



Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik

Prof. Dr.-Ing. Damir Pecornik

# **Abscheidung von Partikeln mit Hilfe einer durch Drallrohre erzeugten Drallströmung**

## **Studienarbeit**

**vorgelegt von:**

Alexandra HOF und Ingo FALK

Mannheim

Mai 2004

**Aufgabensteller:** Prof. Dr.-Ing. Damir Pecornik

**Betreuer:** Dipl.-Ing. (FH) Alexander Weber



## Erklärung

Wir versichern, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Mannheim, den 17. Mai 2004

Alexandra HOF

Ingo FALK



## Vorwort

Diese Studienarbeit wurde am Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik (ATF) der Fachhochschule Mannheim, Hochschule für Technik und Gestaltung verwirklicht. Das Institut gehört zum Fachbereich Maschinenbau und betreut dort die Vorlesungen der Fächer Thermodynamik und Fluidmechanik sowie die strömungstechnischen Laborübungen für die Fachbereiche Maschinenbau und Verfahrenstechnik. Darüber hinaus wird Forschung und wissenschaftliche Beratung auf den Gebieten der angewandten Thermo- und Fluidodynamik und der numerischen Strömungssimulation betrieben.

Für diese Aufgaben stehen dem Institut ein Windkanal und ein umfangreich ausgestattetes Strömungslabor zur Verfügung. In diesem Strömungslabor konnten alle im Rahmen des Projektes erforderlichen Versuche und Messungen an einer eigens zu diesem Zweck errichteten Versuchsanlage durchgeführt werden. Neben der Auswertung und Aufbereitung der im Labor erfassten Messdaten wurde auch die Erzeugung der notwendigen grafischen Darstellungen und CAD-Konstruktionen weitestgehend mit Hilfe der im Institut ATF vorhanden Computerausstattung vorgenommen. Bei der wissenschaftlichen Bewertung konnte auf die hier vorgefundene Auswahl an Studien-, Diplomarbeiten und Literaturmaterial zurückgegriffen werden.

Unser Dank gilt den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. (FH) Helmut Zimmermann für die fachliche Leitung des Projektes, Herrn Alexander Weber für die inhaltliche Betreuung der Studienarbeit und nicht zuletzt Herrn Josef Häusler für die praktische Hilfe bei der Durchführung der Messungen und Versuche. Weiterhin danken wir dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Damir Pecornik sowie Herrn Dipl.-Ing. (FH) Franz Krutzler, die stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Mannheim, im Mai 2004

Alexandra HOF, Ingo FALK



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Versuchsaufbau .....</b>	<b>13</b>
2.1	Beschreibung der Luftführung .....	13
2.2	Messung und Voreinstellung der Strömungsgeschwindigkeit .....	16
2.2.1	<i>Funktionsprinzip der Einlaufdüse .....</i>	<i>16</i>
2.2.2	<i>Berechnung der einzustellenden Druckwerte an der Düse .....</i>	<i>17</i>
2.3	Zugabe der Partikel zum Luftstrom .....	19
2.3.1	<i>Partikeldosierung .....</i>	<i>19</i>
2.3.2	<i>Aufbau und Wirkungsweise der Dosierrinne .....</i>	<i>19</i>
2.3.3	<i>Aufbau und Wirkungsweise der Zellenradschleuse.....</i>	<i>20</i>
2.4	Austragung der Partikel – das Drallprinzip .....	22
2.5	Strömungswiderstand des Drallrohr-Abscheiders .....	30
2.5.1	<i>Bereich von Ebene 0 über Ebene 1 hinweg:.....</i>	<i>33</i>
2.5.2	<i>Ebene 2:.....</i>	<i>34</i>
2.5.3	<i>Bereich zwischen Ebene 2 und 3:.....</i>	<i>35</i>
2.5.4	<i>Ebene 3:.....</i>	<i>36</i>
2.5.5	<i>Bereich zwischen den Ebenen 4 und 5:.....</i>	<i>37</i>
2.5.6	<i>Drallrohr-Abscheider insgesamt:.....</i>	<i>38</i>
2.6	Abscheidung der Restpartikel nach dem Drallrohr-Abscheider .....	40
2.6.1	<i>Funktionsweise des Abscheidezyklons .....</i>	<i>40</i>
2.6.2	<i>Probleme mit dem Abscheidezyklon während der Versuche .....</i>	<i>43</i>
<b>3</b>	<b>Vorbereitende Messungen .....</b>	<b>44</b>
3.1	Aufnahme des Geschwindigkeitsprofils der Einlaufströmung .....	44
3.2	Beurteilung des Geschwindigkeitsprofils der Einlaufströmung .....	47
3.3	Messung des Gesamtdruckverlustes über dem Drallrohr-Abscheider.....	49
3.4	Auswertung der Druckverlustmessung – Berechnung des Drallanteils .....	51



<b>4</b>	<b>Durchführung der Messungen nach Norm .....</b>	<b>55</b>
4.1	Messung bei mittlerer Partikelkörnung .....	55
4.2	Messung bei grober Partikelkörnung .....	61
4.3	Messung bei feiner Partikelkörnung .....	66
<b>5</b>	<b>Auswertung der Messungen nach Norm .....</b>	<b>75</b>
5.1	Abscheidegrad der Partikel mittlerer Körnung .....	75
5.2	Abscheidegrad der Partikel grober Körnung .....	79
5.3	Abscheidegrad der Partikel feiner Körnung .....	81
<b>6</b>	<b>Weiterführende Versuche und Messungen .....</b>	<b>85</b>
6.1	Einzelversuche bei geringerer Partikelbeladung .....	85
6.1.1	<i>Geänderte Zugabezeit der Partikelbeladung .....</i>	<i>85</i>
6.1.2	<i>Abscheidegrade bei mittlerer Körnung .....</i>	<i>88</i>
6.2	Einzelversuche nach Veränderung des Austrittsrohres .....	90
6.2.1	<i>Veränderung des Austrittsrohres .....</i>	<i>90</i>
6.2.2	<i>Abscheidegrad bei geändertem Austritt (mittlere Körnung) .....</i>	<i>93</i>
6.2.3	<i>Abscheidegrad bei feinem, frischem Granulat .....</i>	<i>95</i>
6.2.4	<i>Abscheidegrad bei feinem, gebrauchtem Granulat .....</i>	<i>96</i>
6.3	Aufnahme des Drallprofils im Drallrohr-Abscheider .....	98
<b>7</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>107</b>
7.1	Beurteilung der Skalierbarkeit des Konstruktionsprinzips .....	107
7.2	Konstruktive Verbesserungsmöglichkeiten am Drallrohr-Abscheider .....	109
7.3	Ausblick .....	112



<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>114</b>
8.1	Druckverlustmessung Reihe 1 .....	114
8.2	Druckverlustmessung Reihe 2 .....	115
8.3	Aufnahme des Geschwindigkeitsprofils bei 40 m/s .....	116
8.4	Aufnahme des Geschwindigkeitsprofils bei 20 m/s .....	117
8.5	Prüfung nach Norm, mittlere Körnung .....	118
8.6	Prüfung nach Norm, grobe Körnung.....	119
8.7	Prüfung nach Norm, feine Körnung .....	120
8.8	Messwerte bei geringerem Beladeverhältnis.....	121
8.9	Messwerte nach Verlängerung des Austrittsrohres .....	122
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>123</b>



## Formelverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beziehung	Erklärung
$D_N$	$m$		Nenndurchmesser der Rohrleitung
$\zeta$	1		Gesamt-Widerstandskoeffizient
$d_P$	$m$		Korndurchmesser
$\mu$	1	$\mu = \frac{\dot{m}_P}{\dot{m}_F}$	Massenverhältnis der Gutbeladung
$c, c_D$	$m \cdot s^{-1}$		Nennströmungsgeschwindigkeit in der Rohrleitung
$p_D$	$Pa$		absoluter statischer Druck an der Einlaufdüse
$p_1$	$Pa$		absoluter statischer Druck vor dem Drallrohr-Abscheider
$p_2$	$Pa$		absoluter statischer Druck nach dem Drallrohr-Abscheider
$\alpha_D$	1		Düsenfaktor
$\dot{m}, \dot{m}_F$	$kg \cdot s^{-1}$		Massenstrom des Fluids
$\rho, \rho_F$	$kg \cdot m^{-3}$		Dichte des Fluids
$A, A_N$	$m^2$	$A_N = \frac{\pi}{4} \cdot D_N^2$	durchströmte Querschnittsfläche
$p_0 \dots p_n$	$Pa$		Druck im Messpunkt 0...n, allgemein
$c_0 \dots c_n$	$m \cdot s^{-1}$		Strömungsgeschwindigkeit im Messpunkt 0...n, allgemein
$z_0 \dots z_n$	$m$		geodätische Höhe des Messp. 0...n
$g$	$m \cdot s^{-2}$	$g = 9,81 m \cdot s^{-2}$	Gravitationsbeschleunigung
$\Delta p_{dyn}$	$Pa$		Differenz des dynamischen Druckanteils
$\rho_{tr}, \rho_{f(L)}$	$kg \cdot m^{-3}$		Dichte der Luft (trocken, feucht)
$p_a, p_A, p_i$	$Pa$		absoluter Luftdruck der Umgebung
$R, R_i$	$\frac{Pa \cdot m^3}{kg \cdot K}$	$R_i = 287 \frac{Pa \cdot m^3}{kg \cdot K}$	Gaskonstante der Luft als Idealgas
$T$	$K$	$T_{0^\circ C} = 273,15 K$	Absoluttemperatur
$\varphi_a, \varphi_A$	1, % r.F.		rel. Luftfeuchtigkeit der Umgebung



Formelzeichen	Einheit	Beziehung	Erklärung	
$p_s$	$Pa$	$p_A(\varphi_A = 1) = p_s$	Sättigungs- (Dampf-) Druck der Luft	
$t, t_A$	$^{\circ}C$		Lufttemperatur der Umgebung	
$F_z$	$Pa$		Zentrifugalkraft auf ein Teilchen in der Drallströmung	
$F_s$	$N$		Schleppkraft auf ein Teilchen in der Strömung	
$\rho_P$	$kg \cdot m^{-3}$		Dichte des Kornes (Partikel)	
$r_i$	$m$		Radius des Austrittsrohres	
$v_u$	$m \cdot s^{-1}$		Umfangsgeschwindigkeit der Drallströmung	
$u_i$	$m \cdot s^{-1}$		$u_i = v_u(r = r_i)$	Umfangsgeschwindigkeit am Radius des Austrittsrohres
$\zeta_w$	$1$		Widerstandsbeiwert für $v_i$	
$v_r$	$m \cdot s^{-1}$		$v_i = -v_r(r \leq r_i)$	Radiale Komponente der Geschwindigkeit des Fluids in der Drallströmung
$v_i$	$m \cdot s^{-1}$	Radialgeschwindigkeit des Fluids an der Mündung des Austrittsrohres		
$Re_s$	$1$	Reynoldszahl für die Radialströmung		
$\bar{\eta}$	$Pa \cdot s$		mittlere dynamische Viskosität des Fluids	
$\Delta p_R$	$Pa$		reibungsbedingter Druckabfall	
$\Delta p_F$	$Pa$		Druckabfall durch Formwiderstand	
$\Delta p_V$	$Pa$		Gesamtdruckverlust	
$\zeta_F$	$1$		Formwiderstandsbeiwert	
$c_m$	$m \cdot s^{-1}$		mittlere Strömungsgeschwindigkeit im durchströmten Teilquerschnitt	
$\lambda$	$1$		Reibungskoeffizient	
$L$	$m$		Länge des durchströmten Teilstücks	
$D$	$m$		Durchmesser des durchströmten Teilquerschnitts	



Formelzeichen	Einheit	Beziehung	Erklärung
$\dot{V}_m$	$m^3 \cdot s^{-1}$		mittlerer Volumenstrom im durchströmten Teilquerschnitt
$n$	1		Anzahl der Teilquerschnitte
$\nu$	$m^2 \cdot s^{-1}$		Kinematische Viskosität der Luft
$\frac{d}{k}$	1		Rauhigkeitsverhältnis der Wandung
Re	1		Reynoldszahl für die herrschenden Strömungsverhältnisse
$p_{ges}$	Pa	$p_{ges} = p_{stat} + \Delta p_{dyn}$	Gesamtdruck am Manometer
$p_{stat}$	Pa		statischer Druckanteil
$\Delta p_{stat}$	Pa	$p_{stat} = p_A + \Delta p_{stat}$	Differenz des statischen Druckanteils
$\Delta p_D$	Pa		Druckdifferenz über der Einlaufdüse
$\Delta p_{I-II}, \Delta p_{1-2}$	Pa	$\Delta p_{I-II} = p_1 - p_2$	Druckdifferenz über dem Drallrohr-Abscheider
$\Delta p_{Dr}$	Pa		reibungsbedingter Druckabfall in Folge der Drallströmung
$\Delta t$	s		Prüfzeit
$\dot{V}_{sec}$	$m^3 \cdot s^{-1}$		Volumenstrom bezüglich 1 Sekunde
$\dot{V}_{min}$	$m^3 / min$		Volumenstrom bezüglich 1 Minute
$\dot{m}_{Luft}$	$kg / min$		Massenstrom der Luft
$\dot{m}_{Partikel}$	$kg / min$		Massenstrom der Partikel
$\delta, \delta_{korr}$	°		Azimutwinkel der Drallströmung bezogen auf die Bahntangente
$\alpha, \alpha_p$	°	$\alpha(-\vec{c}) = 0$	Richtungswinkel der Drallströmung entgegen der Hauptströmungsrichtung
$V_{ges}$	$m \cdot s^{-1}$		Betrag der Strömungsgeschwindigkeit im Messpunkt



# 1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studienarbeit hatte zum Gegenstand, eine durch Drallrohre erzeugte Drallströmung zur Abscheidung von Partikeln aus einem Fluidstrom einzusetzen und den Grad der Abscheidung bei der Variation verschiedener Parameter sowie die Zuverlässigkeit des Konstruktionsprinzips gemäß der einschlägigen Normen zu untersuchen. Die erfolgreiche Prüfung durfte mit einiger Sicherheit als Nachweis der Skalierbarkeit der Apparatedimensionen angesehen werden, da es sich hier um das exakt um die Hälfte und zwar auf einen Nenneinlassdurchmesser von  $D_N = 125 \text{ mm}$  (DN 125) verkleinerte Modell eines bereits erprobten Drallrohr-Abscheiders mit DN 250 handelte. Eine Besonderheit des neuen Versuchsapparates lag in der Ausführung des Gehäusemantels aus transparentem Plexiglas, welcher eine visuelle Überwachung der Vorgänge im Innern bei der Abscheidung möglich machen sollte.

Blickrichtung für den Einsatz des Abscheiders war in erster Linie die Entwicklung eines Abgas-Funkenfängers für Verbrennungsmotoren in explosionsgefährdeten Bereichen, gründete sich unsere Arbeit doch direkt auf eine entsprechende Diplomarbeit von Herrn Weber<sup>[1]</sup>, der auch unser Projekt über weite Strecken betreut hat und nach dessen Angaben bereits vor Beginn unserer Versuche der Drallrohr-Abscheider für den Versuch angefertigt sowie die Versuchsanlage vollständig aufgebaut worden war. Somit waren sowohl die anzuwendende Norm für Verbrennungsmotoren (DIN EN 1834-1) als auch die für die Versuchsreihen maßgebenden Kenngrößen vorbestimmt, sodass zunächst das folgende Versuchsprogramm geplant war:

1. Geschwindigkeitsprofilmessung in der Zulaufstrecke für die Geschwindigkeiten  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  zum Nachweis eines vollständig ausgebildeten Strömungsprofils im Bereich zwischen Partikelzugabe und Drallrohr-Abscheider
2. Druckverlustmessung am Drallrohr-Abscheider für den gesamten Geschwindigkeitsbereich im Hinblick darauf, dass der Druckverlustkoeffizient einen Grenzwert von  $\zeta = 5,0$  nicht überschreiten darf



3. Messungen nach DIN EN 1834-1 <sup>[2]</sup> bei der Austragung von Polystyrolgranulat in den 3 Körnungsstufen „fein“:  $d_p \leq 0,22 \text{ mm}$ , „mittel“:  $0,22 \text{ mm} \leq d_p \leq 0,4 \text{ mm}$  sowie „grob“:  $0,4 \text{ mm} \leq d_p \leq 0,6 \text{ mm}$  bei einem Massenverhältnis der Prüfpartikel zum Fluid Luft von  $\mu = 1 \div 100$ , jeweils für einen Bereich der Nennströmungsgeschwindigkeit von  $c = 20 \dots 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , gestuft in Schritten von jeweils  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; Nachweis der Reproduzierbarkeit der Messungen
4. Veränderung des Massenverhältnisses der Gutbeladung auf  $\mu = 1 \div 200$  für mittleres Granulat und Durchführung einer Messreihe wie in 3.
5. Untersuchung zum Verhalten des abgelagerten Beladegutes bei einem Verbleiben im Abscheider und Anreicherung über mehrere Zyklen, d.h. Simulation des Dauereinsatzes
6. Konstruktive Verbesserung des Drallrohr-Abscheiders hinsichtlich angereicherter Beladegutmenge mit dem Ziel der Verlängerung der Einsatzdauer bis zur Reinigung

Während die Kontrollmessungen gemäß der Punkte 1. und 2. erfolgreich durchgeführt und ausgewertet worden waren, zeigten bereits die ersten Messungen nach dem Normprüfverfahren, dass der nach DIN EN 1834-1 <sup>[3]</sup> geforderte Abscheidegrad von 99 % für mittlere Korngröße mit dem Abscheider in dieser Ausführung nicht zu erreichen war. Deshalb wurden konstruktive Änderungen am Apparat vorgenommen und dieser nach erfolgreichen Vorversuchen erneut der Prüfung nach Norm unterzogen.

Trotzdem erfüllte der geprüfte Drallrohr-Abscheider die Anforderungen der Norm nicht. Zwar schien ein Abscheidegrad von 99 % für mittleres Korn durchaus noch im Rahmen des Erreichbaren, doch die Werte von 100 % für grobe sowie 95 % für feine Körnung wurden z.T. erheblich unterschritten. Aus diesem Grund kamen die Planungen, wie in 4. und 5. genannt, in dieser Form nicht zur Ausführung, sondern es wurde in der noch verbleibenden Zeit auf verschiedenem Wege versucht, die Abscheideleistung zu verbessern bzw. die Ursachen für die ernüchternden Ergebnisse zu ergründen.



Gleichwohl konnten dabei wertvolle Erkenntnisse für eine Weiterentwicklung des Funktionsprinzips gewonnen und viel versprechende Ansätze zur konstruktiven Verbesserung erarbeitet werden. Diesem Thema haben wir im Rahmen der Diskussion ein eigenständiges Kapitel gewidmet.

Am Ende der Arbeit befindet sich ein ausführliches Verzeichnis der verwendeten Literatur- und Informationsquellen, auf welche sich die Quellenangaben unter jedem Kapitel, wie z.B. die folgenden, beziehen.

[<sup>1</sup>] WEBER: *Neuentwicklung eines Funkenfängers*; ebd.

[<sup>2</sup>] vgl. DIN EN 1834-1 S. 12 Kapitel 6.4.1

[<sup>3</sup>] vgl. DIN EN 1834-1 S. 7 Tabelle 2



## 2 Grundlagen und Versuchsaufbau

### 2.1 Beschreibung der Luftführung

Die gesamte Versuchsanordnung zeigt die Abbildung 2.1 auf der übernächsten Seite. Für die Messungen konnte die Anlage durch ein saugseitig betriebenes Gebläse mit einem regelbaren Luftstrom beaufschlagt werden. Diese Luft wurde über eine Einlaufdüse zugeführt und durchlief bis zum Drallrohr-Abscheider eine gerade Rohrstrecke mit dem Nennquerschnitt des zu untersuchenden Drallrohr-Abscheiders von  $125\text{ mm}$  Durchmesser.

Unmittelbar hinter der Einlaufdüse befand sich die erste Druckentnahmestelle  $p_D$ , die aus 4 gleichmäßig am Umfang verteilten und durch eine Ringleitung verbundenen Bohrungen mit je  $1\text{ mm}$  Durchmesser bestand. Ihr Zweck, sowie die Funktionsweise der Einlaufdüse sind im nachfolgenden Kapitel näher erläutert.

Ebenfalls auf dieser Einlaufstrecke und zwar etwa  $2\text{ m}$  vor dem Eintritt in den Drallrohr-Abscheider wurden dem Luftstrom die Prüfpartikel zudosiert. Diese Aufgabe übernahm eine so genannte Zellenradschleuse, eine Fördereinrichtung, die dadurch charakterisiert ist, dass der zu beladende Luftstrom nicht merklich beeinflusst wird. Im Kapitel 2.3 wird eingehend auf die Funktion der Zellenradschleuse eingegangen.

Die mit Partikeln beladene Luft trat nun axial in den Drallrohr-Abscheider ein und an dessen Ende in gleicher Richtung und auf derselben Achse wieder aus, um anschließend eine weitere gerade Rohrstrecke zu durchlaufen. Jeweils ca.  $0,5\text{ m}$  vor, sowie etwa  $1,2\text{ m}$  hinter dem Abscheider waren zwei weitere Druckentnahmestellen angebracht, die in ihrer Ausführung dem Messpunkt an der Einlaufdüse glichen. Sie dienten dazu, den statischen Druck im Rohr aufzunehmen und somit eine laufende Kontrolle des Druckniveaus im Luftstrom und vor allem des Druckabfalls über dem Drallrohr-Abscheider zu ermöglichen.



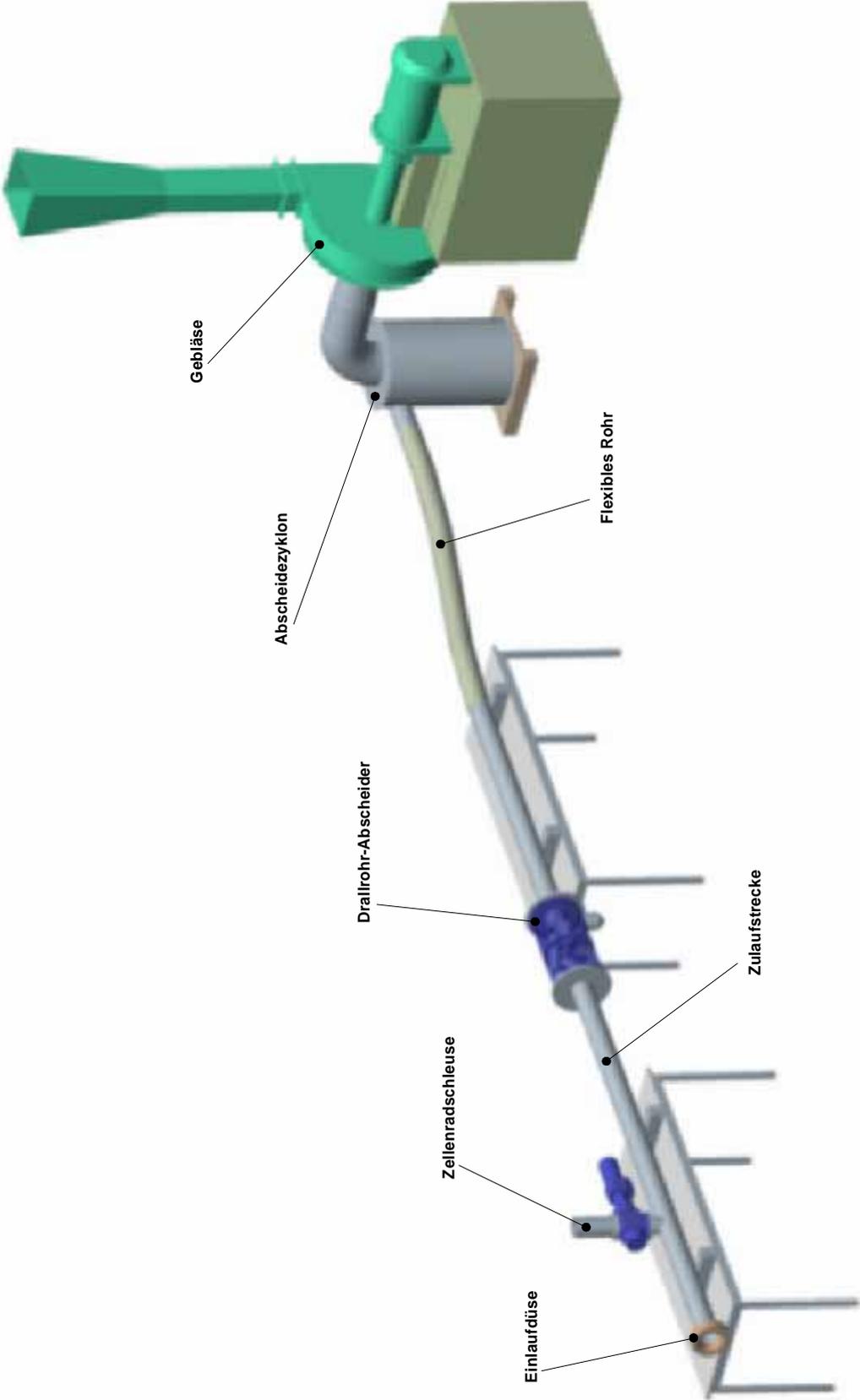
Zu diesem Zweck waren die Entnahmestellen mit Betz-Präzisionsmanometern verbunden und zwar in der folgenden Weise: vor dem Abscheider zur Bestimmung des absoluten (Unter-) Druckes  $p_1$  und nach dem Abscheider zur Ermittlung der Druckdifferenz zwischen den Messpunkten vor und nach dem Drallrohr-Abscheider ( $p_1$  und  $p_2$ ).

