Design von Schalldämpfern – der Weg vom CAD-Modell zum Prototypen

Friedrich Bake, Karsten Knobloch, Anita Schulz, Ralf Burgmayer, Wolfram Hage, Sebastian Kruck, Larisa Grizewski und Lars Enghardt

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Triebwerksakustik, 10623 Berlin, E-Mail: friedrich.bake@dlr.de

Einleitung

Bei der Entwicklung und Auslegung von Schalldämpfern in Flugtriebwerken, auch Liner genannt, spielt die experimentelle Untersuchung und Verifizierung der Auslegung in Strömungskanälen eine entscheidende Rolle. Dies gilt insbesondere für innovative Linerkonzepte mit zum Teil komplexen inneren Strukturen, die durch moderne additive Fertigungsverfahren (z.B. 3D-Druck) in den Fokus der Forschung und Entwicklung rücken.

Zum Vergleich der weltweit existierenden Untersuchungseinrichtungen für überströmte Liner hat das *International Forum for Aviation Research (IFAR)* eine Benchmark-Aktivität, koordiniert von der NASA, initiiert. Ausgehend von den gleichen digitalen Geometriedaten (CAD) war dabei durch jeden teilnehmenden Partner die Fertigung zu realisieren sowie die akustische Charakterisierung verschiedener Linertestobjekte vorzunehmen, um das Ergebnis dieser Prozesse miteinander vergleichen und bewerten können.

Im Rahmen dieses Beitrags werden die Ergebnisse der entsprechenden Untersuchungen vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) vorgestellt. Hierzu wurden die 3D-gedruckten Liner zunächst in dem Liner-Strömungskanal DUct aCoustic Testrig - Rectangular (DUCT-R) beim DLR Berlin hinsichtlich ihres Dissipationsverhaltens bei verschiedenen Strömungsmachzahlen vermessen. In einem weiteren Schritt wurden über Mikrofone innerhalb der Linersektion die axialen Wellenzahlen der sich über dem Liner ausbreitenden, akustischen Moden bestimmt. Aus diesen Wellenzahlen wurde über verschiedene - meist inverse - Verfahren die Impedanz der Lineroberfläche berechnet. Da diese Impedanz eine auch von der Überströmung abhängige Linereigenschaft darstellt, ist sie ein zentraler Bestandteil des Vergleichs der verschiedenen Mess- und Auswerteverfahren. In dieser Arbeit werden die DLR-Ergebnisse mit den Ergebnissen der NASA verglichen.

Liner-Entwicklungsprozess

Der grundsätzliche Ablauf bei der Entwicklung von Linern ist in Abbildung 1 dargestellt. Zunächst wurde basierend auf semi-empirischen Linerimpedanzmodellen eine Vorauslegung hinsichtlich der geometrischen Eigenschaften des Liners (Linertiefe, Kammergröße, Deckschichtperforation,…) vorgenommen. Dabei bestimmen die genannten geometrischen und strömungsmechanischen Parameter die optimale Impedanz für das zu dämpfende Schallfeld.

Mit Hilfe von additiven Fertigungsverfahren (3D-Druck) wurden entsprechende Testobjekte für die Untersuchung im Strömungskanal hergestellt.

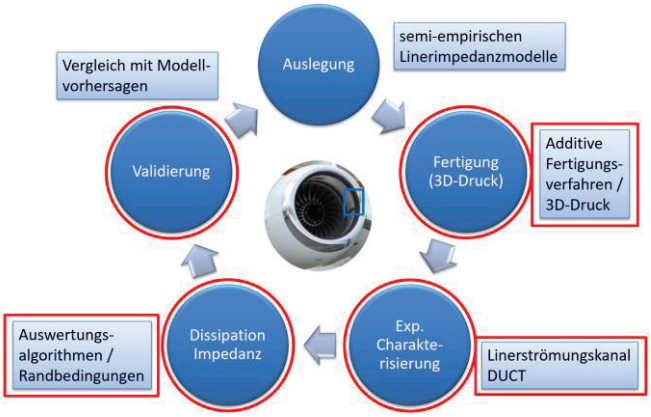

Abbildung 1: Iterativer Entwicklungsprozess für schalldämpfende Wandelemente (Liner). Rote Umrahmung kennzeichnet die in dieser Arbeit durchgeführten Schritte.

