

## ENTWICKLUNG UND AUFBAU EINES STEREO-MIKRO-PIV SYSTEMS ZUR INSTANTANEN STRÖMUNGSFELDMESSUNG

L.-G. Klasen, A. Leder, M. Brede

Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Str. 2, 18051 Rostock

### Zusammenfassung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Messverfahrens zur instantanen Erfassung der drei Komponenten des Geschwindigkeitsvektors in Strömungssystemen mit mikroskopischen Längenabmessungen.

Mögliche Anwendungsgebiete der neuen Messtechnik stellen sowohl biologische Systeme, die Medizintechnik, als auch durchströmte Strukturen in der Mikrotechnologie (MEMS) dar, bei denen die erforderlichen Kenntnisse über dreidimensionale Strömungs- und Austauschvorgänge zunehmend in den Vordergrund treten. Die besondere Herausforderung bei diesem Forschungsprojekt ist daher, mit Hilfe des bekannten Prinzips der Stereo-PIV die instantane Auflösung eines zweidimensionalen mikroskopischen Geschwindigkeitsfeldes (2D) für alle drei Komponenten des Geschwindigkeitsvektors (3C) zu realisieren. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass dies im Rahmen des vorgestellten Projekts erstmalig gelungen ist.

### Einleitung

Strömungen im Mikrometermaßstab treten zunehmend in den Vordergrund angesichts der zahlreichen Entwicklungen in der Mikrotechnologie (MEMS, lab on a chip). Weiterhin kommen mikroskopische Strömungen in vielen Bereichen der Biologie und Medizin vor, die insbesondere für Neuentwicklungen in der biomedizinischen Technik - beispielsweise hinsichtlich Stents- und Innenohrmodellierungen - genauester Untersuchungen bedürfen. Bislang besteht jedoch ein Defizit an Messeinrichtungen für Mikroströmungen. Insbesondere komplex dreidimensionale und instationäre Mikroströmungen, wie sie z.B. in der Biologie vorkommen, können nur als zeitgemittelte Strömungen erfasst werden.

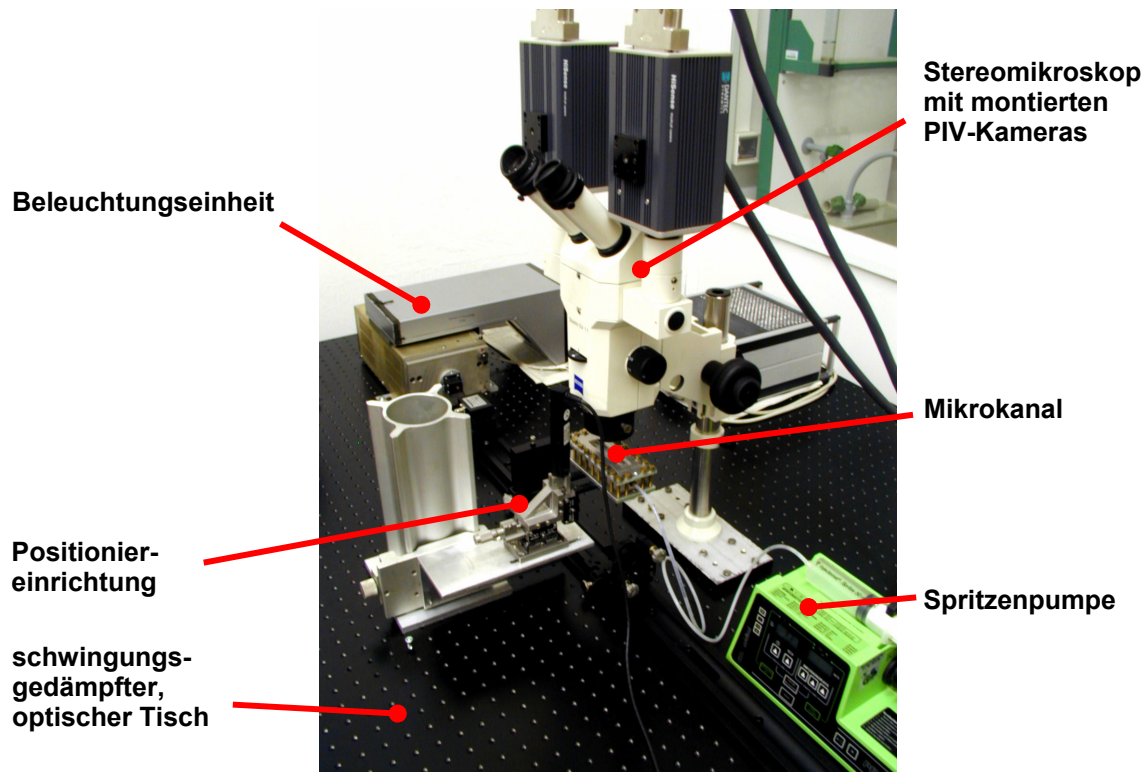
Aus diesem Grund befindet sich am Lehrstuhl Strömungsmechanik ein Mikro-PIV ( $\mu$ -PIV) System im Aufbau und Erprobung, welches die Prinzipien des Stereo-PIV (2D-3C) als auch der konfokalen Mikroskopietechnik in sich vereint. Der besondere Schwerpunkt des Projektes liegt dabei in der instantanen Detektierung von Geschwindigkeitsfeldern in einem mikroskopischen Objektfeld.

