

Ortsaufgelöste Vermessung turbulenter Scherströmungen mittels Laser-Doppler-Profilesensor

¹Czarske, J., ¹Büttner, L., ¹Razik, T.,
²Müller, H., ²Dopheide, D., ³Becker, S., ³Lienhart, H., ³Durst, F.

¹Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH)
Gruppe Messtechnik

Hollerithallee 8, 30419 Hannover

²Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
Fachbereich Fluidmechanik

Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

³Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg,
Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSTM)
Cauerstr. 4, D-91058 Erlangen

Einleitung

Die Vermessung von Scherströmungen mit starkem Geschwindigkeitsgradienten ist von großer Bedeutung sowohl für die Grundlagenforschung als auch für die Entwicklung von Produkten. Scherströmungen liegen z.B. bei Tragflügeln, Turbinenschaufeln, Einspritzdüsen, Mikrokanälen, Blutpumpen, Stents und Herzklappen vor. Deren messtechnische Erfassung erfordert Verfahren mit hoher Ortsauflösung. Verschiedene Lasermessverfahren wurden hierfür qualifiziert. Zu nennen sind kamera-basierte Verfahren wie die Particle-Image-Velocimetrie (PIV), die unter Nutzung von Mikroskop-Objektiven eine Ortsauflösung im Mikrometerbereich erreichen (sog. μ -PIV [1, 2]). Die Datentransferrate von Kameras limitiert aber die Zeitauflösung auf typisch einige kHz und es liegen für μ -PIV kleine Arbeitsabstände vor. Weiterhin liegt die virtuelle Turbulenzintensität bei typisch 1%. Diese Begrenzungen können mit dem Laser-Doppler-Velocimeter (LDV) - Messverfahren überwunden werden.

Die mit LDV-Sensoren erreichte Ortsauflösung von ca. 50 μm ist durch die Größe des Detektions- bzw. Messvolumens gegeben. Für die Erfassung von steilen Scherschichten ist eine deutlich höhere Ortsauflösung erforderlich. Besonders gilt diese Forderung für die Vermessung von turbulenten Scherschichtströmungen [3, 4]. In der Umgebung der Objektoberfläche kann die vorliegende Scherströmung mit einer Grenzschicht beschrieben werden [5]. Die Dicke einer Grenzschicht wird mit zunehmender Geschwindigkeit der freien Strömung verkleinert und liegt oft im Submillimeterbereich. Eine hohe Ortsauflösung der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsmessung wurde mit der Verkleinerung des Detektions- bzw. Messvolumens z.B. durch Blenden, starke Fokussierung und große Überlagerungswinkel sowie örtlich inkohärentes Licht erreicht [6-8]. Es konnten quasi-punktförmige Messungen mit einer Ortsauflösung von typisch 50 μm durchgeführt werden.

Eine grundlegend neuartige Möglichkeit zur Erfassung von Scherströmungen ist die ortsaufgelöste Geschwindigkeitsmessung innerhalb des Messvolumens. Basierend auf zwei symmetrisch angeordneten Referenz-Laser-Doppler-Sensoren wurde innerhalb einer Länge von ungefähr 6 mm eine Ortsauflösung von ungefähr 30 μm erreicht [9]. Gegenüber quasi-punktförmigen Messungen ist für die Erfassung des Geschwindigkeitsprofils ein Abtastvorgang mit einer Traversierung nicht erforderlich. Es liegt eine ortskontinuierliche Messung vor, die auch den Aliasing-Effekt vermeidet. Aliasing ist aus der zeitdiskreten Signalverarbeitung bekannt [10]. Übertragen auf die Messung ortsabhängiger Größen wie der

1.2

Geschwindigkeit tritt Aliasing auf, wenn der Abstand der Messpunkte größer als die halbe Periode der örtlichen Geschwindigkeitsänderung ist. Eine kontinuierliche Messung weist demgegenüber eine gleitende Mittelung auf [11] und vermeidet ähnlich wie ein Anti-Aliasing-Tiefpassfilter eine Fehlabtastung. Damit sind die Voraussetzungen für eine Aliasing-freie Geschwindigkeitsprofilmessung von z.B. turbulenten Rohrströmungen gegeben.

