

# Akustische Eigenschaften einer Flugzeugkabinenwand mit integrierten Helmholtz-Resonatoren in der Glaswolle

Kimberley Bruhn<sup>1</sup>, Hannah Hoppen<sup>1</sup>, Wolfgang Gleine<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Berliner Tor 7a, 20099 Hamburg

Kimberley.Bruhn@haw-hamburg.de

## Einleitung

Gerade in der älteren Generation der Flugzeuge ist einer der größten Kostenfaktoren im Betrieb der Kraftstoffverbrauch. Um die Luftfahrt effizienter zu gestalten, gibt es zurzeit zwei Varianten. Ein höherer Schub kann durch eine erhöhte Auslassgeschwindigkeit der Triebwerke erzeugt werden. Dabei steigt allerdings der Energiebedarf quadratisch zur Geschwindigkeit. Wobei hingegen die Steigerung der Luftmenge einen linearen Zusammenhang zum Energiebedarf aufweist. Auf Grund dessen ist meist die Vergrößerung der Triebwerke die effizientere Lösung. Mit zunehmendem Durchmesser der Triebwerke steigt allerdings auch das Nebenstromverhältnis [1]. Durch ein hohes Nebenstromverhältnis der Triebwerke verändert sich deren Schallemission und damit das Schallspektrum in der Kabine, sodass ausgeprägte tieffrequente Töne mit hohen Schallpegeln im Vergleich zum Hintergrundgeräusch auftreten, die den Komfort für die Passagiere erheblich beeinträchtigen können. Die derzeitige Flugzeugwand (Abbildung 1), die aus einer Doppelwand mit innenliegender Glaswolle als Absorber besteht, stellt im tiefen Frequenzbereich, besonders im Bereich der Doppelwandresonanzfrequenz keine ausreichende Schallisolation dar.

Aus der Literatur ist bekannt, dass Helmholtz-Resonatoren oft als Absorber im tiefen Frequenzbereich eingesetzt werden [2]. In diesem Beitrag wird experimentell untersucht, ob durch in die Glaswollschicht eingebaute Helmholtz-Resonatoren, die Schallisolation einer konventionellen Flugzeugdoppelwand speziell im tiefen Frequenzbereich (360 Hz) maßgeblich verbessert werden kann. Dabei soll das Gewicht der Isolation mit eingebetteten Resonatoren 900 g/m<sup>2</sup> nicht überschreiten.

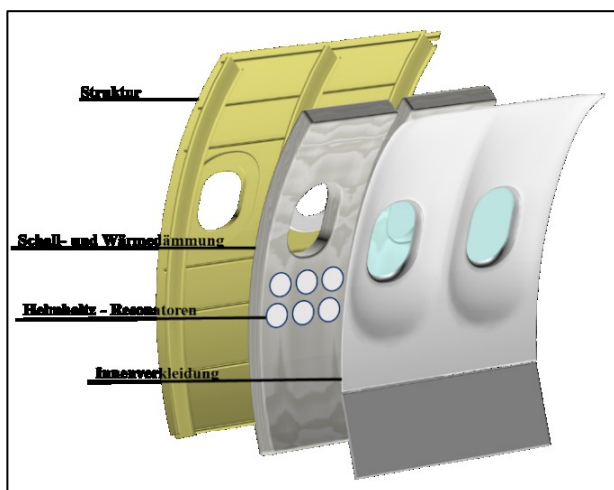


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Wandaufbaus im Flugzeug mit integrierten Helmholtz-Resonatoren

## Funktionsweise Helmholtz-Resonator

Der Ursprung der Funktionsweise eines Helmholtz-Resonators liegt in der Mechanik. Einfache Feder-Masse-Dämpfer-Systeme sind meist die Grundlage für schwingende Systeme. Ähnlich funktioniert auch der Helmholtz-Resonator. Das eingeschlossene Luftvolumen bildet die akustische Feder, die Öffnung die akustische Masse und der Strömungswiderstand (R) der Öffnung den Dämpfer (Abbildung 2).

Die Öffnung sowie das Luftvolumen bilden ein schwingendes System, sobald Druckwellen auf die Öffnung des Halses auftreffen. Diese Schwingungen können Töne erzeugen, die so gewählt werden können, dass eine Auslöschung durch Interferenz folgt. Weitere Dissipationseffekte treten durch Reibung im Hals und durch Verwirbelung an der Öffnung des Halses auf [3].

