

TURBULENZ- UND KORRELATIONSUNTERSUCHUNGEN MIT EINEM DOPPLER-GLOBAL-ARRAY-VELOZIMETER

TURBULENCE AND CORRELATION ANALYSIS USING A DOPPLER GLOBAL ARRAY VELOCIMETER

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: andreas.fischer2@tu-dresden.de

* Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Schlagworte: DGV, Geschwindigkeitsfeldmessung, hohe Zeitauflösung
Key words: DGV, velocity field measurement, high temporal resolution

Kurzfassung

Für Turbulenz- und Korrelationsuntersuchungen sind zeit- und orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessungen notwendig. Aus diesem Grund wird ein Doppler-Global-Velozimeter mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) vorgestellt, welches Messraten von 100 kHz gestattet. Die Geschwindigkeitsverläufe werden an 25 Messpunkten mit fasergekoppelten Lawinenphotodetektoren auf optischem Weg gemessen. Dabei wird die Doppler-Frequenzverschiebung von an Teilchen gestreutem Licht mittels der spektral abhängigen Transmissionskennlinie eines atomaren Cäsium-Übergangs in eine Änderung der Detektorsignale überführt. Die Auswertung des Amplitudenverhältnisses der 1. und 2. Harmonischen eines Detektorsignals liefert eine allein von Geschwindigkeit und nicht von der mittleren Streulichtleistung abhängig Größe, ohne dass es wie bei konventionellen DGV-Verfahren eines zweiten Detektorarrays zur Referenz bedarf. Es wird schwerpunktmäßig über die kürzlichen Anwendungen des FM-DGV-Messsystems berichtet: die Nachlaufströmung eines Zylinders, eines Zylinderstumpfs und eines Gitters. Die aufgenommenen Turbulenzspektren und Korrelationsfunktionen werden mit Hitzdrahtmessungen validiert und mit dem in der Literatur benanntem Strömungsverhalten verglichen. Ausblickend für den Einsatz bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten wie z. B. in Turbomaschinen wird eine instationäre Düsenströmung vermessen, bei welcher Geschwindigkeiten von max. 130 m/s auftreten. Die Messungen belegen, dass mit dem FM-DGV-Messsystem zeitlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsfeldmessungen in turbulenten, instationären Strömungen möglich sind.

Einleitung und Motivation

Um komplexe instationäre Strömungsphänomene erfassen und verstehen zu können, benötigt man zeitaufgelöste Geschwindigkeitsfeldmessungen (2d oder 3d) aller drei Geschwindig-

keitskomponenten (3k). Neben der Erforschung des Verhaltens von grundlegenden Strömungen, wie beispielsweise die instationäre Umströmung stumpfer Körper (Jensch et al. 2007), ist dies besonders für die Optimierung von Strömungsmaschinen wie z.B. Turbomaschinen von hohem Interesse (Voges et al. 2007). Falls Strömungssimulationen verfügbar sind, benötigt man für deren Validierung ebenfalls Messdaten. Für Turbulenz- und Korrelationsuntersuchungen sind Messraten bis zu mehreren 10 kHz oft notwendig.

Ein zeitauflösendes und bildgebendes Geschwindigkeitsmessverfahren ist die Temporally Resolved Particle Image Velocimetry (TR-PIV), mit welcher Wernet 2007 durch den Einsatz von CMOS-Kameras Geschwindigkeitsmessraten bis 25 kHz erreicht hat. Wernet 2007 verweist zudem auf ein realisiertes TR-PIV-Messsystem, welches eine MHz-Bildrate besitzt. Es soll hier nicht näher betrachtet werden, weil sich damit nur 8 Bildern aufnehmen lassen und es somit für die Aufnahme von Turbulenzspektren ungeeignet ist. Der beim 25-kHz-System vorhandene Kameraspeicher (8 Gigabyte) gestattete Aufnahmen bis 2,2 s, so dass die Frequenzauflösung einer spektralen Auswertung der Geschwindigkeitssignale 0,45 Hz beträgt. Die hohe Bildrate erfordert eine Verringerung der Pixelanzahl auf 640 x 80, womit bei der angewandten Fenstergröße von 32 x 32 Pixel 50 Messpunkte bzw. bei einem Überlapp von 50 % 200 Messpunkte resultieren. Die mittels TR-PIV in einer Düsenströmung mit der Austrittsgeschwindigkeit 160 m/s aufgenommenen Turbulenzspektren stimmen mit denen von Hitzdrahtmessungen qualitativ gut überein. Eine quantitative Fehlerabschätzung wurde nicht angegeben. Nach Megerle et al. 2002 werden mit PIV typische relative Messunsicherheiten von ca. 3 % erreicht. Die Messunsicherheit kann bei hohen Pulswiederholraten des Lasers im kHz-Bereich größer ausfallen, da die Pulsenergie und somit das Signal-Rausch-Verhältnis abnimmt.

Ein weiteres bildgebendes Geschwindigkeitsmessverfahren ist die Doppler-Global-Velozimetrie (DGV), wobei einzelne Streuteilchen optisch nicht aufgelöst werden müssen. Es basiert auf einer Frequenz-Intensitäts-Konversion mittels molekularer Absorption, wodurch die geschwindigkeitsabhängige Doppler-Frequenzverschiebung des Streulichts als Intensitätsänderung mit einer Kamera flächig messbar ist. Im Vergleich zu PIV ist es daher robuster bezüglich optischer Aberrationen, die verstärkt dann auftreten, wenn der optische Zugang erschwert ist (Willert et al. 2002). Dies trifft auf geschlossene Strömungen wie z. B. in Verbrennungsmotoren oder Turbomaschinen zu, wo unter anderem mit Endoskopen gearbeitet werden muss. Typische Unsicherheiten liegen bei 3 m/s bis 4 m/s (Morrison et al. 2001). Wegen der Verwendung von CCD-Kameras haben herkömmliche DGV-Verfahren jedoch eine für die Turbulenzanalyse unzureichende Messrate von <10 Hz, und aufgrund der typischerweise geringen Streulichtintensitäten notwendigen Mittelung oft sogar unter 1 Hz.

Deswegen wird stattdessen ein Lawinenphotodiodenarray (APD-Array) mit 25 Elementen zur Photodetektion eingesetzt, welches Messraten bis 100 kHz ermöglicht. Zudem erfolgt eine Verkleinerung des Laserlichtschnitts, womit sich höhere Signal-Rausch-Verhältnisse und damit geringere statistische Messunsicherheiten erzielen lassen. Schließlich wird von einer sinusförmigen Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) Gebrauch gemacht, wodurch die sonst notwendige Referenzkamera zur Messung der Streulichtintensität entfällt. Ausgewertet wird hier das Amplitudenverhältnis der ersten und zweiten Harmonischen des Detektorsignals, welches unabhängig von der mittleren Streulichtleistung ist. Damit vereinfacht sich der Messaufbau sowie dessen Justage, die notwendige Anzahl an Detektoren halbiert sich und im Gegensatz zu konventionellen DGV-Verfahren treten keine Bildausrichtungsfehler auf.

Zunächst soll das Messprinzip kurz umrissen werden. Danach wird das aufgebaute FM-DGV-Messsystem charakterisiert. Den Schwerpunkt des vorliegenden Beitrags bildet die anschließende Vorstellung von gemessenen Turbulenzspektren und Korrelationen in turbulenten, instationären Strömungen, womit die Leistungsfähigkeit des Messsystems hierfür demonstriert werden soll.

FM-DGV Messprinzip und Eigenschaften des aufgebauten Messsystems

Das Messprinzip kann in ausführlicher Darstellung den Publikationen von Fischer et al. 2008a, 2008b und 2009a entnommen werden und soll hier lediglich zusammenfassend wiedergegeben werden. Gemäß der in Abb. 1a skizzierten Messanordnung beleuchtet ein Laserlichtschnitt die zu vermessende Strömungsebene. Die Laserfrequenz ist sinusförmig moduliert. Das von Partikeln in die Beobachtungsrichtung gestreute Laserlicht wird durch eine Absorptionzelle hindurch mittels eines Photodetektorarrays vermessen. Die Mittenfrequenz dieses Streulichts ist aufgrund des Doppler-Effektes direkt proportional zur Strömungsgeschwindigkeit verschoben (vgl. Abb. 1a). Wegen der spektralen Transmissionscharakteristik der Absorptionzelle und der sinusförmigen Laserfrequenzmodulation (s. Abb. 1b) ändert sich so das Verhältnis von der ersten zur zweiten Harmonischen eines Detektorsignals. Dieses Amplitudenverhältnis ist unabhängig von der mittleren Streulichtleistung und dient folglich zur Geschwindigkeitsmessung. Für dreikomponentige Geschwindigkeitsmessungen sind beispielsweise zwei weitere Beobachtungsrichtungen notwendig, weil bei einer Lasereinfalls- und Beobachtungsrichtung nur eine Komponente der Geschwindigkeit erfasst wird.

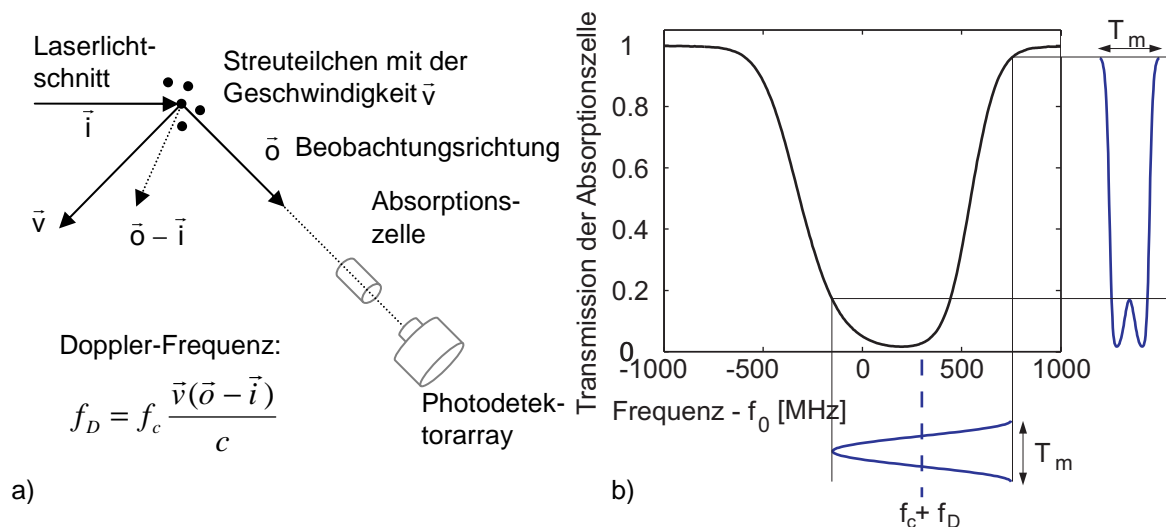


Abb. 1: a) Funktionsprinzip eines Doppler-Global-Velozimeters mit Laserfrequenzmodulation, b) Skizzierung der Frequenzmodulation an einer gemessenen Cs-Absorptionslinie ($f_0 = 351,7217$ THz, f_c Lasermittenfrequenz)

Der experimentelle Aufbau sowie dessen messtechnischen Eigenschaften wurde z. B. von Fischer et al. 2009b beschrieben. Als Laserquelle kommt ein DFB-Laser mit der Wellenlänge 852,1 nm, der maximalen Ausgangsleistung 80 mW und der Linienhalbwertsbreite < 3 MHz zum Einsatz. Die Modulationsfrequenz des Laserdiodenstroms und somit der Laserfrequenz beträgt 100 kHz und die Modulationsamplitude ca. 450 MHz. Zur Photodetektion wird ein Array bestehend aus 25 fasergekoppelten Lawinenphotodetektoren verwendet, welche eine 3-dB-Bandbreite von 450 kHz aufweisen und so die 1. und 2. Harmonische der Lichtsignale auflösen können. Die Messpunkte sind zunächst linear angeordnet (s. Abb. 2), um zwecks Maximierung der Laserintensität die Lichtschnitthöhe zu reduzieren. Die laterale und axiale Ortsauflösung beträgt ca. 930 μm .

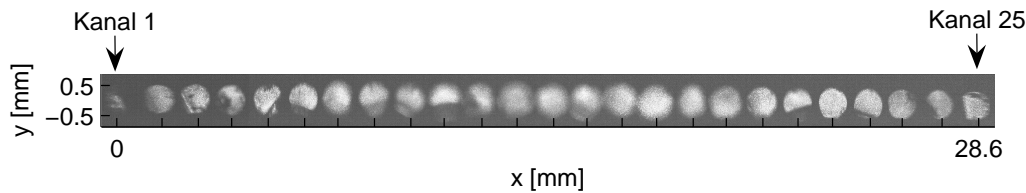


Abb. 2: Abbild der 25 Messpunkte

Im Ergebnis können so hohe mittlere Streulichtleistungen P_s erreicht werden, für die sich die erreichbare Standardunsicherheit σ_v der Geschwindigkeit für die Zeitauflösung T wie folgt abschätzen lässt (Fischer et al. 2008b):

$$\sigma_v = \frac{I}{\sqrt{T/s}} \cdot \sqrt{\frac{(0,0084 \text{ m/s})^2}{(P_s/nW)^2} + \frac{(0,0051 \text{ m/s})^2}{P_s/nW}}. \quad (1)$$

Diese Unsicherheit resultiert aus dem bei der Photodetektion auftreten Rauschen (vorwiegend thermisches Rauschen und Schrotrauschen). Da zur Signalauswertung der Streulichtsignale mind. eine Signalperiode benötigt wird, beträgt die max. Zeitauflösung $10 \mu\text{s}$, so dass dem Abtasttheorem folgend Turbulenzspektren bis 50 kHz auflösbar sind. Der Speicher des Datenerfassungssystems gestattet 8 s lang kontinuierliche Messungen, so dass die Turbulenzspektren mit einer Frequenzauflösung von $0,125 \text{ Hz}$ gemessen werden können. Die zweiseitige Rauschleistungsdichte S_v der Geschwindigkeit kann ausgehend von Gl. (1) für die Annahme von weißem Rauschen berechnet werden:

$$S_v = \sigma_v^2 \cdot T = \frac{(0,0084 \text{ m/s})^2}{(P_s/nW)^2 \text{ Hz}} + \frac{(0,0051 \text{ m/s})^2}{P_s/nW \text{ Hz}}. \quad (2)$$

Sie stellt die Auflösungsgrenze der zu messenden Turbulenzspektren dar.

Messergebnisse

Die nachfolgend vorgestellten Messungen fanden in einem Windkanal Göttinger Bauart am Institut für Luft- und Raumfahrt an der TU Dresden statt. Die Kalibrierung erfolgt vor Ort am Freistrahler der Düse, dessen Geschwindigkeit über eine Druckmessung basierend auf der Bernoulli-Gleichung bestimmt wurde. Der Turbulenzgrad der Freistrahlerströmung beträgt je nach mittlerer Geschwindigkeit zwischen $1,3 \%$ und 3% . Als Seeding wurden DEHS-Teilchen mit einem mittleren Durchmesser von $1 \mu\text{m}$ verwendet. Durch die Rezirkulation ist eine Aussage zur vorliegenden Teilchenkonzentration nur schwer möglich. Zudem wurde der Partikelgenerator nicht kontinuierlich betrieben, da die Streulichtsignale bei zu starker Seedingzufuhr aufgrund von Absorption abnahmen. Mit dem Generator können maximal 14 Laskin-Düsen betrieben werden, die laut Datenblatt insgesamt eine maximale Partikelrate von rund $1,4 \cdot 10^9$ Partikel pro Sekunde aufweisen. Der Durchmesser der Düse des Windkanals beträgt 10 cm . Es wurde die Nachlaufströmung von verschiedenen Objekten untersucht:

- A) ein Zylinder (Durchmesser $D = 2,5 \text{ mm}$ bzw. $D = 5 \text{ mm}$) und
- B) ein auf einer Platte befestigter Zylinderstumpf (Durchmesser $D = 2 \text{ cm}$, Höhe $H = 2D$).
- C) ein Drahtgitter (Gitterkonstante 3 mm , Drahtdurchmesser 1 mm),

Die Messobjekte sind in der Abb. 3 dargestellt. Es folgt nun eine Vorstellung der jeweiligen Messergebnisse, wobei Teilergebnisse bereits in Fischer et al. 2009b veröffentlicht sind.

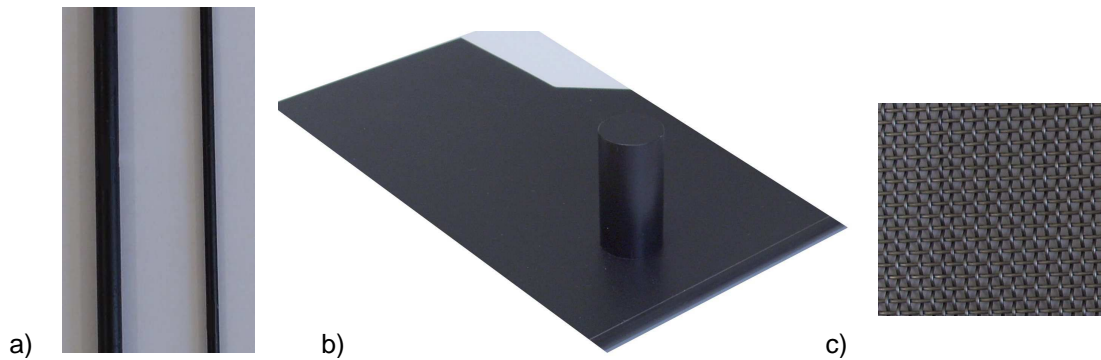


Abb. 3: Fotos der Messobjekte a) Zylinder mit den Durchmessern 5 mm und 2,5 mm, b) das Modell des Zylinderstumpfs, c) das Gitter mit der Gitterkonstante 3 mm

A) Zylinder

Eine Skizze der Messanordnung der 25 Messpunkte findet sich in Abb. 4. Gemessen wurde die Hauptströmungskomponente (in x-Richtung). Zunächst wurde das Geschwindigkeitsfeld im Nachlauf des quer angeströmten Zylinders mit dem Durchmesser $D = 2,5$ mm aufgenommen. Hierfür wurde der Messpunkt des Kanals 13 als Erstes bei den Koordinaten $x = 1,5 D$ und $y = 0$ positioniert, und nach erfolgter Messung um $D / 2$ entlang der x-Achse verschoben. Insgesamt wurden so 7×25 Messpunkte erfasst.

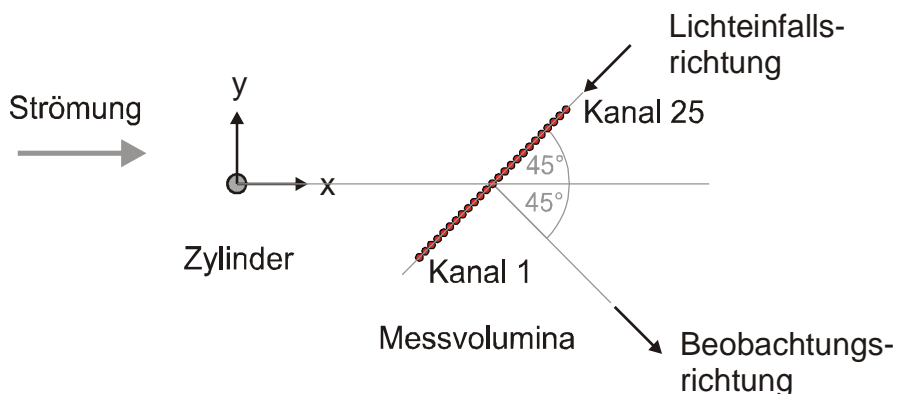


Abb. 4: Skizze der Messanordnung im Windkanal

Die über 2 s gemittelten Geschwindigkeitsmesswerte sind in Abb. 5a aufgetragen. Das dargestellte Geschwindigkeitsfeld fußt auf einer linearen Interpolation zwischen den Messstellen. Der Abb. 5a ist zu entnehmen, dass sich die Strömungsgeschwindigkeit hinter dem Zylinder erwartungsgemäß reduziert und abseits des Zylinders die Geschwindigkeit der Freistrahströmung von 1,2 m/s annimmt. Auffallend ist jedoch eine Struktur, die diagonal entlang der Lichteinfallrichtung verläuft. Hier ist zu vermuten, dass die Anströmung aufgrund der niedrigen Motordrehzahl des Windkanalantriebs und der pulsformigen Seedingzufuhr nicht stationär war. Dadurch lagen bei den sequentiell durchgeführten Messungen unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten vor. Normiert man deshalb die Messungen jeweils auf die Geschwindigkeit am Kanal 3 abseits des Zylinders, so ergibt sich das in Abb. 5b dargestellte Strömungsbild. Im Ergebnis sind die benannten Artefakte vollständig verschwunden, was die eingangs gestellte These stützt. Letztlich verbleiben noch kleinere Artefakte bei ca. $x = 5$ mm und $y = -3$ mm, die nicht abschließend geklärt werden konnten. Zum einen können störende Lichtreflexe hierfür verantwortlich sein, zum anderen hat sich nachträglich herausgestellt,

dass der Kanal 9 ($y = -3,15 \text{ mm}$) des Datenerfassungssystems defekt war. Dennoch belegt die Messung, dass mit dem FM-DGV-Messsystem das Geschwindigkeitsfeld einer stationären Strömung (max. $1,2 \text{ m/s}$) erfolgreich aufgelöst werden konnte.

Die Eignung des FM-DGV-Messsystems für zeitlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsmessungen ist anschließend untersucht worden, wobei die Nachlaufströmung eines Zylinders mit dem Durchmesser $D = 5 \text{ mm}$ als Modellströmung vorlag. Es wurde, wie bei allen nachfolgenden Messungen, mit 100 kHz Messrate 8 s lang an 25 Punkten simultan gemessen. Der Kanal 13 war bei $x = 6,5 D$ und $y = -0,5 D$ positioniert. Die beispielsweise dort gemessenen zweiseitigen Leistungsdichtespektren der Geschwindigkeit (nachfolgend Turbulenzspektren genannt) sind in den Abb. 6a und 6b für die unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten $9,5 \text{ m/s}$ und $28,9 \text{ m/s}$ dargestellt. Die zugehörigen Reynolds-Zahlen lauten 3289 und 10005 . Der Übersichtlichkeit halber sind die Turbulenzspektren über jeweils 10 benachbarte Punkte gemittelt. Zusätzlich sind die mit einer Hitzdrahtsonde (HWA) gemessenen Spektren zwecks Validierung der FM-DGV-Messungen angegeben.

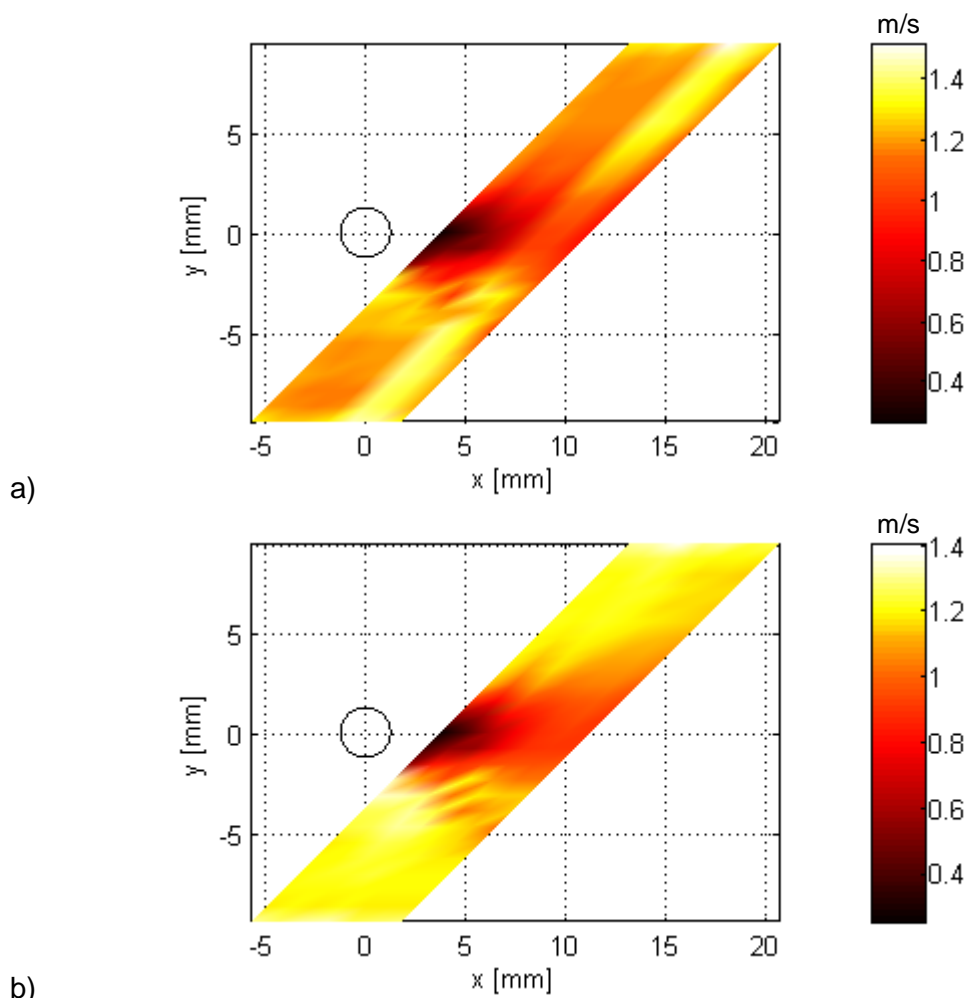


Abb. 5: Gemessenes Geschwindigkeitsfeld im Zylindernachlauf (Zylinderdurchmesser $2,5 \text{ mm}$) bei einer Anströmgeschwindigkeit von $1,2 \text{ m/s}$ a) nicht normiert und b) normiert auf Kanal 3

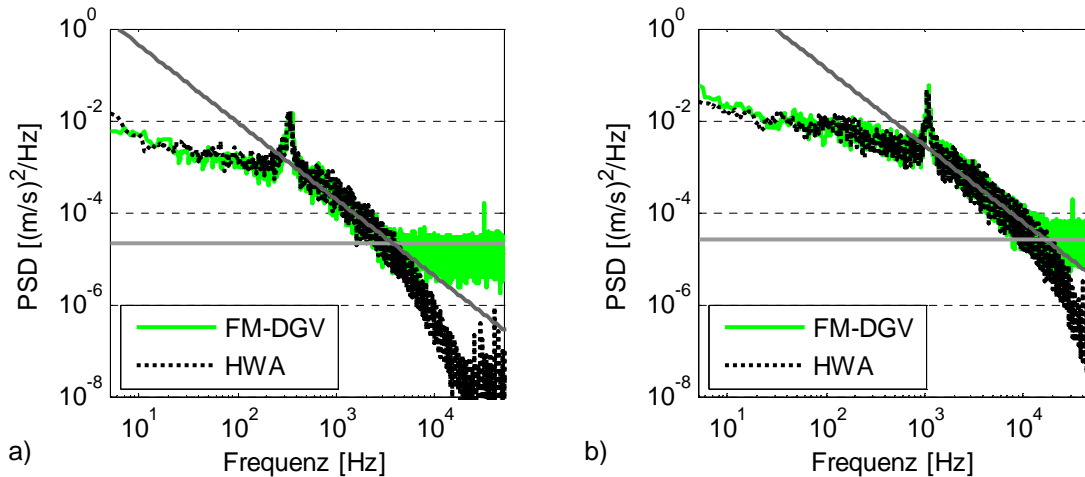


Abb. 6: Messungen im Nachlauf des Zylinders (Durchmesser 5 mm) mit Hitzdrahtsonde (HWA) und FM-DGV (Kanal 13) für die Anströmgeschwindigkeit a) 9,5 m/s bzw. b) 28,9 m/s (horizontale Linie: abgeschätzte Rauschleistungsdichte)

Übereinstimmend werden sowohl mit FM-DGV als auch mit der Hitzdrahtsonde die Wirbelablösefrequenzen von ca. 340 Hz bzw. 1090 Hz gemessen, die den Strouhal-Zahlen 0,18 bzw. 0,19 entsprechen. Sie stimmen zudem etwa mit den von Zdravkovich 1997 (S. 121) angegebenen Strouhal-Zahlen in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl überein. Zdravkovich benennt für beide Strömungskonfigurationen den geringfügig höheren Wert von 0,2, was an unterschiedlichen Durchmesser-Längen-Verhältnissen der untersuchten Zylinder oder dem Einfluss des Seedings auf die Dichte der Strömung liegen kann.

Während die HWA-Daten mit zunehmender Frequenz abnehmen, konvergieren die mittels FM-DGV gemessenen Spektren ab 4 kHz bzw. 15 kHz gegen einen konstanten Wert. Dies resultiert aus den stochastischen Fluktuationen der Geschwindigkeitsmesswerte, die gemäß der Gl. (2) zu einer Rauschleistungsdichte führt. Setzt man darin die gemessenen Streuleistungen 2,04 nW bzw. 1,83 nW ein, dann erhält man die abgeschätzte Rauschleistungsdichte. Sie ist in der Abb. 6a und 6b jeweils als horizontale Linie eingezeichnet, und stimmt gut mit der tatsächlichen Rauschleistungsdichte überein.

Des Weiteren ist jeweils eine abfallende Gerade mit dem Anstieg (im doppelt-logarithmischen Maßstab) von $-5/3$ eingezeichnet. Dieser Abfall tritt gemäß der Theorie von Kolmogorov bei isotroper Turbulenz in Turbulenzspektren auf. Tatsächlich findet sich passend dazu ein solcher Abfall bei der Strömung mit der Reynolds-Zahl 10005 (s. Abb. 6b).

Im Gegensatz zu dem dominant ausgeprägten Grundmode bei $y = \pm 0,5 D$ tritt nach Brede et al. 2004 bei der Position $y = 0$ die 1. Oberwelle verstärkt auf und die Grundwelle verschwindet. Auch dieses Verhalten spiegeln die Messergebnisse wieder, wenn man z. B. den Kanal 16 bei $x = 6,99 D$ und $y = -0,01 D$ betrachtet. Die dort gemessenen Turbulenzspektren sind in der Abb. 7a bzw. 7b wieder für die beiden Reynolds-Zahlen 3289 und 10005 dargestellt. Die darin eingezeichneten Pfeile markieren die jeweils 1. und 2. Harmonische der Nachlaufströmung, die erwartungsgemäß auftreten. Zudem sind der Vollständigkeit halber erneut jeweils die abgeschätzte Rauschleistungsdichte und der bekannte Anstieg $-5/3$ eingezeichnet.

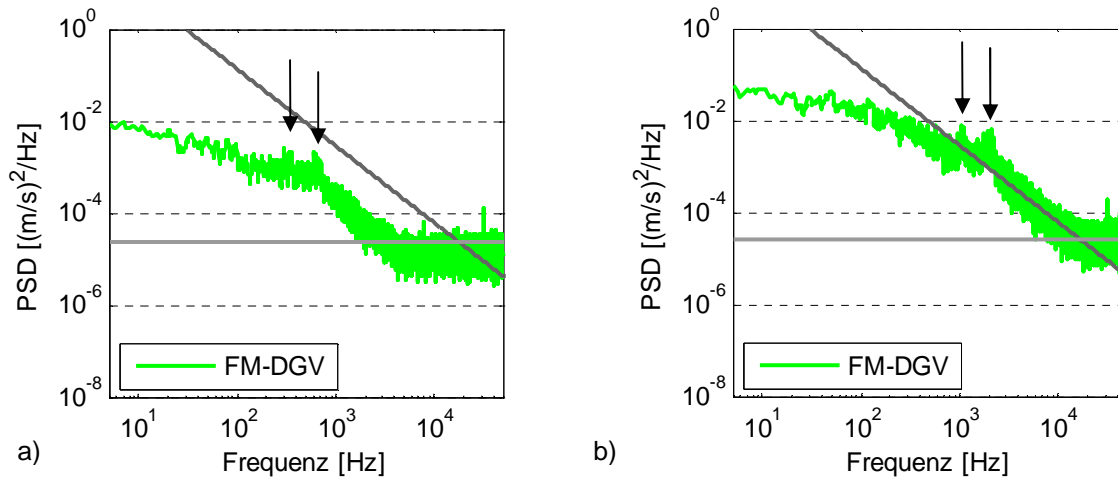


Abb.7: Messungen im Nachlauf des Zylinders (Durchmesser 5 mm) mit FM-DGV (Kanal 16) für die Anströmgeschwindigkeit a) 9,5 m/s bzw. b) 28,9 m/s (Die mittlere Streulichleistung lautet a) 1,99 nW bzw. b) 1,78 nW.)

Abschließend sollen gemessene Korrelationsfunktionen vorgestellt werden. Als Erstes ist die Autokorrelationsfunktion des Geschwindigkeitssignals von Kanal 13 zusammen mit der über die Hitzdrahtsonde bestimmten Funktion ausschnittsweise in der Abb. 8a für die Reynoldszahl 10005 gegeben. Betrachtet wurden nur die Geschwindigkeitsschwankungen, d.h. die mittlere Geschwindigkeit wurde von den Geschwindigkeitsverläufen zuvor abgezogen. Die mit dem Hitzdraht gemessene mittlere Strömungsgeschwindigkeit betrug 22,21 m/s und die mit dem DGV-System gemessene 20,62 m/s. Die geringe Differenz ist plausibel und vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Hitzdrahtsonde den Betrag der Geschwindigkeit in der x-y-Ebene misst, das FM-DGV hingegen nur die Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung. Trotz dieses Unterschieds liegen beiden Kurven sehr gut übereinander. Die Überhöhung der FM-DGV-Messung bei $\tau = 0$ ist durch die größere Rauschleistung begründet, da sich weißes Rauschen in der Autokorrelationsfunktion als Impuls bei $\tau = 0$ mit einem Gewicht identisch der Rauschleistung darstellt. Die Periodendauer der Oszillation beträgt ca. 0,92 ms, was mit der zuvor bestimmten Wirbelablösefrequenz von 1090 Hz konsistent ist.

Es sei der Vollständigkeit halber darauf hingewiesen, dass bei $\tau > 12$ ms die Autokorrelationsfunktionen (vgl. Abb. 8a) von der Hitzdraht- und der FM-DGV-Messung nicht mehr phasensynchron sind. Hierzu findet sich in der Abb. 8b ein weiterer Ausschnitt der Autokorrelationsfunktionen. Obwohl die Korrelation dort weiter abgenommen hat, ist deren Periodizität mit der zuvor genannten Periodendauer nach wie vor klar erkennbar.

In Abb. 8c ist die Kreuzkorrelationsfunktion der Signale des Kanals 13 und des Kanals 15 vom FM-DGV-Messsystem aufgetragen. Die Korrelation der Signale ist erwartungsgemäß schwächer als die Autokorrelationsfunktion in Abb. 8a und das Maximum ist nun bei $\tau \approx 90 \mu\text{s}$. Die Messpositionen liegen in x- und y-Richtung um jeweils 1,58 mm voneinander entfernt, weshalb bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von ca. 20,6 m/s bei gleichförmiger geradliniger Ausbreitung der Strömungsstrukturen die bei Kanal 13 vorliegende Geschwindigkeit ca. 77 μs später bei Kanal 15 auftritt. Die Größenordnung zwischen dem gemessenen und dem grob abgeschätzten Zeitversatz ist somit konsistent, zumal die Strömung im Nachlauf des Zylinders langsamer ist und so den geringfügig größeren Messwert erklärt. Die Periode der Oszillation ist die gleiche wie bei der Autokorrelationsfunktion.

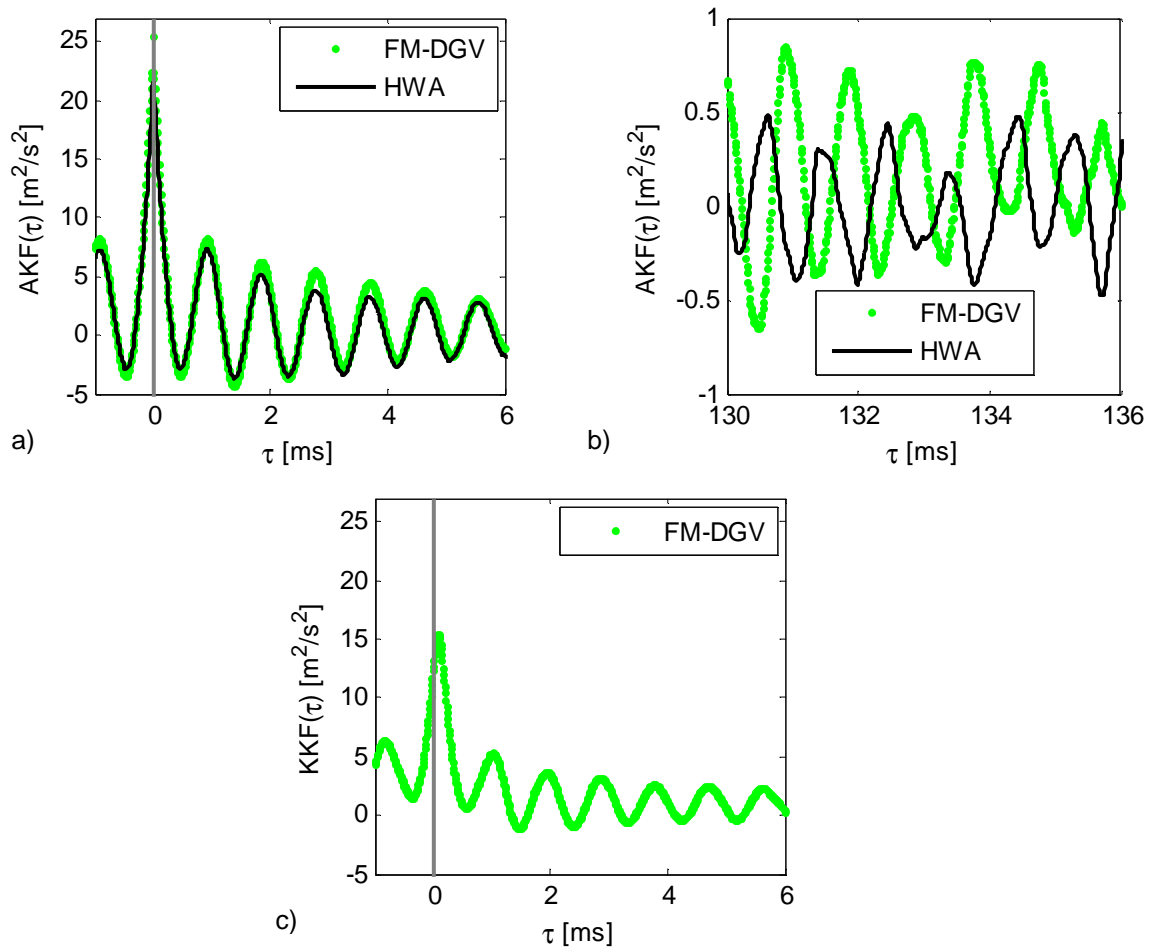


Abb.8: a) + b) Ausschnitte der Autokorrelationsfunktion des Geschwindigkeitsverlaufs vom FM-DGV (Kanal 13) und der Hitzdrahtsonde (HWA) und c) die Kreuzkorrelationsfunktion der Geschwindigkeitsverläufe der Kanäle 13 und 15 der FM-DGV-Messung

B) Zylinderstumpf

In einem Folgeexperiment wurde im Nachlauf eines quer angeströmten Zylinderstumpfs mit dem Durchmesser $D = 2$ cm und der Höhe $H = 2 D$ gemessen (vgl. Abb. 3b). Es handelt sich hierbei um ein verkleinertes maßstabsgetreues Modell des z. B. in Jensch et al. 2007 beschriebenen Zylinderstumpfs, das wegen des geringen Durchmessers der Windkanaldüse angefertigt wurde. Anzumerken ist vorab, dass aufgrund der begrenzten Maximalgeschwindigkeit des Windkanals nicht die gleiche Reynolds-Zahl von 200000 wie bei Jensch et al. 2007 einstellbar war. Vorgestellt werden exemplarisch die von Kanal 14 des FM-DGV-Messsystems aufgenommenen Turbulenzspektren. Die zugehörigen Koordinaten betragen $x = 2,04 D$, $y = -0,46 D$ und $z = H/2$, wobei z den senkrechten Abstand der Messpunkte zur Platte angibt. Für die Anströmgeschwindigkeit 4,6 m/s bzw. 28,9 m/s (Reynolds-Zahlen 6370 bzw. 40021) findet sich das akquirierte Turbulenzspektrum zusammen mit dem einer Hitzdrahtmessung in der Abb. 9a bzw. 9b. Die Spektren sind wieder der Übersichtlichkeit halber über jeweils 10 benachbarte Punkte gemittelt dargestellt. Die Kurven beider Messverfahren liegen bis zu einer Frequenz von 1 kHz bzw. 10 kHz dicht beieinander. Bei höheren Frequenzen dominiert, wie bereits beschrieben, die virtuelle Turbulenz, die im wesentlichen durch das bei der Photodetektion auftretende Rauschen verursacht wird. Die in Abb. 9a sichtbaren Spitzen in der FM-DGV-Messkurve bei rund 600 Hz sind noch nicht abschließend geklärt. Die beiden Abbn. 9a und 9b zeigen deutlich die Verschiedenheit der Strömung bei

den unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten. So nimmt die Leistungsdichte zu und die Strömungsturbulenzen werden hochfrequenter. Bei hohen Geschwindigkeiten ist wieder ein der isotropen Turbulenz gleichartiges Verhalten festzustellen, da die Leistungsdichte in dem Frequenzbereich 200 Hz – 6 kHz wiederum den charakteristischen Anstieg von $-5/3$ aufweist.

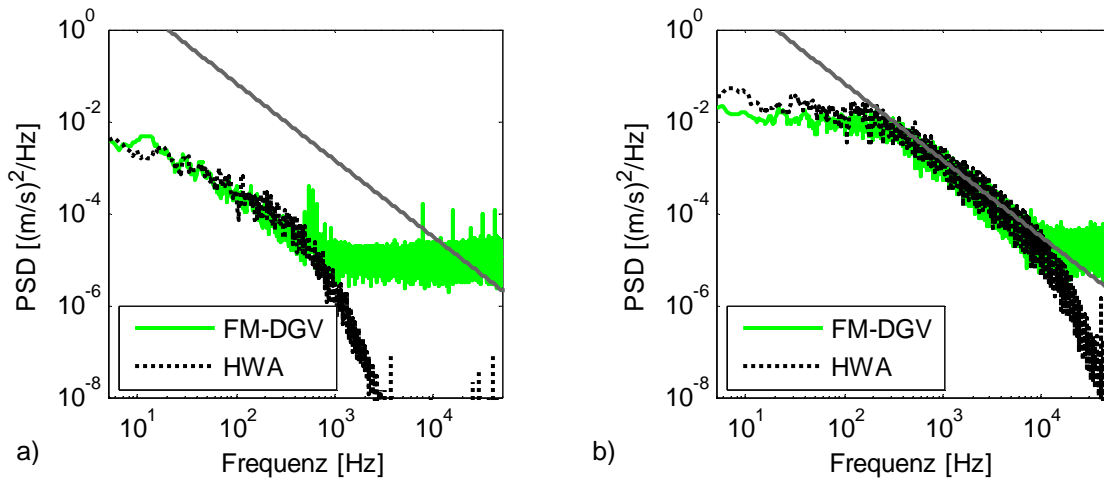


Abb. 9: Messungen im Nachlauf der Umströmung eines Zylinderstumpfs mit dem FM-DGV-Messsystem (Kanal 14) und einer Hitzdrahtsonde (HWA) bei den Anströmgeschwindigkeiten a) 4,6 m/s und b) 28,9 m/s (mittlere Streulichtleistung a) 1,83 nW, b) 1,32 nW)

C) Gitter-Turbulenz

Als letztes Messobjekt diente im Windkanal die Nachlaufströmung eines Gitters (s. Abb. 3c), die häufig als Modell für isotrope Turbulenz verwendet wird. Die Turbulenzspektren des Kanals 13 sind beispielhaft gemeinsam mit denen von Hitzdrahtmessungen in den Abbn. 10a und 10b für die unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten von 9,6 m/s und 19,6 m/s gegeben. Sie zeigen qualitativ einen ähnlichen Verlauf wie die zuvor diskutierten Turbulenzspektren und sollen daher nicht weiter diskutiert werden.

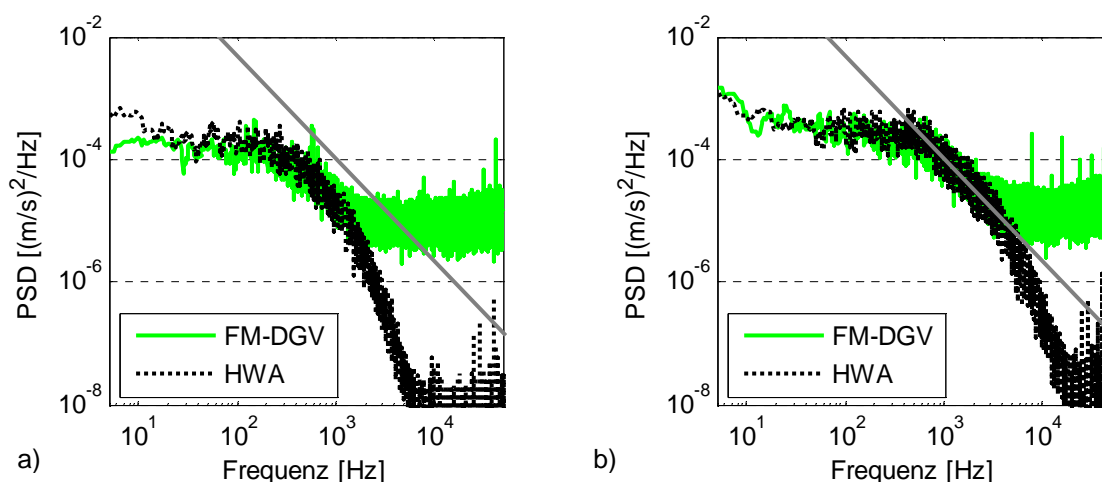


Abb. 10: Messungen im Nachlauf eines Gitters mit dem FM-DGV-Messsystem (Kanal 13) und einer Hitzdrahtsonde (HWA) bei den Anströmgeschwindigkeiten a) 9,6 m/s und b) 19,6 m/s (mittlere Streulichtleistung a) 2,3 nW, b) 1,9 nW)

Ausblickend für den Einsatz des FM-DGV-Messsystems bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten wie z. B. in Turbomaschinen soll abschließend die Vermessung einer instationären Düsenströmung im Labor präsentiert werden. Die Kalibrierung des Messsystems erfolgte analog zu den Messungen im Windkanal an selbiger Düse mittels Druckmessungen und der Bernoulli-Gleichung. Der Durchmesser der Düse beträgt 1 cm und die Messanordnung entspricht dem Aufbau im Windkanal, so dass die Hauptströmungskomponente vermessen wurde. Der Kanal 13 befand sich strömungsmittig ca. 2 cm von Düsenöffnung entfernt. Die Messergebnisse der Kanäle 2-21 sind in der Abb. 11 dargestellt. Die äußeren Kanäle wurden ausgeblendet, weil ihre Messposition deutlich außerhalb der Strömung lag und somit Seedingteilchen nur in geringem Maß vorhanden waren. Infolgedessen streuen die Messungen am Rand sehr stark. Dieses Verhalten ist tendenziell auch der Abb. 11 zu entnehmen, wo die Kanäle in der Mitte der Düsenströmung sichtbar geringere Schwankungen aufweisen als am Rand. Dies verdeutlicht den allgemein bei DGV-Verfahren notwendigen Bedarf von hohen Seedingkonzentrationen. Die mit 100 kHz zeitaufgelöste Geschwindigkeitsprofilmessung zeigt zudem in ausgezeichneter Übereinstimmung mit der manuellen Einstellung der Düsenaustrittsgeschwindigkeit, dass letztere während der Messung zunächst von ca. 60 m/s auf 100 m/s und anschließend auf 70 m/s verändert wurde. Das FM-DGV-Messsystem wurde auf diese Weise bis zu der maximal erreichbaren Strömungsgeschwindigkeit der Düse von 130 m/s erfolgreich getestet.

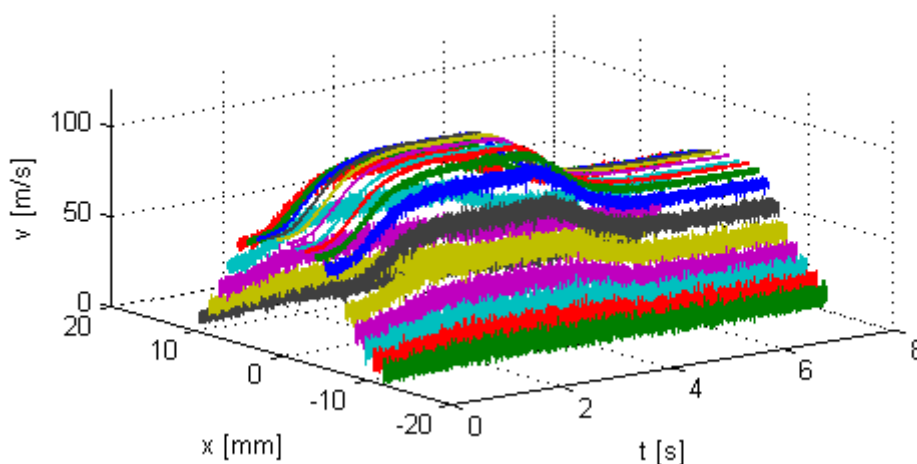


Abb. 11: Orts- und zeitaufgelöste Geschwindigkeitsmessung an einer instationären Düsenströmung (Düsensdurchmesser 1 cm)

Zusammenfassung

Erstmals wurden Turbulenz- und Korrelationsuntersuchungen mittels eines DGV-Verfahren mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) vorgenommen. Das Geschwindigkeitsmessprinzip beruht auf der Detektion der Doppler-Frequenzverschiebung von an bewegten Teilchen gestreutem, schmalbandigem Laserlicht. Hierfür wird das Streulicht mittels 25 fasergekoppelter Lawinenphotodioden durch eine mit Cäsiumgas gefüllte Absorptionszelle hindurch vermessen. Aufgrund der sinusförmigen Laserfrequenzmodulation bei 852,1 nm und der Nichtlinearität der bei dieser Wellenlänge vorliegenden Cäsium D_2 -Linie lässt sich aus dem Amplitudenverhältnis der ersten und zweiten Harmonischen eines Detektorsignals die Verschiebung der Lasermittelfrequenz ableiten. Im Gegensatz zu konventionellen DGV-Verfahren bedarf es hierzu keiner zweiten Kamera, um den Störeinfluss der unbekanntem Streulichtleistung zu korrigieren.

Mit der hohen Bandbreite der Lawinenphotodetektoren im Vergleich zu Kameras und der schnellen Frequenzmodulation mit 100 kHz wurde eine hohe Zeitauflösung von 10 μ s bei simultaner Erfassung von 25 Messpunkten erreicht. Die Ortsauflösung beträgt lateral und axial gegenwärtig 0,93 mm. Die Messunsicherheit hängt von der Leistung des auf einen Detektor fallenden Streulichts sowie der gewünschten Zeitauflösung ab. Beispielsweise beträgt die Standardabweichung der Geschwindigkeit bei einer Messrate von 5 kHz und der typischen Streulichtleistung von 1 nW ungefähr 0,7 m/s. Die Rauschleistungsdichte der Geschwindigkeit beträgt bei einer Streulichtleistung von 1 nW ca. 10^{-4} $\text{m}^2/(\text{s}^2 \text{ Hz})$ und ist unabhängig von der Zeitauflösung. Folglich können in Turbulenzspektren dargestellte Oszillationen bis zu dieser Leistungsdichte gemessen werden. Die Speicherkapazität des Datenerfassungssystems gestattet derzeit 8 s lange, unterbrechungsfreie Messungen. Damit können Turbulenzspektren mit der Frequenzauflösung von 0,125 Hz gemessen werden, wodurch etwaige Wirbelfrequenzen präzise feststellbar sind. Korrelationsuntersuchen können sowohl örtlich (25 Elemente) als auch zeitlich (max. 8 s Zeitversatz) erfolgen.

Als Beweis für diese Leistungsfähigkeit des FM-DGV-Messsystems wurden Messungen im Nachlauf eines Zylinders, eines Zylinderstumpfs und eines Gitters durchgeführt und mit den Messungen einer Hitzdrahtsonde erfolgreich validiert. Beispielsweise konnten in der Kármán'schen Wirbelstraße Wirbelablösefrequenzen bis ca. 1,1 kHz beobachtet werden, die mit den in der Literatur beschriebenen Strömungsverhalten übereinstimmt, und der Hypothese von Kolmogorov folgend wurde ein Anstieg des Turbulenzspektrums im doppelt-logarithmischen Maßstab zu $-5/3$ bestimmt. Es konnten Turbulenzspektren bis ca. 10 kHz aufgelöst werden. Zusätzlich wurden zeitliche Korrelationsuntersuchungen der Geschwindigkeit an einem Messpunkt und von zwei örtlich verschiedenen Messpunkten vorgestellt. Der Einsatz des FM-DGV-Messsystems zur Erfassung kleiner Geschwindigkeiten (< 1 m/s) wurde anhand der Geschwindigkeitsfeldmessung einer Zylindernachlaufströmung illustriert. Die zukünftig anvisierte Untersuchung von Strömungen mit hoher kinetischer Energie ist hingegen durch Geschwindigkeitsprofilmessungen an einer Freistrahelströmung mit bis zu 130 m/s erfolgreich getestet worden. Im Ergebnis liefert das FM-DGV-Messsystem neue Impulse für die Turbulenz- und Korrelationsuntersuchungen komplexer Strömungen.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Prof. Roger Grundmann, Herrn Dr. Veit Hildebrand und Herrn Jürgen Frey (Institut für Luft- und Raumfahrt, TU Dresden) für die tatkräftige experimentelle Unterstützung bei den Windkanalversuchen. Des Weiteren sei Herrn Dr. Martin Brede (Lehrstuhl Strömungsmechanik, Universität Rostock) für die hilfreichen Hinweise bei der Untersuchung der Zylinderumströmung herzlich gedankt. Zudem gilt 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) unser besonderer Dank.

Literatur

Brede, M., Leder, A., 2004: „Frequenz- und Strukturanalyse des instationären Zylindernachlaufs in der Transition mit Hilfe von LDA und TR-PIV Messdaten“, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik – 12. Fachtagung, Tagungsband, Beitrag 15.1-15.7, veröffentlicht von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie, ISBN 3-9805613-1-3

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2009a: „Measurements of velocity spectra using time-resolving Doppler global velocimetry with laser frequency modulation and a detector array“, Exp. Fluids, DOI 10.1007/s00348-009-0640-7 (13pp)

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2009b: „Array Doppler Global Velocimeter with Laser Frequency Modulation for Turbulent Flow Analysis – Sensor Investigation and Application“, in „Imaging Measurement Methods for Flow Analysis“ (Hrsg.: W. Nitzsche, C. Dobriloff), S. 31-41, Berlin, Springer, ISBN 978-3-642-01105-4

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2008a: “Considerations on measurement uncertainty and temporal resolution of Doppler global velocimetry using laser frequency modulation“, Applied Optics, Vol. 47, No. 20, S. 3941-3953

Fischer, A., König, J., Czarske, J., 2008b: „Speckle noise influence on measuring turbulence spectra using time-resolved Doppler global velocimetry with laser frequency modulation“, Meas. Sci. Technol., Vol. 19, Nr. 125402 (15pp)

Jensch, M., Brede, M., Hüttmann, F., Leder, A., Frederich, O., Wassen, E., Thiele, F., 2007: „Time-Resolved Stereo-PIV Messungen im Kopfbereich und Nachlauf eines Kreiszylinderstumpfes“, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik – 15. Fachtagung, Tagungsband, Beitrag 19.1-19.7, veröffentlicht von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie, ISBN 978-3-86009-007-7

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

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

Voges, M., Beversdorff, M., Willert, C., Krain, H., 2007: „Application of particle image velocimetry to a transonic centrifugal compressor“, Exp. Fluids, Vol. 43, S. 371-384

Wernet, M. P., 2007: „Temporally resolved PIV for space–time correlations in both cold and hot jet flows“, Meas. Sci. Technol., Vol. 18, S. 1387-1403

Willert, C., Roehle, I., Schodl, R., Dingel, O., Seidel, T., 2002: „Application of Planar Doppler Velocimetry within Piston Engine Cylinders“, 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 8.-11. Juli 2002, Lissabon, Portugal, Paper Nr. 38-2 (10pp)

Zdravkovich, M. M., 1997: „Flow around circular cylinders - Vol. 1: Fundamentals“, Oxford, Oxford University Press