

Fortschritte bei der Entwicklung und Anwendung eines miniaturisierten Sensors für wandnahe Strömungen

L. Jehring*, E.-S. Zanoun*, C. Egbers*, S. Eckert[◇], C. Schultz[◇], D. Suchland[◊]

* Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre (LAS),

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Siemens-Halske-Ring 14, 03046 Cottbus

◇ Astro- und Feinwerktechnik GmbH, Albert-Einstein-Str. 12, 12489 Berlin

◊ ASI Advanced Semiconductor Instruments GmbH, Rudower Chaussee 30, 12489 Berlin

Zusammenfassung

Die korrekte Untersuchung von Grenzschicht-Strömungen erfordert eine hochauflösende Messung u.a. des Geschwindigkeitsprofils besonders im Bereich der viskosen Unterschicht, also in unmittelbarer Wandnähe. Für eine längs angeströmte ebene Platte bedeutet das je nach Reynoldszahl eine absolute Auflösung von deutlich unter 100 μm für das Messvolumen eines Laser-Doppler-Anemometers oder des Durchmessers einer Prandtl-Sonde.

Zur Erreichung dieser Auflösung wird ein miniaturisiertes LDA entwickelt und mit Heißfilm-Messtechnik (HFA) in einem Modul kombiniert. Die HFA-Messtechnik dient zur direkten Bestimmung der Wand Schubspannung, wobei die Heißfilme mittels des im Modul integrierten LDA kalibriert werden. Eine Besonderheit des Sensor-Moduls ist dabei, dass die Laser-Strahlen *durch* die Oberfläche des umströmten Körpers in die Grenzschicht eintreten, was zukünftig die Möglichkeit der Integration des Sensors in verschiedene Probekörper und somit die leichtere Erreichbarkeit sonst schwer zugänglicher Messstellen ermöglicht.

Der vorliegende Beitrag stellt den derzeitigen Stand der Entwicklung des Moduls dar. Es werden erste mittels eines Breadboard-Aufbaus gewonnene Messungen des wandnahen Strömungsprofils an der längs angeströmten ebenen Platte ohne Druckgradient im Windkanal vorgestellt und diese mit Referenzmessungen verglichen. Es wird die erreichte Auflösung und die Zuverlässigkeit der gewonnenen Messwerte diskutiert.

Einleitung

Trotz großer Fortschritte auf dem Gebiet der numerischen Strömungsmechanik lassen sich komplexe turbulente Strömungen insbesondere bei großen Reynoldszahlen in Wandnähe nur sehr schwer berechnen. Die erforderliche hohe räumliche Auflösung des Rechengitters und die Notwendigkeit der Verwendung von Turbulenzmodellen sind wesentliche Beschränkungen, denen die Berechnungen unterliegen. Die Validierung und Weiterentwicklung von Turbulenzmodellen erfordert den Vergleich mit hochaufgelösten Messergebnissen in Wandnähe.

Auf der anderen Seite wird der Reibungswiderstand c_f von Körpern direkt durch das wandnahe Geschwindigkeitsprofil bzw. die Wandschubspannung bestimmt. Eine ungenaue Ermittlung z.B. der Konstanten des logarithmischen Wandgesetzes hätte dann u.U. direkte Auswirkungen auf den vorab berechneten Treibstoffverbrauch eines Flugzeuges oder die Passagierkapazität.

Die im Modul verwendeten Messtechniken sind jede für sich bei Messungen in unmittelbarer Wandnähe mit gewissen Nachteilen behaftet. Heißfilme unterliegen einem nicht unwesentlichen Wärmeverlust in den Körper, auf dem sie befestigt sind, was wiederum zu Fehlern bei der Bestimmung der Wandschubspannung führen kann, wenn der erwünschte Wärmestrom in die Strömung deutlich kleiner wird als der in den Körper (siehe Durst et al. 2001, Durst und Zanoun 2002).

