

# Optimierung eines Helmholtz-Resonators mit integriertem Biegebalken für Anwendungen in Doppelwänden

Hannah Hoppen<sup>1\*</sup>, Felix Langfeldt<sup>1</sup>, Wolfgang Gleine<sup>1</sup>, Otto von Estorff<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 20099 Hamburg, Deutschland

<sup>2</sup> Technische Universität Hamburg, 21073 Hamburg, Deutschland

\* Email: Hannah.Hoppen@haw-hamburg.de

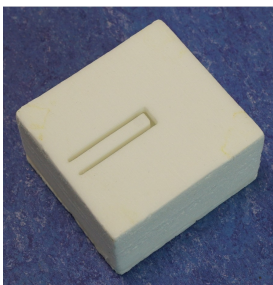
## Einleitung

Die derzeitige Entwicklung der Flugzeugtriebwerke tendiert zu größer werdenden Nebenstromverhältnissen, um effizienteres Fliegen zu ermöglichen. Einhergehend mit hohen Nebenstromverhältnissen treten ausgeprägte tief-frequente Töne mit hohen Schallpegeln im Vergleich zum Hintergrundrauschen im Schallspektrum in der Kabine auf. Um den Komfort der Passagiere zu verbessern, können Resonanzabsorber, z. B. Helmholtz-Resonatoren, in die Flugzeugseitenwand eingebaut werden.

In der Literatur werden viele Lösungen vorgestellt, wie Helmholtz-Resonatoren auf zwei oder mehr Frequenzen abgestimmt werden können, damit diese in einem breiteren Frequenzband wirksam sind [1, 2].

In diesem Beitrag wird ein Helmholtz-Resonator mit integriertem Biegebalken betrachtet [3]. Die Halsöffnung des Helmholtz-Resonators wird durch einen u-förmigen Schlitz realisiert, sodass innerhalb des Schlitzes ein Biegebalken stehen bleibt, der für einen zweiten Resonanz-Mechanismus sorgt, siehe Abbildung 1.

Obwohl Helmholtz-Resonatoren alleine nur in einem schmalen Frequenzband um ihre Resonanzfrequenz wirksam sind, können sie, eingebaut in eine Doppelwand, für eine breitbandige Verbesserung des Schalldämmmaßes sorgen [4]. Nachfolgend wird untersucht, ob ein in den Helmholtz-Resonator integrierter Biegebalken eine weitere Verbesserung des Schalldämmmaßes einer Doppelwand bewirken kann. Dazu wird die Auswirkung der Modifikation verschiedener Parameter hinsichtlich einer Optimierung für eine Anwendung im Flugzeug analysiert. Der Resonator soll so ausgelegt werden, dass in einem möglichst breiten Frequenzband die Schallisolation erhöht ist.



**Abbildung 1:** Helmholtz-Resonator mit integriertem Biegebalken.

## Analytisches Modell

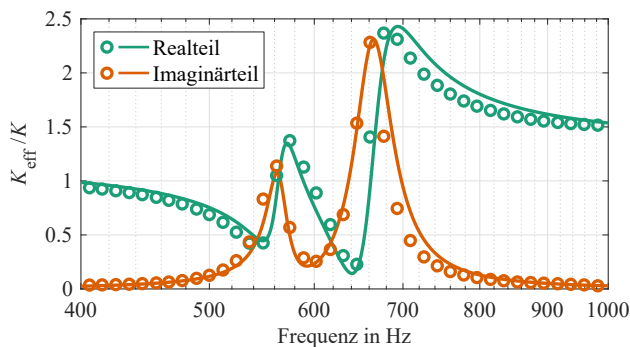
Die Modellierung einer Doppelwand mit Helmholtz-Resonatoren und integrierten Biegebalken erfolgt, ähnlich wie in [4] für Doppelwände mit konventionellen Helmholtz-Resonatoren, unter Berücksichtigung des effektiven Kompressionsmoduls für das Luftvolumen.

