

## Simultane Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldmessungen in Rayleigh-Bénard Konvektion bei großen Aspektverhältnissen

### Simultaneous measurement of the velocity and temperature field in Rayleigh-Benard convection at high aspect ratios

**Sebastian Moller<sup>1</sup>, Christian Resagk<sup>1</sup>, Dominik Baczyzmalwski<sup>2</sup>, Julian Massing<sup>2</sup>,  
Christian Kähler<sup>2</sup> und Christian Cierpka<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Technische Universität Ilmenau, Am Helmholtzring 1, 98693 Ilmenau

<sup>2</sup>Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Rayleigh-Bénard Konvektion, PIV, TLC

Rayleigh-Bénard convection, PIV, TLC

#### Zusammenfassung

Thermische Konvektion ist für viele technische Anwendungen von großem Interesse, weshalb diese intensiv erforscht wird. Eine kanonische Anordnung zu deren Untersuchung stellt das Rayleigh-Bénard Experiment dar, bei dem sich zwischen einer Heizplatte an der Unterseite und einer Kühlplatte an der Oberseite eine thermisch getriebene Strömung einstellt. Dieses Experiment wurde in den letzten Jahrzehnten vielfach durchgeführt, wobei große Bereiche charakteristischer Parameter abgedeckt wurden. Aktuell stehen vor allem die Untersuchungen großer Aspektverhältnisse, welche mit einem geringen Abstand zwischen den isothermen Platten einhergehen, im Fokus, da bei diesen großskalige Strömungen unterdrückt werden und somit die Auswirkungen kleiner Strukturen besser analysiert werden können. Da Geschwindigkeits- und Temperaturfelder in thermischer Konvektion voneinander abhängen und die Art der Korrelation jedoch noch nicht vollständig geklärt ist, sind simultane Messungen dieser Größen von zentralem Interesse. Zu derartigen Messungen können temperatursensitive Partikel eingesetzt werden, die mittels Particle Image Velocimetry (PIV) auch gleichzeitig zur Bestimmung von Geschwindigkeiten genutzt werden können. Im vorliegenden Fall wurden zu diesem Zweck sogenannte thermochromic liquid crystals (TLCs) verwendet, die in Abhängigkeit der Temperatur unterschiedliche Farben aufzeigen. Die zentrale Aufgabe der vorliegenden Studie war es, zu prüfen, ob die Strukturen im Temperaturfeld thermischer Konvektion bei großen Aspektverhältnissen mit den Flüssigkristallen zeitlich und räumlich hoch aufgelöst abgebildet werden können. Für die Messmethode wurde ein mögliches Vorgehen zur Kalibration erarbeitet, welches sich dadurch auszeichnet, dass es die unterschiedliche Erscheinung der Flüssigkristalle unter der Beobachtung aus verschiedenen Blickwinkeln berücksichtigt. Außerdem wurde untersucht, inwiefern Reflektionen und Messrauschen minimiert werden können. Letztendlich konnte bei der Kalibration eine Unsicherheit bezüglich der Temperatur in der Größenordnung von 0,1K erreicht werden, wodurch bei Messungen in thermischer Konvektion die Strukturen im Temperaturfeld deutlich sichtbar gemacht werden konnten.

