

OPTISCHE SCHALLSCHNELLEMESSUNG BEI ÜBERLAGERTER STRÖMUNG MITTELS FM-DGV

OPTICAL MEASUREMENT OF THE ACOUSTIC PARTICLE VELOCITY IN A SUPERPOSED FLOW BY MEANS OF FM-DGV

Daniel Haufe¹, Andreas Fischer¹, Lars Büttner¹, Jürgen Czarske¹,
Anita Schulz², Friedrich Bake³, Lars Enghardt³

¹Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik, Professur für Mess- und Prüftechnik
Helmholtzstraße 18, 01069 Dresden
E-Mail: daniel.haufe@tu-dresden.de

²Technische Universität Berlin, Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, Fachgebiet Turbomaschinen- und Thermoakustik
Müller-Breslau-Straße 8, 10623 Berlin

³Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Berlin
Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik
Müller-Breslau-Straße 8, 10623 Berlin

Schallschnelle, Strömungsmessung, DGV, Mehrpunktmessung
acoustic particle velocity, in-flow measurement, DGV, multi-point measurement

Kurzzusammenfassung

Zur Effizienzsteigerung von Triebwerksschalldämpfern fehlen eingehende Kenntnisse der aeroakustischen Schalldämpfungsmechanismen. Hierfür bedarf es der gleichzeitigen und berührungslosen Messung von Schallschnelle und Strömungsgeschwindigkeit in solchen Dämpfern. Aufgrund der stark unterschiedlichen Größenordnung beider Geschwindigkeiten werden Messverfahren mit hoher Dynamik von mindestens 1000 benötigt, die ebenso eine geringe Messunsicherheit bieten. Solch ein Messverfahren ist die Doppler-Global-Velozimetrie mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV). In diesem Beitrag wird experimentell demonstriert, dass simultane Mehrpunktmessungen der Schallschneleamplitude mit einer Unsicherheit von 4 mm/s mit FM-DGV durchgeführt werden können. Neben der Amplitude konnte die Schallschnelle durch Phasenmittelung auch zeitaufgelöst gemessen werden. Abschließend wird in einer Düsenströmung gezeigt, dass die Messung einer Schallschnelle von minimal 25 mm/s bei einer überlagerten Strömungsgeschwindigkeit von 100 m/s möglich ist. Mit der daraus resultierenden Dynamik von 4000 erfüllt das Messsystem die Anforderungen für die Messung an Linern.

Einleitung

Um eine deutliche Reduzierung von Flugzeuglärm zu erreichen, wie von der European Commission 2001 gefordert, müssen insbesondere Flugzeugtriebwerke leiser werden. Zu

diesem Zweck kommen beispielsweise sogenannte Bias-Flow-Liner zum Einsatz, deren Dämpfungswirkung auf der Interaktion von Schall und Strömung basieren, siehe Tam et al. 2001. Die komplexen Dämpfungsmechanismen eines Bias-Flow-Liners (Modellabbildung in Abb. 1) sind immer noch Gegenstand aktueller Forschung. So existieren beispielweise Diskrepanzen zwischen numerischer Simulation und experimentellen Untersuchungen in Heuwinkel et al. 2008.

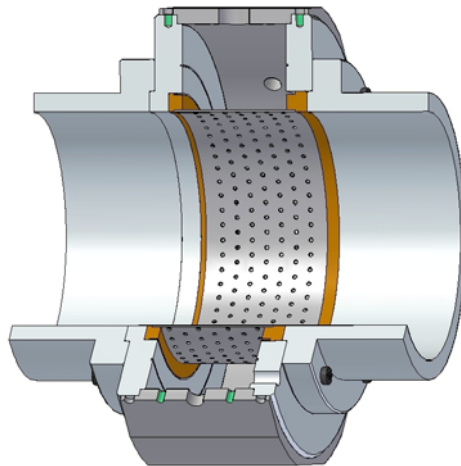


Abb. 1: Modell eines Bias-Flow-Liners (aus Heuwinkel et al. 2010)

