

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG ZUR BILDUNG GROßSKALIGER STRUKTUREN IN RAUMLUFTSTRÖMUNGEN

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE FORMATION OF LARGE-SCALE FLOW STRUCTURES IN INDOOR AIRFLOWS

Max Körner, Christian Resagk, André Thess

Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau

E-Mail: max.koerner@tu-ilmenau.de

gemischte Konvektion, großskalige Strömungsstrukturen, 2D2C-PIV
mixed convection, large-scale flow structures, 2D2C-PIV

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird die Verifizierung der aufgestellten Hypothesen zur Bildung großskaliger Strömungsstrukturen innerhalb eines quaderförmigen Modellraumes in Abhängigkeit von der Archimedes-Zahl Ar diskutiert. Dazu werden Archimedes-Zahlen in den Bereichen $Ar < 0.1$, $0.1 \leq Ar < 10$ sowie $Ar > 10$ bei niedrigen Reynolds- und Grashof-Zahlen im Bereich von $Re < 5 \times 10^3$ und $Gr < 5 \times 10^7$ untersucht. Die Archimedes-Zahl-Bereiche sind jeweils beispielhaft für die erzwungene Konvektion, die gemischte Konvektion bzw. die natürliche Konvektion. Aus Voruntersuchungen und der Literatur lassen sich für jede Konvektionsform unterschiedliche Strömungsstrukturen vorhersagen, welche über das Geschwindigkeitsfeld $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ durch 2D2C-Particle Image Velocimetry Messungen charakterisiert werden sollen. Die Untersuchungen konnten die Vorhersagen zur Strukturbildung im Bereich der erzwungenen sowie der gemischten Konvektion bestätigen. Die Vorhersage der natürlichen Konvektion hingegen entzieht sich den bisherigen Vorhersagen und bedarf daher intensiverer Untersuchungen. Die Erkenntnisse dieser Studie sollen einen Beitrag zum besseren Verständnis von Raumluftrömungen sowie zur Erarbeitung zukünftiger mathematischer Modelle leisten.

Einleitung

Die Klimatisierung von Innenräumen verursacht Raumluftrömungen, welche meist großskalige Strömungsstrukturen (LSC = large-scale circulation) bildet. Die LSC charakterisieren in diesem Fall die globale Verteilung von Geschwindigkeit $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ und Temperatur $T(\mathbf{x}, t)$ innerhalb des betrachteten Raumes. Aus diesen Verteilungen lassen sich wiederum Kriterien zur Beurteilung der Raumlufqualität oder der Energieeffizienz der Klimatisierungssysteme treffen. Die Raumlufqualität hat wiederum nachweislich Einfluss auf das Wohlbefinden, die Leistungsfähigkeit und die Gesundheit der Personen innerhalb eines Raumes (Fang et al. 2004; Wyon 2004; Seppänen & Fisk 2004). Durch die Überlagerung einer Vielzahl von Einflüssen, beispielsweise die Art der Wärmequellen oder verschiedenartige Lüftungskonzepte, sind die meist hoch turbulenten, nicht-isothermen Raumluftrömungen und die sich bildenden LSCs noch nicht hinreichend verstanden (Li & Heiselberg 2011) und daher Gegenstand

aktueller Forschung. Vor allem im Hinblick auf weltweit knapper werdender Energieressourcen, einer fortschreitenden Urbanisierung aber auch erhöhter Ansprüche an den Umweltschutz sind insbesondere Kenntnisse zur Optimierung von Klimatisierungssystemen in Räumen und Passagierkabinen von großem Nutzen.

Im vorliegenden Beitrag werden Grundlagenexperimente zur Bildung von LSCs der Raumluftströmungen innerhalb eines quaderförmigen Raumes vorgestellt und erste Ergebnisse diskutiert. Der Fokus der vorliegenden Studie liegt dabei auf Geschwindigkeitsmessungen mit der 2D2C-Particle Image Velocimetry (PIV) sowie auf der Variation der die Strömung beschreibenden dimensionslosen Kennzahlen Reynolds-Zahl, Grashof-Zahl und Archimedes-Zahl.

