

UNTERSUCHUNG MIKROSKOPISCHER STRÖMUNGSSTRUKTUREN MIT HILFE DER PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV)

Lars-Gunar Oschatz, Martin Brede, Antonio Delgado*, Alfred Leder

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

* Technische Universität München, Lehrstuhl für Fluidmechanik und Prozessautomation, Weihenstephaner Steig 23, 85350 Freising

Abstract

Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines Messverfahrens zur Analyse von Strömungen in Systemen mit mikroskopischen Längenabmessungen.

Mögliche Anwendungsgebiete der neuen Messtechnik stellen sowohl biologische Systeme, die Medizintechnik, als auch MEMS-Strukturen dar, bei denen die erforderlichen Kenntnisse über dreidimensionale Strömungs- und Austauschvorgänge zunehmend in den Vordergrund treten. Der Schwerpunkt des Forschungsprojektes ist daher, mit Hilfe des Prinzips der Stereo-PIV erstmals die instantane Auflösung eines mikroskopischen Geschwindigkeitsfeldes (2D) für alle drei Komponenten des Geschwindigkeitsvektors (3C) zu realisieren.

Einleitung

Die experimentelle Untersuchung mikroskopischer Strömungsstrukturen trifft in den Ingenieurwissenschaften auf wachsendes Interesse.

Gründe hierfür sind aktuelle Forschungsgebiete, wie z. B. die Entwicklung und Konstruktion von MEMS-Strukturen (z. B. Mikromischer, Miniaturpumpen). Hier sind die Kenntnisse der Strömungs- und Turbulenzprozesse für die Auslegung, den Betrieb und für eine Optimierung von allergrößter Bedeutung. Weiterhin können bestimmte Phänomene aus den Bereichen der Biologie und Medizin, wie z. B.

- induzierte Strömungsfelder von Protozoen,
- Strömungen im menschlichen Ohr (Cochlea),
- veränderte Blutgefäßströmungen nach dem Einsetzen von Stents

nur durch Experimente exakt analysiert und beurteilt werden.

Um die genannten Strömungs- und Turbulenzprozesse in der miniaturisierten Technik als auch in den Anwendungsbereichen aus der Biologie und Medizin näher untersuchen und charakterisieren zu können, wird an der Universität Rostock ein Mikro-PIV (μ -PIV) System entwickelt und aufgebaut, welches die Prinzipien des Stereo-PIV (2D-3C) als auch der konfokalen Mikroskopietechnik in sich vereint. Des Weiteren soll es mit dem zu entwickelnden System möglich sein, Strömungsfelder in diesen Größenordnungen erstmalig instantan aufzulösen.

Die ersten Messungen zu Testzwecken konzentrieren sich auf ein Strömungsfeld in einem quadratischen Kanalquerschnitt. Die Kanalhöhe und -weite betragen je $200 \mu\text{m}$. Der Kanal wird durch Fräsung in den Kunststoff PMMA eingebracht (vgl. Abb. 1). Die Deckelung des Kanals erfolgt mit einem Glasplättchen.

Aufgrund der Komplexität des Projektes beschränken sich die ersten Untersuchungen zunächst auf eine flächige, zweikomponentige Auswertung des Messfeldes.

