# Experimentelle Untersuchung von turbulenten Strömungsstrukturen in Mischkonvektion

# Experimental investigation of turbulent flow structures in mixed convection

#### Martin Herzberg, Christian Resagk, Christian Cierpka

Institut für Thermo- und Fluiddynamik, Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau E-Mail: martin.herzberg@tu-ilmenau.de

Gemische Konvektion, groß-skalige Strömungsstrukturen, PIV mixed convection, large-scale flow structures, PIV

#### Zusammenfassung

In Innenräumen ist häufig eine Raumluftströmung vorzufinden, welche durch Mischkonvektion gekennzeichnet ist. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Untersuchung von turbulenten Strömungsstrukturen, die in einem Modellraum im verkleinerten Maßstab von 1:15 untersucht werden. Hierzu wird ein neuer experimenteller Aufbau vorgestellt, der unter Verwendung der SCALEX-Anlage an der TU Ilmenau, dazu geeignet ist Kennzahlenbereiche für Rayleigh-Zahl *Ra*, Reynolds-Zahl *Re* und Archimedes-Zahl *Ar* einzustellen, die einen Vergleich mit Modellräumen im Originalmaßstab erlauben. Als Messverfahren für das Geschwindigkeitsfeld wird der experimentelle Aufbau mit einem Particle Image Velocimetry (PIV) Messsystem kombiniert. Es werden ersten Messungen bei kleinen Archimedes-Zahlen gezeigt und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen gegeben.

#### Einleitung

Für die thermische Behaglichkeit und die Energieeffizienz, sowie für die Verteilung von Schadstoffen und Aerosolen in Innenräumen spielen Strömungsstrukturen in Raumluftströmungen eine große Rolle. Raumluftströmungen sind im Allgemeinen durch Mischkonvektion gekennzeichnet, die sich aus natürlicher und erzwungener Konvektion zusammensetzt. Zur Untersuchung von Mischkonvektion steht ein Modellraum im verkleinerten Maßstab von 1:15 zur Verfügung. Der Modelraum hat eine Länge von 0,4 m, eine Höhe von 0,3 m und eine Tiefe von 0,5 m. Auf beide Seiten sind über die gesamte Tiefe Lufteinlässe (oben) und Luftauslässe (unten) angebracht. Im Modelraum befinden sich 4 Heizelemente, die jeweils aus 2 Heizpatronen und einem Aluminiumkörper bestehen und die Sitzreihen in einer Flugzeugkabine darstellen. Sie haben eine Breite von 4 cm, eine Höhe von 6 cm und sind in einem Abstand von 1,5 cm über dem Modelraumboden angebracht. Zwischen Vorder- bzw. Rückseite des Modellraums und den Heizelementen befindet sich ein Abstand von jeweils 5 mm.

Ein Maß für das Verhältnis von natürlicher und erzwungener Konvektion ist die Archimedes-Zahl Ar. Diese setzt sich aus der Rayleigh-Zahl Ra, der Reynolds-Zahl Re und der Prandtl-Zahl Pr wie folgt zusammen

$$Ar = \frac{Ra}{PrRe^2} = \frac{\beta g \Delta TH}{u_{in}^2}.$$

Dabei beschreibt  $\beta$  den Volumenänderungskoeffizienten des verwendeten Arbeitsgases, g die Fallbeschleunigung auf der Erdoberfläche,  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz zwischen Heizelementen und der mit der Geschwindigkeit  $u_{in}$  einströmenden Luft. In Simulationen und vorangegangenen Messungen konnte bereits gezeigt werden, dass sich in Abhängigkeit von der Archimedes-Zahl unterschiedliche Strömungsstrukturen (Abb. 1) ausbilden [Körner et al. 2013].



**Abb. 1** Darstellung der groß-skaligen Strömungsstrukturen (LSCs) in Abhängigkeit von der Archimedes-Zahl in einem Modelraum mit 4 Heizelementen, nach [Körner et al. 2013]

