

Particle-Image-Velocimetry unter Einsatz von thermochromen Flüssigkristallen

T. Deters, S. Gliemann und C. Egbers

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus

E-Mail: deters@las.tu-cottbus.de - Homepage: <http://www.tu-cottbus.de/LAS>

Zusammenfassung

Die Untersuchung von temperaturabhängigen Strömungen in Fluiden erfordert eine geschwindigkeits- und temperaturlösende Messmethode.

Die hier beschriebene Messtechnik ist eine Kombination zwischen Particle-Image-Velocimetry (PIV) und der qualitativen Erfassung eines zweidimensionalen Temperaturfeldes unter Einsatz von thermochromen Flüssigkristallen. Die Messtechnik wird an einer mit einem Fluid befüllten und unter stationären Temperaturgradienten stehenden Kavität vorgestellt.

Motivation

In einer Vielzahl industrieller, technischer und physikalischer Experimente ist ein berührungsloses Messverfahren von Interesse, welches sowohl den räumlichen und zeitlichen Temperaturverlauf eines Fluids als auch seine Geschwindigkeitsverteilung wiedergibt. Die bekannten Verfahren PIV sowie die Laser-Doppler-Anemometry (LDA), kombiniert mit dem Einsatz von feldhaft angeordneten Thermoelementen, liefern nur eine unzureichende Ortsauflösung. Infrarotaufnahmen der herkömmlichen Art bieten lediglich die Temperaturfeldabtastung von Oberflächen. Thermochrome Farbstoffe können die Temperatur eines Fluids zwar in ganzen Volumen darstellen, zeigen jedoch nur ein eingeschränktes Farbspiel bei Temperaturänderungen, die als Farbumschläge zwischen zwei Farbwerten beobachtbar sind. Zudem finden die Farbumschläge innerhalb enger Temperaturgrenzen statt. Sehr viel besser zu handhaben sind die Möglichkeiten, die thermochrome Flüssigkristalle (TLC) dem Anwender bieten: Eine Mischung aus Fluid und TLC erfüllt das gesamte Messvolumen und zeigt in einem bestimmten Temperaturbereich ein charakteristisches Farbspektrum, das mit Hilfe von Farbkameras direkt zur Bildgebung benutzt werden kann. Der Temperaturbereich läßt sich zudem in weiten Bereichen durch die Mischung verschiedener Flüssigkristalle einstellen.

Physikalisch-technische Grundlagen

Die wichtigsten physikalischen Aspekte zum Verständnis der Particle-Image-Velocimetry unter Einsatz von thermochromen Flüssigkristallen werden im Folgenden zusammenfassend präsentiert. Eine umfassende Darstellung der relevanten Grundlagen für die PIV-Messtechnik findet sich bei Raffel, Willert, Kompenhans [1]. Der Einsatz thermochromer Flüssigkristalle bietet die Möglichkeit, eine berührungslose Ganzfeldmessung der Temperatur von Flüssigkeiten durchzuführen.

Flüssigkristalle bestehen aus länglichen, stäbchen- bis scheibenförmigen, organischen Molekülen und bilden einen uneinheitlichen Aggregatzustand zwischen kristallinem Festkörper und Flüssigkeit. Ein

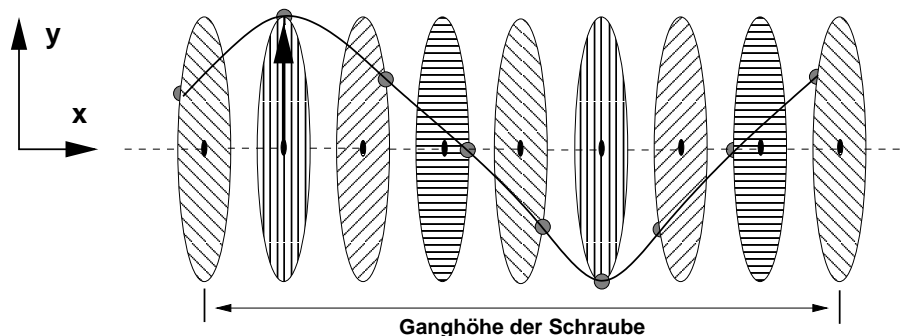


Abbildung 1: Modell eines Flüssigkristalls in cholesterischer Mesophase: Die Schraffuren deuten die Vorzugsrichtungen der Moleküle an. Der Vektor der Vorzugsrichtung beschreibt von Schicht zu Schicht eine Schraubenlinie.

