

Roboter-LDA Querströmungsmessungen eines NACA 6412 0° AoA Profils um zu zeigen, dass 2D CFD, 2D CNN und 2D PIV Untersuchungen zulässig sind

Robotic LDA cross-flow measurements of a NACA 6412 0° AoA profile to demonstrate that 2D CFD, 2D CNN and 2D PIV investigations are valid

M. Berger¹, P. Raffener², 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, NACA 6412 0° AoA, Querschströmung, 10 m/s Freistromgeschwindigkeit

1D robot LDA, NACA 6412 0° AoA, cross-flow, 10 m/s freestream velocity

Zusammenfassung

Die Vorhersage des Strömungsfeldes bei Flugzeugprofilen ist entscheidend um größtmöglichen Auftrieb bei geringsten Treibstoffverbrauch zu gewährleisten. Durch Unterstützung von numerischer Fluidodynamik (CFD) aber auch neuraler Faltungsnetze (CNN), kann der experimentelle Aufwand reduziert werden. Der Nachteil der CFD ist die unter Umständen lange Berechnungsdauer aufgrund des notwendigen iterativen Lösungsprozesses und Nichtlinearität der Navier-Stokes Gleichungen in Eulerscher Betrachtung. Außerdem kann die Genauigkeit dieser Berechnung nicht immer abgeschätzt werden. Jedoch bietet CFD die größtmögliche Ergebnisinformation, wie z.B. alle Geschwindigkeitskomponenten, Druck und turbulente Intensität. Mit CNN kann im Gegensatz zur CFD relativ schnell ein Ergebnis produziert werden, welches jedoch stark von der Qualität der Trainingsdatensätze abhängt. Außerdem gibt es bis jetzt keine Flexibilität bei den Randbedingungen. Experimente können in der Entwicklung von Flugzeugtragflügelprofilen meist nur skaliert mit Berücksichtigung von dimensionslosen Kennzahlen der Fluidodynamik durchgeführt werden.

In der Untersuchung soll gezeigt werden, dass 2D/2C particle image velocimetry (PIV) Messungen im eigenen Windkanal zur Überprüfung der Genauigkeit von 2D CFD Simulationen und 2D CNN Vorhersagen zulässig sind. Deshalb wird mittels 1D LDA Messsystems die Querströmungskomponente untersucht. Je kleiner diese ist, desto besser.

In einem offenen Windkanal, Einlassdurchmesser 80 mm, wird bei der Freistromgeschwindigkeit von 10 m/s und einer Windkanaleinlass Reynoldszahl (Re) von 800 000 das NACA 6412 Profil mit einem Anstellwinkel (AoA) von 0° untersucht. Die Chordlänge ist 100 mm, die Chordbreite 200 mm. Die Re berechnet auf der Chordbreite ist 2 000 000. Zur LDA Messung wird ein selbstentwickeltes RobotStudio® 2021 plugin verwendet damit der ABB Roboter die vorher definierten Messpunkte abfährt. Insgesamt werden 238 Messpunkte in Windkanalmitte untersucht. Der LDA Messneigungswinkel wird mit 25° festgelegt, damit Laserreflexionen reduziert werden und am LDA Sensor Signal mit hoher Qualität auftritt. Es werden Seeding-Tropfen bestehend aus Di(2-ethylhexyl)sebacat (DEHS) mit einem Modaldurchmesser von etwa 1,2 µm und einer Stokes-Zahl kleiner als 1 verwendet. Das bedeutet, dass die Tropfen der Luftströmung mit vernachlässigbarer Geschwindigkeitsdifferenz folgen. Die LDA Messzeit wird auf mindestens 10 Sekunden, eine maximale Zeit wird pro Messpunkt mit 30 Sekunden gesetzt.

Außerdem wird die Messung an jeden einzelnen Messpunkt abgebrochen, falls mehr als 1000 valide Bursts und > 10 s erreicht wurden. Ergebnisse zeigen, dass mehr als 100 valide Bursts an 203 von 238 Messpunkten erreicht wurden. Die 35 Messpunkte waren nahe an Wand des Flugzeugsprofils und aufgrund von Laserreflektionen schwer zu erfassen. Die Geschwindigkeitsquerströmungskomponente gemittelt über alle 238 Messpunkte ist -0.239 m/s, was im Verhältnis zur Freistromgeschwindigkeit von 10 m/s $2,39\%$ beträgt. Die Standardabweichung ist 0.125 m/s. Da die Geschwindigkeitsquerströmungskomponente so klein ist, sind 2D/2C PIV Messungen zur Überprüfung von 2D CFD und 2D CNN Ergebnissen zulässig.

