

## Simultane Bestimmung des Temperatur- und Strömungsfeldes basierend auf der Phosphoreszenzlebensdauer von EuTTa

### Simultaneous temperature and velocity field measurements based on the phosphorescence lifetime of EuTTa

J. Massing<sup>1</sup>, C. J. Kähler<sup>1</sup>, C. Cierpka<sup>2</sup>

1 Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

2 Institut für Thermodynamik und Strömungsmechanik, Technische Universität Ilmenau, Am Helmholtzring 1, 98684 Ilmenau

Schlagworte: astigmatismus particle tracking, temperatursensitive Partikel, Mikrofluidik  
Key words: astigmatism particle tracking, temperature sensitive particles, microfluidics

#### Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine Messtechnik vorgestellt und qualifiziert, mit der das dreidimensionale (3D) Temperaturfeld und die drei Komponenten des dreidimensionalen (3D3C) Geschwindigkeitsfeldes in mikrofluidischen Kanälen simultan vermessen werden können. Die Temperatur wird durch Auswertung der Phosphoreszenzlebensdauer von individuellen lumineszierenden Mikropartikeln bestimmt. Gleichzeitig kann das Geschwindigkeitsfeld über die Verschiebung von individuellen Partikelbildern berechnet werden. Um die Tiefeninformation zu erhalten wird das etablierte Astigmatismus *particle tracking velocimetry* (APTV) Verfahren verwendet. Mit der beschriebenen Methode werden simultane Messungen des Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldes in einem beheizten Mikrokanal durchgeführt und mit numerischen Simulationen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Messgenauigkeit der Methode hoch genug ist um quantitative Analysen beider Felder durchzuführen.

#### Einleitung

Für viele Anwendungen in der Mikrofluidik ist die Bestimmung des Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldes von großem technischem und wissenschaftlichem Interesse. Beispielsweise werden mikrofluidische Wärmeübertrager immer häufiger zur Kühlung von mikroelektronischen Elementen verwendet. Aufgrund des hohen Oberflächen – Volumenverhältnisses eignen sich Mikrokanäle besonders gut um große Wärmeströme abzuführen. Zukünftige Entwicklungen im Bereich der Mikroelektronik ermöglichen immer höhere Leistungsdichten mit immer größerer Wärmeentwicklung (Tullius et al. 2011). Dies macht die Entwicklung von effektiveren Wärmemanagementsystemen nötig, was nur möglich ist wenn das Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld in den Kühlkanälen bekannt ist. Als zweites Beispiel, beeinflussen Temperaturänderung im Fluid das Strömungsfeld in sogenannten akustofluidischen Systemen. Innerhalb dieser Systeme werden akustische Kräfte mittels eines Piezokristalls induziert und genutzt, um ein schnelles Vermischen von Flüssigkeiten zu realisieren oder um Mikropartikel zu fokussieren. Dabei kann die Temperatur an der Grenzfläche zwischen piezoelektrischem Substrat und Fluid lokal auf bis zu 70 °C ansteigen (Luong et al. 2011).

Dadurch werden die Materialparameter des Kanals signifikant verändert, was die Ausbreitung der akustischen Wellen, sowie die Resonanzfrequenzen und somit auch die Mischungseffizienz, bzw. die Position der fokussierten Partikel beeinflusst (Asgustsson et al. 2011; Kiebert et al. 2017). Eine weitere Technologie, die von effektiven Wärmemanagementsystemen profitieren kann sind mikrofluidische Brennstoffzellen, da der Wirkungsgrad der chemischen Reaktion in der Brennstoffzelle direkt von der Betriebstemperatur abhängt (Faghri und Guo. 2005). Für Direkt-Methanol-Brennstoffzellen konnte von Scott et al. (1999) eine Erhöhung der abgegebenen Leistung bis zu einer Zelltemperatur von 100 °C gezeigt werden. Bei höheren Temperaturen nahm die Leistung jedoch wieder ab, da vermehrte Dampfblasenbildung auftrat.

Um die Analyse von mikrofluidischen Systemen zu ermöglichen wird eine nicht-invasive Messmethode benötigt, mit der das Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld simultan vermessen werden kann. Mit der *particle image velocimetry* (PIV) für die Geschwindigkeit und der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) für die Temperatur existieren bereits weit verbreitete optische und nicht-invasive Verfahren, um die jeweiligen Felder separat zu bestimmen (Kähler et al. 2016; Sakakibara und Adrian. 2004). Durch die Kombination von PIV mit LIF (Futanati et al. 2004) oder durch die Verwendung von temperatursensitiven Partikeln als PIV-Tracer können beide Felder simultan vermessen werden. Eine solche Technik ist die *particle image thermometry* (PIT), bei der temperatursensitive Flüssigkristalle (TLCs) als Tracer eingesetzt werden. Sie reflektieren verschiedene Wellenlängen des sichtbaren Lichtes in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (Dabiri 2009). Weitere temperatursensitive Partikel, die in Kombination mit PIV verwendet wurden sind thermographische Phosphore (Aldén et al. 2011; Abram et al. 2016) und mit fluoreszierenden Farbstoffen gefüllte Mikrokapseln (Vogt und Stephan. 2012). In der Mikrofluidik ist der Einsatz von PIV basierten Verfahren allerdings limitiert, da die örtliche Mittelung durch die Verwendung von Auswertefenstern zu systematischen Fehlern führt, wenn starke Gradienten in der Strömung vorhanden sind (Cierpka und Kähler. 2012). Darüber hinaus ist die Verwendung eines Laserlichtschnittes wegen der kleinen Abmessungen und des eingeschränkten optischen Zuganges praktisch unmöglich, sodass stets ein Volumen beleuchtet wird, das sich über die gesamte Kanaltiefe erstrecken kann. Somit tragen auch Signale außerhalb der Messebene signifikant zur Kreuzkorrelation bei der PIV, bzw. zum Fluoreszenzsignal bei der LIF bei. Dadurch entstehen systematische Fehler, wenn Gradienten in Tiefenrichtung vorhanden sind, was in der Mikrofluidik häufig der Fall ist (Rossi et al. 2012; Kim und Yoda. 2014).

