

Anwendung neuronaler Netze zur Temperaturfeldmessung in Rayleigh-Bénard Konvektion mittels thermochromer Flüssigkristalle

Application of neural networks to temperature field measurements in Rayleigh-Bénard convection using thermochromic liquid crystals

Sebastian Moller, Christian Resagk und Christian Cierpka

Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Technische Universität Ilmenau, Am Helmholtzring 1, 98693 Ilmenau

Schlagworte: TLC, Rayleigh-Bénard Konvektion, Neuronale Netze

Key words: TLC, Rayleigh-Bénard convection, neural networks

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Anwendbarkeit neuronaler Netze zur Kalibrierung von Temperaturfeldmessungen mittels des Farbsignals thermochromer Flüssigkristalle (TLCs) am Beispiel des Rayleigh-Bénard Experiments untersucht. Dabei wurde das Farbsignal von TLCs hinsichtlich der Abhängigkeit von der Temperatur sowie von der Position innerhalb des Blickfelds einer Farbkamera charakterisiert. Um die Abhängigkeit der Farbe von der Position bei den Temperaturmessungen zu berücksichtigen, wurden erstmals neuronale Netze zur Kalibration der Messungen eingesetzt und mit Blick auf die resultierende Messunsicherheit mit zwei weiteren Methoden der Kalibration verglichen. Abschließend wurde die Anwendbarkeit von neuronalen Netzen anhand einer beispielhaften Temperaturfeldmessung in einer horizontalen Ebene einer Rayleigh-Bénard Zelle demonstriert.

Einleitung

Die Erforschung und genauere Analyse in natürlichen und technischen Systemen vorkommender Strömungen erfordert in vielen Fällen das simultane Bestimmen von mehreren physikalischen Größen. Oftmals sind simultane Messungen von Geschwindigkeits- und Temperaturfeldern von großem Interesse, da aus diesen Kenntnisse über den Impuls- und Wärmetransport von Strömungen abgeleitet werden können. Zu diesem Zweck können durch stetige Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Messtechnik verschiedene Methoden eingesetzt werden, welche an den spezifischen Anwendungsfall angepasst werden können. Unter den möglichen Messmethoden zur simultanen Erfassung von Geschwindigkeits- und Temperaturfeldern zeichnet sich die Anwendung von sogenannten thermochromen Flüssigkristallen (TLCs) dadurch aus, dass sich mit diesen Temperaturfelder in einem relativ kleinen Temperaturbereich sehr genau bestimmen lassen (Dabiri 2009). Somit sind diese gut geeignet, um Strömungen mit kleinen Temperaturdifferenzen näher zu untersuchen. Zur Bestimmung der Temperatur anhand von TLCs werden diese in den meisten Anwendungsfällen mit Weißlicht beleuchtet und reflektieren in Abhängigkeit der Temperatur nur einen bestimmten Wellenlängenbereich vom Spektrum der Beleuchtung. Folglich variiert die farbliche Erscheinung von TLCs mit der Temperatur, was zu deren Messung genutzt wird. Jedoch ist die farbliche Erscheinung nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Winkel zwischen Belichtung und Beobachtung

abhängig, was sich sowohl auf den Messbereich als auch auf die Messunsicherheit bezüglich der Temperatur auswirkt (Moller et al. 2019). Da sich dieser Winkel bei der Aufnahme des Farbsignals von TLCs, wofür beispielsweise eine digitale Kamera verwendet werden kann, auch innerhalb des Blickfelds ändert, muss dessen Einfluss auf das Farbsignal bei der Kalibration der Temperaturmessungen berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern sich die Abhängigkeit des Farbsignals thermochromer Flüssigkristalle von der Position innerhalb des Blickfelds einer Kamera durch die Anwendung neuronaler Netze zur Kalibration der Temperaturmessungen abdecken lässt. In diesem Zug wird vor allem die resultierende Messunsicherheit analysiert und mit denen anderer Methoden zur Kalibration verglichen. Um die Anwendbarkeit dieser Methoden zu veranschaulichen, werden diese zur Temperaturfeldmessung in einer Rayleigh-Bénard Zelle eingesetzt und die berechneten Temperaturfelder anhand einer direkten Gegenüberstellung diskutiert.

Beschreibung des Experiments

Im vorliegenden Fall werden thermochrome Flüssigkristalle zur Bestimmung des Temperaturfelds in Rayleigh-Bénard Konvektion eingesetzt. Dieser Strömungstyp, welcher in einem abgeschlossenen, von unten beheizten und von oben gekühlten Volumen durch Dichteunterschiede angetrieben wird, eignet sich zur Charakterisierung einer Temperaturmesstechnik, da anhand der Temperatur der Heizplatte an der Unterseite und der Kühlplatte an der Oberseite der Temperaturbereich des Mediums in der Rayleigh-Bénard Zelle dem temperatursensitiven Bereich der TLCs genau angepasst werden kann. Als Medium in der Zelle wird in diesem Fall Wasser verwendet. Die Rayleigh-Bénard Zelle weist Abmessungen von $l \times b \times h = 700\text{mm} \times 700\text{mm} \times 28\text{mm}$ und somit ein Aspektverhältnis von $\Gamma = l/h = 25$ auf. Die optische Zugänglichkeit der Rayleigh-Bénard Zelle für die Anwendung optischer Messtechniken zur Bestimmung von Geschwindigkeits- und Temperaturfeldern ist gegeben, da sowohl die Seitenwände als auch die Kühlplatte aus Glas sind. Folglich kann bei der Untersuchung von TLCs in horizontalen Schnittebenen der Zelle ein großes Blickfeld analysiert werden, was eine genaue Untersuchung vom Einfluss des Winkels zwischen Belichtung und Beobachtung der TLCs erlaubt.

