Schalldruckmessungen mittels tomografischer laser-interferometrischer Vibrometrie

Larisa Grizewski[1], Oliver Rothkamm[2], Johannes Gürtler[2], Friedrich Bake[3], Jürgen Czarske[2], Lars Enghardt[3]

[1] *TU Berlin, FG Turbomaschinen- und Thermoakustik, 10623 Berlin, E-Mail: larisa.grizewski@tu-berlin.de*

[2] *TU Dresden, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik, 01069 Dresden*

[3] *Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Abt. Triebwerksakustik, 10623 Berlin*

Einleitung

Liner werden als passive Schallabsorber zur Reduktion der Lärmemissionen von Flugzeugtriebwerken eingesetzt. Diese Schallabsorber bestehen in der Regel aus perforierter Wandauskleidung mit dahinterliegenden Hohlräumen. Liner werden an unterschiedlichen Orten eines Triebwerks verbaut, z. B. als Auskleidung im Einlauf, aber auch im Nebenstromkanal, im Düsenbereich und in etwas anderer Bauform auch in der Brennkammer.

Die Charakterisierung dieser Liner und damit die Beschreibung des akustischen Verhaltens an solcher perforierten Oberfläche erfolgt mittels der komplexen Schallimpedanz Z:

$$Z = \frac{\underline{p}}{\underline{v_s}} \tag{1}$$

Diese ergibt sich als Quotient aus dem komplexwertigen Schalldruck $\underline{p}$ und der wandnormalen Komponente der Schallschnelle $\underline{v_s}$. Die Bestimmung der Impedanz erfolgt in der Regel experimentell im Kundtschen Rohr oder in speziellen Akustik-Windkanälen mit Überströmung. Die Impedanz wird dabei in den meisten Fällen indirekt mittels Schalldruckmessungen gegenüber der absorbierenden Wand oder aber in den schallharten Kanalabschnitten vor und hinter dem Liner und anschließender Eduktion über die Anpassung von Modellparametern an die gemessenen Schalldruckwerte ermittelt. Damit kann eine globale Impedanz der gesamten Lineroberfläche bestimmt werden, die lokalen physikalischen Phänomene an den Perforationen werden aber nicht abgebildet und konnten bisher nur unzureichend messtechnisch erfasst werden. Auch die Auslegung und Optimierung der Liner basiert nach wie vor weitgehend auf heuristischen Methoden und experimenteller Validierung und ist daher Gegenstand intensiver Forschung.

Möchte man aber die Effizienz der Liner erhöhen oder neuartige Linerkonzepte wie z. B. Liner mit verteilter Impedanz zielgerichtet entwickeln, ist es wichtig auch die lokalen Phänomene und aeroakustischen Wechselwirkungen an den Perforationen selbst besser zu verstehen. An dieser Stelle sind innovative Messverfahren mit hoher Dynamik und Auflösung und der Möglichkeit der nicht invasiven Erfassung von Schalldruck und Schallschnelle und damit der lokalen Impedanz über der Lineroberfläche erforderlich. Solch ein Messverfahren wird derzeit an der TU Dresden gemeinsam mit der TU Berlin entwickelt.

Im ersten Schritt wurden Messungen an einer Lineroberfläche bei senkrechtem Schalleinfall (ohne Überströmung) durchgeführt und dabei die Druckverteilung über der Lineroberfläche mit einer räumlichen Auflösung im Mikrometer-Bereich bestimmt.

Experimentelles Vorgehen

Optisches Messverfahren

Das Verfahren der kamerabasierten laser-interferometrischen Vibrometrie (KLIV) beruht im Grunde auf der Laser Doppler Vibrometrie (LDV). In der Abbildung 1 ist der prinzipielle Aufbau des optischen Messsystems gezeigt.

