

Mitteilung

Projektgruppe/Fachkreis: Experimentelle Strömungsmechanik

Ansprechpartner: Tobias Mey

Institution: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Abteilung Fluidsysteme

Adresse: Bunsenstraße 10
37073 Göttingen

Telefon: +49 (551) 709-2251

Telefax: +49 (551) 709-2241

e-mail: tobiasmey@web.de

weitere Partner: Andreas Westhoff, Claus Wagner

Thema: Experimentelle Untersuchung der Strömungsstruktur in einer beheizten Kanalströmung

Ausgangssituation:

In zahlreichen technischen Anwendungen, wie z.B. bei der Solar- und Geothermie, bei Wärmetauschern im Allgemeinen sowie bei dem Beschichtungsverfahren der chemischen Gasphasenabscheidung spielt die vorliegende Strömungsstruktur eine wichtige Rolle. Sie ist ein entscheidender Faktor für den Wirkungsgrad des Bauteils bzw. für die Qualität der zu erzeugenden Oberfläche. Das Auftreten einer auftriebsinduzierten Strömung wirkt sich in den ersteren Beispielen positiv hinsichtlich des Wärmetransfers aus, im letzteren Anwendungsbeispiel hat es jedoch den negativen Effekt einer inhomogenen Beschichtung zur Folge (1).

Die Optimierung der genannten Anwendungen und Verfahren erfordert grundlegende Kenntnisse über die Bedingungen für die Entstehung einer solchen sogenannten Mischkonvektion (i.e. die Überlagerung einer erzwungenen mit einer freien Konvektion). Weiterhin ist hierbei von entscheidender Bedeutung unter welchen Voraussetzungen die Strömungsstruktur laminaren bzw. turbulenten Charakter annimmt.

Trotz zahlreicher Studien zu diesem Themenkomplex ist es bisher nicht gelungen, diese Fragen in befriedigender Weise zu beantworten (2,3,4).

Ziel:

Für einen generischen Wärmetauscher, d.h. einen rechteckigen Strömungskanal mit beheizter, isothermer Unterseite und adiabaten Seitenwänden sowie adiabater Oberseite, ist die Strömungsstruktur auf experimentelle Weise zu charakterisieren. Als Fluid wird Wasser verwendet. Die relevanten Kennzahlen der erzeugten Strömung sind die Reynolds-Zahl Re sowie die Rayleigh-Zahl Ra . Diese sind so zu wählen, dass sowohl eine laminare als auch eine turbulente Mischkonvektion gleichzeitig vorliegen. Auf diesem Wege sollen einerseits die räumliche Ausdehnung des einen oder des anderen Strömungszustands gefunden werden. Weiterhin ist insbesondere die Art und Weise des Regimewechsels zu studieren.

Als Parameter dieser Untersuchung sind der Temperaturunterschied ΔT zwischen dem einströmenden Fluid und der beheizten Unterseite des Kanals sowie die mittlere Einströmgeschwindigkeit U anzuführen, variiert wird jedoch lediglich ΔT . Die Archimedes-Zahl $Ar = g\beta\Delta T L/U^2$ versteht sich in diesem Zusammenhang als Verhältnis der durch ΔT verursachten Auftriebskraft zur Trägheitskraft und wird hier als dimensionslose Kennzahl der Strömung angeführt.

g Erdschwerebeschleunigung, β Wärmeausdehnungskoeffizient, L Kanalhöhe

Lösungsweg:

Zur Untersuchung der relevanten Prozesse wird der generische Wärmetauscher anhand eines Strömungskanals mit den Abmessungen Höhe x Breite x Länge = 20 x 250 x 1500 mm realisiert. Dessen Grundseite besteht aus einer von innen verrohrten Aluminiumplatte, die von einem Temperiermedium durchströmt und so auf eine möglichst konstante Temperatur gebracht wird. Die Seiten- und Deckenfläche sind aus Plexiglas gefertigt, sodass ein visueller Zugang zum Messbereich ermöglicht wird.

Durch Verwendung eines (unbeheizten) Vor- und Nachlaufs von 1000 mm bzw. 600 mm Länge wird eine möglichst geringe Beeinflussung der Strömung im Bereich des Wärmetauschers durch äußere Einflüsse sichergestellt. Weiterhin dient eine sich vor dem Kanal anschließende Beruhigungskammer dazu, niederfrequente Turbulenzen aus der Strömung herauszufiltern und ein über die gesamte

Kanalbreite möglichst gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil zu erzeugen. Auf diesem Wege soll eine wohldefinierte Zuströmbedingung geschaffen werden.

Es wird eine Strömung mit der Reynolds-Zahl $Re = UL/\nu = 200$ (ν kinem. Viskosität) erzeugt, welche zunächst eine laminare Kanalströmung darstellt. Mit dem zusätzlichen thermischen Einfluss werden Archimedes-Zahlen im Bereich $2.2 < Ar < 4.2$ erreicht.

Anhand von Messungen mittels planarer Particle Image Velocimetry wird in dem beschriebenen Aufbau das Geschwindigkeitsfeld $u(x,y)$ der Strömung in einer Ebene parallel zur Bodenfläche bestimmt. Zu jedem Messfall werden dabei 2000 einzelne Strömungsfelder in äquidistanten Zeitschritten im Abstand von 1.7s ermittelt, was sich zur Auflösung der in diesem Fall sehr langsamen Strömung von $U = 1\text{cm/s}$ als ausreichend erwiesen hat. Mittels der so ermöglichten Untersuchung der zeitlichen Dynamik sind Hinweise auf eine laminare oder eine turbulente Mischkonvektion zu finden: geringe zeitliche Schwankungen im Strömungsfeld deuten auf laminare Strukturen hin, während bei starken zeitlichen Schwankungen von einem turbulenten Charakter ausgegangen werden kann.

Schließlich soll mit diesen Ergebnissen die räumliche Ausdehnung der beiden Strömungsregime quantifiziert werden, sodass sowohl die Stelle des Regimewechsels angegeben werden kann, als auch die Art und Weise, wie dieser sich vollzieht.

Zur Umgehung von Problemen, die von Messfehlern bzw. Rauschphänomenen herrühren, wird bei dieser Analyse eine Datenreduktion durchgeführt. Bei der hier vorliegenden Mischkonvektion treten in Strömungsrichtung orientierte Konvektionsrollen auf, dessen Mittelpunkte im Strömungsfeld $u(x,y)$ als lokale Geschwindigkeitsmaxima zu identifizieren sind (5). Diese Rollenzentren werden anhand eines Algorithmus bestimmt und mit dem Wert „1“ bewertet, alle übrigen Stellen erhalten den Wert „0“. Eine anschließende Mittelung dieser binären Verteilung über alle 2000 Messpunkte liefert die Aufenthaltswahrscheinlichkeit $p(x,y)$ der Konvektionsrollen für den gesamten Messverlauf, wie unter Abbildung 1) und 2) dargestellt.

Ergebnis:

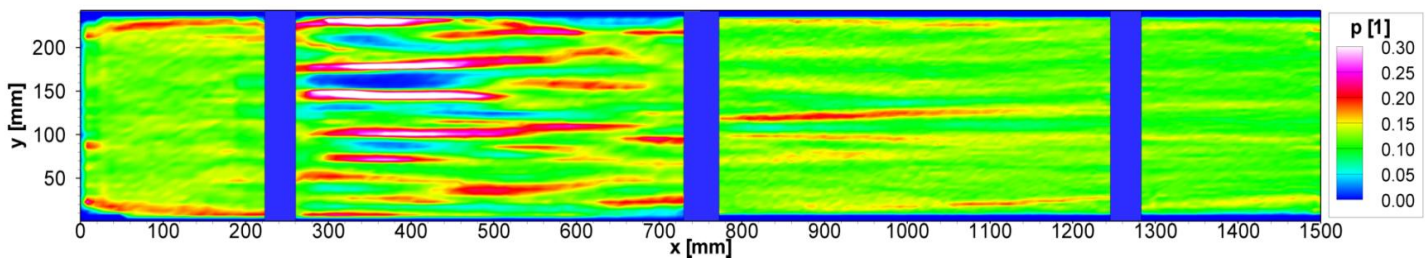


Abbildung 2: Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Konvektionsrollen für $Ar = 2.2$

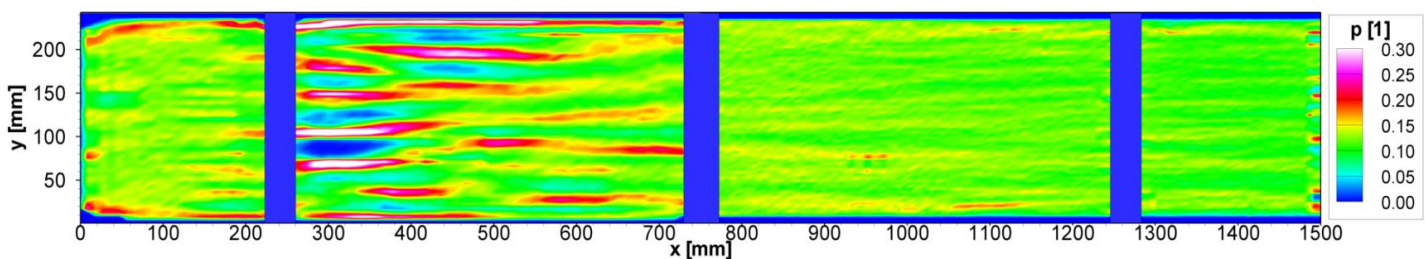


Abbildung 1: Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Konvektionsrollen für $Ar = 4.2$

Als Ergebnis ist in Abb. 1 und 2 die Aufenthaltswahrscheinlichkeit $p(x,y)$ der Konvektionsrollen für $Ar = 2.2$ sowie für $Ar = 4.2$ dargestellt. Die drei ausgeblendeten blauen Balken sind messtechnisch unzugängliche Bereiche, an diesen Stellen befanden sich während der Messung Spannurgurte zur Fixierung des Kanals. Der Bereich links vom ersten Spanngurt entzieht sich einer sinnvollen Interpretation, da hier aufgrund von schlechten Helligkeitsverhältnissen bei der PIV-Auswertung keine vertrauenswürdigen Ergebnisse erzielt werden konnten. Somit ist die Entstehung der laminaren Mischkonvektion nicht zugänglich, jedoch kann der Übergang zur turbulenten Mischkonvektion nachvollzogen werden.

Für beide Archimedes-Zahlen sind direkt hinter dem ersten Spanngurt ausgeprägte Streifen mit maximaler, mittlerer zeitlicher Aufenthaltswahrscheinlichkeit $p \approx 0.3$ zu sehen, welche durch Stellen mit minimalen Werten $p \approx 0$ voneinander getrennt sind. Hier sind also klar abgegrenzte Orte

vorzufinden, an denen sich Konvektionsrollen bevorzugt aufhalten, sowie Orte, an denen sie nie vorzufinden sind.

Nun findet man deutliche Unterschiede, wenn man die Ausdehnung dieser Streifen in x-Richtung betrachtet. Für den Fall $Ar = 2.2$ weisen sie ganz verschiedene Längen auf, man findet ein sukzessives Zusammenbrechen der stabilen Rollenpositionen. Der Bereich dieses Zusammenbrechens erstreckt sich von $x \approx 400 \text{ mm}$ bis $x \approx 650 \text{ mm}$ und kann als Übergangsbereich zu einer turbulenten Mischkonvektion interpretiert werden, welche für $x > 650 \text{ mm}$ angenommen wird.

Im Falle von $Ar = 4.2$ vollzieht sich der Regimewechsel früher und deutlich schlagartiger. Die bei $x = 300 \text{ mm}$ vorliegenden vier zentralen Konvektionsrollen verlieren ihre stabilen Positionen alle etwa gleichzeitig im verhältnismäßig schmalen Bereich $350 \text{ mm} < x < 400 \text{ mm}$. Hier kann also für $x < 350 \text{ mm}$ von einer laminaren Strömung ausgegangen werden, während diese für $x > 400 \text{ mm}$ turbulente Aspekte aufweist.

Anhand der durchgeführten Stabilitätsanalyse konnten somit Bereiche für eine laminare Mischkonvektion und eine turbulente Mischkonvektion bestimmt werden, sowie die Ausdehnung des Gebiets in der sich der Übergang zwischen den zwei Strömungsregimen vollzieht.

Literatur:

1. **Maughan, J. R. and Incropera, F. P.** 1990, *Regions of Heat Transfer Enhancement for Laminar Mixed Convection in a Parallel Plate Channel*. International Journal of Heat and Mass Transfer 33, pp. 555-570.
2. **Benderradji, A., et al.** 2008, *Characterization of Fluid Flow Patterns and Heat Transfer in Horizontal Channel Mixed Convection*. Heat Mass Transfer 44, pp. 1465-1476.
3. **Kim, M. C., Chung, T. J. and Choi, C. K.** 2003, *The Onset of Convective Instability on the Thermal Entrance Region of Plane Poiseuille Flow Heated Uniformly From Below*. International Journal of Heat and Mass Transfer 46, pp. 2629-2636.
4. **Osborne, D. G. and Incropera, F. P.** 1985, *Experimental Study of Mixed Convection Heat Transfer for Transitional and Turbulent Flow Between Horizontal, Parallel Plates*. International Journal of Heat and Mass Transfer 28, pp. 1337-1344.
5. **Chiu, K. C. and Rosenberger, F.** 1987, *Mixed Convection Between Horizontal Plates - II. Fully Developed Flow*. Heat Mass Transfer 30, pp. 1655-1662.

weiteres Vorgehen:

Da in dieser Untersuchung lediglich eine Messebene untersucht wurde, bietet es sich zunächst an, weitere, leicht versetzte Ebenen zu vermessen, z.B. in unmittelbarer Bodennähe, wobei die Schwierigkeiten der Helligkeitsverhältnisse am Beginn des Kanals beseitigt werden müssen. Somit wäre es möglich, auch die anfängliche die Ausbildung der laminaren Mischkonvektion zu studieren und den Bereich dieses Strömungsregimes nach unten hin abzugrenzen. Weiterhin könnten durch verschieden orientierte Messebenen die Konvektionsrollen direkt sichtbar gemacht werden und somit Information über die Dreidimensionalität der Strömung gewonnen werden.

Als Erweiterung zu PIV ist hier die Verwendung von Thermo Liquid Crystals (TLC) sinnvoll, damit könnten neben Geschwindigkeitsfeldern gleichzeitig Temperaturfelder ohne zusätzliche Beeinflussung der Strömung aufgenommen werden.

Ferner bietet es sich an den Parameterraum dieser Untersuchung auszudehnen und neben der Archimedes-Zahl beispielsweise die Reynolds-Zahl zu variieren oder ein anderes Aspektverhältnis zu wählen.