Die Einschränkungen beim Einsatz von optischen Messmethoden (speziell LDA) resultieren aus der erforderlichen Kleinheit des LDA-Messvolumens, um die notwendige räumliche Auflösung zu erreichen. Mittlerweile werden auch Verfahren entwickelt, um innerhalb des Messvolumens selbst Geschwindigkeitsgradienten bestimmen zu können (siehe Büttner, Czarske 2004). Die Bestimmung der Turbulenzintensität in Wandnähe erfordert nach Durst et al. (1995, 1998) Korrekturen mit Ableitungen höherer Ordnung. Sowohl Firmen, als auch nicht-kommerzielle Forschungsteams arbeiten seit langem an der Miniaturisierung von LDAs (z.B. Damp 1991, Büttner und Czarske 2004, Fechtmann et al. 2004, Zanoun et al. 2004).

Bei Untersuchungen an schwer zugänglichen oder weiter entfernten Messstellen vergrößert sich die Länge des Messvolumens infolge der erforderlichen langen Brennweiten. Bei dem hier verwendeten Messaufbau wird dieser Nachteil dadurch vermieden, dass das LDA direkt in den Körper integriert werden kann und die Laser-Strahlen dann senkrecht aus der Oberfläche austreten (siehe Abb. 1(a) links, dargestellt im Vergleich zu einer Standard-Anordnung, rechts). Diese Ausrichtung erfordert ebenfalls eine Verkleinerung der Längsausdehnung des Messvolumens auf die gewünschte Größe von weniger als $100 \mu\text{m}$ – im Gegensatz zur Standard-Anordnung, wo die Querausdehnung entscheidend ist.

Die Bestimmung der Wandschubspannung τ_w , Gleichung (1),

$$\tau_w = -\mu \left[\frac{dU}{dy} \right]_{Wand} \quad (1)$$

die gleichzeitig die Grundlage für die Festlegung der zur Entdimensionalisierung der Messdaten notwendigen Geschwindigkeits- und Längenmaßstäbe (2) bildet,

$$u_c = u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}, \quad l_c = \nu/u_\tau \quad (2)$$

erfordert eine reproduzierbare und genaue Bestimmung des Geschwindigkeitsgradienten in unmittelbarer Wandnähe, d.h. im Bereich der viskosen Unterschicht mit $y^+ = y/l_c \leq 5$. Diese Messungen sollten deshalb nicht von der Wandnähe als solche negativ beeinflusst werden, wie z.B. ein zusätzlicher Wärmetransport zur Wand bei Hitzdrahtmessungen (siehe Durst et al. 2001, Durst und Zanoun 2002), der einen real nicht existierenden Beitrag zur Geschwindigkeit vortäuscht.

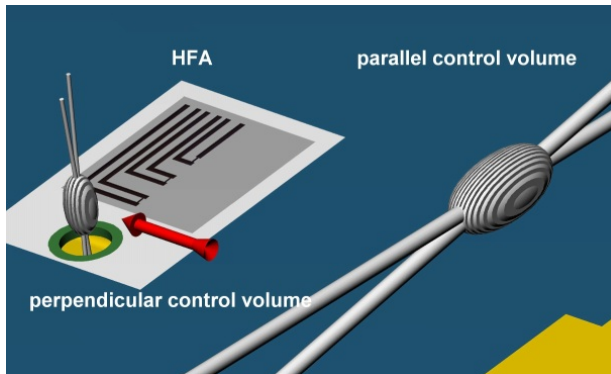
Neben den bereits genannten Methoden zur Bestimmung der Wandschubspannung wird insbesondere die Ölfilm-Interferometrie (siehe Tanner und Blows 1976, Winter 1976, Fernholz et al. 1996) zur Kalibrierung und Kontrolle der mit dem Modul gemessenen Messwerte angewendet. Einen umfassenden Überblick über weitere Methoden zur Wandschubspannungsmessung findet man z.B. bei Kornilov et al. 2002.

