Technische Universität Dresden

Messbarkeitsgrenzen optischer Strömungsmessverfahren: Theorie und Anwendungen

Dr.-Ing. Andreas Fischer

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur habilitatus

(Dr.-Ing. habil.)

genehmigte Habilitation

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. K. Röbenack		
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. J. Czarske	Vortrag mit Kolloquium:	18.07.2013
	Prof. Dr.-Ing. I. Röhle	Probevorlesung:	18.07.2013
	Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. J. Woisetschläger		

Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik

Band 8

Andreas Fischer

Messbarkeitsgrenzen optischer Strömungsmessverfahren: Theorie und Anwendungen

Shaker Verlag
Aachen 2013

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., Habil.-Schr., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2404-3
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

„In physical science, the first essential step in the direction of learning any subject is to find principles of numerical reckoning and practicable methods for measuring some quality connected with it. I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely in your thoughts advanced to the state of science, whatever the matter may be. So therefore, if science is measurement, then without metrology there can be no science.“

William Thompson, 3. Mai 1883
(Vorlesung „Electrical Units of Measurement“)

Danksagung

Die vorliegende Schrift enstand an der Professur für Mess- und Prüftechnik der TU Dresden. Dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. J. Czarske gebührt mein besonderer Dank für die Unterstützung der Arbeiten und das entgegen gebrachte Vertrauen. Für die bereitwillige Begutachtung der Arbeit danke ich zudem Prof. Dr.-Ing. I. Röhle und Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. J. Woisetschläger.

Messtechnik ist ein stark interdisziplinär ausgerichtetes Fachgebiet, so dass ich bei den vielfältigen Kooperationen inspirierende Diskussionen und spannende Einblicke in thematisch angrenzende Forschungsvorhaben genießen durfte. Hierfür danke ich den Herren Dr. rer. nat. Guido Stockhausen und Dr. Christian Willert von der Abteilung Triebwerksmesstechnik des Instituts für Antriebstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Köln, Clemens Rakenius, Dr.-Ing. Martin Kegalj und Prof. Dr.-Ing. Heinz-Peter Schiffer vom Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe der TU Darmstadt, Marcel Gottschall und Prof. Dr.-Ing. Konrad Vogeler von der Professur für Turbomaschinen und Strahlantriebe der TU Dresden, Prof. Dr.-Ing. habil. Ronald Mailach vom Lehrstuhl für thermische Turbomaschinen der Ruhr-Universität Bochum, Thomas Leitgeb und Prof. Dr. techn. Jakob Woisetschläger von der Abteilung Laseroptische Messtechnik des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik der TU Graz sowie André Fischer, Dr.-Ing. Friedrich Bake und Prof. Dr. rer. nat. Lars Enghardt von der Abteilung Triebwerksakustik des Instituts für Antriebstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Berlin. Ihnen sei ebenso für die freundliche und konstruktive Unterstützung bei der Durchführung der Messkampagnen gedankt, ohne die die Arbeit nicht hätte gedeihen können.

Die Anfänge der Arbeit fußen auf einer engen Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, wobei ich den Herren Dr.-Ing. M. Eggert und Dr. rer. nat. H. Müller für die wertvollen Hinweise und Beiträge meinen Dank aussprechen möchte. Zudem haben die lebendigen Diskussionen mit Herrn James Meyers vom NASA Langley Research Center zum Entstehen der Arbeit mit beigetragen, wofür ich ihm sehr dankbar bin.

Allen Kollegen und ehemaligen Kollegen an der Professur für Mess- und Prüftechnik sei für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die stete Hilfsbereitschaft gedankt. Stellvertretend seien hierfür Dr. rer. nat. Lars Büttner und Dr.-Ing. Thorsten Pfister genannt. Sie standen mir in zahlreichen anregenden Diskussion ganz wesentlich hilfreich zur Seite. Den Mitgliedern meiner Arbeitsgruppe der Messsystemtechnik möchte ich ganz besonders danken, weil ich die ausgezeichnete Zusammenarbeit im Team mit Jörg König, Daniel Haufe und Raimund Schlüßler nicht nur als fachliche, sondern auch als persönliche Bereicherung empfinde. Darüber hinaus haben eine Vielzahl von Studenten im Rahmen von Studien-, Diplomarbeiten und Hilfstätigkeiten zu den Forschungsvorhaben beigetragen, denen ich ausdrücklich danken möchte.

Schließlich schulde ich den Förderträgern der wissenschaftlichen Projekte, insbesondere der Deutschen Forschungsgemeinschaft, meinen Dank. Mit ihrer Finanzierung der Projekte haben sie die vorliegende Arbeit überhaupt erst möglich gemacht.

Auch die bedingungslose Unterstützung meiner Familie soll nicht unerwähnt bleiben. Sie hat mir stets den Rücken gestärkt und frei gehalten. Dafür und für die vielen freudigen Momente mit ihr möchte ich meiner Familie herzlich danken.

Kurzfassung

Die optische Messtechnik entwickelt sich rasant, wobei der Fortschritt wesentlich auf der anhaltenden Entwicklung optoelektronischer Komponenten wie zum Beispiel CCD- und CMOS-Kameras sowie leistungsstarker, modulierbarer Laser beruht. Hiervon profitieren auch optische Strömungsmessverfahren, die für die Luftfahrtindustrie von herausragender Bedeutung sind: Um trotz steigendem Kostendruck und höheren gesellschaftlichen Forderungen bestehen und wachsen zu können, werden effizientere, schadstoffärmere und leisere Triebwerke benötigt. Da Triebwerke Strömungsmaschinen sind, erfordert die Triebwerksoptimierung geeignete Strömungsmessverfahren.

Die Arbeit liefert mit der Untersuchung von Messbarkeitsgrenzen optischer Strömungsmessverfahren Beiträge, um aktuellen Herausforderungen z. B. der Triebwerksmesstechnik zu begegnen. Hierzu gehören die optische Charakterisierung von Einlaufströmungen, die Erforschung von Spaltströmungen in Verdichtern und Turbinen, die Untersuchung von Flammeninstabilitäten und das Verstehen der Interaktion zwischen Strömung und Schall zwecks Optimierung akustischer Dämpfungsglieder.

Als Beispiel diene zunächst die Untersuchung von unerwünschten Strömungsoszillationen in drallstabilisierten Brennern. Wegen der Modellunbestimmtheiten bei der Simulation turbulenter reaktiver Strömungen sind hierfür Messungen unerlässlich. Solche optischen Messungen stellen jedoch eine Herausforderung dar, weil sie unempfindlich bezüglich des Flammenleuchtens sein müssen und zudem eine hohe Messrate im Kilohertzbereich benötigt wird. Optische Strömungsgeschwindigkeitsmessverfahren lassen sich in Weg-Laufzeit- und Doppler-Verfahren unterteilen, wobei insbesondere das Potenzial von Doppler-Verfahren noch nicht vollständig erschlossen ist. Zum Beispiel sind mit der Doppler-Global-Velozimetrie bislang keine ausreichend hohen Messraten in Flammen erreicht worden. Dank der Identifizierung der Messbarkeitsgrenze ließ sich die Messrate steigern und die Messunsicherheit minimieren. Mit Hilfe einer Laserfrequenzmodulation gelang zudem die Entkopplung der Störung durch das Flammenleuchten vom Messsignal. Damit konnten Strömungsoszillationen in einer drallstabilisierten Flamme untersucht und schließlich mit Verbrennungsschwankungen in Zusammenhang gebracht werden. Über dieses Beispiel hinausgehend gelangen erstmals optische Mehrpunktmessungen in einer Einlaufströmung mit der geforderten Messrate, um die optische Charakterisierung solcher Strömungen zu ermöglichen. Zudem wurde die bei einem Turbinenrotor mit Squealervertiefungen auftretende Spaltströmung in einem Turbinenversuchsstand aufgelöst und damit Strömungssimulationen validiert. Auch besitzt das optimierte Messverfahren einen ausreichend hohen dynamischen Bereich von > 1000, so dass simultane Messungen des Schallschnelle- und Strömungsgeschwindigkeitsfeldes an Schalldämpfungsgliedern durchgeführt werden konnten. Diese Ergebnisse stellen Fortschritte der Messtechnik für die Optimierungsanstrengungen bei Flugzeugtriebwerken dar.

Einhergehend mit den Ergebnissen in der Anwendung wurden Fortschritte für die Messsystemtheorie erzielt. Beispielsweise gelang basierend auf der Cramér-Rao-Schranke ein fundamentaler Vergleich der Messbarkeitsgrenzen von Weg-Laufzeit- und Doppler-Messverfahren unter Berücksichtigung des die optischen Verfahren stets limitierenden Photonenschrotrauschens. Damit und durch weitere vertiefende modellbasierte Unsicherheitsbetrachtungen sind wichtige Grundlagen für die zukünftige Entwicklung und Anwendung von optischen Strömungsmesssystemen gegeben.

Abstract

The rapid progress in optical metrology is mainly driven by the ongoing development of optoelectronic components such as CCD and CMOS cameras as well as powerful lasers, which can be modulated. As a benefit, this improves optical flow measurements, which are of utmost importance for the aviation industry: In order to withstand rising costs, the higher demands of society and to grow further, more efficient and quieter aircraft engines with less pollutant emissions are necessary. Since aircraft engines are flow machines, their optimization requires suitable flow measurement systems.

The present work investigates the limits of optical flow measurement methods in view of current challenges in aircraft engine metrology. These challenges are the optical characterization of inlet flows, the investigation of gap flows in compressors and turbines, the analysis of flame instabilities and the comprehension of flow-sound interaction for optimizing acoustic damping components.

As an example, the investigation of undesired flow oscillations in swirl stabilized combustors is considered at first. Because simulations of turbulent reactive flows suffer from model uncertainties, flow measurements are indispensable. However, such flow measurements in flames are challenging. On the one hand, they have to be insensitive regarding flame glow. On the other hand, a high measurement rate in the kilohertz range is necessary. Optical flow velocity measurement methods rely on the time-of-flight principle or the Doppler effect, while especially the potential of Doppler methods is not fully explored. For instance, no sufficiently high measurement rates were obtained with Doppler global velocimetry in flame flows. As a benefit from identifying the measurement limit, however, the measurement rate was significantly increased and the measurement uncertainty was minimized. Using a laser frequency modulation in addition, the measurement signal could be separated from the superposed flame glow distortion. Finally, flow oscillations were detected in a swirl stabilized combustor and the correlation with combustion oscillations was identified. Further optical multipoint measurements succeeded in inlet flows for the first time with the desired measurement rate. Additionally, the tip clearance flow of a rotor with blade tips with squealer cavity was resolved at a turbine test rig during machine operation. The measurement results agree with numerical flow simulations and, thus, validate the simulation results. Furthermore, the optimized measurement system has been shown to have a sufficiently high dynamic range of > 1000 for simultaneous measurements of the sound particle velocity and the flow velocity field at acoustic damping components. In summary, the results presented in this thesis advance the metrology for optimizing aircraft engines.

The application results are completed by new developments in measurement system theory. For instance, a fundamental analysis of how photon shot noise affects the limits of time-of-flight and Doppler measurement methods was performed. With this and further detailed model based uncertainty considerations, important fundamentals are given for the future development and application of optical flow measurement systems.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung **1**
1.1. Motivation . . . 1
1.2. Herausforderungen für die Messtechnik . . . 2
1.3. Gegenstand und Struktur der Arbeit . . . 5
1.4. Ausgewählte Publikationen . . . 6
1.5. Förderung der Arbeiten . . . 8

2. Grundlagen zu den Grenzen der Messbarkeit **11**
2.1. Charakterisierung von Strömungsgeschwindigkeitsmessungen . . . 11
2.2. Übersicht optischer Strömungsmessverfahren . . . 13
2.3. Grenzen der Messbarkeit . . . 18
2.3.1. Einfluss des Seedings auf die Fluideigenschaften . . . 19
2.3.2. Strömungsabtastung, endliche Orts- und Zeitauflösung . . . 20
2.3.3. Partikelfolgevermögen . . . 21
2.3.4. Brown'sche Bewegung der Partikel . . . 25
2.3.5. Schrotrauschen von Lichtsignalen . . . 26
2.3.6. Auswertung von Geschwindigkeitszeitreihen . . . 37

3. Einlaufströmung **41**
3.1. Stand der Technik und die wissenschaftliche Fragestellung . . . 41
3.2. Ergebnisse . . . 42

4. Spaltströmung **47**
4.1. Stand der Technik und die wissenschaftliche Fragestellung . . . 47
4.2. Ergebnisse . . . 48

5. Flammenströmung **51**
5.1. Stand der Technik und die wissenschaftliche Fragestellung . . . 51
5.2. Ergebnisse . . . 52

6. Schallschnelle **55**
6.1. Stand der Technik und die wissenschaftliche Fragestellung . . . 55
6.2. Ergebnisse . . . 56

7. Zusammenfassung und Ausblick **59**
7.1. Motivation . . . 59
7.2. Ziel und Ergebnisse der Arbeit . . . 59
7.3. Ausblick . . . 62

A. Cramér-Rao-Schranke der Partikelposition **65**

B. Eigenschaften ausgewählter Schätzer **67**
B.1. Mittelwert 68
B.2. Fourier-Koeffizienten (Diskrete Fourier-Transformation) 68
B.2.1. Real- und Imaginärteil 68
B.2.2. Betragsquadrat 70
B.2.3. Betrag 72
B.3. Amplitude einer Harmonischen (Frequenz bekannt, Phase bekannt) 74
B.4. Amplitude einer Harmonischen (Frequenz bekannt, Phase unbekannt) . . . 74
B.5. Leistung einer Harmonischen (Frequenz bekannt) 75

Literaturverzeichnis **77**

Kurzfassungen der ausgewählten Publikationen **95**

Publikationsverzeichnis **101**

Diplom- und Studienarbeiten **113**

Lebenslauf **115**