

Charakterisierung der Zuluftströmung in einem Passagierkabinenmodell

Characterization of the inlet air flow in a passenger cabin model

Martin Herzberg, Clemens Naumann, Christian Resagk, Christian Cierpka
TU Ilmenau, Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Am Helmholtzring 1, 98693 Ilmenau

PIV, Innenraumbelüftung, Wandstrahlen
PIV, room ventilation, wall jets

Abstract

Um die Einlassgeschwindigkeit in einem Experiment zur Untersuchung von Raumluftströmungen in Fahrzeuginnenkabinen richtig einzustellen, werden in diesem Beitrag Untersuchungen zum Verhalten der Einlassströmung bei verschiedenen Lüftereinstellungen und Drücken durchgeführt. Es werden PIV Messungen der Einlassströmung mit Geschwindigkeitswerten aus einer Hitzdrahtsensor Messung verglichen und Kalibrierungsgeraden für die Sensoren angegeben.

Einleitung

Raumluftströmungen in Fahrzeugkabinen sind im Allgemeinen durch Mischkonvektion gekennzeichnet. Neben der natürlichen Konvektion, die in Innenräumen an erwärmten Oberflächen auftritt, spielt bei der Belüftung auch die erzwungene Konvektion eine wichtige Rolle. Zur Untersuchung der in einer Fahrzeugkabine auftretenden Strömungsstrukturen wurde ein Passagierkabinenmodell entwickelt [1,2], welche schematisch in Abbildung 1 dargestellt ist.

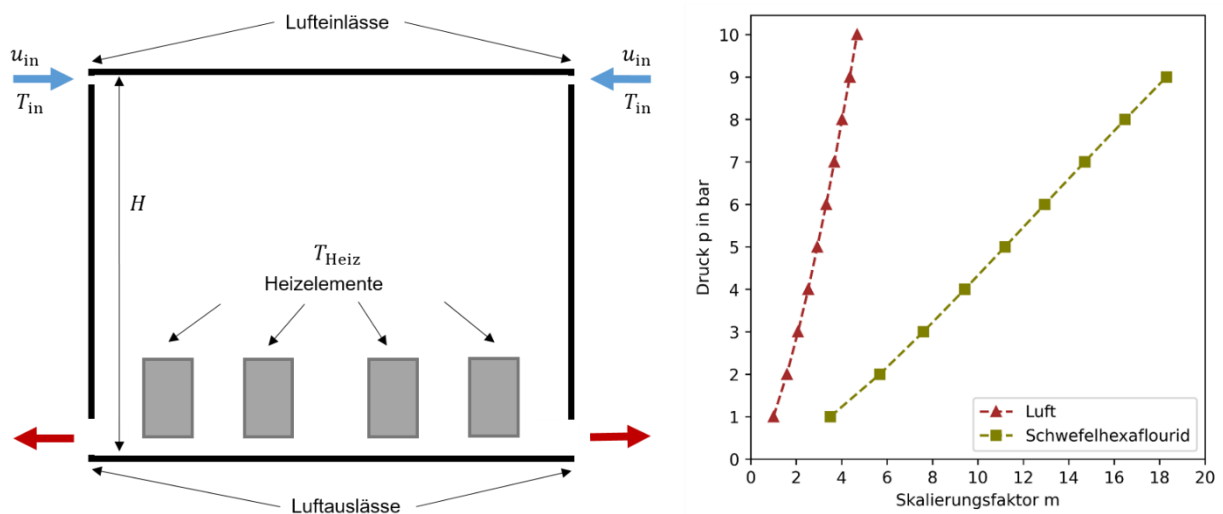


Abbildung 1: Darstellung des Passagierkabinenmodells (links) und Zusammenhang zwischen Skalierungsfaktor m und Druck für Luft und Schwefelhexafluorid (rechts).

Das Passagierkabinenmodell besteht aus PMMA und hat eine Breite $B = 40$ cm, eine Höhe $H = 30$ cm und eine Tiefe $D = 50$ cm. An beiden Seiten befindet sich ein Einlass mit einer Einlasshöhe von $h_E = 2$ mm und ein Auslass mit der Auslasshöhe $h_A = 20$ mm. Am Boden des Modells sind Heizelemente angebracht, welche den durch die in der Fahrzeugkabine befindlichen Personen erzeugten Wärmestrom imitieren sollen.

