

Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V.
Arbeitsgemeinschaft Strömungen mit Ablösung

2D-Meßtechnik

DGLR-Workshop
18. bis 19. Oktober 1988
Markdorf
Hotel Bischofsschloß

Fachliche Leitung:
Dr. rer. nat. K.-A. Bütetisch
DFVLR Göttingen
Dipl.-Ing. P. Dick
Dornier GmbH
Prof. Dipl.-Ing. B. Ewald
TH Darmstadt

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

SIMULTANE ERFASSUNG VON TEMPERATUR- UND GESCHWINDIGKEITSFELDERN IN EINER THERMISCHEN KONVEKTIONSSTRÖMUNG MIT UNGEKAPSELTEN FLÜSSIGKRISTALLTRACERN

W.J. Hiller, St. Koch, T.A. Kowalewski
MPI für Strömungsforschung, Bunsenstr.10, 3400 Göttingen

Zusammenfassung

Für die Untersuchung einer thermisch angetriebenen Konvektionsströmung in einer würfelförmigen Zelle wurde ein Meßverfahren entwickelt, welches die simultane Sichtbarmachung von Geschwindigkeits- und Temperaturfeldern gestattet. Das Verfahren beruht darauf, daß die in dem Strömungsmedium suspendierten Tracer aus ungekapselten Flüssigkristallen bestehen, die in Abhängigkeit von ihrer Temperatur weißes Licht wellenlängenselektiv reflektieren. Durch Messung der Wellenlänge des reflektierten Lichtes läßt sich die Temperatur der Tracer bestimmen, aus der dann auf die des unmittelbar umgebenden Mediums geschlossen wird. Die bei den Versuchen erzielte Meßgenauigkeit liegt bei $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Wegen der chemischen Unbeständigkeit der Tracersubstanzen beschränkt sich ihre Anwendung auf eine sehr begrenzte Anzahl von Fluiden. Die viel resistenteren gekapselten Flüssigkristalle sind wegen des hohen Anteils unselektiv gestreuten Lichtes in Flüssigkeiten nicht brauchbar. Die Geschwindigkeit wird aus der Änderung der räumlichen Lage der Tracer bestimmt. Über Einzelheiten der Versuchstechnik und die Herstellung der Tracer wird berichtet.

1. Einführung

Während für Sichtbarmachung, Aufzeichnung und Analyse von Geschwindigkeitsfeldern strömender Medien schon seit längerem bewährte Methoden existieren, die immer weiter vervollkommenet und durch neue Verfahren ergänzt werden, befindet sich die Registrierung und Analyse von Temperaturfeldern erst im Anfangsstadium der Entwicklung. Im folgenden wollen wir über Erfahrungen mit Flüssigkristalltracern, die in Form kleiner Tröpfchen in der Flüssigkeit suspendiert werden, zur simultanen Temperatur- und Geschwindigkeitsmessung berichten. Diese Tracer schwimmen gleichsam als kleine Thermometer mit der Strömung mit, und die Verfolgung ihrer Spuren gibt zusätzlich Aufschluß über die Strömungsgeschwindigkeit.

2. Prinzip des Verfahrens

Unter den Flüssigkristallsubstanzen besitzen einige die interessante Eigenschaft, weißes Licht in Abhängigkeit von der Substanztemperatur selektiv zu reflektieren. Diese Eigenschaft nutzen wir in der Weise aus, daß wir die LC als kleine Partikel dem Strömungsmedium beifügen und aus der Wellenlänge des reflektierten Lichtes auf die Temperatur der Partikel und - unter gewissen Einschränkungen - auch auf die des unmittelbar umgebenden Mediums schließen. Die Art der Lichtreflektion ist vom Prinzip her der beim Fabry-Perot -Interferenzfilter gleich, und wie diese ist sie vom Winkel zwischen dem beleuchtenden Lichtstrahl und der Beobachtungsrichtung abhängig. Bei einer Vergrößerung des Winkels wird also die Wellenlänge des reflektierten Lichtes zu kleineren Werten verschoben. Außerdem geht mit dieser Verschiebung eine Änderung des Temperaturbereiches einher, in der sich die Farbe des reflektierten Lichtes von Rot nach Blau ändert. Um diese beiden störenden Effekte auszuschalten, muß man dafür sorgen, daß der Winkel zwischen Beobachtungs- und Beleuchtungsrichtung konstant ist. Am einfachsten gelingt

dies durch Beleuchtung mit einem parallelen Lichtbündel (Lichtschnitt) und durch Beobachtung des Streulichtes unter konstantem Winkel. Bei den Experimenten hat sich auch aus Gründen der Unterdrückung von unerwünschtem Streulicht ein Winkel von 90° als günstig erwiesen.