Kristall besitzt einen 3-dimensionalen periodischen Aufbau, der durch eine Einheitszelle als Grundbaustein des gesamten Kristalles charakterisiert werden kann. Die zumeist unterschiedlichen Bindungslängen im atomaren Aufbau der Einheitszelle sind die Ursache für verschiedene Anisotropien, so z. B. die doppelbrechenden Eigenschaften von vielen natürlich vorkommenden Mineralen bei Bestrahlung mit Licht. Bedingt durch die periodische Ordnung in Kristallen läßt sich eine große Anzahl von Symmetrieeoperationen durchführen. Anders gelagert ist der Fall in Flüssigkeiten: Dort existieren keine einheitlichen Bindungslängen und nur eine Nahordnung der Atome. Flüssigkristalle vermögen lockere 2-dimensionale Schichten auszubilden, die gegeneinander, wie bei einer Flüssigkeit, verschieblich sind. Sie nehmen so eine Stellung zwischen Kristall und Flüssigkeit ein (Mesophase). Es existieren verschiedene Mesophasen (smektisch, cholesterisch/chiral-nematisch, nematisch), die sich durch die Anordnung der Schichtebenen zueinander unterscheiden. Thermochrome Flüssigkristalle befinden sich in einer cholesterischen Mesophase, die in Abbildung 1 skizziert ist. Die Längsachsen der Moleküle in einer Flüssigkristallschicht ordnen sich im zeitlichen Mittel in einer Vorzugsrichtung an. Die Vorzugsrichtung ändert sich von Schicht zu Schicht um einen temperaturabhängigen Winkelbetrag, der gleichzeitig den Abstand zwischen den Schichten beschreibt. Der Vektor der Vorzugsrichtungen beschreibt damit in der Schichtabfolge eine schraubenförmige Kurve. Gleichfalls wird die Permittivität des Mediums und damit der Brechungsindex ($n \sim \sqrt{\epsilon}$) durch die Vorzugsrichtung der Schichten moduliert. Der Brechungsindex in y-Richtung n_y weist damit ein periodisches Verhalten auf. Die kleinen Änderungen der Brechungsindices führen wiederum zur teilweisen Reflexion von Weißlicht an jeder Schicht, wobei die Reflexionsanteile miteinander interferieren. Eine konstruktive Reflexion findet bei einem optischen Gangunterschied von $\Delta s = m\lambda_0$ mit $m = 1, 2, \dots$ statt. Die Größe m entspricht dabei der Anzahl der parallel orientierten Schichten, an denen das Licht reflektiert werden kann. $\Delta s = \lambda_0$ ist in der Abbildung 1 die halbe Ganghöhe der Schraubenlinie. Eine Wellenlänge λ_0 des einfallenden Weißlichtes wird daher bevorzugt reflektiert, d. h. dem Betrachter erscheint der Flüssigkristall farbig. Die Ganghöhe bzw. Δs ist direkt abhängig von der Temperatur, und es ergibt sich die funktionale Abhängigkeit der Wellenlänge von der Temperatur. Bedingt durch den Aufbau der Flüssigkristalle erniedrigt sich Δs interessanterweise bei Temperaturerhöhung.

