

Bildgebende nicht-invasive Messung des lokalen Schalldrucks an einem Bias-Flow-Liner

Camera-based and non-invasive measurement of local sound pressure on a Bias-Flow-Liner

Andrés E. Ramos Ruiz¹, Johannes Gürtler¹, Anita Schulz², Friedrich Bake², Lars Enghardt^{2,3}, Jürgen Czarske¹

¹Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik
Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik
Helmholtzstraße 18, 01062 Dresden
E-Mail: andres.ramos@tu-dresden.de

²Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Berlin
Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik
Müller-Breslau-Straße 8, 10623 Berlin, Deutschland

³Technische Universität Berlin, Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, Fachgebiet Turbomaschinen- und Thermoakustik
Müller-Breslau-Straße 8, 10623 Berlin, Deutschland

Strömungsmessung, Schalldruck, Aeroakustische Dämpfung, Bias-Flow-liner
Flow measurement, sound pressure, aeroacoustic attenuation, Bias-Flow-liner

Zusammenfassung

Zur Lärmreduktion an Turbinen kommen sogenannte Bias-Flow-Liner (BFL) zum Einsatz. Dabei handelt es sich um perforierte Bleche mit dahinterliegender Kavität, deren aeroakustisches Dämpfungsprinzip auf der Wechselwirkung von Schall und dem durch die Perforation geführten Bias-Flow beruht. Diese Interaktion ist jedoch noch nicht vollständig verstanden. Um die Dämpfungseffizienz von BFL zu erhöhen, sind orts aufgelöste, nicht-invasive Messungen des Schalldrucks notwendig. In diesem Beitrag stellen wir ein Messsystem zur nicht-invasiven, 2D Schalldruckmessung mit einer Ortsauflösung von $500 \mu\text{m}$ vor. Das Messsystem basiert auf einem Kameravibrometer und wird an einer stehenden Schallwelle in einem BFL-Modell charakterisiert.

Einleitung

Zur Reduktion der Lärmemission von Flugzeugtriebwerken oder stationären Gasturbinen kommen passive akustische Dämpfungselemente zum Einsatz, sogenannte Liner. Als Liner werden perforierte Wandauskleidungen mit dahinterliegender Kavität bezeichnet. Eine deutlich breitbandigere Dämpfung kann mit sogenannten Bias-Flow-Linern (BFL) erzielt werden [1]. Bei diesen erfolgt eine zusätzliche Durchströmung der Perforation mit Luft. Bei BFL beruht der Dämpfungseffekt auf der aeroakustischen Interaktion zwischen Schall und Bias-Flow [2], ist aber noch nicht vollständig verstanden. Zur Optimierung der Dämpfung mittels BFL ist daher ein tiefgehendes Verständnis dieser Wechselwirkung erforderlich.

Zur Quantifizierung der Dämpfungseffekte soll die Schallimpedanz gemessen werden [3]. Sie ist eine charakteristische Materialgröße in der Akustik und stellt das Energieaustauschvermögen eines akustischen Prozesses dar [3]. Die Schallimpedanz berechnet sich zu

$$\underline{Z} = \frac{p}{v} \quad (1)$$

aus dem skalaren Schalldruck p und der vektoriellen Schallschnelle v . Zur Bestimmung der Schallimpedanz sind beide Größen ortsaufgelöst und nicht-invasiv zu erfassen. Ortsaufgelöste Schallschnellemessungen in einem BFL ohne Durchströmung wurden bereits in [4] gezeigt. Die Anforderung an die Schalldruckmessung sind: nicht-invasiv, Ortsauflösung in sub-mm, Auflösung von Schallfrequenzen bis 10 kHz und eine möglichst geringe Messdauer. Zur Schalldruckmessung können Mikrophone oder Mikrophon-Arrays verwendet werden. Diese Messmethode ist invasiv oder hat keine ausreichende Ortsauflösung. Um die Messanforderung zu erfüllen, soll der Schalldruck interferometrisch erfasst werden. Mit Hilfe eines Laser-Vibrometer-Messsystems kann der Schalldruck nicht invasiv gemessen werden. Der Schalldruck kann indirekt aus der Phasenverschiebung des Laserlichts gewonnen werden. Das Messsystem wurde kamerabasiert aufgebaut um die Ortsauflösung im Submillimeterbereich zu erreichen. Die Rekonstruktion des Schallfelds erfolgt mit Hilfe der Radon-Transformation. Es wurde eine Validierung mittels Vergleichsmessungen mit einem konventionellen Laser-Doppler-Vibrometers der Firma Polytec durchgeführt. Es werden Ergebnisse der nicht invasiven Schalldruckbestimmung präsentiert. Die dazugehörige Koordinaten-Transformation zur Optimierung des Messergebnisses wird diskutiert.