Die derzeit auf dem Markt erhältlichen LC sind in einem Temperaturbereich von etwa -30 bis 120°C einsetzbar. Der Farbumschlag von Rot nach Blau ist je nach Substanzzusammensetzung in einem Temperaturintervall von $0,5$ bis ca. 20°C frei wählbar. Diese Angaben gelten für die Beobachtung in Rückstreuung. Über die physikalischen und chemischen Eigenschaften der LC existiert eine umfangreiche Literatur; einen guten Überblick findet man z.B. in "Physics Today, May 1982" [1]. Ergänzend sei noch erwähnt, daß die Entwicklung neuer Substanzen, die auch bei wesentlich höheren Temperaturen einsetzbar sein sollen, in vollem Gange ist.

3. Herstellung der LC-Tracerteilchen.

Flüssigkristalle werden nicht nur als reine Substanz sondern auch in der Konfektionierung als kleine verkapselte Tröpfchen angeboten, die in einer wässrigen Lösung suspendiert sind. Schon bei den ersten Experimenten mit den verkapselten LC zeigte sich eine derart starke unerwünschte Lichtstreuung an den Kapselwänden, so daß das Nutzsignal stark von weißem Licht verhüllt war. Mit bloßem Auge konnten praktisch keine Rot-Töne mehr beobachtet werden, während dieselben verkapselten LC auf einer Oberfläche aufgetragen noch durchaus gute Signale ergaben. Deshalb wurde es notwendig, als Tracer ungekapselte LC zu verwenden. Dazu wird die LC-Substanz -wir verwenden synthetisch hergestellte Präparate auf Cholesterinbasis der Fa. BDH (England)- in einem Lösungsmittel, das die chemische Struktur der LC nicht angreift, gelöst und in einer Düse zerstäubt. Die dabei entstehenden Tröpfchen fallen in einem Rohr auf eine Glycerinoberfläche und werden durch eine rotierende Walze in das Glycerin eingemischt. Während die Teilchen im Rohr herunterfallen, verdampft das Lösungsmittel. Etwaige verbleibende Lösungsmittelreste werden durch nachfolgendes Evakuieren aus dem erwärmten Glycerin herausgetrieben. Je nach Konzentration der Lösung und den Betriebsparametern der gepulsten Düse, die speziell für diesen Zweck entwickelt wurde, läßt sich die Teilchengröße variieren. Für unsere Versuche verwenden wir meist Tracer mit einem Durchmesser von $30-100\ \mu\text{m}$. Ergänzend sei noch erwähnt, daß "sauberes" Arbeiten den größten Einfluß auf die Ergebnisse hat. Alle Teile die mit dem gelösten LC in Berührung kommen, bestehen bei unserer Apparatur aus Teflon oder Edelstahl rostfrei. Auch so nebensächlich erscheinende Prozesse, wie etwa die Abfilterung der Lösung von eventuell die Düse verstopfenden festen Partikeln erfordert große Sorgfalt.

Als geeignetes Trägerfluid für die LC hat sich Glycerin erwiesen, indem die LC über längere Zeit (10 Tage) ihre Reflektionseigenschaften erhalten. Ein anderer Vorteil des Glycerins besteht darin, daß sein optischer Brechungsindex sehr nahe an dem der von uns verwendeten (doppelbrechenden) LC liegt. Durch Verdünnung mit Wasser läßt sich die Zähigkeit und damit auch die Rayleigh- und Prandtlzahl in einem großen Bereich ändern. Bis zu einer Prandtlzahl von etwa 100 bleibt die Beständigkeit der Suspension erhalten.

4. Eichung der Temperaturabhängigkeit

Zur Eichung der Temperaturabhängigkeit wurde die Suspension aus LC und Glycerin in eine würfelförmige Meßzelle von $38\ \text{mm}$ Kantenlänge gefüllt. Zwei gegenüberliegende Seiten dieses Gefäßes bestehen aus schwarz vernickelten Kupferplatten, die mit je einem Peltierelement auf einem vorgegebenen Temperaturniveau gehalten werden können. Die restlichen 4 Wände bestehen aus $6\ \text{mm}$ dickem Plexiglas. In diesem Gefäß wurde ein senkrecht nach oben positiver Temperaturgradient von $3^\circ\text{C}/38\ \text{mm}$ durch entsprechendes Temperieren der Kupferplatten eingestellt, so daß der Farbumschlagbereich der LC

darin enthalten war. Da diese Temperaturschichtung stabil, und die Wärmeleitung durch die Plexiglasseitenwände sehr gering ist, ist der Temperaturgradient auf der Kanalmitte praktisch konstant, sodaß aus dem Abstand H gemessen vom oberen Deckelrand aus, die auf der Kanalachse herrschende Temperaturverteilung berechnet werden kann. Der Kanal wird nun von der Seite mit einem Lichtschnitt beleuchtet und unter einem Winkel von 90° durch eine Reihe verschiedener Interferenzfilter mit einer Fernsichtkamera beobachtet. Aus der Lage der so sichtbar gemachten Isothermen erhält man die in Abb. 1 dargestellte Eichkurve. Diese verläuft im roten Bereich sehr steil, dort entsprechen schon kleinen optischen Wellenlängendifferenzen relativ große Temperaturdifferenzen, und die Meßgenauigkeit ist hoch. Zum Bereich des blauen Lichtes hin wird die Eichkurve immer flacher, und die Meßgenauigkeit nimmt ab. Bei einer Halbwertsbreite unserer Interferenzfilter

