

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Optisches Geschwindigkeitsmesssystem zur vektoriellen
Erfassung instationärer Strömungsprozesse

Dipl.-Phys. Raimund Schlüßler

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. A. Richter

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Czarske

Tag der Einreichung: 22.03.2016

Prof. Dr.-Ing. I. Röhle

Tag der Verteidigung: 25.08.2016

ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. J. Woisetschläger

Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik

Band 11

Raimund Schlüßler

**Optisches Geschwindigkeitsmesssystem zur vektori-
ellen Erfassung instationärer Strömungsprozesse**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5093-6

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 vorliegende Arbeit entstand an der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik der Technischen Universität Dresden. Mein besonderer Dank gilt daher dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske für die Möglichkeit diese Arbeit an seinem Lehrstuhl durchführen zu dürfen sowie für viele wertvolle Hinweise und Ratschläge. Für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Richter bedanken. Weiterhin bedanke ich mich herzlich für die freundliche Übernahme des Koreferats bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingo Röhle und Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Jakob Woisetschläger und für die Abnahme des Rigorosum bei Herrn Prof. Dr. Jochen Guck.

Weiterhin möchte ich speziell Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer für eine Vielzahl an Diskussionen und damit einhergehenden Ideen danken, welche diese Arbeit maßgeblich mit geformt haben. Auch Herrn Dr. rer. nat. Lars Büttner danke ich für viele Hinweise und Anregungen.

Außerdem möchte ich allen Kollegen der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik, darunter insbesondere Herrn Dr.-Ing. Daniel Haufe, für viele anregende Diskussionen und Hinweise meinen herzlichen Dank aussprechen. Meinen beiden Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Johannes Gürtler und Herrn Dipl.-Ing. Mike Bermuske möchte ich zudem für ihre Unterstützung der experimentellen Arbeiten im Rahmen ihrer Diplomarbeiten danken. Es haben weiterhin mehrere Studierende im Rahmen von Studien- und Diplom- und Masterarbeiten zum Erfolg der vorliegenden Arbeit beigetragen. Dafür danke ich Herrn M.Sc. Christian Blechschmidt und Julian Kunz.

Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Zellbeck und Herrn Dipl.-Ing. Kay Mahler vom Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren der Technischen Universität Dresden für die Bereitstellung der Hochdruck-Diesel-Einspritzdüse und Herrn Dr.-Ing. Thilo Sandner vom Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme für die Bereitstellung des Mikrospiegels.

Herrn Michael Loeper und allen Mitarbeitern der Fakultätswerkstatt für Präzisionsmechanik möchte ich für die schnelle und exakte Umsetzung aller für diese Arbeit notwendigen technischen Entwürfe danken. Der deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die finanzielle Unterstützung der durchgeführten Arbeiten.

Abschließend möchte ich auch meiner Frau Laura und meinen Eltern für die bedingungslose Unterstützung danken.

Kurzfassung

Die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und der Lärm- und Schadstoffemissionen von technischen Strömungsprozessen wie Verbrennungs- und Einspritzvorgängen ist von hoher gesellschaftlicher Bedeutung und erfordert ein tieferes Verständnis der auftretenden Strömungsphänomene. Hierfür ist die messtechnische Erfassung der Strömungen notwendig, wobei insbesondere die Strömungsgeschwindigkeit von hohem Interesse ist. Strömungsgeschwindigkeitsmessungen in dynamischen oder reaktiven Fluiden stellen jedoch hohe Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik. Um Strömungsoszillationen und instationäre Phänomene mit kurzen Zeitskalen erfassen zu können, muss eine Messung simultan dreikomponentig und mit einer hohen Messrate von 100 kHz oder mehr erfolgen. Zur Analyse komplexer und kleinskaliger Geschwindigkeitsfelder ist eine bildgebende oder volumetrische Messung mit einer hohen örtlichen Auflösung wünschenswert. Momentan verfügbare Messsysteme genügen bisher nicht allen genannten Anforderungen. Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung, Charakterisierung und Qualifizierung eines geeigneten Systems zur zeitaufgelösten Erfassung instationärer Strömungsprozesse in hochdynamischen und reaktiven Fluiden.

Einen für diese Zwecke vielversprechenden Ansatz stellt die Doppler-Global-Velozimetrie mit Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) dar, da diese eine berührungslose Messung mit hoher Messrate gestattet und prinzipiell auch dreikomponentige und volumetrische Messungen ermöglicht. Daher erfolgte die Entwicklung und Realisierung eines simultan dreikomponentigen FM-DGV-Systems und eines FM-DGV-Systems zur bildgebenden und volumetrischen Messung. Die aufgebauten Systeme wurden hinsichtlich ihrer Geschwindigkeitsmessunsicherheit charakterisiert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die resultierenden Messunsicherheiten hinreichend klein sind und der Einfluss von Brechungsindexfluktuationen auf die Messunsicherheit vernachlässigt werden kann. Die Analyse der Messunsicherheiten aufgrund von Strömungsgeschwindigkeits- und Streulichtleistungsfluktuationen erfolgte mittels eines modellbasierten Ansatzes. Dabei wurde gezeigt, dass Streulichtleistungsfluktuationen einen dominanten Beitrag zum Messunsicherheitsbudget leisten können. Um die Eignung für die simultan dreikomponentige Messung mit hoher Messrate zu demonstrieren, wurden Messungen an einem Bias-Flow-Liner (BFL) durchgeführt. Dabei gelang erstmals an einem BFL die Untersuchung des Leistungsdichtespektrums in kartesischen Koordinaten und der Nachweis eines breitbandigen Energietransfers von Energie der Schallanregung hin zur kinetischen Energie der Strömung. Zur Demonstration der Messung in reaktiven Fluiden wurde ein drallstabilisierter Gasbrenner untersucht, wie er in stationären Gasturbinen und Flugzeugtriebwerken eingesetzt wird. Hierbei konnte eine thermo-akustische Wechselwirkung zwischen der Wärmefreisetzungsrate und dem Druck nachgewiesen werden und es zeigte sich ein Zusammenhang zwischen den lokalen Geschwindigkeitsoszillationen innerhalb der Flamme und den globalen Schalldruckemissionen. Durch die bildgebende, zeit- und orts aufgelöste Messung mit hoher Messrate konnten zudem erstmals instationäre Phänomene der Strömungsgeschwindigkeit im düsen nahen Bereich einer Hochdruck-Einspritzdüse ohne Seeding-zufuhr vermessen werden. Diese Entwicklungen ermöglichen weitere Untersuchungen zum stabileren Betrieb von Gasbrennern mit mageren Gemischen, ein tieferes Verständnis der Dämpfungsmechanismen an BFL und die Optimierung des Einspritzvorganges in Motoren. Somit kann perspektivisch ein Beitrag zum ressourcenschonenden, umweltfreundlichen und leisen Betrieb von technischen Strömungsmaschinen wie Flugzeugtriebwerken, stationären Gasturbinen und Verbrennungsmotoren geleistet werden.

Abstract

The reduction of the consumption of resources and the noise and polluting emissions of technical flow processes such as combustion and injection processes is of high social relevance and requires a deeper understanding of the occurring flow phenomena. For this purpose the metrological acquisition of the flows is necessary, whereat especially the flow velocity is of high interest. However, flow velocity measurements in dynamic or reactive fluids make great demands on the engaged measurement techniques. In order to resolve velocity oscillations or unsteady phenomena with short timescales a simultaneous three component measurement with a high measurement rate of 100 kHz or more is required. To analyze complex and small-scale velocity fields an imaging or volumetric measurement with a high spatial resolution is desired. Currently available measurement systems do not fulfill all these requirements. Hence, the goal of this work is the development, characterization and qualification of a measurement system suitable for the temporally resolved acquisition of unsteady flow processes in highly dynamic and reactive fluids.

For this purpose the Doppler global velocimetry with laser frequency modulation (FM-DGV) represents a promising approach, since it allows a contactless measurement with high measurement rate and in principle enables simultaneous three component and volumetric measurements. Hence, as a first step a simultaneous three component FM-DGV system and a FM-DGV system for imaging and volumetric measurements were developed. Subsequently, the realized systems were characterized regarding their velocity measurement uncertainty. It was shown, that the resulting measurement uncertainty is sufficiently small and that the influence of fluctuations of the refractive index on the measurement uncertainty can be neglected. The analysis of the measurement uncertainty due to fluctuations of the flow velocity and the scattered light power was conducted using a model-based approach. It was thereby shown, that fluctuations of the scattered light power can lead to a dominant term of the uncertainty budget. In order to demonstrate the suitability for simultaneous three component measurement with high measurement rate, measurements at a bias flow liner (BFL) were conducted. Thereby for the first time at a BFL it was possible to determine the power spectral density in Cartesian coordinates and to show the broadband energy transfer from the energy of the sound excitation to the kinetic energy of the flow. To demonstrate the measurement in reactive flows, a swirl-stabilized burner was investigated, as it is used in stationary gas turbines and airplane engines. It was possible to prove a thermo-acoustic interaction between the heat release rate and the pressure and to show a correlation between the local velocity oscillations within the flame and the global sound pressure emissions. By means of the imaging, temporally and spatially resolved measurement with high measurement rate it was furthermore possible to resolve unsteady phenomena in the near-nozzle region of a high-pressure injection nozzle without the addition of tracer particles. These developments allow further investigations regarding the stable operation of gas burners with lean mixtures, a deeper understanding of the damping effects at BFL and the optimization of injection processes in engines. Consequently, it is perspectively possible to contribute to the resource-efficient, environment-friendly and quiet operation of technical flow machines as aircraft engines, stationary gas turbines and combustion engines.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XI
Akronymverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielstellung	1
1.2 Stand der Technik	2
1.3 Lösungsansatz und Struktur der Arbeit	4
2 Grundlagen	7
2.1 Doppler-Global-Velozimetrie (DGV)	7
2.1.1 Konventionelle DGV	8
2.1.2 Doppler-Global-Velozimetrie mit Frequenzmodulation (FM-DGV)	9
2.2 Particle Image Velocimetry (PIV)	12
3 Messsystementwicklung	13
3.1 Simultan dreikomponentige FM-DGV (3C)	13
3.1.1 Ansatz	13
3.1.2 Realisierung	15
3.2 Volumetrische FM-DGV (3D)	17
3.2.1 Ansatz	17
3.2.2 Realisierung	19
3.3 Volumetrisch, dreikomponentige FM-DGV (3D3C)	20
3.4 Fazit	21
4 Charakterisierung der Messsysteme	23
4.1 Messung und Kalibrierung	23
4.1.1 Zufällige Messabweichungen	26
4.1.2 Systematische Messabweichungen	28
4.1.3 Zusammenfassung	31
4.2 Störlichteinfluss	32
4.2.1 Einführung	32
4.2.2 Störungsreduktion	35
4.2.3 Störungskorrektur	40
4.2.4 Fazit	43
4.3 Brechungsindexfluktuationen	43
4.3.1 Grundlagen	43
4.3.2 Messungen	46
4.3.3 Simulation	50
4.3.4 Fazit	56

4.4	Streulichtleistungs- und Geschwindigkeitsfluktuationen	57
4.4.1	Einführung	58
4.4.2	Simulation	58
4.4.3	Ergebnisse	59
4.4.4	Fazit	62
4.5	Zusammenfassung	63
5	Anwendung der Messsysteme	65
5.1	Strömungszillationen in einer drallstabilisierten Flamme	65
5.1.1	Einführung	65
5.1.2	Messaufbau	66
5.1.3	Messergebnisse	69
5.1.4	Fazit	74
5.2	Dämpfungseigenschaften eines Bias-Flow-Liners	76
5.2.1	Einführung	76
5.2.2	Messaufbau	77
5.2.3	Messergebnisse	78
5.2.4	Fazit	79
5.3	Nichtstationäre Phänomene in einer Hochdruck-Diesel-Einspritzung	80
5.3.1	Einführung	80
5.3.2	Messaufbau	80
5.3.3	Validierungsmessungen	84
5.3.4	Messergebnisse	86
5.3.5	Fazit	92
5.4	Volumetrische Vermessung eines Sprays	93
5.4.1	Einführung	93
5.4.2	Messaufbau	93
5.4.3	Messergebnisse	94
5.4.4	Fazit	95
5.5	Fazit	96
6	Zusammenfassung	99
6.1	Ergebnisse & Fortschritt für die Wissenschaft	99
6.2	Ausblick	102
	Literaturverzeichnis	105
	Publikationsverzeichnis	113
	Abschlussarbeiten	117
	Lebenslauf	119

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung
A_1	Amplitude der ersten Harmonischen des Detektorsignals
A_2	Amplitude der zweiten Harmonischen des Detektorsignals
α	Ablenkungswinkel aufgrund von Brechungsindexfluktuationen
a_v	Änderung der Geschwindigkeit während einer Modulationsperiode
b	Spaltbreite
B	Bandbreite der Signalerfassung
β	Winkel zwischen den Beobachtungsrichtungen
c	Lichtgeschwindigkeit
\mathcal{C}	Kalibrierfunktion des FM-DGV
\mathcal{C}_{ref}	Referenzkalibrierfunktion des FM-DGV
\vec{d}	Ausrichtungsvektor der Kalibrierscheibe
D	Drallzahl
$\tilde{\delta}_{P_p}$	Relative Änderung der Streulichtleistung während einer Modulationsperiode
D_p	Durchmesser eines Tracerpartikels in der Zwischenbildebene
d_s	Lokale Filmstärke der Störung
$d_{s,\text{max}}$	Maximalwert der Filmstärke d_s der Störung
E	Elektrisches Feld
ϵ	Empfindlichkeit der Photodetektoren
f_{P_p}	Frequenz der Streulichtleistungsfluktuationen
f	Frequenz
f_c	Lasermittelfrequenz
f_D	Dopplerfrequenz
f_h	Frequenzhub
f_L	Frequenz des einfallenden Laserlichts
f_m	Modulationsfrequenz
f_{rot}	Rotationsfrequenz der Kalibrierscheibe
f_{scan}	Oszillationsfrequenz des Mikrospiegels
f_p	Frequenz des an den Partikeln gestreuten Lichts
f_v	Frequenz der Geschwindigkeitsfluktuationen
γ	Winkel zwischen Empfindlichkeitsrichtung ($\vec{o} - \vec{i}$) und Fluidgeschwindigkeit \vec{v}_p
$\tilde{\gamma}_{P_p}$	Amplitude der Streulichtleistungsfluktuationen
$\tilde{\gamma}_v$	Amplitude der Geschwindigkeitsfluktuationen
h	Ordnung des Gauß'schen Strahls

\vec{i}	Beleuchtungsrichtung während der Messung
I	Intensität
\vec{i}_{cal}	Beleuchtungsrichtung während der Kalibrierung
l	Spaltlänge
λ	Laserwellenlänge
m	Zähindex der Beobachtungsrichtung
\mathcal{M}	Transformationsmatrix
M^2	Beugungsmaßzahl
n	Zähindex der Beleuchtungsrichtung
n_{DEHS}	Brechungsindex von Di-Ethyl-Hexa-Sebacat (DEHS)
N_{Ebenen}	Anzahl messbarer Tiefenpositionen
\vec{o}	Beobachtungsrichtung während der Messung
\vec{o}_{cal}	Beobachtungsrichtung während der Kalibrierung
$\vec{\omega}$	Wirbelstärke
P_{ges}	Gesamte Leistung des auf den Detektor treffenden Lichts, bestehend aus Streulichtleistung P_{p} und Störlichtleistung P_{s}
$\tilde{\varphi}$	Azimuthwinkel
φ_{m}	Phasenwinkel der Laserfrequenzmodulation
$\varphi_{P_{\text{p}}}$	Phasenwinkel der Streulichtleistungsfluktuationen
φ_{v}	Phasenwinkel der Geschwindigkeitsfluktuationen
P_{I}	Leistung der direkten Reflexe
P_{II}	Leistung des reflektierten Partikelstreulichts
P_{III}	Leistung der Hintergrundbeleuchtung
P_{i}	Leistung des einfallenden Laserstrahls
P_{p}	Leistung des an den Partikeln gestreuten und direkt empfangenen Lichts (Nutzlicht)
P_{sat}	Lichtleistung notwendig zur Sättigung der Photodetektoren
P_{s}	Störlichtleistung
P_{w}	Leistung des auf die Wand treffenden Lichts
q	DGV: Quotient der Signale von Detektor und Referenzdetektor, FM-DGV: Quotient der Amplituden von 1. und 2. Harmonischer des Detektorsignals
q_{ref}	Quotient der Amplituden von 1. und 2. Harmonischer des Referenzdetektorsignals
r	Abstand von Zentrum des Brennerauslass
R	Radius der Brennerdüse
ρ	Räumliche Ausdehnung der Brechungsindexfluktuationen
R_{w}	Reflektivität der Wand
s_{cam}	Abstand der Kamera von den Brechungsindexfluktuationen
$\Delta\vec{s}$	Verschiebungsvektor

\vec{s}_d	Position des Messvolumens auf der Kalibrierscheibe bezogen auf den Scheibenmittelpunkt
σ	Standardabweichung
$\tilde{\sigma}$	Streuquerschnitt
s	Detektorsignal
S	Spektrale Leistungsdichte
s_{ref}	Signal des Referenzdetektors
t	Zeit
τ_c	Transmission der molekularen Absorptionszelle
τ	Zeitliche Ausdehnung der Brechungsindexfluktuationen
Δt	Zeitauflösung
$\tilde{\theta}$	Polarwinkel
θ	Fernfelddivergenzwinkel
T	Messdauer
v	Strömungsgeschwindigkeit des Fluids
\bar{v}	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Fluids
$v_{\vec{o}, \vec{i}}$	Komponente der Geschwindigkeit in Richtung $(\vec{o} - \vec{i})$
\vec{v}_p	Partikelgeschwindigkeit
\vec{v}_w	Geschwindigkeit der Wand
w	Strahlradius
w_0	Strahltaillenradius
x	Kartesische Koordinate x
y	Kartesische Koordinate y
z	Kartesische Koordinate z
ζ	Transmission des Strahlteilers
z_r	Rayleigh-Länge

Akronymverzeichnis

Akronym	Beschreibung
APD	Avalanche-Photodiode
BFL	Bias-Flow-Liner
C	Komponenten
CO	Kohlenstoffmonoxid
D	Dimensionen
DEHS	Di-Ethyl-Hexa-Sebacat
DGV	Doppler-Global-Velozimetrie
FM-DGV	Doppler-Global-Velozimetrie mit Laserfrequenzmodulation
FSK-DGV	Doppler-Global-Velozimetrie mit Frequenzumtastung (engl.: frequency shift keying)
FTF	Flammentransferfunktion
HK	Hinterkante
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
LDS	Leistungsdichtespektrum
MEMS	Mikrosystem (engl: microelectromechanical system)
MOPA	Master Oscillator Power Amplifier
NEP	noise equivalent power
NO _x	Stickstoffoxid
OPS	Optischer Positionssensor
PIV	Particle Image Velocimetry
PTV	Particle Tracking Velocimetry
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
TTL	Transistor-Transistor-Logik
VK	Vorderkante