

Reynoldsskalierte CFD und LDA Klassenraumuntersuchungen im Maßstab 1:100 zur Überprüfung von CFD Simulationen in Originalgröße

Reynolds-scaled CFD and LDA classroom investigations at a scale of 1:100 to check CFD simulations at original size

M. Berger¹, T. Senfter², C. Mayerl², M. Piminger³, T. Hausberger¹, M. Pillei²

¹Dept. of Medical Technologies, MCI Innsbruck, Austria

²Dept. of Industrial Engineering & Management, MCI Innsbruck, Austria

³Dept. of Mechatronics, MCI Innsbruck, Austria

1D Roboter-LDA, Klassenraum, CFD und LDA

1D robot LDA, classroom, CFD and LDA

Zusammenfassung

Effiziente Raumströmung und Luftführung sind entscheidende Faktoren für die Gestaltung und den Betrieb von Gebäuden, insbesondere in Bezug auf die Luftqualität und den thermischen Komfort. Die Verwendung von numerischen Strömungs (CFD)-Simulationen zur Vorhersage und Optimierung dieser Strömungsverhältnisse ist weit verbreitet, erfordert jedoch eine Überprüfung, um ihre Genauigkeit sicherzustellen. Eine bewährte Methode zur Überprüfung von CFD-Simulationen im Originalmaßstab ist die Anwendung der Reynoldsskalierung in Verbindung mit Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) Raumuntersuchungen. Es wird untersucht, ob durchgeführte Experimente im Maßstab 1:100 es ermöglichen, die Luftströmungsdynamik in Originalgröße zu modellieren und eine Übereinstimmung mit den CFD-Ergebnissen gegeben ist. Diese Forschungsansätze spielen eine entscheidende Rolle bei der Optimierung von Lüftungssystemen, der Minimierung von Energieverlusten und der Gewährleistung eines gesunden und komfortablen Raumklimas in Gebäuden verschiedener Art. Durch die genaue Untersuchung der Strömungscharakteristiken und -muster in einem kleineren Maßstab können wichtige Einblicke gewonnen werden, wie sich Luftströmungen in realen Gebäudeszenarien verhalten. Dies ermöglicht es, potenzielle Engpässe, Wirbelbildungen zu identifizieren, die Auswirkungen auf die Luftqualität und den Komfort haben können. Darüber hinaus erlaubt die Anwendung der Reynoldsskalierung eine präzise Anpassung der experimentellen Bedingungen, um die Reynoldszahl des Modells entsprechend derjenigen des Originals zu skalieren, wodurch eine genauere Simulation der Strömungsphänomene erreicht wird.

Es wird der MCI Klassenraum 4A-024 am Standort IV, Maximiliantrasse 2, 6020 mit 90 Studierenden untersucht. Die Originalgröße hat eine 16 m x 7 m Grundfläche und einer Höhe von 3,5 m. Es werden Experimente in einem vereinfachten 3D-gedruckten Raum durchführt, da einerseits das Einbringen des Messsystems bereits die Strömung fälschlicherweise verändern würde. Des Weiteren können kontrollierte Einlass-, und Auslassrandbedingungen ohne Verwendung zusätzlichen Gebläses nicht gewährleistet werden, was sehr viel aufwändiger wäre. Das Ziel der Arbeit ist es zu überprüfen, ob ein im Maßstab 1:100 vereinfachtes 3D-gedrucktes Modell mit LDA und CFD Simulationen verwendet werden kann, um zu zeigen, dass CFD Simulationen in Originalgröße verwendet werden können, um den Raum zu optimieren. Es wird angenommen, dass es an einem Fenster mit 4 cm/s Originalgröße einströmt, und bei einem zweiten Fenster wieder ausströmt. Alle anderen Fenster sind verschlossen. In den CFD Simulationen wird dafür eine horizontale Ebene auf Kopfhöhe exportiert und mit den dazugehörigen LDA Experimenten einer Geschwindigkeitskomponente (y-Richtung) verglichen. Ein

qualitativer Vergleich zeigt, dass CFD Simulationen im Maßstab 1:100 gut mit den LDA Messungen zusammenstimmen und dass CFD Simulationen in Originalgröße ähnlich sind. Das bedeutet, dass die Reynoldsskalierung in der Lüftungstechnik im Maßstab 1:100 bei Räumen verwendet werden kann. Eine Schwäche dieser Untersuchung ist die vereinfachte Raumkonstruktion. Der mittlere Unterschied zwischen Simulation und Messung ist 1,13 m/s.

