Andrés Eduardo Ramos Ruiz*, Johannes Gürtler, Robert Kuschmierz und Jürgen Czarske

Berührungslose Messung des lokalen Schalldrucks mittels Hochgeschwindigkeits-Holographie

Non-invasive measurement of the local sound pressure using high-speed holography

DOI 10.1515/teme-2018-0028

Zusammenfassung: Für die Lärmreduzierung von Flugzeugtriebwerken kommen perforierte Bleche mit dahinterliegender Kavität (sogenannte Liner) zum Einsatz. Das aeroakustische Dämpfungsprinzip dieser Elemente beruht auf der Wechselwirkung von Schall und Strömung. Bisherige physikalische Modelle der Dämpfungsprozesse erlauben jedoch nicht die notwendige Entwicklung effizienterer Liner, da die aeroakustische Wechselwirkung noch nicht vollständig verstanden ist. Daher ist die Kenntnis relevanter Größen, wie die lokale Schalldruckverteilung, entscheidend für das Verständnis der lokalen Dämpfungsprozesse. Dazu präsentieren wir ein kamerabasiertes Messsystem für die zweidimensionale nicht-invasive orts aufgelöste Schalldruckbestimmung.

Schlüsselwörter: Aeroakustik, Schalldämpfung, Kamera-Holographie.

Abstract: In order to reduce the noise emission from airplane turbines perforated sheet with a cavity behind it (so called liner). The dampening principle of these elements are based on the interaction between sound and flow. Current physical models of this aeroacoustical sound absorption do not allow the development of more efficient liners, since the aeroacoustic interaction has not been yet fully understood. Therefore all relevant factors, like the local sound field distribution, have to be measured to fully comprehend the local sound absorption processes. For this purpose we present with this work a camera-based measuring system for the two dimensional non-invasive

measurement of the local sound pressure with a high spatial resolution.

Keywords: Aeroacoustics, sound absorption, camera holography.

1 Einleitung

Die Lärmemission durch den zunehmenden Flugverkehr ist die drittgrößte Lärmquelle in Deutschland und die resultierende Umweltbelastung ist eines der wichtigsten Themen der europäischen Gesundheits- und Flugverkehrspolitik. Zum Schutz von Mensch und Umwelt sollen daher Lärmemissionen durch den Flugverkehr minimiert werden [2, 4]. Üblicherweise erfolgt diese Reduktion durch den Einsatz sogenannter *Liner*. Diese sind perforierte Wandauskleidungen mit dahinterliegender Kavität, wodurch ein akustisch dämpfender Resonanzeffekt hervorgerufen werden kann, ähnlich wie der eines Helmholtz-Resonators. Um die Bandbreite der Schalldämpfung zu erhöhen, kann eine zusätzliche Durchströmung in die Kavität eines *Liners* geleitet werden [9]. Dies kann mit einem Bias-Flow-Liner (BFL) realisiert werden, dessen breitbandige Dämpfungswirkung teilweise auf der aeroakustischen Interaktion von Schallfeld und Durchströmung basiert. Diese Interaktion ist noch nicht vollständig verstanden. Für die notwendige Entwicklung neuer Liner mit effizienterer Dämpfungswirkung ist daher eine tiefergehende Analyse der aeroakustischen Prozesse notwendig.

Zu diesem Zweck erfolgten bereits Messungen der Schallschnelle und Strömungsgeschwindigkeit [5–7, 10]. Dabei wurden lokale Variationen des Schallfeldes mit Größenordnungen im mm-Bereich detektiert. Um diese akustischen Effekte weiter zu charakterisieren und zu verstehen, ist die lokale Detektion der Schalldruckverteilung an einem BFL mit Ortsauflösungen im Sub-mm-Bereich notwendig.