Eingegangen wird auf die Qualifizierung eines neuartigen LDV-Profilsensors nach der Differenz-Technik zur zeitaufgelösten Geschwindigkeitsmessung von Scherströmungen mit Mikrometer-Ortsauflösung. Das Messverfahren basiert auf einer Vergleichsmessung unter Nutzung von zwei Laserwellenlängen. Mit der damit erreichten Bestimmung der Position und Geschwindigkeit von einzelnen Streuteilchen im LDV-Messvolumen wird das Geschwindigkeitsprofil ohne mechanisches Scannen erfasst. Die hohe Ortsauflösung des Profilsensors erlaubt kleinste Wirbel im Bereich der Kolmogorov-Mikroskala aufzulösen. Mit der Nutzung von modernen Kalibrationsverfahren können darüber hinaus präzise Messungen von Geschwindigkeitsschwankungen bis zu einer Turbulenzintensität von ca. 0,01% durchgeführt werden.

Laser-Doppler-Profilsensor

Die das Messvolumen passierenden Streuteilchen erzeugen Burst-Signale, die vereinfacht als ein Abbild des resultierenden Interferenzstreifensystems aufgefasst werden können. Die Frequenz f des Messsignals folgt mit dem Streifenabstand d für eine geradlinige Trajektorie des Streuteilchens entlang der x-Achse des Messvolumens mit der Geschwindigkeit u

zu: $f = \frac{u}{d}$ [12]. Konventionell kann eine Diskriminierung von Trajektorien für verschiedene

z-Positionen nicht vorgenommen werden. Es wird eine integrale Erfassung der Trajektorien für das gesamte Messvolumen erhalten. Für die Auflösung von Geschwindigkeitsänderungen ist daher ein kleines Messvolumen erforderlich. Eine Verkleinerung des Messvolumens ist aber begrenzt, da für die Doppler-Frequenzmessung mittels der FFT-Signalverarbeitungstechnik (FFT: Fast Fourier Transformation) eine ausreichende Anzahl von Signalperioden bzw. Streifen benötigt wird. Weiterhin wird mit einem kleineren Durchmesser des Laserstrahls dessen Divergenz erhöht, so dass sich die Variation des Streifenabstands entlang der z-Achse vergrößert (sogenannter virtueller Turbulenzgrad). Mit der Nutzung von Blenden in der Empfangsoptik kann eine Verkleinerung des Detektionsvolumens vorgenommen werden, es ist aber in der Regel ein seitlicher optischer Zugang erforderlich und es liegt eine Begrenzung der Ortsauflösung durch das Abbesche Beugungslimit vor.

Eine Alternative ist die ortsaufgelöste Messung des Geschwindigkeitsprofils innerhalb des Messvolumens. Die Grundidee basiert auf einer systematischen Verzerrung des Interferenzstreifensystems, so dass sich ein variierender Streifenabstand ergibt. Damit ist die Frequenz des Messsignals auch von der Position des Streuteilchens abhängig. Es kann aber keine Trennung zwischen der Position und der Geschwindigkeit vorgenommen werden, so dass eine systematische Messabweichung vorliegt. Bekanntermaßen kann eine systematische Messabweichung mit einer Korrektur beseitigt werden. Mit zwei unterscheidbaren Interferenzstreifensystemen ist diese Forderung zu erfüllen [13]. Die Auswertung der Frequenzen der resultierenden zwei Signale ermöglicht die Bestimmung der Position und Geschwindigkeit von einzelnen Streuteilchen im Messvolumen. Mit einem präzisen Kalibrationsverfahren [14] und einer optimierten Signalverarbeitungstechnik [15] wird eine Ortsauflösung von 1,6 μm im Zentrum des Messvolumens erreicht [16].

Bild 1 zeigt das Grundprinzip des Laser-Doppler-Profilsensors. Es beruht auf der Erzeugung von divergierenden und konvergierenden Interferenzstreifensystemen. Mit verschiedenen Laserwellenlängen wird eine getrennte Auswertung der erzeugten Signale erreicht.