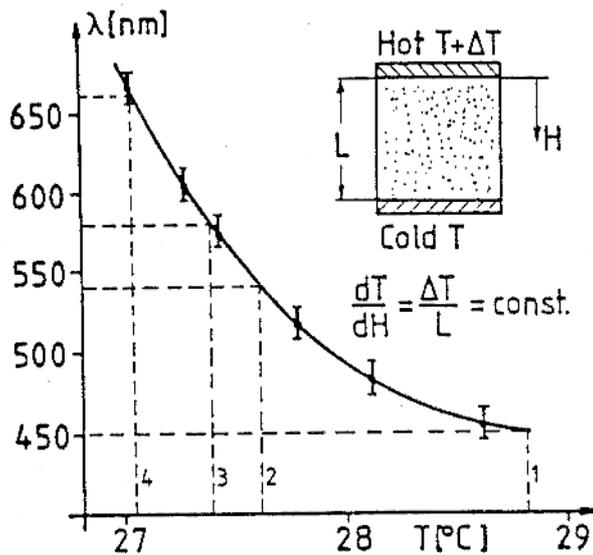


Abb. 1 Eichung der Temperaturabhängigkeit. Die mit den Ziffern: 1 (blau), 2 (grün), 3 (gelb), 4 (rot) gekennzeichneten Farben werden später zur Markierung der Isothermen benutzt. Die in der Eichkurve eingezeichneten senkrechten Balken geben die Halbwertsbreite unserer Interferenzfilter an.

von 15 nm würden wir also im roten Bereich eine Auflösung von $0,07$ und im blauen Bereich von $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ erwarten.

Wie man schon aus der Richtungsabhängigkeit der Streulichtfrequenz vermuten kann, wird die Meßgenauigkeit auch von dem Winkel, unter dem das Streulicht beobachtet wird, beeinflusst. Dieser Einfluß wurde mit der in Abb. 2 skizzierten Anordnung, bei der zur Beleuchtung der Tracer ein monochromatischer He-Ne-Laserstrahl benutzt wurde, untersucht. Unter Ausnutzung der Kenntnis der vertikalen Temperaturverteilung längs der Kanalachse wurde für vorgegebene Beobachtungswinkel der jeweilige Abstand H bestimmt, bei dem das empfangene Streulichtsignal ein Maximum hat. Das Streulicht selbst wurde unter einem sehr kleinen Öffnungswinkel mit einer Fotodiode gemessen. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses wurde ein Lock-In Verstärker benutzt. In Abb. 3 ist für einen festen Beobachtungswinkel der so gemessene Intensitätsverlauf des von den LC in Abhängigkeit von ihrer Temperatur gestreuten Lichtes dargestellt. Aus der unter verschiedenen Winkeln gemessenen Lage der Streulichtmaxima gewinnt man die in Abb. 4 dargestellte Temperaturverschiebung für das Erscheinen von Rot ($\lambda = 633 \text{ nm}$) als Funktion des Beobachtungswinkels α . Die Kurve ist bezogen auf einen Beobachtungswinkel von 90° . Aus dieser Kurve sieht man unmittelbar, daß auch der Öffnungswinkel, unter dem das von den LC gestreute Licht gesammelt wird, für die Reinheit der Farbe wichtig ist. Um die schon weiter oben erwähnte Auflösung von $0,07 \text{ }^\circ\text{C}$ zu gewährleisten, sollte der Öffnungswinkel nicht größer als 3° sein. In Rückstreuung hingegen ($\alpha = 0^\circ$) durchläuft die Temperaturverschiebung ein Minimum, dort spielt der Öffnungswinkel nur eine kleine Rolle.