Die Arbeiten zur Entwicklung und zum Bau der Heißfilme werden von der Fa. ASI Advanced Semiconductor Instruments GmbH, Berlin durchgeführt. Die Entwicklung des LDA erfolgt bei der Fa. Astro- und Feinwerktechnik GmbH, Berlin.

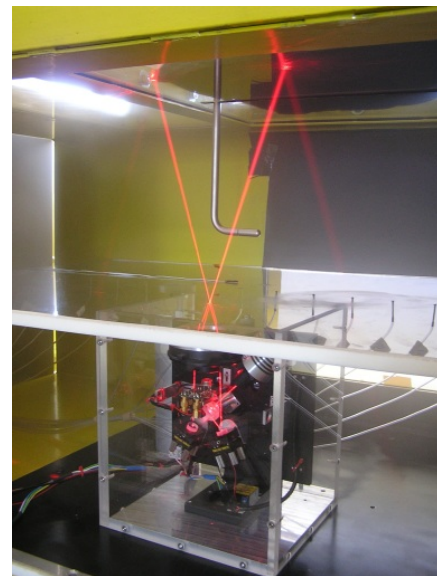
Aufbau des Moduls

Das Sensor-Modul Abb. 1(a) besteht zum einen aus einem auf einer entspiegelten Glasplatte aufgetragenen Heißfilm-Sensorarray (HFA), das zur direkten Bestimmung der Wandschubspannung (1) dient. In unmittelbarer Nähe zu den einzelnen Sensoren des HFA können die Strahlen des LDA durch die Scheibe hindurchtreten und zur Kalibrierung der Heißfilme benutzt werden. Das LDA besitzt dazu eine Traversierung, die einen Bereich bis zu ca. 10 mm über der Körperoberfläche abdeckt. Die Scheibe mit dem HFA besitzt z.Z. einen Durchmesser von 15 mm und wird in die Oberfläche des zu untersuchenden Körpers bündig eingepasst. Die bisher durchgeführten Untersuchungen zur Funktionsfähigkeit der Heißfilme basierten auf einem HFA auf Kapton-Basis der Fa. ASI, Abb 2(a). Details der Untersuchungen wurden bereits an anderer Stelle vorgestellt (siehe Jehring et al. 2004).

Der Breadboard-Aufbau Abb. 3(b), 1(b) des Moduls wurde inzwischen zum Schutz vor Streulicht und Verschmutzung durch Streuteilchen vollständig mit einem (lichtundurchlässigen) Gehäuse versehen.



(a) Vergleich der Lage des Messvolumens des Mini-LDA mit dem eines Standard-LDA



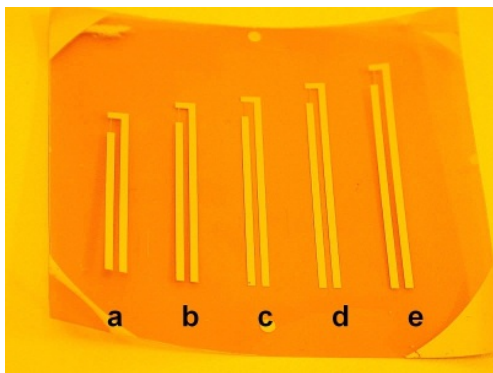
(b) Mini-LDA beim Betrieb im Windkanal

Abbildung 1: Aufbau des Sensormoduls und bündige Installation im Windkanal unterhalb einer ebenen Platte

