Gleichzeitige Temperatur- und Geschwindigkeitsprofilmessung mit Mikrometerauflösung

Simultaneous temperature and velocity profile measurements with micrometre resolution

F. Bürkle*1, L. Büttner1, M. Dues2, J. Czarske1 ¹ Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik Helmholtzstraße 18, 01062 Dresden, *E-Mail: <u>florian.buerkle@tu-dresden.de</u>

² ILA R&D GmbH, Rudolf-Schulten-Str. 3, 52428 Jülich

Laser-Doppler-Profilsensor, Fluoreszenz, Temperaturmessung Laser Doppler profile sensor, fluorescence, temperature measurement

Zusammenfassung

In verschiedenen strömungsmechanischen Anwendungen ist die gleichzeitige Erfassung der Temperatur und der Geschwindigkeit für ein umfassendes Verständnis der vorliegenden Prozesse nötig. Insbesondere in mikrofluidischen Strömungen, beispielsweise Brennstoffzellen oder Mikrowärmetauscher, ermöglicht die Kenntnis der Temperatur die Effizienz zu steigern. Es existieren schon Messtechniken, welche die gleichzeitige Messung der Geschwindigkeit und der Temperatur ermöglichen. Für Messungen mit großen Arbeitsabstand im Bereich einiger zehn Zentimeter existiert jedoch keine Messtechnik, die eine hohe Orts- und Temperaturauflösung ermöglicht.

Der Laser-Doppler-Profilsensor ist geeignet, um bei großen Arbeitsabstand eine Ortsauflösung im Mikrometerbereich mit einer relativen Geschwindigkeitsunsicherheit von weniger als 0,1 % zu erreichen. Erstmalig wird durch Kombination mit fluoreszenten Partikeln, deren Fluoreszenzintensität sich abhängig von der Temperatur ändert, die Temperatur mit gleicher Ortsauflösung gemessen. Die erreichte Temperaturunsicherheit bewegt sich im Bereich von weniger als 1 °C.

Einleitung

Die gleichzeitige Erfassung der Temperatur und der Geschwindigkeit von Strömungen ermöglicht einen erweiterten Einblick in verschiedene temperaturabhängige Strömungen. Als Beispiel seien hier Brennstoffzellen genannt, deren Wirkungsgrad von der Reaktionstemperatur abhängt (Faghri und Guo 2005). Wenn die Temperatur kontrolliert werden kann, ist es möglich sie auf einen für maximale Effizienz geeigneten Wert einzustellen. Ein weiteres interessantes Beispiel sind Mikrowärmetauscher, da die stetige Entwicklung mikroelektrischer Komponenten eine erhöhte Leistungsdichte zur Folge hat (Tullius et al. 2011). Dies erfordert ein Verständnis der komplexen Vorgänge für eine optimale Kühlung der integrierten Schaltkreise.

Einfache Strukturen wie rechteckige Kanäle mit laminarer Strömung lassen sich simulieren, komplexere Strukturen mit turbulenter Strömung und Multi-Physik-Phänomenen sind jedoch schwer zu berechnen. Diese Prozesse lassen sich nur mit geeigneter Messtechnik erfassen.

Zwei etablierte Methoden für die Erfassung von Strömungsgeschwindigkeiten sind kamerabasierte Techniken (Particle Image/Tracking Velocimetry, PIV/PTV, siehe Raffel et al. 2018, Gürtler et al. 2021, Gao et al. 2021) und die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA, siehe Albrecht et al. 2003). Temperaturfelder lassen sich beispielsweise mittels laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) messen. Die Kombination von PIV und LIF ist schon länger bekannt und erlaubt die Messung von Geschwindigkeits- und Temperaturfeldern (bspw. Funatani et al.2004). Für mikroskalige Strukturen ist PIV aufgrund der geringen Ortsauflösung jedoch nicht geeignet. Eine wesentlich bessere Ortsauflösung lässt sich mit Mikro-PTV erreichen, als Beispiel sei hier Astigmatismus-PTV (A-PTV) genannt. Es erlaubt die Bestimmung des Orts im Mikrometerbereich bei einer Geschwindigkeitsunsicherheit von etwa 2 %. Die gleichzeitige Bestimmung der Temperatur wird mit der Auswertung der temperaturabhängigen Lebensdauer fluoreszenter Partikel durchgeführt (Massing et al. 2018). Ein Nachteil hierbei ist jedoch, dass der Arbeitsabstand auf wenige Zentimeter beschränkt ist. Niedrigere Geschwindigkeitsunsicherheiten bei gleichzeitig höherem Arbeitsabstand lassen sich mit LDA erreichen. Eine Temperaturbestimmung erfolgt hier beispielsweise über die temperaturabhängige Verschiebung des Fluoreszenzspektrums fluoreszenter Partikel (Ojo et al. 2015). Die Ortsauflösung konventioneller LDA-Sensoren liegt jedoch im Bereich von einem Millimeter und eignet sich somit auch nicht für mikroskalige Strömungen. Weiterhin benötigen beide genannte Methoden eine UV-Lichtquelle, was in manchen Anwendungen unerwünscht ist.

Die Einschränkungen beider Methoden lassen sich mit der Einführung des Laser-Doppler-Profilsensors überwinden. Basierend auf konventionellen LDA wird die Wellenfrontkrümmung fokussierter Laserstrahlen genutzt, um zwei gefächerte Interferenzstreifenmuster zu erzeugen. Dies ermöglicht die gleichzeitige Erfassung von Geschwindigkeit und Ort innerhalb des Messvolumens und somit die Messung die genaue Erfassung eines Geschwindigkeitsprofils (Bürkle et al. 2020, Burgmann et al. 2021). Die gleichzeitige Erfassung der Temperatur über das temperaturabhängige Intensitätsverhältnis zweier fluoreszenter Farbstoffe wird in diesem Beitrag erstmalig vorgestellt.

Der Laser-Doppler-Profilsensor im Zeitmultiplex

Als Erweiterung des konventionellen LDA nutzt der Laser-Doppler-Profilsensor zwei fächerförmig angeordnete Streifenmuster, deren Streifenabstand sich entlang der optischen Achse unterschiedlich ändert (siehe Abb. 1 (a)). Der Quotient der Streifenabstände ist somit eindeutig



Abb. 1: Kalibrierfunktionen beider Interferenzstreifensysteme im Zeitmultiplex-Betrieb. (a) Streifenabstandsfunktionen und (b) Kalibrierfunktion (Quotientenfunktion q(z)) für die Ortsbestimmung.



Abb. 2: Schematische Darstellungen des Messaufbaus (a) und der Detektionseinheit (b). Die Abkürzungen beschreiben folgende Bauteile: L: Linse, PBS: Polarisierender Strahlteiler, M: Spiegel, $\lambda/2$: $\lambda/2$ -Wellenplatte, DCM: Dichroitischer Spiegel, PD: Photodiode, BP: Bandpass, LP: Langpass

für jeden Ort entlang der optischen Achse und lässt sich daher als Kalibrierfunktion für die Position im Messvolumen nutzen als

$$q(z) = \frac{f_{D1}(v, z)}{f_{D2}(v, z)} = \frac{v_x/d_1(z)}{v_x/d_2(z)} = \frac{d_2(z)}{d_1(z)}.$$

Ein Streifenmuster ist dabei konvergierend, während das andere divergierend ist (siehe Abb. 1 (a)). Dies ergibt eine höhere Steigung der Kalibrierfunktion (Abb. 1 (b)), als wenn beide Streifenmuster konvergierend oder divergierend wären, wodurch eine geringere Messunsicherheit bei der Ortsbestimmung erzielt wird.

Da für die Temperaturbestimmung fluoreszente Partikel eingesetzt werden sollen, erfolgt die Trennung der Streifenmuster durch Zeitmultiplex (siehe Wang et al. 1994 und König et al. 2010). Realisiert wird es durch den Einsatz zweier modulierbarer Laser (Wellenlänge 488 nm), welche abwechselnd an- und ausgeschaltet werden. Der schematische Aufbau des LD-PS ist in Abb. 2 (a) dargestellt. Die maximale Schaltfrequenz f_s der Laser beträgt 150 MHz, sodass die maximal messbare Geschwindigkeit nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem $v_{max} = 0.5 * 150$ MHz * 2,8 µm = 210 m/s für dieses System ist. Die hier erwarteten Geschwindigkeiten sind allerdings um zwei Größenordnungen geringer, sodass mit einer Schaltfrequenz von 5 MHz gearbeitet wird. Die Ortsauflösung beträgt $2\sigma_z \approx 3$ µm und die relative Geschwindigkeitsunsicherheit $2\sigma_{vx} \le 0.1$ % über die gesamte Länge des Messvolumens von 400 µm.

Temperaturmessung mittels fluoreszenter Partikel

Die Temperaturmessung erfolgt durch den Vergleich der Fluoreszenzintensitäten der beiden Farbstoffe Rhodamin B und Uranin, dem Natriumsalz von Fluorescein. Das Emissionsmaximum einer wässrigen Uraninlösung liegt bei etwa 514 nm, das einer wässrigen Rhodamin B-Lösung bei ca. 550 nm. Beide Farbstoffe werden in Wasser gelöst und gründlich (> 15 Minuten) mit einem Magnetrührer gerührt, um ein homogenes Mischverhältnis zu erhalten. Mittels eines Zerstäubers werden Partikel für die Messung in Luft hergestellt und direkt in die Strömung geleitet. Beim Passieren des Messvolumens wird sowohl das Streulicht als auch das Fluoreszenzlicht aufgenommen und in einer Detektionseinheit getrennt (siehe Abb. 2 (b)). Dabei wird das Streulicht mit einem dichroitischen Spiegel vom Fluoreszenzlicht getrennt. Das Fluoreszenzlicht wird mit einem zweiten dichroitischen Spiegel in zwei Teile gespalten, wobei das von Uranin emittierte Licht hauptsächlich reflektiert und das von Rhodamin B emittierte



Abb. 3: (a) Beispiel für ein Partikelsignal, (b) Kalibrierfunktion für die Temperaturmessung

Licht transmittiert wird. Da die Spektren sich jedoch im Bereich von 550 – 600 nm signifikant überlappen, wird das reflektierte Licht mit einem Bandpass (mittlere Wellenlänge 525 nm, Halbwertsbreite 45 nm) und das transmittierte Licht mit einem Langpass (Grenzwellenlänge 600 nm) gefiltert. Ein Beispiel für ein Partikelsignal ist in Abb. 3 (a) zu sehen Aus dem gestreuten Licht werden die beiden Dopplerfrequenzen bestimmt. Die Maximalintensität der Fluoreszenzsignale wird mit einem Gauß-Fit bestimmt und der Quotient einer Temperatur zugewiesen.

Zur Kalibrierung werden die Signale in einer Strömung nahe einer mit einem Peltier-Element geheizten Oberfläche gemessen. Die Temperatur nahe der Oberfläche wurde zuvor ohne Strömung für verschiedene Leistungen des Peltier-Elements gemessen, da der Temperaturfühler die Temperatur in der Grenzschicht der Strömung mittelt, welche vom Rand entfernt schnell abfällt. Die ermittelte Kalibrierfunktion ist in Abb. 3. (b) zu sehen. Die Temperaturunsicherheit während der Kalibrierung wird mit ±0,5 K angenommen. Ebenfalls zu sehen ist eine Unsicherheit des Intensitätsverhältnisses, welche etwa ±15 % des mittleren Intensitätsverhältnisses beträgt. Als Ursachen dafür in Betracht zu ziehen sind unterschiedliche Konzentrationen der Farbstoffe in einzelnen Partikeln sowie die Reabsorption des von Uranin emittierten Lichts durch Rhodamin B. Um die hohe Unsicherheit zu kompensieren, wurden für jede Temperatur einige hundert Partikel aufgenommen und die einzelnen Intensitätsverhältnisse gemittelt. Somit ließ sich eine hinreichend geringe Unsicherheit des Mittelwerts erreichen.

Messung eines Temperaturprofils

Zur Erprobung der Temperaturmessung wird die Strömung in einem quadratischen Kanal mit einer Seitenlänge von 10 mm gemessen. Zur Erzeugung eines Temperaturgradienten wird eine Wand mit einem Peltier-Element erwärmt. Um die gesamte Grenzschicht zu erfassen, wurde der Kanal nach 1200 aufgenommenen Signalen um 100 µm entlang der optischen Achse verschoben. Nach der Bestimmung des Orts aus den Dopplerfrequenzen wurden die gemessenen Geschwindigkeiten und die aus dem Intensitätsverhältnis ermittelten Temperaturen in 10 µm-Intervalle eingeteilt. Innerhalb eines Intervalls wurden dann die mittleren Geschwindigkeiten und Temperaturen berechnet. Das resultierende Geschwindigkeits- und Temperaturprofil ist in Abb. 4 zu sehen. Zu sehen ist eine näherungsweise lineare Zunahme der Geschwindigkeit hin zur Mitte des Kanals. Die Kanalwand findet sich dem linearen Fit folgend bei etwa 200 µm. Ebenfalls zu sehen ist ein exponentieller Abfall der Temperatur. Folgt man dem exponentiellen Fit, steigt die Temperatur zur Wand hin auf etwa 36 °C an. Die beiden



Abb. 4: Gemessenes Geschwindigkeits- und Temperaturprofil nahe einer beheizten Wand

letzten Intervalle zeigen jedoch ein Sinken der Temperatur an, wobei auch ein Stagnieren im Rahmen der Messunsicherheit denkbar ist. Dies erscheint plausibel, da die Temperatur der Wand auf ca. 31,5 °C eingestellt war und die Messung kurz hinter der beheizten Wand durchgeführt wurde. Die Geschwindigkeitsmessung nahe der Wand war aufgrund der starken Reflexionen nicht möglich. Die Unsicherheitsbalken in Abb. 4 zeigen das 95-%-Konfidenzintervall für jedes 10 µm-Intervall berechnet nach der Studentschen t-Verteilung:

$$\Delta T = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \cdot t$$

Dabei ist σ die Standardabweichung im entsprechenden Intervall, N die Anzahl der Punkte pro Intervall und t der t-Faktor aus der Studentschen t-Verteilung. Da für alle Intervalle mit einem Ort z < 50 µm die Anzahl der Messpunkte N > 70 ist, wird der t-Faktor mit t = 1,994 bestimmt. Die Temperaturunsicherheit über alle Intervalle reicht dann von ±0,24 bis ±0,71 °C oder ±1,8 bis ±5,5 % des Messbereichs. Die Geschwindigkeitsunsicherheit beträgt zwischen ±0,7 und 4,3 %. Nach dem Fit steigt die Geschwindigkeit um 2,7 mm/s für 10 µm, die man sich von der Wand entfernt. Dies sorgt für eine Abweichung von 5 % bei niedrigen Geschwindigkeiten nahe der Wand und 0,7 % bei hohen Geschwindigkeiten in Richtung der Kanalmitte. Evaluiert man die Geschwindigkeitsunsicherheit in einem kleineren Bereich, so sinkt sie auf 0,2 %. Mit diesen Unsicherheiten ist eine präzise Messung des Temperatur- und Geschwindigkeitsprofils möglich.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass mit einem Laser-Doppler-Profilsensor im Zeitmultiplexbetrieb die gleichzeitige Messung des Geschwindigkeits- und Temperaturprofils möglich ist. Mit Ortsunsicherheiten von unter 10 µm, Geschwindigkeitsunsicherheiten von weniger als 0,2 % und einer Temperaturauflösung von weniger als 1 °C eignet sich der Sensor für hochauflösende Messungen in mikrofluidischen Strömungen. Mit der großen Auswahl möglicher Farbstoffe lassen sich auch andere Temperaturbereiche erschließen. Mit einer stärkeren Temperaturabhängigkeit ließe sich ebenfalls die Unsicherheit verringern. Zur Anwendung in flüssigen Strömungen ließen sich die Tropfen in Mikrokapseln verschließen, wodurch die Farbstoffe ihre temperaturabhängigen Eigenschaften behielten, die sie durch Einbetten in eine feste Matrix verlören. Mögliche Anwendungsfälle finden sich z. B. Strömungen in Methanol-Brennstoffzellen oder in Elektrolyseanlagen. Für höhere Temperaturen könnte mit festen Partikeln gearbeitet werden und bspw. Brennvorgänge untersucht werden.

Dankesworte

Die Autoren danken der DFG für die Förderung im Rahmen des Projekts BU 2241/4-1.

Literatur

Faghri, A., Guo, Z., 2005: "Challenges and opportunities of thermal management issues related to fuel cell technology and modeling", International Journal of Heat and Mass Transfer, 48, pp. 3891-3920 **Tullius, J. F., Vajtai, R., Bayazitoglu, Y., 2011:** "A review of cooling in microchannels", Heat Transfer Engineering, 32, pp. 527-541

Funatani, S., Fujisawa, N., Ikeda, H., 2004: "Simultaneous measurement of temperature and velocity using two-colour LIF combined with PIV with a colour CCD camera and its application to the turbulent buoyant plume", Measurement Science and Technology, 15, pp. 983-990

Massing, J., Kähler, C. J., Cierpka, C., 2018: "A volumetric temperature and velocity measurement technique for microfluidics based on luminescence lifetime imaging", Experiments in Fluids, 50, pp. 65-73

Ojo, A. O., Fond, B., Van Wachem, B. G. M., Heyes, A. L., Beyrau, F., 2015: "Thermographic laser Doppler velocimetry", Optics Letters, 40, pp. 4759-4762

Bürkle, F., Moyon, F., Feierabend, L., Wartmann, J., Heinzel, A., Czarske, J., Büttner, L., 2020: "Investigation and equalisation of the flow distribution in a fuel cell stack, Journal of Power Sources, 448, pp. 227546

Albrecht, H.-E., Damaschke, N., Borys, M., Tropea, C., 2003: "Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques", Springer, ISBN: 978-3-540-67838-0

Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., Kompenhans, J., 2018: "Particle Image Velocimetry", Springer, ISBN: 978-3-319-68851-0

Gao, Z., Radner, H., Büttner, L., Ye, H., Li, X., Czarske, J., 2021: "Distortion correction for particle image velocimetry using multiple-input deep convolutional neural network and Hartmann-Shack sensing", Optics Express 29 (12), pp. 18669-18687

Gürtler, J., Greiffenhagen, F., Woisetschläger, J., Kuschmierz, R., Czarske. J., 2021: "Seedingless measurement of density fluctuations and flow velocity using high-speed holographic interferometry in a swirl-stabilized flame", Optics and lasers in engineering 139, pp. 106481

Burgmann, S., Dues, M., Barwari, B., Steinbock, J., Büttner, L., Czarske, J., 2021: "Flow measurements in the wake of an adhering and oscillating droplet using laser-Doppler velocity profile sensor", Experiments in Fluids 62 (3), pp. 1-16

Wang, H., Strunck, V., Müller, H., Dopheide, D., 1994: "New technique for multi-component flow velocity measurements using a single HF-pulsed diode laser and a single photodetector", Experiments in Fluids, 18, pp. 36-40

König, J., Voigt, A., Büttner, L., Czarske, J., 2010: "Precise micro flow rate measurements by a laser Doppler velocity profile sensor with time division multiplexing", Mesurement Science and Technology, 21, pp. 074005