

Untersuchung des Strömungsverlaufes im Abscheideraum eines Gleichstromzyklons mit 3C-PIV und CFD

Fluid flow investigation in the separation chamber of a uniflow cyclone with 3C-PIV and CFD

Pillei M., Kofler T. und Kraxner M.

MCI, Department for Environmental, Process and Energy Engineering
Maximilianstraße 2, 6020 Innsbruck, Austria

3C-PIV, Fluiddynamik, Gleichstromzyklone
3C-PIV, fluid dynamics, uniflow cyclones

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag zeigt eine Untersuchung zum Strömungsverlauf im Abscheideraum eines Gleichstromzyklons. Vergleichende Referenzversuche mittels 3C-Particle Image Velocimetry sollen eine transiente CFD Simulation im für die Abscheidung kritischen Bereich vor dem Tauchrohr validieren. Durch die detaillierte Untersuchung des Strömungsfelds soll die Möglichkeit der weiteren Verwendung von CFD Daten geprüft werden. Erste Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen 3C-PIV und CFD. Besonders in jedem Bereich, der für die Abscheidung am relevantesten ist, kann eine hohe Ähnlichkeit gesehen werden.

Einführung

Gleichstromzyklone werden primär zur Luftreinigung bzw. zur Abtrennung von dispersen Phasen aus kontinuierlichen Fluidströmen eingesetzt. Als Charakteristik kann die Tatsache angesehen werden, dass sowohl die disperse Phase als auch das Fluid den Trennapparat nur in einer Richtung durchströmen. Zum Vergleich benötigen, hinsichtlich der Leistungsdaten vergleichbare, Gegenstromzyklone aufgrund der apparativ bedingten Richtungsumkehr der Strömung mehr Bauraum und sind besonders hinsichtlich der Nachrüstbarkeit stärker limitiert. Gleichstromzyklone zeichnen sich daher aufgrund ihres kompakten Designs, einem niedrigen Druckverlust und der einfachen Nachrüstbarkeit in bestehende Systeme aus. Ein Gleichstromzyklon ist eine Trennapparat der mechanischen Verfahrenstechnik und besteht aus vier wesentlichen Komponenten: Eintrittsleitapparat, Abscheideraum (AR), Tauchrohr (TR), Austragsfenster (AF), deren Geometrie entscheidend für die Leistungsdaten Abscheidungsgrad und Druckverlust sind. Der Eintrittsleitapparat (ELA) hat die Funktion des Drallgebers und bringt das anströmende Fluid in eine Drehbewegung mit hoher Umfangsgeschwindigkeit u. Der Eintrittsleitapparat besteht aus symmetrisch angeordneten Schaufeln um einen zylindrischen Kern der in axialer Richtung durchströmt wird. Im Abscheideraum wird der disperse Anteil der rotierenden Mehrphasenströmung durch die Trägheitskräfte nach außen gedrängt. Das Tauchrohr als weitere wesentliche Komponente steht in den Abscheideraum hinein, über welches das Reingas den Abscheideraum verlässt. Durch das Austragsfenster werden die abgeschiedenen Partikel aus dem System entfernt. Aktuell werden Gleichstromzyklone

auf Grundlage von empirischen Daten ausgelegt. Es sind daher weitere systematische Untersuchungen notwendig um allgemein gültige Auslegungskriterien ableiten zu können. [1, 2]

Die vorliegende Arbeit untersucht das Strömungsmilieu vor dem Tauchrohr eines Gleichstromzyklons mittels stereoskopischer 3C-Particle Image Velocimetry. Parallel dazu wird eine CFD Untersuchung durchgeführt die validiert und zu einem späteren Zeitpunkt Informationen zu optisch nicht oder nur schwer zugänglichen Regionen liefern soll. Durch die detaillierte Untersuchung des Strömungsfelds sollen mögliche Geometrieoptimierungen abgeleitet werden.

Versuchsaufbau

Für die Versuchsdurchführung wird ein stereoskopischer Messaufbau für die PIV Messung gewählt. Die Laserlichtschnitteinheit befindet sich um 90° gedreht oberhalb der Messstrecke und wird von oben nach unten geführt um Reflexionen am Messaufbau zu vermeiden, vgl. Abb. 1. Der Lichtschnitt wird von einem frequenzverdoppelten, doppelt oszillierenden Nd:YAG Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$ erzeugt. Die Lichtschnittdicke ist durch die Lichtschnittoptik vorgegeben (Gauß'sche Strahlencharakteristik) und wird entsprechend der idealen Taille eingestellt. Die Triggerung erfolgt über einen Synchronisator der die beiden Kameras und den Laser gemäß den Einstellungen ansteuert. Die Aufnahmezeit beträgt apparatebedingt 4 Hz.

