

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG GROßSKALIGER STRÖMUNGSSTRUKTUREN IN EINER RAUMLUFTSTRÖMUNG MIT LASER-LICHTSCHNITT-VISUALISIERUNGEN UND LDV-MESSUNGEN

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LARGE-SCALE STRUCTURES OF AN INDOOR AIRFLOW USING LASER LIGHT SHEET VISUALIZATION AND LDV-MEASUREMENTS

Max Körner, Christian Resagk, André Thess

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

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

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden erste Ergebnisse zur Skalierung von nicht-isothermen Raumluftströmungen vorgestellt. Verwendet wird dabei ein neuartiges Verfahren zur experimentellen Modellierung von nicht-isothermen Raumluftströmungen im stark verkleinerten Maßstab unter Berücksichtigung aller maßgeblichen Ähnlichkeitskriterien. Der Skalierungsmaßstab wird hierbei durch die Anpassung der thermophysikalischen Materialeigenschaften eines Arbeitsgases durch Erhöhen des absoluten Druckes eingestellt. Untersucht werden die großskaligen Strömungsstrukturen der stationären, turbulenten, gemischten Konvektion, welche sich innerhalb des gewählten Modellraumes einstellen. Der Modellraum besitzt eine vereinfachte Geometrie und ist auf den Maßstabsfaktor von 1:10 bezüglich eines Originalraumes skaliert, welcher der Validierung des Verfahrens dient. Erste Untersuchungen der großskaligen Strukturen sowie eine erste qualitative Validierung der Skalierungsmethode wurden mit Laser-Lichtschnitt-Visualisierungen für verschiedene Skalierungsfaktoren durchgeführt. Zur Quantifizierung der gefundenen, verschiedenen Strömungsstrukturen sollen Geschwindigkeitsmessungen mit der Laser Doppler Velocimetry (LDV) durchgeführt werden.

Einleitung

Raumluftströmungen beeinflussen maßgeblich das Wohlbefinden der sich im Raum aufhaltenden Personen und damit direkt den Gesundheitszustand. Beispielsweise können, wie in Richter 2007 dargestellt, zu hohe Geschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich von Person ein Zugluftrisiko bedeuten. Andererseits können, wie in Sundell et al. 2011 aufgeführt, zu geringe Geschwindigkeiten zu erhöhten CO₂-Werten im Aufenthaltsbereich führen, welche sich negativ auf das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit der sich im Raum aufhaltenden Personen auswirken.

Neben den genannten ergonomischen Faktoren spielen auch Aspekte der Energieeffizienz und der Sicherheit von Räumen eine große Rolle. Trotz intensiver Forschung auf dem Gebiet

der Raumluftrömung sind die Prozesse der Strukturbildung der Raumluftrömung noch nicht hinreichend bekannt um beispielsweise allgemeingültige Berechnungsmodelle für die vollständige Beschreibung der Strömung ableiten zu können. Ein Grund dafür ist, dass die experimentelle Validierung für methodische Untersuchungen im Originalmaßstab sehr aufwändig ist. Eine sinnvolle Lösung zur Minimierung des Aufwandes methodischer experimenteller Untersuchungen der Raumluftrömung stellt dabei die Verwendung eines Raummodells im stark verkleinerten Maßstab dar.

Im vorliegenden Beitrag werden erste Ergebnisse zur Visualisierung von Raumluftrömungen unter Verwendung einer neuartigen Experimentieranlage zur Modellierung von nicht-isothermen Raumluftrömungen im stark verkleinerten Maßstab vorgestellt. Diese ersten Ergebnisse stellen einen qualitativen Nachweis der zu Grunde liegenden Skalierungsmethode dar. Mit dieser verwendeten Skalierungsmethode lassen sich nicht-isotherme Raumluftrömungen unter Berücksichtigung aller maßgeblichen Ähnlichkeitskennzahlen in einem stark verkleinerten Maßstab grundlegend experimentell untersuchen. Weiterhin werden geplante Messungen zur Geschwindigkeitsverteilung mit der Laser Doppler Velocimetry diskutiert.