Einleitung

Die rasche Entwicklung von GPU Hardwaretechnologien und dadurch deutliche Zunahme von Rechenleistung in den letzten Jahren mit Verfügbarkeit von großen digitalen Datensätzen, spielen eine entscheidende Rolle in der Evolution von Deep Learning (DL). DL hat sich schnell als eine dynamische und sich rasch entwickelnde Disziplin herauskristallisiert, mit umfangreichen Anwendungen, die nahezu jeden Sektor von Wissenschaft und Technologie umfassen (Calzolari and Liu 2021; Goodfellow, Bengio, and Courville 2016). CNNs zeigen bemerkenswerte Erfolge in praktischen Anwendungen, insbesondere in der Bildverarbeitung. Die Fähigkeit, Gitterdatenstrukturen effizient zu verarbeiten, ist ein entscheidender Faktor für den Erfolg. Darüber hinaus besitzen CNNs die Fähigkeit des Lernens, was es ihnen ermöglicht, relevante Merkmale direkt aus Rohdateneingaben zu erfassen. Diese Fähigkeit eliminiert die Notwendigkeit manueller Merkmalsextraktion und verbessert so ihre Effizienz und Wirksamkeit weiter (Goodfellow, Bengio, and Courville 2016; Gu et al. 2018). In der Vergangenheit ermöglichte DL schnelle, bis hin zu Echtzeit-Vorhersagen von Luftströmungen. Diese Fortschritte wurden jedoch in der Regel auf Kosten der Genauigkeit erreicht (Calzolari and Liu 2021). Die kürzlich durchgeführte Studie von Kochkov et al. (Kochkov et al. 2021) zeigte das Potenzial der DL-Integration in CFD. Beschleunigungen von $40-80$ Mal bei Beibehaltung der gleichen Genauigkeit für die Simulationsergebnisse konnten präsentiert werden. Neben integrierte Modelle gibt es auch das DeepCFD (Ribeiro et al. 2020) CNN basierendes Surrogatmodell. Dieses Framework approximiert zunächst Lösungen für 2D-Vektorfelder und 2D-Skalarfelder basierend auf verschiedenen CFD simulierten primitiven Geometrien wie Kreisen, Dreiecken, Quadraten und abgeleiteten Hindernisformen. Nachher kann ohne CFD mit neuen Hindernisformen das Strömungsfeld und Druckfeld vorhergesagt werden.

Die CFD (Ferziger and Peric 2012) ist eine verbreitete Methode zur Strömungsvorhersage und liefert präzise Ergebnisse mit beeindruckender Flexibilität. Der Lösungsprozess ist aber für die stark gekoppelten, nichtlinearen partiellen Navier-Stokes-Gleichungen immer noch zeitaufwendig. CFD liefert präzise Ergebnisse mit beeindruckender Flexibilität und Kosteneffizienz (Kundu, Cohen, and Dowling 2015). Die Genauigkeit und Rechenzeit von CFD-Lösungen hängen jedoch stark von der Größe der Netzgitterelemente ab. Dies wird besonders wichtig, wenn schnelle Berechnungen erforderlich sind, z.B. bei Echtzeitanalysen, d.h. während der aerodynamischen Gestaltung (Usman et al. 2021), insbesondere für die Optimierung.