Da das Temperaturverhalten reversibel ist, eignen sich thermochrome Flüssigkristalle zur mehrfachen Temperaturfeldbestimmung bei Einsatz eines Weißlicht-Schnittes durch ein Testvolumen. Der Auswahl der thermochromen Partikel kommt eine besondere Bedeutung zu. Die hier verwendeten mikro-verkapselten Flüssigkristalle zeigen ihre typische selektive Reflektivität in Bandbreiten zwischen $0.5^\circ\text{C} \leq \Delta\vartheta \leq 60^\circ\text{C}$. Die Bandbreite wiederum besitzt einen typischen Startwert der Temperatur für Rotreflexion im Bereich von $-30^\circ\text{C} \leq \vartheta_S \leq 200^\circ\text{C}$. Startwerte und Bandbreiten sind durch die Komposition von Mischungen verschiedener Flüssigkristalle in weiten Bereichen verschieblich. Eine Bestimmung von Bandbreite und Startwert ist normalerweise für jede neu bereitete Suspension aus

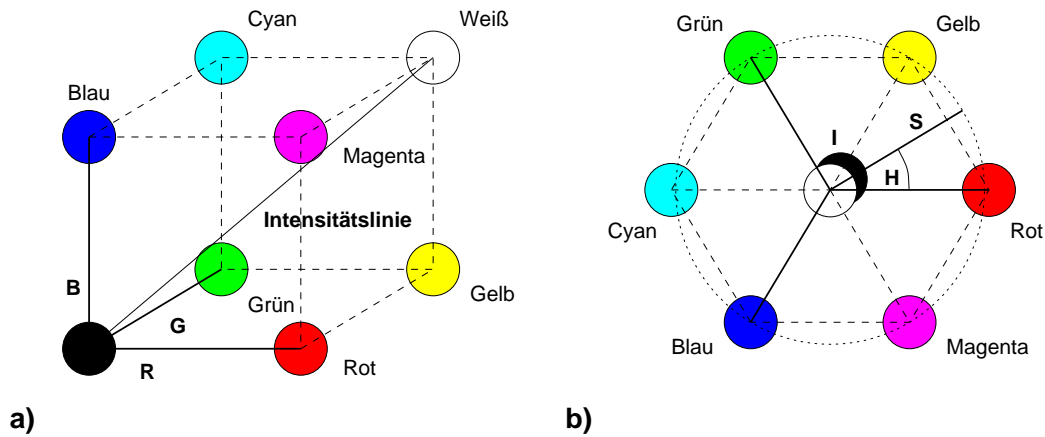


Abbildung 2: Die Farbinformationen eines Farbbildes lassen sich mit unterschiedlichen Koordinatensystemen beschreiben: a) RGB-Darstellung in einem kartesischen Koordinatensystem, b) HSI-Darstellung in einem Zylinderkoordinatensystem.

gekapseltem Flüssigkristall und Trägermittel notwendig. Ein weiteres Problem ist der hohe Streulichtanteil von weißem Licht an den Mikro-Verkapselungen, der wiederum für PIV-Aufnahmen dringend erforderlich ist. Die Partikelgröße muß daher an die Bedürfnisse beider Meßsysteme angepaßt werden. Sie liegt typischerweise im Bereich von 5 bis 30 μm und garantiert eine kurze Reaktionszeit der Flüssigkristalle auf Temperaturänderungen von ca. 50 ms. Die niedrige Konzentration in der Suspension und eine dem Wasser ähnliche Dichte ($< 1,2 \frac{kg}{l}$) der Partikel stellt sicher, dass sich weder die physikalischen Eigenschaften noch die Strömungsverhältnisse signifikant ändern. Weitere interessante Tatsachen sind z. B. aus [3, 4] zu entnehmen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verarbeitung der Farbbilder zu einem Temperaturbild. Die Farbkamera stellt drei Schwarzweiß-Bilder für die Grundfarben Rot, Grün und Blau her. Dazu werden Farbfilter mit hoher Güte in der Kamera integriert. Durch additive Farbmischung können alle Helligkeits- und Farbnuancen mit Hilfe der drei Grundfarben dargestellt werden. Jeder Farbton wird in einem 3-dimensionalen kartesischen Farbraum angeordnet (siehe Abbildung 2 a). Die Temperatur der Flüssigkristalle wird mit Hilfe aller drei Farbwerte berechnet. Die Intensitätsprofile der einzelnen Grundfarben sind Gaußkurven-ähnlich, entsprechend den Filterkennlinien der Kamera und der Farbempfindlichkeit der Bildsensoren, und können daher wegen Mehrdeutigkeit nicht benutzt werden. Eine Transformation der Bildinformation aus dem RGB- in den HSI-Farbraum (Hue, Saturation, Intensity oder Chrominanz, Farbsättigung, Intensität) liefert eine monoton steigende Abhängigkeit der Chrominanz von der Temperatur. Die Transformation ist leicht nachzuvollziehen, wenn das RGB-System entlang der Intensitätslinie zwischen Weiß- und Schwarzpunkt betrachtet wird (Abbildung 2 b). Die Chrominanz ist dementsprechend der Polwinkel in einem um die Intensitätslinie angeordneten Zylinderkoordinatensystem. Der Radius beschreibt dann die Farbsättigung. Wie stark die Farbinformationen, die die Flüssigkristalle liefern, vom Betrachtungswinkel zur Lichtschnittebene abhängig sind, zeigt eine Untersuchung in [2]. Sie kann soweit reichen, daß $hue(\vartheta)$ nicht mehr monoton-steigend ist. Für Betrachtungswinkel um 90° ist die Monotonität jedoch gewährleistet.