Methode

Zur Modellierung von Strömungen in einem stark verkleinerten Maßstab ist es erforderlich die Ähnlichkeitstheorie zu berücksichtigen. Im Fall der gemischten Konvektion müssen die drei dimensionslosen Kennzahlen Reynolds-Zahl Re , Rayleigh-Zahl Ra und Prandtl-Zahl Pr im Modellmaßstab und Originalmaßstab übereinstimmen. Die dimensionslosen Kennzahlen sind wie folgt definiert:

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (1)$$

$$Ra = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot a} \quad (2)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (3)$$

(u ...Zuluftgeschwindigkeit; L ...Höhe des Raumes; ν ...kinematische Viskosität; β ...thermischer Volumenausdehnungskoeffizient; g ...Gravitationsbeschleunigung; T ...Temperaturdifferenz im Raum; a ...Temperaturleitfähigkeit)

Bisherige Skalierungsmethoden von nicht-isothermen Raumluftrömungen, wie beispielsweise in Gladstone et al. 2001, basieren hauptsächlich auf der Modellierung der thermische Konvektion über Konzentrationsunterschiede in Salzhaltigen-Lösungen. Vorteilhaft bei dieser Modellierungsmethode ist der geringe Aufwand beim Aufbau des Versuchsstandes. Nachteilig ist jedoch, dass diese Methode nur unzureichend reale Randbedingungen bzw. reale nicht-isotherme Strömungen abbilden kann. Beispielsweise lassen sich keine dreidimensionalen beheizten Körper nachbilden. Des Weiteren können auch keine Wärmeströme an den Außenwänden nachgebildet werden, was eine nicht-adiabatische Betrachtung des Raumes unmöglich macht. Die im vorliegenden Beitrag verwendete Skalierungsmethode, welche bereits im Detail in Koerner et al 2011 vorgestellt wurde, basiert auf der Modifizierung der thermophysikalische Materialparameter kinematische Viskosität ν , Temperaturleitfähigkeit a und thermischer Volumenausdehnungskoeffizient β durch Erhöhen des Druckes eines Arbeitsgases. Dadurch lässt sich der Skalierungsmaßstab sehr genau und variabel einstellen. In den

vorgestellten Untersuchungen werden als Arbeitsgas sowohl trockene Luft als auch Schwefelhexafluorid (SF_6) bis zu einem Druck von $p = 4.5\text{bar}$ eingesetzt.

Experimentaufbau

Zum Einstellen des Skalierungsfaktors über den Druck des Arbeitsgases wird die in Koerner et al 2011 beschriebene SCALEX-Anlage verwendet. Die Anlage besteht aus einem Druckbehälter und einer Gasversorgungseinheit zur Bereitstellung des Arbeitsgases SF_6 und zur Einstellung des nötigen Druckes. Um moderne optische Strömungsmesstechnik verwenden zu können, wurden, wie Abb. 1 zeigt, an dem Behälter mehrere optische Schaugläser installiert. Die Schaugläser bestehen aus Borosilikatglas (BK7) und sind thermisch vorgespannt um den Maximaldruck der Anlage von $p_{\text{max}} = 10\text{bar}$ standzuhalten. Die Dicke der für die Visualisierung verwendeten seitlichen Schaugläser beträgt $d = 40\text{mm}$. Sie haben einen Durchmesser von $D = 300\text{mm}$.



