

ENTWICKLUNG EINES MINIATURISIERTEN LDA FÜR GRENZSCHICHT-UNTERSUCHUNGEN

DEVELOPMENT OF A MINIATURIZED LASER DOPPLER VELOCIMETER FOR BOUNDARY LAYER INVESTIGATIONS

L. Jehring*, H. Albrecht**, T. Otto***, S. Fischer*, V. Motuz*, C. Egbers*, O. Raitza**, C. Schramm***

* Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre (LAS), BTU Cottbus
Siemens-Halske-Ring 14, D-03046 Cottbus, Germany

** LOPTEK Optical Fibers, Oberlandstraße 13-14, D-12099 Berlin, Germany

*** OECA Opto-Electronic Components and Applications, Handwerkerstraße 13, D-15366
Hoppegarten, Germany

Schlagworte: turbulente Grenzschichten, viskose Unterschicht, LDA

Key words: turbulent boundary layers, viscous sub-layer, LDV

Abstract

Ein wesentlicher Teil des Widerstands von umströmten Körpern resultiert aus der Wandreibung. Deshalb kommt der genauen Bestimmung der Wandschubspannung, also der Geschwindigkeitsänderung an der Wand innerhalb der viskosen Unterschicht auch an schwer zugänglichen Messpositionen eine besondere Bedeutung zu. Wir berichten über die Entwicklung eines LDA-Systems zur Bestimmung des wandnahen Geschwindigkeitsprofils (1 Geschwindigkeitskomponente) mit Messvolumina in der Größenordnung des Kolmogorowschen Mikromaßstabs mit der Möglichkeit der oberflächenbündigen Implementierung des Messsystems in die Körperoberfläche.

Motivation

Unterschiedliche experimentelle und numerische Verfahren zur Bestimmung des Wandreibungskoeffizienten

$$c_f = \int \frac{\tau_w}{1/2 \rho U_\infty^2} dy$$

über die Wandschubspannung

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0}$$

stehen zur Verfügung. Hierbei sind U_∞ die Geschwindigkeit der freien Strömung, μ die dynamische Viskosität, y der Wandabstand und u die mittlere Strömungsgeschwindigkeit tangential zur Wand.

Direkte numerische Simulation (DNS) liefert Ergebnisse nur für kleinere Reynolds-Zahlen Re , die Verwendung von Turbulenzmodellen bei großen Reynolds-Zahlen erfordern selbst Annahmen über das Verhalten in Wandnähe.

Experimentell kann die Wandschubspannung auch bestimmt werden über die Druckdifferenz an der Wand (Preston-Rohr, Druckänderung in Strömungsrichtung, Stanton-Manometer oder Zaunsonden), über direkte Messungen mittels in die Wand integrierte Sensorelemente, über thermische Verfahren (mittels Hitzdraht- und Heißfilm-Messtechnik oder Infrarot-Thermographie), elektrochemische und optische Verfahren (Ölfilm-Interferometrie, Flüssigkristalle sowie LDA und PIV). Nicht zuletzt kann die Wandschubspannung aus der Kenntnis des Geschwindigkeitsprofils in der viskosen Unterschicht oder des logarithmischen Bereichs bestimmt werden. Siehe im dazu im Detail z.B. Tropea et al. 2007, Tavoularis 2005, Kornilov et al. 2002, Sheplak et al. 2004. LDA und PIV haben den Vorteil, die Strömung nicht zu beeinflussen, erfordern jedoch wie auch die anderen Methoden die Untersuchung der viskosen Unterschicht $y^+ = \frac{y}{\mu} \sqrt{\rho \cdot \tau_w} < 5$ bzw. $y < 100\mu m$ mit einer Auflösung in der Größenordnung des Kolmogorowschen Mikromaßstabs, also der Ausdehnung der kleinsten Turbulenzstrukturen

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \approx L \cdot (Re)^{-3/4}$$

in der Größenordnung von $\mathcal{O}(10\mu m)$, wobei L ein makroskopischer Längenmaßstab, ν die kinematische Viskosität und ε die spezifische Dissipationsrate sind.

