

HOCHAUFLÖSENDER LASER-DOPPLER-FELDSENSOR ZUR DREIKOMPONENTIGEN ORTSVERTEILTEN STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITSMESSUNG

Andreas Voigt, Christian Bayer, Katsuaki Shirai, Lars Büttner, Jürgen Czarske

Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Prüftechnik
Helmholtzstr. 18, D-01069 Dresden,
E-Mail: voigt@iee.et.tu-dresden.de, Internet: <http://eeemp1.et.tu-dresden.de/>

Schlagworte: Laser-Doppler-Anemometrie, Mikrofluidik, Laser-Doppler-Feldsensor

Kurzfassung

Zur bildgebenden Vermessung von kleinskaligen Strömungen werden üblicherweise kamerabasierte Systeme eingesetzt. Diese sind durch Beugungseffekte und Pixelauflösung limitiert. In dieser Arbeit wird ein neuartiger Sensor zur zweidimensionalen Messung von Strömungsfeldern vorgestellt. Der Laser-Doppler-Feldsensor beruht auf der Kombination von zwei Laser-Doppler-Profilsensoren, die auf der Verwendung von konvergierenden und divergierenden Interferenzstreifensystemen basieren. Der Feldsensor liefert ein Bild von der Strömung, ohne eine Kamera zu verwenden und umgeht somit das Problem der Pixelauflösung und Beugungseffekte. Die erreichte Standardabweichung der Ortsmessung beträgt $4\ \mu\text{m}$ (x-Richtung) bzw. $16\ \mu\text{m}$ (y-Richtung). Die relative Standardabweichung der Geschwindigkeit liegt bei 10^{-3} . Die systematischen Abweichungen liegen sowohl bei der Orts- als auch bei der Geschwindigkeitsmessung unterhalb der Standardabweichung. Als erster Anwendungsfall wird die Messung an einer Diesel-Einspritzdüse vorgestellt. Aufgrund seiner hohen Orts- und Geschwindigkeitsauflösung besitzt der Sensor ein großes Anwendungspotential für die Mikrofluidik.

Einleitung

Die Vermessung kleinskaliger Strömungsvorgänge stellt eine große Herausforderung an die Messtechnik dar. Strömungen auf kleinem Raum finden sich z. B. in mikrofluidischen Anwendungen (Biomedizintechnik, Lab-on-a-Chip) oder bei Einspritzdüsen. Ein weiteres neues Feld ist die In-vivo-Messung von Blutströmungen in Arterien und Arteriolen (Lindken et al. 2004, Vennemann et al. 2007), ein Gebiet, das unter anderem für die Arteriosklerose-Prävention relevant werden könnte. Bekannte Verfahren wie die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA), die Micro-Particle-Image-Velocimetry (μ -PIV) und die Doppler-Global-Velocimetry (DGV) haben bei der Messung von kleinskaligen Strömungen jeweils messsystemtypische Limitierungen. LDA (Albrecht et al. 2003) liefert eine sehr hohe Präzision bei der Geschwindigkeitsbestimmung, aber die durch die Größe des Messvolumens vorgegebene Ortsauflösung von etwa $50\ \mu\text{m}$ ist bei Weitem unzureichend. Außerdem ist die Messung quasi punktförmig, d.h. um ein Bild der Strömung zu erhalten muss der Sensor mechanisch traversiert werden. μ -PIV ist ein Lichtschnitt-basiertes Verfahren, bei dem die Geschwindigkeitskomponenten in der Schnittebene gemessen werden (Santiago et al. 1998). Die Tiefenauflösung ist durch die Tiefenschärfe und Teilchengröße vorgegeben und somit relativ ungenau definiert. Sie liegt typischerweise im Bereich von einigen $10\ \mu\text{m}$. Da μ -PIV eine Kamera zur Abbildung verwendet, treten Limitierungen durch Pixelauflösung und

1.2

Beugung (Abbe-Limit) auf (Meinhart et al. 1999). Ein weiterer Nachteil von μ -PIV ist die Beobachtung der Strömung durch ein Mikroskopobjektiv, das extrem kurze Arbeitsabstände erfordert. DGV (Eggert et al. 2006, Fischer et al. 2006) ist ein Lichtschnitt-basiertes Verfahren, bei dem die Dopplerverschiebung des am Streuteilchen gestreuten Lichts mittels Transmission durch eine Absorptionszelle bestimmt wird. DGV unterliegt bei der Tiefenauflösung ähnlichen Beschränkungen wie μ -PIV. Es wurden bisher Geschwindigkeitsauflösungen bis 2 cm/s demonstriert (Fischer et al. 2006). Als abbildendes Verfahren unterliegt auch DGV den Limitierungen der Beugung und der Pixelauflösung. Ferner ist für die Messung eine extrem hohe Dichte an Streuteilchen notwendig. Der in dieser Arbeit vorgestellte Laser-Doppler-Feldsensor umgeht diese Beschränkungen, da er, aufbauend auf dem LDA-Prinzip, ein Bild von der Strömung gewinnt, ohne eine Kamera zu verwenden. Dadurch wird eine hohe Präzision in der Orts- und Geschwindigkeitsmessung erreicht und gleichzeitig ein großer Arbeitsabstand ermöglicht.