Um hier Klarheit zu schaffen, bedarf es nicht-invasiver Messtechnik, die eine gleichzeitige Erfassung von Schall- und Strömungsgeschwindigkeitsfeld an der Lineroberfläche gestattet. Dabei erfolgt die Beschreibung des Schallfeldes mittels der sogenannten Schallschnelle, welche den Geschwindigkeitsvektor der oszillierenden Bewegung von Fluidteilchen aufgrund der Schallanregung beschreibt. Die Schallschnelle beträgt rund 70 mm/s bei einem beispielhaften Schalldruck von 120 dB. Dieser Geschwindigkeitswechselgröße ist ein hoher Geschwindigkeitsterm überlagert, der von der Überströmung des Liners herrührt und bei einer beispielhaften Machzahl von $Ma=0,29$ ungefähr 100 m/s beträgt. Da beide Größen gleichzeitig gemessen werden, ergibt sich hieraus eine hohe Anforderung an den Dynamikbereich des Messverfahrens. Zudem wird unter Beachtung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems eine hohe Messrate von mind. 38 kHz benötigt, um Schallschnelleamplituden im Hörbereich, d.h. bis zu einer Frequenz von maximal 19 kHz, ohne Unterabtastung auflösen zu können. Dabei soll die Messunsicherheit einige mm/s nicht übersteigen. Für diese und ähnliche Messaufgaben (z.B. zur Untersuchung thermoakustischer Phänomene, siehe Berson et al. 2008) sind optische Verfahren vielversprechend. So wurde bereits von Taylor 1979 demonstriert, dass Schallschnellen bis zu einer Amplitude von 0,7 mm/s mittels Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) punktförmig gemessen werden können. Zudem wurden LDA-Messungen von Schnelleamplituden bis minimal 100 mm/s bei überlagerter Strömungsgeschwindigkeit von 0,8 m/s von Thompson et al. 2005 präsentiert. Ebenso wurden bildgebende Verfahren wie die Partikel-Image-Velozimetrie (PIV) zur Messung von Schallschnellen eingesetzt, z. B. in Hann et al. 1997, die dort gewählte überlagerte Strömungsgeschwindigkeit war jedoch kleiner als die Schnelleamplitude.

Kürzlich wurde in Schlußler et al. 2011 die Doppler-Global-Velozimetrie mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) zur punktförmigen Schallschnellemessung verwendet. In diesem Beitrag soll gezeigt werden, dass simultane Mehrpunktmessungen der Schallschnelle, auch bei überlagerter Strömung, mit FM-DGV möglich sind. Im ersten Abschnitt wird das FM-DGV-Verfahren aus Müller et al. 2007 kurz vorgestellt und seine Eignung für die Messung an Bias-Flow-Linern diskutiert und anschließend experimentell untersucht. So beschreibt der darauffolgende Abschnitt simultane Mehrpunktmessungen der Schallschnelle,

die unter Benutzung eines Arrays aus fasergekoppelten Avalanche-Photodioden durchgeführt wurden. Es schließt sich eine Messung der Schallschnelle bei überlagerter Strömungsgeschwindigkeit in einer Düsenströmung mit einer mittleren Geschwindigkeit von 100 m/s an.

Doppler-Global-Velozimetrie mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV)

In diesem Abschnitt soll das Messprinzip der Doppler-Global-Velozimetrie mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) erklärt und dessen Eignung für die Schallschnellemessung an Linern diskutiert werden. Detaillierte Informationen zum eingesetzten Messaufbau sind zahlreichen Veröffentlichungen, wie beispielsweise Fischer et al. 2009, zu entnehmen. Das Prinzip der Doppler-Global-Velozimetrie beruht auf dem optischen Dopplereffekt. Dabei wird die geschwindigkeitsabhängige Dopplerfrequenzverschiebung von frequenzmoduliertem Licht gemessen, siehe Abb. 2a. Hierzu werden dem zu untersuchenden Fluid kontinuierlich Streuteilchen zugeführt, an denen aus Richtung \vec{i} einfallendes Laserlicht gestreut wird. Dabei erfährt das an den Partikeln gestreute Licht eine Frequenzverschiebung, die von der Geschwindigkeit des Partikels abhängt. Hierbei wird angenommen, dass die Partikel die Geschwindigkeit des Fluids annehmen und ihm rückwirkungsfrei folgen. Die Dopplerfrequenz des in Richtung \vec{o} beobachteten Streulichts wird durch Flankendemodulation an der Transmissionskennlinie einer mit Cäsium gefüllten Absorptionzelle (Abb. 2b) in eine Intensitätsinformation gewandelt. Diese wird mittels Avalanche-Photodioden detektiert. Nach Kalibrierung erhält man schließlich die zu messende Geschwindigkeitskomponente in Richtung $\vec{o} - \vec{i}$. Bei Verwendung mehrerer Beleuchtungs- bzw. Detektionseinheiten können gleichzeitig mehrere Geschwindigkeitskomponenten gemessen werden, worauf hier nicht näher eingegangen werden soll.