Hypothese zur Strukturbildung

Raumluftströmungen werden von erzwungener und natürlicher Konvektion dominiert, die entsprechend durch mechanischen bzw. thermischen Antrieb verursacht werden. Bei der häufig auftretenden räumlichen und zeitlichen Überlagerung beider Konvektionsformen spricht man von gemischter Konvektion. Die Randbedingungen der Raumluftströmungen sind daher hauptsächlich durch die drei dimensionslosen Kennzahlen Reynolds-Zahl Re , Grashof-Zahl Gr und Archimedes-Zahl Ar charakterisiert, welche wie folgt definiert sind

$$Re = \frac{uH}{\nu} \quad (1)$$

$$Gr = \frac{\beta g \Delta T H^3}{\nu^2} \quad (2)$$

$$Ar = \frac{Gr}{Re^2} \quad (3)$$

wobei $u = u_{in}$ die Geschwindigkeit der Zuluft, H die Höhe des Raumes, ν die kinematische Viskosität, β den Volumenausdehnungskoeffizient, g die Fallbeschleunigung und ΔT den globalen mittleren Temperaturunterschied darstellen. Die Geometrie des Raumes lässt sich über das Aspektverhältnis Γ beschreiben, welches in der vorliegenden Studie konstant bleibt. Bei der Betrachtung der LSC spielt zunächst die Archimedes-Zahl eine wesentliche Rolle, da diese den jeweiligen Einfluss von erzwungener und natürlicher Konvektion beschreibt. Grundsätzlich wird definiert, dass bei $Ar < 0.1$ die erzwungene Konvektion die Strömung dominiert. Die natürliche Konvektion dominiert dagegen bei $Ar \geq 10$. Im Bereich von $0.1 \leq Ar < 10$ wird von gemischter Konvektion gesprochen.

Der zu untersuchende Modellraum bildet eine generische Passagierkabine nach. In Abb. 1 wird der über die Tiefe des Raumes konstante Querschnitt mit entsprechenden Zu- und Abluftöffnungen und den darin befindlichen Wärmequellen schematisch dargestellt. Abb. 1 verdeutlicht zudem die Hypothese zu den möglichen LSCs für die drei definierten Bereiche der Raumluftströmung, erzwungene, gemischte und natürliche Konvektion, in Abhängigkeit zur Archimedes-Zahl Ar . Den Bereich der erzwungenen Konvektion, d.h. LSC1 wurde bereits in Körner et al. 2013 für einen Reynolds-Zahlen-Bereich von $1.5 \times 10^4 \leq Re \leq 7.0 \times 10^4$ beschrieben. Demnach bilden sich 2 große gegenläufige Strömungsstrukturen, welche hauptsächlich durch die Zuluft verursacht wird.

Im Fall gemischter Konvektion wird basierend auf den Erkenntnissen aus Körner 2014 angenommen, dass sich ein großer Wirbel als Teil einer komplexen 3-dimensionalen Strömungsstruktur über die gesamte Raumbreite L bildet. Durch den Symmetriebruch bei dieser Strömungsstruktur ist davon auszugehen, dass diese, wie in Abb. 1 durch LSC2a und LSC2b dargestellt, jeweils spiegelbildlich vorliegen können. Wird die Archimedes-Zahl weiter erhöht dominiert zunehmend die natürliche Konvektion, welche vorwiegend über den globalen Temperaturunterschied zwischen den Wärmequellen und der Zuluft verursacht wird. Ausgehend von Erkenntnissen der Rayleigh-Benard-Konvektion, z.B. in Grossmann und Lohse 2003, wird für die LSC3 angenommen, dass sich zwei gegenläufige große Wirbel ausbilden. Wie in Abb. 1 dargestellt, sollten diese Wirbel sich entgegengesetzt zu denen in LSC1 drehen. Gegenstand des vorliegenden Beitrags ist die grundlegende Verifizierung der aufgestellten Hypothese bei niedrigen Reynolds- und Grashof-Zahlen im Bereich von $Re < 5 \times 10^3$ und $Gr < 5 \times 10^7$.