Einleitung

Die Energieerzeugung in Österreich lag 2022 bei ca. 508 PJ. In Anbetracht der österreichischen Klima- und Energiestrategie, die vorsieht, dass der Anteil der erneuerbaren Energien auf 45 % bis 50 % erhöht wird, während die Energieeffizienz um 25 % bis 30 % gesteigert werden soll, sieht sich die Gebäudetechnik mit einigen konzeptionellen und technologischen Herausforderungen konfrontiert. Ein möglicher Ansatz zur Erhöhung der Energieeffizienz stellt die Auslegung von Lüftungsanlagen und Optimierung von Räumen dar. Neben dem Heizen und der Warmwasseraufbereitung in Gebäuden stellen Lüftungsanlagen die Hauptverbraucher in Gebäuden dar. Die Relevanz der Lüftung umfasst dabei unter anderem Schutz vor Schadstoffen, Wärmerückgewinnung zur Erhöhung der Energieeffizienz, Komfort der Bewohner (Temperaturregelung, Feuchtigkeitskontrolle, Luftqualitätsmanagement) und Brand- und Rauchschutz.

Die Belüftung von Räumen ist ein wichtiger Forschungsbereich in der intelligenten Gebäudetechnik. Oft haben bereits kleine geometrische Änderungen einen großen Einfluss auf das Strömungsfeld und somit eine Verbesserung der Belüftung. In dieser Untersuchung wird der Istzustand der Strömung des MCI Klassenraums 4A-024 im Modellmaßstab 1:100 untersucht. Untersuchungen im Labor haben den großen Vorteil, dass zeitlich unveränderte Randbedingungen gewährleistet werden können. Weiters würde das Messequipment im Originalraum bereits die Strömung beeinflussen. Der Skalierungsfaktor wurde gewählt, da bei größeren 3D-Druckteilen der Verzug zum Problem wird und dadurch sich die örtliche Genauigkeit verschlechtert. Die Grundlage der Untersuchung bietet die Reynold'sche Ähnlichkeitstheorie welche die Skalierung und Vereinfachung der Untersuchung verkleinert erlaubt (Landau and Lifshitz 1959)

$$Re_{or} = \frac{v L}{\nu_{or}} = Re_{mo} = \frac{v L}{\nu_{mo}},$$

wobei 'or' für Original und 'mo' für Modell steht. Ein Ziel der Untersuchung ist auch die Messergebnisse mit Strömungssimulationen im Original- und Modellmaßstab zu vergleichen um die Genauigkeit der Strömungssimulationen zu überprüfen. Nachher ist eine weitere Optimierung der Raumströmung rein simulativ möglich. Die Messungen werden mit der 1D-LDA (Laser Doppler Anemometrie) (Zhang 2010) durchgeführt. Um die optische Zugänglichkeit zu gewährleisten, besteht die Decke aus einem Glaselement. Der LDA Messbereich, TCP (tool center point), wird dabei von einem Roboter mittels inverser Kinematik an die richtige Position und Orientierung gebracht (Hausberger 2017). Dafür wird ein Roboter mit sechs Freiheitsgraden (6-DoF), wie von (Niku 2020) vorgeschlagen. In der Arbeit von (Jux et al. 2018) werden robotergesteuerte koaxiale PIV-Messungen präsentiert, die darauf abzielen, komplexe aerodynamische Strömungen bei Radfahrern auf großem Maßstab zu untersuchen. Zur Erfassung der Partikelgeschwindigkeiten mittels des Shake-the-Box-Algorithmus wird ein Laser-Kamerasystem (4-Kamera-Konfiguration) auf dem Roboter montiert, wie in (Schanz, Gesemann, and Schröder 2016) beschrieben. Margerit et al. (Margerit et al. 2021) haben eine MATLAB®-Umgebung entwickelt, die robotergesteuerte Laser-Doppler-Vibrometer verwendet, um die 3D-Geschwindigkeiten auf der Oberfläche zu messen. Michaux, et al (Michaux, Mattern, and

Kallweit 2018) demonstrieren, wie ein Roboter auf industrieller Ebene PIV-Messungen mit einer Genauigkeit von 0,04 bis 0,1 mm durchführt. Darüber hinaus bietet der Roboter im Vergleich zu einem Linearachsentraversierungssystem den Vorteil, dass das Messkoordinatensystem einfach mit dem Objekt registriert werden kann, was die Messvorbereitung vereinfacht.

Durchführung

Für die Umsetzung wird die LDA ILA fp50- shifted (ILA; Jülich, Deutschland) mit einer 250 mm Linse verwendet. Diese ist auf dem Roboter IRB 1200 7kg 0.7m (ABB; Zürich, Schweiz) montiert. Zur Datenerfassung der LDA Messergebnisse wird ILA LDA control systems qt 2.0.10 verwendet. Das programmierte Plugin wird in der RobotStudio® Version 2021 verwendet.

Vorbereitung der 3D-CAD

Zu Beginn wird der Klassenraum 4A-024 mit dem Laser-Entfernungsmessgerät DLE 50 (Bosch, Gerlingen, Deutschland) vermessen und die Wände, Studenten, Tische und der Vortragende mit der Software Inventor 2024 (Autodesk, San Rafael, USA), konstruiert. Der Ursprung ($x = 0 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm}$, $z = 0 \text{ mm}$) der CAD Datei wird dabei so gelegt, dass dieser der Ursprung des Messkoordinatensystems ist und später mit dem Roboter eingelernt werden kann, siehe Abb. 1. Die Originalgröße hat 16 m x 7 m Grundfläche und einer Höhe von 3,5 m. In der Abbildung wird aber das um Faktor 100 kleiner skalierte Modell dargestellt. In Abb. 1a sieht man die 3D Konstruktion in Abb. 1b den dazugehörigen 3D-Druck. Um Lichtreflexionen zu vermeiden, ist schwarzes Filament aus PLA und der 3D20 (Dremel, Wisconsin, USA) 3D-Drucker verwendet worden. Im Raum sitzen 90 Studierende, und ein Vortragender (ist aber in Abbildung nicht sichtbar). Die Konstruktion wird im ACIS Dateiformat (.sat) abgespeichert da dieses von RobotStudio® 2021 (ABB, Mannheim, Deutschland) geöffnet werden kann.

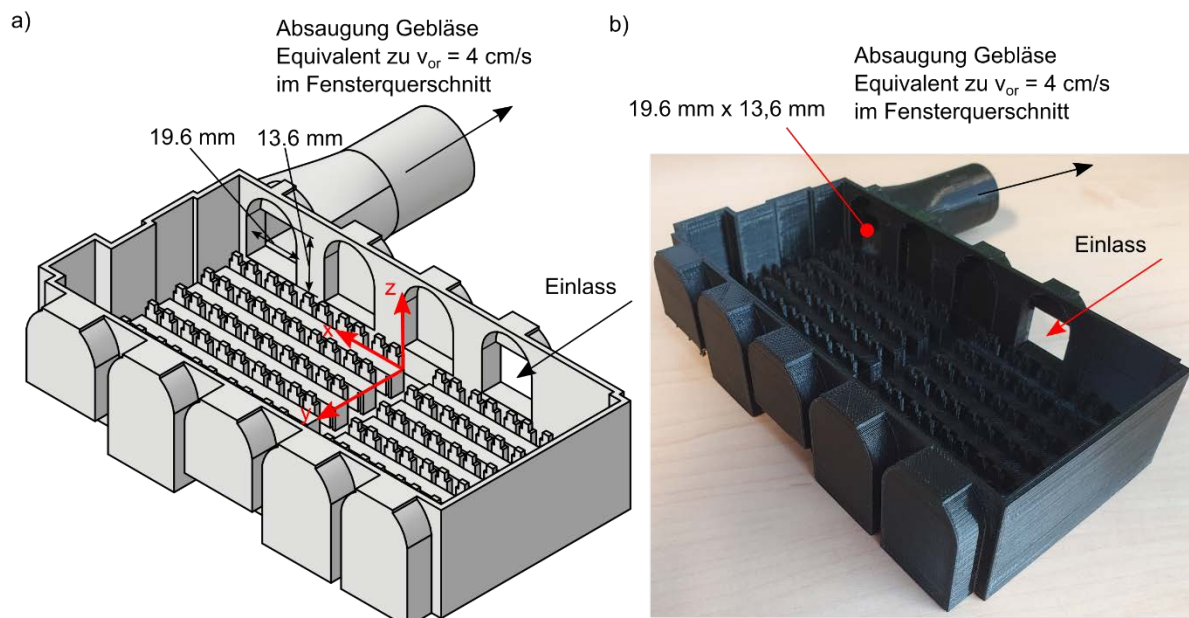


Abb. 1: 3D Konstruktion in a) und 3D Druck in b) im Maßstab 1:100 des zu untersuchenden Raums 4A-024 am MCI IV, Maximilianstrasse 2, Innsbruck. Im Raum sitzen 90 Studierende und ein Vortragender. Der Vortragende ist in der Abb. nicht sichtbar. Das Einlass-, und Auslassfenster hat in Original eine Größe von 1,96 m x 1,36 m. Das rot gezeigte Koordinatensystem zeigt den Ursprung der Konstruktion, welcher später bei der Roboterplanung zur Registrierung von Messkoordinatensystem und Objektkoordinatensystem verwendet wird.

Experimenteller Aufbau inkl. Robotersteuerung

Abb. 2 zeigt den experimentellen Aufbau in RobotStudio®. Zu Beginn wird der 3D-konstruierte Raum (.sat) Dateiformat in Robotstudio importiert und erscheint im Ursprung mit dem bereits verwendeten Koordinatensystem. Nachher wird in RobotStudio® der Tisch konstruiert und Roboterunteraufbau ebenfalls im .sat Format importiert. Der virtuelle Roboter IRB 1200 7 kg 0.7 m ist aus der Robotware 6.10.00 erstellbar und erscheint automatisch im Ursprung. Mittels Lineartransformation und Rotation wird dieser an die richtige Stelle gebracht. Im .rslib Dateiformat besteht aus früheren Untersuchungen bereits eine Bibliothek des LDA Messkopfs mit der 500 mm Linse. Nach montieren auf dem Roboter muss der TCP jedoch auf die verwendete 250 mm Linse angepasst werden. Die Koordinaten dafür sind ($x = -0.60$ mm, $y = 282.2$ mm, $z = 128.8$ mm). Dann stimmt zwar die graphische Darstellung der grünen LDA Laserstrahlen nicht mit der Realität überein, was nur ein Nachteil in der graphischen Darstellung ist und nicht am Messergebnis ändert. Dafür stimmt aber die TCP Position und Orientierung (= Pose). Ein würfelförmiges Messvolumen mit einer Seitenlänge von 5 mm, entspricht 500 mm in Originalgröße, wird an eine Stelle auf Kopfhöhe in der zweiten Sitzreihe in der Nähe der einströmenden Luft positioniert und mit $3 \times 3 \times 3$ Messpunkten örtlich diskretisiert. Nach Anpassen der Orientierung, sodass der Roboter alle Positionen erreichen kann, wird eine Roboterkonfiguration ausgewählt und für alle verwendet. Der Pfad wird in RobotStudio® simuliert und auf zum Roboter gesendet. Am realen Roboter wird die Position des Roboter-LDA TCPs mit 4 Punkten kalibriert, die Orientierung wird vom globalen Roboterkoordinatensystem verwendet. Nach der Kalibration wird das Messkoordinatensystem eingelernt indem der Ursprung ($x = 0$ mm, $y = 0$ mm, $z = 0$ mm) angefahren wird, ein Punkt in x-Richtung und abschließend ein Punkt in y-Richtung. Die z-Koordinate berechnet RobotStudio® mittels Kreuzprodukt der Einheitsvektoren.

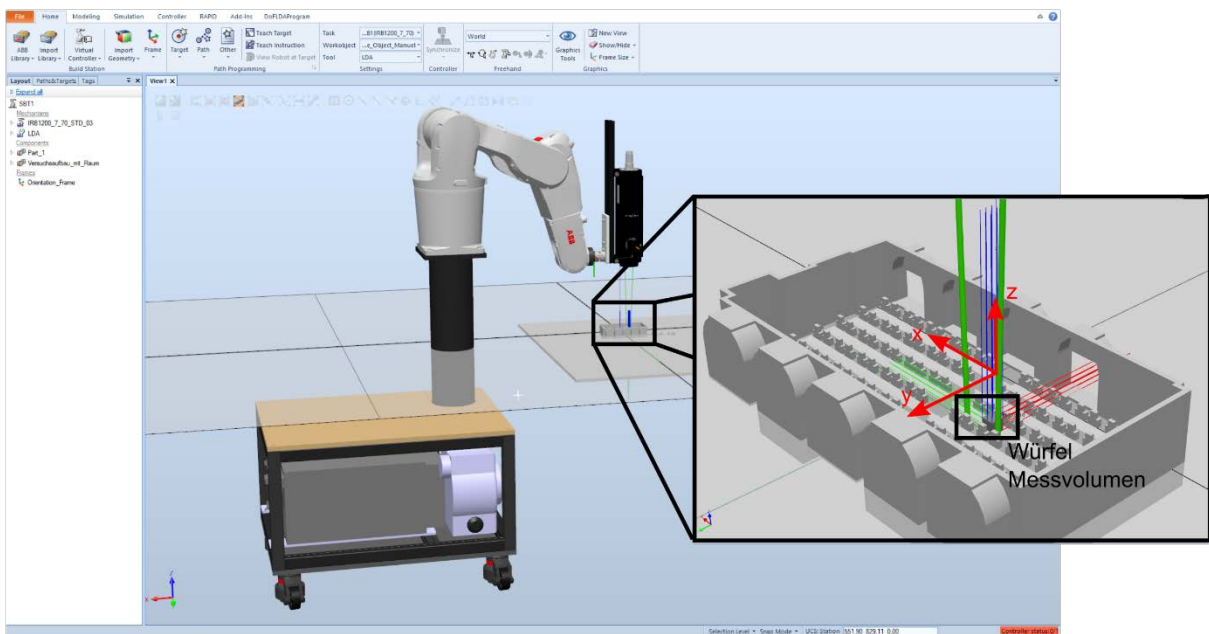


Abb. 2: Screenshot von RobotStudio®. Die Messumgebung wird dargestellt: Das beinhaltet den Aufbau des Roboters inkl. Steuerung und die LDA welche montiert ist. Das Koordinatensystem ist das Messkoordinatensystem welches auch für die CFD Simulationen verwendet wird. Es wird ein würfelförmiges Messvolumen untersucht welches mit 27 Messpunkten diskretisiert wurde. Der Kreuzungspunkt aus rot-grün-blau zeigt den Messpunkt. Der Roboter-LDA TCP muss dafür jeden Messpunkt abfahren.

Den Prozess dieser Roboterprogrammierung wird als Real-Offline bezeichnet. Nachher fährt der Roboter die Messpunkte im Handbedienmodus, ohne dabei die Messungen durchzuführen, ab. Nachher wird der Roboter für die Messung im Automatikbetrieb gestellt, dass der Totmannschalter am Bedienpanel nicht immer gedrückt werden muss. Die LDA Software LDA control Qt v2.0.10 erfasst das Doppler Signal und wertet dieses aus. Die Einstellungen dafür sind: Samplingrate = 50 MHz, Anzahl der Samples = 1024, Min/Max Burst Validierung: 3, Min. Schwellwert = 5 mV, Software Frequenzlimit: unten = 0 kHz, oben = 17153.3 kHz, Hardware Frequenzlimit: Hochpass = 100 kHz, Tiefpass = 20 Mhz, Verschiebefrequenz der Braggzelle = 3 MHz, Eingangsbereich. ± 100 mV, Trigger = 19.685 %, Detektierungsspannung = 1000 V, Bursts: Number of bursts = 1000, max. Messzeit pro Punkt = 30 s, Minimale Messzeit = 10 s. Statistische Unsicherheit = 2 %. Die Leistung des Lasers ist 100 mW. Abb. 3 zeigt ein Foto des Experimentellen Aufbaus. Damit Tropfen aus dem Wasserverdampfer ans Einlassfenster gelangen, ist eine Schachtel mit dem Ausschnitt passend positioniert worden. Zum kontrollierten Absaugen wird ein PI geregelter Seitenkanal-Frequenzumrichter System mit Hitzdrahtanemometer verwendet.

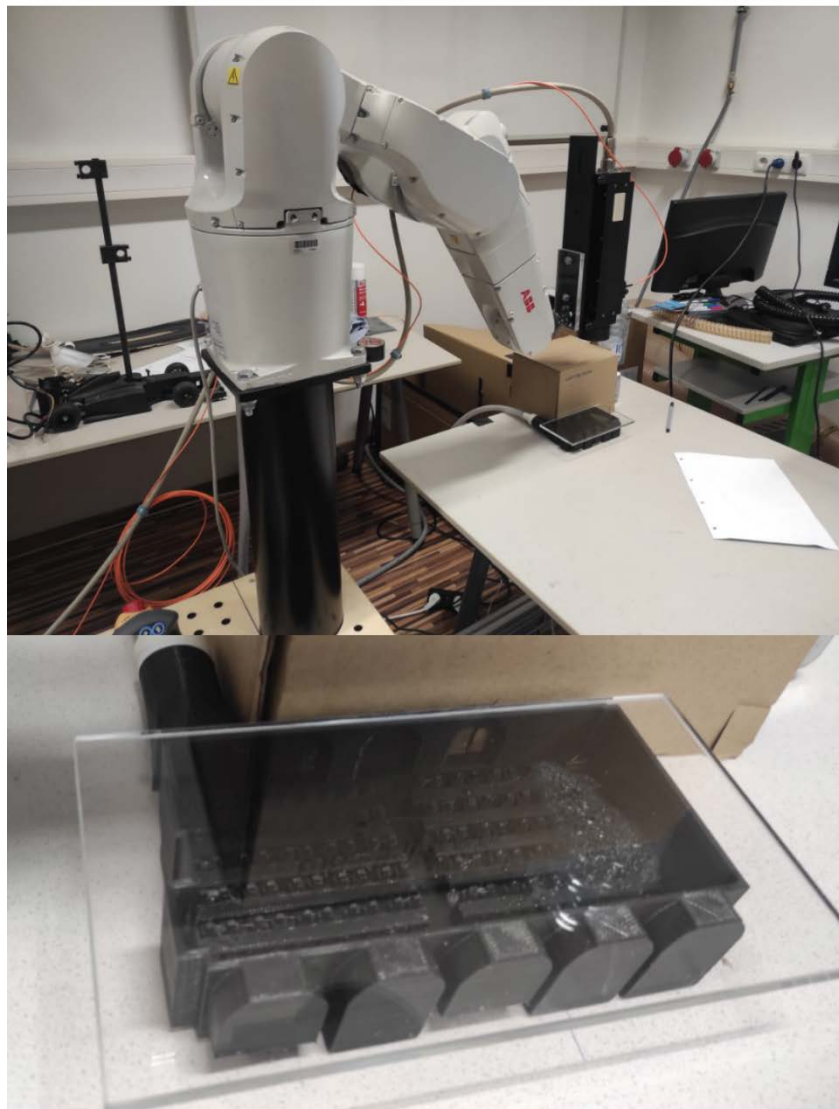


Abb. 3: Experimenteller Aufbau im Labor. Roboter-LDA Messsystem mit 1:100 skalierten Raummodell. Die Glasscheibe (Decke) dient der optischen Zugänglichkeit.

CFD Simulationen

Die Strömungsberechnungen vom Original und Modell sind in Ansys Workbench 2023 R2 mit DesignModeler, FluentMeshing und Fluent berechnet worden. Die Geometrie wird in DesignModeler importiert und mit der Füll Funktion die Fluiddomäne extrahiert. Dafür müssen die Decke und die Ein-, und Auslassflächen mit einem Flächenkörper vorher versehen werden. Named selection werden für die Ein-, und Auslassrandbedingung definiert. Alle nicht definierten Flächen werden in Fluent später automatisch als Wände beschrieben. In FluentMeshing wird zu Beginn ein Oberflächenetz mit einer minimalen Zellgröße von 0.00015434 m und einer maximalen Größe von 0.003951 m in der Modellgröße erstellt. Am Auslass wird die velocity-inlet Randbedingung mit negativer Geschwindigkeit und am Einlass eine Druckrandbedingung verwendet. Vereinfacht wird die Grenzschichtauflösung mit 3 Grenzschichtzellen, einer Wachstumsrate von 1.2 und ein Übergangsverhältnis von 0.272 gesetzt. Abschließend legt man für das Volumennetz die Polyeder fest mit einer maximalen Zellgröße von 0.00515146 m und einer Wachstumsrate von 1.2. Für die Simulation in der Originalgröße kann dasselbe Netz um Faktor 100 skaliert werden. Zur Turbulenzmodellierung wird das Standard $k-\omega$ -SST verwendet. Alle Erhaltungsgleichungen sind mit einer Genauigkeit von zweiter Ordnung gelöst worden. Diese konnten einen skalierten Residuenschwellwert von $<1e-6$ erreichen.

Ergebnisse: Vergleich zwischen Simulation und Messung

Abbildung 4 links zeigt die Ergebnisse experimentellen Untersuchungen im Maßstab 1:100. Die y-Geschwindigkeitskomponente ist dafür mit der LDA and 27 Messpunkten und einer Schnittebene der 3D-CFD Simulation extrahiert worden.

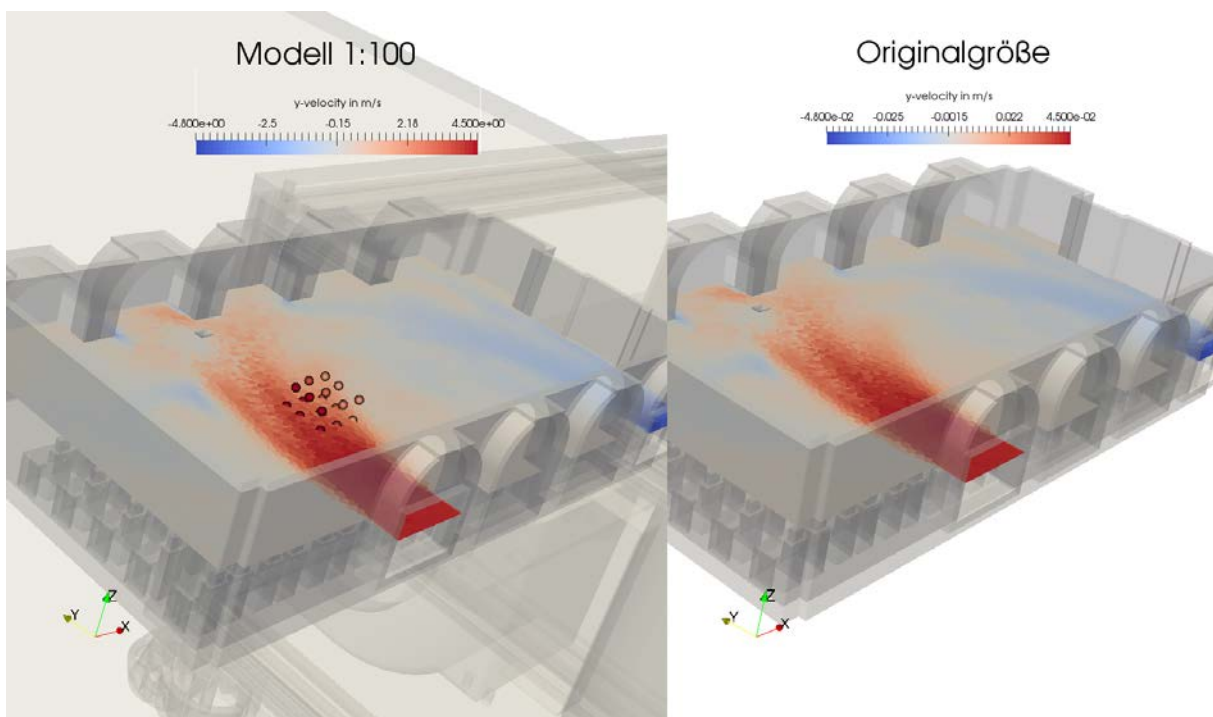


Abb. 4: links: LDA Messergebnisse der y- Geschwindigkeitskomponente im Modell 1:100 sind als Punkte dargestellt. Die Konturfläche ist die y- Geschwindigkeitskomponente eines Schnittes der sitzenden Studierenden im Klassenraum. Rechts: Die y- Geschwindigkeitskomponente der sitzenden Studierenden im Klassenraum auf Kopfhöhe.

Die LDA Ergebnisse sind dabei als Punkte dargestellt, die CFD Schnittebene ist auf Kopfhöhe der sitzenden Studierenden eingeführt worden. Qualitativ herrscht eine gute Übereinstimmung zwischen den LDA Messergebnissen und den CFD Ergebnissen. Abbildung 4 rechts zeigt die CFD Ergebnisse in Originalgröße des Raums. Vergleicht man diese mit denen im Modell 1:100 so ist erkennbar, dass die Reynoldstheorie sehr gut für Raumströmungen im Maßstab 1:100 verwendet werden kann. Tab. 1 zeigt die Simulations-, und Messergebnisse von jedem Messpunkt. Der mittlere Unterschied zwischen Simulation und Messung ist 1,13 m/s.

Tab. 1: CFD und LDA Messergebnisse von jedem einzelnen Messpunkt.

x in m	y in m	z in m	LDA in m/s	CFD in m/s
-0.03	0.021	0.014	5.075	4.18
-0.025	0.02	0.015	2.365	2.1273
-0.025	0.02	0.01	3.836	3.45
-0.03	0.02	0.01	6.744	4
-0.03	0.02	0.005	0.011	0.6
-0.025	0.02	0.005	3.184	0.28
-0.02	0.02	0.005	0.025	0.7
-0.02	0.02	0.01	1.995	2.08
-0.02	0.02	0.015	2.059	0.89
-0.02	0.029	0.006	0.574	0.66
-0.02	0.026	0.005	0.008	0.51
-0.02	0.025	0.01	3.028	2.54
-0.02	0.029	0.01	3.187	1.87
-0.02	0.03	0.015	2.057	2.51
-0.02	0.026	0.015	1.927	1.79
-0.025	0.025	0.015	3.036	3.29
-0.03	0.025	0.015	5.396	4.16
-0.03	0.029	0.015	5.519	4.003
-0.025	0.03	0.015	3.523	3.43
-0.025	0.03	0.01	4.9	3.07
-0.03	0.03	0.01	5.969	3.54
-0.03	0.026	0.01	6.329	3.86
-0.025	0.025	0.01	4.61	3.38
-0.025	0.025	0.005	2.675	-0.012
-0.03	0.025	0.005	2.748	0.96
-0.03	0.029	0.005	1.295	0.39
-0.025	0.03	0.005	2.115	0.7

Schlussfolgerung

Der Vergleich zwischen Simulation und Messung im 1:100 skalierten Raum zeigt ähnliche y-Geschwindigkeitstendenzen, jedoch keine genaue Übereinstimmung. Der Grund dafür können die nicht exakt gleichen Ein-, Auslassrandbedingungen in der CFD Simulation und LDA Messung sein. Weiters kann die limitierte örtliche Auflösung des 3D Druckes geringfügig verant-

wortlich sein für die Unterschiede der Ergebnisse. Positiv hervorzuheben ist, dass die Reynoldstheorie für CFD Simulationen von Raumuntersuchungen im Maßstab 1:100 sehr gut mit der Originalgröße übereinstimmt.

Dankesworte

Wir möchten Johannes Sieberer und Benjamin Massow für die Mitarbeit der Entwicklung des Roboter-LDA Plugins in RobotStudio® danken.

Literatur

- Hausberger, Thomas:** 2017. "A 6-DoF Laser-Doppler-Velocimetry System for Evaluation of Flow along Arbitrary Curved Surfaces, Master Thesis." MCI Management Center Innsbruck.
- Jux, Constantin, Andrea Sciacchitano, Jan F.G. Schneiders, and Fulvio Scarano:** 2018. "Robotic Volumetric PIV of a Full-Scale Cyclist." *Experiments in Fluids* 59(4): 1–15. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-018-2524-1>.
- Landau, Lew Dawidowitsch;, and Jewgeni Michailowitsch; Lifshitz:** 1959. *Fluid Mechanics - Third Revised English Edition*. Pergamon.
- Margerit, Pierre, Tristan Gobin, Arthur Lebée, and Jean François Caron:** 2021. "The Robotized Laser Doppler Vibrometer: On the Use of an Industrial Robot Arm to Perform 3D Full-Field Velocity Measurements." *Optics and Lasers in Engineering* 137(August 2020).
- Michaux, F., P. Mattern, and S. Kallweit:** 2018. "RoboPIV: How Robotics Enable PIV on a Large Industrial Scale." *Measurement Science and Technology* 29(7).
- Niku, Saeed B:** 2020. *Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications*. John Wiley & Sons.
- Schanz, Daniel, Sebastian Gesemann, and Andreas Schröder:** 2016. "Shake-The-Box: Lagrangian Particle Tracking at High Particle Image Densities." *Experiments in fluids* 57(5): 1–27.
- Zhang, Zhengji:** 2010. Calcium in Living Cells *LDA Application Methods Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics*. Springer.