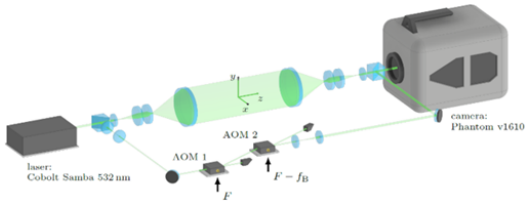

Abbildung 1: Prinzipdarstellung des optischen Messaufbaus. Laser: $\lambda = 532$nm, Kamera: 64x1024 Pixel, f_B: 30 kHz, field of view: 2x30 mm, frame rate: 120 kHz. Quelle: [1]

Ein Laserstrahl wird in einen Mess- und einen Referenzstrahl aufgeteilt und die Frequenz des Referenzstrahls durch einen Modulator um die Trägerfrequenz f_B verschoben. Der Messstrahl durchquert ein akustisch aktives Messvolumen. Schließlich werden beide Strahlteile auf dem Kamerasensor interferometrisch überlagert.

Die Schallwelle verursacht eine Dichteänderung im Messvolumen, die über die Gladstone-Dale-Konstante G mit dem Brechungsindex n verknüpft ist:

$$n - 1 = G\rho \tag{2}$$

Durchquert also ein Laserstrahl ein akustisch aktives Volumen, so verursacht die Dichteänderung eine schallinduzierte Änderung des Brechungsindexes und damit eine Phasenverschiebung der Lichtwelle als Funktion der Schalldruckänderung integral entlang des Laserstrahls. Auf dem Sensor wird somit ein oszillierendes Intensitätssignal detektiert, dessen Frequenz von der Änderung der Dichte im Messvolumen abhängt. Mithilfe der Gladstone-Dale Konstante G und dem Zusammenhang zwischen Druck, Dichte und Brechungsindex kann schließlich ein Zusammenhang zwischen der Änderung der instantanen Frequenz des Lichts und dem Linienintegral des Schalldruckes abgeleitet werden:

$$\Delta f_I(t) \sim \int_l \dot{p}(z,t)dz \tag{3}$$

Als Ergebnis erhält man damit eine über die Weglänge des Laserstrahls aufsummierte Schalldruckschwankung. Diese Messung wird auch als Projektionsmessung bezeichnet und ist in der Abbildung 2 schematisch dargestellt. Die Erweiterung der klassischen LDV ist die flächenhafte Messung von mehreren solchen Projektionen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera. Das Messvolumen wird gescannt, indem mehrere laterale Positionen x' und für jede Position ein Winkelbereich von mindestens 180° vermessen wird. Die Rekonstruktion des lokalen Schallfeldes für einen Punkt im Messvolumen erfolgt durch einen tomografischen Algorithmus, die gefilterte inverse Radon-Transformation.

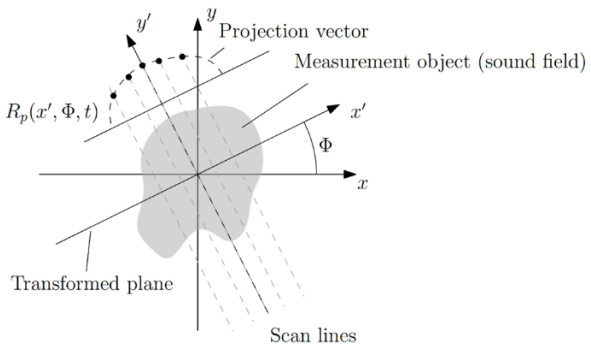

Abbildung 2: Prinzip der Radon-Transformation. Quelle: [1]

Außerdem wird durch die Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera als Detektor das Messprinzip auf ein Volumen erweitert. Das Ergebnis jeder Projektionsmessung ist ein Bild, wobei jedes einzelne Pixel der Kamera einer simultanen Projektionsmessung entspricht.

Bei der Messung sind bestimmte Voraussetzungen zu erfüllen. So muss das zu messende Feld in einem Winkelbereich mit hoher Winkelauflösung gescannt werden sowie stationär und räumlich abgeschlossen sein. Können die Voraussetzungen nicht bzw. nur teilweise erfüllt werden, kann dies zu Aliasing-Effekten in der Rekonstruktion und in der Folge zu Artefakten in den Druckwerten führen.