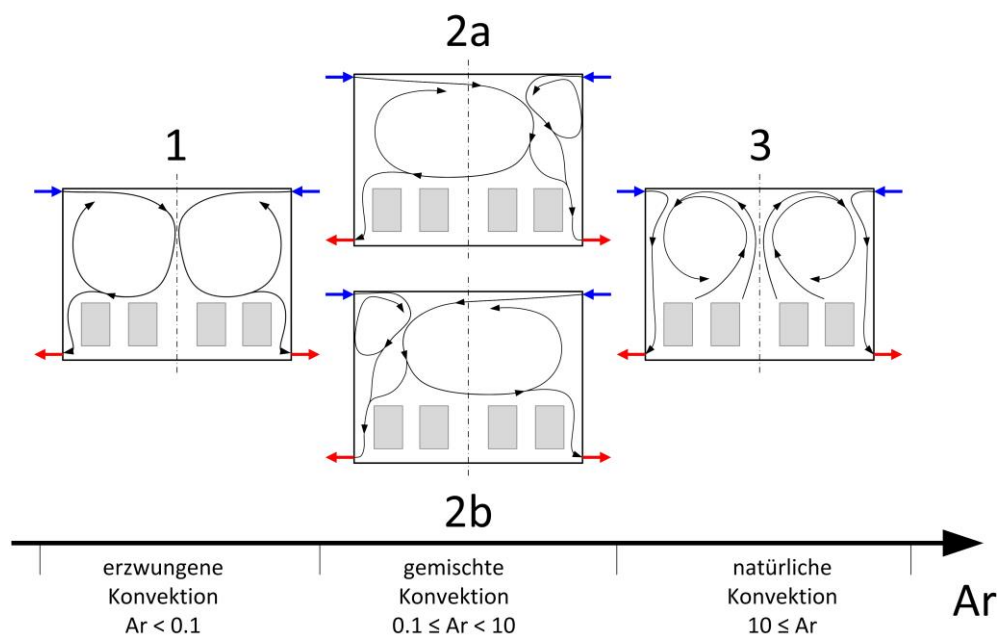


Abb. 1: Hypothese zu den möglichen großskaligen Strömungsstrukturen in Abhängigkeit von der Archimedes-Zahl. Wesentliche Einflussgröße hinsichtlich der Strukturbildung sind die gewählte Raumgeometrie (Aspektverhältnisse Γ_{xy} und Γ_{zy}), die Zuluftgeschwindigkeit u_{in} und der Temperaturunterschied ΔT zwischen den Wärmequellen und der Zuluft. Fall 2 sollte aufgrund des Symmetriebruchs mehrfach existieren.

Methoden und experimenteller Aufbau

Zur Untersuchung der LSC in einem weiten Kennzahlenbereich wird die in Körner et al. 2011 erstmalig vorgestellte und in Körner 2014 detailliert beschriebene SCALEX-Anlage (SCALEX = scaled convective airflow laboratory experiment) verwendet. Grundlage zur Einstellung eines weiten Bereiches der dimensionslosen Kennzahlen ist die Druckabhängigkeit der Materialeigenschaften des Arbeitsgases. Die Dichte $\rho(p)$ trägt dabei maßgeblich zur Erweiterung der Kennzahlen-Bereiche bei, da diese durch $\nu = \eta / \rho$ mit η als dynamische Viskosität die kinematische Viskosität stark beeinflusst. Als Arbeitsgase werden wahlweise Luft oder Schwefelhexafluorid SF_6 eingesetzt. Durch Verwendung von SF_6 , welches sich durch $\rho_{SF_6} \approx$

$5 \cdot \rho_{air}$ auszeichnet, können bereits bei relativ geringen Drücken von $p < 10$ bar sehr hohe Bereiche der Reynolds- und Grashof-Zahl erreicht werden ($Re < 10^6$, $Gr < 10^{12}$).

Aufgrund dieser Methode besteht die SCALEX-Anlage aus einem Druckbehälter ($V = 1.4\text{m}^3$) mit angeschlossener Arbeitsgasversorgung. Wie in Abb. 2 dargestellt befindet sich im Inneren des Druckbehälters der zu untersuchende Modellraum. Schaugläser in der Druckbehälterwand ermöglichen einen optischen Zugang, so dass die bildgebende Messmethode des PIV zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten eingesetzt werden kann. Die Schaugläser haben Dicken von 19mm bis 40mm und bestehen aus Borosilikat. Der optische Zugang wird durch die Verwendung von PMMA als Wandmaterial des Modellraumes weiter verbessert. Dieser hat eine Länge von $L = 500\text{mm}$, eine Breite von $D = 400\text{mm}$ und eine Höhe von $H = 300\text{mm}$. Somit ergeben sich die Aspektverhältnisse zu $\Gamma_{xy} = D/H = 4/3$ und zu $\Gamma_{yz} = L/H = 5/3$. Die Zuluft- und Abluftöffnungen befinden sich, wie in Abb. 1 dargestellt, in Decken- bzw. Bodennähe der Seitenwände. Am Boden des Modellraumes befinden sich quaderförmige Wärmequellen, welche aus Aluminium gefertigt wurden und elektrisch beheizt werden. Weitere Details des Modellraumes sind Körner 2014 zu entnehmen.

