

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Untersuchung optischer Verfahren zur gleichzeitigen
Messung von Strömungs- und Schallfeldern an
aeroakustischen Schalldämpfern

Daniel Haufe

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. H. Lakner

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Czarske Tag der Einreichung: 06.07.2015

Prof. Dr. rer. nat. L. Enghardt Tag der Verteidigung: 18.12.2015

Prof. Dr.-Ing. I. Röhle

Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik

Band 10

Daniel Haufe

**Untersuchung optischer Verfahren zur gleichzeitigen
Messung von Strömungs- und Schallfeldern an
aeroakustischen Schalldämpfern**

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4267-2

ISSN 1866-5519

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die Arbeiten zu dieser Dissertation entstanden an der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik, deren Leiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske, ich zu besonderem Dank verpflichtet bin. Ihm gebührt nicht nur der Dank für die Aufnahme meiner Person als wissenschaftlichen Mitarbeiter und Doktoranden, sondern ebenso für das Vertrauen und die Freiheiten, die er mir für die Bearbeitung der Forschungsaufgaben geschenkt hat. Ein herzlicher Dank geht zudem an alle Mitglieder seines Lehrstuhls, von deren Hilfsbereitschaft und Engagement ich stets profitiert habe. Hierbei möchte ich speziell Herrn PD Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer danken, dessen motivierendes, kreatives und kompetentes Handeln mir stets ein großes Vorbild war und noch immer ist. Weiterhin sei den Herren Dr. rer. nat. Lars Büttner, Dr.-Ing. Jörg König und Dipl.-Phys. Raimund Schlüßler für zahlreiche Diskussionen und Hilfestellungen sowie insbesondere meinem Zimmerkollegen Dr.-Ing. Nektarios Koukourakis („Neki“) für die freundliche Atmosphäre gedankt.

Für die fruchtbringende Kooperation mit der TU Berlin und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt möchte ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Lars Enghardt vielfach meinen Dank aussprechen, ebenso wie den Herren Dr.-Ing. Friedrich Bake und Dr.-Ing. André Fischer sowie Frau Dipl.-Ing. Anita Schulz für die kollegiale Zusammenarbeit. Für ihre Mitwirkung im Rahmen von Studien- bzw. Diplomarbeiten und wissenschaftlichen Hilfstätigkeiten danke ich (in alphabetischer Reihenfolge) Christian Mächler, Sebastian Pietzonka, Heiko Scholz und Lena Schröder. Dankend hervorheben möchte ich die Übernahme der Gutachtertätigkeit von Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske, Prof. Dr. rer. nat. Lars Enghardt und Prof. Dr.-Ing. Ingo Röhle sowie die Bereitschaft für die Mitgliedschaft bzw. den Vorsitz bei der Promotionskommission von Prof. Dr.-Ing. habil. Rüdiger Hoffmann bzw. Prof. Dr.-Ing. Hubert Lakner.

Wegen der abschnittsweise erhaltenen Finanzierung von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Drittmittelprojekt) und vom Studentenwerk Dresden (Sächsisches Landesstipendium) gilt den beteiligten Institutionen mein aufrichtiger Dank. Darüber hinaus bedanke ich mich bei den Fakultätswerkstätten (Mechanik-, Elektronik- und Diplomandenwerkstatt) für ihre Zuarbeiten, sowie bei den Firmen TOPTICA Photonics AG und ILA GmbH für die Bereitstellung des verwendeten Lasers und des eingesetzten Partikelgenerators.

Zu guter Letzt möchte ich meinem Familien- und Freundeskreis meinen höchsten Dank für die Unterstützung vor und während meiner Promotionszeit zum Ausdruck bringen. Dank dem erhaltenen Rückhalt und Zuspruch konnte ich mein Promotionsvorhaben beginnen und zu einem erfolgreichen Abschluss bringen.

