

## **MESSUNG VON GESCHWINDIGKEITSSPEKTREN MIT EINEM 2D3K-DOPPLER-GLOBAL-ARRAY-VELOZIMETER MIT LASERFREQUENZMODULATION**

### **MEASUREMENTS OF VELOCITY SPECTRA USING A 2D3C-DOPPLER-GLOBAL-ARRAY-VELOCIMETER WITH LASER FREQUENCY MODULATION**

**Andreas Fischer, Jörg König, 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: andreas.fischer2@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](#)

#### **Kurzfassung**

Es wird über den aktuellen Entwicklungsstand eines FM-DGV-Messsystems berichtet, welches eine mit 100 kHz frequenzmodulierte DFB-Laserdiode mit 852 nm Emissionswellenlänge, eine Cs-Absorptionszelle als Frequenz-Intensitäts-Umsetzer und ein Array bestehend aus 25 Fasern gekoppelt mit Avalanche-Photodioden zur Signaldetektion einsetzt. Durch die Signalauswertung im Frequenzbereich kann auf die bei konventionellen DGV-Techniken notwendige Referenzdetektoreinheit verzichtet werden, so dass Störungen wie beispielsweise Bildausrichtungsfehler entfallen. Durch die Optimierung der Detektoren konnte die bisherige Messunsicherheit um den Faktor 7 reduziert werden. Der Zusammenhang zwischen der statistischen Messunsicherheit und der gewünschten Zeitauflösung von bis zu 10  $\mu$ s wurde experimentell zu 0,012 m/s geteilt durch die Streulichtleistung in nW mal Quadratwurzel der Zeitauflösung in s bestimmt und analytisch bestätigt. Im Windkanal wurden mehrkanalig Geschwindigkeitsspektren einer turbulenten Strömung gemessen und mit Hitzdrahtmessungen erfolgreich validiert.

#### **Einleitung**

Zur Charakterisierung von Strömungen, wie beispielsweise im Einlauf von Turbomaschinen, sind orts aufgelöste Strömungsmessungen von Geschwindigkeitsspektren notwendig. Die Erfassung von Geschwindigkeitsspektren setzt eine hohe Zeitauflösung des Messgeräts voraus, weswegen häufig Hitzdrahtsonden eingesetzt werden. Damit können Messraten bis zu wenigen 100 kHz erreicht werden, siehe Watmuff 1995, wobei die Messung jedoch invasiv und nur punktförmig erfolgt. Typische Unsicherheiten sind dabei ca. 2%, s. Huffman 1980. Mit einem Laser Doppler Anemometer (LDA) sind hingegen Unsicherheiten von etwa 0,5 % möglich. Allerdings ist dies ebenfalls eine Punktmesstechnik und die Messwerte sind auf-

grund der statistisch verteilten Ankunftszeit der Tracer zeitlich nicht äquidistant, was eine Berechnung von Geschwindigkeitsspektren erschwert. Mit Time Resolved Particle Image Velocimetry (TR-PIV) sind örtlich aufgelöste Messungen mit Messunsicherheiten von ca. 3 %, siehe Megerle et al. 2002, und mit CMOS-Kameras Messraten von einigen kHz möglich. Allerdings müssen hierfür die Tracer optisch aufgelöst werden. Dies ist z.B. bei Messungen in Verbrennungsmotoren oder Turbomaschinen nicht generell der Fall, weswegen dann die Doppler-Global-Velozimetrie (DGV) oft zum Einsatz kommt. Eine optische Auflösung einzelner Tracer ist dabei nicht notwendig. Die DGV-Technik gestattet flächige Geschwindigkeitsmessungen, deren Messrate aufgrund des geringen Streulichts und des üblichen Einsatzes von CCD-Kameras nur wenige Hz beträgt. Cavone et al. hat im Jahr 2006 die Kameras durch Photomultiplier ersetzt, wodurch zwar konstante Messraten von 50 kHz erzielt wurden, jedoch wiederum nur eine Punktmessung vorlag.

In diesem Beitrag wird ein DGV-Messsystem mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) vorgestellt, wobei die Verwendung eines fasergekoppelten Avalanche-Photodiodenarrays sowohl eine Bildgebung von 25 Messpunkten als auch eine hohe Zeitauflösung von bis zu 100 kHz für die Aufnahme von Geschwindigkeitsspektren gestattet. Durch die Nutzung der Laserfrequenzmodulation entfallen zudem Referenzkamera und Strahlteiler der konventionellen DGV-Technik, die zu Messabweichungen von bis zu 20 m/s führen können, siehe Morrison et al. 2001. Zunächst wird das FM-DGV-Messprinzip und der experimentelle Aufbau beschrieben. Anschließend folgt eine Darstellung der Orts- und Zeitauflösung des Messsystems. Es wird insbesondere auf die Möglichkeit zur Echtzeitsignalverarbeitung hingewiesen. Der Zusammenhang zwischen der Zeitauflösung, der Ortsauflösung und der erreichbaren Messunsicherheit wird danach diskutiert. Abschließend wird die mehrkanalige Messung von Geschwindigkeitsspektren eines Windkanalexperiments vorgestellt und mit Hitzdrahtmessungen verglichen.

### FM-DGV Messprinzip

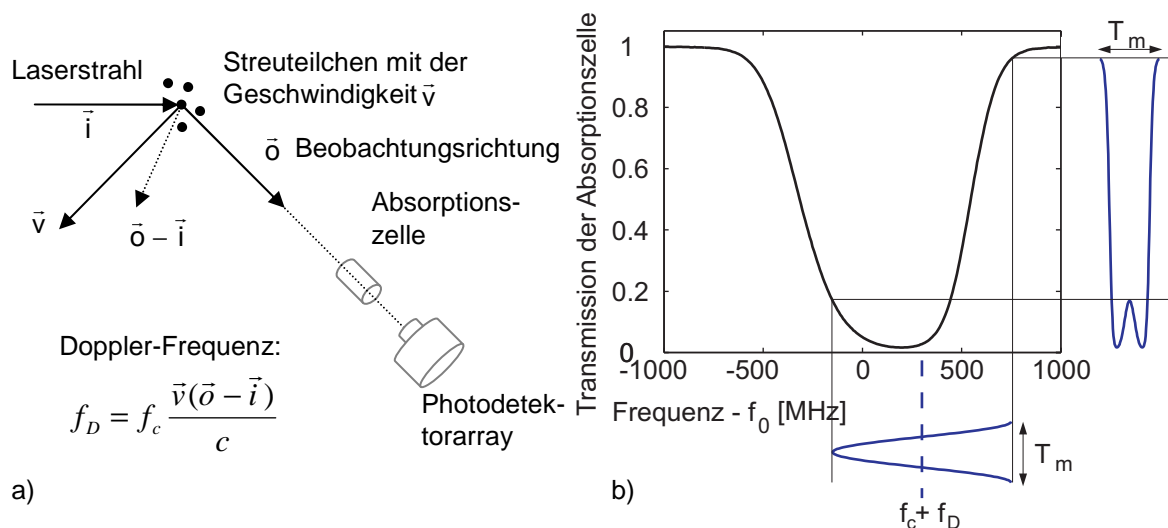


Abb. 1: a) Funktionsprinzip eines Doppler-Global-Velozimeters mit Laserfrequenzmodulation, b) Skizzierung der Frequenzmodulation an einer gemessenen Cs-Absorptionslinie ( $f_0 = 351,7217$  THz,  $f_c$  Lasermittelfrequenz)

Das Funktionsprinzip eines Doppler-Global-Velozimeters mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) ist ausführlich in Fischer et al. 2007 beschrieben worden. Es soll hier das Messprinzip nur kurz umrissen werden. Ziel ist die vektorielle Messung von Geschwindigkeiten in einer Strömungsebene (2D3k). Hierfür beleuchtet man die Strömung mit einem Lichtschnitt. Das an Partikeln gestreute Laserlicht ist in Abhängigkeit von der Richtung des

einfallenden Laserlichts und der Beobachtungsrichtung sowie von der Strömungsgeschwindigkeit gemäß dem Doppler-Effekt in seiner Frequenz verschoben (s. Abb. 1a). Da hier eine sinusförmige Frequenzmodulation angewandt wird, ergibt sich eine geschwindigkeitsabhängige Verschiebung der Lasermittenfrequenz, die nun flächig auszuwerten ist. Dazu misst man mit einem Detektorarray das gestreute Licht, welches zuvor eine molekulare Absorptionzelle passiert hat. Da der schmalbandige Laser bei einer Absorptionslinie des Absorbergases betrieben wird, führt die Frequenzmodulation zu einer Lichtintensitätsmodulation in Abhängigkeit der Lasermittenfrequenz (s. Abb. 1b). So kann durch pixelweise Berechnung der Amplituden  $A_1$ ,  $A_2$  der ersten und zweiten Harmonischen der Detektorsignale in bestimmten Eineindeutigkeitsbereichen jeweils auf die Lasermittenfrequenz geschlossen werden (s. Abb. 2a). Da beide Amplitudenwerte direkt proportional zur mittleren Streulichtleistung sind, wird letztlich deren Quotient

$$q = A_1 / A_2 \quad (1)$$

als Messgröße verwendet. Er ist unabhängig von der mittleren Streulichtleistung. Da entsprechend der gewählten Lasereinfalls- und Beobachtungsrichtung nur eine Komponente der Geschwindigkeit erfasst wird, sind für dreikomponentige Geschwindigkeitsmessungen drei beispielsweise sequentiell betriebene Beobachtungsrichtungen notwendig (s. Abb. 3).

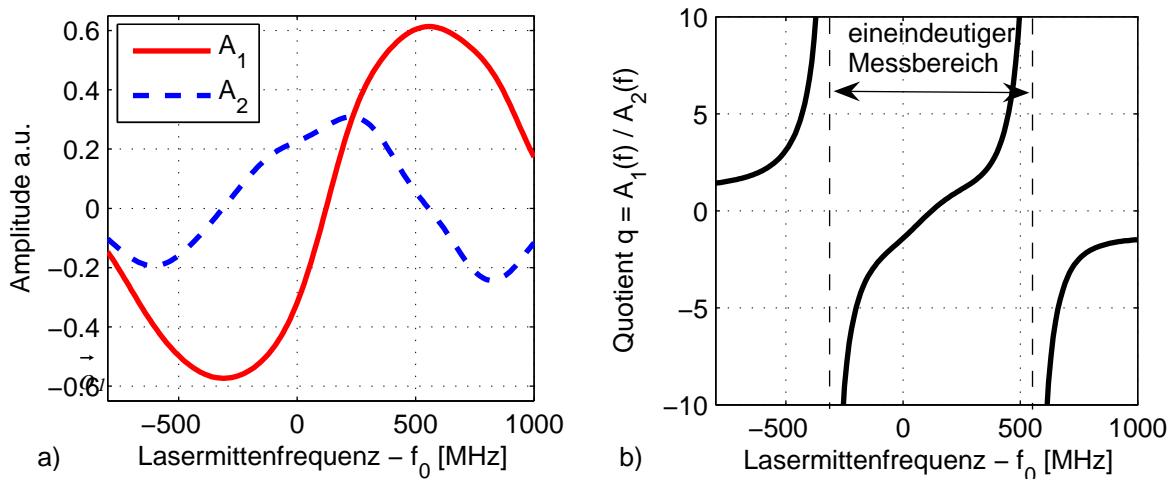
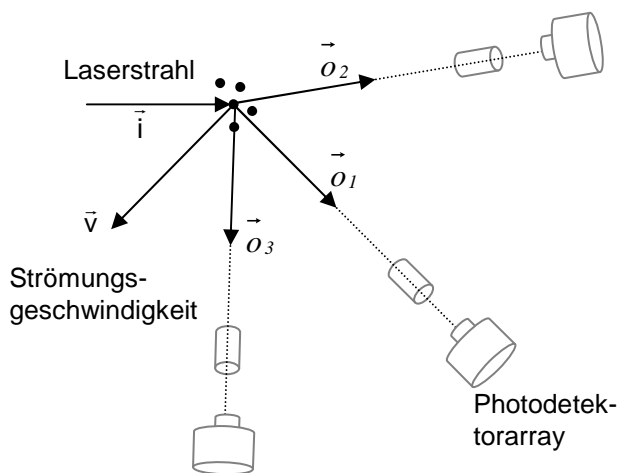


Abb. 2: a) berechnete Amplituden der ersten und zweiten Harmonischen, b) Quotient  $A_1(f) / A_2(f)$  (400 MHz Modulationsamplitude, Absorptionslinie gemäß Bild 1b)



Doppler-Frequenzen:

$$f_{D,1} = f_c \frac{\vec{v}(\vec{o}_1 - \vec{i})}{c}$$

$$f_{D,2} = f_c \frac{\vec{v}(\vec{o}_2 - \vec{i})}{c}$$

$$f_{D,3} = f_c \frac{\vec{v}(\vec{o}_3 - \vec{i})}{c}$$

Abb. 3: dreikomponentige Geschwindigkeitsmessung mit z.B. sequentieller Photodetektion aus 3 räumlich verschiedenen Beobachtungsrichtungen

## Experimenteller Aufbau

Als kompakte und frequenzmodulierbare Laserquelle wird gegenwärtig ein DFB-Diodenlaser der Wellenlänge 852,3 nm eingesetzt. Die Modulationsfrequenz beträgt 100 kHz. Die im Messvolumen vorhandene Lichtleistung beträgt ca. 80 mW. Die Linienbreite des Lasers wurde zu  $< 2,4$  MHz vermessen und ist somit im Vergleich zur Breite des Transmissionsprofils der Absorptionszelle von ca. 850 MHz vernachlässigbar klein. Damit ist gewährleistet, dass mit diesem Laser die Transmissionskennlinie spektral aufgelöst werden kann. Die Laserdiode wird durch Änderung des Diodenstroms frequenzmoduliert. Die Lasermittenfrequenz wird mit Hilfe einer Referenzabsorptionszelle auf den Arbeitspunkt, den Quotienten  $q = 0,1$ , stabilisiert und kann für die nachfolgenden Betrachtungen als konstant angenommen werden. Für eine Beschreibung der Regelung sei auf die Publikation von Fischer et al. 2007 verwiesen.

Mittels einer zylindrischen und sphärischen Linse wird ein Lichtschnitt erzeugt, dessen Höhe ca. 7 mm und Dicke ca. 800  $\mu\text{m}$  beträgt. Wie später noch gezeigt, wurden häufig auch Lichtschnitthöhen von 1 mm angewandt, wenn nur eine 1D Messung angestrebt wurde. Die mittlere Streulichtleistung pro Bildpunkt ist unabhängig von der Lichtschnittdicke, da mit einem schmaleren Lichtschnitt zwar die Anzahl der beleuchteten und somit streuenden Partikel abnimmt, die Laserintensität jedoch gleichzeitig zunimmt. Allerdings ergeben sich mit einer höheren Anzahl von beleuchteten Partikeln geringere Streulichtleistungsschwankungen, so dass geringere Messunsicherheiten erreicht werden können, s. Fischer et al. 2007. Da mit zunehmender Lichtschnittdicke zugleich die örtliche Auflösung entlang der optischen Achse abnimmt, wurde als Kompromiss obiger Wert gewählt.

Als Streupartikel werden die mit einem Partikelgenerator (Laskin-Düsen) aus Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) erzeugten Teilchen verwendet. Sie haben im Mittel einen Durchmesser von 1  $\mu\text{m}$ . Auf die Seedingkonzentration wird später noch eingegangen.

Als Absorbergas in der Absorptionszelle wird Cäsiumgas verwendet, da es bei der eingesetzten Laserwellenlänge eine für das Messprinzip notwendige Absorptionslinie aufweist (s. Abb. 1b). Die Absorptionszelle ist ca. 5 cm lang und hat einen Durchmesser von 2,5 cm. Der Kühlfinger der Zelle und der restliche Zellkörper sind jeweils temperaturstabilisiert. Die Kühlfingertemperatur beträgt 25°C, die Gastemperatur 45 °C. Die Temperaturschwankungen über 1 h weisen bei konstanter Umgebungstemperatur eine Standardabweichung von ca. 4 mK auf, was einer vernachlässigbaren Geschwindigkeitsstandardunsicherheit von 0,5 cm/s entspricht, siehe Fischer et al. 2007. Die Zellenfenster sind keilförmig und in einem Winkel von ca. 2° angebracht, um störende Resonatoreffekte zu vermeiden.

Mit einem Kepler-Teleskop – die Absorptionszelle befindet sich zwischen den beiden Linsen mit den Brennweiten 14 cm und 6 cm – wird der zu vermessende Strömungsabschnitt im Maßstab 2,33 : 1 auf die präparierten Faserenden (Kerndurchmesser 400  $\mu\text{m}$ ) des fasergekoppelten Avalanche-Photodiodenarrays (APD-Array) abgebildet. Die numerische Apertur der Empfangsoptik ist 0,09. Das in die 25 Fasern eingekoppelte Streulicht wird mit einem eigens für das FM-DGV selbst entwickelten Detektorarray vermessen, welches aus 25 Elementen mit einer mittleren Empfindlichkeit von 232 MV/W besteht. Die 3dB-Grenzfrequenz liegt bei 440 kHz und ist somit ausreichend, um sowohl die Grundwelle als auch die 1. Oberwelle des Lichtsignals aufzulösen. Das Signalübersprechen zwischen den einzelnen Kanälen beträgt ca. -80 dB. Die minimale NEP (noise equivalent power) beträgt 35 fW/ $\sqrt{\text{Hz}}$  und ist im Vergleich zu PIN-Detektoren gleicher Bandbreite mindestens um den Faktor 4 geringer, was ein höheres Auflösungsvermögen kleinerer Lichtleistungen bedeutet. Die Photodiodenausgangssignale werden mittels eines Mehrkanaldatenerfassungssystems mit mehreren A/D Messkarten abgetastet, digitalisiert und anschließend im Rechner mit Matlab ent-

sprechend der o.g. Signalverarbeitung ausgewertet, d.h. die Berechnung des Quotienten der ersten beiden harmonischen Amplituden. Um Aliasing zu vermeiden, wurde mit einer Abtast-rate von 2 MHz gearbeitet.

### Zeit- und Ortsauflösung des Messsystems

Die Ortsauflösung des FM-DGV-Messsystems ist im Wesentlichen durch die Beleuchtung und die Empfangsoptik inklusive der Durchmesser und Anordnung der Faserenden gegeben. Aufgrund des Abbildungsmaßstabs von 2,33 : 1 und eines Faserkerndurchmessers von 400  $\mu\text{m}$  beträgt die laterale Ausdehnung eines Bildpunkts gegenwärtig ca. 0,93 mm. Die Tiefenschärfe der Optik beträgt ca. 1,3 cm, so dass i.d.R. die geringere Lichtschnittdicke die axiale Ausdehnung eines Bildpunkts entlang der optischen Achse vorgibt. Die Lichtschnittdicke variierte je nach Messung, lag jedoch stets im Bereich (0,5 – 1) mm.

Die Anordnung der Faserenden in der Bildebene und somit der 25 Bildpunkte kann anwendungsspezifisch erfolgen. Hier wurden zunächst zwei Halter konstruiert, die eine äquidistante flächige Anordnung (2D) von 5 x 5 Bildpunkten und eine lineare Anordnung (1D) von 1 x 25 Bildpunkten gestatten. Die Dimensionen dieser Anordnungen können der Abb. 4 entnommen werden.

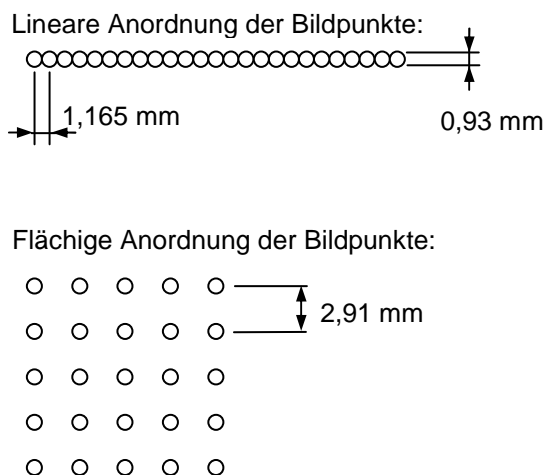


Abb. 4: Konfigurationen zur Anordnung der Bildpunkte

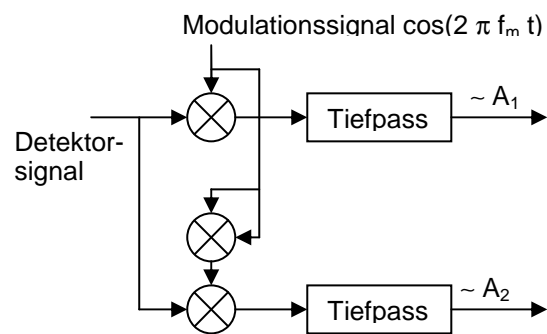


Abb. 5: Signalfluss bei der analogen Signalvorverarbeitung (Prototyp, 1 Kanal,  $f_m$  Modulationsfrequenz)

Die Zeitauflösung des Messsystems kann prinzipiell bis zu einer Periodendauer der Modulationsfrequenz gesteigert werden, was zur Zeit eine maximale Messrate von 100 kHz bedeutet. Mit dem gegenwärtigen Speicher der Messkarten können ohne Unterbrechung bis zu 8 s lang Daten akquiriert und anschließend (off-line) ausgewertet werden.

### Echtzeitmessung mit analoger Signalvorverarbeitung

Falls die Anwendung eine längere Echtzeitmessung erfordert, kann eine analoge Signalvorverarbeitung zum Einsatz kommen. Diese wurde für einen Kanal bereits erfolgreich getestet. Dabei werden die Amplituden der ersten beiden Harmonischen mittels einer analogen Schaltung bestimmt (s. Abb. 5). Hierfür wird das Detektorsignals mit dem Modulationssignal bzw. dem frequenzverdoppelten Modulationssignal gemischt und jeweils anschließend mit einem Tiefpass gefiltert. Bei gleichbleibend hoher Zeitauflösung benötigt die Erfassung der Amplitudensignale eine signifikant geringere Abtast-rate im Vergleich zur Signalauswertung ohne analoger Signalvorverarbeitung und hat eine deutliche Reduzierung des Signalverarbei-

tungsaufwands zur Folge. Diese beschränkt sich dann lediglich auf eine Division der Amplitudenwerte und eine Umrechnung der gemessenen Quotienten in Geschwindigkeitswerte.

Beispielsweise kann durch die analoge Signalvorverarbeitung bei einer Zeitauflösung von 16 ms, die Abtastrate prinzipiell um den Faktor 32000 gesenkt werden. Zur Reduzierung des Einflusses des Messkartenrauschens wurde zunächst jedoch mit einer Abtastrate von 6,25 kHz und anschließender Mittelung gearbeitet, so dass die Abtastrate um den Faktor 320 gesenkt wurde. Das Messergebnis einer zeitaufgelösten Geschwindigkeitsmessung an einem Kalibrierobjekt (rotierende Glasscheibe) ist in der Abb. 6a dargestellt. Die mittlere betragsmäßige Abweichung der Messergebnisse mit und ohne analoger Signalvorverarbeitung beträgt 0,05 m/s, d.h. es liegt eine gute Übereinstimmung vor. Die Ergebnisse einer separaten Untersuchung der statistischen Standardunsicherheiten finden sich in der Abb. 6b. Die statistische Unsicherheit ist bei Verwendung der analogen Signalverarbeitung größer als wie mit der komplett digitalen Signalverarbeitung, da durch die Elemente der analogen Schaltung wie beispielsweise der Mischer und der Tiefpassfilter zusätzliches Rauschen hinzu kommt. Dennoch wurden mit der Prototypschaltung bereits geringe Standardabweichungen von 0,05 m/s erreicht, die in derselben Größenordnung liegen, wie bei der digitalen Signalverarbeitung.

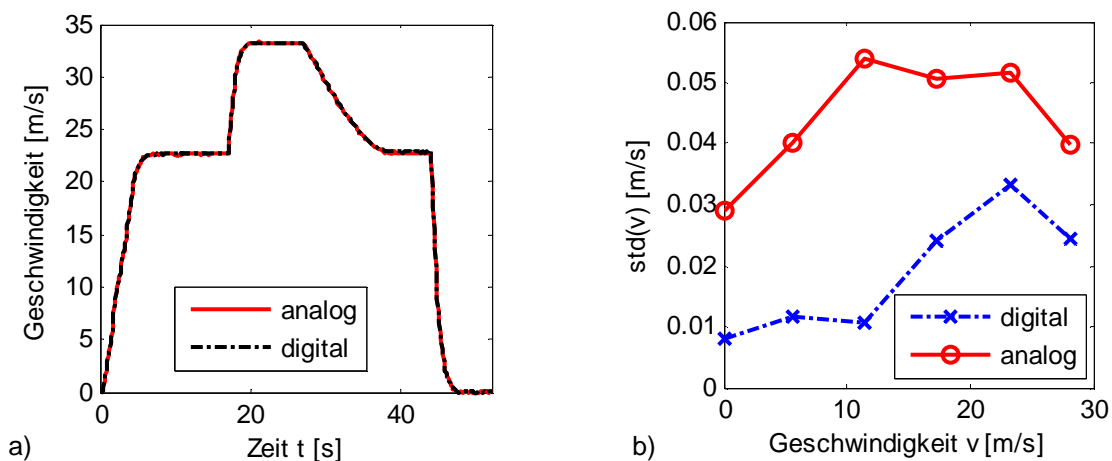


Abb. 6: a) Vergleich einer zeitaufgelösten Messung (62,5 Hz Messrate) am Kalibrierobjekt mit und ohne analoger Signalvorverarbeitung und b) die bei einer Kalibrierung gemessenen Standardabweichungen

### Betrachtungen zur Messunsicherheit

Die gewählte Orts- und Zeitauflösung steht in einem engen Zusammenhang zur Messunsicherheit. Nach Fischer et al. 2008 gilt für die Standardabweichung der Geschwindigkeit  $\sigma_v$  gemäß einer Berechnung der Cramér-Rao-Schranke für thermisches und Dunkelstromrauschen eines Detektors und das Photonenschrottrauschen

$$\sigma_v \sim \text{NEP} / (P_s \sqrt{T}), \quad (2)$$

wobei  $P_s$  die Streulichtleistung und  $T$  die Zeitauflösung ist. Der Parameter NEP (noise equivalent power) ist die Quadratwurzel aus einer Rauschleistungsdichte, die o.g. Rauschquellen beinhaltet. Die Einwirkung der Zeitauflösung auf die Messunsicherheit ist direkt aus der Beziehung (2) ersichtlich, wohingegen die örtliche Auflösung indirekt eingeht: Eine größere laterale Ausdehnung eines Bildpunkts, also eine geringere örtliche Auflösung, führt zu einer größeren Streulichtleistung pro Bildpunkt. Alternativ kann auch durch eine Verkleinerung der

Lichtsnitthöhe die Laserintensität gesteigert, und so die Streulichtleistung pro Bildpunkt vergrößert werden.

Aufgrund der geringeren örtlichen Auflösung des APD-Arrays im Vergleich zu der Anzahl der Bildpunkte von üblicherweise verwendeten CCD-Kameras kann so eine höhere Streulichtleistung pro Bildpunkt erreicht und folglich ein verbessertes SNR erzielt werden. Gleichzeitig gestattet die höhere Bandbreite der APD-Elemente eine höhere zeitliche Auflösung, die für die Aufnahme von Geschwindigkeitsspektren erforderlich ist.

An einer Düsenströmung wurde experimentell der zahlenmäßige Zusammenhang zwischen Messunsicherheit, Streulichtleistung und Zeitauflösung

$$\sigma_v = 0,012 \text{ m/s} / (P_s/nW \sqrt{T/s}), \quad (3)$$

bestätigt (s. Abb. 7a). Dieser fällt mit der berechneten Crámer-Rao-Schranke zusammen und ist für Streulichtleistungen  $< 2 \text{ nW}$  gültig. Dabei dominiert der Einfluss des Detektorrauschens (thermisches Rauschen und Dunkelstromrauschen). Dieser Fall trifft für Strömungsmessungen hier i.d.R. zu und konnte auch bei Messungen im Windkanal so bestätigt werden. Bei sorgfältiger Präparation z.B. bei einer Düsenströmung können darüber hinaus auch höhere Streulichtleistungen erreicht werden, wenn man die Seedingkonzentration erhöht. Mit Hinblick auf Anwendungen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit, wie beispielsweise in Turbomaschinen, ist die maximal erreichbare Streulichtleistung von Interesse, um die minimal erreichbare statistische Messunsicherheit abschätzen zu können. Diese wurde bei gegenwärtiger Systemkonfiguration experimentell an einer Düse für eine Distanz von 2 cm zur Düsenöffnung (1 cm Durchmesser) für verschiedene Lichtsnitthöhen ermittelt (s. Abb. 7b). Zunächst erkennt man qualitativ eine indirekte Proportionalität zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Streulichtleistung, aufgrund der mit steigender Düsengeschwindigkeit abnehmenden Seedingkonzentration. Zum Seeding wurde ein Partikelgenerator mit 14 Laskin-Düsen eingesetzt, die je  $10^8$  Partikel pro Sekunde erzeugen. Die abgeschätzte Seedingkonzentration bei 100 m/s beträgt folglich  $1,8 \cdot 10^5$  Partikel pro  $\text{cm}^3$  und verhält sich indirekt proportional zur Geschwindigkeit. Im Ergebnis können so, wenn man die Beziehung (3) anwendet, bei der geforderten Messrate von 5 kHz für den Einsatz in einer Turbomaschine, siehe Stockhausen 2008, und entsprechendem Seeding Messunsicherheiten von 0,5 m/s bei Geschwindigkeiten von bis zu 130 m/s erzielt werden.

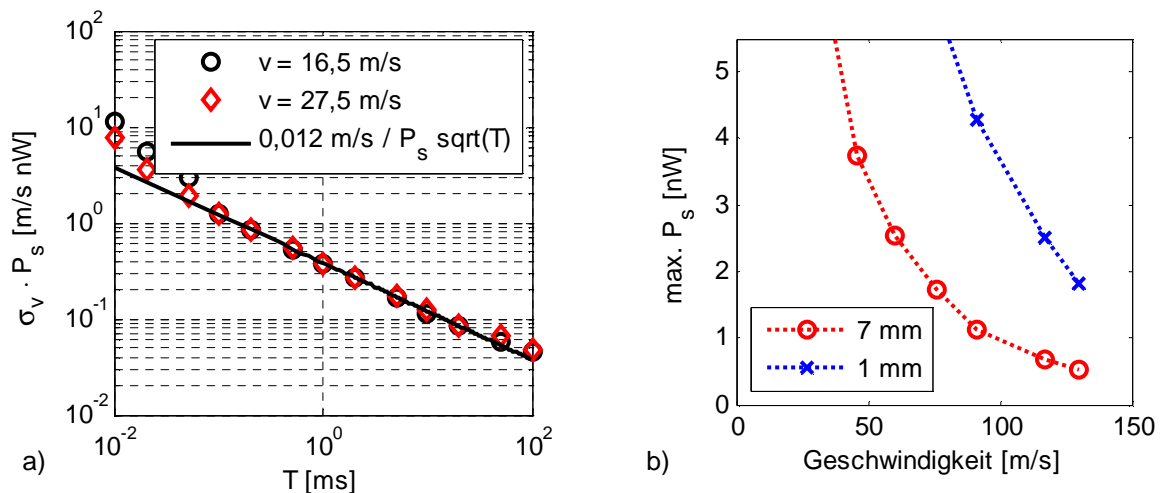


Abb. 7: a) Gemessener und abgeschätzter Zusammenhang zwischen Zeitauflösung  $T$  und Messunsicherheit  $\sigma_v$  und  
 b) maximal erreichbare Streulichtleistung  $P_s$  in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Düsenströmung für die Lichtsnitthöhen 7 mm und 1 mm



## Messung von Geschwindigkeitsspektren

Abschließend soll die hohe zeitliche Auflösung des FM-DGV-Messsystems für mehrkanalige Turbulenzuntersuchungen demonstriert werden. Die Messanordnung in einem Windkanal Göttinger Bauart ist als Draufsicht in der Abb. 8 skizziert. Genutzt wurde hierbei die 1D Anordnung des Faserarrays. Gemessen wurde im Abstand von 7 cm hinter der Düsenöffnung (10 cm Düsendurchmesser). Ein direkt hinter der Düsenöffnung aufgestellter Motor mit montiertem Arm, welcher periodisch die Strömung senkrecht durchquert, dient als Turbulenzgenerator.

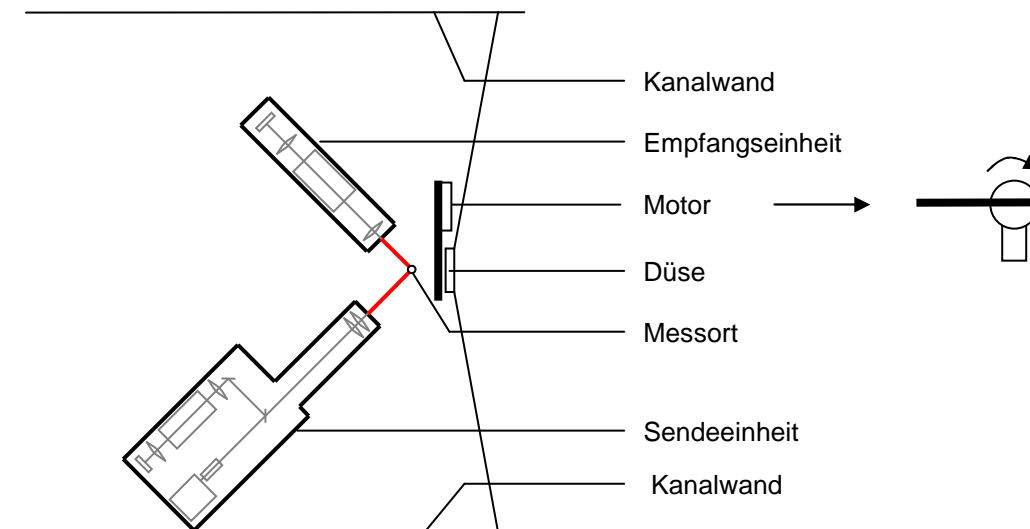


Abb. 8: Draufsicht der Messanordnung im Windkanal und Bild des Turbulenzgenerators

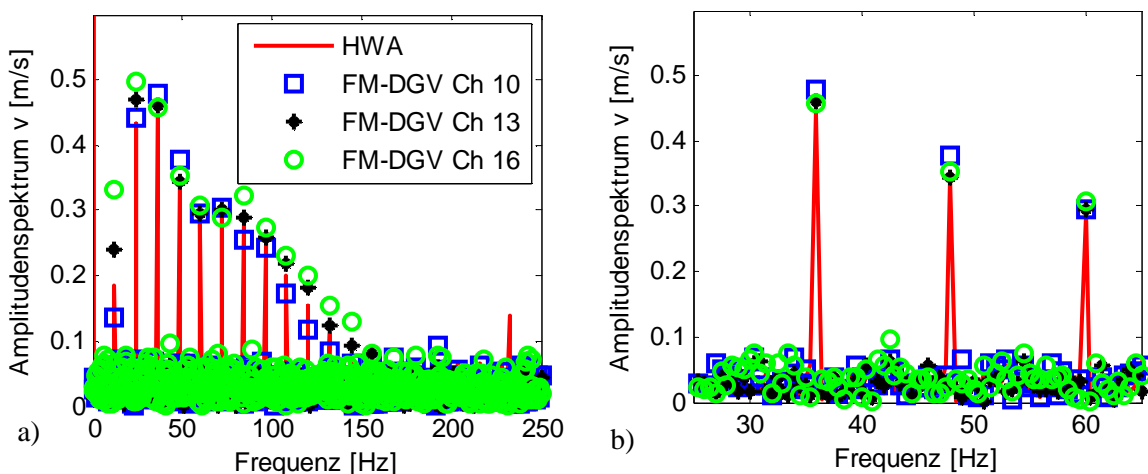


Abb. 9: a) Mehrkanalige Messung von Geschwindigkeitsspektren mit FM-DGV und Detektorarray und Vergleichsmessung mit Hitzdrahtsonde, b) vergrößerter Bildausschnitt (Bem.: Es wurde eine einseitige Spektraldarstellung verwendet, so dass die tatsächlichen Amplituden von Oszillationen aufgetragen sind.)

Die Array-Messergebnisse mit dem FM-DGV-Messsystem und die Vergleichsmessung einer Hitzdrahtsonde (CTA) sind in der Abb. 9 dargestellt. Als Messrate wurde 500 Hz gewählt, um die relevanten spektralen Anteile der Strömungsturbulenzen auflösen zu können. Die Mess-



dauer betrug 2 s, die mittlere Streulichtleistung in etwa 1 nW. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit war 9,6 m/s. Die gemessenen Geschwindigkeitsspektren stimmen innerhalb  $\pm 0,1$  m/s mit der Hitzdrahtmessung überein. Diese Abweichungen sind vermutlich eine Folge der Empfindlichkeit der DGV-Technik bezüglich der Strömungsrichtung, die bei der Hitzdrahtmessung nicht ausgeprägt ist. Die vorgegebene Motordrehfrequenz von 12 Hz sowie die Frequenzen höherer Harmonischer wurden korrekt erfasst. Die Ergebnisse illustrieren somit die Leistungsfähigkeit des FM-DGV-Messsystems zur mehrkanaligen, zeitaufgelösten Geschwindigkeitsmessung von turbulenten Strömungen.

## **Zusammenfassung**

Es wurde ein DGV-Verfahren mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) vorgestellt, womit instationäre komplexe Strömungen hinsichtlich der Geschwindigkeit mit hoher Zeitauflösung von bis zu 10  $\mu$ s an 25 Messpunkten simultan vermessen werden können. Der Vorteil gegenüber konventioneller DGV-Verfahren liegt in der Nutzung einer Frequenzmodulationstechnik, wodurch Fehlerquellen konventioneller Techniken wie beispielsweise Bildausrichtungsfehler und Strahlteilungsfehler, die bis zu 20 m/s betragen können, entfallen. Auch der Fehlereinfluss von Umgebungslicht ist aufgrund der Signalauswertung im Frequenzbereich reduziert. Minimal wurde beim FM-DGV mit optimierten Parametern als statistische Unsicherheit eine Standardabweichung der Geschwindigkeit von 0,02 m/s an einer rotierenden Glasscheibe und 0,04 m/s in einer Düsenströmung bei 16 ms Zeitauflösung gemessen.

Der Einsatz eines fasergekoppelten 2D-Photodiodenarrays mit 25 Elementen reduziert im Vergleich zu CCD-Kameras zwar die Anzahl der Messpunkte, ermöglicht jedoch bei hohen Seedingkonzentrationen eine kontinuierliche Geschwindigkeitsmessung mit hoher Zeitauflösung. Prinzipiell ist die maximale Messrate identisch mit der gewählten Modulationsfrequenz und beträgt hier 100 kHz. Durch eine Verringerung der Lichtschnitthöhe können zudem höhere Streulichtleistungen und somit eine geringere Messunsicherheit im Vergleich zu konventionellen Techniken erreicht werden. Die derzeitige Dimension des Volumens eines Bildpunktes beträgt mit gegenwärtiger Optik ca. 1 mm im Durchmesser, um vernachlässigbare Streulichtleistungsschwankungen zu gewährleisten.

Die Messunsicherheit verhält sich indirekt proportional zur Quadratwurzel aus der Zeitauflösung und zur Streulichtleistung. Letztere hängt von der Seedingkonzentration, der örtlichen Auflösung und der Laserleistung ab. Dieser Zusammenhang wurde theoretisch und experimentell bestätigt. Beispielsweise sind bei 5 kHz Messrate und 1,8 nW Streulichtleistung, statistische Messunsicherheiten von 0,5 m/s erreichbar.

Die Anwendung der vorgestellten Messtechnik für mehrkanalige Turbulenzuntersuchungen wurde anhand der Aufnahme von Geschwindigkeitsspektren einer turbulenten Strömung demonstriert. Die Messergebnisse stehen in guter Übereinstimmung mit einer vergleichenden Hitzdrahtmessung. Damit öffnen sich neue Perspektiven für den Einsatz der FM-DGV-Messtechnik für mehrkanalige Turbulenz- und Korrelationsuntersuchungen, wie beispielsweise in Turbomaschinen oder an einem quer angeströmten Zylinderstumpf.

## **Dankesworte**

Die Autoren danken Herrn Arndt Bretschneider für die tatkräftige experimentelle Unterstützung und der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projektes "Einsatz neuartiger Doppler-Global-Velozimeter (DGV) zur Analyse komplexer Strömungen" (Förderkennzeichen Cz 55/16-3 und Mu 1252/2-3).

## 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, Lissabon, 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., Eggert, M., Müller, H., 2008: "Measurements of velocity spectra using Doppler Global Velocimetry with laser frequency modulation and a detector array", 14<sup>th</sup> Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon, Portugal, Sitzung 7.3

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2008: "Considerations on measurement uncertainty and temporal resolution of Doppler global velocimetry using laser frequency modulation", Applied Optics, vsl. Vol. 47, No. 20

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Grosche, G., Müller, H., 2007: "Investigation of time-resolved single Doppler global velocimetry using sinusoidal laser frequency modulation", Meas. Sci. Technol., Vol. 18, S. 2529-2545

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2007: "Untersuchungen zur Zeitauflösung eines 2d3k-Doppler-Global-Array-Velozimeters mit Laserfrequenzmodulation", Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 15. Fachtagung, Tagungsband, Beitrag 45.1-45.9, Universitätsdruckerei Rostock, ISBN 978-3-86009-007-7

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

Huffman, G. D., 1980: "Calibration of triaxial hot-wire probes using a numerical search algorithm", J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 13, S. 1177-1182

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

Megerle, M., Sick, V., Reuss, D. L., 2002: "Measurement of digital particle image velocimetry precision using electro-optically created particle-image displacements", Meas. Sci. Technol., Vol. 13, S. 997-1005

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., Eggert, M., Czarske, J., Büttner, L., Fischer, A., 2007: "Single-camera Doppler global velocimetry based on frequency modulation techniques", Exp. Fluids, Vol. 43, S. 223-232

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

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

Stockhausen, G., 2008: Anforderungen an das Messsystem bei Anwendung in Turbomaschinen, mündl. Mitteilung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln

Watmuff, J. H., 1995: "An Investigation of the Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer", Experimental Thermal and Fluid Science, 11:117-134

Westerweel, J., 1997: "Fundamentals of digital particle image velocimetry", Meas. Sci. Technol., Vol. 8, S. 1379-1392