

## Beitrag zur Untersuchung der Rückströmung am Tauchrohr eines Gleichstromzyklons mit Sekundärabsaugung

### Investigation of the fluid flow in the vortex finder region of a uniflow cyclone with secondary suction

**Pillei M., Kofler T. und Kraxner M.**

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

3C-PIV, Gleichstromzyklone, Separation  
3C-PIV, uniflow cyclone, separation

#### Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag stellt eine Untersuchung des Strömungsverlaufes im Abscheideraum eines Gleichstromzyklons mit und ohne Sekundärabsaugung vor. Mittels stereoskopischer Particle Image Velocimetry werden Messungen der Geschwindigkeitskomponenten nahe der Tauchrohrmündung eines solchen Abscheiders durchgeführt. Ziel dieser Messmethode ist die Untersuchung des Einflusses der Sekundärabsaugung auf den Abscheidegrad des Gleichstromzyklons. Resultierend aus der Kräftebilanz der Feststoffpartikel im Zentrifugalfeld im Abscheideraum des Gleichstromzyklons können mögliche Trennkorndurchmesser identifiziert werden.

#### Einführung

Die Voraussage der zu erwartenden Leistungsdaten eines Gleichstromzyklons bei vorgegebenen Betriebsparametern kann aufgrund des komplexen Zusammenspiels der Einflussfaktoren (z. B. Beladung, Geschwindigkeit, ...) nur sehr eingeschränkt erfolgen. Für bestehende empirische Berechnungsmodelle wird deshalb im Wesentlichen eine jeweils für das Problem spezifische Datenbasis als Grundlage für die Abschätzung der zu erwartenden Abscheideleistung herangezogen. Diese sehr spezifische Betrachtung erlaubt daher generalisierte Aussagen nur sehr eingeschränkt. Allgemeinere Aussagen für diesen Typ von Gas-Feststoff Zentrifugalabscheider erfordern deshalb systematische Untersuchungen die das Abscheideverhalten bei zuvor definierten Betriebsparametern beschreiben und zu Auslegungskriterien führen aus denen optimale Konfigurationen abgeleitet werden können. Für eine Abschätzung hinsichtlich der Abscheideleistung eines Gleichstromzyklons ist insbesondere die Strömungssituation im Bereich um das Tauchrohr von großer Bedeutung. Diese Ergebnisse stellen einen Beitrag zur Messung und Beurteilung der hochverdrallten Rückstromzone und der Auswirkung auf den Trennkorndurchmesser an der Tauchrohrmündung mit und ohne Sekundärabsaugung eines Gleichstromzyklons vor.

## Versuchsaufbau & Methodik

Die Strömungsverhältnisse im Abscheideraum der Gleichstromzyklonzelle werden mittels stereoskopischer Particle Image Velocimetry (PIV) untersucht. Diese Methode wird eingesetzt um die axiale, die radiale sowie die tangentielle Geschwindigkeitskomponente der Drallströmung im für die Abscheidung besonders relevanten Bereich des Tauchroreinlaufes zeitgleich und über den gesamten Messquerschnitt ermitteln zu können. Für die Untersuchung des Effektes der Rückströmung und zur Gewährleistung der optischen Zugänglichkeit wird die Gleichstromzyklonzelle im Vergleich zum Referenzmodell hochskaliert. Darüber hinaus ist der Abscheideraum des Drallabscheiders als Glasprototyp ausgeführt durch den der Lichtschnitt auf die gewünschte Messebene eingekoppelt wird. Der gewünschte Messquerschnitt befindet sich im ersten Drittel des Tauchrohres, vgl. Abb. 1. Diese Abbildung beschreibt schematisch den Querschnitt einer Gleichstromzyklonzelle sowie den Verlauf der Hauptströmung und der für diesen Abscheidertypus typischen Rückströmungszone.

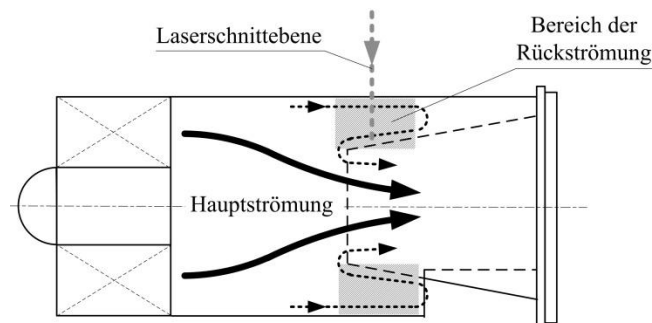


Abb. 1: Untersucher Bereich der Rückströmung am Tauchrohr [1]