Messaufbau

Zur Erreichung der notwendigen räumlichen Auflösung von $10\mu m$ in Wandnähe bis $100\mu m$ Wandabstand und mehr benutzt man vielfach die Eigenschaften divergierender Interferenzstreifenmuster, siehe Czarske et al. 2002, Modarress et al. 2006, Lowe et al. 2009. In der vorliegenden Arbeit wird dagegen das klassische Prinzip paralleler Interferenzmuster weiter entwickelt zu Messvolumengrößen vergleichbar mit der Kolmogorow-Länge in typischen turbulenten Unterschallströmungen, siehe Jehring et al. 2007. Der oberflächenbündig in den Messkörper integrierte Messkopf kann weiterhin relativ zur Körperoberfläche bis zu $20mm$ Abstand von dieser traversiert werden, damit wird das Mess-/Detektionsvolumen zur Erfassung der gesamten Grenzschicht von der viskosen Unterschicht über diesen Bereich bewegt. Die Anordnung arbeitet nach dem Rückstreuverfahren.

Abb. 1 zeigt eine schematische Darstellung des Messprinzips. Um mit klassischen LDA-Anordnungen (oben links) insbesondere an weiter entfernten Stellen messen zu können, ergeben sich Messvolumenlängen im Bereich von Millimetern und größer in Abhängigkeit von der notwendigen Brennweite der Sende- und Empfangsoptik. Im Gegensatz dazu wird in der neuen Anordnung das Messvolumen durch die Körperoberfläche (z.B. Glasplatte mit $0,2...1,0$ mm Dicke bei einem Durchmesser von derzeit $50...90mm$) hindurch erzeugt, so dass jetzt dessen Längsachse senkrecht zur Körperoberfläche positioniert ist.

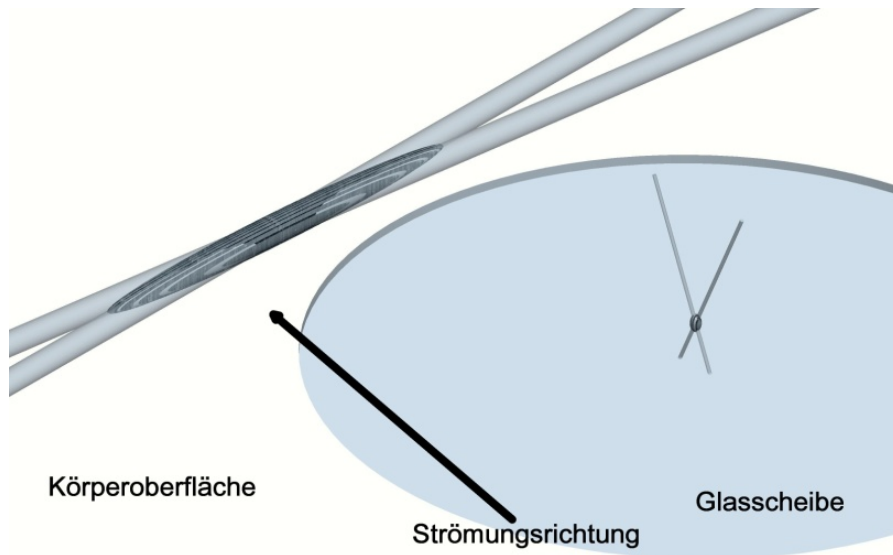


Abb. 1: Qualitative Darstellung der Größenverhältnisse und der Prinzipanordnung des neuen Verfahrens (über Glasscheibe) im Vergleich zu einem klassischen Anwendungsfall (links oben).