Die Kühlplatte der Rayleigh-Bénard Zelle wird mit Wasser, welches oberhalb der Platte durch einen externen Kühlkreislauf gefördert wird, gekühlt. Der Kreislauf wird gemäß Abbildung 1 durch eine zweite Glasplatte geschlossen, sodass die optische Zugänglichkeit erhalten bleibt. Die Temperatur der Heizplatte an der Unterseite der Zelle wird durch einen weiteren externen Kreislauf geregelt, in welchem Wasser durch mäanderförmige Kanäle innerhalb der Heizplatte strömt. Die Heizplatte besteht aus Aluminium, welches Temperaturgradienten auf der Oberfläche aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit zugunsten der isothermen Randbedingungen bestmöglich kompensiert. Weiterhin ist die Zelle mit mehreren Temperatursensoren an der Heiz- und Kühlplatte sowie an der Seitenwand ausgestattet, um die Temperaturen im Betrieb messen zu können. Optional kann auch eine Temperaturmesslanze durch eine der Seitenwände geführt werden, sodass auch die Temperatur im Inneren der Zelle punktuell überprüft werden kann.

Zur Messung des Temperaturfelds in einer horizontalen Messebene der Rayleigh-Bénard Zelle werden in diesem Fall TLCs vom Typ R20C20W (LCR Hallcrest) eingesetzt. Gemäß den Angaben des Herstellers beginnen diese bei einer Temperatur von $T = 20^\circ\text{C}$ rötlich zu erscheinen. Mit steigender Temperatur ändert sich deren Farbe entlang des sichtbaren Spektrums, bis diese bei $T = 40^\circ\text{C}$ blau erscheinen. Diese Spezifikationen sind jedoch nur für den Fall gültig, dass die TLCs aus der gleichen Richtung beleuchtet und beobachtet werden, was bei

der Betrachtung eines Lichtschnitts aber nicht möglich ist. Bei einer nicht parallelen Anordnung der Kamera zur Messebene und somit gemäß Abbildung 1 einem von $\varphi = 0^\circ$ verschiedenen Winkel wird der Temperaturmessbereich, in welchem genaue Messungen möglich sind, mit steigendem Winkel bis zur senkrechten Anordnung immer mehr reduziert. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, wird die Farbkamera aus diesem Grund im vorliegenden Fall nicht senkrecht, sondern unter einem Winkel von $\varphi = 70^\circ$ zur Messebene platziert. Diese Anordnung stellt einen guten Kompromiss dar, um Temperaturmessungen sowohl über einen gewissen Messbereich mit geringer Messunsicherheit als auch mit einer hohen räumlichen Auflösung über ein großes Blickfeld durchführen zu können, was im folgenden Kapitel näher untersucht wird.

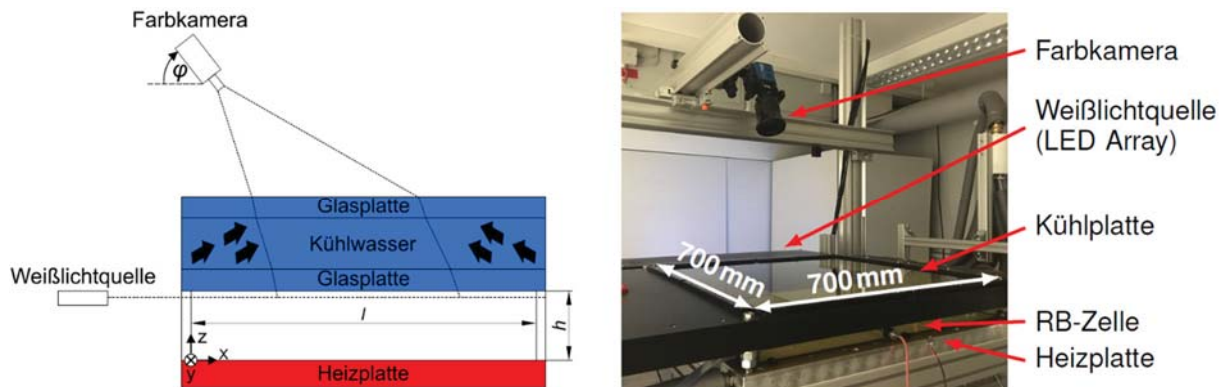


Abb. 1: Schaubild des Prinzips vom experimentellen Aufbau (links) und realer Aufbau (rechts) zur simultanen Geschwindigkeits- und Temperaturfeldmessung in horizontalen Schnittebenen der Rayleigh-Bénard (RB) Zelle. Es wird darauf hingewiesen, dass das Koordinatensystem im linken Bild für alle Untersuchungen gültig ist.

Für die Temperaturmessungen in horizontalen Ebenen der Rayleigh-Bénard Zelle anhand des Farbsignals von TLCs werden diese mit einer Farbkamera (sCMOS PCO edge 5.5, PCO AG) mit einem Bayer-Filter aufgenommen. Diese wird für die vorliegende Studie mit einem Weitwinkelobjektiv (Zeiss Otus 1.4/28, Zeiss AG) ausgestattet, sodass ein großes Blickfeld auf den Sensor der Kamera abgebildet werden kann. Das Objektiv ist über einen Scheimpflugadapter mit der Kamera verbunden, um die komplette Messebene trotz der schrägen Anordnung der Kamera scharf abbilden zu können.

Um das zur Beleuchtung der TLCs erforderliche Weißlicht in Form eines Lichtschnitts für zwei-dimensionale Messungen in einer horizontalen Ebene bereitzustellen, wird eine Vielzahl weißer LEDs verwendet. Diese sind seitlich von der Rayleigh-Bénard Zelle entlang einer Linie auf der Höhe der Messebene angeordnet. Zur Erzeugung eines Lichtschnitts aus dem von den LEDs emittierten Licht, welches eine hohe Divergenz besitzt, wurde eine entsprechende Lichtschnittoptik entwickelt (Schmeling et al. 2014 und Moller et al. 2019). Diese ermöglicht es, einen Lichtschnitt mit nahezu gleichmäßiger und einstellbarer Dicke über den kompletten Querschnitt der Zelle von 700mm x 700mm zu generieren. Für die im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Messungen wurde die Dicke des Lichtschnitts auf ungefähr $d_{LS} = 3\text{ mm}$ eingestellt. Gemessen von der Oberfläche der Heizplatte erstreckt sich der Lichtschnitt von $z = 24\text{ mm}$ bis $z = 27\text{ mm}$, sodass dieser bei der Zellhöhe von $h = 28\text{ mm}$ den Bereich direkt unterhalb der Kühlplatte für die Messungen beleuchtet. Die Lage des Lichtschnitts wurde so gewählt, da in der Nähe der isothermen Platten ausgeprägte Strömungsstrukturen in Erscheinung treten und somit auch die Temperaturmesstechnik anhand der Farbe der TLCs anschaulich demonstriert werden kann.

Um thermische Konvektion innerhalb der Zelle zu erzeugen, wurde in diesem Fall eine Temperatur von $T_H = 21,5^\circ\text{C}$ an der Heizplatte und $T_K = 18,2^\circ\text{C}$ an der Kühlplatte eingestellt, sodass die Temperaturen in der Zelle alle im Intervall $T \in [T_K, T_H]$ liegen. Das Intervall ist so gewählt, dass die TLCs starke farbliche Änderungen mit der Temperatur zeigen und somit genaue Temperaturmessungen möglich sind (Moller et al. 2019). Damit die Farbe der TLCs der jeweiligen Temperatur zugeordnet werden kann, wurden zuvor Kalibrationsmessungen durchgeführt. Bei diesen wurden die Temperatur der Heiz- und Kühlplatte jeweils auf den gleichen Wert eingestellt und im stationären, isothermen Zustand 100 Bilder mit einer Frequenz von $f = 5\text{ Hz}$ von der farblichen Erscheinung der TLCs mit der Farbkamera aufgenommen. Dieses Prozedere wurde für verschiedenen Temperaturen von $T = 17,9^\circ\text{C}$ bis $T = 22,3^\circ\text{C}$ durchgeführt, um das Temperaturintervall der Konvektionsmessung komplett abzudecken. Wie in Abbildung 1 bereits angedeutet, wurden die Aufnahmen nicht über den kompletten Querschnitt der Zelle durchgeführt, sondern über einen Bereich im Zentrum der Zelle mit Abmessungen von ungefähr $l_x \times l_y = 350\text{ mm} \times 300\text{ mm}$, was $l_x \times l_y = 12.5 h \times 10.7 h$ entspricht.

Auswertung und Ergebnisse

Zur Kalibration der Temperaturmessungen wurde die farbliche Erscheinung der TLCs in Abhängigkeit der Temperatur im Detail untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass deren Farbe auch eine deutliche Abhängigkeit vom Winkel zwischen dem Lichtschnitt und der Beobachtungsrichtung und somit von der genauen Position innerhalb des Blickfelds der Kamera aufweist. Dies ist in der Abbildung 2 zu sehen, welche die TLCs im gesamten Blickfeld für drei verschiedene Temperaturen zeigt. Neben der farblichen Änderung der TLCs mit der Temperatur ist zu erkennen, dass trotz der jeweils isothermen Verhältnisse ein farblicher Trend vom linken zum rechten Rand des Blickfelds vorliegt, was bei der Kalibration der Temperaturmessungen einbezogen werden muss. Bei dieser wird das komplette Blickfeld in kleine Auswertefenster eingeteilt und für jedes von diesen eine separate Kalibrationskurve zwischen dem Farbsignal und der Temperatur von den TLCs ermittelt. Um deren Unterschiede zu verdeutlichen, werden im Folgenden drei beispielhafte Kalibrationskurven für die in Abbildung 2 gelb umrahmten Auswertefenster untersucht.

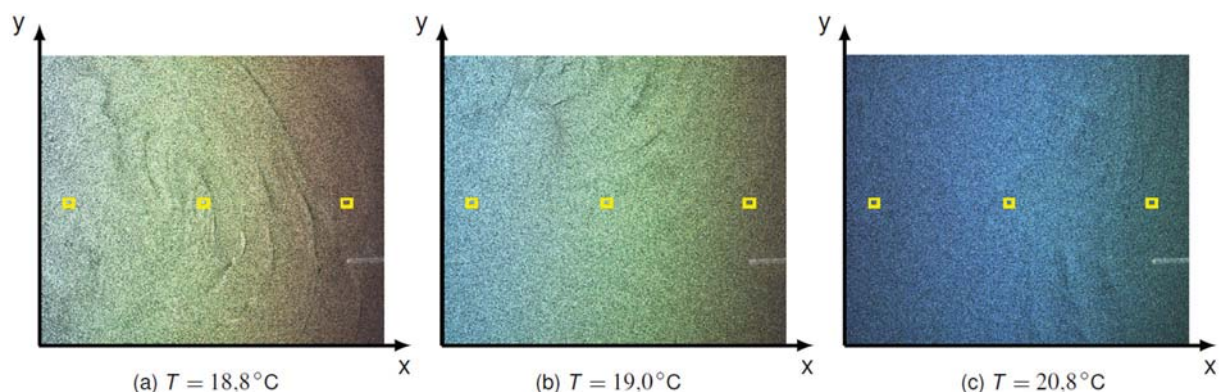


Abb. 2: Aufnahmen der TLCs R20C20W für drei verschiedene Temperaturen. Entsprechend dem in Abbildung 1 eingeführten Koordinatensystem werden die TLCs von links beleuchtet. Die gelb umrahmten Auswertefenster mit einer Größe von $32 \times 32\text{ px}$ werden näher hinsichtlich der Korrelation zwischen Farbsignal und Temperatur der TLCs untersucht.

Zur Charakterisierung des Farbsignals in den Auswertefenstern, welche für alle Betrachtungen in dieser Arbeit eine Größe von $32 \times 32\text{ px}$ aufweisen, werden die roten (R), grünen (G) und blauen (B) Farbwerte der Pixel verwendet. Jeder Farbwert ist durch einen internen

Algorithmus für jedes Pixel der Farbkamera mit dem Bayer-Filter gegeben. Von diesen werden jeweils die Mittelwerte über das gesamte Auswertefenster gebildet. Im nächsten Schritt werden die Mittelwerte genutzt, um die Farbe der TLCs in diesem Auswertefenster anhand des *HSV*-Farbraums zu beschreiben (Loesdau et al. 2014). In diesem Farbraum repräsentiert *Hue* (H) den Farbton der TLCs in Form eines Winkels $H \in [0^\circ, 360^\circ]$, welcher in diesem Fall normiert ist, sodass $H \in [0, 1]$. Die *Saturation* (S) gibt an, ob der Farbton eher rein ($S = 0$) ist oder einen hohen Anteil an weißem Licht ($S = 0$) enthält, während *Value* (V) die Intensität des Signals durch $V \in [0, 1]$ widerspiegelt. Die Anwendung dieses Farbraums bringt den Vorteil mit sich, dass die Temperatur der TLCs nur mittels eines Skalars in Form von *Hue* bestimmt werden kann. Da der Wert von *Hue* unabhängig von der Partikelbildichte der TLCs sowie von der Intensität zu deren Beleuchtung ist, wird somit im Folgenden nur der Wert von *Hue* für eine sehr robuste Kalibration herangezogen. Für jedes Auswertefenster und jede bei der Kalibration eingestellte Temperatur werden die sich ergebenden *Hue*-Werte über die 100 aufgenommenen Bilder gemittelt, sodass für jedes Auswertefenster eine Kalibrationskurve $\langle H \rangle_t(T)$ resultiert.

Die beispielhaften Kalibrationskurven für die in Abbildung 2 markierten Auswertefenster sind in der Abbildung 3 ersichtlich. Diese geben deutlich zu erkennen, dass der Wertebereich von *Hue* nahezu von $H = 0$ bei geringen Temperaturen bis ungefähr $H = 0,6$ bei höheren Temperaturen reicht, was die farbliche Änderung der TLCs von rot zu blau entlang des sichtbaren Spektrums widerspiegelt. Allerdings fällt auf, dass die farbliche Änderung der TLCs mit der Temperatur in Abhängigkeit der Position unterschiedlich schnell vonstattengeht. Am linken Rand der Zelle bei größeren Winkeln zwischen Belichtung und Beobachtung ändert sich die Farbe im Wesentlichen in einem kleineren Temperaturintervall bei geringen Temperaturen, während die Änderung der Farbe mit der Temperatur in Richtung des rechten Randes der Zelle zunehmend kontinuierlicher erfolgt. Außerdem verschiebt sich auch die Temperatur, bei welcher die TLCs beginnen rötlich zu erscheinen, in Richtung des rechten Randes der Zelle zu höheren Temperaturen hin. Zur Eindeutigkeit der Temperaturmessungen legt diese Temperatur, welche in Abbildung 3 jeweils rot markiert ist, das untere Ende des Messbereichs für das jeweilige Auswertefenster fest. Die Temperaturmessungen über das gesamte Blickfeld werden somit im vorliegenden Fall durch den rechten Rand der Zelle limitiert, an welchem die Temperatur erst ab $T = 18,8^\circ\text{C}$ eindeutig bestimmt werden kann.

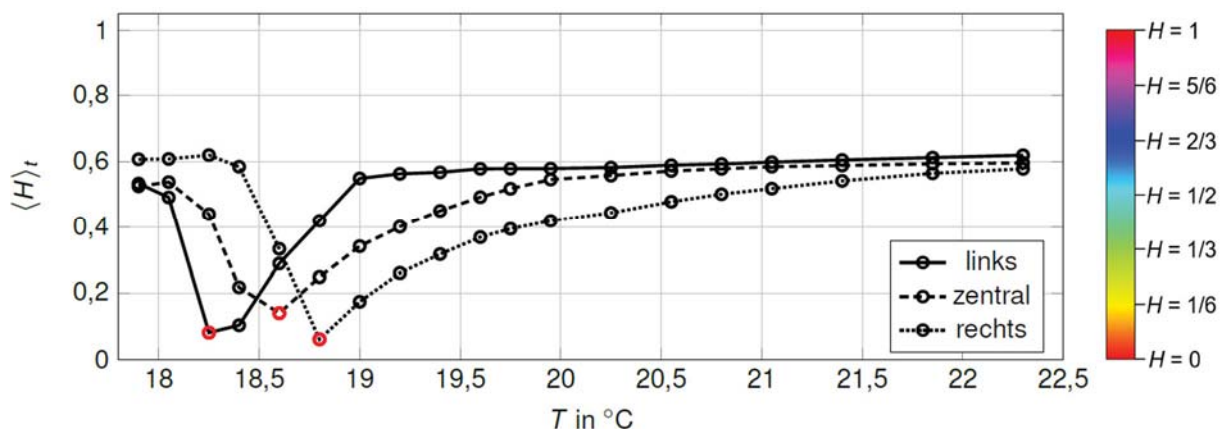


Abb. 3: Farbton der TLCs in Form von *Hue* in Abhängigkeit von der Temperatur für drei verschiedene Auswertefenster innerhalb des Blickfelds der Kamera, welche in Abbildung 2 markiert sind. Zur Veranschaulichung ist auf der rechten Seite die zugehörige Farbskala zu sehen. Die rot markierten Minima der Kurven repräsentieren jeweils den Anfang des Bereichs mit eindeutiger Zuordenbarkeit des Farbsignals zu einer Temperatur.

Um die Temperatur von TLCs anhand von deren Farbe und Position innerhalb des Blickfelds zu bestimmen, werden im Folgenden drei Methoden gegenübergestellt, welche in der Abbildung 4 schematisch dargestellt sind. Diesen Ansätzen ist gemeinsam, dass deren Berechnungsvorschriften alle auf der Basis der zeitlich gemittelten Kalibrationskurven der einzelnen Auswertefenster, wie sie in der Abbildung 3 für drei beispielhafte Auswertefenster zu sehen sind, ermittelt werden, was den direkten Vergleich der Ergebnisse ermöglicht. Bei der ersten Methode nach Abbildung 4a wird für jedes Auswertefenster ein Koeffizientenvektor $\vec{C} = (1, C_H, C_{H^2}, C_{H^3}, C_{H^4})$ bestimmt, welcher nach der Matrizenmultiplikation mit einer System-Matrix der zugrunde liegenden *Hue*-Werte bestmöglich die bei den Kalibrationsmessungen bekannten Temperaturen ergeben soll (Moller et al. 2017). In die System-Matrix werden die *Hue*-Werte der Kalibrationskurven von der ersten bis zur vierten Ordnung sowie ein Offset einbezogen, um den Verlauf der Kurven in guter Näherung abbilden zu können. Bei der zweiten

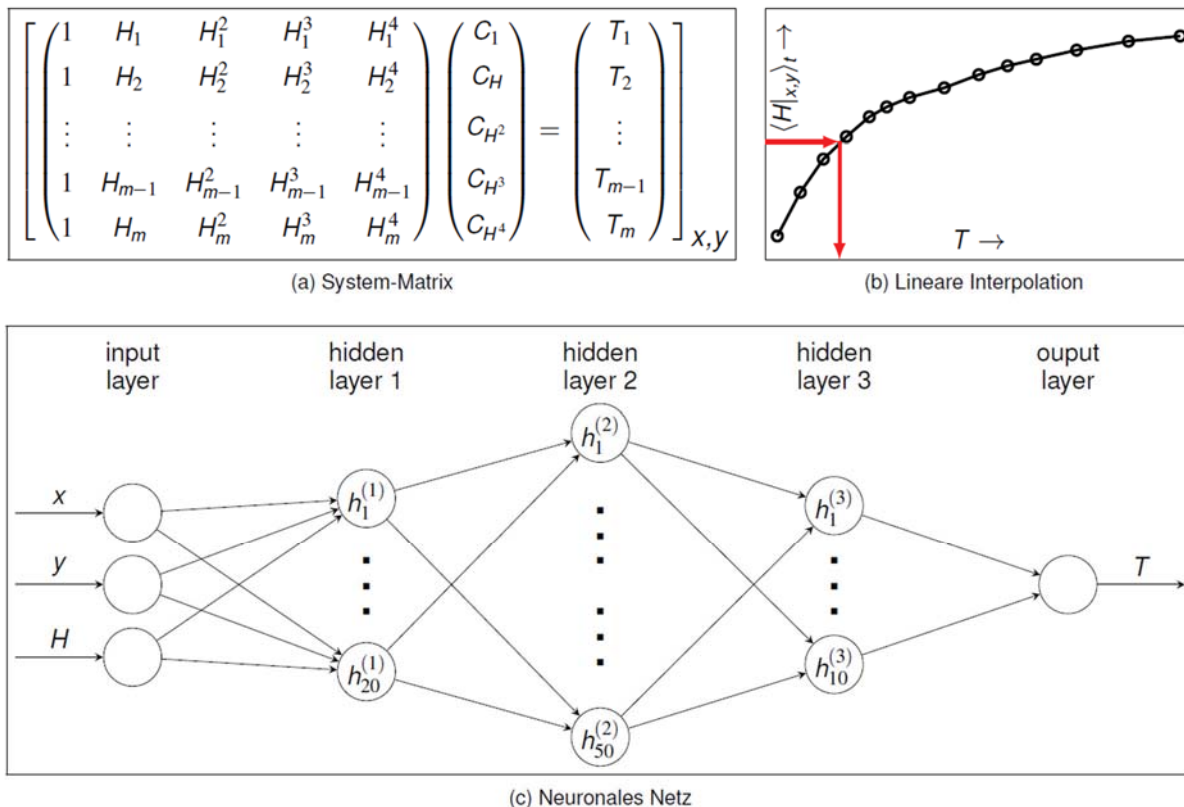


Abb. 4: Schematische Darstellung verschiedener Methoden zur Berechnung der Temperatur von TLCs auf Basis des *Hue*-Werts H mittels einer System-Matrix (a), linearer Interpolation des *Hue*-Werts in den Kalibrationskurven (b) und eines neuronalen Netzes (c).

Methode wird die für jedes Auswertefenster ermittelte Kalibrationskurve genutzt, um anhand eines gegebenen *Hue*-wertes mittels linearer Interpolation die zugehörige Temperatur berechnen zu können. Bei der dritten und letzten Methode wird ein neuronales Netz verwendet, um auf Basis der Position des Auswertefensters $P_A = (x, y)$ und des *Hue*-wertes die Temperatur zu bestimmen. Es wurden verschiedene Strukturen des Netzes mit unterschiedlichen Anzahlen an Neuronen bei variierender Anzahl der sogenannten *hidden layers*, welche im Allgemeinen die Eingangsgrößen der *input layer* in die Ausgangsgrößen der *output layer* überführen, mit Blick auf die resultierende Unsicherheit der Temperaturmessungen getestet. Die in Abbildung 4c zu sehende Struktur mit 20 Neuronen in der ersten, 50 Neuronen in der zweiten und 10 Neuronen in der dritten *hidden layer* wurde letztendlich für die weiteren Betrachtungen herangezogen, da sich die Ergebnisse bei einer weiteren Erhöhung der Anzahl an Neuronen und *hidden layers* nur noch sehr geringfügig ändern, aber die Rechenzeit enorm ansteigt.

Um diese Methoden hinsichtlich der zu erreichenden Messunsicherheit bezüglich der Temperaturmessungen gegenüberzustellen, wird mit diesen die Temperatur für jedes Auswertefenster der 100 aufgenommenen Bilder für jeden Temperaturschritt der Kalibration berechnet und mit dem bereits bekannten Wert verglichen. Die mittlere Abweichung der berechneten Temperaturen zum bekannten Sollwert über die komplette Fläche A des Blickfelds und alle Zeitschritte t der Kalibrationsmessungen sowie die Standardabweichung der berechneten Temperaturen sind in der Abbildung 5 für alle Methoden gegenüber gestellt, wobei die Standardabweichung durch die Fehlerbalken repräsentiert wird. Es ist zu erkennen, dass die lineare Interpolation der *Hue*-Werte in den Kalibrationskurven und das neuronale Netz besonders im unteren Temperaturbereich zu deutlich besseren Ergebnissen führen als die System-Matrix.

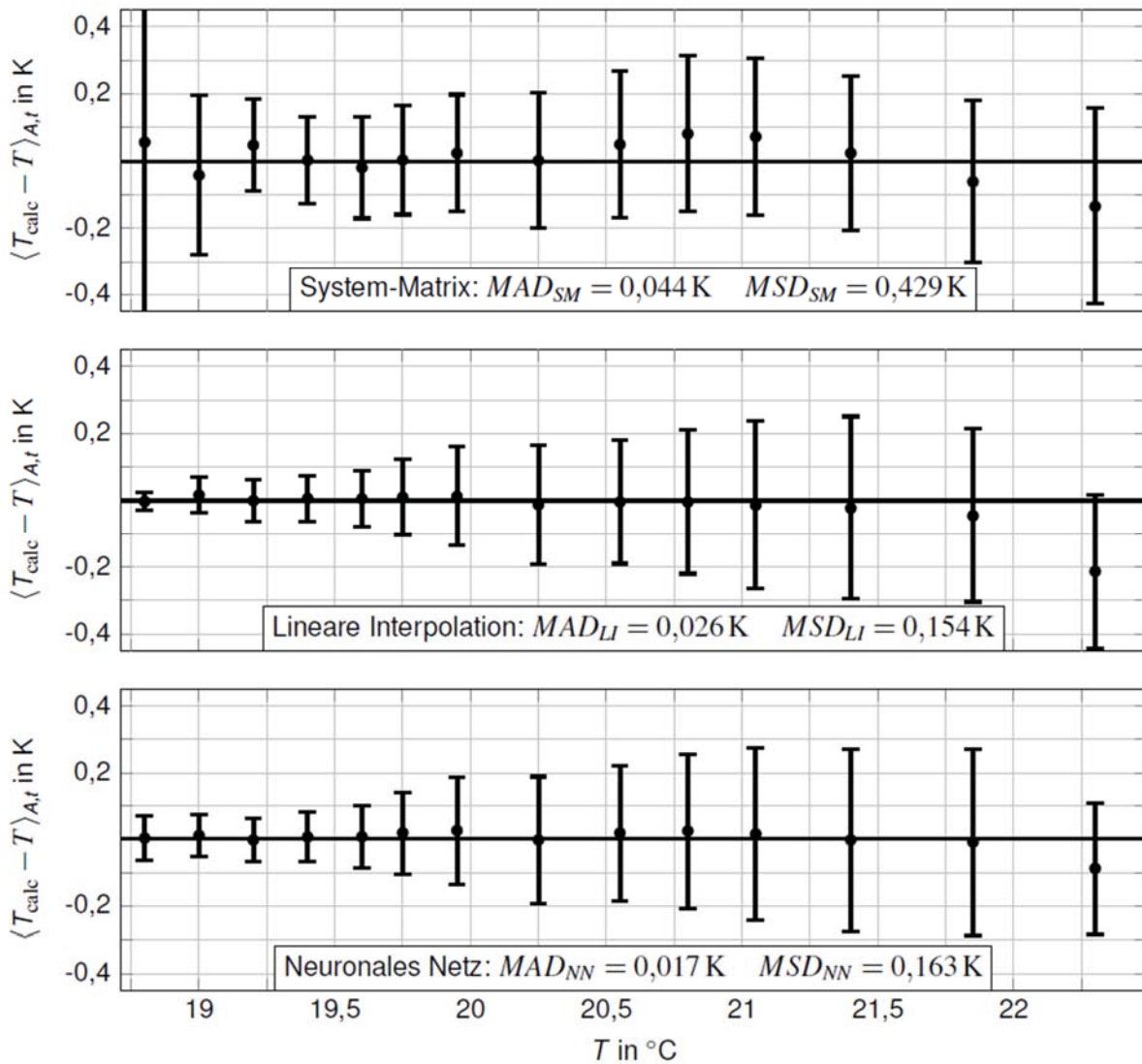


Abb. 5: Mittlere Abweichung der berechneten zu den gegebenen Temperaturen über die komplette Fläche A des Blickfelds und über alle Zeitpunkte t der Kalibrationsmessungen bei der Anwendung einer System-Matrix (oben), der linearen Interpolation der *Hue*-Werte in den Kalibrationskurven der einzelnen Auswertefenster (mittig) und eines neuronalen Netzes (unten). Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung der berechneten Temperaturen. Der Mittelwert der absoluten Abweichungen (MAD - Mean Average Deviation) über den kompletten Temperaturbereich sowie die mittlere Standardabweichung (MSD - Mean Standard Deviation) ist jeweils beigefügt.

Im Temperaturbereich $18,8^{\circ}\text{C} < T < 19,6^{\circ}\text{C}$ sind mit diesen beiden Methoden Temperaturmessungen mit sehr geringer Messunsicherheit möglich, da für die Standardabweichungen der berechneten Temperaturen $\sigma_{T_{\text{calc}}} < 0,1 \text{ K}$ gilt, während die mittlere Abweichung zum Sollwert

der Temperatur vernachlässigbar ist. Auch bei einer Erhöhung der Temperatur bleibt die Standardabweichung größtenteils im Bereich von $\sigma_{T_{\text{calc}}} < 0,25\text{K}$ bei weiterhin vernachlässigbarer mittlerer Abweichung der Temperatur, solange $T < 21,4^\circ\text{C}$. Erst bei Temperaturen $T > 22^\circ\text{C}$ liegen deutlichere mittlere Abweichungen vor, was darauf zurückzuführen ist, dass sich die *Hue*-Werte in diesem Bereich nur noch geringfügig mit der Temperatur ändern und somit die Zuordnung zu einer Temperatur erschwert wird.