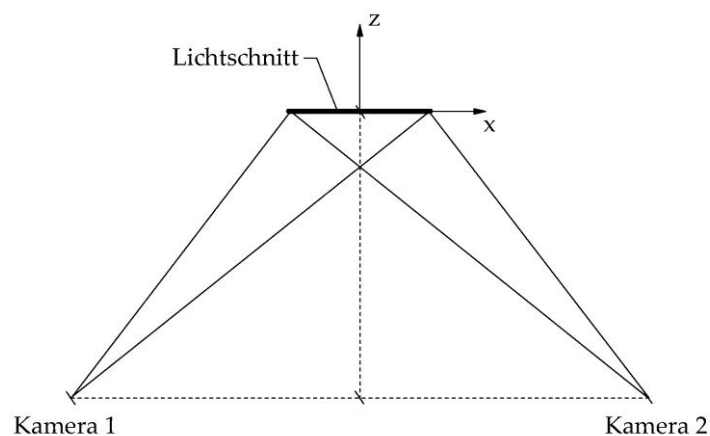


Abb. 1: Stereokonfiguration

Die beiden CCD Kameras sind über einen stereoskopischen Aufbau in einem Winkel von 80° zueinander positioniert. Durch die am Kameraaufbau enthaltenen Scheimpflugadapter kann die Tiefenschärfe auch bei kleinen Blendenzahlen ($< f4.0$) entsprechend den Anforderungen über den gesamten Messquerschnitt aufgelöst werden. Der Messaufbau ist so gewählt, dass die Kameras über eine Längeneinheit parallel zur Strömungsrichtung geführt und so mehrere Messebenen bei gleicher Kalibrierung vermessen werden können. [3]

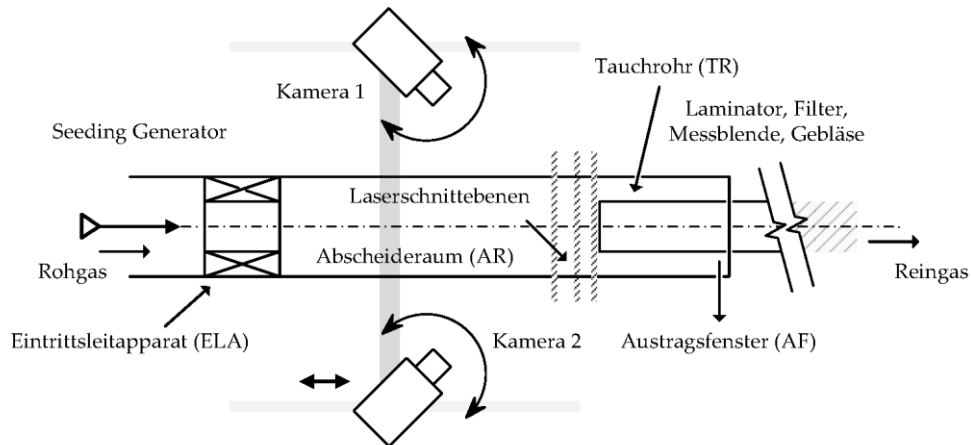


Abb. 2: Versuchsaufbau

Für eine sinnvolle Interpretation des Strömungsfeldes im Abscheideraum ist eine möglichst genaue Auflösung der Umfangsgeschwindigkeit erforderlich, daher wird der Laserschnitt normal zur Strömungsrichtung geführt, siehe Abb. 2. Dies resultiert zwar in einem etwas schlechteren Reflexionsverhalten der Seeding-Öl-Partikel (reduziertes *forward scattering*) dafür kann die Hauptströmungsrichtung der Drallströmung *In-Plane* entsprechend genau aufgelöst werden. [1, 2]

Für die Messung wird ein Seeding-Generator verwendet der über Laskin-Düsen fein verteilte Öltröpfchen dispergiert. Aufgrund der sehr positiven Eigenschaften hinsichtlich Lichtstreuung und Folgevermögen eignet sich diese Art von Seeding besonders für PIV Anwendungen. Nachstehende Abb. 3 zeigt die gemessene Dichte- und Summenverteilung des verwendeten Seeding am Einlauf der Messstrecke. Die Ermittlung der Verteilungskurven erfolgt mittels Laserbeugung, Spraytec (Malvern).

