

# ÄHNLICHKEITSTHEORETISCHE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES SCALE-UP VERHALTENS VON HYDROZYKLONEN

Jonathan Sternberger<sup>\*a</sup>, Thomas Senfter, Manuel Berger<sup>a</sup>, Tobias Kofler<sup>a</sup>, Christian Mayerl<sup>a</sup>, Sandro Holzer<sup>a</sup>, Stephan Kahl<sup>a</sup> und Martin Pillei<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Department of Environmental, Process and Energy Engineering, MCI-The Entrepreneurial School, Innsbruck, Austria*

*\* Corresponding Author: Jonathan Sternberger, jonathan.sternberger@mci.edu*

**Abstract.** In vielen Bereichen der Prozessindustrie werden Zyklonabscheider für die Abtrennung von Partikeln aus Gasen oder Flüssigkeiten eingesetzt. Während für Gaszyklone etablierte Berechnungs- und Auslegungsgrundlagen vorliegen, erfolgt die Auslegung und der Betrieb von Flüssigkeitszyklonen (Hydrozyklonen) nach wie vor stark erfahrungsbasiert. Wenn einmal ein optimaler Zyklon für eine bestimmte Trennaufgabe gefunden ist, wird z.B. bei Verdoppelung der Anlagenkapazität üblicherweise ein zweiter baugleicher Zyklon parallelgeschaltet. Die Anzahl der eingesetzten Zyklone entspricht dabei der Skalierung der Kapazität.

Ein alternativer Ansatz wäre, bei erhöhter Anlagenkapazität auch einen größeren Zyklon zu verbauen. Hier sind Zyklonhersteller allerdings verhalten, weil Scale-up in der gesamten Prozessindustrie ein problembehaftetes Thema darstellt und sich Apparate im Großmaßstab oft nicht gleich wie im Labor verhalten. Die gegenständliche Arbeit beschäftigt sich mit dem Scale-up von Hydrozyklonen, wobei drei verschiedene Zyklongrößen experimentell an einem Versuchsstand und theoretisch mittels CFD-Analysen untersucht werden. Diese Ergebnisse werden mit Ansätzen zur Maßstabsvergrößerung mit ausgewählten dimensionslosen Kennzahlen (Reynolds, Stokes, Euler) verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die experimentell erzielten Abscheidegrade bei gleicher Kennzahl (Reynolds, Stokes oder Euler) und unterschiedlicher Zyklongröße nicht übereinstimmen. Somit ist die Anwendbarkeit der gewählten dimensionslosen Kennzahlen nicht zielführend. Folglich muss noch weitere Forschungsarbeit geleistet werden, um eine stimmige und allgemein gültige Scale-up Methodik zu etablieren.

**Keywords:** Hydrozyklon, Scale-up, dimensionslose Kennzahlen

## **1 EINLEITUNG**

Laut aktuellem Stand der Technik kann eine Parallelschaltung mehrerer Zyklone, aber auch das Scale-up eines Zyklons zur Kapazitätsanpassung angestrebt werden. Eine parallele Verbindung mehrerer Zyklone wird verbreitet praktiziert und ist die etablierte Methode zur Kapazitätserhöhung einer Anlage. Da die Betriebsparameter der eingesetzten Zyklone gut erforscht sind und sich der apparative Aufwand erhöht, raten verschiedenste Hersteller auf diese Art die Kapazität zu erhöhen.

Die individuelle Auslegung von Hydrozyklonen hingegen stellt ein großes Problem dar, da bisweilen keine allgemein gültigen Richtlinien oder Berechnungsmodelle definiert sind. Durch diese Lücke ist es auch nur begrenzt möglich, das Abscheideverhalten eines Zyklons während der Planung zu bestimmen. Das Scale-up in der Verfahrenstechnik gilt allgemein als ungelöst beziehungsweise nicht ausgereift und bedarf somit weiterer Forschungsarbeit [1] [2]. Nachfolgende Ausführungen befassen sich mit dieser Problemstellung und sollen Aufschluss über das Scale-up Verhalten von Hydrozyklonen geben. Dazu werden ähnlichkeitstheoretische Ansätze betrachtet, wie sie in „*A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones*“ [3] von den Autoren beschrieben sind. Die daraus resultierende Theorie der beiden Autoren ist jedoch nicht universell anwendbar, sondern beschränkt sich lediglich auf die untersuchten Zyklone. Aus diesem Grund wird versucht, die beschriebenen Ansätze abzuleiten, um die nachstehende Forschungsfrage beantworten zu können.

*„Ist es möglich eine allgemein gültige Scale-up Methodik für Hydrozyklone zu etablieren?“*

## **2 METHODIK**

### **2.1 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG**

Im Zuge der experimentellen Untersuchung wird ein Versuchsstand entwickelt und Systemkennlinien von drei unterschiedlich großen, aber dennoch geometrisch ähnlichen Hydrozyklonen generiert, welche den Druckverlust in Abhängigkeit zum angesetzten Volumenstrom aufzeigen. Abscheideversuche mit partikelbeladenen Flüssigkeiten dienen der Ermittlung des Abscheidegrades. Der Abscheidegrad eines Zyklons ist der wichtigste Parameter zur Leistungsabschätzung des Apparates. Daher wird ein gleicher Abscheidegrad für ein erfolgreiches Scale-up des Hydrozyklons unabdingbar.

### **2.2 SCALE-UP MODELLE**

Diese Arbeit lehnt sich an eine Publikation aus dem Jahr 2000 [3] an, in der die Autoren eine Scale-up Methodik etablierten. Die dabei aufgestellte These beinhaltet geeignete Gleichungen und Kennzahlen und ist bisweilen lediglich für die untersuchten Bradley und Rietema Hydrozyklone gültig. Um eine allgemeine Anwendbarkeit dieser Ausführungen

bestätigen zu können, wird ein Scale-up mit denselben Kennzahlen an geometrisch abweichenden Trennapparaten durchgeführt.

Um Gleichungen, Ansätze und zyklonspezifische Werte in diese Arbeit zu integrieren, ist eine gleiche Betriebsweise obligatorisch. Beschriebene Geometrieverhältnisse dürfen ebenfalls nicht stark voneinander abweichen. Da jedoch die Betriebsweise, wie auch die Geometrieparameter nicht übereinstimmen, wird auf allgemein gültige Gleichungen zurückgegriffen. Gl. 1-3 beschreiben dabei die Reynolds-, Stokes-, und Eulerzahl. Zudem muss ebenfalls die Bedingung in Gleichung Gl. 4 erfüllt sein.

$$Re = \frac{D_K \cdot \rho_f \cdot v_E}{\eta_f} \quad \text{Gl. 1}$$

$$Stk_T = \frac{(d_T)^2 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot v_E}{18 \cdot \eta_f \cdot D_K} \quad \text{Gl. 2}$$

$$Eu = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_f \cdot v_E} \quad \text{Gl. 3}$$



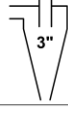
$$Stk_T \cdot Eu = const. \quad \text{Gl. 4}$$

### 3 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

#### 3.1 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Die experimentellen Daten der Versuchsdurchführung an den drei geometrisch ähnlichen Hydrozyklonen sind zusammenfassend in Tabelle 1 ersichtlich. Der Tabelle sind variierende Abscheidegrade zu entnehmen, abhängig von der Zyklongröße und eingestelltem Volumenstrom. Aufgrund der hohen Versuchsanzahl werden die Ergebnisse mit einem mittleren Abscheidegrad  $\eta_{av}$  übersichtlich dargestellt. Die geringsten und höchsten Abscheidegrade  $\eta_{min}$  und  $\eta_{max}$  zeichnen einen Bereich ab, in dem der jeweilige Hydrozyklon bei den entsprechenden Volumenströmen operiert. Bei näherer Betrachtung werden Zusammenhänge ersichtlich, wie etwa ein zunehmender Abscheidegrad mit größer werdendem Volumenstrom, oder ein verringerter Abscheidegrad bei größeren Hydrozyklonen.

Tabelle 1: Übersicht zu den erzielten Abscheidegrade der Versuche

Zyklongröße	$\dot{V} \uparrow$			$\dot{V} \uparrow\uparrow$			$\dot{V} \uparrow\uparrow\uparrow$			
 1"	<u>Volumenstrom</u>									
	$\dot{V} \uparrow = 4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\text{av}}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\text{av}}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\text{av}}$	$\eta_{\max}$
	$\dot{V} \uparrow\uparrow = 5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	0,45	0,45	0,45	0,47	0,48	0,49	0,52	0,52	0,52
	$\dot{V} \uparrow\uparrow\uparrow = 6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$									
 2"	<u>Volumenstrom</u>									
	$\dot{V} \uparrow = 10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\text{av}}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\text{av}}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\text{av}}$	$\eta_{\max}$
	$\dot{V} \uparrow\uparrow = 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	0,34	0,34	0,34	0,37	0,38	0,38	0,39	0,40	0,41
	$\dot{V} \uparrow\uparrow\uparrow = 20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$									
 3"	<u>Volumenstrom</u>									
	$\dot{V} \uparrow = 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\text{av}}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\text{av}}$	$\eta_{\max}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\text{av}}$	$\eta_{\max}$
	$\dot{V} \uparrow\uparrow = 20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	0,30	0,31	0,32	0,31	0,33	0,35	0,33	0,34	0,35
	$\dot{V} \uparrow\uparrow\uparrow = 25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$									

### 3.2 SCALE-UP MODELLE

Zusätzlich bestimmte Daten und Stoffeigenschaften werden zur Ermittlung der dimensionslosen Reynolds-, Stokes- und Euler-Zahlen bei unterschiedlicher Zyklongröße und den jeweiligen Volumenströmen benötigt. Werden nun die Abscheidegrade aus Tabelle 1 den Ähnlichkeitskennzahlen aus Tabelle 2 gegenübergestellt, lassen sich keine Aussagen über ein ähnliches Verhalten zwischen den Zyklongrößen und dem Abscheidegrad treffen.

Tabelle 2: Ergebnisse der dimensionslosen Kennzahlen in Abhängigkeit von Zyklongröße und Volumenstrom

Zyklongröße	$\dot{V}$ $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	$Re$	$Stk_T$	$Eu$	$Stk_T \cdot Eu$
1"	4	480342	0,033	2,32	0,08
	5	600427	0,035	2,32	0,08
	6	720512	0,034	2,33	0,08
2"	10	603193	0,024	2,41	0,06
	15	904790	0,033	2,42	0,08
	20	1206386	0,038	2,42	0,09
3"	15	445833	0,010	4,57	0,05
	20	594445	0,012	4,58	0,05
	25	743056	0,014	4,57	0,06

Für einen 1"-Zyklon, der mit  $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  durchströmt wird, gilt die selbe Reynoldszahl wie für einen 2"-Zyklon bei  $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  oder einen 3"-Zyklon bei  $20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Im Vergleich liegen die dazugehörigen Abscheidegrade bei 48%, 38% und 33%. Dies lässt den Schluss zu, dass Reynolds keine geeignete Scale-up Kennzahl ist. Ähnliches lässt sich auch für die anderen Kennzahlen aus den obigen Tabellen ableiten.

### 3.3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Durch die Verwendung der gewählten dimensionslosen Kennzahlen ist es dieser Arbeit gelungen, deren Nicht-Eignung als Scale-up Grundlage zu belegen. Die Forschungsfrage kann somit mit einem „Nein“ beantwortet werden.

Dieser Beitrag ist ein erster Schritt zu einer einheitlichen und allgemein gültigen Scale-up Methodik für Hydrozyklone. Dieses Vorhaben kann unter anderem die experimentelle Untersuchung um eine kontinuierliche Betriebsweise erweitern. Im Zuge einer zukünftigen Arbeit könnten weitere dimensionslose Kennzahlen auf Plausibilität in Bezug auf die Scale-up Methodik überprüft werden.

## 4 ACKNOWLEDGEMENT

Die Forschung, die zu diesen Ergebnissen führten, wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit am MCI erbracht. Die finanziellen Mittel, die zur Errichtung des Versuchsstandes benötigt wurden, sind vom Forschungsbereich „Fluid&Mechanics“ bereitgestellt worden.

### 4.1 NOMENKLATUR

$\eta_f$	Dynamische Viskosität des Fluids
$\rho_p$	Dichte der Partikel
$\rho_f$	Dichte des Fluids
$D_K$	Innendurchmesser des Hydrozyklons
$d_T$	Trennkorndurchmesser
$v_E$	Eintrittsgeschwindigkeit
Re	Reynoldszahl
$Stk_T$	Stokeszahl
Eu	Eulerzahl

### 4.2 LITERATUR

- [1] T. A. Bell, „Challenges in the scale-up of particulate processes—an industrial perspective,“ Elsevier, Powder Technology, 2005.
- [2] M. Zlokarnik, „Dimensional analysis and scale-up in chemical engineering,“ Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] L. u. M. R. Castilho, „A simple procedure for design and performance prediction of bradley and rietema hydrocyclones,“ Elsevier, Minerals Engineering, 2000.