Im weiteren Verlauf wurde die Luft über eine flexible Rohrleitung mit Nennquerschnitt (DN 125) einem Abscheidezyklon zugeleitet, weil dessen Eintrittsrohr gegenüber dem starren Rohr am Ausgang des Drallrohr-Abscheiders aus konstruktionsbedingten Gründen leicht axial und in der Höhe versetzt angeordnet war. Mit dem Aufbau und Wirkprinzip des Abscheidezyklons beschäftigt sich das Kapitel 2.6 detailliert, jedoch ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass der Austritt aus dem Zyklon im Querschnitt DN 250 ausgeführt war und zwar so, dass die Achse des nachfolgenden Gebläses in der Draufsicht senkrecht zur Achse der übrigen Rohrstrecke verlief.

Das Gebläse mit dem Nennquerschnitt DN 250 wurde über einen leistungsstarken Gleichstrommotor angetrieben, dessen Drehzahl von Null bis auf etwa 4000 Umdrehungen pro Minute stufenlos eingestellt werden konnte. Das ermöglichte einen Betrieb der Anlage mit der geforderten maximalen Strömungsgeschwindigkeit von  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  trotz der zu erwartenden Strömungsverluste im Drallrohr-Abscheider sowie im Abscheidezyklon. Ein Diffusor gab den vom Gebläse erzeugten Luftstrom in vertikaler Richtung wieder an die Umgebung ab.



### Gesamtanordnung der Versuchsanlage



## 2.2 Messung und Voreinstellung der Strömungsgeschwindigkeit

### 2.2.1 Funktionsprinzip der Einlaufdüse

Um den notwendigen Luftstrom für den Betrieb der Versuchsanlage zu erzeugen, muss die stehende Umgebungsluft möglichst verlustarm auf die Strömungsgeschwindigkeit beschleunigt werden. Dies geschieht am Eintritt in die Rohrleitung. Bei einer allmählichen Rohrverengung treten jedoch wesentlich geringere Reibungs- und Ablöseverluste auf als bei sprungartigen Querschnittsänderungen. Die gewählte Einlaufdüse sorgt nun für einen praktisch verlustfreien Eintritt der Luft in das Rohr und damit für eine allmähliche Ausbildung der reibungsbehafteten Rohrströmung. Dies drückt sich in einem Düsenfaktor von  $\alpha_D = 0,99$  aus und entspricht einer gut abgerundeten Düse, also einem Druckverlust von 1%.

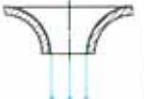
Form der Ausflußöffnung	Geschwindigkeitsbeiwert $\varphi$	Kontraktionszahl $\alpha$	Ausflußzahl $\mu$
 scharfkantig	0,97	0,61...0,64	0,59...0,62
 gut abgerundete Düse	0,97...0,99	= 1	0,97...0,99

Abbildung 2.2.1: Verschiedene Formen von Düsen

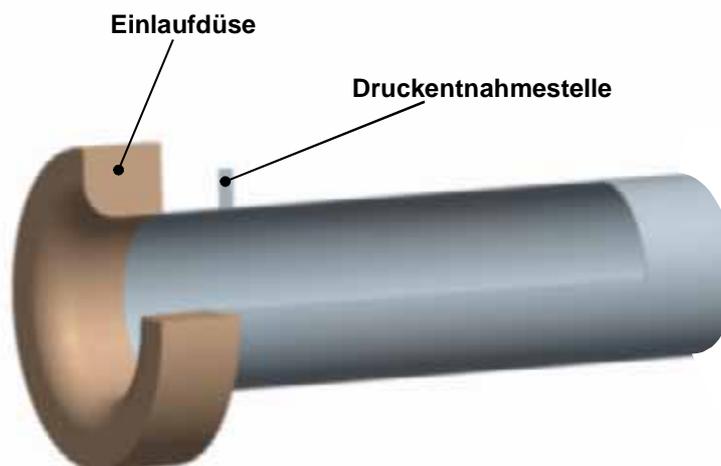


Abbildung 2.2.2: Eingebaute Einlaufdüse



Ist der Düsenfaktor bekannt, kann die erhaltene Strömungsgeschwindigkeit anhand der zur Beschleunigung des Luftstromes notwendigen Energie berechnet werden. Diese Energieumwandlung hat nämlich einen bestimmten Druckabfall zur Folge, welcher hinter der Einlaufdüse (Siehe Abbildung 2.2.2) gemessen werden kann.

## 2.2.2 Berechnung der einzustellenden Druckwerte an der Düse

Ansatz ist die Betrachtung des Energieverlaufs in Rohrleitungssystemen. Es gilt die Energiebilanzgleichung von Bernoulli, nach der die Summe von Druck-, kinetischer und potentieller Energie in jeder Querschnittsebene entlang einer Rohrstrecke konstant bleiben muss (vgl. auch Bohl <sup>[1]</sup>). Nimmt man nun den Mündungsquerschnitt der Einlaufdüse als Ebene 0, den Rohrquerschnitt unmittelbar hinter der Düse als Ebene 1 an, gelangt man zu folgender Darstellung der Gleichung:

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{c_0^2}{2} + g \cdot z_0 = \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 = \textit{konstant}$$

Die Bernoulli-Gleichung ist also vom Energieerhaltungssatz abgeleitet, wobei bereits durch die Masse  $m$  dividiert wurde, denn es gilt:

$$\dot{m} = \textit{konstant}$$

Aus der Bilanzgleichung resultiert der Anteil für die kinetische Energie, die der Luft zu ihrer Beschleunigung zugeführt werden muss, wenn die Höhen  $z_0$  und  $z_1$  als gleich angenommen werden und die statischen Drücke  $p_0$  und  $p_1$  bestimmt werden können. Dann entspricht der gemessene Druckabfall energiemäßig genau dem Geschwindigkeitsanstieg von Null auf die jeweilige Strömungsgeschwindigkeit, also der dynamischen Druckdifferenz, geteilt durch den Düsenfaktor  $\alpha_D$  der Einlaufdüse. Da nur die Strömungsgeschwindigkeit für die einzelnen Versuche (z.B.  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) angegeben ist, muss daraus der einzustellende statische Druck hinter der Düse ermittelt werden:

$$\Delta p_{0-1} = \frac{c_1^2 \cdot \rho_f}{2 \cdot \alpha_D} \quad \text{mit:} \quad \rho_{tr} = \frac{p_a}{R_i \cdot T} \quad \text{und daraus:} \quad \rho_f = \rho_{tr} \cdot \left( 1 - 0,377 \cdot \varphi_a \cdot \frac{p_s}{p_a} \right)$$



Für die weiteren Berechnungen werden die folgenden konstanten Umgebungsbedingungen angenommen:

- Lufttemperatur:  $t_A = 20 \text{ °C}$
- Luftdruck:  $p_A = 101400 \text{ Pa}$
- Luftfeuchtigkeit:  $\varphi_A = 50 \% \text{ r.F.}$

Beispielrechnung für 20 m/s:

$$\underline{\underline{\rho_{tr}}} = \frac{101400 \text{ Pa}}{287,20 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 293,15 \text{ K}} = \underline{\underline{1,204 \text{ kg / m}^3}}$$

$$\underline{\underline{\rho_f}} = 1,204 \text{ kg / m}^3 \cdot \left( 1 - 0,377 \cdot 0,5 \cdot \frac{2337 \text{ Pa}}{101400 \text{ Pa}} \right) = \underline{\underline{1,199 \text{ kg / m}^3}}$$

$$\underline{\underline{\Delta p_{0-1}}} = \frac{(20 \text{ m / s})^2 \cdot 1,199 \text{ kg / m}^3}{2 \cdot 0,99} = \underline{\underline{242 \text{ Pa}}}$$

Strömungsgeschwindigkeit in m/s	Druckdifferenz in Pa	Druckdifferenz in mbar
20	242,2	2,4
25	378,5	3,8
30	545,0	5,4
35	741,8	7,4
40	968,9	9,7

Tabelle 2.2.1: Tabelle der einzustellenden Druckdifferenzen

Probleme bei der Einstellung der Strömungsgeschwindigkeit :

Der einzustellende Druck für die maximal geforderte Strömungsgeschwindigkeit konnte nicht ganz erreicht werden, da der vorhandene Ventilator die dafür notwendige Drehzahl bzw. Leistung nicht aufbringen konnte.

[<sup>1</sup>] BOHL: *Technische Strömungslehre* S.58 f.



## 2.3 Zugabe der Partikel zum Luftstrom

### 2.3.1 Partikeldosierung

Wie schon mehrfach erwähnt, sollte für die Prüfung des Drallrohr-Abscheiders die DIN EN 1834-1 <sup>[1]</sup> zur Anwendung kommen. Diese Norm sieht vor, dass die Prüfpartikel in gleichmäßigen Mengen im Zeitraum von 1 Minute der Ansaugluft bzw. dem Abgasstrom zugegeben werden. Die Prüfpartikel dürfen nicht entflammbar sein und müssen eine Dichte kleiner als  $0,9 \text{ g/cm}^3$  haben. Die Prüfung soll mit Partikeln der Größe  $0,1 \text{ mm}$ ,  $0,2 \text{ mm}$  und  $0,5 \text{ mm}$  durchgeführt werden. Abweichend von der Norm wurden allerdings folgende Größenklassen gewählt:  $< 0,22 \text{ mm}$ ,  $0,22 \dots 0,4 \text{ mm}$  sowie  $0,4 \dots 0,6 \text{ mm}$ . Die Partikelzugabe erfolgte durch eine Zellenradschleuse mit vorgeschalteter Dosierrinne.

### 2.3.2 Aufbau und Wirkungsweise der Dosierrinne

Allgemein :

Die Dosierrinne dient zur kontinuierlichen Zugabe der Prüfpartikel in die Zellenradschleuse. Bei der Dosierrinne handelt es sich um einen unterkritisch abgestimmten, geradlinigen Schwingungen ausführenden Vibrationstisch auf der Grundlage eines federgekoppelten Zweimassensystems mit elektromagnetischem Antrieb, auf dem eine Blechrinne befestigt ist. Über einen Trichter werden die Prüfpartikel auf die einseitig geschlossene Rinne befördert.

Dosierrinne :

Die Rinne wird mit einer regelbaren Frequenz zu Schwingungen angeregt, wodurch die Prüfpartikel in Richtung Zellenradschleuse transportiert werden. Die Anpassung der Schwingfrequenz und dadurch der Transportgeschwindigkeit der Prüfpartikel ermöglicht ein Frequenzgeber. Zudem kann der Abstand zwischen der Rinne und dem Trichter durch ein Verstellrad verändert und so die kontinuierliche Fördermenge geregelt werden. Beides zusammen machte den Partikelstrom über einen weiten Bereich einstellbar.

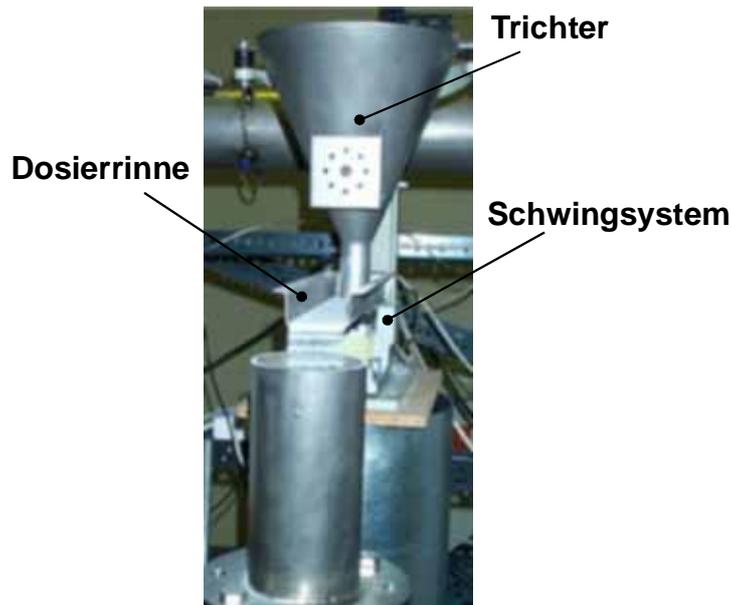


Abbildung 2.3.1: Dosierrinne mit Trichter

### 2.3.3 Aufbau und Wirkungsweise der Zellenradschleuse

Allgemein :

Zellenradschleusen dienen zur kontinuierlichen Förderung von Schüttgut für pneumatische Förderanlagen. In unserem Fall diente die Schleuse zur stetigen Zugabe der Prüfpartikel unter der Bedingung, dass der Luftvolumenstrom kaum erhöht oder gemindert wird. Nach Siegel <sup>[2]</sup> gibt es zwei verschiedenen Arten von Zellenradschleusen, die Austragsschleuse und die Durchblassschleuse. In unserer Versuchsreihe haben wir eine Austragsschleuse benutzt, wobei die Dosierung der Prüfpartikel erst ca. 7 D nach der Einlaufdüse erfolgte.

Wirkungsweise der verwendeten Zellenradschleuse:

In einer Zellenradschleuse dreht sich ein Zellenrad mit halbkreisförmigen Taschen in einem zylindrischen Gehäuse um eine waagrechte Welle. Die Schleuse ist stirnseitig gekapselt und schließt das Rohrleitungssystem mit dem Zellenrad zur Umgebung hin ab. Somit können die Prüfpartikel nur über die Umfangsrichtung des Rades zugeführt werden.

Die Prüfpartikel fallen in die Taschen des sich drehenden Zellenrades und lagern sich dort während einer halben Umdrehung ab. Danach fließen die Partikel bei einer Austragschleuse nach unten. In Umfangsrichtung dichten Stege ständig den Spalt zwischen Zellenrad und Gehäuse ab. Diese Abdichtung ist berührungslos und mit einer Labyrinthdichtung vergleichbar. Infolge des Spiels zwischen Zellenrad und Gehäuse und durch die Druckdifferenz  $p_1 - p_0$  strömt jedoch trotzdem in Umfangsrichtung und an den Stirnseiten auch radial eine gewisse Schleusenleckluft von oben nach unten. Zudem muss über die Taschen des Zellenrades permanent ein unerwünschter Lufteintrag in das System in Kauf genommen werden. Dieser ist allerdings auf Grund der Anordnung der Taschen konstant und sollte die Messungen nicht nennenswert beeinflusst haben.

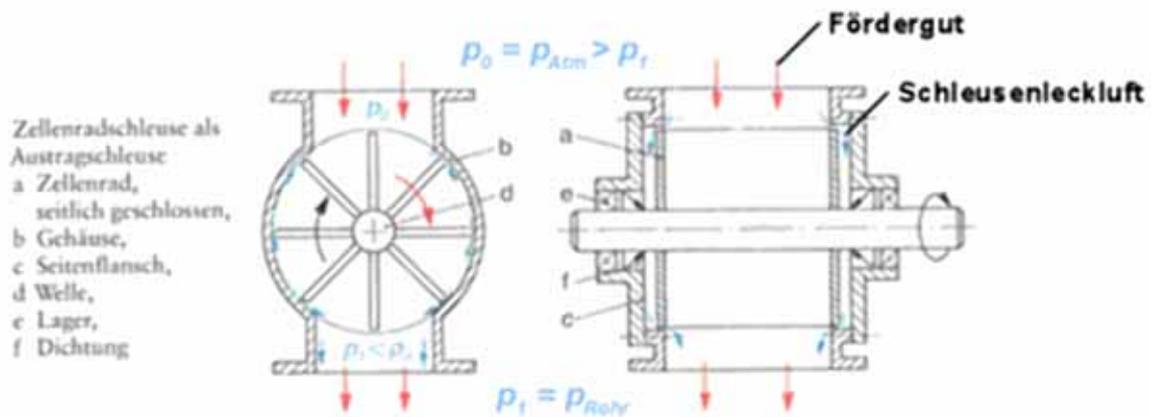


Abbildung 2.3.2: Aufbau der Zellenradschleuse als Austragschleuse

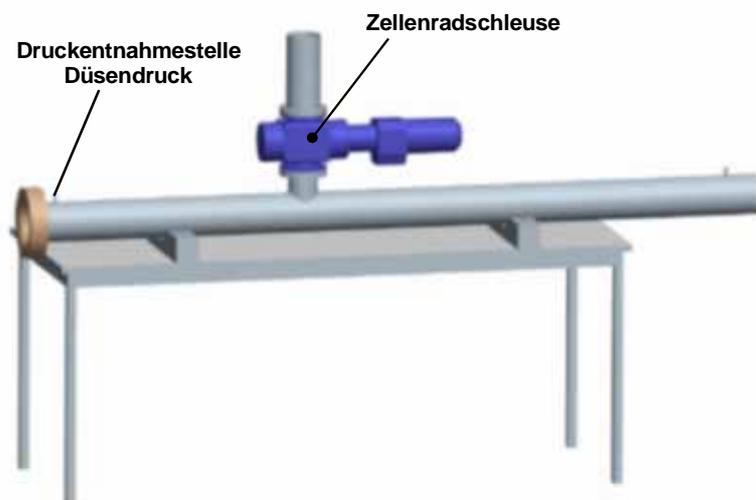


Abbildung 2.3.3: Anordnung der Zellenradschleuse



Vor- und Nachteile der Zellenradschleuse :

Wie bei Siegel <sup>[3]</sup> beschrieben, haben derartige Zellenräder, die besonders bei der pneumatischen Förderung in der Kunststoffindustrie angewendet werden, den besten Befüllungsgrad und werden für kohäsive <sup>(1)</sup> Schüttgüter eingesetzt.

Durch die Schleusenleckluft kann der Luftvolumenstrom gemindert oder erhöht und zudem können die Prüfpartikel beim Ein- und Auslaufen aus der Schleuse behindert werden.

<sup>(1)</sup> ko|hä|siv <Adj.>: auf Kohäsion beruhend. → Kohäsion die, der innere Zusammenhalt; Kohäsionskräfte bewirken den Zusammenhalt von Atomen oder Molekülen gleicher Art.

<sup>[1]</sup> vgl. DIN EN 1834-1 S.7

<sup>[2]</sup> SIEGEL: *Pneumatische Förderung*; S.203 f.

<sup>[3]</sup> SIEGEL: *Pneumatische Förderung*; S.209 f.

## 2.4 Austragung der Partikel – das Drallprinzip

Die Trennung von Teilchen aus einem Fluidstrom heraus kann prinzipiell auf zwei verschiedene Arten erfolgen: durch rein mechanisches Zurückhalten der Partikel gegenüber dem strömenden Fluid mit Hilfe eines Siebfilters oder durch Abscheiden mittels einer auf die Teilchen wirkenden Kraft.

Zwar ist durch Siebung laut Siegel <sup>[1]</sup> eine praktisch hundertprozentige Trennung von Partikeln und Fluid realisierbar, jedoch muss dieser Erfolg mit mehr oder weniger großen Strömungsdruckverlusten erkaufte werden. Diese werden um so größer, je kleiner die Partikel sind, da einerseits die „Maschen“ des Siebfilters ja stets geringere Abmessungen aufzuweisen haben als die kleinsten zu filternden Teilchen, andererseits aber eben auch vom Fluid durchströmt werden müssen.



Zudem stellt sich im Verlauf der Siebung eine zunehmende „Verstopfung“ des Filters durch die zurückgehaltenen Partikel ein, was die Druckverluste noch ansteigen lässt. Schließlich ist gerade beim Einsatz eines solchen Siebfilters zur Abgasreinigung auf Grund der zu erwartenden Temperaturen die Auswahl an Werkstoffen stark eingeschränkt, was die Herstellungskosten in die Höhe treibt.

Unter den vorgenannten Gesichtspunkten erscheint es nur konsequent, überall da, wo die physikalischen Eigenschaften des Fluids hohe Anforderungen an durchströmten Bauteile stellen, mit Hilfe einer Kraft, die an den Teilchen angreift, diese aus dem Fluidstrom auszutragen und zwar möglichst ohne dass dem Strom dabei größere Mengen seiner kinetischen Energie entzogen werden müssen. Diese Fluideigenschaften liegen beispielsweise dann vor, wenn Rußpartikel aus einem Abgasstrom zurückgehalten werden sollen, etwa weil sie in Form von Funken eine Brandgefahr für die Umgebung darstellen können.

Neben der Einleitung der Austragungskraft durch Erzeugung eines elektrischen Feldes, worauf hier nicht näher eingegangen werden soll, besteht auch die Möglichkeit, die Kraft mittels einer Zentrifugalbeschleunigung aufzubringen. Dazu muss das mit Partikeln beladene Fluid in eine Rotationsbewegung, also in einen Drall versetzt werden.

Genauer gesagt muss im vorliegenden Fall der translatorisch verlaufende Fluidstrom auf eine kreis- bzw. schraubenlinienförmige Bahn umgelenkt werden um den Abscheider anschließend, nach Austragung der Partikel, wieder mehr oder weniger translatorisch zu verlassen.



Die Zusammenhänge, die bei der Trennung von Teilchen und Fluid berücksichtigt werden müssen, sind im Folgenden kurz genannt. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass sich diese Zusammenhänge äußerst komplex darstellen und eine erschöpfende Betrachtung den Umfang dieser Arbeit bei weitem übersteigen würde. Insbesondere muss hier auf eine analytisch-rechnerische Untersuchung verzichtet werden. Die folgende Abbildung zeigt die kinematischen Kenngrößen.

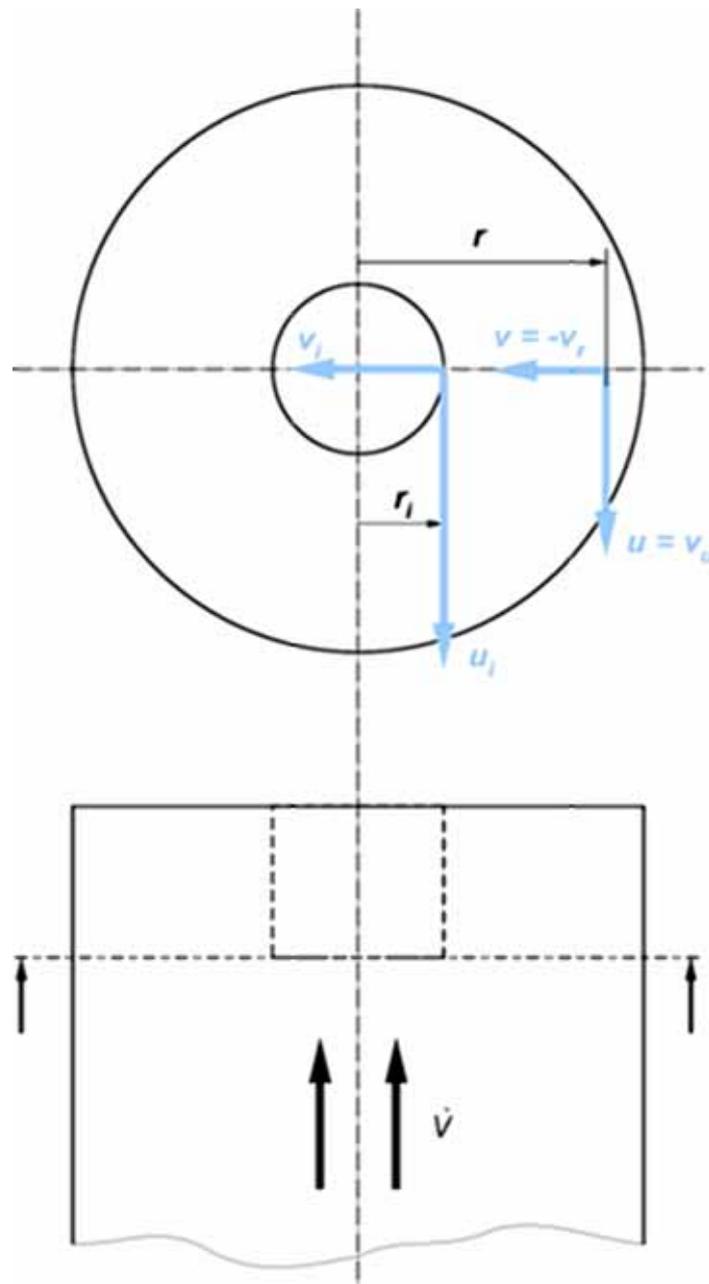


Abbildung 2.4.1: Geschwindigkeitskomponenten in der Mündungsebene



Die physikalischen Vorgänge, die hierbei zu beachten sind, sind analog denen, die auch für Abscheidezyklone maßgebend sind. Bei Siegel <sup>[2]</sup> wird dabei der Ansatz verfolgt, dass es im angenommenen Gleichgewichtszustand zwischen der auf die Partikel wirkenden Zentrifugalkraft  $F_z$  und der Schleppkraft  $F_s$  am äußeren Rand der Mündung des Austrittsrohres ein theoretisches Grenzkorn gibt, welches gerade noch abgeschieden wird. Die geometrische Form des Teilchens wird dabei ebenso vernachlässigt, wie die Dichte des strömenden Fluides gegenüber der Teilchendichte. Nun ist gemäß Abbildung 2.4.1:

$$F_z = \frac{\pi}{6} \cdot d_P^3 \cdot \rho_P \cdot \frac{u_i^2}{r_i} \quad (1)$$

und:

$$F_s = \zeta_w \frac{\rho_F}{2} \cdot v_i^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_P^2 \quad (2)$$

Der Widerstandsbeiwert für laminare Strömung (In radialer Richtung tritt keine turbulente Strömung auf!) errechnet sich zu:

$$\zeta_w = \frac{24}{\text{Re}_s} = \frac{24 \cdot \bar{\eta}}{\rho_F \cdot d_P \cdot \rho_F}$$

Nach Eliminierung von  $\zeta_w$  und Gleichsetzen von (1) und (2), gilt dann bei Siegel <sup>[2]</sup>:

$$d_P^* = \sqrt{18 \cdot \frac{v_i \cdot \bar{\eta} \cdot r_i}{\rho_P \cdot u_i^2}} \quad (3)$$

als theoretischer Korndurchmesser des kleinsten, gerade noch abgeschiedenen Partikels.