## 1. Einleitung

Da sich mit Rayleigh-Bénard Konvektion eine Vielzahl von natürlichen Erscheinungen thermisch angetriebener Strömungen abbilden lässt, steht diese schon seit geraumer Zeit im Fokus der Wissenschaft. Hierfür sei als ein wichtiges Beispiel die Entstehung von Strömungen in der Erdatmosphäre genannt, welche zweifelsohne für viele Anwendungen von großer Bedeutung sind. Zum Verständnis der Physik dieser Strömungen ist eine Untersuchung des Geschwindigkeits- und Temperaturfelds unumgänglich, weil diese den Transport von Masse und Wärme bestimmen. Da jene sich aber gegenseitig beeinflussen, besteht die Herausforderung, deren Korrelation zu verstehen, wofür simultane Messungen notwendig sind. Zu diesem Zweck wurden in der Vergangenheit bereits verschiedene Methoden verfolgt, deren Anwendungsmöglichkeiten durch die jeweiligen Vor- und Nachteile bestimmt werden. Eine elegante Methode ist es, zur Strömung temperatursensitive Partikel hinzuzufügen, die in Abhängigkeit der Temperatur optisch unterschiedlich erscheinen und somit als Indikator zur Temperaturmessung herangezogen werden können. Unter der Voraussetzung, dass diese Partikel der Strömung schlupffrei folgen, können deren Bewegungen mittels Kreuzkorrelation (PIV) auch dazu genutzt werden, lokale Strömungsgeschwindigkeiten zu bestimmen. Eine Methode, welche sich dieses Prinzip zunutze macht, besteht darin, den zeitlichen Bewegungsablauf von thermochromen Flüssigkristallpartikeln im Strömungsfeld zu verfolgen. Die simultane Temperaturmessung wird dadurch ermöglicht, dass die Partikel mit weißem Licht beleuchtet werden und je nach Temperatur unterschiedliche Wellenlängen reflektieren, was mit einer variierenden farblichen Erscheinung einhergeht. Während andere Arten von temperatursensitiven Partikeln wie beispielsweise temperature sensitive fluorescent particles (TSFP) (Massing et al. 2016) oder thermochromic phosphorescent particles (TPP) (Fond et al. 2012) für große Temperaturbereiche eingesetzt werden können, zeichnen sich die Flüssigkristalle (Dabiri 2009) dadurch aus, dass sie in einem kleinen Intervall temperaturabhängige Eigenschaften aufweisen, wobei dieses bei der Herstellung der Partikel genau eingestellt werden kann. Da in thermischer Konvektion in vielen Fällen eher geringe Temperaturunterschiede vorliegen, sind die Flüssigkristalle für präzise Messungen in dieser Art von Strömung geeignet, da sie die kleinen Temperaturintervalle mit einer hohen Auflösung abdecken können. In der vorliegenden Studie sollte deshalb geprüft werden, ob Flüssigkristalle für simultane Temperatur- und Geschwindigkeitsmessungen eingesetzt werden können, wobei der Schwerpunkt auf einer zuverlässigen Kalibration bezüglich der Temperaturmessung liegt. Basierend auf dieser Kalibration werden auch erste Ergebnisse von Temperaturmessungen in thermischer Konvektion mittels Flüssigkristallen aufgezeigt, um deren Anwendbarkeit zu verdeutlichen.

## 2. Experimenteller Aufbau

Um Messungen mit Flüssigkristallen in thermischer Konvektion durchführen zu können, ist zunächst ein Aufbau notwendig, mit dem derartige Strömungen generiert und von mehreren Seiten beobachtet werden können. Die für die vorliegenden Untersuchungen eingesetzte Messzelle ist in Abbildung 1 dargestellt und weist Abmessungen von  $0,6\text{m} \times 0,6\text{m} \times 0,024\text{m}$  und somit ein Aspektverhältnis von  $\Gamma=L/H=25$  auf. Als Trägermedium in der Messzelle befindet sich deionisiertes Wasser, welches von unten mit einer elektrischen Heizplatte mit einer maximalen Heizleistung von  $P_{el}=1550\text{W}$  beheizt wird, während die Kühlung an der Oberseite durch temperiertes Kühlwasser vorgenommen wird. Dieses fließt zwischen zwei optisch transparenten Platten oberhalb der Messzelle und wird im Kreislauf durch einen Thermostaten befördert, welcher die einzustellende Temperatur des Wassers regelt.

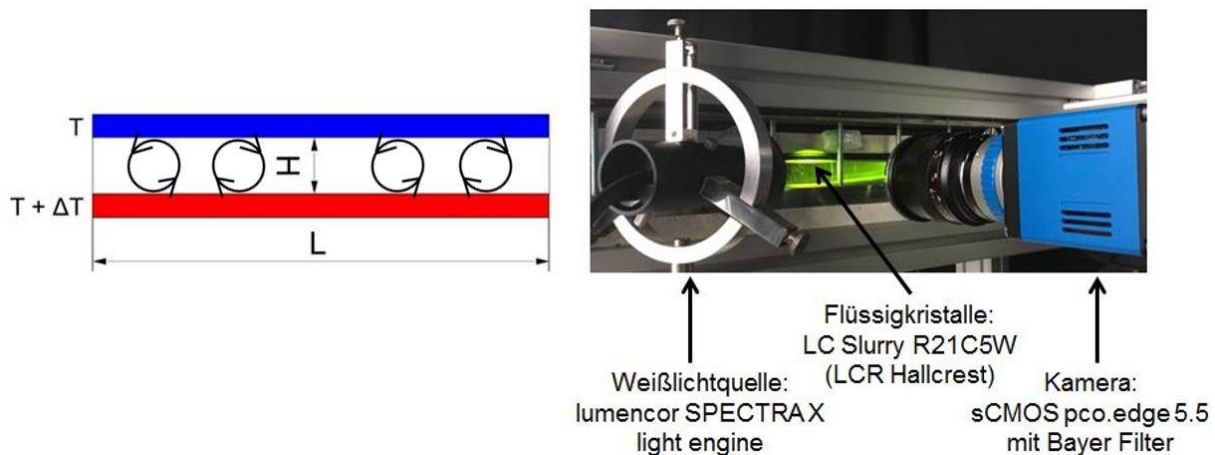


Abb. 1: Prinzip (links) und Experimentalaufbau (rechts) zur Untersuchung thermischer Konvektion.