Der Laser-Doppler-Profilsensor

Da über den Aufbau des Laser-Doppler-Profilsensors bereits mehrfach (z. B. in Czarske et al. 2002) berichtet wurde, wird hier nur kurz auf das Grundprinzip eingegangen. Im Gegensatz zum herkömmlichen LDA verwendet der Profilsensor zwei überlagerte unterscheidbare Strahlenpaare. Die Strahltaillen sind dabei so positioniert, dass sich ein Interferenzstreifensystem mit konvergierenden Streifen und eines mit divergierenden Streifen ergibt. Ein Streuteilchen, das durch das Messvolumen tritt, sendet somit zwei Burstsignale der Frequenz f_1 und f_2 aus. Aus diesen gemessenen Frequenzen kann die axiale Position z und die laterale Geschwindigkeitskomponente v_x des Teilchens bestimmt werden. Der Profilsensor ermöglicht also eine Ortsauflösung im Messvolumen. Es wurden bereits Ortsauflösungen bis zu $0,6 \mu\text{m}$ und relative Geschwindigkeitsauflösungen bis $1 \cdot 10^{-4}$ demonstriert. Ein Beispielaufbau zur technischen Realisierung des Profilsensors mittels Wellenlängenmultiplexing ist in Abbildung 1 gegeben.