Kurzfassung

Um Flugzeugtriebwerke und stationäre Gasturbinen schadstoffärmer und leiser zu gestalten, werden effizientere Dämpfer zur Unterdrückung des in der Brennkammer entstehenden Schalls benötigt. Hierfür sollen durchströmte, perforierte Wandauskleidungen eingesetzt werden, die sogenannten Bias-Flow-Liner (BFL). Die Erhöhung der Dämpfungseffizienz von BFL erfordert jedoch ein tiefer gehendes Verständnis der aeroakustischen Dämpfungsmechanismen. Die Analyse der Mechanismen bedarf einer experimentellen Untersuchung des Vektorfeldes der Fluidgeschwindigkeit, die sowohl die Strömungsgeschwindigkeit als auch die Schallschnelle enthält. Zur gleichzeitigen Erfassung beider Größen wird eine berührungslose sowie örtlich und zeitlich hoch aufgelöste Messung der Geschwindigkeit von im Mittel 10 m/s bis 100 m/s bei einer Unsicherheit von maximal 10 mm/s für die Schallschnelleamplitude und einem Dynamikumfang von 1000 bis 10 000 benötigt. Für diese Messung sind optische Verfahren vielversprechend, genügen aber bisher nicht diesen Anforderungen.

Deshalb wurden im ersten Schritt neuartige optische Geschwindigkeitsmessverfahren erstmals bezüglich der Eignung für aeroakustische Untersuchungen am BFL, speziell hinsichtlich der Unsicherheit und des Dynamikumfangs, charakterisiert: der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilensor (LDV-PS), die akustische Particle Image Velocimetry (A-PIV) und die Doppler-Global-Velocimetrie mit Frequenzmodulation (FM-DGV). Aus dem Messunsicherheitsbudget geht für alle Verfahren die turbulente Strömungsfluktuation als dominierender Beitrag zur Unsicherheit für die gemessene Schnelleamplitude hervor, wobei die Unsicherheit durch eine Erhöhung der Messdauer gesenkt werden kann. Für eine Messdauer von 80 s beträgt die mittels FM-DGV erzielte Unsicherheit bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 100 m/s beispielsweise 10 mm/s, woraus ein Dynamikumfang von 10 000 resultiert. Demnach erfüllen die neuartigen Verfahren die Voraussetzungen für die Anwendung am BFL, was im zweiten Schritt experimentell demonstriert wurde. Hierbei wurde zwecks Untersuchung kleiner Strukturen der LDV-PS mit einer feinen Ortsauflösung von minimal 10 μm genutzt. Ferner wurde die großflächige Erfassung mittels A-PIV zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen den Perforationslöchern eingesetzt und eine spektrale Untersuchung der mittels FM-DGV gemessenen Geschwindigkeit bei einer hohen Messrate von 100 kHz durchgeführt. Im Ergebnis wurden folgende Erkenntnisse zum Dämpfungsverhalten gewonnen: Am BFL tritt eine Interaktion von Strömung und Schall auf, die zu einer Oszillation der Geschwindigkeit mit hoher Amplitude bei der Schallanregungsfrequenz führt. Aus der erstmals durchgeführten Zerlegung der volumetrisch gemessenen Geschwindigkeit in Strömungsgeschwindigkeit und Schallschnelle resultiert, dass die akustisch induzierte oszillierende Geschwindigkeit vorwiegend dem Strömungsfeld zuzuordnen ist. Folglich wurde ein Energietransfer vom Schallfeld ins Strömungsfeld am BFL nachgewiesen, der wegen des sich typischerweise anschließenden Zerfalls von Strömungswirbeln und der finalen Umwandlung in Wärmeenergie zur Dämpfung beiträgt. Zudem wurde mittels spektraler Analyse der Geschwindigkeit ein breitbandiger Energiezuwachs bei tonaler Schallanregung festgestellt, welcher mit der Dämpfungseffizienz korreliert ist. Somit wird die These der primär von der akustisch induzierten Wirbelbildung herrührenden Dämpfung gestützt. Diese mit den neuartigen optischen Messverfahren gewonnenen Erkenntnisse tragen perspektivisch zur Optimierung von BFL hinsichtlich einer hohen Dämpfungseffizienz bei.