Betrachtet man die Formel (3) genauer, so fällt sofort auf, dass mit der Radialgeschwindigkeit  $v_i$  und der Umfangsgeschwindigkeit  $u_i$  zwei schwer zu ermittelnde Größen enthalten sind. Zwar wurden diese zu einem späteren Zeitpunkt an einer etwas anderen Stelle der Kammer mit Hilfe einer 5-Loch-Sonde messtechnisch bestimmt, es sei jedoch betont, dass eine lokale Messung noch keine allgemeingültige Aussage über den Grad der Partikelabscheidung der Apparatur zulässt, geschweige, dass etwa durch gezielte Veränderung eines Parameters eine vorausberechenbare Beeinflussung des Ergebnisses möglich wäre. Dazu wäre zumindest eine Untersuchung der Abhängigkeit der beiden genannten Geschwindigkeiten von den geometrischen Daten des Abscheiders notwendig, was vor allem wegen der laut Siegel<sup>[3]</sup> in diesem Bereich sehr steil abfallenden Kurve von  $u_i$  (siehe Abbildung) schwierig sein dürfte.

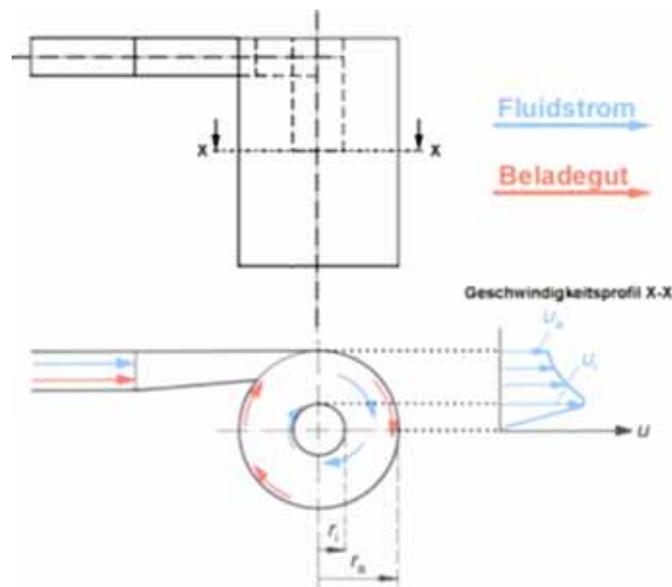


Abbildung 2.4.2: Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit bei Abscheidezyklonen

Darüber hinaus nennt die Arbeit von Kohlmann/Slowik/Hartke<sup>[3]</sup> noch weitere Einflussgrößen wie den Aufgabevolumenstrom, die Dichtedifferenz oder den Feststoffvolumenanteil. Im Rahmen des Kapitels 6.3 soll dennoch der Versuch unternommen werden, beispielhafte Kontrollrechnungen durchzuführen.

Der hier untersuchte Abscheider ist dadurch gekennzeichnet, dass die Erzeugung des Dralls durch vier Rohre erfolgt, die auf einem gemeinsamen Teilkreis von  $160\text{ mm}$  Durchmesser tangential zu einer Schraubenlinie mit einem Steigungswinkel von  $45^\circ$  angeordnet sind. Wie die Abbildung 2.4.2 zeigt, sind diese Drallrohre die einzigen Durchbrüche in der wie eine Trennwand wirkenden, runden Scheibe und stellen somit den einzig möglichen Strömungsweg des Fluids von der ersten in die zweite Kammer des Abscheiders dar.

Da im Laborversuch Luft als Fluid und Styropor-Granulat als Beladegut eingesetzt wurden, konnte der Mantel des Abscheiders sehr vorteilhaft aus Plexiglas gefertigt werden, sodass alle Vorgänge im Innern, soweit sichtbar, sehr gut zu beobachten waren.

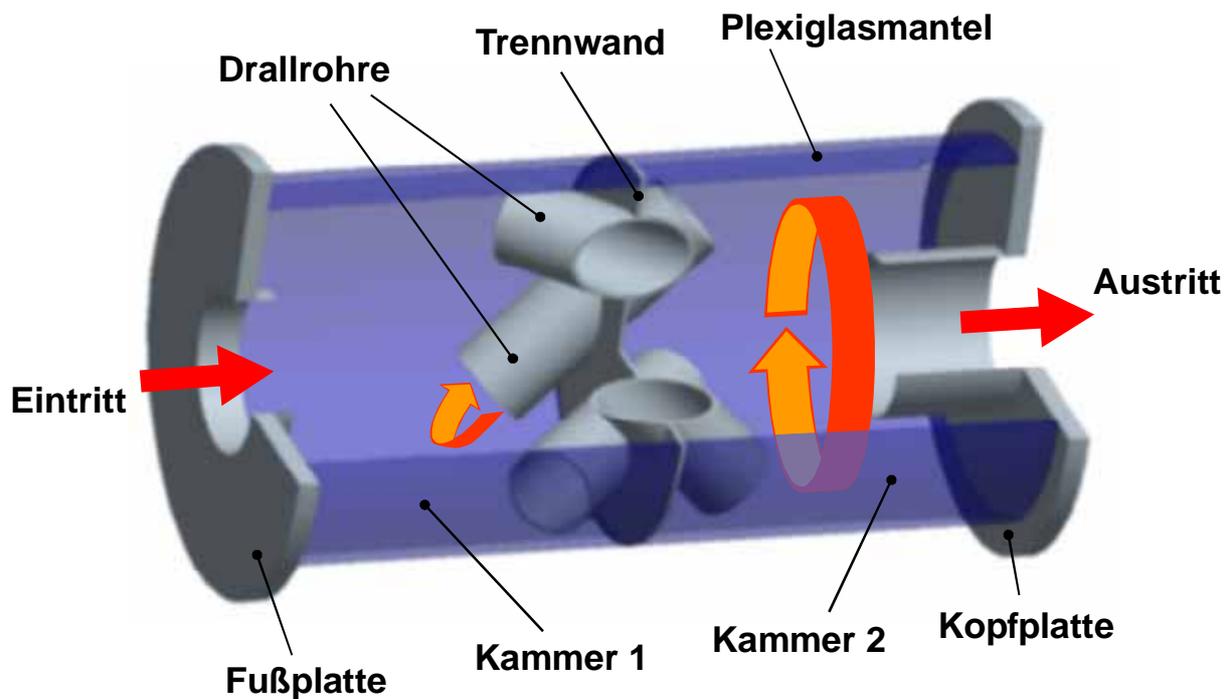


Abbildung 2.4.3: Schnittdarstellung des Drallrohr-Abscheiders



Das axial in die erste Kammer einströmende Fluid erfährt durch die plötzliche Querschnittserweiterung vom Nennquerschnitt auf den Querschnitt der Kammer eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit und des statischen Druckes. Die Gesamtenergie, die abzüglich der unvermeidlichen Reibungsverluste nach der Bernoulli-Gleichung erhalten bleiben muss, wird beim Eintritt in die Drallrohre dann unter weiterer Druckabnahme teilweise wieder in erhöhte kinetische Energie umgesetzt. Jedoch war auf Grund der Rückwirkung der Rohre schon in Kammer Eins eine deutliche Drallströmung zu verzeichnen.

In der zweiten Kammer bewegt sich der Fluidstrom zunächst auf einer schraubenlinienförmigen Bahn an der Außenwand entlang bis zur Kopfplatte des Abscheiders, um dort nach innen eingeschnürt zu werden. Anschließend strömt das Fluid auf einer entgegengesetzt steigenden Schraubenbahn am Austrittsrohr entlang zu dessen Öffnung und hinaus aus dem Drallrohr-Abscheider. Die Tatsache, dass die an sich zylindrisch ausgeführten Drallrohre mit ihrer Längsachse die angestrebte Schraubenlinie nur in einem Punkt, nämlich auf Höhe der Scheibe berühren, ist insofern von Bedeutung, als dass dadurch der erzeugte Drallstrom am Austritt aus den Rohren zusätzlich nach außen, also auf die Außenwand des Abscheiders gerichtet ist. Dadurch wird der Effekt der beiden entgegengesetzten Längsströmungen mit Strömungsumkehr an der Kopfplatte möglicherweise noch verstärkt.

Prinzipiell ging man bei der Konzeption des Abscheiders davon aus, dass die Partikel allmählich in Kammer Zwei auf einer Kreisbahn verharren bzw. sich im Laufe der Zeit nahe der Kopfplatte ablagern würden. Jedoch zeigten schon die ersten Versuche, dass die bereits zur Ruhe gekommenen Teilchen immer wieder vom Drallstrom aufgewirbelt und durch die dann offenbar kurzzeitig verminderte Zentrifugalwirkung mit in den Austritt aus dem Abscheider gerissen wurden. Das hatte inakzeptable Abscheidegrade zur Folge und hätte eine Fortsetzung des Versuches unsinnig erscheinen lassen.



Somit war eine Modifikation des Drallrohr-Abscheiders erforderlich, wobei sich unser Augenmerk vor allem auf eine möglichst rasche Entfernung der rotierenden bzw. sich ablagernden Partikel aus der Kammer richtete. Die Lösung fand sich in der Anbringung eines runden Auffanggefäßes am Umfang des Abscheidermantels, unmittelbar an dessen Kopfplatte (vgl. Abbildung 2.4.3).

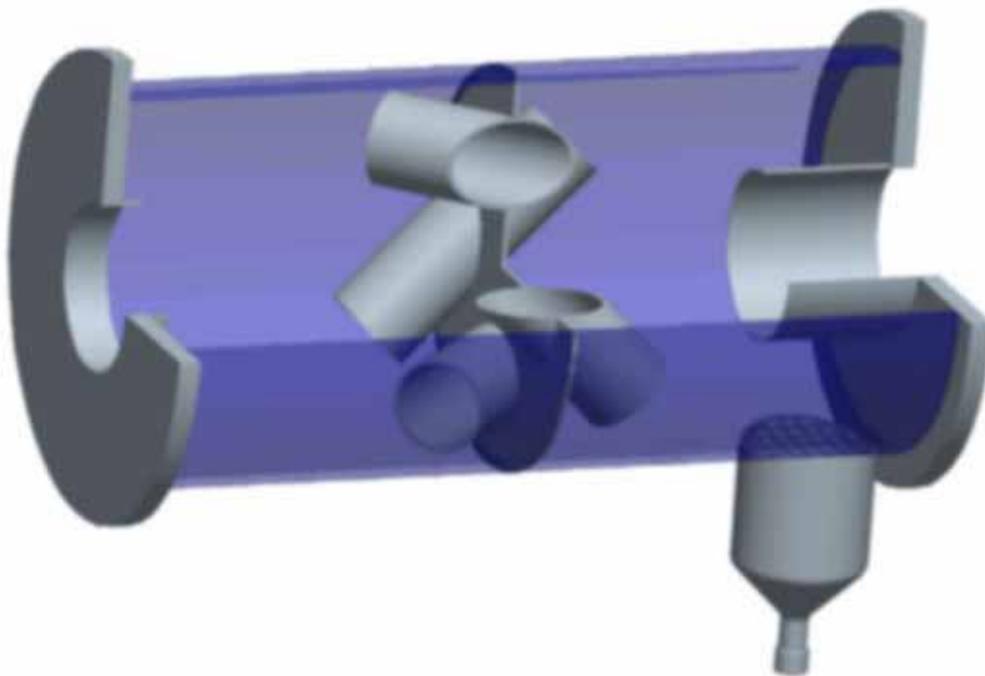


Abbildung 2.4.4: Modifizierter Drallrohr-Abscheider mit Auffanggefäß

Nach einigen Vorversuchen mit der modifizierten Apparatur wurden die Versuchsreihen wieder aufgenommen.

[<sup>1</sup>] SIEGEL: *Pneumatische Förderung* S. 251 f.

[<sup>2</sup>] SIEGEL: *Pneumatische Förderung* S. 246 ff.

[<sup>3</sup>] KOHLMANN / SLOWIK / HARTKE: *Die Steuerung der Abscheideleistung von Zyklonen im Betrieb* ebd.



## 2.5 Strömungswiderstand des Drallrohr-Abscheiders

Der vom Drallrohr-Funkenfänger verursachte Druckabfall im Fluidstrom wurde im Rahmen der Laborversuche für den gesamten geforderten Bereich der Strömungsgeschwindigkeiten exakt gemessen. Jedoch war zur konstruktiven Vorauslegung eine Abschätzung des zu erwartenden Druckverlustes sinnvoll und zwar sowohl für die niedrigste zu messende ( $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) und die maximal geforderte Strömungsgeschwindigkeit ( $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Allerdings ist hierbei der Anteil der Drallströmung (Umlenkung und Reibungsverluste) nur sehr schwer vorausberechenbar. Dieser musste zunächst unberücksichtigt bleiben und später als Differenz zwischen den berechneten und den gemessenen Werten bestimmt werden.

Zur Ermittlung des rechnerischen Druckabfalls ohne Drall wird der Drallrohr-Abscheider zweckmäßigerweise in Teilelemente zerlegt. Der zu erwartende Abfall des Druckes setzt sich dann jeweils aus dem Anteil der Rohrreibung  $\Delta p_R$  und dem Druckverlust durch Formwiderstand  $\Delta p_F$  zusammen:

$$\Delta p_V = \Delta p_R + \Delta p_F \quad (1)$$

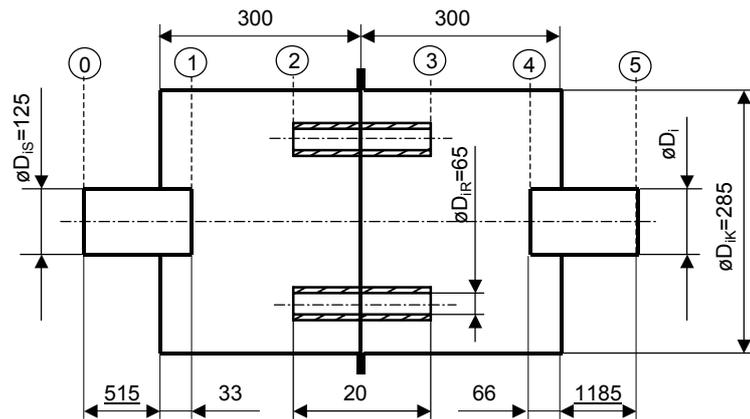
Dabei ist der Druckverlust durch einen Formwiderstand allgemein wie folgt definiert:

$$\Delta p_F = \zeta_F \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c_m^2 \quad (2)$$

und der Druckabfall durch Rohrreibung ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$\Delta p_R = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c_m^2 \quad (3)$$

Im Folgenden ist der Drallrohr-Abscheider zur Verdeutlichung des Rechenganges schematisch dargestellt.



$\varnothing D_{IS}$  = innerer Stützendurchmesser  
 $\varnothing D_{IR}$  = innerer Drallrohrdurchmesser  
 $\varnothing D_{IK}$  = innerer Kammerdurchmesser

Ebene 0 = Druckmessstelle vor dem Drallrohr-Abscheider  
 Ebene 5 = Druckmessstelle nach dem Drallrohr-Abscheider

Abbildung 2.5.1: schematische Darstellung des Drallrohr-Abscheiders

Zunächst müssen die in den Teilbereichen des Drallrohr-Abscheiders auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten berechnet werden. Ansatz hierfür soll ein über die gesamte Apparatur konstanter Volumenstrom sein, sodass sich die Strömungsgeschwindigkeit umgekehrt proportional zum jeweiligen Strömungsquerschnitt verhält:

$$c_m = \frac{\dot{V}_m}{A}$$

Da nur runde Querschnitte auftreten, gilt allgemein:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad \text{d.h.} \quad c_m = \frac{\dot{V}_m}{n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2}$$

Die konstanten Volumenströme werden nun auf den Nennquerschnitt, also auf den Querschnitt von Ein- bzw. Austrittsstutzen bezogen:

$$\text{Mit } \dot{V}_m = c_{mS} \cdot A_S \quad \text{wird dann} \quad \dot{V}_m = c_{mS} \cdot \frac{\pi}{4} D^2$$



Somit werden:

$$\dot{V}_{20} = 20 \frac{m}{s} \cdot \frac{\pi}{4} (0,125 m)^2 = \underline{\underline{0,245 \frac{m^3}{s}}} \quad \text{und} \quad \dot{V}_{40} = 40 \frac{m}{s} \cdot \frac{\pi}{4} (0,125 m)^2 = \underline{\underline{0,491 \frac{m^3}{s}}}$$

Für die Abscheider-Kammern ergeben sich daraus:

$$c_{mK20} = \frac{0,245 m^3}{\frac{\pi}{4} (0,285 m)^2 \cdot s} = \underline{\underline{3,847 \frac{m}{s}}} \quad \text{sowie} \quad c_{mK40} = \frac{0,491 m^3}{\frac{\pi}{4} (0,285 m)^2 \cdot s} = \underline{\underline{7,695 \frac{m}{s}}}$$

Entsprechend treten in den Drallrohren folgende Geschwindigkeiten auf:

$$c_{mD20} = \frac{0,245 m^3}{4 \cdot \frac{\pi}{4} (0,065 m)^2 \cdot s} = \underline{\underline{18,491 \frac{m}{s}}}; \quad c_{mD40} = \frac{0,491 m^3}{4 \cdot \frac{\pi}{4} (0,065 m)^2 \cdot s} = \underline{\underline{36,982 \frac{m}{s}}}$$

Die folgende Übersicht enthält die Zusammenfassung der Volumenströme und Geschwindigkeiten:

Teilelement	$20 m \cdot s^{-1}$	$40 m \cdot s^{-1}$
Gesamtvolumenstrom Drallrohr-Abscheider	$\dot{V}_{20} = 0,245 \frac{m^3}{s}$	$\dot{V}_{40} = 0,491 \frac{m^3}{s}$
Strömungsgeschwindigkeit Ein- / Austrittsstutzen	$c_{mS20} = 20 \frac{m}{s}$	$c_{mS40} = 40 \frac{m}{s}$
Strömungsgeschwindigkeit Abscheider-Kammern	$c_{mK20} = 3,847 \frac{m}{s}$	$c_{mK40} = 7,695 \frac{m}{s}$
Strömungsgeschwindigkeit Drallrohre	$c_{mD20} = 18,491 \frac{m}{s}$	$c_{mD40} = 36,982 \frac{m}{s}$

Tabelle 2.5.1: Kenngrößen in den Teilelementen



Für die weiteren Berechnungen werden die folgenden konstanten Umgebungsbedingungen angenommen bzw. wurden sie mit Hilfe einer Tabellenkalkulation bestimmt:

- Lufttemperatur:  $t_A = 20 \text{ °C}$
- Luftdruck:  $p_A = 101500 \text{ Pa}$
- Luftfeuchtigkeit:  $\varphi_A = 50\% \text{ r.F.}$
- Kinematische Viskosität des Fluids Luft:  $\nu = 1,508 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- Dichte der feuchten Luft:  $\rho_{fL} = 1,1882 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Damit ergeben sich gemäß den Formeln (1), (2) und (3) für die einzelnen Teilbereiche folgende Druckverluste:

### 2.5.1 Bereich von Ebene 0 über Ebene 1 hinweg:

Anzusetzen ist:  $\Delta p_V = \Delta p_R + \Delta p_F$

Für den jeweiligen Reibungsanteil:  $\Delta p_R = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho_{fL}}{2} \cdot c_{mS}^2$

$$\text{mit } Re_{0-1/20} = \frac{c_{mS20} \cdot D_S}{\nu} = \frac{20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,125 \text{ m}}{1,508 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \approx \underline{\underline{1,7 \cdot 10^5}}$$

$$\text{und } Re_{0-1/40} = \frac{c_{mS40} \cdot D_S}{\nu} = \frac{40 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,125 \text{ m}}{1,508 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \approx \underline{\underline{3,3 \cdot 10^5}}$$

für nahtlos gewalztes Rohr <sup>[1]</sup> mit  $\frac{d}{k} = \frac{125 \text{ mm}}{0,05 \text{ mm}} = 2500$

erhält man aus dem Lambda-Reynolds-Diagramm <sup>[2]</sup> für die Rohrreibungszahlen:

$$\lambda_{0-1/20} = 0,019 \quad \text{bzw.} \quad \lambda_{0-1/40} = 0,018$$



Somit wird: 
$$\Delta p_{R0-1/20} = 0,019 \cdot \frac{(515 + 33) \text{ mm}}{125 \text{ mm}} \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(20 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{20 \text{ Pa}}}$$

und: 
$$\Delta p_{R0-1/40} = 0,018 \cdot \frac{(515 + 33) \text{ mm}}{125 \text{ mm}} \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(40 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{75 \text{ Pa}}}$$

Für den Formwiderstand gilt nun: 
$$\Delta p_F = \zeta_F \cdot \frac{\rho_{fL}}{2} \cdot c_{mK}^2$$

Wobei 
$$\zeta_F = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2 = \left(\frac{D_2^2}{D_1^2} - 1\right)^2 = \left(\frac{285^2}{125^2} - 1\right)^2 = \underline{\underline{17,63}} \quad \text{ist.}$$

Daraus ergeben sich:

$$\Delta p_{F0-1/20} = 17,63 \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(3,847 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{155 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta p_{F0-1/40} = 17,63 \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(7,695 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{620 \text{ Pa}}}$$

und für die Gesamtdruckverluste im Bereich zwischen Ebene 0 und 1:

$$\Delta p_{V0-1/20} = (20 + 155) \text{ Pa} = \underline{\underline{175 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta p_{V0-1/40} = (75 + 620) \text{ Pa} = \underline{\underline{695 \text{ Pa}}}$$

## 2.5.2 Ebene 2:

Beim Eintritt der Strömung in die Drallrohre wirkt nur ein Formwiderstand:

$$\Delta p_V = \zeta_F \cdot \frac{\rho_{fL}}{2} \cdot c_{mD}^2$$



Setzt man für den Widerstandsbeiwert <sup>[3]</sup> eine Größe von  $\zeta_F = 1,0$  an, erhält man für die entsprechenden Druckverluste:

$$\Delta p_{V_{2/20}} = 1,0 \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(18,491 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{203 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta p_{V_{2/40}} = 1,0 \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(36,982 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{813 \text{ Pa}}}$$

### 2.5.3 Bereich zwischen Ebene 2 und 3:

Es muss ein Rohrreibungswiderstand berücksichtigt werden:

$$\Delta p_V = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho_{fl}}{2} \cdot c_{mD}^2$$

der sich bei den Reynoldszahlen:

$$Re_{2-3/20} = \frac{c_{mD20} \cdot D_D}{\nu} = \frac{18,491 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,065 \text{ m}}{1,508 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \approx \underline{\underline{8 \cdot 10^4}}$$

und

$$Re_{2-3/40} = \frac{c_{mD40} \cdot D_D}{\nu} = \frac{36,982 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,065 \text{ m}}{1,508 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \approx \underline{\underline{1,6 \cdot 10^5}}$$

einstellt.