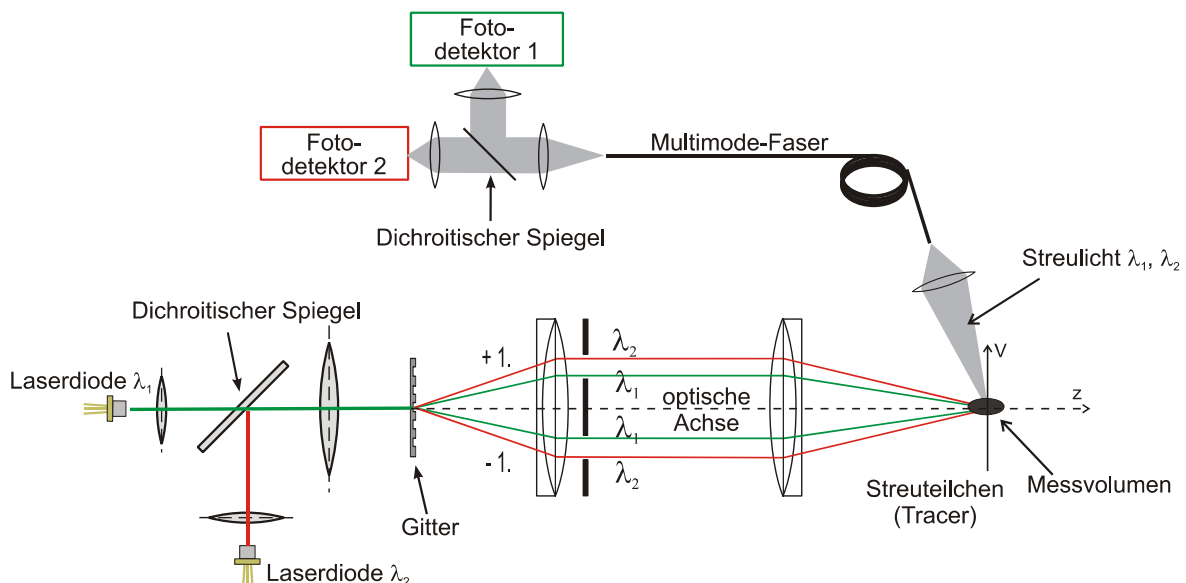


Abbildung 1: Optischer Aufbau des Profilsensors mit Wellenlängenmultiplexing

Messung einer Mikrokanalströmung mit dem Laser-Doppler-Profilsensor

Zur Bestimmung der Ortsauflösung des Profilsensors für eine reale Strömungsmessung wurde eine gerade Mikrokanalströmung der Querschnittsfläche $100\ \mu\text{m} \times 2000\ \mu\text{m}$ entlang der kurzen Seite vermessen. Aufgrund des Breitenverhältnisses von 1:20 kann die Strömung dabei als zweidimensional angesehen werden. Das strömende Fluid war Wasser, welches mit Polystyrolpartikeln von $2\ \mu\text{m}$ Durchmesser versetzt war, die als Streuteilchen fungierten. Die Länge des Messvolumens des Profilsensors war mit $500\ \mu\text{m}$ größer als die Breite des Mikrokanals. Daher konnte die Messung ohne Traversierung erfolgen. Als treibende Kraft der Strömung wirkte der hydrostatische Druck. Dieser wurde durch zwei Reservoirs großer Querschnittsfläche erzeugt, deren Höhendifferenz $378\ \text{mm}$ betrug. Die Reynoldszahl der Strömung lag in der Größenordnung von $Re = vD/\nu \approx 10^0$ (v : Strömungsgeschwindigkeit, D : Durchmesser, $\nu=10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$: kinematische Viskosität von Wasser). In Abb. 2 ist das Messergebnis graphisch dargestellt. Die Einzelpunkte stellen jeweils die gemessene Geschwindigkeit v und die Position z eines einzelnen Streuteilchens dar. Es wurde über eine Slotbreite von $7\ \mu\text{m}$ gemittelt. Mit Hilfe der gemittelten Werte wurde, dem theoretisch erwarteten Profil gemäß, ein Parabelfit vorgenommen. Die Parabel zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Die untere Öffnung der Fit-Parabel beträgt $100,7\ \mu\text{m}$, entsprechend der Fertigungsbreite des Mikrokanals von $100\ \mu\text{m}$. Die Messunsicherheit des Ortes wurde ermittelt, indem der Bereich bestimmt wurde, innerhalb dessen die Fit-Parabel verschoben werden konnte. Der so ermittelte Wert lag mit $3,5\ \mu\text{m}$ nur knapp oberhalb der Streuteilchengröße, d. h. dass der Partikeldurchmesser die Ortsauflösung zum Teil mitbestimmt. Der statistische Fehler der Geschwindigkeit lag bei $0,45\ \%$. Hierbei sollte aber erwähnt sein, dass diese gemessenen Fehler nicht in erster Linie vom Messsystem stammen. Vielmehr lag eine residuale Änderung des hydrostatischen Drucks während der Messdauer (60 Minuten) vor, die einer Änderung der maximalen Strömungsgeschwindigkeit von ca. $0,2\ \text{mm/s}$ entsprach (relative Änderung ca. $0,43\ \%$, entspricht einer Änderung der Füllstandshöhe von $1,6\ \text{mm}$). Insgesamt zeigt die Messung deutlich die Nützlichkeit des Profilsensors für die Mikrofluidik, z. B. um den Durchfluss zu bestimmen. In dieser realen Strömung zeigt sich die hohe Ortsauflösung des Profilsensors von $3,5\ \mu\text{m}$.

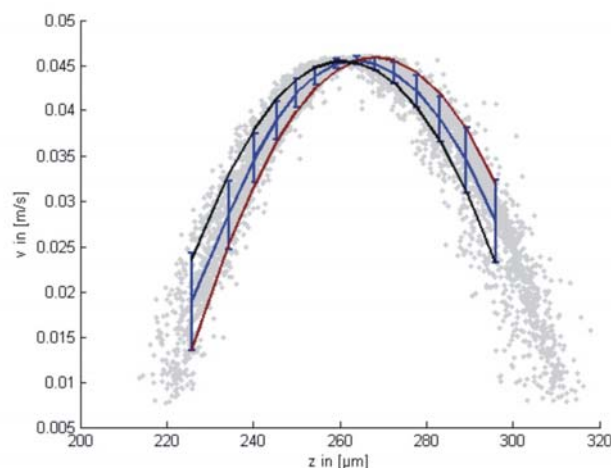


Abbildung 2: Gemessenes Geschwindigkeitsprofil der Mikrokanalströmung (graue Punkte: Rohdatenpunkte). Dargestellt sind die beiden Parabel-Fits, deren Abstand in z -Richtung die Ortsauflösung vorgibt.

Aufbau des Laser-Doppler-Feldsensors

Der Laser-Doppler-Feldsensor entsteht durch die Kombination zweier Profilsensoren (siehe Abb. 3), wobei die optischen Achsen orthogonal überlagert werden. Der Überlagerungsbereich der Messvolumina der einzelnen Sensoren ist dann das Messvolumen des Feldsensors. Profilsensor 1 misst die x -Koordinate und die v_z -Komponente des Streuteilchens, das durch das Messvolumen tritt. Der zweite Profilsensor dient zur Messung von y und v_z . Bei Messung einer Vielzahl von Streuteilchen erhält man somit das Bild $v_z(x,y)$ des Strömungsfeldes im Messvolumen. Das vom Streuteilchen ausgesendete Licht kann über eine einzelne oder mehrere Detektionseinheiten aufgefangen werden. Ein Foto des Feldsensoraufbaus ist in Abb. 4 zu sehen. Zur Trennbarkeit der vier Kanäle (Streifensysteme) wurde eine Kombination aus Wellenlängenmultiplexing (WDM) und Frequenzmultiplexing (FDM) gewählt. Profilsensor 1 verwendet Wellenlängenmultiplexing. Das divergierende Streifensystem wird durch das Licht einer roten Laserdiode bei 658 nm erzeugt, wobei die Leistung im Messvolumen 42 mW beträgt. Das konvergierende Streifensystem stammt von einer infraroten Laserdiode bei 785 nm mit einer Leistung von 25 mW im Messvolumen. Die Strahltaillendurchmesser betragen 40 μm (rot) und 60 μm (infrarot). In Abb. 5a ist der Verlauf des Streifenabstandes in Abhängigkeit von der Position auf der optischen Achse x dargestellt. Der mittlere Streifenabstand beträgt dabei etwa 2,9 μm . Die Steigung der Kalibrierkurve $q(x) = d_{\text{infrarot}}(x) / d_{\text{rot}}(x)$ ist ein Maß für das Auflösungsvermögen des Sensors und beträgt etwa 0,6/mm. Die gesamte Länge des Messvolumens in x -Richtung ist 250 μm . Der Arbeitsabstand des WDM-Sensors vom Messvolumen beträgt 5 cm.