Die experimentelle Charakterisierung ermöglicht unter Einsatz verschiedener Auswertungsalgorithmen die Erfassung der Dämpfungseigenschaften (Dissipation) des Linertestobjekts sowie in weiteren Schritten die Bestimmung der Impedanz des Liners.

Schließlich wird über den Vergleich mit den ursprünglichen Modeldaten eine Validierung durchgeführt und bei Bedarf der in Abbildung 1 abgebildete Entwicklungsprozess iterativ wiederholt.

In dem hier vorgestellten Beispiel liegt, wie in Abbildung 1 durch rote Umrahmungen hervorgehoben, der Fokus primär auf der Fertigung eines vorgegebenen Linerdesigns mittels 3D-Druck und der experimentellen Charakterisierung. Die Validierung erfolgt in diesem Fall durch den Vergleich mit entsprechenden Ergebnissen von weiteren Benchmarkpartnern, hier der NASA.

Linergeometrie und additive Fertigung

Die Linergeometrie wurde von der NASA als CAD-Datensatz vorgegeben. Es handelt sich um einen Single-Degree-of-Freedom (SDOF) Resonatorliner unterteilt in einzelnen Kavitäten mit einem Querschnitt von 10,2mm x 10,2mm und einer Tiefe von 50,8mm. Die Anzahl dieser Kavitäten beträgt 30 in axialer (Kanal-) Richtung und 4 in lateraler Richtung. Die Deckschicht des Liners ist perforiert mit einer Porosität von etwa 12%. Weitere geometrische Parameter sind in Tabelle 1 aufgelistet. Erste Messungen an diesen Linerkonfigurationen wurden von der NASA in Jones et al. [1] veröffentlicht.

Tabelle 1: Linergeometrieparameter.

Loch-durch-messer	Deck-schicht-dicke	Porosität	Liner-kammer-tiefe	Rück-wand-dicke	Aktive Liner-länge
1,1mm	0,8mm	12%	50,8mm	3,8mm	406,4mm

Das gesamte Linersample wurde mit Hilfe von 3D-Druck mit lichtaushärtendem Photopolymer-Harz in drei Segmenten gefertigt. Abbildung 2 (links) zeigt eines dieser Segmente während der Fertigung. Der Einbau des gesamten Linersamples im akustischen Strömungskanal ist in Abbildung 2 (rechts) zu sehen. Das Linersample deckt hierbei mit 60mm Breite die gesamte Kanalwand ab.

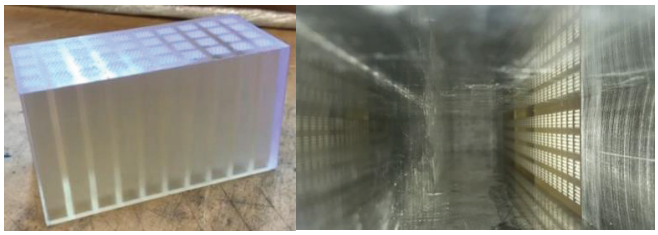

Abbildung 2: Additiv gefertigtes Linersegment (links) und Einbau des kompletten Testobjekts im Liner-Strömungskanal (rechts).