Die Oberflächen der isothermen Platten sind mit jeweils vier Pt100 Widerstandsthermometern ausgestattet, sodass deren Temperaturen an verschiedenen Stellen überprüft werden können. Die beiden Platten, welche den Kühlwasserstrom umgeben, sind aus Glas, um auch Geschwindigkeits- und Temperaturfelder in horizontalen Ebenen von oben mit einer Kamera analysieren zu können. Für die hier dargestellten Untersuchungen wird die Messzelle von der Seite mit einer Weißlichtquelle (Lumencor Spectra X light engine) beleuchtet, bei welcher die Charakteristik des emittierten Lichtspektrums mit sechs voneinander unabhängigen LEDs eingestellt werden kann. Somit kann mithilfe dieser Lichtquelle das Signal-Rausch-Verhältnis trotz der nichtlinearen Empfindlichkeit der Flüssigkristalle und Kamera über den gesamten Messbereich möglichst konstant gehalten werden (Segura 2015). Bei zukünftigen Messungen sollen genauere Spektralanalysen durchgeführt werden, um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu gewährleisten und das Signal-Rausch-Verhältnis noch zu steigern. Die Messzelle wird ebenfalls von der Seite mit einer Farbkamera vom Typ PCO edge 5.5 mit integriertem Bayer-Sensor beobachtet, um die Farbsignale der Flüssigkristalle auswerten zu können. Gegenüber einem Messaufbau mit mehreren Kameras und Spektralfiltern hat dies den Vorteil, dass eine aufwändige Kalibration der Kameras untereinander entfällt. Der temperaturaktive Bereich der Flüssigkristalle, welche bei der Durchführung des Experiments eingesetzt werden, reicht nach Herstellerangaben von 21°C bis 26°C auf. Bei der Start-Temperatur von 21°C erscheinen diese zunächst rot und durchschreiten das sichtbare Farbspektrum, bis sie bei 26°C als violett wahrzunehmen sind. Da das Antwortverhalten der Flüssigkristalle aber stark vom Winkel zwischen der Lichtquelle und Kamera abhängt (Nasarek 2010), ist es zunächst wichtig, diesen Winkel so zu bestimmen, dass die Unterschiede in der farblichen Erscheinung im anvisierten Temperaturbereich zum Tragen kommen, wofür sich beim vorliegenden Experimentalaufbau ein Winkel von 40° als geeignet erwies. Dieser muss für die Kalibrierung und die anschließenden Messungen beibehalten werden, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

### 3. Kalibration der Temperaturmessung

Um mit den Flüssigkristallen Temperaturmessungen durchführen zu können, muss das Verfahren kalibriert werden. Dabei muss ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Temperatur und der farblichen Erscheinung der Flüssigkristalle hergestellt werden. Zu diesem Zweck wurden bei der Kalibration die Temperaturen der Heiz- und Kühlplatte bestmöglich angeglichen und mit den Pt100 Widerstandsthermometern überprüft. Aufgrund der Tatsache, dass an der Heizplatte nur die zugeführte elektrische Leistung eingestellt werden kann, kann dies nur dadurch realisiert werden, dass die Leistung der Heizplatte und die Temperatur am Thermostat für die Kühlplatte kontinuierlich verändert werden. Die Temperaturen an den Platten wurden von etwa 19°C bis 25,5°C in Schritten von etwa 0,3°C erhöht, wobei die bei jedem Temperaturschritt aufgenommenen Partikelbilder abgespeichert wurden. Bei der Auswertung der

Farbsignale der Flüssigkristalle wurde der komplette betrachtete Bereich zunächst in viele kleine Auswertefenster unterteilt, in denen die Intensitäten der roten, grünen und blauen Farbanteile jeweils gemittelt wurden. Hierbei wurden Schwellwerte gesetzt, um aufgrund von Reflexionen Pixel mit stark überhöhten Farbintensitäten sowie zu geringe Intensitäten des Hintergrunds zu filtern. Stellt man die Mittelwerte der Auswertefenster gegenüber, so lässt sich feststellen, dass diese deutlich schwanken. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das von den Flüssigkristallen reflektierte Licht aus unterschiedlichen Winkeln auf die Kamera trifft und der Beobachtungswinkel die farbliche Erscheinung beeinflusst. Bildet man von den mittleren Intensitäten der Farbanteile in den einzelnen Auswertefenster nun für den kompletten betrachteten Bereich und über viele Zeitpunkte hinweg erneut den Mittelwert, so ergibt sich aber eine deutliche Abhängigkeit der farblichen Erscheinung von der Temperatur, was in der Abbildung 2 zu sehen ist.

