellten Schallminderungsmaßnahmen, die in Schäumen gute, zusätzliche Schallreduktionswirkungen erzielen, hinsichtlich einer Übertragbarkeit ihrer Eigenschaften in einer Flugzeugkabinendoppelwand untersucht, die mit Glaswollpaketen ausgefüllt ist.

Bestimmung der Zielgrößen

Die Schallisolation der Flugzeugkabine gegenüber äußeren Schallquellen, wie Triebwerken oder Schallanregungen der Flugzeugrumpfstruktur durch die Strömungsgrenzschicht, wird durch eine Doppelwand mit eingebettetem Absorber erzielt. Die Doppelwand besteht aus der Primärstruktur, einer durch Spante und Stringer versteiften Aluminiumhaut, und der Kabinenwandverkleidung. Als Absorber dienen in Folie eingeschweißte Glaswollpakete verschiedener Dichten und Dicken, deren Eigenschaften in Tabelle 1 aufgelistet sind.

Tabelle 1: Eigenschaften der Glaswolle

Typ	Parameter		
	Dichte in pcf	Dichte in kg/m ³	Strömungswiderstand in Ns/m ⁴
pink	0,34	5,44	20.000
amber	0,42	6,73	24.000
green	0,6	9,61	31.000
orange	1,0	16,02	62.000

In Abbildung 1 sind vier Schalldämmmaße von Doppelwänden mit Glaswolle verschiedener Dichten und Strömungswiderständen, die mit Hilfe von Transfermatrizen berechnet werden, dargestellt. Dabei wird für den Doppelwandaufbau eine Flächenmassen von 5 kg/m² für die Primärstruktur und 1,5 kg/m² für die Kabinenwandverkleidung sowie ein Wandabstand von 10 cm als feste Parameter angesetzt. Die Differenz der Schalldämmmaße zwischen der Glaswolle mit dem höchsten und niedrigsten Strömungswiderstand ist in Abbildung 1 als „Delta“ angegeben.

Aus Abbildung 1 geht hervor, dass die eingebettete Glaswolle als Absorber mit steigendem Strömungswiderstand für einen abgeschwächten Einbruch des Schalldämmmaßes bei der Doppelwandresonanzfrequenz sorgt. Das Ziel dieser Studie ist es, die verschiedenen Schallminderungskonzepte aus der oben genannten Lite-

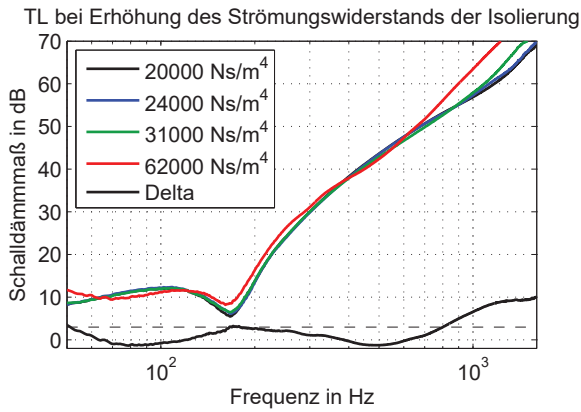


Abbildung 1: Einfluss des Strömungswiderstands von verschiedenen Glaswolltypen auf das Schalldämmmaß der Doppelwand im Flugzeug. Die schwarze Linie zeigt die Differenz zwischen der Glaswolle mit dem höchsten und dem niedrigsten Strömungswiderstand.

ratur für die pinke, relativ leichte Glaswolle mit dem Strömungswiderstand von 20000 Ns/m^4 dahingehend zu untersuchen, ob das berechnete Schalldämmmaß in der Doppelwand um 3 dB erhöht werden kann. Aus Abbildung 1 wird deutlich, dass erst die Verdreifachung des Strömungswiderstands und damit einhergehend ungefähr die Verdreifachung der Dichte für eine Erhöhung des Schalldämmmaßes bei der Doppelwandresonanzfrequenz um 3 dB sorgt.

Abbildung 2 zeigt die im Impedanzrohr mit der 2-Mikrofon-Methode gemessenen Absorptionsgrade von den vier verschiedenen Glaswolltypen vor der harten Wand.

