

## Ein Particle-Image-Velocimetry / Thermography System (PIV/T) zur Untersuchung thermischer Konvektionsströmungen

H. G. Heiland, K. Wozniak\*, G. Wozniak

Institut für Mechanik  
Lehrstuhl für Strömungsmechanik  
Technische Universität Chemnitz  
Straße der Nationen 62  
09107 Chemnitz

\* SIVUS gGmbH  
Europark  
Schulstraße 38  
09125 Chemnitz

### Zusammenfassung

Flüssigkristalline Substanzen können für unterschiedliche berührungslose Messzwecke eingesetzt werden, da die optischen Signale, die von den Flüssigkristallen reflektiert werden, sich in Abhängigkeit von verschiedenen physikalischen Parametern reproduzierbar ändern. Diese Parameter können z. B. die Temperatur, der Druck oder auch das elektrische oder magnetische Feld sein. Eine Änderung dieser Größen wird durch eine selektive Farbreflexion von einfallendem weißem Licht der Flüssigkristalle sichtbar. Die resultierende Farbverteilung erlaubt eine quantitative Auswertung der anfallenden Messdaten. In dieser Studie wird ein Particle-Image-Velocimetry / Thermography System (PIV/T) zur simultanen Messung der Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung der thermischen Konvektion in einem schmalen Behälter angewendet. Die Bestimmung dieser Größen mittels elektronischer Bilddatenerfassung und -verarbeitung wird im Detail beschrieben.

### Einleitung

Die vorgestellte Messmethode stellt eine Kombination aus der Particle-Image-Velocimetry (PIV) und der Flüssigkristalltechnik dar und wird als Particle-Image-Velocimetry / Thermography (PIV/T) bezeichnet. Das PIV/T-Messprinzip basiert auf in der Strömung dispergierten, thermosensitiven Flüssigkristallpartikeln als Signalträger. Flüssigkristalle besitzen die besondere optische Eigenschaft, einfallendes weißes Licht in Abhängigkeit von der Temperatur selektiv zu reflektieren. Somit ist es möglich, aufgrund des Reflektionsverhaltens der Flüssigkristalle die Temperaturverteilung in einer strömenden Flüssigkeit lokal zu ermitteln. Zusätzlich lässt sich die Geschwindigkeitsverteilung anhand der Bewegung der Flüssigkristall-Tracer bestimmen.

Mit dem hier vorgestellten Messsystem wird die thermische Konvektion in einem schmalen vertikalen Spalt untersucht. Die vertikalen Seitenwände werden jeweils auf konstanter Tem-

peratur  $T_{max}$  bzw.  $T_{min}$  gehalten. Charakterisiert wird die thermische Konvektionsströmung durch die Prandtl-Zahl und die Grashof-Zahl, siehe Bühler 2003:

$$Pr \equiv \frac{\nu}{a} \quad \text{und} \quad Gr \equiv \frac{g \beta (T_{max} - T_{min}) B^3}{\nu^2}.$$

In dieser Definition bezeichnet  $B$  die Breite des Spalts,  $(T_{max} - T_{min}) = \Delta T$  die horizontale Temperaturdifferenz,  $\beta$  den thermischen Ausdehnungskoeffizienten,  $\nu$  die kinematische Viskosität und  $a$  die Temperaturleitfähigkeit. Die  $Pr$ -Zahl als reine Stoffgröße beschreibt das Verhältnis von Impuls- zu Wärmetransport. Die  $Gr$ -Zahl beschreibt das Verhältnis von Auftriebs- zu viskosen Kräften.

Prinzipiell sollen mit diesem Experiment die strömungsmechanischen und thermodynamischen Verhältnisse in Mikroreaktoren simuliert werden. In diesen Experimenten wurde ein so genannter Nachweisreaktor für biologische Anwendungen (Bioreaktor) untersucht, welcher vertikal aufgestellt ist und die Maße  $1,1 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  ( $B \times H \times T$ ) besitzt, siehe Wuttke 2004.