Klassische Messmethoden zur Bestimmung des Schalldrucks nutzen Mikrofone mit einer Messunsicherheit von ca. $3 \cdot 10^{-4}$ [1]. Die Mikrofonanordnung kann als Einzelmis-

*Korrespondenzautor: Andrés Eduardo Ramos Ruiz, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 18, 01069 Dresden, E-Mail: andres.ramos@tu-dresden.de

Johannes Gürtler, Robert Kuschmierz, Jürgen Czarske, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 18, 01069 Dresden, E-Mail: johannes.guertler@tu-dresden.de, robert.kuschmierz@tu-dresden.de, juergen.czarske@tu-dresden.de

Abb. 1: 3D-Skizze des Messaufbaus.

krofon oder als Matrixanordnung erfolgen. Bei dieser invasiven Messmethode werden zwangsläufig die intrinsischen Eigenschaften des Schall- und Strömungsfelds geändert. Außerdem kann die notwendige Sub-mm-Ortsauflösung nicht erreicht werden.

Eine nicht-invasive Schalldruckbestimmung mit hohen Ortsauflösungen kann mittels optischer, interferometrischer Messmethoden durchgeführt werden. Die Fluktuation der Dichte im Messvolumen aufgrund der Änderung des Schalldrucks kann durch die Phasenänderung der durchlaufenden Lichtwelle detektiert werden [3, 11]. Um eine Ortsauflösung im Sub-mm-Bereich sowie hohe Abtastraten zur Detektion des hörbaren Spektrums bis 20 kHz zu erreichen, wurde ein kamerabasiertes laser-interferometrisches Vibrometer (KLIV) realisiert. Dank der Nutzung einer Hochgeschwindigkeitskamera ermöglicht das KLIV die gleichzeitige Detektion von Brechungsindexoszillationen, und somit des Schalldrucks, mit einer Bildrate von 50 kHz integral entlang mehrerer paralleler Laserstrahlen. Durch die Parallelisierung kann eine Beschleunigung des Messvorgangs erreicht werden, wodurch eine Verbesserung der Robustheit gegenüber Schwankungen von Umgebungstemperatur und -druck erreicht wird. Außerdem kann durch die Korrelation zweier Messpunkte mit bekanntem Abstand die Bewegungsgeschwindigkeit der auftretenden turbulenten Strukturen bestimmt werden. Da die Schalldruckbestimmung entlang des Laserstrahles als Linienintegral erfolgt, muss die orts aufgelöste Verteilung des Schalldruckfelds tomographisch rekonstruiert werden. Die inverse Radon-Transformation wurde als Rekonstruktionsalgorithmus verwendet [8]. Die Validierung des KLIV wurde mit einem Laborstandard-Mikrofon sowie einem kommerziell erhältlichen 1D-Vibrometersystem durchgeführt. Für die Untersuchung des lokalen Schalldrucks wurde ein BFL-Modell konstruiert.

Abb. 2: Die Experimentmodelle. Oben, das Referenzmodell (A) mit bündig an der schallharten Oberfläche angebrachtem Mikrofon. In der Mitte, das Resonanzmodell (B) mit einer einzigen Perforation auf der schallharten Oberfläche. Unten, das BFL-Modell (C).

2 Methode und experimenteller Messaufbau

Der betrachtete Messaufbau besteht aus einem PMMA-Rohr mit einem am oberen Ende montierten Lautsprecher. Am unteren Ende des Rohres können verschiedene Abschlüsse (schallhartes Referenzmodell, Resonanzmodell und BFL-Modell) montiert werden. Die 3D-Skizze des Messaufbaus ist in der Abbildung 1 dargestellt. Der allseitige optische Zugang und die Schallfeldbegrenzung sind durch das transparente PMMA-Rohr gegeben. Die Experimentmodelle sind in der Abbildung 2 dargestellt.

Das Referenzmodell (A) besteht aus einer schallharten Oberfläche mit bündig zur Oberfläche angebrachten Laborstandard-Mikrofon (Fa. G.R.A.S.). Das Resonanzmodell (B) verfügt über eine schallharte Oberfläche mit einem einzigen Zentralloch. Anhand dieses Modells können akustische Resonanzzustände orts aufgelöst vermessen werden. Das BFL-Modell (C) besteht aus einem Perforat, dessen Lochmuster typischen Linerkonstruktionen entspricht (vgl. [5, 6]). Zusätzlich sind vier Ventile vorhanden, um die Zuführung einer Durchströmung zu ermöglichen.