Das verwendete 2D2C-PIV-System besteht aus einer SensiCam der Firma PCO und einem Minilite PIV Laser der Firma Continuum. Die Kamera hat einen CCD-Chip mit einer Größe von 1280×1024 Pixeln. Der Laser stellt eine maximale Energie von $E = 12\text{mJ/pulse}$ bei einer Wellenlänge von $\lambda = 532\text{nm}$ bereit. Wie in Abb. 2 zu sehen, wird der Laser über ein zusätzliches Schauglas durch die Behälterwand geführt. Innerhalb des Druckbehälters wird der Laser mit einer aus Mikro-Bank-Bauteilen aufgebauten Lichtschnittoptik aufgeweitet. Lichtschnittoptik und Kamera sind jeweils auf einer Traverse montiert, so dass in späteren Untersuchungen der Lichtschnitt durch die gesamte Raumtiefe bewegt werden kann. Das Seeding wird mit dem PIVpart 14 Partikelgenerator der Firma PIVTec realisiert und über die Zuluft in den Modellraum geführt. Die Verwendung von Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) ergibt laut Datenblatt des Generators eine mittleren Partikelgröße von $d_p = 1\mu\text{m}$.

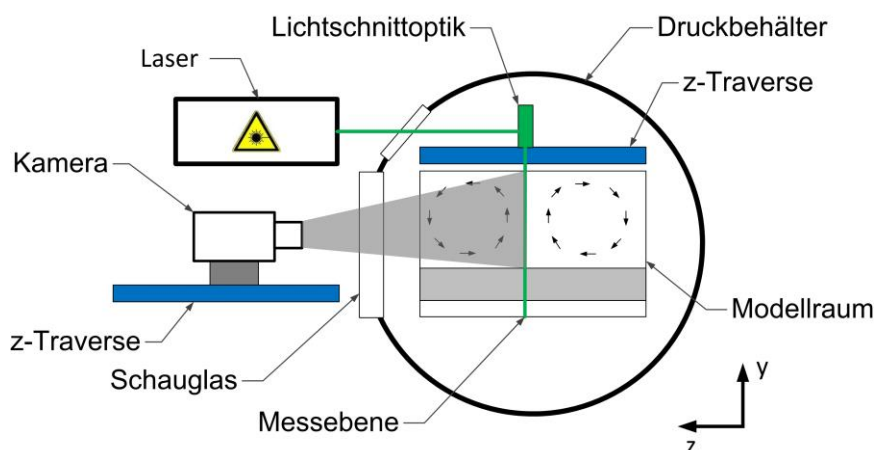


Abb. 2: Schematischer Aufbau des 2D2C-PIV-Systems an der SCALEX-Anlage

Für die im vorliegenden Beitrag diskutierten Untersuchungen der LSC bei niedrigen Reynolds- und Grashof-Zahlen wurde Luft bei $p = 980\text{mbar}$ und einer Umgebungstemperatur von $T = 297.65\text{K}$ als Arbeitsgas verwendet. Für die Verifizierung der drei in Abb. 1 dargestellten LSCs wurden die in Tab. 1 aufgeführten Randbedingungen eingestellt.

LSC	u_{in} / ms^{-1}	$\Delta T / \text{K}$	Re	Gr	Ar
1	0.23	0.03	4.4×10^3	1.1×10^5	5.7×10^{-3}
2a / 2b	0.23	4.0	4.4×10^3	1.5×10^7	0.77
3	0.05	11	1.0×10^3	4.0×10^7	40

Tab. 1: Randbedingungen zur vorliegenden Untersuchung der LSC bei niedrigen Reynolds- und Grashof-Zahlen

Die Wiederholrate der PIV-Messungen betrug $f = 2\text{Hz}$, wobei der Zeitabstand zwischen den Doppelbildern, die separation time, $t = 15\mu\text{s}$ betrug. Die geometrische Auflösung der Bilder beträgt in x - und y -Richtung 4.5px/mm . Das Geschwindigkeitsfeld für die Untersuchung der LSC1 wird als Snapshot dargestellt, alle anderen Geschwindigkeitsfelder stellen über $t = 10\text{s}$ bzw. $t = 20\text{s}$ gemittelte Werte dar. Die dargestellten Visualisierungen wurden den Doppelbildern der PIV-Aufnahmen entnommen. Die Messebene befindet sich in der x - y -Ebene an der Position $z/D = 0.5$ und umfasst nahezu den gesamten Bereich oberhalb der Wärmequellen.