Zur Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils, ist die Position und Geschwindigkeit von einzelnen Streupartikeln zu erfassen. Die Position des Streuteilchens wird mit dem Quotienten der gemessenen Doppler-Frequenzen f_1 and f_2 , d.h. der Kalibrationsfunktion erhalten:

$$q(z) = \frac{f_2(z,u)}{f_1(z,u)} = \frac{u(z)/d_2(z)}{u(z)/d_1(z)} = \frac{d_1(z)}{d_2(z)}. \quad (1)$$

Die Doppler-Frequenz ergibt sich zu $f_i = u / d_i$, ($i = 1, 2$), mit u als x-Komponente der Geschwindigkeit.

Der Streifenabstand d_i ($i = 1, 2$) bezieht sich auf die Interferenzstreifensysteme unterschiedlicher Laserwellenlänge.

Mit der bestimmten Position des Streuteilchens im Messvolumen sind die aktuellen Streifenabstände durch die Kalibrationsfunktionen bekannt, und es kann die Geschwindigkeit berechnet werden:

$$u(y) = f_1(z,u) \cdot d_1(z) = f_2(z,u) \cdot d_2(z). \quad (2)$$

Mit einer Wiederholungsmessung von Streuteilchen, die örtlich statistisch verteilt das Messvolumen durchlaufen, wird das Geschwindigkeitsprofil erhalten.

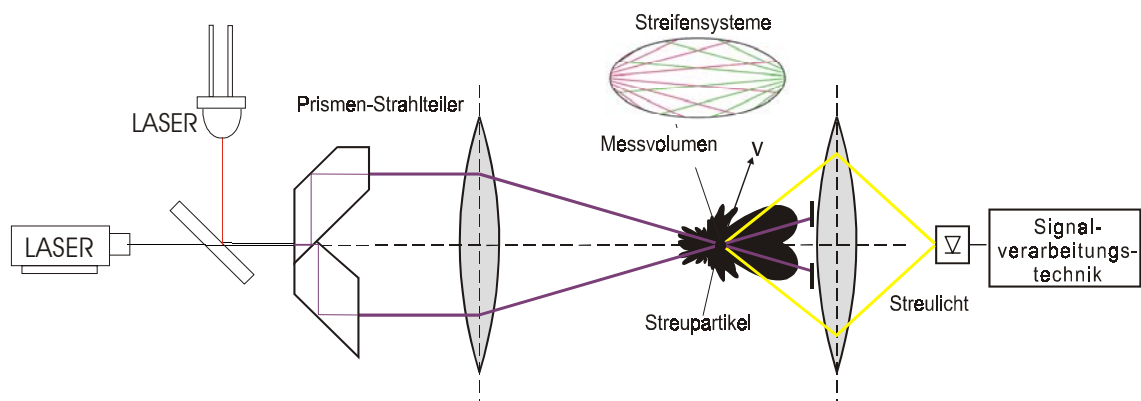


Bild 1: Aufbau des LDV-Profilsensors.

