

HOCHAUFGELÖSTE MESSUNGEN IN TURBULENTEN GRENZSCHICHTEN MIT PIV UND PTV

C.J. Kähler, S. Scharnowski, C. Cierpka

Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr München,
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Schlagworte: PIV, PTV, Genauigkeit, Auflösung

Key words: PIV, PTV, accuracy, resolution

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird gezeigt, dass sich mit modernen PIV und PTV Auswertetechniken die Ortsauflösung bei einem Arbeitsabstand von einem Meter auf über 5 μm steigern lässt. Da sich auf diese Weise Messfehler aufgrund einer räumlichen Mittelung über das Messvolumen nahezu vollständig vermeiden lassen, ist eine sehr präzise Messung der Geschwindigkeit in transparenten Strömungen mit diesen bildgebenden Messverfahren möglich. Darüber hinaus lässt sich die Messposition sehr genau bestimmen und Vibrationen des Modells oder des Messsystems können vollständig kompensiert werden. Daher können auch bei Scherströmungen sehr genaue Daten erhoben werden. Die Verlässlichkeit der entwickelten Techniken wird am Beispiel einer turbulenten Grenzschichtströmung entlang einer ebenen Platte nachgewiesen.

Einleitung

Die Fortschritte im Bereich der numerischen Simulation von Strömungen haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass der Bedarf an verlässlichen experimentellen Daten sehr stark zugenommen hat. Die experimentelle Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit mit geringer Messunsicherheit ist aber aus folgenden Gründen eine große Herausforderung:

1. Die Präparierung der Strömung mit der erforderlichen Qualität ist oftmals nicht möglich, da zum Beispiel nicht kontrollierbare Vibrationen der Versuchsanlage oder stochastische Unsicherheiten bedingt durch turbulente Temperaturfluktuation in der Strömung stören.
2. Mit abnehmendem Abstand zur Wand sinkt die Strömungsgeschwindigkeit und die Messunsicherheit nimmt zu, so dass die verlässliche Erhebung von Daten in diesem Bereich äußerst schwierig ist.
3. Bei der Untersuchung von Scherströmungen treten aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung gemäß Abbildung 1 stets systematische Fehler auf, die nur bedingt korrigiert werden können.

Der erste Punkt lässt sich durch kleinere Anlagen die sich besser kontrollieren lassen teilweise beheben, allerdings ergeben sich dann Einschränkungen bzgl. des Parameterraumes. Beispielsweise skaliert die erreichbare Reynolds-Zahl mit der Dimension der Anlage. Um den zweiten Punkt zu verbessern, wurden die sogenannten Multiframe-Techniken entwickelt (Hain und Kähler, 2007).

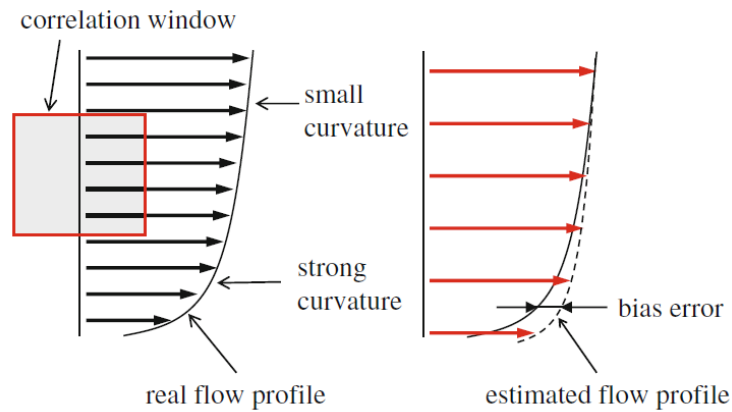


Abb. 1: Räumliche Filterung bei der Berechnung eines Geschwindigkeitsprofils mit Fensterkorrelation.

Um Verbesserung bezüglich des dritten Punktes zu erzielen, wurde versucht die Miniaturisierung der Messsonden voranzutreiben, um den Effekt durch die räumliche Mittelung zu reduzieren. Bei den mechanischen Sonden wurde zum Beispiel die runde Öffnung durch eine ovale Öffnung ersetzt, so dass mit diesen so genannten Fischmaulsondern Grenzschichtprofile mit verbesserter Genauigkeit ermittelt werden können (Eckelmann, 1997). Im Bereich der elektrischen Messtechnik wurden aufbauend auf die Hitzdrahtmesstechnik miniaturisierte Varianten entwickelt, die heute mit einer Auflösung von wenigen Mikrometern arbeiten (Vallikiv et al. 2011). Leider handelt es sich bei den beiden genannten Verfahren um invasive Techniken, welche die Strömung stören. Um diese Problematik zu vermeiden, wurden im Bereich der optischen Messtechnik ebenfalls Weiterentwicklungen vorangetrieben. So ist es zum Beispiel in den letzten Jahren bei der Laser Doppler Anemometrie (LDA) gelungen, die Position einzelner Partikel innerhalb des Messvolumens mit einer Genauigkeit von $5\ \mu\text{m}$ bei $300\ \text{mm}$ Arbeitsabstand zu bestimmen (Shirai et al., 2006). Im Bereich der Particle Image Velocimetry (PIV) konnten ebenfalls enorme Verbesserungen erzielt werden, indem Mikroskopoptiken zusammen mit hochauflösenden Auswertetechniken kombiniert wurden (Kähler et al., 2006). Mit der so genannten Ensemble-Korrelation ist die Auflösung durch die Partikelbildgröße D bestimmt, die sich bei der Abbildung eines beleuchteten Tröpfchens ergibt (Kähler et al., 2012).

In Abbildung 2 (links) ist zu sehen, dass sich mit dieser Technik selbst Sprünge im Geschwindigkeitsprofil relativ zuverlässig auflösen lassen. Leider nimmt die Größe der Partikelbilder mit zunehmendem Abbildungsmaßstab ebenfalls zu, so dass die maximale Auflösung (SRW = Step Response Width) bei einem Arbeitsabstand von einem Meter circa $5\ \mu\text{m}$ beträgt (abgeleitet aus Kähler et al., 2012).

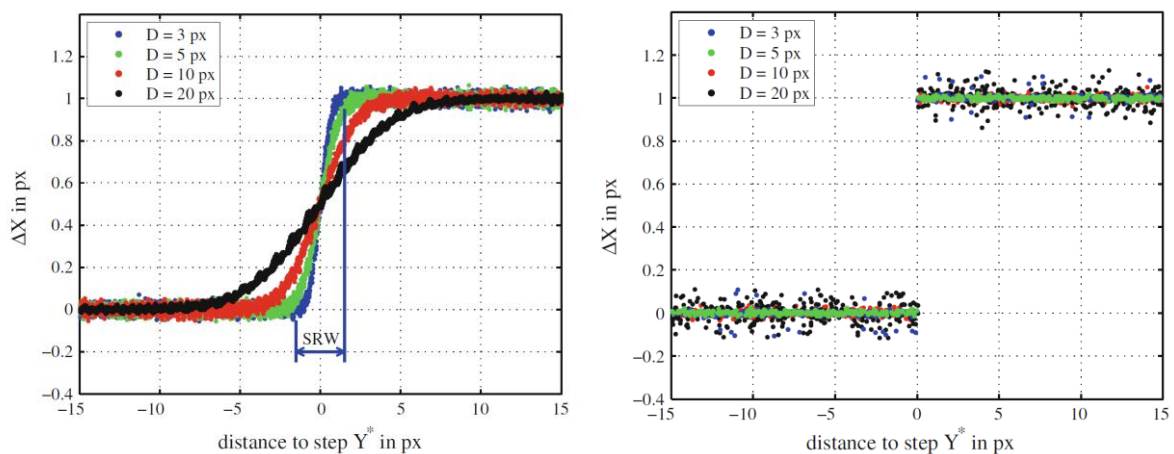


Abb. 2: Antwort einer Sprungfunktion ermittelt mit Single-Pixel Ensemble-Korrelation (links) und mit PTV (rechts) nach Kähler et. al 2012.

Um die Auflösung weiter zu verbessern, wurde in den letzten Jahren die Particle Tracking Velocimetry (PTV) Technik erheblich weiter entwickelt (Cierpka und Kähler, 2012 und enthaltene Referenzen). Bei dieser Methode wird nicht ein Ensemble von Partikelbildern betrachtet, aus dem eine mittlere Geschwindigkeit abgeleitet wird, sondern die Verschiebung von einzelnen Partikelbildern. Abbildung 2 (rechts) verdeutlicht, dass sich mit dieser Technik beliebige Geschwindigkeitssprünge in transparenten Strömungen zuverlässig auflösen lassen. Die Ortsauflösung ist nur durch die Präzision, mit der sich die Position eines Partikelbildes bestimmen lässt, begrenzt. Diese wiederum ist abhängig von der Größe des Partikelbildes, wobei Partikelbilder mit einem Durchmesser von 3-15 Pixeln mit einer Ortsunsicherheit von 0.01 Pixel (bei hinreichendem Signal zu Rauschverhältnis) in ihrer Position bestimmt werden können (Cierpka und Kähler, 2012). Um das Potential der neuen Entwicklungen abschätzen zu können, wurden detaillierte Untersuchungen in turbulenten Grenzschichtströmungen entlang einer ebenen Platte durchgeführt, die im Folgenden vorgestellt werden.

Versuchsaufbau

Die Experimente wurden im Atmosphärischen Windkanal der Universität der Bundeswehr München durchgeführt. Die in Abbildung 3 dargestellte Anlage hat eine 22 m lange Messstrecke und die Querschnittsfläche beträgt $2 \times 2 \text{ m}^2$. Die turbulente Grenzschicht, die sich auf dem Boden der Messstrecke ausbildet, wurde 15 m hinter dem Beginn der Messstrecke analysiert. Für die Messung wurde die Strömung mit DEHS Partikeln versetzt, die einen mittleren Durchmesser von $1 \text{ }\mu\text{m}$ besitzen. Für die Beleuchtung der Partikel wurde ein Spectra Physics Quanta-Ray PIV 400 Nd:YAG doppel-puls-Laser verwendet. Die Lichtschnittdicke betrug 1 mm. Vier unterschiedlich große Beobachtungsfelder wurden vermessen, welche in Abbildung 4 schematisch dargestellt sind. Die experimentellen Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

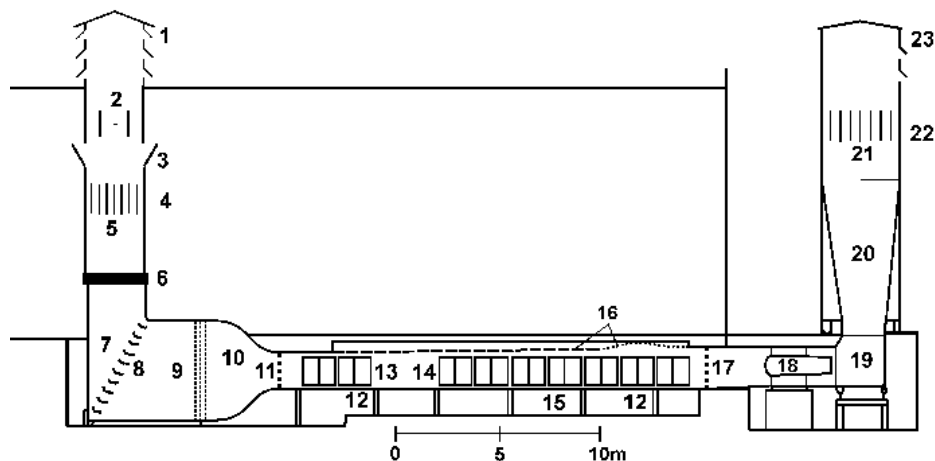


Abb. 3: Skizze des Atmosphärischen Windkanals München (AWM)

Tabelle 1 Messparameter

Position	Wandabstand in mm	Maßstab	Skalierung in $\mu\text{m}/\text{px}$	D in px
1	300 ... 740	0.04	173	2-3
2	-11 ... 438	0.04	177	2-3
3	-3.5 ... 60	0.26	24.8	5-8
4	-1.8 ... 9.1	1.52	4.3	10-25

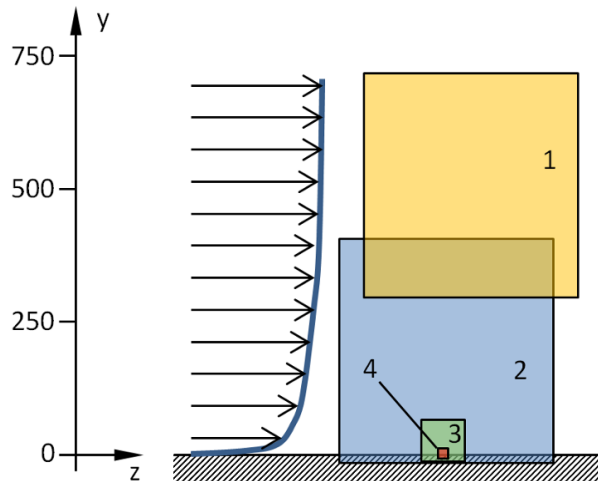


Abb 4: Messbereiche der 4 Positionen

Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt die gemessenen turbulenten Grenzschichtprofile für drei verschiedene Reynolds-Zahlen. Für die Bestimmung der einzelnen Geschwindigkeitsprofile wurden jeweils 10000 Bildpaare mit der Ensemble-Korrelation ausgewertet. Die ermittelten Grenzschichtdicken und weitere abgeleitete Größen sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Auflösung in wandnormaler Richtung beträgt $350 \mu\text{m}$ und unter Berücksichtigung der Ausdehnung des Beobachtungsfeldes von ca. 450 mm , ergibt sich eine Dynamik von über 1000 unabhängigen Geschwindigkeitsvektoren. Trotz der im Vergleich mit konventionellen PIV Auswertetechniken deutlich verbesserten Auflösung, kann die viskose Unterschicht nicht hinreichend abgetastet werden, wie Abbildung 6 verdeutlicht.

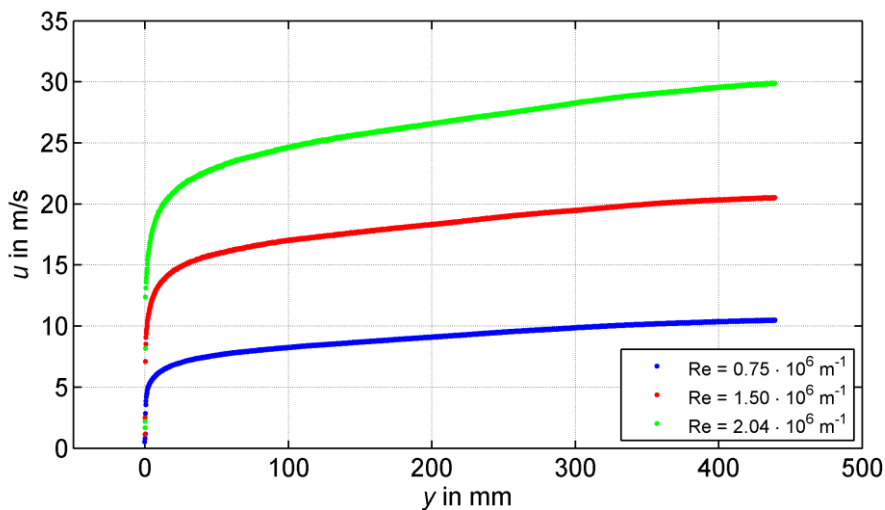


Abb. 5: Geschwindigkeitsprofile einer turbulenten Grenzschichtströmung bei drei verschiedenen Reynolds-Zahlen berechnet mit der Ensemble-Korrelation (Kähler et al., 2012c)

Tabelle 2 Ergebnisse der Ensemble-Korrelations Auswertung

Re in 10^6 m^{-1}	u_∞ in m/s	δ_{99} in mm	u_τ in m/s	τ_w in N/m^2
0.75	11.06 ± 0.02	535 ± 3	0.34 ± 0.01	0.14 ± 0.01
1.50	21.13 ± 0.03	457 ± 5	0.67 ± 0.02	0.52 ± 0.02
2.04	30.30 ± 0.05	455 ± 4	0.93 ± 0.03	1.01 ± 0.04

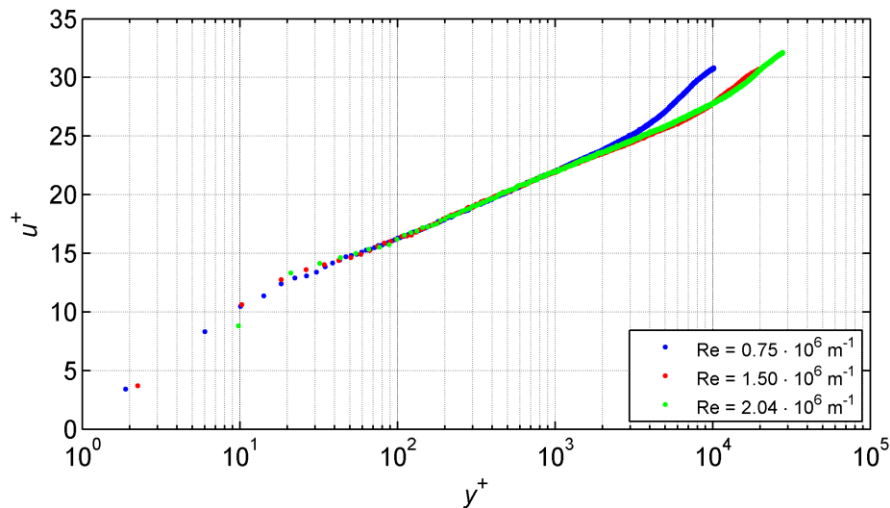


Abb. 6: Geschwindigkeitsprofile einer turbulenten Grenzschichtströmung bei drei verschiedenen Reynolds-Zahlen berechnet mit PTV (Kähler et al., 2012c)

Um den in Abbildung 6 hervorgehobenen wandnahen Bereich besser zu vermessen, wurde der in Abbildung 4 gezeigte Ausschnitt 4 mit der Particle Tracking Methode analysiert. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse zusammen mit den Ergebnissen der anderen Messungen dargestellt. Die räumliche Auflösung beträgt bei diesen Messungen $4.3 \mu\text{m}$, bzw. 0.098 Wand-einheiten. Die viskose Unterschicht ist deutlich zu erkennen und wurde mit ca. 50 unabhängigen Datenpunkten aufgelöst. Mit dieser Methode ist daher eine zuverlässige Bestimmung der Wandschubspannung auch bei großen Arbeitsabständen und Reynolds-Zahlen direkt möglich. Innerhalb der viskosen Unterschicht ist ebenfalls die deutliche Verbesserung der Ergebnisse gegenüber der Auswertung mit der Ensemblekorrelation zu erkennen (vgl. SP 1-2 Profil).

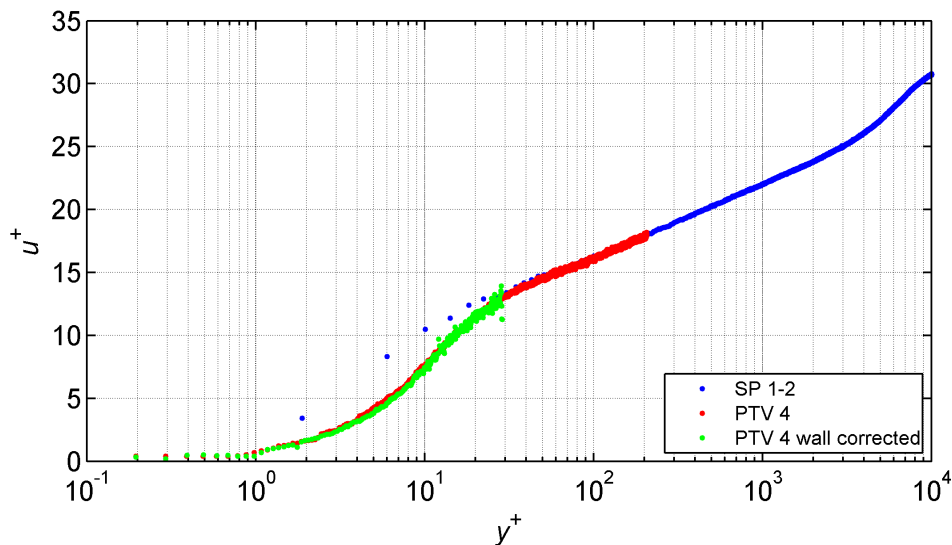


Abb 7: Normierte Geschwindigkeitsprofile. Mit der Particle Tracking Velocimetry kann die viskose Unterschicht sehr gut erfasst werden (Kähler et al., 2012c)

Eine genaue Analyse der Daten zeigt, dass sich lediglich im untersten Bereich der Grenzschicht eine Abweichung vom theoretischen Geschwindigkeitsverlauf ergibt. Diese Abweichung beruht auf Vibrationen des Modells oder des Messaufbaus, die bei den hochauflösenden Messungen (Pos. 4) eine Standardabweichung von $1,3 \text{ pixel}$ oder $5,7 \mu\text{m}$ besitzen. Um diesen Fehler zu korrigieren, wurde für jedes Partikelbild die Wandposition ermittelt und kor-

rigiert. Trotz des vermeintlich geringen Effektes (siehe Abbildung 8) ergeben sich nennenswerte Unterschiede bei der Bestimmung der Schubspannung und der Schubspannungsgeschwindigkeit. Aus den PTV Ergebnissen ergeben sich folgende Werte:

Unkorrigiert: $\tau_w = 0,111 \pm 0,0045 \text{ N/m}^2$ und $u_\tau = 0,308 \pm 0,0038 \text{ m/s}$.

Korrigiert: $\tau_w = 0,110 \pm 0,0043 \text{ N/m}^2$ und $u_\tau = 0,307 \pm 0,0037 \text{ m/s}$.

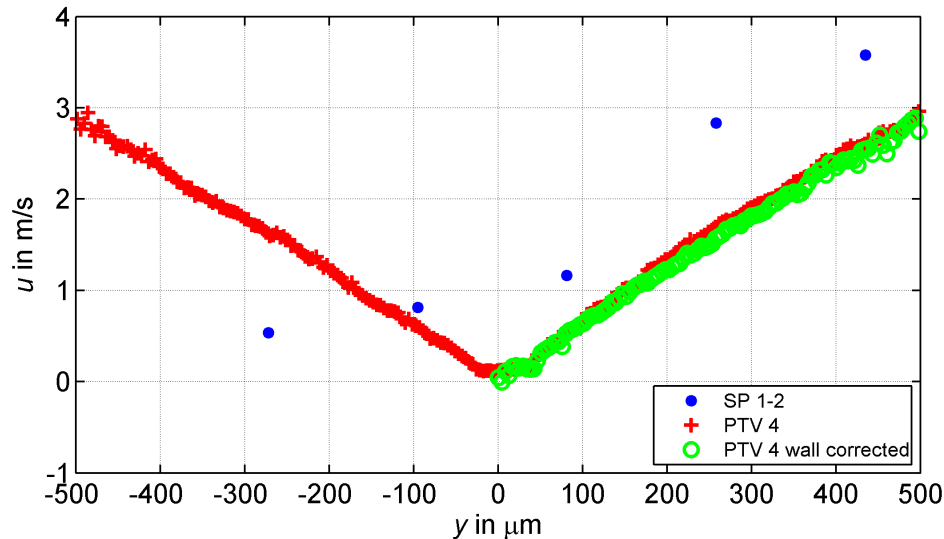


Abb. 8: Vergrößerter Darstellung des Grenzschichtprofils im Bereich von $-500 \mu\text{m} < y < 500 \mu\text{m}$ (Kähler et al., 2012c)

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Experimente zeigen, dass sich mit den diskutierten Methoden das gesamte turbulente Grenzschichtprofil mit hoher Ortsauflösung vermessen lässt. Ferner lassen sich durch eine Wandkorrektur systematische Fehler mit der PTV-Methode grundsätzlich korrigieren. Die Auswertung von Grenzschichtmessungen mit den PTV Algorithmen verdeutlicht, dass sich mit dieser Verbesserung sowohl die viskose Unterschicht, als auch die Übergangsschicht bis in den Bereich des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils selbst bei einem Arbeitsabstand von einem Meter sehr zuverlässig ermitteln lässt (ca. 50 unabhängige Datenpunkte in der viskosen Unterschicht). Der daran anschließende Grenzschichtbereich lässt sich selbst bei Bildausschnitten mit einer Höhe von 450 mm mit der Ensemble-Korrelation zuverlässig vermessen. Neben den Fortschritten in der räumlichen Auflösung und Genauigkeit ist bei diesen Techniken vorteilhaft, dass keine Traversierung erforderlich ist, die Datenerfassung schnell abläuft und Vibration der Versuchsanlage oder des Messsystems einfach korrigierbar sind, da diese Information bei der bildgebenden Messtechnik automatisch mit erfasst wird. Die hier vorgestellten Ergebnisse lassen sich mit anderen Messtechniken nur sehr schwer realisieren, da bei präzisen Punktmessverfahren eine Traversierung der Messsonde erfolgen muss, die mit Unsicherheiten verbunden ist. Ferner können Vibrationen der Versuchsanlage oder des Messsystems nicht korrigiert werden.

Danksagung

Das dargestellte Forschungsprojekt wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB – TR40 (Technologische Grundlagen für den Entwurf thermisch und mechanisch hochbelasteter Komponenten zukünftiger Raumtransportsysteme) und im Rahmen des DFG Einzelantrages KA 1808/8-1 gefördert.

Literatur

- Cierpka C, Kähler CJ (2012), Cross-correlation or tracking, 16th Int. Symp on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July 09 – 12
- Eckelmann H, (1997) Einführung in die Strömungsmesstechnik, Teubner Verlag
- Hain R, Kähler CJ (2007) Fundamentals of multiframe particle image velocimetry (PIV). *Exp Fluids* 42:575-587, DOI 10.1007/s00348-007-0266-6
- Kähler CJ, Scharnowski S, Cierpka C (2012) On the resolution limit of digital particle image velocimetry. *Exp Fluids* 52:1629-1639, DOI 10.1007/s00348-012-1280-x
- Kähler CJ, Scharnowski S, Cierpka C (2012a) On the uncertainty of digital PIV and PTV near walls. *Exp Fluids* 52:1641-1656, DOI 10.1007/s00348-012-1307-3
- Kähler CJ, Scharnowski S, Cierpka C (2012c) High-resolution velocity profile measurements in turbulent boundary layers, 16th Int. Symp on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July 09 – 12
- Kähler CJ, Scholz U, Ortmanns J (2006) Wall-shear-stress and near-wall turbulence measurements up to single pixel resolution by means of long-distance micro-PIV. *Exp Fluids* 41:327-341, DOI 10.1007/s00348-006-0167-0
- Shirai K, Pfister T, Büttner L, Czarske J, Müller H, Becker S, Lienhart H, Durst F (2006) Highly spatially resolved velocity measurements of a turbulent channel flow by a fiber-optic heterodyne laser-Doppler velocity-profile sensor, *Exp Fluids* 40: 473–481
- Vallikivi M, Hultmark M, Bailey SCC, Smits AJ (2011) Turbulence measurements in pipe flow using a nano-scale thermal anemometry probe, *Exp Fluids* 51:1521–1527