Zur Zeit wird ein HeNe-Laser mit einer Wellenlänge 633nm, Leistung 12mW (THORLABS HRP 120-1) verwendet, die Halbwinkel liegen in Abhängigkeit von der Konfiguration bei 19,5° (LM_11) bis 23,5° (LM_10). Der Achsenabstand der Laserstrahlen liegt zwischen 6mm und 16mm, LM_10 beträgt der Streifenabstand dabei ca. 0,8 μ m.

Es werden Messvolumenlängen von < 30 μ m erreicht bei Messvolumendicken von ca. 10 μ m. Damit ist hier die räumliche Auflösung in Wandnormalenrichtung um ein Mehrfaches kleiner als in der klassischen Anordnung, in Tangentialrichtung sogar bis um den Faktor 100 kleiner. Ein typischer klassischer Fall mit einer Brennweite von 310mm ergibt ein Messvolumen von ca. 2400x140x140 μ m³ im Vergleich zu ca. 10x30x10 μ m³ bei analoger Anordnung des Messvolumens zur Strömungsrichtung (Abb. 1).

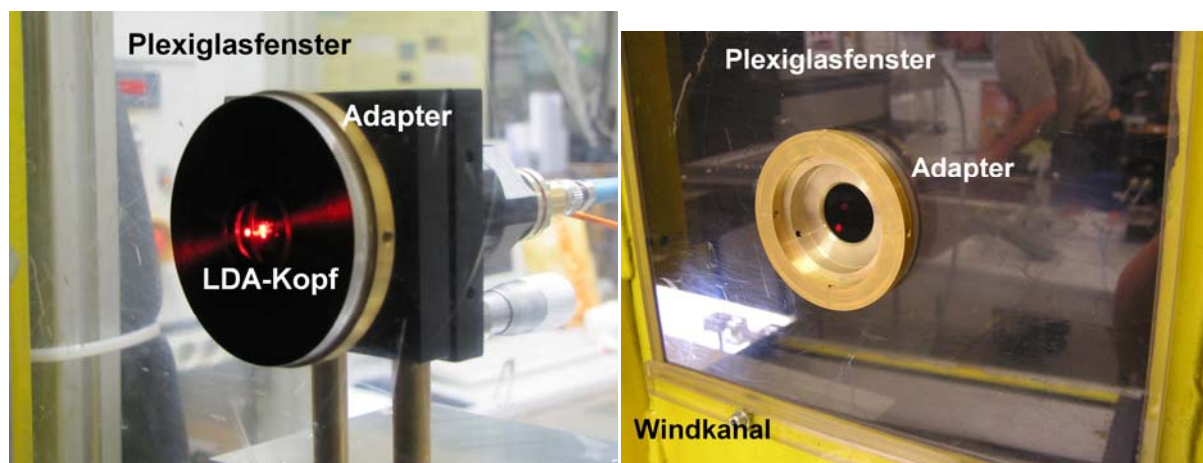


Abb. 2: links. LDA-Messkopf LM_11 oberflächenbündig im Windkanalfenster aus Plexiglas (Messvolumenlänge <30 μ m, Traversierung 0 bis 10mm über Oberfläche), rechts. Aufnahmevorrichtung für LDA-Kopf