Bei einem Rauigkeitsverhältnis von  $\frac{d}{k} = \frac{65 \text{ mm}}{0,05 \text{ mm}} = 1300$

führt dieser zu den Rauigkeitskoeffizienten <sup>[2]</sup>:

$$\lambda_{2-3/20} = 0,022 \quad \text{bzw.} \quad \lambda_{2-3/40} = 0,021$$



Daraus ergeben sich schließlich die Druckverluste:

$$\Delta p_{V_{2-3/20}} = 0,022 \cdot \frac{200 \text{ mm}}{65 \text{ mm}} \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(18,491 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{14 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta p_{V_{2-3/40}} = 0,021 \cdot \frac{200 \text{ mm}}{65 \text{ mm}} \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(36,982 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{53 \text{ Pa}}}$$

### 2.5.4 Ebene 3:

Der Austritt aus den Drallrohren ist wiederum mit einem Formwiderstand verbunden:

$$\Delta p_V = \zeta_F \cdot \frac{\rho_{fL}}{2} \cdot c_{mk}^2$$

Beim Widerstandsbeiwert ist zu beachten, dass ja insgesamt 4 Drallrohre gleichzeitig durchströmt werden, also ist:

$$\zeta_F = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2 = \left(\frac{D_K^2}{4 \cdot D_D^2} - 1\right)^2 = \left(\frac{285^2}{4 \cdot 65^2} - 1\right)^2 = \underline{\underline{14,49}}$$

Dies führt zu folgenden Druckverlusten:

$$\Delta p_{V_{3/20}} = 14,49 \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(3,847 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{127 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta p_{V_{3/40}} = 14,49 \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(7,695 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{510 \text{ Pa}}}$$



### 2.5.5 Bereich zwischen den Ebenen 4 und 5:

Der Druckverlust in diesem Bereich setzt sich wieder aus einem Anteil für die Reibung und einem Anteil für den Formwiderstand zusammen:

$$\Delta p_V = \Delta p_R + \Delta p_F$$

Für ersteren gilt: 
$$\Delta p_R = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho_{fl}}{2} \cdot c_{mS}^2$$

wobei die Kenngrößen denen aus dem Bereich am Eintritt in den Abscheider entsprechen:

$$Re_{4-5/20} = Re_{0-1/20} \approx \underline{\underline{1,7 \cdot 10^5}}$$

$$Re_{4-5/40} = Re_{0-1/40} \approx \underline{\underline{3,3 \cdot 10^5}}$$

Für 
$$\frac{d}{k} = \frac{125 \text{ mm}}{0,05 \text{ mm}} = 2500$$

sind demnach auch die Reibungskoeffizienten gleich:

$$\lambda_{4-5/20} = \lambda_{0-1/20} = 0,019 \quad \text{und} \quad \lambda_{4-5/40} = \lambda_{0-1/40} = 0,018$$

Es ist jedoch eine andere Länge anzusetzen:

$$\Delta p_{R4-5/20} = 0,019 \cdot \frac{(1185 + 66) \text{ mm}}{125 \text{ mm}} \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(20 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{45 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta p_{R4-5/40} = 0,018 \cdot \frac{(1185 + 66) \text{ mm}}{125 \text{ mm}} \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(40 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{171 \text{ Pa}}}$$

Der Formwiderstand errechnet sich aus: 
$$\Delta p_F = \zeta_F \cdot \frac{\rho_{fl}}{2} \cdot c_{mS}^2$$



Der entsprechende Widerstandsbeiwert <sup>[3]</sup> von  $\zeta_F = 1,0$  führt dann zu den Druckverlusten:

$$\Delta p_{V_{4-5/20}} = 1,0 \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(20 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{238 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta p_{V_{4-5/40}} = 1,0 \cdot \frac{1,1882 \text{ kg}}{2 \cdot \text{m}^3} \cdot \left(40 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \underline{\underline{951 \text{ Pa}}}$$

Die Gesamtdruckverluste im Bereich zwischen Ebene 4 und 5 betragen schließlich:

$$\Delta p_{V_{4-5/20}} = (45 + 238) \text{ Pa} = \underline{\underline{283 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta p_{V_{4-5/40}} = (171 + 951) \text{ Pa} = \underline{\underline{1122 \text{ Pa}}}$$

### 2.5.6 Drallrohr-Abscheider insgesamt:

Der Gesamtdruckverlust, der vom Abscheider für die beiden Strömungsgeschwindigkeiten mindestens, also ohne Berücksichtigung des Dralls zu erwarten war, ergibt sich aus der Summe der Einzeldruckverluste über den Teilbereichen:

Für eine Strömungsgeschwindigkeit im Nennquerschnitt von  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  also:

$$\Delta p_{V_{20}} = 175 \text{ Pa} + 203 \text{ Pa} + 14 \text{ Pa} + 127 \text{ Pa} + 283 \text{ Pa} = 802 \text{ Pa} \approx \underline{\underline{800 \text{ Pa}}}$$

sowie für  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ :

$$\Delta p_{V_{40}} = 695 \text{ Pa} + 813 \text{ Pa} + 53 \text{ Pa} + 510 \text{ Pa} + 1122 \text{ Pa} = 3193 \text{ Pa} \approx \underline{\underline{3200 \text{ Pa}}}$$



Abschließend kann der Druckverlustkoeffizient des gesamten Abscheiders ohne Drallanteil berechnet werden, wenn man die ermittelten Größen in die Gleichung (2) einsetzt und die Formel nach  $\zeta_V$  auflöst:

$$\Delta p_V = \zeta_V \cdot \frac{\rho_{fl}}{2} \cdot c_m^2 \Rightarrow \zeta_V = \frac{2 \cdot \Delta p_V}{\rho_{fl} \cdot c_m^2}$$

Es ist dann:

$$\zeta_{V20} = \frac{2 \cdot 800 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^2}{1,1882 \text{ kg} \cdot 20^2 \text{ m}^2} = \underline{\underline{3,37}} \quad \text{bzw.} \quad \zeta_{V40} = \frac{2 \cdot 3200 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^2}{1,1882 \text{ kg} \cdot 40^2 \text{ m}^2} = \underline{\underline{3,37}}$$

Die Größe der Strömungsgeschwindigkeit sollte demnach ohne Einfluss auf den Druckverlustkoeffizient geblieben sein.

[<sup>1</sup>] BOHL: *Technische Strömungslehre* S. 259 Tafel 15

[<sup>2</sup>] BOHL: *Technische Strömungslehre* S. 258 Tafel 14

[<sup>3</sup>] BOHL: *Technische Strömungslehre* S. 111 Bild 4.68 oben



## 2.6 Abscheidung der Restpartikel nach dem Drallrohr-Abscheider

### 2.6.1 Funktionsweise des Abscheidezyklons

Da Abscheidezyklone überwiegend im Bereich der Verfahrenstechnik eingesetzt werden, gehen die hier wiedergegebenen Erläuterungen im Wesentlichen auf entsprechende Vorlesungsunterlagen von Prof. Lohrengel <sup>[1]</sup> von der Fachhochschule Heilbronn zurück. Er gliedert die allgemeinen Grundvorgänge der Partikelabscheidung wie folgt:

1. Erzwingung unterschiedlicher Bahnlinien von Gas und Partikeln
2. Auffangen und Festhalten der Partikel
3. Entfernen der Partikel aus dem System

Vorgang beim Abscheidezyklon:

In einem Zyklon wird der partikelbeladene Luftstrom durch geeignete Strömungsführung in eine Rotationsbewegung versetzt. Dadurch wirken auf die Partikel Zentrifugalkräfte, die eine Bewegung der Teilchen radial nach außen zur Folge haben, durch welche die Partikel aus dem Luftstrom herausgeschleudert werden.

Aufbau und Wirkungsweise von Zyklonen:

Während bei Lohrengel <sup>[2]</sup> Zyklone meist einen Mantel besitzen, der sich nach unten konisch verjüngt, hat der hier genutzte Zyklon einen zylindrischen Mantel. Der Einlauf erfolgt tangential, wodurch eine Drallströmung erzeugt wird (vgl. Abbildungen 2.6.1 und 2.6.2). Das Geschehen im Inneren eines Zyklons ist dabei ähnlich der durch die Drallrohre erzeugten Strömung. Aufgrund der sich ausbildenden Wirbelströmung, lagern sich die abzuscheidenden Partikel infolge der auf sie wirkenden Zentrifugalkräfte ab. Sie werden dann mit der Wandgrenzschichtströmung in spiralförmigen Bahnen nach unten in den Auffangbereich gefördert. Die Luft verlässt den Zyklon in Form einer Radialströmung von außen nach innen und strömt durch das Tauchrohr nach oben. Die Tauchrohrabmessungen bestimmen die Abscheideleistung und den Druckverlust.

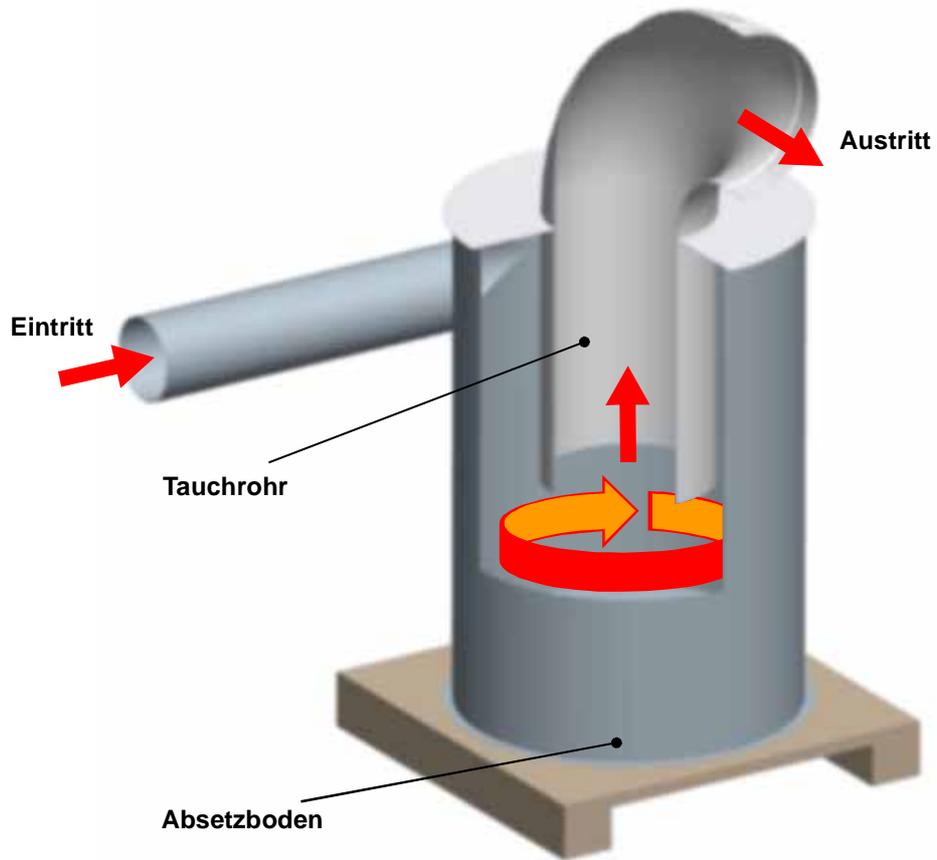


Abbildung 2.6.1: Zur Abscheidung der Restpartikel verwendeter Zyklon

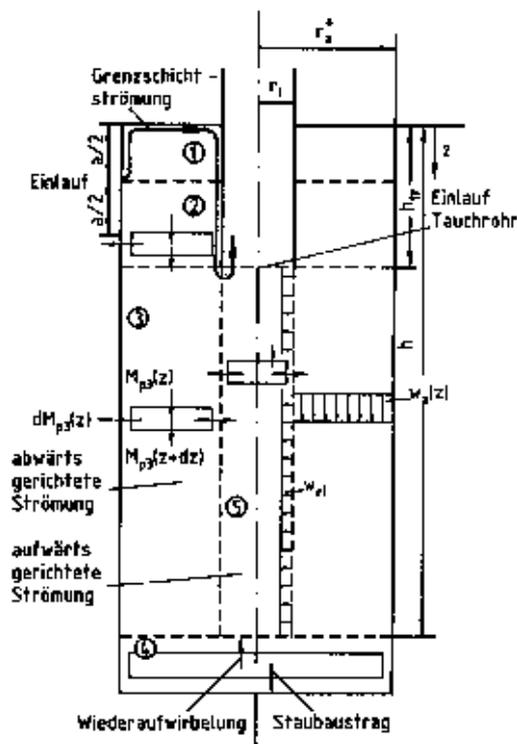


Abbildung 2.6.2 Aufbau und Wirkungsweise eines zylindrischen Abscheidezyklons



### Strömungsverhältnisse in einem Zyklon:

Im Zyklon herrscht eine dreidimensionale turbulente Zweiphasenströmung. Dies behindert zwar eine einfache theoretische Berechnung der Strömung und damit eine exakte Auslegung des Zyklons. Werden seine Hauptabmessungen (Durchmesser und Höhe) jedoch möglichst groß gewählt, kann auch ein nach Erfahrungswerten konstruierter Abscheidezyklon gute Ergebnisse liefern. Ein so gestalteter Zyklon erwies sich bei der Abscheidung der Restpartikel vor dem Ventilator letztendlich als völlig ausreichend.

Die Strömung in einem Zyklon lässt sich in Umfangs-, Axial- und Radialgeschwindigkeit unterteilen. Neben der tangentialen beeinflusst auch radiale Komponente der Strömungsgeschwindigkeit die Zentrifugalkraft und damit die Abscheidung.

### Vor- und Nachteile von Abscheidezyklonen:

- Einfache Bauweise
- Geringer Platzbedarf
- Hohe Betriebssicherheit
- Geringe Betriebs- und Investitionskosten
- Bei Feinststaub unzulängliche Abscheidung

### Einsatzgebiete allgemein:

- Heißgas- und Hochdruckentstaubung
- Vorabscheider bei hohen Rohgasstaubgehalten
- Endabscheider für leicht abzuscheidende Stäube
- Tropfenabscheidung



## 2.6.2 Probleme mit dem Abscheidezyklon während der Versuche

Im Zyklon, der zur Abscheidung der Restpartikel vor dem Ventilator verwendet wurde, sorgte der vorhandene Zwischenboden aus Lochblech nicht genügend für eine Abgrenzung zwischen Strömungsraum und Auffangbereich am Zyklonboden. Offenbar war die gesamte Öffnungsfläche der Bohrungen im Verhältnis zur Bodenfläche zu groß. Dies führte dazu, dass die Restpartikel vor allem in der Mitte nach einer gewissen Zeit wieder aus dem beruhigten Strömungsgebiet mitgerissen und durch den Ventilator in die Abluft gefördert wurden (vgl. auch Abbildung 2.6.2). Es musste also eine konstruktive Änderung vorgenommen werden und zwar wurde eine runde, geschlossene Platte auf der Mitte des Zwischenbodens befestigt, die den Auffangbereich zu ca. 70 % abdeckte. Diese Platte hinderte die abgelagerten Prüfpartikel im mittleren Bereich daran, wieder von der Strömung mitgenommen zu werden.

<sup>[1]</sup> Lohrengel: *Abgasreinigung / Immissionsschutz, Abscheidemechanismen*; S.26

<sup>[2]</sup> Lohrengel: *Abgasreinigung / Immissionsschutz, Zyklone*; S.41f

### 3 Vorbereitende Messungen

#### 3.1 Aufnahme des Geschwindigkeitsprofils der Einlaufströmung

Um den Anforderungen der Norm DIN EN 1834-1 <sup>[1]</sup> zu genügen und im Hinblick auf die Grundsätze wissenschaftlichen Arbeitens ist es erforderlich, dass die für die Versuche verwendete Anlage auf eventuell vorhandene Beeinträchtigungen der Messergebnisse untersucht wird. Ziel ist es, diese Störeinflüsse weitestgehend zu beseitigen oder wenigstens deren mögliche Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse hinsichtlich ihrer Relevanz zu beurteilen.

Im konkreten Fall musste vor allem geprüft werden, ob der erzeugte Fluidstrom beim Eintritt in den Drallrohr-Abscheider tatsächlich die an der Einlaufdüse eingestellte Strömungsgeschwindigkeit erreichte und ob das Strömungsprofil ausreichend ausgebildet war. Letzteres ist vor allem aus zwei Gründen kritisch: Zum einen betrug die Gesamtlänge der Zulaufstrecke lediglich ca.  $24 D$ , obwohl beispielsweise die Norm für Durchflussmessgeräte <sup>[2]</sup> mindestens eine Länge von  $100 D$  vorschreibt und zwar ohne dass etwa ein zusätzlicher Strömungsgleichrichter zwischengeschaltet war. Zum anderen war die Strecke zwischen der Zellenradschleuse und dem Abscheider noch kürzer ( $16 D$ ) und ein stark inhomogenes Strömungsprofil hätte mit Sicherheit eine ungleiche Verteilung der Partikel über dem Strömungsquerschnitt zur Folge gehabt. Somit erschien eine Vermessung des Geschwindigkeitsprofils wie in der folgenden Abbildung geboten.

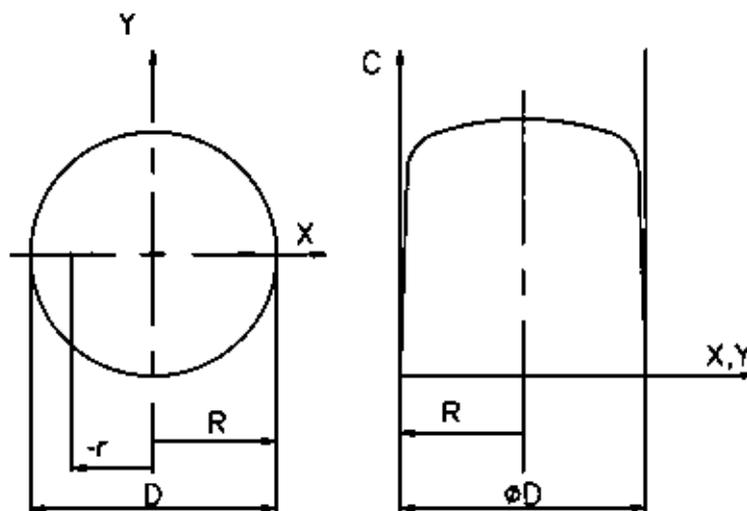


Abbildung 3.1.1: Aufnahme des Geschwindigkeitsprofils in zwei Richtungen



Zu diesem Zweck sind jeweils im Abstand  $2D$  vor dem Eintritt in den Drallrohr-Abscheider zwei Bohrungen im Rohr angebracht und zwar eine auf der Oberseite und eine im Winkel von  $90^\circ$  seitlich. Durch diese Bohrungen, die bei Nichtgebrauch mit Klebestreifen verschlossen wurden, kann nun ein so genanntes Prandtl-Staurohr in die Zulaufstrecke eingeführt werden, welches zusätzlich mit einer Höhenverstellung ausgestattet ist, um das Strömungsprofil schrittweise abzufahren. Eine Profilmessung in den beiden Achsen X und Y ermöglicht es nun, sich ein zweidimensionales Bild von der Geschwindigkeitsverteilung über dem Rohrquerschnitt zu machen bzw. eine Ungleichverteilung zu erkennen. Die folgende Abbildung 3.1.1 zeigt die Anordnung und Wirkungsweise des Staurohres nach Prandtl in Verbindung mit U-Rohr-Manometern.

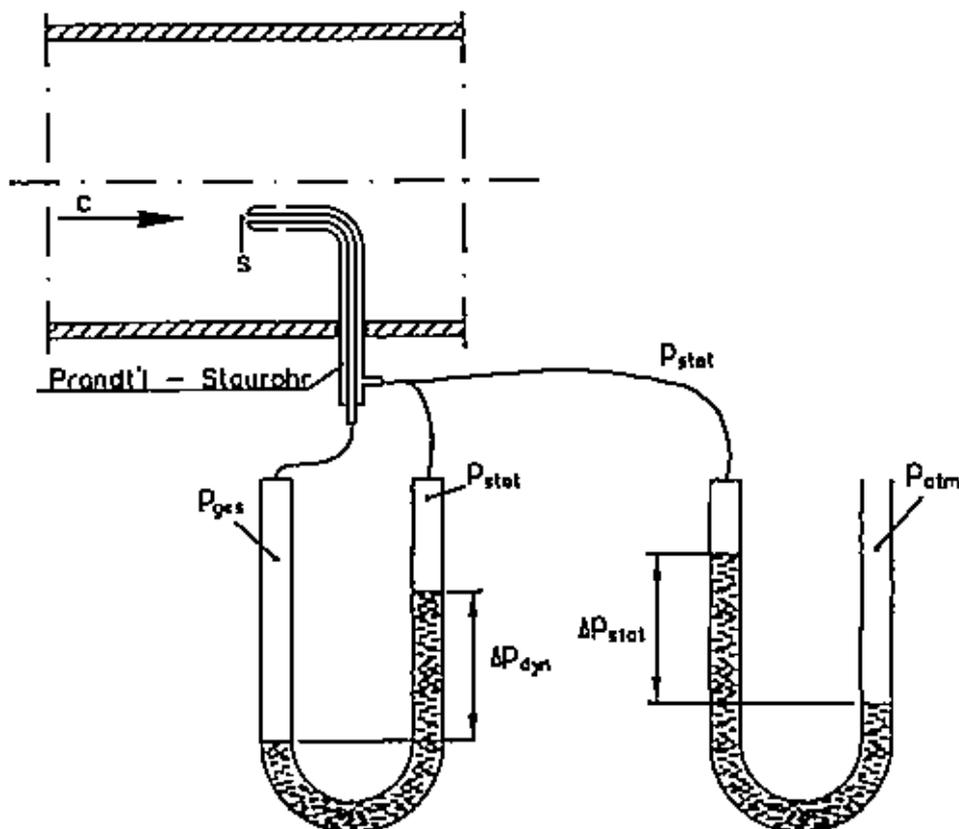


Abbildung 3.1.2: Prandtl-Staurohr mit Manometern

Es ist zu erkennen, dass zusätzlich zur Bestimmung des dynamischen Druckanteils ein weiteres Manometer angeschlossen war, um auch den statischen (Unter-) Druck des Fluids explizit zu messen, weil die Dichte eines Gases, im vorliegenden Falle Luft, bekanntlich von dessen Druck abhängig ist.



Da zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit im jeweiligen Messpunkt ein Ansatz über die Bernoulli-Gleichung erfolgen soll, also über:

$$p_{ges} = p_{stat} + \Delta p_{dyn} \quad (1),$$

muss der genaue statische Druck an jeder Messposition miterfasst werden. Aus dem Ansatz (1) folgt:

$$\Delta p_{dyn} = p_{ges} - p_{stat} \quad \text{mit} \quad \Delta p_{dyn} = \rho \cdot \frac{c^2}{2}$$

Zur Messung der beiden Druckwerte kamen so genannte Schrägrohrmanometer zum Einsatz. Das sind U-Rohr-Manometer, deren einer Schenkel zur Erhöhung der Ablesegenauigkeit bei kleinen Drücken um einen bestimmten Winkel geschwenkt werden kann. Zum Ermitteln des korrekten Druckes, vor allem nahm der dynamische Druck sehr kleine Werte an, muss der abgelesene Zahlenwert dann durch einem entsprechenden Umrechnungsfaktor dividiert werden. Die Manometer (siehe Abbildung 3.1.2) liefern folgende Werte:

Links:  $\Delta p_{dyn} = p_{ges} - p_{stat}$  und rechts:  $\Delta p_{stat} = p_{stat} - p_A$  mit  $\Delta p_{stat} < 0$

Schließlich wird mit Hilfe des statischen Druckes und dem Ansatz:

$$\rho_{trL} = \frac{p_{stat}}{R \cdot T} = \frac{p_A + \Delta p_{stat}}{R \cdot T}$$

die tatsächliche Dichte unter Berücksichtigung der Luftfeuchte:

$$\rho_{fl} = \rho_{trL} \cdot \left( 1 - 0,377 \cdot \varphi_A \frac{p_s}{p_A} \right)$$

bestimmt.



Somit erhält man die Strömungsgeschwindigkeit durch Einsetzen in (1) und Umstellen:

$$c = \sqrt{\frac{2\Delta p_{dyn}}{\rho_{fl}}}$$

[<sup>1</sup>] vgl. DIN EN 1834-1 (Normung für Funkenfänger)

[<sup>2</sup>] vgl. EN ISO 5167-1...4 (Normung für Durchflussmessgeräte)

### 3.2 Beurteilung des Geschwindigkeitsprofils der Einlaufströmung

Die Ergebnisse der Messungen bezüglich des Geschwindigkeitsprofils wurden mit Hilfe einer Tabellenkalkulation aufbereitet, um sie anschließend in den folgenden Diagrammen darstellen zu können. Üblicherweise gibt man nur das dimensionslose Verhältnis zu einer Bezugsgröße in den Darstellungen wieder. Zu ihrer Beurteilung legten wir die Europäische Norm ISO 5167 [<sup>1</sup>] zu Grunde, wobei als Vergleichsprofil die turbulente Geschwindigkeitsverteilung in glatten Rohren nach H. Reichardt [<sup>2</sup>] herangezogen wurde. Diese Norm schreibt vor, dass das Profil dann als ungestört zu betrachten ist, wenn der Quotient aus lokaler Strömungsgeschwindigkeit im Messpunkt und maximaler Strömungsgeschwindigkeit in der Messebene vom selben Quotienten des Vergleichsprofils nicht mehr als  $\pm 5\%$  abweicht. Es muss also hier:

$$\left| \frac{c_{\text{Messpunkt}}\left(\frac{r}{R}\right)}{c_{\text{Messebene-max}}} - \frac{c_{\text{Reichardt}}\left(\frac{r}{R}\right)}{c_{\text{Reichardt-max}}} \right| \leq 5\%$$

sein, dieser Toleranzbereich ist ebenfalls in den folgenden Diagrammen dargestellt.