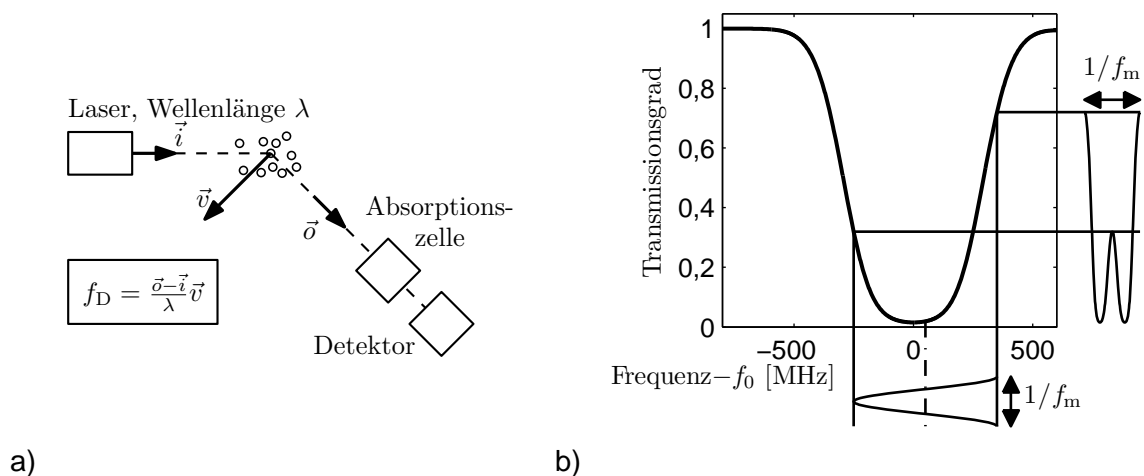


Abb. 2: a) Aufbau Doppler-Global-Velozimetrie mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation
 b) beispielhafte Transmissionskurve für den Cäsium D1-Übergang mit $f_0=335$ THz und Modulationsfrequenz f_m

Bezüglich der Anforderungen für die Schallschnellemessung an Linern bietet das an der TU-Dresden eingesetzte FM-DGV-Verfahren aus Schlüsler et al. 2011 aufgrund seiner hohen Messrate (gegenwärtig bis zu 100 kHz) eine hohe Geschwindigkeitsmessrate und erlaubt dank eines Arrays aus 24 hochempfindlichen, fasergekoppelten Avalanche-Photodioden eine simultane Mehrpunktmessung der Schallschnelle mit geringer Messunsicherheit, was im folgenden Abschnitt gezeigt werden soll.

Simultane Mehrpunktmessungen der Schallschnelle

Für die simultane Mehrpunktmessung der Schallschnelle mit FM-DGV soll zunächst das charakteristische Schallschnelleprofil von ebenen stehenden Wellen in einem Kundtschen Rohr mit FM-DGV gemessen werden, siehe Abb. 3a. Die Messung erfolgt unter Verwendung eines Bündels aus 24 Fasern, welche jeweils mit einem Detektor verbunden sind. Die Beleuchtungsrichtung \vec{i} und die Beobachtungsrichtung \vec{o} wurden so gewählt, dass die 24 einzelnen Messpositionen jeweils unterschiedliche axiale Positionen z aufweisen, um das Schallschnelleprofil entlang der Rohrachse zu erhalten, wie in Abb. 3b verdeutlicht.