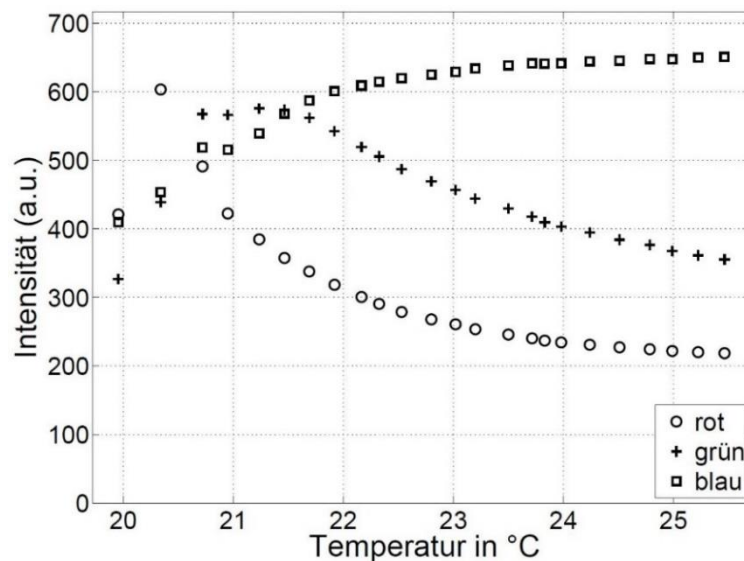


Abb. 2: Zeitlich und räumlich gemittelte Intensitäten der roten, grünen und blauen Farbanteile vom reflektierten Licht der Flüssigkristalle.

Diese Abbildung gibt zu erkennen, dass vor allem der rote Anteil mit zunehmender Temperatur abfällt, während der blaue Anteil deutlich ansteigt. Bei höheren Temperaturen ( $T > 24^\circ\text{C}$ ) wird die Änderung der einzelnen Intensitäten immer geringer, was sich letztendlich darin äußert, dass die Partikelbilder alle stark bläulich erscheinen und sich für verschiedene Temperaturen kaum voneinander unterscheiden lassen. So ändert sich beispielsweise die Intensität für den roten Farbanteil zwischen  $21^\circ\text{C}$  und  $22^\circ\text{C}$  um etwa 110 Einheiten, während zwischen  $24^\circ\text{C}$  und  $25^\circ\text{C}$  nur noch eine Änderung von ungefähr 15 Einheiten vorliegt. Trotzdem kann festgehalten werden, dass aus dem Farbsignal der Partikel eine eindeutige Zuordnung zur Temperatur gewonnen werden kann. Wie bereits angedeutet, muss zwischen jenen ein Zusammenhang gefunden werden, mit dem sich aus den Intensitäten der roten, grünen und blauen Farbanteile die vorherrschenden Temperaturen berechnen lassen. Hierfür wurden viele verschiedene Ansätze getestet, an dieser Stelle wird aber lediglich auf denjenigen eingegangen, welcher die besten Ergebnisse liefert und somit auch für die weiteren Betrachtungen verwendet wird. Bei diesem Ansatz wird für jedes einzelne Auswertefenster ein Koeffizientenvektor berechnet, der eine Matrix mit den Informationen der einzelnen Farbanteile aus diesem Auswertefenster zu den entsprechenden Temperaturen überführt. Die Temperaturen sind bei der Kalibration dadurch gegeben, dass die mit den Pt100 Widerstandsthermometern gemessenen Temperaturen von der Heiz- und Kühlplatte gemittelt werden, da diese nicht exakt angeglichen werden konnten, wobei die Abweichung aber  $0,1^\circ\text{C}$  in keinem Fall überschritt. Die Berechnung erfolgt nach dem folgenden Prinzip:

$$\begin{pmatrix} 1 & R_1/B_1 & R_1/G_1 & G_1/B_1 & R_1^2/B_1^2 & R_1^2/G_1^2 & G_1^2/B_1^2 \\ 1 & R_2/B_2 & R_2/G_2 & G_2/B_2 & R_2^2/B_2^2 & R_2^2/G_2^2 & G_2^2/B_2^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & R_{m-1}/B_{m-1} & R_{m-1}/G_{m-1} & G_{m-1}/B_{m-1} & R_{m-1}^2/B_{m-1}^2 & R_{m-1}^2/G_{m-1}^2 & G_{m-1}^2/B_{m-1}^2 \\ 1 & R_m/B_m & R_m/G_m & G_m/B_m & R_m^2/B_m^2 & R_m^2/G_m^2 & G_m^2/B_m^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_{R/B} \\ C_{R/G} \\ C_{G/B} \\ C_{R^2/B^2} \\ C_{R^2/G^2} \\ C_{G^2/B^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_{m-1} \\ T_m \end{pmatrix}$$