Technischer Aufbau

Das Experiment besteht aus einer vollständig aus Plexiglas gefertigten Apparatur, schematisch dargestellt in Abbildung 3, und einer aus Abbildung 4 ersichtlichen Experiment-Infrastruktur. Die Apparatur ist aufgeteilt in drei abmessungsgleiche Volumen. Das mittlere Volumen enthält eine Höhenverstellung aus einem Plexiglasstempel, der ausgehend vom oberen Teil der Apparatur variiert werden kann. Die

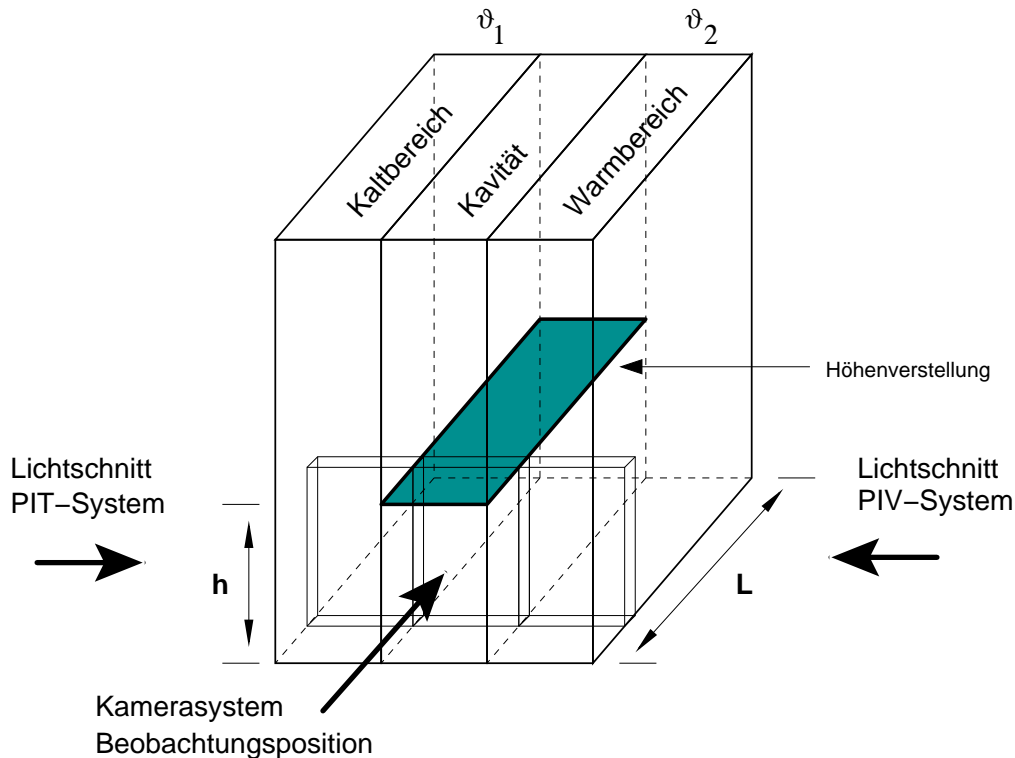


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Kavität, die sich zwischen Kalt- und Warmbereich befindet und ein variables Aspektverhältnis besitzt. Der Weißlichtschnitt der Particle-Image-Thermometry (PIT) und der Lichtschnitt des PIV-Systems treffen sich auf gleicher Höhe in der Kavität.

dadurch entstandene Kavität wird mit Hilfe der Kavitätslänge L und der Kavitätshöhe h durch das Aspektverhältnis $\Gamma = \frac{L}{h}$ beschrieben. Die Kavität ist links und rechts durch je ein wassergefülltes Volumen begrenzt. Die Volumina sind mit Hilfe zweier thermostatischer Bäder auf die Temperaturen ϑ_1 und ϑ_2 einstellbar. Die sich im thermischen Gleichgewicht ausbildende Konvektionsdynamik kann über die gesamte Länge L durch doppelt vorhandene Lichtschnittoptiken beobachtet werden. Es ist je eine Lichtschnittoptik für die PIV-Bildaufzeichnung und die Aufzeichnung des Temperaturfeldes durch thermochrome Flüssigkristalle vorhanden. Die PIV-Aufzeichnung findet mit Hilfe eines kommerziellen PIV-Systems von TSI Inc. statt. Das System besteht aus einem Nd:YAG-Laser von New Wave Research, einer Synchronisationssteuerung, einer Schwarz-Weiß-Kamera (PIVCAM 10-30) und einem PC, auf dem die Steuersoftware des PIV-Systems läuft. Der Weißlichtschnitt auf der entgegengesetzten Seite der Apparatur muß z. Z. noch per Hand auf den Lichtschnitt des PIV-Systems justiert werden. Als Weißlichtquelle dient eine 300W-Xenon-Entladungslampe mit hoher Farbtemperatur bei $5600^\circ K$. Die Lichtleistung wird aus der Lampe über ein Lichtwellenleiterkabel (LWL) ausgekoppelt und einer Linsenordnung aus Kondensator-, Konkav- und Zylinderlinse zugeführt. Die Optik übernimmt dabei die bei der PIV-Optik üblichen Lichtbündelverstellungen (Bündelhöhe, Bündelbreite). Die Bündelbreite des Weißlichtschnitts ist ein kritischer Wert. Üblicherweise ist die Strahldivergenz des Laserstrahls sehr gering gegenüber der einer Weißlichtquelle, was kleine Linsendimensionen und geringe Abbildungsfehler zu Folge hat. Bei der Weißlichtoptik kommt daher ein Kondensator zum Einsatz, der die Lichtleistung auf die Abbildungsoptik lenkt und geringe Bündelbreiten von wenigen Millimetern ermöglicht. Eine Besonderheit in der Weißlichtoptik ist eine Schrittmotor-gesteuerte Sektorblende, die zur Unterbrechung des Strahlengangs dient. Die Bilder der Lichtschnitte von Geschwindigkeits- und Temperaturfeld müssen mit der jeweiligen Lichtquelle aufgenommen werden. Nachdem die Aufnahme eines PIV-Bildes bei geschlossener Sektorblende erfolgt ist, wird die Sektorblende für das Weißlicht

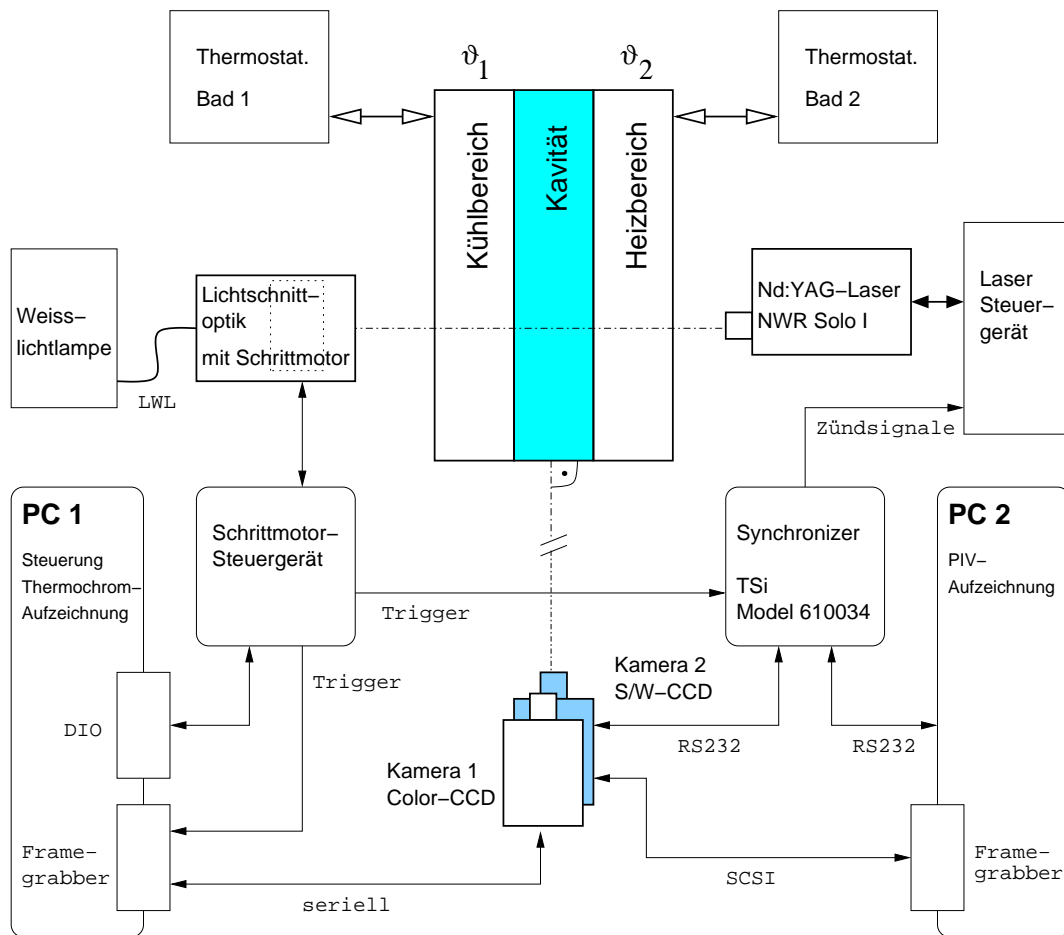


Abbildung 4: Funktionsdiagramm des bis jetzt existierenden Experimentaufbaus

geöffnet und ein Farbbild aufgezeichnet. Die zeitliche Abfolge wird per Software oder direkt mit der Sektorblende gesteuert. Der Schrittmotor wird durch eine übliche Schrittmotorsteuerung bedient und liefert gleichzeitig die Auslösesignale für die S/W- und Farbaufnahme. Die Steuerung des Schrittmotors und der Auslösesignale erfolgt durch eine handelsübliche PCI-DIO-Karte. Als Farbkamera dient ein System von PCO Computer Optics (SensiCam) mit zugehöriger Aufzeichnungssoftware. Beide Kameras sind nahezu normal zur Lichtschnittebene aufgestellt und liefern ihre Bilder bereits digitalisiert an zwei Framegrabber-Karten in PC1 und PC2. Die Farbkamera ist zur Senkung des Bildrauschens des CCD-Sensors auf ca. -10°C aktiv bekühlt. Die Gesamtsteuerung des Experiments erfolgt in PC1 im Zusammenwirken mit einem LabVIEW-Programm. Da sich das System in der Entwicklung befindet, kann sich der Aufbau des Experiments in Abbildung 4 noch abändern. Möglichkeiten zur Änderung bestehen in der Konstruktion einer Mechanik zum simultanen Verfahren der Lichtschnittebenen bzw. eine Zusammenführung beider Lichtschnitte mit Hilfe eines opto-mechanischen Aufbaus bzw. algorithmisch im PC.

Experimentelle Umsetzung

Neben der hier schon erwähnten Problematik bei der Auswahl der thermochromen Partikel ist die Kalibration der Flüssigkristalle ein weiterer wichtiger Aspekt. Hierbei wird die Chrominanz (hue) der verwendeten Flüssigkristall-Mixtur in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Sie erfolgt über ein Kalibrationsvolumen, das durch ein thermostatisches Bad isotherm gehalten wird. Die eingebrachte Suspension wird durch die auch im Experiment zum Einsatz kommende Weißlicht-Messoptik per

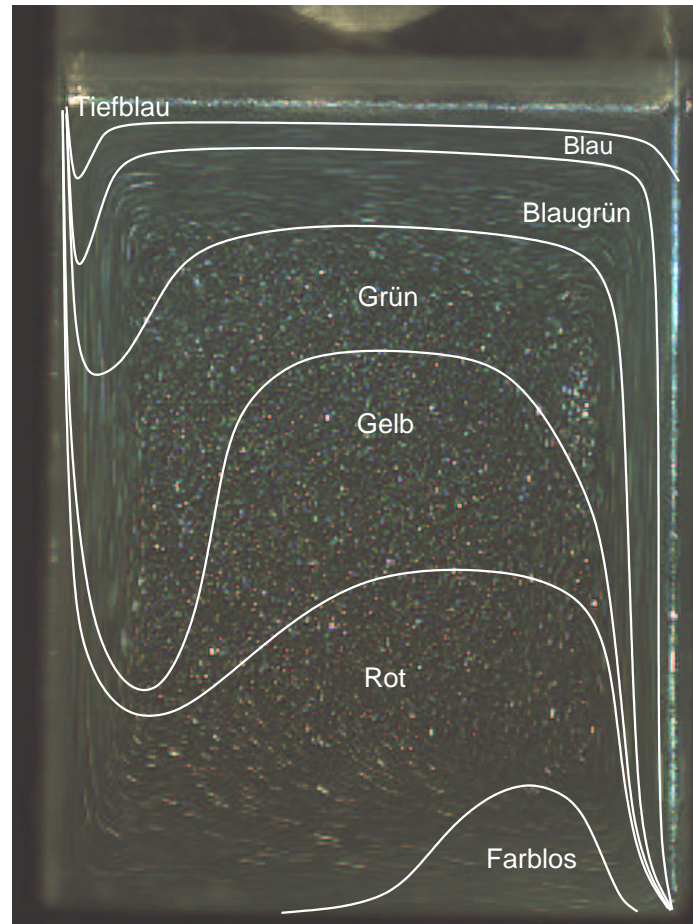


Abbildung 5: Farbaufnahme einer Konvektionsströmung in der Kavität. Die Warmseite der Kavität ist auf $33,6^{\circ}\text{C}$ und die Kaltseite auf $21,6^{\circ}\text{C}$ eingestellt. $L = 17\text{ cm}$, $h = 4,5\text{ cm}$ und die Breite beträgt $b = 3,5\text{ cm}$. Der Lichtschnitt befindet sich bei 7 cm . Die Farbbereiche wurden für die Graustufendarstellung manuell gekennzeichnet. Das Bild besteht eigentlich aus 128 Einzelbildern, so dass die Walzenströmung in der Kavität angedeutet wird. Die Temperaturen wurden so gewählt, dass die gesamte Farbbandbreite der verwendeten Suspension im Bild zu sehen ist. Das Bild ist mit Hilfe eines Bildschärfungsalgorithmus im Kontrast angehoben worden.

Lichtschnitt vermessen. Die Kamera wird ebenfalls im 90° Winkel zur Lichtschnittebene positioniert und nimmt vollflächig den Farbwert des Lichtschnittes auf. Diese Methode besitzt einige Vorteile gegenüber einer anderen oft benutzten, bei der der Flüssigkristall auf einer mit Thermoelementen versehenen Metallplatte aufgetragen wird. Die Metallplatte wird an ihren Stirnseiten unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt, so daß der gesamte Farbbereich abgedeckt wird. Die Chrominanzwerte der Bildpunkte in der Nähe der Thermoelemente dienen dann der Bestimmung von $\text{hue}(\vartheta)$. Vorteile der isothermen Methode sind eine Beurteilung der Kamera-Sensorgüte bei der Wiedergabe von Farbwerten, Reduktion von Farbrauschen durch Mittelung über große Bildbereiche und ein einfacher Aufbau. Mit Hilfe der kalibrierten Suspension lassen sich dann die Messungen am Experiment durchführen. Mehr Einzelheiten zu diesem Thema läßt sich [3, 4, 5] entnehmen.

Das Alterungsverhalten der Flüssigkristall-Mixtur ist ein weiterer Problempunkt. Auflösungserscheinungen der Mikro-Verkapselung im höheren Temperaturbereich machen die Partikel unbrauchbar. Ebenso führt Verklumpung zu einer relativ starken Sedimentation, so daß Suspensionen schon nach 2 bis 3 Tagen unbrauchbar werden können. Obwohl die ersten Testaufnahmen mit der Color-Kamera

noch mit einer provisorischen Lichtschnittoptik angefertigt wurden, – die zur Verfügung stehende Lichtleistung wird noch nicht vollständig auf den Lichtschnitt abgebildet – läßt sich die Farbigkeit der Bilder nachvollziehen. In Abbildung 5 ist eine Walzenkonvektion mit Hilfe der beschriebenen CCD-Kamera mit 24 Bildern pro Sekunde aufgenommen worden. Je 128 Bilder wurden zu dem dargestellten Bild zusammengefaßt, d. h. das Bild summiert die Lichtinformation von ca. 5 Sekunden. Die Temperaturdifferenz beträgt $\Delta\vartheta = 12^\circ\text{C}$. Auffällig sind die lichtstarken Partikel besonders im mittleren Teil des Bildes, die in einer Videoaufzeichnung in allen Spektralfarben leuchten. Dieser Effekt kann verschiedene Ursachen haben: Die Partikel besitzen eine ausgeprägte Abhängigkeit der reflektierten Wellenlänge vom Betrachtungswinkel. Die Partikel sind in der Suspension willkürlich verteilt, die Gesamtorientierungen der Flüssigkristalle in den Partikeln ebenso. Die Partikel haben doppelbrechende Eigenschaften. Sie transmittieren polarisiertes Licht, das auf doppelbrechende Polarisatoren trifft usw. Es resultieren Farbeffekte, die sich praktisch nachvollziehen lassen, wenn man z. B. doppelbrechende Stoffe unter Weißlichtbeleuchtung mit Polarisationsfiltern betrachtet.

Ausblick

Das beschriebene Experiment wurde konzipiert, um eine neue Messmethode am Cottbuser Lehrstuhl zu etablieren. Es dient vor allem dem Aufbau und der Weiterentwicklung der Messtechnik, besonders auch im Hinblick auf ein gerade im Bau befindliches Rührwerk mit Zylinderspalt zur Untersuchung von Taylor-Couette-Strömungen. Am neuen Taylor-Couette-Experiment soll die Messtechnik ohne große Modifikationen zum Einsatz kommen. Der mechanische Aufbau, die Lichtschnittoptik sowie die Steuer- und Auswertesoftware bilden Schwerpunkte zukünftiger Entwicklungsarbeit.

Literatur

- [1] M. Raffel, C. Willert und J. Kompenhans (1998): *Particle Image Velocimetry*, Springer Verlag
- [2] N. Fujisawa, T. Nakajima, N. Katoh und Y. Hashizume (2004): *An uncertainty analysis of temperature and velocity measured by stereo liquid-crystal thermometry and velocimetry*, Meas. Sci. Technol., Nr. 15, S. 799-806
- [3] G. und K. Wozniak und J. Siekmann (1995): *Non-isothermal flow diagnostics using microencapsulated cholesteric particles*, Applied Scientific Research, Nr. 56, S. 145-156
- [4] J. Stasiak (1997): *Thermochromic liquid crystals and true colour image processing in heat transfer and fluid-flow research*, Heat and Mass Transfer, Nr. 33, S. 27-39
- [5] P. Jeschke, R. Biertümpfel und H. Beer (2000): *Liquid-crystal thermography for heat-transfer measurements in the presence of longitudinal vortices in a natural convection flow*, Meas. Sci. Technol., Nr. 11, S. 447-453