Stereo-PIV-Messungen in der Querströmungsebene einer turbulenten Kanalströmung

Stereo-PIV Measurements in the Cross-Flow Plane of a Turbulent Channel Flow

Saskia Pasch, Marc T. Hehner, Lars H. von Deyn, Jacopo Serpieri, Davide Gatti, Bettina Frohnapfel, Jochen Kriegseis

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Strömungsmechanik (ISTM), Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

Stereo-PIV, turbulente Kanalströmung Stereo PIV, turbulent channel flow

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Stereo Particle Image Velocimetry (SPIV)-Messungen in einer voll entwickelten turbulenten Strömung in einem Flachkanal. Mit dem gewählten Versuchsaufbau werden alle drei Geschwindigkeitskomponenten (u, v, w) in der Querströmungsebene (v, z) normal zur Hauptströmungsrichtung des Kanals gemessen. Damit können sowohl alle Komponenten des Reynoldsspannungstensors als auch Sekundärströmungen in der Querströmungsebene erfasst werden. Ein Vergleich der gemessenen Geschwindigkeiten und der Reynoldsspannungskomponenten mit numerisch ermittelten Daten von Hoyas und Jimenez (2008) zeigt eine gute Übereinstimmung, sodass die vorgestellte Messtechnik für Untersuchungen aktiver und passiver Strömungskontrollmechanismen in der turbulenten Kanalströmung eingesetzt werden kann.

Abstract

This work presents Stereo Particle Image Velocimetry (SPIV) measurements in a fully developed turbulent flow in a flat channel. With the chosen experimental setup, all three velocity components (u, v, w) are measured in a crossflow plane (y, z) perpendicular to the main flow direction of the channel. Thus, all components of the Reynolds stress tensor as well as secondary flows in the crossflow plane can be quantified. A comparison of the measured velocities and Reynolds stress components with numerically determined data from Hoyas and Jimenez (2008) shows good agreement, so that the presented measurement technique can be employed in investigations of active and passive flow control mechanisms in turbulent channel flows.

Einleitung

Trotz der zunehmenden Notwendigkeit CO₂-Emissionen zu reduzieren, wird in den kommenden Jahren ein stetiges Wachsen des weltweiten Luftverkehrs erwartet ("Flightpath 2050" 2011). Dies führt zu einem steigenden Interesse an technischen Lösungen, die dazu beitragen die Effizienz von Flugzeugen zu verbessern. Da 50% des gesamten Widerstands von Flugzeugen auf Oberflächenreibung zurückgeführt werden können (Hills 2005) und turbulente Oberflächenreibung im Vergleich zu der laminarer Strömungen besonders groß ist (Joslin 1998), stellen Technologien zur Reduzierung der turbulenten Oberflächenreibung einen Forschungsschwerpunkt in diesem Bereich dar. Zur experimentellen Untersuchung und Quantifizierung von Reibungsminderungseffekten unterschiedlicher aktiver und passiver Strömungskontrollmechanismen im Labor bietet sich die Betrachtung einer voll entwickelten turbulenten Kanalströmung an, da diese bereits gut dokumentiert ist und einen direkten Vergleich mit Daten aus Direkter Numerischer Simulation (DNS) ermöglicht. Die vorgestellten SPIV-Messungen schließen an Druckabfallmessungen in einem Flachkanal gleicher Geometrie und entsprechende Strömungsberechnungen beeinflusster Strömungen mittels DNS an (vergleiche von Deyn et al. 2019, Gatti et al. 2020). Mit Hilfe der Messung des statischen Drucks entlang des Kanals können kleine Änderungen des Strömungswiderstands aufgrund von Oberflächenreibung direkt gemessen werden, während die Untersuchung der zugrundeliegenden Wirkmechanismen einer detaillierteren Betrachtung der Strömung bedarf. Genaue Kenntnis des Geschwindigkeitsprofils, der Reynoldsspannungen und eventueller Sekundärströmungen liefert daher wertvolle Informationen zur Analyse der Strömungskontrollmechanismen und zur Modellentwicklung der teilweise komplexen Strömungsbeeinflussung, die beispielsweise durch Plasma-Aktuatoren (siehe Hehner et al. 2019) oder Riblets (siehe Gatti et al. 2020) erfolgen kann.

In dieser Arbeit werden SPIV-Messungen der turbulenten Kanalströmung ohne Strömungskontrollmaßnahmen vorgestellt und mit numerisch ermittelten Geschwindigkeiten und der Reynoldsspannungskomponenten von Hoyas und Jimenez (2008) verglichen. Anhand der Übereinstimmung der Daten sowie der erreichten Auflösung kann die Eignung des Messverfahrens für die Untersuchung von Strömungskontrollmechanismen in der turbulenten Kanalströmung festgestellt werden.

Experimenteller Ablauf

Der experimentelle Aufbau für SPIV-Messungen am optisch zugänglichen Flachkanal (Teststreckenhöhe h = 25,2 mm) ist in Abbildung 1 gezeigt. Zwei Photron-SA4-Kameras erzeugten unter Scheimpflugbedingungen Doppelbilder (1024 x 1024 px², Wiederholrate f_c = 480Hz) der zugeführten DEHS-Partikel, die von einem Quantronix Darwin-Duo Nd:YLF Laser in der *y-z*-Querebene beleuchtet wurden, wobei ein Laserplus 0,12 μ s lang war. Eine konvexe Linse in der Kanalwand diente als optischer Zugang für den Laser und die Dicke des Lichtschnitts betrug etwa 0,5 mm. Die beiden Kameras waren rechts und links in einem Winkel von etwa 27° zur Hauptströmungsrichtung stromab des Kanalauslasses positioniert, um die Strömung nicht zu blockieren. Die Verwendung eines Nikkor-Objektivs (Brennweite f = 200 mm, Blende $f_{\#} = 11$) und der Einsatz eines Telekonverters zur Verlängerung der Brennweite um den Faktor 2 führte zu einer räumlichen Auflösung von 60 px/mm.

Da die Hauptströmung senkrecht zur Lichtschnittebene orientiert war, wurde der Pulsabstand des Lasers direkt auf die jeweilige Strömungsgeschwindigkeit in der Kanalmitte angepasst. Diese wurde mit Hilfe einer Prandtl-Sonde nahe des Kanalausgangs überprüft und eingestellt. Um statistische Signifikanz auch bei den kleinen Reynoldsspannungskomponenten zu gewährleisten, wurden 13635 Bildpaare pro Experiment in fünf Teilmessungen aufgezeichnet. Die Auswertung der PIV-Bilddaten erfolgte mit der Software PIVview von PIVTEC unter der Verwendung von Multipass- und Multigrid-Algorithmen. Die korrelierten Teilbilder (Interrogation Areas) waren $48 \times 24 \text{ px}^2$ groß und es wurde eine Überlappung von 50% gewählt. Ausreißer (<1%) wurden mittels eines Median-Filters und eines Filters für eine maximale Verschiebung identifiziert und die fehlenden Werte interpoliert. Die so berechneten Geschwindigkeitsfelder umfassten etwa $14 \times 16 \text{ mm}^2$ mit einer Auflösung von 0,2 mm in y-Richtung und 0,4 mm in z-Richtung.



Abb. 1: Experimenteller Aufbau der SPIV-Messungen und verwendetes Koordinatensystem im Strömungskanal.

Darstellung der Messdaten in viskosen Einheiten

Da die numerisch ermittelten Vergleichsdaten in dimensionslosen Wandeinheiten vorliegen, wurden die gemessenen Geschwindigkeitsfelder zunächst umgerechnet. Zur Ermittlung der für die Entdimensionierung notwenigen Wandschubspannungsgeschwindigkeit u_{τ} wurden zwei Ansätze verwendet und verglichen, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Pope (2000) betrachtet die Totalspannung

$$\tau(y) = \rho \vartheta \frac{d\langle U \rangle}{dy} - \rho \langle uv \rangle \tag{1}$$

als Summe der viskosen Spannung $\rho \vartheta(d\langle U \rangle/dy)$ und der Reynoldsspannung $-\rho \langle uv \rangle$, wobei die Totalspannung linear mit dem Wandabstand abfällt. Die an der Wand vorliegenden Wandschubspannung τ_W kann über die Steigung der Totalspannung anhand von Messwerten ermittelt werden, sodass die gesuchte Wandschubspannungsgeschwindigkeit $u_{\tau} = \sqrt{\tau_W/\rho}$ bestimmt werden kann.

Die in Abbildung 2 dargestellten Verläufe der beiden Spannungskomponenten wurden aus den Messdaten bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_b von 19,3 m/s berechnet. Für größere *y*-Werte stimmt die Totalspannung mit der gezeigten linearen Approximation überein. In der Nähe der Wand bei kleinen *y*-Werten führen Reflektionen zu fehlerhaften Geschwindigkeitsvektoren und erschweren die Bestimmung der Geschwindigkeiten mit der PIV-Messtechnik. Zudem reicht die gewählte Auflösung nicht aus, um die vorliegenden, großen Geschwindigkeitsgradienten zu erfassen. Der Schnittpunkt der approximierten, linear verlaufenden Totalspannung mit der Ordinate zeigt den Wert der gesuchten Wandschubspannung $\tau_{\rm W}$ an.



Abb. 2: Verläufe der Totalspannung, der viskosen Spannung und der Reynoldsspannung über y der Strömungsmessung bei $u_b = 19,3 \text{ m/s}$.

Luchini (2017) stellt eine universelle Formulierung turbulenter Geschwindigkeitsprofile vor, die die unterschiedlichen charakteristischen Schichten eines mittleren Geschwindigkeitsprofils repräsentiert. Basierend auf dem Vergleich dieser mit dem gemessenen Geschwindigkeitsprofil können beschreibende Parameter wie die Reibungsreynoldszahl $Re_{\tau} = u_{\tau}\delta/\vartheta$ der betrachteten Strömung ermittelt werden. Daraus wurde u_{τ} mit der halben Kanalhöhe als charakteristische Länge δ und der Viskosität der Luft $\vartheta = 1.55 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ bestimmt.

Die berechneten Wandeinheiten beider Ansätze stimmen sehr gut miteinander überein. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurde zur Ermittlung der viskosen Skala die Beschreibung des turbulenten Geschwindigkeitsprofils von Luchini verwendet.

Es ist anzumerken, dass die Wandschubspannung auch direkt anhand des Geschwindigkeitsgradienten an der Wand über die Formulierung der viskosen Spannung aus Formel 1 berechnet werden kann, da dort die Reynoldsspannung aufgrund der Haftbedingung verschwindet. Die Verwendung dieses Ansatzes setzt eine hochaufgelöste Messung des wandnahen Geschwindigkeitsprofils voraus und stellt somit eine Herausforderung bei der Auswahl einer geeigneten Messtechnik dar. Das beschriebene Vorgehen ist für weiterführende Untersuchungen verschiedener aktiver und passiver Strömungskontrollmechanismen dann von Vorteil, wenn der Ansatz nach Luchini aufgrund der Präsenz von Volumenkräften, wie beispielsweise beim Einsatz von Plasma-Aktuatoren, nicht mehr uneingeschränkt gültig ist.

Ergebnisse der Messungen

In den durchgeführten Experimenten wurden drei Geschwindigkeitskomponenten (*u*, *v*, *w*) in der Querströmungsebene (*y*, *z*) der Kanalströmung mit dem oben beschriebenen SPIV-Aufbau gemessen. Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten u_b betrugen in den betrachteten Fällen 7,6 m/s, 13 m/s, 19,3 m/s und 25,3 m/s, sodass die entsprechenden Reynoldszahlen Re_b basierend auf der halben Kanalhöhe 6180, 10570, 15690 und 20570 waren. Die Reynoldszahlen Re_{τ} auf der viskosen Skala für die betrachteten Fälle berechneten sich zu 354, 566, 822 und 1027.

Eine Überprüfung der Signifikanz der SPIV-Messungen wurde für alle betrachteten Reynoldszahlen an den *y*-Koordinaten maximaler Werte der Reynoldsspannungskomponenten uu^+ , vv^+ und ww^+ an je drei verschiedenen *z*-Koordinaten $z_{\text{links}} = 1/4 z_{\text{max}}$, $z_{\text{mitte}} = 1/2 z_{\text{max}}$ und $z_{\text{rechts}} = 3/4 z_{\text{max}}$ im Bildbereich durchgeführt. Abbildung 3 zeigt die Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponenten u, v und w bezogen auf u_b über der Anzahl der berücksichtigten Bildpaare für den Fall $Re_{\tau} = 822$, wobei die *z*-Koordinaten durch den Linienstil und die *y*-Koordinaten durch die Farbe angezeigt werden. Ab etwa $5 \cdot 10^3$ Bildpaaren konvergieren die Werte der relativen Standardabweichungen gegen einen konstanten Wert, sodass zusätzliche Bilder die mittleren Messwerte nicht mehr verändern. Für die anderen Reynoldszahlen war dies bereits bei einer geringeren Anzahl berücksichtigter Bildpaare zu beobachten.

Eine leichte relative Drehung der Lichtschnittebene (bzw. Messebene) zur Querströmungsebene wurde zu Beginn der Auswertung der berechneten Geschwindigkeiten durch eine Rotation des Koordinatensystems um 1.2° um *y*-Achse die bzw. 0.4° um die *z*-Achse korrigiert.

Abbildung 4 zeigt die in den Messungen ermittelten turbulenten Geschwindigkeitsprofile im Vergleich mit numerischen Referenzdaten (DNS Daten von Hoyas und Jimenez, 2008) in viskosen Einheiten $u^+(y^+)$. Die gemessenen Daten zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem charakteristischen Profil der wandnahen turbulenten Grenzschicht bis in die viskose Unterschicht im Fall der kleinsten betrachteten Reynoldszahl Re_{τ} =354. Das Abfallen der Messdaten bei großen y^+ - Werten zeigt die Position der Kanalmitte an, zu der die Geschwindigkeitsprofile symmetrisch verlaufen.



Abb. 3: Verhältnisse der Standardabweichungen der Geschwindigkeitskomponenten u, v und w zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_b über der Anzahl berücksichtigter Bildpaare bei $Re_{\tau} = 822$ an verschiedenen Positionen in der Querströmungsebene.



Abb. 4: Turbulente Geschwindigkeitsprofile der Messungen bei Re_{τ} = 354, 566, 822 und 1027 und numerische Referenzdaten bei Re_{τ} = 550 (Hoyas und Jimenez 2008) in viskosen Einheiten.

Die Verläufe der Wurzel der Reynoldsspannungskomponenten uu_{rms}^+ , vv_{rms}^+ und ww_{rms}^+ , sowie der Reynoldsspannungskomponente uv^+ in viskoser Einheit über den dimensionslosen Wandabstand y^+ sind in Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Die Messung mit $Re_{\tau} = 566$ zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den numerisch ermittelten Daten bei $Re_{\tau} = 550$. Abbildung 6 zeigt zusätzlich die gemessenen Profile der genannten Größen bei $Re_{\tau} = 822$ und 1027 und den Referenzfall bei $Re_{\tau} = 950$. Die Verläufe stimmen mit den numerischen Referenzdaten entsprechend ihrer Reynoldszahlen gut überein. Abweichungen der Messergebnisse von den Referenzdaten treten bei ww_{rms}^+ und uv^+ bei kleineren Reynoldszahlen auf.



Abb. 5: Verläufe der Wurzel der Reynoldsspannungskomponenten uu_{rms}^+ , vv_{rms}^+ und ww_{rms}^+ und der Reynoldsspannungskomponente uv^+ über den Wandabstand y^+ der Messung bei $Re_{\tau} = 566$ im Vergleich zu DNS Daten bei $Re_{\tau} = 550$ (Hoyas und Jimenez 2008) in viskosen Einheiten.



Abb. 6: Verläufe der Wurzel der Reynoldsspannungskomponenten uu_{rms}^+ , vv_{rms}^+ und ww_{rms}^+ und der Reynoldsspannungskomponente uv^+ über den Wandabstand y^+ Messungen bei $Re_{\tau} = 566$, 822 und 1027 im Vergleich zu DNS Daten bei $Re_{\tau} = 550$ und 950 (Hoyas und Jimenez 2008) in viskosen Einheiten.

Fazit und Ausblick

Die vorliegenden Stereo-PIV-Messdaten in der Querströmungsebene eines Flachkanals belegen, dass es mit dieser laseroptischen Messtechnik möglich ist, sowohl das mittlere Geschwindigkeitsprofil als auch die Reynoldsspannungen bei unterschiedlichen Reynoldszahlen hochaufgelöst bis in die viskose Unterschicht turbulenter Strömungen zu bestimmen. Dieser Versuchsaufbau ist daher geeignet die Strömungsbeeinflussung durch aktive und passive Turbulenzkontrolle in einem Set-Up zu vermessen, das in DNS reproduziert werden kann. So können durch komplementäre Messungen und DNS Strömungskontrolltechniken detailliert untersucht werden, deren numerische Abbildung selbst in DNS oft nur modellbehaftet möglich ist. Beispielhaft hierfür seien die Strömungsbeeinflussung mit Plasmaaktuatoren oder durch raue Wände mit Strukturen sehr kleiner Längenskala genannt.

Für zukünftige Messungen wird eine höhere Auflösung des wandnahen Bereichs angestrebt, um den Geschwindigkeitsgradienten an der Wand und somit die Wandschubspannung direkt messbar zu machen. Zudem könnten Messungen in der viskosen Unterschicht auch bei höheren Reynoldszahlen durchgeführt werden. Einen möglichen Ansatz hierfür stellen zusätzliche Messungen mit dem Stereo-PIV-Aufbau mit kleinerem Bildausschnitt und höherer Auflösung dar. Alternativ könnte simultan zu den vorgestellten SPIV-Messungen mit einem Laser Doppler Anemometrie Profilsensor (Czarske et al. 2002) ein hochaufgelöstes Geschwindigkeitsprofil direkt über der Wand erfasst werden. Die Eignung dieser Messtechnik für die Bestimmung der Reynoldsspannungen soll in zukünftigen Messkampagnen im direkten Vergleich mit Hitzdrahtmesstechnik evaluiert werden.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Projektes SPP 1881 (Projektnummer 316200959) für die Unterstützung. Unser Dank richtet sich weiterhin an Marios Kotsonis von der TU Delft für die Leihgabe der Telekonverter.

Literatur

2011: "Flightpath 2050 - Europe's Vision for Aviation Report" Publications Office of the European Union, Luxembourg

Hills, D., 2005: "The Airbus challenge", Aeronaut. J. 109(1102), 639–644

Joslin, R.D., 1998: "Aircraft Laminar Flow Control" Annu. Rev. Fluid Mech. 30 (1), 1–29

Von Deyn, L. H., Örlü R., Gatti, D., Kriegseis, J., Frohnapfel, B., Stroh, A., 2019: "Turbulent channel flows with secondary motions: A concerted DNS and experimental study", 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena

Gatti, D., Von Deyn, L. H., Forooghi, P., Frohnapfel B., 2020: "Do riblets exhibit fully rough behavior?" Exp. Fluids 61 (81)

Hehner, M. T., Gatti, D., Kriegseis, J., 2019: "Stokes-layer formation under absence of moving parts – A novel oscillatory plasma actuator design for turbulent drag reduction" Phys. Fluids, Vol. 31 (5), 051701

Hoyas, S., Jimenez, J., 2008: "Reynolds number effects on the Reynolds-stress budgets in turbulent channels" Phys. Fluids, Vol. 20 (10), 101511

Luchini, P., 2018: "Structure and interpolation of the turbulent velocity profile in parallel flow" European Journal of Mechanics-B/Fluids, 71, 15-34.

Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., Müller, H., 2002: "Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution" Measurement Science and Technology, 13(12):1979–1989

Pope, S. B., 2000: "Turbulent flows", Cambridge University Press, Cambridge