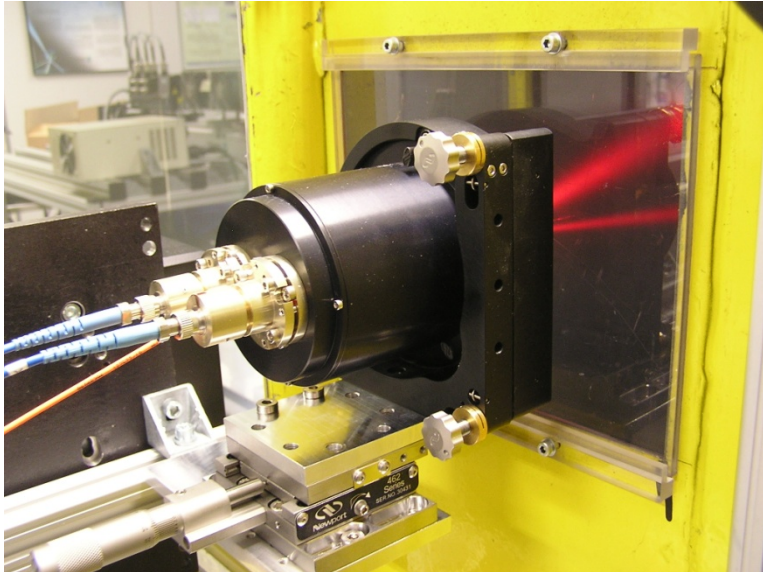


Abb. 3: Hinteransicht des LDA-Kopfs LM_10 außen am Windkanal montiert mit Einkoppel- und Empfangsfasern (links)

Wegen der Oberflächenbündigkeit wurden wenig störenden Einflüsse durch Wandreflexionen beobachtet.

Wegen der Verwendung von hochkorrigierten Linsen mit geringer sphärischer Abberation bei großer Apertur sind nur geringe Verzerrungen des Streifenmusters zu erwarten.

Die Rückstreusignale werden mit einer Avalanche-Photodiode (APD) mit Verstärkereinheit detektiert, Abb. 4 rechts. Um den Einfluss von Rückstreuungen auf den Diodenlaser zu verringern, wurde ein Inline-Faserisolator getestet, Abb. 4 links Mitte.

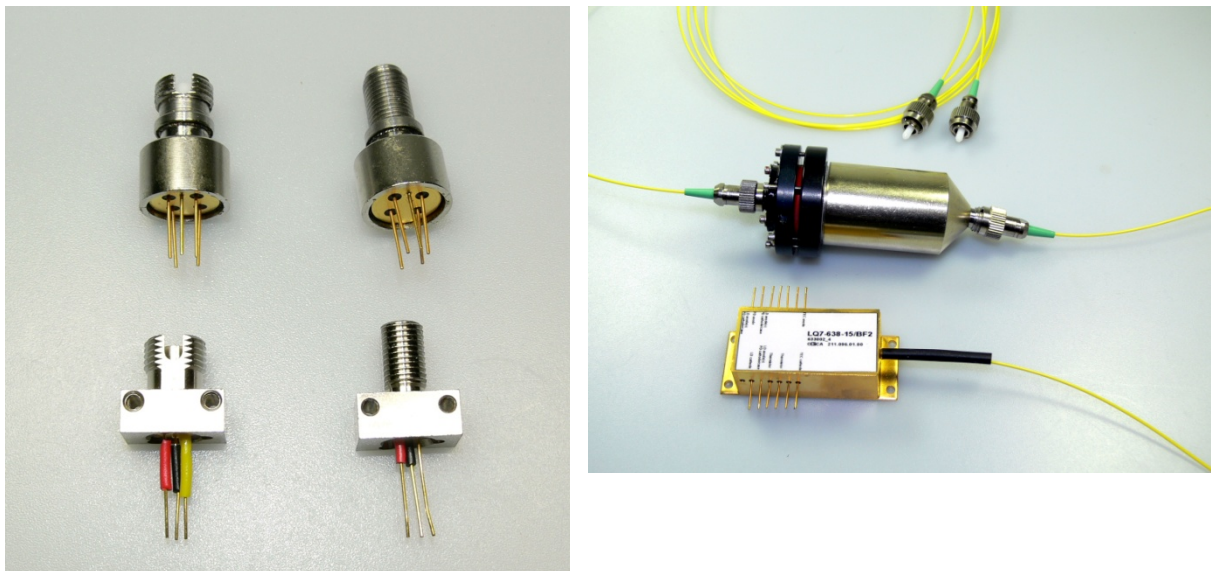


Abb. 4: links: APD-Module mit Vorverstärker (First Sensor AD500-8-1.3G TO5); rechts: Inline-Faserisolator (Mitte) und Laserdiode (unten)

