Dissipationsverhalten Periodisch Durchströmter Liner bei Streifendem Schalleinfall

Ralf Burgmayer[1], Lars Enghardt[1], Friedrich Bake[1]

[1] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Abteilung Triebwerksakustik, 10623 Berlin, E-Mail: ralf.burgmayer@dlr.de*

Einleitung

Perforierte Wandauskleidungen, auch Liner genannt, stellen eine wichtige Schallreduktionstechnologie in durchströmten Kanälen, wie beispielsweise Flugzeugtriebwerken, dar. Die Schallemission moderner, emissionsarmer Triebwerke weist zunehmend breitbandige Charakteristika auf. Konventionelle, auf dem Helmholtzresonatorprinzip basierende Linerkonzepte zeigen eine schmalbandige Dämpfung im Bereich ihrer Resonanzfrequenz und für eine Reihenschaltung mehrerer Helmholtzresonatorliner ist nur unzureichend Bauraum im Triebwerk vorhanden. Die Triebwerksakustik steht vor der Herausforderung sich diesen Entwicklungen anzupassen. Demnach besteht Bedarf an neuen Schalldämpfungstechnologien. Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit das Wirkungsprinzip eines periodisch durchströmten Liners, auch Zero-Mass-Flow-Liner (ZML) genannt, untersucht.
Experimentelle Studien zeigen, dass turbulente Strömungen, wie Verwirbelungen und Jets einen dämpfenden Effekt auf das Schallfeld haben [1]. Dieser Umstand wird bei kontinuierlich durchströmten Linern, sogenannten Bias-Flow-Linern (BFL), ausgenutzt um ihre Dissipationsfähigkeiten breitbandig zu erhöhen.
Eine periodische Durchströmung kann beispielsweise mit Schallquellen erzeugt werden. Untersuchungen zur Bestimmung der Impedanz von Öffnungen in Platten haben ergeben, dass es bei hohen Schalldruckamplituden ebenfalls zur Bildung von Jets und Verwirbelungen kommt. Maßgeblich für die Bildung von Jets und Verwirbelungen ist die Schallschnelle an der Öffnung der Platten [3, 4]. Heuwinkel et al. [5] haben auf Basis dieser Erkenntnisse einen Prototypen eines periodisch durchströmten Liners vorgestellt und konnten sehr große Ähnlichkeiten zwischen BFL und ZML feststellen. Beide Linervarianten zeigen ein sehr ähnliches, mit steigender Durchströmung breitbandiger werdendes Dissipationsverhalten. Über die Beschaffenheit des Schallfeldes in der Kavität des ZML lagen bis auf einen Gesamtschalldruckpegel, gemessen in der Kavität des Schalldämpfers, keine genauen Informationen vor. Es stellt sich die Frage ob der Wirkmechanismus des ZML lediglich eine Funktion der Schallschnelle an der Linerplatte oder eine Kombination aus Schallschnelle und Auslenkung der Teilchen ist.

Zur Klärung dieser Frage werden in dieser Studie erste experimentelle Untersuchungen zum Dissipationsverhalten einer periodisch durchströmten perforierten Platte vorgestellt. Dazu wird die Dissipation einer Reihe von gelochten Platten variierender geometrischer Parameter bestimmt. Dabei wird die Durchströmung mit verschiedenen Frequenzen, im Folgenden als Aktuatorfrequenzen bezeichnet, bei konstanter Schallschnelle an der perforierten Platte angeregt. Da die Auslenkung der Teilchen im Vergleich zur Schallschnelle eine frequenzabhängige Größe darstellt kann, durch Variation der Aktuatorfrequenz, zwischen den Parametern unterschieden werden.