Zur Illumination der Seeding-Partikel für die PIV-Messung wird eine Laserschnittebene in Strömungsrichtung aufgespannt. Als Lichtquelle wird ein Q-Switch Nd:YAG Laser verwendet. Der stereoskopische Aufbau besteht aus zwei Kameras der in einem Winkel von jeweils  $45^\circ$  zur Messebene positioniert sind. Durch die Anwendung eines Scheimpflug-Adapters wird die Objektivenebene mittels Tilt-Adapter um jeweils  $10^\circ$  in die korrespondierende Richtung aus der Sensorebene gedreht um die Schärfenebene an die Messebene anzugleichen. [2] Durch diese Verschiebung der Ebenen kann der für eine erfolgreiche Messung benötigte Schärfegrad über den ganzen Messquerschnitt erzielt werden. Die Messebene ist so gewählt, dass die Kameras sowohl die axiale als auch die radiale Geschwindigkeitskomponente in-plane abbilden können. Diese Komponenten sind für die Beurteilung der Rückströmungseffekte an der Tauchrohröffnung besonders relevant, vgl. Abb. 1. [1]

## Ergebnisse

Die PIV Untersuchung der Drallströmung im Inneren des Gleichstromzyklons wird mit zwei Volumenströmen durchgeführt. Die Geschwindigkeiten orientieren sich hierbei an charakteristischen Geschwindigkeiten in Gleichstromzyklonen. Hier konnte in früheren Beiträgen ein Bereich von  $9 \text{ m/s} \leq v_{\text{zyklon}} \leq 19 \text{ m/s}$  identifiziert werden. [1,3]

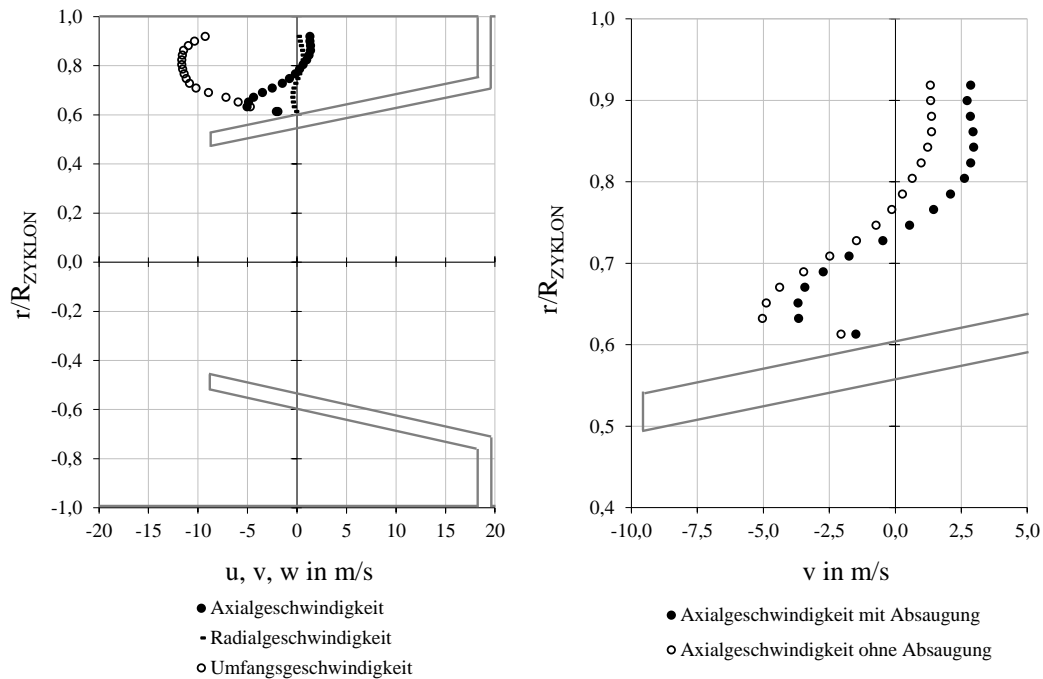


Abb. 2: Gemessene Geschwindigkeitsverteilung am Tauchrohr (links), vergrößerte Darstellung der Rückströmung am Tauchrohr mit und ohne Absaugung [1]