Eine wesentliche Rolle spielt die experimentelle Überprüfung von CFD und CNN Ergebnissen auf ihre Genauigkeit. Laseroptische Messmethoden wie die Particle Image Velocimetry (PIV) (Raffel et al. 2007) und die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) (Zhang 2010) werden verwendet, um das Geschwindigkeitsvektorfeld \vec{v} experimentell zu bewerten. PIV-Messungen sind weniger zeitaufwendig und liefern 2D- oder 3D \vec{v} -Ergebnisse mit begrenzten Informationen über turbulente Strukturen (Hern et al. 1993). Die LDA hingegen führt punktweise Messungen (Zhang 2010) mit hoher zeitlicher Auflösung durch (Hern et al. 1993). Um LDA-Messsysteme zu automatisieren, sind lineare Traversiereinheiten, um Wiederholbarkeit und Genauigkeit im Bereich von μm zu gewährleisten. Lineare Achsen können die Position der Messsonde nur

translational ändern, ohne die Ausrichtung zu verändern. Um dieses Problem zu überwinden, wird ein Roboter mit sechs Freiheitsgraden (6-DoF) verwendet (Niku 2020). In (Jux et al. 2018) werden robotergesteuerte koaxiale PIV-Messungen vorgestellt, um groß angelegte komplexe aerodynamische Strömungen eines Radfahrers zu untersuchen. Das Laser-(4) Kamerasystem ist auf dem Roboter montiert, um die Partikel \vec{v} mit dem Shake-the-Box-Algorithmus zu belichten und zu erfassen (Schanz, Gesemann, and Schröder 2016). In (Margerit et al. 2021) wurde eine MATLAB® (MathWorks; New Mexico, USA)-Umgebung für robotergesteuerte Laser-Doppler-Vibrometer entwickelt, um die 3D-Geschwindigkeit auf der Oberfläche zu messen. In (Michaux, Mattern, and Kallweit 2018) liefert ein Roboter PIV-Messergebnisse auf einer großen industriellen Skala mit einer Genauigkeit von 0.04 – 0.1 mm. Weiters bietet der Roboter im Vergleich zum Linearachsentraversierungssystem bei der Messvorbereitung den Vorteil, dass das Messkoordinatensystem mit dem Objekt sehr einfach registriert werden kann. In der präsentierten Untersuchung wird ein selbstentwickeltes Roboter-LDA plugin für RobotStudio® verwendet, sodass die Querströmungsgeschwindigkeit in einem NACA 6412 0°AoA mit einer Chordlänge von 100 mm und einer Re basierend auf der Chordbreite von 2 000 000, Freistromgeschwindigkeit ist 10 m/s, erfasst. Diese sollte wenn möglich sehr klein sein, dass bereits durchgeführte 2D/2C PIV Messungen, 2D CFD Simulationen und 2D CNN Vorhersagen zulässig sind.

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 offene Windkanal und ein Volumen an dessen Oberfläche die LDA Messpunkte positioniert werden können in der Software Inventor 2024 (Autodesk, San Rafael, USA), konstruiert. Der Ursprung ($x=0$ mm, $y=0$ mm, $z=0$ mm) der CAD Datei wird dabei so gelegt, dass dieser der Ursprung des Messkoordinatensystems ist und später mit dem Roboter eingelernt werden kann. Die Konstruktion wird im ACIS Dateiformat (.sat) Format abgespeichert und in RobotStudio® 2021 geöffnet. Aus der RobotWare 6.10.00.00 wird der ABB IRB 1200 7kg 0.7m importiert und so positioniert und orientiert, wie dieser im experimentellen Setup vorzufinden ist. Schlussendlich wird die bereits erstellte Bibliothek der LDA im Dateiformat .rslib importiert. Diese wurde jedoch für die 500 mm Linse erstellt. In dieser Untersuchung ist aber die 250 mm Linse verwendet worden. Die Position des tool center points (TCP) ist $x=-0.6$ mm, $y=282.20$ mm, $z=128.8$ mm. Somit stimmt die optische Darstellung der Laserstrahlen zwar nicht, jedoch stimmt die TCP Position und Orientierung. Anschließend wird das Werkobjektkoordinatensystem im Ursprung der 3D-Konstruktion erstellt. Das selbe Koordinatensystem wird auch für die Orientierung der Messachse von allen Messpunkten verwendet.

