

Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik

Band 2

Andreas Fischer

**Beiträge zur Doppler-Global-Velozimetrie
mit Laserfrequenzmodulation**

– Präzise Messung von Geschwindigkeitsfeldern in
turbulenten Strömungen mit hoher Zeitauflösung –

Shaker Verlag
Aachen 2009

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., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8370-4

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

Beiträge zur Doppler-Global-Velozimetrie mit Laserfrequenzmodulation

Andreas Fischer

Für die Untersuchung komplexer Strömungsvorgänge, wie zum Beispiel die Umströmung eines Zylinderstumpfes, werden zeitaufgelöste Geschwindigkeitsfeldmessungen benötigt. Ein hierfür geeignetes berührungsloses Messverfahren ist die Doppler-Global-Velozimetrie (DGV). Dabei wird die zu untersuchende Strömung, welche Streuteilchen enthält, mittels Laserlicht flächig beleuchtet und durch eine molekulare Absorptionszelle hindurch auf eine Kamera abgebildet. Die Absorption in der Zelle hängt von der Lichtfrequenz ab, weswegen sich die Doppler-Frequenzverschiebung des Streulichts als Intensitätsänderung flächenhaft messen lässt. Da eine Querempfindlichkeit zur Streulichtintensität besteht, muss zwecks Korrektur letztere mit einer zweiten Kamera gemessen werden. Dadurch können Bildausrichtungs- und Strahlteilungsfehler auftreten. Neuere DGV-Verfahren, wie die FM-DGV, benötigen hingegen nur eine Kamera. Sie basieren auf einer Laserfrequenzmodulation und der Auswertung sequentiell aufgenommener Bilder. Das Ziel dieser Arbeit ist der Aufbau und die erstmalige, grundlegende Charakterisierung eines FM-DGV-Messsystems mit hoher Zeitauflösung zur Untersuchung instationärer, turbulenter Strömungen.

Im Ergebnis wurde ein Messsystem bestehend aus einem DFB-Diodenlaser der Wellenlänge 852 nm als frequenzmodulierbare Lichtquelle, mit Cäsiumgas gefüllten Absorptionszellen zur Frequenz-Intensitäts-Konversion und einem fasergekoppelten Detektorarray mit 25 Lawinendiioden zur Lichtdetektion realisiert. Der Messbereich beträgt ± 260 m/s. Im Vergleich zu bisherigen DGV-Verfahren gelang eine signifikante Steigerung der Messrate von einigen 10 Hz auf 100 kHz. Damit ist das FM-DGV-Messsystem für zeitlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsfeldmessungen prädestiniert.

Zur Abschätzung und Bewertung der minimal erreichbaren Messunsicherheit erfolgt erstmals eine Berechnung der Cramér-Rao-Schranke für sämtliche DGV-Verfahren mit und ohne Laserfrequenzmodulation. Daraus folgt, dass sich mit allen Verfahren in etwa gleiche Unsicherheiten erreichen lassen, wenn man allein das bei der Photodetektion auftretende Rauschen wie beispielsweise thermisches Rauschen und Schrotrauschen berücksichtigt. Es wird gezeigt, dass dieses Rauschen bei der Erfassung von Geschwindigkeitsänderungen gegenwärtig die Messunsicherheit limitiert. Ausgehend von den Parametern des aufgebauten Messsystems und der typ. Streulichtleistung 3 nW beträgt die abgeschätzte Standardunsicherheit für eine Zeitauflösung von 16 ms ungefähr 0,05 m/s. Die Abhängigkeit der Messunsicherheit von der Zeitauflösung und der Streulichtleistung wird eingehend untersucht. Bei absoluten Geschwindigkeitsmessungen dominieren meist Messabweichungen von $\pm 0,2$ m/s aufgrund temperaturbedingter Schwankungen des Absorptionsverhaltens der Zelle. Zusätzlich können Streulichtfluktuationen die Messung stören, wobei die resultierende Unsicherheit mit steigender Strömungsgeschwindigkeit, -turbulenz und Ortsauflösung zunimmt. Es wird jedoch gezeigt, dass sich dieser Störeinfluss durch eine Vergrößerung der Modulationsfrequenz signifikant verringern lässt. Für die gewählte Modulationsfrequenz von 100 kHz ist er bei Strömungsgeschwindigkeiten unter 60 m/s vernachlässigbar.

Als Anwendungsbeispiele werden zeit- und ortsauflöste Messungen in einer instationären Düsenströmung und der Kármán'schen Wirbelstraße präsentiert und durch Vergleichsmessungen mit einer Hitzdrahtsonde bestätigt. Die hohe Zeitauflösung des optimierten FM-DGV-Messsystems von 10 μ s und die Nutzung des entwickelten Detektorarrays gestatten dabei erstmals die simultane Aufnahme von Turbulenzspektren an 25 Punkten. Damit eröffnen sich neue Perspektiven für die Turbulenz- und Korrelationsanalyse instationärer, turbulenter Strömungen.

Contributions to the Doppler global velocimetry with laser frequency modulation

Andreas Fischer

Temporally resolved velocity field measurements are necessary for investigating complex flows such as the wake of a truncated cylinder. Doppler global velocimetry (DGV) is an optical measurement technique providing this capability. Thereby, a flow seeded with particles is illuminated by a laser light sheet and imaged through a molecular absorption cell onto a camera. Since the light transmission through the absorption cell depends on the light frequency, the Doppler shift frequencies can be measured in a plane as intensity changes. In order to correct the cross sensitivity regarding the scattered light intensity, a second camera is required for measuring the intensity distribution of the scattered light. However, this correction can cause image misalignment and beam splitting errors. These errors do not occur at novel DGV techniques such as FM-DGV, because they only need a single camera. This is possible by modulating the laser frequency and evaluating sequentially captured images. The aim of this work is to create and to characterise fundamentally an FM-DGV measurement system with high temporal resolution for investigating non-stationary, turbulent flows.

The realised FM-DGV system consists of a DFB laser with a wavelength of 852 nm as light source, absorption cells filled with caesium gas for frequency to intensity conversion and a fibre-coupled detector array with 25 avalanche photodiodes for light detection. The measurement range amounts to ± 260 m/s. Compared with previous DGV systems, the measurement rate was significantly increased from several 10 Hz to 100 kHz. Hence, the developed measurement system is especially useful for velocity field measurements with high temporal resolution.

In order to estimate and to evaluate the minimum achievable measurement uncertainty, the Cramér-Rao lower bound was calculated for all DGV techniques with and without laser frequency modulation for the first time. Thus, all DGV methods achieve equal measurement uncertainties, if only noise from the photodetection such as thermal and shot noise is considered as disturbance. As a result of experimental studies, this disturbance limits the uncertainty for measuring velocity fluctuations. The estimated velocity standard uncertainty for a temporal resolution of 16 ms amounts to about 0.05 m/s considering the parameters of the developed measurement system and a typical scattered light power of 3 nW. It is further shown that the measurement uncertainty decreases with increasing scattered light power and decreasing temporal resolution. Measuring absolute velocity values with low temporal resolution, the measurement accuracy is currently limited within ± 0.2 m/s by temperature drifts of the absorption cell. Additional errors can result from scattered light fluctuations increasing with rising flow velocity, flow turbulence and spatial resolution. However, an investigation reveals that these disturbances are reduced significantly by increasing the modulation frequency. For the currently used modulation frequency of 100 kHz, the errors from scattered light fluctuations turned out to be negligible for flows with mean velocities lower than 60 m/s.

Finally, temporally and spatially resolved measurements of a non-stationary nozzle flow and a Kármán vortex street are presented and approved by measurements using a hot-wire anemometer. Due to the high temporal resolution of 10 μ s and the use of the developed detector array, simultaneous measurements of turbulence spectra at 25 points are possible for the first time using DGV. This opens up new perspective for turbulence and correlation investigations in non-stationary, turbulent flows.