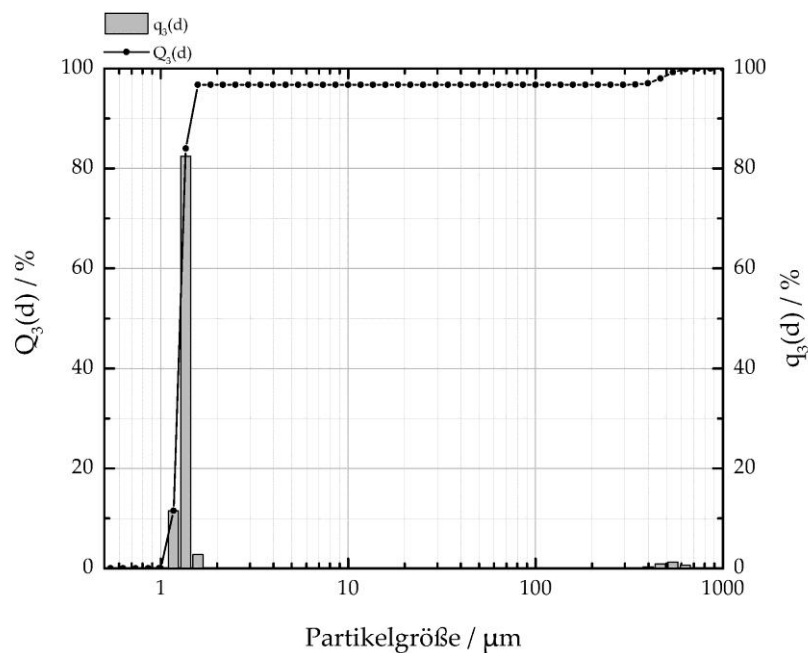


Abb. 3: Teilchengrößenverteilung DEHS

Hierzu zeigt Abb. 3 das arithmetisch gemittelte Ergebnis der Partikelgrößenverteilungsbestimmung aus ca. 7500 Einzelaufnahmen. Auf den Ordinaten ist die Verteilungssumme $Q_3(d)$ sowie die Verteilungsdichte $q_3(d)$ gegen die logarithmisch skalierte Partikelgröße aufgetragen. Die Auswertung ergibt einen $D_3(50)$ von ca. 1,2 μm .

Methodik

Particle Image Velocimetry

Die PIV-Untersuchungen werden als stereoskopische 2D/3C-Messungen durchgeführt. Diese Anordnung erlaubt die zeitgleiche Messung aller drei Geschwindigkeitskomponenten (axial, tangential, radial) innerhalb des Lichtschnittes über beide CCD Kameras. Der Aufbau ist wie bereits im Versuchsaufbau kurz erwähnt so gewählt, dass sich die tangentielle Geschwindigkeitskomponente in der Messebene befindet (In-Plane) und die axiale Geschwindigkeitsinformation über die Rekonstruktion der Vektoren (Out-of-Plane) errechnet wird. Diese Rohbilder werden zuerst mittels Mapping-Algorithmus entzerrt und resultierend aus diesen PIV-Daten aus beiden Bildern und den aus den Stereogeometrie-Daten zur Verfügung stehenden Winkeln rekonstruiert, vgl. Abb. 1. Neben der unvermeidbaren Verzerrung durch das Objektiv wird hier durch die starke Rohrkrümmung bzw. des geringen Messrohrdurchmessers das Bild verzeichnet. Durch eine für das Mapping verwendete Polynomfunktion kann jedoch ein ausreichend zufriedenstellendes Resultat erzielt werden, siehe Abb. 4. Von einer Brechungsindexkorrektur wird in diesem Fall abgesehen da dadurch die Möglichkeit der Traversierung in Z-Richtung eingeschränkt wird oder nur mit sehr großem apparativem Aufwand realisiert werden kann.