Punkt-, und Pfadplanung

Das entwickelte Plug-in erlaubt die Planung von Messpunkten mit orthogonalem Abstand zu einer Oberfläche oder innerhalb eines Volumens zu planen. Da alle Messpunkte in einer Ebene sein sollen, wird dafür die Oberfläche des erstellten Messvolumens ausgewählt. Die Anzahl der Messpunkte wird mit 200 festgelegt, der Abstand mit 0 mm. Der RobotStudio® Algorithmus zum Erstellen von Messpunkten erstellt mit dieser Eingabe 238 Messpunkte die

zufällig auf dieser Fläche verteilt sind. Die Orientierung jedes einzelnen Messpunktes wird angepasst, sodass der Roboter diese erreichen kann. Damit Reflektionen an der Oberfläche reduziert werden können und am LDA Sensor ein hochwertiges Doppler-Signal ankommt, sind alle Messpunkte um 25° rotiert worden. Abb. 1 zeigt die RobotStudio® graphische Benutzeroberfläche und Abb. 2 den dazugehörigen experimentellen Aufbau im Labor.

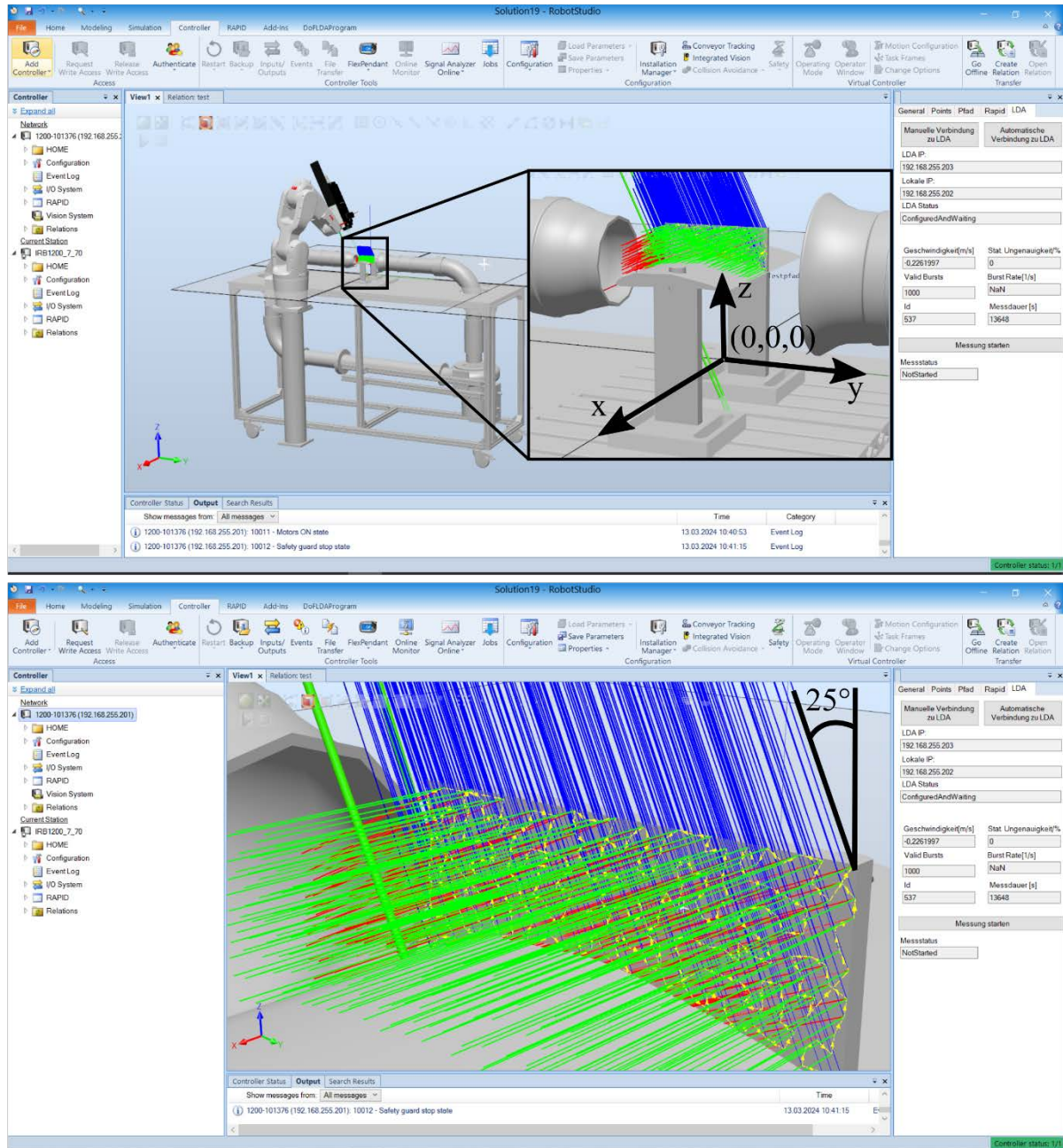


Abb. 1: Graphische Benutzeroberfläche von RobotStudio® 2021. Es wird die 3D-Konstruktion des Windkanals und des Messvolumens gezeigt. Am Roboter (ABB IRB 1200 7kg 0.7m) ist die LDA montiert. Der Ursprung der 3D Konstruktion (0,0,0) wird als Messkoordinatensystem genutzt. Jeder Messpunkt wird durch ein eigenes Koordinatensystem (grüne, rote, blaue) Linie dargestellt. In Gelb ist der Pfad des Roboters abgebildet, die Erstellung von diesem ist nachfolgend erklärt.



Abb. 2: Experimenteller Versuchsaufbau: 1 ... Roboter ABB IRB 1200 7kg 0.7m, 2 LDA ILA fp50-shifted, 3 ... NACA 6412 0° AoA, 4 ... offener Windkanal, 5 ... Robotersteuerungseinheit, 6 ... LDA Mess-Bildschirm, 7 ... Laptop mit RobotStudio® 2021 zur Robotersteuerung, 8 ... LDA Messauswerteeinheit (Hardwarefilter) und Versorgung für den Laser.