Akustischer Messaufbau

Zunächst wurden von der TU Dresden Messungen in einem einfachen Kundtschen Rohr durchgeführt, siehe Abbildung 3. Es wurde ein Plexiglasrohr mit bekannten optischen Eigenschaften verwendet. Die Verwendung eines Zylinders als Kanal ermöglichte einen uneingeschränkten optischen Zugang von 360°.

Die Schallanregung erfolgte mittels eines Lautsprechers. Diesem gegenüber wurde ein Liner positioniert. Der Liner selbst besteht aus einer Deckplatte mit verteilten runden Öffnungen, verklebt mit einer Wabenstruktur und einer abschließenden, schallharten Rückplatte. Der Durchmesser der Löcher beträgt 2 mm, die Lochtiefe 0,5 mm und die Tiefe der Kavitäten 40 mm. Die Resonanzfrequenz des Liners liegt bei ca. 1480 Hz.

Messdurchführung

Die optische Messtechnik wurde um den akustischen Kanal aufgebaut, sodass der Messstrahl des Lasers durch

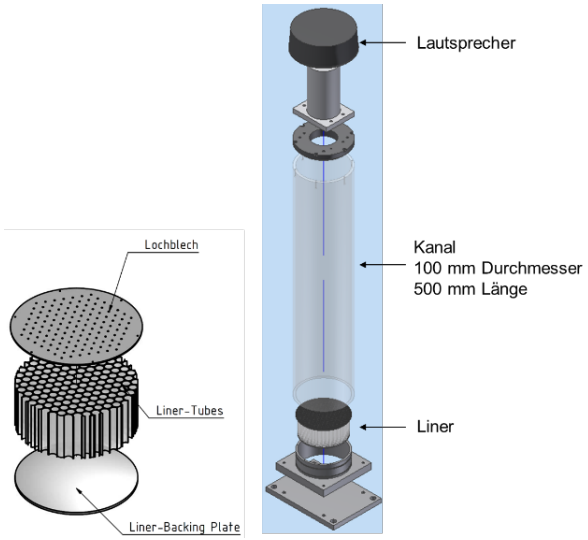

Abbildung 3: Akustischer Messaufbau. Plexiglasrohr mit einer Länge von 500 mm und einem Durchmesser von 100 mm. Senkrechter Schalleinfall.

das Rohr strahlt. Der Laser und die Kamera konnten lateral verfahren und das Schallfeld über dem Liner so abgetastet werden. Der akustische Aufbau wurde auf einem Rotationstisch aufgebaut, sodass für jede laterale Position ein Winkelbereich von 180° abgetastet werden konnte. Die Ortsauflösung beträgt 32,6 μm. Es wurden 16 Ebenen in die Höhe über der Lineroberfläche vermessen. Die Winkelauflösung beträgt 0,1°.

Aufgrund der hexagonalen Symmetrie des hier genutzten Liner-Segments, wurde ein eingeschränkter Winkelbereich von nur 30° abgescannt und die Rekonstruktion unter der Annahme der Symmetrie durchgeführt. Neben dem Winkelscan erfolgte zudem ein lateraler Scan in drei Schritten, um den gesamten Zylinderinnenraum zu erfassen.

Messergebnisse

In der Abbildung 4 ist das Ergebnis der Messungen mit anschließender Rekonstruktion des lokalen Schalldruckfeldes in 0,07 mm Höhe über der Lineroberfläche dargestellt.

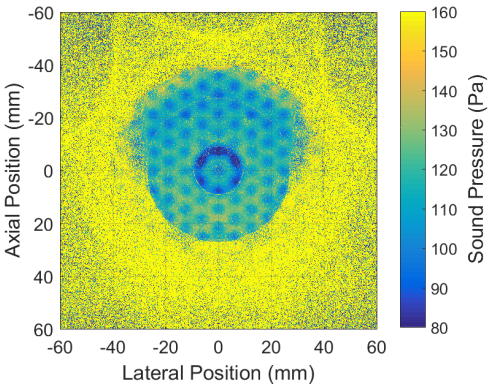

Abbildung 4: Rekonstruierte Schalldruckfeld 0,07 mm über der Lineroberfläche. Draufsicht auf den Liner. Dargestellt ist die Schalldruckamplitude in Pa.