Abb. 1: Druckbehälter (links) und SF_6 -Versorgungseinheit (rechts)

Zur Visualisierung wurde ein Laser-Lichtschnitt mit sowohl einen rotierenden Spiegel (L1) als auch einen oszillierenden Spiegel (L2), wie in Abb. 2 schematisch gezeigt, verwendet. Das L1-System wurde von außen verwendet und das Licht wurde durch ein auf der Oberseite des Druckbehälters installiertes baugleiches Schauglas ($d = 40\text{mm}$, $D = 300\text{mm}$) hindurchgeleitet. Dabei wurde ein DPSS-CW-Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 532\text{nm}$ und einer Strahlbreite von $d_{\text{beam}} = 2\text{mm}$ sowie einer Leistung von $P_{L1} = 1.8\text{W}$ verwendet. Zur Aufspannung der Lichtschnittebene wurde ein rotierender 45° -Spiegel verwendet, welcher mit einer Drehzahl von $N = 100\text{s}^{-1}$ betrieben wurde. Diese Drehzahl entspricht der vierfachen Aufnahmegeschwindigkeit der verwendeten Videokamera Canon XL-1s ($f_{\text{CAM}} = 25\text{Hz}$).

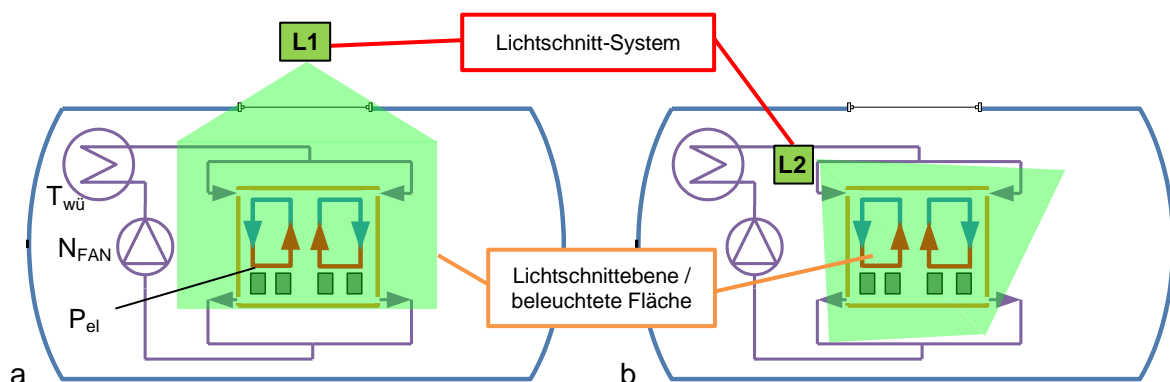


Abb. 2: Schematische Darstellung des Aufbaus der beiden verwendeten Lichtschnitt-Systeme L1 (a) und L2 (b) der SCALEX-Anlage zur Visualisierung der großskaligen Strömungsstrukturen

Das in Abb. 2b dargestellte L2-System besteht ebenfalls aus einem DPSS-CW-Laser mit gleicher Wellenlänge und Strahlbreite wie L1, jedoch mit einer Leistung von $P_{L2} = 400\text{mW}$. Die geringere Leistung konnte verwendet werden, da das System sich innerhalb des Druckbehälters befindet und unmittelbar oberhalb des Modellraumes angebracht ist. Dadurch muss, wie der Vergleich von Abb. 2a und 2b zeigt, eine wesentlich geringere Fläche aufgespannt werden. Wie Abb. 3 zeigt, wird zum Aufspannen der Lichtschnittebene ein mit $f = 50\text{Hz}$ oszillierender Spiegel verwendet. Die Frequenz wurde gewählt, da dabei der Spiegel im Bereich der Eigenfrequenz schwingt und somit eine größere Fläche aufgespannt wird und somit eine vollständige Beleuchtung des Modellraumquerschnitts ermöglicht.

