

## UNTERSUCHUNGEN ZUR ZEITAUFLÖSUNG EINES 2D3K- DOPPLER-GLOBAL-ARRAY-VELOZIMETERS MIT LASERFREQUENZMODULATION

### INVESTIGATIONS CONCERNING THE TEMPORAL RESOLUTION OF A 2D3C- DOPPLER-GLOBAL-VELOCIMETER WITH LASER FREQUENCY MODULATION

**Andreas Fischer, Lars Büttner, Jürgen Czarske, Michael Eggert\*,  
Harald Müller\***

Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik  
Professur für Mess- und Prüftechnik, Helmholtzstraße 18, 01069 Dresden  
E-Mail: [fischer@iee.et.tu-dresden.de](mailto:fischer@iee.et.tu-dresden.de), Internet: <http://eeemp1.et.tu-dresden.de/>

\* Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig,  
Fachbereich 1.4 Gase, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Schlagworte: DGV, Frequenzmodulation, Diodenlaser, Turbulenzuntersuchungen  
Key words: [DGV, frequency modulation, diode laser, turbulence analysis](#)

#### Zusammenfassung

Es wird über die Realisierung eines Doppler-Global-Velocimetry-Verfahrens mit Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) berichtet, welches eine mit bis zu 100 kHz frequenzmodulierte DFB-Laserdiode mit 852 nm Emissionswellenlänge, eine Cs-Absorptionszelle als Frequenz-Intensitäts-Umsetzer und ein Array bestehend aus Fasern gekoppelt mit Photodioden zur Signaldetektion einsetzt. Es wird eine Validierung des FM-DGV-Messsystems an einer Düsenströmung vorgestellt (1D- und 2D-Messung). Die minimale Standardabweichung der Geschwindigkeit in Düsenmitte betrug 0,04 m/s. Schwerpunktmäßig wird die mit dem Messsystem erreichbare maximale Zeitauflösung untersucht und mit konventionellen DGV-Techniken verglichen. Im Ergebnis können höhere kontinuierliche Messraten erreicht werden, die identisch der gewählten Modulationsfrequenz sind. Somit ist das Messsystem zur Vermessung instationärer Strömungen, wie beispielsweise den Nachlauf eines angeströmten Zylinderstumpfs, geeignet, wo Messraten von ca. 400 Hz gefordert sind. Durch den Einsatz eines cw-Lasers können Messdaten mit hoher Zeitauflösung zudem kontinuierlich aufgenommen und somit Turbulenzspektren berechnet werden.

#### Einleitung und Stand der Technik bei der konventionellen DGV

Mit der Doppler-Global-Velocimetry (DGV) können Geschwindigkeiten von Strömungen berührungslos, orts- und zeitaufgelöst erfasst werden. Hierfür wird ein schmalbandiger Laser auf die Flanke einer molekularen Absorptionslinie stabilisiert und als Lichtschnitt auf die zu untersuchende Strömung gerichtet. Das aufgrund des Doppler-Effekts in der Frequenz verschobene Streulicht wird durch eine molekulare Absorptionszelle hindurch mit Kameras zweidimensional vermessen (siehe Abb. 1a). Entsprechend der Absorptionslinienflanke werden dabei die geschwindigkeitsbedingten Änderungen der Lichtfrequenz als Änderungen der

## 45.2

Lichtleistung sichtbar (siehe Abb. 1b). Zwecks Normierung wird die Streulichtleistung mittels einer Strahlteilung und einer zweiten sogenannten Referenzkamera erfasst.

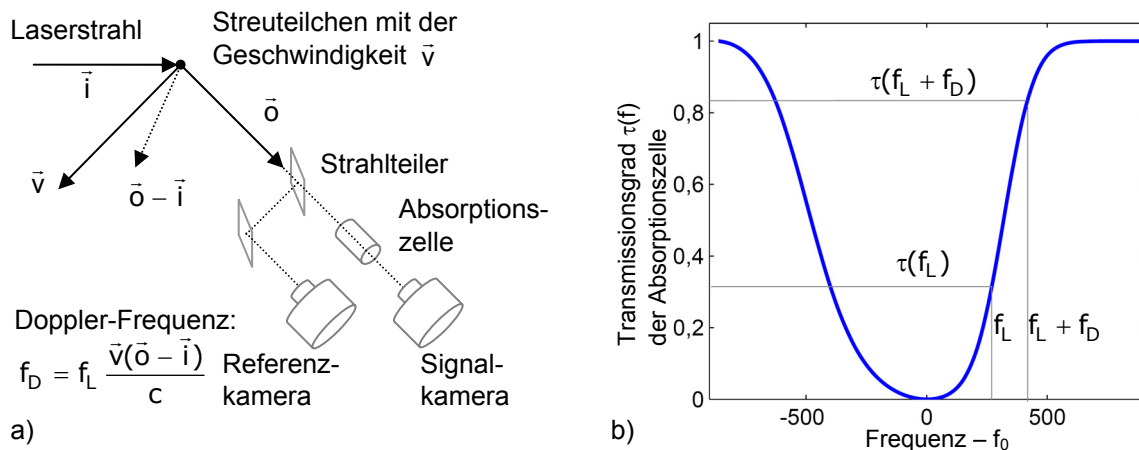


Abb. 1: a) Funktionsprinzip eines Doppler-Global-Velozimeters, b) Cs-Absorptionslinie (gemessen)

Seit Erfindung der Doppler-Global-Velocimetry (Komine et al. 1990) wird die Verwendung zweier verschiedener Lichtquellen verfolgt: ein cw-Laser und ein gepulster Laser. Nutzt man einen cw-Laser, so ist die Strömung zeitkontinuierlich beleuchtet und das Kamerasystem entscheidet wesentlich über die erreichbare Zeitauflösung. Konventionell wurde hier ein Argon-Ionen-Laser mit Ausgangsleistungen von 1 - 2 W eingesetzt, der Licht der Wellenlänge 514,5 nm emittiert und somit auf die Flanke einer Jod-Absorptionslinie eingestellt werden kann. Als Kameras dienen CCD-Kameras, die typische maximale Frameraten von ca. 10 – 20 Hz aufweisen. Die daraus resultierende Messrate ist für die Erfassung von instationären Strömungen meist zu gering. Bei periodischen Strömungen haben Röhle et al. 2001 gezeigt, dass mittels akusto-optischer Modulatoren die Beleuchtung im  $\mu\text{s}$ -Bereich an- und ausgeschaltet werden kann. Durch zusätzliche Triggerung auf ein periodisch wiederkehrendes Strömungsereignis und wiederholte Messungen konnten so Bilder der Strömungsgeschwindigkeiten in einem Abgaskrümmers mit einer Zeitauflösung von 138  $\mu\text{s}$  (Belichtungsdauer) aufgenommen werden, was einer Datenrate von ca. 7,2 kHz entspricht. Da wegen der geringen Belichtungsdauer nur wenig Lichtenergie pro Lichtpuls zur Verfügung stand (0,055 mJ), wurde für einen Auswertzeitpunkt stets über mehrere Lichtpulse integriert. Die Kamerabelichtungszeit für einen Auswertzeitpunkt betrug entsprechend der Periodizität der Strömung 30 s, damit insgesamt ca. 160 mJ Lichtenergie vom Laser ausgesandt wurde.

Höhere Lichtenergien können in kürzeren Zeiten mit einem gepulsten Laser erzielt werden, wobei sich hier ein frequenzverdoppelter Nd:YAG Laser anbietet, da er Licht der Wellenlänge 532 nm emittiert und somit zusammen mit einer Jod-Absorptionszelle für das DGV-Verfahren verwendbar ist. Kendall et al. 2004 und Thorpe et al. 2000 haben ein solches DGV-System für die Strömungsmessung an einem nicht invasiven Impferät vorgestellt. Dabei wurden Lichtpulse der Energie 200 mJ mit einer Breite von 10 ns erzeugt. Da die Pulswiederholrate nur 10 Hz und zudem die Kameraauslesezeit 1 s betrug, musste auch hier eine ständige Wiederholung des Experiments erfolgen. Durch eine Triggerung auf den jeweiligen Start eines Versuchs konnte so wegen den Unsicherheiten bei der Triggerschaltung eine Zeitauflösung von 1  $\mu\text{s}$  erreicht werden.

Um auch für nicht-reproduzierbare Strömungen die Zeitauflösung zu erhöhen sind höhere Pulsrepetitionraten und schnellere Kameras notwendig. So berichten Thurow et al. 2004 von einem DGV-Messsystem mit einem Nd:YAG Laser, der Pulswiederholraten von bis zu

1 MHz gestattet, und mit CCD-Kameras, die mittels der sogenannten Framing-Betriebsart eine endliche Bildsequenz mit maximalen Frameraten von bis zu 1 MHz aufnehmen können. Konkret wurden dort 28 aufeinander folgende Laserpulse der mittleren Lichtenergie 9 mJ und der Dauer 10 ns mit einer Pulsfrequenz von 250 kHz generiert, auf eine Düsenströmung gerichtet und entsprechend der DGV-Technik mit den benannten CCD-Kameras erfasst worden sind.

Im Ergebnis ist somit für nicht periodische bzw. nicht reproduzierbare, instationäre Strömungen eine beachtliche Zeitauflösung demonstriert worden, wobei jedoch nur eine sehr begrenzte Anzahl von Bildern aufgenommen werden konnte. Dies limitiert die Vermessung von turbulenten Strömungen und die Erfassung von Turbulenzspektren, da die gewünschte spektrale Auflösung der Geschwindigkeit eine schnelle und häufige Messung der Strömungsgeschwindigkeit bedarf. Aus diesem Grund nutzte Cavone et al. 2006 keinen gepulsten, sondern einen cw-Argon-Ionen-Laser. Da in diesem Fall die auszuwertende Lichtenergie als sehr gering anzunehmen ist und die Anzahl der Messungen und die Messrate zunächst wesentlich durch die Photodetektionsmethode begrenzt werden, verwendete Cavone et al. Photomultiplier mit einer Bandbreite von 200 MHz, welche mittels eines Integrators auf ca. 67 kHz herabgesetzt wurde. Anstelle der bei DGV möglichen 2D Messung wurde deshalb dort lediglich eine 0D Messung demonstriert. Die verwendete kontinuierliche Messrate lag bei 50 kHz. Es wurde mittels Geschwindigkeitsmessungen an einer Düsenströmung ein validiertes Turbulenzspektrum aufgenommen.