Um diese Problematik zu umgehen, wurde von Segura et al. (2013, 2015) eine Messtechnik entwickelt, die auf der Auswertung von individuellen Partikelbildern von nicht verkapselten TLCs basiert, die sich mit der Strömung bewegen. Darüber hinaus konnte die Temperatur und Geschwindigkeit durch die Verwendung des Astigmatismus *particle tracking velocimetry* Verfahrens (APTV; Cierpka et al. 2010) in 3D vermessen werden. Die Messtechnik ist sehr gut geeignet um kleine Temperaturunterschiede aufzulösen denn die TLCs können flexibel für verschiedene Temperaturbereiche hergestellt werden. Allerdings ist die maximale Temperaturdifferenz für momentan erhältliche TLC Materialien auf  $\Delta T \leq 30$  K beschränkt. Des Weiteren lassen sich mit der momentan erhältlichen Hardware nur relativ langsame Strömungen vermessen, da Belichtungszeiten in der Größenordnung von mehreren Millisekunden benötigt werden, um ein ausreichendes Signal zu erhalten. Eine Messtechnik, mit der auch größere Temperaturunterschiede und Geschwindigkeiten erfasst werden können, wurde von Massing et al. (2016) vorgestellt. Dabei wird das APTV-Verfahren mit temperatursensitiven, lumineszierenden zweifarbigem Mikropartikeln kombiniert. Die Auswertung des temperatursensitiven Lumineszenzsignals ermöglicht volumetrische Messungen des Temperaturfeldes in Mikrokanälen mit Temperaturunterschieden von bis zu  $\Delta T = 70$  K. Die Messunsicherheit für individuelle Partikelbilder betrug dabei  $2\sigma = 4,4$  K (zweifache Stan-

dardabweichung), was ca. 6,2 % des vollen Messbereichs entspricht. Um eine quantitative Analyse von kleineren Temperaturunterschieden zu ermöglichen ist diese Unsicherheit jedoch zu hoch.

Im folgenden Beitrag soll eine Messtechnik vorgestellt und qualifiziert werden, die die Vermessung des 3D3C Geschwindigkeitsfeldes und des 3D Temperaturfeldes in mikrofluidischen Kanälen für verschiedene Temperaturbereiche und Geschwindigkeiten ermöglicht. Die Technik basiert auf der Kombination des APTV-Verfahrens mit polymethylmethacrylat (PMMA) Polymerpartikeln, die mit dem Farbstoff europium (II) thenoyltrifluoroacetate (Eu-TTa) markiert sind (Surflay Nanotec). Das Geschwindigkeitsfeld wird über den Versatz individueller, astigmatisch verzerrter Partikelbilder bestimmt. Dabei ist die 3D Position der Partikel im Messvolumen in der astigmatisch verzerrten Form der Partikelbilder enthalten (Cierpka et al. 2010). Gleichzeitig kann das Temperaturfeld anhand der Abklingzeit der Phosphoreszenz individueller Partikel berechnet werden. Durch Anpassungen der verwendeten Triggersequenz kann die Technik flexibel für den gewünschten Geschwindigkeits- und Temperaturbereich optimiert werden.

### Prinzip der Temperaturbestimmung

Allgemein hängen sowohl die Intensität, als auch die Abklingzeit der Lumineszenz verschiedener Moleküle von ihrer Umgebungstemperatur ab. Allerdings beträgt die Abklingzeit von fluoreszierenden Farbstoffen lediglich wenige Mikrosekunden, weshalb sie mit wissenschaftlichen Kameras, die momentan für optische Messverfahren in der Strömungsmechanik verwendet werden, nicht aufgelöst werden kann. Aus diesem Grund werden in vielen Fällen intensitätsbasierte Methoden wie die LIF eingesetzt. In den letzten Jahren haben jedoch verschiedene Forschungsgruppen langlebige phosphoreszierende Farbstoffe verwendet um die Temperatur anhand der Phosphoreszenzlebensdauer zu bestimmen (Hu und Koochesfahani. 2006; Someya et al. 2009; Fuhrmann et al. 2012). Da die Abklingzeit der Phosphoreszenz von einigen Stoffen, wie beispielsweise verschiedenen Europiumderivativen, mehrere hundert Mikrosekunden beträgt, können Bilder zu mehreren Zeitpunkten des Abklingens mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen werden. Je mehr Bilder innerhalb der Phosphoreszenzlebensdauer erfasst werden, desto genauer lassen sich der exponentielle Abfall und somit auch die Abklingzeit berechnen. Dabei ist jedoch die Bildwiederholrate der Kamera limitierend. Für sehr hohe Aufnahmefrequenzen muss der Kamerasensor stark verkleinert werden, was die örtliche Auflösung oder den Messbereich einschränkt. Falls die Abklingzeit einer Exponentialfunktion erster Ordnung folgt, kann sie mittels der *rapid lifetime determination* Methode (RLD; Woods et al. 1984) anhand von lediglich zwei Messungen an den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  mit einer konstanten Belichtungszeit  $\tau_{exp}$  bestimmt werden. Dies verringert die benötigte Aufnahmefrequenz erheblich. Die jeweiligen Phosphoreszenzsignale ergeben sich dann zu:

$$I_1 = \int_{t_1}^{t_1 + \tau_{exp}} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} dt$$

$$I_2 = \int_{t_2}^{t_2 + \tau_{exp}} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} dt$$