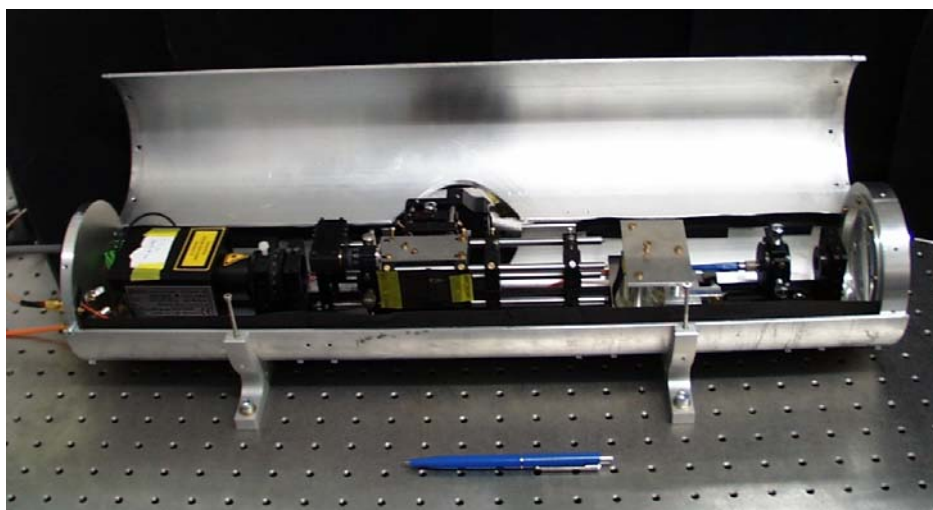


Bild 2: Ansicht des LDV-Profilsensors.

1.4

Die Bilder 1 und 2 zeigen den realisierten LDV-Profilesensor. Eingesetzt wurde eine Laserdiode mit 50 mW @ 658 nm und ein Nd:YAG Laser mit 100 mW @ 532 nm. Nach einer kollinearen Überlagerung der Laserstrahlen werden zwei Interferenzstreifensysteme erzeugt, Bild 3. Bild 4 zeigt deren Streifenabstände in Abhängigkeit von der z-Koordinate. Bild 5 stellt die resultierende Kalibrationsfunktionen dar, siehe Gl. (1). Es wurden Glasplatten unterschiedlicher Dicke vor das Messvolumen plaziert, um den Einfluss von Abschlussfenstern von z.B. Windkanälen auf die Kalibrationsfunktion zu untersuchen. Aufgrund von Brechung der Laserstrahlen verschiebt sich der geometrisch-optische Kreuzungspunkt, so dass das Zentrum des Messvolumens entlang der z-Achse verschoben wird. Zusätzlich wird aufgrund der optischen Dicke der Platten die Lage der Strahltaillen des Gaußschen Strahles in die entgegengesetzten Richtung verschoben. Mit der Einbeziehung der Glasplatten bei der Kalibrationsprozedur werden diese Verschiebungen erfasst und präzise Strömungsmessungen ermöglicht.

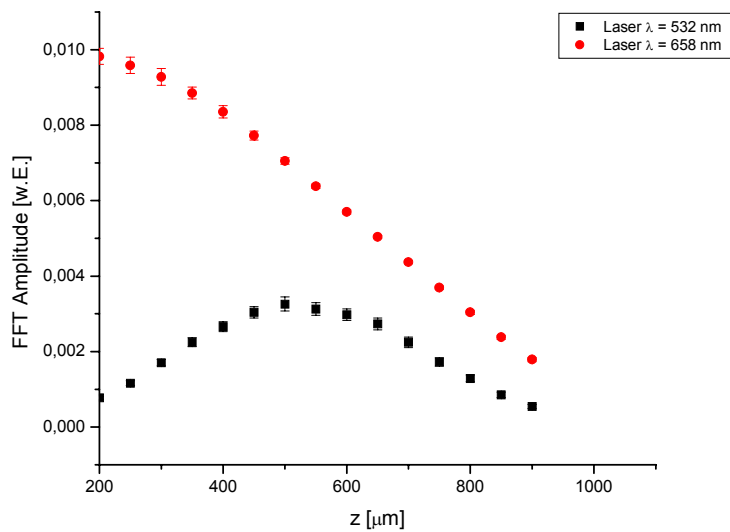


Bild 3: Signalamplitude der beiden Messkanäle in Abhängigkeit von der z-Position.

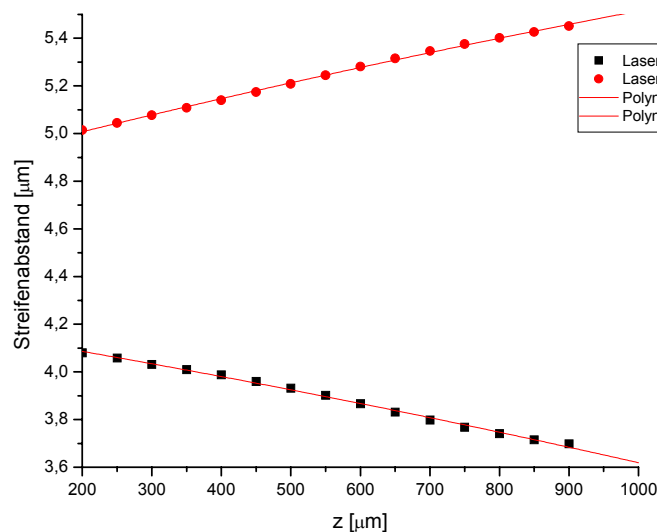


Bild 4: Interferenzstreifenabstände für die beiden Laserwellenlängen in Abhängigkeit von der z-Position.

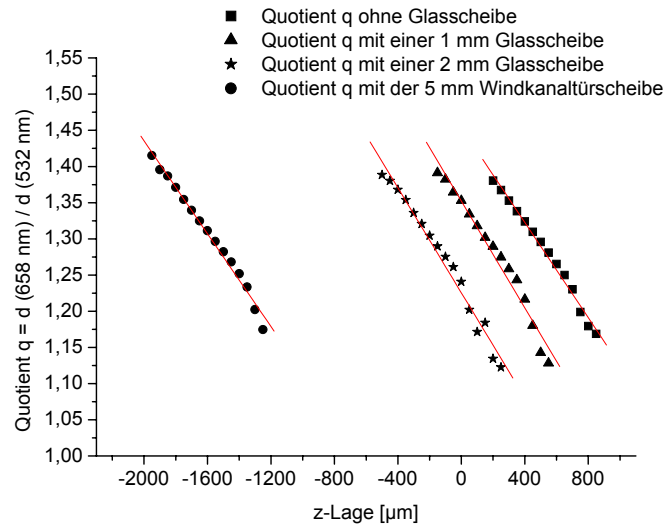


Bild 5: Kalibrationsfunktion des LDV-Profilsensors für Glasplatten verschiedener Dicke vor dem Messvolumen.

Geschwindigkeitsmessung einer freien Strömung mit dem Profilsensor

Der Profilsensor wurde für die Untersuchung von Windkanälen eingesetzt. In Bild 6 ist die mittlere Geschwindigkeit und der Turbulenzgrad eines Eiffel-Windkanals dargestellt. Aus den Messungen kann der optimale Betriebsbereich mit kleinem Turbulenzgrad ermittelt werden.

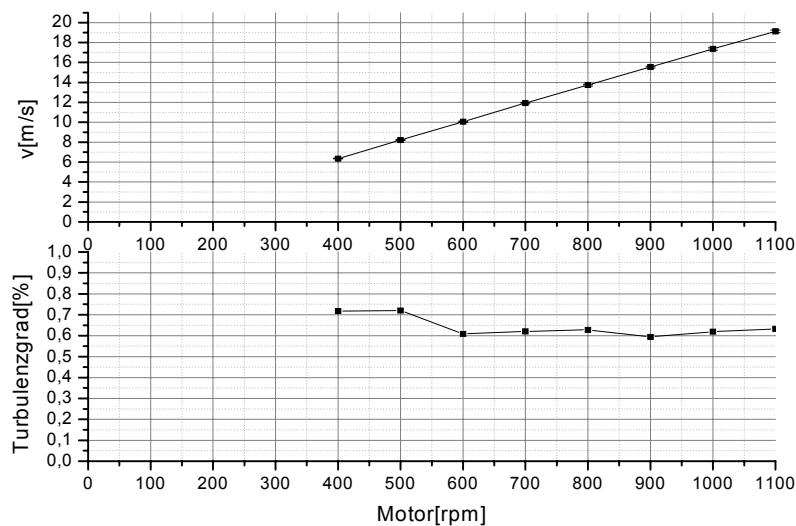


Bild 6: Präzise Vermessung eines Eiffel-Windkanals der PTB. Dargestellt ist die mittlere Geschwindigkeit (oben) und der Turbulenzgrad (unten) für verschiedene Motordrehzahlen des Windkanals.

Geschwindigkeitsmessungen von wandgebundenen Strömungen mit dem Profilsensor

Der LDV-Profilsensor wurde für die Vermessung von Grenzschichtströmungen in einem Windkanal Göttinger Bauart eingesetzt. Zunächst wurde eine laminare Scherströmung untersucht, siehe Bild 7. Eine hervorragende Übereinstimmung der zeitgemittelten Messwerte des Profilsensor mit denen eines Hitzdraht-Sensors liegt vor. Nachfolgend wurde mit der Einbringung von Hindernissen eine turbulente Scherströmung erzeugt. Das Bild 8 zeigt eine orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessung der turbulenten Grenzschicht. Die Messrohdaten wurden Slots mit einem Positionsintervall von $10\ \mu\text{m}$ zugeordnet und hinsichtlich des 1. Moments (Zeitmittelwert) und 2. Moments (Standardabweichung) ausgewertet. Das Bild 9 zeigt die gute Übereinstimmung der Profilsensor-Messungen für den Zeitmittelwert mit Hitzdraht-Messungen.

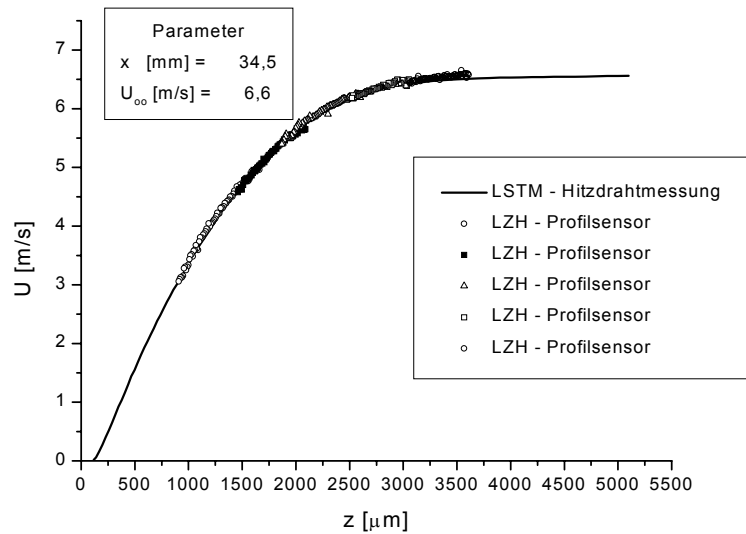


Bild 7: Ortsaufgelöste Vermessung einer laminaren Plattengrenzschicht im Windkanal Göttinger Bauart des LSTM. Eine zusätzliche Traversierung wurde zur Vergrößerung des örtlichen Messbereichs vorgenommen. Eine hervorragende Übereinstimmung der zeitgemittelten Messwerte des Profilsensor mit denen eines Hitzdraht-Sensors liegt vor.

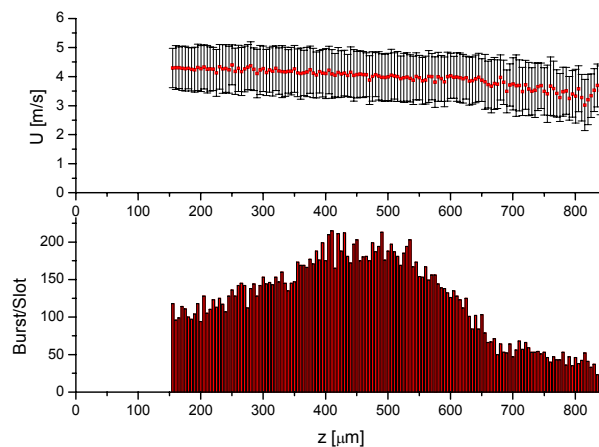


Bild 8: Ortsaufgelöste Vermessung einer turbulenten Grenzschichtströmung im Windkanal Göttinger Bauart des LSTM. Oben: Rohdaten; unten: Anzahl der Messwerte pro Slotintervall von $10\ \mu\text{m}$.

Das Bild 10 zeigt die Veränderung des zeitgemittelten Geschwindigkeitsprofils und des Turbulenzgradprofils (relative Standardabweichung) vor und nach der Einbringung von Sandpapier in die Einlaufstrecke, d.h. für eine laminare und eine turbulente Scherströmung.

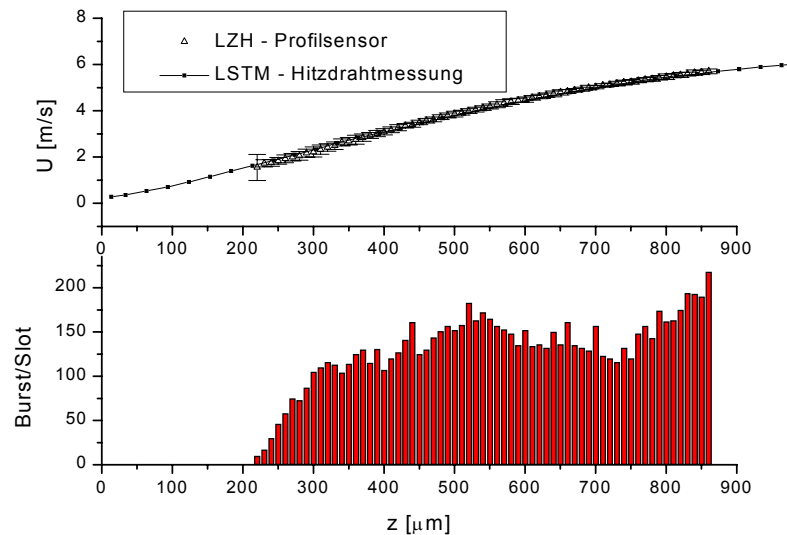


Bild 9: Ortsaufgelöste Vermessung einer turbulenten Grenzschicht im Windkanal Göttinger Bauart des LSTM mit dem Profilsensor im Vergleich zu einem Hitzdraht-Sensor. Oben: Rohdaten des Profilsensors; unten: Anzahl der Messwerte pro Slotintervall von $10 \mu\text{m}$.

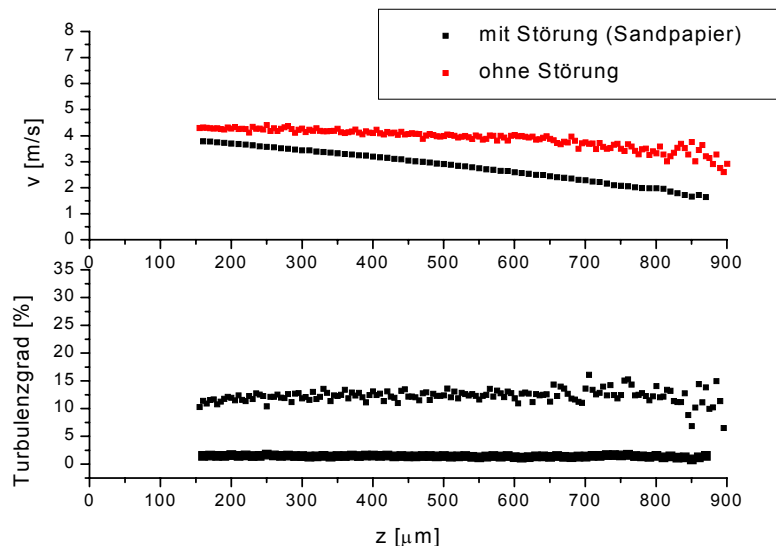


Bild 10: Ortsaufgelöste Vermessung einer Grenzschichtströmung im Windkanal Göttinger Bauart des LSTM mit dem Profilsensor: Vergleich zwischen einer laminaren Scherströmung (ca. 0,35% Turbulenzgrad) und einer turbulenten Scherströmung (ca. 12% Turbulenzgrad).

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde auf die Qualifizierung eines Differenz-Laser-Doppler-Profilsensors für die Vermessung von turbulenten Grenzschichtströmungen eingegangen. Der Profilsensor

wurde mit der Vermessung der Grenzschicht einer umströmten, ebenen Glasplatte verifiziert. Die gemessenen Geschwindigkeitsprofile sind in sehr guter Übereinstimmung mit den Daten eines Hitzdraht-Sensors. Erstmals wurde die Eignung des Profilsensors für die Vermessung von turbulenten Scherströmungen gezeigt. Die Erweiterung des Profilsensors ermöglicht mehrdimensionale, bildgebende Geschwindigkeitsmessungen von turbulenten Grenzschichtströmungen.

Die Arbeiten wurden teilweise durch die DFG unterstützt.

Literatur:

- [1] Meinhart, C., Wereley, S., Santiago, J.: PIV measurements of a microchannel flow; Exp. in Fluids, 27, S.414-419, 1999
- [2] Meinhart, C., Zhang, H.: The flow structure inside a microfabricated inkjet printhead; Journal of microelectromechanical systems, Vol. 9, No. 1, S.67-75, 2000
- [3] Durst F, Kikura H, Lekakis I, Jovanovic J, Ye Q: Wall shear stress determination from near-wall mean velocity data in turbulent pipe and channel flows; Exp. in Fluids, 20, S.417-428, 1996
- [4] Fischer, M., Jovanovic, J., Durst F.: Reynolds number effects in the near-wall region of turbulent channel flows; Physics of Fluids, Vol.13, No.6, S.1755-1767, 2001
- [5] Schlichting H und Gersten K: Grenzschicht-Theorie, Springer, Berlin, 1997
- [6] Mazumder MK, Wanchoo S, McLeod P C, Ballard G S, Mozumdar S and Caraballo N: Skin friction drag measurements by LDV; Appl. Opt. 20, 2832-7, 1981
- [7] Tieu AK, Mackenzie MR and Li EB: Measurements in microscopic flow with a solid-state LDA, Exp. Fluids, Vol.19, S.293-294, 1995.
- [8] Büttner L, Czarske J: A multimode-fibre laser-Doppler anemometer for highly spatially resolved velocity measurements using low coherence light, Measurement, Science and Technology, 12, S.1891-1903, 2001
- [9] Strunck V, Müller H, Dopheide D: Traversionsfreie LDA-Grenzschichtmessungen mit Mikrometerraufösung im Meßvolumen, 6th Conf. Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik (Essen, 28th-30th September 1998, ed. W. Merzkirch et al.) pp. 28.1-28.11
- [10] Profos, P. und Pfeifer, T: Grundlagen der Messtechnik, erschienen im Oldenbourg Verlag, München, 1992
- [11] Czarske, J., Zawischa, I. und Tünnermann, A.: Distributed Brillouin temperature OTDR fiber sensor using powerful all-solid-state lasers, Proc. 12th Intern. Conf. On Optical Fiber Sensors - OFS, 28-31.11.1997, Williamsburg, USA
- [12] Albrecht, H., Borys, M., Damaschke, N., Tropea, C.: Laser-Doppler and phase-Doppler measurement techniques, Springer, Heidelberg, 2002
- [13] Czarske J: Laser Doppler velocity profile sensor using a chromatic coding, Measurement, Science and Technology, 12, S.52-57, 2001
- [14] Müller H, Kramer R, Strunck V, Mickan B, Dopheide D: Laser-Doppler-Anemometer zur Darstellung und Weitergabe der Einheit Strömungsgeschwindigkeit, 9th conference Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Winterthur, Schweiz, 18.-20.9.2001, S. 24.1-24.8
- [15] Czarske J: Statistical frequency measuring error of the quadrature demodulation technique for noisy single-tone pulse signals, Meas. Sci. Technol., Vol.12, No.5, May 2001, S.597-614.
- [16] Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., Müller, H.: Boundary layer velocity measurements with a spatially-resolving laser Doppler profile sensor, Meas. Sci. Technol., S.1979-1989, 2002.