## Flüssigkristalle

Der Einsatz von Flüssigkristallen im Bereich der Messtechnik begründet sich auf der Variation bestimmter optischer Eigenschaften als Funktion der Temperatur, der Schubspannung, des Druckes oder auch des elektrischen oder magnetischen Feldes, wobei der erst genannte Effekt häufig für wissenschaftliche und technische Anwendungen genutzt wird, siehe Ciofalo et al 2003, Praisner et al 2001, Pochan et al 1972 und Wolinski et al 1995. Die für diese Messtechnik bedeutenden Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich dabei aus der Anisotropie bestimmter physikalischer Eigenschaften des flüssigkristallinen Materials wie dem Brechungsindex oder der Dielektrizitätskonstanten bei einer gleichzeitigen makroskopischen Fluidität der Moleküle, siehe de Gennes et al 1993 und Chandrasekhar 1977.

Thermosensitive Flüssigkristalle sind kommerziell in verschiedenen Ausführungen erhältlich. Reine Flüssigkristalle sind nur für Fluide geeignet, die mit Flüssigkristallen unmisierbar sind, z. B. Silikonöle, aber nicht Wasser. Mikroverkapselte Flüssigkristalle sind dagegen auch für Wasser geeignet. Die Verkapselung, i. d. R. aus Gelatine oder Gummi-Arabicum, bietet allerdings keinen ausreichenden Schutz vor chemischen Einflüssen. In dieser Arbeit wurden mikroverkapselte Flüssigkristalle verwendet.

Die Farbbandbreite von thermosensitiven Flüssigkristallen reicht von Rot als Starttemperatur über Gelb und Grün zu Blau. Außerhalb ihres Ansprechbereiches reagieren die Flüssigkristalle optisch transparent. Handelsübliche Flüssigkristall-Mischungen sind in einem Temperaturarbeitsbereich zwischen  $-30$  und  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  mit den Bandbreiten von  $0.5$  bis  $20^\circ\text{C}$  erhältlich. Die Angaben der Bandbreiten gelten für die Anwendung der Temperaturmessung auf festen Oberflächen unter Aufsichtbedingung. Für den Einsatz zur Untersuchung von Fluidströmungen sind die auftretenden Bandbreiten wesentlich geringer. Die Reaktionszeit von Flüssigkristallen liegt im Bereich weniger Millisekunden.

## Experimentelles

Zur Visualisierung der thermischen Konvektion im vertikalen Spalt wurde das in Abbildung 1a dargestellte Messsystem Particle-Image-Velocimetry / Thermography (PIV/T) entwickelt. Kernstück der Anlage ist die Messkammer, siehe Abbildung 1b.

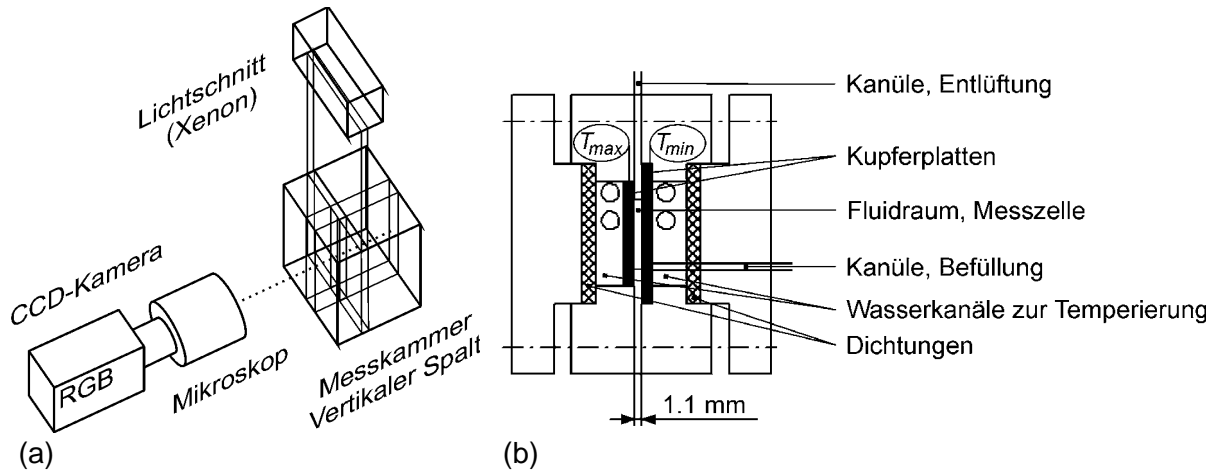


Abb. 1: (a) PIV/T Messsystem, (b) Messkammer 1.1 x 10 x 10 mm ( $B \times H \times T$ )

Die thermische Konvektionsströmung im vertikalen Spalt wird mit einer hochauflösenden CCD-Farbkamera und einem Long-Distance-Microscope digital erfasst. Dabei generiert die Kamera Farbbilder durch die drei Primärfarbwerte Rot, Grün und Blau (RGB-Farbmodell). Beleuchtet wird die mit Flüssigkristallen dispergierte Flüssigkeit mittels eines Lichtschnitts. Als Lichtquelle dient eine Xenon-Lichtbogen-Lampe hoher Intensität (Typ XB-500 W). Aufnahme- und Strömungsebene sind parallel zueinander angeordnet.