Die Abklingzeit  $\tau$  ist definiert als die Zeit bei der die Intensität auf  $1/e$  ihres Ursprungswertes  $I_0$  abgeklungen ist und berechnet sich zu:

$$\tau = \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)}$$

In den meisten praktischen Fällen fällt die Phosphoreszenz allerdings mit einer Exponentialfunktion höherer Ordnung ab. Somit muss eine geeignete Kalibration durchgeführt werden, um die Temperatur aus nur zwei Messpunkten bestimmen zu können. Da die Zeitintervalle während der Messung konstant bleiben, kann die Temperatur direkt aus dem Intensitätsverhältnis  $I_1/I_2$  berechnet werden. Ein großer Vorteil gegenüber Intensitätsbasierten Messungen liegt darin, dass die Abklingzeit eine intrinsische Eigenschaft der Fluorophore ist. Dies macht sie im Gegensatz zur Intensität unabhängig von Fluktuationen in der Anregungsintensität, Verlusten im optischen Pfad oder in der Probe, Variationen in der Farbkonzentration oder Photobleaching.

### Numerische und experimentelle Qualifizierung

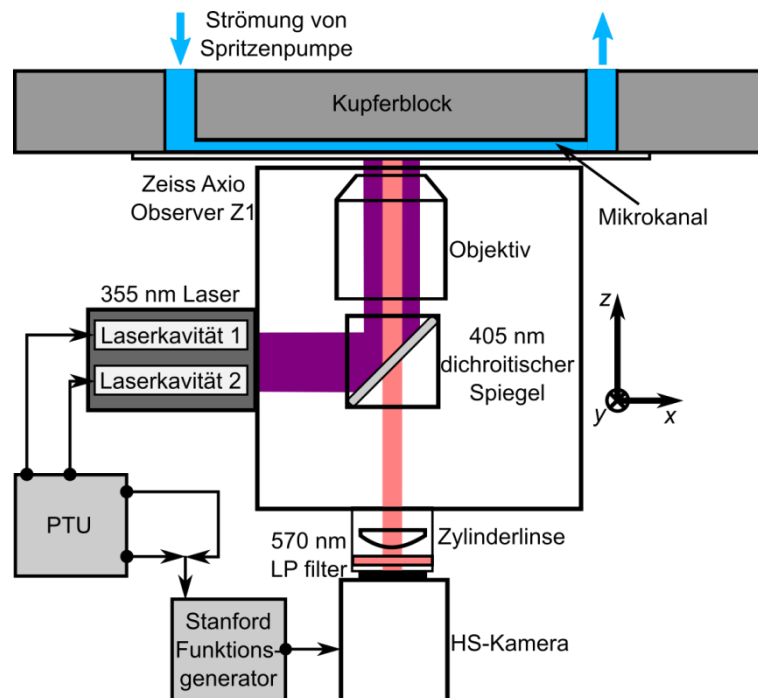


Abb. 1 Schema des experimentellen Aufbaus.

Um die beschriebene Messmethode zu qualifizieren wurde das dreidimensionale Geschwindigkeits- und Temperaturfeld innerhalb eines einfachen geraden Mikrokanals vermessen und mit numerischen Simulationen verglichen. Der Messaufbau ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Der Mikrokanal wurde in einen Kupferblock gefräst und von unten mit einem Mikroskopglasträger abgeschlossen, um einen optischen Zugang zu ermöglichen. Das Kupfer wurde mit warmem Wasser aus einem thermostatischen Bad geheizt, welches kontinuierlich durch vier Heizkanäle im Kupferblock strömte. In früheren Experimenten konnten Irwansyah et al. (2015) zeigen, dass mit diesem Verfahren eine konstante Temperatur im gesamten Kupferblock eingestellt werden kann. Der Kanal hatte eine Länge von 30 mm und einen quadratischen Querschnitt von  $2 \times 2 \text{ mm}^2$ . Er wurde an der Messposition von  $x = 10 \text{ mm}$  stromab des Einlasses mit einem Zeiss Axio Observer Z1 Mikroskop beobachtet, welches mit einem Zeiss EC Plan-Neofluar  $10 \times/0.3$  Objektiv ausgestattet war. Das Phosphoreszenzsignal der Partikel wurde mit einer LaVision Imager HS Hochgeschwindigkeitskamera

aufgenommen. Als Partikel wurde eine monodisperse Weiterentwicklung der von Massing et al. (2016) vorgestellten Perylen/EuTTa Partikel (Surflay Nanotec), mit einem mittleren Partikeldurchmesser von  $D_p = 7 \mu\text{m}$  verwendet, da zu diesem Zeitpunkt noch keine rein mit EuTTa markierten Partikel erhältlich waren. Die Emission von EuTTa hat bei einer Wellenlänge von 620 nm ein Maximum und ist temperatursensitiv. Bei Raumtemperatur beträgt die Phosphoreszenzlebensdauer ca.  $250 \mu\text{s}$ . Um die Perylenemission auszufiltern wurde ein 570 nm Langpassfilter vor der Kamera platziert. Als Beleuchtungsquelle wurde ein frequenzverdreifachter Nd:YAG Puls laser mit einer Wellenlänge von 355 nm und zwei Laserkavitäten verwendet (Innolas Spitlight 400). Der Astigmatismus wurde mittels einer Zylinderlinse mit einer Brennweite von 850 mm erzeugt. Dadurch ergab sich eine effektive Messtiefe von  $\Delta z = 105 \mu\text{m}$ . Aufgrund der Zylinderlinse und des zusätzlichen Abstandes zwischen Kamera und Mikroskop erhöhte sich die Vergrößerung auf 10,78 in  $x$  – Richtung und 11,22 in  $y$  – Richtung.

Als Fluid wurde eine wässrige 5% – NaCl Lösung verwendet und mittels einer nemesys Spritzenpumpe mit einem konstanten Volumenstrom von  $\dot{V} = 1,1 \text{ ml/min}$  durch den Kanal geströmt. Die Temperatur des Kupferblocks wurde auf  $T_W = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  eingestellt und über vier in den Kupferblock eingelassene Pt100 Widerstandsthermometer kontrolliert. Da die  $z$  – Ausdehnung des Messvolumens nur  $105 \mu\text{m}$  betrug, wurde das Messvolumen in 20 Schritten mit einem Abstand von  $100 \mu\text{m}$  in Tiefenrichtung durch den Kanal verfahren, um das vollständige dreidimensionale Strömungsfeld im Kanal zu vermessen. Dabei musste nach jedem dritten Messpunkt die Spritze neu befüllt werden.

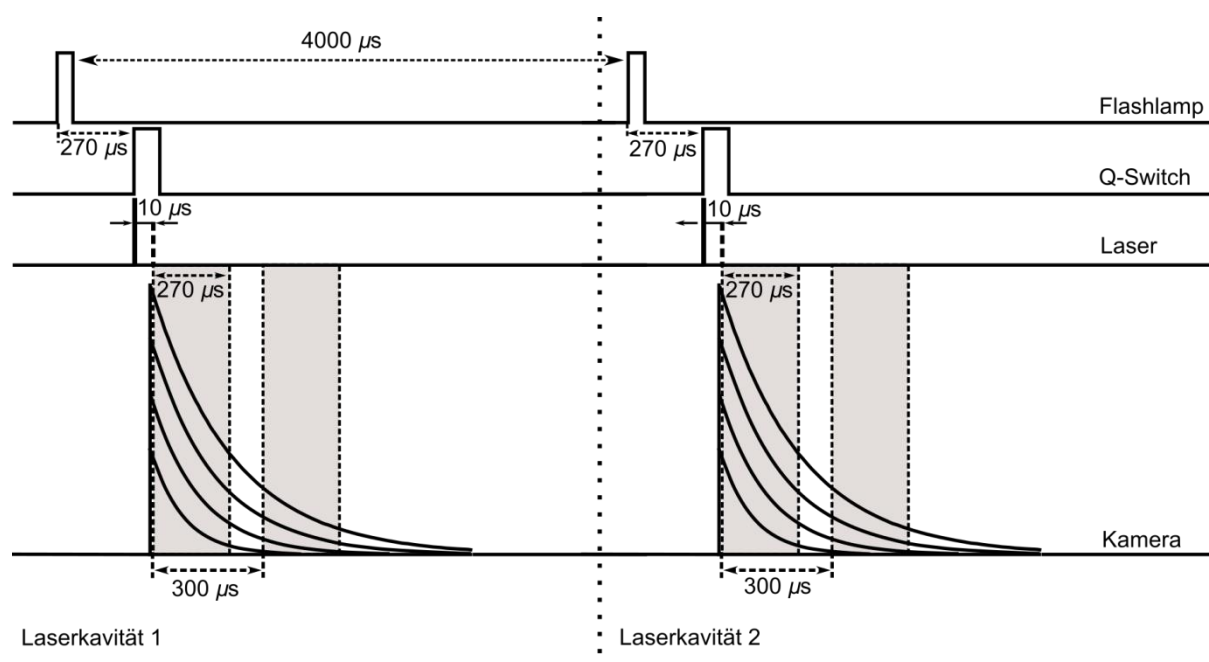


Abb. 2 Schema der verwendeten Triggersequenz.

Die verwendete Triggersequenz wurde über zwei miteinander verbundenen Funktionsgeneratoren erzeugt und ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Der Laser wurde mittels einer *programmable timing unit* (LaVision PTU) gesteuert. Bei dem verwendeten Laser beträgt die maximale Wiederholrate für eine Kavität 10 Hz, was zu gering ist um die Geschwindigkeiten im Kanal messen zu können. Aus diesem Grund wurden, ähnlich wie bei Doppelbildern für PIV, beide Laserkavitäten mit einem Abstand von  $4000 \mu\text{s}$  ausgelöst. Um die Abklingzeit der Phosphoreszenz aufzulösen musste jedoch die Kamera separat zum Laser mit einer höheren Frequenz angesteuert werden. Dazu wurde ein Funktionsgenerator von Stanford Research Systems im Burstmodus genutzt. Als Eingangssignal wurde das Auslösen des

Q-Switches der jeweiligen Kavität von der PTU an den Funktionsgenerator übergeben. Daraufhin wurden zwei Burstsignale mit einer Verzögerung von  $10 \mu\text{s}$  und einem Abstand von  $300 \mu\text{s}$  an die Kamera gesendet, die jeweils eine Bildaufnahme auslösten. Durch die Verzögerung zwischen Auslösen des Q-Switches und Bildaufnahme konnte sichergestellt werden, dass kein reflektiertes Laserlicht das Phosphoreszenzsignal im ersten Bild überlagert. Mit einem Abstand von  $\Delta t = 300 \mu\text{s}$  konnten zwei Bilder innerhalb des Abklingens der Phosphoreszenz aufgenommen werden. Damit ließ sich die Temperatur für jedes Partikelbild über das Verhältnis  $I_1/I_2$  aus der Kalibrierfunktion bestimmen. Um ein möglichst großes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zu erreichen, wurde eine Belichtungszeit von  $270 \mu\text{s}$  eingestellt. Der Abstand von  $\Delta t = 300 \mu\text{s}$  zwischen den beiden Bildern entspricht einer Aufnahme Frequenz von ca. 3333 Hz. Um diese Frequenz zu erreichen musste der verwendete Kamerasensor auf  $1152 \times 1148$  Pixel verkleinert werden, was einem Aufnahmebereich von  $1175 \times 1125 \mu\text{m}^2$  ( $x \times y$ ) ergibt. Der Bildabstand wurde möglichst groß gewählt um einen Großteil des Sensors verwenden zu können und damit einen möglichst großen Messbereich zu gewährleisten. Außerdem erhöht sich die Temperatursensitivität mit größerem  $\Delta t$ , was die Messunsicherheit verringert. Allerdings muss sichergestellt sein, dass die zweite Aufnahme auch bei der höchsten Temperatur innerhalb der kleiner werdenden Abklingzeit liegt wodurch die minimale Bildrate festlegt ist. Da bei den auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten kein Partikelversatz zwischen den beiden Bildern eines Bursts vorhanden war, wurde das Geschwindigkeitsfeld über den Partikelversatz zwischen dem Auslösen der beiden Laserkavitäten bestimmt.

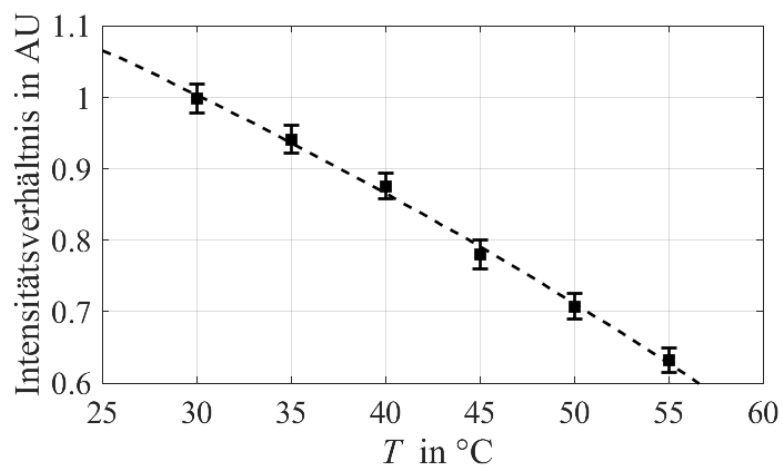


Abb. 3 Kalibrationskurve - Intensitätsverhältnis in Abhängigkeit von der Temperatur

Die hier dargestellte Triggersequenz ist sehr flexibel einstellbar und die jeweiligen zeitlichen Abstände lassen sich für den erwarteten Temperatur- und Geschwindigkeitsbereich optimieren. Abb. 3 zeigt das Intensitätsverhältnis in Abhängigkeit von der Temperatur, welche aus der Temperaturkalibration bestimmt wurde. Dabei wurde die Temperatur im Kanal im Bereich von  $30 - 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$  in Schritten von  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  konstant eingestellt und 250 Bildpaare pro Schritt aufgenommen und ausgewertet. Mit der hier verwendeten Triggersequenz ergibt sich eine Abhängigkeit des Intensitätsverhältnisses von der Temperatur von  $-1.5 \text{ } \%/ \text{K}$ , wobei die Fehlerbalken eine Standardabweichung der berechneten Temperatur aller aufgenommenen Partikelbilder darstellen. Die mittlere Messunsicherheit beträgt  $2\sigma = 2 \text{ K}$  für das individuelle Partikelbild, was mehr als einer Halbierung der von Massing et al. (2016) angegebenen Messunsicherheit für die intensitätsbasierte Messmethode entspricht.

## Experimentelle und numerische Ergebnisse

Abb. 4 zeigt die gemessenen 3D Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder im Vergleich zu numerischen Simulationen im Querschnitt des Kanals. Die Simulationen wurden in Fluent durchgeführt. Da die Strömung im Kanal symmetrisch ist, bestand das numerische Modell nur aus einer Kanalhälfte, inklusive Ein- und Auslass. Bei der vorherrschenden Strömung betrug die Richardsonzahl  $Ri = Gr/Re^2 \approx 7$ , was bedeutet, dass sowohl erzwungene als auch freie Konvektion berücksichtigt werden müssen. Um die dichtegetriebene Strömung zu simulieren, wurden die Dichte, die Viskosität und die Wärmeleitfähigkeit des Fluides als Polynom in Abhängigkeit der Temperatur angegeben (nach Kestin et al. 1981; Ozbek und Phillips. 1980). Als Randbedingungen wurde die Temperatur der Kupferwände konstant auf  $T_W = 50 \text{ °C}$  gesetzt. Das Glas wurde als adiabate Wand modelliert und als Einlassbedingung wurde ein konstanter Massenstrom vorgegeben. Bei der Auswertung der experimentellen Daten wurde ein Binning von  $10 \times 25 \text{ } \mu\text{m}^2$  ( $y \times z$ ) verwendet. Um Ausreißer effektiv zu detektieren und zu entfernen waren jedoch mindestens 10 Partikelbilder pro Bin notwendig, was vor allem am Rand aufgrund der relativ geringen Partikelkonzentration nur durch eine Ensemblemittelung über 300 Bildpaare erreicht werden konnte. Zusätzlich wurden die Bins  $500 \text{ } \mu\text{m}$  in  $x$  – Richtung verlängert. Dies war zulässig, da das Temperaturfeld über diese Kanallänge näherungsweise konstant blieb. Darüber hinaus war die Partikelverteilung in einigen Messebenen sehr unregelmäßig, was zu größeren Bereichen ohne Partikelbilder führte. Um die dadurch entstehenden fehlerhaften Messungen zu verhindern, wurden beide Kanalhälften nacheinander vermessen und die aufgenommenen Partikelbilder einer Kanalhälfte gespiegelt und zur anderen Kanalhälfte hinzugefügt.

Das experimentell und numerisch bestimmte Temperaturfeld ist in Abb. 4a dargestellt. Die minimale Temperatur in der Kanalmitte beträgt ca.  $41 \text{ °C}$ . In Richtung der Kupferwände steigt die Temperatur an, bis die Wandtemperatur direkt an der Wand erreicht ist. Da das Glas adiabatisch ist, ist der Temperaturgradient in Richtung Kanalboden an der Glasoberfläche  $\partial T/\partial z = 0$ . Zwischen den experimentellen und numerischen Ergebnissen ist eine sehr gute qualitative Übereinstimmung zu erkennen. Die Temperatur in der Mitte des Kanals sowie die Temperaturgradienten zur Wand hin sind zwischen Simulation und Messung konsistent. Bei näherer Analyse sind jedoch leichte Unterschiede zwischen beiden Feldern erkennbar. Im Experiment ist das Temperaturfeld parallel zur Seitenwand etwas stärker in Richtung Kanalmitte geneigt als in der Simulation, was gut am gelbgefärbten Temperaturbereich zu erkennen ist. Zusätzlich steigt die Temperatur in  $z$  – Richtung etwas schneller an. Beide Unterschiede ließen sich durch Toleranzen im Fertigungsprozess aufklären, die zu einer leicht schrägen Kanalwand führen. Somit konnte gezeigt werden, dass die Auflösung der Messtechnik hoch genug ist, um Temperaturunterschiede von lediglich  $\Delta T = 9 \text{ K}$  quantitativ zu analysieren.

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch für die Geschwindigkeitsfelder. In Abb. 4b ist die Hauptströmungskomponente der Geschwindigkeit ( $V_x$ ) dargestellt und zeigt eine gute qualitative sowie quantitative Übereinstimmung in Experiment und Simulation. Die Sekundärströmungskomponenten sind in Abb. 4c und Abb. 4d abgebildet. Aufgrund der dichtegetriebenen Strömung entstehen zwei symmetrische, gegenläufig rotierende Wirbel im Kanal. Dies entspricht den Ergebnissen von Cheng und Hwang (1969) für einen quadratischen Kanal mit einer konstanten, einheitlichen Temperatur aller vier Kanalwände. In  $y$  – Richtung wurden in der oberen Kanalhälfte höhere absolute Geschwindigkeiten gemessen, als in der Simulation vorhergesagt (vgl. Abb. 4c). Dies spricht erneut für eine leicht schräge Kanalwand. Für die Geschwindigkeit in  $z$  – Richtung ( $V_z$ ) ergibt sich die geringste Auflösung der drei Geschwindigkeitskomponenten. Dies war jedoch zu erwarten, da die Unsicherheit in der Bestimmung der Tiefenposition am größten ist. Darüber hinaus beträgt das Geschwindigkeitsmaximum dieser Komponente lediglich 3 % der maximalen Hauptströmungsgeschwindigkeit. Da der zeitliche Abstand zwischen dem Auslösen der beiden Laserkavitäten auf die Hauptströmungsgeschwindigkeit optimiert wurde, ist der Partikelversatz in  $z$  – Richtung mit ca.  $1 \text{ } \mu\text{m}$  sehr klein und damit der relative Fehler hoch. Falls diese Geschwindigkeitskomponente von

größerem Interesse ist, kann die Triggersequenz bzw. die Brennweite der Zylinderlinse daraufhin optimiert werden.