Im nächsten Schritt wird die Roboterbewegung real offline, also ohne Roboterhardware geplant, sodass der Roboter mit inverser Kinematik die Punkte (Pose) erreichen kann. Dabei muss die Orientierung und Position vom LDA TCP mit jedem Messpunkt übereinstimmen. Da jeder Messpunkt durch mehrere Achskonfigurationen erreicht werden kann, wird eine Konfiguration ausgewählt. Die TCP Geschwindigkeit wird mit 20 mm/s eingestellt. Abschließend wird die Roboterbewegung in RobotStudio® simuliert und geprüft ob jeder Messpunkt mit der gewählten Achskonfiguration erreicht werden kann. Der geplante Pfad wird zum Roboter gesendet.

Im Handbetrieb (Jogging) wird die Position des LDA-Roboter Systems an einem Punkt durch anfahren aus vier verschiedenen Orientierungen örtlich kalibriert. Die Orientierung beschrieben durch Quaternionen wird dabei von RobotStudio® übernommen. Das Messkoordinatensystem, siehe Abb. 1, wird anschließend mit dem kalibrierten Roboter-LDA System mit Ursprung, Verschiebung in x-Richtung und Verschiebung in y-Richtung festgelegt. Die z-Koordinate berechnet sich dabei automatisch aus dem Kreuzprodukt zwischen den beiden Einheitsvektoren.

LDA Messung

Abb. 3 zeigt einen Screenshot der Software LDA control Qt v2.0.10 nach Vollendung eines Messpunktes. In dem gezeigten Fall dauerte die Messung länger als 10 s und 1000 valide Bursts konnten in kleiner 30 s erfasst werden. Die LDA Parameter wurde gewählt, sodass für die Auswertung das LDA Signal eindeutig vom Rauschen unterschieden werden kann. Der Roboter fährt nach abgeschlossener Messung jedes Messpunktes zum nächsten und wartet wieder bis dieser abgeschlossen ist.

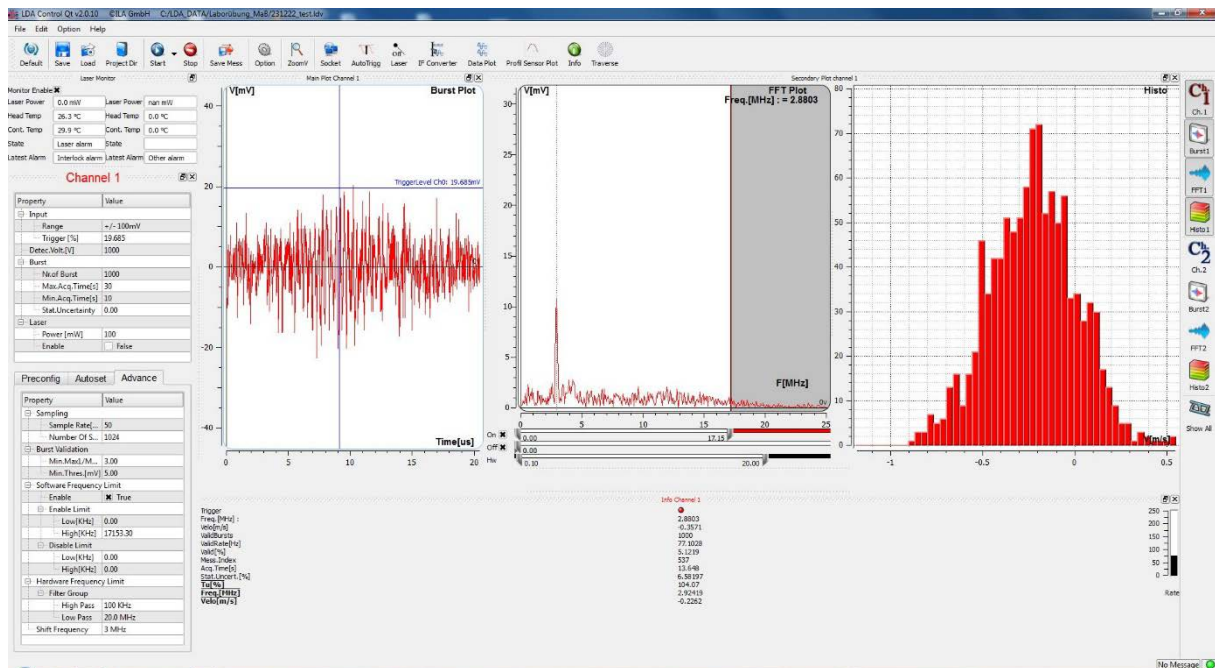


Abb. 3: Screenshot der LDA Software LDA control Qt v2.0.10. Die gemessene Geschwindigkeit ist -0.2262 m/s mit einer turbulenten Intensität von 104.07 % und einer statistischen Unsicherheit von 6.58%.

Postprocessing: Darstellung der Roboter-LDA Messergebnisse mit 3D Konstruktion

Die 3D Konstruktion des Windkanals ist zusätzlich noch im STL Dateiformat in Meter binär abgespeichert worden. Die Messergebnisse liegen im csv-Dateiformat vor. Zur graphischen Darstellung sind beide Dateien in ParaView 5.11.1 geladen worden. Die Messpunkte sind mit dem Befehl „table to points“ mit Auswahl der Spalten für x,y,z Koordinaten zu Punkten konvertiert worden. Zur statistischen Auswertung werden die Messergebnisse in MATLAB 2023b geladen.

Ergebnisse der LDA Messung

Abb. 4 zeigt das Vektorfeld der Geschwindigkeitskomponente in der Ebene inmitten des NACA 6412 0° AoA Tragflügelprofils. Es ist zu sehen, dass eine geringfügige, bis -0.5 m/s, in negativer x-Richtung vorherrschende Querströmung. Im Vergleich zur Freistromgeschwindigkeit von 10 m/s ist diese aber sehr gering. Der Mittelwert von allen Messpunkten ist -0.239 m/s mit einer Standardabweichung von 0.1252 m/s. Am Tragflügelprofilende der strömungsabgewandten Seite fällt mit +0.3 m/s ein Vektor auf. Hierbei handelt es sich um einen Messfehler, da nur sehr wenige valide Bursts hier möglich waren.

Abb.5 zeigt die Anzahl der validen Bursts von jedem Messpunkt. Diese ist skaliert im Bereich von 0 bis 100, sodass zu sehen ist, dass an der Wandoberfläche vom NACA 6412 0° AoA Strömungsprofils nur wenige valide Bursts erfasst werden konnten. Der Maximalwert der validen Bursts ist 2618, der Mittelwert 1174 und die Standardabweichung 738.

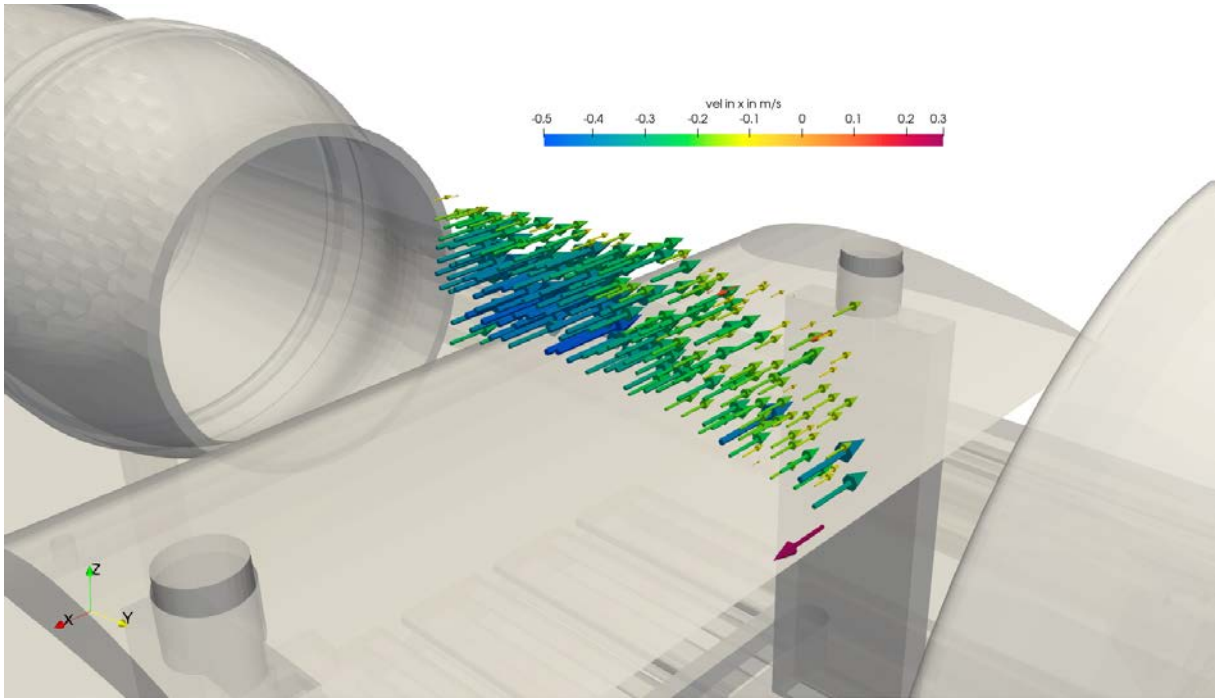


Abb. 4: Darstellung der 1D- LDA Messkomponente und dem Windkanal (transparent) in ParaView 5.11.1. Der Bereich der Darstellung ist zwischen -0.5 m/s und 0.3 m/s. Das Geschwindigkeitskoordinatensystem ist dabei ident dem Ortskoordinatensystem.

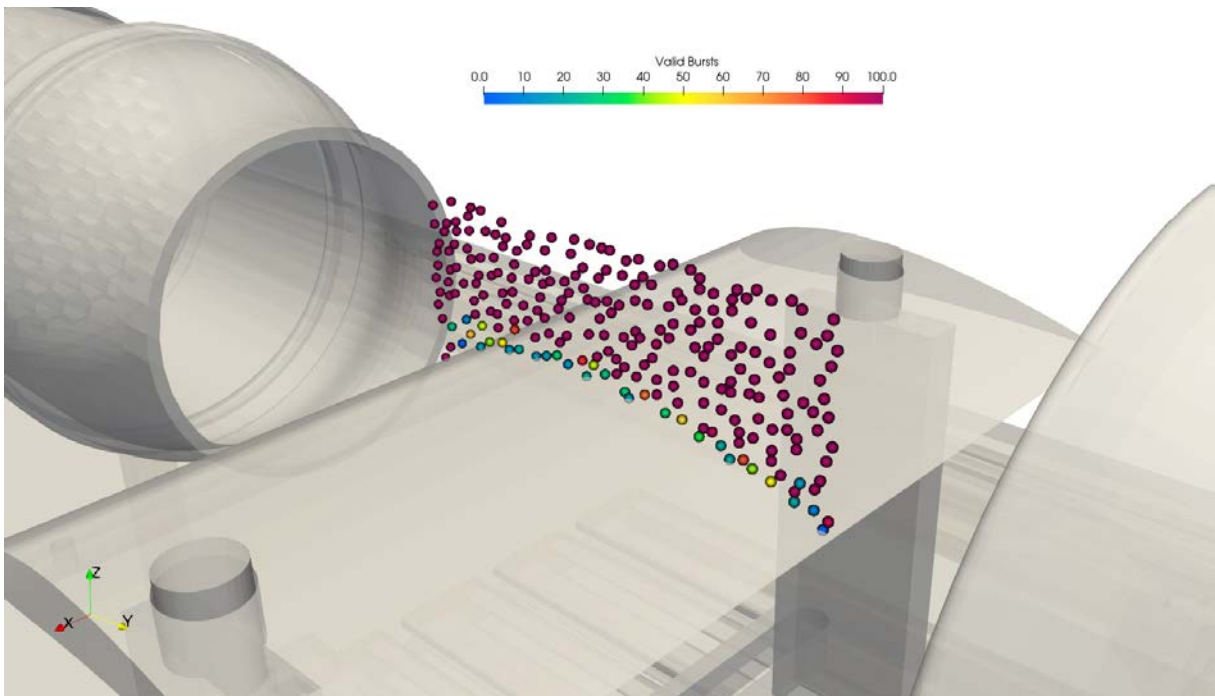


Abb. 5: Darstellung der validen Burts und dem Windkanal (transparent) in ParaView 5.11.1. Der Bereich der Darstellung ist zwischen 0 und 100 , sodass zu sehen ist, dass nahe der Wandoberfläche vom NACA 6412 0° AoA Profils nur wenig valide Bursts erfasst werden konnten.

Schlussfolgerung

Untersuchungen zeigen, dass 2D PIV Messungen zur Überprüfung von 2D CFD und 2D CNN Ergebnissen zulässig sind. Bei einer Freistromgeschwindigkeit von 10 m/s ist die mittlere Querströmungskomponente -0.239 m/s.

Dankesworte

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

Literatur

- Calzolari, Giovanni, and Wei Liu:** 2021 "Deep Learning to Replace, Improve, or Aid CFD Analysis in Built Environment Applications: A Review." *Building and Environment* 206: 108315.
- Ferziger, Joel H, and Milovan Peric:** 2012. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer Science & Business Media.
- Goodfellow, Ian, Yoshua Bengio, and Aaron Courville:** 2016. *Deep Learning*. MIT press.
- Gu, Jiuxiang et al:** 2018. "Recent Advances in Convolutional Neural Networks." *Pattern recognition* 77: 354–77.
- Hern, T J et al:** 1993. *Shear-Drive Flow in a Square Cavity: A Comparative Study Using PIV, LDV, and Computational Simulations*. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States).
- 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.
- Kochkov, Dmitrii et al:** 2021. "Machine Learning–Accelerated Computational Fluid Dynamics." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118(21): e2101784118.
- Kundu, Pijush K, Ira M Cohen, and David R Dowling:** 2015. *Fluid Mechanics*. Academic press.
- 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.
- Raffel, Markus, C E Willert, S T Wereley, and Jürgen Kompenhans:** 2007. 79 *Current Science Particle Image Velocimetry*. Springer.
- Ribeiro, Mateus Dias, Abdul Rehman, Sheraz Ahmed, and Andreas Dengel:** 2020. "DeepCFD: Efficient Steady-State Laminar Flow Approximation with Deep Convolutional Neural Networks." *arXiv preprint arXiv:2004.08826*.
- 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.
- Usman, Ali et al:** 2021. "Machine Learning Computational Fluid Dynamics." In *2021 Swedish Artificial Intelligence Society Workshop (SAIS)*, IEEE, 1–4.
- Zhang, Zhengji:** 2010. *Calcium in Living Cells LDA Application Methods Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics*. Springer.