Das Verhältnis von natürlicher zu erzwungener Konvektion kann mit Hilfe der Archimedeszahl Ar (bzw. Richardsonzahl Ri)

$$Ar = Ri = \frac{Ra}{PrRe^2} = \frac{\beta g \Delta T H}{u_{in}^2}$$

beschrieben werden. Dabei ist β der Ausdehnungskoeffizient, g die Erdbeschleunigung, ΔT die Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur der Heizelemente T_{Heiz} und der Temperatur der einströmenden Luft T_{in} und H die als charakteristische Länge angenommene Höhe des Modells. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit der einströmenden Luft u_{in} soll auf beiden Seiten des Modellraums gleich sein.

Die zu grundlegenden dimensionslosen Kennzahlen Rayleighzahl Ra , Reynoldszahl Re und Prandtlzahl Pr können über eine Veränderung des Drucks oder den Austausch des Arbeitsgases von Luft zu Schwefelhexafluorid beeinflusst werden [3]. Diese Anpassung kann in der SCALEX-Anlage der TU Ilmenau vorgenommen werden [4]. Für den Zusammenhang zwischen den Dimensionen des Modells und den Dimensionen der zu untersuchenden Originalräume kann ein Skalierungsfaktor m definiert werden. Der Zusammenhang zwischen dem benötigten Druck und dem Skalierungsfaktor ist in Abbildung 1 für die Arbeitsgase Luft und Schwefelhexafluorid (SF_6) dargestellt.

Eine genaue Kenntnis und Kontrolle der in das Passagierkabinenmodell einströmenden Luft und insb. der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_{in} ist notwendig, um gezielt das Verhältnis von natürlicher zu erzwungener Konvektion beeinflussen zu können. Dazu wurden zwei thermische Volumenstromsensoren in der Luftzuführung des Modells verbaut, die bei verschiedenen Drücken und Arbeitsgasen kalibriert werden müssen. Dazu, und zur genauen Charakterisierung der einströmenden Luft, wurden Particle Image Velocimetry (PIV) Messungen an den Einlassspalten des Passagierkabinenmodells durchgeführt.

Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau bestehend aus dem Modellraum mit einem Luftzirkulationssystem. Die Luft wird mit Hilfe eines Lüfters im Kreis geführt. Die zwei Volumenstromsensoren sind so verbaut, dass zusammen mit den davor angebrachten Ventilen eine gleichmäßige Aufteilung des Volumenstroms auf beiden Seiten des Modellraums möglich ist. Das Luftzirkulationssystem ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Bei den Volumenstromsensoren handelt es sich um das Modell IL 30.005 der Firma Schmidt Technologie. Die Sensoren sind nach dem Prinzip eines Hitzdrahtanemometer aufgebaut und können Volumenströme \dot{V} im Bereich von $0,15 \frac{m^3}{h}$ bis $76,3 \frac{m^3}{h}$ mit einer Messabweichung von $\pm \left(0,03 \cdot \text{Messwert} + 0,2289 \frac{m^3}{h}\right)$ ausgeben.