Der zweite Profilsensor ist als Frequenzmultiplexingsystem realisiert. Das grüne Licht ($\lambda = 532 \text{ nm}$) stammt von einem diodengepumpten Nd:YAG-Laser, wobei die Leistung im Messvolumen 40 mW beträgt. Da der genaue Aufbau des Sensors in T. Pfister et al. 2005 beschrieben ist, folgt hier nur eine Kurzbeschreibung des Systems. Der Sensor hat vier Sendestrahlen, deren Frequenzen durch einen separaten optischen Aufbau mit drei akustooptischen Modulatoren von der ursprünglichen Laserfrequenz f_0 auf die Frequenzen $f_1=f_0$, $f_2=f_0 + 80 \text{ MHz}$, $f_3=f_0+120 \text{ MHz}$ und $f_4=f_0+60 \text{ MHz}$ verschoben wurden. Ein Streifensystem des Profilsensors wird durch die Kombination der Strahlen 1 und 3, das andere durch Kombination von Strahl 2 & 4 gebildet. Das Streulichtsignal wird durch einen einzelnen Lawinen-Photodioden-Detektor mit einer Bandbreite von 250 MHz aufgenommen. Dieses Signal enthält, den beiden Streifensystemen entsprechend, zwei verwertbare Burstsignale, eines mit einer Trägerfrequenz von 120 MHz, das andere mit einer Trägerfrequenz von 20 MHz. Durch eine elektronische Mischer-Schaltung werden diese Signale getrennt, so dass man 2 Ausgangssignale im Basisband erhält.

