

FM-DGV ZUR GESCHWINDIGKEITSFELDMESSUNG

M. Eggert, H. Müller, D. Dopheide, *) J. Czarske

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Fachbereich Gase

Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

*) Laser Zentrum Hannover e.V.,
Hollerithallee 8, 30419 Hannover

Abstract

Der Beitrag beschreibt ein neues auf der Doppler-Global-Velozimetrie basierendes Verfahren zur Geschwindigkeitsfeldmessung, bei dem die Hauptbeiträge zur Messunsicherheit im Vergleich zu bisherigen Verfahren entfallen bzw. drastisch reduziert werden können. Dies wird durch ein Frequenzmodulationsverfahren erreicht, durch dessen Einsatz die sonst notwendige Referenzkamera entfällt.

Einleitung

Die Doppler Global Velozimetrie ist ein spektroskopisches Verfahren zur Geschwindigkeitsfeldmessung, das auf dem Einsatz von Absorptionszellen für die Auswertung der Dopplerverschiebung von Streulicht aus der Lichtschnittebene einer zu untersuchenden Strömung beruht. Dabei setzt ein steiflankiges Absorptionsfilter Dopplerverschiebungen in Intensitätsänderungen des durch eine Absorptionszelle transmittierten Streulichts um. Um Einflüsse von Laserleistungsschwankungen und Inhomogenitäten innerhalb des Lichtschnitts zu vermeiden, wird das durch die Absorptionszelle transmittierte Streulicht auf das direkt empfangene Streulicht normiert. Hierzu sind 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 Absorptionszellentransmission. Die größten Messunsicherheitsanteile entstehen bei den bisher realisierten DGV-Messsystemen durch unvermeidbare Pixeldejustagefehler, sowie durch Instabilitäten der Absorptionszelle 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 kann durch die Übertragung der bereits auf der letzten GALA-Fachtagung vorgestellten FM-DGV-Modulationstechnik zur Geschwindigkeitsprofilmessung mittels APD-Array auf den Einsatz nur einer CCD-Kamera zur Geschwindigkeitsfeldmessung erreicht werden. Dabei stellt die Einsparung der Referenzkamera ein großes Potenzial zur drastischen 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.

Erste Messergebnisse von Geschwindigkeitsfeldern belegen, dass mit der hier vorgestellten FM-DGV-Technik bei geringerem Aufwand bereits deutlich höhere Auflösungen und geringere Messunsicherheiten gegenüber konventionellen Systemen erzielt werden können. So konnte bei einer zeitlichen Auflösung von 0,5 s bereits eine Geschwindigkeitsauflösung von 0,1 m/s erreicht werden.

FM-DGV-Funktionsprinzip

Um das von Müller et al 2003 auf der GALA-Fachtagung vorgestellte Verfahren der FM-DGV zur Messung von Geschwindigkeitsprofilen auf die Messung von Geschwindigkeitsfeldern zu übertragen, muss der APD-Zeilensensor durch eine CCD-Kamera ersetzt werden.

Anstelle der Normierung des Messbildes auf ein zeitgleich aufgenommenes Referenzbild durch eine Quotientenbildung beider Bildintensitäten in bisherigen DGV-Systemen, wird bei dem FM-DGV-Verfahren eine Quotientenbildung zweier aus der Bildfolge einer Kamera hinter der Absorptionszelle von der Dopplerverschiebung eindeutig abhängenden Amplitudenmodulationsanteile vorgenommen.

Während APD-Elemente jedoch ein kontinuierliches Signal liefern, welches mit hoher Abtast-rate erfasst werden kann, so dass viele Messwerte pro Modulationsperiode zur Verfügung stehen, muss bei den niedrigen Bildwiederholraten erhältlicher Kameras mit möglichst wenigen Bildern pro Modulationsperiode gearbeitet werden, um eine annehmbare zeitliche Messauflösung zu erhalten. Nach Nyquist sind zur Bestimmung der Frequenzanteile $A(1f_M)$ und $A(2f_M)$ des amplitudenmodulierten Lichts hinter der Absorptionszelle mindestens vier Messwerte, also Kamerabilder notwendig. Da hierbei die Abtastrate nicht mehr hoch gegenüber der Modulationsfrequenz ist, ist es von Vorteil, keine kontinuierliche, sondern eine diskrete Frequenzmodulation zu nutzen, um über den Belichtungszeitraum eines Kamerabildes konstante Helligkeiten zu erreichen.