Liner-Strömungskanal

Die experimentellen Untersuchungen wurden an dem Liner-Strömungskanal DUCT-R beim DLR Berlin durchgeführt (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Dieser Kanal hat einen Querschnitt von 60mm x 80mm und kann mit einer Strömungsmachzahl von maximal $M = 0{,}3$ (auf der zentralen Achse) betrieben werden. Der Kanal mit einem symmetrischen Aufbau wird von jeweils zwei Lautsprechern an dem stromaufseitigen oder stromabseitigen Ende der Messsektion akustisch angeregt. Insgesamt wurden bei dieser Untersuchung 40 Mikrofone eingesetzt, von denen 26 in der Linersektion gegenüber der Linerwand (Face-to-Face, FTF) und 14 in den schallharten Kanalsektionen installiert waren.

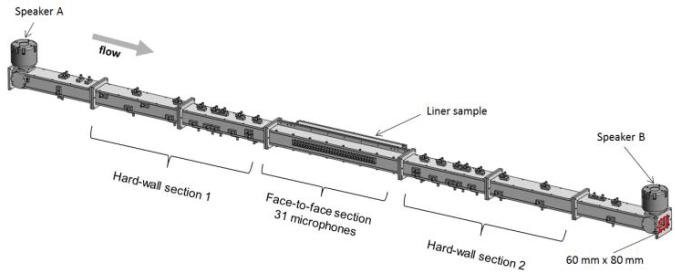

Abbildung 3: Skizze des DLR DUCT-R Strömungskanals für Lineruntersuchungen mit symmetrischem Aufbau.

Für die hier vorgestellte Linerkonfiguration wurden insgesamt drei Strömungsfälle (ohne Strömung, $M = 0{,}1$ und $M = 0{,}3$) untersucht.

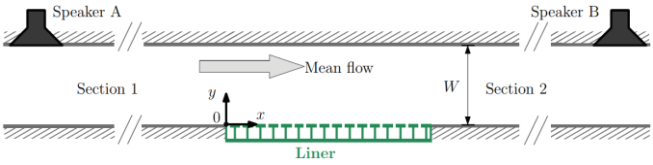

Abbildung 4: Schnittskizze durch die Linersektion im Strömungskanal.

Datenanalyse und Ergebnisse

Im ersten Schritt wurden die Streukoeffizienten (Reflexion und Transmission) des gesamten Linersegments aus den Mikrofonmessungen in den Messsektionen stromauf und stromab der Linersektion bestimmt. Daraus wurden wiederrum unter Berücksichtigung des Strömungseinflusses die energetischen Dissipationskoeffizienten mit (Δ_{1-2}) und gegen (Δ_{2-1}) die Strömung berechnet. Eine genauere Beschreibung dieser Streukoeffizienten ist zum Beispiel in Lahiri et al. [2] erklärt.

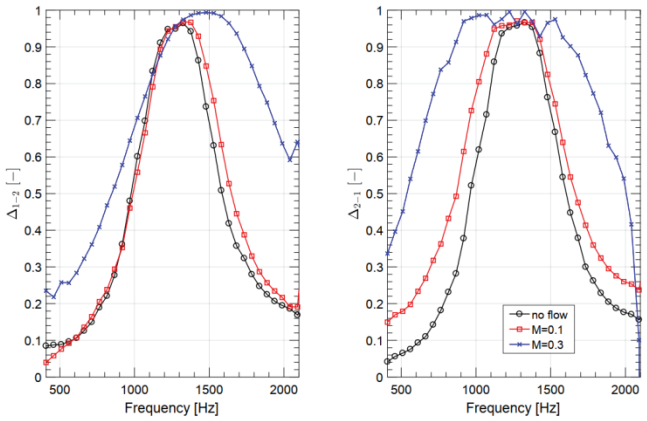

Abbildung 5: Dissipationskoeffizienten des Linerobjekts in Strömungsrichtung (links; Δ_{1-2}) und entgegen der Strömungs-richtung (rechts; Δ_{2-1}). Schwarz: ohne Strömung; rot: $M = 0{,}1$; blau: $M = 0{,}3$.