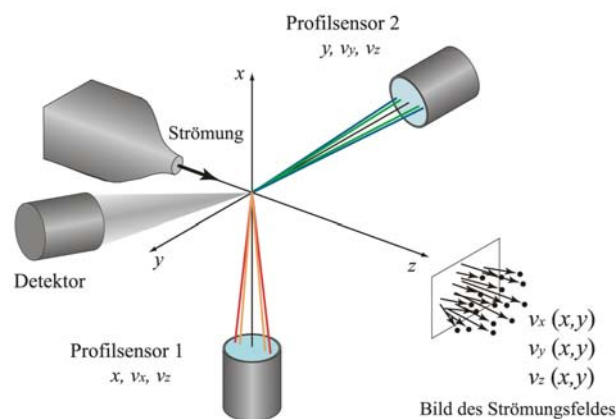


Abbildung 3: Aufbau des Laser-Doppler-Feldsensors

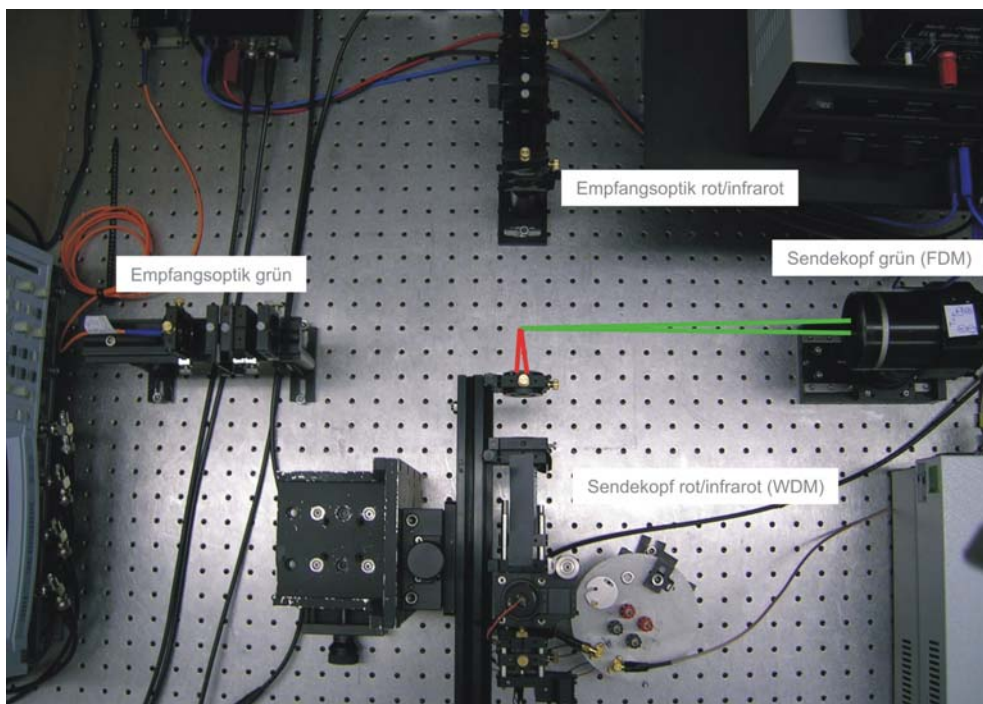


Abbildung 4: Foto des Feldsensoraufbaus. In diesem Fall sind die Detektoren jeweils zum Empfang des vorwärts gestreuten Lichts aufgebaut. Die roten und zwei grüne Laserstrahlen sind symbolisch skizziert.

Der Strahltaillendurchmesser beim grünen System beträgt ca. $80 \mu\text{m}$. In Abb. 5b ist der Verlauf der Streifenabstandsfunktionen in Abhängigkeit der Position y entlang der optischen Achse des Sensors dargestellt. Der mittlere Streifendurchmesser beträgt etwa $4,5 \mu\text{m}$. Die Kalibrierfunktion hat eine Steigung von $0,13/\text{mm}$ und die Länge des Messvolumens beträgt $750 \mu\text{m}$. Der FDM-Sensor hat einen Arbeitsabstand von 31 cm vom Messvolumen.

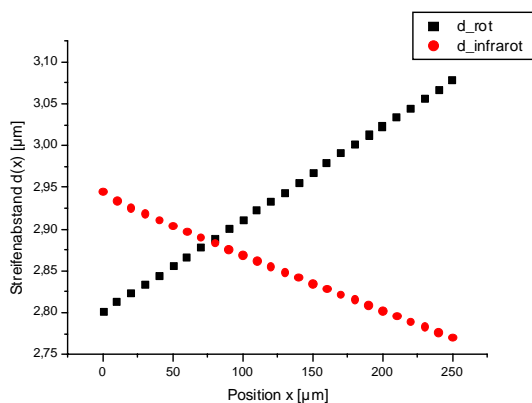


Abbildung 5a: Streifenabstände des roten und infraroten Streifensystems

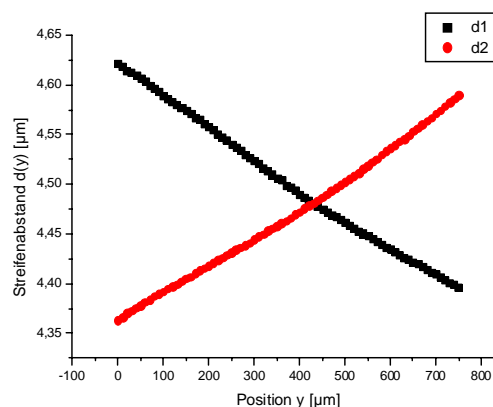


Abbildung 5b: Streifenabstandsfunktionen der grünen Streifensysteme

1.6

Signalauswertung beim Feldsensor

Bei der Signalauswertung des Feldsensors muß für vier Kanäle die Frequenz des jeweiligen Burstsignals ermittelt werden. Zunächst erfolgt eine zeitliche Koinzidenzprüfung der vier Bursts, die die tatsächliche Zugehörigkeit der Bursts zum selben Streuteilchen gewährleistet. Bei der anschließenden Frequenzanalyse werden die Signale zunächst mittels FFT in den Frequenzbereich transformiert. Da die Peaks bandbreitenbegrenzt sind, durchlaufen die Signale dann zur Verbesserung des SNR einen adaptiven Bandpassfilter. Das hier erhaltene SNR kann zur Beurteilung der Signalqualität verwendet werden, die auch als ein Validierungsfaktor eingeht. Durch Rücktransformation des halbseitigen und bandpassgefilterten Signals in den Zeitbereich erhält man das zum Burst gehörige komplexe analytische Signal. Nach der Quadraturdemodulationstechnik (Müller et al. 1997) lassen sich daraus die zeitabhängige Momentanamplitude und –frequenz bestimmen. Der für den Burst charakteristische Parameter (Mittenfrequenz) ergibt sich dann aus den zeitabhängigen Größen durch eine zeitliche Mittelung, wobei die Momentanamplituden als Wichtungsfunktionen verwendet werden. In Abb. 6 sind gemessene Burstsignale dargestellt, die zu einem Streuteilchen gehören.