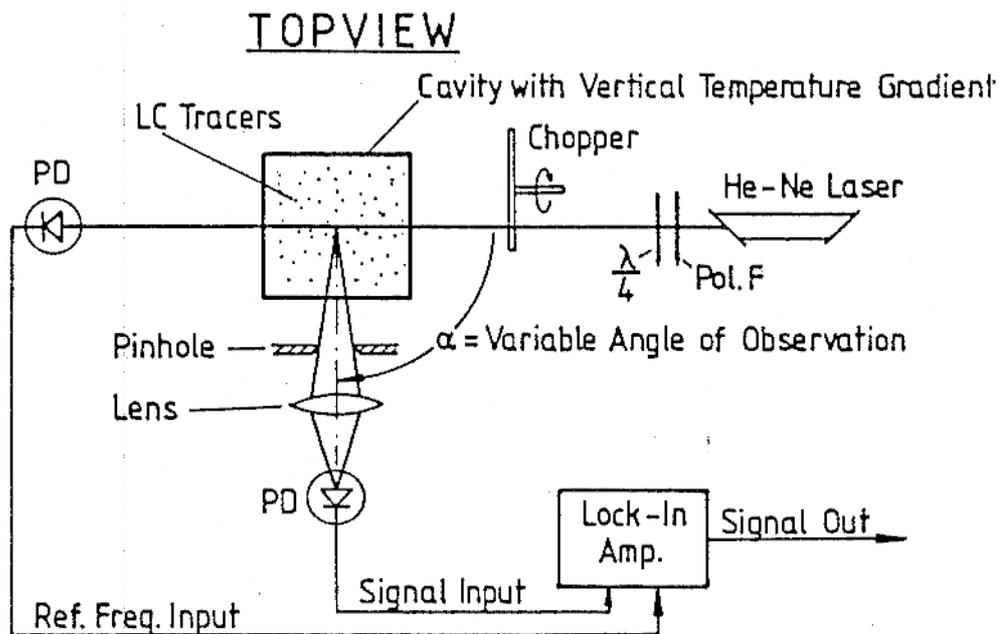


Abb. 2 Eichung der Winkelabhängigkeit des von den LC-Tracern gestreuten Lichtes.

5. Auswertung

Im Prinzip könnte man die zur Eichung benutzten Verfahren auch zur Auswertung verwenden. Es stellt sich aber schnell heraus, daß dieses Verfahren nicht operativ ist. Eine Registrierung der Tracer auf Farbfilm und nachfolgender Bearbeitung bringt nur zusätzliche Komplikationen (wie z.B. die Eichung des Aufnahmемaterials) und verschiebt das Problem auf die Analyse der Filmbilder. Es scheint uns, daß man die Farbe der Tracer am einfachsten mit Hilfe einer Farbfernsehkamera bestimmen können sollte. Geeignete Verfahren, die auch für die Analyse kleiner Bildpunkte anwendbar sein sollten, sind in der Literatur bereits beschrieben [2]. Sie beruhen im Prinzip darauf, daß man aus den Anteilen der drei von der Kamera gelieferten Farbsignale (R,G,B), die Farbe des Tracerteilchens auch in Bezug auf die Wellenlänge rekonstruieren kann. Dies gelingt umso besser, je geringer die Weißverhüllung der Tracer durch unerwünschtes Streulicht ist. Da die Tracerteilchen sehr klein sind und in vielen Fällen wohl nur noch als kleine Beugungsscheibchen auf der Sensorschicht der Farbfernsehkamera abgebildet werden, ist von der Verwendung einer einfachen Kamera mit nur einem maskierten Aufnahmechip abzuraten. Aus Mangel an einer geeigneten Kamera haben wir mit diesem quantitativen Auswerteverfahren noch keine eigenen Erfahrungen sammeln können.

Ein ganz anderes Problem bei der Benutzung von LC-Tracern besteht darin, daß häufig der Farbspielbereich nicht den gesamten zu untersuchenden Temperaturbereich abdeckt. Hier läßt sich Abhilfe durch simultane Verwendung von LC mit verschiedenen Umschlagbereichen schaffen. In der Praxis darf man aber nicht vergessen, daß proportional zur Zahl der verwendeten LC-Substanzen die Anzahldichte der Tracer ansteigt. Dadurch wächst aber gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit, daß verschiedenartige Tracer koagulieren und dabei neue unbekannte Farbumschlagbereiche bilden, stark an.

Die Ermittlung der Geschwindigkeitsfelder aus der zeitlichen Abfolge der Tracerorte wurde ganz konventionell durchgeführt und soll an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden.

