

Laseroptische Schallschnellemessung an Schalldämpfern

Laser optical measurement of the acoustic particle velocity at sound absorbers

**Daniel Haufe¹, Andreas Fischer¹, Jürgen Czarske¹,
Anita Schulz², André Fischer³, Friedrich Bake³, Lars Enhardt³**

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, Liner
acoustic particle velocity, flow measurement, DGV, liner

Kurzfassung

Zur Optimierung von perforierten Schalldämpfern mit zusätzlicher Durchströmung (sog. Bias Flow Liner) fehlt bislang ein umfassendes Verständnis der Dämpfungsmechanismen, welche auf einer Strömungs-Schall-Interaktion beruhen. Zur Erlangung tiefergehender Erkenntnisse über die Dämpfungsphänomene werden berührungslose Verfahren zur gleichzeitigen Messung der Schallschnelle und der Strömungsgeschwindigkeit benötigt. Hierbei werden mehrkomponentige und mehrdimensionale Geschwindigkeitsmessungen mit geringer Unsicherheit gefordert. Zur Analyse des Umwandlungsprozesses von Schallenergie in Wärme (dissipative Dämpfung), beispielsweise über eine Turbulenzenergiekaskade, ist zudem die Bestimmung von Geschwindigkeitsspektren erforderlich. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass die Doppler-Global-Velozimetrie mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation diese Anforderungen erfüllt. In einem ersten Schritt erfolgt eine Validierung an einem bekannten Schallfeld mit überlagerter Strömung mit einer maximalen Machzahl von 0,27. Die dabei auftretende Standardunsicherheit der gemessenen Geschwindigkeitsamplitude betrug 1 mm/s bis 12 mm/s und wird von turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen in der Strömung limitiert. Schließlich wurde das Strömungsgeschwindigkeits- und Schallschnellefeld an einem durchströmten Schalldämpfer dreikomponentig erfasst. Die dabei aufgenommenen Geschwindigkeitsspektren bis 25 kHz erlauben die Analyse des Energietransfers von Schallenergie zu Strömungsenergie. Dies ermöglicht zukünftig ein besseres aeroakustisches Verständnis der Dämpfungsmechanismen zur Optimierung von Bias Flow Linern.

Einleitung

Um Flugzeug- oder Gasturbinenlärm zu mindern, werden beispielsweise sogenannte Bias Flow Liner zur Schalldämpfung eingesetzt (Rupp et al., 2010). Dabei wird ein künstlich erzeugter Luftstrom durch perforierte Wände eingeblasen, der mit der Schallwelle interagiert (Eldredge et al., 2003). Zur Optimierung der Dämpfungseffizienz solcher Liner fehlt ein tiefergehendes Verständnis der zugrunde liegenden Wechselwirkungsmechanismen zwischen Strömungs- und Schallfeld. Hierfür bedarf es berührungsloser Messtechnik zur simultanen vektoriellen Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit und der Schallschnelle¹ in der Nähe des Liners. Da sich Schallschnelle und Strömungsgeschwindigkeit um drei Größenordnungen oder mehr unterscheiden können, wird eine hohe Dynamik des verwendeten Messsystems von mindestens 1000 benötigt. Wie bereits durch Haufe et al. 2012 gezeigt wurde, bietet die Doppler-Global-Velozimetrie mit sinusförmiger Frequenzmodulation (FM-DGV) eine solche hohe Dynamik von rund 4000. Während mit FM-DGV bislang lediglich einkomponentige und eindimensionale Messungen gezeigt wurden, sollen in diesem Beitrag erstmals mehrkomponentige Geschwindigkeitsfeldmessungen an einem Bias Flow Liners demonstriert werden. Hierfür soll in einem ersten Schritt die Schallschnellemessung mit FM-DGV in einer Strömung mit einer maximalen Machzahl von 0,27 mittels etablierter Mikrofontechnik validiert werden. Für diesen Fall wird ein bekanntes Strömungs- und Schallfeld zu Grunde gelegt. Zudem wird eine Charakterisierung der Eigenschaften des Messsystems (Messrate, Messunsicherheit) im Hinblick auf die Anwendung am Liner durchgeführt. Darauf aufbauend wird das Strömungs- und Schallfeld am Bias Flow Liner gemessen. Zusätzlich zur Schallschnelle werden die ebenfalls gewonnenen Turbulenzspektren beispielhaft gezeigt. Diese können zukünftig zu Analyse der zur Dämpfung beitragenden Energieumwandlungsprozesse von Schallenergie zur Strömungsenergie dienen.

