

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN GROSS-SKALIGER STRÖMUNGSSTRUKTUREN VON RAUMLUFTSTRÖMUNGEN ANHAND EINES STARK VERKLEINERTEN MODELLRAUMES

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LARGE-SCALE STRUCTURES OF AN INDOOR AIRFLOW USING A SMALL SCALE MODEL ROOM

Max Körner, Christian Resagk, André Thess

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

Raumluftströmung, gemischte Konvektion, Ähnlichkeitstheorie, Visualisierungen, LDA
indoor airflows, mixed convection, similarity theory, flow visualization, LDA

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden Ergebnisse zur Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Eigenschaften groß-skaliger Strömungsstrukturen einer Raumluftströmung in einem stark abstrahierten Raum für den Fall der gemischten Konvektion bei einer Reynolds-Zahl $Re = 1.6 \times 10^5$, einer Rayleigh-Zahl $Ra = 2.1 \times 10^{10}$ und einer Prandtl-Zahl $Pr = 0.795$ vorgestellt. Für die Untersuchungen wurde ein neuartiges Verfahren verwendet, welches die experimentelle Nachbildung von Raumluftströmungen in einem stark verkleinerten Maßstab und einem gleichzeitig sehr hohen Parameterbereich ermöglicht. Die groß-skaligen Strömungsstrukturen wurden durch Messung der Geschwindigkeitsfelder in verschiedenen Ebenen bezüglich der räumlichen Struktur sowie durch eine Langzeitmessung über mehrere Stunden hinsichtlich des zeitlichen Verhaltens untersucht. Für die Geschwindigkeitsmessung wurde ein 2D-LDA verwendet. Die Untersuchung der Strömungsstruktur für die gewählte Modellraumgeometrie und den eingestellten Randbedingungen ergab eine hochkomplexe räumliche Struktur die auf großen Zeitskalen deutlichen Schwankungen unterzogen ist.

Einleitung

Durch eine vorteilhafte Gestaltung von Raumluftströmungen werden Ergonomie, Sicherheit und Energieeffizienz eines Raumes verbessert. Dabei beeinflussen Raumluftströmungen nachweislich das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit aber auch die Gesundheit von Personen innerhalb eines Raumes (Fang et al. 2004; Wyon 2004; Seppänen & Fisk 2004). Werden beispielsweise das Zugluftrisiko (Fanger & Christensen 1986; Strøm-Tejsten et al. 2007) oder die Verbreitung von Schadstoffen und Krankheitserregern (Mangili & Gendreau 2005) reduziert, erhöht dies wiederum die Sicherheit eines Raumes. Am Beispiel der Klimaanlage von Elektroautos wird deutlich, dass Raumluftströmungen auch die Energieeffizienz beeinflussen. Denn, je höher der Energiebedarf der Klimaanlage, desto geringer ist die maximal zu erzielende Reichweite des Fahrzeugs.

In klimatisierten Räumen liegt meist der Fall der gemischten Konvektion, also eine räumliche und zeitliche Überlagerung von natürlicher und erzwungener Konvektion, vor. Diese ge-

mischte Konvektion lässt sich durch die drei Ähnlichkeitskennzahlen Reynolds-Zahl Re , Rayleigh-Zahl Ra , Prandtl-Zahl Pr charakterisieren. Diese Kennzahlen sind wie folgt definiert:

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} \qquad Ra = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot a} \qquad Pr = \frac{\nu}{a}$$

mit u als charakteristische Geschwindigkeit, L als charakteristische Länge, ν als kinematische Viskosität, a als Temperaturleitfähigkeit, β als Volumenausdehnungskoeffizient, g als Fallbeschleunigung und ΔT als charakteristischer Temperaturunterschied.

