

Dämpfungsvergleich eines porösen Liners im direkten und streifenden Schalleinfall

Fleming Kohlenberg¹, Larisa Grizewski¹, Julia Genßler¹, Ralf Burgmayer¹,
Maximilian Behn¹, Karsten Knobloch¹

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Triebwerksakustik, 10623 Berlin, Email: fleming.kohlenberg@dlr.de

Einleitung

Poröse Materialien haben eine innere Struktur mit viel Oberfläche und Wandreibung, was sie zu effektiven Schallabsorbern sowohl in der Raumakustik als auch in Strömungskanälen macht. Um Schallabsorber zu charakterisieren sind je nach Anwendungszweck verschiedene Größen gebräuchlich. Der Absorptionskoeffizient ist definiert als Verhältnis zwischen nicht reflektierter und einfallender Schalleistung an einer Oberfläche. Dieser wird üblicherweise im direkten Schalleinfall im Kundt'schen Rohr (siehe DIN EN ISO-10534-2, ASTM E1050) oder für ein diffuses Schallfeld im Hallraum (siehe DIN EN ISO 354) bestimmt. Zur Beschreibung der akustischen Übertragungseigenschaften einer Wandauskleidung im streifenden Schalleinfall (Liner) kann das Einfügedämmmaß (Schalleistungspegeldifferenz mit und ohne Auskleidung), die Durchgangsdämpfung (Schalleistungspegeldifferenz vor und hinter der Auskleidung) oder die Dissipation (Schalleistung, die im ausgekleideten Kanal weder reflektiert noch transmittiert wird) verwendet werden. Für eine Vorauslegung eines Schalldämpferkonzepts wird oft der relativ einfach bestimmbare Absorptionskoeffizient verwendet. Um diese Übertragbarkeit zu prüfen, werden die Dämpfungseigenschaften eines porösen Materials (Basotect[®] W) in drei verschiedenen Prüfständen der Abteilung Triebwerksakustik des DLR in Berlin bestimmt und verglichen.

Experimentelle Prüfstände Normal Incidence Tube (D-NIT)

Eine gängige und verhältnismäßig einfache Methode um die Impedanz ohne Hintergrundströmung und den Absorptionskoeffizienten im direkten Schalleinfall zu bestimmen ist das Kundt'sche Rohr. Das von der Abteilung Triebwerksakustik im DLR verwendete Kundt'sche Rohr D-NIT ist in Abb. 1 dargestellt. Im Prüfstand regen ein oder mehrere Lautsprecher ebene Wellen an, die über einen quadratischen Kanal ($A = 35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$) zu einer Probe geleitet werden. Der Messbereich (200 Hz – 5000 Hz) ist zu tieferen Frequenzen durch die Lautsprecheranregung und zu oberen Frequenzen durch die Cut-On-Frequenz höherer Moden beschränkt. In der Kanalwand sind drei Mikrofone an den Positionen x_1, x_2, x_3 eingebaut um das akustische Feld p' mithilfe einer Ausgleichsrechnung in hin- und rücklaufende Wellen \hat{p}^+, \hat{p}^- zu zerlegen:

$$\begin{bmatrix} e^{-ik^+x_1} & e^{ik^-x_1} \\ e^{-ik^+x_2} & e^{ik^-x_2} \\ e^{-ik^+x_3} & e^{ik^-x_3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{p}^+ \\ \hat{p}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p'(x_1) \\ p'(x_2) \\ p'(x_3) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

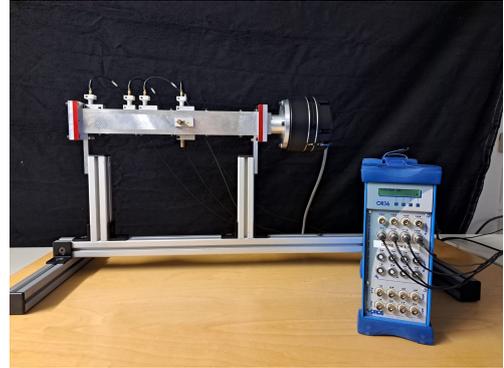


Abbildung 1: Foto des Kundt'schen Rohres D-NIT zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten

Die Verwendung von drei statt zwei Mikrofonen erlaubt eine Fehlerbetrachtung der Mikrofonsignale im eingebauten Zustand. Ein weiteres zusätzliches Mikrofon in der Nähe der Probe misst den Totalschalldruck, welcher insbesondere für perforierte Platten relevant ist. Aus dem Verhältnis der komplexen Amplituden der hin- und rücklaufenden akustischen Welle kann der komplexwertige Reflexionsfaktor

$$r = \frac{\hat{p}^-}{\hat{p}^+} \quad (2)$$

bestimmt werden. Hieraus lässt sich die normierte spezifische Impedanz ζ und der Absorptionskoeffizient α der Probe bestimmen

$$\zeta = \frac{1+r}{1-r}, \quad \alpha = 1 - |r|^2. \quad (3)$$

Duct Acoustic Test Rig (DUCT-R)

Um die Dämpfungseigenschaften eines Liners im streifenden Schalleinfall mit Hintergrundströmung zu untersuchen kann der Strömungsakustikprüfstand DUCT-R verwendet werden, dessen schematischer Aufbau in Abb. 2 dargestellt ist. Der DUCT-R hat eine Querschnittsfläche von

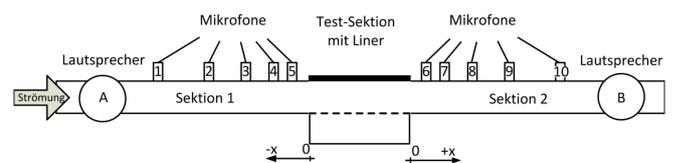


Abbildung 2: Schematischer Messaufbau DUCT-R

60 mm × 80 mm, wodurch sich eine Cut-On Frequenz von 2100 Hz für die erste höhere Kanalmode in der schallharten Sektion ergibt. Durch eine abwechselnde Anregung

über die beiden Lautsprecher A und B zwischen reflexionsarmen Abschlüssen kann mithilfe der wandseitigen Mikrofone das Schallfeld analog zu Gleichung (1) vor und hinter der Testsektion in hin- und rücklaufende Schallwellen zerlegt werden. Weitere Informationen zum Prüfstand können beispielsweise in [1] nachgelesen werden. Aus den Mikrofondaten lässt sich die Streumatrix \mathbf{S}

$$\begin{bmatrix} \hat{p}_{1A}^- & \hat{p}_{1B}^- \\ \hat{p}_{2A}^+ & \hat{p}_{2B}^+ \end{bmatrix} \times \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{1A}^+ & \hat{p}_{1B}^+ \\ \hat{p}_{2A}^- & \hat{p}_{2B}^- \end{bmatrix} \quad (4)$$

und hieraus die energetischen Streukoeffizienten (Reflexion R , Transmission T , Dissipation Δ) und somit die akustischen Eigenschaften des Liners bei linearer (<110 dB) oder nicht-linearer (für typische Liner >130 dB) Schallanregung mit und ohne Hintergrundströmung (Machzahl < 0.3) bestimmen

$$\Delta^\pm = 1 - (R^\pm + T^\pm). \quad (5)$$

Mode Synthesizer (MoSy)

In großen Strömungskämen wie Flugzeugtriebwerken ist nicht nur die ebene Welle (Grundmode) im relevanten Frequenzbereich energietragend, sondern insbesondere auch höhere akustische Kanalmoden. Um die Dämpfungswirkung des Liners für diese Moden zu untersuchen kann der Mode Synthesizer (MoSy) verwendet werden. Der Prüfstand besteht aus einem Ringkanal (innerer Durchmesser 330 mm, äußerer Durchmesser 500 mm, somit Kanalhöhe 85 mm) und erlaubt die gezielte Anregung von einzelnen Moden (azimutale Modenordnungen -8 bis $+8$, radiale Moden 0 und 1) mithilfe von zwei ringförmigen Lautsprecherarrays, bestehend aus 32 Lautsprechern. Das akustische Wellenfeld vor und hinter dem Liner wird mithilfe einer Radialmodenanalyse aus den 98 Mikrofondaten pro Sektion zerlegt. Aus den Modenamplituden können anschließend analog zum ebenen Fall Streukoeffizienten, Einfügedämmmaß und Durchgangsdämpfung pro Modenordnung berechnet werden. Weitere Informationen zum Prüfstand sind beispielsweise in [2] zu finden. Das Verfahren zur gezielten Anregung dominanter Moden ist in [3] nachlesbar.

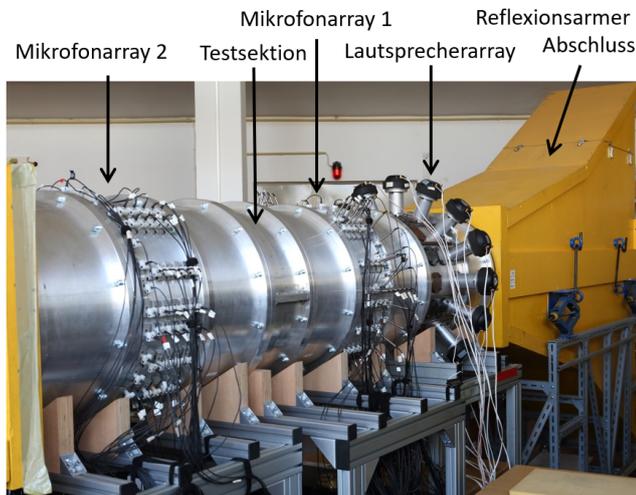
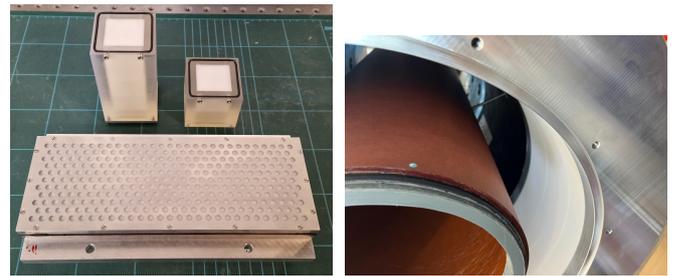


Abbildung 3: Messaufbau MoSy

Proben für die verschiedenen Prüfstände

Für die experimentellen Untersuchungen wurden insgesamt vier verschiedene Proben gefertigt, die in Abb. 4 dargestellt sind. Alle Proben haben gemeinsam, dass das innere Volumen mit Basotect® W ausgekleidet ist. Für den direkten Schalleinfall wurden zwei Probenhalter mit 50 mm und 100 mm Tiefe per 3D-Druck aus Epoxidharz gefertigt. Für den DUCT-R wurde eine 200 mm lange und 50 mm tiefe Probe in einem Aluminiumgehäuse untersucht. Für eine Anbindung an den Strömungskanal wurde als Trennung zum Kanal ein akustisch durchlässiges Lochblech (Lochflächenanteil 30 %) angebaut. Der Liner für den MoSy (Abb. 4b) ist ein 200 mm langer und 100 mm tiefer, weder axial noch azimuthal segmentierter Vollring aus porösem Material ohne Lochblech.



(a) Proben für D-NIT (oben) (b) Probe für MoSy (unsegmentierter Vollring und DUCT-R (unten))

Abbildung 4: Proben zur Untersuchung des porösen Materials in den verschiedenen Prüfständen

Ergebnisse

In Abb. 5 ist der gemessene Absorptionskoeffizient im direkten Schalleinfall für die 50 mm und 100 mm tiefe Probe dargestellt. Zusätzlich ist der Verlauf mithilfe einer empirisch modellierten Impedanz (Delaney-Bazley Modells nach [4]) vorhergesagten Absorption dargestellt. Bei der Simulation wurde eine Porosität von nahe 100 % und ein Strömungswiderstand von $\sigma = 10\,934\text{ Nm}^{-4}\text{ s}$ nach [5] angenommen. Neben einer grundsätzlich guten

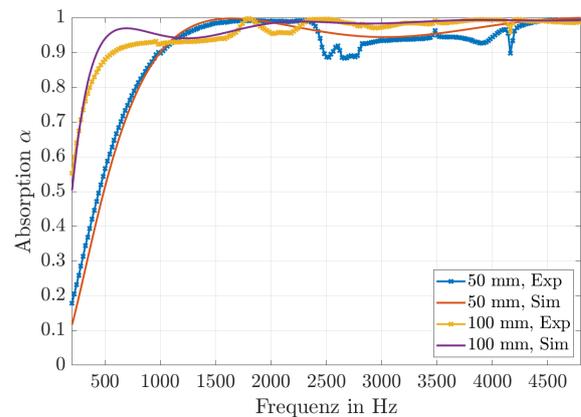


Abbildung 5: Direkte Absorption mit 50 mm und 100 mm Probe am D-NIT und Vergleich mit Simulation

Übereinstimmung zwischen Simulation und experimentellen Ergebnissen ist erkennbar, dass der poröse Absorber mit 50 mm Tiefe ab circa 1000 Hz breitbandig einen Großteil des einfallenden Schalls absorbiert. Die Abweichungen

um 2500 Hz sind eventuell auf lokale Resonanzeffekte innerhalb der Probe zurückzuführen. Bei 100 mm Tiefe ist eine breitbandige Absorption sogar schon ab etwa 500 Hz erkennbar.

Die Streukoeffizienten der Linerprobe im ebenen streifenförmigen Schalleinfall, gemessen am DUCT-R sind in Abb. 6 dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Liner wenig re-

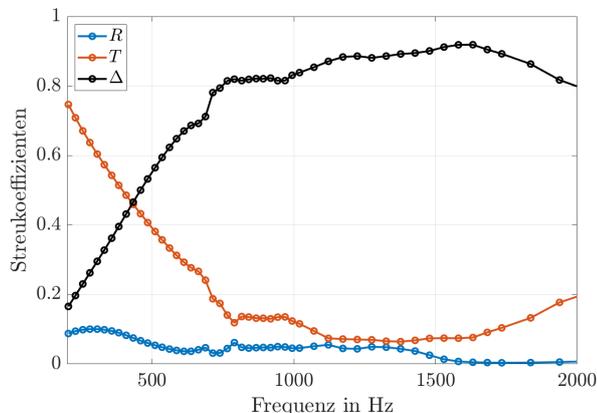


Abbildung 6: Gemessene Streukoeffizienten am DUCT-R, (Ma= 0)

flektiert (blaue Kurve) aber eine starke Transmissionsreduktion (rote Kurve) erzielen kann, was durch eine hohe Dissipation (schwarze Kurve) führt. Die Dissipation steigt hierbei steil bis circa 750 Hz an, bis ein Plateau um ungefähr $\Delta = 0,85$ erreicht wird. Zu hohen Frequenzen >1700 Hz ist eine leichte Reduktion der Dissipation erkennbar.

Mit einer Hintergrundströmung (Ma= 0,3) ändern sich die Dämpfungseigenschaften je nach Strömungsrichtung aufgrund von Konvektions- und Refraktionseffekten, dargestellt in Abb. 7. Die Konvektion führt zu einer Ver-

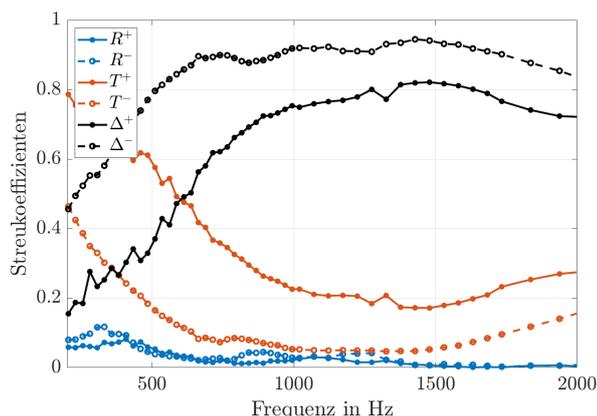


Abbildung 7: Gemessene Streukoeffizienten am DUCT-R, (Ma= 0,3)

ringerung der Dämpfung in Strömungsrichtung, weil die Schallwelle schneller über die absorbierte Wand streicht; bei der Refraktion wird durch das Grenzschichtprofil in Wandnähe hingegen die Schallwelle in Richtung des Liners gelenkt, was die Dämpfung erhöht. Beide Effekte sind somit entgegengesetzt gerichtet. Es ist erkennbar, dass der Liner in Strömungsrichtung schwächer und entgegen der Strömungsrichtung stärker dämpft, was auf eine Dominanz

der Konvektionseffekte hinweist. Der grundsätzliche Dissipationsverlauf bleibt jedoch erhalten und die Strömung führt nur zu einer Verschiebung des Spektrums.

Der MoSy-Prüfstand erlaubt eine Betrachtung der Streukoeffizienten über verschiedene Modenordnungen. Die am MoSy gemessenen Streukoeffizienten für die Grundmode ($m = 0, n = 0$) sind in Abb. 8 dargestellt. Wie bei den vor-

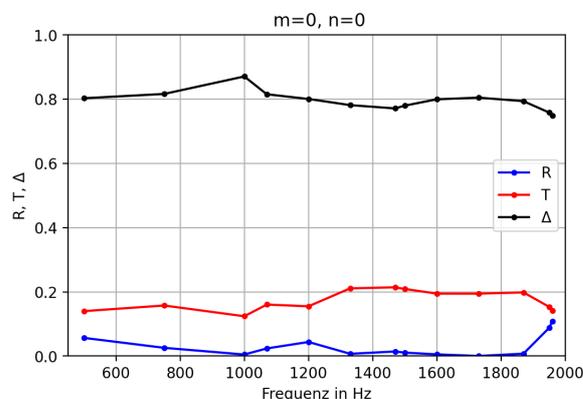


Abbildung 8: Streukoeffizienten 100 mm Probe am MoSy

herigen Ergebnissen ist eine breitbandige Dämpfung um $\Delta = 0,8$ erkennbar, die leicht zu hohen Frequenzen abfällt. Durch die Probentiefe von 10 cm ist eine starke Dämpfung schon bei 500 Hz erkennbar. Beispielhafte Ergebnisse für höhere azimutale Modenordnungen bei 1500 Hz sind in Abb. 9 präsentiert. Die Grundmode wird am schwächsten

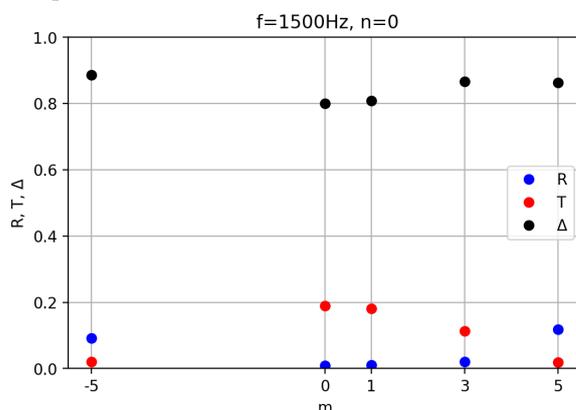


Abbildung 9: Streukoeffizienten über azimutale Modenordnung bei 1500 Hz

gedämpft und es ist eine annähernd symmetrische Steigung ($m = \pm 5$) zu höheren Modenordnungen erkennbar. Die Unterschiede zwischen den Modenordnungen sind jedoch gering. In Abb. 10 ist ein Vergleich der Messergebnisse der Grundmode zwischen DUCT-R und MoSy dargestellt. Es ist eine gute Übereinstimmung der Streukoeffizienten insbesondere um 1000 Hz erkennbar. Um 600 Hz unterscheiden sich die Ergebnisse vermutlich wegen der verschiedenen Probentiefen (DUCT-R: 50 mm, MoSy: 100 mm); zu höheren Frequenzen vermutlich wegen der unterschiedlichen Kanalhöhe (DUCT-R: 60 mm, MoSy 85 mm). Letztere Vermutung wird durch eine Simulation der Dissipation, mithilfe einer CHE-Simulation nach [6] der 50 mm tiefen Probe bei variabler Kanalhöhe, dargestellt in Abb. 11, bestärkt. Hier ist erkennbar, dass

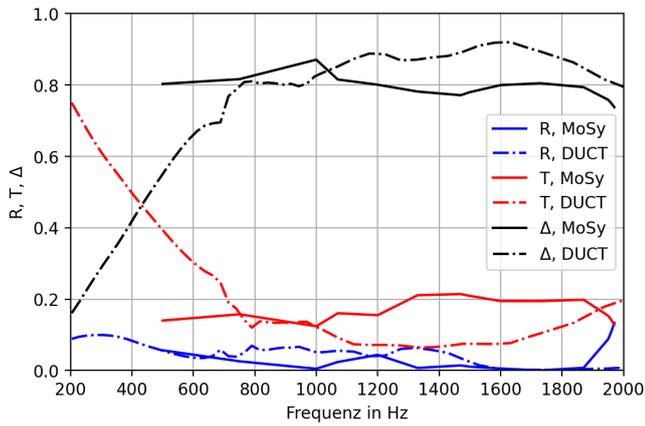


Abbildung 10: Streukoeffizientenvergleich zwischen MoSy (Probentiefe: 100 mm, Kanalhöhe: 85 mm) und DUCT (Probentiefe: 50 mm, Kanalhöhe: 60 mm)

die Dissipation für die poröse Probe insbesondere zu hohen Frequenzen stark von der Kanalhöhe abhängig ist: Je kleiner die Kanalhöhe, desto höher die Dissipation. Ob-

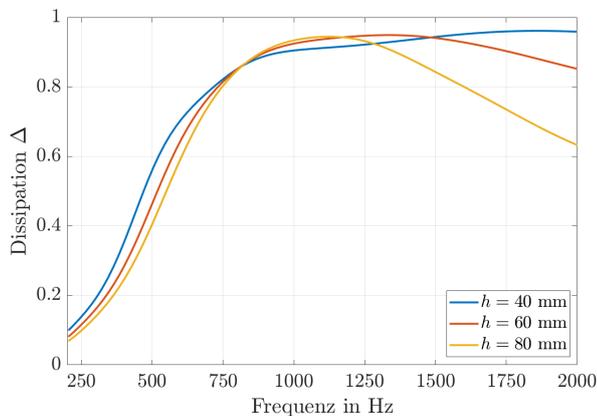


Abbildung 11: Simulierte Dissipation der 5 cm tiefen Probe bei variabler Kanalhöhe

wohl beide Linerproben für DUCT und MoSy die selbe axiale Linerlänge aufweisen, sei der Vollständigkeit halber erwähnt, dass auch die Linerlänge ein entscheidender Parameter für die Linerwirkung ist. Dessen Abhängigkeit wird in Abb. 12 klar: Je länger der Liner, desto stärker ist die Dämpfungswirkung.

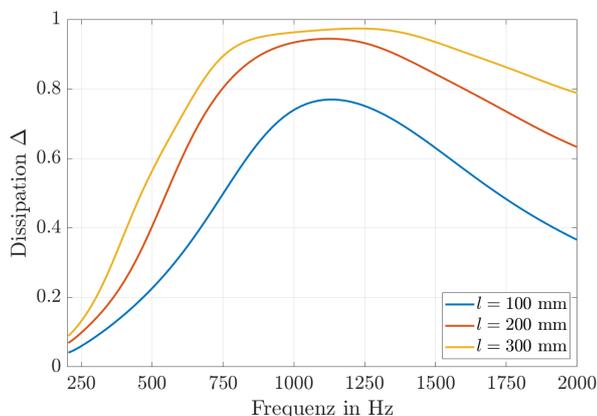


Abbildung 12: Simulierte Dissipation der 5 cm tiefen Probe bei variabler Linerlänge

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus einem Kundt'schen Rohr auf den streifenden Schalleinfall am Beispiel eines porösen Materials untersucht. Zusätzlich wurde der Einfluss von möglicher Hintergrundströmung und höheren Kanalmoden betrachtet. Es zeigte sich, dass der Verlauf des Absorptionskoeffizienten bei direktem Schalleinfall vergleichbar mit der Dissipation im streifenden Schalleinfall ist. Konvektive Effekte der Hintergrundströmung verschieben das Spektrum und es ist eine leicht höhere Dissipation bei höheren azimuthalen Kanalmoden messbar. Der Absorptionskoeffizient ist somit für die poröse Probe grundsätzlich geeignet um die Dämpfungswirkung im Strömungskanal abzuschätzen. Für eine genaue Quantifizierung der Dissipation im streifenden Schalleinfall muss jedoch die Linerlänge, die Kanalhöhe und die Hintergrundströmung miteinbezogen werden. Bei Helmholtz-Resonator-Linern hängt die Dämpfungswirkung selbst beispielsweise von der Hintergrundströmung ab und es sind größere Unterschiede zwischen Absorptionskoeffizient und Dissipation erwartbar. Dies soll in zukünftigen Studien untersucht werden.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei Sebastian Kruck und Sven Nieländer für die Unterstützung bei der Fertigung und Integration der Proben bedanken.

Literatur

- [1] Busse-Gerstengabe et. al.: Comparative study of impedance eduction methods, Part 1: DLR tests and methodology. (19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference 2013) AIAA-2013-2124
- [2] Behn et al.: Comprehensive experimental investigation of mode transmission through stator vane rows: Results and calibration of an analytical prediction model. (23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference 2017), AIAA 2017-3218
- [3] Ulf Tapken: Analyse und Synthese akustischer Interaktionsmoden von Turbomaschinen. Dissertation (2016), TU Berlin
- [4] Jean-F. Allard und Yvan Champoux: New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. The Journal of the Acoustical Society of America. 1992; 91(6)
- [5] Li et al.: Diffuse Sound Absorptive Properties of Parallel-Arranged Perforated Plates with Extended Tubes and Porous Materials. Materials. 2020; 13(5):1091
- [6] Weng et al.: Comparison of Non-Modal-Based and Modal-Based Impedance Eduction Techniques. (24th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference 2018), AIAA 2018-3773