Abstract

In order to design aircraft engines and stationary gas turbines with a lower emission of pollutants and noise, dampers with an increased efficiency for the suppression of the sound generated in a combustion chamber are needed. For this aim, perforated liners with a flow through the perforation, called bias flow liners (BFL), are applied. However, increasing the damping efficiency of a BFL demands a deeper understanding of the aeroacoustic damping mechanisms. The analysis of the mechanisms requires an experimental investigation of the fluid velocity vector field which comprises both the flow velocity and the acoustic particle velocity. To acquire both quantities simultaneously, a contactless and both spatially and temporally highly-resolving measurement of the velocity having a mean value of 10 m/s to 100 m/s with a maximum uncertainty of 10 mm/s for the amplitude of the acoustic particle velocity and a dynamic range of 1000 to 10 000 is necessary. To this end, optical methods are promising, however, they were previously not sufficient regarding these requirements.

For this reason, novel optical methods for the velocity measurement have initially been characterized concerning their suitability for aeroacoustic investigations at BFL for the first time, especially regarding the uncertainty and the dynamic range: laser Doppler velocity profile sensor (LDV-PS), acoustic Particle Image Velocimetry (A-PIV) and Doppler global velocimetry with frequency modulation (FM-DGV). As shown in the measurement uncertainty budget, the turbulent fluctuation has the most dominant contribution to the uncertainty of the measured amplitude of the acoustic particle velocity for all methods, though, the uncertainty can be decreased by increasing the measurement duration. Using FM-DGV as an example, the uncertainty at a flow velocity with a mean value of 100 m/s amounts to 10 mm/s for a measurement duration of 80 s, which results in a dynamic range of 10 000. Following that, the investigated methods fulfil the requirements for the application at the BFL, which was experimentally proven in a second step. For the investigation of small structures, the LDV-PS was used employing a fine spatial resolution of minimum 10 μm . Furthermore, the large-scale acquisition by A-PIV was utilized to investigate the interaction between the perforation holes, and a spectral analysis of the velocity was conducted, measured using FM-DGV at high measurement rate of 100 kHz. As a result, the following insights have been attained about the damping mechanisms: An interaction of sound and flow occurs at the BFL, where an oscillation of the velocity is generated, with a high amplitude at the sound excitation frequency. As obtained by the decomposition of the volumetrically measured velocity into flow velocity and acoustic particle velocity for the first time, the acoustically induced oscillating velocity predominantly corresponds to the flow field. Thus, an energy transfer from the sound field to the flow at the BFL has been proven, which accounts for the damping, due to the typically following decay of flow vortices and the eventual transform into heat energy. In addition, a spectral analysis of the velocity revealed a broadband energy gain for tonal sound excitation and the gain is correlated to the damping efficiency. Consequently, this corroborates the assumption that the damping is primarily resulting from an acoustically induced vortex generation. These insights gained by the novel optical measurement methods perspective contribute to the optimization of BFL concerning a high damping efficiency.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Symbolverzeichnis | III |
