

REALISIERUNG EINES SELBSTKALIBRIERENDEN DGV-SYSTEMS ZUR STRÖMUNGSFELDDANALYSE

REALISATION OF A SELF-CALIBRATING DGV-SYSTEM FOR FLOW FIELD ANALYSIS

M. Eggert¹, H. Müller¹, A. Fischer², L. Büttner², J. Czarske²

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

² TU Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik
Professur für Mess- und Prüftechnik
01062 Dresden

Schlagworte: DGV, Einkamerasystem, Geschwindigkeitsfeldmessung, zeitaufgelöst
Key words: DGV, single camera, flow field measurement, time resolved

Kurzfassung

Durch den Einsatz des im Beitrag erläuterten FSK (Frequency Shift Keying)-Verfahrens kann die bei bisherigen DGV-Systemen erforderliche Referenzkamera entfallen und darüberhinaus eine Selbstkalibrierung des Gesamtsystems während der Messung vorgenommen werden. Hierdurch ist es möglich, die Messunsicherheit gegenüber konventionellen Systemen bei hoher Zeitauflösung zu reduzieren und die Messung der Dopplerverschiebung auf definiert vorgegebene Frequenzdifferenzen zurückzuführen. Ein nach diesem Verfahren arbeitendes System wurde aufgebaut und anhand zeitaufgelöster Geschwindigkeitsfeldmessungen im Wirbelnachlauf eines Zylinderstumpfes erfolgreich erprobt.

Einleitung

Bei der Doppler Global Velozimetrie setzt ein steifflankiges Absorptionsfilter Dopplerverschiebungen des Streulichts aus der Lichtschnittebene in Intensitätsänderungen um. Um Einflüsse von Laserleistungsschwankungen und Inhomogenitäten innerhalb des Lichtschnitts zu vermeiden, wird das durch die Absorptionzelle transmittierte Streulicht auf das direkt empfangene Streulicht normiert. Hierzu sind in konventionellen Systemen zwei Kameras erforderlich, die als Mess- und Referenzkamera pixelgenau aufeinander ausgerichtet werden müssen. Notwendige Voraussetzungen für ein zuverlässiges Funktionieren dieses Verfahrens zur absoluten Geschwindigkeitsmessung sind die Frequenzstabilisierung der Laserquelle auf einen definierten Arbeitspunkt innerhalb der Absorptionslinie und die Kalibrierung der Absorptionzellentransmission. Die größten Messunsicherheitsanteile entstehen bei den bisher realisierten DGV-Messsystemen durch unvermeidbare Pixeldejustagefehler, sowie durch Instabilitäten der Absorptionzelle und deren Kalibrierung. In der Literatur wird die Messunsicherheit bisher eingesetzter Systeme mit ca. 4 m/s abgeschätzt, wobei mit optimierten Systemen eine minimale Unsicherheit von 0,5 m/s erzielt werden konnte.

Eine wesentliche Vereinfachung und Verbesserung bisheriger DGV-Systeme zur Strömungsfeldanalyse konnte durch die Übertragung der bereits auf der 11. GALA-Fachtagung vorge-

stellen FM-DGV-Modulationstechnik zur Geschwindigkeitsprofilmessung mittels APD-Array (Müller et al 2003) auf den Einsatz nur einer CCD-Kamera zur Geschwindigkeitsfeldmessung erreicht werden (Eggert et al 2004, Müller et al 2004).

Dabei stellt die Einsparung der Referenzkamera ein großes Potenzial zur Reduzierung von Fehlereinflussgrößen wie zum Beispiel unvermeidbarer Pixeldejustagefehler von Mess- und Referenzbild, Polarisationsabhängigkeiten bei der Intensitätsteilung in Referenz- und Messbildpfad, unterschiedliche Bildverzerrungen von Mess- und Referenzbild etc. dar, wodurch sich die erreichbare Messunsicherheit deutlich reduzieren lässt. Mit der neuen FSK-DGV-Technik können bei geringerem Aufwand bereits deutlich höhere Auflösungen und geringere Messunsicherheiten gegenüber konventionellen Systemen erzielt werden. So konnte bei einer zeitlichen Auflösung von 0,5 s bereits eine Geschwindigkeitsauflösung von 0,1 m/s an einer rotierenden Scheibe erreicht werden. Weiterhin wurden in einer Rohrströmung bereits Wirbelstrukturen mit Geschwindigkeiten von unter 0,3 m/s aufgelöst (Eggert et al 2006).

Mit der jetzt eingesetzten Selbstkalibrierung des Gesamtsystems wird durch die zur Geschwindigkeitsfeldaufnahme zeitgleiche Vermessung der Absorptionslinie eine weitere Reduzierung der Unsicherheit für die Absolutgeschwindigkeitsmessung möglich. Das Verfahren wurde anhand von Messungen in einer stationären Rohrströmung mit einer Auflösung von 0,1 m/s und einer phasengemittelten Messung der Wirbelstruktur im Nachlauf eines Zylinderstumpfes verifiziert.

Prinzip der selbstkalibrierenden FSK-DGV

Anstelle der Normierung des Messbildes auf ein zeitgleich aufgenommenes Referenzbild durch eine Quotientenbildung beider Bildintensitäten in bisherigen DGV-Systemen, wird beim FSK-DGV-Verfahren die Bildfolge einer einzelnen Kamera hinter der Absorptionszelle bei bildsynchronem Umschalten der Laserfrequenz (frequency shift keying, FSK) ausgewertet.

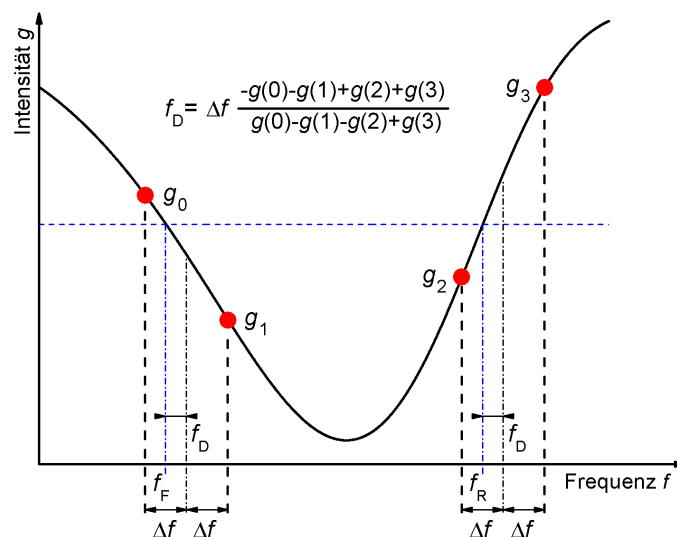


Abb. 1: Prinzip des selbstkalibrierenden FSK-DGV-Verfahrens

Abbildung 1 verdeutlicht das Prinzip der selbstkalibrierenden FSK-DGV. Ausgehend von den Frequenzen f_F und f_R entsprechend der halben Transmission auf der fallenden und steigenden Absorptionslinienflanke, sowie den vorgegebenen Frequenzschritten Δf , wird der Laser abwechselnd auf vier Frequenzen stabilisiert:

$$\begin{aligned} f_0 &= f_F - \Delta f & f_1 &= f_F + \Delta f \\ f_2 &= f_R - \Delta f & f_3 &= f_R + \Delta f \end{aligned}$$

Anhand der Gradienten $dg/df (f_F)$ und $dg/df (f_R)$ auf den Flanken sind die von der Kamera aufgenommenen Intensitäten

$$g_0 = g(f_0 + f_D) = g(f_F) + (f_D - \Delta f) \frac{dg}{df}(f_F) \quad g_1 = g(f_1 + f_D) = g(f_F) + (f_D + \Delta f) \frac{dg}{df}(f_F)$$

$$g_2 = g(f_2 + f_D) = g(f_R) + (f_D - \Delta f) \frac{dg}{df}(f_R) \quad g_3 = g(f_3 + f_D) = g(f_R) + (f_D + \Delta f) \frac{dg}{df}(f_R)$$

bei einer Dopplerverschiebung f_D gegeben. Durch Umformen lässt sich

$$f_D = \Delta f \frac{-g_0 - g_1 + g_2 + g_3}{g_0 - g_1 - g_2 + g_3}$$

ableiten, so dass die Dopplerfrequenz f_D anhand der vier aufgenommenen Intensitäten direkt auf den erzeugten Frequenzschritt Δf rückführbar ist, solange sich die dopplerverschobenen Frequenzen in den Bereichen der Absorptionslinienflanken bewegen, die als linear betrachtet werden können. Da additive und multiplikative Faktoren auf die Intensitäten durch die Differenz- bzw. Quotientenbildung für jeden Bildpunkt individuell aufgehoben werden, haben weder Fremdlicht und das Dunkelbild der Kamera, noch die Streulichtintensität einen Einfluss auf die Messung, solange sie über alle vier aufgenommenen Bilder konstant sind.