Um diese Modelle im Messaufbau zu untersuchen, wurde das KLIV basierend auf einem Mach-Zehnder-Interferometer aufgebaut. Der schematische Aufbau des KLIV

Abb. 4: Vergleich zwischen KLIV und Polytec.

ten verwendet. Die absolute Messunsicherheit der einzelnen Messsysteme beträgt 0,098 Pa für das Laborstandard-Mikrofon, 2,6 Pa für das Standardvibrometer und 2,2 Pa für das KLIV, jeweils für eine Messdauer von 8 s. Die Validierungsmessungen fanden zeitgleich etwa 1 mm über dem Mikrofon bei einer Schallanregung von 633 Hz statt. Unter der Annahme, dass die Richtcharakteristik des Mikrofons schmal und fokussiert ist (nach [1]) und eine nahezu ebene Schallwellenfront im Zylinder vorliegt, wurden die Vergleichsmessungen zwischen Mikrofon und KLIV durchgeführt. Die dabei auftretenden Abweichungen betrugen maximal 1,6 Pa. Die Validierung mit dem Standard-Vibrometer erfolgte pixelweise entlang eines einzigen Messpfads. In der Abbildung 4 ist das Amplitudenspektrum der integralen Messung eines Pixels des KLIV sowie des Polytec-Vibrometers dargestellt. Beide Systeme detektieren ein markantes Maximum bei der Anregungsfrequenz. Dabei betrug die absolute Abweichung der Amplituden etwa 2,4 Pa. Die Messabweichungen könnten aus der Schalldruckbestimmung bei leicht unterschiedlichen Volumina oder aufgrund Linsenaberrationen, welche eine Reduktion des Interferenzkontrasts und damit der Signalqualität (Senkung des Signal-Rausch-Verhältnisses) verursachen, zustande kommen. Gemessen an der Messunsicherheit der einzelnen Systeme stimmen die experimentell bestimmten Messwerte überein und das KLIV wird als validiert angenommen.

Messung lokaler Schalldruckphänomene

Für die Untersuchung des lokalen Schalldrucks wurde das Resonanzmodell eingesetzt. Dieser Abschluss entspricht einem Helmholtz-Resonator mit der Resonanzfrequenz $f_r = 200$ Hz. Die Messungen wurden bei einer Schallanre-

Abb. 5: Schnittdarstellung der tomographisch rekonstruierten Schalldruckamplitude bei schallhartem Abschluss (Modell A) und Helmholtz-Resonator (Modell B).

gung von $3 \cdot f_R = 600$ Hz und einer Schalldruckamplitude von 3,5 Pa durchgeführt. Mittels der inversen Radon-Transformation wurde das Schallfeld tomographisch bei einem Abstand von 1 mm über der Modelloberfläche rekonstruiert. Als Ergebnis dieser Messung ist die Amplitude des Schalldrucksignals in Abbildung 5 als Schnitt durch das Zentrum des zweidimensional rekonstruierten Schallfelds dargestellt. Die Position des Lochs wird durch die schwarzen Balken markiert. Zum Vergleich ist eine identische Messung mit dem schallharten Referenzmodell durchgeführt worden. Deutlich erkennbar sind die detektierten lokalen Schalldruckoszillationen über der Lochöffnung. Diese weichen stark ab vom gemessenen Schalldruckverlauf bei Nutzung des schallharten Referenzmodells. Es ist bisher ungeklärt, wie diese lokalen Schalldruckoszillationen mit dem Lochdurchmesser, der Resonanzfrequenz des Resonators oder der Schalldruckamplitude skalieren.

Schließlich wurde das BFL-Modell (C) untersucht, welches aus einem Perforat mit 53 regelmäßig zueinander versetzt angeordneten, kreisförmigen Löchern mit einem Durchmesser von jeweils 2,5 mm besteht. Eine konstante Durchströmung mit dem Massenstrom 5 kg h^{-1} wurde in die dahinterliegende Kavität eingeleitet. Die Schalldruckamplitude betrug 20 Pa bei einem monofrequenten Anregungssignal von $f = 1122$ Hz. Das Ergebnis ist in der Abbildung 6 dargestellt. Es wurden lokale Variationen des Schalldrucks über den Kanten der Löcher (Lochmitte durch „+“ im Bild markiert) bei einer Ortsauflösung kleiner als $100 \mu\text{m}$ detektiert. Aufgrund der begrenzten Apertur erfolgten die Messungen mit einem reduzierten Blickfeld, welches nicht das komplette Schallfeld erfasste. Aus dieser Fensterung resultieren die bei der tomographi-

Abb. 6: Amplitude der Schalldruckverteilung an einem BFL-Experimentmodell (Modell C).

schen Rekonstruktion auftretenden Linienartefakte sowie eine Verzerrung der Perforatstruktur. Zusammengefasst ist es erstmals mittels Hochgeschwindigkeits-Holographie gelungen, die orts aufgelöste Schalldruckverteilung eines BFL-Modells im Sub-mm-Bereich zu erfassen. Das Dämpfungsverhalten aeroakustischer Prozesse kann somit nicht-invasiv, phasen- und orts aufgelöst untersucht werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein kamerabasiertes interferometrisches Messsystem zur nicht-invasiven orts aufgelösten Schalldruckbestimmung vorgestellt. Es wurden drei verschiedene akustische Modelle untersucht. Zum ersten wurde eine Validierung anhand des Referenzmodells durchgeführt. Erste Messungen an einem gedämpften Schallfeld wurden mit Hilfe des Resonanzmodells durchgeführt. Im Nahfeld des Lochs wurden lokale Schalldruckoszillationen detektiert. Schließlich erfolgte die aeroakustische Messung am BFL-Modell. Es wurde eine konstante Zuführung der Durchströmung eingestellt. Dort wurden lokale Variationen des Schalldrucks über den Kanten der Löcher beobachtet.

Dieses kamerabasierte Messsystem kann perspektivisch zur Vermessung von weiteren Phänomenen, die auf einer schnellen Brechungsindexänderung beruhen, eingesetzt werden. Durch das Erweitern der Apertur kann durch Korrelationstechnik die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden.

Literatur

- [1] DIN EN 61094-1:2000 Messmikrofone Teil 1: Anforderungen an Laboratoriums-Normalmikrofone, 2000.
- [2] L. Fritsch, A. L. Brown, R. Kim, D. Schwela und S. Kephapopoulos. *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*. World Health Organization, 2011. 10.1080/13504630.2011.629519.
- [3] J. Gladstone und T. Dale. Researches on the refraction, dispersion, and sensitiveness of liquids. *Trans. Royal ...*, 1863.
- [4] L. Goines und L. Hagler. Noise pollution: a modern plague. *South. Med. J.*, 100(3):287–294, 2007.
- [5] J. Gürtler, D. Haufe, A. Schulz, F. Bake, L. Enghardt, J. Czarske und A. Fischer. High-speed camera-based measurement system for aeroacoustic investigations. *J. Sensors Sens. Syst.*, 5(1):125–136, 2016. 10.5194/jsss-5-125-2016.
- [6] D. Haufe, A. Fischer, J. Czarske, A. Schulz, F. Bake und L. Enghardt. Multi-scale measurement of acoustic particle velocity and flow velocity for liner investigations. *Exp. Fluids*, 54(7):1569, 2013. 10.1007/s00348-013-1569-4.
- [7] D. Haufe, J. Gürtler, A. Schulz, F. Bake, L. Enghardt und J. Czarske. Aeroacoustic analysis using natural Helmholtz–Hodge decomposition. *J. Sensors Sens. Syst.*, 7(1): 113–122, 2018. 10.5194/jsss-7-113-2018.
- [8] A. C. Kak und M. Slaney. *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999. 10.1137/1.9780898719277.
- [9] A. Schulz, D. Haufe, A. Fischer, J. Czarske, F. Bake und L. Enghardt. Acoustic damping analysis of bias flow liners based on spectral flow characteristics. *19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf.*, 2013.
- [10] A. Schulz, D. Haufe, J. Czarske, A. Fischer, F. Bake und L. Enghardt. Spectral analysis of velocity fluctuations in the vicinity of a bias flow liner with respect to the damping efficiency. *Acta Acust. united with Acust.*, 101(1):24–36, 2015. 10.3813/AAA.918801.
- [11] A. Torras-Rosell, S. Barrera-Figueroa und F. Jacobsen. Sound field reconstruction using acousto-optic tomography. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(5):3786–93, 2012. 10.1121/1.3695394.