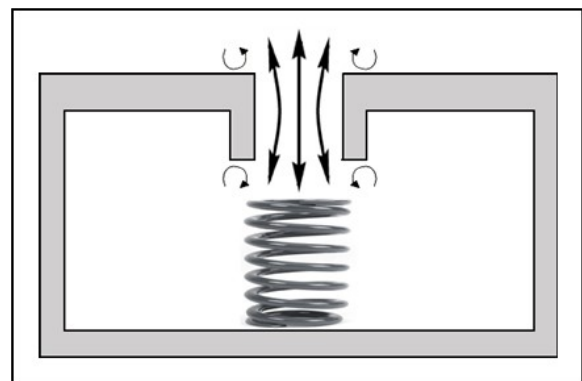


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Helmholtz-Resonators und deren Reibungsverluste.

## Dimensionierung

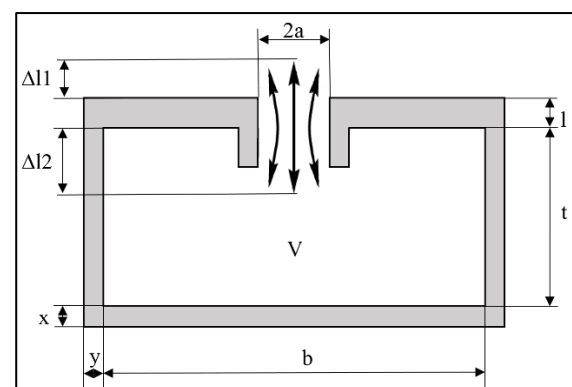


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Helmholtz-Resonators und deren Dimensionierungsgrößen.

Die maximale Absorption liegt bei der Resonanzfrequenz  $f_0$ , da dort die größte Reibung, bedingt durch das Schwingen der Luftmasse in den Löchern, entsteht. Die Resonanzfrequenz lässt sich mit den Größen aus Abbildung 3 und

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_a}{V(l + \Delta l_1 + \Delta l_2)}} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

mit der Mündungskorrektur

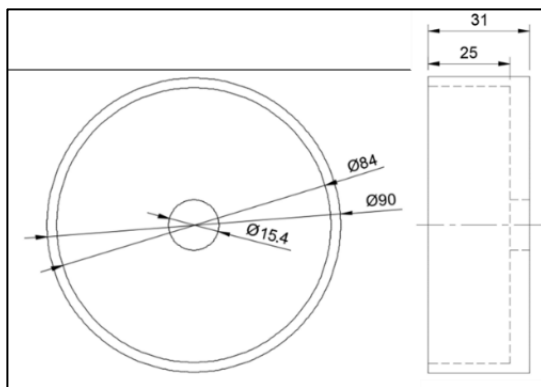
$$\Delta l_1 + \Delta l_2 \cong \frac{16a}{3\pi} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

und der Halsöffnungsfläche

$$S_a = \pi r^2 \quad [\text{m}^2] \quad (3)$$

berechnen. Um die Frequenz anzupassen, kann das Volumen, die Länge des Halses oder der Durchmesser des Loches variiert werden.

Für einen Resonator mit einer Resonanzfrequenz von 370 Hz ergeben sich folgende Dimensionen:



**Abbildung 4:** Technische Zeichnung eines Helmholtz-Resonators mit berechneten Maßen

Um unter den gegebenen Anforderungen einen möglichst hohen Volumenfüllgrad der Helmholtz-Resonatoren im Vergleich zur restlichen Kavität der Doppelwand zu erhalten, werden die Resonatoren mit einem Abstand von 2 cm zueinander jeweils versetzt angeordnet. Daraus resultiert auf einer 1m x 1,20 m großen Probe eine Anzahl von 93 Resonatoren.



**Abbildung 5:** Modifikation der herkömmlichen Glaswolle durch eingebettete Resonatoren

Die Glaswollschicht mit eingebetteten Resonatoren weist ein Gewicht von 560 g/m<sup>2</sup> auf. Dieser Wert liegt deutlich unter dem der Anforderung und ist lediglich 190 g/m<sup>2</sup> schwerer, als die Glaswollschicht allein.