Bereits hier ist der Druckabfall in den Löchern des Liners erkennbar. Bei einem senkrechten Schalleinfall auf eine schallharte Wand, wie die Bereiche zwischen den Löchern, würde die Welle an der Wand reflektieren und der Schalldruck an der Stelle wäre maximal. Dagegen wirken die Löcher selbst als „nachgiebige Wand“, die Schallschnelle an der Stelle ist nicht mehr gleich Null und der Druck fällt ab. Das Messergebnis erscheint also zunächst plausibel.

Man sieht aber auch, dass die Ergebnisse stark verrauscht sind und nur ein bestimmter Bereich auswertbar ist. Aufgrund des Messverfahrens und der Rekonstruktion ergeben sich Artefakte und stark verrauschte Bereiche, sodass ein Nachbearbeiten der Daten erforderlich ist. Das Ziel ist zunächst eine rein phänomenologische Untersuchung und die Prüfung der Ergebnisse auf Plausibilität.

Der Bereich außerhalb des Liners wurde abgeschnitten, da die Ergebnisse hier unphysikalisch sind. Außerdem sind in der Abbildung 5 die tatsächlichen Lochpositionen markiert. Die Positionen der Löcher werden in dem auswertbaren Bereich gut wiedergegeben.

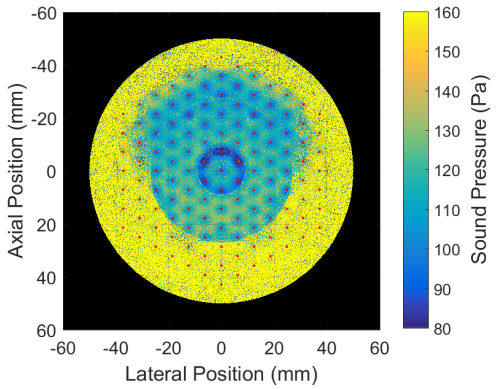

Abbildung 5: Rekonstruierte Schalldruckfeld 0,07 mm über der Lineroberfläche. Draufsicht auf den Liner. Linerausschnitt. Dargestellt ist die Schalldruckamplitude in Pa.

Im nächsten Schritt wurden einzelne Löcher jeder Ebene betrachtet (exemplarisch in der Abbildung 6) und die dazugehörigen Schalldruckverläufe über dem Radius aufgetragen (Abbildung 7). In der Abbildung 7 ist der Bereich des Loches mit dem Radius von 1 mm grau unterlegt.

Dabei fallen unterschiedliche Ausreißer wie einzelne Peaks, Rauschen, aber auch größere Bereiche mit deutlich überhöhten Schalldruckwerten auf, welche als unphysikalisch betrachtet werden.

Zur Verbesserung der Ergebnisse und Berücksichtigung der unterschiedlichen Arten der Störungen wurde eine Kombination aus mehreren Filtern angewendet. Hier wurde nacheinander der Hampel Filter, der Median Filter und ein gleitender Mittelwert verwendet (Abbildung 8). Die Daten wurden anschließend neu abgetastet, um eine Mittelung über mehrere Löcher zu ermöglichen.

An dieser Stelle wurden die Ergebnisse auf Plausibilität untersucht und eine Auswahl der Löcher getroffen, die für die weitere Analyse verwendet werden konnten. Löcher mit unphysikalischen Schalldruckverläufen, wie beispielhaft in der Abbildung 9 unten dargestellt ist, wurden aussortiert. Für die weiteren Untersuchungen wurden nur Löcher mit plausiblen Verläufen berücksichtigt wie in der Abbildung 9 oben dargestellt.