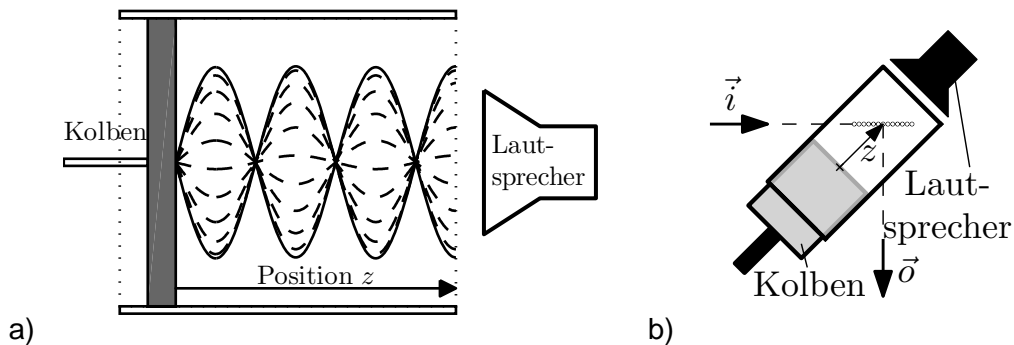


Abb. 3: a) Schallschnelleprofil bei ebenen stehenden Wellen im Kundtschen Rohr
b) Aufbau der Mehrpunktmessung der Schallschnelle im Kundtschen Rohr mit FM-DGV

Es wurde eine Messrate von 50 kHz gewählt, was gemäß dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem eine Auflösung der Schallschnelleamplitude bis maximal 25 kHz erlaubt. Dies wird im ersten Experiment für drei gleichzeitig angeregte Schallfrequenzen demonstriert. Zur Auswertung der Schnelleamplituden wurde die Fouriertransformierte des Zeitsignals unter Berücksichtigung der Phase des Anregungssignals genutzt, siehe Schlüßler et al. 2011. Das so gemessene Schallschnelleamplitudenprofil ist in Abb. 4 dargestellt und zeigt für alle drei angeregten Frequenzen eine gute Übereinstimmung mit dem theoretisch angenommenen Profil (durchgezogene Linie). Die Standardunsicherheit bei einer Messdauer von 1 s beträgt im Mittel 4 mm/s, es sind keine systematische Abweichungen zu erkennen.

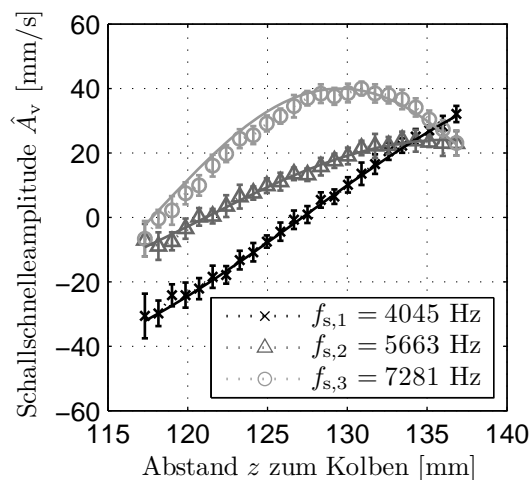


Abb. 4: Schallschnelleamplitudenprofil mehrerer gleichzeitig gemessener akustischer Frequenzen

Ist neben dem Amplitudenprofil auch der zeitliche Verlauf der Schallschnelle von Interesse, bietet sich eine periodische Einteilung der Zeitsignale in Phasenlots sowie eine phasenrichtige Mittelung an. Da jedem Slot nur ein Bruchteil der Messdauer zur Verfügung steht, steigt die Messunsicherheit gemäß Fischer et al. 2009. Um diesen Effekt zu kompensieren, wurde eine Erhöhung der Messdauer auf 80 s durchgeführt. Das so ermittelte Schallschnelleprofil ist für verschiedene, beispielhaft gewählte Phasenlagen in Abb. 5 dargestellt.