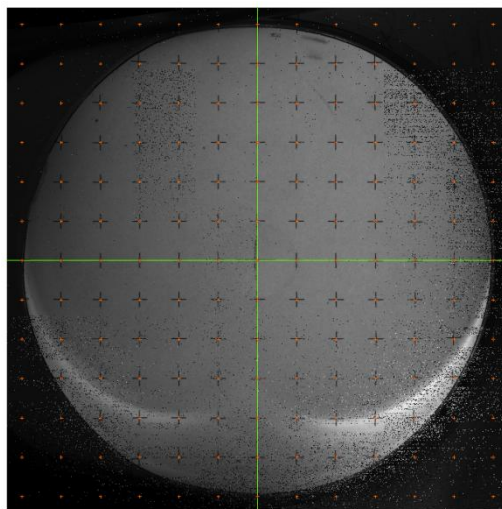


Abb. 4: Mapping Rohrquerschnitt einer Kamera

Für die Kreuzkorrelation werden folgende Parameter gewählt. Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung wird als *Multi-Grid-Interrogation* ein *Grid Refinement* über mehrere Stufen angewendet (128x128px \rightarrow 32x32px). Durch dieses Verfahren kann der Dynamikbereich und die räumliche Auflösung erhöht werden. [4] Darüber hinaus kann die Genauigkeit durch das eingesetzte *Subpixel Peak Fitting* noch weiter erhöht werden (*3-Point Gauß Fit*). Die Überprüfung auf Validität der Vektoren erfolgt über *Outlier Detection*, *Normalized Median Test* sowie einem *Maximum Displacement Test*. [5, 6] Die Auswertung erfolgt über das Softwarepaket PIVView 3.5.9.

Für die numerische Berechnung wird der Solver *Ansys Fluent 14* verwendet. Als Turbulenzmodell wird ein *Reynold Stress Model (Quadratic Pressure Strain)* gewählt welches als Grundlage für die strömungsmechanische Untersuchung dient. Die Berechnung wird transient durchgeführt um die im Abscheideraum existierenden hohen Geschwindigkeiten und -gradienten entsprechend aufzulösen. Die Zeitschrittweite wird aus dem Verhältnis von minimaler Elementgröße zur Elementeintrittsgeschwindigkeit abgeschätzt und wird zu Beginn mit 10^{-5} gewählt. Durch das *Adaptive Setting* kann die Zeitschrittweite im Verlauf der Berechnung angepasst werden und der Abbruchfehler definiert werden. Für die Druckberechnung wird *PRESTO* verwendet, da es besonders in Hinblick auf drallbehaftete Strömungen deutliche Vorteile gegenüber zellenzentrierten Modellen hat (keine Interpolation des Druckes auf den Zellflächen, Druck und Geschwindigkeitsinformation ist nicht am selben Punkt vereint). [7]

Ergebnisse

Nachfolgende Ergebnisse zeigen die normalisierte Auswertung der Ergebnisse von PIV Messung und CFD Simulation für folgende Messebenen, siehe Abb. 5. Die Messungen sind bei gleichem Volumenstrom durchgeführt und über eine Messblende nach DIN EN ISO 5167-1:2004-01 referenziert.