## Schalldämmmaßmessung

### Aufbau und Messung

In einem Hallraum befinden sich ein Lautsprecher, der Schallwellen in Form weißen Rauschens emittiert. Ein Mikrophon, das an einem rotierenden Stativ befestigt ist, misst einen im Hallraum herrschenden mittleren Schalldruck. Der Hallraum ist durch ein 1 m x 1,2 m großes Fenster mit einem Freifeldraum verbunden.

Getestet wurden drei verschiedene Konfigurationen, die in den Abbildungen 6, 7 und 8 dargestellt sind. In jeder Konfiguration wurden die im Kapitel Dimensionierung beschriebenen Helmholtz-Resonatoren (HR) in eine Schicht Glaswolle eingebettet. Als Vergleichsmessung wurde die Glaswollschicht mit Resonatoren durch eine Schicht ohne Resonatoren und ohne Aussparungen für die Resonatoren ersetzt. Die Glaswollschicht wurde an einer Glasfaserverstärkten Kunststoffplatte (GFK-Platte) befestigt, die eine Flächenmasse von 2 kg/m<sup>2</sup> besitzt. Dies soll die Innenverkleidung der Flugzeugwand darstellen und entspricht dem Aufbau für die Messung der „Einzelwand“ (EW). Eine mitteldichte Holzfaserplatte (MDF-Platte), mit einer Flächenmasse von 5,5 kg/m<sup>2</sup> stellt die Struktur des Flugzeuges dar. Die „flugzeugähnliche Doppelwand“ (DW) besitzt in diesem Aufbau einen Abstand der beiden Platten zueinander von 13 cm sowie eine zweite Glaswollschicht. Um die Anzahl der Sitze im Flugzeug zu erhöhen, könnte in einigen Modellen zukünftig der Abstand der Doppelwände minimiert werden, sodass die zweite Glaswollisolation entfernt werden müsste. Der Versuchsaufbau „Doppelwand mit reduziertem Abstand“ (DW80) stellt diesen Fall der Flugzeugdoppelwand mit reduziertem Wandabstand von 8 cm dar.

Um das angefertigte 1 m x 1,20 m große Seitenwandfunktionsmuster akustisch zu charakterisieren, wurden dessen Elemente und auch das gesamte Wandmodell abschnittsweise in ein Transmissionsfenster des Akustiklabors eingebaut und die Schalldämmmaße ermittelt.

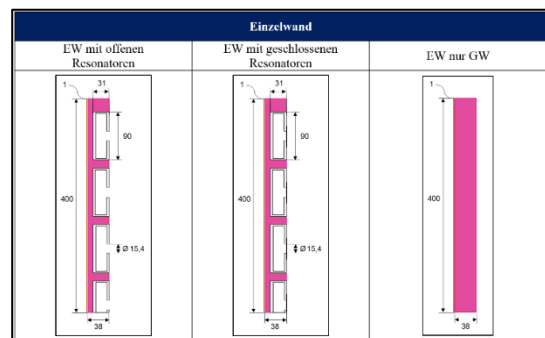
Es ergeben sich folgende Flächenmassen der Wände:

GFK- Platte mit in Glaswolle eingebettete HR: 2,56 kg/m<sup>2</sup>

GFK-Platte mit Glaswolle: 2,37 kg/m<sup>2</sup>

MDF-Platte mit Glaswolle: 5,87 kg/m<sup>2</sup>

### Einzelwand



**Abbildung 6:** Versuchsaufbau einer Einzelwand

### Flugzeugähnliche Doppelwand

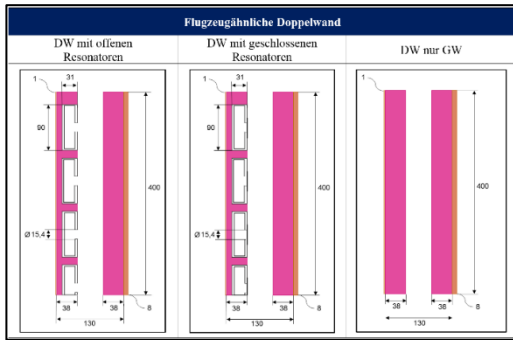


Abbildung 7: Versuchsaufbau einer flugzeugähnlichen Doppelwand

### Doppelwand mit reduziertem Abstand

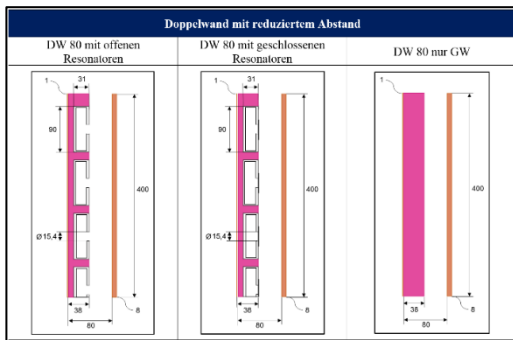


Abbildung 8: Versuchsaufbau einer Doppelwand mit reduziertem Abstand

In einem Hallraum emittierte ein Lautsprecher weißes Rauschen mit einem Schallpegel von ca. 110 dB. Im Freifeldraum wurde mittels einer Intensitätssonde die transmittierte Schallintensität gemessen, während das rotierende Mikrofon im Hallraum den mittleren Schalldruck misst, sodass gemäß DIN En ISO 15186-1:2003 das Schalldämmmaß berechnet werden kann.

### Messergebnisse

Die Abbildungen 9, 10 und 11 zeigen das Schalldämmmaß im Frequenzbereich von 100 – 600 Hz. Dabei wird das Schalldämmmaß eines Wandaufbaus mit Glaswolle ohne Resonatoren in rot und das eines mit in Glaswolle eingebetteten Helmholtz-Resonatoren in blau dargestellt. Die gelbe Linie stellt die Differenz zwischen bei beiden Messungen dar.