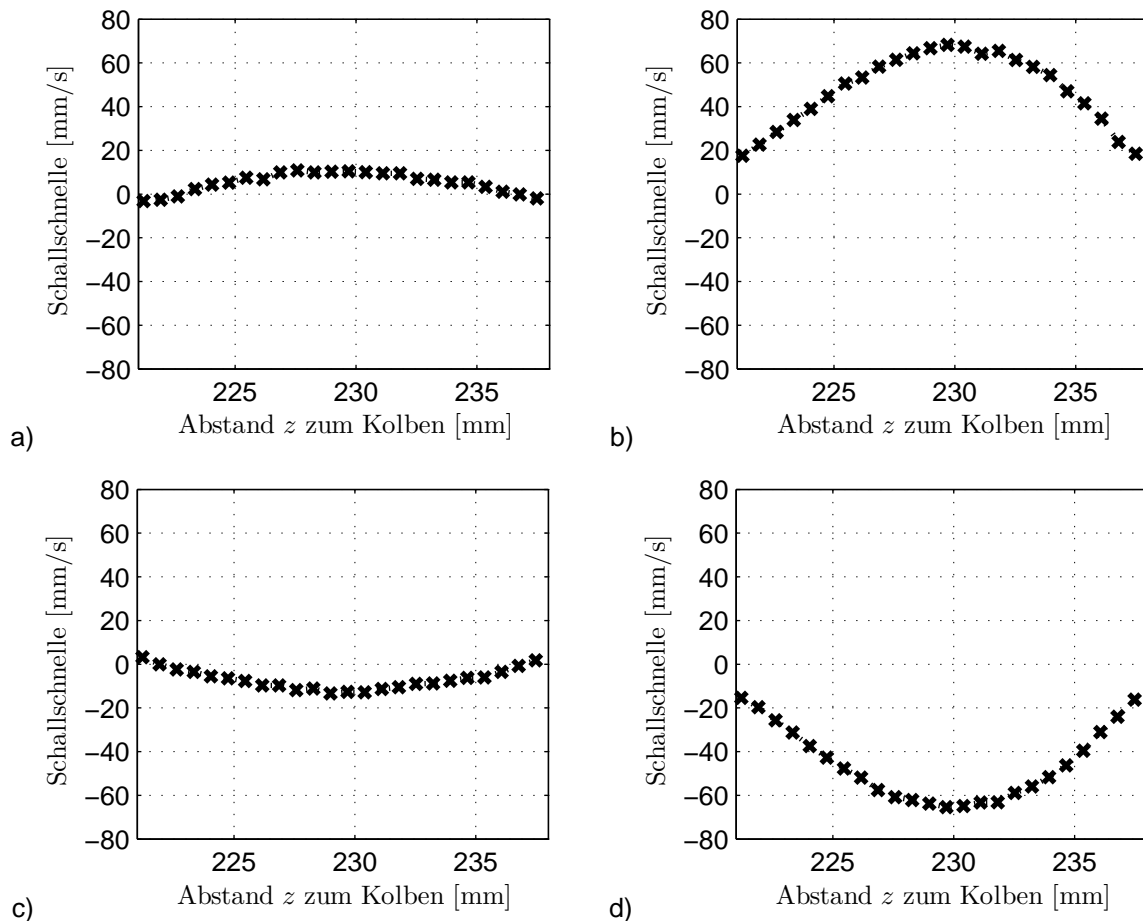


Abb. 5: phasenaufgelöstes Schallschnelleprofil bei akustischen Stehwellen im Kundtschen Rohr
a) Phasenlage 90° b) Phasenlage 180° c) Phasenlage 270° d) Phasenlage 360°

Schallschnellemessung bei überlagerter Strömung

In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, dass die Schallschnelle auch bei Vorhandensein einer überlagerten Strömungsgeschwindigkeit mit FM-DGV gemessen werden kann. Hierfür wurde die Freistrahströmung einer Düse bei zusätzlicher Anregung mit einem Lautsprecher untersucht, siehe Abb. 6a. Dabei betragen der Durchmesser der Düsenöffnung 10 mm, die Strömungsgeschwindigkeit im Mittel 100 m/s und die Schallfrequenz 5,415 kHz.

Die Messung erfolgte in gleicher Weise wie im vorangegangenen Abschnitt. In Abb. 6b ist zusätzlich zur Schallschnelleamplitude auch die mittlere Geschwindigkeit veranschaulicht.