Experimenteller Aufbau

Der erstmalige Einsatz von FM-DGV zur Schallschnellemessung an einem Bias Flow Liner erfolgte am Strömungskanal DUCT-R im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin, siehe Abbildung 1. Die wichtigsten experimentellen Parameter sind in der Tabelle 1

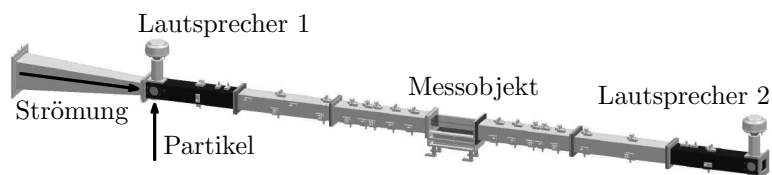


Abb. 1: Aufbau der Schallschnellemessung am Strömungskanal DUCT-R

aufgeführt. Das hierfür verwendete FM-DGV-Messsystem wird ausführlich u. a. in Fischer et al. 2009 beschrieben, daher wird hier nicht näher darauf eingegangen. Die Ermittlung der Amplitude der Schallschnelle erfolgt gemäß Haufe et al. 2012 anhand des Fourierkoeffizienten der mittels FM-DGV gemessenen Geschwindigkeitszeitreihe.

Validierung & Charakterisierung

Zur Validierung der Schallschnellemessung mittels FM-DGV wird ein Absolutvergleich der gemessenen Schallschnelle zu Ergebnissen der bewährten Mikrofontechnik (Heuwinkel et al. 2010) vollzogen. Hierzu wurde das Schnelleprofil mit beiden Messtechniken im zunächst schallharten Strömungskanal (d. h. ohne Linerperforation) gewonnen. Dabei wurden 14 wand-

¹ mit Schall assoziierte Wechselgeschwindigkeit

Kanallänge (gesamt)	4 m
Querschnittsfläche	60 mm x 80 mm
Wandung	Aluminium, 10 mm stark
Strömungsgeschwindigkeit	Ma 0,02 ... 0,25
Strömungstemperatur	25 ... 30 °C
Schalldruckpegel	99 ... 130 dB
Schallfrequenz	488 ... 1854 Hz
Partikel	DEHS, $\varnothing \approx 1 \mu\text{m}$

Tab. 1: experimentelle Parameter für die Schallschnellemessung

bündig montierte, entlang der Kanalachse verteilte Kondensatormikrofone zur Schalldruckmessung eingesetzt. Unter Annahme eines ebenen akustischen Wellenfeld lässt sich daraus mittels Wellenfelderlegung gemäß Heuwinkel et al. 2010 das Profil der Schallschnelleamplituden entlang der axialen Position im Kanal bestimmen. Die so erhaltenen Profile sind beispielhaft in Abbildung 2 im Vergleich zu den FM-DGV-Messergebnissen für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten bis maximal Ma 0,27 dargestellt, jeweils mit den 95%-Konfidenzintervallen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse der beiden verwendeten Messtechniken. Somit ist die Schallschnellemessung mittels FM-DGV validiert. Weiterhin wurden die mit FM-DGV und A-PIV bestimmten mittleren Strömungsgeschwindig-

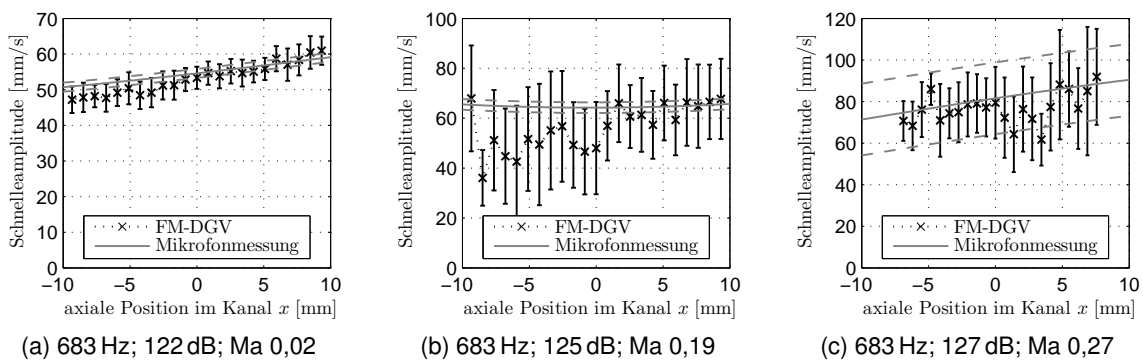


Abb. 2: Vergleich der Profile der mittels FM-DGV und Mikrofonmessungen ermittelten Schallschnelleamplitude

keiten verglichen und zeigten ebenfalls eine gute Übereinstimmung (nicht dargestellt).