### Einzelwand

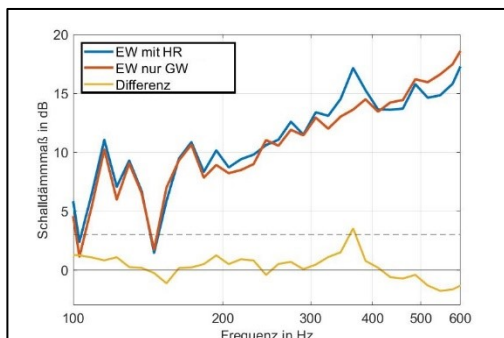


Abbildung 9: Schalldämmmaß einer Einzelwand

### Flugzeugähnliche Doppelwand

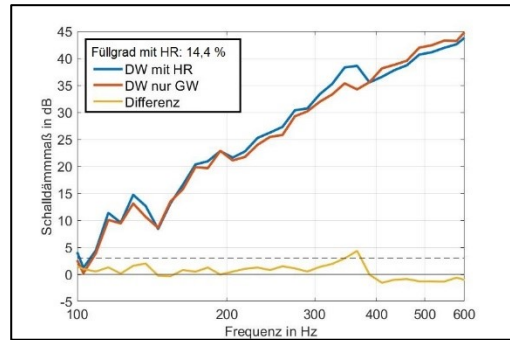


Abbildung 10: Schalldämmmaß einer flugzeugähnlichen Doppelwand

### Doppelwand mit reduziertem Abstand

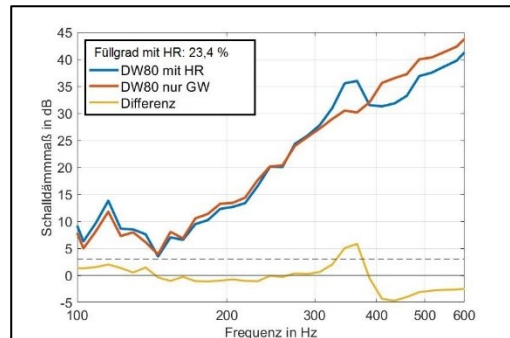


Abbildung 11: Schalldämmmaß einer Doppelwand mit reduziertem Abstand

### Auswertung und Vergleich

Alle Verläufe zeigen wie zu erwarten, anfangs ein modalgeprägtes Verhalten. Die Messkurven ohne Resonatoren zeigen ab 200 Hz einen Anstieg des Schalldämmmaßes von etwa 6 dB/Oktave für die Einzelwand und etwa 19 dB/Oktave für die Doppelwand mit reduziertem Abstand. Im Vergleich dieser Messkurven mit den zugehörigen Messungen mit integrierten HR, deren Resonanzfrequenz bei etwa 370 Hz liegen fällt auf, dass im Bereich ihrer wirksamen Bandbreite eine Schalldämmmaßerhöhung von bis zu 5 dB gegenüber den entsprechenden Referenzkurven in diesem Frequenzbereich auftritt, allerdings auch eine verringerte Schalldämmung im nachfolgend höheren Frequenzbereich. Für die Messungen der Doppelwände wurden die jeweiligen Tonraumresonanzfrequenzen, sowie die Füllgrade ( $\phi R$ ) der HR bestimmt (vgl. Abbildung 10 und 11). Die Tonraumresonanzfrequenz ergibt sich aus:

$$t_R = \frac{f_{HR}}{\sqrt{1-\phi R}} \quad [\text{Hz}] \quad (4)$$

$$f_{HR} = \text{Resonanzfrequenz des HR} [\text{Hz}] = 374,1 \text{ Hz} [4]$$

### Einzelwand

In Abbildung 9 ist ersichtlich, dass das Schalldämmmaß oberhalb des modalgeprägten Verhaltens in der Probe mit HR ein höheres Ergebnis in Bezug zum Schalldämmmaß der Probe ohne HR aufweist. Ein Grund hierfür könnte der Anstieg der Flächenmasse von zusätzlichen 190 g/m<sup>2</sup> sein. Da die zusätzliche Flächenmasse allerdings nur circa 8 % des Wandaufbaus beträgt, führt der Effekt der zusätzlichen Mas-

se theoretisch zu einer Schalldämmmaßerhöhung von 0,7 dB und ist daher nur gering. Das Schalldämmmaß oberhalb der Resonanzfrequenz in der Probe mit HR, ist trotz höherer Masse geringer. Grund hierfür ist der, durch die in Glaswolle eingebetteten Resonatoren, geringere Anteil an Glaswolle. Dieser Effekt ist, auf Grund der sehr guten Eigenschaften der Glaswolle im hohen Frequenzbereich und unzureichenden Eigenschaften im niedrigen Frequenzbereich, nur oberhalb der HR Resonanzfrequenz ersichtlich.

### Flugzeugähnliche Doppelwand

Auch das Schalldämmmaß der flugzeugähnlichen Doppelwand zeigt in Abbildung 10 ein ähnliches Verhalten. Erkennbar ist eine stetige Erhöhung des Schalldämmmaßes der DW mit Resonatoren im Vergleich zur DW mit einer Glaswollschicht ohne HR bis zu der Resonanzfrequenz. Diese Erhöhung ist erneut auf die zusätzliche Flächenmasse zurückzuführen. Die maximale Steigerung wird bei der Resonanzfrequenz von 370 Hz mit über 4 dB erreicht. Im Frequenzbereich  $> 370$  Hz liefert die Probe mit HR ein geringeres Schalldämmmaß, als die herkömmliche Isolation (nur GW) der Flugzeugdoppelwand. Die maximale Senkung liegt bei der Tonraumresonanzfrequenz von ungefähr 400 Hz und ist mit max. 1,5 dB sehr gering. In diesem Bereich ist die Senkung des Schalldämmmaßes, bedingt durch die Tonraumresonanz, größer, als die Steigerung des Schalldämmmaßes auf Grund der zusätzlichen Flächenmasse.