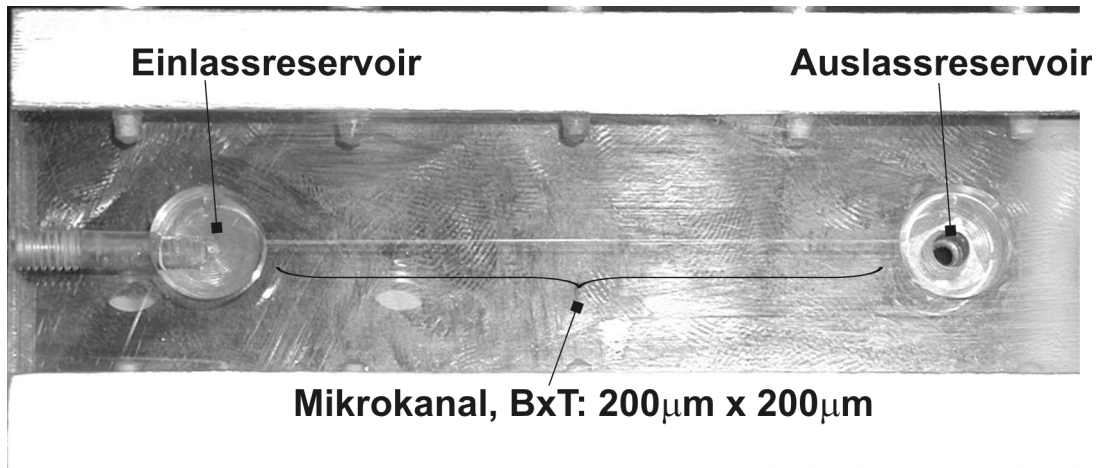


Abb. 1: Gefräster Mikrokanal in *PMMA* (Plexiglas)

Experimenteller Aufbau

Der Versuchsstand ist auf einem schwingungsgedämpften optischen Tisch montiert, s. Abb. 2.

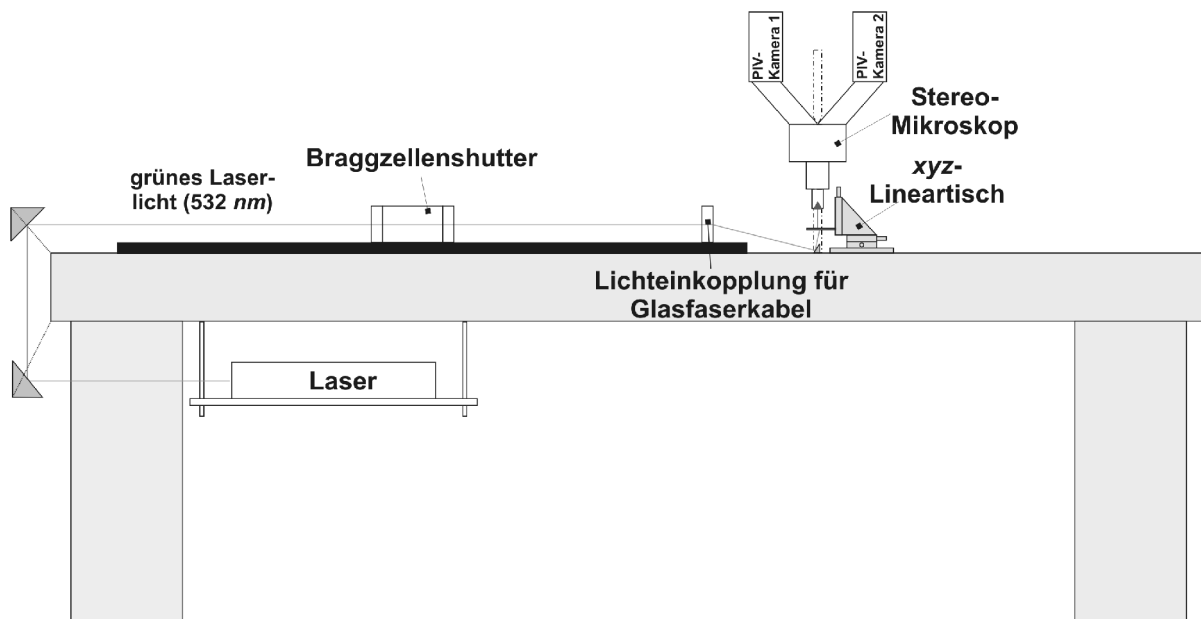


Abb. 2: Versuchsstand auf der optischen Tischplatte

Die Vermessung des mikroskopischen Strömungsfeldes erfolgt mit Hilfe eines **Mikro-Particle Image Velocimetry** (μ -**PIV**) - Verfahrens, ähnlich dem System von Meinhart et. al. [1]. 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.

Mit Hilfe eines luftgekühlten Argon-Ionen-Lasers und einer Braggzelle werden zwei Pulse grünen Laserlichts ($\lambda = 514 \text{ nm}$) bekannten Zeitversatzes Δt erzeugt. Nach der Braggzelle wird das Laserlicht in eine Glasfaser eingespeist und unter dem Mikroskop ausgekoppelt (vgl. Abb. 2). Der Laserstrahl beleuchtet den auf dem Lineartisch positionierten Mikrokanal. Im Gegensatz zum herkömmlichen PIV wird kein Laserlichtschnitt von einer bestimmten Di-

cke erzeugt, sondern die Messebene im quadratischen Kanalquerschnitt ($B \times T$: $200 \mu m \times 200 \mu m$) definiert sich über die Tiefenschärfe des Mikroskops.

Dem Fluid wird fluoreszierendes, kugelförmiges Seeding mit einem Durchmesser von ca. $1 \mu m$ zugegeben. Das gestreute rote Fluoreszenzlicht wird auf die CCD-Kamera abgebildet. Ein dem Mikroskop vorgeschalteter Filter trennt reflektiertes grünes Hintergrundlaserlicht von der Deckelung und den Wänden des Kanals ab.

Schwerpunkte der Weiterentwicklung dieser experimentellen Technik werden auf folgenden Gebieten gesetzt:

- Verbesserung der Löslichkeit des Seedings im Fluid,
- Verringerung der Wandhaftung des Seedings an der Deckelung des Mikrokanals und
- Einsatz neuer Techniken bei der Fertigung des Mikrokanals.

Die eingehendere Diskussion der aufgeführten Probleme erfolgt in der Zusammenfassung dieses Beitrages.

Erste Ergebnisse an einem Mikrokanal aus Glas

Das Messverfahren wird an einem aus vier Glasplättchen geklebten Kanal (vgl. Abb 3a) getestet. Die vier Plättchen formen einen rechteckigen Kanalquerschnitt ($B \times T$: $10 mm \times 1 mm$) mit einem hydraulischen Durchmesser von $d_{hyd} = 1,82 mm$ (vgl. Abb. 3b). Der experimentelle Aufbau ist in Abb. 4 dargestellt. Die Ausleuchtung des Strömungsfeldes in der Messstrecke erfolgt über eine TTL-getriggerte rote Laserdiode ($\lambda = 588 nm$). Durch eine auf dem Stereo-Mikroskop montierte Hi-Sense Kamera werden die Strömungsbilder aufgenommen. Mit dem vorhandenen Mikroskop sind maximale Vergrößerungen von $V_{ges} = 412$ möglich.

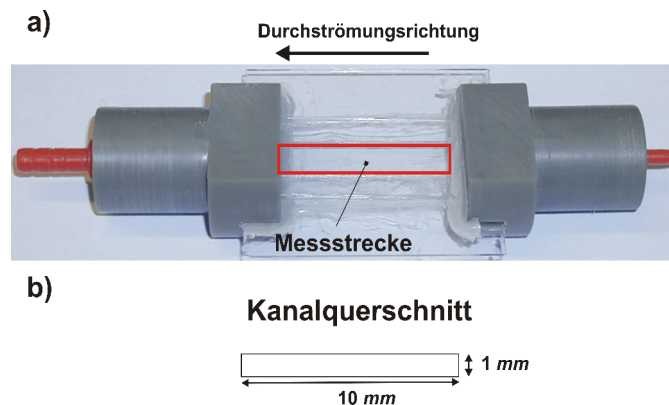


Abb. 3: Geklebter Glaskanal mit zugehörigem Kanalquerschnitt

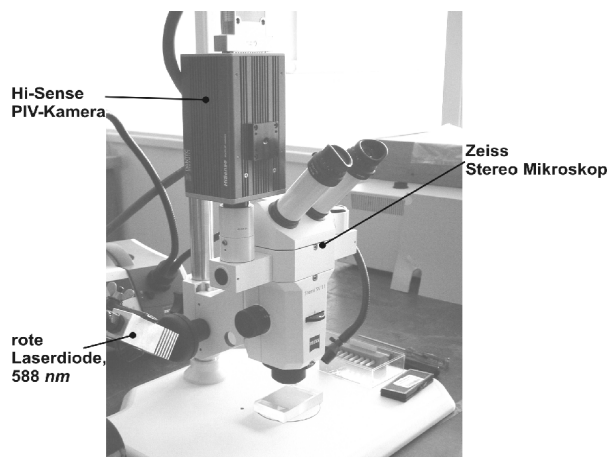


Abb. 4: Experimenteller Aufbau für die ersten Testmessungen

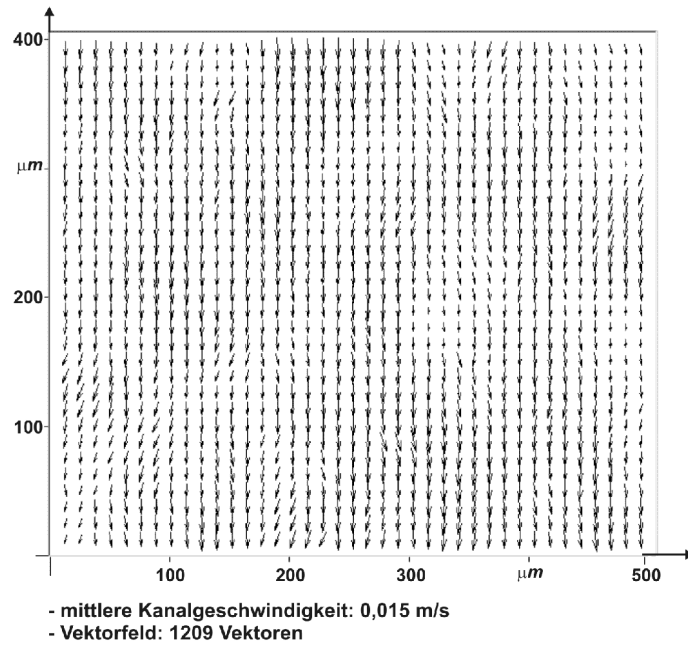


Abb. 5: Detektiertes Geschwindigkeitsfeld im Glaskanal

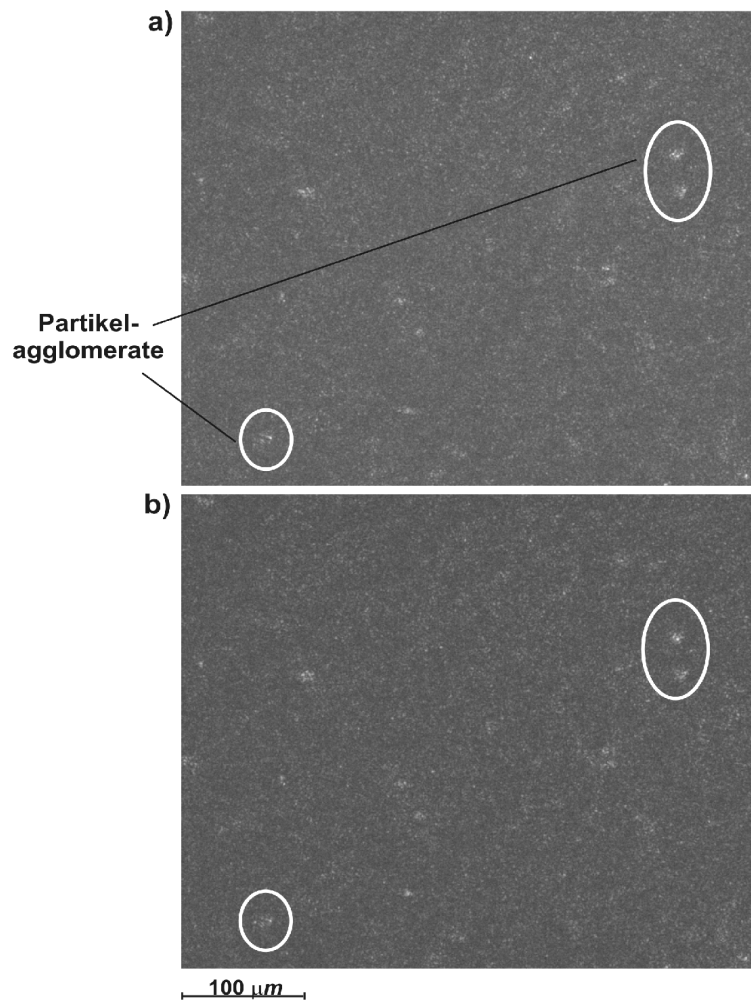


Abb. 6: Doppelbilder aus dem geklebten Glaskanal

Ein erstes detektiertes Geschwindigkeitsfeld in der Grösse von $400\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ ist in Abb. 5, die dazugehörigen Doppelbilder sind in Abb. 6 dargestellt. Die Doppelbilder weisen einen Zeitversatz von $\Delta t = 1,6\ \text{ms}$ auf. Die Messebene befindet sich in halber Kanalhöhe, $0,5\ \text{mm}$ über dem Glasboden. Auf den Doppelbildern sind sowohl scharf als auch unscharf abgebildete Partikel infolge der Ausleuchtung von Teilen des Volumens ausserhalb der Messebene zu erkennen. Gleichfalls sind auf den Doppelbildern Partikelagglomerate infolge unvollständiger Trennung gut nachzuweisen. Durch Kreuzkorrelation mit Abfrageflächen von 64×64 Pixel gelingt es, dass in Abb. 5 dargestellte Vektorfeld abzuleiten. Eine mittlere Kanalgeschwindigkeit von etwa $0,015\ \text{m/s}$ kann detektiert werden. Damit ist die zur Verfügung stehende Auswertesoftware in der Lage, die geringen Strömungsgeschwindigkeiten auszuwerten. Jedoch muss auch festgestellt werden, dass es zur Bildung von Partikelagglomeraten kommt. Die Agglomerate sind in Abb. 6 auf den Doppelbildern hervorgehoben. Die Agglomerate sowie die sehr schnelle Wandhaftung der Partikel an den Kanalwänden und der Deckelung stellen momentan das grösste Hindernis für eine kontinuierliche Messung dar. Derzeit sind Messungen an Mikrostrukturen zeitlich sehr begrenzt (lediglich einige Minuten) möglich.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem gezeigten Versuchsaufbau konnte ein Geschwindigkeitsfeld in der Grösse von $400\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ aufgelöst werden. Der durchströmte Kanal hat einen rechteckigen Strömungsquerschnitt mit einem hydraulischen Durchmesser von $d_{\text{hyd}} = 1,82\ \text{mm}$. Trotz Problemen mit der Löslichkeit des verwendeten Seedings ist eine Messung des Geschwindigkeitsfeldes in der Mittelebene des Kanales möglich. Die verwendete Auswertesoftware ist in der Lage, derart kleine Strömungsfelder auszuwerten. Eine Validierung der ermittelten mittleren Kanalgeschwindigkeit mit Hilfe der Messung des Massenstroms über eine Präzisionswaage steht derzeit noch aus.

Momentan finden Untersuchungen zur Optimierung des experimentellen Setups statt. Die Konzentration liegt dabei auf den folgenden Punkten:

a) Experimentelle Ermittlung der optischen Parameter des mikroskopischen Systems:

Hierbei stehen vor allem Untersuchungen zur Quantifizierung der Tiefenschärfe und des Blickwinkels des Mikroskops im Vordergrund. Ohne dieses Wissen ist eine stereoskopische Auswertung des Messfeldes nicht möglich.

b) Optimale Werkstoffpaarung zwischen Mikrokanal und Seedingmaterial:

Bisher ist es noch nicht gelungen, eine optimale Werkstoffpaarung zwischen dem Mikrokanal und dem in der Strömung mitgeführten Seeding zu erreichen. Sehr häufig können Messungen aufgrund von Seedingablagerungen an der Deckelung des Kanals nicht durchgeführt bzw. fortgesetzt werden. Eine mögliche Lösung dieses Problem ergäbe sich durch die Fräsung der Mikrokänale in *PTFE* oder *FEP*. Dies wird momentan eingehend untersucht.

c) Seeding:

Bisher verwendete Seedingmaterialien sind gekennzeichnet durch eine ungenügende Trennung während des Lösungsprozesses sowie durch die Bildung von Agglomeraten während des Experiments. Das Problem soll durch die Beschaffung von Seeding in gelöster Form sowie durch den Einsatz von Ultraschall in der Fluidzuführung weit vor der Messstrecke gelöst werden.

Literatur

- [1] Meinhart, C. D., Wereley, S. T., Santiago, J. G.; 1999; PIV measurement of a microchannel flow. Experiments in Fluids 27; 414-419.