Um die Methoden im Gesamten zu vergleichen, wurden die Absolutwerte der mittleren Abweichungen und die Standardabweichungen gemittelt, wofür die Ergebnisse in der Abbildung 5 als *MAD* (*Mean Average Deviation*) und *MSD* (*Mean Standard Deviation*) ersichtlich sind. Die Werte zeigen, dass die Anwendung der linearen Interpolation und des neuronalen Netzes zu ähnlichen und besseren Ergebnissen als die Anwendung der System-Matrix führt. Die Werte der mittleren absoluten Abweichung dieser beiden Methoden von $MAD_{LI} = 0,026\text{K}$ und $MAD_{NN} = 0,017\text{K}$ lassen erkennen, dass nur sehr geringe systematische Abweichungen vorliegen. Trotz der bei höheren Temperaturen ansteigenden Standardabweichung der Temperaturmessungen zeigen die mittleren Standardabweichungen von $MSD_{LI} = 0,154\text{K}$ und $MSD_{NN} = 0,163\text{K}$, dass mit diesen Methoden über den gesamten Temperaturbereich genaue Messungen möglich sind.

Die Anwendbarkeit von TLCs für Temperaturfeldmessungen wird in der Abbildung 6 am Beispiel einer Messung in der vorgestellten Rayleigh-Bénard Zelle mit Temperaturen von $T_H = 21,5^\circ\text{C}$ an der Heizplatte und $T_K = 18,2^\circ\text{C}$ an der Kühlplatte demonstriert. Eine Aufnahme der TLCs in der horizontalen Messebene direkt unterhalb der Kühlplatte, welche die Existenz konvektiver Strömungsstrukturen deutlich aufzeigt, ist in der Abbildung 6a zu sehen. Diesen Strukturen ist ein farblicher Trend vom linken zum rechten Rand der Zelle überlagert, welcher die erläuterte Abhängigkeit des Farbsignals von TLCs vom Winkel zwischen der Belichtung und Beobachtung widerspiegelt. Der farbliche Trend ist auch im zugehörigen *Hue*-Feld in der nebenstehenden Abbildung 6b zu erkennen. Dieses zeigt deutlich auf, dass sich die *Hue*-Werte über das gesamte Blickfeld von links nach rechts im Mittel deutlich verringern, was die Notwendigkeit eines speziellen Ansatzes zur Kalibration der Temperaturmessungen nochmals unterstreicht. Beim Vergleich des *Hue*-Felds mit der Aufnahme der TLCs lassen sich die Konturen der konvektiven Strukturen wiederfinden, sodass diese auch in den berechneten Temperaturfeldern zum Vorschein kommen. Das Temperaturfeld wurde sowohl mittels linearer Interpolation der *Hue*-Werte in den Kalibrationskurven der einzelnen Auswertefenster als auch anhand des neuronalen Netzes bestimmt, was in den Abbildungen 6c und 6d gegenübergestellt ist. Aus dem Vergleich der Temperaturfelder lässt sich schlussfolgern, dass mit beiden Methoden die Temperaturen der konvektiven Strukturen erfasst werden können und diese generell zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen. Beim Vergleichen der Temperaturen an den jeweils gleichen Positionen innerhalb der beiden berechneten Temperaturfelder ergibt sich für die absoluten Abweichungen ein Mittelwert von ungefähr $0,05\text{K}$, welcher die Ähnlichkeit der Ergebnisse bestätigt.

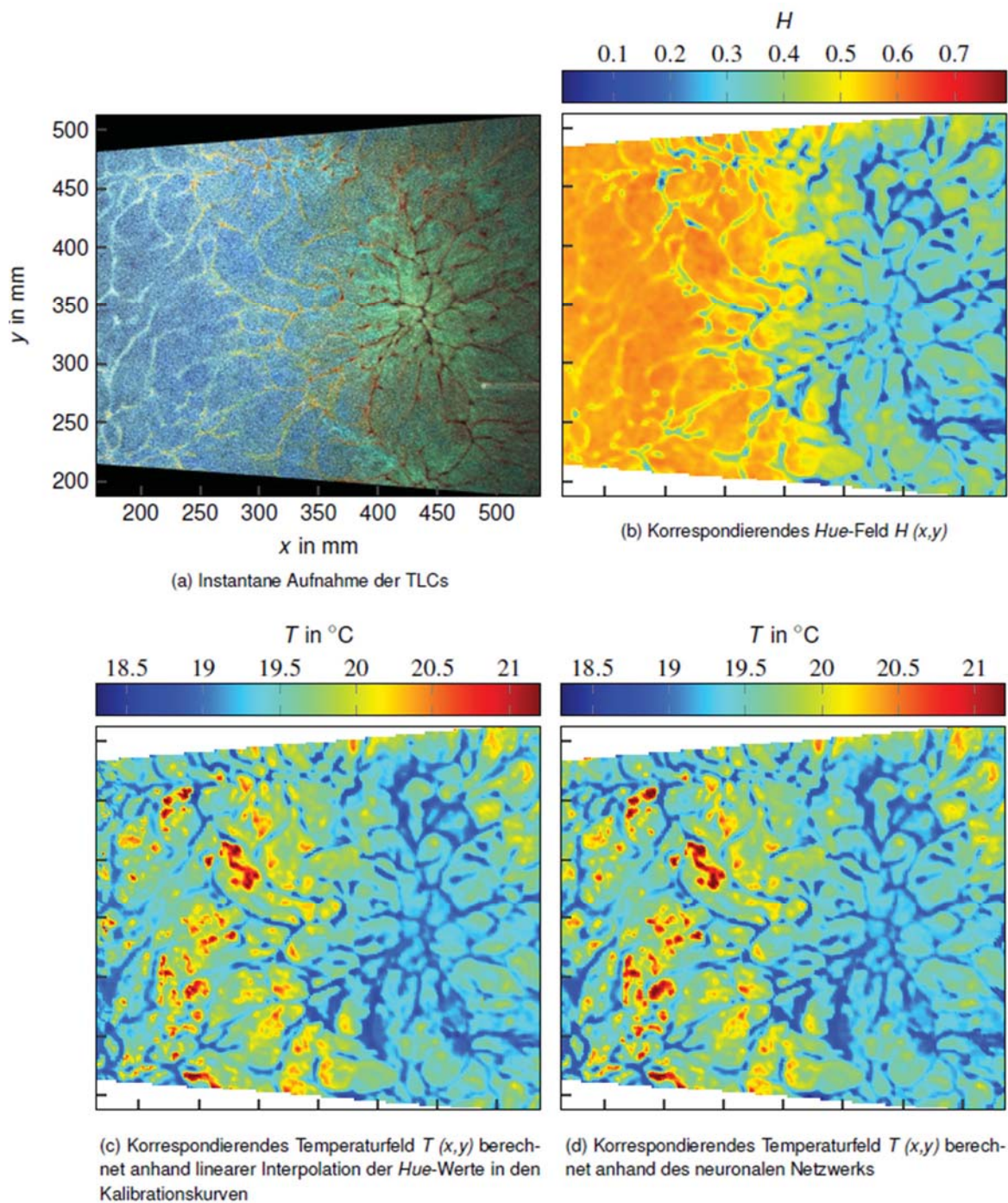


Abb. 6: Instantane Aufnahme der TLCs (a) und das korrespondierende Hue-Feld (b) sowie das Temperaturfeld berechnet anhand linearer Interpolation der Hue-Werte in den Kalibrationskurven (c) und anhand des neuronalen Netzkes (d). Das Bild der TLCs wurde direkt unterhalb der Kühlplatte mit einer Temperatur von $T_K = 18,2^\circ\text{C}$ aufgenommen, wobei die Temperatur der Heizplatte $T_H = 21,5^\circ\text{C}$ betrug. Die in der Abbildung 6a ersichtlichen Dimensionen, welche die Orientierung nach dem Koordinatensystem in Abbildung 1 widerspiegeln, sind ebenfalls für das Hue-Feld und die Temperaturfelder gültig.

Fazit

Die Untersuchung des Farbsignals von TLCs vom Typ R20C20W hat gezeigt, dass dieses sowohl von der Temperatur als auch von der Position innerhalb des Blickfelds und somit vom Winkel zwischen Beleuchtung und Beobachtung abhängt. Während sich die Farbe bei kleineren Winkeln langsam mit der Temperatur ändert, ist bei größeren Winkeln, welcher der senkrechten Anordnung der Farbkamera zum Lichtschnitt näher kommen, ein sehr schneller Farbwechsel zu beobachten. Der Aspekt, dass die Position der TLCs innerhalb des Blickfelds der Farbkamera einen Einfluss auf das Farbsignal hat, muss bei der Kalibration der Temperaturmessungen anhand der Farbe von den TLCs berücksichtigt werden. Bei der Anwendung eines neuronalen Netzes zur Kalibration auf ein Sichtfeld mit einer Abmessung von $l_x \times l_y = 350 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ haben sich im Temperaturbereich $18,8^\circ\text{C} < T < 22,3^\circ\text{C}$ eine mittlere absolute Abweichung von $MAD_{NN} = 0,017 \text{ K}$ und eine mittlere Standardabweichung von $MSD_{NN} = 0,163 \text{ K}$ ergeben, was die Eignung dieser Methode für genaue Temperaturmessungen bestätigt. Auch der Vergleich von beispielhaften Temperaturfeldern in der vorgestellten Rayleigh-Bénard Zelle, welche auf der Basis des neuronalen Netzes und einer weiteren Kalibrationsmethode berechnet wurden, demonstriert die Anwendbarkeit dieser Methoden, da sehr ähnliche Ergebnisse resultieren. Jedoch bestehen noch weitere Ansätze zur Verbesserung der vorgestellten Methoden. Beispielsweise könnte die Anwendung von neuronalen Netzen noch optimiert werden, indem der Kalibration die zeitlich aufgelösten Hue-Felder anstatt des zeitlich gemittelten Hue-Feldes zugrunde gelegt werden, was allerdings eine deutlich höhere Rechenkapazität erfordert. Trotz der Untersuchungen, welche bereits für die vorliegende Studie hinsichtlich der Struktur des neuronalen Netzes durchgeführt wurden, müssen auch zukünftig noch weitere in dieser Hinsicht vorgenommen werden, um den Einfluss der Struktur evaluieren zu können.

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich bei Dr. Daniel Schiepel und Dr. Daniel Schmeling vom *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)* in Göttingen für die Unterstützung bei der Entwicklung der Weißlichtquelle. Weiterhin möchten die Autoren der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP1881 „Turbulent Superstructures“ ihren Dank ausdrücken.

Literatur

Dabiri, D., 2009: “Digital particle image thermometry/velocimetry: a review”, *Experiments in Fluids* 46 (2): 191-241

Loesdau, M., Chabrier, S. und Gabillon, A., 2014: “Hue and Saturation in the RGB color space”, *6th International Conference on Image and Signal Processing, ICISP 2014*, 30. Juni – 02. Juli, Cherbourg, Frankreich

Moller, S., Resagk, C., Baczyzmalski, D., Massing, J., Kähler, C. J., Cierpka, C., 2017: “Simultane Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldmessungen in Rayleigh-Bénard Konvektion bei großen Aspektverhältnissen”, *Proceedings der 25. GALA - Fachtagung “Experimentelle Strömungsmechanik”*, 05. - 07. September, Karlsruhe, Deutschland

Moller, S., König, J., Resagk, C., Cierpka, C., 2019: “Influence of the illumination spectrum and observation angle on temperature measurements using thermochromic liquid crystals”, *Measurement Science and Technology*, in Produktion (<https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab173f>)

Schmeling, D., Bosbach, J., Wagner, C., 2014: “Simultaneous measurement of temperature and velocity fields in convective air flows”, *Measurement Science and Technology* 25:035302