| Abkürzungsverzeichnis | VI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation und Zielstellung | 1 |
| 1.2 Stand der Technik | 3 |
| 1.3 Lösungsansatz und Struktur der Arbeit | 8 |
| 2 Theoretische Grundlagen | 11 |
| 2.1 Geschwindigkeitsfelder in Fluiden | 11 |
| 2.1.1 Beschreibung von Strömungsfeldern | 12 |
| 2.1.2 Beschreibung von Schallfeldern | 13 |
| 2.2 Ausgewählte Verfahren für die Messung der Fluidgeschwindigkeit | 16 |
| 2.2.1 Laser-Doppler-Velozimetrie (LDV) | 18 |
| 2.2.1.1 konventionelle LDV | 18 |
| 2.2.1.2 Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor (LDV-PS) | 21 |
| 2.2.2 Particle Image Velocimetry (PIV) | 22 |
| 2.2.2.1 konventionelle PIV | 22 |
| 2.2.2.2 akustische PIV (A-PIV) | 24 |
| 2.2.3 Doppler-Global-Velozimetrie (DGV) | 24 |
| 2.2.3.1 konventionelle DGV | 24 |
| 2.2.3.2 DGV mit Frequenzmodulation (FM-DGV) | 26 |
| 2.3 Signalverarbeitung | 28 |
| 2.3.1 Signalmodell | 28 |
| 2.3.2 Parameterschätzung | 29 |
| 2.3.3 Phasenaufgelöste Geschwindigkeitsschätzung | 31 |
| 2.3.4 Trennung von Strömungsfeld und Schallfeld | 32 |
| 3 Experimentelle Voraussetzungen | 35 |
| 3.1 Aeroakustik-Versuchsstände | 35 |
| 3.2 Geschwindigkeitsmesssysteme | 37 |
| 3.2.1 LDV-PS-System | 37 |
| 3.2.1.1 Aufbau | 38 |
| 3.2.1.2 Signalverarbeitung | 39 |
| 3.2.2 A-PIV-System | 40 |
| 3.2.2.1 Aufbau | 41 |
| 3.2.2.2 Signalverarbeitung | 42 |
| 3.2.3 FM-DGV-System | 42 |
| 3.2.3.1 Aufbau | 42 |
| 3.2.3.2 Signalverarbeitung | 44 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | Charakterisierung der Geschwindigkeitsmessverfahren | 45 |
| 4.1 | Messunsicherheit und Dynamikumfang | 45 |
| 4.1.1 | LDV-PS-Unsicherheitsbudget (Einzelmessung) | 46 |
| 4.1.2 | A-PIV-Unsicherheitsbudget (Einzelmessung) | 50 |
| 4.1.3 | FM-DGV-Unsicherheitsbudget (Einzelmessung) | 53 |
| 4.1.4 | Verfahrensunabhängige Unsicherheitsbeiträge | 56 |
| 4.1.5 | Parameterunsicherheit (Mehrfachmessung) und Dynamikumfang | 57 |
| 4.2 | Validierung mit Referenzdaten aus Mikrofonmessungen | 60 |
| 4.2.1 | LDV-PS-Validierung | 62 |
| 4.2.2 | A-PIV-Validierung | 64 |
| 4.2.3 | FM-DGV-Validierung | 66 |
| 4.3 | Schlussfolgerungen | 70 |
| 5 | Anwendung der optischen Verfahren am Bias-Flow-Liner | 73 |
| 5.1 | Einordnung der Bias-Flow-Liner und Problemstellung | 73 |
| 5.2 | Untersuchungsgegenstand | 75 |
| 5.3 | Untersuchungen der Dämpfungsmechanismen | 77 |
| 5.3.1 | Untersuchungen mit LDV-PS | 78 |
| 5.3.1.1 | Aufbau und Durchführung | 78 |
| 5.3.1.2 | Ergebnisse | 80 |
| 5.3.1.3 | Fazit | 82 |
| 5.3.2 | Untersuchungen mit A-PIV | 82 |
| 5.3.2.1 | Aufbau und Durchführung | 83 |
| 5.3.2.2 | Ergebnisse | 83 |
| 5.3.2.3 | Fazit | 86 |
| 5.3.3 | Untersuchungen mit FM-DGV | 86 |
| 5.3.3.1 | Aufbau und Durchführung (flächige Messung) | 86 |
| 5.3.3.2 | Ergebnisse (flächige Messung) | 87 |
| 5.3.3.3 | Aufbau und Durchführung (volumetrische Messung) | 92 |
| 5.3.3.4 | Ergebnisse (volumetrische Messung) | 93 |
| 5.3.3.5 | Fazit | 97 |
| 5.4 | Schlussfolgerungen | 98 |
| 6 | Zusammenfassung | 101 |
| 6.1 | Erkenntnisse und Fortschritt für die Wissenschaft | 101 |
| 6.2 | Ausblick auf weiterführende Arbeiten | 105 |
| A | Zur örtlichen Mittelung über die Beobachtungsapertur | 109 |
| B | Zur Temperaturabhängigkeit der Schallschnelle bei Wellenüberlagerung | 111 |
| | Literaturverzeichnis | 113 |
| | Publikationsverzeichnis | 125 |
| | Lebenslauf | 129 |

Symbolverzeichnis

| Symbol | Beschreibung |
|-------------------------|--|
| A_1 | Amplitude der 1. Harmonischen der Modulationsfrequenz im Detektor-signal |
| A_2 | Amplitude der 2. Harmonischen der Modulationsfrequenz im Detektor-signal |
| \hat{a}_{osc} | Amplitude einer kosinusförmigen Oszillation |
| B | mathematisches Gebiet |
| \hat{b}_{osc} | Amplitude einer sinusförmigen Oszillation |
| c_{Licht} | Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts |
| c_{Schall} | Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls |
| d | Streifenabstand eines Interferenzstreifensystems |
| F_{∞} | greensche Funktion |
| f | Frequenz |
| f_{center} | Mittelfrequenz bei der Laserfrequenzmodulation |
| f_{Doppler} | Dopplerfrequenz |
| f_{hub} | Modulationshub bei der Laserfrequenzmodulation |
| $f_{\text{Laserlicht}}$ | Frequenz des Laserlichts |
| f_{mod} | Modulationsfrequenz der Laserfrequenzmodulation |
| f_{osc} | Frequenz der Oszillationsgeschwindigkeit |
| f_{Schall} | Frequenz des Schallsignals |
| $f_{\text{Streulicht}}$ | Frequenz des Streulichts |
| f_v | Messrate der Geschwindigkeit |
| G_v | Übertragungsfunktion für die Geschwindigkeit |
| g | Fallbeschleunigung |
| I_{turb} | Turbulenzintensität |
| \vec{i} | Einheitsvektor der Einfallrichtung |
| k_{Schall} | Wellenzahl des Schalls |
| Lp_{Schall} | Schalldruckpegel |
| $l_{x,y}$ | Breite des Messvolumens |
| l_z | Länge des Messvolumens |
| M | Machzahl |
| \dot{m} | Massenstrom |
| N_{Loch} | Anzahl der Lochöffnungen der BFL-Perforation |
| N_{Segment} | Anzahl der Segmente im Messvolumen des LDV-PS |
| N_v | Anzahl der gemessenen Geschwindigkeitswerte |

| Symbol | Beschreibung |
|--------------------------------|--|
| n | Laufindex |
| \vec{o} | Einheitsvektor der Beobachtungsrichtung |
| $P_{\text{Streulicht}}$ | Streulichtleistung |
| \bar{p} | statischer (zeitgemittelter) Fluiddruck |
| p_0 | Bezugswert des Schalldrucks (in Luft) |
| p_{Schall} | Schalldruck |
| $\tilde{p}_{\text{Schall}}$ | Effektivwert des Schalldrucks |
| \hat{p}_{Schall} | Amplitude des Schalldrucks |
| $\hat{p}_{\text{Schall,hin}}$ | Amplitude des Schalldrucks der zum Reflektor hinlaufenden Welle |
| $\hat{p}_{\text{Schall,refl}}$ | Amplitude des Schalldrucks der reflektierten Welle |
| q | beim LDV-PS: Quotient der Streifenabstände; bei der DGV: bzw. Quotient der Detektorsignale; bei der FM-DGV: Quotient der Amplituden von 1. und 2. Harmonischer |
| q_{ref} | Referenzquotient bei FM-DGV |
| R | Radius im Kugelkoordinatensystem |
| r | Reflexionsfaktor für den Schalldruck |
| S_v | zweiseitige spektrale Leistungsdichte der Geschwindigkeit |
| $S_{v,\text{fluct}}$ | zweiseitige spektrale Leistungsdichte der stochastischen Fluktuationsgeschwindigkeit |
| $S_{v,\text{fluct-flow}}$ | zweiseitige spektrale Leistungsdichte der Geschwindigkeit aufgrund der turbulenten Strömung |
| \vec{s} | Ortsvektor |
| T_{Burst} | Burstdauer |
| T_{Mess} | Messdauer |
| t | Zeit |
| u | Zeitsignal des Fotodetektors |
| v | Fluidgeschwindigkeit |
| \bar{v} | zeitgemittelte Fluidgeschwindigkeit |
| v_{fluct} | stochastische Fluktuationsgeschwindigkeit |
| v_{oi} | zu messende Geschwindigkeitskomponente |
| v_{osc} | (phasenaufgelöste) Oszillationsgeschwindigkeit |
| \hat{v}_{osc} | Amplitude der Oszillationsgeschwindigkeit |
| v_{Schall} | Schallschnelle |
| \hat{v}_{Schall} | Amplitude der Schallschnelle |
| $v_{\text{Strömung}}$ | Strömungsgeschwindigkeit |
| w_0 | Radius der Strahltaile des gaußschen Strahls |
| x | kartesische Ortskoordinate x |
| y | kartesische Ortskoordinate y |