Die Standardunsicherheit σ für die gemessene Schallschnelleamplitude beträgt, unter Berücksichtigung von rein zufälligen Beiträgen, $\sigma = 1 \text{ mm/s}$ (Ma 0,02) bzw. $\sigma = 12 \text{ mm/s}$ (Ma 0,25) bei einer Messdauer von $T = 80 \text{ s}$. Die Unsicherheit hängt gemäß

$$\sigma = \sqrt{\frac{2S_v}{T}} \quad (1)$$

von der spektralen Leistungsdichte S_v der gemessenen Geschwindigkeit ab (Parsevalsches Theorem). Dabei wird S_v von der Turbulenz der Strömungsgeschwindigkeit dominiert, die mittels der gemessenen Geschwindigkeitsspektren (Abbildung 3) veranschaulicht wird. So liegt bei höheren Machzahlen ein erhöhte spektrale Leistungsdichte S_v vor, was typischen Turbulenzmodellen entspricht. Die experimentell bestimmten Standardunsicherheiten der Schallschnelleamplitude steigen für höhere Machzahlen, in Übereinstimmung mit Gleichung (1). Damit ist gezeigt, dass die Standardunsicherheit der im Kanal gemessenen Schallschnelleam-

plitude durch die Turbulenz der Strömung und nicht durch Einflüsse des Messsystems (wie beispielsweise Detektorrauschen) dominiert wird.

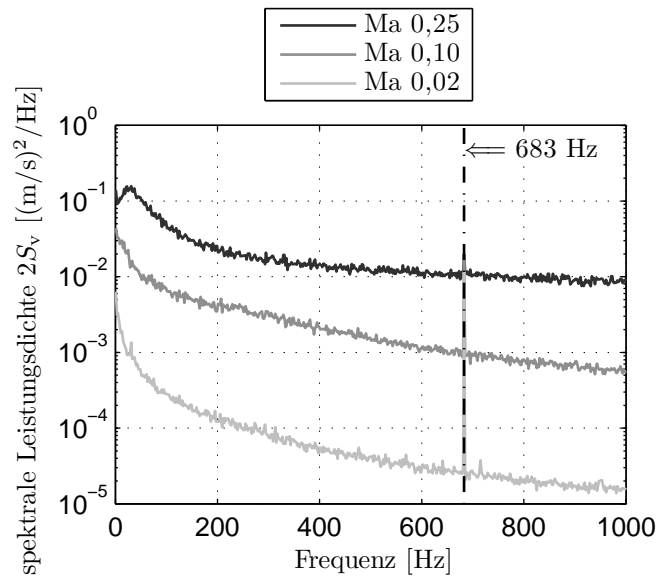


Abb. 3: Beispiele für die gemessene spektrale Leistungsdichte (einseitig) der Geschwindigkeit im schallharten Kanal

Anwendung

Die im vergangenen Abschnitt validierte FM-DGV-Technik wurde erstmals zur gleichzeitigen Messung von Schallschnelle und Strömungsgeschwindigkeit an einem Bias Flow Liner angewendet, was im Folgenden beschrieben wird: Als Messobjekt wurde ein generischer Bias Flow Liner, bestehend aus einem perforierten Blech (siehe Abbildung 4) mit dahinterliegendem Hohlraum, mit vergleichbaren Parametern wie in Heuwinkel et al. 2010 verwendet. Es wurden