Der Kompressionsmodul für eine Luftschicht mit einem Helmholtz-Resonator und integriertem Biegebalken wird entsprechend den Bewegungsgleichungen aus [3] und der Herleitung in [4] bestimmt. Genau wie das Modell aus [3] beruht das Modell des effektiven Kompressionsmoduls auf den Resonanzfrequenzen des Helmholtz-Resonators  $f_{HR}$ , des Biegebalkens im Vakuum  $f_{CL}$  und des Biegebalkens mit zusätzlicher Steifigkeit durch das Luftvolumen im Resonator  $f_{CL,V}$ . Der effektive Kompressionsmodul  $K_{eff}$  lässt sich berechnen zu

$$K_{eff} = K \left\{ 1 - \phi_{ext} + \phi_R \cdot \left[ \frac{f_{CL,V}^2 - f^2}{f_{CL,V}^2 - f_{CL}^2} - 1 - \frac{f^2}{f_{HR}^2} \right] \cdot \left[ \frac{f_{CL,V}^2 - f^2}{f_{CL,V}^2 - f_{CL}^2} \left( 1 - \frac{f^2}{f_{HR}^2} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}. \quad (1)$$

Darin sind  $K$  der Kompressionsmodul der umgebenden Luft,  $\phi_R = V_R/V_0$  der Volumenfüllgrad des Resonatorluftvolumens  $V_R$  bezogen auf das Luftvolumen  $V_0$ , in das der Resonator eingebettet ist, und  $\phi_{ext} = (V_R + V_W)/V_0$  der Volumenfüllgrad des gesamten Resonators und dem Volumen seiner Wände  $V_W$ . Eine mögliche Dämpfung wird durch komplexe Resonanzfrequenzen berücksichtigt.

Gleichung 1 wurde mithilfe von Impedanzrohrmessungen mit der 4-Mikrofonmethode nach der ASTM E2611-09 validiert. Vermessen wurde der in Abbildung 1 dargestellte Resonator. Der genaue Aufbau und die Dimensionen sind in [3] aufgeführt. Der Resonator besitzt folgende Resonanzfrequenzen:  $f_{HR} = 583(1 + 0,05i)$  Hz,  $f_{CL} = 585(1 + 0,013i)$  Hz und  $f_{CL,V} = 602(1 + 0,013i)$  Hz. Die Dämpfung wurde über die Imaginärteile der Resonanzfrequenzen berücksichtigt und aus den Messergebnissen abgeschätzt. Durch den Messaufbau ergeben sich folgende Füllgrade:  $\phi_R = 0,15$ ,  $\phi_{ext} = 0,27$ . Die beiden Resonanzfrequenzen des gekoppelten Systems aus Helmholtz-Resonator und Biegebalken sind  $f_1 = 545$  Hz und  $f_2 = 640$  Hz (s. Modell zur Berechnung in [3]). Der Vergleich zwischen dem experimentell und analytisch ermittelten effektiven komplexen Kompressionsmodul  $K_{eff}$ , normiert mit dem Kompressionsmodul der umgebenden Luft  $K = \rho_0 c_0^2$ , ist in Abbildung 2 gezeigt.



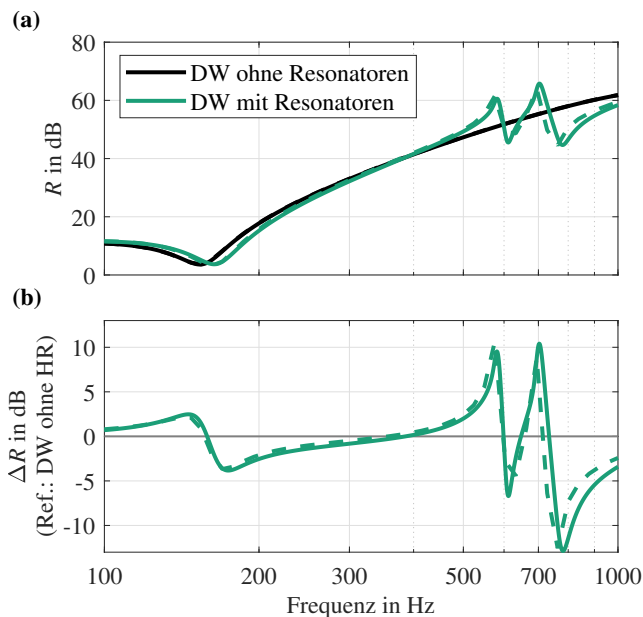
**Abbildung 2:** Vergleich der experimentellen und analytischen Ergebnisse für den komplexen effektiven Kompressionsmodul: — analytisches Modell; o Experiment

