

2D-MOLECULAR TAGGING VELOCIMETRY ZUR ANALYSE MIKROFLUIDISCHER STRÖMUNGEN

Karsten Roetmann¹, Christoph S. Garbe², Volker Beushausen¹

¹ Laser-Laboratorium Göttingen e.V., Hans-Adolf-Krebs Weg 1, 37077 Göttingen

² Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR), Universität Heidelberg,
Im Neuenheimer Feld 368, 69120 Heidelberg

Zusammenfassung

Die zweidimensionale Molecular Tagging Velocimetry (MTV) ist eine partikelfreie Alternative zu herkömmlichen Strömungsmessverfahren wie PIV und PTV. Sowohl bei der Generierung der Bilddaten als auch bei der Auswertung werden neue Wege gegangen, die in diesem Beitrag beschrieben werden. Anstatt Partikel als Strömungsmarker zu verwenden, wird ein, dem Fluid homogen zugemischter, Farbstoff („caged dye“) optisch markiert. Die Markierungen können durch Auslesen des Fluoreszenzlichtes des Farbstoffes verfolgt werden. Im Folgenden werden die Generierung von Rohbildern, also der Markierungsvorgang und das Auslesen der Fluoreszenz beschrieben. Die Rohbilder werden mit der Methode des optischen Flusses und mit einem gewöhnlichen PIV-Algorithmus ausgewertet und die Ergebnisse verglichen.

Einleitung

In den letzten Jahren fand im Bereich mikrofluidischer Strömungen eine rasante Entwicklung statt. Technologische Fortschritte in der Fertigung mikrofluidischer Komponenten führen seitdem zu immer breiter einsetzbaren Systemen in verschiedensten Anwendungsbereichen (siehe Burns und Ramshaw 2001 oder Nguyen 2002 oder Wang 2000). Zu nennen ist hier unter anderem die chemische und biochemische Analytik. Sie ist mit den neuen Hilfsmitteln in der Lage, in miniaturisierten Laboren, die häufig nicht größer als eine Kreditkarte sind, erheblich schnellere Untersuchungen an winzigen Probenmengen durchzuführen. In Zukunft könnte die Mikrofluidik auch für chemische Produktionsabläufe immer interessanter werden. Die Möglichkeit experimentelle Randbedingungen sehr genau einstellen und kontrollieren zu können, führt zu einer effizienteren Produktion und ermöglicht einen genau definierten Reaktionsablauf mit sehr sauberen Produkten ohne die Erzeugung störender Nebenprodukte.

Aufgrund des stark wachsenden Interesses an mikrofluidischen Systemen besteht großer Bedarf an neuen diagnostischen Hilfsmitteln zur Analyse von Mikroströmungen (siehe Sinton 2004). Die Entwicklung des hier vorgestellten neuen Geschwindigkeitsmessverfahrens findet im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes „Bildgebende Messverfahren zur Strömungsanalyse“ (SPP 1147) statt. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Teilaspekt der Geschwindigkeitsmessung mittels einer Variante der „molecular tagging velocimetry“ (MTV). Dabei soll die herkömmliche MTV (siehe Inaba et al. 2001, Gharib et al. 2002, Koochesfahani und Nocera 2001 oder Koochesfahani et al. 2000) zu einem zweidimensionalen Messverfahren erweitert werden. Wie im Folgenden dargelegt wird, weist MTV einige Besonderheiten auf, wie sie in herkömmlichen Strömungsvisualisierungsverfahren mittels Tracerpartikeln nicht auftreten. Daher lassen sich herkömmliche Verfahren wie PTV oder PIV nur bedingt einsetzen. Vielversprechender erscheint ein neuer Ansatz der digitalen Bildverarbeitung, bei

dem Charakteristika der Strömungsvisualisierung berücksichtigt und ausgenutzt werden können.

Flächig strukturierte Fluidmarkierung

Bei dem hier vorgestellten Verfahren werden zweidimensionale Strömungsfelder bestimmt, indem das fließende Fluid optisch markiert und die, sich durch die Strömung verzerrende, markierte Struktur zeitlich verfolgt wird. Die Markierung wird durch den Einsatz eines besonderen Fluoreszenzfarbstoffes, einem so genannten „caged dye“ erreicht (siehe Gee et al 2001). Dieser Farbstoff liegt derart chemisch verändert vor, dass seine Fähigkeit zur Fluoreszenz durch eine zusätzliche funktionale Gruppe am Molekül deaktiviert ist. Durch einen Lichtpuls im nahen UV (351nm) kann ein Bindungsbruch zwischen dem Molekül und der zusätzlichen Gruppe hervorgerufen werden. Dies hat zur Folge, dass die Fähigkeit zur Fluoreszenz wieder aktiviert ist. Mit einer darauf folgenden Anregung mit grünem Laserlicht (514nm, Ar+) lässt sich sodann die zuvor mit dem „Schreiblaserpuls“ in die Strömung geschriebene flächige Struktur zeitaufgelöst auslesen.

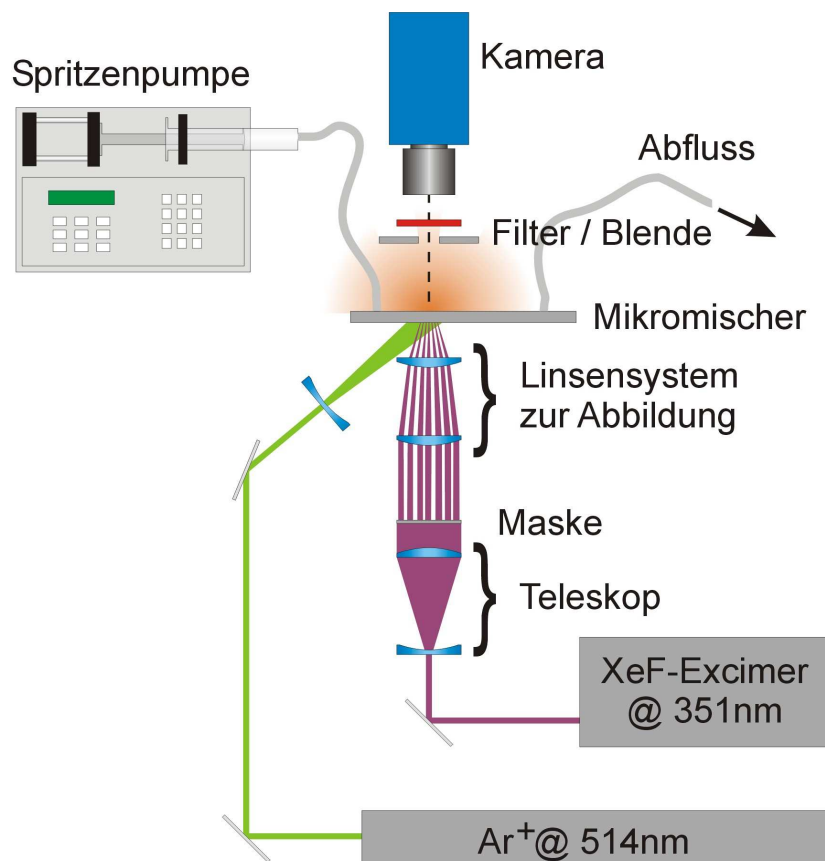


Abb. 1: Aufsichtsskizze des Versuchsaufbaus

Abbildung 1 zeigt den experimentellen Aufbau, mit dem die im Folgenden dargestellten Bild-daten gewonnen wurden. Im Zentrum der Abbildung befindet sich das Untersuchungsobjekt (Mikromischer, Mikrokanal), das im Wesentlichen aus einem 200µm dicken Fluidfilm in einer Strömungsküvette aus Quarzglas (Fa. Starna, Strömungszelle Typ 48) besteht. Der rechteckige Querschnitt des Kanals ist 8mm weit und 200µm tief. Die Kanallänge beträgt 40mm. Eine Spritzenpumpe (Harvard Apparatus Advanced Syringe Pump PHD2000) sorgt für einen gleichmäßigen Antrieb der Mikroströmung. Als Versuchsfluid wurde demineralisiertes Was-

ser mit 50mg/l „caged dye“ (Carboxy-Q-Rhodamine, Molecular Probes, Dextran Carboxy-Q-Rhodamine CMNCBZ-caged 10.000MW anionic) verwendet.

Der optische Teil des Aufbaus besteht aus den drei Teilen:

1. Markierung,
2. Fluoreszenzanregung und
3. Detektion.

Die Markierung geschieht dabei durch einen gepulsten XeF-Excimerlaser (Lambdaphysik, COMPex 150) bei einer Wellenlänge von 351nm. Ein Teleskop weitet den Laserstrahl so weit auf, dass die darauf folgende Maske vollständig und möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Die Maske enthält die Struktur, mit der das Fluid markiert werden soll. Die Maske wird über ein Linsensystem aus zwei Einzellinsen verkleinert auf den Mikrokanal abgebildet. Der Verkleinerungsfaktor des Linsensystems ist etwa 8, so dass die Maske (ca. 40mm) auf eine Größe von 5mm Kantenlänge verkleinert wird. Dadurch kann ein großer Teil der Kanalbreite ausgeleuchtet werden. Die Abbildung geschieht über ein System aus zwei Linsen um Abbildungsfehler zu minimieren. An den durch die Maske beleuchteten Stellen des Fluids wird die Fluoreszenzfähigkeit des Farbstoffes aktiviert und kann nachfolgenden mit einem „Leselaser“ kontinuierlich ausgelesen werden.

Der hier eingesetzte „Leselaser“ ist ein kontinuierlicher Argon-Ionen Laser bei einer Wellenlänge von 514nm (Coherent, Innova 310). Dieser beleuchtet den Mikrokanal nach Aufweitung durch eine Konkavlinse flächig. Der Leselaserstrahl trifft den Mikrokanal unter einem Winkel von ca. 35°, damit dieses Anregungslicht nicht direkt in die zum Nachweis genutzte CCD-Kamera einfällt. Durch das Licht des Argon-Ionen Lasers wird der freigesetzte Farbstoff zur Fluoreszenz bei einer Wellenlänge von 575nm angeregt. Die Fluoreszenzstrahlung wird im dritten Teil des optischen Aufbaus von der erwähnten CCD-Kamera (LaVision, Imager Compact QE) registriert. Zur Eliminierung des Anregungslichtes werden ein Filter (Schott, OG570) und eine Blende eingesetzt.

Die Aufnahme von Bilddaten geschieht mit einer Bildfolge von 10Hz bei einer Auflösung von 512x480 Pixeln und einer Belichtungszeit von 10ms. Ein einzelner Puls des Excimerlasers schreibt das Muster der Maske zum Zeitpunkt t_0 in das Fluid. Von diesem Zeitpunkt an kann das Fluoreszenzlicht des Farbstoffes verfolgt werden. Aufgrund der kontinuierlichen Beleuchtung des Fluids durch den Argon-Ionen Laser hängt die Aufnahmefrequenz der Fluoreszenzbilder allein von der Bildwiederholrate der verwendeten Kamera ab, Damit ist es bei einer entsprechend schnellen Kamera möglich, auch schnellere Strömungen zu vermessen.

Aufnahme von Rohbildern

Für die ersten grundlegenden Untersuchungen wurde eine einfache Mikrokanalströmung verwendet. Als Untersuchungsobjekt kam hier die beschriebene Strömungsküvette zum Einsatz. Abbildung 2 zeigt beispielhaft ein Bild der mit der Maske strukturierten Fluoreszenz im Flüssigkeitsfilm. Deutlich zu erkennen ist das von der hier verwendeten Maske erzeugte Punktmuster. Die Maske bestand in diesem Fall aus Punkten von 1mm Größe, die in einer zufälligen Anordnung mit einem mittleren Abstand von 1,55mm verteilt waren. Die Strömung verläuft von links nach rechts und die Kanalbreite von 8mm ist von oben nach unten angeordnet. Die Position im Kanal lässt sich an der y-Achse ablesen, dabei liegen die Kanalwände bei $y=0\text{mm}$ und $y=8\text{mm}$. Die Tiefe des Mikrokanals von 200 μm erstreckt sich in die Bildebene hinein. Die Aufnahme zeigt in Falschfarben die Intensität der Fluoreszenzlichtes der Markierungen. Der Zeitpunkt der Aufnahme liegt direkt nach dem Markierungsvorgang, also bei $t_0=0\text{s}$. Der Durchfluss in der Küvette betrug 1ml/h. Dies entspricht bei der gegebenen Kanalgeometrie einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $u=0,17\text{mm/s}$. Diese Aufnahme ist die erste einer Serie, die mit einer Aufnahmefrequenz von 10Hz erzeugt wurde. Mehrere Aufnahmen einer weiteren Serie im Verlauf zeigt Abbildung 4.

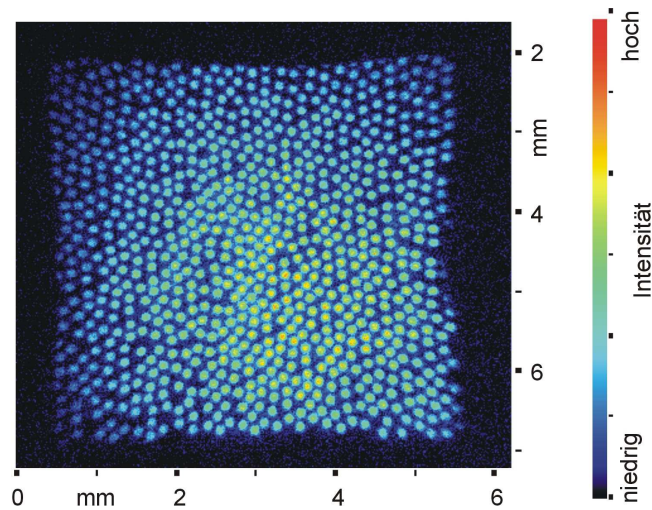


Abb. 2: MTV-Aufnahme einer Mikrokanalströmung

Der Schreibpuls des Excimerlasers ist typischerweise ca. 20ns lang und daher in der Lage eine nicht verschmierte Markierung zu erzeugen. Die Pulsenergie des Schreibpulses im Beobachtungsvolumen beträgt ca. 20mJ. Die Fluoreszenzanregung durch den kontinuierlichen Argon-Ionen Laser geschieht mit einer Leistung von ca. 250mW. Aufgrund der geringen Konzentration des absorbierenden Fluoreszenzmarkers im Wasser und der verschwindend geringen Wasserabsorption kann davon ausgegangen werden, dass nahezu die gesamte Lichtenergie durch den Kanal transmittiert wird. Der tatsächliche Energieeintrag in die Fluidströmung liegt also deutlich niedriger als die verwendeten Laserenergien. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass keine Beeinflussung der Strömung durch das eingekoppelte Laserlicht stattfindet.

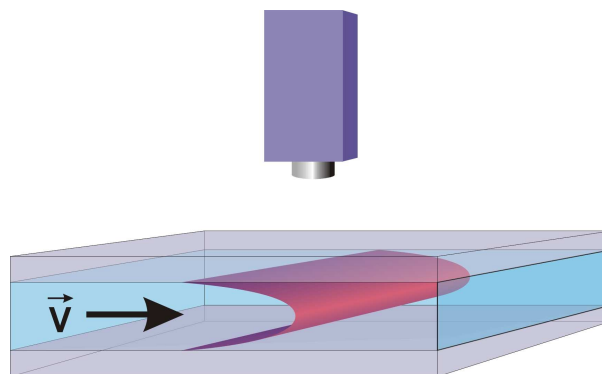


Abb. 3: schematische Darstellung der druckgetriebenen Strömung zwischen Deck- und Bodenplatte

Bei der Aufnahme in Abbildung 2 ist zu beachten, dass die Lichtintensitäten integral über die Kanaltiefe aufgenommen wurden. Dadurch ergibt sich bei druckgetriebener Strömung zu späteren Zeitpunkten nach der Markierung eine Verschmierung der markierten Struktur durch zweierlei Prozesse. Zunächst kommt es aufgrund der Brownschen Molekülbewegung zu einem isotropen Diffusionsprozess des Fluoreszenzfarbstoffes. Dieser isotropen Diffusion ist die anisotrope Taylordiffusion überlagert, die sich aus der tiefenintegration der Strömungsvisualisierung und dem parabelförmigen Geschwindigkeitsprofil ergeben. Dieses Strömungsprofil ist in den hier vermessenen Mikrofluiden sehr ausgeprägt, da die Haftbedingung an den Wänden gilt und die beiden Platten einen sehr geringen Abstand aufweisen. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Zwischen den beiden Glasplatten fließt das Fluid von links nach rechts, die Blickrichtung der Kamera ist senkrecht dazu angeordnet, so dass eine zunächst scharfe markierte Struktur zu einem späteren Zeitpunkt

in Strömungsrichtung verschmiert erscheint. Eine Bildserie, die mit einer Struktur sehr kleiner Punkte erzeugt wurde, ist in Abbildung 4 gezeigt.

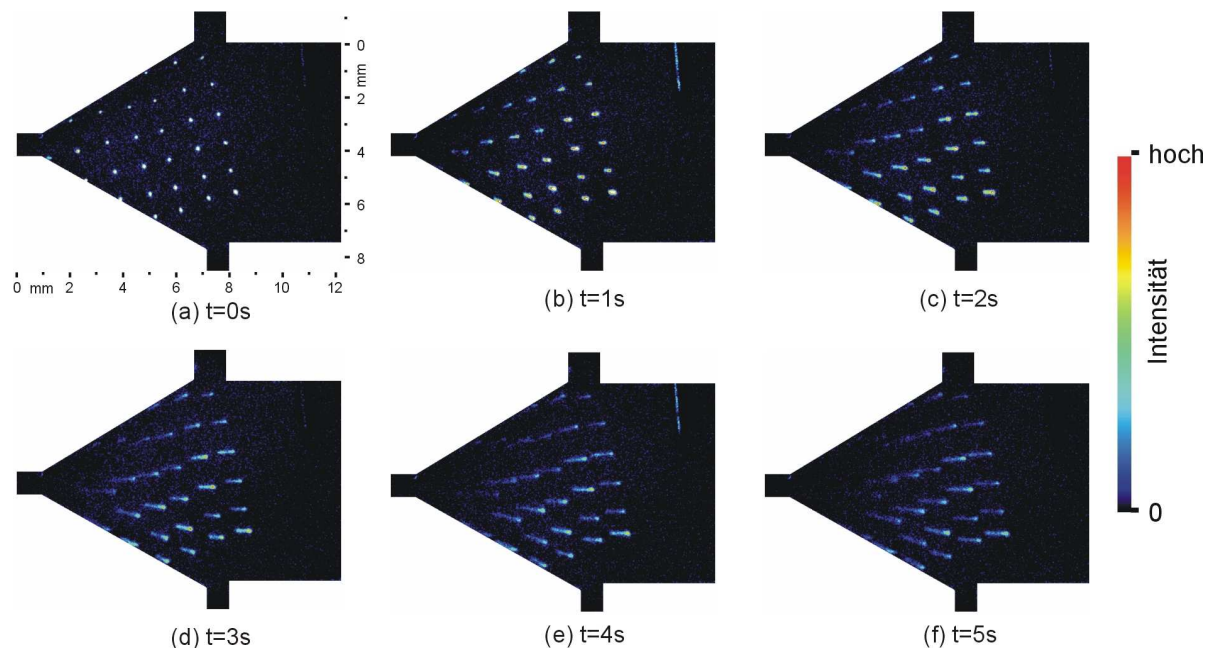


Abb. 4: schematische Darstellung der druckgetriebenen Strömung zwischen Deck- und Bodenplatte

Für die folgenden Berechnungen der Strömungsfelder wurde dieser Aspekt zunächst außer Acht gelassen, soll jedoch im weiteren Verlauf der Untersuchungen mit in die Auswertalgorithmen einbezogen werden.

Geschwindigkeitsauswertung mit der Methode des optischen Flusses

In herkömmlichen Verfahren der Strömungsvisualisierung werden Partikel der zu vermessenden Strömung beigemischt und diese mittels optimierten Verfahren verfolgt (PTV) oder ihre Geschwindigkeit gemessen (PIV). Da es sich bei diesen Techniken um feste Teilchen handelt unterliegen sie keinen Diffusionseffekten sondern ändern ihre Abbildungseigenschaften im Strömungsverlauf nicht. Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben wurde, stellt dies einen grundlegenden Unterschied zu dem hier verwendeten MTV dar. Bei MTV unterliegen die markierten Fluidelemente molekularer Diffusion sowie Taylordiffusion. Die hier zu vermessenden Strömungen sind laminar, so dass das Strömungsprofil bekannt ist. Somit kann das Problem der Taylordiffusion auf die Messung des Strömungsmaximums in der Mitte der beiden Glasplatten reduziert werden. Die molekulare Diffusion hingegen sollte bei der Bewegungsschätzung mitberücksichtigt werden, da es ansonsten zu einem systematischen Fehler zu hohen Werten kommen kann. Die Größe dieses systematischen Fehlers hängt natürlich direkt mit der Stärke der molekularen Diffusion zusammen. Im Folgenden wird ein Verfahren der Geschwindigkeitsmessung skizziert, welches es erlaubt, die molekulare Diffusion im Schätzverfahren zu berücksichtigen. So ist es möglich neben einer genaueren Geschwindigkeitsmessung ohne systematischen Fehler auch die Diffusionskonstante der molekularen Diffusion zu messen. In diesem Beitrag wird nur das Prinzip des Algorithmus beschrieben. Weitere Details des Verfahrens sind in Garbe et al 2003a beschrieben.

Der optische Fluss ist als „Grauwertfluss“ in der Bildebene definiert, wie in Jähne 2002 beschrieben. Er spiegelt das meist dichte Verschiebungsvektorfeld wieder, welches aufgrund des Abbildungsprozesses von Szenenobjekten als Grauwerten in Bildfolgen sichtbar wird. Um aus Grauwertänderungen auf den optischen Fluss schließen zu können sind Annahmen

oder Modelle des Bewegungsprozesses notwendig. Die Problematik, aus Bildsequenzen Verschiebungsvektorfelder bestimmen zu können, sind seit nunmehr 20 Jahren Gegenstand der Forschung, so dass eine Vielzahl verschiedener Algorithmen entwickelt wurden (siehe Barron et al. 1994 sowie Haußecker und Spies 1999). Im Rahmen der in diesem Beitrag angestellten optischen Fluss Berechnungen wurde ein lokales gradientenbasiertes Verfahren verwendet (siehe Garbe et al. 2003b), welches auf einer Erweiterung des Strukturtenors basiert (siehe Haußecker et al. 1999. und Haußecker und Fleet 2001).

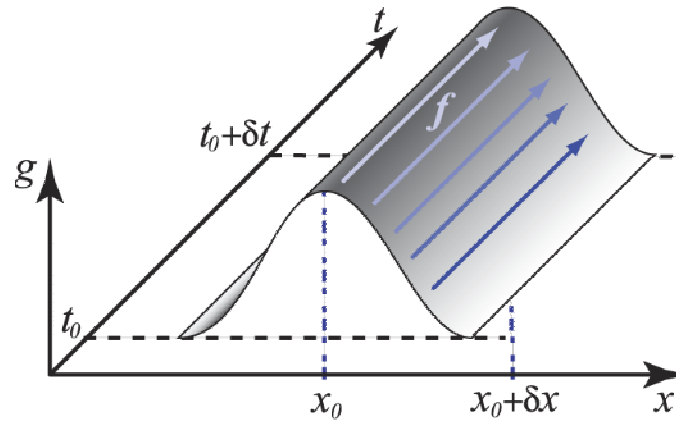


Abb. 5: Schematische Darstellung der Bewegungsbestimmungsgleichung unter Annahme des konstanten Grauwertes entlang einer Trajektorie.

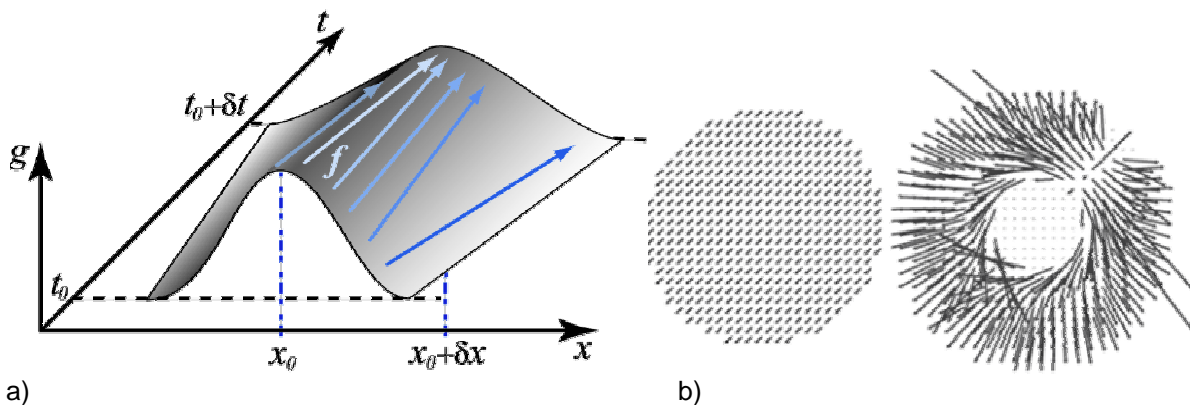


Abbildung 6: a) Schematische Darstellung der Bewegungsgleichung bei gleichzeitiger Diffusion der Grauwertstrukturen. b) Ergebnis einer optischen Flussberechnung einer sich bewegenden, diffundierenden Struktur. Wird der Diffusionsterm in der Bewegungsschätzung nicht mitberücksichtigt, so resultiert das zweite, falsche Vektorfeld.

Grundlegend für dieses Verfahren ist zunächst die Annahme, dass Grauwerte von Objekten entlang ihrer Trajektorie konstant bleiben. Diese Annahme wird anhand von Abbildung 5 verdeutlicht. Sie kann gemäß $g(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) = g(x, y, t)$ formuliert werden. Hier kennzeichnet g den Grauwert in der Bildsequenz. Entwickelt man diesen Ausdruck in einer Taylor-Reihe erster Ordnung, so erhält man den Ausdruck

$$g(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) = g(x, y, t) + \frac{\partial g}{\partial x} \frac{dx}{dt} \delta t + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{dy}{dt} \delta t + \frac{\partial g}{\partial t} \delta t + o(f^2).$$

Aus diesem ergibt sich nun sofort die Grauerterhaltungsgleichung (siehe auch Fennema und Thompson 1979):

$$\frac{dg(x, y, t)}{dt} = \frac{\partial g}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial g}{\partial t} = (\nabla g)^T f + \frac{\partial g}{\partial t} = 0.$$

Diese Gleichung enthält als Unbekannte die Geschwindigkeiten in die zwei Bewegungsrichtungen $f = (dx/dt, dy/dt)^T = (u, v)^T$. Da nur eine Bestimmungsgleichung zur Verfügung steht kann dieses Problem nicht eindeutig gelöst werden. Aus diesem Grund wird die Annahme gemacht, dass die Bewegung auf benachbarten Pixeln die gleiche ist. Somit kann eine Bewegungsgleichung pro Pixel in einer lokalen Nachbarschaft aufgestellt werden. Typische Größen für Nachbarschaften sind 5×5 – 11×11 Pixel, je nach Bildmaterial. Somit ist ein Überbestimmtes Gleichungssystem gegeben, welches mittels „Weighted Least Squares“ (siehe Lucas und Kanade 1981) oder „Weighted Total Least Squares“ gelöst werden kann (siehe auch van Huffel und Vandewalle 1991). Diese lokale Umgebung kann nun analog zu einer Faltung über die Bildsequenz geschoben werden, so dass bei gut konditionierten Daten für jedes Pixel die lokale Bewegung geschätzt werden kann.

Das hier beschriebene Verfahren beruht auf der Annahme, dass die Grauwerte der Objekte entlang ihrer Trajektorie konstant bleiben. Dies ist in der hier beschriebenen Anwendung offensichtlich nicht der Fall. Vielmehr unterliegen die Strukturen einem Diffusionsprozess. Dieses Verhalten wird in Abbildung 6 skizziert. Wie ebenfalls in dieser Abbildung zu sehen ist, muss ein solcher Diffusionsprozess für eine genaue Bewegungsschätzung mitberücksichtigt werden, da es sonst zu einem falschen Ergebnis kommt. Somit kann die Grauwertgleichung entsprechend um isotrope Diffusion oder anisotrope Diffusion erweitert werden (siehe Garbe et al. 2003a):

$$\frac{dg(x, y, t)}{dt} = \frac{\partial g}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial g}{\partial t} = (\nabla g)^T f + \frac{\partial g}{\partial t} = \nabla(\mathbf{D}\nabla)g = D\Delta g.$$

Auch diese Bestimmungsgleichung kann genau wie die einfache Bewegungsgleichung lokal durch ein überbestimmtes Gleichungssystem gelöst werden. Neben dem optischen Fluss f wird dabei gleichzeitig noch die Diffusionskonstante D im Falle der isotropen Diffusion gelöst, bzw. die Diffusionsmatrix \mathbf{D} wenn anisotrope Diffusion vorherrscht.

Verschiedene Algorithmen

Der nächste wichtige Schritt auf dem Weg zu Geschwindigkeitsdaten ist die Auswertung der Rohbilder mit entsprechenden Auswertelgorithmen. Dazu steht als erste Alternative die eben beschriebene Methode des optischen Flusses (OF) zur Verfügung. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung kommerziell verfügbarer PIV- oder PTV-Algorithmen. Die Flächendeckende Struktur aus Abbildung 2 legt die Verwendung eines korrelationsbasierten Algorithmus nahe. Daher werden in diesem Abschnitt die Geschwindigkeitsschätzungen der Methode des optischen Flusses mit PIV-Berechnungen gegenübergestellt. Dazu wurden dieselben Rohbilder für beide Algorithmen zugrunde gelegt. Verwendet wurde eine Punktmarkierung, die möglichst Flächendeckend sein sollte. Abbildung 2 zeigt eine Aufnahme dieser Serie. Die Vektorfelder zeigen jeweils denselben Zeitpunkt der Strömung.

Die Methode des optischen Flusses ist in der Lage, lückenlose und gleichmäßige Vektorfelder aus den Rohdaten zu erzeugen, ein Beispiel zeigt Abbildung 7. Der gezeigte Bildausschnitt entspricht demselben Bereich wie in Abbildung 2, die beiden Kanalwände verlaufen also waagrecht oberhalb und unterhalb des Ausschnitts bei $y=0\text{mm}$ und $y=8\text{mm}$. Die Vektoren verlaufen wie erwartet von links nach rechts und der Betrag der Geschwindigkeiten passt sehr gut zum berechneten Wert der mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $u=0,17\text{mm/s}$.

Auch die Verwendung des korrelationsbasierten PIV-Algorithmus erbrachte ein gutes Vektorfeld, wie Abbildung 8 zeigt. Die Beträge der Geschwindigkeiten liegen im selben Bereich und das Vektorfeld ist ebenfalls lückenlos. Um die beiden Vektorfelder genauer vergleichen zu können, wurden nun senkrechte Profile aus den Feldern herausgegriffen, die über einen Bereich in x-Richtung gemittelt wurden. Abbildung 9 zeigt diesen Vergleich. Auf der x-Achse ist die Position im Kanal senkrecht zur Strömungsrichtung aufgetragen, dabei befinden sich die Kanalwände wieder bei $x=0\text{mm}$ und $x=8\text{mm}$. Sinnvolle Daten lassen sich nur im Bereich der

Markierung gewinnen, daher sind die Profile nicht im gesamten x-Bereich aufgetragen. Eingetragen ist neben den Profilen, die sich aus den Vektorfeldern der Methode des optischen Flusses und dem PIV-Algorithmus ergeben, auch der Wert der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, der sich aus Durchfluss und Kanalgeometrie berechnet.

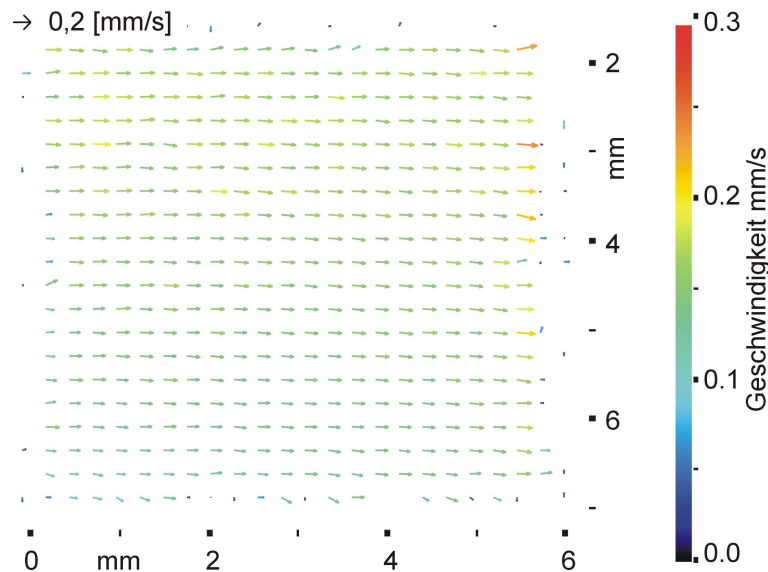


Abb. 7: Geschwindigkeitsvektorfeld geschätzt durch die Methode des optischen Flusses

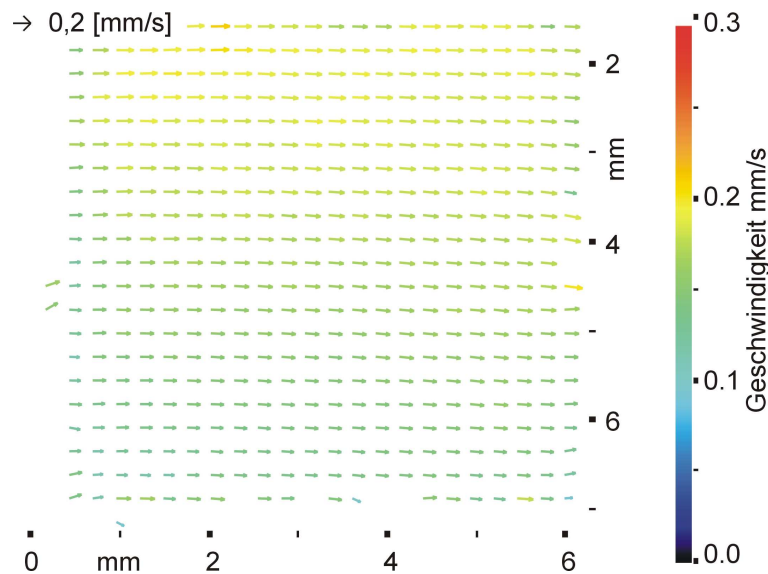


Abb. 8: Geschwindigkeitsvektorfeld geschätzt durch einen kommerziell verfügbaren PIV-Algorithmus

Zwischen beiden Varianten gibt es nur sehr geringe Abweichungen und die Beträge der Geschwindigkeiten passen sehr gut zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit, die sich aus dem bekannten Durchfluss und Kanalgeometrie berechnen lässt. Auffällig ist die nach unten (x gegen 8mm) tendenziell niedrigere Geschwindigkeit, die beide Auswerteverfahren zeigen. Diese Besonderheit ist korrekt wiedergegeben, da der Kanal im hinteren Bereich unten verschlossen ist. Damit muss die Strömungsgeschwindigkeit im oberen Kanalbereich tatsächlich schneller sein.

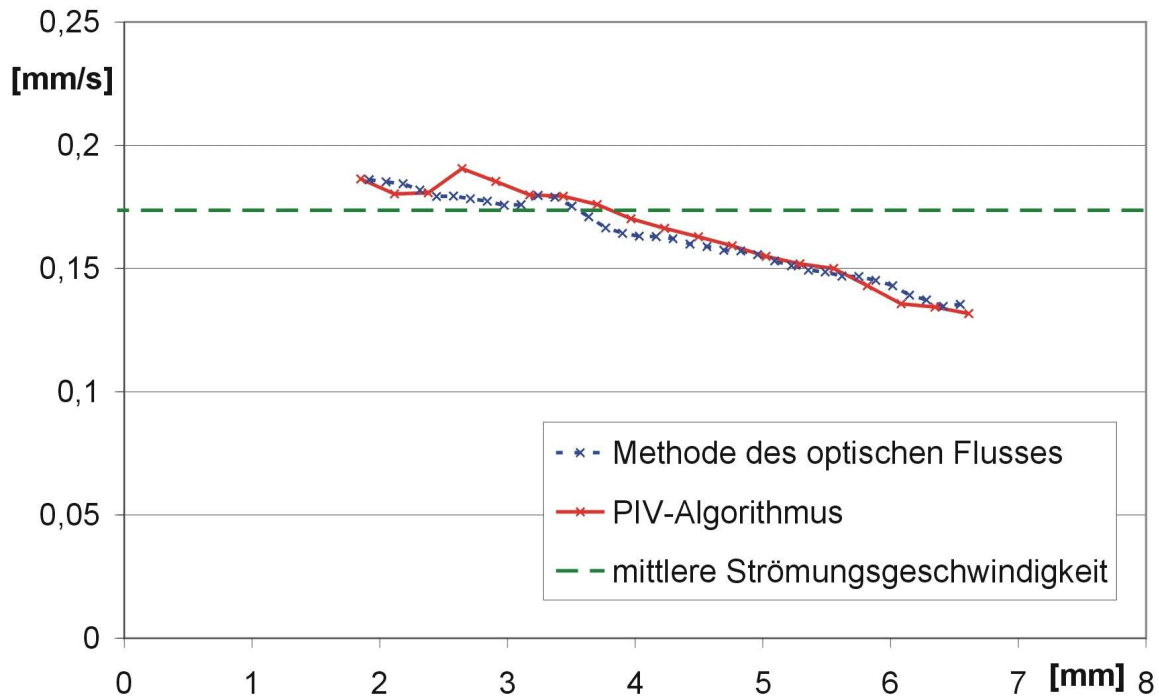


Abb. 9: Vergleich von Geschwindigkeitsprofilen senkrecht zur Strömungsrichtung

Diskussion und Ausblick

Das Verfahren der Molecular Tagging Velocimetry ist erfolgreich auf zwei Dimensionen erweitert worden. Die Rohbilder sind mit der Methode des optischen Flusses und einem herkömmlichen PIV-Algorithmus ausgewertet worden. Die Ergebnisse sind vielversprechend und bekannte Strömungsphänomene werden korrekt wiedergegeben. Zur Referenzierung ist die bekannte mittlere Strömungsgeschwindigkeit herangezogen worden. Die Beträge der geschätzten Geschwindigkeiten stimmen mit diesem Wert gut überein. Zusätzlich sollen im weiteren Verlauf des Projektes μ PIV-Messungen im Kanal die Genauigkeit der Ergebnisse einordnen helfen. Unter Strömungsbedingungen mit hoher Diffusion ist die Auswertung mit dem optischen Fluss notwendig, da PIV und PTV diese nicht berücksichtigen und damit systematische Fehler machen. Die Auswertung mit der Methode des optischen Flusses soll der Situation weiter angepasst und optimiert werden. Auch die Taylordispersion soll in der Auswertung berücksichtigt werden. Somit sollte es in naher Zukunft möglich sein, mit einer hohen Genauigkeit auch technisch relevantere Strömungen zu vermessen.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projektes im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes „Bildgebende Messverfahren zur Strömungsanalyse“ (SPP 1147).

Literatur

- Barron JL, Fleet DJ, Beauchemin S., 1994, Performance of Optical Flow Techniques, International Journal of Computer Vision 12[1], 43-77
 Burns JR, Ramshaw C, 2001, Lab on a Chip, 1 10
 Fennema C, Thompson W., 1979, Velocity determination in scenes containing several moving objects, Computer Graphics and Image Processing 9, 301-315

Garbe CS, Spies H, Jähne B., 2003a, Estimation of surface flow and net heat flux from infrared image sequences, *Journal of Mathematical Imaging and Vision* 19[3], 159-174

Garbe CS, Spies H, Jähne B., 2003b, Estimation of complex motion from thermographic Image Sequences, Cramer, K. E. and Maldague, X. P. *Proceedings of Spie.* 5073, 303-317.

Gee KR, Weinberg ES, Kozlowski DJ, 2001, Caged Q-Rhodamine Dextran: A new photoactivated Fluorescent Tracer, *Bioorganic&Medicinal Chemistry Letters* 11, 2181-2183

Gharib, M., Kremers, D., Koochesfahani, M. M., and Kemp, M. 2002 Leonardo's vision of flow visualization, *Exp. in Fluids*, 33, 219-223

Haußecker H, Spies H. *Motion*, 1999, In: Jähne B, Haußecker H, Geißler P (eds.), *Handbook of Computer Vision and Applications*, vol. 2. Academic Press

Haußecker H, Garbe C, Spies H, Jähne B., 1999, A Total Least Squares for Low-Level Analysis of Dynamic Scenes and Processes. *DAGM.* 240-249, Bonn, Germany, Springer

Haußecker H, Fleet DJ., 2001, Computing Optical Flow with Physical Models of Brightness Variation, *PAMI* 23[6], 661-673

Inaba S, Sato Y, Hishida K, Maeda M, 2001, "Flow Measurements in Microspace using Sub-Micron Fluorescent Particles – An Effect of Brownian Motion on Velocity Detection", *Proc. Fourth Int.*

Jähne B., 2002, *Digitale Bildverarbeitung*, 5. ed. Heidelberg, Germany: Springer

Horn BKP, Schunk B., 1981, Determining Optical Flow, *Artificial Intelligence* 17, 185-204

Koochesfahani, M., Cohn, R, and MacKinnon, C. 2000 Simultaneous whole-field measurements of velocity and concentration fields using combined MTV and LIF Meas. *Sci. Technol.*, 11, 1289- 1300

Koochesfahani, M. and Nocera, D. 2001 Molecular tagging velocimetry maps fluid flows, *Laser Focus World*, 37(6), 103-108.

Lucas B, Kanade T., 1981, An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, *DARPA Image Understanding Workshop.* 121-130

Symp. Particle Image Velocimetry, 1141

Nguyen NT, Wereley ST, 2002, *Fundamentals and Applications of Microfluidics*, Artech House Publishers, Boston, London

Sinton D, 2004, Microscale flow visualization, *Microfluid Nanofluid* 1 2-21

Van Huffel S, Vandewalle J., 1991, *The Total Least Squares Problem: Computational Aspects and Analysis*, Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics

Wang J, 2000, From DNA biosensors to gene chips, *Nucleic Acid Research* Vol 28 No 16 3011-3016