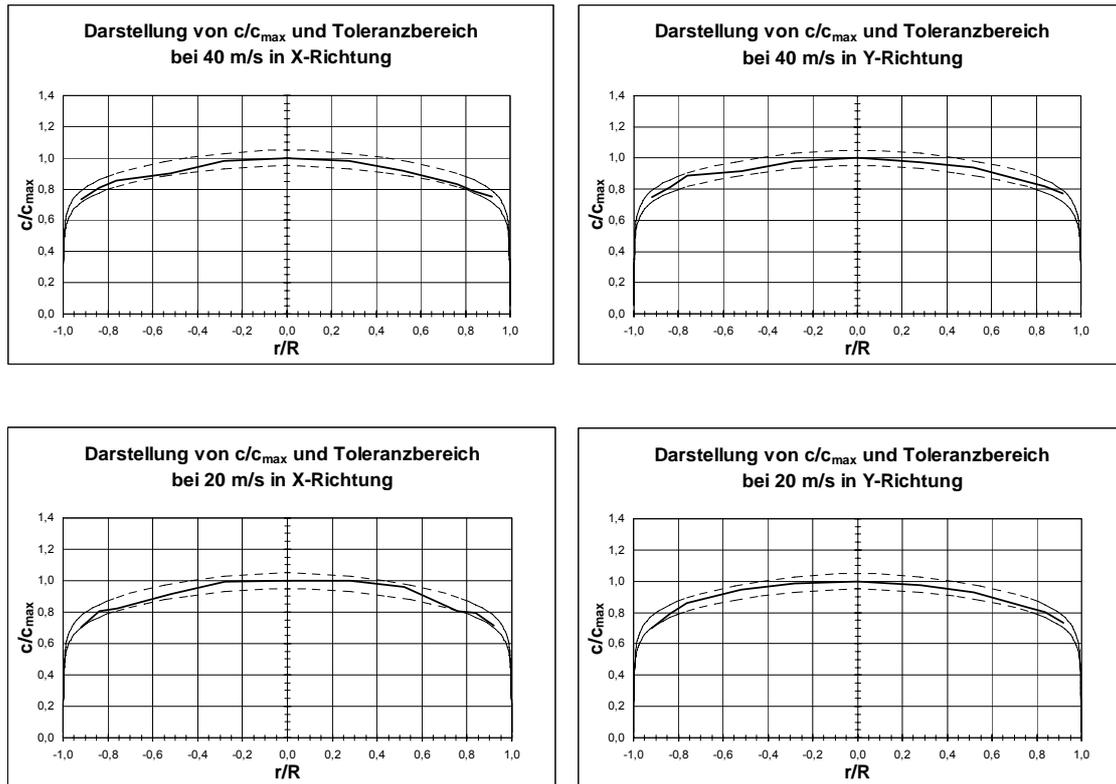


Abbildung 3.2.1: Verhältnis der lokalen zur maximalen Strömungsgeschwindigkeit

Wie man sofort erkennt, liegen die gemessenen Profile allesamt innerhalb der erlaubten Abweichungen nach Norm.

Die unsymmetrische Senke im Kurvenverlauf bei der höheren Strömungsgeschwindigkeit sollte auf Grund ihrer Lage im unteren Rohrbereich (negatives Radienverhältnis) eigentlich nicht mit einem Einfluss durch die Zellenradschleuse in Zusammenhang stehen, was zunächst befürchtet wurde. Sie dürfte jedoch auch kaum Einfluss auf die Abscheidung gehabt haben.

[<sup>1</sup>] Vgl. EN ISO 5167-1...4

[<sup>2</sup>] REICHARDT: *Vollst. Darstellung der turb. Geschwindigkeitsverteilung* ebd.



### 3.3 Messung des Gesamtdruckverlustes über dem Drallrohr-Abscheider

Wie bereits in Kapitel 2.5 erwähnt, war eine quantitative Vorausberechnung des Druckverlustes, der sich infolge der Drallströmung bemerkbar machen würde, nicht möglich. Jedoch wurden für alle Messdurchläufe die statischen Drücke vor und hinter dem Abscheider gemessen und protokolliert, sodass anschließend der tatsächliche Gesamtdruckverlust genau bekannt war. Setzt man nun voraus, dass die Vorüberlegungen hinsichtlich der Verluste auf Grund der anderen konstruktiven Parameter der Realität entsprachen, dann ist der Druckverlust, der durch die Drallströmung verursacht wurde, genau die Differenz aus den Mess- und den Rechenwerten. Die Abbildung 3.3.1 zeigt einen Blick auf alle drei Betz-Manometer zur Erfassung des Drucks an der Einlaufdüse  $\Delta p_D = p_A - p_D$  und vor dem Abscheider  $\Delta p_I = p_A - p_1$  sowie den Druckabfall  $\Delta p_{I-II} = p_1 - p_2$ .

Weiter unten (Abbildung 3.3.2) ist dargestellt, wo die Entnahmestellen 1 und 2 angeordnet sind. Die Druckmessung erfolgte allerdings nicht nur während der eigentlichen Versuche mit Partikelbeladung, sondern um sich ein Bild vom Druckverlauf über einen größeren Geschwindigkeitsbereich machen zu können, wurden vorab separate Druckverlustmessungen ohne Zudosierung von Granulat durchgeführt. Es ist später zu untersuchen, ob die Beladung großen Einfluss auf den Druckverlust ausübte oder eher vernachlässigbar ist.



Abbildung 3.3.1: Betz-Präzisionsmanometer zur Druckverlustmessung

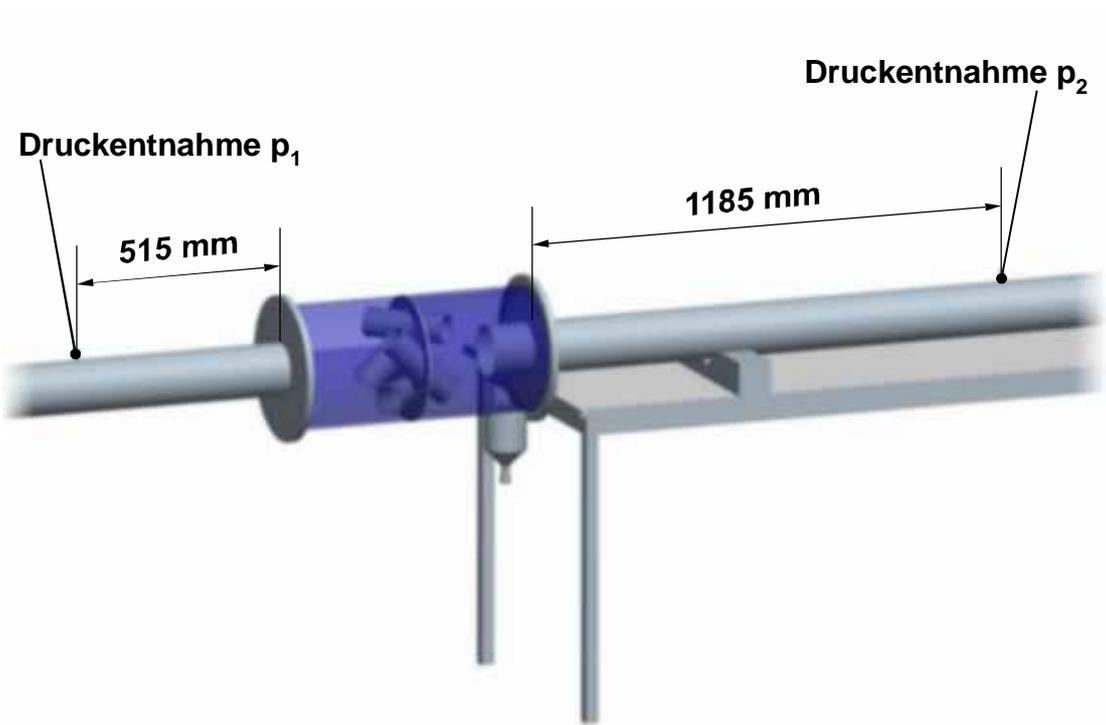


Abbildung 3.3.2: Anordnung der Druckentnahmestellen



Wir führten also hierzu zwei Messreihen durch und zwar unmittelbar hintereinander, einmal in aufsteigender Folge der Geschwindigkeitsstufen und einmal absteigend. Dabei erstreckte sich der Geschwindigkeitsbereich von etwa  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  bis auf die Maximalgeschwindigkeit von  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Durch Notieren des Düsendruckes konnten später jeweils die tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeiten errechnet werden und mussten deshalb nicht exakt eingestellt werden.

### 3.4 Auswertung der Druckverlustmessung – Berechnung des Drallanteils

In den folgenden beiden Tabellen sind gemessenen Druckverluste für die jeweiligen Strömungsgeschwindigkeiten und die resultierenden Widerstandszahlen dargestellt:

Nr.	$c_D$	$\Delta p_{1-2}$	$\Delta p_R$	$\Delta p_F$	$\zeta$
--/--	m/s	Pa	Pa	Pa	
1	8,129	156,0	10,9	145,1	3,72
2	10,126	243,0	16,2	226,8	3,75
3	11,717	322,0	21,0	301,0	3,72
4	14,265	480,0	29,7	450,3	3,76
5	16,933	676,0	40,3	635,7	3,78
6	20,186	955,0	55,1	899,9	3,77
7	24,073	1352,0	75,4	1276,6	3,77
8	28,581	1900,0	102,2	1797,8	3,79
9	31,187	2280,0	119,3	2160,7	3,84
10	34,103	2720,0	139,7	2580,3	3,85
11	36,864	3190,0	160,2	3029,8	3,88
12	40,368	3840,0	187,8	3652,2	3,92
$\zeta_m =$					3,80

Tabelle 3.4.1: Druckverluste Messreihe 1

Nr.	$c_D$	$\Delta p_{1-2}$	$\Delta p_R$	$\Delta p_F$	$\zeta$
--/--	m/s	Pa	Pa	Pa	
1	8,284	161,0	11,3	149,7	3,70
2	10,042	236,0	15,9	220,1	3,70
3	11,572	313,0	20,5	292,5	3,71
4	14,145	472,0	29,3	442,7	3,76
5	17,058	682,0	40,8	641,2	3,75
6	20,186	955,0	55,1	899,9	3,77
7	24,038	1353,0	75,2	1277,8	3,79
8	28,521	1905,0	101,8	1803,2	3,82
9	31,132	2275,0	118,9	2156,1	3,84
10	34,052	2735,0	139,3	2595,7	3,88
11	36,887	3225,0	160,3	3064,7	3,92
12	40,347	3845,0	187,6	3657,4	3,93
$\zeta_m =$					3,80

Tabelle 3.4.2: Druckverluste Messreihe 2



Es ist leicht zu erkennen, dass sich die resultierenden Widerstandskoeffizienten beider Messungen praktisch nicht unterscheiden, obwohl in unterschiedlicher Reihenfolge und bei teilweise differierenden Geschwindigkeitsstufen gemessen wurde. Damit ist auch die Zuverlässigkeit des Messablaufs bestätigt.

Ebenfalls wiedergegeben sind jeweils die Absolutwerte der Druckverluste, zusätzlich aufgespalten in einen äquivalenten Reibungs- bzw. Formanteil. Zur grafischen Veranschaulichung zeigen die beiden folgenden Diagramme den Verlauf von Druckverlust und Widerstandskoeffizient über dem Volumenstrom bzw. der Reynoldszahl:

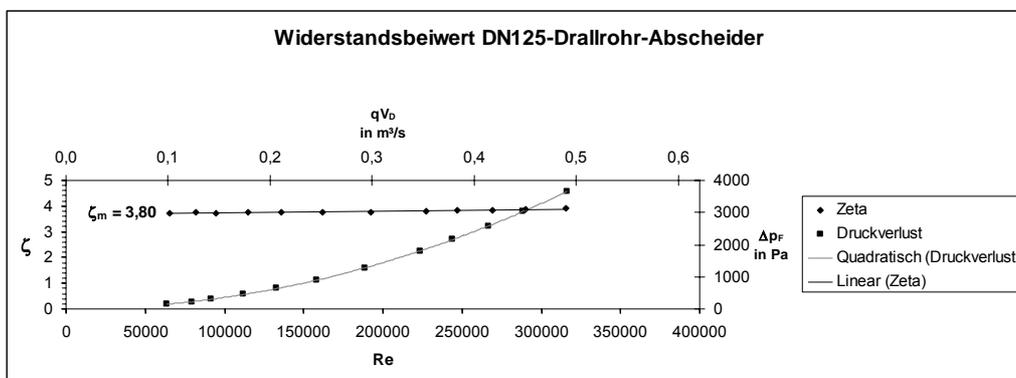


Abbildung 3.4.1: Druckverlust und Widerstandsbeiwert für Messung 1

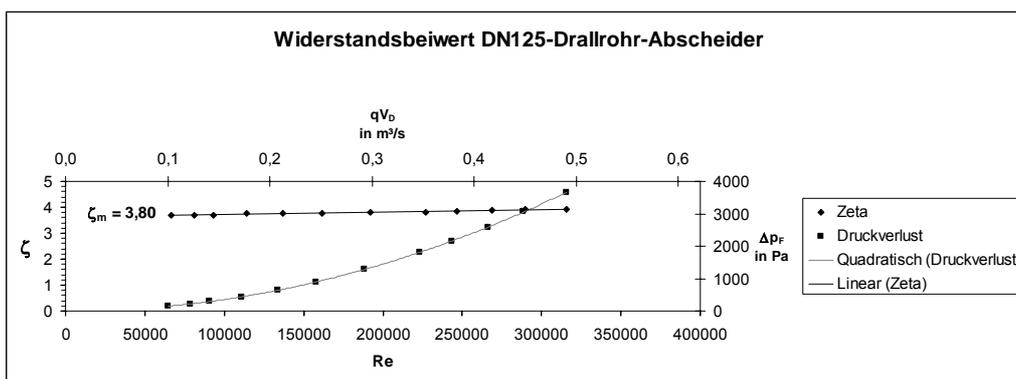


Abbildung 3.4.2 Druckverlust und Widerstandsbeiwert für Messung 2



In beiden Messdurchläufen war, wie auch die Diagramme zeigen, ein geringfügiger Anstieg des Widerstandskoeffizienten zu verzeichnen. Dieser Anstieg ist jedoch so gering, dass er kaum eindeutig einer bestimmten Ursache zuzuordnen ist. Ebenso weicht der Druckverlust nicht signifikant vom quadratischen Verlauf ab. Nach Wagner <sup>[1]</sup> ist bei turbulenter Strömung ein Anstieg des Reibungskoeffizienten beim Übergang vom hydraulisch glatten in den rauen Bereich möglich, was im vorliegenden Fall (Reynolds-Zahlen) durchaus plausibel erscheint. Allerdings hat man es hier im Wesentlichen nur mit Stoßverlusten zu tun, sodass deren Einfluss (konstanter Widerstandsbeiwert) überwiegt.

Mit Hilfe der Messwerte soll nun noch der von der Drallströmung herrührende Druckabfall für die Strömungsgeschwindigkeiten  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  berechnet werden. Er ergibt sich aus der Differenz zwischen Messung und Berechnung:

$$\Delta p_{Dr20/1} = \Delta p_{Dr20/2} = \Delta p_{1-2/20} - \Delta p_{V20} = 955 \text{ Pa} - 800 \text{ Pa} = \underline{\underline{155 \text{ Pa}}}$$

und:

$$\Delta p_{Dr40/1} = \Delta p_{1-2/40/1} - \Delta p_{V40} = 3840 \text{ Pa} - 3200 \text{ Pa} = \underline{\underline{640 \text{ Pa}}}$$

sowie:

$$\Delta p_{Dr40/2} = \Delta p_{1-2/40/2} - \Delta p_{V40} = 3845 \text{ Pa} - 3200 \text{ Pa} = \underline{\underline{645 \text{ Pa}}}$$



Setzt man diese Werte für den Drallanteil ins Verhältnis und vergleicht den Quotienten mit dem Verhältnis der Quadrate der Strömungsgeschwindigkeiten, so zeigt sich fast Proportionalität:

$$\frac{\Delta p_{Dr40/1}}{\Delta p_{Dr20}} = \frac{640 \text{ Pa}}{155 \text{ Pa}} = \underline{\underline{4,13}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta p_{Dr40/2}}{\Delta p_{Dr20}} = \frac{645 \text{ Pa}}{155 \text{ Pa}} = \underline{\underline{4,16}}$$

im Vergleich zu:

$$\left( \frac{c_{40}}{c_{20}} \right)^2 = \left( \frac{40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \right)^2 = \underline{\underline{4,0}}$$

Der Druckverlustkoeffizient ist also auch hier nur geringfügig angestiegen.

[<sup>1</sup>] WAGNER: *Strömung und Druckverlust* S.77 ff.



## 4 Durchführung der Messungen nach Norm

### 4.1 Messung bei mittlerer Partikelkörnung

Grundlagen:

Die Messungen erfolgten nach DIN EN 1843–1 <sup>[1]</sup>. In dieser Norm sind die Anforderungen an Funkenfängern festgehalten. Der Drallrohrabscheider hatte die Wirkungsweise eines Funkenfliehkraftabscheiders. Der Fliehkraftabscheider dient zum Heraustrennen der Partikel aus dem Abgasstrom unter Einsatz der Fliehkraft. Zur Prüfung der Abscheidegrade muss bei jeder Strömungsgeschwindigkeit und für jede Partikelgrößenklasse in mindestens einer Messung geprüft werden. Das Massenverhältnis zwischen Prüfpartikel und Luft muss etwa 1/100 betragen.

Als Prüfpartikel dienten bei den Messungen Styroporkörner. Styropor ist ein treibmittelhaltiges, expandierbares Polystyrol (EPS) und zeichnet sich durch ein geringes Gewicht aus. EPS ist in der vorliegenden Form wasserliebend, bei entsprechenden Temperatur und Feuchte schäumt es auf. Die Schüttgutdichte beträgt nur  $0,6 \text{ kg/dm}^3$  und erfüllt damit die Anforderungen der Norm DIN EN 1843 – 1 <sup>[1]</sup>.

Für die Berechnung der benötigten Massen muss der Volumenstrom pro Minute und die Dichte der feuchten Luft berechnet werden.

Randbedingungen für die Berechnungen sind :

- Lufttemperatur  $t = 20^\circ\text{C}$
- Genormte Prüfzeit  $\Delta t = 60 \text{ s}$
- Sättigungsdruck  $p_s = 2337 \text{ Pa}$
- Luftdruck  $p_i = 101800 \text{ Pa}$
- Luftfeuchtigkeit  $\varphi_A = 0,42$
- Nenndurchmesser  $D_N = 0,125 \text{ m}$
- Nennfläche  $A_N = 0,0123 \text{ m}^2$
- Spezifische Gaskonstante  $R_i = 287,3 \text{ J/(kgK)}$



Für die Beispielrechnung wird die maximale Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s angenommen.

Zuerst muss der Volumenstrom für eine Sekunde ermittelt werden:

$$\underline{\underline{\dot{V}_{\text{sec}}}} = A_N \cdot c = 0,0123 \text{ m}^2 \cdot 40 \text{ m/s} = \underline{\underline{0,492 \text{ m}^3/\text{s}}}$$

Danach wird der Volumenstrom für eine Minute, die genormte Zeit für die Versuche, ermittelt:

$$\underline{\underline{\dot{V}_{\text{min}}}} = \frac{\Delta t \cdot \dot{V}_{\text{sec}}}{\text{min}} = \frac{60 \text{ s} \cdot 0,492 \text{ m}^3/\text{s}}{\text{min}} = \underline{\underline{29,52 \text{ m}^3/\text{min}}}$$

Für die Berechnung der Masse der Luft pro Minute muss die Dichte der trockenen Luft:

$$\underline{\underline{\rho_{\text{tr}}}} = \frac{p_i}{R_i \cdot T} = \frac{101800 \text{ Pa}}{287,3 \text{ J/kgK} \cdot (273,15 + 20) \text{ K}} = \underline{\underline{1,208 \text{ kg/m}^3}}$$

und die Dichte der feuchten Luft berechnet werden:

$$\underline{\underline{\rho_f}} = \rho_{\text{tr}} \cdot \left( 1 - 0,377 \cdot \varphi_A \cdot \frac{p_s}{p_i} \right) = 1,208 \text{ kg/m}^3 \cdot \left( 1 - 0,377 \cdot 0,415 \cdot \frac{2337 \text{ Pa}}{101800 \text{ Pa}} \right) = \underline{\underline{1,204 \text{ kg/m}^3}}$$

Die Masse der Luft pro Minute ergibt sich aus folgender Rechnung:

$$\underline{\underline{\dot{m}_{\text{Luft}}}} = \dot{V}_{\text{min}} \cdot \rho_f = 29,52 \text{ m}^3/\text{min} \cdot 1,204 \text{ kg/m}^3 = \underline{\underline{35,542 \text{ kg/min}}}$$

Aus diesen Werten wird die für die Messversuche benötigte Masse der Prüfpartikel pro Minute berechnet:

$$\underline{\underline{\dot{m}_{\text{Partikel}}}} = \frac{1}{100} \cdot \dot{m}_{\text{Luft}} = \frac{1}{100} \cdot 35,542 \text{ kg/min} = \underline{\underline{0,355 \text{ kg/min}}}$$



Tabelle für die Partikelbeladungen der einzelnen Strömungsgeschwindigkeiten:

Strömungsgeschwindigkeit in m/s	Partikelbeladung kg/min
20	0,178
25	0,222
30	0,266
35	0,311
40	0,355

Tabelle 4.1.1: Partikelbeladung

Geplante Messungen nach DIN EN 1843–1 <sup>[1]</sup>:

Die Messungen erfolgten nach folgendem Schema :

- Abwiegen der Partikelbeladung
- Befüllen des Trichters
- Einstellen der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeit
- Anstellen der Dosierrinne
- Festhalten der Beobachtungen und Druckverluste während der Prüfzeit von einer Minute
- Abstellen der Anlage nach einer Minute
- Wiegen des Staubsaugers vor dem Aussaugen
- Aussaugen der ersten und zweiten Kammer
- Wiegen des Staubsaugers nach der Messung
- Festhalten der Messwerte
- Auswerten der Abscheidegrade
- Leeren des Staubsaugers vor jeder neuen Messung



Beobachtungen während den Messungen:

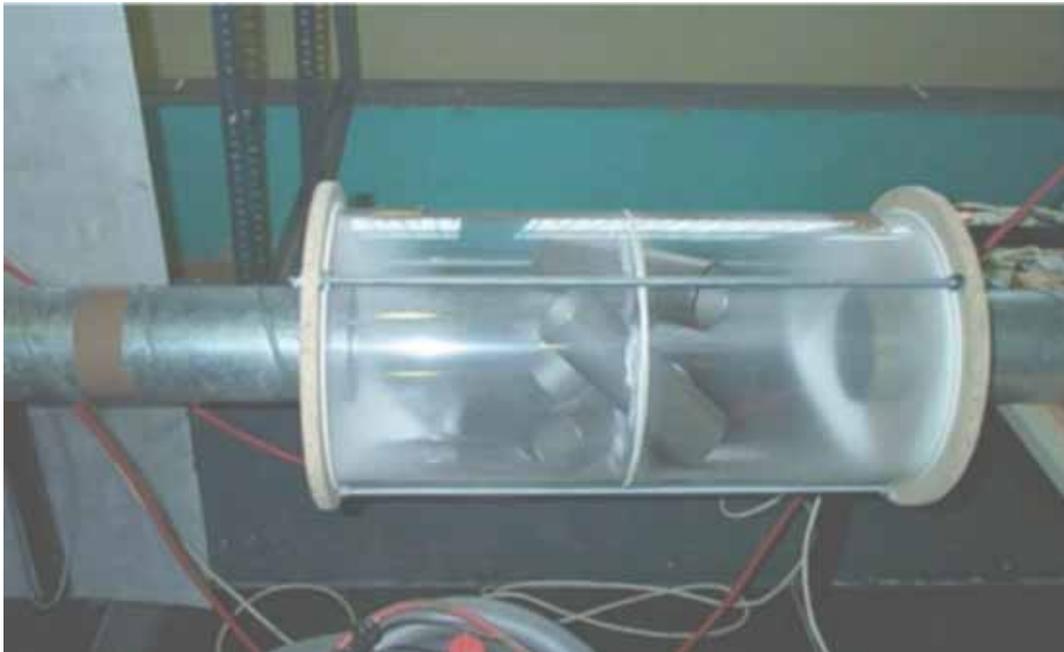


Abbildung 4.1.1: Strömungsgeschwindigkeit 30 m/s

Die Prüfpartikel wurden in die erste Kammer gefördert, lagerten sich dort ab und wurden dann nach und nach in die zweite Kammer gefördert. In der zweiten Kammer lagerten sich die Partikel direkt unter dem Austrittsrohr ab. Als sich die Ablagerung vergrößerte, wurden die Prüfpartikel von der Drallströmung aufgewirbelt. Diese Verwirbelungen führten dazu, dass die Partikel in das Austrittsrohr gefördert wurden. Die Menge der nicht abgeschiedenen Partikel nahm so stark zu, dass sogar der Abscheidezyklon die Menge nicht mehr aufnehmen konnte und diese nach einer gewissen Zeit in die Abluft förderte.

Beurteilung des Drallrohrabscheiders:

Die genannten Beobachtungen ließen nicht nur auf einen schlechten Abscheidegrad schließen, sondern legten einen Umbau des Drallrohrabscheiders nahe. Ein zusätzlicher Behälter wurde an die Unterseite der zweiten Kammer genau dort angebracht, wo sich vorher die meisten Prüfpartikel abgelagerten. Für die folgenden Messungen sollte diese einfache Änderung eine Verbesserung ermöglichen, was durch Probeversuche bestätigt wurde.