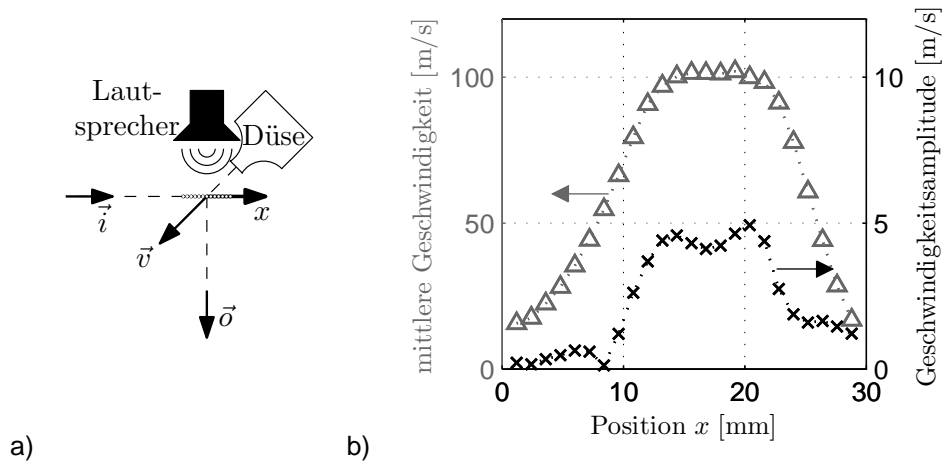


Abb. 6: a) FM-DGV-Messung der Schallschnelle bei Überlagerung einer Düsenströmung
 b) gemessenes Profil der Schallschnelle und der mittleren Geschwindigkeit

Es treten zum Teil extrem hohe Schallschnellen bis 4,9 m/s auf, was einem Schalldruckpegel von etwa 157 dB entsprechen würde. Daher wird hier vielmehr vermutet, dass lokale Strömungssoszillationen vorherrschen, die durch die Schallanregung induziert wurden. Um auszuschließen, dass es sich hierbei um stochastische Strömungsturbulenzen handelt, wurde das Spektrum der gemessenen Geschwindigkeit untersucht, welches in Abb. 7a dargestellt ist. Es zeigen sich neben dem Peak bei der Anregungsfrequenz (hier: Überhöhung bis 4,9 m/s) zusätzliche Geschwindigkeitsamplituden bis etwa 200 mm/s über einem breiten Frequenzbereich. Diese spektralen Geschwindigkeitsanteile rühren von der Turbulenz der Strömung her und lassen sich aufgrund ihres zufälligen Charakters durch Mittelung unterdrücken. Das resultierende Spektrum bei Erhöhung der Messdauer von 1 s auf 80 s ist in Abb. 7b dargestellt. Durch die höhere Frequenzauflösung werden die von der Strömungsturbulenz herrührenden Geschwindigkeitsamplituden auf ca. 25 mm/s verringert, gleichzeitig verbleibt der Peak bei der Schallanregungsfrequenz 5,415 kHz und bestätigt somit die vorangegangenen Messergebnisse. Somit lassen sich bei einer Messdauer von 80 s prinzipiell Schallschnellen bis minimal 25 mm/s bei einer überlagerten Strömungsgeschwindigkeit von 100 m/s erfassen und aufgrund der Mittelung vom Turbulenzanteil separieren. Dies bestätigt den hohen Dynamikbereich des FM-DGV-Messsystems (hier: Faktor 4000).