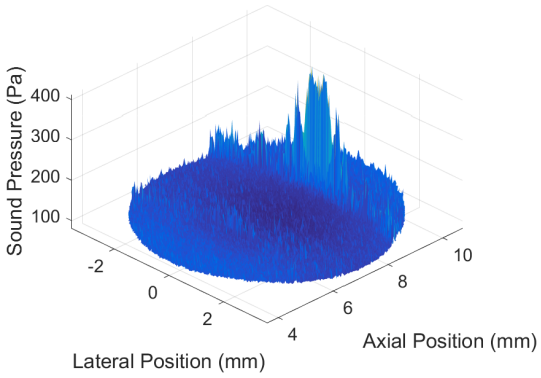

Abbildung 6: Schalldruckverlauf über einem Einzelloch. Ausschnitt der Darstellung in der Abbildung 4. Betrachtet wird der Bereich bis zum benachbarten Loch, Durchmesser des Betrachtungsausschnitts 7,16 mm.

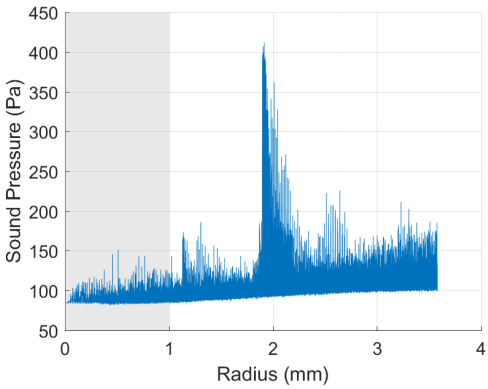

Abbildung 7: Über dem Radius aufgetragene Schalldruckamplituden. Der Bereich des Lochs ist grau unterlegt. Auffällig sind die überhöhten Schalldruckwerte im Bereich um 2 mm.

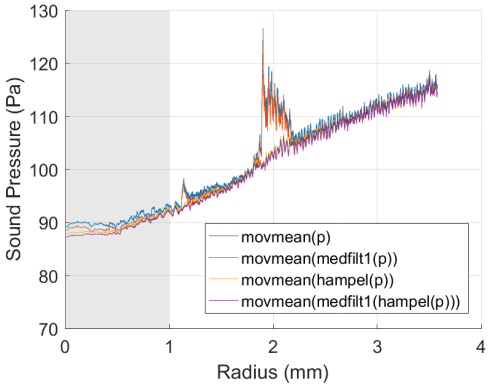

Abbildung 8: Filterung der Schalldruckdaten. Anwendung einer Kombination aus Hampel Filter, Median Filter und dem gleitenden Mittelwert.

Für jede Ebene in den verschiedenen Höhen über der

Lineroberfläche haben sich unterschiedlich viele Löcher ergeben, die in die Mittelung pro Ebene einbezogen werden können. In der Abbildung 10 sind beispielhaft für die Mittelung innerhalb der Ebene 2 (0,07 mm über dem Liner) ausgewählten Druckverläufe dargestellt. Bereits hier ist erkennbar, dass der Schalldruckverlauf von der Mitte des Loches nach außen hin steigt.

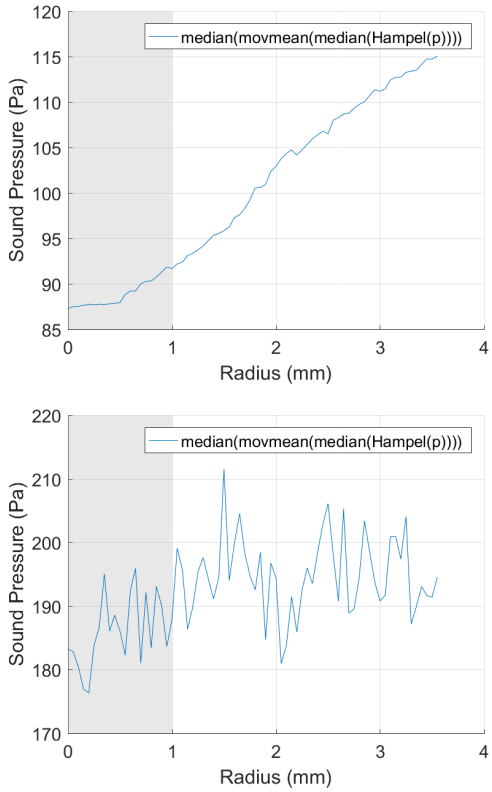

Abbildung 9: Unterschiedliche Schalldruckverläufe. Oben: plausibel, unten: unphysikalisch.