Um eine gute optische Zugänglichkeit zu gewährleisten, wurde die Kammer aus Piacryl gefertigt. Die Messzelle besitzt die Breite  $B = 1.1$  mm und ist vertikal durch die zwei temperierbaren Kupferplatten begrenzt. Die Kupferplatten haben eine Dicke von 1.5 mm und sind zur Vermeidung von störenden Lichtreflexionen schwarz eloxiert. Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Kupfers (E-Cu) gewährleistet konstante Temperaturen an den Begrenzungsflächen der Fluidmatrix. Die Temperierung der beiden Cu-Platten geschieht jeweils mit zwei Umwälzthermostaten. Die Temperaturregelung erfolgt selbstregelnd mit einer Genauigkeit von 0.1 °C. Kontrolliert werden die Randtemperaturen mit in den Kupferplatten eingebrachten Thermo-elementen. Das Befüllen der Kammer erfolgt über die seitlich angebrachte Kanüle. Für die Entlüftung bzw. für den notwendigen Druckausgleich ist am oberen Rand der Messzelle eine weitere Kanüle eingebaut.

Als Testflüssigkeiten sind zwei Glycerin/Wasser-Lösungen, 30% und 60%, verwendet worden. Die kinematische Viskosität der 30%-Lösung beträgt  $\nu = 2.2$  mm<sup>2</sup>/s, die der 60%-Lösung  $\nu = 8.7$  mm<sup>2</sup>/s bei 25 °C. Als Tracer werden thermosensitive, mikroverkapselte Flüssigkristalle des Typs BM/R30C/20W der Fa. Hallcrest eingesetzt. „R“ kennzeichnet die Rotstarttemperatur und „W“ die Bandbreite der Flüssigkristall-Mischung. Beide Datenangaben gelten für die Standardanwendung der Temperaturmessung auf festen Oberflächen. Der Durchmesser der Partikel beträgt ca.  $d \approx 12$  µm. Die Dichte der Flüssigkristallsubstanz beträgt ca. 1.0 g/ml, sodass eine nahezu auftriebsneutrale Anwendung gewährleistet ist.

## Geschwindigkeitsmessung

Die Particle-Image-Velocimetry basiert auf der zeitlichen Verfolgung der dispergierten Flüssigkristalle. Zum Verständnis wird ein einzelnes Partikel betrachtet. Das Partikel bewegt sich mit der Fluidströmung. Zu einem Zeitpunkt  $t$  wird die Strömung über das optische System aufgenommen. Eine zweite Aufnahme wird zu einem etwas späteren Zeitpunkt  $t + \Delta t$  gemacht. Das Partikel hat innerhalb des Zeitintervalls  $\Delta t$  die Strecke  $x_i(t + \Delta t) - x_i(t)$  in der Strömungsebene ( $i = 1, 2$ ) zurückgelegt. Der Geschwindigkeitsvektor  $v_i(t)$  resultiert aus der Beziehung:

$$v_i = \frac{x_i(t + \Delta t) - x_i(t)}{\Delta t}.$$

In dieser Arbeit wird mit zwei einfach belichteten Aufnahmen gearbeitet, siehe Abbildung 2. Im Folgenden werden diese Aufnahmen als Leuchtintensitätsfelder  $I(x,y)$  und  $S(x,y)$  bezeichnet mit der Definitionsmenge  $B = \{(x, y) \mid 0 \leq x < H \wedge 0 \leq y < B, B \in \mathbb{N}\}$ , wobei  $H$  und  $B$  die Höhe bzw. die Breite der diskreten, digitalisierten Aufnahmen sind.