Die ersten Messungen konzentrieren sich auf ein Strömungsfeld in einem Mikrokanal mit rechteckigem Querschnitt. Zur Gewährleistung eines ungehindert optischen Zugangs wird die Mikrostruktur durch Fräsen in PMMA (Plexiglas) eingebracht. Mit Hilfe dieser Fertigungsmöglichkeit lassen sich verschiedene Kanalstrukturen und -geometrien realisieren. Die Deckelung der Mikrostrukturen erfolgt durch chemisches Bonden mit transparenten PMMA-Folien.

## Experimenteller Aufbau

Der Messaufbau der  $\mu$ -PIV Anlage ist in Abb. 1 dargestellt. Die Anlage setzt sich aus folgenden Bauteilen zusammen:

- Carl Zeiss Stereomikroskop
- PIV-Anlage mit zwei PIV-Kameras sowie der zugehörigen Auswerteeinheit
- Beleuchtungseinheit
- Positioniereinrichtung mit motorischer Steuerung für die zu untersuchenden Mikrostrukturen
- Spritzenpumpe als Strömungsantrieb



**Abb. 1:** Stereo- $\mu$ -PIV Messstand montiert auf einer optischer Tischplatte

Die gesamte Messeinrichtung ist auf einem schwingungsgedämpften optischen Tisch montiert. Als Untersuchungsgegenstand dient ein in PMMA eingebrachter Mikrokanal. Die Vermessung des ausgebildeten mikroskopischen Strömungsfeldes im Kanal erfolgt mit Hilfe des Prinzips der Stereo-PIV (2D-3C). Der wesentliche Unterschied zu einem PIV-System im makroskopischen Bereich ist, dass die Strömung hier aufgrund der sehr kleinen Längenabmessungen durch ein Mikroskop betrachtet wird.

Durch einen Doppelpuls lasers werden zwei Pulse grünen Laserlichts ( $\lambda=532$  nm) bekannten Zeitversatzes  $\Delta t$  erzeugt. Das Laserlicht wird mit einem Umlenkspiegel schräg von unten in das Mikroskop eingekoppelt. Der Laserstrahl beleuchtet den auf dem Lineartisch positionierten Mikrokanal. Im Gegensatz zum herkömmlichen PIV wird kein Laserlichtschnitt mit einer bestimmten Dicken erzeugt, sondern die Messebene im Kanalquerschnitt definiert sich über die Tiefenschärfe des Mikroskops.

Der Strömungsantrieb erfolgt über eine Spritzenpumpe mit regelbarem Volumenstrom. Dem Fluid werden fluoreszierende, kugelförmige Streuteilchen mit einem Durchmesser von ca.  $1 \mu\text{m}$  zugegeben. Durch Verwendung eines Interferenzfilters am Mikroskopobjektiv wird nur das gestreute rot verschobene Fluoreszenzlicht der Partikel auf den CCD-Kameras abge-

bildet; der Filter blockt das reflektierte grüne Hintergrundlaserlicht von der Deckelung und den Wänden des Kanals ab.

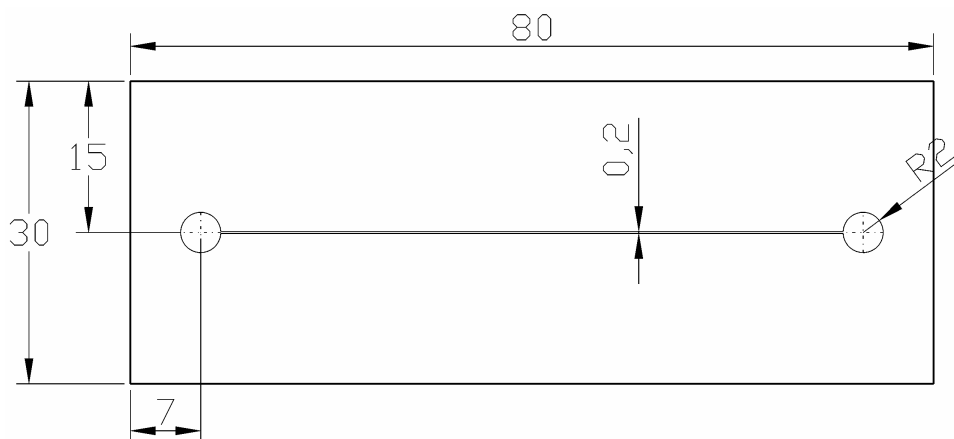
Mit der vorgestellten  $\mu$ -PIV Anlage konnten instantane mikroskopische Geschwindigkeitsfeldmessungen durchgeführt werden. Auf einige Parameter des Systems sowie wesentliche Entwicklungsschritte wird im Folgenden eingegangen.

**Tab.1: Parameter des Mikroskopes, der PIV-Kameras und der Positioniereinrichtung**

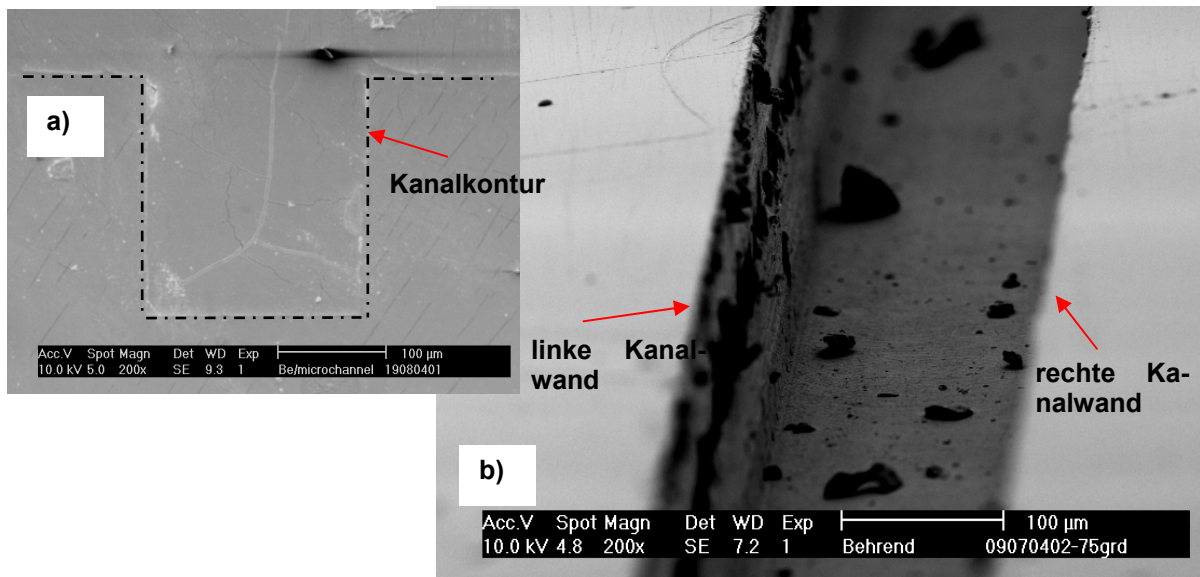
	<b>Mikroskop</b>
<b>max. Vergrößerung</b>	413x
<b>min. Objektfeld [mm<sup>2</sup>]</b>	0,6 x 0,6
<b>Tiefenschärfe [<math>\mu</math>m]</b>	40
	<b>PIV-Kameras</b>
<b>Typ</b>	Dantec HiSense
<b>Auflösung [px]</b>	1280 x 1024
<b>max. Vergrößerung an den Kameras</b>	16,5x
<b>min. Objektfeld [mm<sup>2</sup>]</b>	0,5 x 0,4
	<b>Positioniereinrichtung</b>
<b>Verschiebetische</b>	Newport M-461-XYZ-M
<b>Antrieb</b>	Newport CMA-12CCCL
<b>max. Verfahrweg [mm]</b>	12,5
<b>min. Schrittweite [<math>\mu</math>m]</b>	0,2
<b>Wiederholgenauigkeit [<math>\mu</math>m]</b>	3

Fertigung der Mikrokanalstrukturen:

Einen ganz wesentlichen Teil der bisherigen Arbeiten am Versuchsstand stellten die Erprobung von Fertigungstechniken zur Herstellung von Mikrokanälen und deren Deckelung dar. PMMA erschien aufgrund der Transparenz sowie der guten mechanischen Bearbeitbarkeit des Werkstoffes als sehr geeigneter Träger des Mikrokanals. Bezüglich der Kanalgeometrie wurde ein rechteckiger Querschnitt mit einem Ein- und Auslassreservoir gewählt, der durch eine Mikrofräse in den PMMA-Block eingebracht wurde, vgl. Abb. 2. Die Qualität der mechanischen Bearbeitung wurde mit Hilfe eines Raster-Elektronenmikroskops überprüft und für ausreichend befunden, vgl. Abb. 3. Die Abweichungen in der Breiten- und Tiefenrichtung des Kanals liegen je nach gewählter Kanalgeometrie bei maximal 2  $\mu$ m.



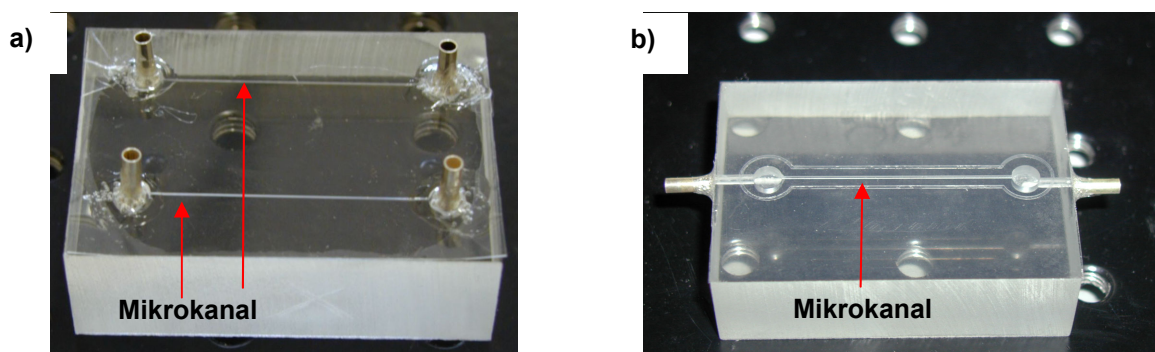
**Abb. 2: Mikrokanal mit Ein- und Auslassreservoir**



**Abb. 3:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zur Vermessung der Kanalgeometrie; a) Querschnitt durch den Mikrokanal; b) Übersichtsaufnahme vom Mikrokanal

Die Mikrokanäle können mittels zweier unterschiedlicher Varianten gedeckelt werden.

- Chemisches Bonden mit Dichlormethan und einer PMMA-Folie, vgl. Abb. 4a): Dazu wird der PMMA-Block einige Minuten mit Dichlormethan bedampft. Dadurch plastiziert eine dünne Schicht an der Oberfläche des Blockes, wodurch es möglich ist, eine PMMA-Folie durch Druck mit dem PMMA-Block zu verbinden. Nach dem Aushärten der Oberfläche ist die Folie hochfest mit dem PMMA-Block verbunden. Die transparente Struktur des PMMA-Blocks bleibt trotz des kurzzeitigen Plastizierens der Oberfläche erhalten.
- Deckelung mit Hilfe eines transparenten Klebebandes, vgl. Abb. 4b): Der Mikrokanal kann in sehr einfacher Weise mit einem handelsüblichen transparenten Klebeband verschlossen werden. Bei den Versuchen wurde aufgrund der genau definierten Höhe von 50  $\mu\text{m}$  ein Klebeband der Fa. ARclad (Typ: ARclad@8102) verwendet.



**Abb. 4:** Gedeckelte Mikrokanäle; a) durch chemisches Bonden und einer PMMA-Folie versiegelter Mikrokanal; b) mit transparenten Klebeband gedeckelter Mikrokanal

Die besten Ergebnisse hinsichtlich Transparenz und druckfester Versiegelung der Kanäle konnten mit Variante a) erzielt werden. Variante b) erscheint für adhoc-Experimente als adäquate Deckelung. Insbesondere die höhere Neigung zu Leckstellen sowie das Festsetzen von Partikeln am Klebstoff erschweren eine kontinuierliche Messung an derartig verschlossenen Kanälen.

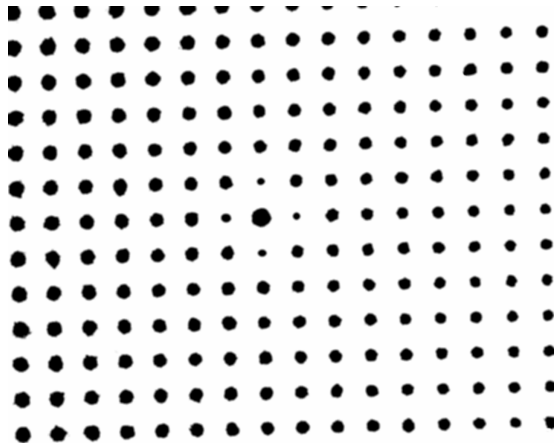


Abb. 5: Punktraster als Kalibriertarget

### Kalibrierung des Stereo- $\mu$ -PIV Systems

Zur Kalibrierung des x-, y- und z-Verschiebung wurde ein Kalibriertarget nach Abb. 5 durch Belichtung eines photographischen Films hergestellt. Damit ist es möglich, das Stereo- $\mu$ -PIV System bis zu einer 250-fachen Vergrößerung am Mikroskop ausreichend zu kalibrieren. Sofern noch stärkere Vergrößerungen am Mikroskop erforderlich sind, muss zur Herstellung des Targets auf lithographische Verfahren ausgewichen werden. Eine weitere Alternative der Kalibrierung stellt die so genannte Selbstkalibrierung nach Wieneke dar.

### Erste Messergebnisse

Das Messverfahren wurde an den vorgestellten Mikrokanälen getestet. Die Breite des Kanals beträgt  $300\ \mu\text{m}$ , die Tiefe  $200\ \mu\text{m}$ . Der hydraulische Durchmesser ergibt sich zu  $D_{\text{hyd}}=240\ \mu\text{m}$ . Die Geometrien der Kanäle sind in den Doppelbildern in Abb. 6 ersichtlich. Der eingestellte Volumenstrom beträgt  $5\ \text{ml/h}$ .

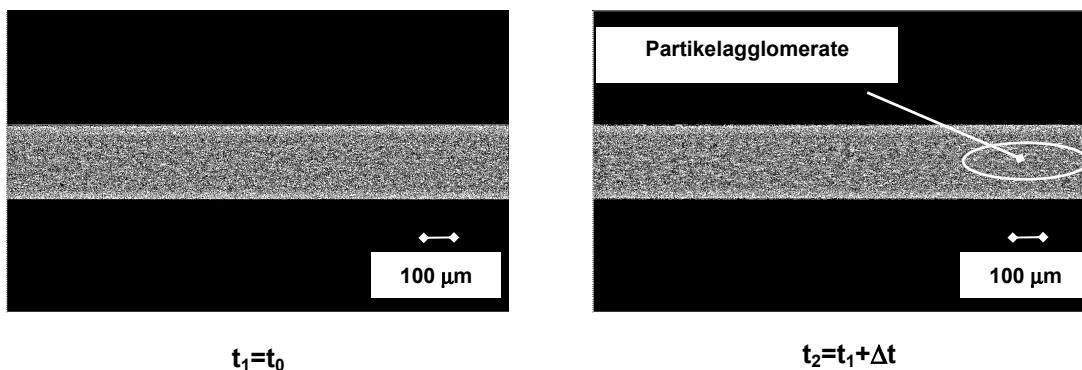


Abb. 6: Doppelbilder aus dem Mikrokanal, Zeitversatz  $\Delta t=290\ \mu\text{s}$

Abb. 6 zeigt Doppelbilder aus dem Mikrokanal mit einem Zeitversatz von  $\Delta t=290\ \mu\text{s}$ . Die Messebene befindet sich auf halber Kanalhöhe,  $100\ \mu\text{m}$  über dem Kanalboden. Auf den Doppelbildern sind infolge der Schärfentiefe des Mikroskops scharf und unscharf abgebildete Partikel zu erkennen. Weiterhin erschweren die auf den Doppelbildern sichtbaren Partikelagglomerate die Auswertung.

Durch adaptive Korrelation von Abtastflächen mit  $32 \times 32$  Pixel und einer Validierung der Geschwindigkeitsdaten mit Hilfe eines gleitenden Mittelwertes und zeitlicher Mittelung über 50 Doppelbilder gelingt es, die in den Abb. 7 und 8 dargestellten Vektorfelder abzuleiten. Die detektierte mittlere Kanalgeschwindigkeit beträgt  $0,049\ \text{m/s}$  und stimmt mit der Aussage der Kontinuitätsgleichung überein. Die Reynoldszahl  $Re$  im Mikrokanal, errechnet mit dem hydraulischen Durchmesser sowie der detektierten mittleren Kanalgeschwindigkeit, beträgt  $Re=12$ . In allen Bereichen der Kanalstruktur lassen sich in ausreichender Genauigkeit parabolische Geschwindigkeitsprofile auflösen. Die Wandhaftungsbedingung kann durch Beobachtung einzelner Partikel in der Nähe der Mikrokanalwandung während der Messreihen bestätigt werden.

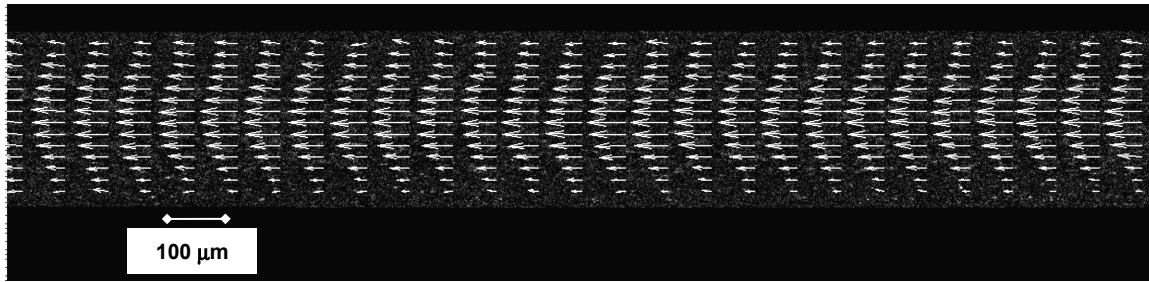


Abb. 7: Kamera 1, zeitlich gemitteltetes Strömungsfeld (u,v) im Mikrokanal

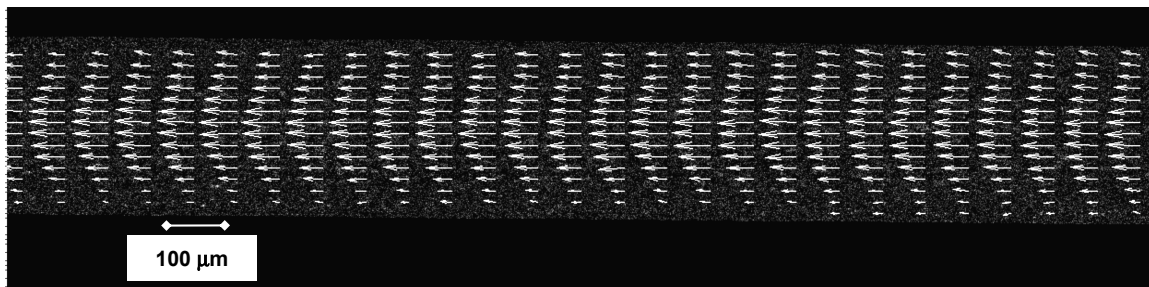


Abb. 8: Kamera 2, zeitlich gemitteltetes Strömungsfeld (u,v) im Mikrokanal

Aus den durch die beiden Kameras detektierten zeitlich gemittelten Strömungsfeldern ließ sich die in Abb. 9 dargestellte dritte Geschwindigkeitskomponente ( $w$ ) in Tiefenrichtung ermitteln. Abb. 9 zeigt als Farbplot die  $w$ -Komponente und als Vektorplot die  $u,v$ -Komponenten. Mittig des Mikrokanals ist erwartungsgemäß eine Geschwindigkeit in Tiefenrichtung nahe Null zu erkennen. Jedoch erscheinen beiderseits an den Kanalwänden Geschwindigkeiten in Richtung Kanalboden sowie in Richtung Kanaldeckel, vgl. Abb. 9. Diese Geschwindigkeiten in Tiefenrichtung sind als Fehlmessungen aufgrund ungenügender Partikelzahl nahe der Wand zu interpretieren.

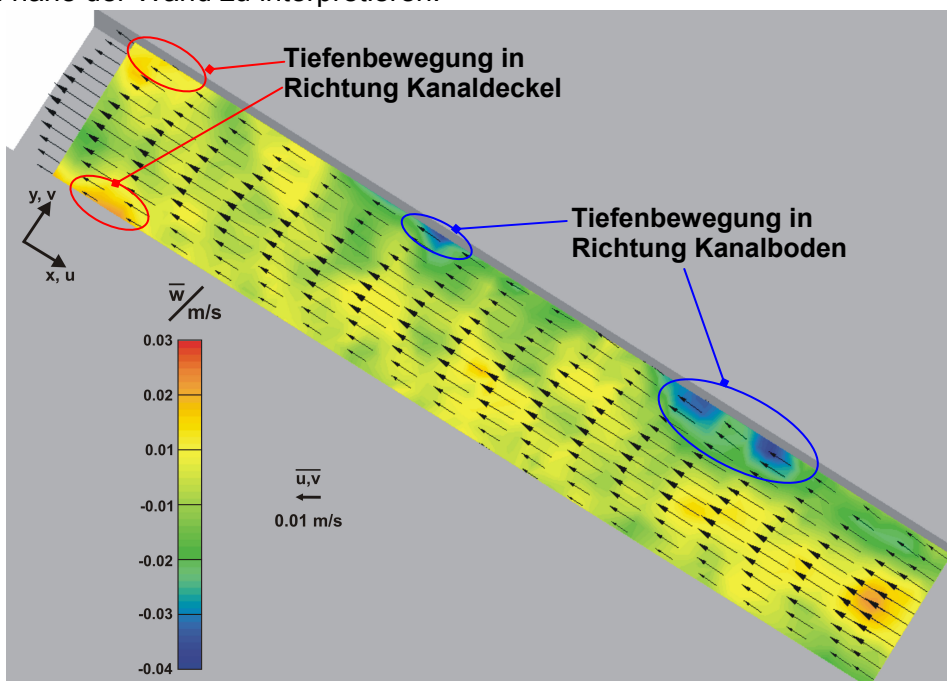


Abb. 9: zeitlich gemitteltetes dreikomponentiges Strömungsfeld im untersuchten Kanalausschnitt; der Farbplot zeigt die Komponente in Tiefenrichtung, der Vektorplot die  $u,v$ -Komponenten des Geschwindigkeitsfeldes

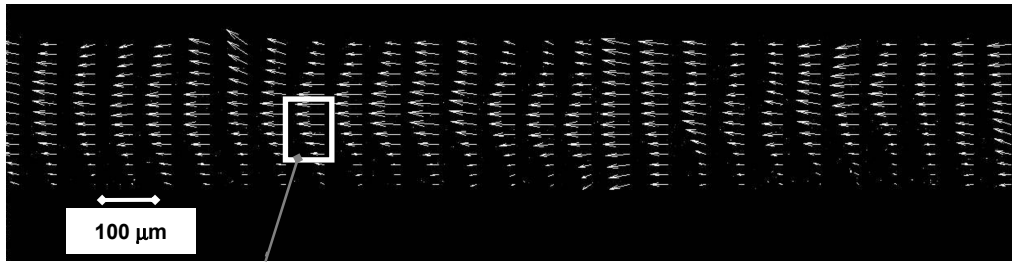


Abb. 10: Kamera 1, instantanes Strömungsfeld (u,v) im Mikrokanal

Strömungsausschnitt, der für die dreikomponentige Analyse herangezogen wurde, vgl. Abb. 12

Fehler infolge ungenügender Teilchendichte nahe der Wand

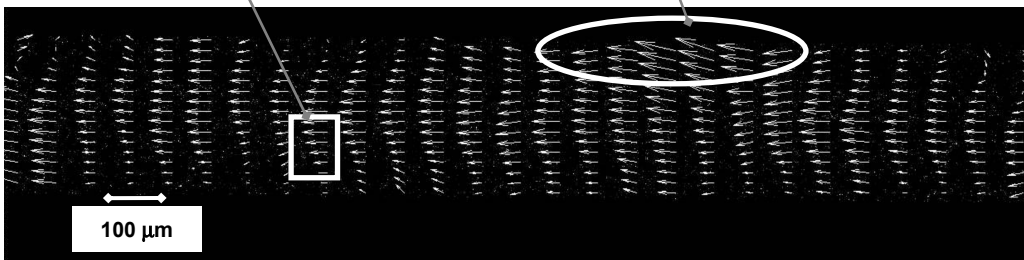


Abb. 11: Kamera 2, instantanes Strömungsfeld (u,v) im Mikrokanal

Instantane Strömungsfelder sind in den Abb. 10 und 11 abgebildet. Es lassen sich auch hier parabolische Geschwindigkeitsprofile im Kanal nachweisen. Jedoch sind die Geschwindigkeitsprofile mitunter stark deformiert. Insbesondere im Wandbereich kann es aufgrund geringer Partikeldichte zu größeren Fehlern kommen, vgl. Abb. 11. Für die nächsten Ausbauschritte des Versuchsstandes wird der Erkennung von Partikelbewegungen nahe der Wand eine hohe Priorität zugeordnet. In Abb. 12 ist ein erstes instantanes dreikomponentiges Geschwindigkeitsfeld dargestellt. Es handelt sich dabei um einen Strömungsausschnitt aus dem Mikrokanal, der in Abb. 11 gekennzeichnet ist.

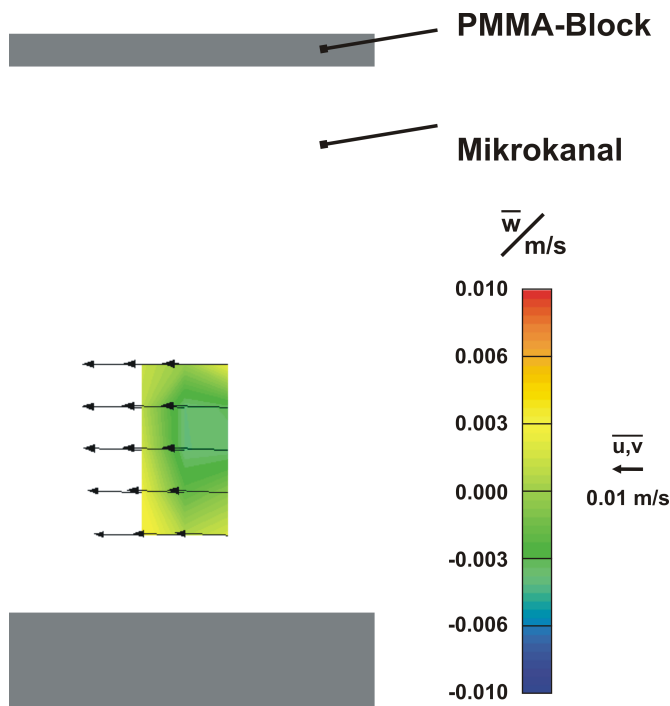


Abb. 12: instantanes dreikomponentiges Geschwindigkeitsfeld im Mikrokanal (Strömungsausschnitt, vgl. Abb. 10 und 11)

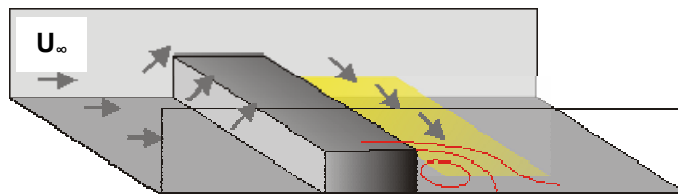
## Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem beschriebenen Versuchsaufbau konnten erste zeitgemittelte Stereo- $\mu$ -PIV Untersuchungen mit Erfolg durchgeführt werden. Als Untersuchungsobjekt diente ein Mikrokanal mit einem rechteckigen Kanalquerschnitt ( $300\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ ,  $D_{\text{hyd}}=240\mu\text{m}$ ), der von Wasser mit zugesetzten fluoreszierenden Partikeln durchströmt wurde.

Die mikroskopischen Messungen werden derzeit u.a. durch ungünstige Beleuchtungsverhältnisse und schlechte Partikelabbildung beeinträchtigt, die momentan die Hauptursachen für instantane dreikomponentige Messungen mit hoher Genauigkeit darstellen. Verbesserungen der optischen Parameter des Systems und die koaxiale Laserlichteinkopplung in das Mikroskop stehen daher bei der künftigen Projektbearbeitung im Vordergrund. Die Partikeldichte in den Kanälen bedarf ebenfalls der Optimierung.

Ein weiterer Schritt ist die Validierung der erhaltenen Messdaten. Derzeit kann lediglich die Konsistenz der an der Spritzenpumpe eingestellten Volumenströme mit den detektierten mittleren Geschwindigkeiten bestätigt werden. Die Überprüfung des Massenstroms über eine Präzisionswaage ist ein weiterer Schritt, um die Genauigkeit des eingestellten Volumenstroms sicherzustellen.

Die Messungen an der einfachen Geometrie eines rechteckigen Mikrokanals dienen der Erprobung des instantanen Stereo- $\mu$ -PIV Prinzips. Zukünftige Messungen sollen an Mikrostrukturen erfolgen, die durch dreidimensionale Umströmungszustände gekennzeichnet sind. Als Beispiel ist in Abb. 12 ein Mikrokanal mit Stufe dargestellt. Die Fertigungsmöglichkeiten dafür sind an der Universität Rostock, Lehrstuhl Antriebstechnik, vorhanden.



**Abb. 13:** Umströmung einer Stufe in einem Mikrokanal

## Dankesworte

Die Autoren danken Prof. Dr.-Ing. Hirschmann (Lehrstuhl Antriebstechnik) für die Zusammenarbeit bei der Erstellung der Mikrokanalstrukturen. Dank gebührt weiterhin den Herren Prof. Dr.-Ing. Schmitz und Prof. Dr.-Ing. Behrend (Lehrstuhl für biomedizinische Technik) für die tatkräftige Unterstützung bei der Qualitätskontrolle der Mikrokanäle.

## Literatur

Klasen, L.; Brede, M.; Leder, A. (2005): Design and development of a Stereo Micro PIV-System, in: Book of Abstracts, International Workshop on  $\mu$ PIV and Applications in Microsystems, Delft, The Netherlands, April 7-8, 2005

Meinhart, C.D.; Wereley, S.T.; Santiago, J.G. (1999): PIV measurements of a microchannel flow, Exp. Fluids 27, p. 414-419

Meinhart, C.D.; Wereley, S.T.; Gray M.H.B. (2000): Volume illumination for particle image velocimetry, Meas. Sc. Tech. 11, p. 809-814

Oschatz, L.-G., Brede, M.; Delgado, A.; Leder, A. (2004): Untersuchung mikroskopischer Strömungsstrukturen mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV), in: B. Ruck, A. Leder, D. Dopheide, (Hrsg.) Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 12. Fachtagung der GALA e.V. 2004, GALA Karlsruhe, paper no. 43

Wienecke, B. (2003): Stereo-PIV using Self-Calibration on Particle Images, in: 5th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Busan, Korea, September 22-24, 2003