

UNTERSUCHUNGEN IN μ -STROMUNGEN MITTELS ANALYSE DER WELLENFRONTDEFORMATION

INVESTIGATIONS IN μ -FLOWS USING WAVE FRONT DEFORMATION

C. Cierpka, R. Hain, C.J. Kähler

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

3D- μ PTV, Wellenfront Deformation, Waveletanalyse

3D- μ PTV, wave front deformation, single camera technique, wavelet analysis

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wird ein Messverfahren für Strömungen in Mikrokanälen vorgestellt, mit dem der dreidimensionale Geschwindigkeitsvektor im Volumen bestimmt werden kann. Dies ist durch Ausnutzung von optischen Effekten bei der Beobachtung von Partikeln durch eine Zylinderlinse möglich. Die Partikelbilder erscheinen dabei ellipsenförmig, wobei das Verhältnis der beiden Hauptachsen die Tiefenposition im Volumen beschreibt. Der Algorithmus zur Bildauswertung basiert auf der Autokorrelation und der Waveletanalyse der Partikelbilder und arbeitet sehr robust. Durch die Bestimmung der Partikelpositionen und die zeitliche Zuordnung der einzelnen Partikel in zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen ist die lokale Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors möglich. Der Vorteil besteht darin, dass nur eine Beobachtungsrichtung nötig ist. Daher ist das Verfahren auch zu Untersuchungen in optisch eingeschränkt zugänglichen Geometrien oder für die Untersuchung von Mikroströmungen geeignet. Das Potential der Messtechnik gegenüber 3D-PTV (Particle Tracking Velocimetry), stereo und tomografischer PIV (Particle Image Velocimetry) wird anhand einer laminaren Kanalströmung aufgezeigt.

Einleitung

Viele Strömungen in komplexen Mikrokanälen sind von stark dreidimensionalem Charakter. Der optische Zugang ist dabei oft eingeschränkt, was die Messung des 3D-Geschwindigkeitsfeldes mit komplexen Messmethoden sehr erschwert. Ein aktueller Vergleich der 3D- μ PTV, tomografischer und stereoskopischer μ PIV Methoden findet sich bei Lindken et al. (2006). Durch den beschränkten optischen Zugang funktionieren PTV und tomografische Methoden hier nicht sehr zuverlässig. Einerseits führt der kleine Winkel zwischen den beiden Beobachtungsrichtungen zu erhöhter Unsicherheit für die Geschwindigkeitsfelder. Andererseits stellt die Unsicherheit bzgl. der tatsächlichen Tiefenposition der unabhängig gemessenen Verschiebungsfelder ein weiteres Problem dar. Wünschenswert wäre eine robuste und einfach anwendbare Messtechnik die es erlaubt, trotz des limitierten optischen Zugangs bei der Verwendung von Mikroskopen innerhalb eines Volumens zuverlässig das komplette 3D-Geschwindigkeitsfeld zu ermitteln. Dies kann durch Brechung der Achsensymmetrie des optischen Systems bei der Beobachtung von Partikeln in der Strömung erreicht werden. Angarita et al. (2006) verwendeten dafür ein Beugungsgitter und Zylinderlinsen mit sehr großer Brennweite ($f = 2000$ mm) für ein Messvolumen der Größe