Abbildung 2 zeigt, dass die experimentellen und analytischen Ergebnisse sehr gut übereinstimmen, womit das Modell für den effektiven Kompressionsmodul validiert ist. Für tiefe Frequenzen entspricht der Realteil des effektiven Kompressionsmoduls dem Kompressionsmodul der umgebenden Luft ( $K_{\text{eff}}/K \approx 1$ ). Während der Imaginärteil des Kompressionsmoduls durch erhöhte Reibung im Hals im Bereich der Resonanzfrequenzen sehr hoch wird, wird der Realteil minimal und dementsprechend wird eine Fluidschicht mit Resonator sehr weich. Für höhere Frequenzen ist der Resonator von dem umgebenden Fluid entkoppelt und sorgt für eine Verkleinerung des Volumens und damit für einen höheren Kompressionsmodul und nähert sich einem Wert von  $K_{\text{eff}} = K/\sqrt{1 - \phi_{\text{ext}}}$  an.

Gleichung 1 wird verwendet, um das Schalldämmmaß einer flugzeugähnlichen Doppelwand mit integrierten Resonatoren zu berechnen. Die in diesem Beitrag betrachtete Doppelwand ist einer Flugzeugseitenwand nachempfunden, mit einem Wandabstand von 100 mm, sowie den Wandflächenmassen von  $5,5 \text{ kg/m}^2$  (Rumpf) und  $1,6 \text{ kg/m}^2$  (Kabinenverkleidung). Eine Isolationsschicht innerhalb der Doppelwand wird für die nachfolgenden grundsätzlichen Untersuchungen nicht berücksichtigt. Ein baugleicher Resonator aus [3] wird flächendeckend auf der Kabinenwandverkleidung im Inneren der Doppelwand angeordnet. Durch den Einbau sind die Resonatorwände steifer und sorgen für leicht höhere Resonanzfrequenzen von  $f_{\text{HR}} = 632 \text{ Hz}$ ,  $f_{\text{CL}} = 640 \text{ Hz}$  und  $f_{\text{CL,V}} = 651 \text{ Hz}$ . Die Dämpfungswerte bleiben unverändert. Die Volumenfüllgrade ergeben sich zu  $\phi_{\text{R}} = 0,2$  und  $\phi_{\text{ext}} = 0,4$ .

Zur Bestimmung des Schalldämmmaßes einer Doppelwand mit und ohne Resonatoren wird die Transfermatrixmethode verwendet [5]. Die innenliegende Luftschicht mit Resonatoren wird als äquivalentes Fluid mit dem effektiven Kompressionsmodul aus Gleichung 1 berechnet. Das Modell für das Schalldämmmaß wird durch numerische Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode verifiziert. Die analytischen Ergebnisse, durchgezogene Linien, und numerischen Ergebnisse, gestrichelte Linien sind in Abbildung 3(a) für das Schalldämmmaß  $R$  und 3(b) für das Einfügedämmmaß  $\Delta R$  dargestellt.

Das Einfügedämmmaß stellt die Differenz zwischen dem



**Abbildung 3:** Vergleich der analytischen und numerischen Ergebnisse für das Schalldämmmaß und das Einfügedämmmaß für eine Doppelwand mit Helmholtz-Resonatoren mit integriertem Biegebalken gegenüber einer massenäquivalenten Doppelwand. (a) Schalldämmmaß; (b) Einfügedämmmaß: — analytisches Modell; - - numerische Simulation

Schalldämmmaß des Doppelwandaufbaus mit Resonatoren und dem des massengleichen Doppelwandaufbaus ohne Resonatoren dar. Die in Abbildung 3 gezeigten Daten zeigen generell eine gute Übereinstimmung zwischen den analytischen und numerischen Ergebnissen und verifizieren dadurch das Modell. Ersichtlich ist eine Vergrößerung des Schalldämmmaßes in zwei Frequenzbändern, aber auch eine Verschlechterung zwischen den Resonanzfrequenzen und im Frequenzbereich hinter der zweiten Resonanzfrequenz. Dieses Verhalten lässt sich direkt am effektiven Kompressionsmodul erklären, der für ein Luftvolumen mit integriertem Resonator bei den Resonanzfrequenzen sehr klein wird und für eine Steifigkeitsreduktion der Luftschicht in der Doppelwand sorgt. Dadurch verschiebt sich die Schalldämmmaßkurve der Doppelwand mit innenliegenden Resonatoren verglichen mit der leeren Doppelwand zu niedrigeren Frequenzen, siehe [4]. Im höheren Frequenzbereich jedoch ist der Resonator von dem umgebenden Luftvolumen entkoppelt und durch die geringere Luftschichtdicke wird der Kompressionsmodul höher und sorgt für ein geringeres Schalldämmmaß.

## Zielfunktion

Der Helmholtz-Resonator mit integriertem Biegebalken soll so optimiert werden, dass das Einfügedämmmaß einer Doppelwand mit innenliegendem Resonator in einem möglichst breiten zusammenhängenden Frequenzbereich erhöht ist. Dazu wird die relative Bandbreite in dem Intervall bestimmt, in dem das Einfügedämmmaß positiv ist. Mit der unteren Frequenz  $f_{\text{u}}$  und oberen Frequenz  $f_{\text{o}}$

berechnet sich die relative Bandbreite zu

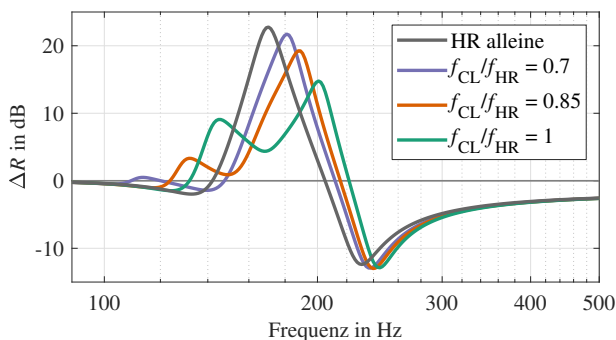
$$B = \frac{f_o - f_u}{\sqrt{f_o f_u}}. \quad (2)$$

Treten mehrere Frequenzintervalle mit positivem Einfügedämmmaß auf, wird nur das größte Intervall berücksichtigt.

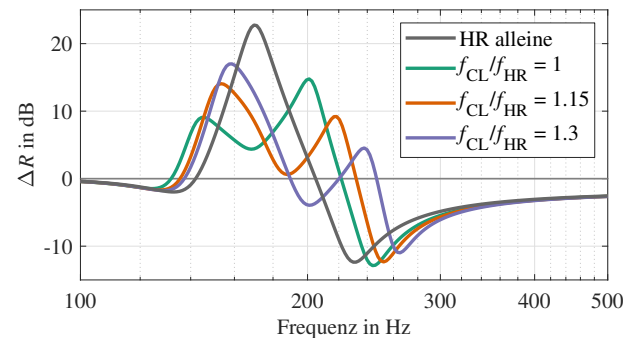
## Parameterstudie

Im Folgenden wird exemplarisch eine analytische Parameterstudie mithilfe des Transfermatrixmodells durchgeführt. Der Doppelwandaufbau entspricht dem oben beschriebenen Aufbau. Die Resonanzfrequenz des Helmholtz-Resonators  $f_{HR}$  ist in allen Fällen auf die Doppelwandresonanzfrequenz  $f_{DW}$  abgestimmt. Die Resonanzfrequenz des Biegebalkens im Vakuum  $f_{CL}$  wird im ersten Fall auf kleinere Resonanzfrequenzen abgestimmt ( $f_{CL} \leq f_{HR}$ ) und die Resonanzfrequenz des Biegebalkens mit erhöhter Steifigkeit durch das Luftvolumen beträgt  $f_{CL,V} = f_{CL} + 10$  Hz. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein zweites Maximum im Einfügedämmmaß durch den integrierten Biegebalken entsteht. Das Maximum nähert sich von 0 Hz und seine Frequenz und Amplitude steigen, wenn sich die Resonanzfrequenz des Biegebalkens der des Helmholtz-Resonators nähert. Gleichzeitig verschiebt sich das ursprüngliche Maximum zu höheren Frequenzen und wird kleiner. Durch das zweite Maximum verbreitert sich das Einfügedämmmaß.

Im zweiten Fall, siehe Abbildung 5, wird der Biegebalken auf höhere Frequenzen als die des Helmholtz-Resonators abgestimmt ( $f_{CL} \geq f_{HR}$ ). Es wird deutlich, dass durch eine weitere Verschiebung der Resonanzfrequenz des Biegebalkens zu höheren Frequenzen die Frequenzen der beiden Maxima wieder weiter auseinanderstreben. Dadurch kann die Schalldämmmaßverbesserung in einem breiteren Frequenzbereich auftreten. Allerdings ist in Abbildung 4 und 5 ersichtlich, dass sich zwischen den beiden Maxima ein Minimum ausbildet. Wenn dieses Minimum im negativen Bereich des Einfügedämmmaßes liegt, wird der Frequenzbereich, in dem das Einfügedämmmaß erhöht ist, in zwei Abschnitte geteilt. Gemäß der Zielfunktion wird für die Optimierung nur der größere Frequenzbe-



**Abbildung 4:** Einfluss des Resonanzfrequenzverhältnisses von Biegebalken  $f_{CL}$  zu Helmholtz-Resonator  $f_{HR}$  auf das Einfügedämmmaß bezogen auf eine Doppelwand ohne Resonatoren für  $f_{CL}/f_{HR} \leq 1$ .

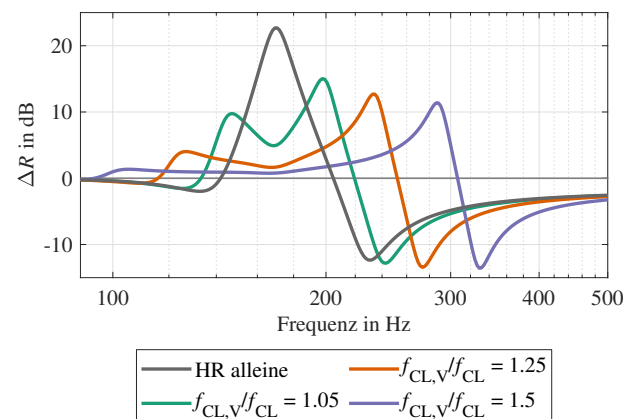


**Abbildung 5:** Einfluss des Resonanzfrequenzverhältnisses von Biegebalken  $f_{CL}$  zu Helmholtz-Resonator  $f_{HR}$  auf das Einfügedämmmaß bezogen auf eine Doppelwand ohne Resonatoren für  $f_{CL}/f_{HR} \geq 1$ .

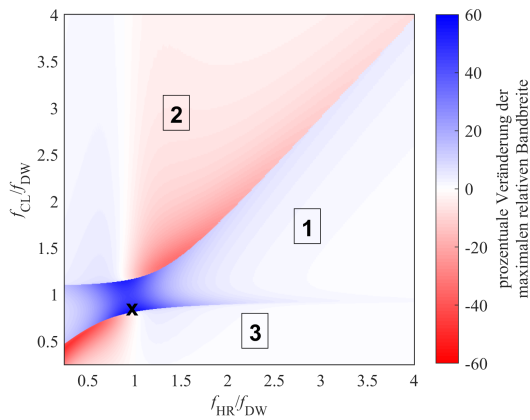
reich berücksichtigt, sodass die beiden Maxima nicht beliebig weit auseinander liegen können.

Im dritten Fall wird der Parameter  $f_{CL,V}$  variiert, wobei die Resonanzfrequenzen  $f_{HR}$  und  $f_{CL}$  beide auf die Doppelwandresonanzfrequenz  $f_{DW}$  abgestimmt sind. Der Einfluss des Verhältnisses von  $f_{CL,V}$  zu  $f_{CL}$  ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Vergrößerung des Verhältnisses  $f_{CL,V}/f_{CL}$  sorgt dafür, dass sich die beiden Maxima voneinander entfernen, verbunden mit einer Vergrößerung der Bandbreite bei gleichzeitiger Verringerung der Einfügedämmmaßwerte.

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Werte  $f_{HR}$  und  $f_{CL}$  auf die Bandbreite, exemplarisch für den Füllgrad  $\phi = 0,2$ , genauer untersucht. Für andere Füllgrade ergeben sich analog zu [4] andere Verhältnisse für die Bandbreite des Helmholtz-Resonators. Das Ergebnis ist in Abbildung 7 dargestellt. Gezeigt wird die prozentuale Veränderung der relativen Bandbreite einer Doppelwand mit Helmholtz-Resonatoren mit integrierten Biegebalken  $B_{CL}$  bezogen auf die einer Doppelwand mit Helmholtz-Resonatoren ohne Biegebalken  $B_{HR}$ . Eine Vergrößerung der Bandbreite mithilfe des Biegebalken



**Abbildung 6:** Einfluss der Resonanzfrequenz des Biegebalkens mit erhöhter Steifigkeit durch das Luftvolumen im Resonator  $f_{CL,V}$  auf das Einfügedämmmaß bezogen auf eine massenäquivalente Doppelwand ohne Resonatoren ( $f_{HR} = f_{CL} = f_{DW}$ ).



**Abbildung 7:** Parameterstudie der relativen Bandbreitenveränderung von dem Einfügedämmmaß eines Doppelwandaufbaus mit Helmholtz-Resonator und integriertem Biegebalken bezogen auf einen Doppelwandaufbau mit baugleichem Helmholtz-Resonator ohne Biegebalken für einen Füllgrad von 0,2.

kens ist durch den blauen Bereich gekennzeichnet. Der rote Bereich beschreibt eine Verringerung der Bandbreite. Auffallend ist die Aufteilung der Bandbreitenveränderung in drei Bereiche. Der Bereich **1** in der Mitte zeigt eine deutliche Vergrößerung von fast 60%, wenn sowohl der Biegebalken als auch der Helmholtz-Resonator nahezu auf die Doppelwandresonanzfrequenz abgestimmt sind. Für höhere Resonanzfrequenzen des Helmholtz-Resonators liegen in diesem Bereich Bandbreitenvergrößerungen von 0 bis ca. 15% vor, wenn  $f_{CL} < f_{HR}$  ist. Für große Verhältnisse von  $f_{HR}/f_{DW}$  ist die Bandbreite des Helmholtz-Resonators allein schon sehr groß, sodass ein zusätzlich integrierter Biegebalken nur einen kleinen Effekt auf die Bandbreite zeigt. Im Bereich **2** ist links für  $f_{HR} < f_{DW}$  und  $f_{CL} > f_{DW}$  ein Bereich mit einer kleinen Erhöhung der Bandbreite bis zu 10% zu erkennen. Für höhere Resonanzfrequenzen des Helmholtz-Resonators tritt durch einen zusätzlich integrierten Biegebalken eine Verringerung der Bandbreite gegenüber dem Helmholtz-Resonator alleine auf. In diesem Bereich liegt das Minimum zwischen den beiden Maxima im negativen Bereich des Einfügedämmmaßes, sodass gemäß der Zielfunktion nur der breitere Frequenzbereich für die Berechnung der Bandbreite berücksichtigt wird und deshalb die Bandbreite verglichen mit dem allein wirkenden Helmholtz-Resonator verkleinert wird. Zwischen diesen beiden Bereichen befindet sich für ungefähr  $f_{HR} = f_{DW}$  ein schmaler weißer Streifen, in dem der Biegebalken keinen Effekt zeigt und sich die Bandbreite nicht verändert. Im Bereich **3** tritt eine Verringerung für kleine Resonanzfrequenzen des Biegebalkens und des Helmholtz-Resonators bezogen auf die Doppelwandresonanzfrequenz auf. Rechts davon, für  $f_{HR} > f_{DW}$  hat ein Biegebalken, der auf kleinere Frequenzen als die Doppelwand abgestimmt ist, nahezu keinen Effekt.

