

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Reduzierung der systematischen Messunsicherheit
in der Doppler-Global-Velocimetry durch
den Einsatz von Laserfrequenzumtastverfahren

Dipl.-Ing. Michael Eggert

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. habil. W. Sauer

Tag der Einreichung: 09.04.2010

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

Tag der Verteidigung: 14.07.2010

Prof. Dr.-Ing. I. Röhle

Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik

Band 4

Michael Eggert

**Reduzierung der systematischen Messunsicherheit
in der Doppler-Global-Velocimetry durch den Einsatz
von Laserfrequenzumtastverfahren**

Shaker Verlag
Aachen 2010

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., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9647-6

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

Für Lisa Marie

Danksagung

Diese Arbeit entstand in der Arbeitsgruppe Strömungsmesstechnik, Fachbereich Gase der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), in Kooperation mit der Professur für Mess- und Prüftechnik, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik der Technischen Universität Dresden.

Bedanken möchte ich mich insbesondere bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. J. Czarske für die Unterstützung und die Motivation zur Veröffentlichung meiner Ergebnisse, sowie Herrn Dr. H. Müller für die Betreuung meiner Arbeit innerhalb der PTB. Ihnen beiden bin ich zudem für die Initiierung des gesamten Projekts zu großem Dank verpflichtet. Herrn Prof. Dr.-Ing. I. Röhle möchte ich für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Recht herzlich möchte ich mich auch bei meinen Kollegen bedanken, insbesondere bei Herrn K. Metzger und Herrn M. Adam für die Anfertigung mechanischer Komponenten, sowie bei Frau S. Naumann-Liedke und meinem Fachbereichsleiter, Herrn Dr.-Ing. H. Többen für das Korrekturlesen meiner Arbeit. Darüberhinaus bin ich Herrn Dr.-Ing. Többen, wie auch meinem Abteilungsleiter, Herrn Dr. R. Schwartz, für den Rückhalt in der PTB dankbar, der den erfolgreichen Abschluss des Projekts ermöglicht hat.

Ebenso danke ich allen Mitarbeitern der Professur für Mess- und Prüftechnik für ihre Gastfreundschaft bei meinen Besuchen in Dresden und für die interessanten Diskussionen. Besonders möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. A. Fischer und Herrn Dr. L. Büttner für die vielen Kommentare und Anregungen zu meiner Arbeit bedanken.

Dem Team des Lehrstuhls Strömungsmechanik der Universität Rostock danke ich für die Unterstützung bei der Durchführungen der Messungen am Zylinderstumpf. Ausdrücklich sei Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Leder und Herrn Dr. M. Brede für die freundliche Bereitstellung ihres Windkanals, sowie Herrn U. Grebin und Herrn M. Jensch für die Hilfe beim Messaufbau und der Visualisierung der Daten gedankt.

Die für diese Messungen benötigte schnelle Kamera wurde freundlicherweise seitens der PCO AG leihweise zur Verfügung gestellt. Mein Dank gilt besonders Herrn W. Tutsch für das zuvorkommende Angebot und die unkomplizierte Abwicklung, sowie Herrn T. Kreuzer für die freundliche Hilfe bei der Inbetriebnahme des Systems.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) bin ich für die finanzielle Förderung des Verbundprojekts „Einsatz neuartiger Doppler-Global-Velocimeter (DGV) zur Analyse komplexer Strömungen; FM-DGV-Sensorentwicklung und -anwendung“ mit den Kennzeichen MU 1252/2 und CZ 55/16, im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1147 „Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse“ sehr zu Dank verpflichtet.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie für die viele Unterstützung und ihr Verständnis danken. Diese Arbeit ist meiner im vorigen Jahr geborenen Tochter gewidmet, welche mich trotz meiner geringen Freizeit während des Schreibens immer wieder mit ihrem Lächeln aufgemuntert hat.

Kurzfassung

Optische Verfahren kommen in vielen Anwendungsbereichen der Strömungsmesstechnik zum Einsatz. Dreikomponentige, mehrdimensionale Verfahren besitzen hierbei eine besondere Bedeutung in der Analyse komplexer Strömungsvorgänge. Die Doppler-Global-Velocimetry (DGV) ist ein spektroskopisches Verfahren zur dreikomponentigen Messung von Strömungsgeschwindigkeitsfeldern, welches auf der orts aufgelösten Messung der geschwindigkeitsabhängigen Dopplerfrequenzen bei der Streuung von Laserlicht aus einem Lichtschnitt basiert. Aus der frequenzabhängigen Transmission des Streulichts durch eine Absorptionszelle kann über eine Kalibrierung auf die Frequenzverschiebung und damit auf die Geschwindigkeit geschlossen werden.

Bei konventionellen DGV-Verfahren wird das Streulicht über einen Strahlteiler auf eine Referenzkamera und durch die Absorptionszelle auf eine Messkamera abgebildet, um anhand der Intensitäten die Transmission bestimmen zu können. Eine Polarisationsabhängigkeit des Strahlteilers, unterschiedliche Abbildungen in Mess- und Referenzzweig, eine unterschiedliche Charakteristik korrespondierender Bildpunkte beider Kameras und fluktuierende Dunkelbild- und Fremdlichtintensitäten führen hierbei zu systematischen Messabweichungen, die in der Literatur mit bis zu 5 m/s beziffert werden. Änderungen der Absorptionszellentemperatur zwischen Kalibrierung und Messung können zu weiteren Messabweichungen führen.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Umsetzung eines selbstkalibrierenden DGV-Verfahrens mit Laserfrequenzumtastung, welches keine Referenzkamera benötigt und somit die genannten Messunsicherheitsbeiträge reduziert. Durch die Auswertung von Bildfolgen bei verschiedenen, definierten Laserfrequenzen auf beiden Absorptionslinienflanken werden die Einflüsse von Fremdlicht und Dunkelbild eliminiert. Gleichzeitig erlaubt die Erfassung der Steigungen an den Absorptionslinienflanken, den Einfluss der Absorptionszellentemperatur zu minimieren. Messungen an einer rotierenden Scheibe zeigen systematische Messabweichungen von unter 0,2 m/s für Geschwindigkeiten bis 30 m/s und eine Reduzierung der Temperaturabhängigkeit auf ein Viertel gegenüber Messungen ohne Selbstkalibrierung.

Insbesondere bei Messungen mit geringer Streulichtleistung und kurzen Belichtungszeiten, in denen veränderliche Fremdlicht- und Dunkelbildeinflüsse bei konventionellen DGV-Verfahren eine zunehmende Rolle spielen, erlaubt das frequenzumtastende Verfahren die Anwendung erweiterter Mittelungstechniken. So konnten erstmals kamerabasierte, phasenaufgelöste DGV-Messungen des turbulenten Strömungsfeldes hinter einem quer angeströmten Zylinderstumpf durchgeführt werden. Hierbei wurden Standardabweichungen von unter 0,7 m/s für phasenaufgelöst an einzelnen Bildpunkten gemessene und unter 0,2 m/s für gemittelte Geschwindigkeiten erreicht, obwohl die Streulichtintensität lediglich zwei Quantisierungsschritten des Sensors entsprach.

Das entwickelte und verifizierte, frequenzumtastende Verfahren erlaubt dreikomponentige DGV-Messungen mit niedriger systematischer Messabweichung auch in Anwendungen mit besonders niedriger Streulichtleistung, beispielsweise gegeben durch hohe zu erzielende Zeitaufösungen. Durch solche Messungen können die Analyse und das Verständnis turbulenter Strömungsvorgänge unterstützt werden.

Abstract

Optical flow measuring techniques are increasingly used in many applications in the field of fluid mechanics. Especially three component velocity measuring techniques are of particular importance for the analysis of complex flow fields. The Doppler Global Velocimetry (DGV) is a technique for measuring three velocity components in a two-dimensional flow field, based on the spectroscopical detection of the Doppler-induced frequency shift of laser light scattered from particles in the flow. An absorption cell is used to achieve a conversion of the frequency shift to intensity changes of the scattered light imaged on a camera. Premising a calibration of the absorption line, the frequency shift can be derived from the transmission of the scattered light.

In conventional DGV systems, a fraction of the scattered light is imaged on a second camera, in order to calculate the transmission from the ratio of intensities received by the measurement and the reference camera. Given by literature, systematic deviations up to 5 m/s may be caused by polarisation effects due to the splitting ratio, an image misalignment, different sensor characteristics of corresponding pixels and fluctuating dark image offsets or extraneous light. Variations of the absorption cell temperature between calibration and measurement may induce an additional deviation.

The aim of this work is the development and implementation of a self calibrating DGV technique based on laser frequency shift keying. Inherently, any influence of the splitting ratio, image misalignments and different sensor characteristics, extraneous light and dark image fluctuations are eliminated by the omission of the reference camera and the analysis of the frequency-dependent intensity changes in image sequences. Furthermore, by evaluating the absorption line slopes, the influence of the absorption cell temperature is minimised by this technique. Measurements on a rotating wheel, comprising velocities up to 30 m/s, show a systematic deviation of less than 0.2 m/s and a reduction of the temperature dependency to a fourth compared to techniques without self calibration.

Particularly in measurements based on low light intensities and a short exposure time, resulting in an increased influence of extraneous light and dark image fluctuations in conventional DGV systems, the frequency shift keying DGV technique allows the application of advanced averaging procedures. For the first time, phase resolved measurements of the turbulent flow field in the wake of a finite cylinder have been accomplished with a camera based DGV system. The standard deviation of below 0.7 m/s given by a phase resolved analysis based on single pixels, as well as a standard deviation of below 0.2 m/s for temporally and spatially averaged velocities, based on a mean intensity according to two digits in the gray scale value of single images, demonstrate the capability of this technique to suppress systematic influences.

The novel frequency shift keying technique which has consequently been developed and verified for different experimental conditions establishes the use of the Doppler Global Velocimetry for new applications requiring three component flow field measurements with high temporal resolutions and low systematic deviations at even low scattered light intensities. Such measurements will help to analyse and understand the behaviour of turbulent and complex flows.

Inhaltsverzeichnis

Akronyme	xv
Verzeichnis wichtiger Formelzeichen	xvii
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel und Struktur der Arbeit	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Prinzip der Doppler-Global-Velocimetry	5
2.2 Entwicklungen der DGV	8
2.2.1 Erreichte Messunsicherheiten	8
2.2.2 Neue Verfahren	11
2.3 DGV mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV)	14
3 DGV mit Laserfrequenzumtastung (FSK-DGV)	17
3.1 Diskretisierung des FM-DGV-Verfahrens	17
3.1.1 Zeitdiskrete Abtastung des Empfangssignals	17
3.1.2 Abtastung der Absorptionslinie anhand diskreter Frequenzen	19
3.1.3 Einfluss der Absorptionszellenparameter	20
3.2 Das selbstkalibrierende FSK-DGV-Verfahren	24
3.2.1 Grundprinzip der Selbstkalibrierung	25
3.2.2 Einfluss der Absorptionszellenparameter	26
3.3 Stochastische Einflüsse der Streulichtdetektion	30
3.3.1 Fehlerfortpflanzung	30
3.3.2 Rauschen	31
3.4 Einflüsse variierender Streulicht- und Dunkelbildintensitäten	36
3.5 Erweiterte Mittelungstechniken	38
3.5.1 Minimierung von Störeinflüssen	38
3.5.2 Phasenaufgelöste Messungen	40
3.6 Einfluss indirekten Streulichts	43
4 Aufbau des selbstkalibrierenden FSK-DGV-Systems	45
4.1 Lichtschnittzeugung	46
4.2 Empfangsoptik	50

4.3	Absorptionszellen	55
4.3.1	Temperaturstabilisierung der Absorptionszellen	57
4.3.2	Charakterisierung	58
4.4	Referenzlaser	60
4.4.1	Konzept	60
4.4.2	Optischer Aufbau	61
4.4.3	Steuerung und Regelung	63
4.4.4	Charakterisierung	64
4.5	Lichtschnittlaser	65
4.5.1	Optischer Aufbau	65
4.5.2	Steuerung und Regelung	67
4.5.3	Charakterisierung	68
4.6	Seedingerzeugung	74
4.7	Rotierende Scheibe	78
4.7.1	Optischer Aufbau	78
4.7.2	Charakterisierung der Drehzahlregelung	80
4.8	Bildbearbeitung und Auswertung	81
4.8.1	Integration	81
4.8.2	Bildentzerrung	82
4.8.3	Bestimmung der Vektoren	85
4.8.4	Berechnung der Dopplerfrequenz	88
5	Messungen	91
5.1	Wahl der Absorptionszellentemperaturen und der Laserfrequenzen	91
5.2	Charakterisierung anhand eines definierten Geschwindigkeitsfeldes	94
5.2.1	Aufbau und Durchführung der Messung	94
5.2.2	Systematische Messabweichungen	96
5.2.3	Stochastische Unsicherheitsbeiträge	97
5.2.4	Einfluss der Streulichtleistung	98
5.2.5	Einfluss der Laserfrequenz	99
5.2.6	Einfluss der Absorptionszellentemperatur	103
5.2.7	Ergebnisse	105
5.3	Dreikomponentige Messung einer stationären Rohrströmung	107
5.3.1	Aufbau und Durchführung der Messung	107
5.3.2	Systematische Messabweichungen	108
5.3.3	Stochastische Unsicherheitsbeiträge	112
5.3.4	Einsatz erweiterter Mittelungstechniken	116
5.3.5	Ergebnisse	117
5.4	Phasenaufgelöste Messung einer instationären Strömung	118
5.4.1	Aufbau und Durchführung der Messung	119
5.4.2	Systematische Messabweichungen	121
5.4.3	Geschwindigkeits- und Zeitauflösung	124
5.4.4	Ergebnisse	127

6 Diskussion	129
6.1 Analyse der Messergebnisse	129
6.2 Möglichkeiten zukünftiger Optimierungen	131
7 Zusammenfassung	137
7.1 Ausgangspunkt	137
7.2 Durchgeführte Arbeiten	138
7.3 Ergebnisse und wissenschaftlicher Fortschritt	141
7.4 Ausblick	141
A Die dopplerverbreiterte Absorptionslinie	143
B Schaltungen	147
B.1 Temperaturregler der Absorptionszellen	147
B.2 Regelung des Referenzlasers	151
B.3 Regelung des Lichtschnittlasers	160
B.4 Messung der Seedingdichte	172
B.5 Antrieb der rotierenden Scheibe	173
Quellenverzeichnis	175
Publikationen	185
Lebenslauf	189

Akronyme

Abkürzung	Bedeutung
ADC	Analog-to-Digital-Converter (Analog-Digital-Wandler)
AOM	Acousto-optic Modulator (Akusto-optischer Modulator)
CCD	Charged Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DAC	Digital-to-Analog-Converter (Digital-Analog-Wandler)
DGV	Doppler Global Velocimetry, Doppler Global Velocimeter (Doppler-Global-Velozimetrie, Doppler-Global-Velozimeter)
DFB	Distributed Feedback
DFT	Discrete Fourier Transform (Diskrete Fouriertransformation)
EOM	Electro-optic Modulator (Elektro-optischer Modulator)
FET	Field-Effect Transistor (Feldeffekttransistor)
FM	Frequency Modulation (Frequenzmodulation)
FSK	Frequency Shift Keying (Frequenzumtastung)
FWHM	Full Width at Half Maximum (Halbwertsbreite)
LDV	Laser Doppler Velocimetry, Laser Doppler Velocimeter
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie, Laser-Doppler-Anemometer
L2F	Laser Two Focus
MOPA	Master Oscillator / Power Amplifier
MTF	Modulation Transfer Function (Kontrastübertragungsfunktion)
PDV	Planar Doppler Velocimetry, Planar Doppler Velocimeter
PFD	Phase Frequency Detector (Phasen- und Frequenzkomparator)
PIV	Particle Image Velocimetry, Particle Image Velocimeter
PID	Proportional, Integral, Derivative
PIN	Positive, Intrinsic, Negative (p-dotiert, intrinsisch, n-dotiert)
PLL	Phase-Locked Loop (Phasenregelschleife)
PWM	Pulse Width Modulation (Pulsweitenmodulation)
VCO	Voltage Controlled Oscillator (Spannungsgesteuerter Oszillator)

Verzeichnis wichtiger Formelzeichen

Symbol	Bedeutung
$A(f)$	Amplitude des Streulichtsignals bei der Modulationsfrequenz f
c	Lichtgeschwindigkeit
f_m	Modulationsfrequenz
f_{Hub}	Modulationshub
f_C	Mittenfrequenz der Absorptionslinie
f_D	Dopplerfrequenz
f_{Δ}	Laserfrequenzschritt des selbstkalibrierenden Verfahrens
f_F	Frequenz auf der fallenden Flanke der Transmissionskennlinie
f_R	Frequenz auf der steigenden Flanke der Transmissionskennlinie
f_n	Diskrete Laser-Sollfrequenzen
f_{Offset}	Versatz der realen Laserfrequenzen gegenüber der Absorptionslinie
f_S	Versatz empfangener Streulichtfrequenzen gegenüber d. Absorptionslinie
f_{SL}	Frequenz des empfangenen Streulichts
\hat{g}	Empfangene, in die Absorptionszelle eingestrahlte Streulichtintensität
g_n	Transmittierte Streulichtintensität bei diskreter Laser-Sollfrequenzen f_n
\vec{i}_n	Einstrahlrichtungen der Lichtschnitte
k_B	Boltzmannkonstante
n_e	Anzahl vom Sensor empfangener Photonen
n_p	Anzahl im Sensor erzeugter freier Elektronen
N	Anzahl der Bilder, deren Intensitäten aufsummiert werden
\vec{o}	Beobachtungsrichtung
P	Anzahl betrachteter Phasenschritte
q_τ	Quotient der Transmission bei empfangenen Streulichtfrequenzen
q_g	Quotient empfangener Intensitäten
T_b	Belichtungszeit
T_{Cs}	Temperatur des Caesiumgases in der Absorptionszelle
T_c	Kühlfingertemperatur der Absorptionszelle

Symbol	Bedeutung
\vec{v}_n	Mit Einstrahlrichtung \vec{i}_n gemessene Geschwindigkeitskomponente
\vec{v}_x, \vec{v}_y	Transversale (in-plane) Geschwindigkeitskomponenten
\vec{v}_z	Axiale (out-of-plane) Geschwindigkeitskomponente
v_{Offset}	Versatz der gemessenen Geschwindigkeiten
β	Einstrahlwinkel des Streulicht in die Absorptionszelle
η	Quantenwirkungsgrad des Sensors
η_{ADC}	Wirkungsgrad des Analog-Digital-Wandlers des Sensors
λ	Wellenlänge
$\sigma(\dots)$	Standardabweichung
$\sigma_A(\dots)$	Standardabweichung erzeugt von Ausleserauschen
$\sigma_D(\dots)$	Standardabweichung erzeugt von Dunkelbildrauschen
$\sigma_Q(\dots)$	Standardabweichung erzeugt von Quantenrauschen
$\sigma_S(\dots)$	Standardabweichung erzeugt von Streulichtfluktuationen
$\tau(f)$	Transmission der Absorptionszelle bei Frequenz f
τ_H	Hilfsgröße, Transmission bei den Frequenzen f_F und f_R
τ_n	Transmission d. Absorptionszelle bei diskreter Laser-Sollfrequenz f_n