Messungen nach dem Umbau des Drallrohrabscheiders:

Aufgrund der konstruktiven Änderung hatte sich die Wirkungsweise des Drallrohrabscheiders prinzipiell geändert, denn die Prüfpartikel sollten jetzt nicht nur abgelagert, sondern auch von der Strömung getrennt werden.

Die Messungen erfolgten nun nach folgendem Schema:

- Abwiegen der Partikelbeladung
- Befüllen des Trichters
- Einstellen der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeit
- Anstellen der Dosierrinne
- Festhalten der Beobachtungen und Druckverluste während der Prüfzeit
- Abstellen der Anlage jetzt nach Entleeren der Prüfpartikel in den zusätzlichen Behälter und nicht mehr nach einer Minute
- Wiegen der aufgefangenen Partikel nach der Messung
- Festhalten der Messwerte
- Auswerten der Abscheidegrade

Beobachtungen während der Messungen:



Abbildung 4.1.2: Strömungsgeschwindigkeit 35 m/s, Prüfzeit 2 min



Während des Versuchs lagerten sich die Prüfpartikel der mittleren Korngröße in der ersten Kammer ab, wurden jedoch dann vollständig in die zweite Kammer befördert. Es entstand in der zweiten Kammer je ein konstanter Drall an der Zwischenwand und an der Deckplatte. Der konstante Drall führte dazu, dass ein Teil der Prüfpartikel länger in der zweiten Kammer blieb. Da der Versuch erst nach vollständiger Entleerung der Kammern beendet wurde, hatte dies eine Erhöhung der Prüfzeit zur Folge.



Abbildung 4.1.3: Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s, Prüfzeit 2 min



Abbildung 4.1.4: Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s, Prüfzeit 4 min



In der zweiten Kammer lagerten sich die Partikel jetzt nicht mehr direkt unter dem Austrittsrohr ab, sondern durch den Auffangbehälter wurden die Prüfpartikel nun abgeschieden.

Die Prüfpartikel der Größe 0,22 mm bis 0,4 mm (mittlere Körnung) setzten sich als feiner Staub während der Messungen an der Zylinderwand ab. Durch diesen Staubfilm wurden leider die optischen Beobachtungen beeinträchtigt. Da die Prüfpartikel aus Kunststoff (EPS) sind, kam es zu einer elektrostatischen Aufladung der Innenwand, wodurch die Partikel, auch nachdem sie vollständig zur Ruhe gekommen waren, an der Wandung des Drallrohrabscheiders anhafteten.

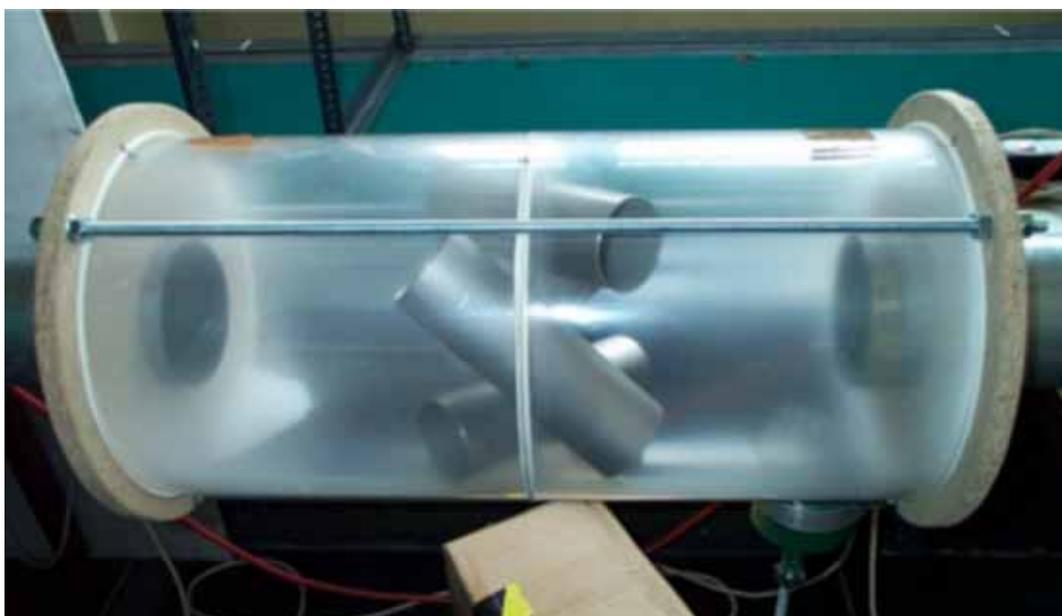


Abbildung 4.1.5: Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s, Prüfzeit 6 min

<sup>[1]</sup> vgl. DIN EN 1834-1

## 4.2 Messung bei grober Partikelkörnung

Als Grundlage für die Messungen bei grober Partikelkörnung dienen die in 4.1 dargelegten Berechnungen für die Partikelbeladungen.



Randbedingungen für die Berechnungen der Partikelbelastungen sind hier:

- Lufttemperatur  $t = 21^\circ\text{C}$
- Genormte Prüfzeit  $\Delta t = 60 \text{ s}$
- Sättigungsdruck  $p_s = 2490 \text{ Pa}$
- Luftdruck  $p_i = 101600 \text{ Pa}$
- Luftfeuchtigkeit  $\varphi_A = 0,40$
- Nenndurchmesser  $D_N = 0,125 \text{ m}$
- Nennfläche  $A_N = 0,0123 \text{ m}^2$
- Spezifische Gaskonstante  $R_i = 287,3 \text{ J/(kgK)}$

Für die Beispielrechnung wird ebenso eine Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s und der Volumenstrom von 29,52 m<sup>3</sup>/min angenommen.

Für die Berechnung des Luftmassenstroms benötigen wir wieder die Dichte der trockenen Luft:

$$\underline{\underline{\rho_{tr}}} = \frac{p_i}{R_i \cdot T} = \frac{101600 \text{ Pa}}{287,3 \text{ J/kgK} \cdot (273,15 + 21 \text{ K})} = \underline{\underline{1,202 \text{ kg/m}^3}}$$

und daraus die Dichte der feuchten Luft:

$$\underline{\underline{\rho_f}} = \rho_{tr} \cdot \left( 1 - 0,377 \cdot \varphi_A \cdot \frac{p_s}{p_i} \right) = 1,202 \text{ kg/m}^3 \cdot \left( 1 - 0,377 \cdot 0,40 \cdot \frac{2490 \text{ Pa}}{101600 \text{ Pa}} \right) = \underline{\underline{1,198 \text{ kg/m}^3}}$$

Die Masse der Luft pro Minute ist :

$$\underline{\underline{\dot{m}_{Luft}}} = \dot{V}_{\min} \cdot \rho_f = 29,52 \text{ m}^3/\text{min} \cdot 1,198 \text{ kg/m}^3 = \underline{\underline{35,365 \text{ kg/min}}}$$

Die Prüfpartikelmenge unterscheidet sich kaum von der vorangegangenen Messreihe bei mittlerer Partikelkörnung :

$$\underline{\underline{\dot{m}_{Partikel}}} = \frac{1}{100} \cdot \dot{m}_{Luft} = \frac{1}{100} \cdot 35,365 \text{ kg/min} = \underline{\underline{0,354 \text{ kg/min}}}$$

Strömungsgeschwindigkeit in m/s	Partikelbeladung kg/min
20	0,177
25	0,221
30	0,266
35	0,310
40	0,354

Tabelle 4.2.1: Partikelbeladungen der einzelnen Strömungsgeschwindigkeiten

Beobachtungen während den Messungen:

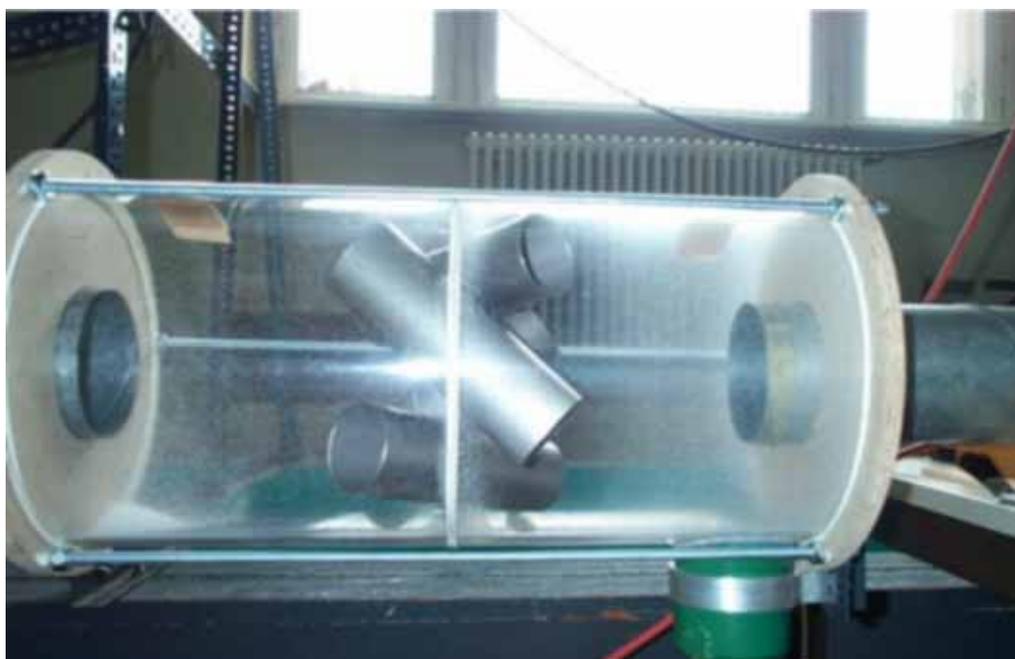


Abbildung 4.2.1: Strömungsgeschwindigkeit 20 m/s, Prüfzeit 2 min

Die Prüfpartikel lagerten sich weder in der ersten Kammer noch in der zweiten Kammer in größeren Mengen ab, sondern wurden entweder direkt vom Behälter aufgefangen oder durch den Austritt gefördert, da sie durch einen merklichen Rückpralleffekt wieder in die Strömung geschleudert wurden.

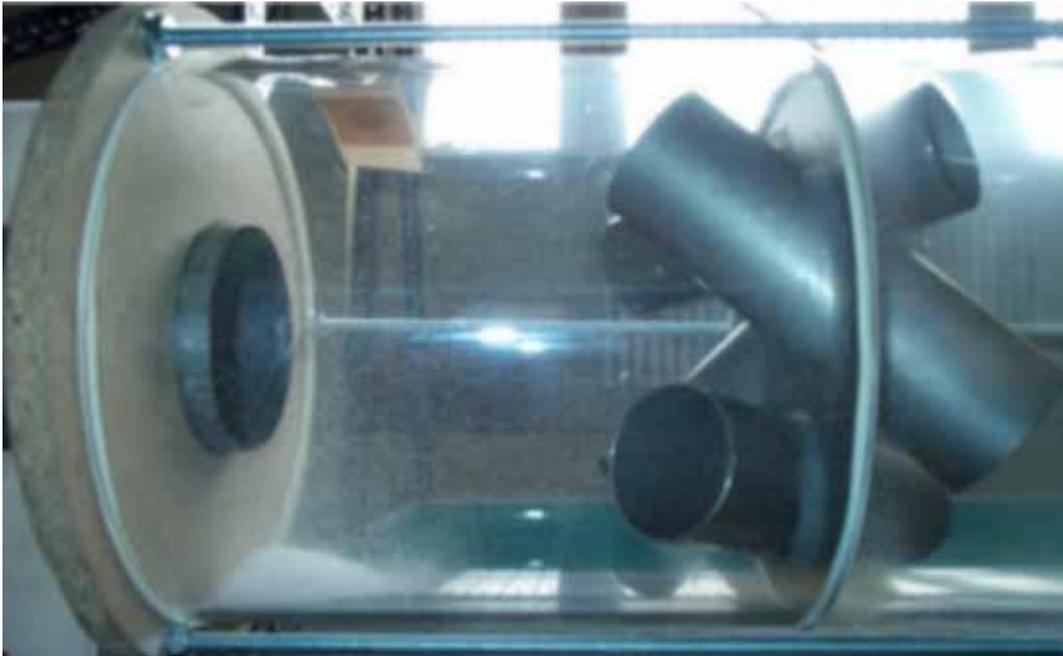


Abbildung 4.2.2: Strömungsgeschwindigkeit 20 m/s, Prüfzeit 3 min

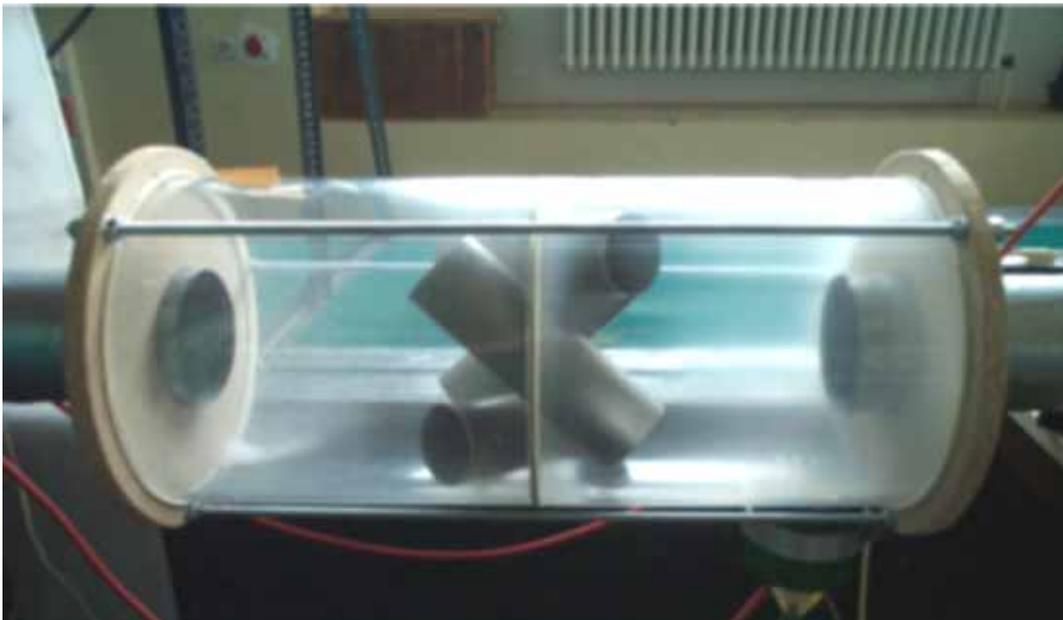


Abbildung 4.2.3 Strömungsgeschwindigkeit 25 m/s, Prüfzeit 3 min

Durch die vorangegangenen Messungen mit mittlerer Körnung war die Innenwand mit feinem Staub verschmutzt. Bei der Messung mit grober Körnung wurde die Innenwand durch die größeren Prüfpartikel selbsttätig gereinigt.



Abbildung 4.2.4 Strömungsgeschwindigkeit 30 m/s, Prüfzeit 3 min

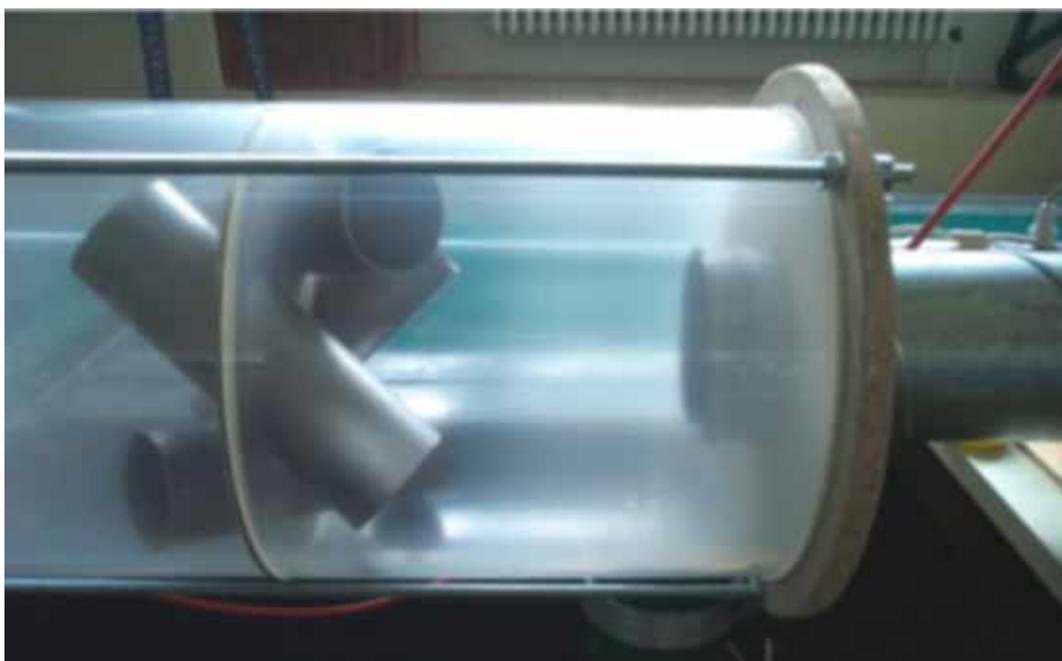


Abbildung 4.2.5: Strömungsgeschwindigkeit 35 m/s, Prüfzeit 2 min



Bemerkung zu den Prüfpartikeln :

Da die Prüfpartikel eine hohe kinetische Energie besaßen, prallten sie von der Innenwand und von der Kopfplatte ab. Dies führte dazu, dass die Partikel direkt in den Austrittsbereich geschleudert wurden. Diese Prüfpartikel waren für die Messungen also eher ungeeignet.

### 4.3 Messung bei feiner Partikelkörnung

Als Grundlage für die Messungen bei feiner Partikelbeladung dienen ebenso die in 4.1 behandelten Berechnungen für die Partikelbeladung.

Randbedingungen für die Berechnungen der Partikelbeladungen sind nun:

- Lufttemperatur  $t = 22^\circ\text{C}$
- Genormte Prüfzeit  $\Delta t = 60 \text{ s}$
- Sättigungsdruck  $p_s = 2643 \text{ Pa}$
- Luftdruck  $p_i = 101500 \text{ Pa}$
- Luftfeuchtigkeit  $\varphi_A = 0,415$
- Nenndurchmesser  $D_N = 0,125 \text{ m}$
- Nennfläche  $A_N = 0,0123 \text{ m}^2$
- Spezifische Gaskonstante  $R_i = 287,3 \text{ J}/(\text{kgK})$

Für die Beispielrechnung wird auch hier eine Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s und 29,52 m<sup>3</sup>/min Volumenstrom angenommen.

Die Dichte der trockene Luft ist :

$$\underline{\underline{\rho_{tr}}} = \frac{p_i}{R_i \cdot T} = \frac{101500 \text{ Pa}}{287,3 \text{ J}/\text{kgK} \cdot (273,15 + 22) \text{ K}} = \underline{\underline{1,197 \text{ kg}/\text{m}^3}}$$



und die Dichte der feuchten Luft :

$$\underline{\underline{\rho_f}} = \rho_{tr} \cdot \left( 1 - 0,377 \cdot \varphi_A \cdot \frac{\rho_s}{\rho_i} \right) = 1,197 \text{ kg/m}^3 \cdot \left( 1 - 0,377 \cdot 0,415 \cdot \frac{2643 \text{ Pa}}{101500 \text{ Pa}} \right) = \underline{\underline{1,192 \text{ kg/m}^3}}$$

Daraus ergibt sich wiederum die Masse der Luft pro Minute:

$$\underline{\underline{\dot{m}_{Luft}}} = \dot{V}_{min} \cdot \rho_f = 29,52 \text{ m}^3/\text{min} \cdot 1,192 \text{ kg/m}^3 = \underline{\underline{35,188 \text{ kg/min}}}$$

Entsprechend beträgt die Masse der Prüfpartikel pro Minute:

$$\underline{\underline{\dot{m}_{Partikel}}} = \frac{1}{100} \cdot \dot{m}_{Luft} = \frac{1}{100} \cdot 35,188 \text{ kg/min} = \underline{\underline{0,352 \text{ kg/min}}}$$

Tabelle für die Partikelbeladungen der einzelnen Strömungsgeschwindigkeiten:

Strömungsgeschwindigkeit in m/s	Partikelbeladung kg/min
20	0,176
25	0,220
30	0,264
35	0,308
40	0,352

Tabelle 4.3.1: Partikelbeladung



Beobachtungen während den Messungen:

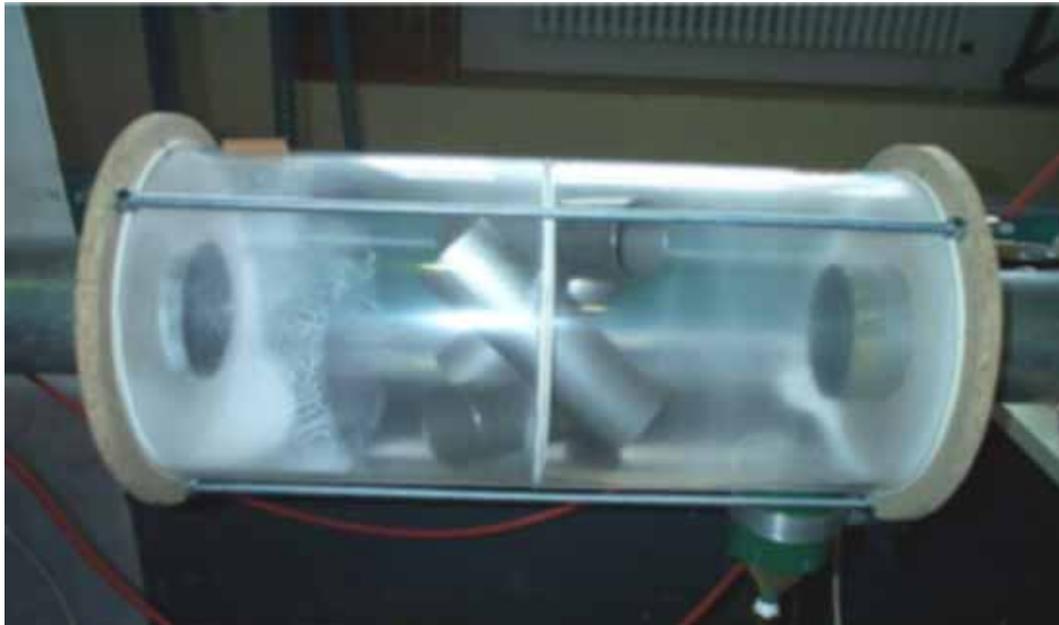


Abbildung 4.3.1: Strömungsgeschwindigkeit 20 m/s, Prüfzeit 30 s

Die Prüfpartikel hafteten, aufgrund der statischen Aufladung zwischen den einzelnen Partikeln, sehr stark aneinander.

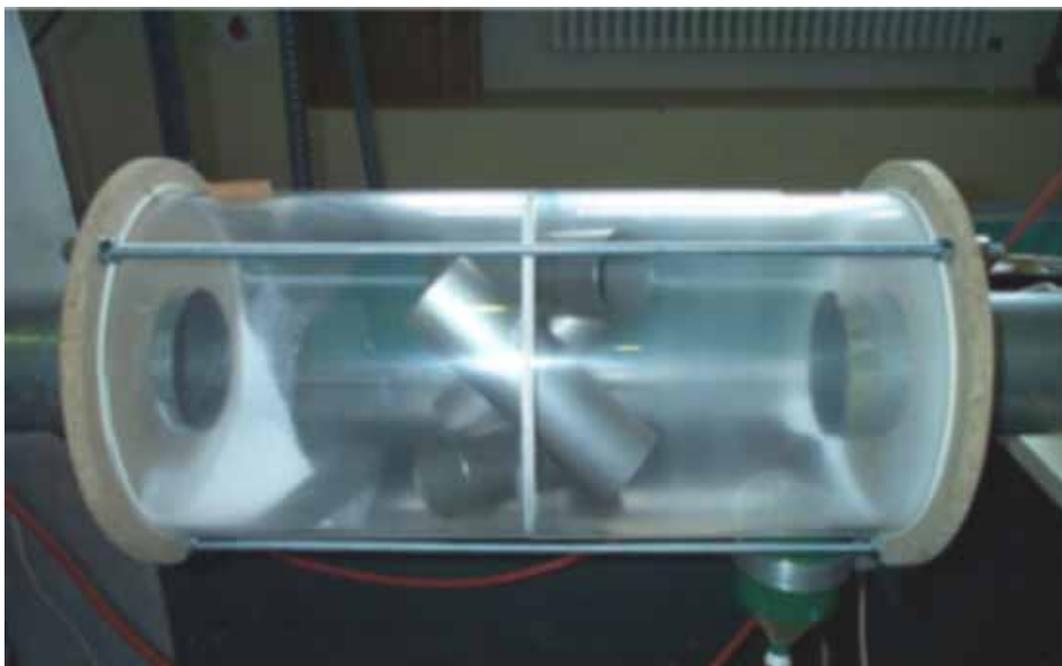


Abbildung 4.3.2: Strömungsgeschwindigkeit 20 m/s, Prüfzeit 1 min 30 s

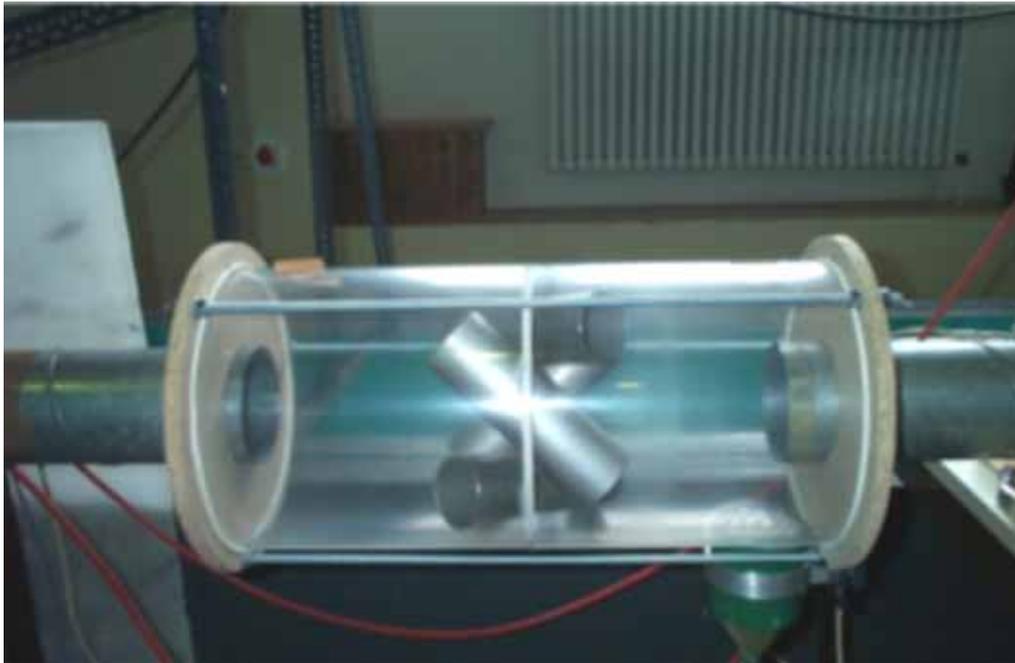


Abbildung 4.3.3: Strömungsgeschwindigkeit 20 m/s, Prüfzeit 12 min

Bei diesem Versuch wurden, erst nach einer langen Prüfzeit, die Prüfpartikel vollständig abgeschieden.

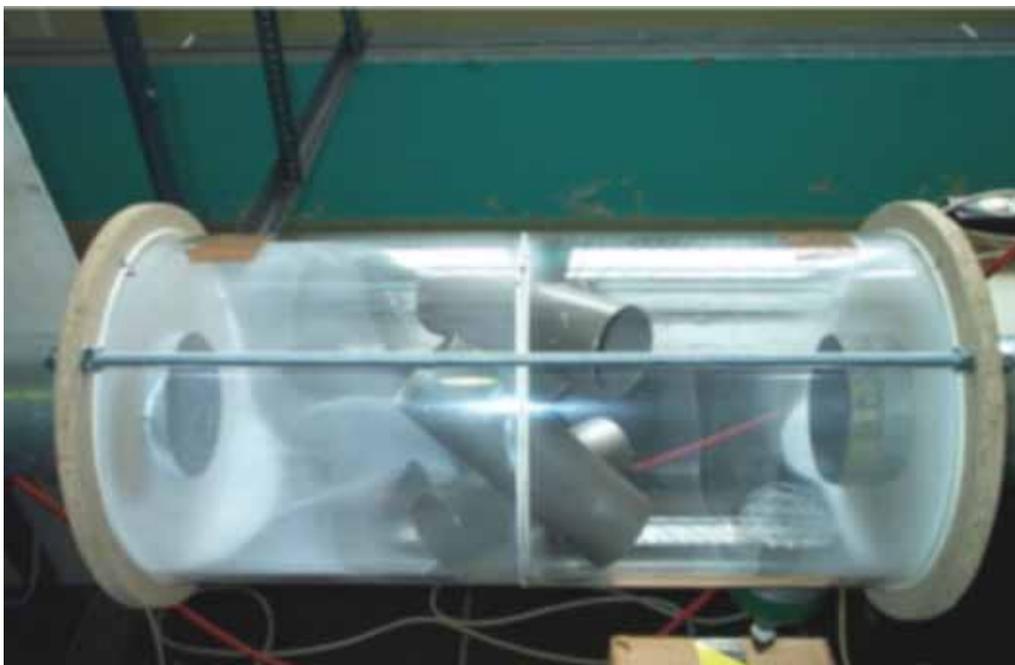


Abbildung 4.3.4: Strömungsgeschwindigkeit 25 m/s, Prüfzeit 30 s

Die Prüfpartikel der Größe bis 0,22 mm (feine Körnung) setzten sich wie feinsten Staub ab.

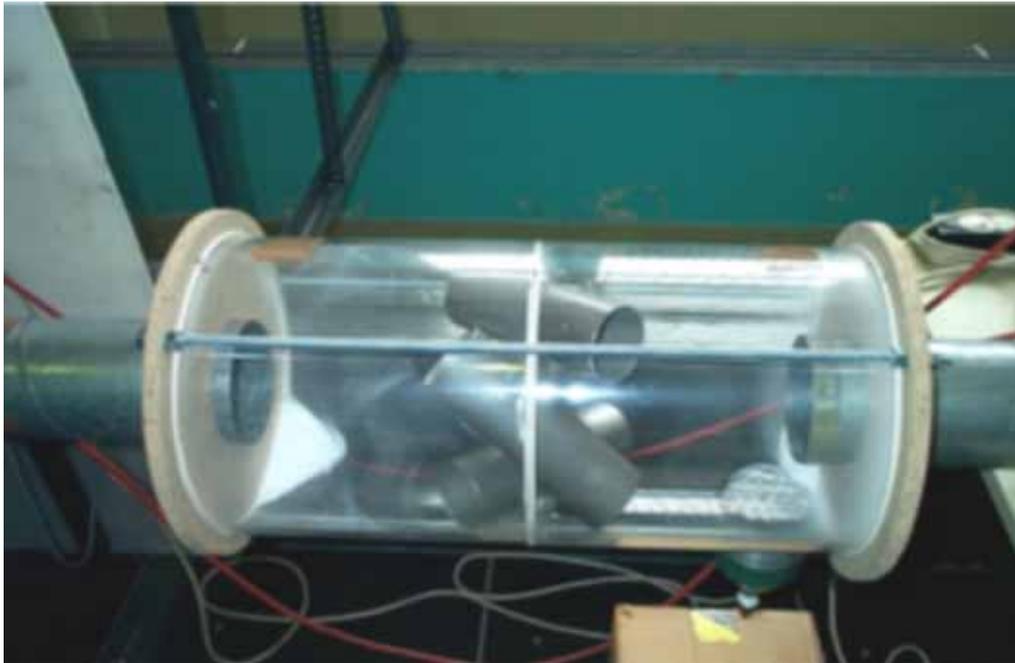


Abbildung 4.3.5: Strömungsgeschwindigkeit 25 m/s, Prüfzeit 3 min

Ab einer Strömungsgeschwindigkeit von 25 m/s wurden Partikelhaufen durch die Strömung in den Austritt mitgerissen.

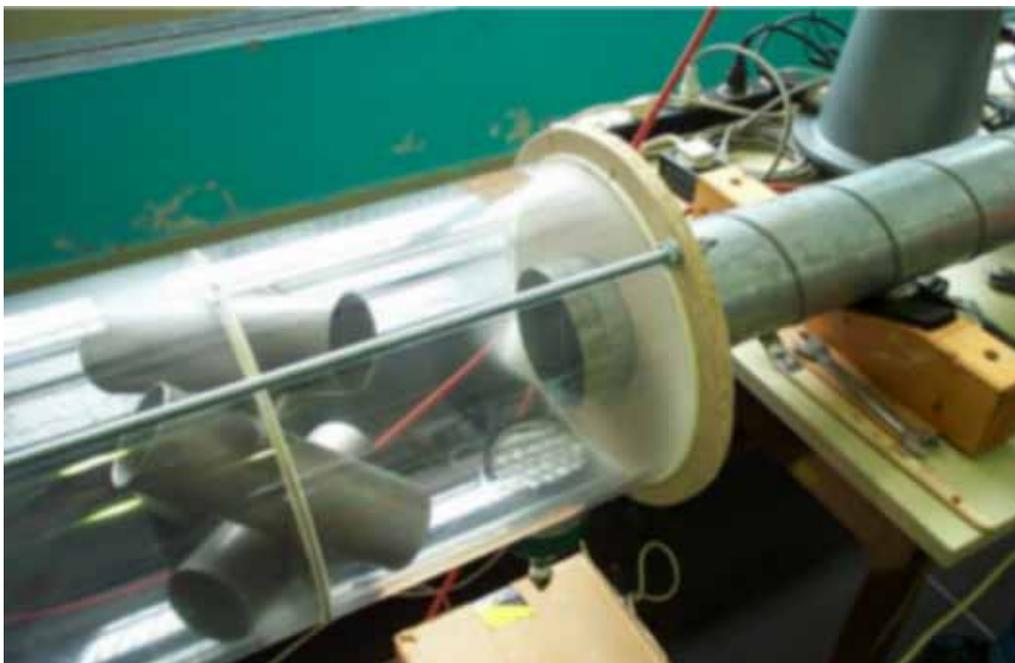


Abbildung 4.3.6: Strömungsgeschwindigkeit 25 m/s, Prüfzeit 3 min, 41 s

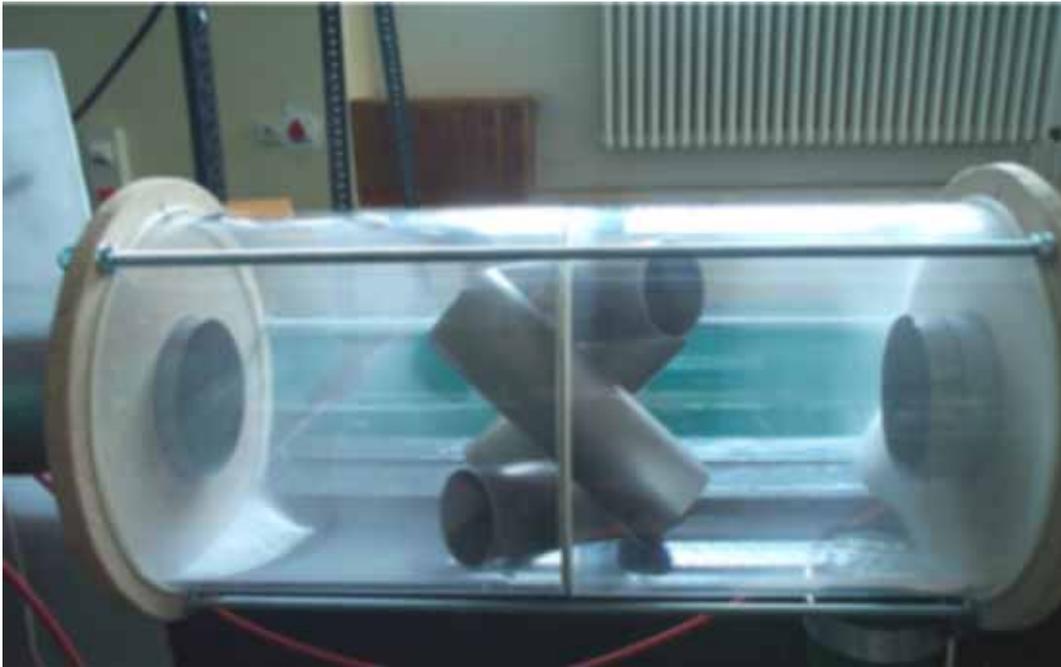


Abbildung 4.3.7: Strömungsgeschwindigkeit 30 m/s, Prüfzeit 2 min

Höhere Strömungsgeschwindigkeiten: Die Prüfpartikel hielten sich als Partikelhaufen in der Drallströmung (siehe Abbildung) und verharrten dann in einer bestimmten Höhe, was dazu führte, dass Partikel von dort in das Austrittsrohr gefördert wurden. Die Prüfzeit verkürzte sich, jedoch blieben noch Restpartikel in der ersten Kammer liegen.

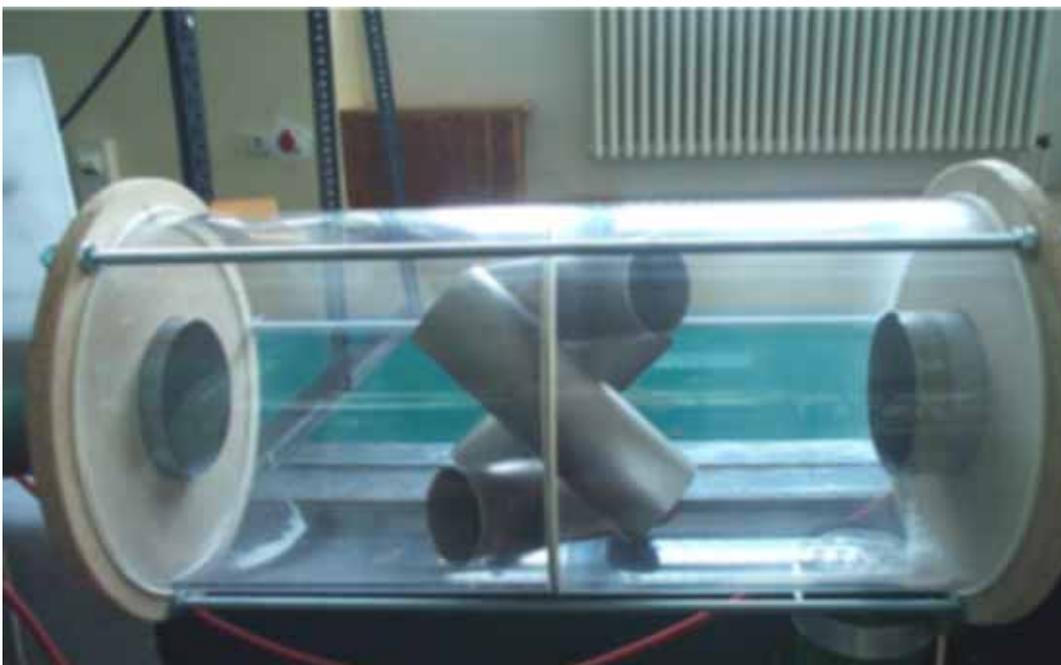


Abbildung 4.3.8: Strömungsgeschwindigkeit 30 m/s, Prüfzeit 4 min 30 s



Abbildung 4.3.9: Strömungsgeschwindigkeit 35 m/s, Mitnahme der Prüfpartikel

Ab einer Strömungsgeschwindigkeit von 35 m/s erfolgte eine erste sichtbare stetige Förderung der Partikel durch die Drallströmung in das Austrittsrohr.

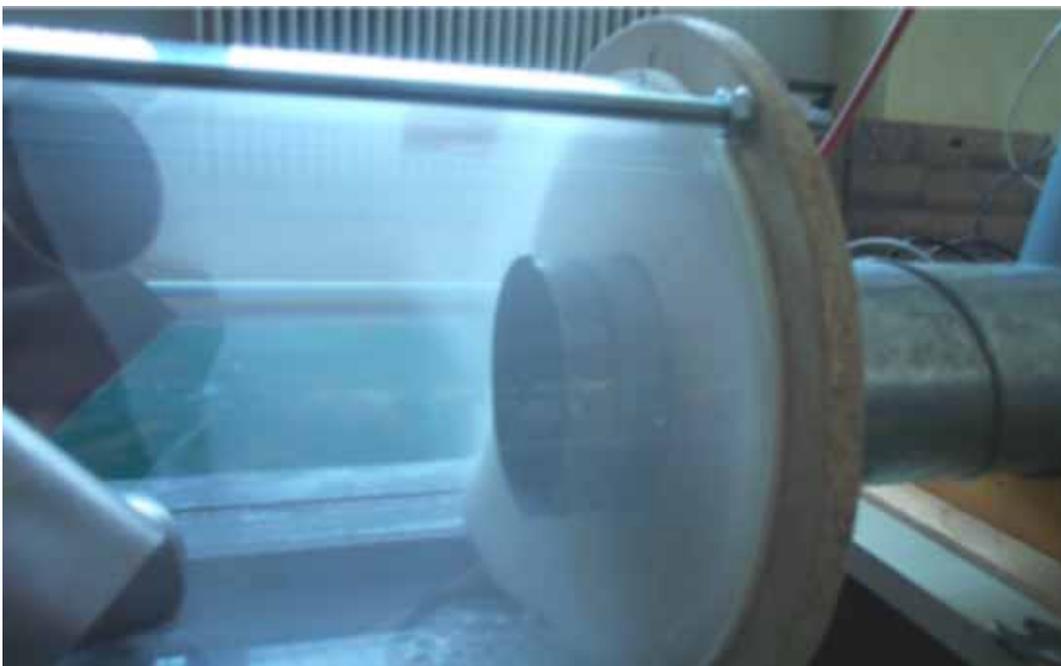


Abbildung 4.3.10: Strömungsgeschwindigkeit 35 m/s, Mitnahme der Prüfpartikel

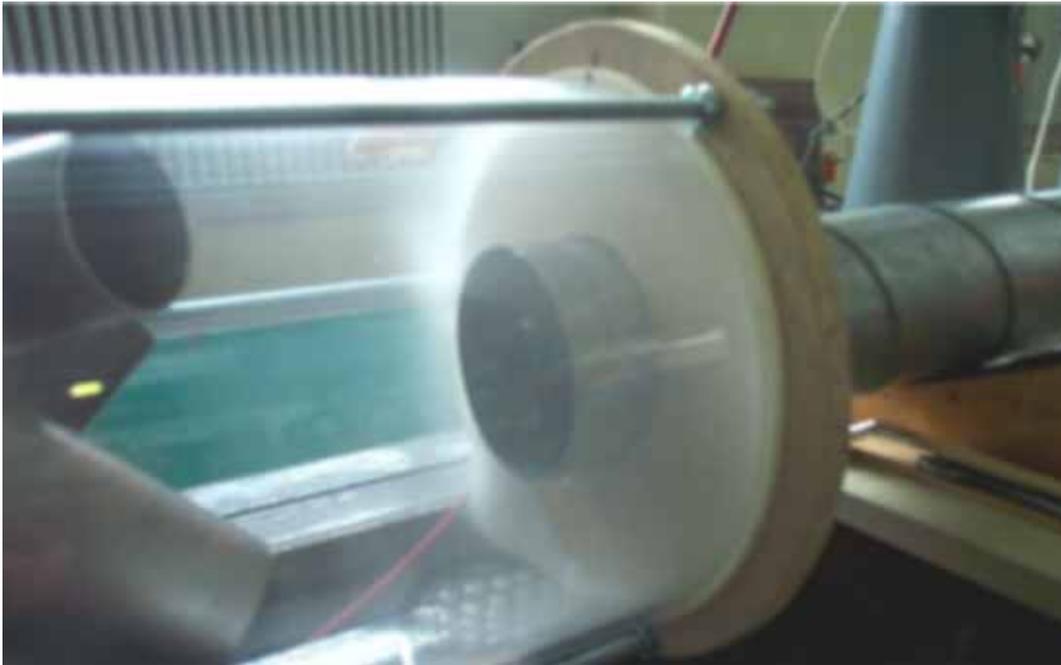


Abbildung 4.3.11: Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s, Prüfzeit 20 s

Trotz Verwirbelungen der Partikel in der ersten Kammer, haften die Prüfpartikel bei der maximalen Strömungsgeschwindigkeit so stark aneinander, dass sie immer nur zeitweise in die zweite Kammer gefördert wurden (siehe folgende Abbildung).

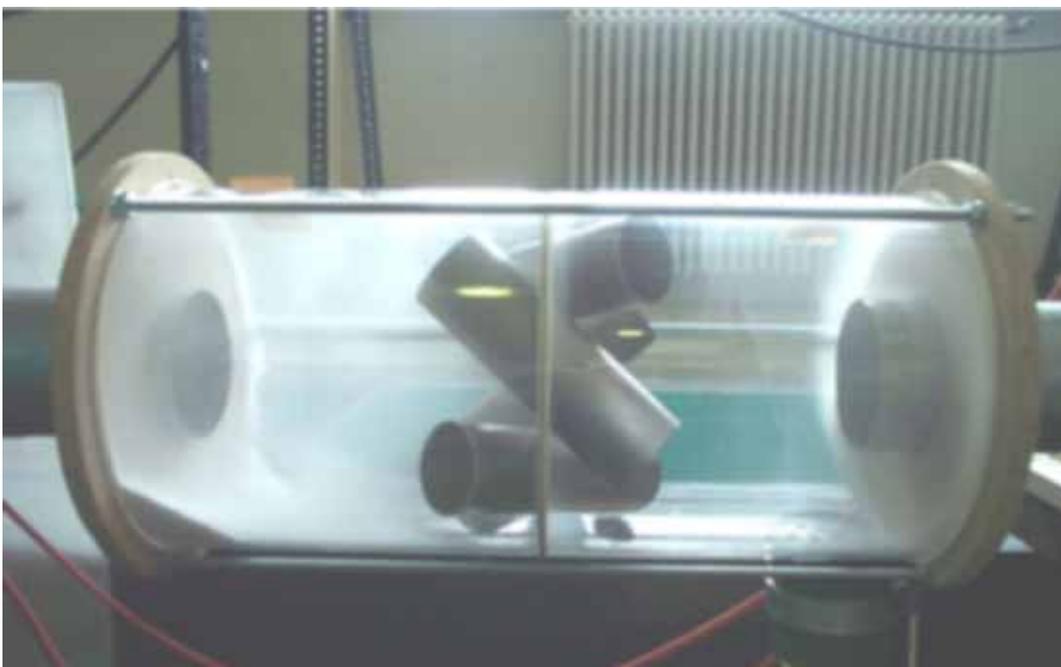


Abbildung 4.3.12: Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s, Prüfzeit 1 min

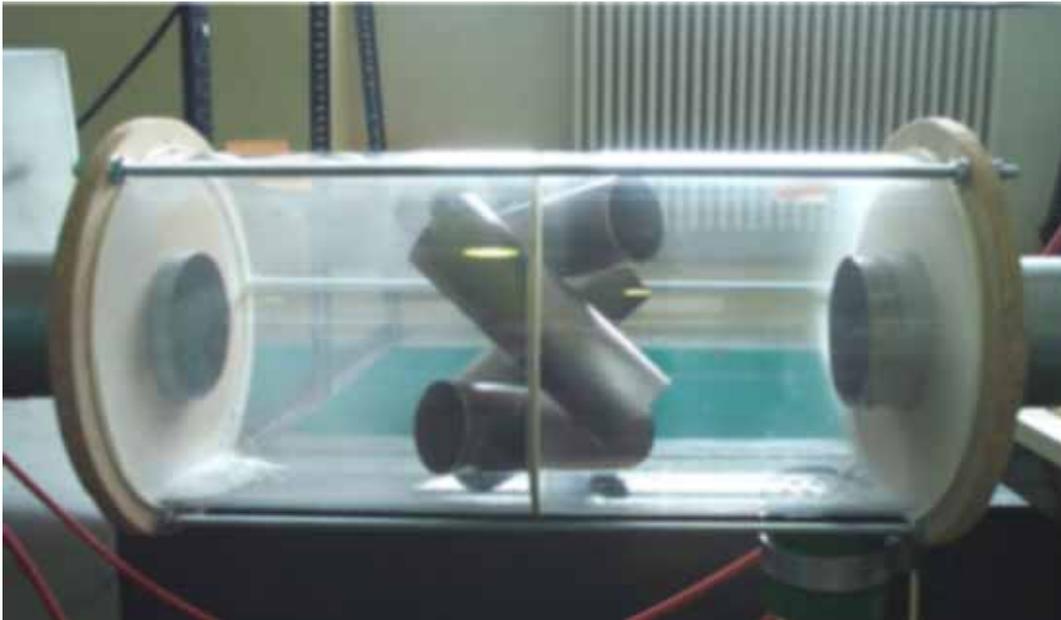


Abbildung 4.3.13: Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s, Prüfzeit 2 min

Die Prüfzeit verringerte sich zwar auf wenige Minuten, jedoch blieben auch hier noch Restpartikel in der ersten Kammer liegen.

Bemerkung zu den Prüfpartikeln :

Da die Prüfpartikel dazu neigten durch elektrostatische Aufladung zusammen zuhaften, wurden sie zeitweise als Haufen in die Strömung mitgerissen. Somit muss befürchtet werden, dass diese Prüfpartikel für die Messungen ebenfalls nicht geeignet waren.



## 5 Auswertung der Messungen nach Norm

### 5.1 Abscheidegrad der Partikel mittlerer Körnung

Als Grundlage für die Auswertung und Beurteilung der Abscheidegrade des Funkenfängers diente die DIN EN 1834-1 <sup>[1]</sup>. In dieser Norm sind die allgemeinen Anforderungen an die Mindestabscheidegrade der verschiedenen Korngrößen festgehalten. Zur Erfassung des Abscheidegrades kam noch die Aufnahme der Druckverluste über dem Drallrohrabscheider mit Partikelbeladung hinzu.