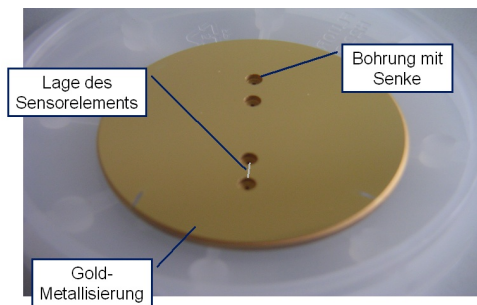
Heißfilmmesstechnik Das Heißfilm-Array nutzt das Prinzip der Abkühlung durch erzwungene Konvektion infolge der wandnahen Strömung zur Bestimmung von u_τ und besteht aus mehreren einzelnen Sensoren. Der Film wird elektrisch beheizt und auf konstanter Temperatur gehalten (CTA). Der durch die Konvektion hervorgerufene Wärmestrom \dot{q} wird in Wandnähe durch das lineare Geschwindigkeitsprofil $u^+ = y^+$ (bzw. das Temperaturprofil) und die Wärmeleitfähigkeit des strömenden Mediums λ_{Fluid} über

$$\dot{q} \propto -\lambda_{Fluid} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{Wand} / (T_{Wand} - T_{Fluid}) \propto u_\tau, \quad (3)$$

sowie die wirksame Fläche des einzelnen Heißfilm-Sensors bestimmt. Infolge der notwendigen Befestigung auf der Körperoberfläche tritt immer ein zusätzlicher Wärmestrom *in* den Körper auf, der von der Wärmeleitfähigkeit und der Dicke des Substrates (Kapton, Glas) sowie des Klebe- und des Körpermaterials abhängt. Ist die Wärmeleitfähigkeit des Körpers größer als die des strömenden Mediums, z.B. Luft, kann es zu Fehlern bei der Bestimmung der Wandschubspannung kommen (siehe z.B. Löfdahl und Gad-el-Hak 1999). Für die Konstant-Temperatur-Anemometrie wird das elektrische Ausgangssignal E^2



(a) Heißfilm-Array auf Kapton



(b) Anordnung auf Glassubstrat mit einem installierten Sensor (unten)

Abbildung 2: Heißfilme der Fa. ASI Berlin

durch das bekannte King'sche Gesetz (4) bestimmt:

$$E^2 = A + B \tau_w^n, \tag{4}$$

mit $n = 1/3$ und A und B als Konstanten, die beispielsweise durch Vergleich mit Ölfilm-Messungen der Grenzschicht an einer ebenen Platte ermittelt werden können oder aber mit dem integrierten LDA im Verlaufe einer Kalibration. Die Größe A in (4) beinhaltet den Wärmestrom in den Körper, der u.U. größer als der in die Strömung sein kann. Untersuchungen zum Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Körpers und des Klebematerials zur Befestigung der Heißfilme wurden bereits vorgestellt (Jehring et al. 2004). Dort wurde auch diskutiert, inwieweit die Größe des Exponenten $1/3$ in (4) verändert werden muss.

Zur Verringerung der Wärmeverluste in den Körper und um das LDA in HFA-Nähe zur Kalibration verwenden zu können, wurden die undurchsichtigen Kapton-Folien als Grundmaterial für die Heißfilme ersetzt durch Glas (dicker, kein flächiger Kontakt der Sensoren zum Körper). Die Kontaktierung der Sensor-Elemente erfolgt nun von unten durch die Glasoberfläche hindurch. Die Sensoren werden jetzt direkt auf das Glas aufgebracht, siehe Abb. 2(b), die Gold-Beschichtung stellt dabei einen Zwischenschritt bei der Herstellung dar und wird vor Fertigstellung entfernt. Die Kontour der Glasplatte kann prinzipiell durch Bearbeitung an die lokale Geometrie eines Körpers angepasst werden, eine gekrümmte Oberfläche stellt für das Aufbringen der Heißfilme kein Hindernis dar.

Das miniaturisierte LDA-Modul Das für die Messungen verwendete LDA besteht aus dem Sensor und einer Signal-Verarbeitungseinheit (Abb. 3(a)). Abbildung 3(b) zeigt den derzeit realisierten Aufbau als Breadboard zur Integration in den Windkanal der BTU Cottbus, Abb. 4.

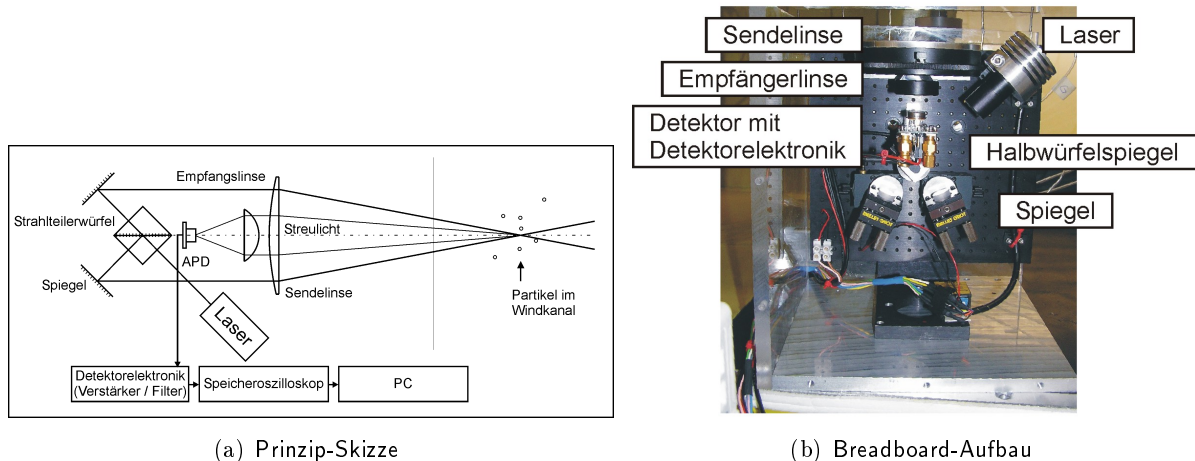


Abbildung 3: Aufbau des LDA-Moduls

Der eigentliche Sensor besteht aus einem Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 635nm, einer optischen Leistung von 12,1 mW, einer angepassten Kollimationsoptik und einer Temperaturstabilisierung mittels Peltierelement. Ein Strahlteilerwürfel erzeugt zwei Teilstrahlen, die jeweils über einen Spiegel und eine Sendelinse zur Überlagerung gebracht werden. Das dabei entstehende Messvolumen besitzt eine Breite y_m von 0,043 mm und eine Länge z_m von 0,133 mm. Ein Teil des Streulichtes, welches beim Passieren von Partikeln durch das Messvolumen entsteht, gelangt über die Empfängerlinse auf eine Avalanche-Photodiode. Die Laser-Strahlen und das Streulicht gelangen durch eine entspiegelte Glasscheibe (Dicke 2 mm, Durchmesser 15 mm), die gleichzeitig Träger der Heißfilm-Sensoren ist, in die Strömung bzw. zurück in das Modul.

Bestandteile der Signalverarbeitung sind die Detektor-Elektronik mit Verstärker-ICs in einer 2-stufigen Verstärkercaskade und Bandpassfilter, ein Speicheroszilloskop mit FFT-Analysator und ein PC zur Datenerfassung und -auswertung, siehe Abb. 3(a). Mit dem Bandpass, der einen Frequenzgang von 33 kHz bis 33 MHz hat, wird konstantes Gleichlicht herausgefiltert. Mit diesem Frequenzbereich können Partikelgeschwindigkeiten von 0,03 bis 32 m/s bestimmt werden.

Versuchsaufbau und Experiment

Hauptziel und Motivation für die Entwicklung eines kombinierten Sensors aus HFA und LDA war die genaue und reproduzierbare Bestimmung der Wandschubspannung unter Vermeidung von unerwünschte Wandeinflüssen. Besonderes Augenmerk wird auf die korrekte Auflösung der viskosen Unterschicht gelegt.