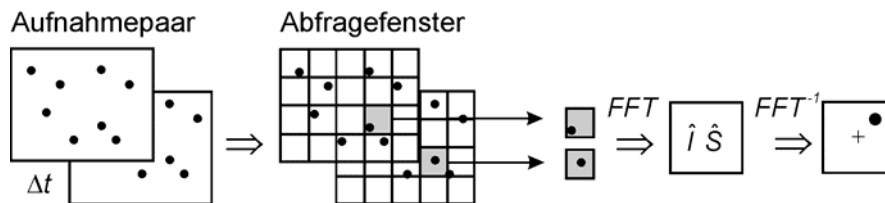


Abb. 2: Zwei einfach belichtete Strömungsaufnahmen und deren Auswertung

In der Praxis werden die Aufnahmen in ein regelmäßiges Raster der Größe  $X \times Y$  mit  $X \cdot N = B$  und  $Y \cdot N = H$  unterteilt. Die einzelnen Rastersegmente werden als sog. Abfragefenster, Interrogation Areas, bezeichnet. Für Paare  $(\hat{I}, \hat{S})$  von Abfragefenstern mit  $\hat{I} \subset I, \hat{S} \subset S$  und der Definitionsmenge  $\hat{B} = \{(m, n) \mid 0 \leq m < N \wedge 0 \leq n < N, N \in \mathbb{N}\}$  bei  $N \times N$  Pixel wird eine Vergleichsanalyse durchgeführt. D. h. das Abfragefenster  $\hat{I}$  des ersten Partikelbildes wird mit dem Abfragefenster  $\hat{S}$  des zweiten Partikelbildes korreliert. Die Berechnung zwischen dem Abfragefensterpaar  $(\hat{I}, \hat{S})$  erfolgt über den normalisierten Kreuzkorrelationskoeffizienten:

$$R_{\hat{I}, \hat{S}}(m, n) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \hat{I}(i, j) \hat{S}(i - m, j - n)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \hat{I}^2(i, j) \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \hat{S}^2(i - m, j - n)}}$$

Die Kreuzkorrelation liefert ein Signalpeak,  $\max\{R_{\hat{I}, \hat{S}}(m, n)\}$ , in der Korrelationsebene  $(m, n)$ .

Die Position dieses Peaks identifiziert die Verschiebung/Bewegung der Partikel innerhalb eines Abfragefensters. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wird die Kreuzkorrelation mittels der Fouriertransformation, für deren Berechnung ein sehr schneller Algorithmus (*FFT*) existiert, berechnet:

$$R_{i,\hat{S}} = FFT^{-1}\{FFT(\hat{I}) FFT^*(\hat{S})\}.$$

*FFT* bezeichnet die Fast Fourier Transformation,  $FFT^{-1}$  deren inverses und  $FFT^*$  deren komplex-konjugiertes Ergebnis.

Mit der Kenntnis der Partikelverschiebung, der Vergrößerungskonstanten des Kamerasystems und der Zeitdifferenz zwischen den Aufnahmen lässt sich der Geschwindigkeitsvektor innerhalb des Abfragefensters bestimmen. Die Analyse aller Abfragefenster ergibt das Geschwindigkeitsvektorfeld der beobachteten Strömung.

Die Messgenauigkeit der PIV-Technik ist insbesondere von dem Folgevermögen der verwendeten Teilchen, in unserem Fall von den thermosensitiven Flüssigkristallen, abhängig. Um den Einfluss des Sedimentationseffekts zu spezifizieren, wurde die Sinkgeschwindigkeit  $v_S$  der Flüssigkristalle für beide Testflüssigkeiten ermittelt. In der 30%-Lösung sedimentierten die Flüssigkristalle mit der Geschwindigkeit  $v_S \approx 0.001$  mm/s und in der 60%-Lösung mit  $v_S \approx 0.0002$  mm/s. D. h., dass der Sedimentationseffekt bei den durchgeführten Experimenten vernachlässigt werden kann.