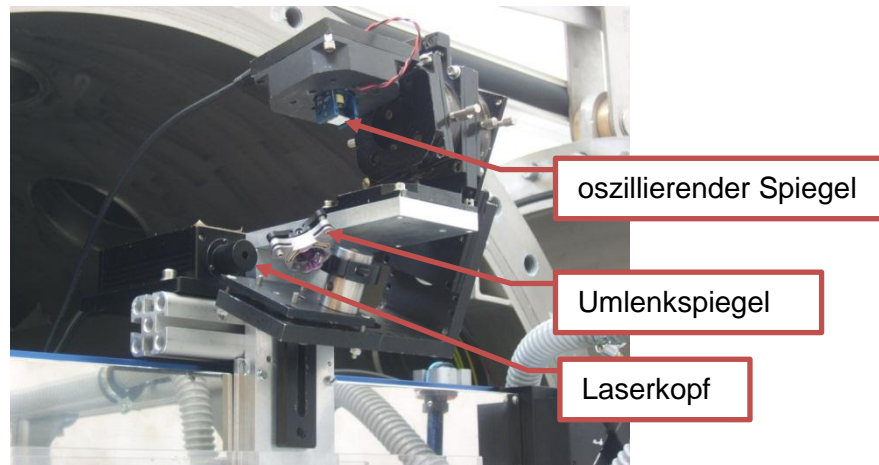


Abb. 3: Das Licht-Schnitt-System L2 der SCALEX-Anlage

Für die Visualisierungen wurden Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat-(DEHS)-Partikel verwendet. Diese wurden mit einem Zerstäuber vom Typ PIVpart12 der Firma PIVTEC erzeugt. Laut Herstellerangaben beträgt die durchschnittliche Partikelgröße $d_p = 1\mu\text{m}$. Der dafür notwendige Überdruck wurde von einem innerhalb des Druckbehälters befindlichen Kompressor erzeugt. Die Partikel wurden hinter Lüfter und Wärmetauscher des Systems über ein Düsensystem in den Zuluft-Volumenstrom eingeleitet.

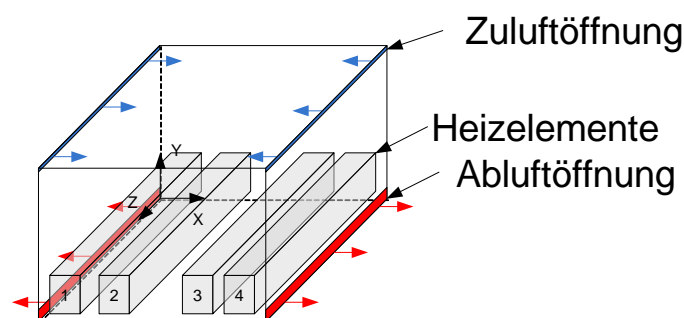


Abb. 4: Schematische Darstellung der zu untersuchenden Modellraumgeometrie

Der zu untersuchende Modellraum ist, wie in Koerner et al 2011 beschrieben und in Abb. 4 dargestellt, ein rechteckiger Raum, mit einer Breite $B = 400\text{mm}$, einer Höhe $H = 300\text{mm}$ und einer Tiefe $T = 500\text{mm}$. Er wurde aus Polymethylmethacrylat (PMMA) gefertigt, um einen bestmöglichen optischen Zugang zu gewährleisten. An der Decke des Raumes sind über der gesamten Tiefe Zuluftöffnungen und am Boden über die gleiche Länge Abluftöffnungen angebracht. Am Boden befinden sich, wie in Abb. 4 dargestellt, vier quaderförmige Heizele-

mente, welche aus Aluminium gefertigt wurden und über je zwei Heizpatronen elektrisch beheizt werden können. Durch den geringen Emissionsgrad der Aluminiumoberfläche der Heizelemente und dem hohen Reflexionsgrad der PMMA-Wände im Bereich der Infrarotstrahlung ($2.8\mu\text{m} < \lambda < 28\mu\text{m}$) kann der Strahlungsaustausch zwischen diesen Elementen vernachlässigt werden.

Zur Quantifizierung und zur detaillierten Untersuchung des zeitlichen Verhaltens der gefundenen Strömungsstrukturen sollen Geschwindigkeitsmessungen mit der Laser-Doppler-Velocimetry (LDV) durchgeführt werden. Dazu wird das bereits in Koerner et al 2010 beschriebene und in Abb. 5 dargestellte LDV-System vom Typ LDV-300 der Firma PolyTec verwendet. Das System wird außerhalb des Druckbehälters vor dem in Abb. 1 sichtbaren seitlichen Schauglas betrieben und besteht aus zwei Sonden, welche zusammen auf einer Grundplatte auf einer 3D-Traverse montiert sind. Die Sonden besitzen die Wellenlängen $\lambda = 830\text{nm}$ für die horizontale Komponente und $\lambda = 680\text{nm}$ für die vertikale Komponente. Die Brennweite der Frontlinsen beträgt $f = 1000\text{mm}$ und der Abstand zwischen den Laserstrahlen am Austritt an der Frontlinse $d_{\text{bs}} = 60\text{mm}$. Die horizontale Komponente wird als on-axis-System betrieben, wobei die optische Achse gleich der in Abb. 4 dargestellten z-Achse entspricht. Die vertikale Komponente wird als off-axis-System mit einem Winkel zur horizontalen Achse von $\varphi = 6.4^\circ$ betrieben.

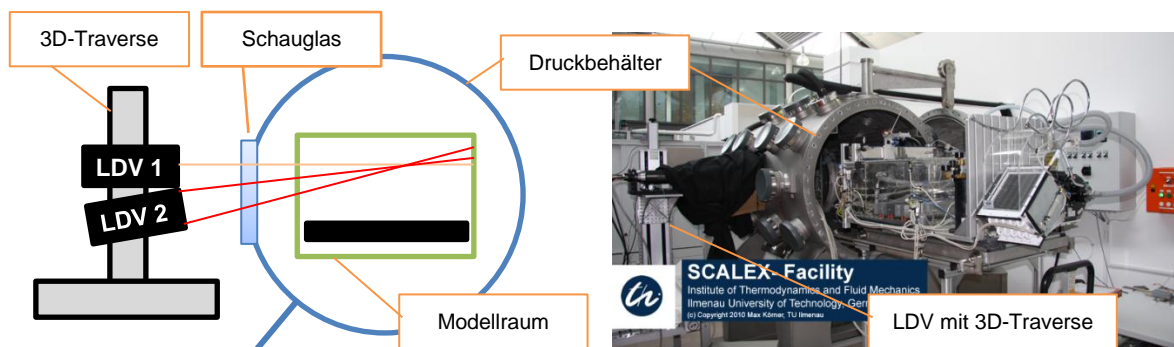


Abb. 5: Schematische Darstellung des LDV-Systems vor dem seitlichen Schauglas des Druckbehälters (rechts, LDV1 = horizontale Komponente; LDV2 = vertikale Komponente); Aufbau des LDV-Systems an der SCALEX-Anlage mit dem Modellraum in der Montageposition (links)

Durch die große Brennweite und die Anordnung der einzelnen Komponenten kann nahezu jeder Punkt innerhalb des Modellraumes mit dem Messvolumen erreicht werden. Durch den Einsatz des Systems außerhalb des Druckbehälters müssen die Laserstrahlen durch verschiedene optische Materialien, wie Luft, Borosilikatglas (40mm), komprimiertes Arbeitsgas (Luft oder SF_6) und PMMA (Modellraumwand, 8mm) geleitet werden. Die verschiedenen Brechungsindizes, welche beim Arbeitsgas zusätzlich vom Druck abhängig sind, und die verschiedenen Reflexionsgrade und Transmissionsgrade verursachen, wie in Koerner et al 2010 beschrieben, einerseits eine Verschiebung der Messvolumina und andererseits eine Verringerung der Signalstärke. Um den Aufwand einer Nachjustierung zu minimieren, wurde das LDV-System zunächst auf die mittlere Querschnittsebene bei $z/T = 0.5$ justiert. Diese Querschnittsebene wurde ebenfalls bei der Durchführung der Lichtschnitt-Visualisierungen verwendet.

Ergebnisse

Um einen qualitativen Nachweis der Skalierungsmethode zu erbringen, wurden zu 4 verschiedenen Skalierungsfaktoren, 1:1, 1:3.3, 1:6.7 und 1:10, Visualisierungen durchgeführt. Dabei wurden die in Abb. 2a dargestellten Systemparameter Lüfterdrehzahl N_{FAN} , Wärmeübertragertemperatur $T_{WÜ}$ und Heizleistung P_{el} konstant gehalten und jeweils nach Erreichen des stationären Zustandes nach jeder Änderung des Skalierungsfaktor Visualisierungen durchgeführt. Für den Skalierungsfaktor 1:1 wurde Luft bei Umgebungsdruck ($p_0 = 1.0\text{bar}$) verwendet. Für die weiteren 3 Skalierungsfaktoren wurde SF_6 bei entsprechend Drücken von $p_1 = 1.0\text{bar}$, $p_2 = 2.7\text{bar}$ und $p_3 = 4.5\text{bar}$ verwendet.

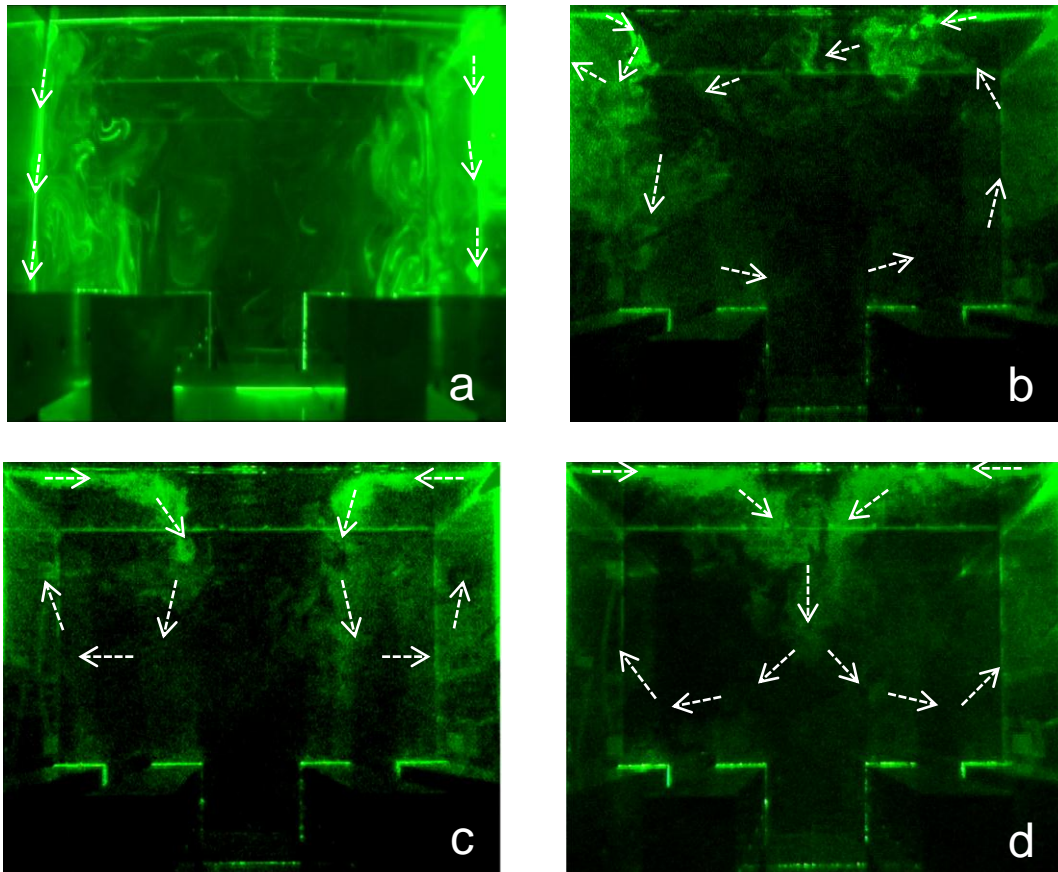


Abb. 6: Visualisierung der stationären, großskaligen Strömungsstrukturen der turbulenten gemischten Konvektion bei 4 verschiedenen Skalierungsfaktoren und konstanten Systemparametern (a... $p = 1.0\text{bar}$, Luft, 1:1; b... $p = 1.0\text{bar}$, SF_6 , 1:3.3; c... $p = 2.7\text{bar}$, SF_6 , 1:6.7; d... $p = 4.5\text{bar}$, SF_6 , 1:10; \rightarrow ...Richtung der Zuluftströmung [ohne betrag])

Bei jeder Druckstufe war eine deutliche Veränderung der großskaligen Strömungsstrukturen, wie es die Momentaufnahmen Abb. 6a-d deutlich zeigen, zu erkennen. So ist bei der ersten Druckstufe p_0 (Skalierungsmaßstab 1:1) zu erkennen, dass hier keine ausgeprägte, großskalige Zirkulationsströmung zu finden ist. Es besteht ein Kurzschluss zwischen Zuluftöffnung und Abluftöffnung, was sich darin äußert, dass die eintretende kalte Luft direkt entlang der Wand nach unten zur Abluftöffnung strömt. Innerhalb des Raumes finden sich turbulente Strömungsstrukturen der freien Konvektion. Wird der Skalierungsfaktor auf 1:3.3 erhöht, ändern sich die Strömungsstrukturen grundlegend. In diesem Fall existiert, wie Abb. 6b zeigt, eine großskalige Zirkulationsströmung in Form eines einzelnen Wirbels, der sich über die gesamte Querschnittsebene erstreckt. Dabei bildet sich an der linken Zuluftöffnung ein klei-

nes Rezirkulationsgebiet. Der rechte Zuluftstrom verteilt sich hingegen über den gesamten Raum. In Abb. 6c ist zu erkennen, dass bei weiterem Erhöhen des Skalierungsfaktors sich die großskaligen Strömungsstrukturen wieder grundlegend verändern. Bei dem Skalierungsfaktor von 1:6.7 ergibt sich nun eine symmetrische Verteilung der Zuluftströmungen mit je einem Rezirkulationsgebiet hinter jeder Zuluftöffnung. Diese Strömungsstrukturen erstrecken sich jedoch nicht über den gesamten Querschnitt. Dies ist erst der Fall sobald der Skalierungsfaktor auf 1:10 erhöht wird. Hier erstrecken sich, wie das Abb. 6d zeigt, die großskaligen Strömungsstrukturen über den gesamten Raum und bilden in der Mitte des Raumes in der Nähe der Decke ein Staupunktgebiet. Die Ergebnisse zur Untersuchung der großskaligen Strömungsstrukturen zeigen eindeutig, dass durch Verändern der thermophysikalischen Materialeigenschaften des Arbeitsgases sich die stationären Strömungsstrukturen grundlegend verändern. Damit wurde ein qualitativer Nachweis der Skalierungsmethode erbracht. Die Ergebnisse der Visualisierungen sollen in weiteren Untersuchungen durch den Einsatz des oben beschriebenen LDV-Systems quantifiziert werden.

Dankesworte

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

Richter, W., 2007: "Handbuch der thermischen Behaglichkeit -Sommerlicher Kühlbetrieb-", Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund

Sundell, J., et al., 2011: "Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature", *Indoor Air*, 21, pp. 191-204

Gladstone, C., Woods, A. W., 2001: "On buoyancy-driven natural ventilation of a room with a heated floor", *J. Fluid Mech.*, 441, pp. 293-314

Koerner, M., Thess, A., 2011: "Experimental investigation of a small-scale model room using a new method of scaling of indoor airflows", *Proceed. 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Austin, Texas, USA

Koerner, M., Resagk, C., Thess, A., 2010: "Experimental Investigation of Non-Isothermal Indoor Airflow in a Small-Scale Model Room Using Laser Techniques", *15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal