

## STEREO-MICRO-PIV MESSUNGEN ZUR BESTIMMUNG DREI-DIMENSIONALER STRÖMUNGSSTRUKTUREN IN MIKROMIXERN

Ralph Lindken\*, Jerry Westerweel\*, Bernd Wieneke\*\*

\* Laboratory for Aero-and Hydrodynamics, Delft University of Technology, Leeghwaterstraat 21, 2628CA Delft, the Netherlands

\*\* LaVision GmbH, Anna-Vandenhoeck-Ring 19, 37081 Göttingen, Germany

### Zusammenfassung

Obwohl produktionstechnisch die Geometrie von fluidischen Mikrochips eher einfach und in der Regel zweidimensional ist, kann das strömungsmechanische Problem komplexer, dreidimensionaler Art sein. Insbesondere effektive Lösungen des Problems des laminaren Mischens und der Partikelseparation nutzen oft dreidimensionale Effekte in Mikrokanälen.

Um diese dreidimensionalen Effekte zu studieren und Modelle zu bilden, haben wir eine Meßmethode entwickelt, die basierend auf der Particle Image Velocimetry (PIV) in einer Tiefenschärfeebene alle drei Komponenten des Geschwindigkeitsvektors misst. Das Meßprinzip basiert auf der Kombination der Stereomikroskopie mit dem PIV-Meßverfahren. Nur durch eine exakte Kalibrierung der zwei Betrachtungsrichtungen und der Position der Meßebenen ist eine genaue Stereo-micro-PIV (Stereo- $\mu$ PIV) Messung möglich. Dieses wurde durch die Anwendung der Selbstkalibrierung an den Partikelbildern im geschlossenen Mikrokanal erreicht.

Die Möglichkeiten der Stereo- $\mu$ PIV werden an der dreidimensionalen Strömung in einem laminaren T-Mikromischer demonstriert.

### Einleitung

Mehrere Publikationen haben mikroskopische Methoden vorgestellt zur dreidimensionalen Messung der Strömung in Mikrokanälen. Lamerding et al. (2002) realisierten die dreidimensionale Geschwindigkeitsmessung durch eine Veränderung des Mikroskopaufbaus. Zwischen Kamera und Mikroskoplinse wird eine zusätzliche Apertur installiert, die leicht versetzt zur optischen Achse rotiert. Diese Methode liefert sehr gute Resultate bei geringer Partikeldichte und relativ großen Partikeln von 4,5  $\mu$ m Durchmesser. Da die Lichtausbeute des Systems gering ist, ist das Verfahren auf die Messung größerer Objekte beschränkt. Ikeda et al. (2005) beschreiben den Aufbau eines Mikro-Holographie-PIV-Systems, daß das Hologramm direkt auf den CCD-Chip einer digitalen Kamera abbildet. Ikeda et al. erreichen hohe räumliche Auflösung, auch in der Tiefe. Die Partikelgröße ist allerdings im Moment auf 1  $\mu$ m beschränkt.

Eine alternative Methode besteht in der Anwendung der Stereo-PIV auf mikroskopische Probleme. Klasen et al. (2005) benutzen Stereo-PIV in einem Mikroskop, so wie in diesem Artikel beschrieben. Bisher haben sie das Problem der Kalibrierung der Meßebenen ausgeklammert. Klank et al. (2003) umgehen das Problem der Kalibrierung der zwei Meßebenen bei stereoskopischer Betrachtung der Strömung, indem sie eine Idee von Prasad und Adrian (1993) nutzen und zeitlich versetzt die dreidimensionale Strömung zweimal mit einem 2D- $\mu$ PIV Aufbau messen. Die Bildbereiche der zwei 2D-Messungen

überlappen nur teilweise, so dass Klank der überlappende Teil zweimal aus leicht unterschiedlichen Blickrichtungen gemessen wird. Bei Nutzung eines nicht telezentrischen Mikroskopobjektivs haben beide Messungen einen leichten Fehler aufgrund der Dreidimensionalität der Strömung. Aus diesem Fehler kann die dritte Komponente des Geschwindigkeitsvektors rekonstruiert werden. Diese Methode funktioniert nur für perfekt stationäre Strömung und fehlerfreie PIV Messungen. Aufgrund des extrem kleinen Winkels zwischen den zwei Blickrichtungen ist die Genauigkeit dieser Methode sehr gering.

In dieser Publikation beschreiben wir Messungen der laminaren, dreidimensionalen Strömung in einem T-Mixer bei  $Re = 200$  bis  $Re = 1400$  mittels Stereo- $\mu$ PIV bei Anwendung der Selbstkalibrierung an den Partikelbildern in einem geschlossenen Mikrokanal.

### **Strömung in einem laminaren T-Mischer**

Der T-Mischer ist ein gebräuchlicher passiver Mikromischer. Wong et al. (2004) berichten von Mischzeiten von weniger als einer Millisekunde bei hohen Drücken. Durch Visualisierung detektieren sie bei Reynoldszahlen von 400 bis 5000 eine gleichmäßige Konzentration der beiden zu mischenden Komponenten über den Kanalquerschnitt. Wong et al. haben auch numerische Simulationen ausgeführt und so sekundäre Strömungsstrukturen gefunden. Obwohl die Geometrie des T-Mischers zweidimensional ist, bildet sich ab  $Re > O(100)$  eine stark dreidimensionale Strömung aus. Engler et al. (2004), Kockmann et al. (2004) und Schlüter et al. (2004, 2005) untersuchen das Mischen theoretisch und experimentell. Bothe et al (2004) berechnen die Strömung mit DNS. Sie zeigen, dass die Strömung bei niedrigen Reynoldszahlen laminar und zweidimensional ist. Bei höheren Reynoldszahlen bilden sich Wirbelstrukturen in der Umlenkungszone des Mischers. Für Reynoldszahlen unter 100 besteht diese Struktur aus einem symmetrischen Paar geläufig rotierender Wirbel (siehe Hofmann et al, 2005). Bei höheren Reynoldszahlen sind diese Strukturen unsymmetrisch und die beiden Wirbel beeinflussen sich gegenseitig. Masse wird von einem Wirbel in den anderen mitgerissen und die Kontaktfläche zwischen den beiden Komponenten wird erhöht. Bei noch höheren Reynoldszahlen  $Re = O(1000)$  wird die Strömung instabil.

### **Messtechnik**

Das Stereo- $\mu$ PIV System besteht hauptsächlich aus einem Epifluoreszenz-Stereomikroskop, einem Doppelpuls-Laser, Optik, fluoreszenten Tracerpartikeln, zwei digitalen Kameras mit hoher Quanteneffizienz, einer Steuerung zur Synchronisation der Komponenten und einem PC zur Datenspeicherung und Auswertung, wie in Abbildung 1 dargestellt.

Das hier verwendete Mikroskop ist ein Leica Mz16 FluoCombi III Epifluoreszenz-Stereomikroskop mit einem Zeiss Doppelvideoadapter (zum Zeitpunkt der Messung war noch kein Doppelkameraadapter von Leica verfügbar) und einem Leica Planapo 1x–5x Stereoobjektiv. Als Laser nutzen wir einen New Wave Pegasus Doppelpuls Nd:YLF Laser mit einer Pulslänge von 100 ns. Gegenüber blitzlampengepumpten Nd:YAG Lasern hat dieser Laser den Vorteil einer zehnfachen bis zwanzigfachen Pulslänge, was die Leistung des in das Mikroskop eingekoppelten Lichtes entsprechend erhöht, ohne die Spitzenbelastung auf die Optik des Mikroskops zu erhöhen. An den Doppelvideoadapter sind zwei LaVision Imager Intense Kameras angeschlossen, die über eine hohe Quanteneffizienz von 62% bei 527 nm verfügen. Das Laserlicht kann in den Strahlengang des Mikroskops eingekoppelt werden, für die hier vorgestellten ersten Messungen wurde jedoch der Mikrokanal direkt beleuchtet. Als Tracerpartikeln dienen fluoreszente Tracer mit einem Durchmesser von 1  $\mu$ m. Das Stereomikroskop erwies sich als sehr lichtstark und die Partikel lieferten ein unerwartet starkes Signal, so dass für weitere Messungen deutlich kleinere Partikel von 500 nm Durchmesser benutzt werden können.

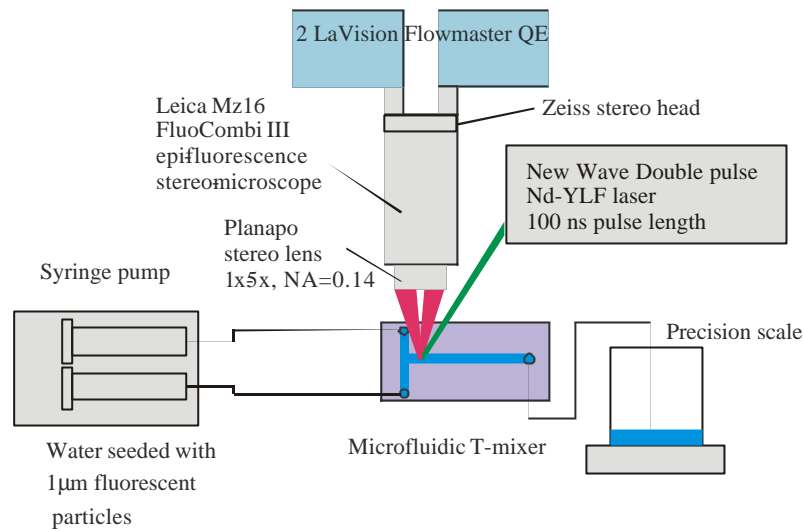


Abb. 1: Experimenteller Aufbau. Die obere Hälfte zeigt die Messtechnik, die untere Hälfte zeigt die Versuchsanordnung zur Messung der Strömung in einem mikrofluidischen T-Mischer

Im Gegensatz zur PIV im Makroskopischen beleuchtet das Laserlicht das gesamte Strömungsfeld im Volumen (Santiago et al. 1998, Meinhart et al. 1999). Auch Tracerpartikeln, die sich vor und hinter der Meßebene befinden werden so beleuchtet. Das Stereoobjektiv mit einer Schärfentiefe von weniger als  $50 \mu\text{m}$  bildet nur einen Teil der beleuchteten Partikeln scharf ab. Jedoch tragen auch Partikeln, die von dem Objektiv nicht mehr scharf abgebildet werden, zu dem Korrelationsergebnis bei. Olsen und Adrian (2003) und Bourdon et al. (2004) beschreiben den Einfluss von unscharf abgebildeten, volumenbeleuchteten Partikeln analytisch und definieren die Korrelationstiefe. Die Korrelationstiefenebene definiert die Tiefe der Meßebene. Der Strahlengang des Stereomikroskops ist Scheimpflug-korrigiert, so dass die Tiefenschärfe-, bzw. Korrelationstiefenebenen der beiden Kamerastrahlengänge parallel aufeinander liegen. Für das Leica Planapo 1x-5x Objektiv beträgt die Korrelationstiefe 60 bis  $80 \mu\text{m}$ .

Das von den Tracerpartikeln in der Meßebene emittierte Fluoreszenzlicht wird mittels Objektiv und Apertur auf den CCD-Chips der Kameras abgebildet.

Die beiden Kameras und der Laser werden von einer programmierbaren Steuerung (PTU) synchronisiert. Die Aufnahme der PIV-Doppelbilder erfolgt im Double-Shutter mode mit einem Zeitabstand von 1 ms. Die Bilddaten werden anschließend zum Rechner transferiert, dort gespeichert und stehen zur Auswertung zur Verfügung. Die Auswertung erfolgt mittels Ensemble Korrelation (Meinhard et al, 2000).

### Selbst-Kalibrierung

Stereo-PIV ist in der Strömungsmechanik eine allgemein angewandte Methode zur Gewinnung von dreidimensionalen Geschwindigkeitsdaten. Bei nicht-mikroskopischen Anwendungen wird ein Kalibriergitter in verschiedenen Tiefenebenen in die Meßebene gestellt und von den beiden Kameras ab fotografiert. Aus den Kalibriermessungen wird die Position der Kameras und der Meßebene bestimmt.

Diese Kalibrieranordnung ist in der Regel für mikroströmungsmechanische Messungen nicht möglich. Das Einbringen eines Kalibriergitters in einen Kanal mit einem Querschnitt von  $800 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$  erscheint unmöglich. Zusätzlich müsste das Kalibriergitter in verschiedene Tiefenpositionen um wenige Mikrometer parallel zur Betrachtungsebene verschoben werden.

Die Selbstkalibrierung an den Partikelbildern der PIV Aufnahme erlaubt es, auch in einem Mikrokanal exakte stereoskopische Messungen auszuführen. Hierzu wird eine erste in-situ Kalibrierung außerhalb des Mikrokanals durchgeführt. Diese Kalibrierung wäre nur korrekt, wenn der Strahlengang nicht durch unterschiedliche Brechungsindizes der aus Glas gefertigten Abdeckung und des Arbeitsfluids Wasser verändert würde.

Anschließend wird der Fehler der in-situ Kalibrierung korrigiert, indem eine weitere Kalibrierung an den Partikelbildern erfolgt. Hierzu wird zuerst die Abweichung der in-situ Kalibrierung ermittelt und dann mittels Triangulation die korrekte Kalibrierfunktion ermittelt. Die Triangulation ist um das 3-Medien-Model von Maas (1992) erweitert, um den Strahlengang von Luft durch das Deckglas in das mit Tracerpartikeln geimpfte Wasser zu rekonstruieren. Die Selbstkalibrierung ist ausführlich in Wieneke (2005) beschrieben.

Mit dieser Methode ist es möglich außerhalb des geschlossenen Mikrokanals zu kalibrieren und dann mittels Selbstkalibrierung auf den PIV Aufnahmen die korrekten Parameter zu bestimmen.

## Testmessung

Um die Genauigkeit des Meßverfahrens abzuschätzen, wurden zunächst Testmessungen an bekannten Strömungen ausgeführt. Der erste Testfall ist die vollausgebildete Kanalströmung. 100 Durchmesser hinter dem Einlauf eines geraden Mikrokanals mit einem Querschnitt von  $800\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  wurde das parabolische Geschwindigkeitsprofil einer vollausgebildeten laminaren Strömung gemessen. Es wird ein parabolisches Profil für die Y-Komponente des Geschwindigkeitsvektors über den Kanalquerschnitt erwartet. Die X- und Z-Komponenten müssen Null betragen. Abbildung 2 zeigt die Messergebnisse für diesen Testfall. Die Hauptströmungskomponente wird korrekt wiedergegeben. Die X-Komponente beträgt Null mit einem Fehler von weniger als 0,3 %. Die Z-Komponente wird kleiner als Null gemessen. Der Fehler bei der Bestimmung der Null-Geschwindigkeit ist kleiner als 3 %.

Anschließend wurde der Kanal um  $5.4^\circ$  gekippt, so dass eine künstlich erzeugte Z-Komponente der Geschwindigkeit mit dem Betrag  $V_z = V_y \cdot \sin 5,4^\circ$  erwartet wird.

Die Meßergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Hauptströmungskomponente wird wieder korrekt wiedergegeben. Die X-Komponente beträgt Null mit einem Fehler von weniger als 0,5 %. Die gemessene Z-Komponente folgt dem erwarteten Profil von  $V_z = V_y \cdot \sin 5,4^\circ$ . Allerdings ist die Abweichung von dem erwarteten Profil in der rechten Kanalhälfte an einigen Meßpunkten sehr groß. Im überwiegenden Teil des Profils ist die Abweichung kleiner 5%.

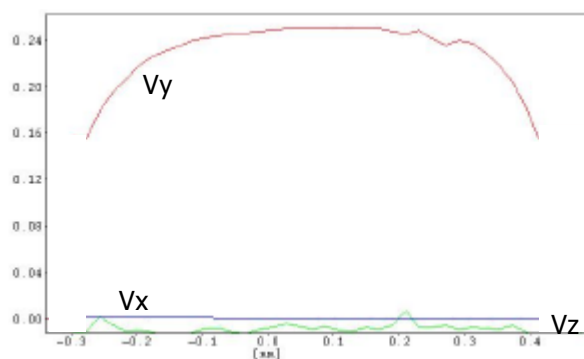


Abb. 2: Profile der Geschwindigkeit in x-,y- und z- Richtung in einem geraden Kanal. Die Geschwindigkeit  $V_x$  quer zur Hauptströmungsrichtung und in der Messebene ist Null. Die Geschwindigkeit  $V_z$  normal auf der Messebene und quer zur Hauptströmungsrichtung ist minimal negativ. Die Abweichung von der erwarteten Null-Geschwindigkeit ist kleiner 3%.

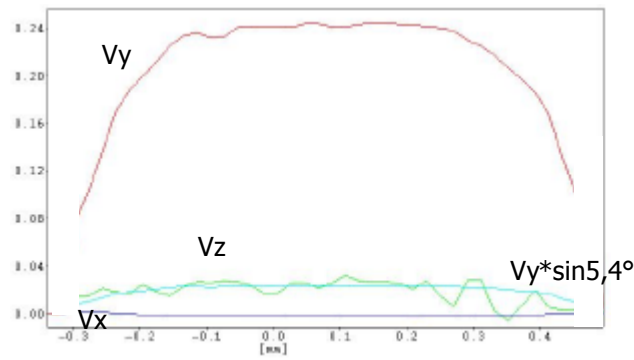


Abb. 3: Profile der Geschwindigkeit in x-,y- und z- Richtung in einem geraden Kanal, der um 5,4° zur Messebene gekippt ist. Die Geschwindigkeit  $V_x$  quer zur Hauptströmungsrichtung und in der Messebene ist Null. Die Geschwindigkeit  $V_z$  normal auf der Messebene und quer zur Hauptströmungsrichtung entspricht der erwarteten Geschwindigkeit  $V_y \cdot \sin(5,4^\circ)$ . Die Abweichung ist kleiner 5%.

Die Reproduzierbarkeit der Testmessung wurde zu diesem Zeitpunkt noch nicht überprüft. Die Ergebnisse sind dementsprechend nur eingeschränkt aussagekräftig.

### Experiment

Der experimentelle Aufbau ist in Abb.1, untere Hälfte dargestellt. Eine Spritzenpumpe fördert mit fluoreszenten Tracerpartikeln versetztes Wasser in einen T-Mixer. Das Wasser strömt durch 2 Kanäle mit  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$  in den Mixer ein. In der Mischzone erweitert sich der Kanal auf  $800 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ . In der Mischzone wird die Strömung mit der Stereo- $\mu\text{PIV}$  in verschiedenen Tiefenebenen vermessen.

Die Flüssigkeit strömt nach Verlassen des T-Mischers in einen geschlossenen Behälter und wird gesammelt. Der verschlossene Behälter verhindert das Verdunsten der Flüssigkeit. Konstanter Gegendruck wird erreicht, indem sich der Auslass in den Behälter unter dem Flüssigkeitsfüllstand befindet. Mit einer Präzisionswaage wird der Massenstrom bestimmt und die Reynoldszahl errechnet. Die Messungen wurden bei  $Re = 200, 700$  und  $1400$  ausgeführt.

### Ergebnisse

Exemplarisch sind in Abbildung 4 und 5 zwei Ergebnisse aus der ersten Messkampagne dargestellt. Die Messungen erfolgten bei  $Re = 700$  und  $Re = 1400$ . Obwohl die Strömung laminar und stationär ist, zeigen die beiden seitlichen Zuströme reproduzierbare Wechselwirkung, aus der sich in dreidimensionale stationäre Strukturen entwickeln. Es werden maximale Geschwindigkeiten in z-Richtung in der Größenordnung der Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung gemessen.

Während bei Reynolds = 700 die Zuströmung dreidimensional übereinander abgleitet, interagieren die zwei Ströme bei Reynolds = 1400 und bilden ein neues Strömungsbild. In beiden Fällen ist die Strömung stationär, bei höheren Reynoldszahlen wird die Strömung instationär.. Die Beobachtungen stimmen mit den in der Einleitung genannten numerischen Simulationen überein.

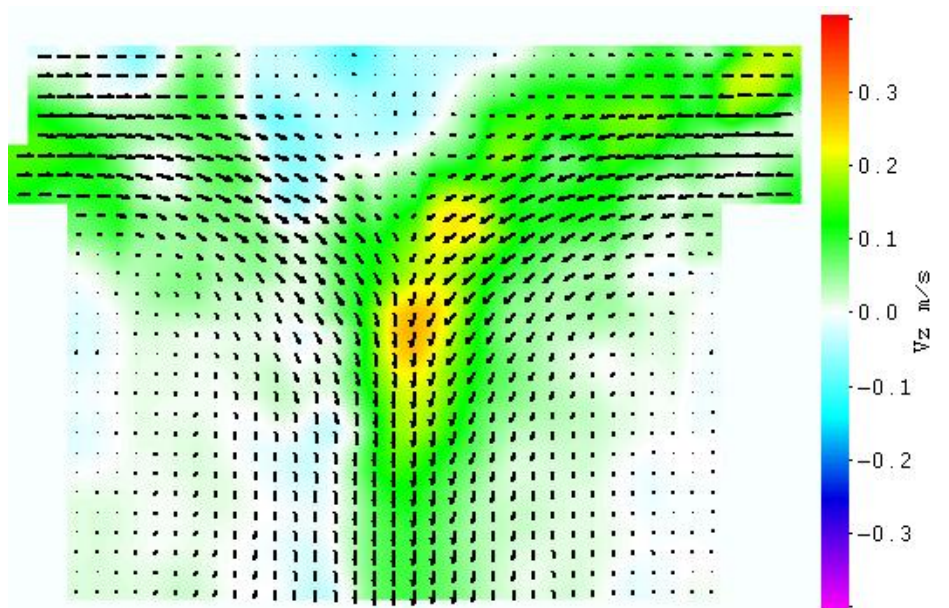


Abb. 4: Stereo- $\mu$ PIV Messung in der Mischzone eines T-Mischers bei  $Re = 700$ . Die z-Komponente des Geschwindigkeitsvektors in farbkodiert dargestellt. Die Messung erfolgte in der Mitte ( $z = 100 \mu\text{m}$ ) des Kanals mit einem Querschnitt von  $800 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ . Deutlich ist die Ablenkung der Strömung aus dem rechten Zufluß nach oben zu erkennen. Die Zuströmung von links wird nach unten abgelenkt. Auch in der rechten Hälfte des Kanals strömt ein Teil der Flüssigkeit abwärts. Ein dreidimensionales Wirbelgebiet hat sich ausgebildet.

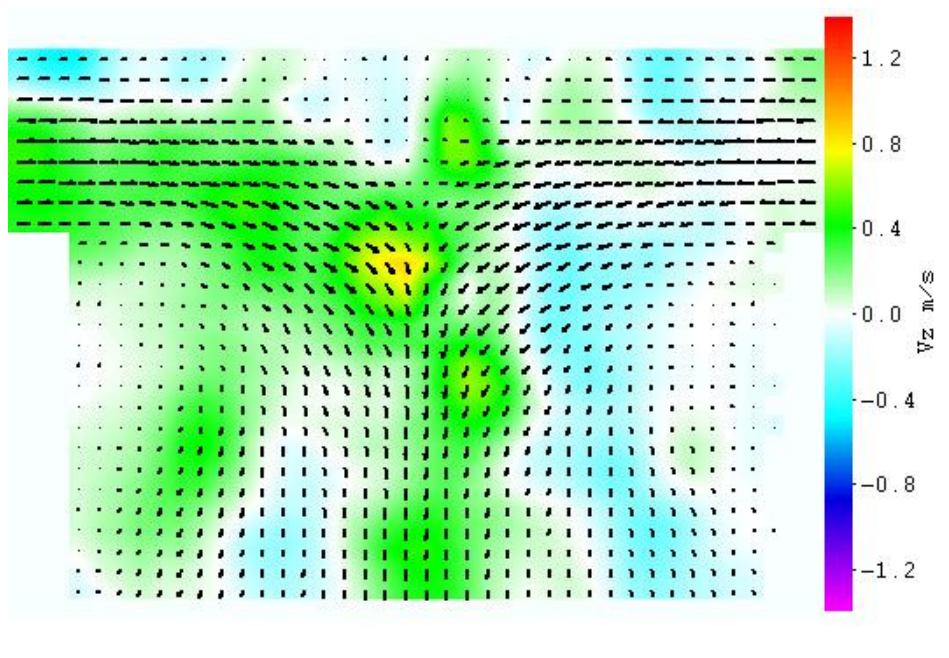


Abb. 5: Stereo- $\mu$ PIV Messung in der Mischzone eines T-Mischers bei  $Re = 1400$ . Die z-Komponente des Geschwindigkeitsvektors in farbkodiert dargestellt. Die Messung erfolgte in der Mitte ( $z = 100 \mu\text{m}$ ) des Kanals mit einem Querschnitt von  $800 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ . Deutlich ist die Ablenkung der Strömung aus dem linken Zufluß nach oben und der Strömung aus dem rechten Zufluß nach unten zu erkennen. In der Mitte des Kanals falten sich die zwei Ströme übereinander.



## Diskussion

Die ersten Messungen mit der Stereo- $\mu$ PIV haben das Potenzial dieser Messmethode gezeigt. Die Testmessungen zur Bestimmung der Genauigkeit der Methode haben einen Fehler von weniger als 5% bei Bestimmung der Geschwindigkeit normal zur Messebene ergeben. Die Genauigkeit ist für makroskopische Stereo-PIV Messungen deutlich höher; dieses ist mit dem sehr kleinen Winkel von  $17^\circ$  zwischen den beiden Blickrichtungen der Kameras im Stereomikroskop zu erklären. Bei den Messungen in der Mischzone des T-Mischers konnte die zufriedenstellende Genauigkeit von 5% nicht erzielt werden. Das in den ersten Messungen verwendete Mikroskopobjektiv wies eine Korrelationstiefe von 60 bis 80  $\mu\text{m}$  auf. Dieser Wert wurde aus der Triangulation der PIV-Meßdaten gewonnen. Bei einer Kanaltiefe von 200  $\mu\text{m}$  ist die Korrelationstiefe zu groß, um detailliert die sich über die Kanaltiefe stark verändernde Strömung aufzulösen. In der Zwischenzeit wurde ein Objektiv mit deutlich geringerer Korrelationstiefe angeschafft und neue Messungen sind geplant.

Desweiteren stellte sich bei der Auswertung der Meßdaten heraus, dass die beiden Tiefenschärfeebenen zwar parallel, aber um  $z=5 \mu\text{m}$  verschoben zueinander lagen. Dieser Wert wurde wiederum aus der Triangulation der PIV-Messdaten gewonnen. Da sich die Strömung innerhalb 5  $\mu\text{m}$  in Tiefenrichtung deutlich verändert, verursacht diese Ungenauigkeit bei der Einrichtung der Kameras einen erheblichen Meßfehler. Zur Zeit untersuchen wir korrelationsbasierte Methoden, die Kameras fehlerfrei zueinander auszurichten.

Die ersten Messungen haben gezeigt, dass Stereo- $\mu$ PIV mit hoher Genauigkeit in geschlossenen Mikrokanälen möglich ist.

Es konnten mehrere Fehlereinflüsse auf das Messergebnis detektiert werden:

Die Verschmutzung der Wände durch anhaftende Tracerpartikeln stört massiv die Selbstkalibrierung. Um diesen Einfluß zu eliminieren musste eine aufwändige Bildvorverarbeitung entwickelt werden. Zur Zeit testen wir verschiedene hydrophobe und hydrophile Beschichtungen der Glasdeckplatte, sowie Polyethylenglykol (PEG) Beschichtungen der Tracerpartikeln, um das Anhaften von Partikeln zu reduzieren.

Anders als normale hochwertige Mikroskopobjektive haben Stereoobjektive einen großen Tiefeschärfereich, so daß die Auflösung beim Scan in z-Ebenen geringer ist.

Der große Tiefeschärfereich bewirkt auch eine geringe Korrelation bei starker Veränderung der Strömung in z-Richtung ( $\partial v_{x,y,z} / \partial z$ ).

Der kleine Winkel von Stereomikroskopen von  $10^\circ$  bis  $20^\circ$  schränkt die Genauigkeit der Bestimmung der Geschwindigkeit in z-Richtung ein.

In Zukunft soll die hier vorgestellte Meßtechnik auch auf biomedizinische Strömungen der dreidimensionalen Strömung im embryonalen Herz (Vennemann et al., 2005) und Partikelseparation (Megens und Prins, 2005) angewandt werden.

## Danksagung

Wir bedanken uns bei

Cor Rops, TNO-TPD, Delft, für die Unterstützung bei der Herstellung der Mikrokanäle, bei Zeiss und Leica (speziell Patrick van Wieringen) für die Bereitstellung von Stereomikroskop-Prototypen,

bei IFAM Fraunhofer Institut, Bremen für die Bereitstellung von verschiedenen Oberflächenbeschichtungen und

bei Dr. Michael Schlüter, IUV, Bremen, für die Diskussion der Meßergebnisse.

## Literatur

- Bothe D, Stemich C, Warnecke HJ (2004) Theoretische und experimentelle Untersuchungen der Mischvorgänge in T-förmigen Mikroreaktoren - Teil 1: Numerische Simulation und Beurteilung des Strömungsmischens. *Chemie Ingenieur Technik* 76:1480-1484
- Bourdon CJ, Olsen MG, Gorby AD (2004) Validation of an analytical solution for depth of correlation in microscopic particle image velocimetry. *Meas Sci Technol* 15:318-327
- Engler M, Kockmann N, Kiefer T, Woias P (2004) Numerical and experimental investigations on liquid mixing in static micromixers. *Chemical Engineering Journal* 101:315–322
- Hoffmann M, Schlüter M, Rübiger N (2005) Experimentelle Untersuchung des Strömungsmischens mittels LIF und PIV in Mikromischern. *Proceedings of 13th GALA Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Cottbus.*
- Ikeda K, Ooms T, Westerweel J (2005) Feasibility Study on Microscopic Digital Holographic PIV. *Proceedings of the PIVNET2 International Workshop on  $\mu$ PIV and Applications in Microsystems.*
- Klank H, Goranovic G, Kutter, JP, Gjelstrup H, Michelsen J, Westergaard CH (2002) PIV measurements in a microfluidic 3D-sheathing structure with three-dimensional flow behaviour. *J. Micromech. Microeng.* 12:862–869
- Klasen LG, Brede M, Leder A (2005) Design and Development of a Stereo Micro PIV – system. *Proceedings of the PIVNET2 International Workshop on  $\mu$ PIV and Applications in Microsystems.*
- Kockmann N, Engler M, Woias P (2004) Theoretische und experimentelle Untersuchungen der Mischvorgänge in T-förmigen Mikroreaktoren – Teil 3: Konvektives Mischen und chemische Reaktion. *Chemie Ingenieur Technik* 76:1777-1783
- Lammerding J, Rohály J, Hart DP (2002) Monocular 3-D magnetic bead microrheometry. *Abstracts of the 11th Int. Symp. Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, paper 1-1, Lisbon, Portugal.*
- Maas HG (1992) Contributions of digital photogrammetry to 3D PTV. In: *Three-Dimensional Velocity and Vorticity. Measuring and Image Analysis Techniques.* (ed Dracos T) 191-208, Kluwer, NL
- Megens M, Prins MWJ (2005) Magnetic biochips: a new option for sensitive diagnostics. *J. Magn. Mag. Mat.*, 293:702
- Meinhart CD, Wereley ST, Santiago JG (1999): PIV measurements of a microchannel flow. *Exp. Fluids* 27:414-419
- Meinhart CD, Wereley ST, Santiago JG (2000) A PIV Algorithm For Estimating Time-Averaged Velocity Fields. *Journal of Fluids Engineering* 122:285 – 289
- Olsen MG, Adrian RJ (2000) Out-of-focus effects on particle image visibility and correlation in microscopic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 29(7):166-174
- Prasad AK, Adrian RJ (1993) Stereoscopic Particle image Velocimetry applied to liquid flows. *Experiments in Fluids*, 15:49 – 60
- Santiago JG, Wereley ST, Meinhart CD, Beebe DJ, Adrian RJ (1998) A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics. *Exp Fluids* 25:316 - 319
- Schlüter M, Hoffmann M, Rübiger N (2004) Theoretische und experimentelle Untersuchungen der Mischvorgänge in T-förmigen Mikroreaktoren – Teil 2: Experimentelle Untersuchung des Strömungsmischens, *Chemie Ingenieur Technik* 76:1682-1688
- Schlüter M, Hoffmann M, Rübiger N (2005) Investigations on micromixing in T-shaped micromixers using  $\mu$ -LIF and  $\mu$ -PIV. *Proceedings of the PIVNET2 International Workshop on  $\mu$ PIV and Applications in Microsystems.*
- Vennemann P, Kiger KT, Lindken R, Groenendijk BCW, Stekelenburg-de Vos S, ten Hagen TLM, Ursem NTC, Poelmann RE, Westerweel J, Hierck BP (2005) In vivo micro particle image velocimetry measurements of blood-plasma in the embryonic avian heart. *Journal of Biomechanics*, published online first
- Wieneke B (2005) Stereo-PIV using self-calibration on particle images. *Experiments in Fluids* 39, published online first
- Wong SH, Ward MCL, Wharton CW (2004) Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer. *Sensors and Actuators B* 100:359–379