Während in den einzelnen Zeilen der Matrix verschiedene Parameter kombiniert werden, wird entlang der Spalten die den Werten zugrunde liegende Temperatur geändert. Zum Zweck der Verständlichkeit sei darauf hingewiesen, dass die Indices in der Matrix die Nummerierung der eingestellten Temperaturschritte repräsentieren. Neben einer Konstante werden in Matrix nur Verhältnisse der roten (R), grünen (G) und blauen (B) Farbanteile in linearer und quadratischer Form berücksichtigt. Dies ist darin begründet, dass die Absolutwerte der einzelnen Farbanteile auch zeitlichen Schwankungen unterliegen, was die Lösung der algebraischen Gleichungen erschwert. Dadurch, dass aber nur Verhältnisse in die Berechnung eingehen, können jene Schwankungen besser kompensiert werden. Nachteilig ist, dass der Koeffizientenvektor für jedes Auswertefenster separat berechnet werden muss, was den Berechnungsaufwand erhöht. Dies muss aber in Kauf genommen werden, da die Farbanteile im kompletten betrachteten Bereich aufgrund verschiedener Beobachtungswinkel zu stark variieren, um den ganzen Bereich mit einem einzigen Koeffizientenvektor abdecken zu können. Natürlich könnten auch die Abhängigkeiten von der Bildposition in der Matrix mit berücksichtigt werden. Für eine zuverlässige Kompensation müssten aber Polynome sehr hoher Ordnung verwendet werden, wobei die Ergebnisse trotzdem wesentlich ungenauer als bei der Aufstellung einzelner Koeffizientenvektoren für die individuellen Auswertefenster sind. Um den für die Kalibration gewählten Ansatz bewerten zu können, sollten die Mittelwerte der berechneten Temperaturen über das komplette Messfenster und eine Vielzahl an Zeitpunkten hinweg den durch die Messungen vorgegebenen Temperaturen gegenüber gestellt werden. Diese und die Standardabweichung der berechneten Temperaturen bei den jeweiligen Temperaturschritten sind der Abbildung 3 zu entnehmen. Aus der Abbildung lässt sich schließen, dass die Mittelwerte der berechneten Temperaturen eine sehr geringe Abweichung zu den gemessenen Temperaturen aufweisen. Die mittlere Abweichung zu den Messwerten beträgt ungefähr  $\overline{\Delta T} = -0,001^\circ\text{C}$ , was andeutet, dass systematische Messfehler ausgeschlossen werden können.

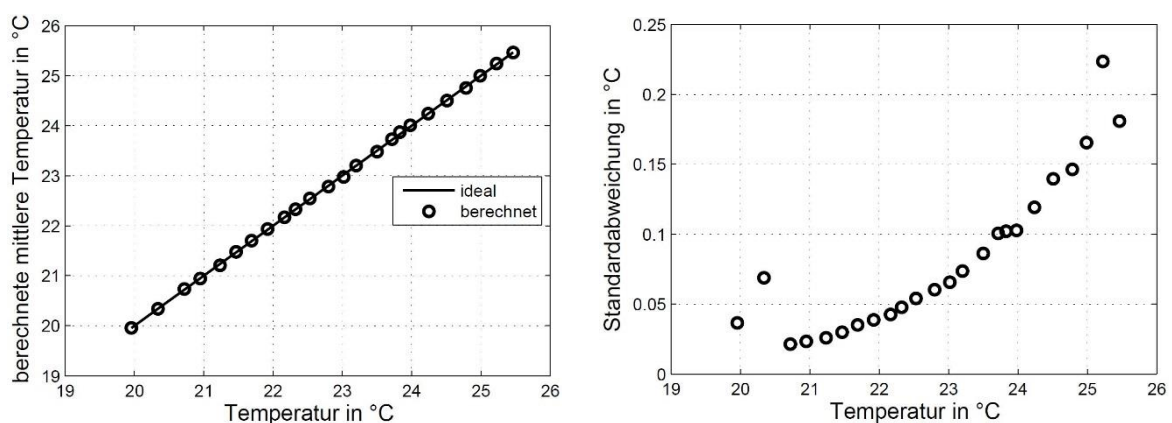


Abb. 3: Mittelwerte der berechneten Temperaturen (links) und deren Standardabweichungen (rechts).