Versuchsaufbau

Die experimentelle Studie wurde an dem rechteckigen Strömungskanal DUCT-R des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Berlin durchgeführt. Der Kanal weist einen Querschnitt von 80 mm × 60 mm auf und kann mit einer Strömungsmachzahl von bis zu 0.3 betrieben werden. Der Kanal besteht aus zwei Sektionen und wurde für diese Studie um eine dritte Sektion, einen Seitenarm, erweitert. Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau. Am Verbindungsstück zwischen Hauptkanal und Seitenarm können gelochte Platten wandbündig zum Hauptkanal montiert werden, sodass diese vom Seitenarm aus beschallt, bzw. periodisch durchströmt werden können. Jede Sektion ist mit fünf Mikrofonen und jeweils einem Lautsprecher versehen. Bei den verwendeten Mikrofonen handelt es sich um $^1/_4''$ Kondensator-Mikrofone mit Kapseltyp 40BP und Vorverstärker des Typs 26AC der Firma GRAS. Zur Erzeugung hoher Schalldruckpegel werden in dieser Studie BMS 4599ND-Lautsprecher verwendet. Um lediglich den Einfluss der periodischen Durchströmung auf die Linerplatten erfassen und die Resonanzen im Seitenarm vernachlässigen zu können, wurde ein reflexionsarmer Abschluss am Seitenarm angebracht. Der Reflexionsfaktor weist für Frequenzen < 440 Hz einen Maximalwert von 0.159 auf. Oberhalb von 440 Hz beträgt der Reflexionsfaktor maximal 0.03.

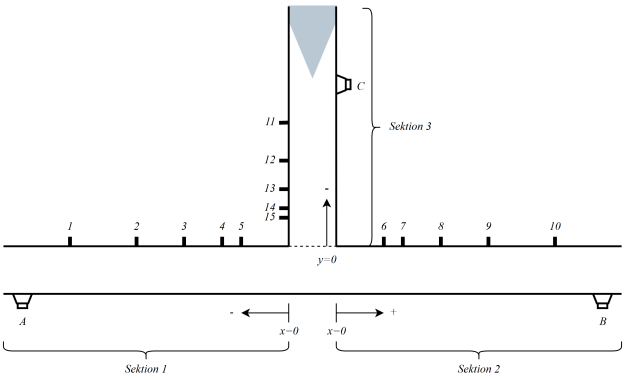


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Hauptkanal mit Seitenarm.

Analyseverfahren

Für die Analyse werden im Hauptkanal und Seitenarm unabhängig voneinander Schallfelder erzeugt. Die Studie

beschränkt sich auf ebene Wellen. Aus den Kanalmaßen ergibt sich die Cuton-Frequenz der ersten höheren Mode zu 2142 Hz. Die periodische Durchströmung, angeregt durch Sinussignale, wird mit Lautsprecher C erzeugt. Die für die Stärke der Durchströmung entscheidende Schallschnelle an der Lochplatte wird über Gleichung 2 berechnet. Im Hauptkanal werden lineare Sweep-Signale genutzt, um die Dissipation zu berechnen. Auf eine Durchströmung des Hauptkanals wird in dieser Studie zunächst verzichtet.

Schallfeldzerlegung

Sowohl im Hauptkanal als auch im Seitenarm werden die aufgenommenen Signale in ihre hin- und rücklaufenden Wellenbestandteile zerlegt, wie in Abbildung 2 für Sektion 3 skizziert. Mathematisch kann das Schallfeld an jedem einzelnen Mikrofon als eine Überlagerung aus hin- und rücklaufender Welle beschrieben werden. Werden mehr als zwei Mikrofone verwendet ergibt sich das überbestimmte Gleichungssystem aus Gleichung 1, das über einen Least-Mean-Square-Fit nach den gesuchten komplexwertigen Amplituden der hin- und rücklaufenden Welle $\hat{p}^+$ und $\hat{p}^-$ aufgelöst werden kann. In die Berechnung der Wellenzahlen k^+ und k^- fließen thermo-viskose Verluste nach Dokumaci [6] ein.

$$\begin{aligned} \hat{p}(x_1) &= \hat{p}^+ e^{-ik^+x_1} + \hat{p}^- e^{ik^-x_1}, \\ \hat{p}(x_2) &= \hat{p}^+ e^{-ik^+x_2} + \hat{p}^- e^{ik^-x_2}, \\ &\vdots \\ \hat{p}(x_m) &= \hat{p}^+ e^{-ik^+x_m} + \hat{p}^- e^{ik^-x_m}. \end{aligned} \tag{1}$$

Schallschnelle im Seitenarm

Die Schallschnelle kann für ebene Wellen aus der linearisierten Euler-Gleichung unter Anwendung des Kontinuitätsgesetzes hergeleitet werden und ergibt sich zu:

$$\left|\hat{u}_p\right| = \frac{\left|\hat{p}^+_{3,c} - \hat{p}^-_{3,c}\right|}{\rho_0 c_0 \sigma}, \tag{2}$$

wobei ρ_0 und c_0 die Dichte bzw. die Schallgeschwindigkeit in Luft darstellen und σ die Porosität der Lochplatte bezeichnet. Abbildung 2 zeigt das Schallfeld im Seitenarm.