Die Versuche werden in einem Niedergeschwindigkeitswindkanal Göttinger Bauart an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus durchgeführt (Abb. 4). Hier lassen sich Reynoldszahlen von $3 \times 10^3 < Re_\theta < 10^4$ bezogen auf die Impulsverlustdicke erreichen. Die Messstrecke (Abb. 4, oben) hat eine Größe von 600 X 500 X 1500 mm mit einer erreichbaren Geschwindigkeit von 0.5 bis 50 m/s bei einem Turbulenzgrad kleiner als 0.5 % bei geschlossener Messstrecke.

In der Messstrecke wurden ebene Platten aus Aluminium und Plexiglas (Abb.1(b)) mit einer Länge von 1050 mm montiert und auf einen Druckgradienten $\Delta p = 0$ justiert. In die Oberfläche der Platten wurde eine Öffnung für ein Fenster zur Aufnahme der Glasscheibe für das Mini-LDA eingebracht. Die unterschiedlichen Plattenmaterialien dienen zur Untersuchung des Einflusses des Wärmetransports

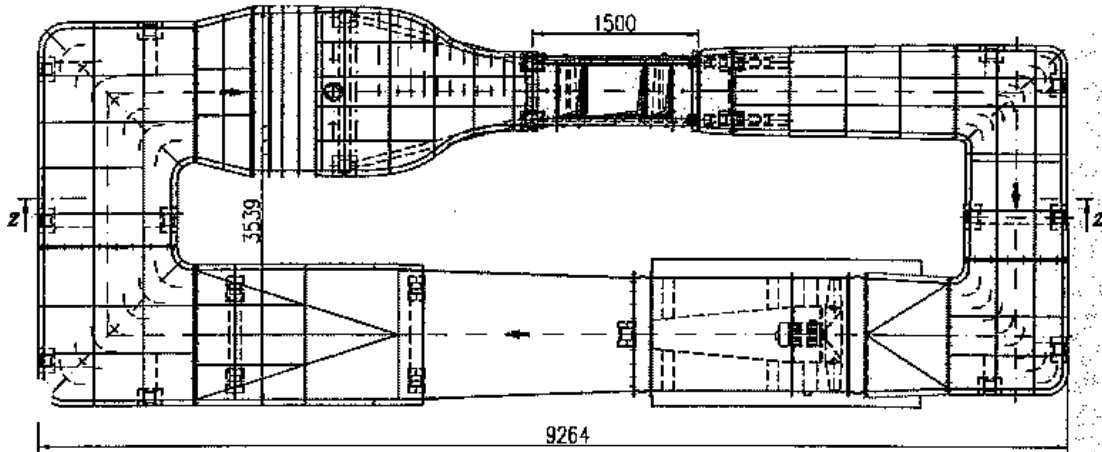
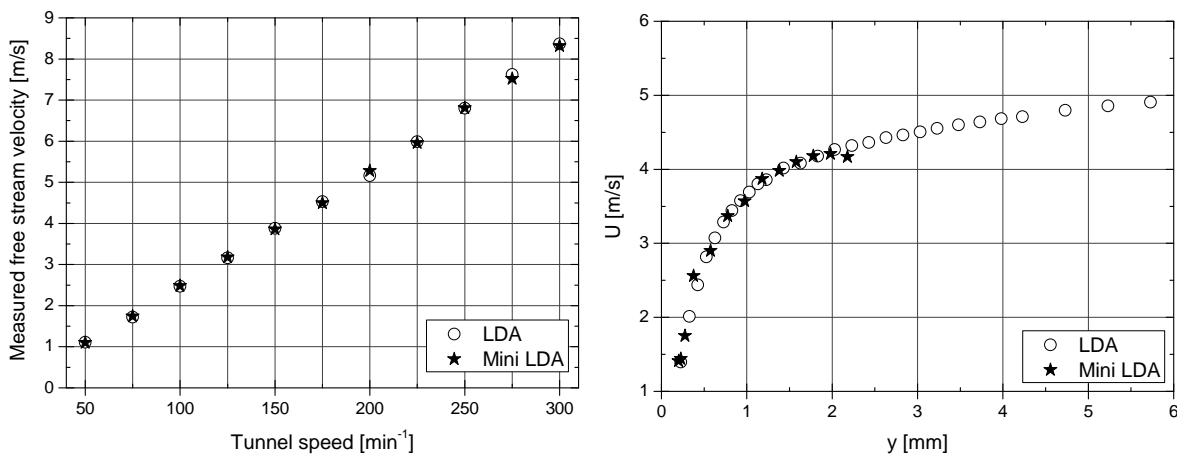


Abbildung 4: Windkanal der BTU Cottbus

vom HFA in die Platte.

Die HFA-Messungen erfolgten mit einem Mini-CTA, die optischen Referenzmessungen mit einem LDA Flowlite von DANTEC. Die Heißfilme wurden anfänglich vor Beginn der Messungen in der ungestörten Strömung mit Hilfe des logarithmischen Wandgesetzes kalibriert sowie später mittels Vergleichsmessungen unter Verwendung des Flowlite. Ergänzend und zur Kontrolle wurde die Wandschubspannung mittels der Ölfilm-Interferometrie bestimmt. Die Leistung des im Mini-LDA verwendeten Lasers reich-



(a) Vergleich der gemessenen Anströmgeschwindigkeiten

(b) Mittlere Geschwindigkeit in Wandnähe

Abbildung 5: Vergleichsmessungen (LDA und Mini-LDA) in der freien Strömung und im Wandbereich

te nicht aus, um verwertbare Messergebnisse unter Verwendung der Plexiglasplatte in voller Dicke (25 mm) zu erhalten. Deshalb wurde in die ebene Platte ein Fenster eingebracht und der HFA-Träger aus Glas eingepasst.

Die vorgestellten Messungen erfolgten simultan mit dem Mini-LDA und dem Flowlite. Erste Ergebnisse

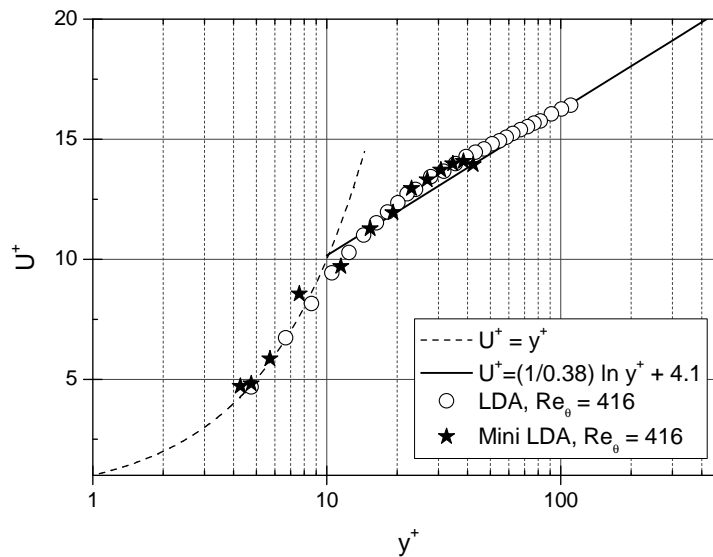


Abbildung 6: Turbulente Grenzschicht mit LDA und Mini-LDA vermessen, logarithmischer Verlauf nach Österlund et al. 2000

sind in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Die Übereinstimmung im Gebiet der freien Strömung für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten ist sehr gut, Abb. 5(a). Durch die Traversierung des Mini-LDA konnte ein Teil einer turbulenten Grenzschicht in guter Übereinstimmung mit dem Flowlite vermessen werden (Abb. 5(b)). Der logarithmische Bereich des Profils ist nur schwach ausgeprägt, da bei der angegebenen Reynoldszahl noch keine voll entwickelte turbulente Grenzschicht vorliegt, siehe Abb. 6.

Schlussbemerkungen

Es wurde der Breadboard-Aufbau eines Sensors zur Vermessung wandnaher Strömungen und zur "in-situ"-Kalibrierung von Heißfilm-Sonden vorgestellt. Erste, reproduzierbare Ergebnisse von LDA-Messungen an einer sich entwickelnden turbulenten ebenen Plattenströmung ohne Druckgradient im Windkanal zeigen eine gute Übereinstimmung mit Vergleichsmessungen.

Zur notwendigen Erhöhung der räumlichen Auflösung ist eine weitere Miniaturisierung des LDA-Aufbaus erforderlich.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit und dem DLR-PT für die Förderung im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo3, FKZ 20F0301A).

Literaturverzeichnis

- Büttner, L., Czarske, J., 2004, "Miniaturisierbarer Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor auf der Basis von diffraktiver Mikrooptik", 12. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmechanik, 7. bis 9. September, Karlsruhe
- Damp, S., 1991, "Miniatur-Laser-Doppler-Anemometer", Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, ISL-Technischer Bericht RT 501/92
- Durst, F., Jovanovic, J., Sender, J., 1995, "LDA measurements in the near-wall region of a turbulent pipe flow", *J. Fluid Mech.* 295: pp. 305–335
- Durst, F., Fischer, M., Jovanovic, J., Kikura, H., 1998, "Methods to set up and investigate low Reynolds number, fully developed turbulent plane channel flow", *Trans. of the ASME Vol. 120*: pp. 496–503
- Durst, F., Zanoun, E. S., Pashtrapanska, M., 2001, "In situ calibration of hot wires close to highly heat-conducting walls", *Exp. Fluids* 31, pp. 103-110
- Durst, F., and Zanoun, E.S., 2002, "Experimental investigation of near-wall effects on hot-wire measurements", *Exp. Fluids* 33, pp. 210-218
- Fechtmann C., Wedemeyer, T., Raithel, M., 2004, "Development of Miniaturized Laser Doppler Velocimeters", 53. International Astronautical Congress, Session J, 29.9.–3.10.2004, Bremen, pp. 19
- Fernholz, H. H., Janke, G., Schober, M., Wagner, P. M., Warnack, D., 1996, "New developments and applications of skin-friction measuring technique", *Meas. Sci. Tech.* 77, pp. 1396-1409
- Jehring, L., Zanoun, E.-S., Egbers, C., 2004 "New Approach for Wall Shear Stress Measurements", 14. DGLR-Fach-Symposium der STAB, November 2004, Bremen.
- Kornilov, V.I., Litvinenko, Yu. A., Pavlov, A.A., 2002, "Skin-friction measurements in an incompressible pressure-gradient turbulent boundary layer. Review of techniques and results", *Proc. XI Int. Conf. on Methods of Aerophys. Research (ICMAR 2002)*, 3-7th July, 2002, Novosibirsk, Russia, Vol. I, pp.114–119
- Löfdahl, L., Gad-el-Hak, M., 1999, "MEMS-based pressure and shear stress sensors for turbulent flows", *Meas. Sci. Technol.* 10, pp. 665-686
- Österlund, J. M., Johansson, A. V., Nagib, H. M., Hites, M. H., 2000, "A note on the overlap region in turbulent boundary layers", *Phys. Fluids* 12, pp. 1-4
- Tanner, L. H., Blows, L. G., 1976, "A study of the motion of oil films on surface in air flow, with application to the measurements of skin friction", *J. Phys. E* 2, 3, pp. 194-202
- Winter, K. G., 1976 "An outline of the techniques available for the measurement of skin friction in turbulent boundary layers", *Prog. Aerospace Sci.*, 18, pp. 1-57
- Zanoun, E.-S., Jehring, L., Egbers, C., Döring, C., Pflanz, J., Eckert, S., Hartmann, M., Schultz, C., Suchland, D., "Development of miniature flow sensor for aerodynamic applications", 2004, 12. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmechanik, 7. bis 9. September, Karlsruhe