

---

Ciplus  
Band 6/2018

# **Untersuchung des Tauchrohrtiefenproblems bei der Abgasreinigung mit Staubabscheidern nach Muschelknautz**

Maurice Kremer



# Untersuchung des Tauchrohrtiefenproblems bei der Abgasreinigung mit Staubabscheidern nach Muschelknautz

Maurice Kremer

Institut für Data Science, Engineering and Analytics  
Technische Hochschule Köln  
Campus Gummersbach  
Steinmüllerallee 1, 51643 Gummersbach

**Keywords:** Abgasreinigung, Staubabscheider, Tauchrohrtiefe, Muschelknautz  
Method of Modelling

## 1 Einleitung

Die Reinhaltung der Luft spielt heute mehr denn je eine wichtige Rolle. In Gesellschaft und Politik wird über Dieselfahrverbote in Innenstädten diskutiert, um die Feinstaubbelastung in den Städten zu senken. Besonders die Industrie steht vor der Aufgabe, den Partikelaustritt zu senken und Wege zu finden, um eine gesunde Luft zu wahren.

Zur Abgasreinigung werden oft Filter eingesetzt. Diese weisen aber hohe Energieverluste auf. Die ständige Reinigung oder der Wechsel der Filter kostet Zeit und Geld. Daher ist neben Filtern eine der gängigsten Methoden die Abgasreinigung durch Staubabscheider. Staubabscheider funktionieren filterlos. Dadurch entfällt eine wiederkehrende Filterreinigung, beziehungsweise der regelmäßige Filtertausch.

Die Technik der Staubabscheider hat ihren Ursprung in der Natur. Aus der Betrachtung von Zyklonen (in den Tropen vorkommende Wirbelstürme) wurde ein Verfahren entwickelt, um staubhaltige Fluide von den Verunreinigungen zu trennen.

Die Abgasreinigung mittels Zyklon-Staubabscheider wird in vielen verschiedenen Industrien eingesetzt, heutzutage meist als Vorabscheider. Beispiele hierfür sind die Braunkohleverarbeitende Industrie, die Gesteinsindustrie und die papier- oder holzverarbeitende Industrie, insbesondere dort, wo viel Staub oder auch größere Späne in die Luft gelangen. Auch im Alltag sind Zyklon-Staubabscheider zu finden. Hier kommen sie in beutellosen Staubsaugern oder als Vorabscheider von Staubsaugern bei der Holzverarbeitung zum Einsatz [1], [7].

Die Vorgänge im Staubabscheider-Zyklon sind bereits durch mathematische Modelle beschrieben worden. Hierbei handelt es sich um Näherungen, jedoch nicht um die exakte Abbildung der Realität, weswegen bis heute die Modelle immer wieder weiterentwickelt und verbessert werden. Eine CFD (Computational Fluid Dynamics) Simulation bringt meist die besten Ergebnisse, ist jedoch sehr aufwendig und muss für jeden Staubabscheider neu entwickelt werden. Daher wird noch immer an der Weiterentwicklung der mathematischen Modelle gearbeitet, um eine Berechnung zu optimieren, die für alle Staubabscheider gilt.

Muschelknautz hat in diesem Bereich über Jahre hinweg geforscht und so eine der wichtigsten Methoden zur Berechnung von Zyklonabscheidern entwickelt. Diese stimmt oft sehr gut mit der Realität überein. Betrachtet man jedoch die Tiefe des Tauchrohres im Zyklon, fällt auf, dass der Abscheidegrad maximal wird, wenn das Tauchrohr nicht in den Abscheideraum ragt, sondern mit dem Deckel des Zyklons abschließt. Dieses Phänomen tritt weder bei den durchgeführten CFD-Simulationen noch bei den durchgeführten Messungen am Bauteil auf. Ziel der Arbeit ist es, diese Unstimmigkeit zwischen Berechnung und Messung zu untersuchen und Gründe hierfür herauszufinden.

Darum wird zunächst der Stand der Technik und das Muschelknautz'sche Modell vorgestellt, um im Anschluss die Berechnungsmethode genauer zu untersuchen. So soll festgestellt werden, ob die Ursache der Abweichungen zur Realität bei einer Analyse der Berechnungsmethode ersichtlich wird. Beispielsweise soll überprüft werden, ob die Schlussfolgerung einer maximalen Abscheideleistung bei minimaler Tauchrohrtiefe von speziellen Faktoren abhängt.

Es wird eine Reihe von Beispielrechnungen durchgeführt, mit deren Hilfe der Zusammenhang von Abscheidegrad und Tauchrohrtiefe ersichtlich wird. Hierbei werden die Geometrieparameter des Abscheiders variiert, um deren Einfluss auf die Tauchrohrtiefe zu untersuchen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Aufbau

Abbildung 1 zeigt den Aufbau eines Zyklon-Staubabscheiders. Grundsätzlich besteht der Aufbau aus dem Einlass, wodurch das mit Feststoffen oder Flüssigkeiten verunreinigte Gas in den Abscheider gelangt. Im zylindrischen und meist auch konischen Abscheideraum wird das Gas gereinigt. Das gereinigte Gas verlässt den Abscheider am oberen Ende wieder über ein Tauchrohr, während die Verunreinigungen über ein Fallrohr oder einen Staubsammelbehälter den Abscheider nach unten hin verlassen. Ziel dabei kann es sein entweder die Luft von festen oder flüssigen Stoffen zu reinigen oder auch die Gewinnung von wertvollen Feststoffen aus dem Luftgemisch.

Besonders interessant sind die verschiedenen Einlaufvarianten (zum Beispiel tangential oder Schlitzeinlauf), die eine ideale Drehströmung erzeugen sollen und jeweils Vor- als auch Nachteile aufweisen. Die Variationen können beispielsweise bei Hoffmann [1] nachgelesen werden. Im Folgenden wird von einem Tangentialeinlauf ausgegangen.

Der Abscheideraum kann zylindrisch oder, wie in der meisten Fällen, im oberen Bereich zylindrisch und weiter unten konisch geformt sein. Hier geschieht die eigentliche Trennung von Staub und Gas. Die wichtigsten Abmaße des Abscheideraums sind die Höhe, der Durchmesser und die Oberflächenrauheit der Wand.

Im Staubaustritt treten die ausgeschiedenen Partikel aus dem Zyklon aus. Auch hier gibt es verschiedene Ausführungsvarianten: Ein einfaches Fallrohr, wodurch sich jedoch der Bauraum vergrößert oder einen Staubbunker, in dem der Staub gesammelt

wird. Der Bunker hat jedoch den Nachteil, dass bereits abgeschiedener Staub wieder aufgewirbelt werden kann und sich so der Abscheidegrad verschlechtert. Abhilfe schafft hier meist ein Apexkegel, der einen ringförmigen Spalt bildet, aus dem die Feststoffe austreten können [2].

Beim Tauchrohr handelt es sich meist um ein zylindrisches Rohr, wodurch das gereinigte Gas den Abscheider wieder verlässt. Hierbei spielen die Eintauchtiefe und die Minimierung des Druckverlusts eine wichtige Rolle.

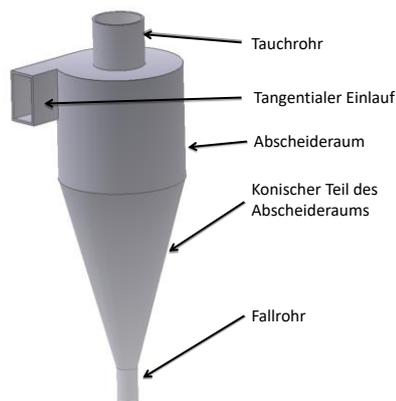


Abbildung 1: Aufbau eines Staubabscheiders: Die verschmutzte Luft tritt durch den Einlauf ein. Der Schmutz landet im Fallrohr. Die gereinigte Luft tritt oben durch das Tauchrohr aus.

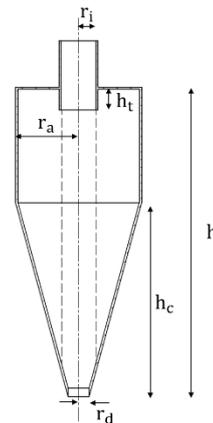


Abbildung 2: Wichtigste Maße eines Staubabscheiders: Radien und Höhen

## 2.2 Strömungen

Es werden vier Strömungen im Zyklon-Staubabscheider unterschieden: Einlaufströmung, Hauptströmung, Grenzschichtströmung und Tauchrohrströmung.

Die Einlaufströmung ist stark von der Geometrie abhängig. Im Einlauf wird der Gasstrom beschleunigt und sorgt so für den Drall im Abscheideraum. Beim Eintreten in den Zyklon geht das Gas in die Hauptströmung über. Dabei handelt es sich um eine dreidimensionale Bewegung, bestehend aus einer axialen und einer radialen Geschwindigkeitskomponente. Die Umfangsgeschwindigkeit der Strömung nimmt nach außen hin ab und besitzt etwa auf der Höhe des Tauchrohrradius  $r_i$  ihr Maximum. Die Wirbelströmung bewegt sich am äußeren Rand axial nach unten, im Inneren hingegen ist die Strömung nach oben gerichtet. Auch hier liegt die Grenze etwa auf dem Tauchrohrradius [2].

Mittels Zentrifugalkraft werden die abzuscheidenden Partikel aus der Hauptströmung herausgeschleudert. Diese Partikel sammeln sich in einer Grenzschicht am Rande des Zyklons. Durch den Austausch zwischen Hauptströmung und Grenzschichtströmung und Störstellen an der Zyklonwand, wie Schwankungen in der Ober-

flächenrauheit, kommt es zu Ausbrüchen aus der Grenzschicht. Hier kann sich dann weiterer Staub ansammeln und es bilden sich Staubstrahlen. Diese bewegen sich mit langsamerer Geschwindigkeit als die Hauptströmung am Rand des Zyklons Richtung Staubauffangbehälter oder Fallrohr. Bei geringer Staubbelastung des Gases sammelt sich im Verlauf der Strähne immer mehr Staub an, wodurch diese an Dicke gewinnt. Bei einer höheren Staubbelastung wird bereits beim Eintritt in den Abscheideraum ein großer Teil der dispersen Phase abgeschieden [3].

Die Strömung im Tauchrohr ist von besonderer Bedeutung beim Druckabfall, da hier der Druckverlust am größten ist. Das gereinigte Gas verlässt den Zyklon über das Tauchrohr. Allerdings steht hierzu nur eine kleine Ringfläche zur Verfügung weswegen hohe axiale Geschwindigkeiten nötig sind, um aus dem Zyklon auszutreten. In der Mitte des Wirbels kommt es zu Rückströmungen. Die Luft fließt zurück an die Stelle mit dem geringsten Druck, welcher sich etwa auf Höhe des Tauchrohereintritts befindet. Hierbei geht ein großer Teil der kinetischen Energie der Tauchrohrströmung verloren [4].

### 2.3 Einflussgrößen auf Abscheidegrad und Druckverlust

Die Maximierung des Abscheidegrads und die Minimierung des Druckverlusts sind die wichtigsten Kriterien bei der Auswahl von Staubabscheidern. Es soll so viel Feststoff wie möglich aus dem Gas entfernt, aber gleichzeitig nur ein möglichst kleiner Druckverlust produziert werden, um die Betriebskosten möglichst gering zu halten. Auf diese Kriterien haben verschiedene Parameter einen mehr oder weniger großen Einfluss. Die wichtigsten werden im Folgenden erläutert.

Einer der wichtigsten Einflussparameter ist die Umfangsgeschwindigkeit  $u$ . Je höher diese ist, desto besser wird der Abscheidegrad, da hierdurch die auf die disperse Phase wirkende Zentrifugalkraft größer wird. Allerdings steigt hierdurch auch der Druckverlust. Besonders Wandreibung und Partikelkonzentration verändern die Umfangsgeschwindigkeit. Beide sorgen für zusätzliche Reibung und sorgen für eine geringere Umfangsgeschwindigkeit und der Abscheidegrad sinkt. Gleichzeitig verringert sich aber der Druckverlust, siehe dazu [1].

Auch die Temperatur des Gases beeinflusst den Abscheidegrad. Zwar ist der Staubabscheider einer der wenigen Varianten der Abgasreinigung, die selbst bei Temperaturen über 1000 Grad Celsius betrieben werden können, trotzdem haben auch hier die hohen Temperaturen einen negativen Einfluss auf den Abscheidegrad. So erhöht sich durch steigende Temperaturen auch die kinematische Viskosität. Die erhöhte Zähigkeit wiederum sorgt für einen Anstieg des Wandreibungsbeiwertes. Die Umfangsgeschwindigkeit sinkt und so ebenfalls der Abscheidegrad [5].

Auch das Tauchrohr beeinflusst die Abscheidung. Wird der Durchmesser des Tauchrohrs verkleinert, verbessert sich der Abscheidegrad. Dies erklärt sich durch die hohen Zentrifugalkräfte, die auf die Partikel wirken. Durch den kleineren Durchmesser sind diese hohen Zentrifugalbeschleunigungen ausgesetzt und noch mehr Partikel können aus dem Gas abgeschieden werden. Mit der Verbesserung des Abscheidegrads geht jedoch auch hier eine deutliche Erhöhung des Druckverlustes einher [2].

Des Weiteren kann auch die Höhe des Abscheideraums variiert werden. Jedoch hat diese Änderung nur eine sehr geringe Auswirkung auf den Abscheidegrad, wohingegen der Druckverlust durchaus beeinträchtigt wird. Je höher die Gesamthöhe des Zyklons, desto geringer meist der Druckverlust. Jedoch ist auch die maximale Höhe begrenzt, wie bei Hoffmann [1] nachzulesen ist.

Betrachtet werden sollten außerdem noch Fertigungsfehler. Hier können hervorstehende Schweißnähte oder ein falsch angebrachter Einlauf zu hohem Verschleiß führen oder Spritzkorn gelangt direkt ins Reingas. Dies kann beispielsweise bei Brauer [6] nachgelesen werden.

### 3 Berechnung nach Muschelknautz

Vollständig können die Vorgänge im Inneren des Zyklon-Staubabscheiders immer noch nicht mathematisch abgebildet werden. Im Folgenden werden die Berechnungen von Muschelknautz näher erläutert, die eine gute Näherung der tatsächlichen Werte ermöglicht. Hierbei wird die Berechnung des Abscheidegrads erläutert. Die Druckverlustberechnung kann beispielsweise im VDI Wärmeatlas [5] nachgelesen werden.

Die Berechnung des Abscheidegrads beruht bei Muschelknautz auf der *Grenzkorngleichgewichtsbetrachtung*. Auf das Korn im Inneren des Zyklons wirkt zum einen die Zentrifugalkraft  $F_F$  nach außen. Gleichzeitig wirkt die Widerstandskraft der Strömung auf die Partikel  $F_R$  entgegengesetzt. Hinzu kommt die Auftriebskraft  $F_A$ , welche entgegengesetzt der Bewegungsrichtung wirkt und so die Zentrifugalkraft verringert.

$$F_R = F_F - F_A \quad (1)$$

Betrachtet wird der Zustand auf dem Tauchrohradius  $r_i$ . Setzt man also die Widerstandskraft der Strömung mit der verringerten Zentrifugalkraft gleich, kann ein Grenzpartikeldurchmesser  $d_s$  (Formel 2) berechnet werden.

$$3\pi\eta_L d_s \cdot v_r = \rho_S \frac{\pi d_s^3}{6} \cdot \frac{u_i^2}{r_i} - \rho_L \frac{\pi d_s^3}{6} \cdot \frac{u_i^2}{r_i}$$

$$d_s = \sqrt{\frac{18\eta_L v_r r_i}{(\rho_S - \rho_L) u_i^2}} \quad (2)$$

Alle Partikel mit größerem Durchmesser werden also rein theoretisch abgeschieden, alle darunterliegenden bleiben in der Strömung enthalten. Hierbei wird vereinfacht von einem Durchmesser einer Kugel ausgegangen [4].

Die Radialgeschwindigkeit  $v_r$  lässt sich über die Kontinuitätsgleichung bestimmen, also aus dem Quotient aus Volumenstrom und radial überströmter Fläche. Diese Fläche wird durch einen gedachten Zylinder auf dem Tauchrohradius unterhalb des

Tauchrohres beschrieben:  $v_r = \frac{\dot{V}}{2\pi r_i h_i}$  [6]. Wird dieser Ausdruck in Gleichung 2 eingesetzt, dann ergibt sich für den Grenzpartikeldurchmesser [5]:

$$d_s = \sqrt{\frac{9\eta_L 0,9\dot{V}}{(\rho_s - \rho_L)\pi h_i u_i^2}} \quad (3)$$

Der Faktor 0,9 folgt aus der Überlegung, dass nur etwa 90 Prozent des Volumens in die Hauptströmung gelangen und somit am Abscheideprozess teilnehmen. Die restlichen 10 Prozent verlassen laut Muschelknautz direkt als Kurzschlussströmung über Deckel und Tauchrohr den Zyklon.

Während es sich bei der Viskosität der Fluids  $\eta_L$ , der Dichte des Staubs  $\rho_s$  und der Dichte des Gases  $\rho_L$  um Stoffkonstanten handelt, muss die Umfangsgeschwindigkeit  $u_i$  auf dem Tauchrohrradius erst berechnet werden. Die Höhe  $h_i$  ergibt sich aus der Differenz der gewählten Gesamthöhe  $h$  und der Eintauchtiefe des Tauchrohres  $h_t$ , siehe Abbildung 2.

Um die Umfangsgeschwindigkeit auf dem Tauchrohrradius zu ermitteln, muss zunächst  $u_a$  auf dem Außenradius ermittelt werden. Dies geschieht über das Verhältnis zwischen dem Eintrittsdrehimpuls, bestehend unter anderem aus Eintrittsgeschwindigkeit  $v_e$  und Eintrittsradius  $r_e$  und dem zugeführten Drehimpuls [2]:

$$\alpha = \frac{\text{Eintrittsdrehimpuls}}{\text{zugeführter Drehimpuls}} = \frac{v_e r_e \rho \dot{V}}{u_a r_a \rho \dot{V}} = \frac{v_e r_e}{u_a r_a} \quad (4)$$

Formel 4 wird nach  $u_a$  umgestellt.  $\alpha$  steht für den Einschnürungsbeiwert. Dieser ist bereits in Experimenten ermittelt worden und kann so entweder direkt aus Diagrammen abgelesen werden (siehe [4]) oder aber unter Berücksichtigung der Staubbelastung berechnet werden (siehe [5]).

Mittels  $u_a$  kann die Umfangsgeschwindigkeit auf dem Tauchrohrradius ermittelt werden [6]:

$$u_i = \frac{u_a \frac{r_a}{r_i}}{1 + \frac{\lambda A_R}{2V} u_a \sqrt{\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}} \quad (5)$$

Der Reibungsbeiwert  $\lambda$  setzt sich aus der Reibung des reinen Gases mit der Wand und der Reibung der Strömung an der Staubschicht in der Grenzströmung am Rand des Zyklons zusammen (Nähere Informationen: [3], [5], [6]).

Aus dem Grenzpartikeldurchmesser kann schließlich die Fraktionsabscheidegradkurve errechnet werden. Wie bereits erwähnt, werden in der Theorie alle Partikel abgeschieden, die größer als die Grenzpartikelgröße sind, kleinere verbleiben im Gas. In der Realität erfolgt diese Trennung jedoch nicht so scharf. Statt einer klaren Trennung zwischen abgeschiedenen und in der Strömung verbleibenden Partikeln erhält man einen glatten Kurvenverlauf, der wie folgt berechnet wird [5]:

$$\eta_F = 0,5 \left( 1 + \cos \left[ \pi \left( 1 - \frac{\log\left(\frac{d}{d_s}\right) + \log(D)}{2\log(D)} \right) \right] \right) \quad (6)$$

Der Parameter  $D$  beschreibt die Steigung der Abscheidegrad-Kurve. Je nach Geometrie des Zyklons kann dieser einen Wert zwischen 2 und 4 annehmen, meist wird er mit 3 definiert.

Zusätzlich zu der Grenzkornleichgewichtsbetrachtung geht Muschelknautz davon aus, dass bei einer höheren Partikelbeladung des Gases bereits eine Abscheidung des Staubes direkt nach dem Eintritt erfolgt. Durch die Turbulenzen im Inneren des Zyklons kann das Fluid nur eine gewisse Menge Staub speichern. Wird diese Grenzbeladung  $\mu_G$  überschritten, bildet sich direkt nach dem Eintritt in den Abscheideraum eine Staubsträhne aus, welche an der Zyklonwand nach unten gelangt. Dieser Effekt kann besonders bei hoher Staubbiladung der Abscheidung in der Hauptströmung überwiegen. Die Berechnung der Grenzbeladung kann im VDI Wärmeatlas [5] nachgelesen werden.

Auf die Berechnung des Druckverlustes wird an dieser Stelle verzichtet, diese kann jedoch ebenfalls im VDI Wärmeatlas [5] oder bei Hoffmann [1] nachgelesen werden.

## 4 Berechnungsuntersuchung

Im Folgenden soll das vorgestellte Berechnungsmodell in Hinblick auf die Tauchrohrtiefe analysiert werden. Sowohl praktische Versuche, als auch Strömungssimulationen, zeigen, dass die Tiefe des Tauchrohres Einfluss auf den Abscheidegrad hat. Die Berechnungsergebnisse zur idealen Tauchrohrtiefe weichen jedoch von Simulation und Versuch ab.

### 4.1 Experimentelle Untersuchung

Zunächst wird eine experimentelle Untersuchung durchgeführt, um den Einfluss verschiedener geometrischer Parameter auf den Abscheidegrad in Abhängigkeit von der Tauchrohrtiefe herauszufinden. Hierfür wurde vom SPOTSeven Lab, einer Forschungs- und Arbeitsgruppe der Technischen Hochschule Köln, bereits ein Programmcode geschrieben [11], der die Berechnungen nach Muschelknautz beinhaltet. Hierbei können sowohl die geometrischen Größen, als auch Prozessparameter, übergeben werden. Das Programm errechnet so den Druckverlust und Abscheidegrad für die eingegebenen Parameter. Die Berechnung erfolgt nach Loeffler [2].

Es wurden folgende Parameter untersucht: der Außendurchmesser  $d_a$ , die Gesamthöhe des Zyklons  $h$ , der Tauchrohrdurchmesser  $d_t$ , die Höhe des Einlasses  $h_e$  und die Breite des Schlitzeinlaufs  $b_e$ , siehe Abbildung 2. Jeder Parameter besitzt zunächst einen vom Programm vorgegebenen Wert. Ausgehend hiervon wird jeder Wert einzeln jeweils um 20 Prozent erhöht und verringert, sodass der Einfluss jedes einzelnen Parameters deutlich wird.

Es entstehen also zwei Stufen für die fünf Faktoren, wodurch sich 32 Berechnungen ergeben. Die Werte sind in Tabelle 1 noch einmal zusammengefasst.

**Tabelle 1. Übersicht der Geometrie-Parameter**

Einstellung	Da [m]	H [m]	Dt [m]	He [m]	Be [m]
Ausgangswert	1.26	2.5	0.42	0.6	0.2
20%	1.512	3	0.504	0.72	0.24
-20%	1.008	2	0.336	0.48	0.16

Für jede Veränderung eines Parameters wird ein Diagramm ausgegeben, welches den Abscheidegrad in Abhängigkeit der Tauchrohrtiefe, skaliert von null bis ein Meter, angibt.

Beim Vergleich der Ergebnis-Diagramme (Abbildung 3) fällt auf, dass sich der Verlauf der Kurven in nur sehr geringem Maße unterscheidet. Zwar ändern sich die Werte des Abscheidegrads, der Verlauf der Kurve bleibt jedoch nahezu gleich.

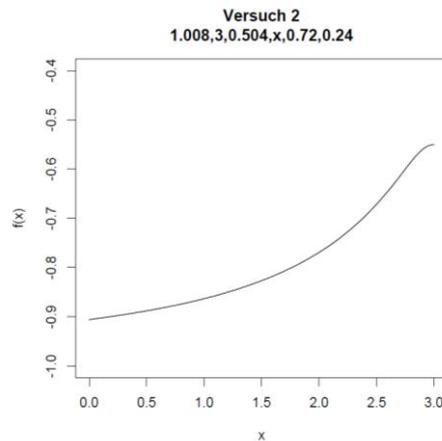


Abbildung 3: Beispielhaftes Ergebnis-Diagramm –  
negierter Abscheidegrad  $f(x)$  in Abhängigkeit der Tauchrohrtiefe  $x$ ,  
mit  $D_a=1,008\text{m}$ ;  $H=3\text{m}$ ;  $D_t=0,504\text{m}$ ;  $H_e=0,72\text{m}$ ;  $B_e=0,24\text{m}$

Es kann festgehalten werden, dass die Veränderung des Einlaufs, sowohl in der Breite, wie auch in der Höhe, so gut wie keinen Einfluss auf die Kurvenform oder die Höhe des Abscheidegrads nimmt. Der Tauchrohrdurchmesser hingegen besitzt einen größeren Einfluss. Ein kleinerer Durchmesser führt hier zu einem höheren Abscheidegrad. Das kann mit Formel 5 erklärt werden. Bei kleiner werdenden Tauchrohrdurchmesser erhöht sich die Umfangsgeschwindigkeit auf dem Tauchrohrradius und es entstehen größere Zentrifugalkräfte. Der Abscheidegrad steigt.

Auch eine Erhöhung des Außendurchmessers zeigt einen verbesserten Abscheidegrad. Dieser Effekt fällt jedoch vergleichsweise gering aus. Die Erklärung ist hierbei

die Gleiche. Ein größerer Außenradius erhöht die Umfangsgeschwindigkeit auf dem Tauchrohrradius und der Abscheidegrad steigt an.

Der einzige Faktor, der den Verlauf der Kurve ändert, ist die Gesamthöhe. Auch hier steigt der Abscheidegrad mit steigender Gesamthöhe. Der Einfluss fällt allerdings nur sehr gering aus. Bei 20 prozentiger Zunahme der Gesamthöhe ergibt sich ein flacherer Verlauf der Kurve, welcher beinahe als linear bezeichnet werden kann. Wird die Gesamthöhe um den gleichen Prozentanteil gesenkt, ist die Kurve zunächst flacher, steigt mit höherer Tauchrohrtiefe aber immer steiler an. Auch wenn diese Auffälligkeit nicht sehr stark ausgeprägt ist, findet man sie bei allen Berechnungsergebnissen wieder.

Diese Veränderung der Kurve lässt sich auf eine Verschiebung entlang der Abszissenachse zurückführen. Dies kann durch eine starke Vereinfachung der Formel für den Grenzpartikeldurchmesser beschrieben werden. Die Tauchrohrtiefe  $h_t$  wird hier durch eine beliebige Variable  $x$  ersetzt und der Grenzpartikeldurchmesser  $d_s$  durch eine beliebige von  $x$  abhängige Funktion  $y(x)$ , da hier nur der Verlauf der Kurve und keine tatsächlichen Werte interessieren. Alle anderen Werte werden als konstant angenommen.

$$d_s = \sqrt{\frac{9\eta_L \cdot 0,9\dot{V}}{(\rho_s - \rho_L) \cdot \pi (h - h_t) \cdot u_i^2}} \text{ vereinfacht zu der Form: } y(x) = \sqrt{\frac{1}{h-x}} \quad (6a)$$

Wird der Wert der Gesamthöhe  $h$  in Formel 6a vergrößert, verschiebt sich die Kurve (Grenzpartikeldurchmesser in Abhängigkeit der Tauchrohrtiefe) entlang der X-Achse nach rechts. Hierdurch lässt sich die Kurvenverschiebung des Abscheidegrads, der direkt vom Grenzpartikeldurchmesser abhängig ist, bei den Versuchsergebnissen erklären.

Um diesen Effekt zu verhindern, wurde eine zweite Berechnungsreihe mit dem Programm durchgeführt. Diesmal jedoch mit einer Kurvendarstellung mit einer auf die Gesamthöhe normierten X-Achse. Bei der Berechnungsreihe konnte die Begründung für die Verschiebung bestätigt werden, da sich durch die Veränderung der Gesamthöhe keine Änderungen der Kurve mehr feststellen lassen. Die anderen festgestellten Einflüsse blieben erhalten.

Interessant sind zudem die folgenden Beobachtungen: Bei einer Vergrößerung des Außendurchmessers und einer Verkleinerung des Tauchrohrradius kann nicht nur der Abscheidegrad optimiert werden, sondern auch der Kurvenverlauf bleibt länger flach und nahezu konstant. So besitzt die Tauchrohrtiefe zu Beginn nur einen sehr geringen Einfluss auf den Abscheidegrad. Nähert sich die Tauchrohrtiefe jedoch an die Gesamthöhe an, wird die Kurve sehr steil und der Abscheidegrad sinkt (Abbildungen 4 und 5).

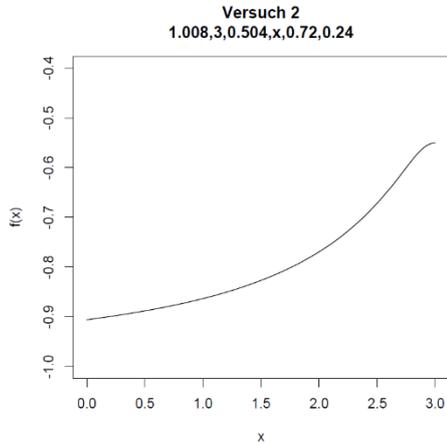


Abbildung 4: Abscheidegrad (negiert) in Abhängigkeit der Tauchrohrtiefe – mit 20% geringerem Außenradius und 20% erhöhtem Tauchrohrradius

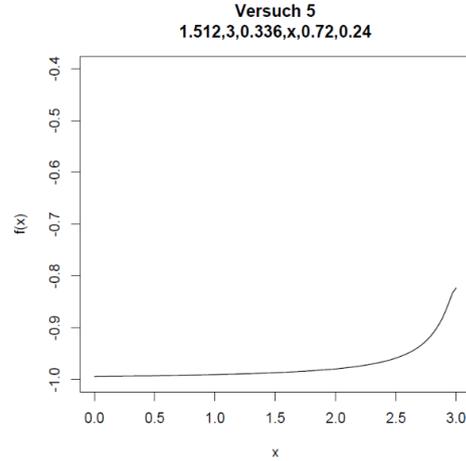


Abbildung 5: Abscheidegrad (negiert) in Abhängigkeit der Tauchrohrtiefe – mit 20% erhöhtem Außenradius und 20% verringertem Tauchrohrradius

So konnten mit der Durchführung der Berechnungsreihe einige Einflüsse herausgefunden und erklärt werden. Die Untersuchung zeigte jedoch, dass der höchste Abscheidegrad bei einer Tauchrohrtiefe von null, also mit dem Deckel abschließend, zu finden ist. Dies änderte sich bei keinem der Diagramme und kann so keinen Aufschluss auf die gesuchte Differenz zwischen Realität und Berechnung geben.

## 4.2 Analytische Untersuchung

Im zweiten Teil der Untersuchung wird die Berechnung nach Muschelknautz analysiert. Hierzu muss zunächst identifiziert werden, wo die Tauchrohrtiefe in der Berechnung vorkommt.

Die Tauchrohrtiefe tritt an zwei Stellen auf. Zum einen bei der Radialgeschwindigkeit, welche direkt in die Gleichung für die Grenzpartikelgröße eingeht (nach [6]):

$$v_r = \frac{\dot{V}}{A_z} = \frac{\dot{V}}{2\pi r_i (h - h_t)} \quad (7)$$

Zum anderen bei der Reibungsfläche  $A_R$  des Gases an der Wand. Diese Reibungsfläche geht direkt in die Umfangsgeschwindigkeit auf dem Tauchrohrradius (Formel 5) ein. Sie setzt sich aus der gesamten Innenfläche des Zyklons zusammen, also aus der Deckelfläche, der oberen Zylinderfläche, der unteren Konusfläche und der Außenfläche des eingesteckten Tauchrohres:

$$A_R = \pi[(r_a^2 - r_i^2) + 2r_a(h - h_c) + (r_d + r_a)\sqrt{(r_a - r_d)^2 + h_c^2} + 2r_i h_t] \quad (8)$$

Um den Grenzpartikeldurchmesser, beziehungsweise den daraus resultierenden Abscheidegrad, in Abhängigkeit der Tauchrohrtiefe darzustellen und somit die Extremstellen herauszufinden, werden einige Konstanten eingeführt:

$$\text{Mit } c_0 = \pi[(r_a^2 - r_i^2) + 2r_a(h - h_c) + (r_d + r_a)\sqrt{(r_a - r_d)^2 + h_c^2}]$$

vereinfacht sich Formel 8 zu:  $A_R = c_0 + 2\pi r_i h_t$ . (9)

Die Fläche wird anschließend in die Gleichung für die Umfangsgeschwindigkeit eingesetzt und ebenfalls durch Konstanten übersichtlicher dargestellt:

$$\text{Mit } c_1 = u_a \frac{r_a}{r_i} \text{ und } c_2 = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{\dot{V}} \cdot u_a \sqrt{\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}$$

$$\text{wird } u_i = \frac{u_a \frac{r_a}{r_i}}{1 + \frac{\lambda(c_0 + 2\pi r_i h_t)}{2\dot{V}} u_a \sqrt{\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}} \text{ zu } u_i = \frac{c_1}{1 + c_2(c_0 + 2\pi r_i h_t)}. \quad (10)$$

Zur besseren Übersicht wird der Grenzpartikeldurchmesser in Abhängigkeit der Tauchrohrtiefe dargestellt, da dieser direkt für den Abscheidegrad entscheidend ist. Nach Einsetzen der Umfangsgeschwindigkeit in die Zielgleichung und anschließender Umformung folgt:

$$d_s(h_t) = \sqrt{\frac{c_3(1 + c_2 c_0 + c_2 2\pi r_i h_t)^2}{(h - h_t)c_1^2}} \quad (11)$$

$$\text{mit } c_3 = \frac{9\eta_L \dot{V}}{(\rho_s - \rho_L) \cdot \pi}$$

Es wird die Tauchrohrtiefe gesucht, an welcher der Grenzpartikeldurchmesser ein Minimum besitzt und so der Abscheidegrad maximal wird. Hierfür wird Gleichung 11 abgeleitet und gleich null gesetzt. Man erhält als mögliche Minima:

$$h_{t1/2} = \frac{-hc_2 2\pi r_i \pm \sqrt{(2hc_2 \pi r_i)^2 + 4hc_2 \pi r_i + 4hc_2^2 c_0 \pi r_i + c_2^2 c_0^2 + 2c_2 c_0 + 1}}{-2c_2 \pi r_i} \vee$$

$$h_{t3/4} = \frac{-1 - c_2 c_0}{c_2 \pi r_i} \quad (12)$$

Nutzt man die Standardwerte des Programms aus Abschnitt 4.1 (siehe Tabelle 1, Zeile 2), erhält man folgende Werte:

$$h_{t1} = 136 \text{ m } \vee h_{t2} = -131 \text{ m } \vee h_{t3/4} = -262 \text{ m}$$

Diese liegen jedoch alle weit außerhalb der möglichen Geometrie des Zyklons (Gesamthöhe 2,5 Meter), sodass die Randwerte näher betrachtet werden sollten.

Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass der minimale Grenzpartikeldurchmesser bei einer Tauchrohrtiefe von null liegt. Bei dem genannten Beispiel beträgt dieser 5,04 Mikrometer (Abbildung 6).

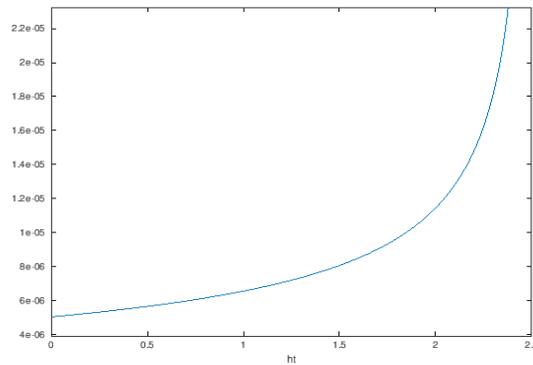


Abbildung 6: Grenzpartikeldurchmesser in Abhängigkeit der Tauchrohrtiefe  $h_t$

Aus Formel 11 können alle Parameter abgelesen werden, welche Einfluss auf die Lage des Minimums des Abscheidegrads und somit auf den Verlauf der Kurve besitzen. Es fällt dabei auf, dass die Formeln der Grenzbelastungshypothese keinen Einfluss besitzen, da hier die Tauchrohrtiefe keine Berücksichtigung findet.

Da die Berechnung keinen Aufschluss gibt, wieso sich bei Versuchen die ideale Tauchrohrtiefe nicht abschließend mit dem Zyklondeckel befindet, muss untersucht werden, ob in der vorliegenden Berechnung Überlegungen außer Acht gelassen wurden.

Besonders interessant ist hierbei der Sekundärstrom. Der Sekundärstrom bezeichnet den Volumenstrom, der direkt vom Einlauf des Zyklons über Deckel und Tauchrohr den Abscheider wieder verlässt, ohne in die Hauptströmung zu gelangen. Der Primärstrom hingegen bezeichnet den Volumenstrom, welcher an der Hauptströmung und damit an der eigentlichen Abscheidung im Abscheideraum teilnimmt.

Muschelknautz geht davon aus, dass der Sekundärstrom etwa zehn Prozent des Gesamtvolumenstroms ausmacht. Er selbst empfiehlt daher für die Tauchrohrtiefe eine optimale Auslegung mit dem 1,5-fachen Tauchrohrradius. Auch eine Abweichung von diesem Wert sieht er als unproblematisch. Geht die Tiefe jedoch gegen null, sinkt nach seiner Aussage der Abscheidegrad [3], insbesondere bei feinerem Staub und einer geringen Beladung. Er begründet dies damit, dass bei einem eingesteckten Tauchrohr die Sekundärströmung einen längeren Weg außen um das Rohr zurücklegen muss. Hierbei wird ein großer Teil des Staubes bereits aus der Sekundärströmung geschleudert [3].

Messungen von Trefz (Abbildung 7) bestätigen diese Annahme und zeigen, dass bei einer Einstecktiefe von zehn Prozent der Gesamthöhe über 80 Prozent des Staubes in der Sekundärströmung herausgetrennt werden, bevor diese den Tauchrohr Austritt erreicht [8].

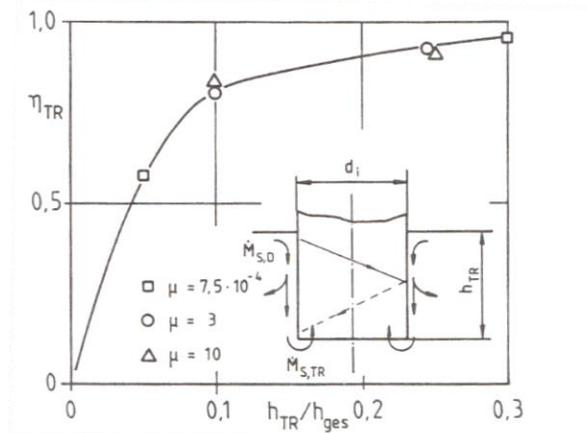


Abbildung 7: Abscheidegrad der Sekundärströmung (hier:  $\eta_{TR}$ ) in Abhängigkeit der normierten Tauchrohrtiefe (hier:  $h_{TR}/h_{ges}$ )  
(Abbildung entnommen aus [8])

Eine Alternative nach Trefz und Muschelknautz ist es, auch für die Sekundärströmung am Deckel eine Grenzpartikelgröße zu berechnen. Dies soll verhindern, dass bei der Berechnung die Abscheideleistung bei einer minimalen Tauchrohrtiefe maximal wird. Ab einer Tauchrohrtiefe von größer oder gleich  $0,25 \cdot h_i$ , also der gedachten Zylinderhöhe bis zum Tauchrohr, wird diese Berechnung allerdings überflüssig [8], [9].

Dass bei einer Tauchrohrtiefe größer null der Abscheidegrad in der Realität steigt, liegt an der Strömung auf der Außenfläche des Tauchrohres. Um vom Deckel des Zyklons zum Gasauslass zu gelangen, muss die Sekundärströmung zunächst die eingesteckte Länge des Tauchrohres axial überwinden. Durch die Wirbelströmung im Zyklon gerät dabei auch die Grenzschichtströmung in Rotation und windet sich so außen um das Tauchrohr. Hierbei steigt die Umfangsgeschwindigkeit bei größer werdender Tauchrohrtiefe, da hier ein größerer Impulsaustausch zwischen der Strömung im Zyklon und der Sekundärströmung am Tauchrohr stattfindet. Hierdurch können Partikel aus der Grenzschichtströmung zur Hauptströmung hin ausbrechen und der Abscheidegrad steigt bei immer höherer Tauchrohrtiefe. Trotzdem gilt das bisherige Ergebnis weiterhin: Bei sinkenden Tauchrohrradius verringert sich auch der Grenzpartikeldurchmesser in der Hauptströmung, wodurch die Abscheideleistung steigt (Vergleich Kapitel 4.1 und 4.2). Somit lässt sich daraus schließen, dass bei einer bestimmten Tiefe die Abscheidung am effektivsten erfolgen muss [10].

Der VDI Wärmeatlas [5] berechnet einen vereinfachten separaten Grenzpartikel für die Tauchrohrströmung (Sekundärströmung) [5]:

$$\eta_{TR}(h_t) = 0,0105 \cdot \arctan\left(\frac{35h_t}{h}\right) \quad (13)$$

Der Formel für den Abscheidegrad wurde für einen speziellen Zyklon ermittelt, gilt aber als Näherung für andere Zykclone.

Der Abscheidegrad der Sekundärströmung wird anschließend zusammen mit dem Fraktionsabscheidegrad und der Abscheidung durch die Grenzbeladung zu einem Gesamtabseidegrad verrechnet [5]:

$$\eta_{ges} = \left(1 - \frac{\dot{V}_{Sek}}{\dot{V}}\right) \cdot \left[1 - \frac{\mu_G}{\mu_e} + \frac{\mu_G}{\mu_e} \cdot \eta_F\right] + \frac{\dot{V}_{Sek}}{\dot{V}} \cdot \left[1 - \frac{\mu_D}{\mu_e} + \frac{\mu_D}{\mu_e} \cdot \eta_{TR}\right] \quad (14)$$

$\mu_G$  steht hierbei für die Grenzstaubbeladung der Hauptströmung,  $\mu_D$  für die Grenzbeladung in der Sekundärströmung und  $\mu_e$  für die Eintrittsbeladung. Es gilt:

$$\frac{\mu_D}{\mu_G} = 6 \text{ für } \mu_e \geq 6 \text{ und } \mu_D = \mu_e \text{ für } \mu_e < 6 \cdot \mu_G$$

Der folgende, von Trefz [8] entwickelte Ansatz, ermöglicht die Bestimmung der optimalen Tauchrohrtiefe:

$$h_{TR\ opt} = 2d_i \left(\frac{v_g}{d_i u_i}\right)^{0,2} \left(1 + \frac{d_i \eta_L}{(\rho_s - \rho_L) d_s^2 u_i}\right) \quad (15)$$

Wie in Formel 15 zu sehen ist, ist zunächst der Grenzpartikeldurchmesser zu berechnen. Somit muss eine plausible Tauchrohrtiefe gewählt und damit der Grenzpartikeldurchmesser und die ideale Tauchrohrtiefe ermittelt werden. Weicht dieser von der gewählten Einstecktiefe ab, wird mit dem errechneten Ideal-Wert erneut ein Grenzpartikeldurchmesser und somit eine neue ideale Tauchrohrtiefe berechnet. Um einen geeigneten Wert zu erhalten, genügen in der Regel zwei Iterationsschritte [8].

Durch Messungen von Trefz konnte herausgefunden werden, dass der Anteil des Sekundärstroms am Gesamtstrom über den Radius gesehen nicht konstant bleibt, sondern mit sinkendem Radius steigt. Die Grenzströmung am Deckel gewinnt zum Tauchrohr hin immer mehr an Volumen. Aufschlussreich ist, dass sich bei fehlendem Tauchrohr bis zu 17 Prozent des Gesamtvolumens im Sekundärstrom befinden (Abbildung 8). Muschelknautz geht in seiner Berechnung davon aus, dass etwa zehn Prozent des Volumens über den Deckel direkt ins Tauchrohr fließen. Dies berücksichtigt er, indem er bei der Radialgeschwindigkeit mit einem Faktor von 0,9 beim Volumenstrom rechnet. Die Messungen von Trefz zeigen hierzu eine Differenz von sieben Prozent bei fehlendem Tauchrohr. Das zeigt, dass der Anteil, welcher in den Sekundärstrom übergeht, nicht konstant ist. Bei fehlendem Tauchrohr werden circa 10 bis 15 Prozent mehr Strömungsvolumen in der Sekundärluft beobachtet [8], [9].

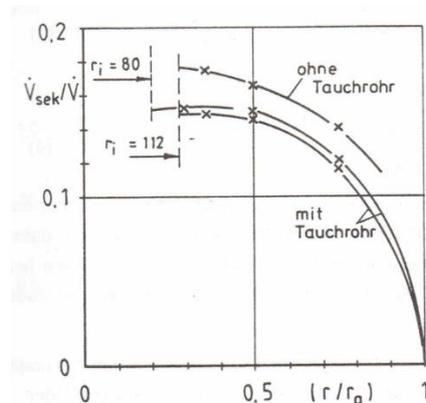


Abbildung 8: Normierter Sekundärstromanteil (hier:  $\dot{V}_{sek}/\dot{V}$ ) in Abhängigkeit des normierten Radius (hier  $r/r_a$ ), gemessen mit und ohne Tauchrohr (Abbildung entnommen aus [8])

Zu untersuchen wäre, ob sich der Anteil bei unterschiedlichen Tauchrohtiefen ändert. Könnte man hier einen Zusammenhang finden, ließen sich die Berechnungen von Muschelknautz dahingehend ergänzen, dass nicht davon ausgegangen wird, dass zehn Prozent des Volumens in Sekundärströmung übergehen. Man könnte den Anteil der Sekundärströmung und damit auch den Faktor 0,9 in Abhängigkeit von der Tauchrohtiefe angeben und gegebenenfalls hierüber die Abweichung zwischen Theorie und Praxis verringern. Diese Annahme ist jedoch an dieser Stelle rein hypothetisch, da Messungen zur Abhängigkeit von Tauchrohtiefe und Anteil der Grenzströmung fehlen.

## 5 Fazit

Es kann festgehalten werden, dass es durchaus Möglichkeiten gibt, die Berechnung von Muschelknautz weiter zu optimieren und realen Versuchsergebnissen näher zu kommen. Trefz hat hier wichtige Erkenntnisse bei der Sekundärströmung gefunden.

Bei der experimentellen Untersuchung des Modells konnte die Differenz zwischen Versuch und Berechnung der Kurve ‚Abscheidegrad-Tauchrohtiefe‘ nicht eliminiert werden. Jedoch wurden die Einflüsse der einzelnen Parameter untersucht und so konnte beispielsweise festgestellt werden, welche Parameter Einfluss auf die Abhängigkeit zwischen Tauchrohtiefe und Abscheidegrad besitzen.

Ein ähnliches Ergebnis hat die direkte Untersuchung der Berechnung nach Muschelknautz ergeben. Zwar konnten hier mögliche Minima der Funktion gefunden werden, jedoch lagen diese alle weit außerhalb der Geometrie des betrachteten Zyklons. So wurde bei der Grenzwertbetrachtung erneut der Schluss gezogen, dass auch bei einer Analyse der Berechnung der Abscheidegrad bei einer Tauchrohtiefe von null optimal ist.

Um die Abweichungen zwischen Experimenten und dem Modell von Muschelknautz zu eliminieren, spielt besonders die Sekundärströmung eine wichtige Rolle.

Das vom SPOTSeven Lab erstellte Programm [11] kann beispielsweise so angepasst werden, dass zum einen der Abscheidegrad für die Tauchrohrströmung (Sekundärströmung) berechnet wird und beim Gesamtabscheidegrad eingefügt wird. Die bisherige Berechnungsprogrammierung kann soweit bestehen bleiben und müsste um Formel 13 erweitert werden. Die berechneten Ergebnisse des Programms müssten dann gemeinsam nach Formel 14 zum Gesamtabscheidegrad zusammengefügt und ausgegeben werden. Der Sekundärstromanteil kann zunächst mit 10% angenommen werden.

Zum anderen kann die ideale Tauchrohrtiefe in das Programm integriert werden. Die Berechnung müsste um Formel 15 ergänzt werden. So muss die bisherige Programmberechnung in das iterative Verfahren zur Bestimmung der idealen Tauchrohrtiefe integriert werden. Zunächst wird also die voreingestellte Tauchrohrtiefe beibehalten, um einen Abscheidegrad zu ermitteln. Hiermit wird die ideale Tauchrohrtiefe ermittelt und die gesamte Berechnung erneut mit der neu ermittelten Einstecktiefe vollzogen. Mit einer Schleife kann so die Berechnung dreimal durchlaufen werden, um eine geeignete ideale Tauchrohrtiefe zu ermitteln. Durch eine Ausgabe der jeweiligen Abscheidegrade könnte herausgefunden werden, wie groß der Einfluss der Tauchrohrtiefe auf den Abscheidegrad ist. Es sollte geprüft werden, ob die Ergebnisse des Programms hierdurch Versuchen oder Simulation näher kommen.

Vielversprechend scheint auch eine Untersuchung des Sekundärstromanteils am Gesamtvolumenstrom in Abhängigkeit von der Tauchrohrtiefe. Hierzu müssten Simulationen oder im Idealfall Messreihen durchgeführt werden. Würde hier ein Zusammenhang gefunden werden, könnte die Formel für den Grenzpartikeldurchmesser leicht angepasst werden und der Faktor 0,9 für den Volumenstrom, welcher die Sekundärströmung bei Muschelknautz berücksichtigt, könnte in Abhängigkeit der Tauchrohrtiefe angegeben werden.

Auch andere Modelle, wie die von Mothes, sollten in Hinblick auf die Tauchrohrtiefen-Problematik untersucht werden, um zu vergleichen, wie andere Modelle das Problem lösen, beziehungsweise wieso das Problem hier gar nicht erst auftritt.

## Quellen

- [1] Hoffmann AC, Stein LE (2008) Gas cyclones and swirl tubes. Principles, design and operation, 2. Aufl. Springer, Berlin
- [2] Löffler F (1988) Staubabscheiden. Thieme, Stuttgart
- [3] Muschelknautz E (1972) Die Berechnung von Zyklonabscheidern für Gase. Chemie Ingenieur Technik 44 (Nr. 1-2): S. 63–71
- [4] Muschelknautz E, Brunner K (1967) Untersuchungen an Zyklonen. Chemie Ing. Techn. 39 (Nr. 9-10): S. 531–538
- [5] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.) (2013) VDI-Wärmeatlas. 11. Aufl. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin
- [6] Brauer H (Hrsg) (1996) Additiver Umweltschutz: Behandlung von Abluft und Abgasen. Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik; Band. 3. Springer, Berlin
- [7] Robel H, Weiß S (Hrsg) (1985) Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden. Mechanisches Trennen in fluider Phase, 1. Aufl. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim
- [8] Trefz M (1992) Die verschiedenen Abscheidvorgänge im höher und hoch beladenen Gaszyklon unter besonderer Berücksichtigung der Sekundärströmung. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 1992. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 3, Band 295. VDI-Verlag, Düsseldorf
- [9] Lorenz T (1994) Heißgasentstaubung mit Zyklonen. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 3, Verfahrenstechnik, Band 366. VDI-Verlag, Düsseldorf
- [10] Hillers M (2009) Berechnungsmodelle für Zyklonabscheider. Vorstellung, Vergleich und Beurteilung von Abscheidmodellen zur Zyklonauslegung. VDM-Verlag Müller, Saarbrücken
- [11] Bartz-Beielstein T, Stork J, Zaefferer M (SPOTSSeven Lab), Cran-Package: „SPOT“ – Sequential Parameter Optimization Toolbox, Version 2.0.3, <https://cran.r-project.org/web/packages/SPOT/index.html>, Funktion funCyclone {SPOT}, <http://127.0.0.1:24775/library/SPOT/html/funCyclone.html>, letzter Zugriff: 02. September 2018

## Formelzeichen

A	Querschnittsfläche
$A_R$	Gesamte Wandfläche
$A_w$	Sedimentationsfläche
$A_Z$	Zylinderfläche unterm Tauchrohr
b	Breite des Einlaufs
D	Parameter zur Beschreibung der Steigung der Fraktionsabscheidegrad-Kurve
d	Durchmesser
$d_e^*$	Grenzpartikel für die Grenzbeladung
$d_s$	Grenzpartikeldurchmesser
$F_A$	Auftriebskraft
$F_F$	Zentrifugalkraft

$F_Z$	Zentripetalkraft
$h$	Höhe (ohne Index: Gesamthöhe des Zyklons)
$h_c$	Höhe des Konus
$h_i$	Höhe unter dem Tauchrohr (Gesamthöhe abzüglich der Tauchrohrtiefe)
$m$	Masse
$\Delta p$	Druckverlust
$Re_R$	Reynoldszahl
$r$	Radius
$r_d$	Fallrohrradius
$r_m$	Mittlerer Radius
$u$	Umfangsgeschwindigkeit
$v$	Geschwindigkeit
$v_{ax}$	Axialgeschwindigkeit
$v_r$	Radialgeschwindigkeit
$\dot{V}$	Volumenstrom
$\alpha$	Einschnürungsbeiwert
$\eta_e$	Abscheidegrad nach der Grenzbeladungshypothese
$\eta_F$	Fraktionsabscheidegrad
$\eta_{ges}$	Gesamtabscheidegrad
$\eta_L$	Dynamische Viskosität des Fluids
$\eta_{TR}$	Tauchrohrabscheidegrad
$\lambda$	Reibbeiwert
$\lambda_L$	Strömungsabhängiger Reibungsbeiwert
$\mu_e$	Eintrittsbeladung
$\mu_G$	Grenzbeladung
$v_g$	Kinematische Viskosität
$\rho_L$	Dichte des Fluids
$\rho_S$	Dichte des Staubs

## Indizes:

a	Auf Höhe des Außendurchmessers
e	Auf Höhe des Einlaufs
i	Auf Höhe des Tauchrohrdurchmessers

---

## **Kontakt/Impressum**

Diese Veröffentlichungen erscheinen im Rahmen der Schriftenreihe "Ciplus". Alle Veröffentlichungen dieser Reihe können unter

<https://cos.bibl.th-koeln.de/home>  
abgerufen werden.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Datum der Veröffentlichung: 08.09.2018

## **Herausgeber / Editorship**

Prof. Dr. Thomas Bartz-Beielstein,  
Prof. Dr. Wolfgang Konen,  
Prof. Dr. Boris Naujoks,  
Prof. Dr. Horst Stenzel  
Institute of Computer Science,  
Faculty of Computer Science and Engineering Science,  
TH Köln,  
Steinmüllerallee 1,  
51643 Gummersbach  
url: [www.ciplus-research.de](http://www.ciplus-research.de)

## **Schriftleitung und Ansprechpartner/ Contact editor's office**

Prof. Dr. Thomas Bartz-Beielstein,  
Institute of Computer Science,  
Faculty of Computer Science and Engineering Science,  
TH Köln,  
Steinmüllerallee 1, 51643 Gummersbach  
phone: +49 2261 8196 6391  
url: <http://www.spotseven.de>  
eMail: [thomas.bartz-beielstein@th-koeln.de](mailto:thomas.bartz-beielstein@th-koeln.de)

ISSN (online) 2194-2870

**Technology  
Arts Sciences  
TH Köln**