### Temperaturmessung

Die Temperaturmessung der Strömung funktioniert mittels einer Farbanalyse der digitalisierten Strömungsaufnahmen. Die lokalen Farbinformationen beinhalten ein Maß für die Temperaturverteilung. Anstelle des allgemeinen *RGB*-Farbmodells wird das wahrnehmungsorientierte *HSL*-Farbmodell eingesetzt. Das *HSL*-Modell basiert auf der Drehung des *RGB*-Koordinatensystems. Dabei steht *H* für Hue (Farbton), dessen Wert direkt mit der Spektralfarbe des sichtbaren Lichts zusammenhängt, *S* für Saturation (Sättigung) und *L* für Lightness (Helligkeit). Das bedeutet: Allein die Ermittlung des *H*-Werts ist für die Bestimmung der Temperatur *T* ausreichend. Die Umrechnung des *RGB*-Datensatzes in Hue-Funktionswerte *H* erfolgt nach dem Formelsatz von Foley et al 1990:

$$\begin{aligned} H &= (B - G) / \Delta, & \text{für } R = \max(R, G, B), \\ H &= 2 + (R - B) / \Delta, & \text{für } G = \max(R, G, B), \\ H &= 4 + (G - R) / \Delta, & \text{für } B = \max(R, G, B), \\ & \text{mit } \Delta = \max(R, G, B) - \min(R, G, B). \end{aligned}$$

Für die Temperaturbestimmung mit Flüssigkristallen ist die eindeutige Zuordnung der Hue-Werte bezüglich der Temperatur erforderlich, d. h. die Flüssigkristalle müssen kalibriert werden,  $T = T(H)$ . Die Kalibrierung muss unter den gleichen geometrischen und optischen Bedingungen wie bei den Experimenten erfolgen, da es sonst zu Fehlinterpretationen bei der Farbanalyse kommen kann. Über den gesamten Temperaturarbeitsbereich der Kristalle werden Farbaufnahmen gemacht (Breitband-Methode) und ausgewertet. In Abbildung 3 wird die Temperaturverteilung als Funktion des Farbwertes für die Flüssigkristalle BM/R30/20W dargestellt.

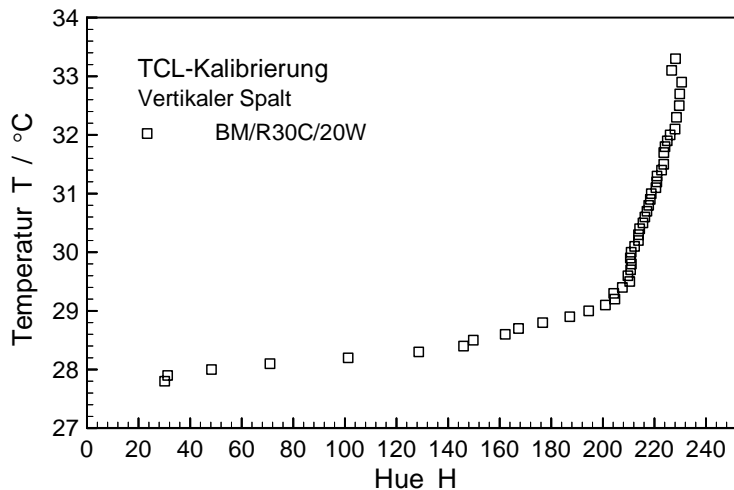


Abb. 3: Flüssigkristall-Kalibrierung

Die Rotstarttemperatur  $T \approx 27.8 \text{ °C}$  liegt bei einem Hue-Wert von  $H \approx 30$ . Werte oberhalb einer Temperatur  $T = 33.0 \text{ °C}$  können nicht mehr exakt analysiert werden. Das Farbverhalten der dispergierten Flüssigkristalle weicht erheblich von den Herstellerangaben ab, welche sich auf die Standardanwendung der Oberflächentemperaturmessung beziehen, siehe Hallcrest 2003.

Die Isothermen der Konvektionsströmung werden über eine Farbanalyse mittels digitaler Bildverarbeitung bestimmt. Das Strömungsfarbbild wird in einzelne Abfragefenster unterteilt, innerhalb welcher die Hue-Mittelwerte ermittelt werden. Mittels der Daten der Flüssigkristall-Kalibrierung werden die Temperaturen dann den zugehörigen Abfragfenstern zugewiesen.