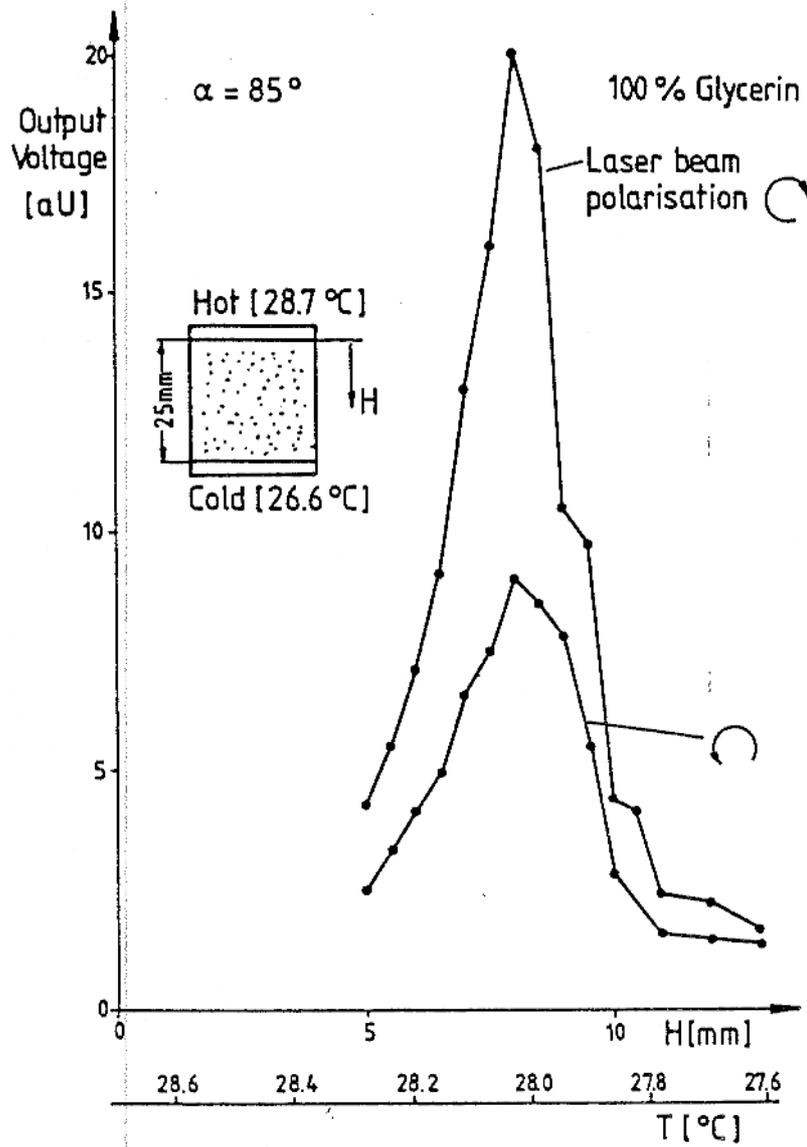


Abb. 3 Beispiel für den Verlauf der gemessenen Streulichtintensität in Abhängigkeit von der Temperatur.

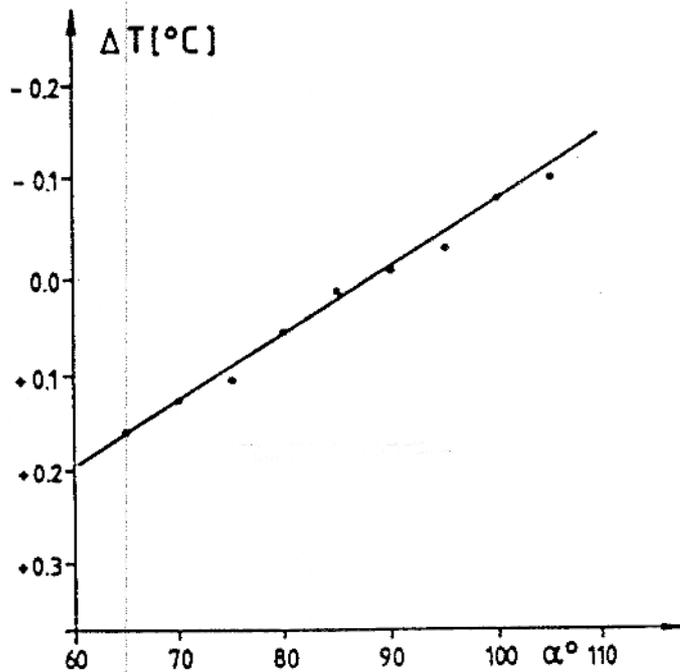


Abb. 4 Temperaturverschiebung für den Einsatz von Rot in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel.

6. Ein Anwendungsbeispiel

Im folgenden wollen wir zur Veranschaulichung der Methode einige Ergebnisse, die wir bei der Untersuchung einer Konvektionsströmung in einer kubischen Zelle gewonnen haben, vorstellen [3]. Als Strömungskanal benutzen wir das schon zur Eichung verwendete Plexiglassgefäß mit den beiden temperierbaren Metallwänden, die beim Versuch senkrecht stehen und auf vorgegebenen Temperaturen gehalten werden. Es stellt sich alsbald eine rotierende Strömung ein, die stark dreidimensionale Strukturen aufweist. In dem von uns untersuchten Rayleighzahlbereich bis zu einigen 10^5 ist die Strömung stationär. Deshalb gestaltet sich die Auswertung relativ einfach. Abb. 5 zeigt eine mehrfach belichtete Farbaufnahme eines zentralen Vertikalschnittes durch den Kanal. Am linken Bildrand befindet sich die geheizte und am rechten die gekühlte Wand. Ihre Temperaturdifferenz beträgt 15°C , was mit Glycerin als Strömungsmedium einer Rayleighzahl von $Ra = 80000$ entspricht. Man sieht deutlich den Verlauf der Isothermen und kann auch die Stromlinien in der Umgebung der beiden Wirbelzentren gut erkennen. Die absolute Lage der Wandtemperaturen ist so gewählt, daß der Farbumschlag, der bei Änderung von Rot nach Blau einer Temperaturdifferenz von 3°C entspricht, in der Nähe der Wirbelzentren liegt. Als Fotomaterial wurde Tageslichtumkehrfilm benutzt. Die Lichtquelle zur Erzeugung der ca. 3 mm breiten Lichtschnitte wird von einer stabförmigen Xenon-Lampe gebildet. Stellt man von den Farbdias S/W-Papierbilder her, so kann man fast überall im Kanal die Spuren der Tracer verfolgen. Aus diesem Grunde haben wir von der Erweiterung des Meßbereiches durch Zugabe von Tracern mit anderen Umschlagbereichen keinen Gebrauch gemacht.