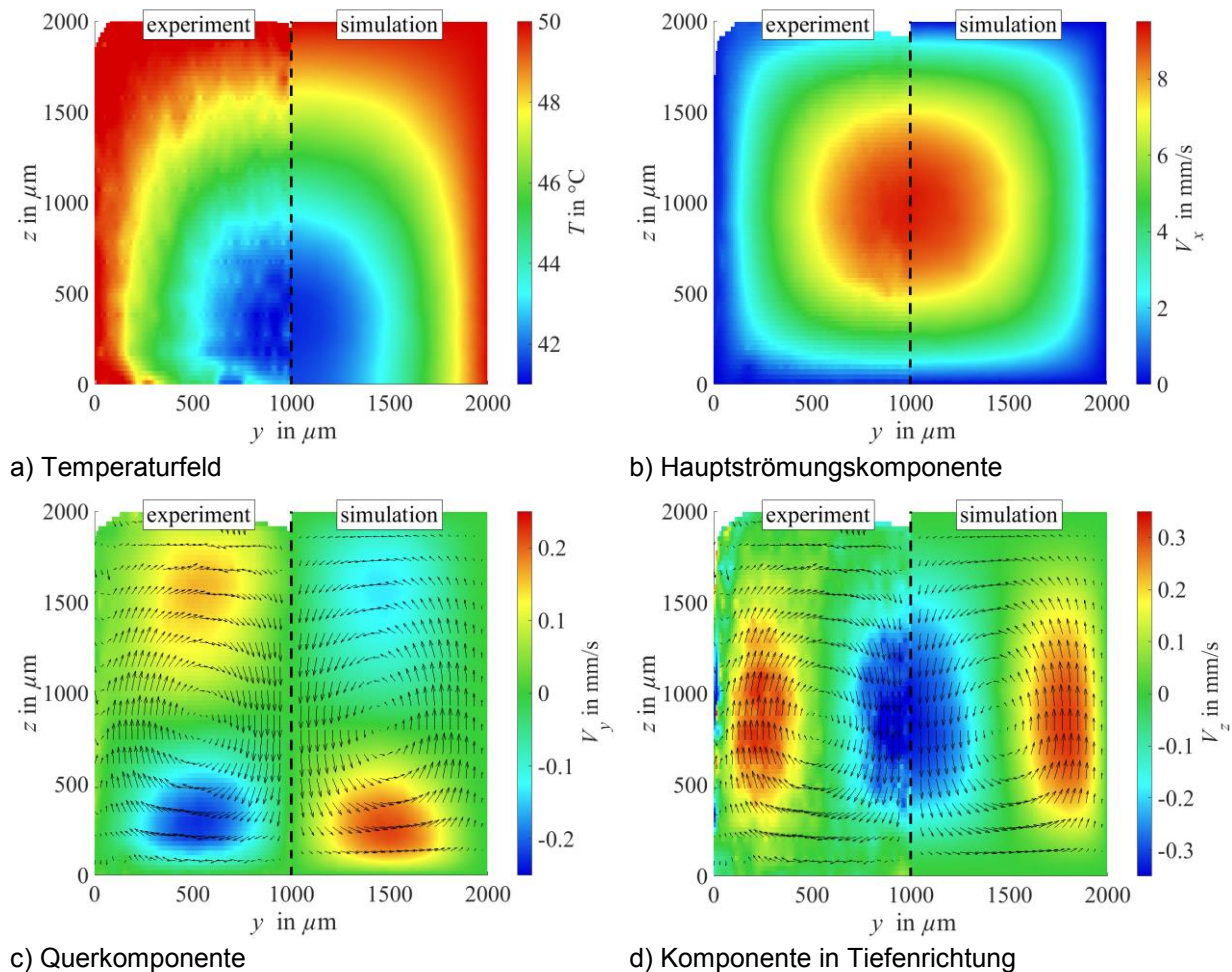


Abb. 4 Vergleich der experimentell und numerisch bestimmten Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder im Querschnitt des Kanals.

## Zusammenfassung

Zur simultanen und nicht-invasiven Bestimmung der dreidimensionalen Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder in mikrofluidischen Kanälen wurde die APTV mit der Auswertung der Phosphoreszenzlebensdauer von Mikropartikeln, welche mit EuTTa markiert waren kombiniert. Mit dieser Methode können systematische Fehler minimiert werden, die aufgrund der Volumenbeleuchtung und der örtlichen Mittelung bei  $\mu$ PIV und  $\mu$ LIF entstehen. Darüber hinaus lässt sich die Methode durch Anpassen der verwendeten Triggersequenz für den erwarteten Geschwindigkeits- und Temperaturbereich optimieren. Dies macht die Technik sehr viel flexibler einsetzbar als bisher verwendete Messtechniken. Zur Qualifizierung der Methode wurde das dreidimensionale Strömungsfeld eines quadratischen Mikrokanals vermessen und mit numerischen Simulationen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Genauigkeit der Messtechnik groß genug für eine quantitative Analyse des Geschwindigkeits- und Temperaturfeldes ist. Damit steht eine Messmethode zur Verfügung, mit der die komplexen dreidimensionalen Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder in verschiedenen Anwendungen der Mikrofluidik erstmals vermessen werden können.



## Dankesworte

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Emmy-Noether Nachwuchsgruppe „Kontrollierte elektrochemische Energieumwandlung durch oberflächennahe Strömungsbeeinflussung“ (CI 185/3) sowie durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Projektes „Schnellstart: Entwicklung eines Verfahrens zum gezielten Vorheizen einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle mit minimalem Energieaufwand“ (18941 N). Darüber hinaus bedanken sich die Autoren bei Rainer Hain für die Unterstützung beim Aufbau des Triggersystems.

## Referenzen:

- Aldén M., Omrane A., Richter M., Särner G., 2011: "Thermographic phosphors for thermometry: a survey of combustion applications", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 37, pp. 422-461
- Abram C., Pougin M., Beyrau F., 2016: "Temperature field measurements in liquids using ZnO thermographic phosphor tracer particles", *Experiments in Fluids*, Vol. 57, pp. 1-14
- Augustsson P., Barnkob R., Wereley S.T., Bruus H., Laurell T., 2011: "Automated and temperature-controlled micro-PIV measurements enabling long-term-stable microchannel acoustophoresis characterization", *Lab on a Chip*, Vol. 11, pp. 4152-4164
- Cheng K.C., Hwang G.J., 1969: "Numerical solution for combined free and forced laminar convection in horizontal rectangular channels", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 91, pp. 59-66
- Cierpka C., Segura R., Hain R., Kähler C.J., 2010: "A simple single camera 3C3D velocity measurement technique without errors due to depth of correlation and spatial averaging for microfluidics", *Measurement Science and Technology*, Vol. 21, Nr. 045401
- Cierpka C., Kähler C.J., 2012: "Cross-correlation or tracking - comparison and discussion", In: 16th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, July 2012, pp. 9-12
- Dabiri D., 2009: "Digital particle image thermometry/velocimetry: a review", *Experiments in Fluids*, Vol. 46, pp. 191-241
- 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*, Vol. 48, pp. 3891-3920
- Fuhrmann, N., Schild, M., Bensing, D., Kaiser, S.A., Schulz, C., Brübach, J., Dreizler, A., 2012: "Two-dimensional cycle-resolved exhaust valve temperature measurements in an optically accessible internal combustion engine using thermographic phosphors", *Applied Physics B*, Vol. 106, pp. 945-951
- Funatani S., Fujisawa N., Ikeda H., 2004: "Simultaneous measurement of temperature and velocity using twocolour LIF combined with PIV with a colour CCD camera and its application to the turbulent buoyant plume", *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, Nr. 983
- Hu, H., Koochesfahani, M.M., 2006: "Molecular tagging velocimetry and thermometry and its application to the wake of a heated circular cylinder", *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, Nr. 1269
- Irwansyah R., Massing J., Cierpka C., Kähler C.J., 2015: "Investigation of the heat transfer in a square microchannel with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluids", *Technisches Messen*, Vol. 82, pp. 572-577
- Kähler C.J., Astarita T., Vlachos P.P., Sakakibara J., Hain R., Discetti S., Foy R., Cierpka C., 2016: "Main results of the 4th international PIV challenge", *Experiments in Fluids*, Vol. 57, pp. 1-71
- Kestin J., Khalifa H.E., Correia R.J., 1981: "Tables of the dynamic and kinematic viscosity of aqueous NaCl solutions in the temperature range 20-150 °C and the pressure range 0.1-35 MPa", *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol. 10, pp. 71-88
- Kiebert F., Wege S., Massing J., König J., Cierpka C., Weser R., Schimdt H., 2017: "3D measurement and simulation of surface acoustic wave driven fluid motion: a comparison", *Lab on a Chip*
- Kim M., Yoda M., 2014: "The spatial resolution of dualtracer fluorescence thermometry in volumetrically illuminated channels", *Experiments in Fluids*, Vol. 55, pp. 1-12
- Luong T.D., Phan V.N., Nguyen N.T., 2011: "High throughput micromixers based on acoustic streaming induced by surface acoustic wave", *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 10, pp. 619-625
- Massing J., Kaden D., Kähler C.J., Cierpka C., 2016: "Luminescent two-color tracer particles for simultaneous velocity and temperature measurements in microfluidics", *Measurement Science and Technology*, Vol. 27, Nr. 015301
- Ozbek H., Phillips S.L., 1980: "Thermal conductivity of aqueous NaCl solutions from 20 to 330 °C", *Journal of Chemical and Engineering Data*, Vol. 25, pp. 263-267

- Rossi M., Segura R., Cierpka C., Kähler C.J., 2012: "On the effect of particle image intensity and image pre-processing on the depth of correlation in micro-PIV", *Experiments in Fluids*, Vol. 52, pp. 1063-1075
- Sakakibara J., Adrian R.J., 2004: "Measurement of temperature field of a Rayleigh-Bernard convection using two-color laser-induced fluorescence", *Experiments in Fluids*, Vol. 37, pp. 331-340
- Scott K., Taama W.M., Kramer S., Argyropoulos P., Sundmacher K., 1999: "Limiting current behaviour of the direct methanol fuel cell", *Electrochimica Acta*, Vol. 45, pp. 945-957
- Segura R., Cierpka C., Rossi M., Joseph S., Bunjes H., Kähler C.J., 2013: "Non-encapsulated thermoliquid crystals for digital particle tracking thermography/velocimetry in microfluidics", *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 14, pp. 445-456
- Segura R., Rossi M., Cierpka C., Kähler C.J., 2015: "Simultaneous three-dimensional temperature and velocity measurements using astigmatic imaging of nonencapsulated thermo-liquid crystal (TLC) particles", *Lab on a Chip*, Vol. 15, pp. 660-663
- Someya, S., Yoshida, S., Li, Y., Okamoto, K., 2009: "Combined measurement of velocity and temperature distributions in oil based on the luminescent lifetimes of seeded particles", *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, Nr. 025403
- Tullius J.F., Vajtai R., Bayazitoglu Y., 2011: "A review of cooling in microchannels", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 32, pp. 527-541
- Vogt J., Stephan P., 2012: "Using microencapsulated fluorescent dyes for simultaneous measurement of temperature and velocity fields", *Measurement Science and Technology*, Vol. 23, pp. 105-306
- Woods, R.J., Scypinski, S., Love, L.C., 1984: "Transient digitizer for the determination of microsecond luminescence lifetimes", *Analytical chemistry*, Vol. 56, pp. 1395-1400