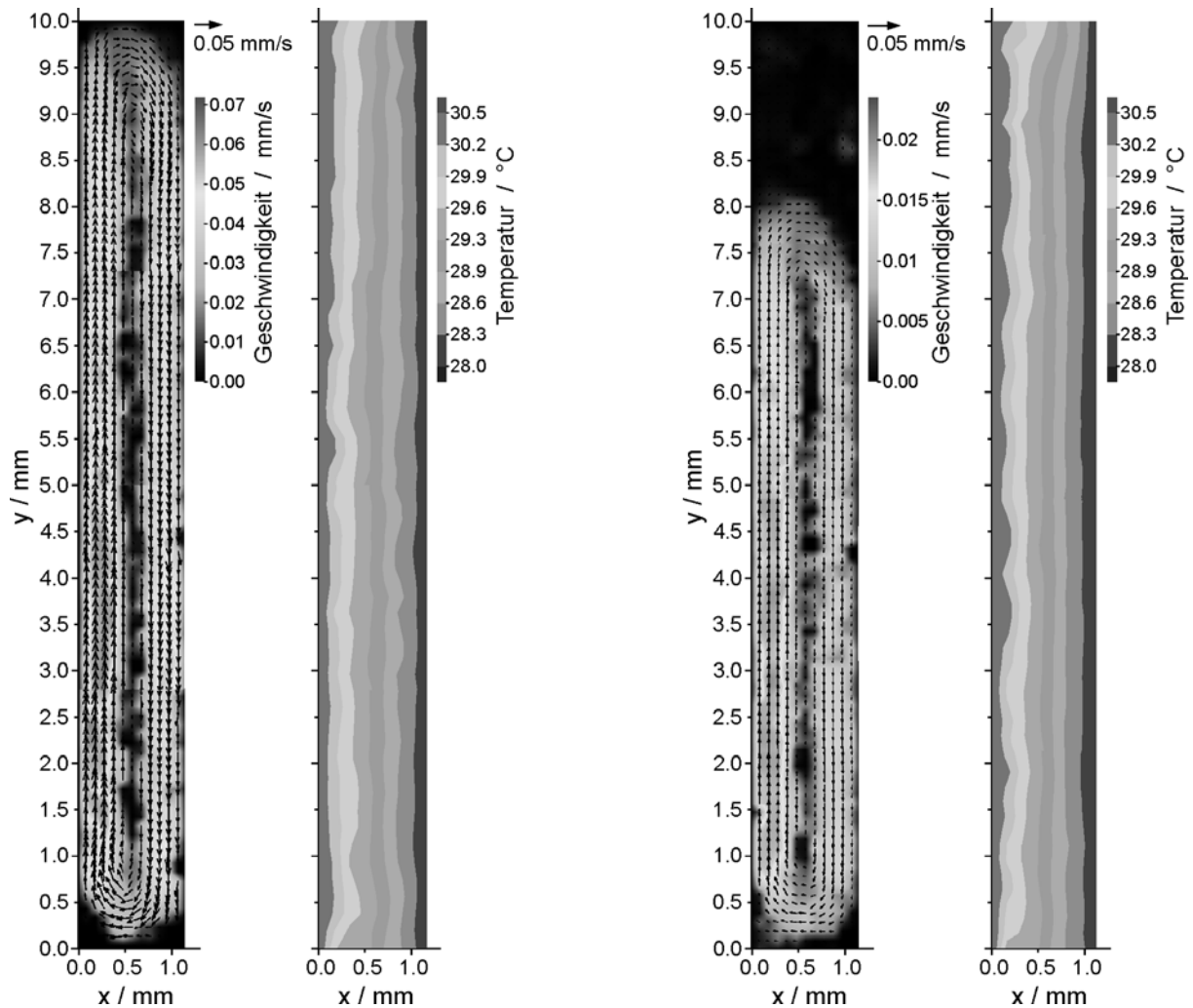
Die Messgenauigkeit der Temperaturmessung hängt insbesondere von der Flüssigkristall-Kalibrierung ab. Ein Vergleich zwischen mehreren Kalibrierungen zeigt, dass die Temperaturmessung zwischen 1% im sichtbaren Rot-Bereich und 5% im sichtbaren Blau-Bereich variiert. Die Angaben gelten für den verwendeten Temperaturarbeitsbereich 28 bis 30.5 °C.

### Ergebnisse und Zusammenfassung

In der Abbildung 4 sind die Konvektionsströmungen der Glycerin/Wasser-Lösungen 30% ( $Pr = 18$ ) und 60% ( $Pr = 78$ ) dargestellt. Die horizontale Temperaturdifferenz ist in beiden Fällen  $\Delta T = 2.5 \text{ K}$ , wobei die rechte Seite mit  $T_{min} = 28 \text{ °C}$  die kältere Seite ist. Die Grashof-Zahl beträgt bei der 30%-Lösung  $Gr = 3640$  und bei der 60%-Lösung  $Gr = 300$ .