Bei kleinen Archimedes-Zahlen von Ar < 0,1 überwiegt die erzwungene Konvektion und die Auftriebskräfte der an den Heizelementen erwärmten Luft kann vernachlässigt werden. In diesem Fall treffen die beiden einströmenden Strahlen direkt aufeinander und werden nach unten in einen gemeinsamen Luftstrom abgelenkt. Auf Höhe der Heizelemente teilt sich dieser Luftstrom wieder in zwei Teilströme auf, die in Richtung der Einlässe abgeleitet werden. Dadurch bilden sich zwei gegenläufige Wirbel aus. Im Bereich der Mischkonvektion ( $Ar \approx 1$ ) kommt er zu einem Symmetriebruch in der Strömung. Die nicht mehr vernachlässigbaren Auftriebskräfte führen zur Formation eines großen Wirbels, der einen Großteil des gesamten Modelraums einnimmt. Der zweite Wirbel wird in den Bereich des Zuluftspalts verdrängt. Auf Grund der Symmetrie des Modelraumes kann sich die Wirbelstruktur in Richtung des Uhrzeigersinns aber auch in die Gegenrichtung ausbilden. Im Fall der überwiegenden natürlichen Konvektion bei Archimedes-Zahlen von  $Ar \ge 10$  dominieren die Auftriebskräfte. Das führt dazu, dass die Luft in der Mitte des Modelraumes nach oben aufsteigt. Ein strömungsmechanischer Kurzschluss zwischen Ein- und Auslass treibt eine Wirbelstruktur an, die sich nun in Gegenrichtung der ersten Strömungsstruktur ausbildet. Es ist davon auszugehen, dass unterschiedliche Strömungsstrukturen, eine unterschiedliche Auswirkung auf die Klimatisierung und die Vermischung von Frisch- und Altluft entfalten.

## **Experimenteller Aufbau**

Um den Modelraum mit den benötigten Volumenströmen am Ein- und Auslass zu versorgen ist Außen ein Ventilationssystem angebracht. Dieses besteht aus einem Ventilator, der die Luft antreibt und von den Auslässen in einem äußeren Führungssystem zurück zu den Einlässen leitet. In diesem Luftstrom ist ein Wärmeübertrager eingebracht, der die erwärmte abgeführte Luft wieder auf die vorgesehene Einlasstemperatur herunterkühlt und über ein angeschlossenes Thermostat die dabei freiwerdende Wärme abführt. Ebenfalls ist in das Ventilationssystem bereits ein PIVpart12 Partikelgenerator der Firma Pivtec GmbH eingebaut, über den es möglich ist DEHS als Seedingpartikel für PIV-Messungen direkt über den Luftstrom in den Modelraum einzubringen. Die Bestimmung der Temperaturen der Heizelemente und der einströmenden Luft, wird über PT-100 Sensoren realisiert. Es befinden sich jeweils 3 Temperatursensoren an jedem Heizelement sowie in der Luftzuführung und Abführung, die über ein Datenerfassungssystem ausgelesen werden können.

Der Modellraum wird in die SCALEX (Scaled Convective Airflow Laboratory Experiment) eingebracht. Hierbei handelt es sich um eine Anlage, die zur Untersuchung von Strömungsverhalten in verkleinerten Maßstäben konzipiert ist und die bereits zuvor bei der Untersuchung von Rayleigh-Bérnard Konvektion mit großen Aspektverhältnissen eingesetzt worden ist [Cierpka et al. 2019]. Die SCALEX besteht aus einem Druckbehälter, der für Drücke bis zu 10 bar ausgelegt ist und mit den Arbeitsgasen Luft oder SF<sub>6</sub> betrieben werden kann. Damit sind in der geplanten Versuchsanordnungen Rayleigh-Zahlen, Reynolds-Zahlen und damit Archimedes-Zahlen erreichbar, die einen Vergleich mit einem Modelraum im Originalmaßstab [Kandzia und Mueller 2018] ermöglichen.



Abb. 2 Schematischer Aufbau (links) und Foto (rechts) des 2D2C-PIV-Systems an der SCALEX Anlage

In Abb. 2 ist der schematische Aufbau des 2D2C-PIV Systems abgebildet. Dieses besteht aus 2 sCMOS Kameras vom Typ pco.edge 5.5 mit 35 mm Objektiven der Firma Zeiss und einem Q-smart Twins Lasersystem der Firma Quantel Laser. Betrieben wird das System über eine PTU X der Firma LaVision und einem leistungsstarken Steuerrechner mit der Software Davis 10.1.1. Der Strahl des Lasers wird über 3 Spiegel umgelenkt, durch eine Lichtschnittoptik der Firma LaVision mit einer Brennweite von 10 mm zu einem Lichtschnitt aufgefächert und von oben durch ein Sichtfenster in den Druckbehälter der SCALEX geführt. Die beiden Kameras werden im Side-by-Side Modus verwendet, sodass es möglich wird, den gesamten Modelraum zu erfassen.

Um Störeinflüsse durch andere Lichtquellen zu vermeiden, wurde um den Kameraaufbau und die Lichtführung des Lasers eine Verdunklung aus schwarzem Stoff angebracht. Um einen Betrieb der Kameras im Sättigungsbereich der Sensoren zu vermeiden ist es nötig die Laser-reflexionen an den Heizelementen abzuschirmen. Aus diesem Grund ist an der Frontseite des

Modelraums eine optische Blende angebracht worden. Eine Untersuchung des Strömungsverhaltens in den Bereichen zwischen den Heizelementen ist damit derzeit nicht möglich. Eine Analyse des Lichtschnitts über die Höhe des Modelraums wurde mit einer LaserCam-HR der Firma Coherent durchgeführt. Hierzu ist eine Messung der Lichtschnittdicke und Intensität durchgeführt. Die Taille des Lichtschnitts wird als Fokushöhe bezeichnet und kann über eine Einstellung an der Lichtschnittoptik über die gesamte Höhe des Modelraumes verschoben werden. Diese Fokushöhe ist während der ersten Messungen auf 10 cm oberhalb des Modellraumbodens eingestellt worden. Die Dicke des Lichtschnitts in Fokushöhe wurde über einen Abfall der maximalen Intensität  $I_0$  auf einen Wert von  $\frac{I_0}{e^2}$  bestimmt und betrug für die durchgeführte Messung 1,4 mm.

# Erste Messungen

Um die Funktionsfähigkeit des beschriebenen Experimentaufbaus zu überprüfen sind zunächst erste Messungen bei einer kleinen Ar-Zahl durchgeführt worden. Die gemessene Einlassgeschwindigkeit  $u_{in}$  betrug dabei  $0.6 \frac{m}{s}$  und die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ist 9,32 K. Damit ergibt sich zusammen mit dem Wert  $3,363 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$  des Volumenänderungskoeffizienten  $\beta$  von Luft bei 25 °C und einem Druck von 1 bar und der Fallbeschleunigung g von 9,81  $\frac{m}{s^2}$  ein Wert von Ar = 0,26 für die Archimedes-Zahl. Das dabei entstehende Geschwindigkeitsfeld ist in Abb. 3 dargestellt. Die PIV-Aufnahmen wurden im Doubleframe-Modus bei einer Belichtungszeit von 250 µs und einer Zeitdifferenz  $\Delta t$  von 2 ms zwischen den Frames aufgenommen. Bei einer Bildwiederhohlrate von 10 Hz wurden 15 Doppelbilder aufgenommen. Das PIV-Processing wurde mit einem Auswertefenster der Größe 48x48 durchgeführt und aus den einzelnen Vektorfelder ein Mittelwertfeld ermittelt.

Es sind zwei horizontal einströmende Luftstrahlen zu beobachten, die sich in der Mitte des Modelraumes zu einem gemeinsamen Luftstrom an der Decke vereinigen. Auf beiden Seiten des Modelraums ist ein in Richtung des Lufteinlasses vertikal abgelenkter Rückstrom zu beobachten, der so zur Ausbildung von zwei symmetrisch angeordneten Walzen führt (LSC 1).



Abb. 3 Darstellung des Geschwindigkeitsfeldes im Modelraum bei einer Archimedes-Zahl von 0,26

# Ausblick auf Forschungsvorhaben

Zum jetzigen Zeitpunkt ist eine detaillierte experimentelle Untersuchung der Strömungsstrukturen im Bereich hoher Archimedes-Zahlen ( $Ar \ge 10$ ) und der Übergänge zwischen unterschiedlichen Strömungsstrukturen noch ausstehend. Insbesondere der funktionelle Zusammenhang scharfer Strukturübergänge in Raumluftströmungen in Abhängigkeit von der Rayleigh- bzw. der Reynolds-Zahl soll mit Hilfe des vorgestellten experimentellen Aufbaus untersucht werden.

Ein weiterer Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten wird in der detaillierten Untersuchung des Temperaturfeldes liegen. Hierfür sollen ebenfalls optische Messmethoden wie Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) bzw. Phosphoreszenz (LIP) eingesetzt werden. Zur simultanen Bestimmung von Geschwindigkeits- und Temperaturfeld soll der experimentelle Aufbau für den Einsatz von Thermochromic Liqud Crystals (TLCs), wie sie beispielsweise bei [Moller et. al 2019] verwendet werden, erweitert werden.

## Dankesworte

Wir bedanken uns für die Finanzierung unserer Forschung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). Für Unterstützung bei der technischen Umsetzung des beschriebenen Experimentaufbaus bedanken wir uns bei Alexander Thieme, Vigimantas Mitschunas und David Schreier.

#### Literatur

Körner, M., Shishkina, O., Wagner, C., Thess, A., 2013: Properties of large-scale structures in an isothermal ventilated room, Building and Environment 59:563-574

**Cierpka, C., Kästner, C., Resagk, C., Schumacher, J., 2019:** On the challenges for reliable measurements of convection in large aspect ratio Rayleigh-Bénard cells in air and sulfur-hexafluoride, Experimental Thermal and Fluid Science 109:109841

Kandzia, C., Mueller, D., 2018: Stability of large room airflow structures in a ventilated room, International Journal of Ventilation 17:1-17

**Moller, S., König, J., Resagk, C., Cierpka, C., 2019**: Influence of the illumination spectrum and observation angle on temperature measurements using therochromic liquid crystals, Measurement Science and Technology 30:084006