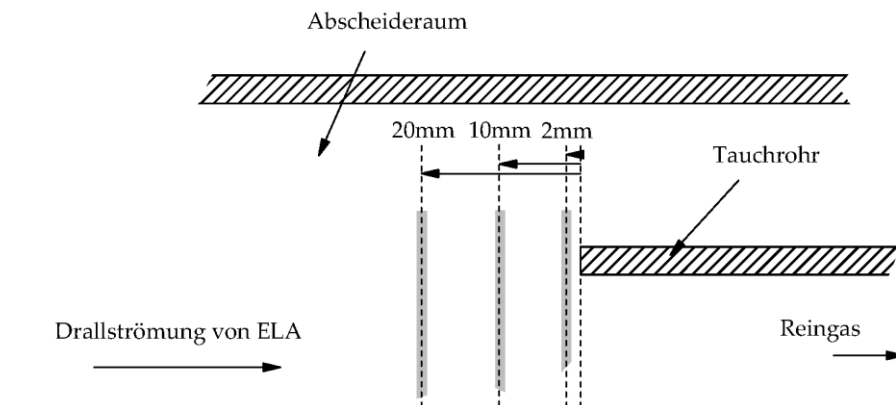


Abb. 5: Messebenen vor Tauchrohr

Die Messebenen befinden sich jeweils 2, 10 und 20 mm vor dem in den Abscheideraum hineinstehenden Tauchrohr (TR) positioniert. Die phänomenologische Untersuchung der Drallströmung zeigt, dass im Bereich des Kerns keine Partikel vorhanden sind. Darüber hinaus zeigt sich in früheren Studien, dass aufgrund des stark ausgeprägten Dralls die Partikel aufgrund ihrer Masse und durch die hohe Umgangsgeschwindigkeit im Kern nach außen gedrängt werden. Dies resultiert in der Tatsache, dass im Kern keine PIV Daten errechnet werden können und daher die Auswertung für den Kern nicht möglich ist. Darüber hinaus kann nicht der gesamte Bereich des Messquerschnitts optimal ausgeleuchtet werden, da durch die starke Rohrkrümmung der Messstrecke starke Reflexionen besonders im unteren Bereich auftreten, siehe Abb. 6. [1]

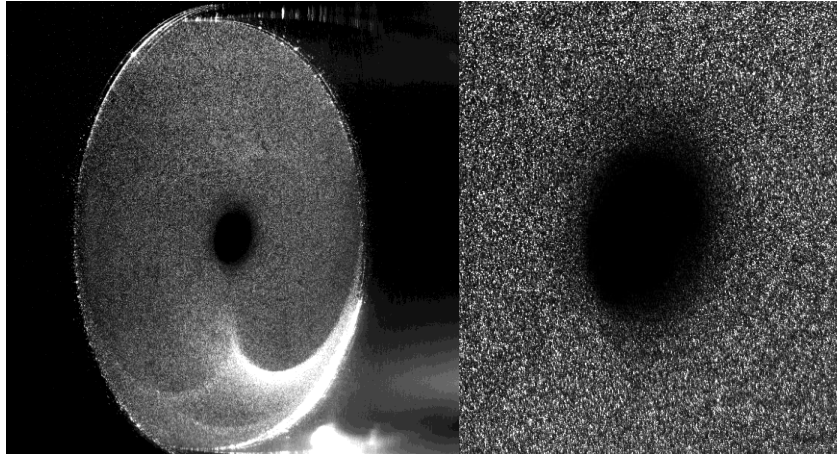
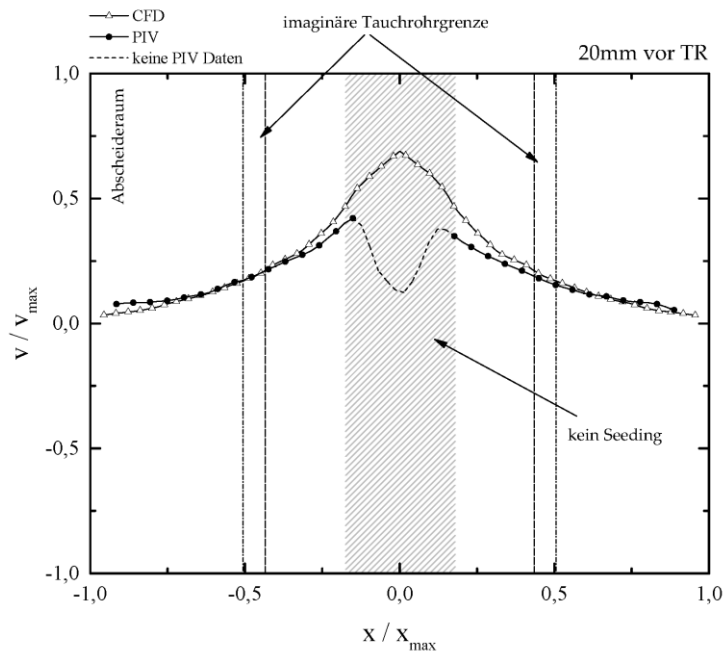


Abb. 6: Keine Seeding Partikel im Kern (li), Vergrößerter Ausschnitt (re)

Nachstehende sind die Ergebnisse aus PIV Messung und CFD Simulation in Abb. 7,8 und 9 gezeigt welche eine gute Übereinstimmung zeigen.

Zur Verdeutlichung der Geometriegegebenheiten sind die imaginären Tauchrohrgrenzen eingezeichnet. Deutlich ersichtlich ist die gute Übereinstimmung von PIV Messung und numerischer Simulation besonders im Bereich $x/x_{\max} \leq -0,5$ bzw. $x/x_{\max} \geq 0,5$. Besonders die Partikel welche sich an diesem Ort im äußeren Bereich aufhalten passieren nicht das Tauchrohr ins Reingas sondern werden im Abscheideraum weiter bis zum Austragsfenster geführt und abgeschieden, vgl. Abb. 2.



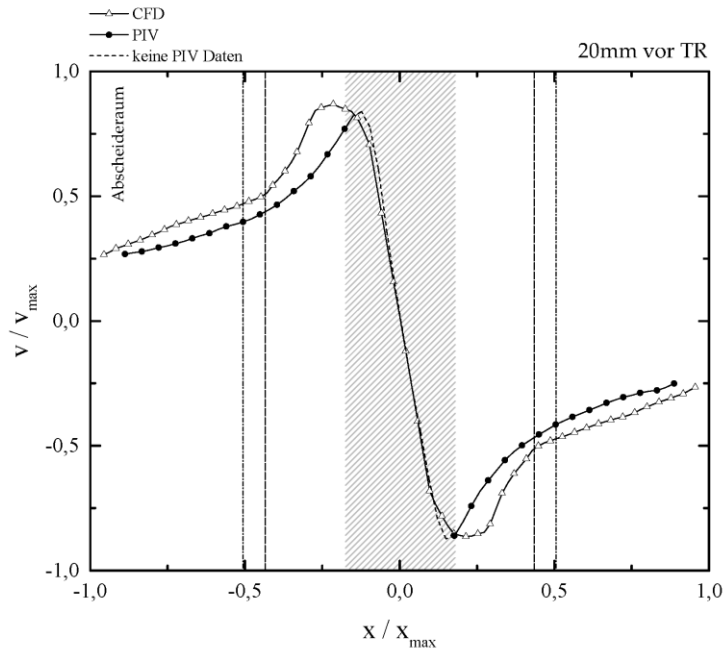
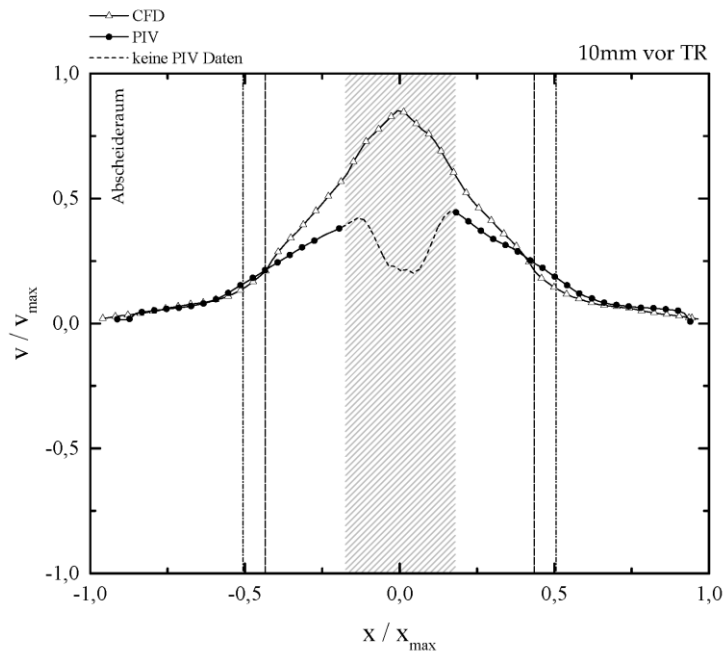


Abb. 7: Axial-/Tangentialgeschwindigkeitsverteilung 20 mm vor TR

Im Bereich um $x/x_{\max} = 0$ kann keine Aussage über die Strömung mittels PIV gemacht werden da keine Seeding Partikel im Kern vorhanden sind. Es kann allerdings eine qualitative Ähnlichkeit festgestellt werden, weil die Ergebnisse durch die Glättungseffekte der PIV Auswertung niedriger ausgeprägt sind.

Abb. 8 zeigt die Ergebnisse 10 mm vor dem Tauchrohr entsprechend Abb. 5.



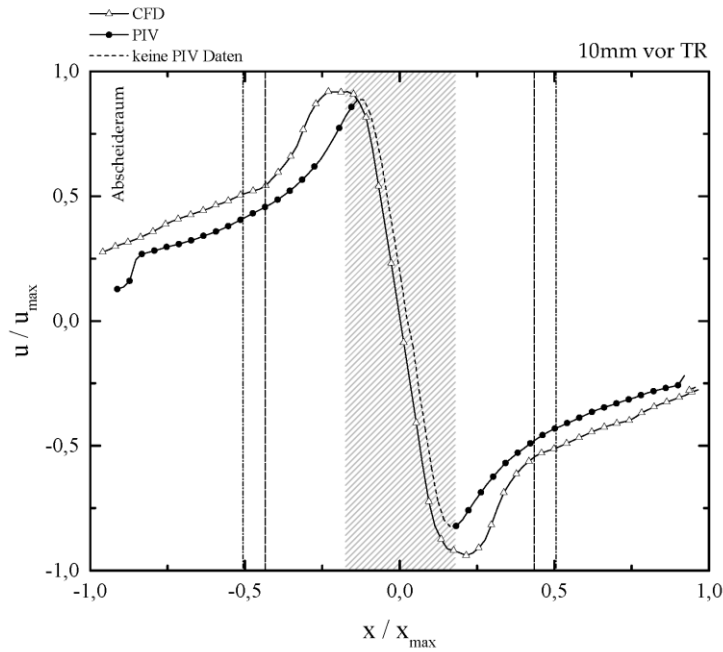
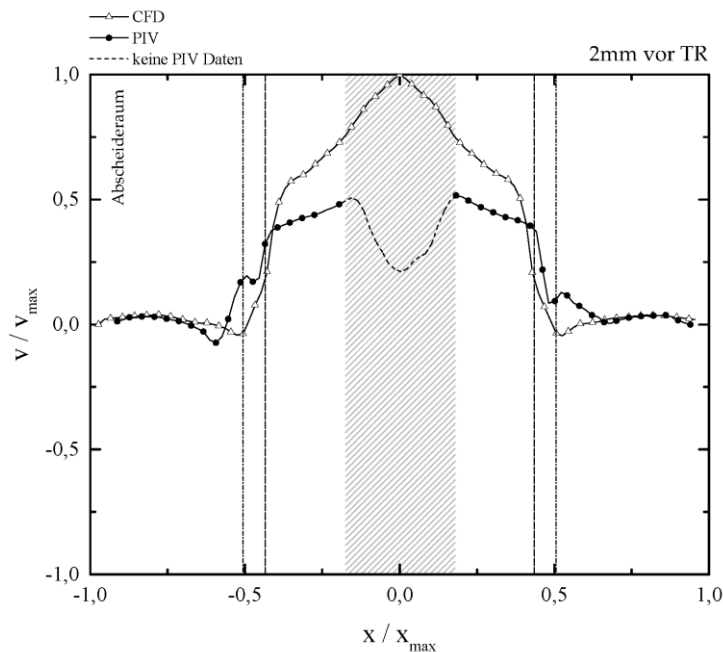


Abb. 8: Axial-/Tangentialgeschwindigkeitsverteilung 10 mm vor TR

Die Werte der Tangentialgeschwindigkeiten zeigen sich im Vergleich zu Abb. 7 ähnlich. Durch den Einfluss des Tauchrohres steigt die Geschwindigkeit im Kern deutlich an. Es kann gezeigt werden, dass besonders im Bereich des Kerns die numerische Berechnung einen deutlich steileren axialen Geschwindigkeitsgradienten aufweist. Die Auswertung der tangentialen Geschwindigkeitsverteilung zeigt hingegen eine qualitativ hohe Übereinstimmung. Die durch die Geometrie des Eintrittsleitapparates vordefinierte Gestalt des Dralls kann sowohl durch PIV und CFD beschrieben werden.