Bei hinreichend großen und in der Regel üblichen Temperaturunterschieden ΔT bilden sich innerhalb eines Raumes groß-skalige Strömungsstrukturen (Krishnamurti & Howard 1981). Jedoch sind insbesondere die Bildungsmechanismen der groß-skaligen Strömungsstrukturen in Raumluftrömungen für den häufig auftretenden Fall der gemischten Konvektion bisher häufig unbekannt, da durch die Größenverhältnisse der zu betrachtenden Räume ein gesamtheitlicher Einblick in die Strömungsstruktur sehr schwierig ist. Durch die Verwendung des in Körner et al. 2011 (1) vorgestellten Verfahrens zur experimentellen Untersuchung von Raumluftrömungen im stark verkleinerten Maßstab werden im vorliegenden Beitrag die räumliche Struktur sowie das zeitliche Verhalten einer groß-skaligen Strömungsstruktur bei $Re = 1.6 \times 10^5$, $Ra = 2.1 \times 10^{10}$ und $Pr = 0.795$ vorgestellt und diskutiert.

Experimentaufbau

Die Untersuchung der groß-skaligen Strömungsstrukturen wurde mit der in Körner et al. 2011 (1) vorgestellten und bereits für erste Untersuchungen in Körner et al. 2011 (2) genutzten SCALEX-Anlage durchgeführt. Durch die Anpassung der in den Ähnlichkeitskennzahlen enthaltenen thermophysikalischen Materialeigenschaften des Arbeitsgases kann ein großer Kennzahlenbereich eingestellt werden. Die Anpassung erfolgt durch die Verwendung eines geeigneten Arbeitsgases sowie durch Erhöhen des Druckes. Zusätzlich lässt diese Anpassung die Verwendung stark verkleinerter Modellräume zu. In den im vorliegenden Beitrag beschriebenen Untersuchungen wurde die in Abb. 1 dargestellte Modellraumgeometrie verwendet. Der Modellraum hat eine Länge $L = 400\text{mm}$, eine Höhe $H = 300\text{mm}$ und eine Tiefe $T = 500\text{mm}$. Am Boden des Modellraumes sind 4 Wärmequellen mit einer Höhe $H = 60\text{mm}$ einer Länge $L = 40\text{mm}$ und einer Tiefe $T = 490\text{mm}$ angeordnet. Die Wärmequellen bestehen aus einem Aluminiumkörper mit zwei übereinander angeordneten elektrischen Heizpatronen. Der Modellraum selbst besteht vollständig aus Plexiglas. Die Zuluft- und Abluftöffnungen sind entlang der Seitenwände des Modellraumes links und rechts der Wärmequellen über die gesamte Tiefe T des Raumes angeordnet. In der hier verwendeten Konfiguration wurde durch die oberen Öffnungen kalte Zuluft mit konstanter Geschwindigkeit und Temperatur dem Raum zugeführt.

Die dimensionslosen Kennzahlen $Re = 1.6 \times 10^5$, $Ra = 2.1 \times 10^{10}$ und $Pr = 0.795$ konnten mit Schwefelhexafluorid SF_6 bei einem Druck von $p = 4.5\text{bar}$ und einer mittleren Temperatur von $T = 293\text{K}$ eingestellt werden. Die charakteristische Länge ist die Raumhöhe H , die Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Heizelementen beträgt $\Delta T = 7.5\text{K}$ und die Zuluftgeschwindigkeit wurde auf $u_{\text{in}} = 0.293\text{m/s}$ eingestellt.

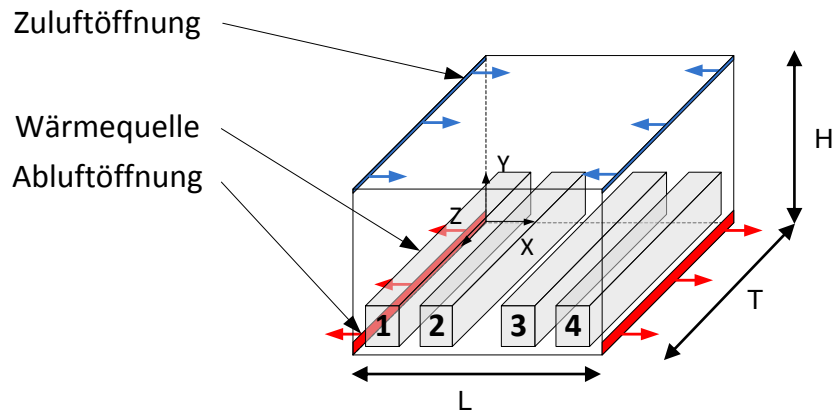


Abb. 1 Darstellung der verwendeten Modellraumgeometrie

Die Temperaturmessung wurde mit Pt100-Widerstandstempersensoren in 4-Leiterschaltung durchgeführt. Dabei wurden die Temperaturen an jedem Heizelement und jeder Zuluftöffnung an jeweils drei über die gesamte Raumtiefe verteilten Punkten gemessen. Für die Geschwindigkeitsmessungen wurde ein 2D-FiberFlow LDA der Firma Dantec Dynamics verwendet, welches auf einem 3D-Traversiersystem außerhalb der SCALEX-Anlage montiert wurde. Bedingt durch den Aufbau der SCALEX-Anlage konnten bisher nur ein 2D-LDA-Aufbau mit einer hohen Brennweite von $f = 1000\text{mm}$ realisiert werden. Das Messvolumen hatte einem Durchmesser von $x = 160\mu\text{m}$ und einer Länge von $y = 4000\mu\text{m}$. Die Wellenlängen betragen $\lambda = 488\text{nm}$ beziehungsweise $\lambda = 514.5\text{nm}$. Als Partikel wurden mit einem PIVTec part12 zerstäubte DEHS-Partikel mit einer durchschnittlichen Partikelgröße von $d = 0.4\mu\text{m}$ verwendet und über die Zuluft in den Raum eingetragen. Die räumliche Struktur wurde über die Messung der Geschwindigkeitsverteilung innerhalb von 3 x-y-Ebenen bei $z/T = [0.17, 0.49, 0.874]$ untersucht. Jede Ebene beinhaltet 60 gleichmäßig verteilte Messpunkte. Die Messdauer pro Punkt betrug $t_{\text{mess}} = 10\text{min}$. Für die Untersuchung des zeitlichen Verhaltens wurde am Punkt $P(x/L, y/H, z/T) = P(0.375, 0.69, 0.49)$ eine Langzeitmessung mit einer Messdauer von $t_{\text{mess}} = 8\text{h}$ durchgeführt.

Ergebnisse

In Abb. 2 sind die zweidimensionalen Geschwindigkeitsfelder der drei gewählten x-y-Ebenen dargestellt. Die Geschwindigkeitsvektoren wurden aus der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitskomponente u und v gebildet und der Betrag der Vektoren auf die Zuluftgeschwindigkeit u_{in} normiert. Die Diagramme in Abb. 2 zeigen die Geschwindigkeitsvektoren aufgetragen über die auf die Höhe H normierte y -Position und auf die Länge L normierte x -Position des Raumes. Im unteren Bereich der Diagramme sind die vier Wärmequellen 1 bis 4 dargestellt.

Die Geschwindigkeitsverteilung in der x-y-Ebene bei $z/T = 0.874$ zeigt, wie in Abb. 2a zu sehen, eine vorwiegend aufwärts gerichtete Strömung (positive y -Richtung). Diese Strömung ist nahezu homogen über die gesamte Ebene verteilt. Im Bereich zwischen $0.7 \leq y/H \leq 1$ und $0.7 \leq x/L \leq 1$ ist eine Wirbelstruktur mit linksgerichtetem Drehsinn zu erkennen, welche die homogene aufwärts gerichtete Strömung unterbricht. Die Geschwindigkeitsverteilung zeigt in dieser Ebene eine starke Asymmetrie bezüglich $x/L = 0.5$.

Die Geschwindigkeitsverteilung in der Raummitte bei $z/T = 0.49$ ist in Abb. 2b dargestellt und weist ebenfalls eine starke Asymmetrie bezüglich $x/L = 0.5$ auf. Die hier gemessene Ge-

schwindigkeitsverteilung zeigt im Gegensatz zu der bei $z/T = 0.874$ eine deutlich Wirbelstruktur. Diese wird charakterisiert durch zwei gegenläufig rotierende große Wirbel unterschiedlicher Größe. Der kleinere Wirbel befindet sich wie auch in der Ebene bei $z/T = 0.874$ in der rechten oberen Ecke im Bereich zwischen $0.7 \leq y/H \leq 1$ und $0.7 \leq x/L \leq 1$ mit linksgerichteten Drehsinn. Der größere Wirbel füllt dagegen nahezu den gesamten restlichen Raum und hat einen rechtsgerichteten Drehsinn. Durch den Drehsinn der beiden Wirbelstrukturen ist die Hauptströmungsrichtung in dieser Ebene abwärtsgerichtet (negative y -Richtung).

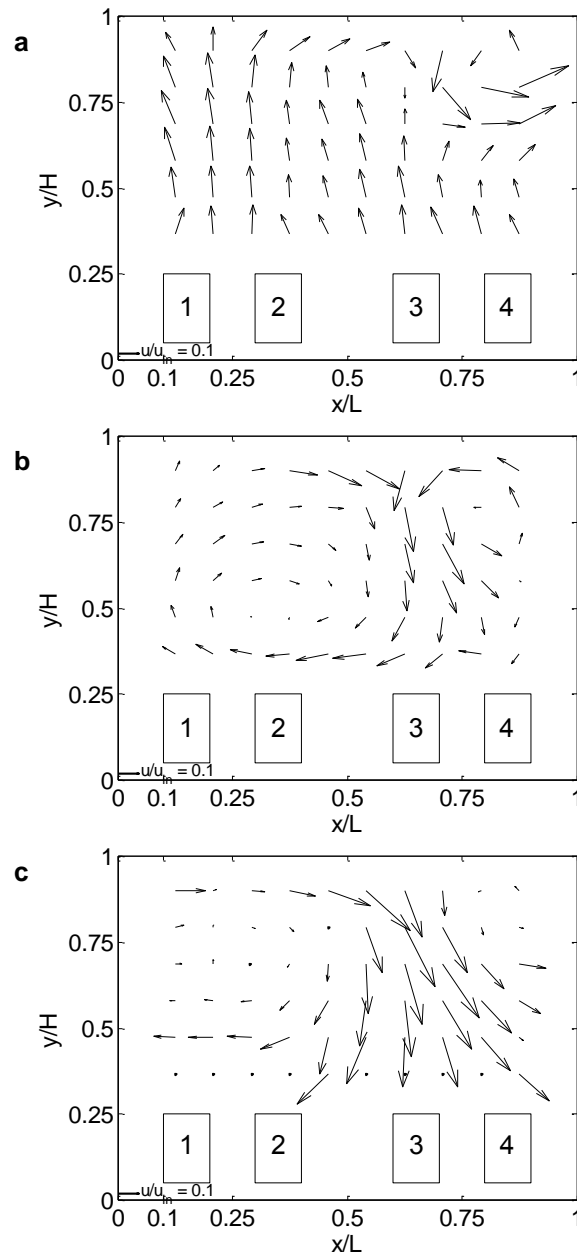


Abb. 2 Geschwindigkeitsfelder der zeitlich gemittelten Geschwindigkeit in den drei x - y -Ebenen bei **a** $z/T = 0.874$; **b** 0.49 ; **c** 0.17 und $Re = 1.6 \times 10^5$, $Ra = 2.1 \times 10^{10}$ und $Pr = 0.795$

Das in Abb. 2c dargestellte Geschwindigkeitsfeld der Ebene $z/T = 0.17$ zeigt wie auch die beiden anderen Ebenen eine stark asymmetrische Geschwindigkeitsverteilung bezüglich $x/L = 0.5$. Es sind ähnliche Wirbelstrukturen wie in der Ebene $z/T = 0.49$ mit zwei gegenläufigen Wirbelstrukturen unterschiedlicher Größe zu sehen. Jedoch ist in dieser Ebene eine verstärkte Abwärtsbewegung der Strömung erkennbar.

Der Vergleich der einzelnen 2D-Geschwindigkeitsfelder miteinander zeigt eine sehr komplexe 3-dimensionale Strömungsstruktur. Es wird vermutet, dass diese Strömungsstruktur aus der zeitlichen und räumlichen Überlagerung von zwei einzelnen Strömungsstrukturen resultiert. Die erste Strömungsstruktur resultiert hauptsächlich durch die erzwungene Konvektion. Durch die symmetrisch zugeführte Zuluft bei $y/H \approx 1$ und $x/L = 0$ und $x/L = 1$ bilden sich zwei gegenläufig rotierende Wirbel links und rechts der Raummitte $x/L = 0.5$ und füllen den gesamten Raum oberhalb der der Heizelemente. Der linke Wirbel ist dabei rechtsdrehend und der rechte Wirbel entsprechend linksdrehend, wobei die Rotationsachse entlang der z-Achse verläuft. Dies konnte mehrfach in isothermen Versuchen beobachtet werden. Die zweite Strömungsstruktur entsteht durch die natürliche Konvektion, welche durch den Temperaturunterschied zwischen Zuluft und Wärmequellen verursacht wird. Diese Strömungsstruktur besteht aus einem einzigen Wirbel mit der Rotationsachse in x-Richtung und erstreckt sich über die größte Raumlänge, also eine der Diagonalen des Raumes. Diese Strömungsstruktur bewirkt, dass die Symmetrieachse der beiden Wirbel, welche aus der erzwungenen Konvektion resultieren, in x-Richtung verschoben wird. Daraus resultiert wiederum die unterschiedliche Größe beider Wirbel. Zusätzlich erklärt sich durch diese Wirbelstruktur der entgegengesetzte Richtungssinn der mittleren Geschwindigkeit der Ebenen $z/T = 0.17$ und $z/T = 0.874$.

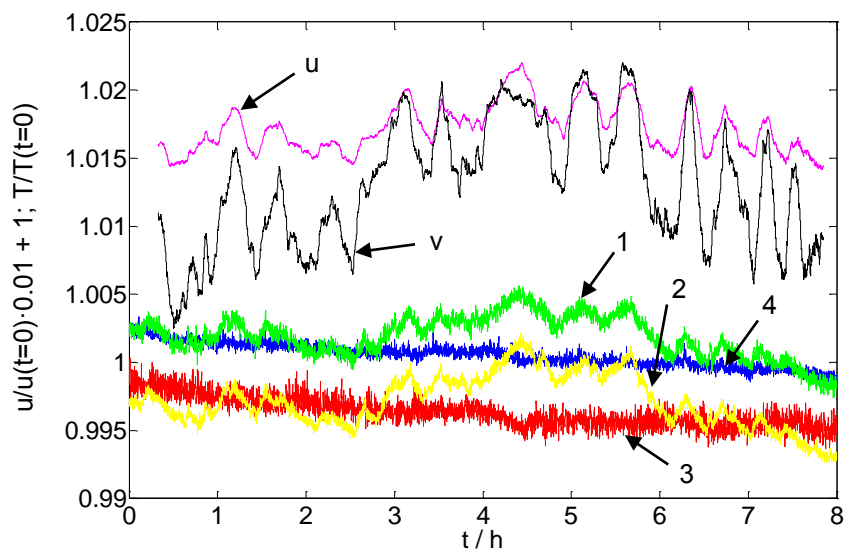


Abb. 3: Normierter Geschwindigkeitsverlauf $u(t)$ und $v(t)$ der Strömungsgeschwindigkeit am Punkt $P(x/L, y/H, z/T) = P(0.375, 0.69, 0.49)$ sowie Temperaturverlauf auf den Wärmequellen 1-4 gemittelt über drei Messpunkte je Wärmequelle

Das Ergebnis der Langzeitmessung ist im Diagramm in Abb. 3 dargestellt, wobei die horizontale und vertikale Geschwindigkeiten u und v über der Zeit t für die gesamte Messdauer $t_{\text{mess}} = 8$ h aufgetragen sind. Zusätzlich sind die Verläufe der mittleren Temperatur pro Heizelement, jeweils über drei Messpunkte gemittelt, dargestellt. Der Geschwindigkeitsverlauf wurde aus dem gleitenden Mittelwert des durch lineare Interpolation rekonstruierten LDA-Signals gebildet. Für einen besseren Vergleich der Zeitreihen wurden die Geschwindigkeiten und die Temperaturen auf den Anfangswert normiert und im Fall der Geschwindigkeit entsprechend mit $u/u(t=0) \cdot 0.01 + 1$ skaliert und verschoben.

Der Geschwindigkeitsverlauf zeigt sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Geschwindigkeit deutliche Oszillationen mit einer Periodendauer von $T \approx 0.5$ h. Diese Oszillatio-

nen sind überlagert von weiteren Schwankungen mit einer Periodendauer $T > t_{\text{mess}}$. Dies wird deutlich durch ein Offset der vertikalen Geschwindigkeit im Bereich von $2.5h < t < 5.5h$. In den Temperaturverläufen sind diese Schwankungen ebenfalls zu sehen. Jedoch sind die Oszillationen der Temperaturen auf den Heizelementen unterschiedlich und asymmetrisch im Raum verteilt. Mit Bezug auf Abb. 1 schwanken die Wärmequellen 1 und 2 stärker als die Wärmequellen 3 und 4. Diese Oszillationen der Geschwindigkeiten und der Temperaturen zeigen, dass die großskaligen Strömungsstrukturen deutlichen Schwankungen unterliegen.

Es wird vermutet, dass es eine direkte gegenseitige Beeinflussung zwischen den großskaligen Strömungsstrukturen und den Wärmequellen gibt. Um diesen Effekt näher zu untersuchen, werden in Zukunft detaillierte systematische Experimente mit bildgebenden Messverfahren angestrebt. Dadurch soll geklärt werden, inwieweit sich die Strömungsstrukturen bei den gewählten Kennzahlen verändern und ob diese Veränderungen auch bei anderen Kennzahlen auftreten.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Projektes "Experimentelle Untersuchungen turbulenter Mischkonvektion in komprimierten Gasen" im Rahmen des Paketantrages PAK225 "Strukturbildungsprozesse in turbulenter Mischkonvektion in Räumen und Passagierkabinen".

Literatur

- Fang L., Wyon D. P., Clausen G., Fanger P. O., 2004: "Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance", *Indoor air*, 14 (Suppl 7), pp. 74-81
- Fanger P. O., Christensen N. K., 1986: "Perception of draught in ventilated spaces", *Ergonomics*, 29(2), pp. 215-35
- Krishnamurti R., Howard L., 1981: "Large-scale flow generation in turbulent convection", *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 78 (4), pp. 1981-1985
- Körner M., Resagk C., Thess A., 2011 (1): "Experimental scale-down modelling of indoor airflows", *The 12th International Conference on Air Distribution in Rooms*, Trondheim, Norway
- Körner M., Resagk C., Thess A., 2011 (2): "Experimentelle Untersuchung großskaliger Strömungsstrukturen in einer Raumluftrömung mit Laser-Lichtschnitt-Visualisierungen und LDV-Messungen", *19. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, Ilmenau
- Mangili A., Gendreau M. A., 2005: "Transmission of infectious diseases during commercial air travel", *Lancet*, 365, pp. 989-996
- Seppänen O. A., Fisk W. J., 2004: "Summary of human responses to ventilation", *Indoor Air*, 14 (7), pp. 102-118
- Strøm-Tejse P., Wyon D. P., Lagercrantz L., Fang L., 2007: "Passenger evaluation of the optimum balance between fresh air supply and humidity from 7-h exposures in a simulated aircraft cabin", *Indoor Air*, 17 (2), pp. 92-108
- Wyon D. P., 2004: "The effects of indoor air quality on performance and productivity", *Indoor Air*, 14, pp. 92-101