Außerdem ist auch die Standardabweichung von der Temperatur der Auswertefenster vor allem bei den niedrigeren Temperaturen gering und steigt bei höheren Temperaturen zwar etwas an, wobei die Werte im Gesamten bei einer mittleren Standardabweichung von etwa  $\overline{\sigma_T} = 0,08^\circ\text{C}$  präzise Messungen in Aussicht stellen. Die größeren Standardabweichungen bei höheren Temperaturen basieren darauf, dass sich die Farbsignale der Flüssigkristalle in diesem Bereich nur noch geringfügig verändern, was in der Abbildung 2 zu sehen ist und die



Zuordnung zur Temperatur erschwert. Aus der Abbildung 3 lässt sich somit der Schluss ziehen, dass der zur Kalibration gewählte Ansatz gute Ergebnisse liefert und somit für Temperaturmessungen in thermischer Konvektion geeignet ist.

#### 4. Temperaturmessungen in thermischer Konvektion

Da sich nach Abbildung 2 vor allem im Bereich von 20°C bis 21°C starke Änderungen des Farbsignals ergeben, wurden die Temperaturen der isothermen Platten so eingestellt, dass sie im Mittel in diesem Bereich liegen. Bei einer Heizplattentemperatur von  $T_H=22,6^\circ\text{C}$  und einer Kühlplattentemperatur von  $T_K=18,1^\circ\text{C}$  ergeben sich deutlich erkennbare Strukturen, welche sich aufgrund der unterschiedlichen Farben der Flüssigkristalle in der Abbildung 4 deutlich hervorheben. Aus diesem Bild lässt sich mit der beschriebenen Kalibration das Temperaturfeld ableiten, welches zum Vergleich ebenfalls in der Abbildung 4 gegenüber gestellt wird.

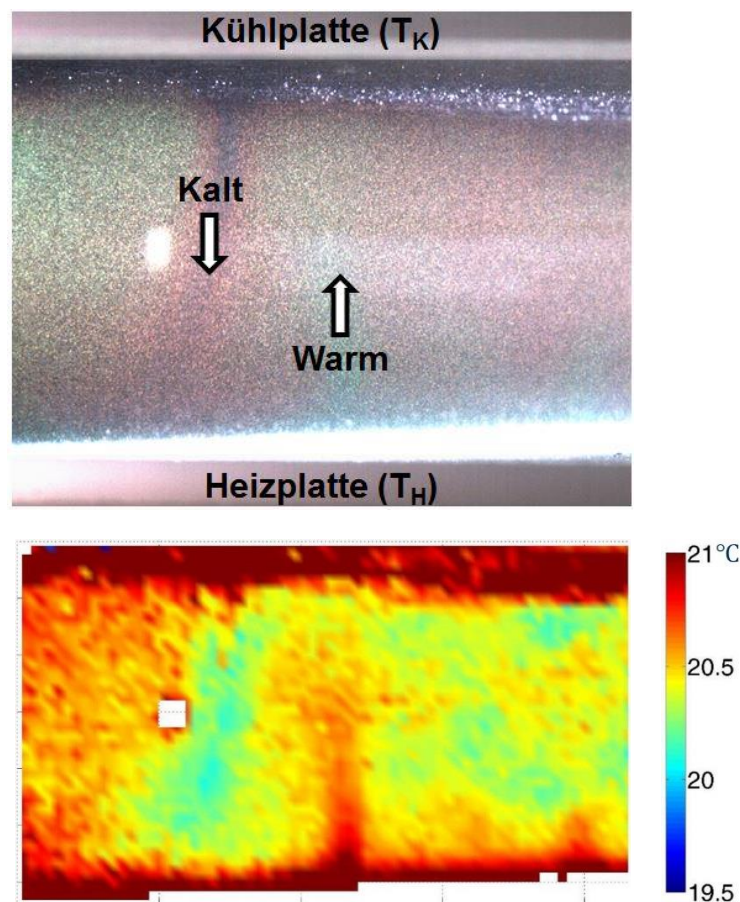


Abb. 4: Rohdaten der Flüssigkristalle (oben) und das resultierende Temperaturfeld (unten) bei  $T_H=22,6^\circ\text{C}$  und  $T_K=18,1^\circ\text{C}$ .

Abgesehen von den Fehlern aufgrund von Reflektionen direkt an den isothermen Platten und in einem kleinen, deutlich auffallenden Bereich im Zentrum lässt sich feststellen, dass die berechneten Temperaturen zwischen der Temperatur der Heiz- und Kühlplatte liegen. Weiterhin gibt der Vergleich zum Rohdatenfeld zu erkennen, dass sich auch die Strukturen mit heißem und kaltem Fluid abzeichnen. Die Ergebnisse bestätigen somit, dass die Kalibrierung der Temperaturmessung gelungen ist und sich thermische Konvektion mit den Flüssigkristallen analysieren lässt. Neben instantanen Temperaturfeldern lassen sich mit diesen auch Zeitreihen erfassen, um die Bewegung von thermischen Strukturen beobachten zu können. Dies lässt sich

an der Abbildung 5 nachvollziehen, in der die Rohdatenfelder den Temperaturfeldern für drei Zeitpunkte mit einem Abstand von jeweils zwei Sekunden gegenübergestellt sind.

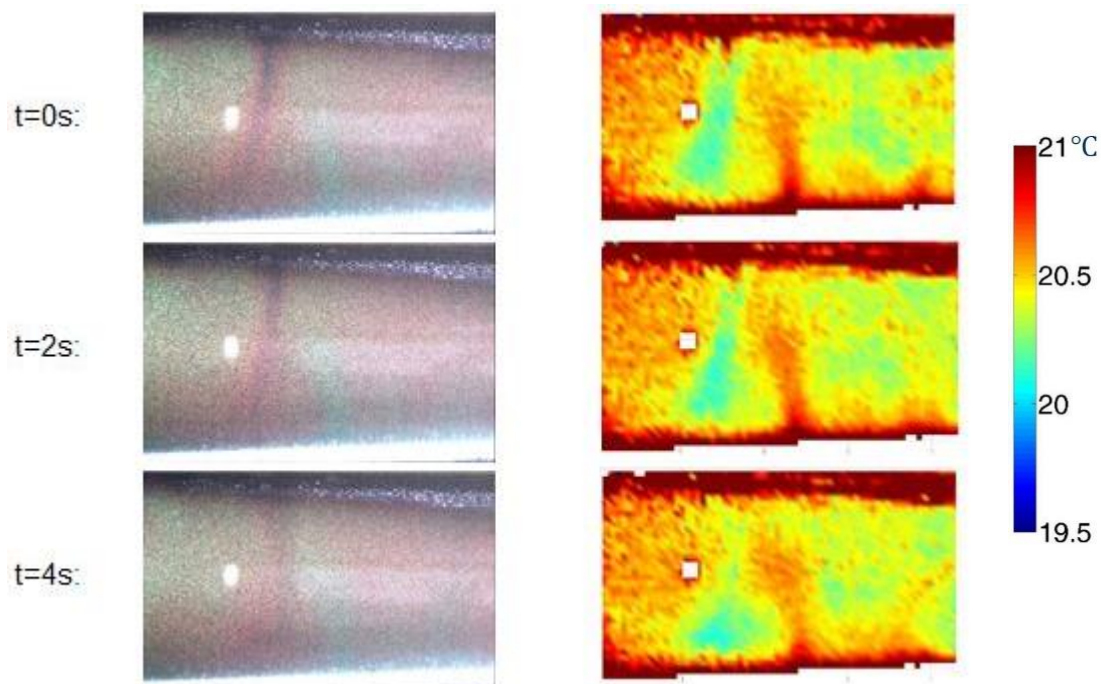


Abb. 5: Rohdatenfelder der Flüssigkristalle (links) und die berechneten Temperaturfelder (rechts) zu drei verschiedenen Zeitpunkten.