Abb. 2 zeigt den Einfluss der Sekundärströmung auf die Abscheideleistung eines Gleichstromzyklons. Die Position der gewählten Laserschnittebene ist Abb. 1 zu entnehmen. Die linke Abbildung zeigt die drei Geschwindigkeitskomponenten ohne Absaugung im untersuchten Strömungsquerschnitt. Die rechte Abbildung zeigt die Axialgeschwindigkeitskomponente mit und ohne Sekundärstrom. Die Rückströmung ist anhand der Ausprägung der Axialgeschwindigkeit deutlich zu identifizieren. Darüber hinaus manifestiert sich der Einfluss der Sekundärabsaugung in einer deutlichen reduzierten Rückströmung im Messquerschnitt, vgl. Abb. 3. Die reduzierte Reingasemission kann durch die Reduktion des Rückströmungsanteils mit Absaugung bzw. durch die reduzierte axiale Rückströmung erklärt werden. Die Partikelemission in Abhängigkeit der Tauchrohrgeschwindigkeit in beiden Betriebsarten zeigt, dass bei auch bei großen Tauchrohrgeschwindigkeiten keine Rückführung der Partikel aus dem Staubastrag stattfindet. Die leicht erhöhte Partikelemission ist auf die erhöhten lokalen Druckgradienten an der Tauchrohröffnung zurückzuführen. Die nachstehende Abb. 3 zeigt die gemessene Axialgeschwindigkeit  $v$  in normalisierter Form im Abscheideraum des Gleichstromzyklons auf der Höhe des Tauchrohres sowie eine vektorielle Darstellung (Abb. 3, Detail A) der Einschnürung an der Tauchrohrmündung. Die eingeschränkte optische Zugänglichkeit verhindert eine komplette Ausleuchtung des gewünschten Bereichs weshalb nur ein Teilausschnitt dargestellt werden kann. Hier sind insbesondere Streuungs- und Abschattungseffekte für die eingeschränkte Ausleuchtung verantwortlich. [1]

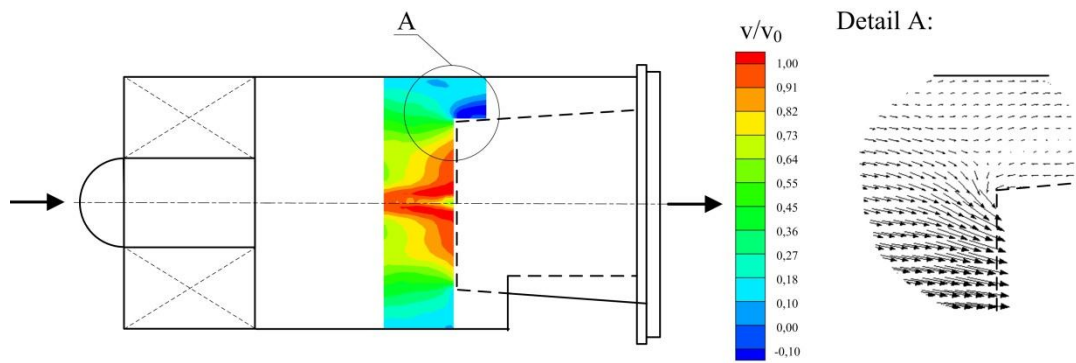


Abb. 3: PIV Messung Axialgeschwindigkeit  $v$  (links) Detailansicht vektorielle Darstellung (rechts) [1]

Durch die Darstellung der radialen Geschwindigkeitskomponente  $w$  im Abscheideraum des Gleichstromzyklons kann der Effekt der durch den Eintrittsapparat aufgeprägten Drallströmung verdeutlicht werden. Im Bereich des Tauchrohres ist durch die Einschnürung der Drallströmung ein hoher Anteil an radialer Geschwindigkeitskomponente  $w$  zu erwarten.

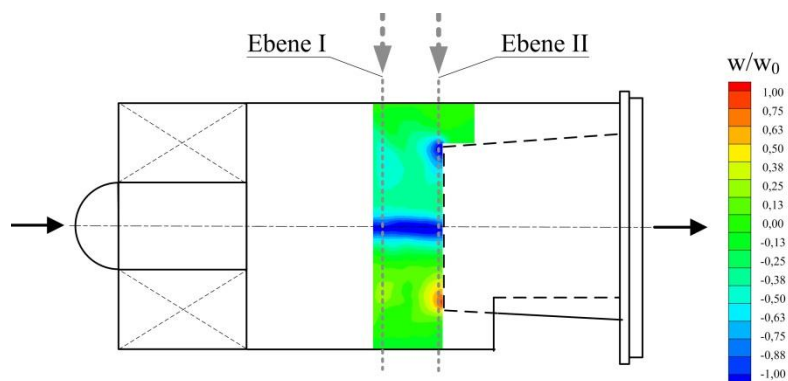


Abb. 4: Radialgeschwindigkeit  $w$  in zwei Ebenen [1]

Diese Erwartung kann durch die PIV Messung bestätigt werden, siehe Abb. 4. Es kann festgestellt werden, dass durch eine Querschnittsverkleinerung des Tauchrohres im Tauchrohr höhere Geschwindigkeiten vorherreschen was zu einer erhöhten radialen Komponente im Bereich des Tauchrohres führt und zu einer Erhöhung der Partikelemission führen kann. Durch die erhöhte radiale Komponente können bereits potentiell abgeschiedene Partikel noch durch das Tauchrohr gesaugt werden. Des Weiteren ist festzustellen, dass im Bereich des Kerns der Strömung die Tracer-Partikel die für die PIV Messung verwendet werden der Strömung nicht widerstandsfrei folgen können und so das Strömungsfeld in diesem Bereich nicht vermessen werden kann. [1]

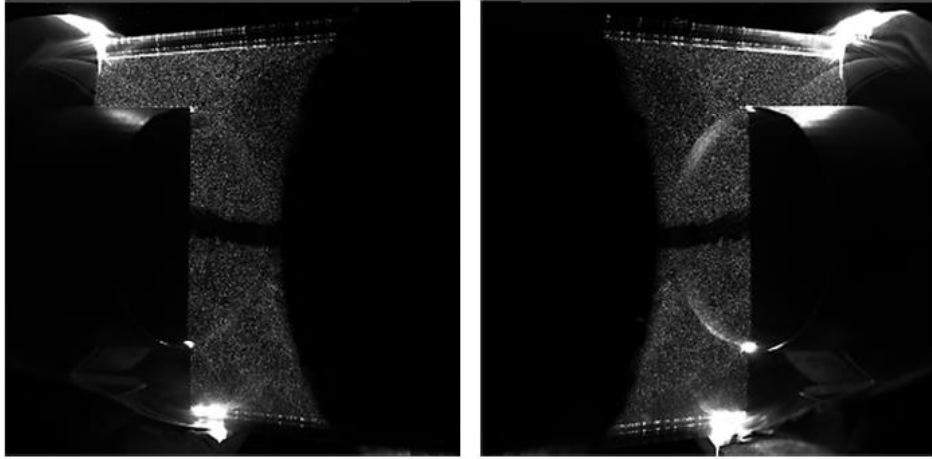


Abb. 5: Doppelkamerabild PIV Messung [1]

Abb. 5 zeigt ein Doppelpaar einer stereoskopischen Aufnahme aus der PIV Messung. Im Kern kann aufgrund der Abwesenheit von Seeding-Tröpfchen keine valide Auswertung durchgeführt werden. In Abb. 4 ist die Geschwindigkeitsinformation im Kern daher zu vernachlässigen. Abb. 6 zeigt die Geschwindigkeitskomponenten über den Querschnitt aus den Messebenen I und II aus Abb. 4. Die Messpunkte werden entlang der Extraktionslinie entnommen und repräsentieren jeweils den 1D Schnitt durch das Messvolumen bei den entsprechenden Positionen.

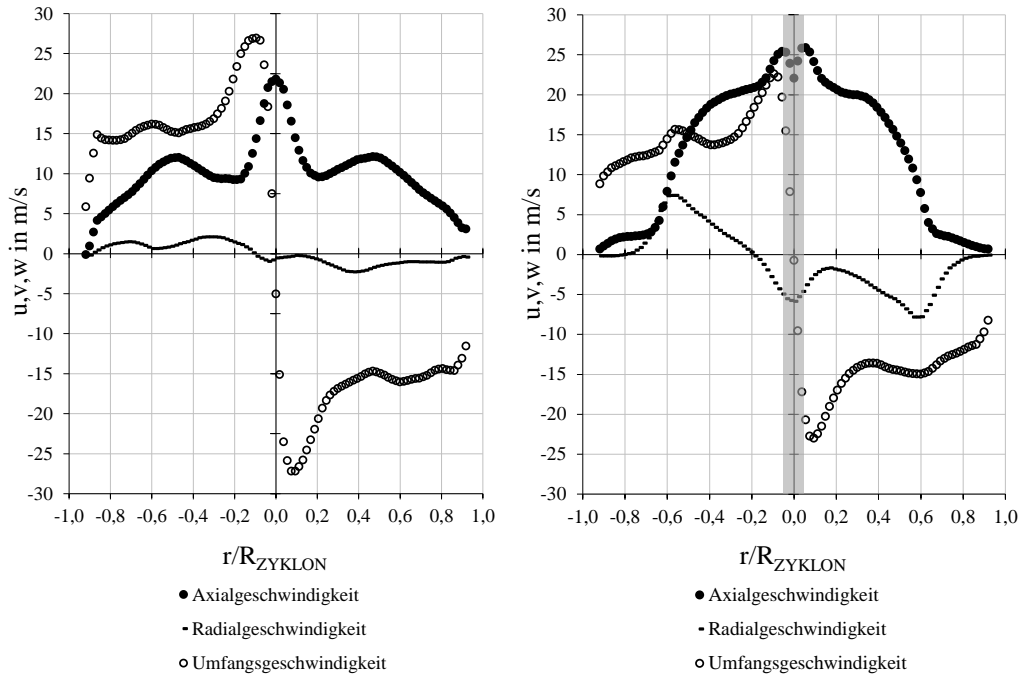


Abb. 6: Geschwindigkeitskomponenten in den Messebenen I (links) und II (rechts) [1]

Abb. 6 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen an den beiden Messebenen. Durch die Information der Geschwindigkeitskomponenten in diesem für die Abscheidung kritischen Bereich des Tauchrohres kann so eine Grenzflächenbetrachtung durchgeführt werden. Unter

der Annahme eines sphärischen Partikels kann für den Grenzkorndurchmesser folgende nachstehende Gleichung aus der Kräftebilanz definiert werden. Für die Bilanz werden die Zentrifugal-, die Widerstands- und die Auftriebskraft im Zentrifugalfeld für die Betrachtung herangezogen, siehe Gl. 1 und 2.

$$|F_Z| - |F_W| - |F_A| = 0 \quad (1)$$

Durch Extraktion der Geschwindigkeitskomponenten an der Position  $r/R_{\text{Zyklon}} = 0,6$  aus Ebene II kurz vor dem Tauchrohr kann aus dem Maximum der Radialkomponente und der entsprechenden Tangentialkomponente der Trennkorndurchmesser  $d_G$  entsprechend Gl. (2) ermittelt werden.

$$d_G = \frac{\rho_G}{\Delta\rho} \cdot |\vec{w}| \cdot \vec{w} \cdot \frac{3}{4} \cdot c_w(Re_p) \cdot \frac{r}{\vec{u}^2} \quad (2)$$

Aus der Berechnung dieses Partikeldurchmessers an unterschiedlichen Positionen im Abscheideraum kann der kritische Sedimentationspfad der Partikel im Abscheider abgeleitet werden.

### Zusammenfassung & Ausblick

Durch die Abbildung des komplexen Strömungsbildes im Abscheideraum eines Gleichstromzyklons kann aus der PIV Information der Geschwindigkeitsvektoren eine Aussage bezüglich der Abscheideleistung getroffen werden. Die Identifikation der kritischen radialen Geschwindigkeiten und dem daraus resultierenden kritischen Trennkorndurchmesser im Bereich der Tauchrohrmündung lassen Aussagen über den Trenngradverlauf dieses Gas-Feststoffabscheiders bei niedrigen Feststoffbeladungen zu. Weitere Untersuchungen zur Evaluierung des Einflusses der Beladung auf das Strömungsprofil insbesondere in Hinblick auf mögliche Partikelschwarmeffekte stellen den nächsten Schritt dieser Untersuchung dar.

### Dankesworte

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

### Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

AF	Austragsfenster	Re	Reynoldszahl
AR	Abscheideraum	$R_{\text{Zyklon}}$	Zykloninnendurchmesser
$c_w$	Widerstandsbeiwert	$\rho$	Dichte
ELA	Eintrittsleitapparat	$u$	Umfangsgeschwindigkeit
F	Kraft	$v$	Axialgeschwindigkeit
Nd:YAG	Nd dot. Yttrium-Aluminium-Granat-Laser	$w$	Radialgeschwindigkeit
PIV	Particle Image Velocimetry		
TR	Tauchrohr		
$r$	Radius		

## Literatur

- [1] Kraxner, M., Empirische Ermittlung von Auslegungskriterien für Gleichstromzyklone in Multizyklonblöcken, *Dissertation*, Technische Universität München, 2013.
- [2] Raffel, M., Willert C. E., Wereley, S. T., Kompenhans J., *Particle image velocimetry: A practical guide*, 2nd ed., Heidelberg, Berlin, 2007.
- [3] Muschelknautz, U., Pattis P., Reinalter, M., Kraxner, M., Design Criteria of Uniflow Cyclones for the Separation of Solid Particles from Gases, CFB-10, 10<sup>th</sup> International Conference on Circulating Fluidized Beds and Fluidized Bed Technology, Sunriver/Or, 2011.