Signalauswertung

Die Signalauswertung erfolgt unter Nutzung von NI LabView®, wobei das Auswerteprogramm auf einem Field Programmable Gate Array (NI PXIE-7961R FlexRio FPGA mit NI PXIE-1073 integrated MXIE) läuft. Wegen der Kleinheit des Messvolumens sind in der Regel insbesondere in unmittelbarer Wandnähe nur wenige Einzel-Bursts zu detektieren. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden zusätzlich zu FFT und PSP die von Ruck et al. 1986 vorgeschlagenen Methoden zum Periodenvergleich implementiert sowie Test der Auswerteverfahren bei deutlich größeren Detektionsvolumina durchgeführt (Abb. 5 und 6). Die mittlere Streuteilchengröße beträgt $0,3\mu\text{m}$.

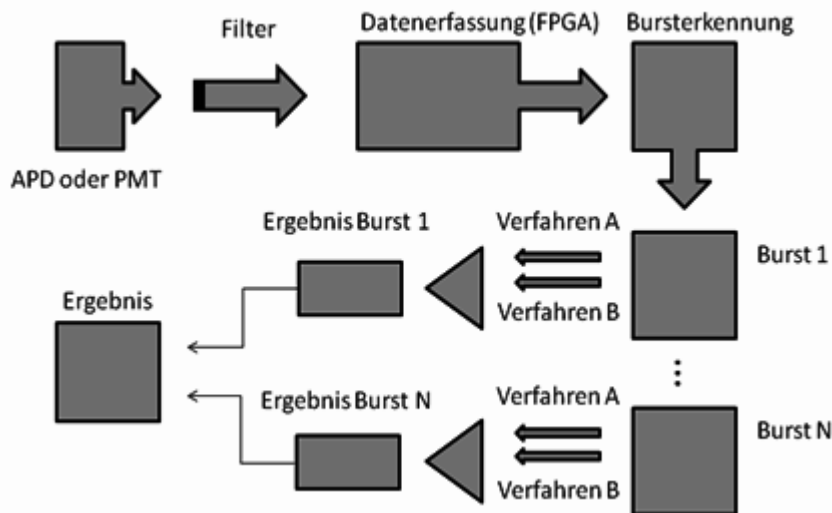


Abb. 5: Prinzip der Signalauswertung

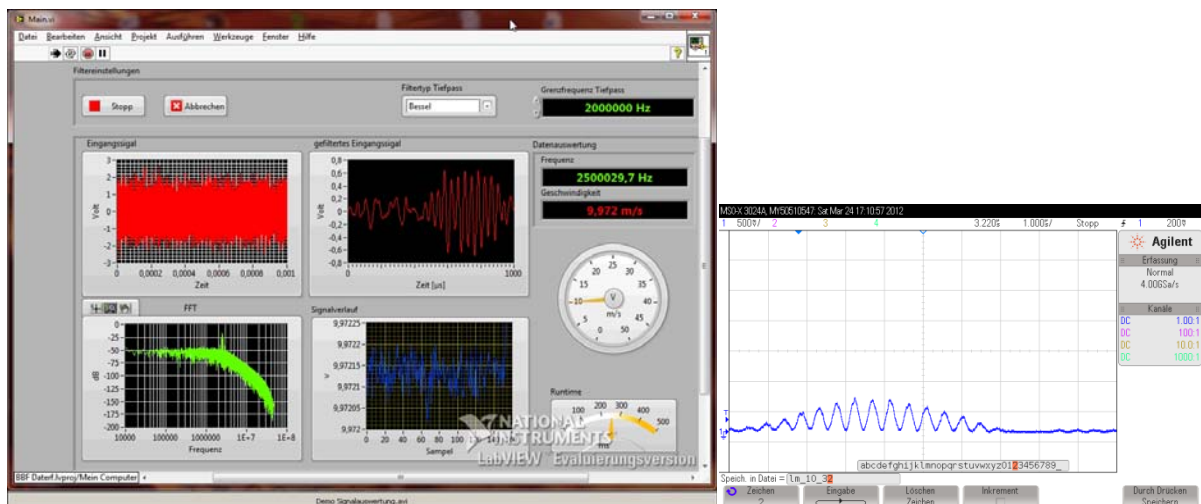


Abb. 6: links: NI LabView-Display für stark verrauschte Signale mit großer Streuteilchendichte (Messvolumen ca. $2400 \times 140 \times 140 \mu\text{m}^3$) und rechts: typischer Einzel-Burst für Messvolumen $30 \times 10 \times 10 \mu\text{m}^3$

Es werden erste Validierungsmessungen präsentiert und die Möglichkeit der Integration in Körper mit (leichter) Oberflächenkrümmung diskutiert.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Versuchsaufbau für ein durch die Körperoberfläche hindurch arbeitendes faseroptisches Laser-Doppler-Anemometer mit äquidistantem Streifenmuster vorgestellt, dessen Mess-/Detektionsvolumen von ca. $30 \times 10 \times 10 \mu\text{m}^3$ besitzt und senkrecht zur Oberfläche bis zu 20mm traversierbar ist.

In einer späteren Entwicklungsphase wird zur Erzielung einer höheren Kompaktheit anstelle eine HeNe-Lasers ein Diodenlaser mit höherer Leistung Verwendung finden. Es wird die Qualität der Faser-Kopplung und die Stabilität der Laser-Dioden optimiert werden. Die Empfangseinheit mit Verstärker und APD muss ebenfalls optimiert werden. Augenmerk bei der Auswertesoftware wird weiter in Richtung geringe Burstanzahl gelegt.

Danksagung