Während sich definierte Frequenzsprünge relativ einfach und quatzgenau zum Beispiel mittels akusto-optischen Modulatoren (AOMs) oder per Schwebungssignal-Anbindung an einen Referenzlaser erzeugen lassen, ist es schwieriger, konstante Verschiebungen und langsame Drifts der vier erzeugten Frequenzen im Ganzen relativ zu den von der Absorptionslinie vorgegebenen Frequenzen f_F und f_R zu vermeiden. Dieses Problem lässt sich jedoch umgehen, indem ein geringer Anteil des vom Lichtschnittlaser erzeugten Lichts direkt in die Empfangsoptik geleitet und von der Kamera durch die Zelle hindurch als Referenzpunkt ohne Dopplerverschiebung beobachtet wird. Die am Referenzpunkt gemessene Frequenzverschiebung, die sich über das gesamte gemessene Feld zur Dopplerverschiebung addiert, lässt sich nun aus den Messdaten subtrahieren.

Dieser Referenzpunkt kann auch genutzt werden, um die Absorptionslinienflanken vor der Messung mit mehreren von der Regelung erzeugten Laserfrequenzen abzutasten. Der auf diese Weise aufgenommene Kennlinienverlauf kann genutzt werden, um die Nichtlinearität zu korrigieren und das System somit auch für höhere Dopplerfrequenzen einsetzen zu können.

Aufbau

Das FSK-DGV-System wurde basierend auf ein DFB-MOPA-Lasersystem bei einer Wellenlänge von 852 nm entsprechend einer Caesium-Absorptionslinie aufgebaut. Bei einer konstant auf etwa 160 mW im Lichtschnitt geregelten Ausgangsleistung werden, synchron zur Bildaufnahme, die vier Laserfrequenzen mittels Schwebungssignal-Anbindung an einen auf die Absorptionslinie stabilisierten, nicht modulierten Referenzlaser erzeugt. Über einen ebenfalls synchron zur Bildaufnahme und Frequenzumtastung betriebenen faseroptischen Umschalter wird das Licht zu den drei Lichtschnittköpfen geleitet. In einer Empfangsoptik wird die Lichtschnittebene durch die Absorptionszelle hindurch (Länge und Durchmesser 50 mm) auf eine CCD-Kamera abgebildet, während ein geringer Anteil des Laserlichts per Faser in die Empfangsoptik geleitet und dort als Referenzpunkt ins Bild eingeblendet wird.

Messungen

Zur Charakterisierung des Systems wurde zunächst das Geschwindigkeitsfeld auf einer von einem Synchronmotor angetriebenen rotierenden Scheibe mit 120 mm Durchmesser aufgenommen und mit den aus Drehzahl und Radius bestimmten realen Geschwindigkeiten verglichen. Abbildung 2 zeigt das bei verschiedenen Drehzahlen gemessene Geschwindigkeitsprofil an einer einzelnen Pixelspalte, aufgenommen mit jeweils einer einzelnen Serie von vier Bildern bei einer Bildrate von 10 Hz. Hierbei wurde eine absolute Abweichung von unter 0,5 m/s bei Geschwindigkeiten bis 15 m/s und unter 3 % bei höheren Geschwindigkeiten erreicht. Zeitaufgelöste Messungen an einzelnen Bildpunkten zeigen eine Standardabweichung von 0,12 m/s bei einer Messrate von 2,5 Hz (Abbildung 3).