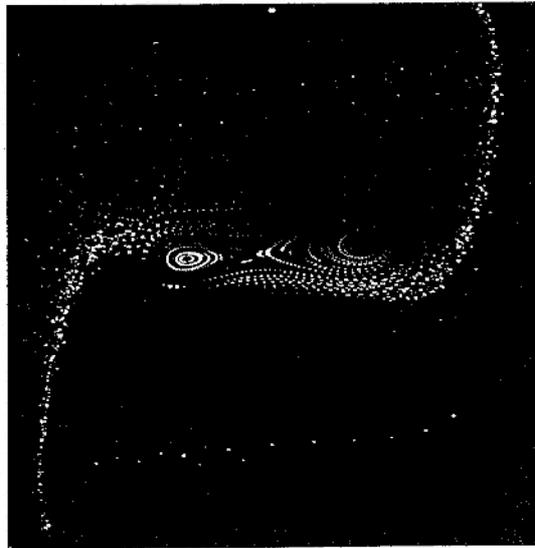


Abb. 5 Vertikaler Mittenschnitt aufgenommen bei $Ra = 80000$. Mehrfachbelichtung.

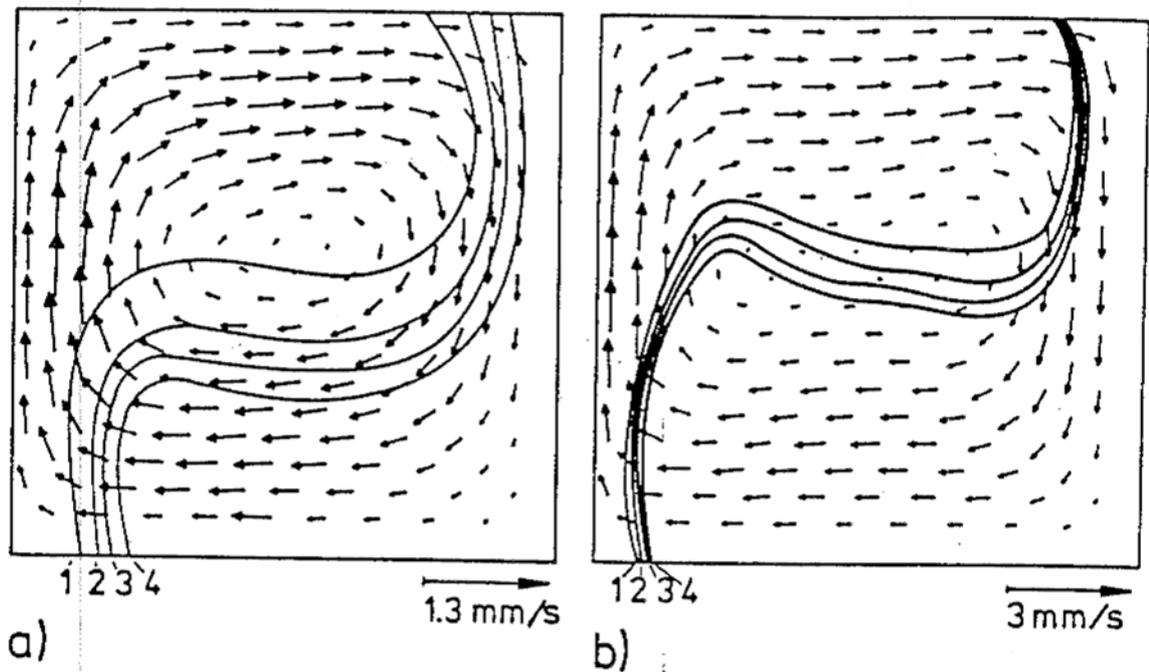


Abb. 6 Geschwindigkeits- und Temperaturfelder in einem Vertikalschnitt in Kanalmitte. a) $Ra = 20000$, b) $Ra = 80000$.