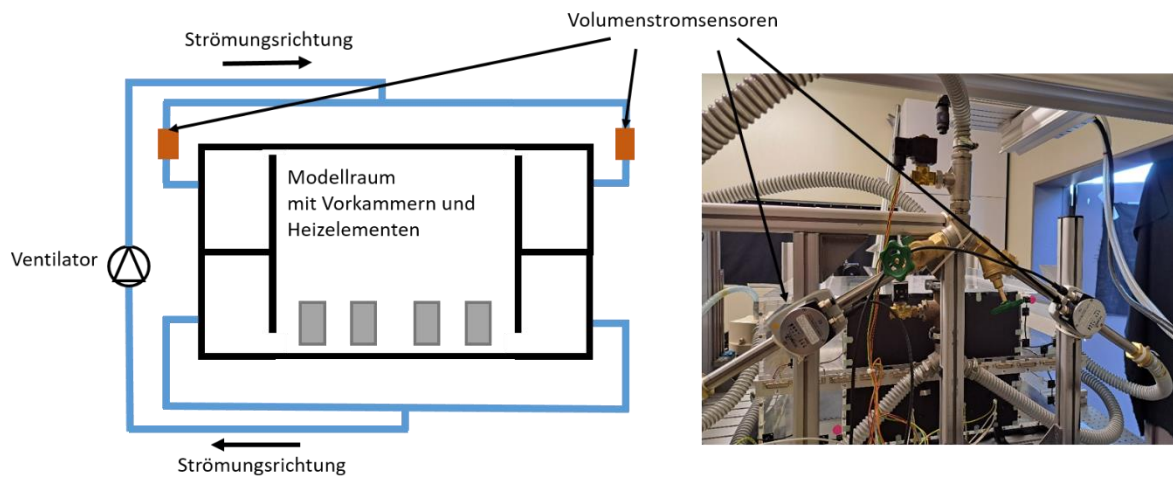


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Luftzirkulationssystems des Modellraums (links) und Foto der verbauten Volumenstromsensoren (rechts).

Für Voruntersuchungen wurden Experimente bei Umgebungsdruck in einem Labor durchgeführt. Der experimentelle Aufbau ist in Abbildung 3 links dargestellt. Das dort verwendete PIV System besteht aus einem Nd:YAG Puls laser des Typs Evergreen 200 mJ der Firma Quantel und zwei wassergekühlten sCOMS Kameras der Firma PCO mit einer Sensorauflösung von 2560×2160 pixel. Der Lichtschnitt wird mit Hilfe einer Lichtschnittoptik oberhalb des Modellraums erzeugt. Der Laser ist dabei so gelagert, dass eine Verschiebung des Lichtschnitts in z-Richtung über die Tiefe und in x-Richtung über die Breite des Modellraums möglich ist. An den Kameras werden Milvus 2/100M Zeiss Objektive verwendet. Sie sind so ausgerichtet, dass die Strömung direkt vor den Einlässen untersucht werden kann.

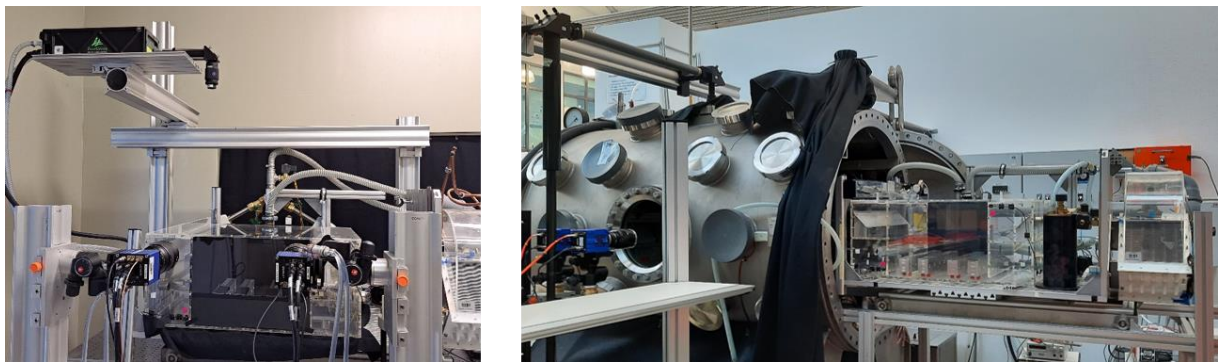


Abbildung 3: Aufbau des PIV System für Voruntersuchungen (links) und Integration des Experiments in SCALEX-Anlage mit PIV System (rechts).

Um Vergleichsmessungen bei höheren Drücken und später mit SF₆ durchführen zu können, wurde das Experiment nach den Voruntersuchungen in die SCALEX Anlage integriert, siehe Abb. 3. Hier wurde ein PIV System der Firma LaVision verwendet, welches aus einem Quantel Ns:YAG Puls laser (532 nm) des Typs Q-smart Twins und zwei luftgekühlten PCO Kameras des Typs Edge 5.5 mit einer Sensorauflösung von 2560×2160 pixel besteht. Der Lichtschnitt wurde von oben in die SCALEX hineingeführt und die Kameras befinden sich von außen vor einem Sichtfenster. Um die Einlässe gut auflösen zu können, wurden erneut Milvus 2/100M Zeiss Objektive verwendet. Diese sind auf Grund der gegebenen Einschränkungen beim optischen Zugang unter einem Winkel zur Lichtschnittebene und unter Nutzung von Scheinflugadaptern auf die beiden Einlässe ausgerichtet. Das Field of View (FOV) in dem die Einlassströmung untersucht wird ist in Abbildung 4 dargestellt.

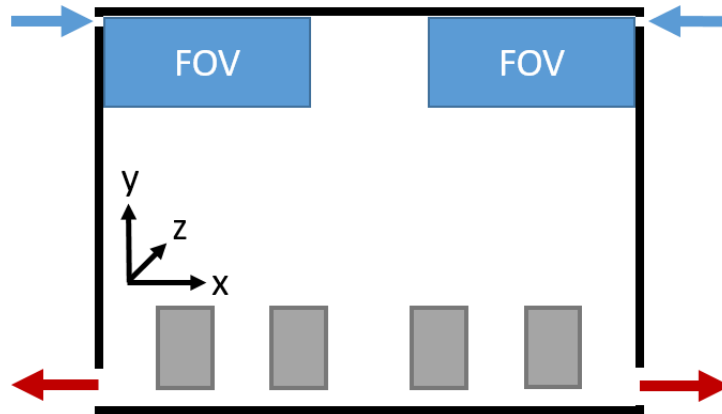


Abbildung 4: Field of View (FOV) und Ausrichtung des Koordinatensystems im Modellraum.

Kalibriert wurden beide Aufbauten mit einem Kalibriertarget des Typs 058-5 der Firma LaVision. Da es sich hierbei um ein 3D Target handelt, jedoch nur planare 2D/2C Messungen durchgeführt werden sollen, wurde darauf geachtet, dass nur eine Ebene zur Kalibrierung genutzt wurde. Bei einer Tiefenposition von $z/D = 0,5$ normiert auf die Gesamttiefe ergibt sich für beide experimentelle Setups eine räumliche Auflösung von $27 \frac{\text{pixel}}{\text{mm}}$.

Eine Messreihe besteht aus jeweils 100 Doppelbildern, die anschließend im Multipass mit Sum of Correlation ausgewertet wurden. Dabei wurde eine Bildwiederholrate von 0,5 Hz so gewählt, dass der zeitliche Abstand zwischen zwei Doppelbildaufnahmen größer ist als die Durchlaufzeit eines einzelnen Partikels durch den Bildbereich bei der kleinsten anzunehmenden Strömungsgeschwindigkeit. Dadurch soll die statistische Unabhängigkeit der einzelnen Doppelbildaufnahmen gesichert werden [5]. Die Größe der kleinsten Auswertefenster beträgt bei den Voruntersuchungen 16×16 pixel und in der SCALEX 24×24 pixel. Mit einer Überlappung von 50 % führt das zu einem Vektorenabstand von 0,29 mm bzw. 0,44 mm.

Ergebnisse und Auswertung

In Abbildung 5 sind die Beträge der Geschwindigkeiten der einströmenden Luft am linken und am rechten Einlass, der Verlauf der Geschwindigkeitsprofile bei einem Abstand von 1 mm vor den Einlässen und der Verlauf der aus den Sensordaten ermittelten Einlassgeschwindigkeit dargestellt. Dabei ist die Versorgungsspannung des Lüfters konstant auf 12 V eingestellt.

Aus den Geschwindigkeitsprofilen kann die mit PIV ermittelte mittlere Einlassgeschwindigkeit $u_{\text{in,piv}}$ ermittelt werden. Dazu wird der Verlauf der Geschwindigkeitswerte im Spalt durch eine Polynomfunktion $f_2(u)$ approximiert. Durch Division des integrierten Wertes durch die Spaltbreite h_{in} erhält man die mittlere Einlassgeschwindigkeit $u_{\text{in,piv}}$.

$$u_{\text{in,piv}} = \frac{\int_0^{h_{\text{in}}} f_2(u) \, du}{h_{\text{in}}} \quad \text{mit} \quad f_2(u) = au^2 + bu + c$$

Die Sensoren ermitteln den Volumenstrom der durch den Ventilator angetrieben wird. Die durch die Sensoren ermittelte Einlassgeschwindigkeit $u_{\text{in,sensor}}$ wird durch Division des gemessenen Volumenstroms \dot{V} durch die bekannte Fläche des Einlasses A_{Einlass} bestimmt.

$$u_{\text{in,sensor}} = \frac{\dot{V}}{A_{\text{Einlass}}}$$

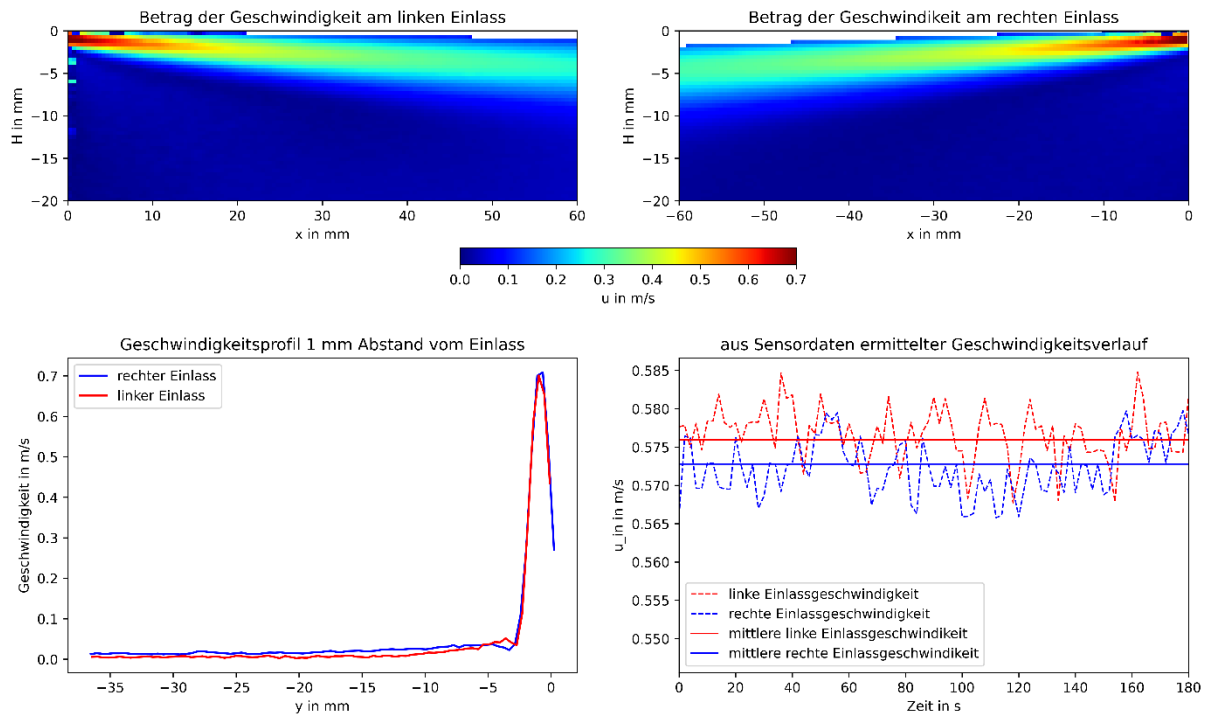


Abbildung 5: Geschwindigkeitsfeld auf der linken Seite des Modellraumes (oben links), Geschwindigkeitsfeld auf der rechten Seite des Modellraums (oben rechts), Vergleich der Geschwindigkeitsprofile bei 1 mm Abstand vor dem Einlass auf die rechten und linken Seite bei $z/D = 0,5$ (unten links) und Verlauf der Einlassgeschwindigkeit an den Sensoren.

Die Abhängigkeit der mittels Sensoren ermittelten Einlassgeschwindigkeit $u_{in,Sensor}$ bei verschiedenen Drücken von der eingestellten Lüfterspannung im Arbeitsgas Luft ist in Abbildung 6 auf der linken Seite dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass mit steigender Spannung die Einlassgeschwindigkeit linear zunimmt. Mit höherem Druck verschieben sich die von den Sensoren ausgegebenen Werte nach oben. Dieses Verhalten hängt mit einer veränderten Wärmeübertragung bei höherer Dichte von Luft zusammen und ist in der Literatur gut dokumentiert [6].

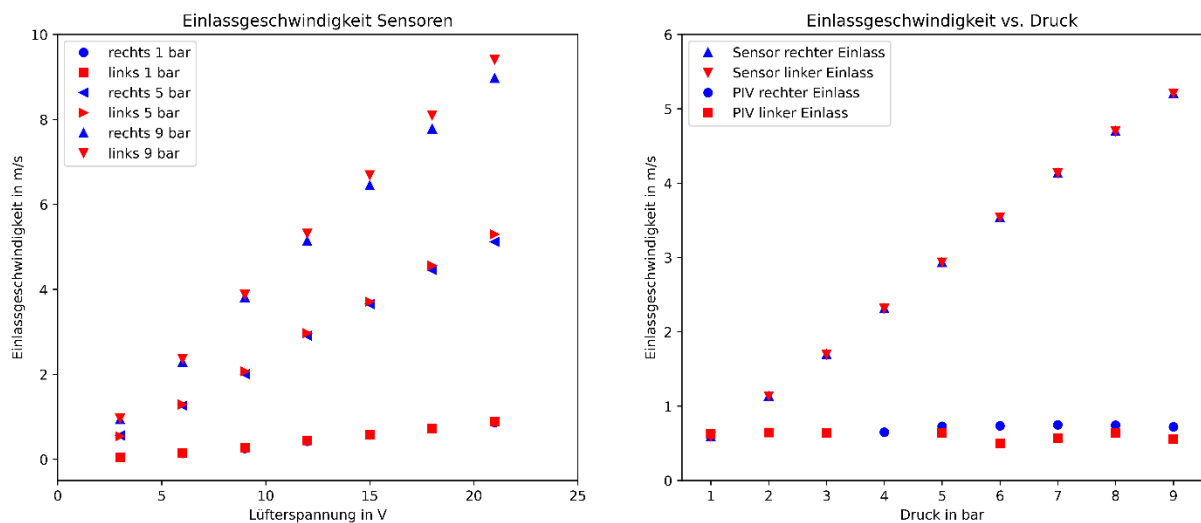


Abbildung 6: Verlauf der mittels Sensoren ermittelten Einlassgeschwindigkeit (links) und Abhängigkeit der Einlassgeschwindigkeiten vom Druck (rechts).

Auf der rechten Seite der Abbildung 6 ist der Verlauf der mittels Sensoren ermittelten Einlassgeschwindigkeit $u_{in, Sensor}$ und der Verlauf der mittels PIV ermittelten Einlassgeschwindigkeit $u_{in, piv}$ bei einer eingestellten Lüfterspannung von 12 V bei verschiedenen Drücken dargestellt. Hier ist zu beobachten, dass $u_{in, piv}$ seinen Wert für verschiedene Drücke nicht maßgeblich ändert während bei $u_{in, Sensor}$ ein zu erwartender linearer Anstieg zu sehen ist.

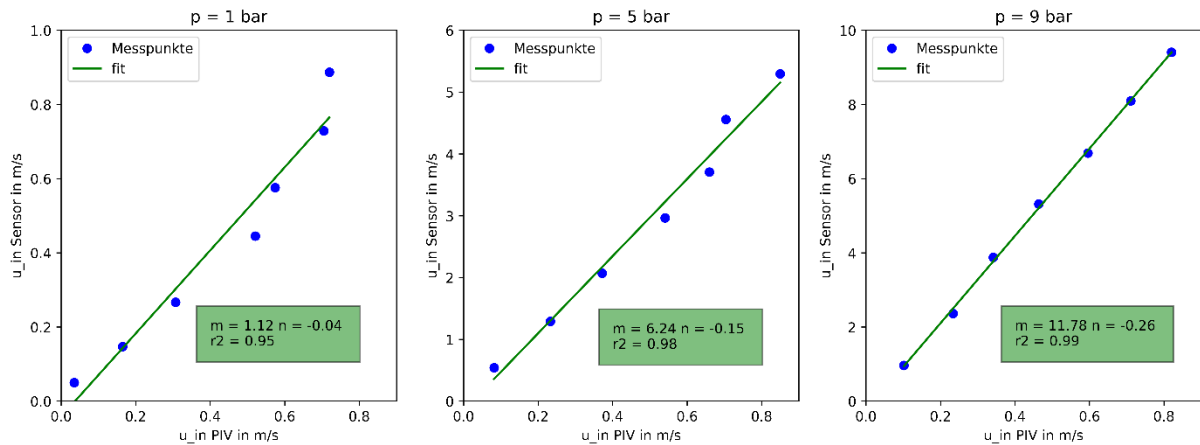


Abbildung 7: Lineare Abhängigkeit der mittels Sensor ermittelten Einlassgeschwindigkeit $u_{in, Sensor}$ von der mittels PIV ermittelten Einlassgeschwindigkeit $u_{in, piv}$.

Um verlässliche Messwerte der Sensoren zu erhalten, wurden die bei verschiedenen Lüfterspannungen aufgezeichneten Geschwindigkeitswerte $u_{in, Sensor}$ der Sensoren mit den zugehörigen Geschwindigkeitswerten der PIV-Messungen $u_{in, piv}$ kalibriert. In Abbildung 7 sind die Kalibriergraden für den linken Einlass bei den Drücken 1, 5 und 9 bar dargestellt. Zusätzlich sind die Parameter der linearen Approximation der Werte zusammen mit dem R^2 -Wert angegeben.

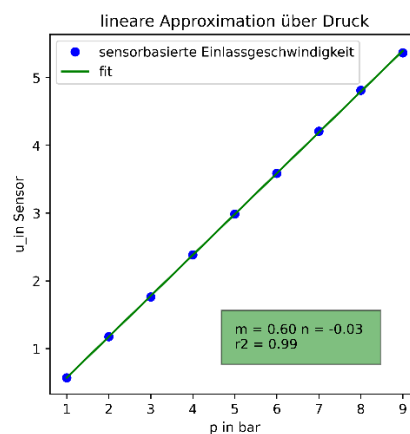


Abbildung 8: Lineare Abhängigkeit der mittels Sensor ermittelten Einlassgeschwindigkeit $u_{in, Sensor}$ vom Druck bei einer konstanten Lüfterspannung von 12 V.

Um die korrekte Einlassgeschwindigkeit auch bei unterschiedlichen Drücken ermitteln zu können, werden die bei einer konstanten Lüfterspannung und bei verschiedenen Drücken ermittelten Einlassgeschwindigkeiten $u_{in, Sensor}$ ebenfalls durch eine lineare Funktion approximiert. In Abbildung 8 ist die druckabhängige Kalibriergerade zusammen mit den Parametern der linearen Approximation dargestellt.

Zusammenfassung und Ausblick

Für einen experimentellen Aufbau zur Untersuchung von Raumluftrömungen ist es möglich beide Einlassseiten gleichmäßig einzustellen. Der Volumenstrom auf beiden Seiten verhält sich konstant, wenn die dazugehörigen Ventile gut eingestellt sind. Es konnte gezeigt werden, dass es einen Zusammenhang zwischen Druck und an den thermischen Sensoren angezeigten Werten gibt, der sich in den PIV Messungen nicht wieder spiegelt. Auf Grundlage dieser Erkenntnis wurde eine Methode zur Kalibrierung der Sensoren vorgeschlagen.

Der beschriebene Messaufbau soll in Zukunft für Untersuchungen zur Ausbreitung von Aerosolen in Innenräumen und zur Kontrolle von Strömungsstrukturen zur Verfügung stehen.

Dankesworte

Wir bedanken uns für die Finanzierung unserer Forschung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Projekte RE 1066/20-1 und CI 185/10-1. Für Unterstützung bei der technischen Umsetzung des beschriebenen Experimentaufbaus bedanken wir uns bei Alexander Thieme.

Literatur

- [1] Herzberg M., Resagk, C., Cierpka, C., "Experimentelle Untersuchung von turbulenten Strömungsstrukturen in Mischkonvektion", 27. Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“, Bremen, 7.-9.9.2021,
- [2] Körner, M., Resagk, C., Thess, A., "Experimentelle Untersuchung zur Bildung großskaliger Strukturen in Raumluftr", 22. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, Karlsruhe, 9.-11.9.2014
- [3] Ghazijahani, M. et al., "The SCALEX facility – an apparatus for scaled fluid dynamical experiments" Technisches Messen 90:332-339
- [4] Körner, M. et al., "Properties of large-scale flow structures in an isothermal ventilated room" Building and Environment. 59:563–574
- [5] Kähler C., Scharnowski S., Cierpka C., „On the uncertainty of digital PIV and PTV near walls“ Experiments in Fluids 55:1641-1656
- [6] Bruun H., „Hot-wire anemometry – principles and signal analysis“, Oxford University Press, New York, 1995