Die so bestimmten Dissipationskoeffizienten sind als Funktion der Frequenz in Abbildung 5 links mit der Strömung und rechts entgegen der Strömung dargestellt. Der Fall ohne Strömung wird durch die schwarzen Linien, der Fall mit einer Machzahl von M = 0,1 durch die roten Linien und der Fall mit M = 0,3 durch die blauen Linien beschrieben. Die Kurven zeigen ein, für SDOF-Liner typisches, ausgeprägtes Dissipationsmaximum bei der Linerresonanzfrequenz um 1300Hz (ohne Strömung). Diese Resonanz entspricht der λ/4-Resonanz basierend auf der Linerkavitätstiefe. Mit steigender Machzahl ist der Strömungseinfluss durch eine Verbreiterung des Dissipationsmaximums (siehe rote und blaue Kurven in Abbildung 5) zu erkennen. Außerdem verschiebt sich erwartungsgemäß das Dissipationsmaximum in Strömungsrichtung zu höheren und entgegen der Strömungsrichtung zu niedrigeren Frequenzen.

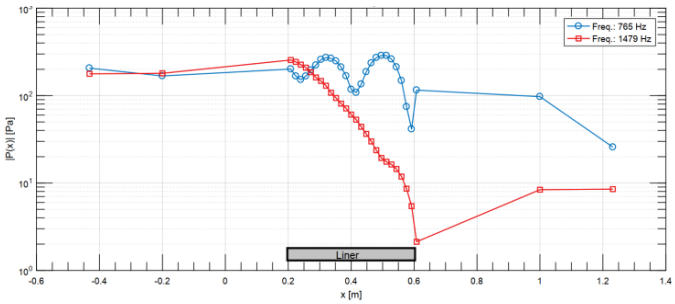

Abbildung 6: Verlauf der Schalldruckamplituden in axialer Kanalrichtung bei $\boldsymbol{M = 0{,}3}$ und stromaufseitiger Anregung; rot: 1479Hz (in etwa Dissipationsmaximum); blau: 765Hz (geringere Dissipation).

Für die weitergehende Bestimmung der Wandimpedanz werden zunächst die axialen Schalldruckverläufe in der Linersektion des Kanals betrachtet. Abbildung 6 zeigt hierzu beispielhaft die Schalldruckamplituden an den jeweiligen Mikrofonpositionen bei $M = 0{,}3$ für zwei Frequenzen. Bei

der Frequenz von 1479Hz (rote Linie in Abbildung 6), die in etwa das Dissipationsmaximum erfasst, ist ein deutlicher Abfall der Schalldruckamplitude in axialer Kanalrichtung über dem Linerelement (grau markierter Bereich in Abbildung 6) zu sehen. Die Anregung erfolgte hier von stromauf (Lautsprecher A). Bei der zweiten Frequenz von 765Hz (blaue Linie in Abbildung 6) mit deutlich geringerer Dissipation nimmt die Schalldruckamplitude weniger ab und das Schallfeld über dem Liner wird von einem Stehwellenfeld durch Reflexionen an den Übergängen von schallharter Kanalwand zur Lineroberfläche dominiert.

Als vergleichbare Größe innerhalb des Liner-Benchmarks wird die Liner-Wandimpedanz verwendet. Für die Bestimmung dieser Impedanz stehen verschiedene Verfahren, auch Impedanzeduktion genannt, zur Verfügung, die aus den gemessenen Schalldruckdaten an den Mikrofonpositionen die Impedanz extrahieren / eduzieren. Primär unterscheidet man hier zwischen nicht-moden-basierten Verfahren, die das Schallfeld als Ganzes betrachten und moden-basierten Verfahren, die das Schallfeld über dem Linersample zunächst in einzelne Moden mit entsprechenden axialen und wandnormalen Wellenzahlen zerlegen und dann damit die Impedanz bestimmen.

Bei letzteren Verfahren wird im einfachsten Fall die mit dem Ansatz $\tilde{p} = \hat{p}(y)\exp(-ikx)$ hergeleitete, eindimensionale konvektive Helmholtz Gleichung (CHE1D) verwendet:

$$\frac{d^2\hat{p}}{dy^2} + k_y^2\hat{p} = 0, \tag{1}$$

wobei $k_y^2 = k_0^2[(1 - M_{avg} * \Gamma)^2 - \Gamma^2]$ die (quadrierte) wandnormale Wellenzahl und $\Gamma = k/k_0$ die dimensionslose axiale Wellenzahl ist.

Unter Berücksichtigung der Ingard-Myers Randbedingung [3][4] lässt sich mit der Kanalhöhe H dann aus den Wellenzahlen die spezifische Wandimpedanz berechnen [5]:

$$\zeta = \frac{ik_0(1 - M_{avg} * \Gamma)^2}{k_y \tan(k_y H)}. \tag{2}$$

Die Bestimmung der (axialen) Wellenzahl erfolgt aus den Mikrofondaten in dem Kanalsegment mit Linerwand (FTF) mit Hilfe der Kumaresan-Tufts (KT) [6] und der Matrix Pencil (MP) [7] Methode.

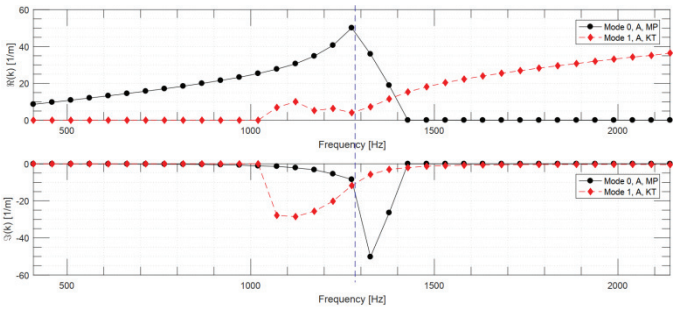

Abbildung 7: Beispiel für extrahierte axiale Wellenzahlen $\boldsymbol{k}$ in der Linersektion für den Fall ohne Strömung (oben: Realteil; unten: Imaginärteil) für zwei verschiedene Moden: „Mode 0“: schwarze Kreise; „Mode 1“: rote Kreise.

Beispielhaft zeigt Abbildung 7 die damit über dem Liner extrahierten Wellenzahlen für den Fall ohne Strömung. Interessant ist hierbei das Phänomen des sog. „mode crossing“: Zwischen 1275Hz und 1326Hz, angezeigt durch die senkrechte, blaue gestrichelte Linie, ist die fundamentale Mode („Mode 0“, schwarze Kreise) nicht mehr die am wenigsten gedämpfte Mode. Dies wird dadurch deutlich, dass ab diesem Frequenzschritt der Betrag des Imaginärteils der Wellenzahl (unteres Diagramm in Abbildung 7) der Mode 0 (schwarz) größer wird als von Mode 1 (rot). Somit wird ab dieser Frequenz die Mode 1 am wenigsten gedämpft und ihre Wellenzahl wird zur Impedanzbestimmung verwendet.

Diese Methode und weitere verfügbare moden-basierten und nicht-moden-basierten Verfahren, die u.a. auch Einfluss-parameter wie z.B. Kanallängs- und Querschnitt, Scherströmungeinfuss sowie viskose und thermische Effekte berücksichtigen, sind detailliert bei Weng et al. [8][9] beschrieben.

Die entsprechend bestimmten Impedanzen (normiert mit der Schallgeschwindigkeit c_0 und der mittleren Dichte ρ) sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt. Die Resistanz, der Realteil der Impedanz, in Abbildung 8 zeigt in dem betrachteten Frequenzbereich von 400Hz bis 2100Hz einen relativ konstanten Verlauf, der mit steigender Machzahl zunimmt (rote Quadrate: ohne Strömung; blaue Kreise: $M = 0{,}1$ und schwarze Rauten: $M = 0{,}3$). Der Vergleich mit den Ergebnissen der NASA zeigt sowohl für den Fall ohne Strömung (grüne Dreiecke) als auch für den Fall mit $M = 0{,}3$ (braune Dreiecke) eine gute Übereinstimmung.

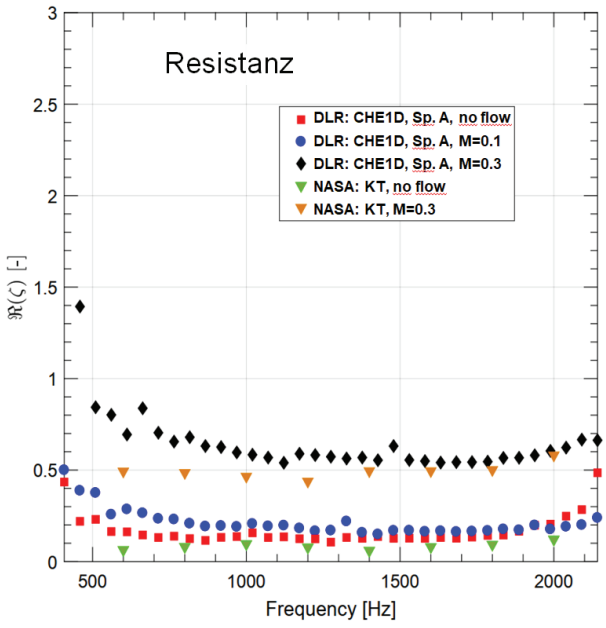

Abbildung 8: Normierte Resistanz (Realteil der Wandimpedanz) des Liners für verschiedene Strömungsfälle im Vergleich zu Ergebnissen der NASA ([1]).

Die Reaktanz, der Imaginärteil der Impedanz, hat in Abbildung 9 einen, für Resonatorliner typischen, über die Frequenz monoton ansteigenden Verlauf. Der Nulldurchgang markiert hierbei die Resonanzfrequenz des Liners. Vergleicht man den Fall ohne Strömung (rote

Quadrate in Abbildung 9) mit dem Fall bei einer Strömungsmachzahl von $M = 0{,}3$ (schwarze Rauten) ist eine leichte Erhöhung der Resonanzfrequenz zu erkennen, wie es auch schon bei den Dissipationskoeffizienten in Abbildung 5 deutlich wurde.

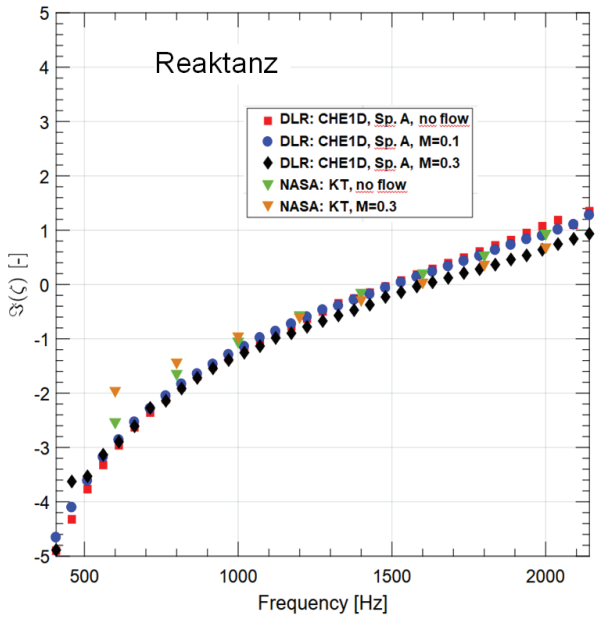

Abbildung 9: Normierte Reaktanz (Imaginärteil der Wandimpedanz) des Liners für verschiedene Strömungsfälle im Vergleich zu Ergebnissen der NASA ([1]).

Der jeweilige Vergleich mit den Ergebnissen der NASA-Untersuchungen (ohne Strömung: grüne Dreiecke; $M = 0{,}3$: braune Dreiecke) zeigt bis auf den Bereich von Frequenzen kleiner 1000Hz ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Unterhalb von 1000Hz zeigen die DLR-Auswertungen kleinere Reaktanzen als die von der NASA bestimmten Resultate.

Zusammenfassung und Ausblick

Zur Entwicklung und Auslegung von schalldämpfenden Wandauskleidungen, auch Liner genannt, wird zunehmend ein iterativer Designprozess genutzt. Sowohl in diesem Prozess als auch bei der späteren Fertigung spielen additive und schnell produzierende Fertigungsverfahren eine entscheidende Rolle. Ein vom *International Forum for Aviation Research (IFAR)* initiierter und von der *NASA* koordinierter Liner-Benchmark erlaubt hierbei den Vergleich von Linerfertigungs- und akustischen Charakterisierungsverfahren verschiedener Forschungseinrichtungen. Das DLR hat hierzu ein entsprechendes Liner-Testobjekt hergestellt und akustisch im DLR-Liner-Strömungskanal DUCT-R untersucht. Neben den akustischen Streukoeffizienten (Reflexion, Transmission, Dissipation) ist hierbei die Bestimmung der axialen Wellenzahl in der Linersektion über die axialen Schalldruckverläufe ein wichtiges Element. Darauf aufbauend wurden u.a. mit einem eindimensionalen Helmholtzgleichungsansatz (CHE1D) die Liner-Wand-Impedanzen bestimmt und erfolgreich mit den Ergebnissen der NASA verglichen.

Danksagung

Die Autoren danken Michael G. Jones vom *NASA Langley Research Center* für die Organisation und Unterstützung des Liner Benchmark vom *International Forum for Aviation Research (IFAR)*.

Literatur

[1] Jones, M., Watson, W., Nark, D., and Howerton, B., "Impedance Eduction for Multisegment Liners," *24rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, No. 2018-3441, Atlanta, Georgia, USA, June 2018.

[2] Lahiri, C., Sadig, S., Gerendas, M., Enghardt, L., and Bake, F., "Establishment Of A High Quality Database For The Modelling Of Perforated Liners," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 133, No. 9, September 2011, pp. 091503–1 – 091503–9.

[3] Ingard, U., "Influence of Fluid Motion Past a Plane Boundary on Sound Reflection, Absorption, and Transmission," The *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 31, No. 7, 1959, pp. 1035–1036.

[4] Myers, M. K., "On the acoustic boundary condition in the presence of flow," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 71, No. 3, 1980, pp. 429–434.

[5] Jing, X., Peng, S., and Sun, X., "A straightforward method for wall impedance eduction in a flow duct," The *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 124, No. 1, 2008, pp. 227–234.

[6] Kumaresan, R. and Tufts, D., "Estimating the parameters of exponentially damped sinusoids and pole-zero modeling in noise," *IEEE Transactions on Acoustics*, Speech, and Signal Processing, Vol. 30, No. 6, Dec 1982, pp. 833–840.

[7] Hua, Y. and Sarkar, T. K., "Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise," *IEEE Transactions on Acoustics*, Speech, and Signal Processing, Vol. 38, No. 5, May 1990, pp. 814–824.

[8] Weng, C., Schulz, A., Ronneberger, D., Enghardt, L., and Bake, F., "Impedance eduction in the presence of turbulent shear flow using the linearized Navier-Stokes equations," *23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference,* 5 - 9 June 2017, Denver, CO, No. AIAA 2017-3182, 2017.

[9] Weng, C., Enghardt, L., and Bake, F., "Comparison of non-modal-based and modal-based impedance eduction techniques," *24th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, No. 2018-3773, Atlanta, Georgia, USA, June 2018.