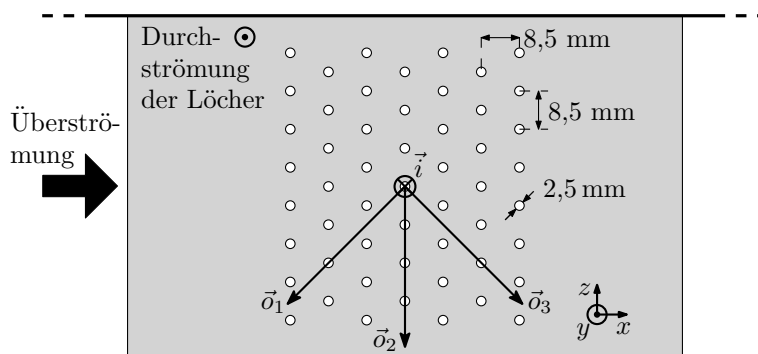


Abb. 4: Darstellung des untersuchten Bias Flow Liners sowie Beleuchtungsrichtung \vec{i} und Beobachtungsrichtung $\vec{o}_{1...3}$ zur Messung von drei Geschwindigkeitskomponenten

verschiedene Durchströmungs- und Überströmungsgeschwindigkeiten gewählt, um beispielsweise das Verhalten des Liners mit und ohne Einblasung (Bias Flow) zu untersuchen. Die Schallanregungsfrequenz betrug $1073\ Hz$, bei der gemäß vorheriger Untersuchungen näherungsweise die maximale Dämpfung des Liners erreicht wird. Die maximal gemessene Schalldruckpegel im Kanal betrug $130\ dB$. Die FM-DGV-Messungen erfolgten unter Nutzung eines

entlang der y -Achse angeordneten fasergekoppelten Detektorarrays zur Mehrpunktmessung an 23 Punkten. Zudem wurden 8 Traversierpunkten entlang der x -Achse für $z = 0$ gewählt, wobei der Koordinatenursprung in der Mitte des zentralen Linerlochs liegt. Zur Bestimmung von drei Geschwindigkeitskomponenten erfolgten drei sequentielle Messungen mit drei verschiedenen Beobachtungsrichtungen \vec{o}_1 bis \vec{o}_3 . Die so gemessenen Geschwindigkeitskomponenten (für die Schallanregungsfrequenz) in Richtung $\vec{o}_k - \vec{i}$, $k = 1 \dots 3$ wurden gemäß Charrett et al. 2007 in kartesische Koordinaten transformiert. In Abbildung 5 beispielhaft dargestellt sind die in der x - y -Ebene gemessenen Geschwindigkeitsamplituden sowie die mittlere Strömungsgeschwindigkeit für den Fall, dass der Bias Flow Liner mit Ma 0,1 überströmt und mit Ma 0,1 (entspricht hier einem Luftmassenstrom von etwa 20 kg/h) durchströmt wird. Bei der Messung