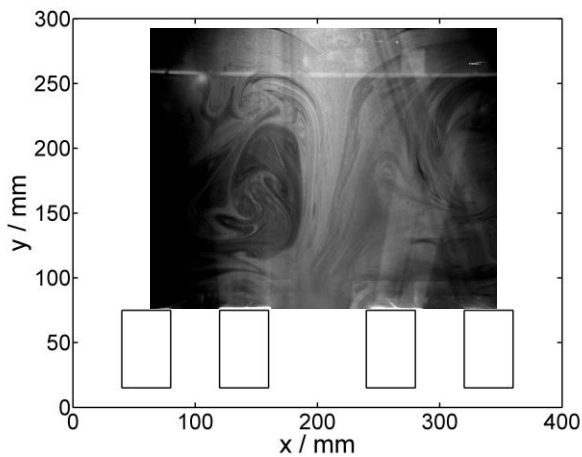
Ergebnisse und Diskussion

In Abb. 3 sind sowohl die Visualisierungen der Strömung als auch die erzielten Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen als Vektorfelder $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ dargestellt. Die Darstellung ist innerhalb der geometrischen Dimensionen des Modellraumes L und H in x - und y -Richtung realisiert. Die Archimedes-Zahl nimmt in Abb. 3 von oben nach unten zu, sodass Abb. 3a,b die LSC1, Abb. 3c,d die LSC2 und die Abb. 3e,f die LSC3 repräsentiert. Aus den Darstellungen des Geschwindigkeitsfeldes ist offensichtlich zu erkennen, dass die Hypothese zu LSC1 und LSC2 auch bei geringen Kennzahlen verifiziert ist. Dies bedeutet, dass die Geschwindigkeitsverteilung in Abb. 3b die für den Bereich $Ar < 0.1$ vermutete LSC bestätigt. Im Vektorfeld sind deutlich die zwei gegenläufig rotierenden großen Wirbel links und rechts der Symmetrieebene mit einer abwärtsgerichteten Strömung in der Mitte des Modellraumes zu erkennen. Auch die für den Bereich der gemischten Konvektion $0.1 \leq Ar < 10$ vermutete asymmetrische LSC2 kann über das mittlere Geschwindigkeitsfeld bestätigt werden. Dabei zeigt Abb. 3d einen großen im Uhrzeigersinn drehenden Wirbel, welcher nahezu den gesamten Raum oberhalb der Wärmequellen einnimmt. Die Mittelung des Geschwindigkeitsfeldes wurde notwendig, da die Strömung bereits starken zeitlichen Schwankungen unterliegt, d.h. turbulent ist. Dies lässt sich auch in der Visualisierung in Abb. 3c erkennen.

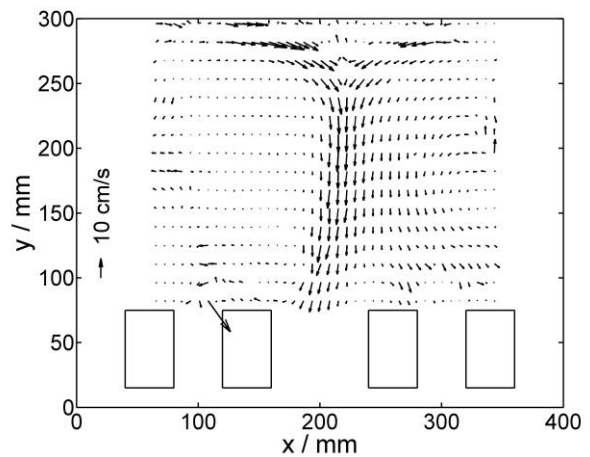
Die LSC3 hingegen lässt sich aus dem vorliegenden Geschwindigkeitsfeld nicht explizit ableiten. Das in Abb. 3f dargestellte Geschwindigkeitsfeld zeigt lediglich eine aufwärtsgerichtete Strömung innerhalb des gesamten Messbereiches. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die in der Hypothese postulierte LSC3 zwei Wirbel bildet, welche nicht um die z -Achse rotieren sondern hauptsächlich um die x -Achse. Demnach wären die Abwärtsbewegungen in dieser Messebene entweder sehr nahe an den Wänden des Modellraumes oder überhaupt nicht existent. Zusätzlich für diesen Erklärungsansatz spricht auch, dass das Geschwindigkeitsfeld im mittleren Bereich zwischen den Wärmequellen ein Quellgebiet aufweist. Dies könnte darauf hindeuten, dass das Aufstiegsgebiet über lange Zeitskalen Schwankungen unterliegt und somit Luft aus dem hinteren Teil des Modellraumes einströmt.

Die Visualisierungen in Abb. 3a,c,d zeigen zusätzlich, dass mit zunehmender Archimedes-Zahl die Durchmischung und somit auch die turbulente Bewegung zunimmt. Dies ist erkennbar durch die geringeren Konzentrationsunterschiede innerhalb des Seedings.

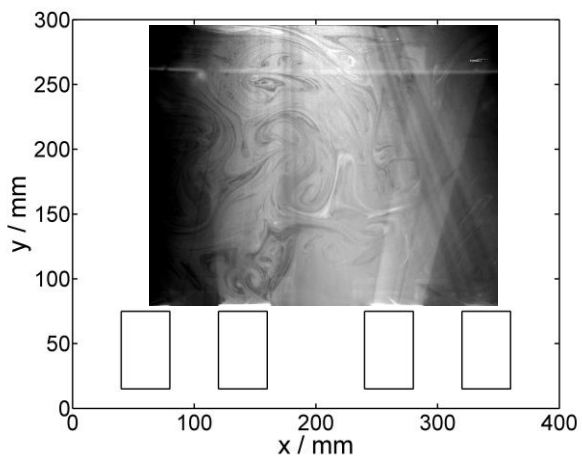
a) $Ar = 5.7 \times 10^{-3}$



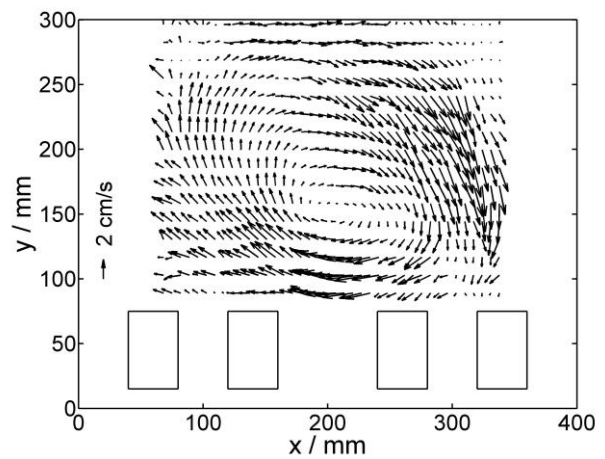
b) $Ar = 5.7 \times 10^{-3}$



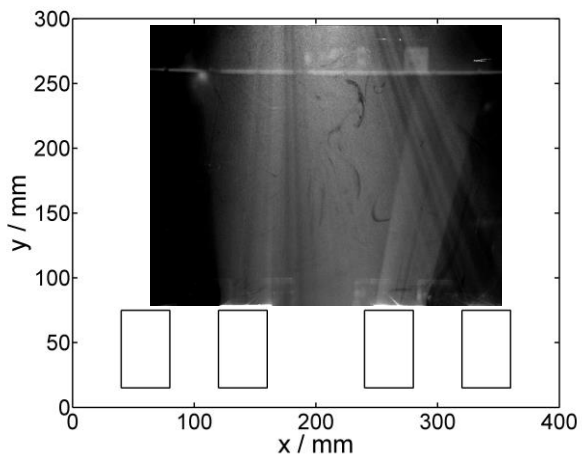
c) $Ar = 0.77$



d) $Ar = 0.77$



e) $Ar = 39.7$



f) $Ar = 39.7$

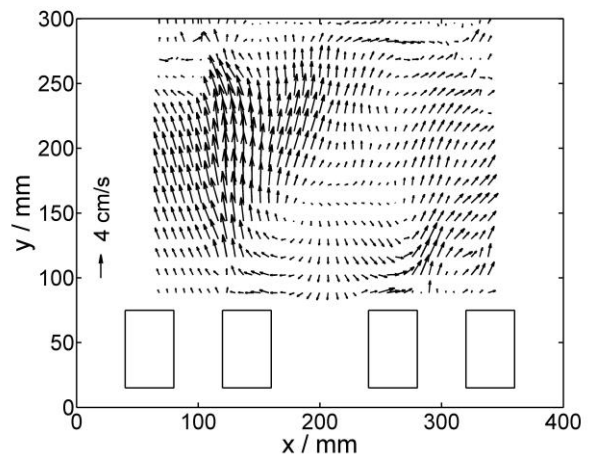


Abb. 3: Visualisierung (links) und Geschwindigkeitsfelder der großskaligen Strömungsstrukturen für drei verschiedene Archimedes-Zahlen; die Geschwindigkeitsfelder für $Ar \geq 0.77$ wurden jeweils über $t = 10s$ bzw. $t = 20s$ entsprechend zeitlich gemittelt

Schlussfolgerung und Ausblick

Die gefundenen Ergebnisse zu den globalen Geschwindigkeitsverteilungen innerhalb der gewählten Raumgeometrie verifizieren zum Teil die aufgestellte Hypothese zur Bildung der

LSC in Abhängigkeit von der Archimedes-Zahl bei geringen Reynolds- und Grashof-Zahlen. Die Hypothese zur Bildung von LSC1 und LSC2 in den jeweiligen Archimedes-Zahl-Bereichen $Ar < 0.1$ und $0.1 \leq Ar < 10$ konnte durch die in diesem Beitrag durchgeführten Geschwindigkeitsmessungen mit einem 2D2C-PIV-System bestätigt werden. Die Hypothese zur Bildung von LSC3 ließ sich bisher noch nicht verifizieren. Dazu sind zukünftig weitere Messungen notwendig. Dabei sind vor allem eine längere Zeit für die Berechnung der mittleren Geschwindigkeitsverteilung als auch eine Messung in mehreren Raumtiefen interessant.

Des Weiteren sind höhere Kennzahlenbereiche Gegenstand zukünftiger Untersuchungen der LSC. Dabei ist ebenfalls interessant, inwiefern die Transition zwischen den einzelnen LSCs funktioniert, d.h. ob es Hysterese Effekte gibt oder ob Unterschiede vorhanden sind, wenn die Transition entweder über die Reynolds-Zahl oder über die Grashof-Zahl realisiert wird. Die Erkenntnisse der vorliegenden und der darauffolgenden Untersuchungen zur Bildung der LSC bieten die Möglichkeit für ein besseres Verständnis der Strukturbildungsmechanismen in Raumlufströmungen, so dass zukünftig vereinfachte mathematische Modelle aus diesen Erkenntnissen abgeleitet werden könnten. Solche einfachen mathematischen Modelle würden vor allem den Auslegungs- und Optimierungsprozess von Klimatisierungssystem stark vereinfachen.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Projekts „Modelluntersuchungen zu turbulenten Strukturbildungsprozessen in Raumlufströmungen mittels Experimenten an komprimierten Schwefelhexafluorid in einem weiten Kennzahlenbereich“.

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*, Vol. 14, No. Suppl. 7, pp. 74-81
- Körner M., 2014: "An experimental method for the investigation of indoor airflows in a reduced scale model room: development and application", Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Deutschland
- Körner, M., Resagk, C., Thess, A., 2011: "Experimental scale-down modelling of indoor airflows", The 12th International Conference on Air Distribution in Rooms, Trondheim, Norway
- Li, Y., Nielsen, P., 2011: "CFD and ventilation research", *Indoor Air*, Vol. 21, No. 6, pp. 442-453
- Grossmann, S., Lohse, D., 2003: "On geometry effects in Rayleigh-Bénard convection", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 486, pp. 105-114
- Wyon, D. P., 2004: "The effects of indoor air quality on performance and productivity", *Indoor Air*, Vol. 14, pp. 92-101
- Seppänen, O. A., Fisk, W. J., 2004: "Summary of human responses to ventilation", *Indoor Air*, Vol. 14, No. 7, pp. 102-118