| Symbol | Beschreibung |
|----------------------------------|--|
| $Z_{\text{Schall,Fern}}$ | Schallkennimpedanz |
| z | kartesische Ortskoordinate z |
| α | Winkel zur seitlichen Kanalnormalen |
| β | Lichtleistungsverhältnis bei der Strahlteilung |
| ΔP_v | spektraler Leistungszuwachs des Geschwindigkeitssignals |
| ΔS_v | Differenz von der spektralen Leistungsdichte des Geschwindigkeitssignals mit und ohne Schallanregung |
| Δt | Zeitintervall (Zeitauflösung) |
| $\Delta \hat{v}_{\text{Schall}}$ | Änderung der Schallschnelleamplitude |
| Δz | Länge der Ortssegmente (Ortsauflösung) entlang der z -Koordinate |
| $\Delta \vartheta$ | Temperaturänderung |
| $\Delta \varphi$ | Phasenwinkelintervall (Phasenauflösung) |
| δ | Dissipationsgrad des BFL |
| ε | Empfindlichkeit des Fotodetektors |
| Θ | Polarwinkel im Kugelkoordinatensystem |
| ϑ | Temperatur |
| θ | halber Öffnungswinkel zwischen den einfallenden Laserstrahlen |
| λ_{Licht} | Wellenlänge des Lichts |
| λ_{Schall} | Wellenlänge des Schalls |
| ζ | halber Öffnungswinkel der Beobachtungsapertur |
| Φ | Azimutalwinkel im Kugelkoordinatensystem |
| φ | Phasenwinkel |
| φ_{mod} | Phasenwinkel der Frequenzmodulation |
| φ_{osc} | Phasenlage der Oszillationsgeschwindigkeit |
| φ_{Schall} | Phasenlage des Schallsignals |
| ρ | Fluiddichte |
| $\bar{\rho}$ | zeitgemittelte Fluiddichte |
| σ | Standardabweichung |
| τ | (optischer) Transmissionsgrad |
| Ω_{Schall} | Schallkreisfrequenz |
| ω | Wirbelstärke |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Beschreibung |
|-----------|--|
| A-PIV | akustische Particle Image Velocimetry |
| BFL | Bias-Flow-Liner |
| C | Komponenten (engl.: components) |
| CCD | charge-coupled device (dt.: ladungsgekoppeltes Bauteil) |
| D | Dimensionen |
| DEHS | Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat |
| DFT | diskrete Fourier-Transformation |
| DGV | Doppler-Global-Velozimetrie |
| DLR | <u>D</u> eutsches Zentrum für <u>L</u> uft- und <u>R</u> aumfahrt |
| DUCT-R | <u>D</u> uct <u>a</u> coustic <u>t</u> est rig – <u>r</u> ectangular cross section (dt.: Kanalakustikversuchsstand – rechteckiger Querschnitt) |
| DVR | dynamischer Geschwindigkeitsbereich (engl.: dynamic velocity range) |
| FM-DGV | Doppler-Global-Velozimetrie mit Frequenzmodulation |
| GUM | <u>G</u> uide to the Expression of <u>U</u> ncertainty in <u>M</u> easurement (dt.: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen) |
| HHD | Helmholtz-Hodge-Zerlegung (engl.: Helmholtz-Hodge decomposition) |
| LDS | Leistungsdichtespektrum |
| LDV | Laser-Doppler-Velozimetrie |
| LDV-PS | Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor (engl.: laser Doppler velocity profile sensor) |
| MKQ | Methode der kleinsten Quadrate |
| PIV | Particle Image Velocimetry (dt.: Partikelbild-Velozimetrie) |
| SNR | Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: signal-to-noise ratio) |