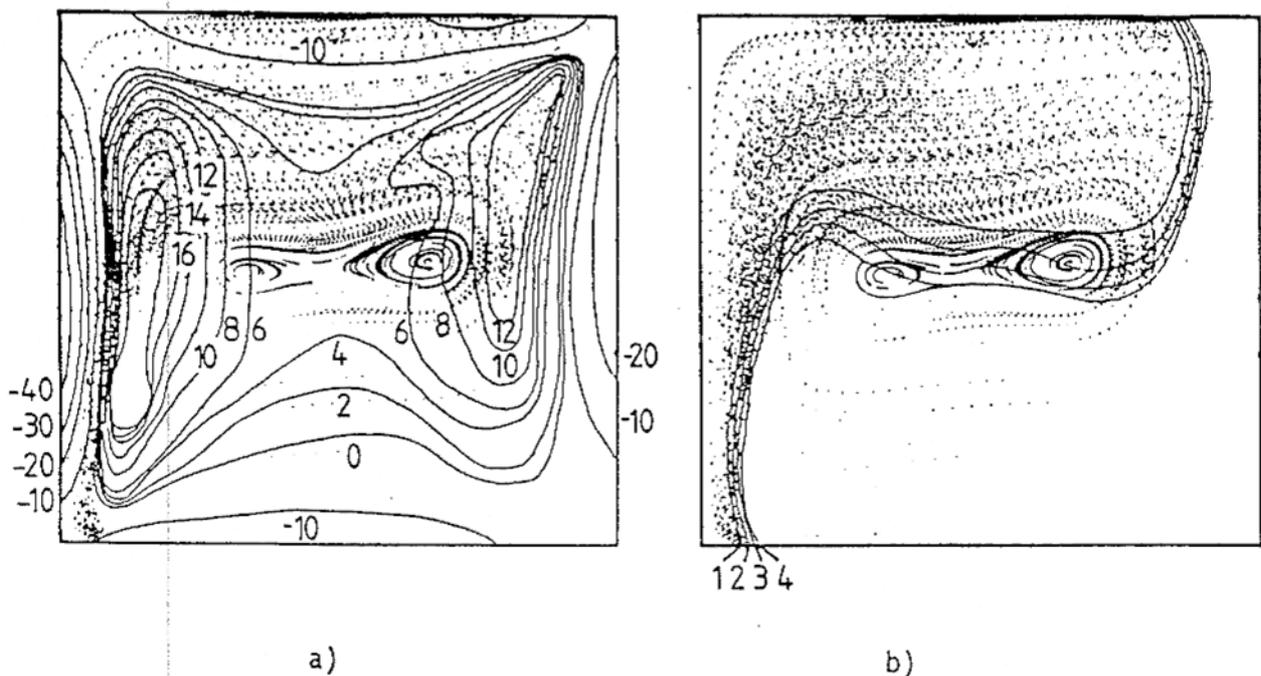


Abb. 7 Horizontalkomponente der Wirbelstärke - (a) und Isothermen - (b) in einem Vertikalschnitt durch die Kanalmitte, $Ra = 80000$.

Eine typische Auswertung solcher Fotos ist in den Abb. 6a,b dargestellt, welche das Geschwindigkeitsfeld und den Verlauf der Isothermen zeigen. Die Isothermen sind mit Ziffern versehen, die den in der Eichkurve angegebenen Temperaturen in etwa entsprechen. Sie wurden "nach Augenschein" aus den Farbfotos herausgezeichnet und dann in das Geschwindigkeitsfeld übertragen.

Ein anderes Beispiel, in dem für einen senkrechten Mittelschnitt die Horizontalkomponente von $\text{rot}(v)$ und $\text{grad}(T)$ aufgetragen sind, zeigt Abb. 7a,b. Man erkennt noch deutlich die von der ebenen Wirbeltransportgleichung geforderte Übereinstimmung der Lage der Maxima von $\text{rot}(v)$ und von $\text{grad}(T)$.