28×21×28 mm³. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Messvolumen unter einem bestimmten Winkel zu beobachten. Dieses Verfahren wurde von Hain und Kähler (2006) für ein Volumen von 16×16×20 mm³ eingesetzt. Leider ist es für Mikroskope ungeeignet, da hier der Blickwinkel nicht verändert werden kann. Die Kodierung der Tiefenposition über drei Pinholes im Lichtweg wie sie von Willert und Gharib (1992) vorgeschlagen und von Yoon und Kim (2006) für Mikroströmungen angewendet wurde, wäre prinzipiell geeignet, jedoch geht dabei sehr viel Lichtintensität verloren. Da die Lichtintensität für sehr kleine und fluoreszierende Partikel an sich schon ein Problem darstellt, ist auch dieses Verfahren hier nicht anwendbar. Ein Verfahren, welches die gestellten Anforderungen erfüllen kann, beruht auf dem in Abb. 1 schematisch dargestellten Funktionsprinzip. Durch die Verwendung einer Standard Zylinderlinse (hier $f = 150$ mm) entstehen Verzerrungen in den Abbildungen der Partikel. Im oberen Teil der Abbildung ist das optische System in der xz -Ebene dargestellt. Die Achse der Zylinderlinse ist in x -Richtung orientiert, weshalb diese den Strahlengang in erster Näherung nicht beeinflusst. Das Partikel A befindet sich näher an der Fokusebene als das Partikel B und wird demzufolge kleiner abgebildet. Im unteren Bildausschnitt ist der Strahlengang in der yz -Ebene dargestellt. Die Fokusebene rückt aufgrund der nun wirkenden Krümmung der Zylinderlinse näher an das Objektiv. Partikel B ist nun näher an der Fokusebene und wird demzufolge kleiner abgebildet. Setzt man aus beiden Teilsystemen die Partikelbilder zusammen, so wird deutlich, dass die Tiefenposition z der Partikel über das Verhältnis der beiden Hauptachsen a_x und a_y der elliptischen Partikelbilder beschrieben werden kann (Hain et al., 2009). Die eigentliche Partikelgröße ist dabei unerheblich. Über die Bestimmung der Position im Volumen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten kann somit der vollständige Geschwindigkeitsvektor im Volumen bestimmt werden.

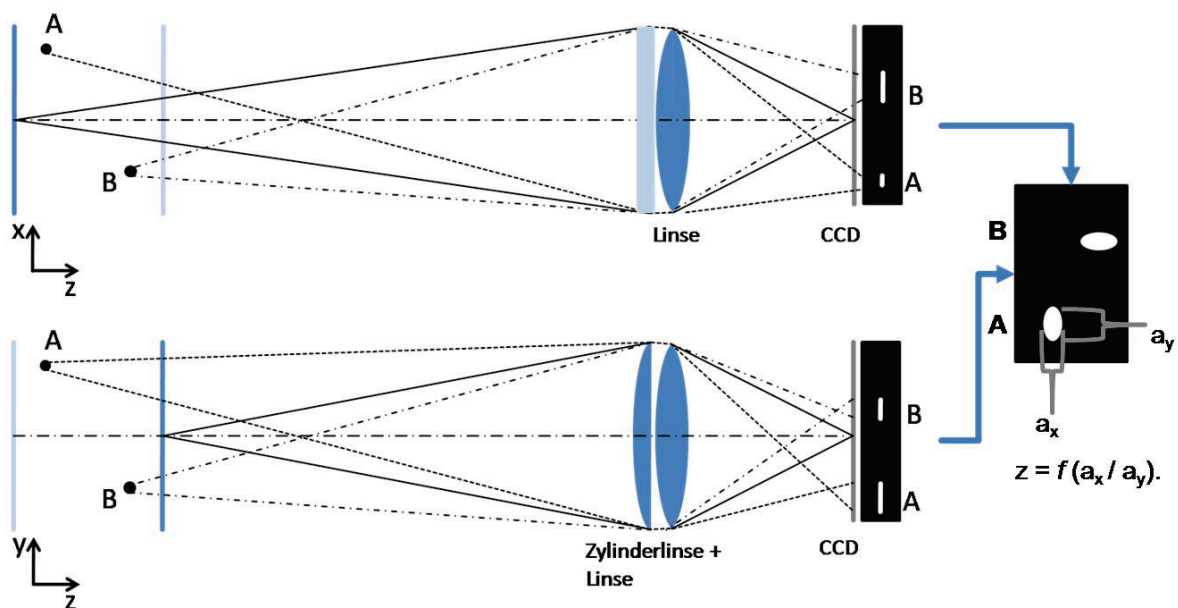


Abb. 1: Prinzipskizze der Tiefenkodierung. In der xz -Ebene (oben) wirkt nur eine Linse, in der yz -Ebene (unten) verkürzt sich der Abstand der Fokusebene zum Objektiv, da die Krümmung der Zylinderlinse hier zum Tragen kommt. Die Partikelbilder sind je nach Tiefenposition unterschiedlich verzerrt.

Die Vorteile des Verfahrens bestehen hauptsächlich darin:

1. Es ist nur eine Beobachtungsrichtung nötig.
2. Der Aufbau ist sehr einfach und leicht in vorhandene Systeme zu integrieren.
3. Kein Lichtintensitätsverlust durch Maskierungen der Optik.
4. Die Empfindlichkeit und Messvolumentiefe ist über die Lage der Fokusebene einstellbar.

Angewandt wurde das Verfahren zur Untersuchung von Strömungen in μ -Kanälen. Es sollten für verschiedene Konfigurationen dreidimensionale Strömungseffekte untersucht werden, welche mit der Standard μ PIV nicht aufgelöst werden können. Verwendet wurde dazu ein Zeiss Axio Observer.Z1 Mikroskop. In den Lichtweg zur Beobachtung des Objektes wurde unmittelbar vor den CCD-Chip der Kamera (PCO Sensicam) die Zylinderlinse eingebaut. Die Messungen wurden mit Rhodamin B Partikeln unterschiedlicher Größe durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass mit Partikeln mit einem Durchmesser von $d_p > 1 \mu\text{m}$ zuverlässige Messungen möglich sind. Für kleinere Partikel sinkt das Signal- zu Rauschverhältnis stark ab, was eine Auswertung der Bilder erschwert. Die Partikel wurden mit einem Nd:YAG Doppelpuls laser (Litron Nano) beleuchtet. Einzelheiten zum Versuchsaufbau und den verwendeten Kanälen finden sich bei Segura und Kähler (2009) und Cierpka et al. (2009). Der Schwerpunkt soll im Folgenden eher auf der Bildauswertung und der Messtechnik an sich liegen.

Algorithmus

Besonders für kleine Partikel ist das Signal- zu Rauschverhältnis oft sehr gering. Eine Bildbearbeitung der Rohbilder für die anschließende Auswertung ist daher unerlässlich. In Abb. 2 sind für eine Vergrößerung von $M = 40$ experimentell gewonnene Partikelbilder für einen Partikeldurchmesser von $d_p = 1\mu\text{m}$ gezeigt. Zuerst wird ein gleitender Minimalwert abgezogen um Inhomogenitäten in der Beleuchtung und Bilder von an der Wand anhaftenden Partikeln zu eliminieren. Ein anschließender Glättungsfilter (hier 5×5 Pixel) und Bandpassfilter (3-70 Pixel) helfen, mögliche Partikel zu detektieren. Der Bandpassfilter ist dabei besonders wichtig. Mit dem Bandpassfilter werden zum einen Strukturen, die zu klein sind, um vertrauenswürdige Ergebnisse bei der Bestimmung der Achsenverhältnisse zu liefern, unterdrückt. Zum anderen kann der Einfluss von Partikeln, welche sich außerhalb des Messbereichs befinden, minimiert werden. Diese Partikel erzeugen stark defokussierte und große Abbilder, welche bei großen Partikeln ($d_p > 10 \mu\text{m}$) hohe Intensitäten aufweisen. Mit der anschließenden Segmentierung werden Bildbereiche herausgestellt, die zu potentiellen Partikelbildern gehören. Die Achsenbestimmung erfolgt letztendlich aber auf den Originaldaten (A), die Bilder (D) dienen lediglich zur Erkennung von Partikelbildern.

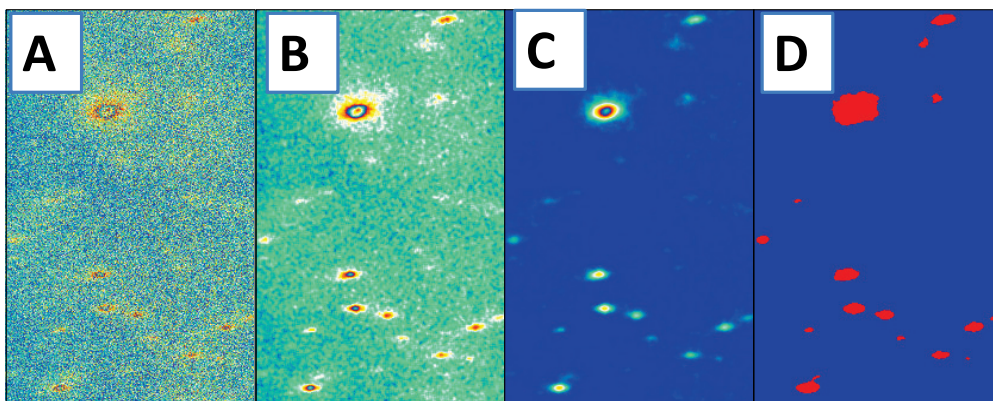


Abb. 2. Bildbearbeitung für Messungen mit $d_p = 1\mu\text{m}$ und einer Vergrößerung von $M = 40$. Die Bearbeitungsschritte sind: Abzug eines gleitenden Minimalgrauwertes (A), Glättung (B), Bandpassfilter (C) und Segmentierung (D).

Da die Partikelbilder stark verrauscht sein können ist die genaue Bestimmung des Achsenverhältnisses nicht trivial. Hain und Kähler (2006) verwendeten in einem ersten Ansatz die iterative Anpassung einer zweidimensionalen Gaußfunktion, um das Achsenverhältnis zu ermitteln. Es zeigte sich jedoch, dass die Verwendung der Autokorrelationsfunktion zu besseren Ergebnissen führte. Hierbei wird die Berandung des Partikelbildes an dem Punkt defi-

niert, an dem die normierte Autokorrelationsfunktion auf den Wert $R = 0,5$ abfällt. In einer ersten Untersuchung wurde ebenfalls die Auswertung der Partikelbilder mittels Waveletanalyse untersucht. Einzelheiten zur Waveletanalyse finden sich bei Cierpka et al. (2008). Dort wurde das Verfahren zwar zur Wirbeldetektion angewandt, die Grundlagen bleiben jedoch gleich, statt der Wirbelstärke wurde hier die Lichtintensitätsverteilung untersucht.

In Abb. 3 ist die relative Abweichung des ermittelten Achsenverhältnis $\varepsilon_a = a_{mess} / a_{real}$ in % angegeben. Die Daten wurden anhand von synthetisch generierten Partikelbildern (gaußförmige Intensitätsverteilung) unterschiedlichen Durchmessers (definiert durch e^{-2} der Lichtintensität) bestimmt. Auf der y -Achse ist dabei das Achsenverhältnis a_x / a_y abgetragen, ein Achsenverhältnis von $a_x / a_y = 1$ entspricht einem kreisrunden Partikelbild.

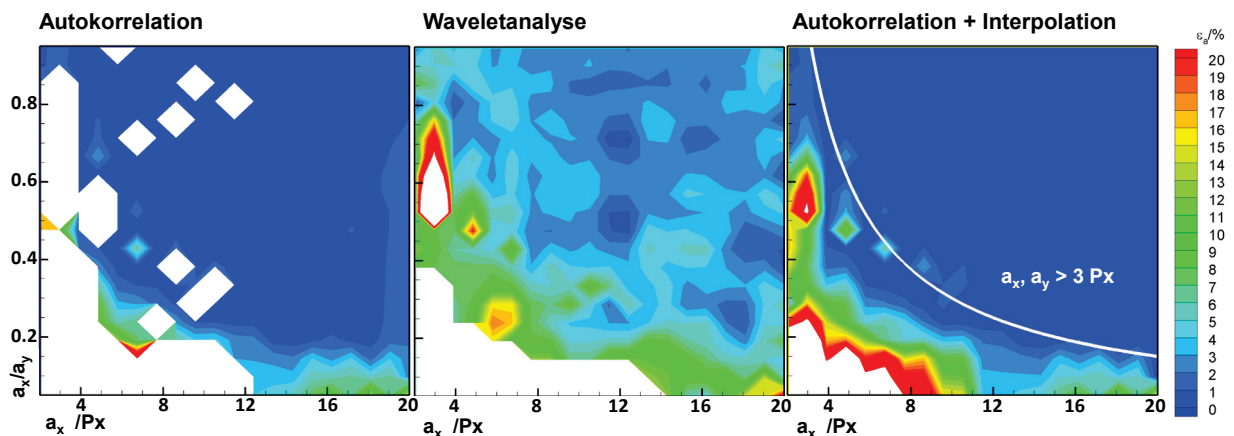


Abb. 3. Abweichung des ermittelten Achsenverhältnisses zum tatsächlichen für verschiedene Auswertalgorithmen und Partikelbildgrößen.

Es stellte sich heraus, dass zwar die Erkennung der Partikelbilder mit der Waveletanalyse robuster funktionierte, jedoch die Genauigkeit nicht gesteigert werden konnte. Die Abweichungen liegen hier in einem großen Gebiet um 5%. Es wurde daher der ursprüngliche Algorithmus ausgebaut, indem die Position $R = 0,5$ durch Interpolation höherer Ordnung der Autokorrelationsfunktion ermittelt wird. Die weiße Linie in Abb. 3 kennzeichnet die Grenze für Partikelbilder, die in beiden Raumrichtungen jeweils mindestens 3 Pixel groß sind. Ist dieses Kriterium gewährleistet, so kann für die synthetischen Testbilder das Achsenverhältnis mit einer Abweichung $\varepsilon_a < 1\%$ bestimmt werden.

Die Partikelbildposition kann leider nicht über die Autokorrelationsfunktion bestimmt werden. Hain und Kähler (2006) nutzten hier ein iteratives Verfahren. An das Partikelbild wird eine zweidimensionale Gaußfunktion angepasst. Das Verfahren arbeitet robust, ist jedoch aufgrund der vier nötigen Iterationen rechenaufwendig. Insgesamt konnte mit der Waveletanalyse die Genauigkeit nochmal gesteigert werden. Die Partikelposition wird über die Anpassung zweier eindimensionale Gaußfunktionen in der Ebene der Waveletkoeffizienten durchgeführt. Als Wavelet wird das zweidimensionale Marr-Wavelet verwendet. Da die Skalenanpassung aufgrund der zuvor ermittelten Größe vorgenommen werden kann, ist lediglich eine Kreuzkorrelation zu berechnen. Die Abweichungen der ermittelten Partikelbildposition x zur Tatsächlichen konnte anhand von synthetischen Partikelbildern untersucht werden. Die Subpixelposition betrug für die Testbilder 0,12345 in x - und 0,88888 in y -Richtung. Der Fehler steigt zwar für stark deformierte Partikel an, ist jedoch für Achsenverhältnisse von $a_x / a_y < 10$ immer kleiner als 0,008 Pixel.

Die Verschiebung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern wurde anschließend mit einem rudimentären PTV Algorithmus durchgeführt. Dazu wurde der Ansatz des nächsten Nachbarn in der xy -Ebene gewählt. Die so ermittelten Verschiebungen wurden anschließend

mit einem globalen Histogrammfilter, der sich die bekannten Eigenschaften der Kanalströmung zu Nutze macht, gefiltert.

Ergebnisse

Anhand einer laminaren Kanalströmung in einem μ -Kanal mit einer Breite von $180\ \mu\text{m}$ wurde das Verfahren getestet. Die Vergrößerung betrug dabei $M = 20$. In Abb. 4 sind die unterschiedlichen Beobachtungsgebiete dargestellt. Für den Fall A befand sich das Messvolumen in der Mitte des Kanals und war von Wandeffekten weitgehend unbeeinflusst. Hier konnten ca. 7000 gültige Vektoren in 500 Bildpaaren ermittelt werden. Für den Fall B, ragt das Messvolumen bis in die untere Kanalwand hinein. Hier konnten für 500 Bilder ca. 3000 gültige Vektoren ermittelt werden. Die Profile der Verschiebung sind für beide Messvolumen parabolisch. Auch die in z-Richtung gemittelten Konturen der Verschiebung zeigen das erwartete Bild für eine Kanalströmung. Die verzögerte Strömung an der rechten und linken Kanalwand ist für beide Messvolumen gut sichtbar, in der Kanalmitte ist durch die blaue Färbung ein Gebiet größerer Verschiebung zu erkennen. Für die Messung in der Nähe des Kanalbodens sind die Absolutwerte der Verschiebung deutlich kleiner. Hier zeigt sich der erwartete Einfluss des Kanalbodens.

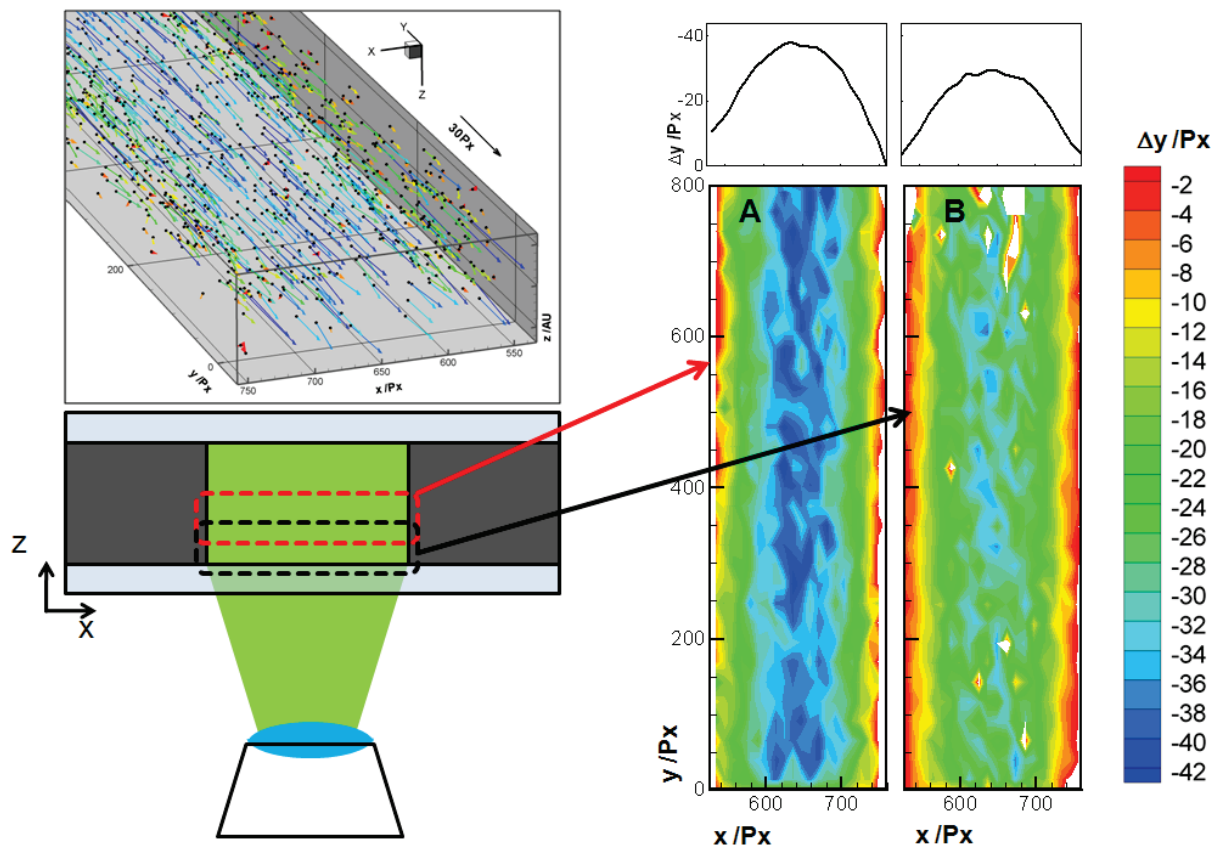


Abb. 4. Ermittelte Partikelpositionen und Vektoren der Verschiebung (links, oben), Positionen der Messvolumen im Kanal (links unten) und in z-Richtung gemittelte Verschiebung Δy für beide Messvolumina

Da bei der Standard μ -PIV das Messvolumen nur über die Tiefenschärfe des Objektivs eingestellt wird, kann immer nur die mittlere Strömung im Messvolumen ermittelt werden. Wenn dieses Messvolumen also unachtsam gewählt wurde, bzw. die Tiefenschärfe den Bereich des gesamten Kanal abdeckt ist eine exakte Messung nicht mehr möglich. Der große Vorteil des neuen Verfahrens wird daher anhand von Abb. 5 ersichtlich. Hier ist die Mittelung der

Verschiebung in y -Richtung über den Querschnitt des Kanals dargestellt. Für den Fall A ist wieder der Einfluss der Kanalseitenwände deutlich sichtbar, in der Höhe variiert das Verschiebungsfeld nicht. Für den Fall B hingegen ist der Einfluss des Kanalbodens klar zu erkennen. Die Verschiebung an den Wänden ist deutlich kleiner als in der Kanalmitte. Das dreidimensionale Verschiebungsfeld in der Kanalströmung kann also vollständig erfasst werden.

Da bisher noch keine Prozedur zur Kalibrierung vorhanden war, wurde die Messvolumentiefe über die Profile der Verschiebung in y -Richtung abgeschätzt. Auf der rechten Seite in Abb. 5 sind daher die Profile in x -Richtung für den Fall A und den Fall B im vom Kanalboden unbeeinflussten Bereich dargestellt. Diese stimmen sehr gut überein. Es ist also anzunehmen, dass die Strömung im oberen Bereich des für den Fall B vollständig entwickelt ist. Passt man nun das Profil in z -Richtung (blau) den anderen Profilen an, so kann man in erster Näherung die Tiefe des Messvolumens zu $z \approx 70 \mu\text{m}$ abschätzen. Mit dem neuen Verfahren konnte also ein Messvolumen von $x \times y \times z \approx 180 \times 500 \times 70 \mu\text{m}^3$ untersucht werden.

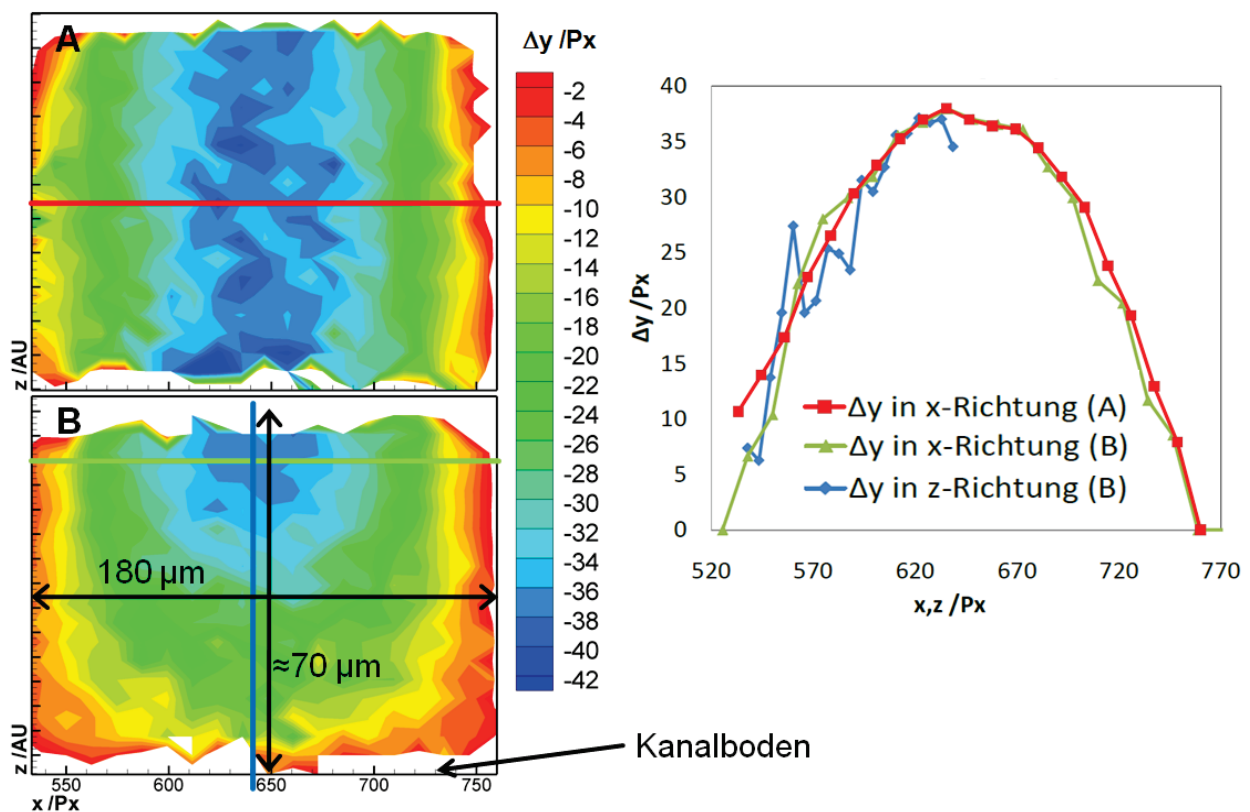


Abb. 5. In y -Richtung gemittelte Verschiebung Δy für beide Messvolumina (links), Vergleich der Verschiebungsprofile (rechts)

Diskussion und Ausblick

Es wurde ein Verfahren zur Messung des dreidimensionalen Verschiebungsvektors im Volumen vorgestellt und erfolgreich an einer μ -Strömung erprobt. Die Partikeltiefenposition wird über das Achsenverhältnis der Partikelbilder bestimmt. Der große Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass es mit nur einer Beobachtungsrichtung auskommt und sehr einfach in vorhandene Systeme integriert werden kann. Eine Maskierung der Linsen ist nicht nötig, die Einstellung der Empfindlichkeit kann über die Wahl der Brennweite der Zylinderlinse eingestellt werden. Die ersten Ergebnisse sind vielversprechend. Als nächster Schritt muss unbedingt die Entwicklung einer Prozedur zur Kalibrierung erfolgen. Bildfehler höherer Ordnung sollen ebenso, wie die Genauigkeit des Verfahrens an sich abgeschätzt werden. Die Kodie-

zung der Tiefenposition über das Achsenverhältnis kann in Zukunft auch genutzt werden um die Genauigkeit für Standard μ PIV Messungen zu erhöhen. Die Filterung von Partikelbildern, welche zu einer bestimmten Messebene gehören, kann hier in einem Bildbearbeitungsschritt vor der eigentlichen Kreuzkorrelation genutzt werden, um das Messvolumen unabhängig von der Tiefenschärfe zu verringern. Das Verfahren soll außerdem für makroskopische Strömungen erprobt werden. Erste Untersuchungen in einem Gebiet von $40 \times 40 \times 20 \text{ mm}^3$ zeigen gute Ergebnisse. Da nur eine Kameraperspektive nötig ist, ist auch die Erweiterung hin zu zeit-aufgelösten Messungen kein Problem.

Dankesworte

Die Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1147 "Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse" gefördert.

Literatur

Angarita-Jaimes N., McGhee E., Chennaoui, M., Campbell, H.I., Zhang, S., Towers, C.E., Greenway, A.H., Towers, D.P., 2006: "Wavefront sensing for a single view three-component three-dimensional flow velocimetry", *Exp. Fluids*, 41, 881-891

Cierpka, C., Hain, R., Kähler C.J., 2009: "Theoretical and experimental investigation of micro wavefront-deformation PTV", 8th International Symposium on Particle Image Velocimetry – PIV09, August 25-28, Melbourne, Australia

Cierpka, C., Weier, T., Gerbeth G., 2008: "Evolution of vortex structures in an electromagnetically excited separated flow", *Experiments in Fluids* 45, 943-953

Hain, R., Kähler, C.J., 2006: "Single camera volumetric velocity measurements using optical aberrations", 12th International Symposium on Flow Visualization, September 10-14, German Aerospace Center (DLR), Göttingen, Germany

Hain, R., Kähler, C.J., Radespiel, R., 2009: "Principles of a volumetric velocity measurement technique based on optical aberrations", in *Notes of Numerical Fluid Dynamics and Multidisciplinary Design 106: Imagine Measurement Methods for Flow Analysis*, 1-10

Lindken, R., Westerweel, J., Wieneke, B., 2006: "3D micro-scale velocimetry methods: A comparison between 3D- μ PTV, stereoscopic μ PIV and tomographic μ PIV", 13th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, June 26-29, Paper #1099, Lissabon, Portugal

Segura, R., Kähler C.J., 2009: " μ PIV in complex μ -systems with pharmaceutical and biological applications", 8th International Symposium on Particle Image Velocimetry – PIV09, August 25-28, Melbourne, Australia

Willert, C., Gharib, M., 2002: "Three-dimensional particle imaging with a single camera", *Experiments in Fluids* 12, 353-358

Yoon, S.Y., Kim, K.C., 2006: "3D particle and 3D velocity field measurement in a microvolume via the defocusing concept", *Meas. Sci. Technol.* 17, 2897-2905