

ENTWICKLUNGEN ZUR EIN-KAMERA-FSK-DGV-2D-3K- GESCHWINDIGKEITSFELDMESSUNG

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

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Fachbereich Gase

Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

*) TU Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik

Professur für Mess- und Prüftechnik

01062 Dresden

Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt den derzeitigen Entwicklungsstand eines neuen auf der Doppler-Global-Velozimetrie basierenden Verfahrens zur Geschwindigkeitsfeldmessung. Durch den Einsatz des erläuterten FSK (Frequency Shift Keying) -Verfahrens als diskretisiertem Frequenzmodulationsverfahren kann nicht nur die bei bisherigen DGV-Systemen erforderliche Referenzkamera entfallen, sondern auch eine Selbstkalibrierung des Gesamtsystems während der Messung vorgenommen werden. Hierdurch ist es möglich, die Messunsicherheit gegenüber konventionellen Systemen drastisch zu reduzieren.

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 steilflankiges 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 konnte durch die Übertragung der bereits auf der 11. GALA-Fachtagung vorgestellten 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 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.

Bisher durchgeführte Messungen von Geschwindigkeitsfeldern belegen, dass mit der neuen FM/FSK-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. Weiterhin wurden in einer Rohrströmung bereits Wirbelstrukturen mit Geschwindigkeiten von unter 0,3 m/s aufgelöst. Darüber hinaus wird mit der Implementierung einer Selbstkalibrierung des Gesamtsystems während des Messvorgangs mit der Vermessung der Absorptionslinie parallel zur Geschwindigkeitsfeldaufnahme eine weitere Reduzierung der Messunsicherheit möglich.

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, musste 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.

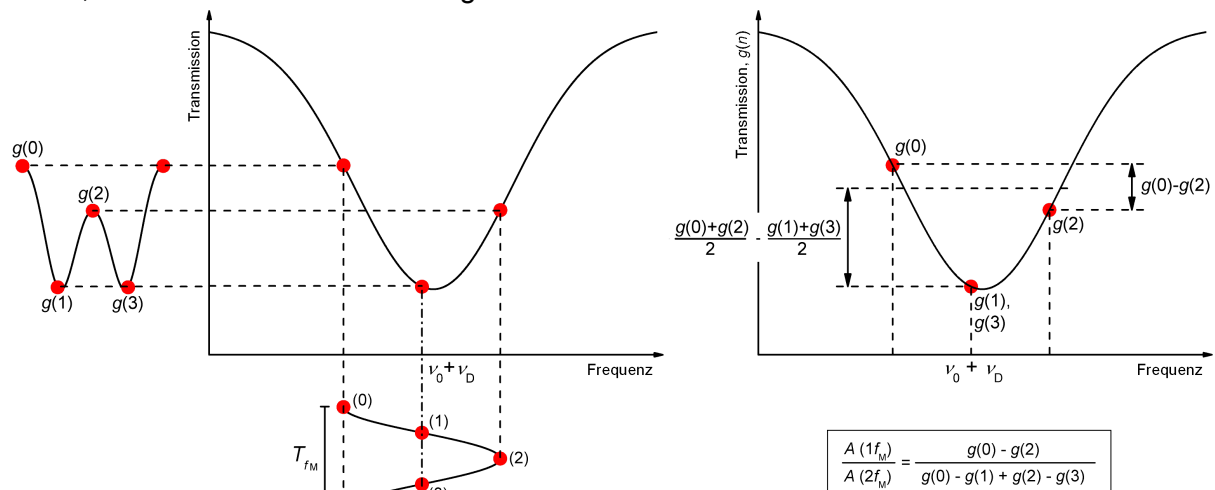


Abb. 1: Übergang von einer kontinuierlichen zur diskreten Frequenzmodulation

Da hierbei die Abtast-rate 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.

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:

$$A(k f_M) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} g(i) \cos \left(2 \pi \frac{k i}{n} \right), \quad A(1 f_M) = g(0) - g(2), \quad A(2 f_M) = g(0) - g(1) + g(2) - g(3)$$

Aus der Absorptionslinie (Abb. 1, rechts) entnimmt man die Differenz $A(1f_M)$ als Summe der durch die Dopplerverschiebung bedingten Intensitätsänderungen auf der Absorptionsflanke, 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 das Maß für die Dopplerverschiebung unabhängig von Fremdlicht und Intensität des frequenzmodulierten Lichts.

Da $g(1)$ 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. 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 Messergebnisse vom FM/FSK-DGV-System

Als Laserquelle wurde für das vereinfachte DGV-System ein fasergekoppeltes 852 nm ECDL-MOPA-System mit einer Ausgangsleistung von ca. 500 mW verwendet, dessen Frequenz synchron zur Kamerabildrate von ca. 10 Hz auf die Arbeitspunkte (0), (1), (2) und (3) (s. Abb. 1) umgetastet wurde.

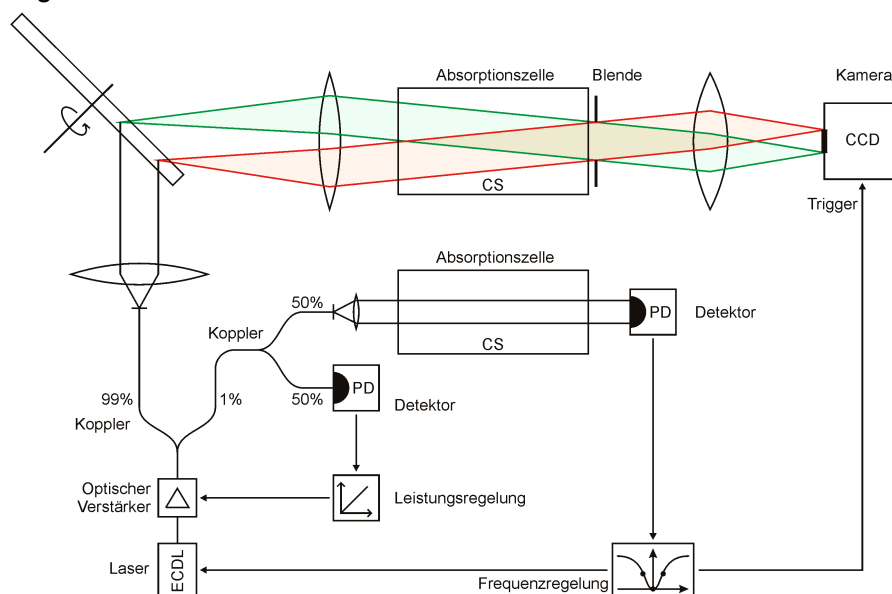


Abb. 2: Schematische Darstellung des FM/FSK-DGV-Systems zur Geschwindigkeitsfeldmessung

Über einen Faserkoppler wurde 1% der in die Monomodefaser eingekoppelten Laserstrahlung ausgekoppelt und durch eine Cäsiumzelle auf einen Photodetektor zur mikrocontroller-gesteuerten Frequenzstabilisierung der DBR-Laserdiode gegeben. Gleichzeitig wurde die Laserausgangsleistung durch die Modulation des Verstärkerstroms konstant gehalten. Mit den verbleibenden 99% der Laserausgangsleistung wurde über eine Aufweitungsoptik eine rotierende, einseitig aufgerauhte Plexiglasscheibe ausgeleuchtet. Die beleuchtete Scheibe wurde auf die CCD-Kamera abgebildet und das Geschwindigkeitsfeld ausgewertet. Ein Ausschnitt des gemessenen Geschwindigkeitsfeldes ist in Abbildung 3 dargestellt.

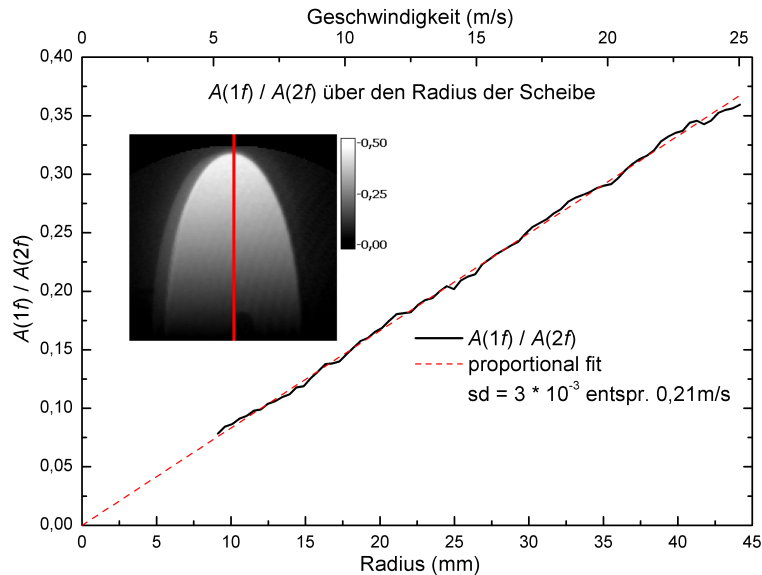


Abb. 3: Gemessener Quotient $A(1f_M) / A(2f_M)$ über Scheibenradius bzw. Scheibengeschwindigkeit

Der Auswertung des in Abbildung 3 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. Damit liefert die Auswertung der drei Bildaufnahmen entsprechend der in Abbildung 1 angegebenen Quotientenbildung unmittelbar die Information über ein komplettes Geschwindigkeitsfeld in bereits weniger als 0,5 s. Die über eine einzige Pixelspalte gemessenen Geschwindigkeiten weisen eine Standardabweichung von lediglich 0,21 m/s gegenüber einer Geraden auf.

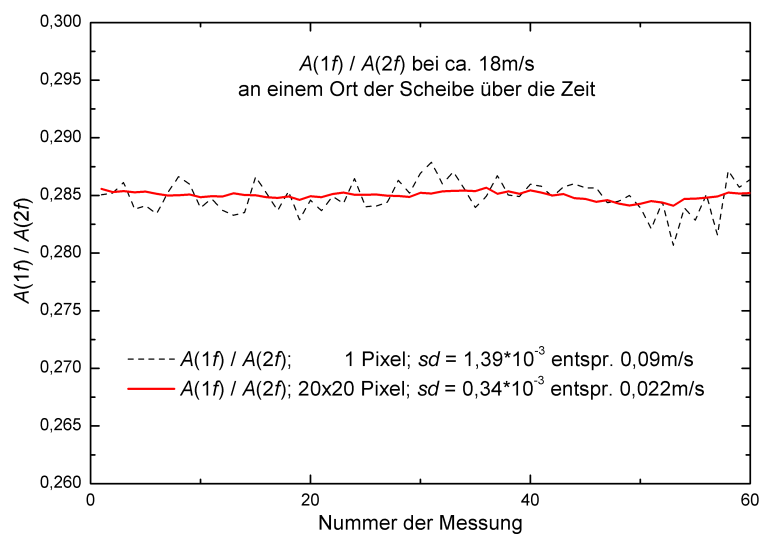


Abb. 4: Gemessener Quotient $A(1f_M) / A(2f_M)$ über die Zeit

Bei einer Darstellung über die Zeit (Abbildung 4) zeigt sich, dass die Messunsicherheit von etwa 0,1 m/s der an einzelnen Bildpunkten gemessenen Geschwindigkeit vom Bildrauschen dominiert wird, während eine Mittelung über mehrere Pixel das Bildrauschen unterdrückt und bei einer erzielten Messunsicherheit von nur noch 0,022 m/s auf eine gute Regelung der Laserfrequenzen schließen lässt.

Messungen in einer Rohrströmung

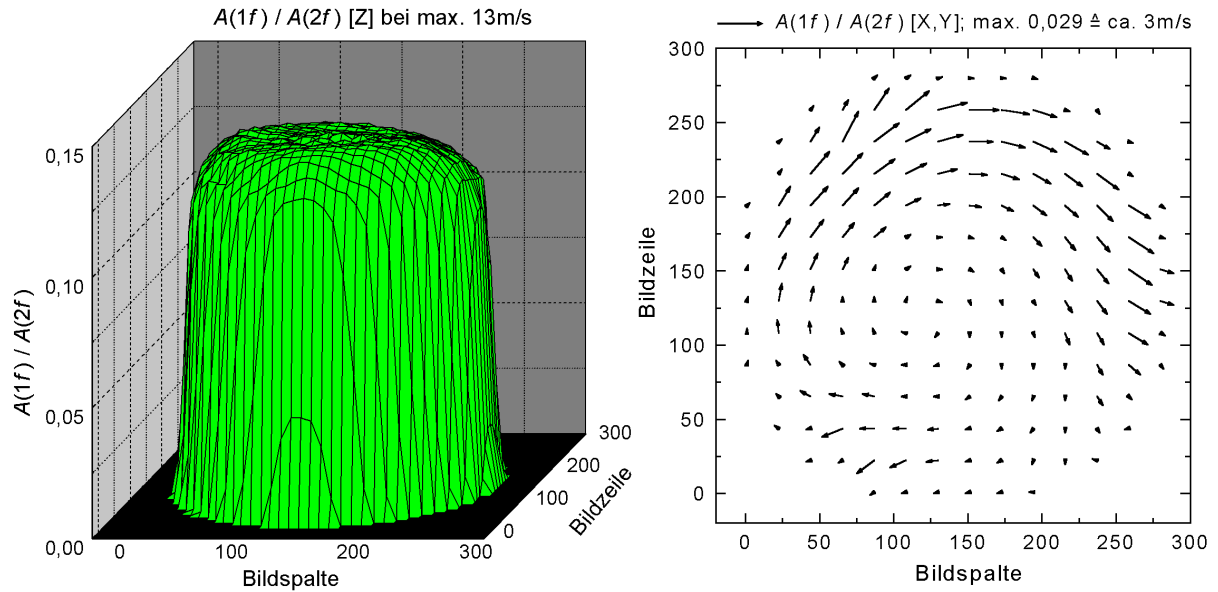


Abb. 5: Messung eines drallbehafteten Rohrströmungsfeldes

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis einer ersten 3-Komponenten-Geschwindigkeitsfeldmessung einer Strömung in einem Rohr mit 20 cm Durchmesser, ca. 4 m hinter einem Doppelkrümmen. Man erhält eine bereits deutlich verbesserte Geschwindigkeitsauflösung gegenüber den bisherigen Messungen mit einem konventionellen 2-Kamera-DGV-System. Im Gegensatz zu vorangegangenen Messungen mit einem konventionelle 2-Kamera-DGV-System lassen sich mit dem neuen FM-FSK-DGV noch Wirbelstrukturen mit Geschwindigkeiten von unter 0,3 m/s auflösen.

Selbstkalibrierende Messverfahren

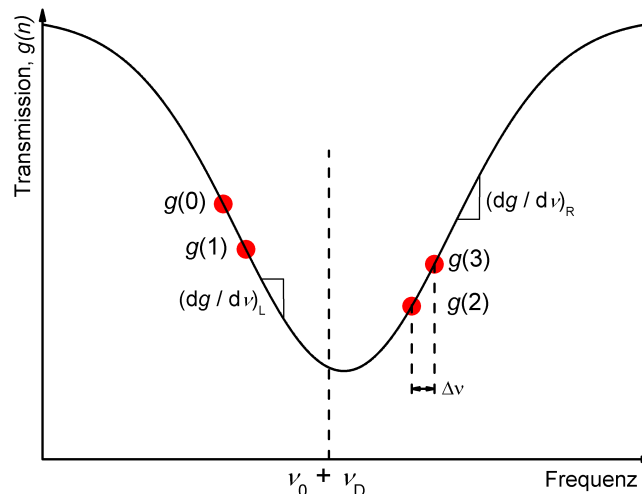


Abb. 6: Spezielle Modulation für selbstkalibrierende Messverfahren

Über eine gleichzeitige Messung von Geschwindigkeitsfeld und Steigung der Absorptionsflanken lässt sich ein selbstkalibrierendes System realisieren, welches nicht nur unabhängig von Fremdlicht und Streulichtleistung, sondern auch unabhängig von der Absorptionslinienform arbeitet. Dieses kann über die Aufnahme von vier Intensitäten bei genau definierten Laserfrequenzen erreicht werden (siehe Abbildung 6).

Durch die Dopplerverschiebung entsteht die Differenz der Intensitäten

$$(g(0) + g(1)) - (g(2) + g(3)) = 2 v_D ((dg/dv)_L - (dg/dv)_R)$$

während die Steigungen gegeben sind durch

$$(dg/dv)_L = (g(1) - g(0)) / \Delta v \quad \text{und} \quad (dg/dv)_R = (g(3) - g(2)) / \Delta v$$

so dass die Dopplerverschiebung bestimmt werden kann aus

$$v_D = 0,5 \Delta v (g(0) + g(1) - g(2) - g(3)) / (-g(0) + g(1) + g(2) - g(3))$$

Voraussetzung für dieses Verfahren ist die Realisierung definierter Frequenzsprünge Δv . Dies lässt sich erreichen, indem ein auf eine Absorptionzelle stabilisierter Laser als absolut-stabile Frequenzreferenz genutzt und der den Lichtschnitt erzeugende Laser mittels Schwebungssignal an den Referenzlaser angebunden wird.

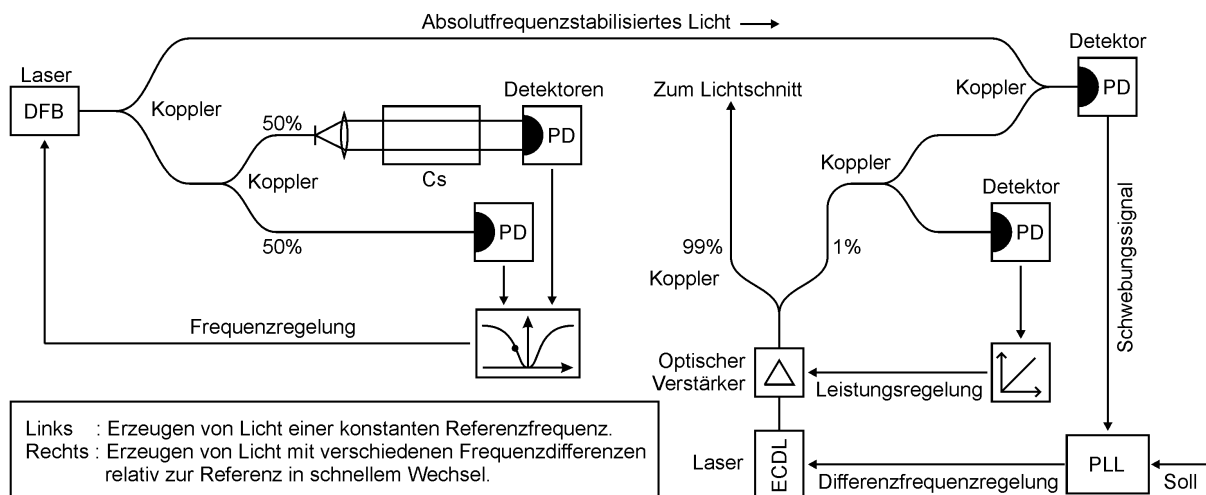


Abb. 7: Regelung mittels Referenzlaser zur Erzeugung definierter Frequenzschritte

Zusammenfassung

Die entscheidenden Vorteile der neuen FM/FSK-DGV-Technik bestehen zum einen in dem Wegfall der bei konventionellen Systemen erforderlichen Referenzkamera und zum andern in der möglichen Selbstkalibrierung des Gesamtsystems. Hierdurch entfällt eine Vielzahl entscheidender Fehlereinflüsse bei der Bildauswertung und der Absorptionzellenkalibrierung, so dass sich die Messunsicherheit deutlich reduzieren lässt. Die bisher erzielten Messergebnisse belegen, dass bei einer Vereinfachung der DGV-Messanordnung bereits ohne implementierte Selbstkalibrierung 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

Eggert, M., Müller, H., Dopheide, D., Czarske, J., 2004: FM-DGV zur Geschwindigkeitsfeldmessung, 12. Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - neuere Entwicklungen und Anwendungen-, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie, Universität Karlsruhe, 7.-9. September 2004, Published by Deutsche Gesellschaft für Laser Anemometrie, ISBN 3-9805613-1-3, Beitrag 10.1-10.6

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.; 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, 11. Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - neuere Entwicklungen und Anwendungen -, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA' 2003), PTB-Braunschweig, 9.-11. September 2003, Fischer Druck, Peine, ISBN 3-00-011903-5, Beitrag 31.1-31.7

Müller, H., Eggert, M., Pape, N., Dopheide, D., Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., 2004: Time resolved DGV based on laser frequency modulation, Conference Proceedings, 12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 9.-11. July 2004 Lisbon, Portugal, Published by CD-ROM, Session 25-2

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