Charakterisierung additiv gefertigter Strukturen zur Schallreduktion in Rohrströmungen

Benedikt Berchtenbreiter, Stefan Becker

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, 91058 Erlangen, Deutschland, E-Mail: bb@ipat.fau.de, sb@ipat.fau.de

Motivation

Die Schallabstrahlung und Akustik sind in vielen technischen Anwendungen gewichtige Qualitätsmerkmale. Ein typisches Beispiel hierfür ist das Klimasystem in Fahrzeugen, das die Geräuschkulisse im Fahrzeuginnenraum bei hohen Frequenzen dominiert. Insbesondere in Elektrofahrzeugen, bei welchen der Verbrennungsmotor als eine der Hauptlärmquellen nicht vorhanden ist, treten Hilfsaggregate wie das Klimasystem akustisch in den Vordergrund. Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung von durch- und überströmten Schalldämpfern wie beispielsweise in Klima- und Abgassystemen oder Linern in Triebwerken ist die veränderte Impedanzrandbedingung bedingt durch die Strömung. Dadurch kann sich das akustische Dämpfungsverhalten ändern.

Während auf der einen Seite gesteigertes Interesse an akustisch optimierten Lösungen präsent ist, entwickelten sich auf der anderen Seite die additiven Vertigungstechnologien in den vergangenen Jahren rasant. Es besteht die Möglichkeit sehr feine Strukturen bei verkürzter Fertigungszeit aus verschiedensten Werkstoffen zu realisieren. Speziell die Möglichkeit der Kombination unterschiedlicher Materialien mit variierenden Materialeigenschaften ist ein entscheidender Vorteil.

Mithilfe der genannten Vorteile additiver Fertigung ist die Entwicklung neuartiger Schalldämpferkonzepte mit gesteigerten akustischen Eigenschaften deshalb das Ziel dieser und zukünftiger Untersuchungen. Das kann zum einen eine erhöhte Absorption bedeuten und zum anderen die Möglichkeit einzelne Frequenzbereiche gezielt schmalbandig zu dämpfen. Es wurden erste systematische experimentelle Untersuchungen an additiv gefertigen Strukturen durchgeführt. Die Messungen wurden am Two-Port-Prüfstand der Forschungsstelle realisiert.

Two-Port-Modell

Das akustische Two-Port-Modell wird schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Mit dem Two-Port-Modell gelingt es die akustischen Eigenschaften von Objekten in Rohrströmungen für die Ausbreitung der ebenen Welle zu bestimmen. Sind Moden höherer Ordnung von Interesse wird der Two-Port zum Multi-Port erweitert. Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit beschränken sich auf die ebene Welle. Entsprechend Abbildung 1 ist der in das Rohrleitungssystem integrierte Schalldämpfer über jeweils eine Schnittstelle mit den Bereichen stromauf und stromab verbunden. Die akustische Kopplung zwischen den beiden Bereichen wird mit den Transmissionskoeffizienten $\tau_{\mathrm{AB/BA}}$ abgebildet. Die passiven Eigenschaften werden durch die Reflexions- $\rho_{\mathrm{A/B}}$ und Absorptionseigenschaften α komplettiert. Die passiven Eigenschaften sind dabei frequenzspezifisch. Unter nachfolgenden Voraussetzungen wird das Two-Port-Modell in Matrixschreibweise entsprechend Gleichung 1 abgebildet [1, 2]:

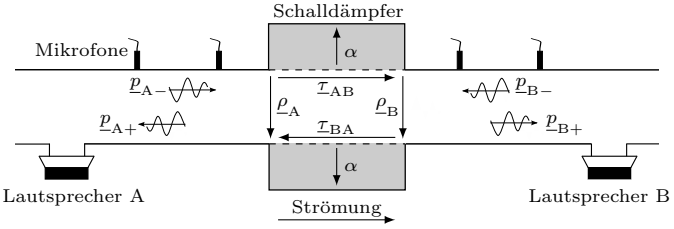

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Two-Port-Modells.

- lineares, zeitinvariantes System
- Trennung des Schalldrucks an einer beliebigen Position im Rohr in eine hinlaufende Welle $\underline{p}_{\mathrm{A/B+}}$ und eine rücklaufende $\underline{p}_{\mathrm{A/B-}}$
- keine Schallentstehung bedingt durch die Strömung im Schalldämpfer

$$\begin{bmatrix} \underline{p}_{\mathrm{A+}} \\ \underline{p}_{\mathrm{B+}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{\mathrm{A}} & \tau_{\mathrm{BA}} \\ \tau_{\mathrm{AB}} & \rho_{\mathrm{A}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{p}_{\mathrm{A-}} \\ \underline{p}_{\mathrm{B-}} \end{bmatrix} \tag{1}$$

Zur Bestimmung der Transmissions- und Reflexionskoeffizienten entsprechend Gleichung 1 wird das Schallfeld in eine hin- und eine rücklaufende Schallwelle zerlegt. Hierfür wird das Schallfeld entsprechend der Zwei-Mikrofon-Methode an jeweils zwei geeigneten Messtellen stromauf und stromab mit wandbündig montierten Mikrofonen erfasst. Gleichung 1 beinhaltet mit ρ_{A}, ρ_{B}, τ_{AB} und τ_{BA} zu viele unbekannte Größen. Das Gleichungssystem ist nicht geschlossen. Aus diesem Grund werden zwei linear akustisch unabhängige Einzelmessungen durchgeführt. Hierfür werden zwei Lautsprecher gemäß Abbildung 1 verwendet. Es resultiert ein geschlossenes Gleichungssystem entsprechend Gleichung 2.

$$\begin{bmatrix} p^{\mathrm{I}}_{\mathrm{A+}} & p^{\mathrm{II}}_{\mathrm{A+}} \\ p^{\mathrm{I}}_{\mathrm{B+}} & p^{\mathrm{II}}_{\mathrm{B+}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{\mathrm{A}} & \tau_{\mathrm{B}} \\ \tau_{\mathrm{B}} & \rho_{\mathrm{A}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p^{\mathrm{I}}_{\mathrm{A-}} & p^{\mathrm{II}}_{\mathrm{A-}} \\ p^{\mathrm{I}}_{\mathrm{B-}} & p^{\mathrm{II}}_{\mathrm{B-}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Durch die Korrelation der Lautpsrecherspannung mit den Mikrofonsignalen gelingt es zudem das Rauschen bedingt durch die hydrodynamischen Druckfluktuationen, die zum akustischen Signal unkorreliert sind, zu reduzieren. Sind der Transmissions und Reflexionskoeffizienten

bestimmt, werden entsprechend den Gleichungen 3 und 4 die Absorption α und der Transmission Loss TL in (+) und entgegen (-) der Strömungsrichtung bestimmt. Mit der Machzahl Ma wird die Fluid-Akustik-Interaktion berücksichtigt [3, 4].

$$\alpha_{\pm} = 1 - \left(\frac{(1 \mp Ma)^2}{(1 \pm Ma)^2} \cdot \rho^2 + \tau^2 \right) \tag{3}$$

$$TL = 20 \cdot \log_{10} \frac{1}{\tau} \tag{4}$$

Experimentelle Untersuchungen

Die Experimentellen untersuchungen wurden am Two-Port-Prüfstand der Forschungseinreichtung durchgeführt. Der Rohrinnendurchmesser beträgt 50 mm. Die Cut-On-Frequenz der ±1/0-Mode liegt daher bei 4010 Hz. Der untersuchte Frequenbereich reicht deshalb bis 4000 Hz, da sich die Forschungsarbeiten zu diesem Zeitpunkt auf die Ausbreitung der ebenen Welle beschränken. Der untersuchte Frequenzbereich wird mit einem weißen Rauschen angeregt.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde das Absorptionsverhalten und der Transmission Loss additiv gefertigter Strukturen unter dem Einfluss von Strömung bestimmt. Neben Gitterstrukturen wurden perforierte Hülsen akustisch analysiert. CAD-Modelle der Gitterstrukturen sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Innendurchmesser 50 mm der Gitterstrukturen entspricht dem Rohrinnendurchmesser des Prüfstands.

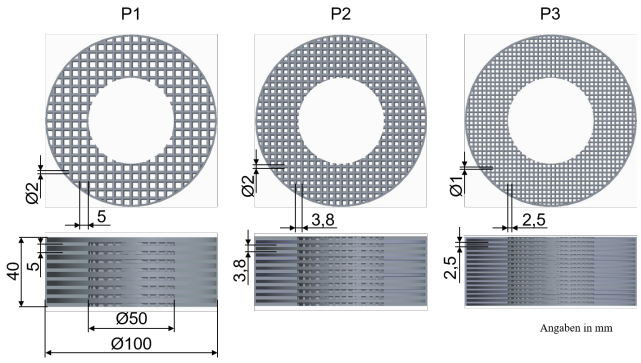

Abbildung 2: Untersuchte additiv gefertigte Gitterstrukturen.

Die Gitterstrukturen wurden mittels selektivem Lasersintern aus Polyamid hergestellt. Die additiv gefertigten Hülsen, die in Abbildung 3 abgebildet sind, wurden mit einem Filamentdrucker aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) gefertigt. Die einzelnen Hülsen haben eine Wandstärke von 0,4 mm und unterscheiden sich in der Perforation. Entsprechend Abbildung 3 gibt es jeweils zwei Varianten mit kreisförmigen und je zwei mit schlitzförmigen Öffnungen. Dabei variiert die Anzahl der Öffnungen in Umfangsrichtung zwischen 4 und 8. Die kreisförmigen Öffnungen (Bohrungen genannt) haben einen Durchmesser von 1,5 mm und die schlitzförmigen sind 1,5×4 mm. Der axiale Abstand der Öffnungen beträgt 2,5 mm. Die Integration im Prüfstand erfolgt entsprechend Abbildung 4. Während die Gitterstrukturen ähnlich wie in einem klassischen Rohrschalldämpfer in einer Querschnittserweiterung angebracht werden, dienen die perforierten Hülsen als Abdeckung einer Kavität bedingt durch einen doppelten Querschnittsprung.

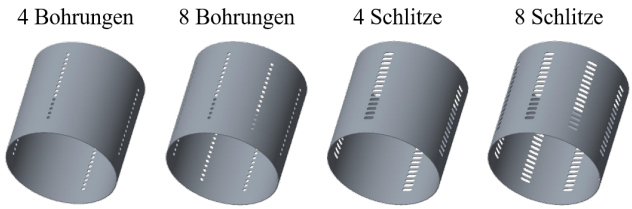

Abbildung 3: Untersuchte additiv gefertigte perforierte Hülsen.

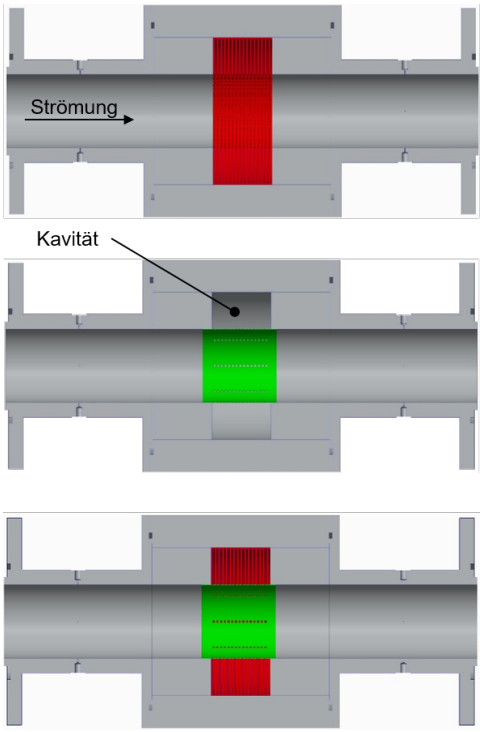

Abbildung 4: Integration der additiv gefertigten Strukturen im Two-Port-Prüfstand. Oben: Gitterstruktur, mitte: perforierte Hülse, unten: Kombination aus Gitterstruktur und Hülse.

Ergebnisse

In Abbildung 5 sind das Absorptionsverhalten und der Transmission Loss bedingt durch die Gitterstrukturen im Vergleich zu einem doppelten Querschnittssprung und einer geraden Rohrleitung für 0 und 10 $^m/_s$ aufgetragen. Die Schallausbreitungsrichtung entspricht dabei der Strömungsrichtung (stromauf → stromab). Während für den doppelten Querschnittssprung und das gerade Rohr die Absorption nahezu 0 ist, ist bei den Proben P1, P2 und P3 ab etwa 3000 Hz ein signifkanter Anstieg zu beobachten, der zwischen den Proben variiert. P2, die das höchste Verhältnis von Gitterstruktur zu Luft aufweist, zeigt ein Absorptionsmaximum bei ca. 3800 Hz. Beim

Transmission Loss ist zu beobachten, dass der doppelte Querschnittsprung bedingt durch die Reflexionen an den Impedanzsprüngen die Proben P1, P2 und P3 übersteigt. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass eine Rohrströmung von 10 $^m/_s$ weder auf die Absorption noch auf den Transmission Loss einen signifikanten Einfluss hat.

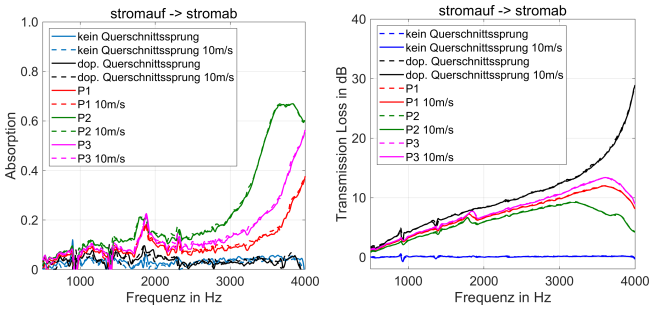

Abbildung 5: Absorption und Transmission Loss für einen doppelten Querschnittsprung, ein geradss Rohrstück, P1, P2 und P3 für 0 und 10 $^m/_s$ (stromauf → stromab).

Das Absorptionsverhalten und der Transmission Loss der perforierten Hülsen sind in Abbildung 6 für Schallausbreitung in Strömungsrichtung dargestellt. Für die Variante mit 4 Bohrungen ist ein Absorptionsmaximum im Bereich von 920 Hz zu erkennen. Das deutet auf einen Helmholtz-Effekt hin. Das Maximium findet sich im Transmission Loss wieder. Für die Hülse mit 8 Bohrungen verschiebt sich das Absorptionsmaximum zu höheren Frequenzen und wird geringer. Der Transmission Loss erhöht sich in diesem Frequenzbereich jedoch bedingt durch eine Zunahme der Reflexionen. Das lässt auf den Einfluss einer veränderten Impedanzrandbedingung schließen. Bei den geschlitzten Hülsen ist dieser Effekt noch stärker ausgeprägt. Während in der Absorption nur eine geringe Zunahme zu beobachten ist, gibt es für den Transmission Loss bei ca. 1300 und 2000 Hz ein Maximum. Für alle perforierten Hülsen ist im Bereich von 2750 Hz schmalbandig eine erhöhte Absorption zu erkennen. Diese tritt vermutlich bedingt durch die Eigenschwingung der Hülsen auf (vgl. unten).

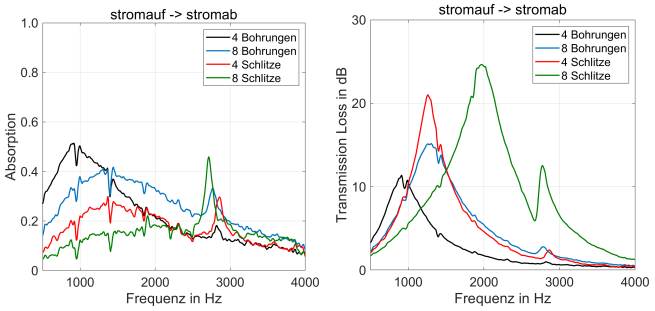

Abbildung 6: Absorption und Transmission Loss für die perforierten Hülsen für 0 $^m/_s$ (stromauf → stromab).

In Abbildung 7 ist der Transmission Loss für die perforierten Hülsen für 0 und 10 m/s dargestellt. Während auf der linken Seite die Verläufe für die Schallausbreitung in Strömungsrichtung (stromauf → stromab) abgebildet sind, zeigen die Grafen auf der rechten Seite die Schallausbreitung entgegen der Strömung (stromab → stromauf). Es ist zu erkennen, dass der Transmission Loss bei einer Schallausbreitung in Richtung der Strömung reduziert wird und entgegen der Strömung erhöht. Das deutet auf eine veränderte Impedanzrandbedingung in der Strömungsgrenzschicht hin. Für die Variante mit 8 Schlitzen ist ein Unterschied von 8 dB zu erkennen. Abbildung 8 zeigt die Verläufe des Transmission Loss

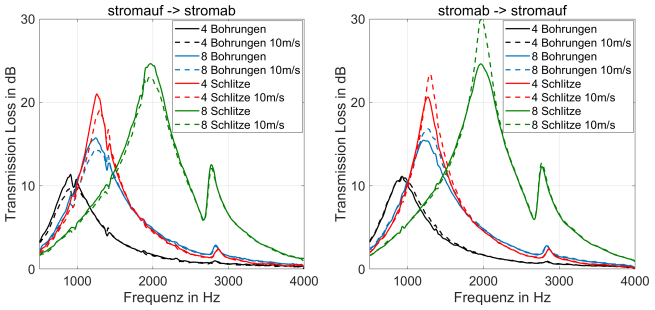

Abbildung 7: Transmission Loss für die perforierten Hülsen für 0 und 10 $^m/_s$. Links: stromauf → stromab, rechts: stromab → stromauf.

(oben) und der Absorption (unten) für 0, 5 und 10 $^m/_s$ exemplarisch für die Variante mit acht Bohrungen. Es ist zu erkennen, dass sich die oben beschrieben Effekte bezüglich der Zu- und Abnahme des Transmission Loss mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit verstärken. Für 5 $^m/_s$ sind die Effekte schwächer ausgeprägt als bei 10 $^m/_s$. Das Absorptionsverhalten weist keine signifkante Abhängigkeit von der Strömung auf.

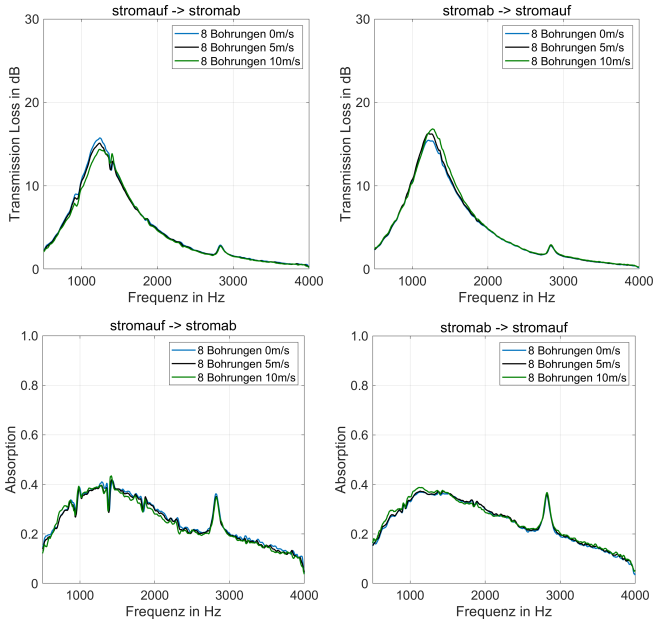

Abbildung 8: Transmission Loss (oben) und Absorption (unten) für die perforierte Hülse mit 8 Bohrungen in Umfangsrichtung für 0, 5 und 10 $^m/_s$. Links: stromauf → stromab, rechts: stromab → stromauf.

Die Gitterstrukturen und perforierten Hülsen wurden zusätzlich in Kombination untersucht (vgl. Abbildung 4 unten). In Abbildung 9 sind exemplarisch die Verläufe für

die Absorption und den Transmission Loss für die Kombination von P3 mit den perforierten Hülsen mit 4 und 8 Bohrungen dargestellt. Zum besseren Vergleich sind ergänzend die Resultate für die enstprechenden perforierten Hülsen ohne P3 abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die Absorption im unteren betrachteten Frequenzbereich gegenüber der Messung ohne P3 kaum beinflusst wird. Die lokalen Absorptionsmaxima im Bereich von 2750 Hz verschieben sich hingegen hin zu höheren Frequenzen in Kombination mit P3. Das Verschieben der Maxima deutet auf eine Absorption durch die Eigenschwingung der Hülsen hin, da diese durch P3 zusätzlich gestützt wird, wodurch sich die Frequenz der Eigenschwingungen ändert. Das Verschieben der beschriebenen lokalen Maxima zeichnet sich ebenfalls im Transmission Loss ab. Die Maxima im Transmission Loss bei etwa 920 und 1315 Hz werden durch P3 reduziert.

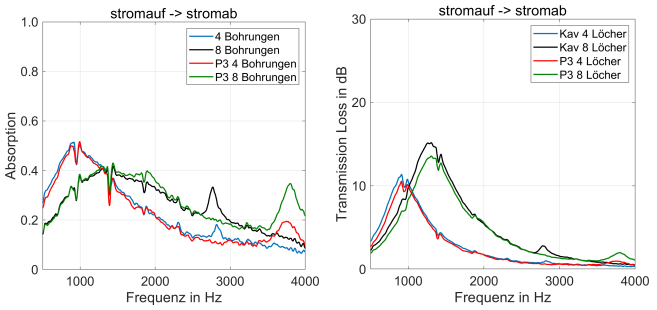

Abbildung 9: Absorption und Transmission Loss für die Kombination aus P3 und den perforierten Hülsen mit 4 und 8 Bohrungen für 0 $^m/_s$ (stromauf → stromab).

Abschließend wurden Untersuchungen durchgeführt, um die Absorption durch die Eigenschwingung der Hülsen zu validieren. Hierzu wurden die Außenseiten der Hülsen mit 8 Bohrungen und 8 Schlitzen entsprechend Abbildung 10 mit Gewebeband verstärkt. Dadurch wurde die Masse erhöht und die Steifigkeit verändert. Es wurden Messungen mit jeweils zwei und acht aufgeklebten Streifen Gewebeband durchgeführt. Das resultierende Absorptionsverhalten ist in Abbildung 11 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl für die Hülse mit schlitzförmigen Öffnungen als auch für die Variante mit kreisförmigen durch das Anbringen von 2 Streifen die Absorption deutlich reduziert und leicht in der Frequenz verschoben wird. Werden acht Streifen aufgeklebt verschwindet das lokale Maximum bei den kreisförmigen Öffnungen vollständig und bei den geschlitzten ist lediglich eine leichte Überhöhung zu bebachten. Diese Ergebnisse verstärken die Annahme einer Absorption durch die Eigenschwingung der perforierten Hülsen.

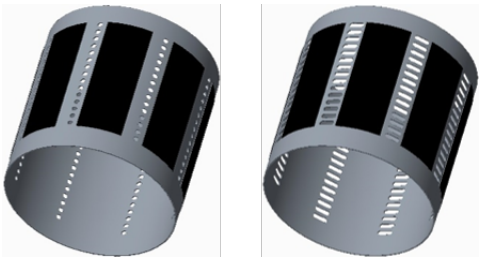

Abbildung 10: Abbildung der mit Gewebeband verstärkten perforierten Hülsen

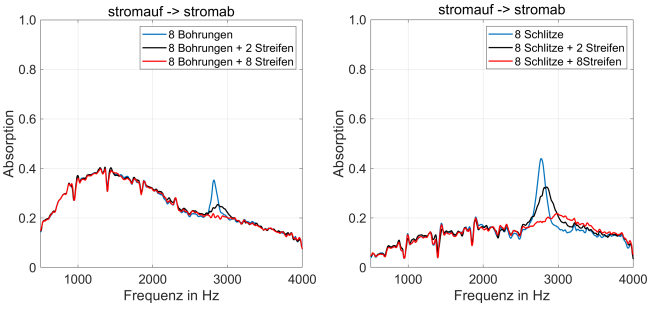

Abbildung 11: Absorptionsverhalten der mit Gewebeband verstärkten perforierten Hülsen. Links: 8 Bohrungen, rechts: 8 Schlitze (stromauf → stromab).

Zusammenfassung

Es wurde das Absorptionsverhalten und der Transmission Loss additiv gefertigter Gitterstrukturen und perforierter Hülsen unter dem Einfluss von Strömung untersucht. Die Messungen wurden am Two-Port-Prüfstand der Forschungseinrichtung durchgeführt.

Die Gitterstrukturen zeigen eine erhöhte Absorption ab etwa 3000 Hz verglichen mit einem doppelten Querschschnittssprung. Dabei liegt kein signifikanter Einfluss der Strömung vor.

Mit den perforierten Hülsen werden in Abhängigkeit der Perforation Maxima im Transmission Loss in verschiedenen Frequenzbereichen erzielt. Dabei liegt ein eindeutiger Einfluss einer Rohrströmung vor. Breitet sich der Schall in Strömungsrichtung aus, wird das Maximum reduziert und in entgegesetzter Richtung erhöht. Zusätzlich zeigen die Hülsen ein lokales Absorptionsmaximum im Bereich von 2750 Hz. Dies ist auf eine Absorption durch die Eigenschwingung der Hülsen zurückzuführen.

Literatur

[1] Åbom, M.: Measurement of the scattering-matrix of acousical two-ports. Mechanical Systems and Signal Processing 5(2), 89-104, 1991

[2] Sack, S., Åbom, M. und Efraimsson, G.: On acoustic multi-port characterisation including higher order modes. Acta Acustica united with Acustica 102 (2016), 834-850

[3] Busse-Gerstengarbe, S., Bake, F., Enghardt, L. und Jones, M. G.: Comparative Study of Impedance Eduction Methods, Part 1: DLR Tests and Methodology. 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Berlin, 2013

[4] ASTM International: E2611-09 Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method.