### Doppelwand mit reduziertem Abstand

Die Abbildung 11 zeigt den Unterschied des Schalldämmmaßes zwischen einer DW mit einem Wandabstand von 80 mm mit einer innenliegenden Lage Glaswolle und einer baugleichen DW, bei der die Glaswollschicht durch eine Glaswollschicht mit HR ersetzt worden ist. Auffallend ist, dass die Differenz des Schalldämmmaßes, von der Probe mit HR und der ohne HR, erstmals bereits vor der Resonanzfrequenz negativ ist. Der ausschlaggebende Grund hierfür ist der hohe Füllgrad der Resonatoren. Ein hoher Füllgrad der Resonatoren ist zwar vorteilhaft, um das Schalldämmmaß in der Resonanzfrequenz deutlich zu verbessern, andererseits verliert die Probe dadurch an Isolationsmaterial (hier Glaswolle). Im Resonanzbereich wird mit einer Differenz von über 5 dB eine deutliche Erhöhung erzielt. Nach dem Resonanzbereich entsteht für die Probe mit eingebauten HR im Vergleich zur herkömmlichen DW80 aus GW ein deutlicher Einbruch des Schalldämmmaßes. Dieser Einbruch ist mit -5 dB deutlich höher als bei den anderen Konfigurationen. Ausschlaggebend dafür ist zum einen die Tonraumresonanzfrequenz, welche bei 428 Hz liegt und zusätzlich der unterschiedliche Aufbau. Während der Wandaufbau der bisherigen Doppelwände auch eine doppelte Glaswollisolation beinhaltet, enthält durch den minimalen Abstand zwischen den Wänden, die DW 80 nur eine Glaswollschicht. Da Glaswolle sehr gute Schallabsorptionseigenschaften im hohen Frequenzbereich liefert, ist dies besonders im Bereich der Tonraumfrequenz ausschlaggebend. Dieser Einbruch der Differenz des Schalldämmmaßes ist in der Grafik deutlich zu erkennen.

### Vergleich

Werden die drei verschiedenen Aufbauten miteinander verglichen ist ersichtlich, dass sich das Schalldämmmaß in Doppelwänden deutlich von dem der Einzelwand abgrenzt. Auf Grund der erheblich besseren akustischen Eigenschaften sollten, wenn möglich, immer Doppelwände statt Einzelwände verwendet werden. Außerdem wird deutlich, dass je größer der Abstand der Doppelwände ist, desto höher ist das allgemeine Schalldämmmaß. Das liegt vor allem an der niedrigen Doppelwandresonanzfrequenz. Der Abstand der Doppelwände steht im Nenner zur Berechnung der Doppelwandresonanzfrequenz. Dadurch liefern Aufbauten mit großem Abstand Doppelwandresonanzfrequenzen im tieffrequenteren Bereich. Somit steigt bei Doppelwänden großer Wandabstände das Schalldämmmaß mit theoretisch 18 dB/Oktave bereits bei tieferen Frequenzen, als bei Wänden mit geringeren Abständen und die Schalldämmung erscheint oberhalb der Doppelwandresonanzfrequenz entsprechend höher. Entgegengesetzt hierzu verhält sich die Auswirkung des Helmholtz-Resonators auf das Schalldämmmaß. Je geringer der Abstand der Doppelwände, desto höher wird der Füllgrad der Resonatoren innerhalb der Doppelwand. Mit einem hohen Füllgrad wird ein maximaler Anstieg des Schalldämmmaßes im Resonanzfrequenzbereich erzielt. Daher bietet die DW80 die vergleichsweise größte Erhöhung des Schalldämmmaßes.

### Zusammenfassung und Ausblick

Es ist möglich mit leichtgewichtigen Helmholtz-Resonatoren das Schalldämmmaß im Bereich der Resonanzfrequenz maßgeblich zu erhöhen. Eine Erhöhung des Schalldämmmaßes von über 4 dB mit einer zusätzlichen Masse von circa 2,3 % des Doppelwandaufbau ist das Ergebnis. Dabei ist ein möglichst hoher Füllgrad für eine hohe Steigerung des Schalldämmmaßes ausschlaggebend, was aber hinsichtlich des verfügbaren Raums in der Doppelwand und zusätzlicher Wandmasse abgestimmt sein muss. Die zusätzliche Wandmasse muss gegenüber einem Aufbau mit reiner Glaswolle in einem vertretbaren Rahmen bleiben. Das Material muss insbesondere im Flugzeugbau noch sehr vielen anderen Anforderungen wie Wärmeisolierung, Feuerfestigkeit, einfache Einbauarbeiten etc. gerecht werden.

### Literatur

- [1] D. Prof. Kozulovic, „Vorlesung Flugzeugtriebwerke“, Hamburg, 2017.
- [2] B. Claude und X. B. Francois, „Theory and experiments on poro-acoustics with inner“, Elsevier, France, 2014.
- [3] P. Tang, Journal of Sound and Vibration - Theory of a generalizes Helmholtz resonator, Elsevier B. V., 1973.
- [4] H. L. Kuntz, Development and testing of cabin sidewall acoustic resonators for the reduction of cabin tone levels in, propfan-powered aircraft, NASA CR- 4388, 1991.