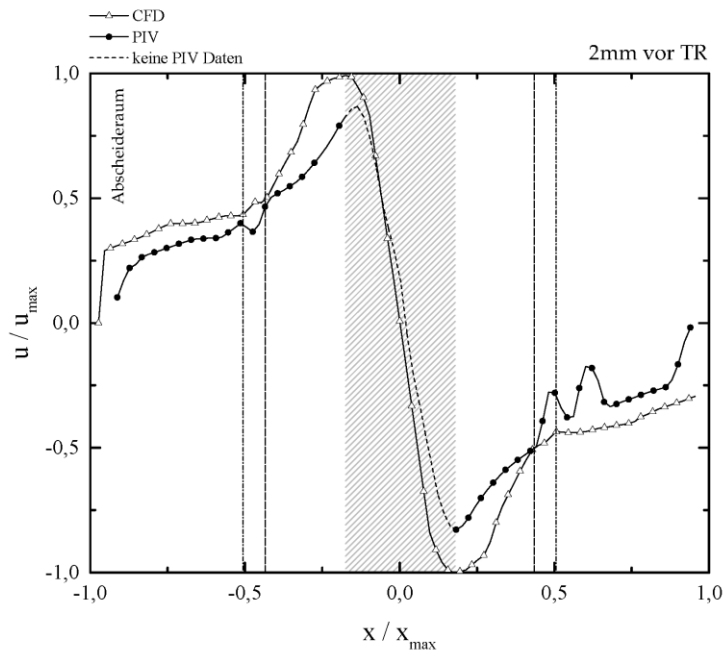


Abb. 9: Axial-/Tangentialgeschwindigkeitsverteilung 2 mm vor TR

Abb. 9 zeigt die Ergebnisse direkt von dem Tauchrohr. In diesem Bereich kann eine Rückströmungszone identifiziert werden, siehe Abb. 9. Aufgrund der Tatsache, dass der Laserschnitt die gesamte Messebene erfassen soll kann nicht direkt auf Tauchrohrhöhe gemessen werden.

Der Einfluss des Tauchrohres ist allerdings auch schon insofern an dieser Messposition festzustellen, da das Tauchrohr zwar matt antireflexionsbeschichtet ist aber es trotzdem zum Überbelichtungseffekt kommt. Dies spiegelt sich besonders in der Auswertung der Tangentialgeschwindigkeit u/u_{\max} wider, in der es besonders im Bereich um das Tauchrohr zu starken Schwankungen kommt.

Zusammenfassung & Ausblick

Die Versuche zeigen, dass mit dieser ersten Untersuchung ein Modell gefunden werden konnte mit welchem die Strömung in einem Gleichstromzyklon näherungsweise nachgebildet werden kann. Durch die Auswahl der für die Abscheidung wesentlichen Zonen vor dem Tauchrohr konnte sichergestellt werden, dass die Simulation in der Lage ist ähnliche Ergebnisse zu liefern. Eingehendere Untersuchungen sind erforderlich um das System noch weiter zu validieren und zu adaptieren. Besonders im Hinblick auf die Out-of-Plane Komponente muss durch die Veränderung der Kamerapositionen ev. durch eine 2C-PIV Messung die Axialgeschwindigkeit der Strömung weiter validiert werden.

Dankesworte

Für die Unterstützung der umfangreichen Untersuchungen durch das MCI sei an dieser Stelle gedankt.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

ELA	Eintrittsleitapparat	z	Z-Koordinate
CFD	Computational Fluid Dynamics	x	X-Koordinate
3C	3 Komponenten	max	Maximalwert
$q_3(d)$	Verteilungsdichte (Volumen)	v	Axialgeschwindigkeit
$Q_3(d)$	Verteilungssumme (Volumen)	u	Tangentialgeschwindigkeit
CCD	Charge-Coupled Device	λ	Wellenlänge
PIV	Particle Image Velocimetry		
TR	Tauchrohr		
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser		

Literatur

- [1] Kraxner, M., Empirische Ermittlung von Auslegungskriterien für Gleichstromzyklone in Multizyklonblöcken, *Dissertation*, Technische Universität München, 2013.
- [2] Muschelknautz, U., Pattis P., Reinalter, M., Kraxner, M., Design Criteria of Uniflow Cyclones for the Separation of Solid Particles from Gases, CFB-10, 10th International Conference on Circulating Fluidized Beds and Fluidized Bed Technology, Sunriver/Or, 2011.
- [3] Raffel, M., Willert C. E., Wereley, S. T., Kompenhans J., Particle image velocimetry: A practical guide, 2nd ed., Heidelberg, Berlin, 2007.
- [4] Willert C., *Meas. Sci. Technol.* 1997, 8 (12), 1465.
- [5] Ronneberger, O., Messung aller drei Geschwindigkeitskomponenten mit Hilfe der "Particle Image Velocimetry" mittels einer Kamera und zweier paralleler Lichtschnitte, *Diplomarbeit*, Georg-August-Universität zu Göttingen, 1998.
- [6] PIVTEC GmbH, PivVIEW 2C/3C User Manual Version 3.0, 2009.
- [7] Ansys Fluent 14, User Manual, 2011.