Theorie und Versuchsstand

Die zeitliche Änderung des Schalldrucks \dot{p} verursacht eine Dichteänderung $\dot{\rho}$ im Medium. Die Dichteänderung $\dot{\rho}$ ruft eine Brechungsindexänderung \dot{n} hervor [5]. Dadurch ändert sich kontinuierlich der optische Weg L durch das zu untersuchende Schallfeld. Dies verursacht eine Phasenänderung $\Delta\varphi$ des Laserlichts. Diese Änderung kann mittels eines Laser-Interferometric-Vibrometer (LIV), wie in Abbildung 1 dargestellt, erfasst werden. Nach Gladstone Dale [6] kann der Zusammenhang zwischen \dot{p} und \dot{n} hergeleitet werden, siehe (5). Die Schalldruckänderung \dot{p} ist optisch durch die Phasenänderung des Laserlichts $\Delta\varphi$ detektierbar.

Da der LIV das Linienintegral entlang L misst, muss mit Hilfe der Radon-Transformation das Schallfeld rekonstruiert werden (siehe Abschnitt *Messobjekt: optische Eigenschaften*). Dazu müssen mehrere Messungen durchgeführt werden, wodurch sich gesamte Messdauer erhöht. Die Parallelisierung wird mittels eines kamerabasierten LIV werden realisiert.

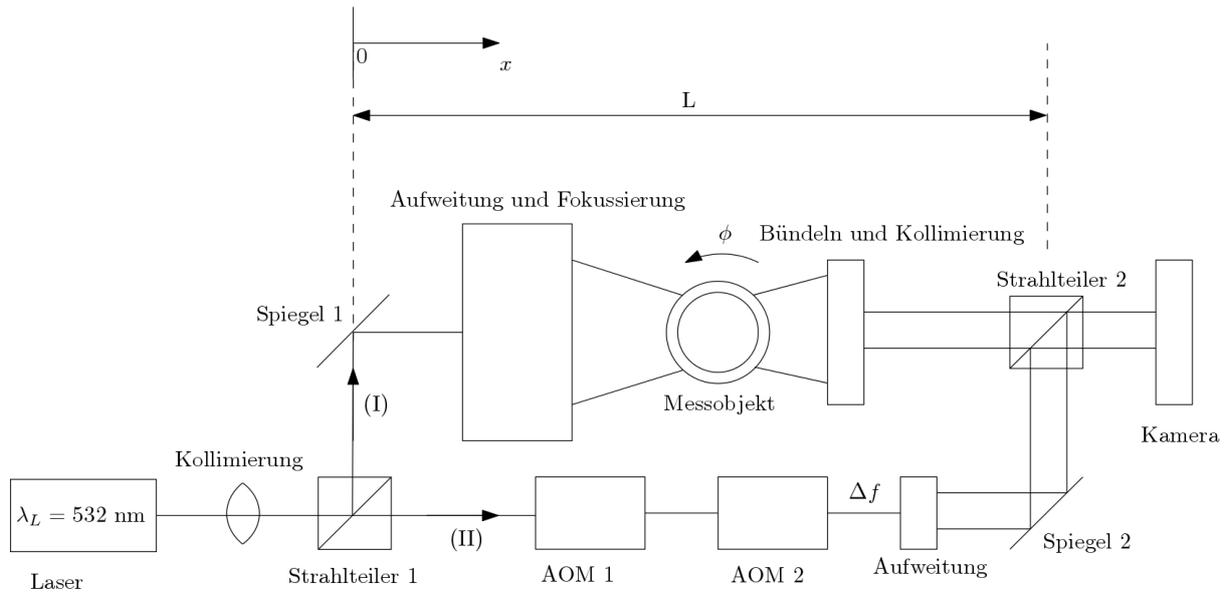


Abbildung 1: Schema eines kamerabasierten Laser-Interferometric-Vibrometers (KLIV): der Laserstrahl ($\lambda_L = 532 \text{ nm}$) wird in einen Messarm (I) und einen Referenzarm (II) geteilt. Die Frequenz des Referenzstrahls wird mittels einer Kaskade von akustooptischen Modulatoren um die Trägerfrequenz f_B verschoben. (I) wird zu einem Lichtschnitt von $100 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ aufgeweitet. Die Frequenz von (I) wird aufgrund der Änderung der optischen Weglänge ΔL um die Frequenzänderung Δf verschoben. ΔL wird durch die Schallausbreitung und die dabei auftretende Änderung des Brechungsindex verursacht (in Ruhezustand gilt $\Delta L = 0$). Beide Strahlen interferieren.

Das kamerabasierten Laser-Interferometric-Vibrometer (KLIV) beruht auf einem Mach-Zehnder Aufbau. Der Laserstrahl wird aufgeteilt in einem Messarm (I) und Referenzarm (II). (I) verläuft entlang der Messstrecke L . Aufgrund der Dichteänderung wird die optische Weglängenänderung ΔL hervorgerufen. (I) wird um $\Delta\varphi$ phasenverschoben. (II) wird durch eine Kaskade von akustooptischen Modulatoren (AOM 1 und 2) geführt. Die Trägerfrequenz $f_B \approx 15 \text{ kHz}$ wird eingestellt. Beide Strahlteile werden am Strahlteiler 2 überlagert und interferieren auf der Kamera. Das Intensitätssignal

$$I(\Delta\varphi) = \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos \left(2\pi \left(f_B t + \frac{L(t)}{\lambda_L} \right) \right) \right] \quad (2)$$

Ist mit der Trägerfrequenz f_B moduliert. Die instantane Frequenz f_I des Intensitätssignal I ergibt sich zu

$$f_I(L, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} (\Delta\varphi) = f_B + \frac{2\dot{L}(t)}{\lambda_L} = f_B + \Delta f. \quad (3)$$

Δf stellt die Frequenzänderung dar. Die Länge der Messstrecke $L(t)$

$$L(t) = \int_x n(l, t) dl \quad (4)$$

ist das Linienintegral vom Brechungsindex entlang des Integrationsweges. Aus der zeitlichen Ableitung von (4) und der Gladstone-Dale Beziehung [6] kann der Zusammenhang zwischen Brechungsindex und Schalldruck

$$\dot{n}(x, t) = \frac{n_0 - 1}{\kappa p_0 n_0} \dot{p}(x, t) \quad (5)$$

hergeleitet werden [5]. Die Gleichung (5) gilt nur für kleine Druckänderungen $p(x, t) \ll p_0$. Der Brechungsindex beim ruhenden Fluid n_0 , der Umgebungsdruck p_0 und die Adiabatanstante κ sind die Umgebungsgrößen. Aus den Formeln (3) - (5) ergibt sich, dass die Frequenzänderung

$$\Delta f(x, t) = \frac{2}{\lambda_L} \frac{n_0 - 1}{\kappa p_0 n_0} \int_L \dot{p}(x, t) dx \quad (6)$$

linear abhängig vom Integral des Schalldrucks entlang des Weges L ist. Um die orts aufgelöste und flächenhafte Schallfeldstrukturen zu messen, wird mit Hilfe der Radon-Transformation [3] die Rekonstruktion des Schalldruckfelds realisiert. Dadurch muss das Messobjekt Das Linienintegral kann als eine Projektion R_p des Messobjekts an der Messstelle und in Richtung der Laserausbreitung verstanden werden, wie in der Abbildung 2 dargestellt.

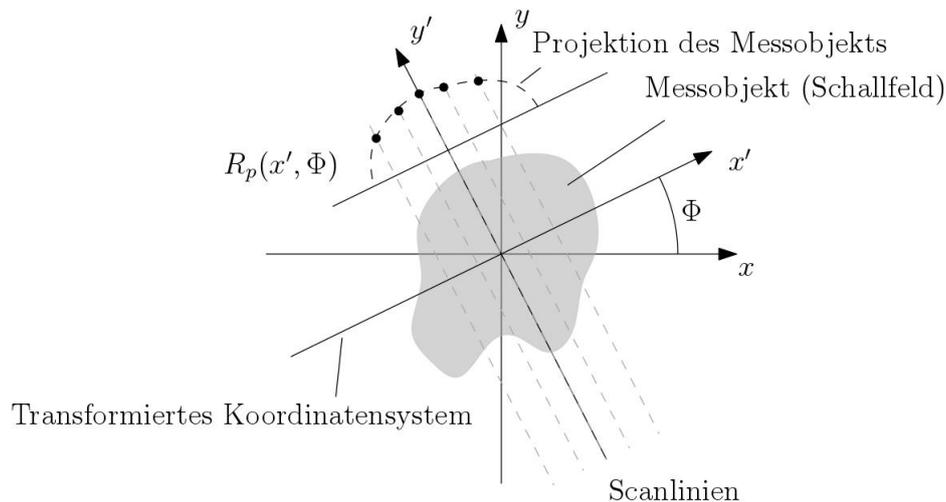


Abbildung 2: Schematisches Prinzip der Radon-Transformation

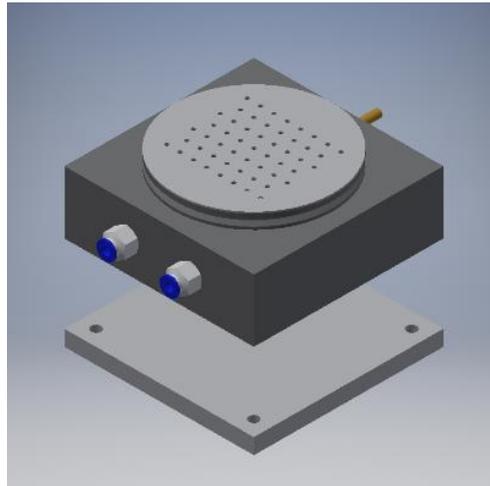
Durch die sukzessive Rotation um das Messobjekt um den Winkel Φ kann das komplette Messobjekt iterativ gescannt werden. Es entsteht ein Projektionsvektor pro Rotationswinkel. Es ergibt sich der Zusammenhang

$$p_r(x, y, t) = \int_0^{N \cdot \Phi} R_p(x', \Phi, t) * h(x') d\Phi \quad (7)$$

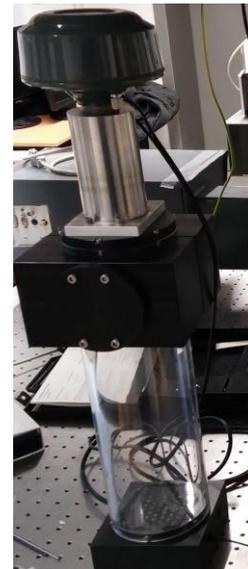
zwischen rekonstruiertem Schalldruckfeld $p_r(x, y, t)$ und Projektionswert $R_p(x', \Phi, t)$ mit der Filterfunktion $h(x')$ und Anzahl N der Winkel. Diese Gleichung stellt die inverse Radon-Transformation dar.

Messobjekt: akustische Eigenschaften

Die Messung der lokalen Schalldruckbestimmung wird mit Hilfe eines BFL-Modells, wie in der Abbildung 3 (a) dargestellt, durchgeführt. Die perforierte Scheibe besteht aus Polymethylmethacrylat (PMMA).



(a)



(b)

Abbildung 3: (a) Das Bias-Flow-Liner Modell (b) der Zylinderkanal samt Lautsprecher (oben) und BFL-Modell (unten)

Im Jahr 2014 führten Haufe et al [7] eine spektrale Analyse des Strömungsfeld an einem ähnlichen BFL-Modell mit Durchströmung durch. Es wurde festgestellt, dass eine Resonanzfrequenz bei $f_0 = 1122 \text{ Hz}$ entsteht. Die sich zugrundeliegenden lokalen Effekte sollen in diesem Beitrag bei dieser Resonanzfrequenz näher untersucht werden.

Messobjekt: optische Eigenschaften

Für die Rekonstruktion des lokalen Schalldrucks mittels Radon-Transformation muss der exakte Integrationsweg der interferometrischen Messung entlang des Schallfeldes bekannt sein. Aus diesem Grund wird das BFL-Modell in einem PMMA-Zylinder mit einem Innendurchmesser von $d_i = 100 \text{ mm}$ und Wanddicke $d_w = 5 \text{ mm}$ angebracht. Das untersuchte Schallfeld ist begrenzt. Die Krümmung des Zylinders erzeugt jedoch eine Verzerrung des Strahlenganges. Um das Schallfeld optimal zu rekonstruieren muss diese Verzerrung mittels einer Koordinatentransformation korrigiert werden. Das Schema dieser Transformation ist in Abbildung 4 (a) dargestellt.

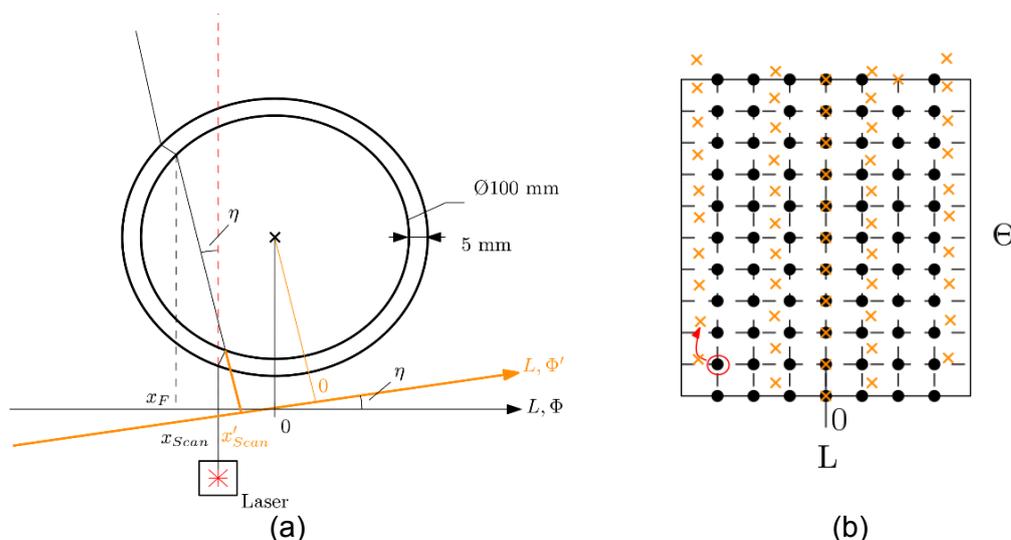


Abbildung 4: (a) Schema der optischen Signalpfadbrechung und Transformationsprinzip. (b) Transformiertes Sinogram. Die Kreuze stellen die translatierten Positionen dar.

In der Abbildung 4 (a) ist der Zylinder von oben, die Signalpfadbrechung und das schematische Prinzip der geometrischen Transformation dargestellt. Bei der Brechung des Signalpfads werden sowohl die Länge als auch die Richtung der Integrationslinie beeinflusst. Das heißt alle Messpunkte sollen gewichtet und translatiert werden. Ausgehend von der Betrachtungsebene L, Φ kann eine zweite Betrachtungsebene L, Φ' erzeugt werden, die orthogonal zum gebrochenen Pfad steht. Der Brechungswinkel η gibt an um wie viel der Pfad gebrochen wurde (abhängig vom Eintrittspunkt) und um genauso viel soll die Betrachtungsebene L, Φ' rotiert werden. Es sei eine $L \times \Theta$ Matrix $M_L^\Theta(r)$ definiert, siehe Abbildung 4 (b). In der Matrix

$$M_L^\Theta(r) = \begin{pmatrix} | & | & | \\ r(\vec{v}_1) & r(\vec{v}_2) & \dots & r(\vec{v}_L) \\ | & | & | \end{pmatrix} \quad (8)$$

stellen $r(\vec{v}_1) \dots r(\vec{v}_L)$ die Projektionsvektoren aller Scanlinien für je einen Winkel dar. Aufgrund der Geometrie des Messobjektes wird für jeden Projektionsvektor gleich gewichtet und verschoben. Die transformierte Matrix ergibt sich zu

$$M'_L(r) = \begin{pmatrix} | & | & | \\ r'(\vec{v}_1) & r'(\vec{v}_2) & \dots & r'(\vec{v}_L) \\ | & | & | \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$= \begin{pmatrix} | & | & | \\ A_1(r(\vec{v}_1) + \eta_1 \vec{e}_1) & A_2(r(\vec{v}_2) + \eta_2 \vec{e}_2) & \dots & A_L(r(\vec{v}_L) + \eta_L \vec{e}_L) \\ | & | & | \end{pmatrix}$$

und $A_1 \dots A_L$ die Wichtungsfaktoren und $\eta_1 \dots \eta_L$ die Brechungswinkeln sind. Es entsteht eine inhomogene Verteilung der Messpunkte, die eine realitätsnahe Abbildung des Schallfelds darstellt.

Ergebnisse

Zur Validierung des KLIV wurde eine Vergleichsmessung mit einem kommerziellen Laser-Doppler-Vibrometers der Firma Polytec durchgeführt. Zur Referenz wurde ein schallhartes Modell benutzt. Beide Messsysteme haben gleichzeitig am gleichen Ort gemessen. Mit dem Polytec-Vibrometer wurde eine Scanlinie gemessen. Am KLIV wurde ein Pixel betrachtet. Es wurde ein Testsignal bei $f_{sig} = 633$ Hz bei verschiedene Amplituden erzeugt. Die Tabelle 1 stellt die Ergebnisse der Vergleichsmessung dar.

		$f_{sig} = 633$ Hz				
		Lautstärke in Pa	3,5	7	10	12
Vibrationsgeschwindigkeit KLIV	v_{KLIV} in m/s	1,46E-05	2,68E-05	3,78E-05	4,84E-05	
Vibrationsgeschwindigkeit Polytec	v_{Poly} in m/s	1,26E-05	2,30E-05	3,25E-05	4,16E-05	
	Δ_{rel}	In %	2,4%	2,1%	2,1%	2,1%

Tabelle 1: Ergebnisse der Vergleichspunktmessung zwischen KLIV und Polytec-Vibrometer

Der Mittelwert der Messabweichung zwischen beide Messsystemen beträgt ca. 2,1 %. Grund der Messabweichung ist noch unklar. Eine Alternative zur Validierung ist eine Vergleichsmessung mit einem Mikrofon. Um beide Messverfahren zu vergleichen, muss mit dem KLIV eine Schallfeldvermessung durchgeführt werden. Der KLIV soll fertig optimiert werden, bevor die geplante Vergleichsmessung mit dem Mikrofon am schallharten Modell durchgeführt wird.

Ein vorläufiges Ergebnis wurde mit Hilfe des Polytec-Vibrometers erzeugt. Die Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchtigkeit änderten sich während des Messvorgangs. Die Änderung der Umgebungsgrößen beeinflussen die Schalldruckbestimmung entsprechend Gleichung (6). Eine korrekte Schalldruckbestimmung wird nur bei Berücksichtigung der Umgebungsgrößen erreicht. Die Messung am BFL-Modell wurde bei einer Durchströmung von

$F = 5 \text{ kg/h}$ und einen Schalldruck von $p = 5 \text{ Pa}$ bei einer Signalfrequenz von $f_{sig} = 1122 \text{ Hz}$ mit einer Ortsauflösung von $500 \mu\text{m}$ durchgeführt. Es wurde das Schallfeld 1 mm oberhalb der Perforation gescannt.

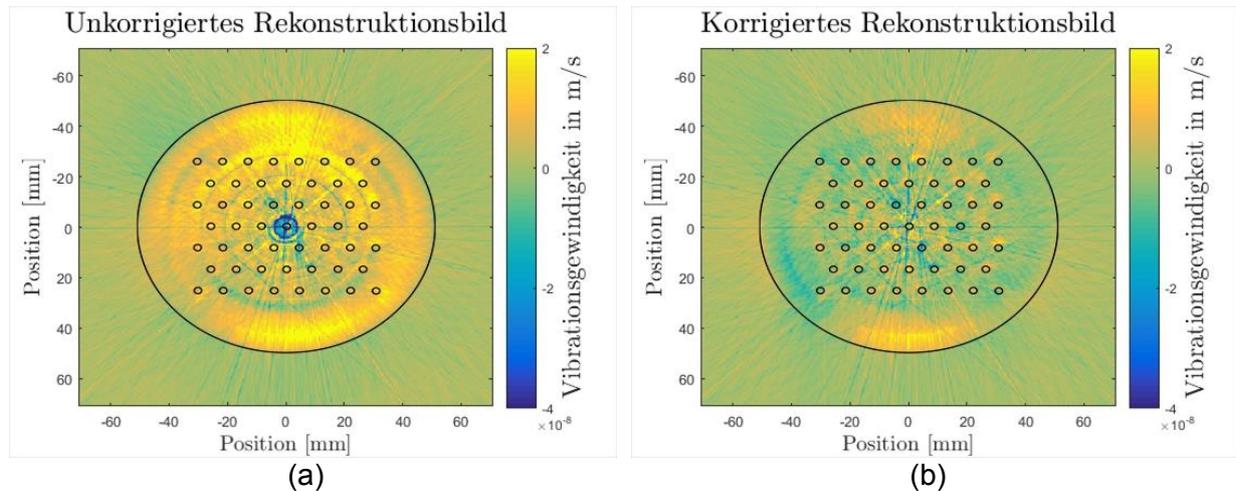


Abbildung 5: (a) unkorrigiertes und (b) korrigiertes Rekonstruktionsbild

In der Abbildung 5 ist das unkorrigierte (a) bzw. per geometrischen Transformation korrigierte (b) Rekonstruktionsbild dargestellt. In der Abbildung 5 (b) ist ersichtlich, dass punktförmige Strukturen in der Nähe der Löcher vorzufinden sind. In Abbildung 5 (a) sind aufgrund von unkorrigierten optischen Aberrationen (siehe Abschnitt *Messobjekt: optische Eigenschaften*) Lochstrukturen nicht erkennbar. In (b) sind Artefakte ersichtlich und die Geometrie der Perforationen ist nicht vollständig reproduziert. Dies kann an Schalldruckschwankungen oder des Umgebungsdrucks liegen. Optische Aberrationen, wie unerwünschte Rückreflexionen, können zur zusätzlichen Messwertverfälschungen führen. Auf Grund der zu groben Ortsauflösung sind nicht alle Effekte der aeroakustischen Interaktion detektierbar.

Es liegt ein komplexes System vor. Es kann nicht von keiner Rotationssymmetrie oder von einem perfekt gefertigten Zylinder ausgegangen sein. Dieses komplexe System muss mit einer erhöhten Ortsauflösung und bei Parametervariationen charakterisiert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Lärmreduktion mittels BFL ist eine etablierte Technik in modernen Turbinen. Ein tiefergehendes Verständnis der aeroakustischen Interaktion zur Erhöhung der Dämpfungseffizienz ist notwendig für die Optimierung. Interferometrische Messsysteme, wie der in diesem Beitrag vorgestellte KLIV, ermöglichen die Schalldruckbestimmung als Linienintegral entlang einer Messstrecke. Die zweidimensionale Schalldruckfeldvermessung wurde mittels Radon-Transformation erreicht. Um die Messdauer zu verkürzen, können mit Hilfe einer Kamera mehrere Messpunkte gleichzeitig erfasst werden. Es konnte eine Bildauflösung von $1600 \times 4 \text{ px}$ bei einer Kameramessrate von 50 kfps und Abtastrate von 15 kHz erzielt werden. Die Ortsauflösung im Submillimeterbereich ist damit anvisiert.

Voraussetzung für die Radon-Transformation ist die Anwendung eines PMMA-Zylinders zur Schallfeldbegrenzung. Auf Grund des Zylinders entstehen mechanische und optische Aberrationen, die durch passenden Versuchsaufbau (Transmissionsanordnung) bzw. Signalverarbeitung (Koordinatentransformation, Anpassung der Umgebungsgrößen) beseitigt werden können. Mittels einer Koordinatentransformation lassen sich Aberrationen a priori basierend auf idealer Messobjektgeometrie und Materialkomposition korrigieren. Vorkommende Messwertabweichungen aufgrund von Fertigungsimperfectionen können durch erhöhte Ortsauflösung reduziert werden.

Eine linienhafte Vergleichsmessung mit einem kommerziellen Vibrometer wurde durchgeführt. Es ergab sich eine Messabweichung von 2,1%. Die Ursachen für diese Messabweichung sind noch unklar. Ein Vergleich mit einem Mikrofon ist anvisiert.

Vorläufig wurde mit einem kommerziellen Vibrometer eine Schallfeldvermessung durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass die Koordinatentransformation die Ortsauflösung der Schallfeldvermessung erhöht. Die detektierten lokale Effekte der aeroakustischen Dämpfung könnten jedoch präziser charakterisiert werden, in dem eine höhere Ortsauflösung ($< 500 \mu\text{m}$) erreicht wird. Mit Hilfe der KLIV können mehrere Messpunkte erfasst werden. Die Messdauer verringert sich und das Messsystem ist robuster gegen Umgebungsänderungen. Der KLIV stellt eine Transmissionsanordnung zwischen Laser, Messobjekt und Sensor dar. Damit ist das Messverfahren gegen optische Aberrationen robuster.

Es sollen weitere Lochgeometrie getestet werden. Weitere Parametervariationen sollen betrachtet werden (z. B. andere Schalldruckwerte oder Durchströmungsgeschwindigkeiten). Die Messdauer kann durch Nutzung einer zweiten Kamera weiter verringert werden.

Mit einem solchen System können die Effekte der aeroakustischen Dämpfung präzise untersucht werden und somit ein Beitrag zur Vermessung der aeroakustischen Phänomene geleistet werden.

Perspektivisch kann dieses Messsystems zur Vermessung von Phänomenen, die auf eine Brechungsindexänderung beruhen, eingesetzt werden. Mittels Laser-Vibrometrie ist möglich die Wärmefreisetzungsrates eines Verbrennungsprozesses integral entlang einer Linie zu messen, um die nötige Charakterisierung der Flamme zur Optimierung der Turbinenleistung zu ermöglichen.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung im Rahmen der Projekte CZ 55/25-3 und EN 797/2-3. Auch an Ludwig Burmeister für die Unterstützung bei den Experimenten.

Literatur

- [1] A. Schulz, D. Haufe, A. Fischer, J. Czarske, F. Bake, and L. Enghardt, "Acoustic Damping Analysis of Bias Flow Liners Based on Spectral Flow Characteristics," *19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf.*, 2013.
- [2] C. Lahiri, "Acoustic performance of bias flow liners in gas turbine combustors," *DLR Dtsch. Zent. für Luft- und Raumfahrt e.V. - Forschungsberichte*, no. 39, pp. 1–364, 2014.
- [3] R. Lerch, G. Seesler, and D. Wolf, *Technische Akustik*. Springer, 2009.
- [4] D. Haufe, A. Fischer, J. Czarske, A. Schulz, F. Bake, and L. Enghardt, "Multi-scale measurement of acoustic particle velocity and flow velocity for liner investigations," *Exp. Fluids*, vol. 54, no. 7, p. 1569, Jul. 2013.
- [5] J. Gladstone and T. Dale, "Researches on the refraction, dispersion, and sensitiveness of liquids," *Trans. R. ...*, 1863.
- [6] A. Torras-Rosell, S. Barrera-Figueroa, and F. Jacobsen, "Sound field reconstruction using acousto-optic tomography.," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 131, no. 5, pp. 3786–93, 2012.
- [7] D. Haufe, A. Schulz, F. Bake, L. Enghardt, J. Czarske, and A. Fischer, "Spectral analysis of the flow sound interaction at a bias flow liner," *Appl. Acoust.*, vol. 81, pp. 47–49, 2014.