Wir danken der Stadt Berlin und dem Land Brandenburg sowie der Europäischen Union für die Förderung der Arbeiten an diesem Projekt.



Das diesem Artikel zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln der Senatsverwaltung für Wirtschaft, Technologie und Forschung des Berliner Senats, des Ministeriums für Wirtschaft und Europaangelegenheiten des Landes Brandenburg und der EU gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., Müller, H., 2002: "Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution" Meas. Sci. Technol. 13 (2002) 1979-89
- Jehring, L., Zanoun, E.-S., Egbers, C., Kito, M., Wiener, A., Schultz, C., Suchland, D., 2007: "Near-Wall Flow Measurements by Means of Miniaturized LDV Flow Sensor Combined with Hot-Film Anemometry"; in: Proc. of XIII. International Conference on the Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk, Russia
- Kornilov, V.I., Litvinenko, Y.A., Pavlov, A.A., 2002: "Skin-Friction Measurements in an Incompressible Pressure-Gradient Turbulent Boundary Layer. Review of Techniques and Results" In: Proc. of XI. International Conference on the Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk, Russia
- Lowe, K.T., Simpson, R.L., 2009: "An advanced laser-Doppler velocimeter for full-vector particle position and velocity measurements", Meas. Sci. Technol. 20 (2009)
- Modarress, D., Svitek, P., Modarress, K., Wilson, D., 2006: "Micro-Optical Sensors for Boundary Layer Flow Studies (Keynote Paper)"; Proc. of FEDSM2006 ASME Joint U.S. –European Fluids Engineering Summer Meeting, Miami
- Ruck, B., Schmitt, F., Loy, T., 1986: "Signalbewertung in der Laser-Doppler-Anemometrie durch Periodenvergleich", tm 53(1986), 5
- Sheplak, M., Cattafesta, L., Nishida, T., McGinley, C.B., 2004: "MEMS Shear Stress Sensors: Promise and Progress" ; in; Proc. 24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, Portland
- Tavoularis, T. (ed.) 2005: "Measurement in Fluid Mechanics", Cambridge University Press, Cambridge
- Tropea, C., Yarin, A.L., Foss, J.F. (eds.), 2007: "Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics"