

Experimentelle Untersuchungen zur wandnahen Geschwindigkeitsverteilung an der luvseitigen Flanke eines Hügels unter Nutzung der Particle-Image-Velocimetry

Experimental investigations on near wall velocities on the windward slope of a hill, using Particle-Image-Velocimetry

Daniel Quosdorf, Ulrich Jenssen, Claudia Strobl, Michael Manhart
Fachgebiet Hydromechanik, Technische Universität München, 80333 München

Wandschubspannung, periodische Hügel, PIV
wall shear stress, periodic hill, PIV

Zusammenfassung

Die Strömung über periodisch angeordnete Hügel in einem ebenen Plattenkanal gilt als Standardfall der Strömungsmechanik und bietet die Möglichkeit, Phänomene wie z.B. die Ablösung einer Strömung an gekrümmten Oberflächen und ihr freies Wiederanlegen zu beobachten. Sie ist ein Benchmark für die Leistung sowohl numerischer Verfahren und Turbulenzmodelle als auch experimenteller Methoden (Breuer et al. 2009, Rapp und Manhart 2011, Manhart et al. 2011). Zu nennen sind hier auch die Deutsch-Französische Forschergruppe "Large Eddy Simulation of complex turbulent flows" (FOR 507) sowie die 4. PIV-Challenge (<http://www.pivchallenge.org>).

Ziel der hier vorgestellten Untersuchung ist es, mit Hilfe der Particle-Image-Velocimetry (PIV) Geschwindigkeitsfelder möglichst nah an der Wand aufzulösen, um Aussagen über die Grenzschicht- und Turbulenzstrukturen an der ansteigenden Flanke eines solchen Hügels treffen zu können. Für die Messposition $x/h = 8$ und eine Reynolds-Zahl von $Re = 37000$ kann anhand von Geschwindigkeitsprofilen und der Verteilung der Reynolds-Schubspannungen gezeigt werden, dass die sich ausbildende Grenzschicht gestört ist und sich nicht durch das universelle Wandgesetz beschreiben lässt. Sie wird maßgeblich von der Außenströmung kontrolliert.

Einleitung

Die Strömung über periodisch angeordnete Hügel ist gekennzeichnet durch eine Beschleunigung des Fluids, die durch die ansteigende Kontur des Hügel, aber mehr noch durch die Verengung des Querschnitts hervorgerufen wird. Ist der Hügel steil genug, kommt es an der Kuppe zur Ausbildung einer Übergeschwindigkeit, die jedoch von der Form des Hügels abhängig ist. Hinter dem Hügel entwickelt sich ein Rezirkulationsgebiet. Die Größe des Rezirkulationsgebiets und auch der Punkt des Wiederanlegens schwanken mit der Zeit. Ein Vergleich vorausgehender PIV-Messungen mit numerischen Simulationen (LES) zeigt, dass die Größe des Rezirkulationsgebiets durch die Simulation überschätzt wird. Ein Grund hierfür ist vermutlich eine falsche Voraussage der Turbulenzstrukturen im Luv-Bereich des Hügels

durch die Numerik. Dies führt zu einer Aufdickung der inneren Grenzschicht und somit zu einer geringeren Übergeschwindigkeit an der Kuppe des Hügels. In Abb. 1a ist ein Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten in Hauptströmungsrichtung $\langle u \rangle$ dargestellt. Der Fehler setzt sich bis ins Rezirkulationsgebiet fort. Es besteht somit ein Interesse daran, die Turbulenzstrukturen im wandnahen Bereich messtechnisch zu erfassen. Aus diesem Grund wurden Messungen mit hoher räumlicher Auflösung unter Nutzung der PIV im Bereich der ansteigenden Flanke ($x/h = 8$) und am Übergang zur Kuppe des Hügels ($x/h = 8.7$) bei zwei Reynolds-Zahlen $Re = 37000$ und $Re = 10600$ durchgeführt. Ergebnisse für $x/h = 8$ bei $Re = 37000$ sollen in diesem Beitrag diskutiert werden. Die Reynolds-Zahl wird hierbei mit der Bulk-Velocity u_b und der Höhe des Hügels $h = 50$ mm gebildet. Die Bulk-Velocity ist die mittlere Geschwindigkeit im verengten Querschnitt über der Kuppe des Hügels. Die Abb. 1b zeigt die Geometrie sowie die betrachteten Messfelder.

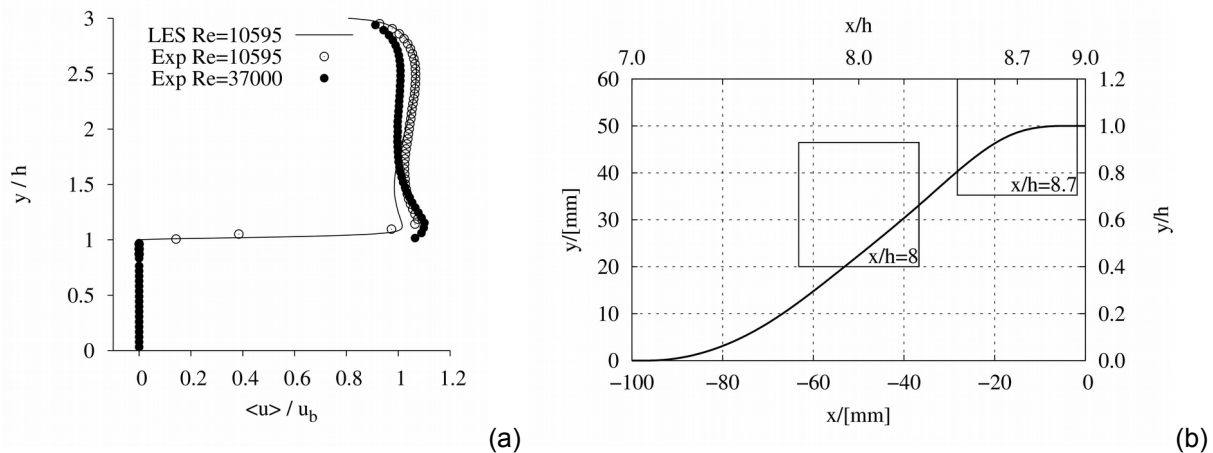


Abb. 1: Verteilung der normierten Geschwindigkeitskomponente in Hauptströmungsrichtung $\langle u \rangle$ für Messungen bei verschiedenen Reynolds-Zahlen im Vergleich zu einer Large-Eddy Simulation auf der Hügelkuppe (Manhart et al. 2011) (a), Geometrie an der Luv-Seite des Hügels und Koordinaten sowie Ausdehnung der Messfelder bei $x/h = 8$ und $x/h = 8.7$ (b)

Versuchsaufbau und Messung

Die Messungen wurden an einem bereits bestehenden Versuchsaufbau am Fachgebiet Hydromechanik der Technischen Universität München durchgeführt (siehe Rapp 2009, Rapp und Manhart 2011). Der Querschnitt der Messstrecke wurde mit einer Höhe von $3.035 h$ und einer Breite von $18 h$ so gewählt, dass sich eine in spannweitung Richtung homogene Strömung einstellt. Es wurden 10 Hügel nacheinander angeordnet, um eine Periodizität der Strömung zu gewährleisten. Angetrieben wird die Strömung von einer Kreiselpumpe, die das Fluid (Wasser) aus einem Reservoir in einen mehrkammerigen Einlaufbehälter fördert. In diesem durchströmt das Fluid mehrere Lochbleche zum Energieabbau und zur Vergleichmäßigung. Der Auslauf aus diesem Behälter besitzt die Form eines Viertelkreises, um Ablösungen zu verhindern. Vor Einlauf in die Messstrecke durchläuft das Fluid noch einen Gleichrichter. Am Auslauf befindet sich ein Wehr. Der Volumenstrom kann über einen Schieber geregelt und über einen magnetisch-induktiven Durchflussmesser erfasst werden. Der Aufbau ist in der Abb. 2 graphisch dargestellt.

Verwendet wurde ein klassisches Mono-PIV-System. Die Lichtschnittoptik wurde oberhalb des Strömungskanal befestigt, so dass sich der Lichtschnitt senkrecht und entlang der Hauptströmungsrichtung öffnet. Die Kamera wurde in einem Winkel von 90° zur Lichtschnittebene angebracht. Um eine hohe räumliche Auflösung zu erhalten, wurde ein Makroobjektiv mit einer Brennweite von $f_{\text{foc}} = 105$ mm verwendet. Vergrößerung und Brennweite wurden

durch einen Telekonverter (2x) verdoppelt. Es konnte eine räumliche Auflösung von $12.89 \mu\text{m} / \text{pix}$ erreicht werden, was einer Auflösung von $5.9 \eta_K$ entspricht, wobei $\eta_K = 35 \mu\text{m}$ die Kolmogorov-Länge ist. In der Tab.1 sind wesentliche Parameter für Messsystem und Experiment angegeben.

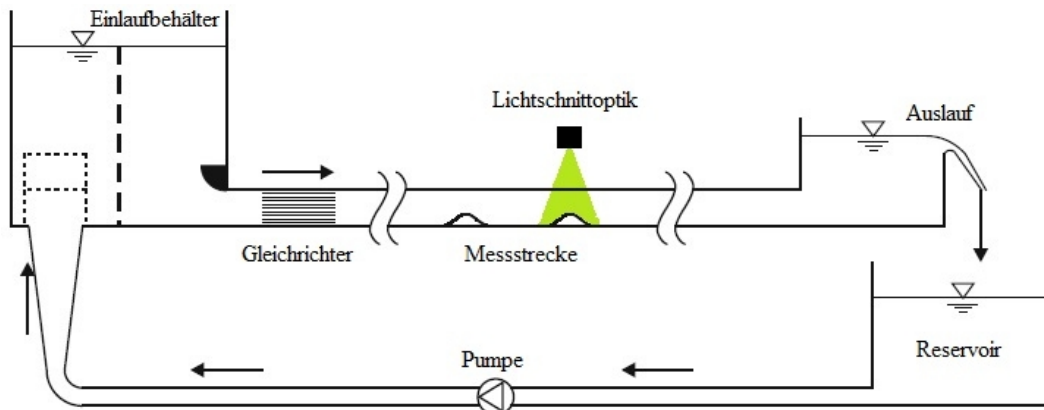


Abb. 2: Aufbau des Versuchsstandes (Rapp 2009, editiert)

Bei wandnahen Messungen ist für gewöhnlich mit Reflexionen durch die Oberfläche zu rechnen, die eine Auswertung der PIV-Bilder in unmittelbarer Wandnähe erschweren. Um dies zu verhindern, wurde die Oberfläche des Hügels mit einem Lack beschichtet, dem der fluoreszierende Farbstoff Rhodamin B zugegeben wurde (Depardon et al. 2005). Das Kameraobjektiv selbst wurde mit einem optischen Bandpassfilter (532BP10) ausgestattet.

PIV-System	Experiment
Kamera: Auflösung: 2048 x 2048 pix Messfrequenz: $f = 7.5 \text{ Hz}$ Brennweite: $f_{\text{foc}} = 210 \text{ mm}$	Partikel: Glashohlkugeln ($d_p = 10 \mu\text{m}$, $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) Bulk-Velocity: $u_b = 0.744 \text{ m/s}$ Maßstab: $M = 12.89 \cdot 10^{-6} \text{ m/pix}$ Reynolds-Zahl: $Re = 37000$ Anzahl der Bilder: $n = 10000$ Fluid: Wasser
Laser: Typ: NdYag-Doppelpulslaser Leistung: $2 \times 190 \text{ mJ}$	

Tab. 1: Parameter des Messsystems und Daten zum Experiment

Verringerung des Wandinflusses und Auswertung

Eine erste Beurteilung der aufgenommenen Bilder ergab, dass trotz der Nutzung eines fluoreszierenden Anstrichs Artefakte an der Wand auftraten. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei nicht um eine Reflexion des Wandmaterials selbst, sondern vielmehr um das Streulicht angelagerter Partikel handelt. Um Einsicht in die wandnahen Strukturen der Strömung zu erhalten, ist die Bestimmung des Wandabstandes und eine ungestörte Berechnung wandnaher Geschwindigkeitsvektoren essentiell. Da die Bestimmung der Wandposition durch die Nutzung eines Kalibriertargets nur mit unzureichender Genauigkeit möglich war, wurde die Wandkontur in erster Näherung aus dem Ensemble-Minimum aller Bilder bestimmt. Die gut sichtbaren anhaftenden Partikel ermöglichten die Konstruktion eines Polynoms 3. Grades, durch das die Geometrie der Wand an dieser Stelle beschrieben werden kann. Im Weiteren kann dann der Wandabstand selbst iterativ aus dem Geschwindigkeitsfeld bestimmt werden, wenn es bis in den linearen Bereich aufgelöst wird.

Zunächst aber erfolgte eine Bildvorverarbeitung, um den Einfluss der Wand zu verringern. Hierbei wurden der Hintergrund mit Hilfe eines räumlichen Medianfilters abgezogen und die

verbleibenden hellen Wandbereiche durch Herausschneiden entfernt. Der abgeschnittene Bereich wurde durch einen geringen konstanten Grauwert ersetzt. Abschließend wurde ein Gaußfilter angewandt. Die Abb. 3a zeigt einen Bildausschnitt an der Wand. Auf der linken Seite ist das Rohbild dargestellt. Zu erkennen sind die durch anhaftende Partikel erzeugten Artefakte. Die rechte Seite des Bildes zeigt einen durch die Bildvorverarbeitung behandelten Bereich. Dargestellt ist auch die erste Schätzung des Wandverlaufs und ihre Darstellung durch ein Polynom.

Zur Ermittlung der Geschwindigkeitsvektoren wurde der klassische Ansatz über die Kreuzkorrelation auf quadratischen Abtastflecken der Größe 16 x 16 Pixel gewählt. Schneidet einer der Abtastflecke den abgeschnittenen Bereich, kann es zu einer Verfälschung des berechneten Geschwindigkeitsvektors kommen. Um derartige Fehler zu kompensieren, kann ein entsprechender Vektor in den Schwerpunkt des Teils seines Abtastflecks verschoben werden, der in der Strömung liegt und Informationen enthält. Theunissen et al. 2008 diskutieren diese und weitere Maßnahmen. Die Abb. 3b zeigt beispielhaft wandnahe Vektoren und ihre Verschiebung in den Schwerpunkt des verbliebenen Teils ihres Abtastflecks.

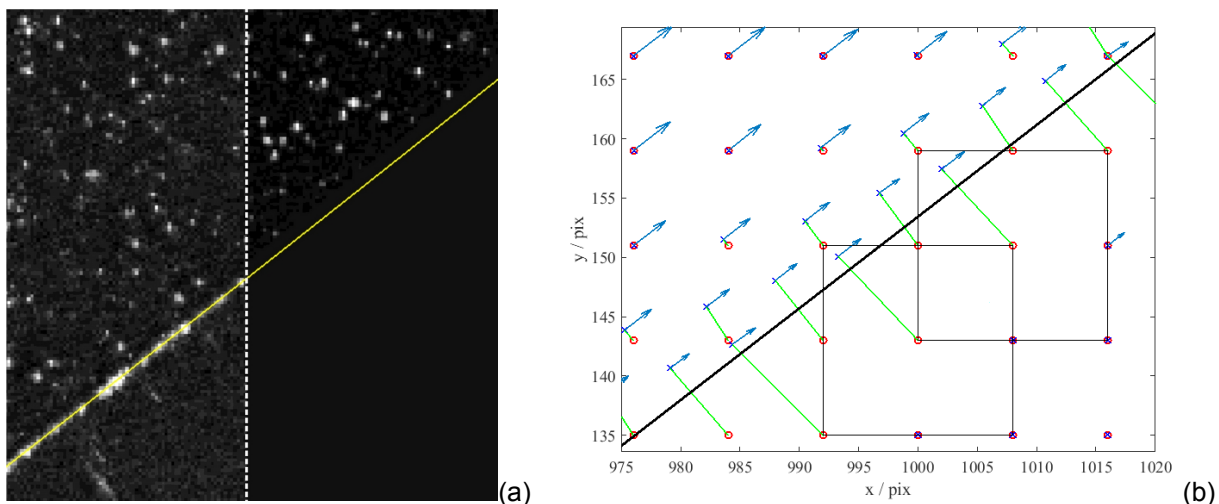


Abb. 3: Bildvorverarbeitung: Rohbild links, Ergebnis der Vorverarbeitung auf der rechten Seite sowie erste Schätzung des Wandverlaufs (a), Verschiebung von Vektoren in den Schwerpunkt des außerhalb des abgeschnittenen Bereichs befindlichen Teils eines Abtastflecks (b)

Um die Wandposition zu ermitteln, wurde folgendes Verfahren angewandt. Ausgehend von der ersten Schätzung des Wandverlaufs und der Approximation durch ein Polynom, wurden die Geschwindigkeiten in ein wandorientiertes Koordinatensystem transformiert, dessen Achsen an jedem Punkt tangential und normal zur Wand gerichtet sind $(x, y) \rightarrow (x_t, x_n)$. Es ergeben sich hieraus Normal- und Tangentialkomponenten der Geschwindigkeit (u_t, u_n) . Unter der Annahme, dass der Anstieg der Wandkontur annähernd konstant und der Gradient $\partial u_t / \partial x_t$ klein ist, können nun nebeneinander liegende, senkrechte Profile u_t - x_n überlagert werden, um die Anzahl der Aufpunkte zu erhöhen. Die Abb. 4a zeigt dieses Vorgehen angewandt auf unterschiedlich ausgewertete Datensätze an der Position $x / h = 8$. Dargestellt sind Geschwindigkeiten, die aus unbearbeiteten Rohbildern ermittelt wurden, sowie Geschwindigkeiten aus vorverarbeiteten Bildern und vorverarbeiteten Bildern mit Verschiebung der wandnahen Vektoren in den Schwerpunkt ihres Abtastflecks. Erkennbar ist, dass die unbearbeiteten Bilder (+) stark streuende Vektoren in unmittelbarer Wandnähe produzieren. Diese können als unzuverlässig gelten, da die Wand und ihre Artefakte einen starken Einfluss auf die Korrelation haben. Auch die Geschwindigkeiten aus den vorverarbeiteten Bildern (x) - ohne Verschiebung - streuen stark. Zudem fällt das Profil schnell ab. Eine Verschiebung der Vektoren in den Schwerpunkt (\square) führt das Profil auf einen plausiblen Verlauf mit geringer Streuung. An

dieses kann nun eine Gerade angelegt werden. Ihr Schnittpunkt mit der x_n -Achse gibt den Wandabstand relativ zur ersten Schätzung an. Nach einer Verschiebung des Polynoms um diesen Abstand kann diese Prozedur nun wiederholt werden, bis die angelegte Gerade durch den Ursprung des Koordinatensystem verläuft. Der letzte Schritt dieser Iteration ist in der Abb. 4b dargestellt. Erkennbar ist, dass der lineare Bereich der Grenzschicht aufgelöst wurde. Somit können Wandabstand und Wandschubspannung berechnet werden.

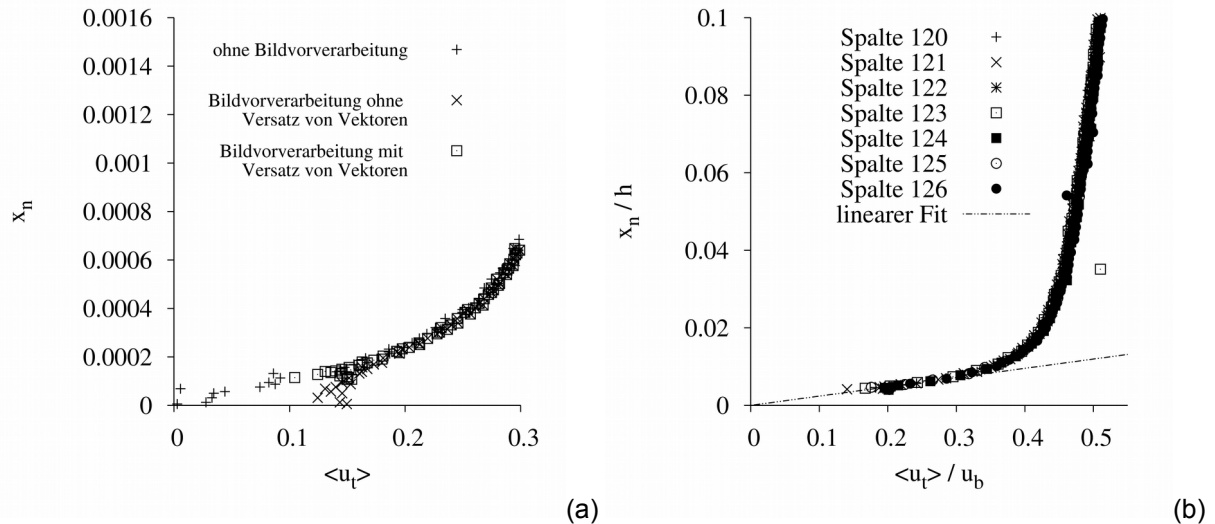


Abb. 4: Vergleich von Geschwindigkeitsprofilen bei verschiedenen Stufen der Vorverarbeitung/Auswertung (jeweils 6 senkrechte Profile in der Umgebung von $x / h = 8$) (a), senkrechte Profile des letzten Iterationsschritts und linearer Fit zur Ermittlung der Wandschubspannung (b)

Exemplarisch für den untersuchten Bereich wurde nun mit Hilfe dieses Verfahrens an zwei Positionen ($x / h = 8.0$ und $x / h = 8.2$) die Wandschubspannung berechnet. Sie steigt in Strömungsrichtung an, was mit der starken Beschleunigung des Fluids erklärt werden kann. Dementsprechend sinkt die viskose Länge. Die Ergebnisse sind in der Tab. 2 genannt.

Position	Wandschubspannung $\tau_w = \mu \cdot \frac{\partial u_t}{\partial x_n}$	Wandschubspannungsgeschwindigkeit $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$	Viskose Länge $\delta^+ = \frac{\nu}{u_\tau}$
$x / h = 8.0$	0.62 N / m ²	0.025 m / s	40 μ m
$x / h = 8.2$	0.83 N / m ²	0.029 m / s	35 μ m

Tab. 2: Ergebnisse der Auswertung von Geschwindigkeitsprofilen an zwei Positionen ($x / h = 8.0$ und $x / h = 8.2$)

Interpoliert man die Geschwindigkeitsverteilung auf einen Pfad, der normal zur Wand verläuft und trägt sie in inneren Koordinaten auf, so erkennt man, dass der Verlauf für beide Positionen dem linearen Wandgesetz $y^+ = u^+$ bis $x_n \approx 10 \nu / u_\tau$ folgt. Der lineare Bereich der Grenzschicht ist somit dicker als bei einer Gleichgewichtsgrenzschicht. Im Verhältnis zur Beschleunigung steigt die Wandschubspannung zu langsam an, wodurch es zu dieser Aufdickung des linearen Bereichs kommt. Für größere Wandabstände können dann Abweichungen vom logarithmischen Wandgesetz festgestellt werden. Die Verläufe sind in der Abb. 5a dargestellt.

In Abb. 5b sind mehrere nebeneinander liegende Profile der transformierten Reynolds-Schubspannungen $\langle u_t' u_n' \rangle$ in inneren Koordinaten in wandnormaler Richtung in der Umgebung von $x / h = 8.0$ aufgetragen. Sie wurden mit Abtastflecken der Größe 32 x 32 Pixel berechnet. Erkennbar ist in unmittelbarer Nähe zur Wand ein Verhalten, das qualitativ zu einer

voll entwickelten Kanalströmung (Kim et al. 1987) oder zur Simulation einer turbulenten Grenzschicht (Spalart 1988) passt. Die Verteilungen zeigen ein Maximum bei $x_n \approx 20 v / u_\tau$. Darüber hinaus kommt es zu einem annähernd linearen Anstieg der Reynolds-Schubspannungen, welche die Werte für eine Gleichgewichtsgrenzschicht im äußeren Bereich übersteigen.

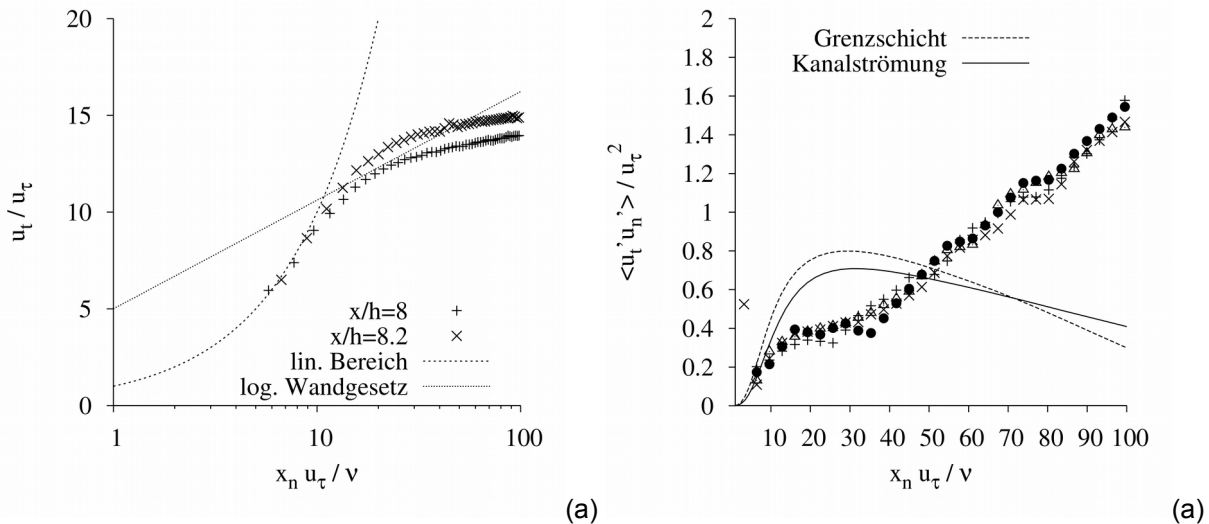


Abb. 5: Geschwindigkeitsprofil auf einem wandnormalen Pfad in inneren Koordinaten und Vergleich mit dem Wandgesetz (a), Reynolds-Schubspannungen $\langle u_i' u_n'^2 \rangle$, interpoliert auf einen wandnormalen Pfad in der Umgebung von $x / h = 8.0$ im Vergleich mit einer turbulenten Grenzschicht (Spalart 1988) und einer voll entwickelten Kanalströmung (Kim et al. 1987) (b)

Schlussfolgerungen

Aus den vorliegenden Ergebnissen kann gefolgert werden, dass mit dem aktuell verfügbaren Equipment wandnahe Messungen der Geschwindigkeitsverteilungen durchgeführt werden können. Der lineare Bereich der Geschwindigkeitsprofile wird aufgelöst, womit eine Möglichkeit zur Ermittlung von Wandabstand und Wandschubspannung geschaffen wird. Eine Verbesserung der Ergebnisse erfolgt durch eine Bildvorverarbeitung sowie durch eine Verschiebung von Geschwindigkeitsvektoren in den Schwerpunkt der verbleibenden Fläche eines Abtastflecks, wenn dieser die Trennlinie zum abgeschnittenen Bereich schneidet. Die ermittelten Geschwindigkeitsprofile folgen dem universellen Wandgesetz nicht. Die Reynolds-Normalspannungen folgen dem Verlauf für eine Gleichgewichtsgrenzschicht im wandnahen Bereich, steigen aber mit wachsendem Abstand von der Wand an. Dies lässt darauf schließen, dass die Strömung maßgeblich von der Außenströmung beeinflusst und die Ausbildung eines Gleichgewichts gestört wird. Eine verbesserte Auswertung mit höherer Genauigkeit und verminderter Anfälligkeit für Einflüsse der Wand ist durch die Anwendung von Verfahren zu erwarten, die auf der Single Pixel Ensemble Correlation basieren (siehe Strobl et al. 2014 und Strobl et al. 2015).

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts (Geschäftszeichen: MA2062/7-1 und MA2062/7-2).

Literatur

Breuer, M.; Peller, N.; Rapp, C.; Manhart, M., 2009: Flow over periodic hills – numerical and experimental study over a wide range of Reynolds numbers. *Computers and Fluids*, 38 (2), S. 433-457

Kim, J.; Moin, P.; Moder, R. 1987: Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 177, S. 133-166

Depardon, S.; Lasserre, J.J.; Boueilh, J.C.; Brizzi, L.E.; Borée, J., 2005: Skin friction pattern analysis using near wall PIV. *Experiments in Fluids*, 39, S. 805-818

Manhart, M.; Rapp, C.; Peller, N.; Breuer, M.; Aybay, O.; Denev, J.A.; Falconi, C., 2011: Assessment of eddy resolving techniques for the flow over periodically arranged hills up to $Re=37000$. In: Salvetti, M.V.; Geurts, B.; Meyers, J. and Sagaut, P., eds., *Quality and Reliability of Large Eddy Simulations II*, S. 361-372, Springer

Rapp, C., 2009: Experimentelle Studie der turbulenten Strömung über periodische Hügel, Dissertation, Technische Universität München, München

Rapp, C.; Manhart, M., 2011: Flow over periodic hills – an experimental study. *Experiments in fluids*, 51 (1), S. 247-269

Spalart, P. 1988: Direct simulation of a turbulent boundary layer up to $Re = 1410$. *Journal of Fluid Mechanics*, 187, S. 61-98

Strobl, C.; Quosdorf, D.; Manhart, M., 2014: Reconstructing velocity distributions from single pixel ensemble correlation PIV images. In: *Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, GALA 2014*, GALA, Karlsruhe

Strobl, C.; Quosdorf, D.; Manhart, M., 2015: Einflussfaktoren auf PIV Auswertungen mit Single Pixel Ensemble Correlation. In: *Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, GALA 2015*, GALA, Dresden

Theunissen, R.; Scarano, F.; Riethmüller, M.L., 2008: On improvement of PIV images near stationary interfaces. *Experiments in Fluids*, 45, S. 557-572

<http://www.pivchallenge.org>