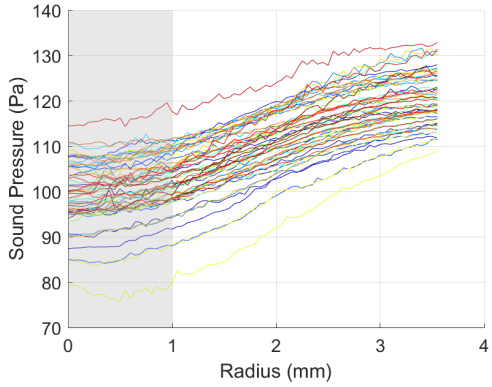

Abbildung 10: Schalldruckverläufe der ausgewählten Löcher einer einzigen Ebene (0,07mm über der Lineroberfläche).

Um einen Eindruck des mittleren Verlaufs zu bekommen wurden die Ergebnisse für jede einzelne Ebene über die ausgewählten Löcher gemittelt, um die Entwicklung der örtlichen Schalldruckverläufe mit der Höhe zu beurteilen. In der Abbildung 11 sind die mittleren Schalldruckverläufe der 16 Höhenebenen über dem Radius des Loches aufgetragen.

Man sieht, dass der Schalldruck über dem Radius ansteigt, wobei dieser Anstieg mit zunehmender Höhe flacher wird. Auch das Minimum in der Lochmitte steigt mit der Höhe über dem Liner. Obwohl der gesamte betrachtete Bereich lediglich 0,5 mm über dem Liner beträgt, ist dieser Effekt deutlich sichtbar.

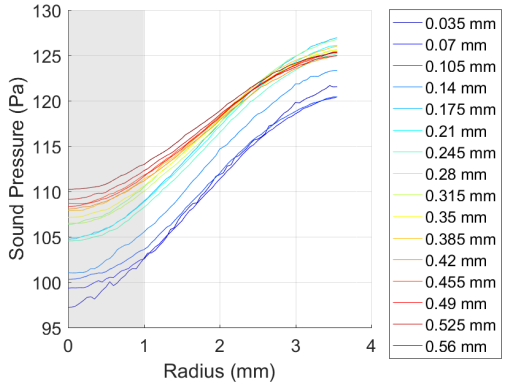

Abbildung 11: Entwicklung der örtlichen Schalldruckverläufe mit der Höhe über der Lineroberfläche.

Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit konnten erste ortsaufgelösten Schalldruckmessungen an einer Lineroberfläche mittels kamerabasierter laser-interferometrischer Vibrometrie gezeigt werden. Es haben sich zum Teil starke Störungen in den Ergebnissen gezeigt. Das Messverfahren ist sowohl in dem Messaufbau, in der Rekonstruktionsmethode als auch in der Datenverarbeitung herausfordernd. Es wurde ein Einfluss der Höhe über der Lineroberfläche auf die Ergebnisse festgestellt. Der Schalldruckabfall in dem Loch fällt mit steigender Höhe geringer aus. Die Ergebnisse sind qualitativ vielversprechend und eine Anwendung des Messverfahrens unter realistischeren Bedingungen erscheint sinnvoll.

Daher wurden bereits auch Messungen in dem akustischen Strömungskanal DUCT-R des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin durchgeführt. Hier konnte unter definierten akustischen Randbedingungen und mit Überströmung gemessen werden. Die Auswertung der Daten steht noch aus und wird in späteren Veröffentlichungen präsentiert. Außerdem ist geplant die Ergebnisse der Messkampagne mit numerischen Daten zu vergleichen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung des DFG-Projektes „Laserbasierte tomographische Messung der lokalen akustischen Impedanz von überströmten Linern (TOMLIM)“ (EN 797/8-1 und CZ 55/41-1), in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist.

Literatur

[1] Rothkamm, O.; Gürtler, J.; Czarske, J.; Kuschmierz, R.: Dense U-Net for Limited Angle Tomography of Sound Pressure Fields. Appl. Sci. 2021, 11, 4570. URL: `https://doi.org/10.3390/app11104570`