Festzuhalten ist, dass ein Resonator für diesen Doppelwandaufbau im besten Fall, sowohl für den Biegebalken als auch für den Helmholtz-Resonator, auf Resonanzfrequenzen etwas kleiner als die Doppelwandresonanzfre-

quenz abgestimmt wird ( $f_{CL}/f_{DW} = 0,81$ ,  $f_{HR}/f_{DW} = 0,98$ ). Diese Stelle ist in Abbildung 7 durch ein Kreuz gekennzeichnet. Die maximale Bandbreitenvergrößerung von ungefähr 60% kann durch geeignete Abstimmung bis zu einem Einfügedämmmaß von 4 dB für einen zusammenhängenden Frequenzbereich erreicht werden. Das Minimum zwischen den beiden Maxima sorgt bei höheren Einfügedämmmaßen für eine Unterbrechung des Frequenzbereiches. Für eine andere Zielfunktion, wenn die Bandbreite zum Beispiel als Summe der einzelnen Frequenzbereiche berechnet wird, ergeben sich auch für höhere Einfügedämmmaße vergrößerte Bandbreiten.

## Zusammenfassung

Es wurde ein Modell für den effektiven Kompressionsmodul einer Luftschicht mit Helmholtz-Resonator mit integriertem Biegebalken experimentell validiert. Mithilfe dieses Modells wurde das Schalldämmmaß eines Doppelwandaufbaus, ähnlich einer Flugzeugseitenwand, mit innenliegendem Resonator berechnet. Die analytischen Schalldämmmaßeergebnisse wurden numerisch verifiziert. Mit dem Modell wurde eine Parameterstudie für einen Füllgrad von 0,2 durchgeführt, um zu ermitteln, durch welche Parameter die relative Bandbreite der Schalldämmmaßverbesserung maximal wird. Eine deutliche Bandbreitenvergrößerung von fast 60% kann bis zu einer Schalldämmmaßerhöhung von 4 dB durch einen zusätzlich integrierten Biegebalken erreicht werden, wenn die Resonanzfrequenz des Biegebalkens und des Helmholtz-Resonators ungefähr der Doppelwandresonanzfrequenz entsprechen.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie als Teilprojekt von Flight-LAB (LuFo V-2) finanziert.

## Literatur

- [1] Tang, S. K., Ng, C. H., Lam, E.Y.L.: Experimental investigation of the sound absorption performance of compartmented Helmholtz resonators. *Applied Acoustics* 73 (2012), 969-976
- [2] Dupont, T., Leclaire, P., Panneton, R. and Umnova, O.: A microstructure material design for low frequency sound absorption. *Applied Acoustics* 136 (2018), 86-93
- [3] Hoppen, H., Langfeldt, F., Gleine, W., von Estorff, O.: Gekoppelter Helmholtz-Resonator mit schwingfähigem mechanischem Resonator. Tagungsband DAGA 2019 - 45. Jahrestagung für Akustik, 433-463
- [4] Langfeldt, F., Hoppen, H., Gleine, W.: Broadband sound transmission loss improvement of double walls with Helmholtz resonators. *Journal of Sound and Vibration* 467C (2020) 115309.
- [5] Allard, J., Atalla, N.: *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*. First Edition. Wiley, New York, 2009