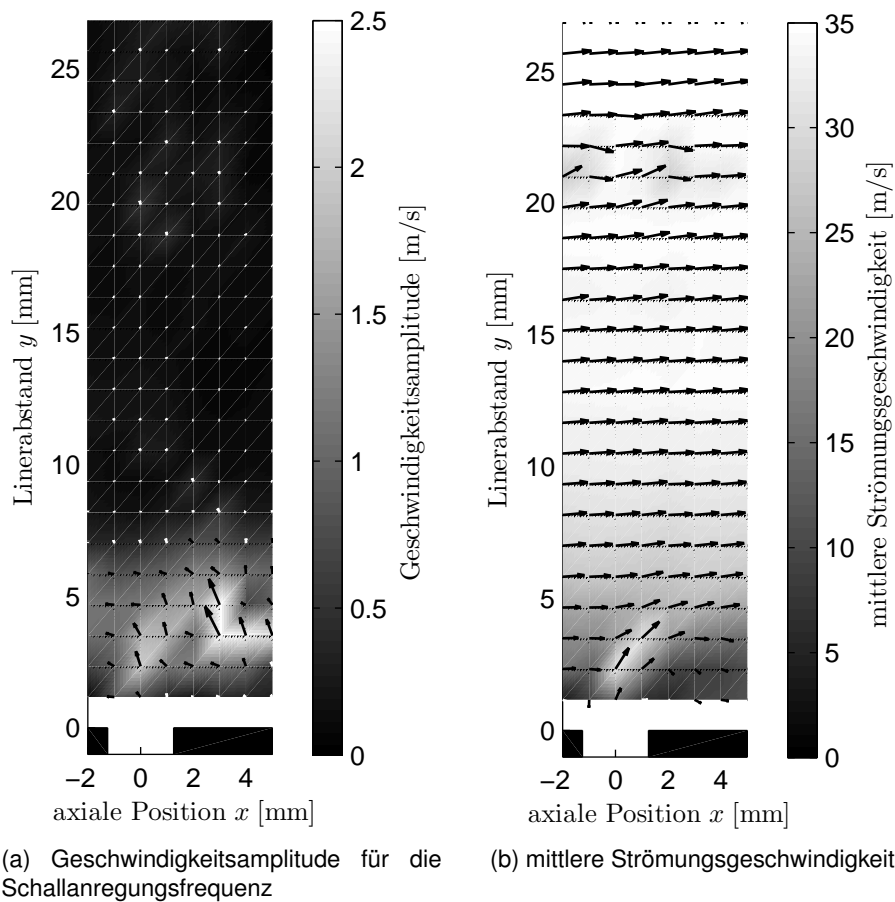


Abb. 5: gemessene Geschwindigkeiten (in-plane-Komponenten) am durch- und überströmten Bias Flow Liner

wurde eine Ortsauflösung von knapp 1 mm erreicht. Die Messunsicherheit betrug 5 mm/s bei einer Messzeit von 80 s. Im gemessenen Strömungsgeschwindigkeitsfeld in Abb. 5b sind sowohl die Überströmung als auch die Durchströmung des Liners mit jeweils ca. 30 m/s sowie deren Vermischung zu erkennen. Bei $y \approx 21$ mm treten leichte Artefakte auf, die auf störende Lichtreflexion im Kanal zurückzuführen sind. Diese können zukünftig durch geeignete Maßnahmen (z. B. Schwärzung bzw. Verwendung von Feldblenden) unterdrückt werden. Beim gemessenen Geschwindigkeitsamplitudenfeld in Abb. 5a ist eine deutliche Aktivität in der Nähe des Liners zu erkennen, hier sind Amplituden bis 2,5 m/s zu verzeichnen. Geht man hierbei von einer Schallschnelleamplitude aus, würde dies einem unwahrscheinlich hohen Schalldruckpegel von etwa 151 dB entsprechen. Daher wird vielmehr angenommen, dass hier keine rein akustische Oszillationen sondern vielmehr schallinduzierte Strömungsozillationen vorliegen. Deshalb wird zukünftig eine Zerlegung des gemessenen Geschwindigkeitsamplitudenfeldes in

schallinduziertes Strömungsfeld und reines Schallfeld, wie bei De Roeck et al. 2007, angestrebt.

Weiterhin können zur Untersuchung des Transfers von Schall- zu Strömungsenergie neben der Messung von Strömungsgeschwindigkeit und Schallschnelle dank der hohen Messrate von FM-DGV (bis zu 100 kHz) gemäß Fischer et al. 2009 auch Geschwindigkeitsspektren aufgelöst werden. Die resultierenden einseitigen Leistungsdichtespektren der Geschwindigkeit sind in Abbildung 6 für verschiedene Orte in der Nähe des Liners dargestellt. Auffällig sind im Vergleich der dargestellten Verläufe für den Abstand $y = 2$ mm unterschiedliche Leistungsdichten in der Umgebung der Schallanregungsfrequenz direkt über dem untersuchten Linerloch (Abbildung 6a) und im Nachlauf dessen (Abbildung 6b). Die Analyse solcher Unterschiede in den spektralen Verläufen im Nahfeld des Liners erlaubt zukünftig Untersuchungen des Energietransfers von der Schallwelle zur Strömungsturbulenz. Somit können perspektiv neue Erkenntnisse zum dissipativen Dämpfungsverhalten des Liners gewonnen werden.