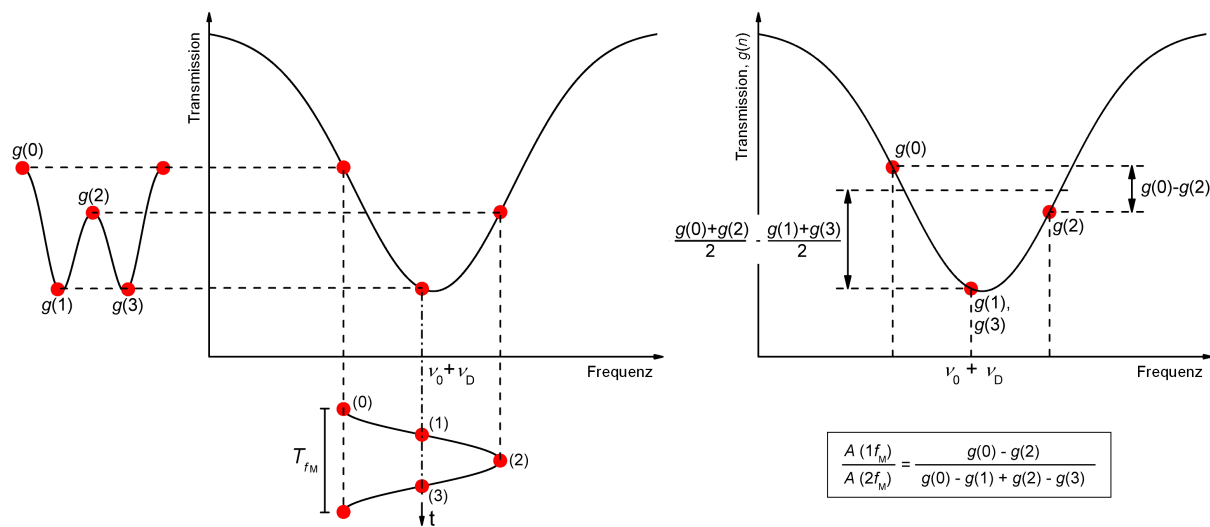


Abb. 1: Übergang von einer kontinuierlichen zur diskreten Frequenzmodulation

Abbildung 1 (links) zeigt die diskrete Frequenzmodulation und die durch die Absorption in der Zelle entstehenden diskreten Helligkeitswerte für eine gegebene Dopplergeschwindigkeit. Die diskreten Werte der Frequenzmodulation wurden, entsprechend der passenden Wahl der Abtastzeitpunkte einer kontinuierlichen Modulation, so gewählt, dass sie möglichst aussagekräftig zur Bestimmung von $A(1f_M)$ und $A(2f_M)$ sind.

Aus diesen vier Werten $g(i)$ können die Frequenzanteile $A(1f_M)$ und $A(2f_M)$ mittels diskreter Fouriertransformation eindeutig bestimmt werden, ein mögliches Verfahren hierzu ist die schnelle Fouriertransformation (FFT).

Bei $n = 4$ Werten und bekannter Phasenbeziehung bietet es sich jedoch an, die Realteilkoeffizienten der diskreten Fouriertransformation direkt zu bilden:

$$A(k f_M) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} g(i) \cos\left(2\pi \frac{k i}{n}\right) \quad \text{So folgt}$$

$$A(1f_M) = g(0) - g(2) \quad \text{und} \quad A(2f_M) = g(0) - g(1) + g(2) - g(3)$$

Anhand der Absorptionslinie (Abb. 1, rechts) findet sich die Differenz $A(1f_M)$ als die Summe der durch die Dopplerverschiebung bedingten Intensitätsänderungen auf der Absorptionsflanke wieder, während $A(2f_M)$ die doppelte Differenz zwischen den Intensitäten auf der Flanke und den Intensitäten im Scheitelpunkt darstellt.

So lässt sich leicht erkennen, dass $A(1f_M)$ ein Maß für die Dopplerverschiebung, skaliert mit der Intensität des frequenzmodulierten Lichts darstellt, während $A(2f_M)$ als Maß für die Intensität des frequenzmodulierten Lichts genommen werden kann. Der Quotient $A(1f_M) / A(2f_M)$ ist somit als Maß für die Dopplerverschiebung unabhängig von Fremdlicht und Intensität des frequenzmodulierten Lichts.

Aufgrund der Tatsache, dass $g(1)$ und $g(3)$ an der gleichen Stelle der Absorptionslinie aufgenommen werden, lässt sich die Messung von $g(3)$ einsparen und $g(3)=g(1)$ setzen. Die gleiche Gesamtzahl an Messwerten vorausgesetzt, liefert in einer Simulation mit verrauschten Signalen eine Frequenzmodulation mit lediglich drei aufgenommenen Werten pro Messung das beste Signal-Rausch-Verhältnis im Vergleich mit vier Punkten pro Messung und einer quasi-kontinuierlichen Abtastung. Dieser Effekt basiert auf der Tatsache, dass bei dieser Art der Modulation nur Messwerte an jenen Punkten auf der Absorptionslinie aufgenommen werden, die die meiste Aussagekraft besitzen.

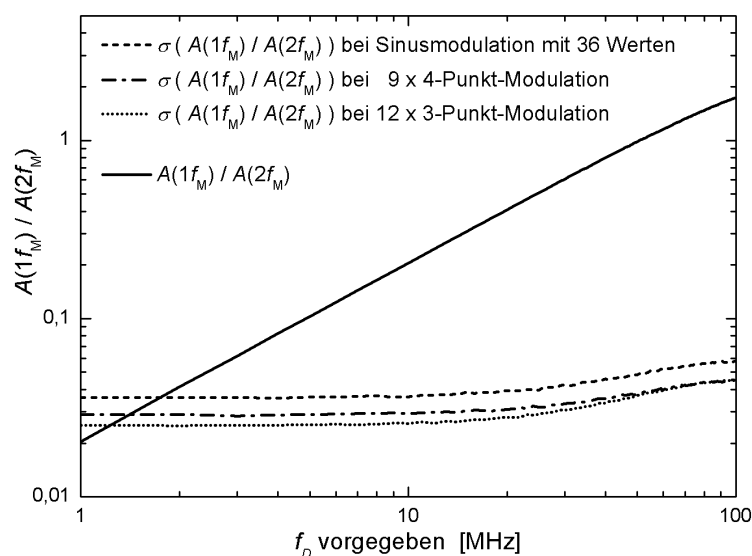


Abb. 2: Simulation zur Bestimmung des Quotienten $A(1f_M) / A(2f_M)$ für eine unterschiedliche Anzahl von Abtastungen pro Modulationsperiode

Mit der Bestimmung der Quotienten $A(1f_M) / A(2f_M)$ für jedes CCD-Kamerapixel und des durch die Kalibrierung bekannten funktionalen Zusammenhangs zwischen $A(1f_M) / A(2f_M)$, der Dopplerverschiebung und der gemessenen Geschwindigkeitskomponente ist die direkte Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes über den von der Kamera erfassten Lichtschnittausschnitt möglich.

Experimenteller Aufbau und erste Messergebnisse vom FM-DGV-System

Als Laserquelle wurde für das vereinfachte DGV-System eine fasergekoppelte 852 nm DBR-Laserdiode mit einer Ausgangsleistung von ca. 50 mW verwendet, deren Frequenz synchron zur Kamerabildrate von ca. 10 Hz auf die Arbeitspunkte (0), (1), (2) und (3) (s. Abb. 1) umgestaltet wurde.

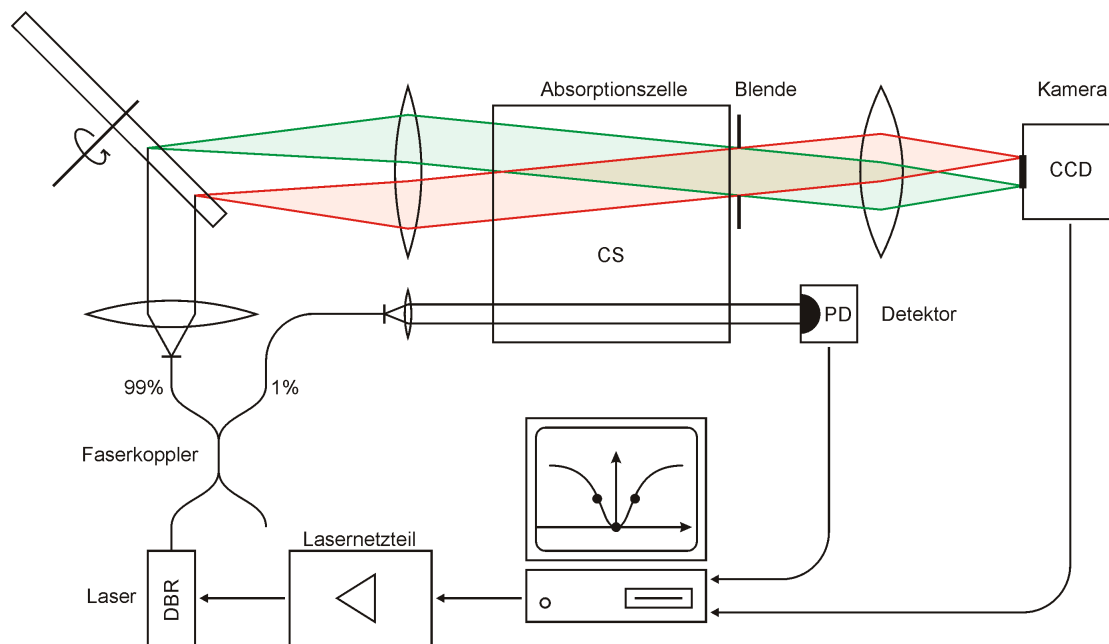


Abb. 3: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus des FM-DGV-Systems zur Geschwindigkeitsfeldmessung

Über einen Faserkoppler wurde 1% der von der DBR-Laserdiode in die Monomodefaser eingekoppelten Laserstrahlung ausgekoppelt und durch eine Cäsiumzelle auf einen Photodetektor zur rechnergesteuerten Frequenzstabilisierung der DBR-Laserdiode gegeben. Dabei wurde die Cs-Zelle sowohl für die Frequenzstabilisierung des Lasers als auch für die Auswertung der Dopplerverschiebung des Streulichts eingesetzt. Mit den verbleibenden 99% der Laserausgangsleistung wurde über eine Aufweitungsoptik die Teilfläche einer rotierenden, einseitig aufgerauhten Plexiglasscheibe ausgeleuchtet. Ein ca. $4 \times 4 \text{ mm}^2$ großer Ausschnitt der beleuchteten Scheibenfläche (siehe Abb. 4) wurde auf die CCD-Kamera abgebildet und das Geschwindigkeitsfeld ausgewertet.

Der Auswertung des in Abbildung 4 exemplarisch dargestellten Geschwindigkeitsfeldes liegt ein Bildaufnahmezyklus von lediglich drei im zeitlichen Abstand von ca. 100 ms aufgenommenen Bildern mit einer jeweils knapp darunter liegenden Bildaufnahmezeit zugrunde. Die Auswertung der drei Bildaufnahmen entsprechend der in Abbildung 1 angegebenen Quotientenbildung liefert unmittelbar die Information über ein komplettes Geschwindigkeitsfeld in bereits weniger als 0,5 s.

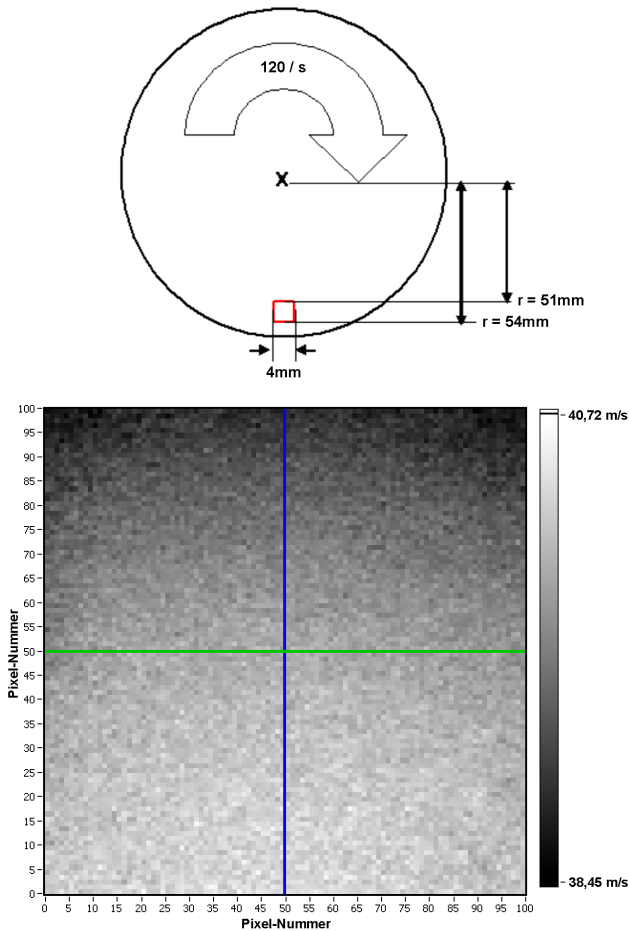


Abb. 4: „Ein-Kamera-FM-DGV-Messung“ des auf der Scheibe markierten Geschwindigkeitsfeldes

Zur Verdeutlichung der mit dem System bereits erzielten Geschwindigkeitsauflösung sind in Abb. 5 die entlang der in Abb. 4 eingezeichneten Linien resultierenden Geschwindigkeitsprofile auf der rotierenden Plexiglasscheibe dargestellt.

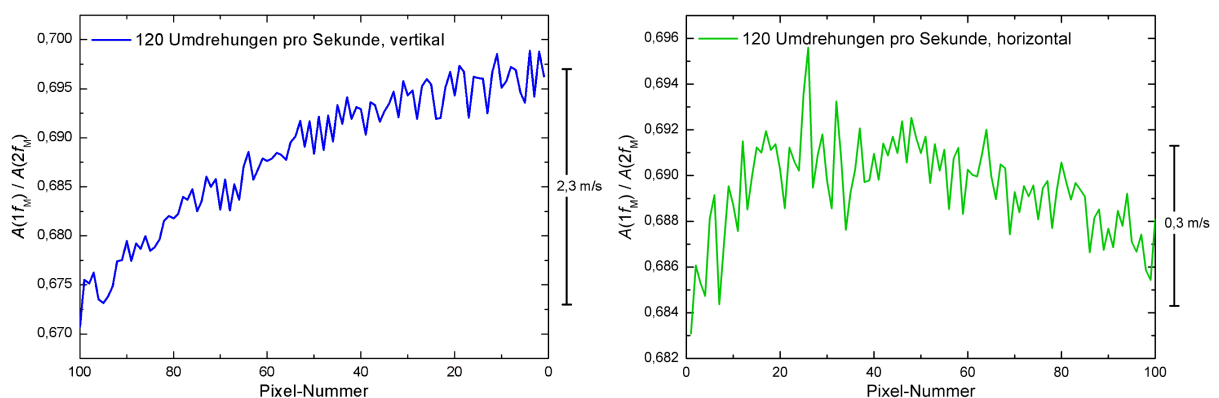


Abb. 5: Vertikales und horizontales Geschwindigkeitsprofil entsprechend der im Geschwindigkeitsfeld in Abb 4 eingezeichneten Linien

Anhand der ersten in den Abbildungen 4 und 5 exemplarisch dargestellten Messergebnisse ist zu erkennen, dass die bereits erzielte Geschwindigkeitsauflösung in der Größenordnung von 0,1 m/s die bisher vorgestellten DGV-Systeme deutlich übertrifft.

Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass sich die in den letzten Jahren bereits für die Messung von Geschwindigkeitsprofilen vorgestellte FM-DGV-Technik auch auf die Messung von Geschwindigkeitsfeldern übertragen lässt. Ein entscheidender Vorteil dieser neuen Technik besteht in dem Wegfall der bei konventionellen Systemen erforderlichen Referenzkamera. Hierdurch entfällt eine Vielzahl entscheidender Fehlereinflüsse bei der Bildauswertung, so dass sich die Messunsicherheit deutlich reduzieren lässt. Erste Messergebnisse belegen, dass bei einer Vereinfachung der DGV-Messanordnung bereits eine Verbesserung der Geschwindigkeitsauflösung mindestens um den Faktor 5 gegenüber konventionellen Systemen erzielt werden konnte.

Dankesworte

Die Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft innerhalb des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1147 „Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse“ gefördert.

Literatur

Ainsworth, R. W.; Thorpe, S. J.; Manners, R. J. "A new approach to flow-field measurement - A view of Doppler global velocimetry techniques", Int. J. Heat and Fluid Flow 18, 1997

Ford, H.D.; Nobes, D.S.; Tatam, R.P. (2001). "Acousto-optic frequency switching for single-camera planar Doppler velocimetry", Proc. SPIE Vol 4448

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 1999, 475 - 482, Rom

Müller, H.; Pape, N.; Grosche, G.; Strunck, V.; Doppeide, D. (2002). „Simplified DGV on-line profile sensor“, 11th Int. Symp. On Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, paper 9.3, Lisbon

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", London, pp. 155-161