Es ist ersichtlich, dass der Absorptionsgrad mit steigender Frequenz und steigendem Strömungswiderstand zunimmt. Aus den gemessenen Absorptionsgraden wird der frequenzabhängige Soll-Absorptionsgrad (in orange abgedruckt) abgeleitet. Um eine Erhöhung des Schalldämmmaßes im Frequenzbereich der Doppelwandresonanzfrequenz um 3 dB zu erzielen, müssen die

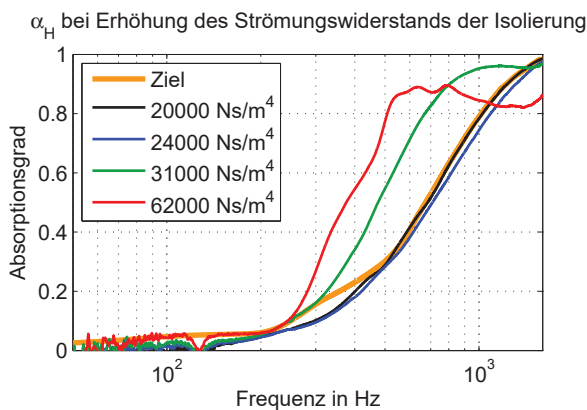


Abbildung 2: Einfluss des Strömungswiderstands von verschiedenen Glaswolltypen auf den Absorptionsgrad vor der harten Wand; gemessen im Impedanzrohr. In orange ist die Soll-Absorptionskurve dargestellt.

zu untersuchenden Maßnahmen im Frequenzbereich um die Doppelwandresonanzfrequenz den Absorptionsgrad der Glaswolle mit dem höchsten Strömungswiderstand von 62000 Ns/m^4 erreichen. Da der erhöhte Absorptionsgrad oberhalb der Doppelwandresonanzfrequenz keinen merkbaren Einfluss auf das Schalldämmmaß zeigt, nähert sich die Soll-Absorptionskurve oberhalb von 500 Hz der Absorptionskurve von Glaswolle mit dem niedrigsten Strömungswiderstand von 20000 Ns/m^4 an.

Experimentelle Studie

Die experimentelle Studie wird mit Glaswolle der Dichte $0,34 \text{ pcf}$, deren Eigenschaften Tabelle 1 zu entnehmen sind, im Impedanzrohr vor der harten Wand mit der 2-Mikrofon-Methode durchgeführt.

Einbetten von Stahlkugeln

Kidner bettet 10 Stahlkugeln ($d = 9 \text{ mm}$, $m = 8 \text{ g}$) in einen Würfel aus Melaminharzschäum mit den Kantenlängen von $0,05 \text{ m}$ ein. Die eingefügten Stahlkugeln übersteigen das Gewicht des Schaumes um das 20-fache. Durch das realisierte Feder-Masse-System erhöht Kidner das im Transmissionsfenster gemessene Einfügedämmmaß zwischen 80 und 160 Hz um bis zu 10 dB. Fuller bettet 36 Kugeln aus verschiedenen Materialien in einen Zylinder (Durchmesser 100 mm, Länge 100 mm) aus Polyimidschaum und Melaminharzschäum. Die eingebetteten Kugeln erhöhen das Gewicht des Schaumes um das 2,5 bis 20-fache. Fuller erhält durch das Feder-Masse-System im Polyimidschaum eine Möglichkeit den Absorptionsgrad bei niedrigen Frequenzen zu steigern. Mit steigender Masse der eingebetteten Kugeln bewegt sich das Maximum des Absorptionsgrades zu niedrigeren Frequenzen.

Da die in dieser Studie verwendete Glaswolle bedeutend geringere Rückstellkräfte als die von Fuller und Kidner verwendeten Schäume besitzt, werden in dieser Studie 7 Stahlkugeln mit einem Durchmesser von $3/16 \text{ Zoll}$ und einem Gewicht von $0,44 \text{ Gramm}$ eingebettet. Der Einfluss der Stahlkugeln auf die Schallabsorptionseigenschaften der Glaswolle ist in Abbildung 3 zu erkennen.

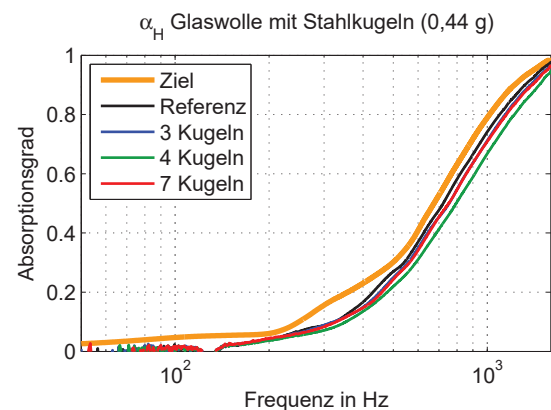


Abbildung 3: Einfluss auf den Absorptionsgrad von eingebetteten Stahlkugeln in 2 Lagen pinke Glaswolle mit der Dichte von $5,44 \text{ kg/m}^3$.

Durch das Einfügen der eingebetteten Massen sinkt der Absorptionsgrad der Glaswolle. Das bedeutet, dass die eingebetteten Massen in der Glaswolle nicht zu resonanten Schwingungen angeregt werden können. Vermutlich liegen die Rückstellkräfte der verwendeten Glaswolle nicht in einem sinnvollen Bereich.

Integrieren einer Feder

Um die einzelnen Glaswolllagen in Schallrichtung zu versteifen, wird eine Feder längs durch die Glaswolle gedreht. Die Feder besitzt eine Masse von 0,1 Gramm. Durch die eingedrehte Feder ist kein nennenswerter Unterschied im Absorptionsverhalten zu Glaswollproben ohne versteifende Feder zu erkennen.

Einbetten von Helmholtzresonatoren

In Anlehnung an die Untersuchungen von Boutin, Groby und Lagarrigue werden Helmholtzresonatoren in die Glaswolle eingebettet. Die verwendeten Helmholtzresonatoren sind aus einer Kugel mit einem Durchmesser von 40 mm und einem variablen Hals zur Abstimmung der Eigenfrequenz aufgebaut.

In Abbildung 4 ist der Einfluss eines Helmholtzresonators mit der Eigenfrequenz von 470 Hz dargestellt. Der Absorptionsgrad ist ab 200 Hz erhöht. Die Höhe des Absorptionsgrades und die Lage des Maximums hängen von der Einbaurichtung des Helmholtzresonators ab.

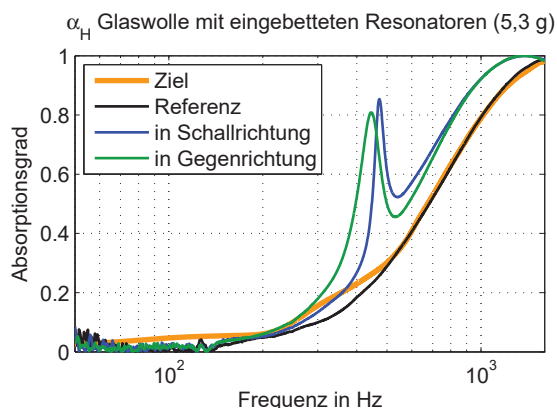


Abbildung 4: Einfluss auf den Absorptionsgrad von einem eingebetteten Helmholtzresonator zwischen 2 Lagen pinke Glaswolle mit der Dichte von $5,44 \text{ kg/m}^3$.

In Abbildung 5 ist der Einfluss der eingebetteten Helmholtzresonatoren auf das Schalldämmmaß der Doppelwand abgebildet. Durch das Einbetten eines Helmholtzresonators kann das Schalldämmmaß an der Doppelwandresonanzfrequenz um 3 dB erhöht werden. Deutlich erkennbar ist die breitbandige Erhöhung des Schalldämmmaßes zwischen der Doppelwandresonanzfrequenz und der Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators.

Einbetten von Aluminiumfolie

Shravage [1] erhöht den Absorptionsgrad von Glaswolle durch Einfügen einer undurchlässigen Schicht. Die von Shravage untersuchte Glaswolle hat eine Dicke von

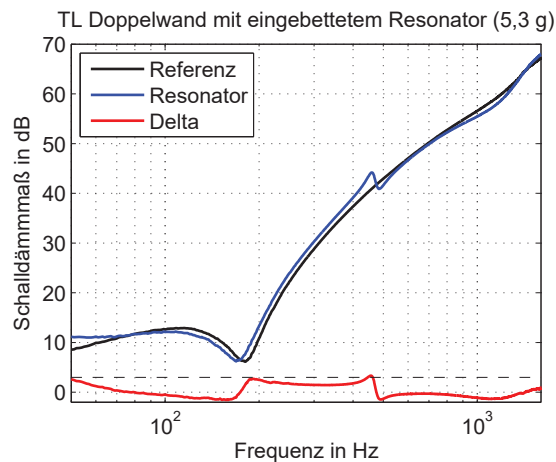


Abbildung 5: Einfluss auf das Schalldämmmaß der Doppelwand von einem eingebetteten Helmholtzresonator zwischen 2 Lagen pinke Glaswolle mit der Dichte von $5,44 \text{ kg/m}^3$.

$0,025 \text{ m}$ und eine Dichte von 48 kg/m^3 . Die verwendete undurchlässige Schicht ist Aluminiumfolie mit einer Flächenmasse von $0,055 \text{ kg/m}^2$. Die von Shravage verwendete Glaswolle hat eine 9 mal höhere Dichte als die Glaswolle, die in dieser Studie untersucht wird. In der vorliegenden Studie wird Glaswolle mit einer Dicke von $0,058 \text{ m}$ und Aluminiumfolie mit einer Flächenmasse von $0,023 \text{ kg/m}^2$ verwendet. Der Einfluss der eingebetteten Aluminiumfolie ist in Abbildung 6 zu erkennen.

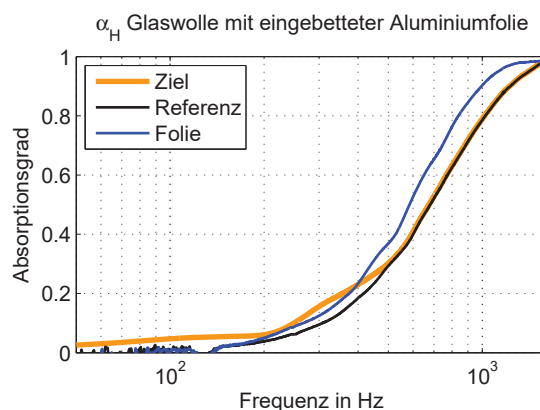


Abbildung 6: Einfluss auf den Absorptionsgrad von eingebetteter Aluminiumfolie zwischen zwei Lagen pinke Glaswolle mit der Dichte von $5,44 \text{ kg/m}^3$.

Abbildung 6 zeigt, dass die eingebettete Aluminiumfolie ab 200 Hz mit steigender Frequenz für einen Anstieg des Absorptionsgrads führt. Der Absorptionsgrad liegt aber erst ab 400 Hz über der Soll-Absorptionskurve.

Einbetten von Kreisringen und Kreisen aus Aluminiumfolie

In einer weiteren Versuchsreihe wird der Einfluss von eingebetteten Kreisringen und Kreisen aus Aluminiumfolie zwischen zwei Lagen Glaswolle untersucht. Die Flächenmasse bleibt dabei gleich, während sich die von Aluminiumfolie bedeckte Fläche ändert. Die Versuchsreihe ist dreigeteilt. Es werden große Kreisringe mit einem

Außendurchmesser D von 97 mm und variablen Innendurchmesser d , kleine Kreisringe mit einem Außendurchmesser von 30 und 40 mm und einem Innendurchmesser von 20 mm sowie Kreise mit einem Durchmesser von 20 bis 40 mm in die Glaswolle eingebettet.

Vermutet wird, dass es durch das Einfügen der Kreisringe bzw. Kreise zwischen die beiden Glaswollschichten an den Kanten der Aluminiumschicht zu lokalen Impedanz- und Strömungswiderstandsänderungen kommt. In der ersten Versuchsreihe mit den großen Kreisringen wird die Länge der Kanten durch die unterschiedlichen Innendurchmesser variiert. In der zweiten Versuchsreihe mit den kleinen Kreisringen wird eine zweite Kante für potenzielle lokale Impedanz- und Strömungswiderstandsänderung hinzugefügt.

Abbildung 7 zeigt den Einfluss der großen Kreisringe auf den Absorptionsgrad. Die Referenz stellt den Absorptionsgrad von Glaswolle ohne Kreisring dar. Ersichtlich ist, dass der Absorptionsgrad mit steigendem Umfang des Innenkreises ab etwa 200 Hz steigt und ab etwa 400 Hz über der Soll-Absorptionskurve liegt.

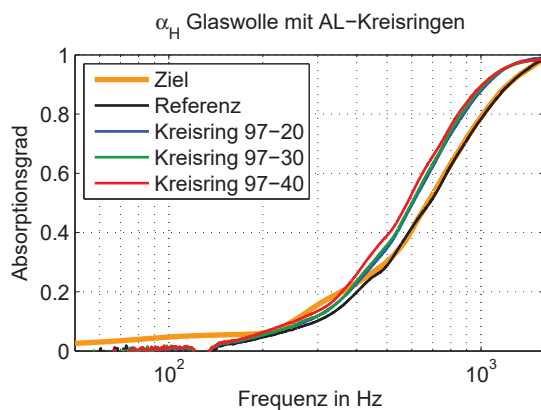


Abbildung 7: Einfluss von eingebetteten Kreisringen mit $D = 97$ mm aus Aluminiumfolie zwischen zwei Lagen pinker Glaswolle mit der Dichte von $5,44 \text{ kg/m}^3$.

Der Einfluss der kleinen Kreisringe bzw. der Kreise auf den Absorptionsgrad ist geringer, es ist allerdings ebenfalls eine Steigerung des Absorptionsgrads mit steigender Umfangslänge ab etwa 200 Hz festzustellen.

Zusammenfassung der Ergebnisse

In dieser Studie wurde untersucht, inwieweit eine dem Stand der Technik entsprechende Kabinendoppelwand eines Passagierflugzeuges bestehend aus Rumpfstruktur, Glaswolle und Kabinenwandverkleidung sich durch Einbetten zusätzlicher Schallminderungsmaßnahmen in die Glaswolle insbesondere im tieferen Frequenzbereich akustisch verbessern lässt. Für die Studie wurde dabei eine im Flugzeugbau übliche Glaswolle mit einer Dichte von $5,44 \text{ kg/m}^3$ als Referenz eingesetzt. Die Absorptionseigenschaften der in die Glaswolle eingebetteten Schallminderungsmaßnahmen wurden mit einem Impedanzrohr gemessen. Das daraus resultierende Schalldämmmaß der modifizierten Doppelwand wurde mit Hilfe von Transfermatrizen berechnet. Im Vergleich mit einer als Ziel

festgelegten Schalldämmmaßerhöhung von 3 dB, die sich auch durch Glaswolle mit der dreifachen Dichte erreichen lässt, ergibt sich: Eine eingedrehte Feder in die Glaswolle zeigte keine Verbesserung des Absorptionsspektrums. In die Glaswolle eingebettete Massen konnten das Absorptionsspektrum der Glaswolle nicht erhöhen. Zwischen die Glaswollpakete gelegte Aluminiumfolie und Kreisringe aus Aluminiumfolie sorgten ab 200 Hz mit steigender Frequenz für eine Steigerung des Absorptionsgrads. Das größte Potential der hier vorgestellten Konzepte zeigte das Einbetten von Helmholtzresonatoren. Durch Variation des Verhältnisses von Halslänge zu Volumen können die Helmholtzresonatoren auf bestimmte Frequenzen abgestimmt werden. Für den Einsatz in der Luftfahrt bleibt die Aufgabe einer geeigneten Materialauswahl bestehen, sodass das Zusatzgewicht der Resonatoren reduziert werden kann.

Danksagung

Diese Arbeit vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie als Teilprojekt von Flight-LAB (LuFo V-2) finanziert und von der Airbus Operations GmbH gefördert. Für die Unterstützung danken die Autoren.

Literatur

- [1] Shrivage, P.; Kiran, P.; Desa, K.; Raju, S.: Improvement of Low Frequency Sound Absorption of Acoustical Materials. Indian Acoustical Conference 2006, NSA-2006, New Delhi, India
- [2] Kidner, M.R.F.; Fuller, C.R.; Gardner, B.: Increase in transmission loss of single panels by addition of mass inclusions to a poro-elastic layer: Experimental investigation. Journal of Sound and Vibration 294 (2006), 466-472
- [3] Fuller, C.R.; Saux, T.-D.: Sound absorption using acoustic meta materials. inter.noise 2012, New York, USA
- [4] Groby, J.-P.; Lagarrigue, C.; Brouard, B.; Dazel, O.; Tournat, V.; Nennig, B.: Enhancing the absorption properties of acoustic porous plates by periodically embedding Helmholtz resonators. The Journal of the Acoustical Society of America 137 (2015), 273-280
- [5] Boutin, C.; Becot, F.-X.: Theory and experiments on poro-acoustics with inner resonators. Wave Motion 54(2015), 76-99
- [6] Lagarrigue, C.; Groby, J. P.; Tournat, V.; Dazel, O.; Umnova, O.: Absorption of sound by porous layers with embedded periodic arrays of resonant inclusions. The Journal of the Acoustical Society of America 134 (2013), 4670-4680
- [7] Doutres, O.; Atalla, N.; Osman, H.: Transfer matrix modeling and experimental validation of cellular porous material with resonant inclusions. The Journal of the Acoustical Society of America 137 (2015), 3502-3513