Müller et al. stellte 1999 ein neuartiges DGV-Messverfahren vor. Damit demonstrierte er 2003 die zeitaufgelöste und orts aufgelöste Messung von Geschwindigkeiten an einem Kalibrierobjekt (rotierende Glasscheibe) und einer Düsenströmung mit einer Datenrate von 2,2 Hz. Es soll nun gezeigt werden, dass mit diesem System kontinuierliche Messungen mit signifikant höherer Zeitauflösungen erreichbar sind. Hierfür soll zunächst das Messprinzip dargelegt werden.

### Funktionsprinzip der FM-DGV

Bei der Doppler-Global-Velocimetry mit Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) wird keine Referenzkamera benötigt, weswegen sogenannte Strahlteilungsfehler und Bildausrichtungsfehler, die bei konventionellen System bis zu 7 m/s bzw. 20 m/s betragen können (siehe Morrison et al. 2001 und Charrett et al. 2006), hier nicht auftreten. Tatsächlich konnte bislang bei einem FM-DGV-Messsystem eine minimale Messunsicherheit von 0,02 m/s erzielt werden, was signifikant geringer als die mit optimierten konventionellen Systeme erreichten 0,5 m/s ist (siehe Fischer et al. 2006).

Die prinzipielle Messanordnung eines FM-DGV-Messsystems ist bis auf den nicht mehr benötigten Strahlteiler und die Referenzkamera mit der Abbildung 1a identisch. Im Unterschied zur konventionellen DGV-Technik wird hier die Lichtfrequenz eines cw-Lasers sinusförmig moduliert:

$$f_L(t) = f_c + f_H \sin(2\pi f_m t),$$

mit  $f_c$  als Lasermittenfrequenz,  $f_H$  als Modulationsamplitude und  $f_m$  als Modulationsfrequenz. Die Lasermittenfrequenz  $f_c$  wird dabei stabilisiert, z.B. auf eine Frequenz nahe des Transmissionsminimums der verwendeten Absorptionslinie. Das an der Strömung gestreute und entsprechend der Strömungsgeschwindigkeit in der Frequenz verschobene Licht wird nach der Transmission durch eine Absorptionszelle vermessen. Wegen der Frequenz-Intensitäts-Umsetzung ergibt sich ein amplitudenmoduliertes Detektorsignal. Zur Veranschaulichung

# 45.4

wurde ein solches Signal berechnet und samt Amplitudenspektrum in der Abbildung 2 dargestellt. Die Amplituden der ersten und zweiten Harmonischen  $A_{1fm}$  bzw.  $A_{2fm}$  verändern sich in Abhängigkeit von der Doppler-verschobenen Lasermittenfrequenz (s. Abb. 3a). Die zunächst konstant angenommene Streulichtleistung ist als Faktor in den Amplitudenwerten enthalten und lässt sich durch eine Division eliminieren. Dadurch erhält man den Quotienten  $q = A_{1fm} / A_{2fm}$  als geschwindigkeitsabhängige Messgröße (s. Abb. 3b). Die Verwendung eines Referenzdetektors zur Messung der Streulichtleistung ist hierbei nicht notwendig. Der nutzbare Messbereich (s. Abb. 3b) überstreicht ca. 700 MHz, was z.B. bei 852 nm Wellenlänge und senkrechter Anordnung von Lichteinfall- und Beobachtungsrichtung einem Geschwindigkeitsintervall von 420 m/s Breite entspricht.

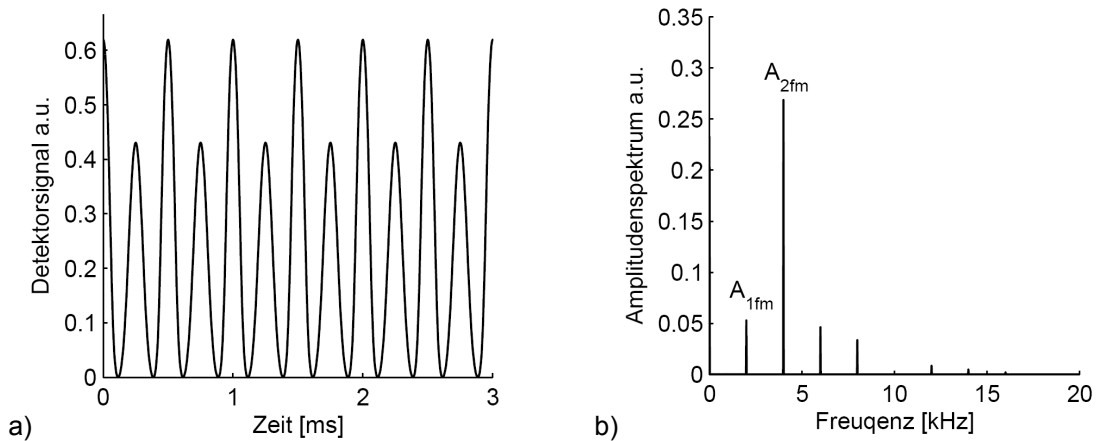


Abb. 2: a) berechnetes Detektorsignal bei Laserfrequenzmodulation und b) dessen Amplitudenspektrum (2 kHz Modulationsfrequenz, 400 MHz Modulationsamplitude, -50 MHz Lasermittenfrequenz bezogen auf die Frequenz des Transmissionminimums, Absorptionslinie gemäß Bild 1b)

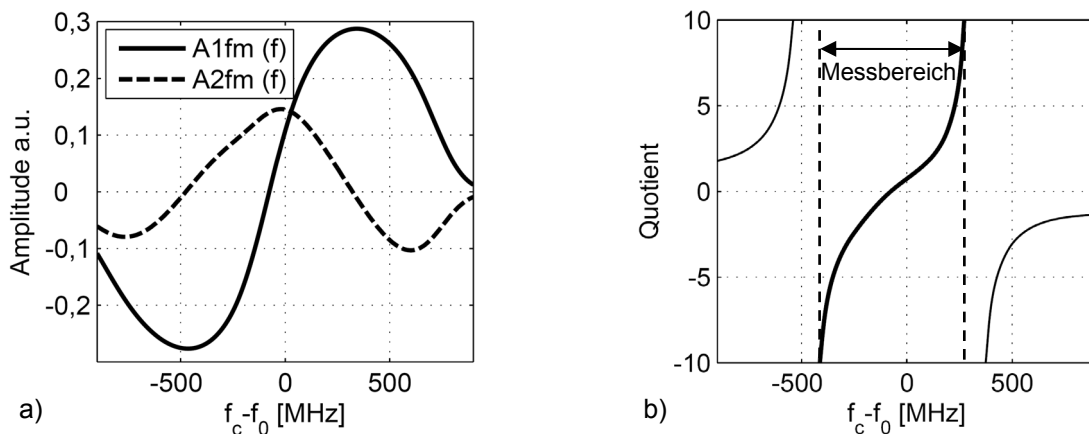


Abb. 3: a) berechnete Amplituden der ersten und zweiten Harmonischen, b) Quotient  $A_{1fm}(f) / A_{2fm}(f)$  ( $f_c$  Lasermittenfrequenz, 400 MHz Modulationsamplitude, Absorptionslinie gemäß Bild 1b)

## Vorüberlegung zur prinzipiell erreichbaren Zeitauflösung bei FM-DGV

Die Signalauswertung bei dem FM-DGV-Verfahren beruht auf einer Schätzung der Amplituden  $A_{1fm}$  und  $A_{2fm}$  der Grund- und Oberwelle des Detektorsignals. Da zur Fourier-Analyse einer harmonischen Funktion zumindest eine Signalperiode vorliegen muss, beträgt die im Prinzip erreichbare höchste Zeitauflösung eine Modulationsperiode  $1/f_m$ . Für hohe Messraten ist demnach aus Gründen der Signalverarbeitung eine hohe Modulationsfrequenz notwendig.

Technisch lassen sich durch Strommodulation von Diodenlasern Modulationsfrequenzen von bis zu einigen GHz mit hinreichend großen Modulationsamplituden von ca. 400 MHz erzielen. Somit verbleibt die Frage einer geeigneten Photodetektion, die Bandbreiten im kHz- bis MHz-Bereich haben. Übliche CCD-Kameras sind hierfür mit typischen Frameraten von 10-20 Hz zu langsam. Es existieren aber auch Kameras mit sogenannter Framing-Betriebsart, die z.B. eine Zeile mit 1024 Bildpunkten mit einer Linienrate von 1 MHz aufnehmen können. Hierbei ist jedoch die max. Anzahl der sequentiell aufnehmbaren Zeilen mit 1000 sehr begrenzt. CMOS Kameras bieten hingegen Frameraten von bis zu wenigen 100 kHz, sind allerdings bislang hinsichtlich des SNR wissenschaftlichen CCD-Kameras unterlegen. Alternativ soll hier Photodiodenarray eingesetzt werden, so dass kontinuierlich gemessen werden kann. Dies erleichtert zudem eine effiziente Faserkopplung, so dass durch Anordnung der Faserenden die Messpunkte entsprechend der Messaufgabe flexibel angeordnet werden können, beispielsweise als lineares oder 2D-Array.

Als Einzelelemente wurden Lawinenphotodioden mit Bandbreiten von ca. 400 kHz ausgewählt, die ein im Vergleich zu PIN-Photodioden besseres SNR bei geringen Lichtleistungen und eine höhere Empfindlichkeit bei vergleichbarer Bandbreite haben. Mit kommerziellen Photomultipliern könnte zwar ein ggf. noch besseres SNR erreicht werden, allerdings besitzen sie bei der hier verwendeten Wellenlänge von 852 nm keine optimale Empfindlichkeit und sind zudem sehr teuer im Vergleich zu Lawinen-Photodioden, was einen Array-Aufbau erschwert.

### Experimenteller Aufbau

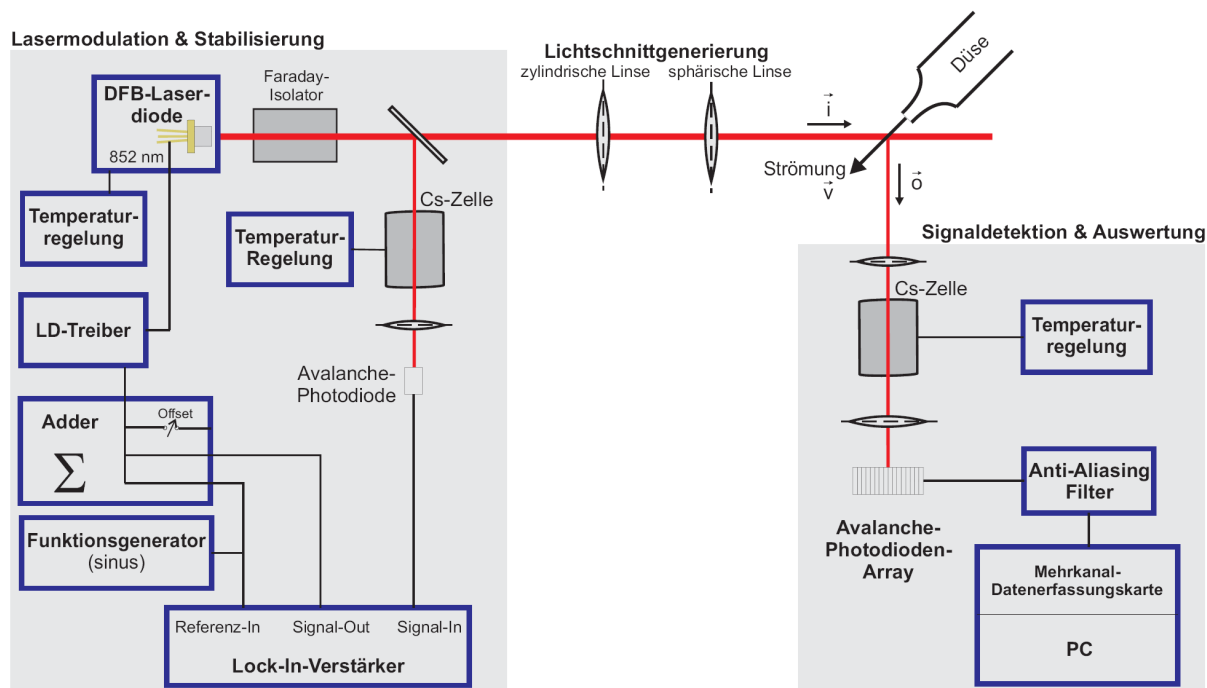


Abb. 4: schematischer Aufbau eines FM-DGV-Messsystems

Der experimentelle Aufbau ist schematisch im Bild 4 gegeben. Als sinusförmig frequenzmodulierte Laserquelle dient eine DFB-Laserdiode, die Licht der Wellenlänge 852 nm emittiert. Die Strommodulation der Laserdiode gestattet Modulationsfrequenzen von bis zu einigen MHz. Zwecks Stabilisierung der Lasermittenfrequenz wird ein Teil des Lichts durch eine mit Cäsium gefüllte Absorptionszelle geführt und mit einer Lawinen-Photodiode gemessen. Ein

Lock-In-Verstärker ermittelt die erste Harmonische des empfangenen Signals und ermöglicht so eine Rückführung der Lasermittelfrequenz im Sinne eines geschlossenen Regelkreises (vgl. Bild 3). Die Bandbreite des Lock-In-Verstärkers beträgt 120 kHz, weswegen die Modulationsfrequenz gegenwärtig nicht größer als 120 kHz gewählt werden kann. Der Lichtschnitt wird hier mit einer zylindrischen und sphärischen Linse erzeugt und ist auf die zu untersuchende Strömung, hier eine Düsenströmung, gerichtet. An in der Strömung befindlichen Teilchen gestreutes Licht gelangt durch eine zweite Absorptionszelle zu einem Lawinen-Photodioden-Array. Zur Erprobung des Systems wurde zunächst eine einzelne Lawinen-Photodiode verwendet. Die Grenzfrequenz dieser Photodiode wurde mittels eines Tiefpass zweiter Ordnung auf ca. 240 kHz begrenzt. Ein fasergekoppeltes Photodiodenarray, womit 1D und 2D Anordnungen möglich sind, befindet sich gegenwärtig im Aufbau. Die gemessenen Intensitätssignale gelangen mittels einer Mehrkanal-Messkarte in den Speicher eines handelsüblichen PCs und werden dort mit Matlab weiter verarbeitet.

### Validierung des FM-DGV-Messsystem

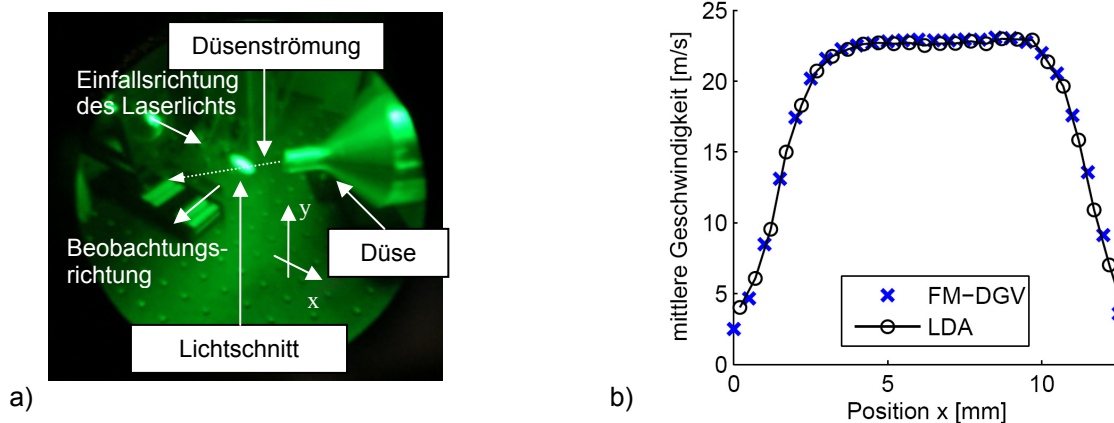


Abb. 5: a) Messanordnung an Düse, b) gemessenes Geschwindigkeitsprofil einer Düsenströmung (Modulationsfrequenz  $f_m = 80$  kHz)

Nach einer Kalibrierung des FM-DGV-Systems durch Messungen an einer rotierenden Glasscheibe (s. Fischer et al. 2006) wurde das Geschwindigkeitsprofil einer Düsenströmung gemessen und mit LDA-Messungen verglichen. Der Messaufbau ist im Bild 5a dargestellt. Der Düsendurchmesser betrug 1 cm. Gemessen wurde ca. 2 cm vor dem Düsenaustritt, wobei im Abstand von 500  $\mu\text{m}$  radial mit einer Abtastrate von 1 MHz 16000 Abtastwerte aufgenommen und daraus jeweils die Amplitudenwerte und somit ein Geschwindigkeitswert ermittelt wurde. Die Messung ist für statistische Zwecke 25 mal wiederholt worden. Die Mittelwerte der Geschwindigkeit sind in der Abbildung 5b dargestellt. Darin sind ebenso die LDA Vergleichsdaten aufgetragen, die qualitativ sehr gut mit den FM-DGV-Messdaten übereinstimmen. Nimmt man die Randpunkte aus, so sind die betragsmäßigen Abweichungen zwischen beiden Messungen  $< 0,4$  m/s. Der Fehler ist vermutlich i.W. darauf zurückzuführen, dass die Strömung instationär ist. Dies wirkt sich deshalb aus, weil LDA- und DGV-Messungen unterschiedliches Seeding benötigen und somit nicht zeitparallel aufgenommen werden konnten. Bei Kalibriermessungen an einer rotierenden Glasscheibe wurden Messunsicherheiten von bis zu 0,02 m/s erreicht.

Bei einer zweiten Messung wurde mit Verfahrenstechniken das komplette Geschwindigkeitsfeld der Düsenströmung vermessen. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 6 dargestellt. Das gemessene Geschwindigkeitsfeld stimmt gut mit dem zu erwartenden symmetrischen Profil überein: In der Düsenmitte ist die Strömungsgeschwindigkeit in etwa konstant. An den

Rändern der Strömung nimmt die Geschwindigkeit in radialer Richtung ab. Die minimale Standardabweichung der Geschwindigkeit betrug in der Düsenmitte 0,04 m/s.

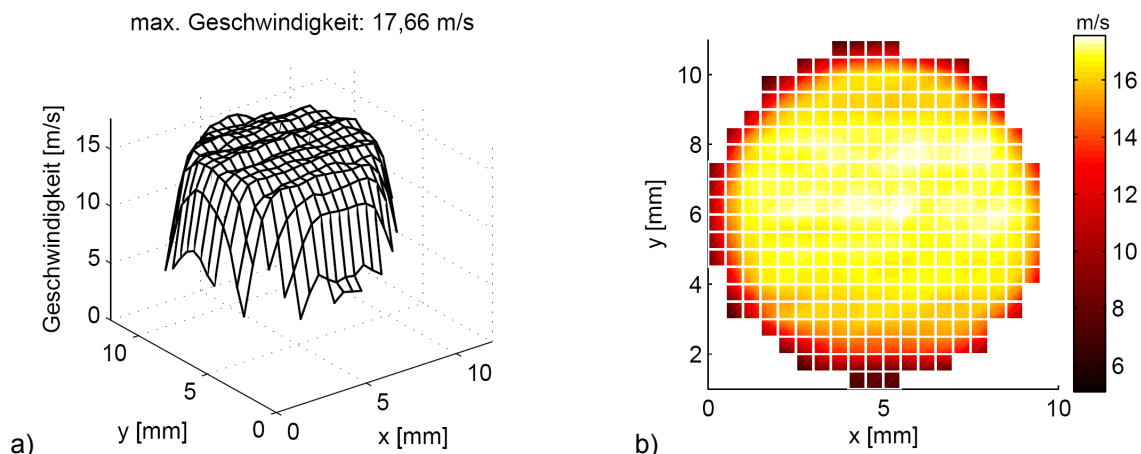


Abb. 6: a) Messanordnung an Düse, b) gemessenes Geschwindigkeitsprofil einer Düsenströmung (Modulationsfrequenz  $f_m = 80$  kHz)

### Zusammenhang zwischen Zeitauflösung und Messunsicherheit

Zur Untersuchung der erreichbaren Zeitauflösung wurde hier zunächst eine Offline-Auswertung für einen Messpunkt angewendet, wobei mit verschiedenen Modulationsfrequenzen experimentiert wurde. Für die Schätzung der Amplituden, d.h. zwecks Berechnung der entsprechenden Fourier-Koeffizienten, sind jeweils unterschiedlich lange Signalabschnitte des gleichen Signals verwendet worden. Im vorliegenden Fall bestand ein Signal aus 400 000 Abtastwerten, die mit einer Abtastrate von 1 MHz erfasst wurden. Zur Signalauswertung wurden Signalabschnitte mit 10 – 20 000 Abtastwerten getestet. Die unterschiedlichen Standardabweichungen der Geschwindigkeit sind in der Abbildung 7 über der jeweils gewählten Messdauer aufgetragen. Erwartungsgemäß nimmt die Messunsicherheit generell mit zunehmender Messdauer ab. Zum Vergleich ist jeweils die für die verschiedenen Modulationsfrequenzen gefittete Funktion  $k / \sqrt{N}$  eingezeichnet, wobei  $N$  die Anzahl der zur Auswertung verwendeten Abtastwerte ist und  $k$  einen anhand der Messdaten angepassten Parameter darstellt. Die gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Werten und der Berechnung zeigt, dass in erster Näherung die zufälligen Fehler dominieren und somit vermutlich das durch die Photodetektion vorhandene Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) die Messunsicherheit im Zusammenhang mit einer möglichst hohen Zeitauflösung limitiert.

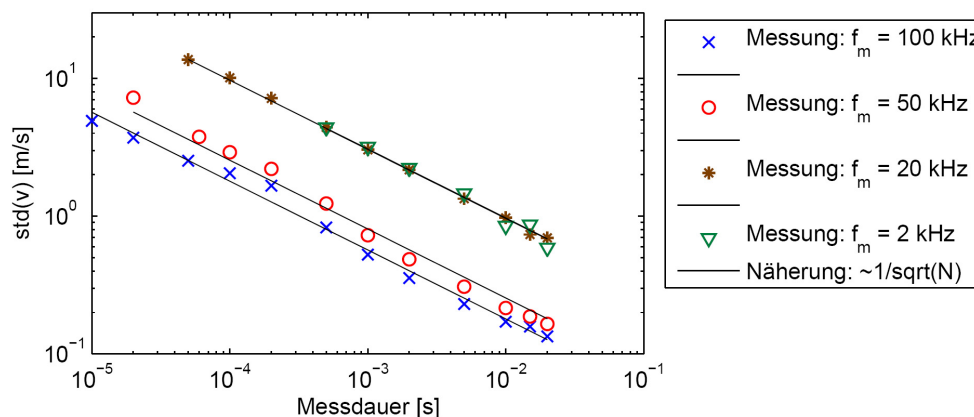


Abb. 7: Zusammenhang zwischen Zeitauflösung und Messunsicherheit in der Düsenmitte für verschiedene Modulationsfrequenzen  $f_m$

Das SNR kann durch optimierte Verstärkerschaltungen der Photodiodensignale verbessert werden, die sich momentan im Aufbau befinden. Messungen an einem ersten Prototyp ergaben eine um den Faktor 4 geringere Messunsicherheit bei gleicher Signalleistung.

Zudem kann der Abbildung 7 entnommen werden, dass die Messunsicherheit mit steigender Modulationsfrequenz abnimmt. Dies ist eine Folge des Einfluss von Streulichtleistungsschwankungen ist, worauf in Fischer et al. 2007 näher eingegangen wird. Im Ergebnis ist eine schnelle Modulation zum Erreichen einer hohen Zeitauflösung und zur Minimierung der Messunsicherheit von Vorteil.

## **Zusammenfassung**

Es wurde ein neuartiges DGV-Verfahren mit Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) vorgestellt, womit instationäre komplexe Strömungen hinsichtlich der Geschwindigkeit vermessen werden können. Da im Unterschied zum konventionellen DGV-Verfahren keine Referenzkamera benötigt wird, entfallen mehrere Fehlerquellen wie beispielsweise Bildausrichtungsfehler und Strahlteilungsfehler, die bis zu 20 m/s betragen können. Minimal wurde beim FM-DGV mit optimierten Parametern eine Standardabweichung der Geschwindigkeit von 0,02 m/s an einer rotierenden Glasscheibe gemessen. Zudem wird hier anstelle der konventionell benutzten Kameras ein fasergekoppeltes 2D-Photodiodenarray konzipiert, die kontinuierliche Geschwindigkeitsmessungen mit hoher Zeitauflösung ermöglichen.

Die Vermessung des radialen Geschwindigkeitsprofils einer Düsenströmung mit der FM-DGV hat gezeigt, dass die Messergebnisse qualitativ und quantitativ mit LDA-Messungen übereinstimmen. Zudem wurde eine 2D-Messung der Düsenströmung durchgeführt, die das erwartete „Top-Hat“-Geschwindigkeitsfeld lieferte. Die minimal erreichte Standardabweichung war dabei in der Düsenmitte ca. 0,04 m/s bei einer Zeitauflösung von 16 ms.

Prinzipiell ist die erreichbare Messrate identisch mit der gewählten Modulationsfrequenz. Bei den hier vorgestellten Messanordnungen wurde zunächst mit Modulationsfrequenzen von bis zu 100 kHz experimentiert, die bei Bedarf auch bis in den MHz-Bereich erhöht werden kann. Eine Parameterstudie hat gezeigt, dass zunächst offline-Messraten von bis 100 kHz möglich sind. Damit können zukünftig turbulente Strömungen vermessen werden, wie beispielsweise im Nachlauf eines angeströmten Zylinderstumpfs.

Mit steigender Messrate nimmt die Unsicherheit zu, da die zu Auswertung verfügbare Signalenergie abnimmt. Die offline-Auswertung ergab, dass die Messunsicherheit in erster Näherung direkt proportional zur Wurzel der Messrate ansteigt, was auf weißes Rauschen als Primärsache schließen lässt. Als Konsequenz wurden neue Lawinen-Photodioden entwickelt, die eine angepasste Bandbreite und optimierte Rauschspannungen besitzen. Derzeit wird ein fasergekoppeltes Lawinenphotodioden-Array aufgebaut, womit zukünftig 2d3k-Geschwindigkeitsmessungen in instationären Strömungen ermöglicht werden.

## **Dankesworte**

Die Autoren danken Herrn Jörg König für tatkräftige Unterstützung bei der Entwicklung der Photodetektorschaltung, Herrn Dipl.-Ing. Carsten Klauke und M.Sc. Katsuaki Shirai für die Begleitung der LDA-Messungen sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projektes "Einsatz neuartiger Doppler-Global-Velozimeter (DGV) zur Analyse komplexer Strömungen" (Förderkennzeichen CZ 55/16-2).



## Literatur

Cavone, A. A., Meyers, J. F., Lee, J. W., 2006 "Development of Point Doppler Velocimetry for Flow Field Investigations" 13<sup>th</sup> Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, Nr. 21.2

Eggert, M., Müller, H., Dopheide, D., Czarske, J., 2004: "FM-DGV zur Geschwindigkeitsfeldmessung", Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 12. Fachtagung, Tagungsband, Beitrag 10.1-10.6, veröffentlicht von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie, ISBN 3-9805613-1-3

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Müller, H., Eggert, M., 2007: "Investigation of time-resolved single Doppler global velocimetry using sinusoidal laser frequency modulation", im Druck bei Meas Sci Technol

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Müller, H., Eggert, M., 2006: "Doppler-Global-Velocimeter mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation zur präzisen Messung von Geschwindigkeitsprofilen", tm Technisches Messen, Vol. 73, S. 237-244, Oldenburg Verlag, München

Kendall, M. A. F., Quinlan, N. J., Thorpe, S. J., Ainsworth, R. W., Bellhouse, B. J., 2004 "Measurements of the gas and particle flow within a converging-diverging nozzle for high speed powdered vaccine and drug delivery", Experiments in Fluids, Vol. 37, S. 128-136

Komine, H., 1990: "System for measuring velocity field of fluid flow utilizing a laser-doppler spectral image converter", US Patent 4 919 536

McKenzie, R. L., 1996: "Measurement capabilities of planar Doppler velocimetry using pulsed lasers", Appl. Optics, Vol. 35, Nr. 6, S. 948-964

Meyers, J. F., Lee, J. W., Schwartz, R. J., 2001: "Characterization of measurement error sources in Doppler global velocimetry", Meas. Sci. Technol., Vol. 12, S. 357-368

Morrison, G. L., Gaharan, C. A., 2001: "Uncertainty estimates in DGV systems due to pixel location and velocity gradients", Meas. Sci. Technol., Vol. 12, S. 369-377

Müller, H., Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., Dopheide, D., 2003: "DGV-Photodioden-Array-Sensor mit Nutzung einer Laserfrequenzmodulation zur Vermessung von instationären Strömungsfeldern", Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 11. Fachtagung, Beitrag 31.1-31.7, Tagungsband, Fischer Druck, ISBN 3-00-011903-5

Müller, H., Lehmacher, Th., Grosche, G., 1999: "Profile sensor based on Doppler Global Velocimetry", Laser Advanced and Applications, Tagungsband, Rom, S. 475-482

Röhle, I., Willert, C. E., 2001: "Extension of Doppler global velocimetry to periodic flows", Meas Sci Technol, Vol. 12, S. 420 - 431

Thorpe, S. J., Quinlan, N., Ainsworth, R. W., 2000 "The characterisation and application of a pulsed neodymium YAG laser DGV system to a time-varying high-speed flow", Optics & Laser, Vol. 32, S. 543-555

Thurow, B., Jiang, N., Lempert, W., Samimy, M., 2004: "MHz Rate Planar Doppler Velocimeter In Supersonic Jets", 42<sup>nd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, Nr. AIAA 2004-0023