Charakterisierung des Feldsensors

Zur Charakterisierung des Feldsensors wurde als Streuobjekt eine Lochblende mit einem Durchmesser von 10 μm verwendet, die an einer rotierenden Scheibe befestigt war. Die Scheibe wurde so positioniert, dass die Durchtrittsrichtung der Lochblende durch das Messvolumen des Feldsensors in z-Richtung erfolgt. Der Winkel der Scheibenebene zu den Sendestrahlen der Sensoren betrug jeweils 45°. Die Scheibe war an einem Chopperblatt befestigt, so dass der Treiber des Choppers als Regelungselektronik für den frequenzstabilen Umlauf der Scheibe diente. Die gewählte Umlauffrequenz betrug 20 Hz, entsprechend einer Geschwindigkeit der Lochblende von 3,14159 m/s. Das durch die Lochblende gestreute Licht wurde hier mit einem einzelnen Detektionslinsenaufbau aufgefangen und anschließend über dichroitische Spiegel und Filter in die drei verwendeten Wellenlängen separiert. Zur Einstellung der x- und y-Position des Durchtrittspunktes durch das Messvolumen dienten zwei orthogonal aufeinander aufgebrachte motorisierte Positioniertische mit einer Positionsauflösung von 100 nm. Somit konnte das Messvolumen mit konstanter v_z -Geschwindigkeit in der x-y-Ebene abgescannt werden. Pro vorgegebener x-y-Position wurden 50 Messungen für x, y, und v_z vorgenommen. Die Mittelwerte wurden mit den vorgegebenen Werten verglichen (siehe Tabelle 1). Im Vergleich mit den statistischen Messfehlern (Tabelle 2) zeigte sich, dass die statistischen Fehler gegenüber den systematischen dominieren. Bei den statistischen Fehlern lässt sich erkennen, dass die Ortsauflösung des WDM-Systems die des FDM-Systems um einen Faktor 4 übertrifft. Dies entspricht erwartungsgemäß etwa dem Verhältnis der Steigungen der jeweiligen Kalibrierkurven. Der gesamte Messfehler des WDM-Systems liegt unterhalb der Größe des Streuobjekts, während der Messfehler der FDM-Systems leicht oberhalb der Streuobjektgröße liegt. Der gesamte nutzbare Messbereich des Feldsensors beträgt ca. 40 μm x 120 μm .

Messung mit dem Feldsensor an einer Diesel-Einspritzdüse

Die erste komplexe Strömung, die mit dem Laser-Doppler-Feldsensor untersucht wurde, war die einer Diesel-Einspritzdüse der DSLA Serie von Bosch (siehe Abb. 7a). Der Öffnungsdurchmesser der Düse betrug 260 μm . Als Streuteilchen wurden Glycerinpartikel (polydispers) mit Durchmessern von einigen μm verwendet. Das Messfeld befand sich in

einer Entfernung von 2 mm von der Düsenöffnung. Als Validierungsschwelle wurde das Mindest-SNR auf 0 gesetzt. Typische SNR-Werte für den FDM-Sensor lagen bei ca. 5, für den WDM-Sensor bei ca. 15. Die erreichte Datenrate lag bei ca. 20 Hz. Abb. 7b zeigt die Ergebnisse der Messung. Hierbei wurde eine gleitende Mittelwertbildung über die Messpunkte in einem Quadrat der Breite $12,5 \mu\text{m} \times 12,5 \mu\text{m}$ gebildet. Man sieht deutlich das gewölbte Strömungsprofil mit einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von etwa 25 m/s.

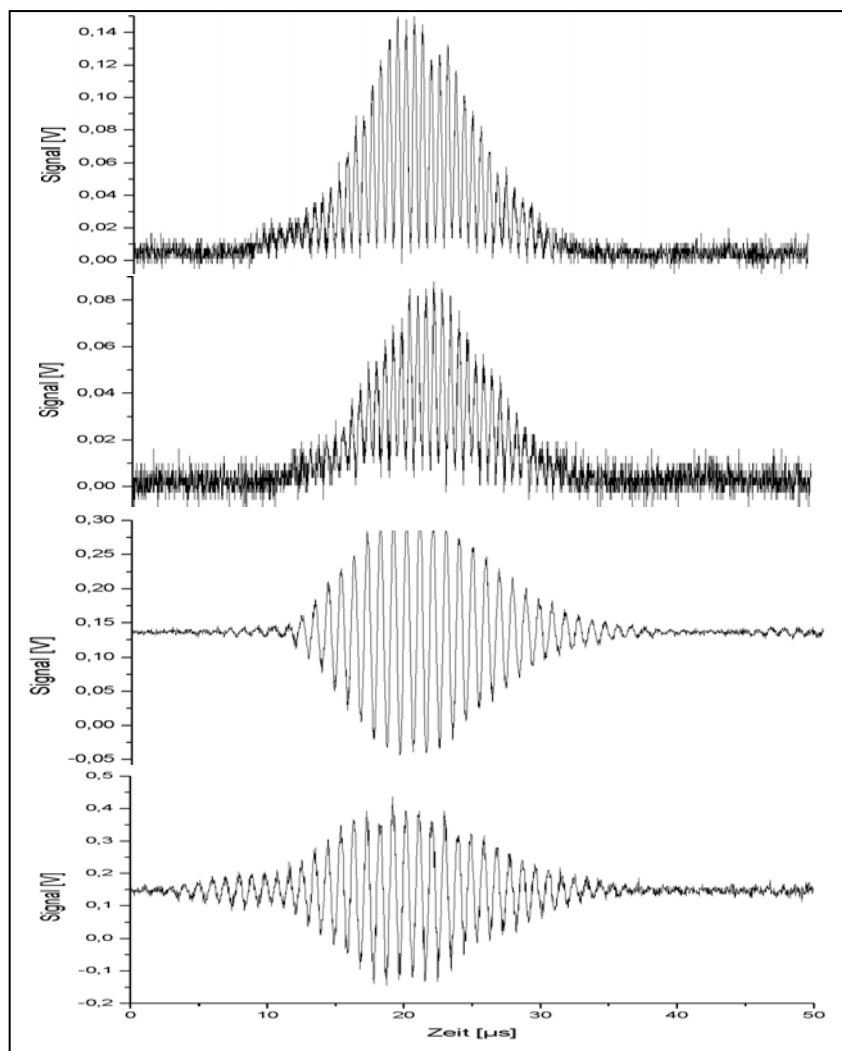


Abbildung 6: Burstsignale, die zu einem Streuteilchen gehören. Die Burstsignale gehören der Reihe nach zu folgenden Streifensystemen: 1. rot, 2. infrarot, 3. grün (Träger: 20 MHz), 4. grün (Träger: 120 MHz)

Tabelle 1: Ermittelte systematische Fehler bei der Testmessung mit dem Kalibrier Aufbau

	Δx	Δy	Δv_z
Mittelwert	2,7 μm	5,8 μm	$0,45 \cdot 10^{-3}$
Maximum	7,3 μm	16,4 μm	$1,9 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 2: Ermittelte Standardabweichungen bei der Testmessung mit dem Kalibrier Aufbau

	σ_x	σ_y	σ_{v_z}
Mittelwert	4,1 μm	15,9 μm	$0,9 \cdot 10^{-3}$
Maximum	11,5 μm	22,3 μm	$1,4 \cdot 10^{-3}$

1.8

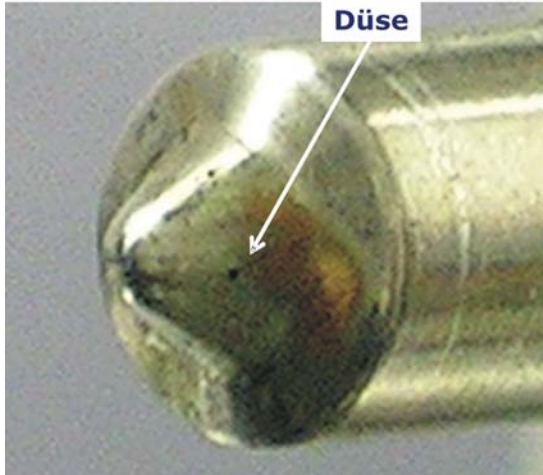


Abbildung 7a: Diesel-Einspritzdüse der DSLA-Serie von Bosch. Der Düsendurchmesser beträgt 260 μm

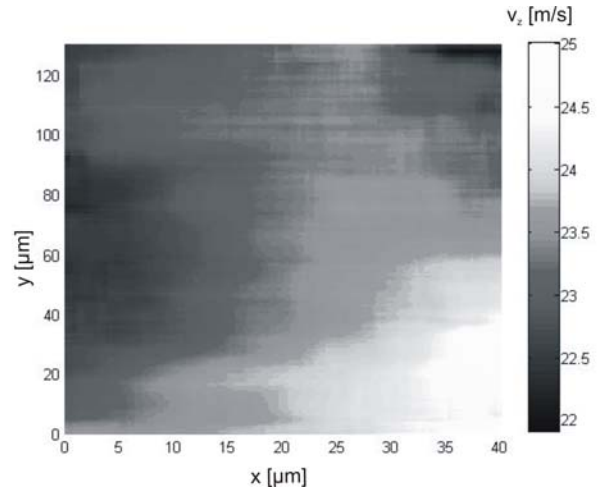


Abbildung 7b: Messung der Strömung der Diesel-Einspritzdüse. Die Mitte der Einspritzdüse befindet sich in der rechten unteren Ecke.

Ausblick

Der Profilsensor kann erweitert werden, indem neben der Mittenfrequenz des Burst-Signals auch die zeitliche Änderung der Frequenz (Frequenz-Chirp) ausgewertet wird. Damit kann die Geschwindigkeitskomponente des Streuteilchens entlang der optischen Achse bestimmt werden (L. Büttner, J. Czarske 2006). Es wurde eine relative statistische Unsicherheit von 3 % erreicht, was einer statistischen Winkelunsicherheit von $\alpha = 0.7^\circ$ entspricht. Diese Auswertung soll in den Feldsensor integriert werden, so dass neben der v_z -Komponente auch die v_x - und v_y -Komponenten gemessen werden. Damit wäre, wie in Tabelle 3 dargestellt, eine vollständige zweidimensionale und dreikomponentige Erfassung des Geschwindigkeitsfeldes möglich.