Die thermische Konvektionsströmung verläuft aufgrund der horizontalen Dichtedifferenz im Fluid an der beheizten Seitenwand aufwärts und an der gekühlten Seitenwand der Messzelle abwärts. In der Mitte gleiten die beiden vertikalen Fluidschichten gegeneinander. Bei der 30%-Lösung erstreckt sich der längliche Konvektionswirbel über die gesamte Messzellenhöhe. Bei der 60%-Lösung wird eine Wirbelhöhe von  $h_w \approx 8 \text{ mm}$  erreicht. Die Geschwindigkeiten sind relativ klein, die untersuchten Strömungen liegen im Stokeschen Bereich. Das Geschwindigkeitsprofil bez. der horizontalen Achse des Spalts ist parabelförmig.

Der Mechanismus des Wärmetransportes von der warmen zur kalten Seite durch Konvektion ist für das Verhältnis  $H \gg B$  bei den gegebenen Kennzahlen relativ schwach. Das Temperaturprofil in horizontaler Richtung ist näherungsweise linear.



$Pr = 18, \Delta T = 2.5 \text{ }^\circ\text{C}, Gr = 3640$   
30%-Glyzerin/Wasser-Lösung

$Pr = 78, \Delta T = 2.5 \text{ }^\circ\text{C}, Gr = 300$   
60%-Glyzerin/Wasser-Lösung

Abb. 4: Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung der thermischen Konvektionsströmung

Mit den Experimenten konnte gezeigt werden, dass das PIV/T System ein geeignetes Verfahren zur Untersuchung von thermischen Konvektionsströmungen in schmalen Zellen ist. Simultan wurden die Größen Geschwindigkeit und Temperatur im Strömungsfeld quantitativ erfasst. Es konnte festgestellt werden, dass bereits bei geringen Temperaturdifferenzen eine stationäre Konvektionsströmung innerhalb der Messzelle entsteht und sich ein länglicher Konvektionswirbel ausbildet. Für die Zukunft planen wir, die beschriebenen Experimente fortzuführen, indem wir den Bereich der verwendeten Kennzahlen, insbesondere die  $Gr$ -Zahl, erweitern, um mögliche oszillierende bzw. turbulente Zustände zu erforschen. Ein anderer zu variierender Parameter für zukünftige Experimente ist die Neigung der Messzelle in Bezug auf den Vektor der Schwerkraft  $\vec{g}$ .

## Literatur

- Bühler, K., 2003: Special solutions of Boussinesq-equations for free convection flows in a vertical gap. *Heat and Mass Transfer*, 39, 632-638
- Chandrasekhar, S., 1977: *Liquid crystals*. Cambridge University Press
- Ciofalo, M., Signorino, M., Simiano M., 2003: Tomographic Particle-image velocimetry and thermography in Rayleigh-Bénard convection using suspended thermochromic liquid crystals and digital processing. *Experiments in Fluids*, 34, 156-172
- de Gennes, P. G.; Prost, J., 1993: *The Physics of Liquid Crystals*. Second Edition. Clarendon Press Oxford
- Foley, J. D.; Van Dam, A.; Feiner, S. K.; Hughes, J. F., 1990: *Computer graphics principles and practice*. Addison Wesley, 590-593
- Hallcrest Limited, 2003: *Product Information: Thermochromic Liquid Crystal*.
- Praisner, T., Sabatino, D. R., Smith, C. R., 2001: Simultaneously combined liquid surface heat transfer and PIV flow-field measurements. *Experiments in Fluids*, 30, 1-10
- Pochan, J. M., Marsh, D. G., 1972: Mechanism of Shear-Induced Structural Changes in Liquid Crystals-Cholesteric Mixtures. *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 57, No. 3, 1193-1200
- Wolinski, T. R., Jarmolik, A., Bock, W. J., 1995: Development of Fiber Optic Liquid Crystal Sensor for Pressure Measurement, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol. 48, No. 1. 1-6
- Wuttke, S., 2004: Mikroreaktoren erhalten Einzug in die Produktion von Feinchemikalien. *Chemie Technik* Nr. 7, 36-40