

Gezielte Impedanzanpassung für akustische Liner mittels poröser Strukturen

Fleming Kohlenberg¹, Karsten Knobloch¹

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

Einleitung

Herkömmliche schalldämpfende Wandauskleidungen (Liner) in Flugzeugtriebwerken funktionieren üblicherweise wie Helmholtz-Resonatoren. Diese zeichnen sich durch eine hervorragende Dämpfung bei ihren jeweiligen Resonanzfrequenzen aus, weisen jedoch eine suboptimale Breitbanddämpfung auf. Hier zeigen poröse Strukturen eine überlegene Leistung. Sie werden häufig in der Raumakustik und in Kulissenschalldämpfern eingesetzt. Ihre Anwendung in Flugzeugtriebwerken war jedoch aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen (Temperatur, Flüssigkeiten, Vogelschlag) bislang begrenzt. Eine vielversprechende Lösung stellt der Einsatz hochporöser Metallschäume oder additiv gefertigter poröser Strukturen aus Materialien dar, die diesen Bedingungen standhalten und gleichzeitig eine signifikante Breitbanddämpfung bieten.

Triply periodic minimal surface (TPMS) Strukturen sind besonders geeignete Kandidaten, weil die Geometrie eindeutig durch eine mathematische Funktion charakterisierbar ist. „Triply periodic“ bedeutet, dass die Struktur über eine Einheitszelle beschreibbar ist, die periodisch in alle drei Raumrichtungen zu einem kontinuierlichen, labyrinthartigen Netzwerk fortgesetzt werden kann. Die Kanäle sind hierbei ohne Selbstüberschneidungen verbunden und somit ohne Einschlüsse die akustisch inaktiv wären. „Minimal Surface“ bezieht sich auf die Eigenschaft, dass die Krümmung im Mittel null ist, wobei die Gesamtstruktur eine besonders hohes Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis aufweist. Eine große Oberfläche ermöglicht hierbei eine große Wandreibung in der visko-thermalen Grenzschicht und somit prinzipiell eine hohe Absorption[1]. Beispielhafte TPMS-Strukturen sind in Abb. 1 dargestellt.

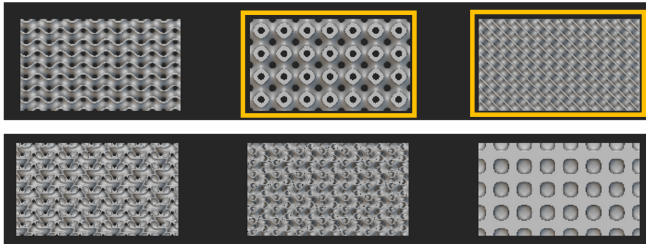


Abbildung 1: Übersicht über verschiedene TPMS Strukturen. V. l. n. r.: Oben: Gyroid, Schwarz, Diamond. Unten: Lidinoid, SplitP, Neovius. Gelb Markierte wurden in diesem Beitrag untersucht.

Die Diamond-Struktur kann beispielsweise durch

$$\sin(x) \sin(y) \sin(z) + \sin(x) \cos(y) \cos(z) + \cos(x) \sin(y) \cos(z) + \cos(x) \cos(y) \cos(z) = t \quad (1)$$

beschrieben werden, wobei x, y, z Raumrichtungen und t die Wanddicke ist[2]. Dies ermöglicht im Gegensatz zu

klassischen stochastisch geformten porösen Materialien aus Fasern oder Schäumen prinzipiell eine nachvollziehbare wiederholbare Fertigung. Insbesondere können Parameter wie die Zellgröße oder Wanddicke angepasst werden um eine gezielte Impedanz zu erreichen.

In diesem Beitrag wurden verschiedene additiv gefertigte TPMS Strukturen hinsichtlich ihres Strömungswiderstandes und ihrer akustischen Absorption design, gedruckt und experimentell untersucht. Der Fokus liegt hierbei auf den Einflüssen verschiedener Geometrieparameter wie der Porosität oder Wanddicke.

Raylometer

Der längenbezogene Strömungswiderstand $r_f = \Delta p/vt$ ist ein Maß für den Widerstand einer Probe gegenüber dem Durchströmen einer stationären Luftströmung. r_f ist strukturspezifisch und bei geschäumten und faserigen Proben abhängig vom Material, jedoch unabhängig von der Probendicke t [3]. Der Strömungswiderstand verschiedener gedruckte Proben wurde in einem Raylometer aus der statischen Druckdifferenz vor und hinter der Proben bestimmt. Der Aufbau ist in Abb. 2 dargestellt. Die Druckdifferenz Δp wird mit einem MKS Baratron 120D mit einem Messbereich von 1333.2 Pa gemessen. Die Luftströmungsgeschwindigkeit v wird im jeweiligen Regelbereich durch zwei Bronkhorst-Inflow-Massendurchflussregler, einen mit 1 kg/h und einen mit 20 kg/h Nenn-Durchfluss, gesteuert. Der Messbereich der Luftströmungsgeschwindigkeit beträgt 6,5 bis 3000 mm/s. In Übereinstimmung mit ISO 9053 wurden die Messwerte auf 0.5 mm/s extrapoliert, um den linearen statischen längenbezogenen Strömungswiderstand $r_{f,0}$ zu ermitteln. Der längenspezifische Luftströmungswiderstand kann als Schätzung des akustischen Widerstands bei 0 Hz angesehen werden.

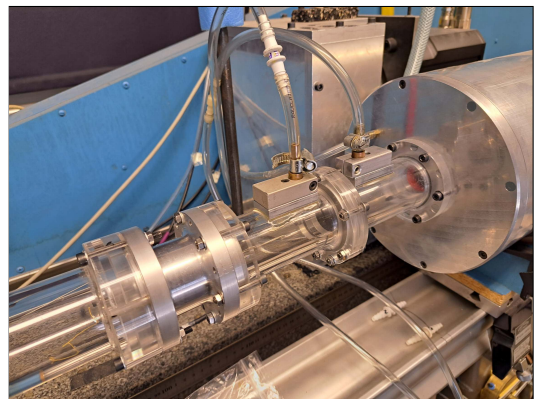


Abbildung 2: Raylometer mit statischen Druckanschlüssen vor und hinter der Probe

Impedanzrohr (D-NIT)

Die Absorption und Impedanz der Proben wurde im Impedanzrohr D-NIT der Abteilung Triebwerksakustik des DLR in Berlin bestimmt und ist in Abb. 3 dargestellt.

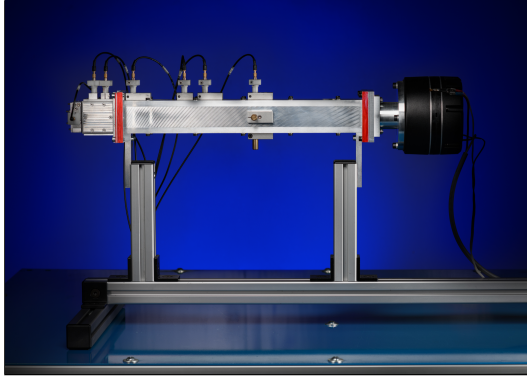


Abbildung 3: Impedanzrohr D-NIT

Das Impedanzrohr hat einen quadratischen Querschnitt von $35\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ und ermöglicht somit Messungen mit ebenen akustischen Wellen bis zur Cut-on Frequenz der ersten höheren Kanalmode von 4900 Hz . Als Schallquelle diente ein Lautsprecher (BMS-4599-ND), der am gegenüberliegenden Ende der Probe im Kanal angebracht war. Das Schallfeld im Kanal wurde mithilfe von drei wandbündigen Mikrofonen (G.R.A.S 46BD-FV $1/4''$) in einfallende und reflektierte Schallwellen zerlegt und aus der komplexen Reflexionszahl r an der Probenoberfläche die Schallabsorption $\alpha = 1 - |r|^2$ und die komplexe normierte Impedanz $\zeta = Z/\rho_0 c_0 = \frac{1+r}{1-r}$ mithilfe der Luftdichte ρ_0 und Schallgeschwindigkeit c_0 bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung des Prüfstandes und der Auswertverfahren findet sich bei Kohlenberg[4].

Proben

Die Proben wurden in der kommerziellen Software nTop entworfen und anschließend in einem Formlabs Form 3 3D-Drucker mithilfe der maskierter Stereolithografie aus Harzpolymer (Grey Resin V3, $\rho_{\text{mat}} = 1.14\text{ g/cm}^3$) gedruckt. Nach dem Druckprozess wurden die Proben im Lösungsmittelbad gewaschen um Restharz auszuspülen und mit UV-Licht sowie Wärme nachgehärtet. Im Anschluss wurden die Proben mechanisch nachbearbeitet um eine wandbündige Montage in die Prüfstände zu ermöglichen. Ein Foto einer Probe während des Druckprozesses und einer fertigen Probe im Probenhalter ist in Abb. 4 respektive in Abb. 5 dargestellt. Die Abmessungen sind $35 \times 35 \times 20\text{ mm}^3$ für die D-NIT-Proben bzw. mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Dicke von 15 mm für die Raylometer-Proben.

Eine Übersicht über die gedruckten Teststrukturen ist in Tabelle 1 dargestellt. Es wurden zwei Strukturtypen (Schwarz und Diamond) und verschiedene Porositäten untersucht, wobei die Porosität aus der Kombination aus Strukturtyp, Einheitszellgröße und Wanddicke resultiert. Der Einfluss von Zellgröße und Wanddicke wurde bestimmt, indem die gleiche Porosität einmal mit einer Einheitszellgröße von 3 mm (D80) und 5 mm (D80-5) erzeugt wurde. Zusätzlich wurden für die Geome-

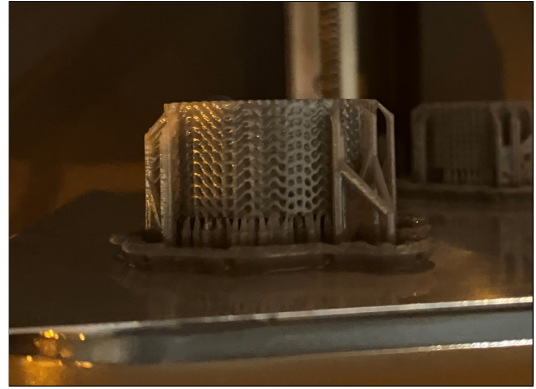


Abbildung 4: Druckprozess

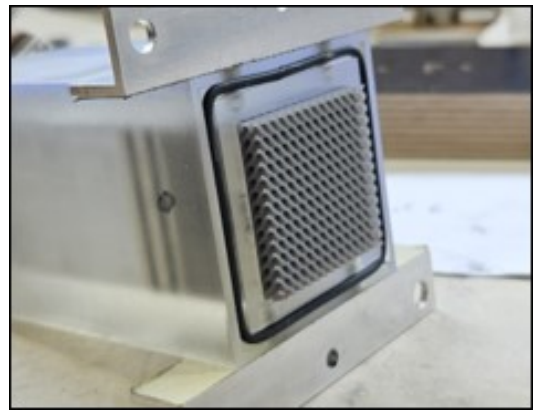


Abbildung 5: Gedruckte Probe (D80-5)

trien D80 und D50 runde Proben hergestellt um den Strömungswiderstand im Raylometer zu bestimmen. Die tatsächliche Porosität $\sigma_p = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_{\text{mat}}}$ wurde aus dem Verhältnis der gemessenen Gesamtmasse m und des Gesamtvolumens V ermittelt: $\rho_p = \frac{m}{V}$. Hierbei zeigte sich, dass die gedruckten Strukturen eine 15 bis 20 % geringere Porosität (z. B.: D80: $\sigma_p = 63\% < \sigma_m = 80\%$) als modelliert aufwiesen. Wiederholungsdrucke zeigten hierbei die selbe Porosität was auf einen systematischen Offset hindeutet. Die Ursache hierfür liegt eventuell in der ungenauen Konvertierung des CAD-Modells zum Druckermodell, der Druckerpräzision (sehr geringe Wanddicken) oder Restharz, das nicht vollständig nach dem Druck ausgespült wurde.

Tabelle 1: Übersicht gedruckte Proben, D: Diamond, S: Schwarz

Name	Zellgröße in mm	Wanddicke in mm	Porosität (CAD) in %
S80	5	0.5	81
D80-5	5	0.5	77
D80	3	0.259	80
D70	3	0.388	70
D60	3	0.516	60
D50	3	0.643	50

Ergebnisse

Der mit dem Raylometer bestimmte Strömungswiderstand der gedruckten Proben ist in Abb. 6 dargestellt. Es zeigt

sich, dass mit den gedruckten Proben ein breiter Bereich des Strömungswiderstands einstellbar ist: $3500 \text{ Pa s/m}^2 < r_{f,0} < 35000 \text{ Pa s/m}^2$. Vergleichbare Metallschäume[5], die durch ihr Material ebenfalls für einen Triebwerkslinereinsatz in Frage kommen, weisen typischerweise einen geringeren Strömungswiderstand bei teilweise deutlich höherem Gewicht auf (material- und porositätsabhängig).

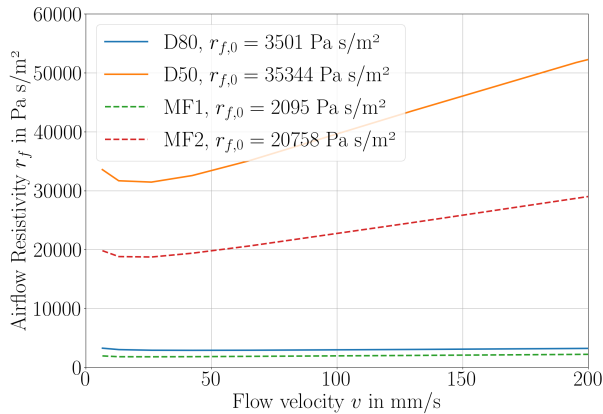


Abbildung 6: Gemessener Strömungswiderstand der gedruckten Proben (D50 $\rho_p = 0.78 \text{ g/cm}^3$, D80 $\rho_p = 0.42 \text{ g/cm}^3$) und Metallschäume (MF1 $\rho_p = 0.59 \text{ g/cm}^3$, MF2 $\rho_p = 1.3 \text{ g/cm}^3$) als Referenz

Abbildung 7 zeigt die im D-NIT gemessenen Absorptionsspektren der verschiedenen gedruckten Proben. Grundsätzlich ist bei allen Proben ein einzelnes Absorptionsmaximum im betrachteten Frequenzbereich erkennbar, das einem $\lambda/4$ -Resonator ähnelt. Eine höhere Porosität führt hierbei zu einer höheren Resonanzfrequenz mit einer geringeren Maximalabsorption. Die höchste und gleichzeitig tiefrequenteste Absorption bei etwa 2200 Hz. $\alpha = 0,95$ wird hierbei mit der geringsten Porosität von 50 % (D50, dunkelblau) erreicht. Eine Porosität von 80 % (D-80, violett) führt hingegen zu einer geringeren maximalen Absorption von $\alpha = 0.6$ bei einer Resonanzfrequenz um 3100 Hz, wobei die Bandbreite vergrößert ist. Der Vergleich zwischen den beiden Proben mit gleicher Porosität, aber unterschiedlicher Wandstärke (D80, violett vs. D80-5, grün) zeigt eine erhöhte Absorption bei kleineren Strukturen, die mehr Oberfläche und somit mehr Wandreibung innerhalb der gedruckten Struktur ermöglichen. Die Diamond-Struktur weist bei gleicher Porosität und Wandstärke für die untersuchten Proben eine höhere Absorption (S80, türkis vs. D80, violett) auf. Die Schwarz-Struktur absorbiert hingegen leicht tieffrequenter. Die geringere Absorption der Schwarz-Struktur ist wahrscheinlich auf eine geringere innere Oberfläche, während die tieffrequentere Dämpfung auf resonante Hohlkammern zurückzuführen ist, siehe Abb. 1.

Die gemessene normierte Impedanz der Proben mit geringster (D50, durchgezogen) und höchster Porosität (D80, gestrichelt) sind in Abb. 8 dargestellt. Die Resonanzen sind als Nulldurchgänge der Reaktanz (rot) mit positiver Steigung erkennbar. Die Steigung der Reaktanz von D50 ist dabei höher und der erste Nulldurchgang bzw. die erste Resonanz tritt bei tieferen Frequenzen auf. Um 3600 Hz

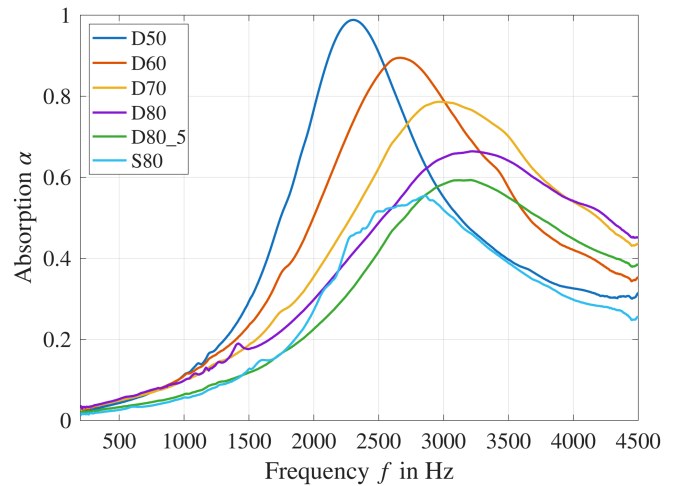


Abbildung 7: Gemessene Absorption der gedruckten porösen Proben

ist bei D50 ein Nulldurchgang der Reaktanz mit negativer Steigung und gleichzeitiger Resistanzerhöhung (blau) zu beobachten, was einer Antiresonanz entspricht und zu einer geringeren Absorption führt, siehe Abb. 7. Außerhalb dieser Resistanzerhöhung zwischen 500 und 2500 Hz liegen die Resistenzen der beiden Proben mit der höchsten bzw. geringsten Porosität zwischen 0,5 (D80) und 1,5 (D50).¹ Dies deutet auf einen weiten Einstellbereich für eine gezielte Impedanzanpassung hin.

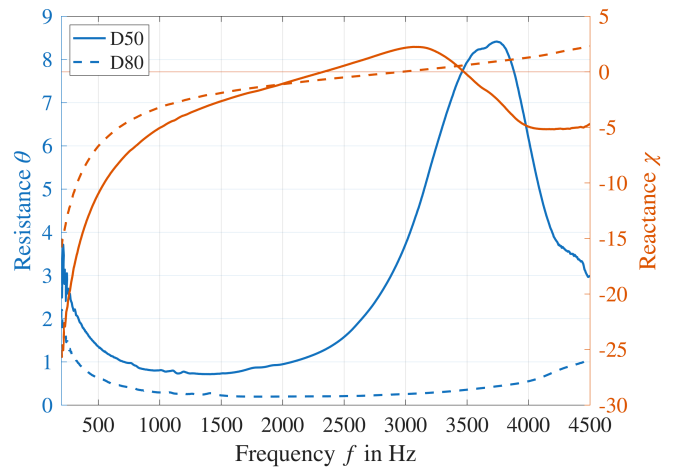


Abbildung 8: Gemessene normierte Impedanz der Proben mit geringer (D50) und hoher Porosität (D80)

Um die Reproduzierbarkeit zu quantifizieren wurden die Proben D80 und D50 zusätzlich jeweils zweimal mit einer Dicke von 15 mm wiederholt gedruckt (D80-WH1/D80-WH2/D50-WH1/D50-WH2). Die gemessenen Absorptionsspektren sind in Abb. 9 dargestellt. Bei hoher Porosität und schmalen Wänden (D80) ist eine gute Reproduzierbarkeit der Spektren erkennbar, wohingegen sich die gemessenen Spektren für die Proben mit geringer Porosität durch dickere Wände (D50) deutlich unterscheiden, was auf eine Verstopfung der inneren Struktur durch nicht

¹Im direkten Schalleinfall wird die höchste Absorption bei einer rein reellen Impedanz von $\zeta = 1$ erreicht. Im streifenden Schalleinfall hängt die optimale Impedanz von den Strömungsbedingungen und der Kanalgeometrie ab.

vollständig ausgespültes Restharz hindeutet. Diese Annahme kann in Zukunft zum Beispiel überprüft werden indem Proben geöffnet werden um die innere Struktur offen zu legen.

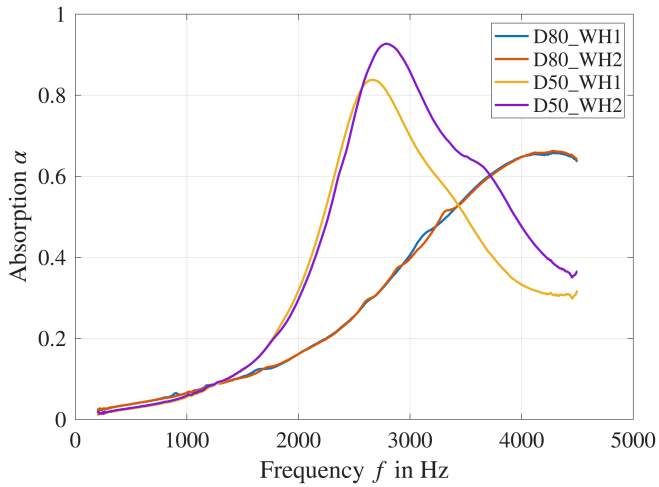


Abbildung 9: Gemessene Absorption von wiederholt gedruckten Proben mit geringer (D50) und hoher Porosität (D80)

Eine weitere Impedanzanpassung ist durch eine geschickte Kombination von verschiedenen Proben möglich. So kann eine tieffrequente, schmalbandige Absorption durch eine Anordnung von D80+D50 (Reihenfolge aus Sicht der einfallenden Welle) oder eine hochfrequente, breitbandige Absorption durch die umgedrehte Anordnung D50+D80 erreicht werden. In einem zukünftigen Schritt kann dieser Effekt bereits in der Modellierung durch Porositätsgradienten innerhalb der Struktur berücksichtigt werden. Dies ermöglicht die gezielte Vermeidung oder Ausnutzung von Impedanzsprüngen zwischen benachbarten Strukturabschnitten..

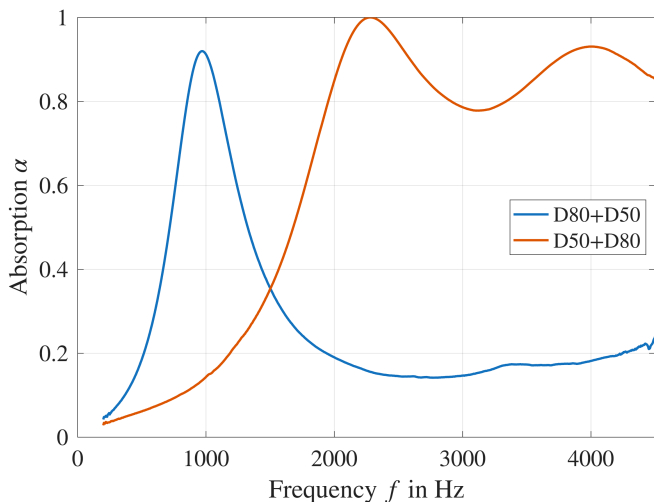


Abbildung 10: Absorption von kombinierten Proben (Gesamtdicke: 30 mm)

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden verschiedene additiv gefertigte TPMS Strukturen hinsichtlich ihrer akustischen Absorption und ihres Strömungswiderstandes charakterisiert. Es konnte gezeigt werden, dass 3D-gedruckte deterministische

TPMS-Strukturen einstellbares Absorptionsverhalten mit hoher Absorption ermöglichen. Der wichtigste Parameter ist die Porosität der Struktur, die durch die Wahl von Zellgröße und Wanddicke einstellbar ist. Bei gleicher Porosität zeigte die Diamond-Struktur eine höhere Absorption als die Schwarz-Struktur. Weiterhin kann die Impedanz der Liner durch Kombination mit verschiedenen gedruckten Strukturen angepasst werden und in einem zukünftigen Schritt bereits im Design durch einen graduell variablen Porositätsverlauf innerhalb der Struktur realisiert werden. Hierfür sollen die akustischen Eigenschaften basierend auf einem semi-phänomenologischen Johnson-Champoux-Allard-Lafarge (JCAL) Modell modelliert und vorhergesagt werden. Es zeigte sich jedoch auch, dass die gedruckte Porosität deutlich von der modellierten Porosität abweicht. Dies deutet darauf hin, dass der Drucker oder der Druckprozess das akustische Verhalten der Probe beeinflusst – beispielsweise aufgrund von nicht vollständig ausgespültem Restharz. Zukünftig soll der Einfluss des Druckprozesses näher untersucht werden indem die innere Struktur der Proben analysiert und die selben Modelle mit anderen Fertigungsverfahren und Materialien wie zum Beispiel Fused Deposition Modeling mit Kunststoffen oder Selektives Laser-Sintern mit Metallen untersucht werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde dankenswerterweise weitestgehend innerhalb des DLR-Projekts LU(FT)² 2030 [Leises Umwelt-Freundliches Transportflugzeug durch Fortschrittliche Technologiesimulation für 2030] realisiert. Die Autoren danken Sebastian Kruck und Angelo Rudolphi vom DLR-Werkstatteam für ihre Unterstützung bei der Herstellung der Proben.

Literatur

- [1] Godakawela, Janith; Lomte, Amulya; Sharma, Bhisam (2025): Sound absorption in uniform and layered gyroid and diamond triply periodic minimal surface porous absorbers. In: Applied Acoustics 236, S. 110761. DOI: 10.1016/j.apacoust.2025.110761.
- [2] Sysoev, E. I.; Sychov, M. M.; Shafigullin, L. N.; Dyachenko, S. V. (2024): Design of Sound Absorbing Honeycomb Materials with a Geometry of Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS). In: Acoust. Phys. 70 (5), S. 887–898. DOI: 10.1134/S1063771024602796.
- [3] Acoustics - Determination of airflow resistance - Part 1: Static airflow method (ISO 9053-1:2018)
- [4] Kohlenberg, Fleming (2026): About Helmholtz Resonators with Flexible Walls for Acoustic Damping. Doktorarbeit. TU Berlin, Berlin. DOI: 10.14279/depositonce-25400
- [5] Kohlenberg, Fleming; Knobloch, Karsten (2025): An initial assessment of porous metal foam liners for acoustic broadband damping. In: DAS/DAGA 2025 Copenhagen. DOI: 10.71568/dasdaga2025.014