Tabelle 3: Messung der Strömungsfeldes mit dem Feldsensor unter Verwendung der Chirp-Auswertung des Burst-Signals

	Profilsensor 1	Profilsensor 2
Richtung der optischen Achse	x	y
Laterale Geschwindigkeitskomponente	v_z	v_z
Axiale Geschwindigkeitskomponente	v_x	v_y
Ortskoordinate	y	x

Zusammenfassung

Es wurde ein Laser-Doppler-Feldsensor zur hochpräzisen zweidimensionalen Vermessung von Strömungsfeldern vorgestellt. Der Feldsensor beruht auf der Kombination von zwei Laser-Doppler-Profilsensoren, deren Messvolumina orthogonal überlagert werden. Jeder Profilsensor besteht dabei aus einem konvergierenden und einem divergierenden Streifensystem. Die Trennung der insgesamt vier Streifensysteme des Feldsensors erfolgt durch eine Kombination aus Wellenlängen- und Frequenzmultiplexing. Die Signalverarbeitung beruht auf einer erweiterten Quadraturdemodulationstechnik. Zur Charakterisierung des Feldsensors wurde eine rotierende Lochblende (Durchmesser 10 μm) eingesetzt. Die erreichten Ortsauflösungen betragen 4 μm (x-Richtung) und 16 μm (y-

Richtung), wobei sich die Ortsauflösung in y-Richtung durch Verwendung eines Sensors mit steilerer Kalibrierkurve weiter erhöhen lässt. Die erreichte relative Geschwindigkeitsauflösung beträgt ca. 10^{-3} . Als erste Messung an einer realen Strömung wurde eine Diesel-Einspritzdüse untersucht. Die Untersuchungen mit der rotierenden Lochblende und die Messung an der Diesel-Einspritzdüse demonstrieren die Eignung des Feldsensors für Strömungsmessungen mit hoher Geschwindigkeits- und Ortsauflösung. Die erfolgreiche Messung der Mikrokanalströmung mit dem Profilsensor lässt schließen, dass auch der Feldsensor ein hohes Potential für den Einsatz in der Mikro- und Nanofluidik besitzt.

Dankesworte

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr. Petrak von der TU Chemnitz für die Bereitstellung des Mikrokanals. Weiterhin danken wir Herrn Sascha Becker für seine Hilfe bei der Programmierung der Ansteuerungen des Kalibriertools. Besonderer Dank gilt der DFG für die stete Förderung der Arbeiten im Projekt Cz55/18-1.

Literatur

Albrecht, H., Borys, M., Damaschke, N., Tropea, C.: "Laser-Doppler and phase-Doppler measurement techniques", Heidelberg: Springer, 2003

Büttner, L., Czarske, J.: "Determination of the axial velocity component by a laser-Doppler velocity profile sensor", *J. Opt. Soc. Am. A* **23**(2): 444-454 (2006)

Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., Müller, H.: "Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution", *Meas. Sci. Techn.* **13**(12): 1979–1989 (2002)

Eggert, M., Müller, H., Dopheide, D., Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J.: "DGV mit Selbstkalibrierung auf Basis neuer Modulationstechniken", *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik – 14. Fachtagung 2006*, Beitrag 27.1 – 27.8, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie (2006)

Fischer, A., Shirai, K., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H.: "Untersuchung zur Messunsicherheit eines 2d3k-Doppler-Global-Velozimeters mit Laserfrequenzmodulation", *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik – 14. Fachtagung 2006*, Beitrag 28.1 – 28.9, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie (2006)

Lindken, R., Vennemann, P., Kiger, K.T., Hierck, B.P., Ursem, N.T.C., Stekelenburg-de Vos, S., ten Hagen, T.L.M., Poelman, R.E., Westerweel, J.: "In-vivo Micro Particle Image Velocimetry (μ -PIV) Messungen in dem Herzen eines Hühnerembryos", *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 12. Fachtagung 2004*, Beitrag 40.1 - 40.7, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie. (2004)

Meinhart, C.D., Wereley, S.T., Santiago, J.G.: "PIV measurement of a microchannel flow", *Exp. Fluids* **27**(5): 414-419 (1999)

Müller, H., Strunck, V., Dopheide, D.: "The application of quadrature demodulation techniques for the investigation of flows", *Flow. Meas. Instrum.* **7**(3/4): 237-245 (1997)

Pfister, T., Büttner, L., Shirai, K., Czarske, J.: "Monochromatic heterodyne fiber-optic profile sensor for spatially resolved velocity measurements with frequency division multiplexing", *Applied Optics* **44**(13): 2501-2510 (2005)

Santiago, J.G., Wereley, S.T., Meinhart, C., Beebe, B.J., Adrian, R.J.: "A PIV system for microfluidics", *Exp. Fluids* **25**(4): 316-319 (1998)

Vennemann, P., Lindken, R., Westerweel, J.: "In vivo whole-field velocity measurement techniques", *Review-Artikel, Exp. Fluids* **42**(4): 495-511 (2007)