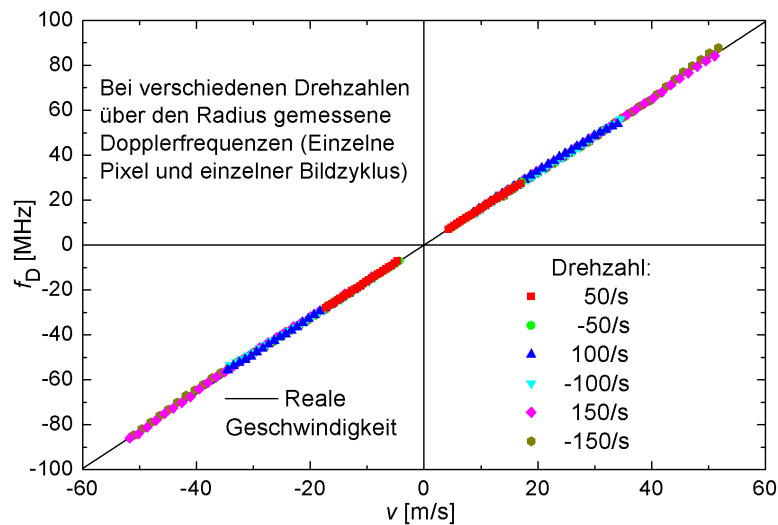


Abb. 2: Über den Radius einer rotierenden Scheibe aufgenommene Geschwindigkeiten

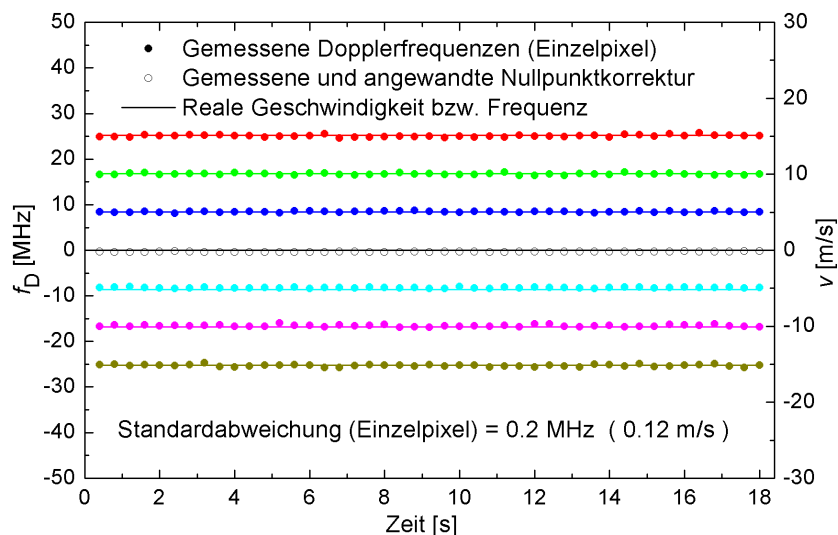


Abb. 3: Zeitaufgelöste Geschwindigkeiten an einzelnen Bildpunkten

Weiterhin wurde die Strömung in einer Rohrleitung mit 20 cm Durchmesser, 4 m hinter einem Doppelkrümmer bei einem Durchfluss von etwa 1000 m³/h und 2000 m³/h vermessen. Bei beiden Messungen wurden insgesamt 300 Zyklen je drei Lichtschnitten und vier Frequenzen mit Bildern von 100 ms Belichtungszeit aufgenommen.

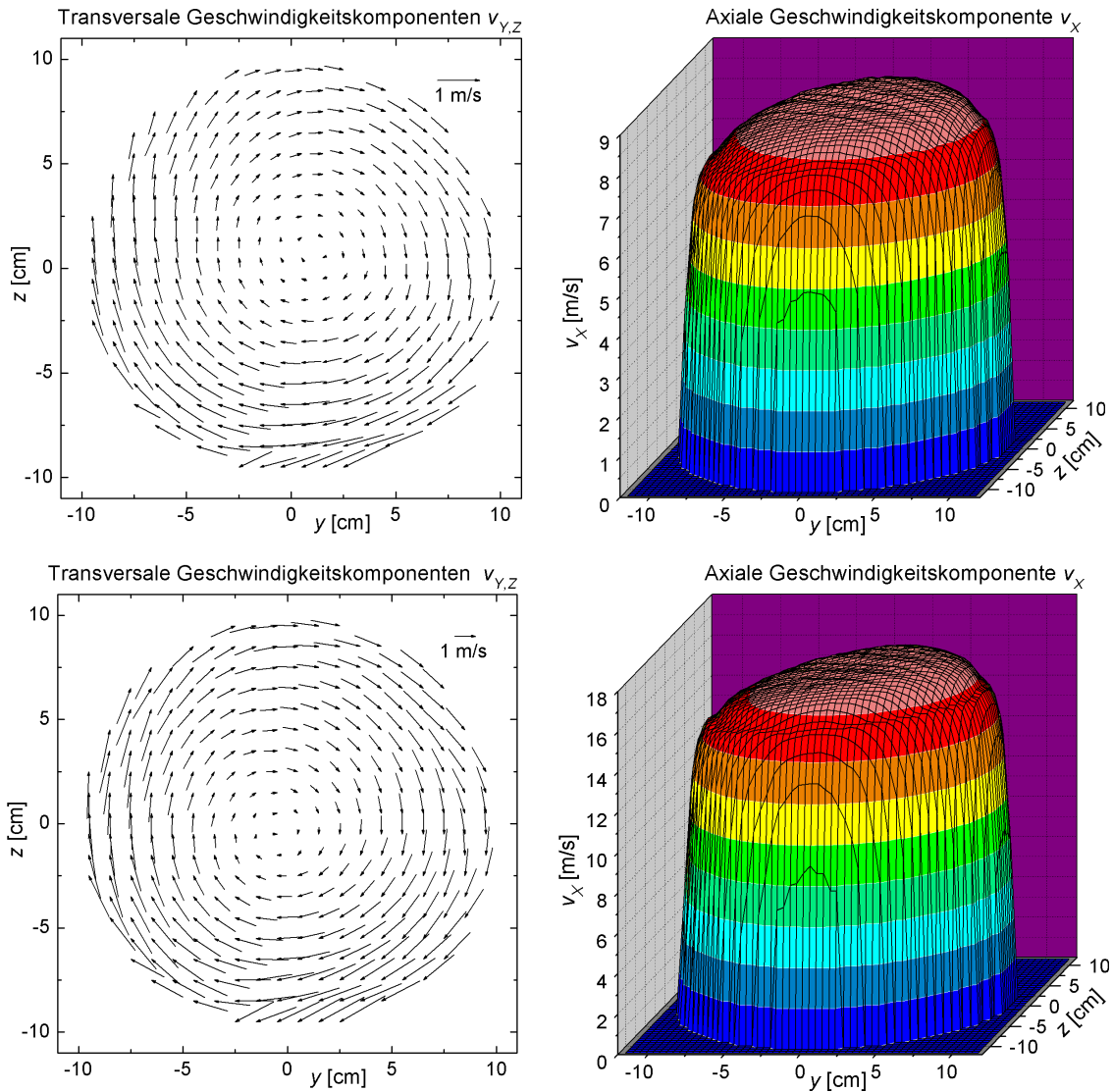


Abb. 4: Rohrströmung 4 m hinter einem Doppelkrümmer, oben: 1000 m³/h, unten: 2000 m³/h

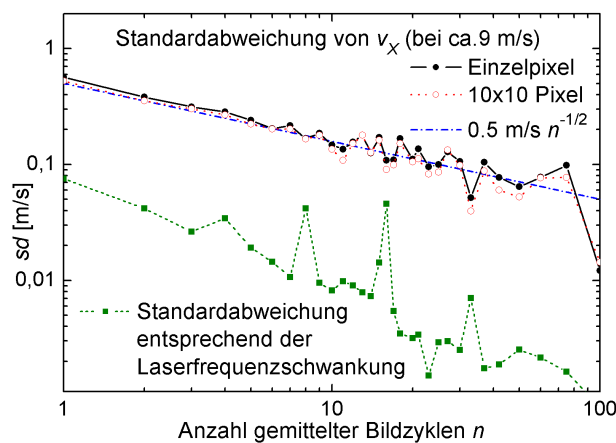


Abb. 5: Standardabweichung für die Geschwindigkeitsmessung

Abbildung 4 zeigt, wie sich das asymmetrische Profil der axialen Geschwindigkeitskomponente verändert und das Zentrum des vom Doppelkrümmer erzeugten Dralls in der Lichtschnittebene mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit verschiebt. Strukturen bis hinab zu 0,1 m/s sind hier in der transversalen Geschwindigkeitskomponente deutlich erkennbar.

Zur Abschätzung der Geschwindigkeits- und Zeitauflösung ist die Standardabweichung der axialen Komponente in Abhängigkeit der Mittelung in Abbildung 5 dargestellt, sie beträgt unter 0,5 m/s für einzelne Bildzyklen bis hin zu unter 0,05 m/s für die Mittelung aus 100 Bildzyklen. Der gleichmäßige Abfall mit der Wurzel der Anzahl gemittelter Bildzyklen legt nahe, dass es sich hier ausschließlich um zeitlich unkorreliertes Rauschen handelt. Da kaum Unterschied zwischen der Standardabweichung für einzelne und der Mittelung aus 10x10 Bildpunkten besteht, scheint das Bildrauschen in dieser Messung keinen wesentlichen Einfluss zu besitzen. Die Standardabweichung des aus der am Referenzpunkt gemessenen Frequenzverschiebung resultierenden Geschwindigkeitsoffsets liegt eine Größenordnung unterhalb der in der Strömung gemessenen, so dass Schwankungen der Zellentemperaturen und Laserregelungen ebenfalls kaum zur Unsicherheit beitragen. Das Rauschen scheint daher in dieser Messung von der Strömung selbst oder von Schwankungen der Seedingkonzentration dominiert zu werden.

Am Windkanal der Universität Rostock wurden phasengemittelte Messungen im Wirbelnachlauf eines Zylinderstumpfes (Abbildung 6) von 12 cm Durchmesser und 24 cm Länge bei einer Anströmgeschwindigkeit von 26 m/s durchgeführt. Die Messebene befand sich 30 cm hinter der Zylinderachse, wie in Abbildung 7 anhand des Rahmens, der die Lichtschnittköpfe trägt, erkennbar ist. Aus dem Lichtschnitt wurde eine Fläche von etwa 25 cm Breite und 29 cm Höhe aus 72 cm Entfernung stromabwärts aufgenommen. Mit jedem Lichtschnitt und mit jeder Laserfrequenz wurde, getriggert von einer Hitzdrahtsonde, jeweils ein ganzer Durchlauf eines sich ablösenden Wirbels mit 15 Bildern je 2 ms Belichtungszeit aufgenommen. Jeder der 3000 aufgenommenen Messzyklen umfasst damit 3 Lichtschnitte mit je 4 Frequenzen mit je 15 Bildern je 2 ms. Obwohl die Frequenz-Intensitäts-Umsetzung der Absorptionslinie aufgrund der kurzen Belichtungszeit und der geringen Lichtschnittleistung von nur 160 mW im Einzelbild lediglich einen Intensitätsgradienten von weniger als 0,01 Grauwert/MHz bewirkt und die Intensitätsänderungen damit im gesamten Geschwindigkeitsbereich weit unterhalb der Quantisierung der Kamera liegen, konnten durch das vom Bildrauschen erzeugte natürliche Dithering dennoch Mittelwerte der Intensitäten mit deutlich höherer Auflösung gebildet werden.

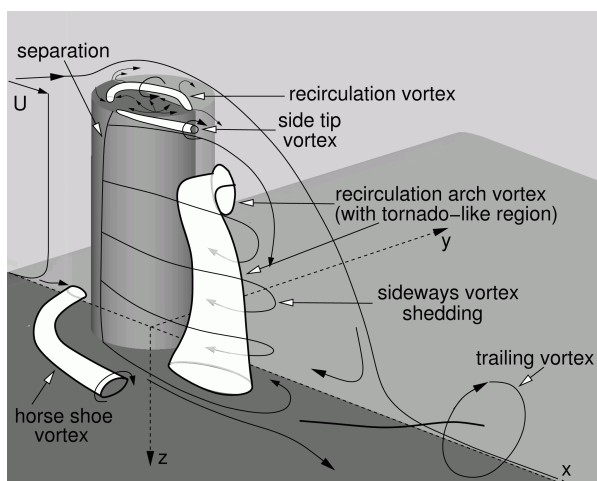


Abb. 6: Topologie der Zylinderumströmung
Quelle: Frederich et al 2008

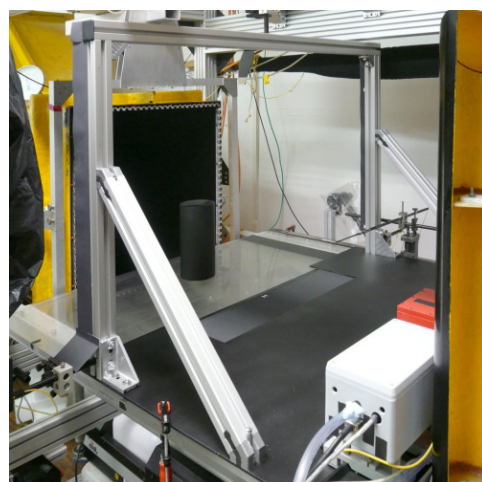


Abb. 7: Aufbau am Windkanal

In der über alle Zeitschlitze gemittelten Strömungsgeschwindigkeitsfeldmessung (Abbildung 8) sind das Wiederanlegen der Strömung an die Endscheibe (mittig), die Hufeisenwirbel in der Nähe der Endscheibe (unten rechts und links) und die resultierende axiale Komponente deutlich erkennbar. In der phasengemittelten Messung - in Abbildung 9 sind zwei der

15 Zeitschlitz dargestellt - wird darüberhinaus die Ablösung der Wirbel anhand der pendelnden Y-Komponente der Strömung deutlich. Offensichtlich sind die zwischen korrespondierenden Zeitpunkten unterschiedlicher Wirbelablösungen auftretenden Schwankungen der Geschwindigkeit und der Seedingskonzentration lediglich statistisch verteilt, so dass hier nach ausreichender Mittelung der Vergleich der bei verschiedenen Frequenzen aufgenommenen Intensitäten möglich ist.

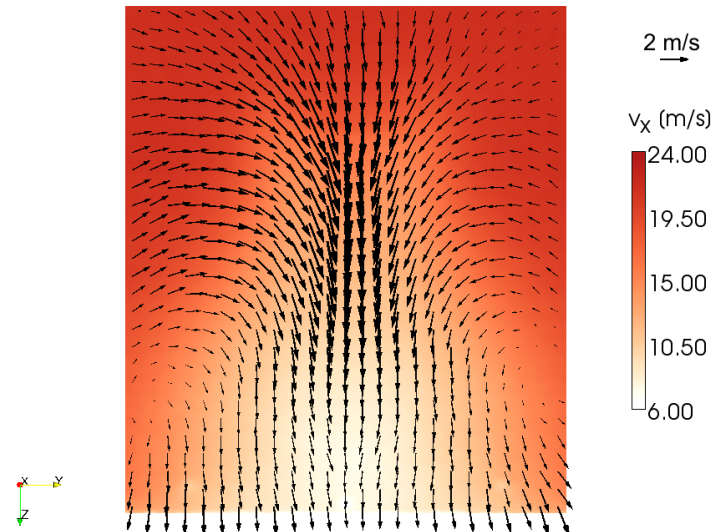


Abb. 8: Zeitlich gemittelttes Strömungsgeschwindigkeitsfeld (250x288 mm) hinter dem Zylinderstumpf

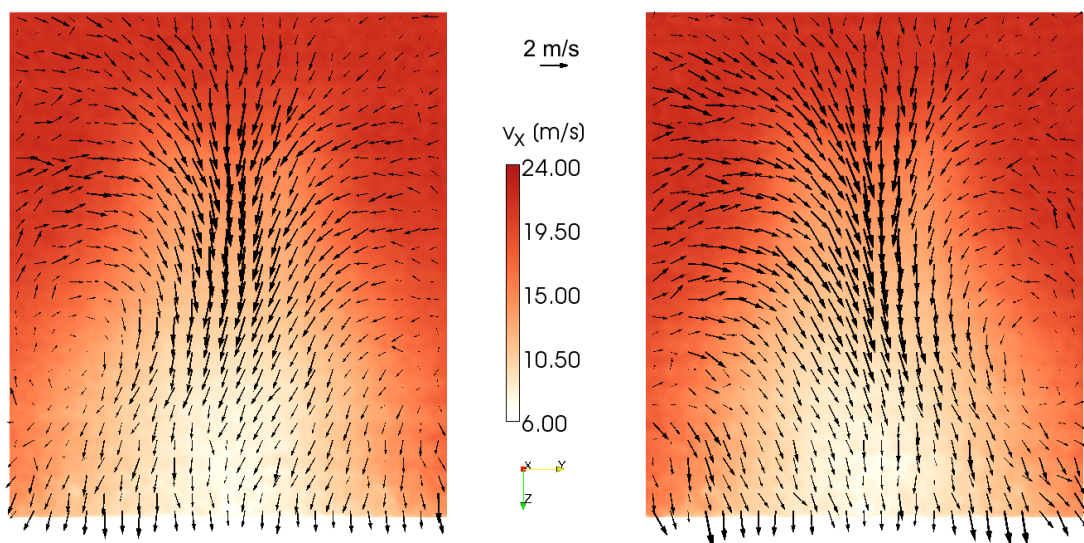


Abb. 9: Phasengemittelte Geschwindigkeitsfelder 10 ms und 24 ms nach Triggerimpuls

Zusammenfassung

Trotz der geringen Intensitäten unterhalb der Quanisierungsstufen der Kamera konnten mit dem selbstkalibrierenden DGV-Verfahren phasengemittelte Messungen im Nachlauf eines Zylinderstumpfes durchgeführt und die Ablösung der Wirbel dargestellt werden. Diese Ergebnisse unterstreichen Vorteile des FSK-DGV-Verfahrens, nicht nur unabhängig von Änderungen der Streulichtleistung, sondern durch den Vergleich nacheinander aufgenommener Bilder einer einzelnen Kamera auch unabhängig von langsamen Schwankungen des Dunkelbilds zu sein.

Dadurch, dass eine Kalibrierung der Empfindlichkeit des Gesamtsystems anhand definierter Laserfrequenzsprünge direkt in die Messung integriert wurde, ist eine absolute Geschwindigkeitsmessung ohne zusätzliche Kalibrierung der Absorptionszelle möglich. In einer stationären Strömung wurde ohne räumliche Mittelung eine Auflösung von unter 0,5 m/s in Einzelmessungen und unter 0,05 m/s in zeitlich gemittelten Messungen mit einer Gesamtmessdauer von wenigen Minuten für 3-komponentige Geschwindigkeitsfelder erreicht.

Dankesworte

Die Autoren danken dem Team des Lehrstuhls Strömungsmechanik der Universität Rostock für die Bereitstellung ihres Windkanals und ihre tatkräftige Unterstützung bei der Messung, sowie PCO für die freundlicherweise zur Verfügung gestellte Highspeed-Kamera. Besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung innerhalb des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1147 „Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse“.

Literatur

- Ainsworth, R. W.; Thorpe, S. J.; Manners, R. J., 1997: „A new approach to flow-field measurement - A view of Doppler global velocimetry techniques“; *Int. J. Heat and Fluid Flow* 18
- Eggert, M., Müller, H., Dopheide, D., Czarske, J., 2004: „FM-DGV zur Geschwindigkeitsfeldmessung“; *Proceedings der 12. Fachtagung zu Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik (GALA)*; 10.1 - 10.6; Karlsruhe; ISBN 3-9805613-1-3
- Eggert, M., Müller, H., Dopheide, D., Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., 2006: „DGV mit Selbstkalibrierung auf Basis neuer Modulationstechniken“ *Proceedings der 14. Fachtagung zu Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik (GALA)*; Cottbus
- Eggert, M., Müller, H., Czarske, J., Büttner, L., Fischer, A., 2008: „Self-calibrating single camera Doppler Global Velocimetry based on FSK-techniques“; *Proceedings of the 14th Int. Symposium on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mechanics*; [CD-ROM] 7.3.3; Lissabon
- Eggert, M., Müller, H., Czarske, J., Büttner, L., Fischer, A., 2009: „Self-calibrating Single Camera Doppler Global Velocimetry Based on Frequency Shift Keying“; *Imaging Measurement Methods for Flow Analysis*; 43-52; ISBN 78-3-642-01105-4
- Ford, H.D.; Nobes, D.S.; Tatam, R.P., 2001: „Acousto-optic frequency switching for single-camera planar Doppler velocimetry“; *Proc. SPIE Vol 4448*
- Frederich, O., Scouten, J., Luchtenburg, M., Thiele, F., Jensch, M., Hüttmann, F., Brede, M., Leder, A., 2008: „Joint numerical and experimental investigation of the flow around a finite wall-mounted cylinder at a Reynolds number of 200000“ *Proceedings of the ERCOFTAC International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements*; ETMM7; 517-522
- Meyers, J.F.; Lee, J.W.; Schwartz R.J. 2001: „Characterization of measurement error sources in Doppler global velocimetry“; *Meas. Sci. Technol.* 12; 357-368
- Morrison, G.L.; Gaharan Jr, C.A., 2001: „Uncertainty estimates in DGV systems due to pixel location and velocity gradients“; *Meas. Sci. Technol.* 12; 369-377
- Müller, H.; Lehmacher, T.; Grosche, G., 1999: „Profile sensor based on Doppler Global Velocimetry“; *8th International Conference Laser Anemometry Advances and Applications*; 475 - 482; Rom
- Müller, H.; Pape, N.; Grosche, G.; Strunck, V.; Dopheide, D., 2002: „Simplified DGV on-line profile sensor“; *11th Int. Symp. On Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*; Paper 9.3; Lisbon
- Müller, H., Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., Dopheide, D., 2003: „DGV-Photodioden-Array-Sensor mit Nutzung einer Laserfrequenzmodulation zur Vermessung von instationären Strömungsfeldern“; *Proceedings der 12. Fachtagung zu Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik (GALA)*; 31.1-31.7; Braunschweig; ISBN 3-00-011903-5
- Müller, H., Eggert, M., Pape, N., Dopheide, D., Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., 2004: „Time resolved DGV based on laser frequency modulation“; *Proc. 12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*; Lisbon, Session 25-2; Portugal; Published by CD-ROM
- Röhle, I.; Schodl, R., 1994: „Evaluation of the accuracy of the Doppler global technique“, *Proc. Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow*; pp. 155-161; London