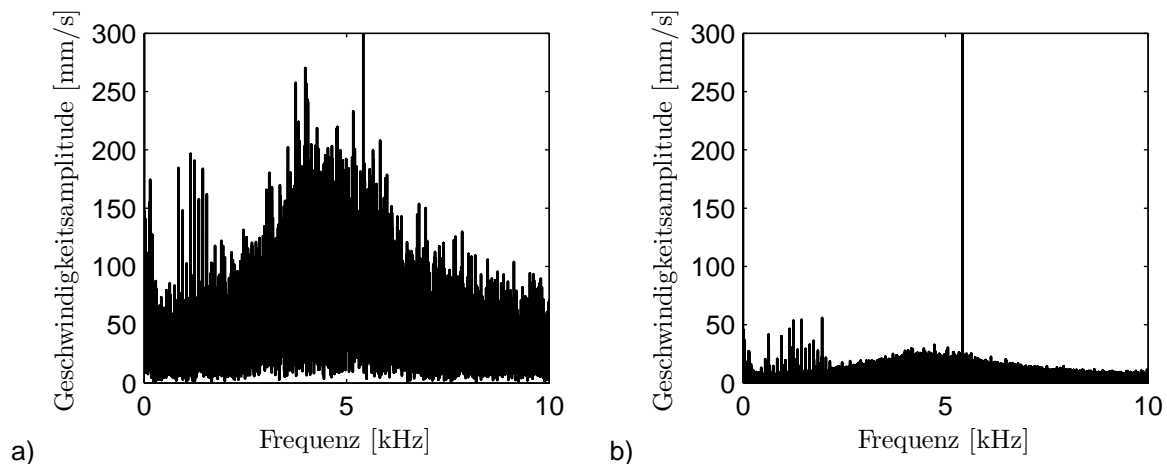


Abb. 7: Spektrum der Geschwindigkeit a) bei 1 s und b) bei 80 s Messdauer

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden Mehrpunktmessungen der Schallschnelle mittels FM-DGV demonstriert. Durch die hohe Messrate von 50 kHz kann das Schallschnellespektrum im gesamten Hörbereich (bis ca. 19 kHz) aufgelöst werden. Die Messunsicherheit der Schalleamplitude beträgt dabei im Mittel 4 mm/s bei einer Messdauer von 1 s und kann durch längere Messdauer weiter reduziert werden. Somit konnte bei einer Messdauer von 80 s eine zeitaufgelöste Messung der Schallschnelle unter Anwendung von Phasenmittelung durchgeführt werden. Weiterhin wurde an einer Düsenströmung mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 100 m/s gezeigt, dass eine überlagerte Schallschnelle von bis zu 25 mm/s mit FM-DGV gemessen werden kann, woraus ein Dynamikbereich von 4000 resultiert. Damit ist das Messsystem für Untersuchungen an Bias-Flow-Linern geeignet, um Erkenntnisse über deren aeroakustische Dämpfungswirkung zu gewinnen. Somit bietet das FM-DGV-Verfahren das Potential, um zur Optimierung der Liner und damit langfristig zur Verringerung des Fluglärms beizutragen.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung des gemeinsamen Forschungsprojekts Cz55/25-1 bzw. En797/2-1.

Literatur

European Commission, 2001: "European Aeronautics: A Vision for 2020", Office for official Publications of the European Communities

Tam, C. K. W., Kurbatskii, K. A., Ahuja, K. K., Gaeta, R. J., 2001: "A numerical and experimental investigation of the dissipation mechanisms of resonant acoustic liners", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 245, pp. 545-557

Heuwinkel, C., Enghardt, L., Röhle, I., Mühlbauer, B., Noll, B., Aigner, M., Busse, S., 2008: "Comparison of Experimental and Numerical Results Concerning the Damping of Perforated Liners With Bias Flow", in: ASME Turbo Expo, No. GT2008-50585, Berlin

Heuwinkel, C., Fischer, A., Röhle, I., Enghardt, L., Bake, F., Piot, E., Micheli, F., 2010: "Characterization of a Perforated Liner by Acoustic and Optical Measurements", in: 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, No. 2010-3765, Stockholm

Berson, A., Michard M., Blanc-Benon, P., 2008: "Measurement of acoustic velocity in the stack of a thermoacoustic refrigerator using particle image velocimetry", *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 1015–1023

Taylor, K. J., 1976: "Absolute measurement of acoustic particle velocity", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 59, pp. 691–694

Thompson, M. W., Atchley, A. A., 2005: "Simultaneous measurement of acoustic and streaming velocities in a standing wave using laser Doppler anemometry", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 117, pp. 1828–1838

Hann, D. B., Greated, C. A., 1997: "The measurement of flow velocity and acoustic particle velocity using particle-image velocimetry" *Measurement Science and Technology*, Vol. 8, pp. 1517–1522

Müller, H., Eggert, M., Czarske, J., Büttner, L., Fischer, A., 2007: "Single-camera Doppler global velocimetry based on frequency modulation techniques", *Experiments in Fluids*, Vol. 43, pp. 223–232

Schlüßler, R., Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., 2011: „Optische Schallschnellemessung mittels Doppler-Global-Velozimeter mit Laserfrequenzmodulation“, 19. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Ilmenau

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H. 2009: "Measurements of velocity spectra using time-resolving Doppler global velocimetry with laser frequency modulation and a detector array", *Experiments in Fluids*, Vol. 47, pp. 599–611