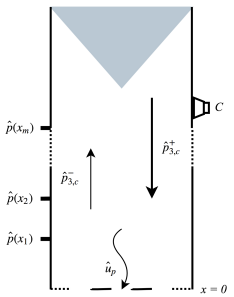
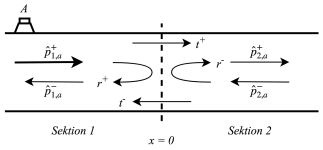


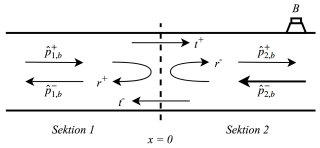
Abbildung 2: Schallfeld in Sektion 3 bei Anregung mit Lautsprecher C.

Bestimmung der Dissipation im Hauptkanal

Der Dissipationskoeffizient entspricht dem Absorptionskoeffizienten, mit dem Unterschied, dass der Erstgenannte unabhängig von den Endreflexionen ist. Die Unabhängigkeit wird durch die konsekutive Anregung eines Schallfeldes in zwei seperaten Messungen erreicht: Zuerst wird der Kanal mit Lautsprecher A angeregt und anschließend mit Lautsprecher B. Abbildung 3 skizziert die entstehenden Schallfelder in beiden Kanalsektionen.



(a) Anregung mit Lautsprecher A



(b) Anregung mit Lautsprecher B

Abbildung 3: Schallfeld im Hauptkanal

Aus den beiden Messungen ergibt sich nach der Schallfeldzerlegung ein linear unabhängiges Gleichungssystem, das nach den Reflexions- und Transmissionskoeffzienten $r^\pm$ bzw. $t^\pm$ aufgelöst wird.

$$\begin{pmatrix} \hat{p}^-_{1,a} & \hat{p}^-_{1,b} \\ \hat{p}^+_{2,a} & \hat{p}^+_{2,b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r^+ & t^- \\ t^+ & r^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{p}^+_{1,a} & \hat{p}^+_{1,b} \\ \hat{p}^-_{2,a} & \hat{p}^-_{2,b} \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Aus den Streukoeffizienten wird die Dissipation für eine Machzahl von $M = 0$ nach Gleichung 4 berechnet:

$$D^\pm = 1 - \left(|r^\pm|^2 + |t^\pm|^2\right). \tag{4}$$

Ergebnisse

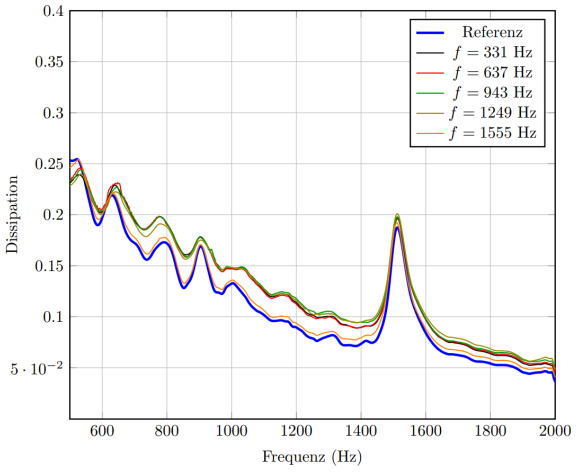
In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Studie vorgestellt. Das Dissipationsverhalten bei Variation der Aktuatorfrequenz und konstanter periodischen Durchströmung wird zuerst an einer Lochplatte aufgezeigt. Anschließend werden Ergebnisse zu den Auswirkungen einer Variation von Porosität und Lochdurchmesser der Platten auf das Dissipationsverhalten vorgestellt.

Die Schallschnelle an den untersuchten Linerplatten wurde mit einer Genauigkeit von maximal ±5% Abweichung vom Zielwert, ohne Anregung im Hauptkanal, eingestellt. Eine größere Abweichung findet sich lediglich bei der geforderten Schallschnelle von 15 m/s ms bei der Aktuatorfrequenz 331 Hz, bei der Lochplatte in Abb. 4. Hier beträgt die Abweichung etwa 13 % vom Zielwert.

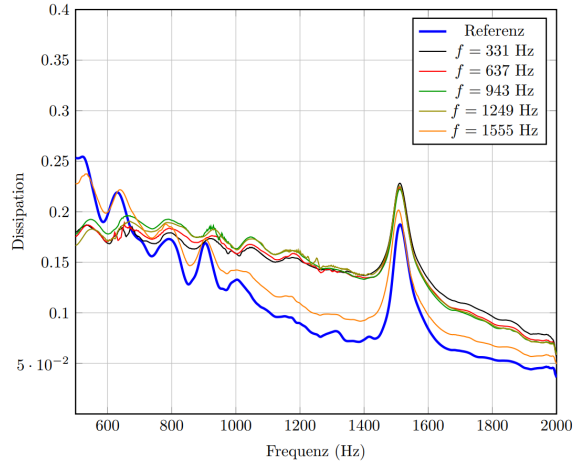
Variation der Aktuatorfrequenz bei konstanter Schallschnelle

Die Dissipation im Hauptkanal wird für eine Reihe verschiedener Aktuatorfrequenzen bei konstanter Schall-

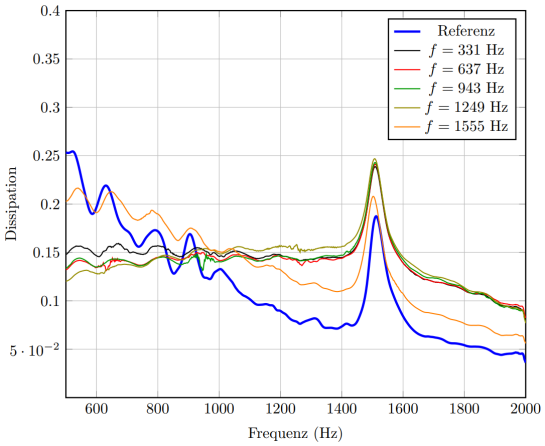
schnelle am Perforat ermittelt. Abbildungen 4a bis 4c zeigen jeweils die Dissipation einer Lochplatte für fünf verschiedene Aktuatorfrequenzen bei konstanten Schallschnellen von 5 m/s, 10 m/s und 15 m/s. Der in blau gezeichnete Graph zeigt die Platte im undurchströmten Zustand und wird im Folgenden als Referenz bezeichnet. Der Peak bei 1513 Hz resultiert vermutlich aus der akustischen Anregung einer Eigenresonanz der Linerplatte. Im Vergleich zur Referenz zeigt die Dissipation bei periodischer Durchströmung im gesamten betrachteten Frequenzbereich eine leichte Erhöhung. Dabei verläuft die Dissipation für alle Aktuatorfrequenzen identisch. Lediglich die Dissipation bei der Aktuatorfrequenz 1555 Hz ist geringer und im Vergleich zur Referenz kaum verändert. Bei Verdopplung der Schallschnelle im Perforat erhöht sich die Dissipation im Vergleich zur Referenz weiter, wie in Abb. 4b zu sehen ist. Zu den hohen Frequenzen wird die Dissipation breitbandiger und sinkt zu den tiefen Frequenzen ab. Auch hier zeigen alle Aktuatorfrequenzen bis auf $f = 1555\,\text{Hz}$ eine identische Dissipation. Wird die periodische Durchströmung auf 15 m/s erhöht, setzt sich der Trend fort: Die Dissipation wird breitbandiger und fällt zu den tieferen Frequenzen hin ab.



(a) $\hat{u}_p = 5\,\text{m/s}$



(b) $\hat{u}_p = 10\,\text{m/s}$



(c) $\hat{u}_p = 15\,\text{m/s}$

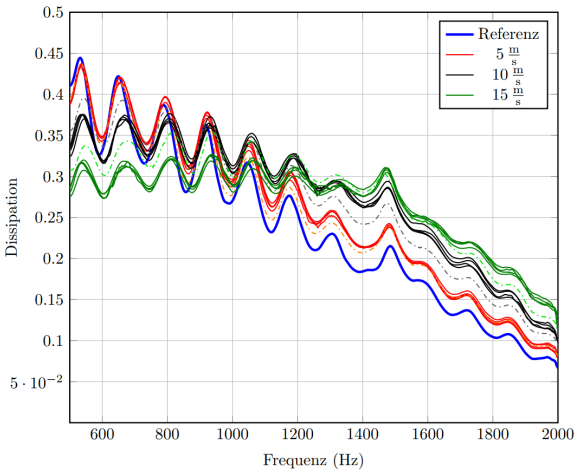
Abbildung 4: Dissipation einer Lochplatte mit $\sigma = 1.03\,\%$, $d = 1.5\,\text{mm}$ und $h = 1\,\text{mm}$ bei Anregung einer periodischen Durchströmung mit verschiedenen Aktuatorfrequenzen im Vergleich zum Referenzfall ohne Durchströmung

Dissipationsverhalten bei Variation der Porosität und des Lochdurchmessers

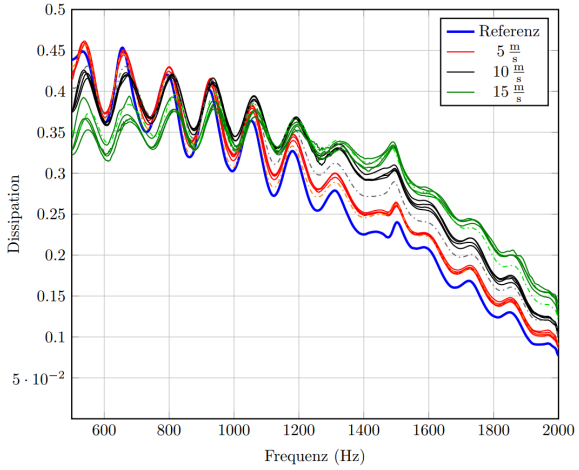
Abbildungen 5a bis 5c fassen die Dissipationsverläufe aller Messpunkte zusammen: Gleichfarbig dargestellt sind die Verläufe der Dissipation bei den verschiedenen Aktuatorfrequenzen gleicher Schallschnelle. Die Dissipation bei der Aktuatorfrequenz von 1555 Hz ist jeweils als gestrichelte Linie dargestellt. Wie die Abbildungen zeigen ändert sich das grundsätzliche Dissipationsverhalten bei Variation der Porosität und des Lochdurchmessers d bei konstanter Plattendicke $h = 1\,\text{mm}$ nicht: Bei steigender Durchströmung wird die Dissipation breitbandiger und verläuft für alle Aktuatorfrequenzen gleich. Außerdem zu erkennen ist, dass die Resonanz der Platte bei 1513 Hz mit steigender Porosität geringer wird und sich auch das Dissipationsverhalten bei der Aktuatorfrequenz von 1555 Hz den restlichen Werten annähert. Unabhängig von der Durchströmung nimmt die Dissipation mit wachsender Porosität zu.

Diskussion und Ausblick

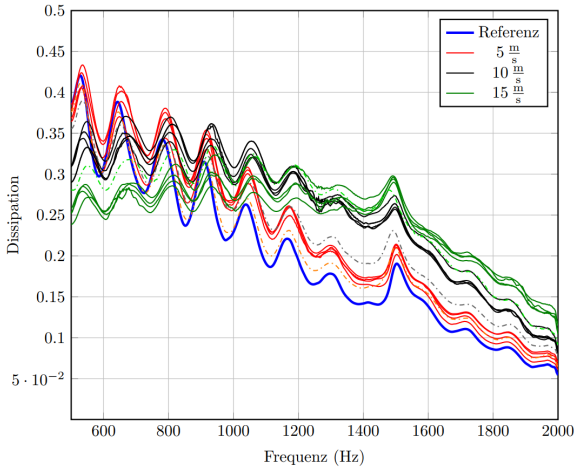
Die Ergebnisse zeigen die Unabhängigkeit der Dissipation einer periodisch durchströmten Lochplatte von der Aktuatorfrequenz. Bei der Aktuatorfrequenz von 1555 Hz zeigt sich ein vergleichsweise geringerer Dissipationszuwachs. Der Grund ist vermutlich, dass die Aktuatorfrequenz im Bereich einer Eigenfrequenz der Lochplatte liegt und somit die Schallenergie eine Schwingung der Platte auslöst. Dies wird dadurch gestützt, dass sich das Dissipationsverhalten bei der Aktuatorfrequenz von 1555 Hz mit steigender Porosität der übrigen Kurvenschar annähert, während der Peak im Dissipationsverlauf, ausgelöst durch die Plattenresonanz, stetig abnimmt, wie in Abb. 5b ersichtlich ist. Ferner bleibt das grundsätzliche Dissipationsverhalten bei Variation der Porosität und des Lochdurchmessers der Platten über alle Frequenzen hinweg konstant: Die Dissipation wird mit zunehmender Durchströmung in gleichem Maße für al-



(a) $\sigma = 4.09\,\%$, $d = 1.5\,\mathrm{mm}$



(b) $\sigma = 6.18\,\%$, $d = 1.5\,\mathrm{mm}$



(c) $\sigma = 4.09\,\%$, $d = 2.5\,\mathrm{mm}$

Abbildung 5: Vergleich der Dissipation von Lochplatten mit unterschiedlichen geomoetrischen Eigenschaften

le Aktuatorfrequenzen breitbandiger. Daraus folgt, dass die Dissipation bei periodischer Durchströmung lediglich von der Schallschnelle abhängt und eine Unabhängigkeit von der Aktuatorfrequenz und somit auch von der Teilchenauslenkung aufweist. Sektion 3 zeigt trotz des reflexionsarmen Abschlusses ein ausgeprägtes Resonanzverhalten in Form eines $\lambda/4$-Resonators. Die Resonanzen steigen mit der Porosität. In den von Resonanzeffekten dominierten Frequenzbereichen bewirkt die periodische Durchströmung eine Verschlechterung der Absorption im Vergleich zum undurchströmten Fall.

In zukünftigen Studien werden die Einflüsse der Resonanzeffekte, bedingt durch das an die Platte anschließende Volumen, sowie der vibroakustischen Kopplungen der Liner-Platten mit dem Schallfeld auf die periodische Durchströmung untersucht. Neben dem Lochdurchmesser und der Porosität muss ausserdem der Einfluss der Plattendicke auf das Dissipationsverhalten untersucht werden. Anschließend werden Experimente zur Bestimmung der Impedanz von periodisch durchströmten Linern durchgeführt, die schlussendlich der Modellierung des Effektes dienen sollen.

Danksagung

Diese Studie wurde durch das Projekt ARTEM (Aircraft noise Reduction Technolgies and related Environmental iMpact) im Rahmen des Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsprograms (Grant agreement ID: 769350) gefördert.

Literatur

[1] Bechert, D. W., Michel, U., and Pfizenmaier, E.: Experiments on the transmission of sound through jets. AIAA Journal (1978), Vol. 16, No. 9.

[2] Lahiri, C.: Acoustic performance of bias flow liners in gas turbine combustors (2014). Technische Universität Berlin.

[3] Ingard U. & Labate S.:Acoustic circulation effects and the nonlinear impedance of orifices: The Journal of the Acoustical Society of America (1950), Vol. 22, No. 211.

[4] Ingard, U. & Ising, H.: Acoustic Nonlinearity of an Orifice. The Journal of the Acoustical Society of America (1967), Vol. 42, No. 6.

[5] Heuwinkel, C., Enghardt, L. & Röhle, I.: Concept and Experimental Investigation of a Zero Mass Flow Liner. 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference) (2008).

[6] Dokumaci, E.: Sound transmission in narrow pipes with superimposed uniform mean flow and acoustics modelling of automobile catalytic converters. Journal of Sound and Vibration (1995), Vol. 182, No. 5.