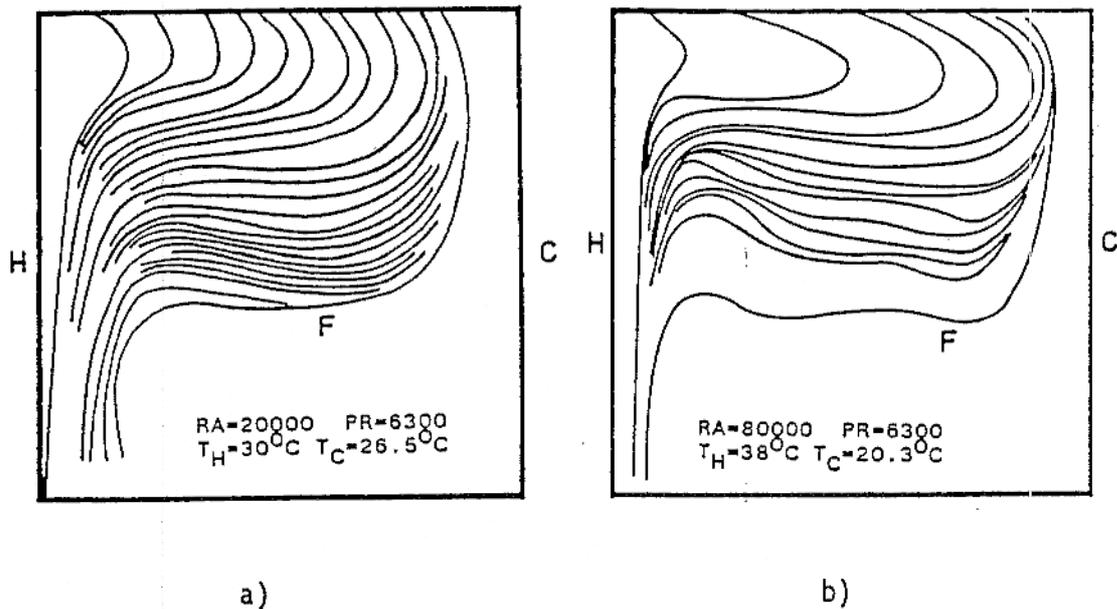


Abb. 8 Zeitliche Entwicklung der Isothermen (27°C) ausgehend vom Ruhezustand. a) Einwirbelsystem $Ra=20000$, b) Zweiwirbelsystem $Ra=90000$, Zeitabstand zwischen den Isothermen 2 min. F ist der stationäre Endzustand.

Ein drittes Beispiel, bei dem die Lokalisierung der Isothermen "nach Augenschein" vorgenommen wurde, ist in Abb. 8a,b dargestellt, welche die zeitliche Entwicklung der Isothermen ausgehend vom Ruhezustand der Strömung beschreibt. Hier haben wir nur die Lage der "roten" Isothermen eingetragen, die man wesentlich genauer verfolgen kann, so daß diese Ergebnisse fast quantitativen Charakter haben. Ein Blick auf das Farbfoto zeigt, daß im Zentrum des Kanales im wesentlichen ein vertikaler Temperaturgradient vorherrscht. Beleuchtet man nun bei dieser Einstellung den Kanal mit einem horizontalen Lichtschnitt großer Breite (ca. 10 mm), so sieht man auf den Farbfotos die Projektionen der von den Seitenwänden zur Kanalmitte sich auf Spiralen bewegendes Tracerbahnen. Aus dem Farbwechsel dieser Spuren etwa von Rot nach Grün wissen wir, daß sich das Teilchen nach oben bewegt. Wir können also die Farbe der Spuren den räumlichen Verlauf der Teilchenbahnen rekonstruieren. Dies war für die Analyse der Strömungsstrukturen eines unserer wichtigsten Hilfsmittel.

7. Ausblick

Die hier vorgestellte Experimentiertechnik darf nur als ein erster Schritt gesehen werden. Noch liegen zu wenig Erfahrungen vor, um sie abschließend beurteilen zu können. Die größten Probleme bei den Versuchen machten uns immer wieder die "Ausreißer" unter den Tracern; d.h. es gab unter ihnen immer wieder solche, die einen anderen Umschlagbereich besaßen. Falls es gelänge, deren Entstehung zu unterbinden oder stark zu reduzieren, wäre eine genauere und insbesondere auch eine vollautomatisierte Temperaturbestimmung einfacher zu realisieren. Auch bei den gekapselten LC findet man diese Ausreißer.

Die Beschränkung auf nur wenige ausgesuchte Flüssigkeiten wie Glycerin und Glycerin-Wasser-Mischungen muß zur Zeit noch hingenommen werden. Eventuell gelingt es später einmal, resistenter LC herzustellen.

Für die Messung in Luft sind die LC-Tracer nicht geeignet, da sich wegen des langsamen Wärmeaustausches zwischen Gas und LC sehr große Relaxationszeiten ergeben. Aber auch bei schnellen Strömungsvorgängen in Flüssigkeiten können die den LC-Substanzen inhärenten Relaxationszeiten, die bei den chiral-nematischen Typen auf Cholesterolbasis etwa 1 ms betragen, zur Verfälschung der Ergebnisse führen.

8. Literatur

- [1] J. David Lister, "Special Issue: liquid crystals", Physics Today, May 1982, pp.25-74.
- [2] N.A. Wilcox, A.T. Watson, G. Tatterson, "Multispectral Image Processing of Temperature Sensitive Tracer Particles", Chem. Eng. Sci., vol.41, 1986, pp.2137-2152.
- [3] W.J. Hiller, St. Koch, T.A. Kowalewski, "Three-Dimensional Structures in Laminar Natural Convection in a Cubic Enclosure", Exp. Thermal and Fluid Sci., erscheint in vol. 2, 1989.