## 5. Technische Herausforderungen bei Messungen mit thermochromen Flüssigkristallen

Zur Beleuchtung einer Ebene in einem Messvolumen für Temperatur- oder Geschwindigkeitsmessungen werden in der Regel Laser verwendet, wobei der Laserstrahl mit einer Optik in eine Richtung aufgeweitet wird. Konventionelle Laser strahlen jedoch monochromatisches Licht ab, weshalb diese nicht zur Temperaturmessung mit Flüssigkristallen eingesetzt werden können, da das zugrunde liegende Prinzip weißes Licht erfordert. Somit müssen andere Lichtquellen zur Beleuchtung herangezogen werden, deren abgestrahltes Licht eine höhere Divergenz als Laserlicht aufweist. Damit man letztendlich einen schmalen Lichtschnitt erreicht, muss das divergierende Licht anhand von Blenden auf einen kleinen Bereich eingeschränkt werden, wodurch ein großer Teil der Leistung der Lichtquelle verloren geht. Bei Lichtquellen mit geringen Leistungen führt dies dazu, dass die Strahlungsintensität im resultierenden Lichtschnitt nicht groß genug ist, um Temperatur- oder Geschwindigkeitsmessungen anhand der Flüssigkristalle vornehmen zu können. Dieses Problem kann dadurch umgangen werden, dass das Messvolumen bewusst volumetrisch beleuchtet wird und dementsprechend auch volumetrische Messmethoden wie beispielsweise APTV (Astigmatism Particle Tracking Velocimetry) (Cierpka et al. 2010) eingesetzt werden. Bei den hier vorgestellten Messungen lag eine Volumenbeleuchtung vor, von welcher der im Bereich der Tiefenschärfe des Objektivs liegende Anteil letztendlich auf den Sensor der Kamera abgebildet wurde. Im vorliegenden Fall war die Tiefenschärfe größer als eine typische Längenskala thermischer Strukturen, weshalb durch die Mittelung in Tiefenrichtung ein erheblicher Messfehler auftritt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Kalibration aufgrund des homogenen Temperaturfeldes von diesem Aspekt unberührt bleibt und dieser nur reale Messungen betrifft.

Wie bereits erwähnt wurde, wirkt sich bei den Messungen mit Flüssigkristallen der Winkel zwischen der Richtung, aus der die Partikel beleuchtet werden und der Richtung, aus der jene beobachtet werden, auf deren farbliche Erscheinung aus. Bei der Kalibration wurde dies

dadurch berücksichtigt, dass für jedes Auswertefenster ein individueller Zusammenhang zwischen den mittleren Farbintensitäten und der Temperatur bestimmt wurde. Bei der Auswertung von sehr großen Flächen könnte es aber unter Umständen vorkommen, dass der Winkel zu stark variiert, um Temperaturmessungen bezüglich der kompletten Ebene durchführen zu können, weil die farbliche Erscheinung der Flüssigkristalle bei den extremen Winkeln keine Abhängigkeit von der Temperatur im angestrebten Bereich aufweist. Bei großen Winkeln wird der Temperaturbereich, in dem die Flüssigkristalle temperatursensitiv sind, nämlich enorm reduziert und außerdem auch etwas verschoben (vgl. Nasarek 2009). Somit muss die Größe des zu untersuchenden Bereichs immer auf die beschriebene Abhängigkeit der farblichen Erscheinung vom Winkel zwischen den Achsen der Lichtquelle und Kamera abgestimmt und im Einzelfall das Messverfahren angepasst werden.

## 6. Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die vorliegende Untersuchung die Anwendbarkeit von Flüssigkristallen für makroskopische Anwendungen bestätigt. Als Besonderheit der Flüssigkristalle sollte nochmals hervorgehoben werden, dass diese im Vergleich zu anderen temperatursensitiven Partikeln nur in einem kleinen Temperaturintervall unterschiedliche optische Eigenschaften besitzen und somit für genaue Messungen bei geringen Temperaturunterschieden eingesetzt werden können. Bei einer entsprechenden Auslegung des Messsystems und der Auswertungsalgorithmen sollen zukünftig auch simultane Geschwindigkeits- und Temperaturmessungen mit Flüssigkristallen durchgeführt werden können, um zum besseren Verständnis von Rayleigh-Bénard Konvektion bei großen Aspektverhältnissen beizutragen.

## Literatur

**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* 21:045401.

**Dabiri, D., 2009:** Digital particle image thermometry/velocimetry: a review. *Experiments in Fluids* 46:191-241.

**Fond, B., Abram, C., Heyes A.L., Kempf A.M., Beyrau, F., 2012:** Simultaneous temperature, mixture fraction and velocity imaging in turbulent flows using thermographic phosphor tracer particles. *Optics Express* 20:22118-22133.

**Massing, J., Kaden, D., Kähler, C., Cierpka, C., 2016:** Luminescent two-color tracer particles for simultaneous velocity and temperature measurements in microfluidics. *Measurement Science and Technology* 27:115301.

**Nasarek, R., 2010:** Temperature Field Measurements with High Spatial and Temporal Resolution Using Liquid Crystal Thermography and Laser Induced Fluorescence. [http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2096/2/Dissertation\\_Nasarek.pdf](http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2096/2/Dissertation_Nasarek.pdf) (13.06.2017).

**Segura, R., Rossi, M., Cierpka, C., Kähler, C.J., 2015:** Simultaneous three-dimensional temperature and velocity field measurements using astigmatic imaging of non-encapsulated thermo-liquid crystal (TLC) particles. *Royal Society of chemistry. Lab on a Chip*, 15, 660-663.