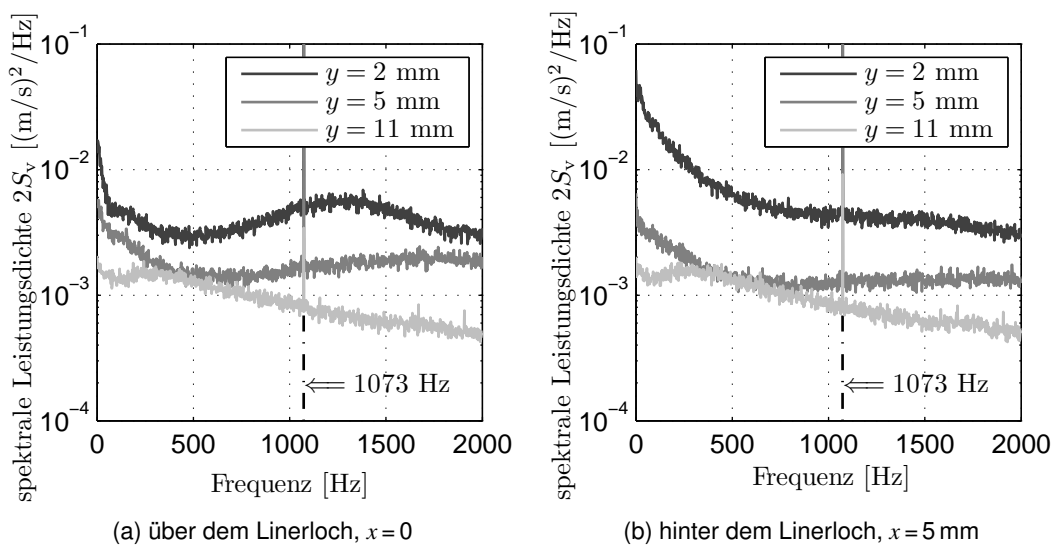


Abb. 6: Vergleich der gemessenen spektralen Leistungsdichte der Geschwindigkeit am Bias Flow Liner für verschiedene Orte

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden simultane Messungen der Schallschnelle und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit an einem Schalldämpfer, am Beispiel eines generischen Bias Flow Liners, vorgestellt. Dabei kam erstmals die Doppler-Global-Velozimetrie mit sinusförmiger Frequenzmodulation zum Einsatz. Hierfür wurde zunächst die Messmethode erfolgreich für Schallschnellemessungen anhand von Vergleichsmessung mit bewährter Mikrofontechnik validiert. Die dabei resultierende Unsicherheit für die Schallschnelle hängt neben der Messdauer (hier: 80 s) von der Turbulenz der Strömung ab und betrug beträgt bei überlagerter Strömung mit einer Machzahl von 0,1 lediglich 5 mm/s. Dies erlaubt die Anwendung für eine gleichzeitige Messung der Strömungszustände (Über- und Durchströmung) sowie der akustischen Aktivität (akustisch induzierte Strömungszosillation) in der Nähe des Liners. Neben der flächenhaften, mehrkomponentigen Messung gestattet die hohe Messrate von maximal 100 kHz die Auflösung von Geschwindigkeitsspektren. In zukünftigen Arbeiten ist die Trennung von rein akustischen und akustisch induzierten Geschwindigkeitssosillation z. B. mittels Helmholtz-Hodge-Zerlegung zu verfolgen. Dadurch wird die Analyse von Strömungs-Schall-Interaktionsphänomenen, welche zur Dämpfung beitragen, ermöglicht. Somit kann perspek-

tivisch ein tiefgehendes Verständnis der Dämpfungsmechanismen erlangt werden, um zur Effizienzsteigerung der Schalldämpfer beizutragen.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung des gemeinsamen Forschungsprojekts CZ55/25-1 bzw. EN797/2-1. Der Firma Intelligent Laser Applications (ILA) GmbH sei herzlich gedankt für die leihweise Bereitstellung des Partikelgenerators PivPart40.

Literatur

Charrett, T. O. H., Nobes, D. S., Tatam, R. P., 2007: "Investigation into the selection of viewing configurations for three-component planar Doppler velocimetry measurements", *Applied Optics*, Vol. 46, No. 19, pp. 4102–4116

De Roeck, W., Baelmans, M., Desmet, W., 2007: "An Aerodynamic/Acoustic Splitting Technique for Hybrid CAA Applications", in: 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2007-3726, Rome, Italy

Eldredge, J. D., Dowling, A. P., 2003: "The absorption of axial acoustic waves by a perforated liner with bias flow", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 485, No. 25, pp. 307–335

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, No. 4, pp. 599–611

Haufe, D., Schlüßler, R., Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., 2012: "Optical multi-point measurement of the acoustic particle velocity in a superposed flow using a spectroscopic laser technique", *Measurement Science and Technology*, Vol. 23, No. 8, pp. 085306–085313

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, 2010-3765, Stockholm

Rupp, J., Carrotte, J., Spencer, A., 2010: "Interaction between the acoustic pressure fluctuations and the unsteady flow field through circular holes", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, No. 6, pp. 061501–1–061501–9