Korngröße mm	Abscheidegrad %
0,1	95
0,2	99
0,5	100

Tabelle 5.1.1: Mindestabscheidegrad von Funkenfängern nach DIN EN 1834-1 <sup>[1]</sup>

Die benötigte Partikelmenge von max. 355g wurde auf einer Präzisionswaage (Anzeigefehler 1g) gemessen und für ca. eine Minute kontinuierlich über die Dosierrinne und die Zellenradschleuse dem Luftstrom zugeführt. Durch Wiegen der Masse vor der Beladung und Wiegen der aufgefangenen Masse nach den einzelnen Messungen wurde der Abscheidegrad ermittelt.

Druckverlustmessungen:

Zur Beurteilung des Abscheidegrades müssen die Druckverluste mit der Beladung aufgenommen werden und mit den Messwerten der Druckverluste ohne Beladung für die Strömungsgeschwindigkeiten von 20 m/s und 40 m/s aus dem Kapitel 3.4. verglichen werden. Somit ist es dann möglich eine Bewertung der Druckverluste mit Gutbeladung vorzunehmen.



	$\Delta p_{\text{Messreihe1}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{\text{Messreihe2}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{1,2}$ (mit Beladung)
$c_{\text{min}} = 20 \text{ m/s}$	955	955	957
$c_{\text{max}} = 40 \text{ m/s}$	3840	3845	3708

Tabelle 5.1.2: Druckverluste mit und ohne Partikelbeladung

Die Druckverlustwerte mit Beladung sind teilweise geringer als ohne Beladung. Für die weiteren Betrachtungen der Abscheidegrade spielen diese Abweichungen aufgrund von Messungenauigkeiten aber keine signifikante Rolle.

Messung	c in m/s	$\dot{V}$ in m <sup>3</sup> /s	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar	t in min
1	20,04	0,246	-2,42	9,7	-3,46	6
2	20,00	0,245	-2,41	9,56	-3,48	6
3	20,00	0,245	-2,41	9,54	-3,45	6
4	20,00	0,245	-2,41	9,52	-3,45	6
5	20,00	0,245	-2,41	9,52	-3,45	6,5
1	24,75	0,304	-3,69	14,66	-5,25	3,5
2	24,85	0,305	-3,72	14,7	-5,28	4
3	24,75	0,304	-3,69	14,72	-5,18	abgebrochen
4	24,72	0,303	-3,68	14,7	-5,22	4
5	24,75	0,304	-3,69	14,64	-5,22	3
1	29,72	0,365	-5,32	21,26	-7,45	3
2	29,72	0,365	-5,32	21,24	-7,46	3
3	29,80	0,366	-5,35	21,28	-7,49	3
4	29,80	0,366	-5,35	21,3	-7,49	3
5	29,69	0,364	-5,31	21,18	-7,45	3
1	34,74	0,426	-7,27	29,18	-10,2	2,5
2	34,76	0,427	-7,28	29,12	-10,17	2,5
3	34,69	0,426	-7,25	29,08	-10,18	2,5
4	34,76	0,427	-7,28	29,14	-10,15	3
5	34,69	0,426	-7,25	29,18	-10,16	2,5
1	39,46	0,484	-9,38	37,8	-13,05	2,5
2	39,40	0,483	-9,35	37,76	-12,96	2,5
3	39,31	0,482	-9,31	37,76	-12,98	2
4	39,33	0,483	-9,32	35,5	-12,18	2
5	39,12	0,480	-9,22	36,6	-12,65	2

Tabelle 5.1.3: Druckverluste bei Partikelbeladung mit mittlerer Körnung



Auswertung des Abscheidegrades:

Beispielrechnung der Abscheidegrade für die minimale Strömungsgeschwindigkeit von 20 m/s:

$$\dot{m}_{\text{Beladung}} = \frac{1}{100} \cdot \dot{m}_{\text{Luft}} = \frac{1}{100} \cdot 177 \text{ kg/min} = \underline{\underline{0,177 \text{ kg/min}}}$$

$$\underline{\underline{\text{Abscheidegrad}}} = \frac{m_{\text{Aufgefangen}}}{m_{\text{Beladung}}} = \frac{0,1759 \text{ kg}}{0,1770 \text{ kg}} = 0,9938 = \underline{\underline{99,38 \%}}$$

und für die maximale Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s:

$$\dot{m}_{\text{Beladung}} = \frac{1}{100} \cdot \dot{m}_{\text{Luft}} = \frac{1}{100} \cdot 35,572 \text{ kg/min} = \underline{\underline{0,355 \text{ kg/min}}}$$

$$\underline{\underline{\text{Abscheidegrad}}} = \frac{m_{\text{Aufgefangen}}}{m_{\text{Beladung}}} = \frac{0,352 \text{ kg}}{0,355 \text{ kg}} = 0,9915 = \underline{\underline{99,15 \%}}$$

Auswertung des Abscheidegrades:

Messung	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgefangen}}$ in g	$m_{\text{Luft}}$ in kg/min	Abscheidegrad in %
1	177	175,9	17,78	99,38
2	177	176,9	17,74	99,94
3	177	175,2	17,74	98,98
4	177	175,6	17,74	99,21
5	177	172,7	17,74	97,57
1	222	220	21,96	99,10
2	222	218	22,04	98,20
3	222	218,2	21,96	98,29
4	222	219,5	21,93	98,87
5	222	219,4	21,96	98,83
1	266	263,9	26,36	99,21
2	266	263,9	26,36	99,21
3	266	264	26,44	99,25
4	266	263,7	26,44	99,14
5	266	263,5	26,34	99,06
1	310	306,7	30,82	98,94
2	310	308	30,84	99,35
3	310	306,7	30,77	98,94
4	310	307,2	30,84	99,10
5	310	307	30,77	99,03
1	355	352	35,00	99,15
2	355	352	34,95	99,15
3	355	352	34,87	99,15
4	355	352	34,89	99,15
5	355	352	34,70	99,15

Tabelle 5.1.4: Abscheidegrade bei mittlerer Körnung



Der Abscheidegrad für die Partikel der mittleren Körnung (0,22 mm bis 0,4 mm) ist durch die Norm DIN EN 1834-1 <sup>[1]</sup> auf mindestens 99 % festgelegt. Lediglich bei den Strömungsgeschwindigkeiten 30 m/s und 40 m/s wurde der Abscheidegrad vollständig erreicht, dagegen kam es bei allen übrigen Strömungsgeschwindigkeiten zu Unterschreitungen des vorgeschriebenen Abscheidegrades. Die Unterschiede entstanden vermutlich durch veränderte Verhältnisse in der Drallströmung bei diesen Geschwindigkeiten, also durch ein verändertes Gleichgewicht zwischen der an den Teilchen angreifenden Fliehkraft und der Schleppkraft der Austrittsströmung. Eine exakte, nachrechenbare Begründung hierfür konnte jedoch nicht gefunden werden.

Bemerkung zur Austragungszeit:

Nach der Norm DIN EN 1834-1 <sup>[1]</sup> ist lediglich die Zugabezeit der Prüfpartikel auf etwa eine Minute festgelegt, jedoch ist nicht ausdrücklich vorgeschrieben, welche Dauer die einzelnen Messungen der Abscheidegrade haben sollen. Es darf aber nach unserer Ansicht davon ausgegangen werden, dass auch nach Ablauf der Zugabezeit die Partikel nicht mehr als im Rahmen des zulässigen Abscheidegrades in den Abgasstrom gelangen dürfen. Aus diesem Grund entschieden wir uns, die Versuche nicht, wie analog zu den Versuchen mit DN 250 geplant, nach einer Minute abubrechen, sondern den Ventilator entweder bis zur vollständigen Abscheidung der Partikel in den Auffangbehälter oder bis zum Erreichen eines stabilen Zustandes der rotierenden Partikel in Betrieb zu halten. Auf diese Weise konnte das aufwändige Aussaugen des Abscheiders und anschließende Abwiegen des Staubsaugers entfallen. Die gesamte Laufzeit der Versuche mit Prüfpartikeln mittlerer Körnung (0,22 mm bis 0,4 mm) betrug anfänglich 6 Minuten und verringerte sich bei der maximalen Strömungsgeschwindigkeit auf 2 Minuten.

<sup>[1]</sup> vgl. DIN EN 1834-1



## 5.2 Abscheidegrad der Partikel grober Körnung

Die Auswertung und Berechnung des Abscheidegrades erfolgte analog denen im Kapitel 5.1, deshalb wurde auf eine Wiederholung der Berechnungen verzichtet.

Druckverlustmessungen:

Die Druckverluste mit Beladung wurden wieder aufgenommen und mit den Messwerten der Druckverluste ohne Beladung verglichen.

	$\Delta p_{\text{Messreihe1}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{\text{Messreihe2}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{1,2}$ (mit Beladung)
$c_{\text{min}} = 20 \text{ m/s}$	955	955	930
$c_{\text{max}} = 40 \text{ m/s}$	3840	3845	3862

Tabelle 5.2.1: Druckverluste mit und ohne Partikelbeladung

Die folgende Tabelle zeigt die Messwerte bei der Partikelbeladung mit grober Körnung.

Messung	c in m/s	$\dot{V}$ in m <sup>3</sup> /s	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar	t in min
1	20,01	0,246	-2,40	9,28	-3,36	6
2	19,93	0,245	-2,38	9,30	-3,38	8
3	19,81	0,243	-2,35	9,28	-3,39	7
4	19,89	0,244	-2,37	9,34	-3,38	10
5	19,89	0,244	-2,37	9,28	-3,36	6
1	24,85	0,305	-3,70	14,80	-5,17	3
2	24,82	0,305	-3,69	14,70	-5,16	2,5
3	24,75	0,304	-3,67	14,76	-5,17	2,5
4	24,82	0,305	-3,69	14,70	-5,19	2,5
5	24,82	0,305	-3,69	14,76	-5,19	2,5
1	29,88	0,367	-5,35	21,30	-7,58	2
2	29,80	0,366	-5,32	21,30	-7,55	2
3	29,77	0,365	-5,31	21,20	-7,55	2
4	29,86	0,366	-5,34	21,36	-7,53	2
5	29,74	0,365	-5,30	21,50	-7,58	2
1	34,79	0,427	-7,25	29,10	-10,05	2
2	34,81	0,427	-7,26	28,96	-10,04	2
3	34,74	0,426	-7,23	29,04	-10,04	2
4	34,86	0,428	-7,28	29,12	-10,07	2
5	34,86	0,428	-7,28	36,60	-12,6	2
1	39,55	0,485	-9,37	38,90	-13,5	2
2	39,72	0,487	-9,45	38,94	-13,28	2
3	39,67	0,487	-9,43	38,76	-13,27	2
4	39,51	0,485	-9,35	38,10	-13,15	2
5	39,72	0,487	-9,45	38,38	-13,22	2

Tabelle 5.2.2: Druckverluste bei Partikelbeladung mit grober Körnung



Auswertung des Abscheidegrades:

Beispielrechnung der Abscheidegrade für die minimale Strömungsgeschwindigkeit von 20 m/s:

$$\dot{m}_{\text{Beladung}} = \frac{1}{100} \cdot \dot{m}_{\text{Luft}} = \frac{1}{100} \cdot 177 \text{ kg/min} = \underline{\underline{0,177 \text{ kg/min}}}$$

$$\underline{\underline{\text{Abscheidegrad}}} = \frac{m_{\text{Aufgefangen}}}{m_{\text{Beladung}}} = \frac{0,1605 \text{ kg}}{0,177 \text{ kg}} = 0,91 = \underline{\underline{91\%}}$$

und für die maximale Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s:

$$\dot{m}_{\text{Beladung}} = \frac{1}{100} \cdot \dot{m}_{\text{Luft}} = \frac{1}{100} \cdot 35,572 \text{ kg/min} = \underline{\underline{0,355 \text{ kg/min}}}$$

$$\underline{\underline{\text{Abscheidegrad}}} = \frac{m_{\text{Aufgefangen}}}{m_{\text{Beladung}}} = \frac{0,3323 \text{ kg}}{0,355 \text{ kg}} = 0,94 = \underline{\underline{94\%}}$$

Auswertung des Abscheidegrades:

Messung	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgefangen}}$ in g	$m_{\text{Luft}}$ in kg/min	Abscheidegrad in %
1	177	160,5	17,66	91
2	177	159,1	17,58	90
3	177	162,1	17,47	92
4	177	160,4	17,55	91
5	177	160,2	17,55	91
1	222	210,3	21,93	95
2	222	211,3	21,90	95
3	222	209,8	21,84	95
4	222	209,3	21,90	94
5	222	211,2	21,90	95
1	266	249,9	26,36	94
2	266	250,5	26,29	94
3	266	251,1	26,27	94
4	266	251,2	26,34	94
5	266	251,7	26,24	95
1	310	291,8	30,69	94
2	310	291,3	30,71	94
3	310	291,7	30,65	94
4	310	292,5	30,75	94
5	310	289,5	30,75	93
1	355	332,3	34,89	94
2	355	330,2	35,04	93
3	355	330,1	35,00	93
4	355	330,5	34,85	93
5	355	329,3	35,04	93

Tabelle 5.2.3: Abscheidegrade bei grober Körnung



Für den Abscheidegrad der Partikel der groben Körnung (0,4 mm bis 0,6 mm) fordert die Norm DIN EN 1834-1 <sup>[1]</sup> annähernd 100 %. Bei allen gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten wurde der Abscheidegrad jedoch bei weitem nicht erreicht sondern lag bei lediglich 90...95 %. Diese gravierenden Abweichungen haben vermutlich ihren Ursprung darin, dass durch einen Pingpong-Effekt die Partikel, wie bei den Versuchsbeobachtungen im Kapitel 4.2 ausgeführt, wieder in die Strömung gerissen wurden.

Bemerkung zur Austragungszeit:

Auch hier wurde der Ventilator entweder bis zur vollständigen Abscheidung der Partikel in den Auffangbehälter oder bis zum Erreichen eines stabilen Zustandes der rotierenden Partikel in Betrieb gehalten. Diese Zeit (Prüfpartikel 0,4 mm bis 0,6 mm) betrug anfänglich 10 Minuten und verringerte sich bis zur maximalen Strömungsgeschwindigkeit auf 2 Minuten.

<sup>[1]</sup> vgl. DIN EN 1834-1

### **5.3 Abscheidegrad der Partikel feiner Körnung**

Als Grundlage für die Auswertung und Berechnung dienten hier ebenfalls die Überlegungen gemäß dem Kapitel 5.1.

Druckverlustmessungen:

Die Druckverluste mit Beladung wurden, genauso wie in den Kapiteln 5.1 und 5.2, wieder aufgenommen und mit den Messwerten der Druckverluste ohne Beladung verglichen.



	$\Delta p_{\text{Messreihe1}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{\text{Messreihe2}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{1,2}$ (mit Beladung)
$c_{\text{min}} = 20 \text{ m/s}$	955	955	936
$c_{\text{max}} = 40 \text{ m/s}$	3840	3845	3942

Tabelle 5.3.1: Druckverluste mit und ohne Partikelbeladung

In der folgenden Tabelle sind die Druckverlustwerte während der Messreihe mit feiner Körnung dargestellt:

Messung	c in m/s	$\dot{V}$ in m <sup>3</sup> /s	$\Delta p_a$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_i$ in mbar	t in min
1	19,853	0,244	-2,35	9,34	-3,37	11
2	19,810	0,243	-2,34	9,5	-3,38	12
3	19,853	0,244	-2,35	9,38	-3,36	10
4	19,768	0,243	-2,33	9,32	-3,33	10
5	19,725	0,242	-2,32	9,24	-3,3	10
1	24,708	0,303	-3,64	15,02	-5,25	6
2	24,742	0,304	-3,65	14,94	-5,24	6
3	24,742	0,304	-3,65	14,94	-5,2	6
4	24,742	0,304	-3,65	14,92	-5,26	7
5	24,809	0,304	-3,67	14,82	-5,28	8
1	29,616	0,363	-5,23	10,75	-7,43	5
2	29,673	0,364	-5,25	10,69	-7,52	5,5
3	29,588	0,363	-5,22	10,72	-7,49	5,5
4	29,616	0,363	-5,23	10,76	-7,44	8,5
5	29,588	0,363	-5,22	10,69	-7,48	8
1	34,846	0,428	-7,24	28,62	-10,05	5
2	34,749	0,426	-7,20	28,88	-10,06	4
3	34,870	0,428	-7,25	28,94	-10,09	4
4	34,822	0,427	-7,23	29,36	-10	9
5	34,798	0,427	-7,22	29,50	-10,05	5
1	39,958	0,490	-9,52	39,20	-13,44	4
2	39,916	0,490	-9,50	39,34	-13,37	4
3	40,042	0,491	-9,56	39,48	-13,48	4
4	39,979	0,491	-9,53	39,62	-13,46	7
5	40,021	0,491	-9,55	39,46	-13,48	8

Tabelle 5.3.2: Druckverluste bei Partikelbeladung mit feiner Körnung



Auswertung des Abscheidegrades:

Beispielrechnung der Abscheidegrade für die minimale Strömungsgeschwindigkeit von 20 m/s:

$$\dot{m}_{\text{Beladung}} = \frac{1}{100} \cdot \dot{m}_{\text{Luft}} = \frac{1}{100} \cdot 176 \text{ kg/min} = \underline{\underline{0,176 \text{ kg/min}}}$$

$$\underline{\underline{\text{Abscheidegrad}}} = \frac{m_{\text{Aufgefangen}}}{m_{\text{Beladung}}} = \frac{0,1723 \text{ kg}}{0,176 \text{ kg}} = 0,979 = \underline{\underline{97,9 \%}}$$

und für die maximale Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s:

$$\dot{m}_{\text{Beladung}} = \frac{1}{100} \cdot \dot{m}_{\text{Luft}} = \frac{1}{100} \cdot 35,1 \text{ kg/min} = \underline{\underline{0,351 \text{ kg/min}}}$$

$$\underline{\underline{\text{Abscheidegrad}}} = \frac{m_{\text{Aufgefangen}}}{m_{\text{Beladung}}} = \frac{0,2891 \text{ kg}}{0,351 \text{ kg}} = 0,817 = \underline{\underline{81,7 \%}}$$

Auswertung des Abscheidegrades:

Messung	m <sub>Beladung</sub> in g	m <sub>Aufgefangen</sub> in g	m <sub>Luft</sub> in kg/min	Abscheidegrad in %
1	176	172,3	17,432	97,9
2	176	172,4	17,395	98,0
3	176	173,2	17,432	98,4
4	176	172,9	17,357	98,2
5	176	173,3	17,320	98,5
1	220	216,8	21,695	98,5
2	220	217,9	21,725	99,0
3	220	218,3	21,725	99,2
4	220	216,9	21,725	98,6
5	220	216,1	21,784	98,2
1	263	260	26,005	98,9
2	263	255,4	26,055	97,1
3	263	251,4	25,980	95,6
4	263	253,6	26,005	96,4
5	263	255,3	25,980	97,1
1	307	256	30,597	83,4
2	307	264,6	30,512	86,2
3	307	273,5	30,618	89,1
4	307	270	30,576	87,9
5	307	281,7	30,555	91,8
1	351	289,1	35,085	82,4
2	351	286,7	35,049	81,7
3	351	291	35,159	82,9
4	351	282,9	35,104	80,6
5	351	293,9	35,141	83,7

Tabelle 5.3.3: Abscheidegrade bei feiner Körnung



Der Abscheidegrad für die Partikel der feiner Körnung (bis 0,22 mm) muss nach DIN EN 1834-1 <sup>[1]</sup> mindestens 95 % betragen. In unserem Versuch erfüllte der Drallrohr-Abscheider zunächst diese Forderung. Ab einer Strömungsgeschwindigkeit von 35 m/s verschlechterte sich der Abscheidegrad jedoch um mehr als 10 %-Punkte.

Die plötzliche Verschlechterung des Abscheidegrades entstand möglicherweise durch ein verändertes Verhalten der Prüfpartikel. Schon bei niedrigen Geschwindigkeiten verklumpten die Prüfpartikel durch die auftretende elektrostatische Aufladung. Bei der Strömungsgeschwindigkeit von 35 m/s sammelte sich das verklumpte Granulat in der zweiten Kammer so stark an, dass die Partikelanhäufungen kontinuierlich in den Austritt gefördert wurden.

Bemerkung zur Austragungszeit:

Die Laufzeit der Versuche bis zum Abbruch betrug anfänglich 11 Minuten und verringerte sich teilweise bei der maximalen Strömungsgeschwindigkeit auf 4 Minuten. Durch die unregelmäßige, stoßweise Förderung der Partikel von der ersten in die zweite Kammer entstanden zum Teil sehr unterschiedliche Nachlaufzeiten .

<sup>[1]</sup> vgl. DIN EN 1834-1



## 6 Weiterführende Versuche und Messungen

### 6.1 Einzelversuche bei geringerer Partikelbeladung

Begründung für eine Änderung der Zugabezeit der Beladung:

Ursprünglich sah die Aufgabenstellung vor, neben den Normversuchen eine zweite, vollständige Messreihe mit halber Gutbeladung (1/200) durchzuführen. Da sich bereits bei der Auswertung der Messreihe für mittlere Körnung (Kapitel 5.1) Unterschreitungen des vorgeschriebenen Abscheidegrades bei der Strömungsgeschwindigkeit 25 m/s zeigten, entschieden wir uns, durch neue Messungen zunächst zu untersuchen, ob bei einer geänderten Zugabezeit der Partikel diese Unterschreitungen ebenfalls auftreten. Die erste Versuchsreihe zur Untersuchung einer möglichen Verbesserung des Abscheidegrades wurde dann jedoch mit feinem Granulat für die maximale Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s durchgeführt und zwar unmittelbar im Anschluss an die entsprechende Prüfung nach Norm.

#### 6.1.1 Geänderte Zugabezeit der Partikelbeladung

Die Messungen erfolgten also nun nicht nach DIN EN 1843–1 <sup>[1]</sup>. Zur Prüfung der Abscheidegrade wurde diesmal das Massenverhältnis zwischen Prüfpartikel und Luft auf etwa 1/500 eingestellt, um einen möglichst deutlichen Effekt zu erzielen. Dies bedeutet, dass die Zugabezeit der Prüfpartikel auf 5 Minuten erhöht, die Prüfzeit jedoch wie in den Messungen und Auswertungen der Kapitel 4 und 5 aufgenommen wurde. Die Masse der Beladung richtete sich nach den Berechnungen in Kapitel 4 für die Partikel feiner Körnung.

Randbedingungen für die Berechnungen sind:

- Lufttemperatur  $t = 20,5$
- Genormte Prüfzeit  $T = 60 \text{ s}$
- Spezifischer Druck  $p_s = 2337 \text{ Pa}$
- Luftdruck  $p_i = 1009 \text{ Pa}$
- Luftfeuchtigkeit  $\varphi_A = 0,42$
- Durchmesser  $D = 0,125 \text{ m}$
- Nennfläche  $A_N = 0,0123 \text{ m}^2$
- Spezifische Gaskonstante  $R_i = 287,3 \text{ J/(kgK)}$

Beobachtungen während den Messungen:

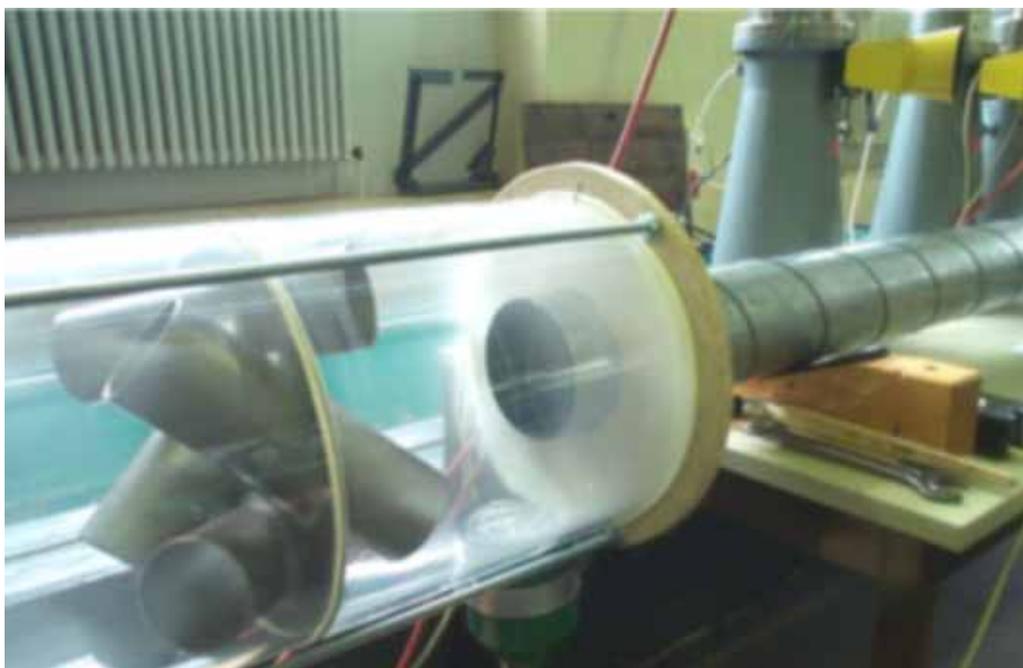


Abbildung 6.1.1: Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s, Prüfzeit 3 min

Die Prüfpartikel wurden in die erste Kammer gefördert, lagerten sich dort aber nicht mehr ab, sondern wurden direkt in die zweite Kammer getragen. Dort sammelten sich die Partikel ebenfalls nur kurzzeitig an und waren bald verschwunden.

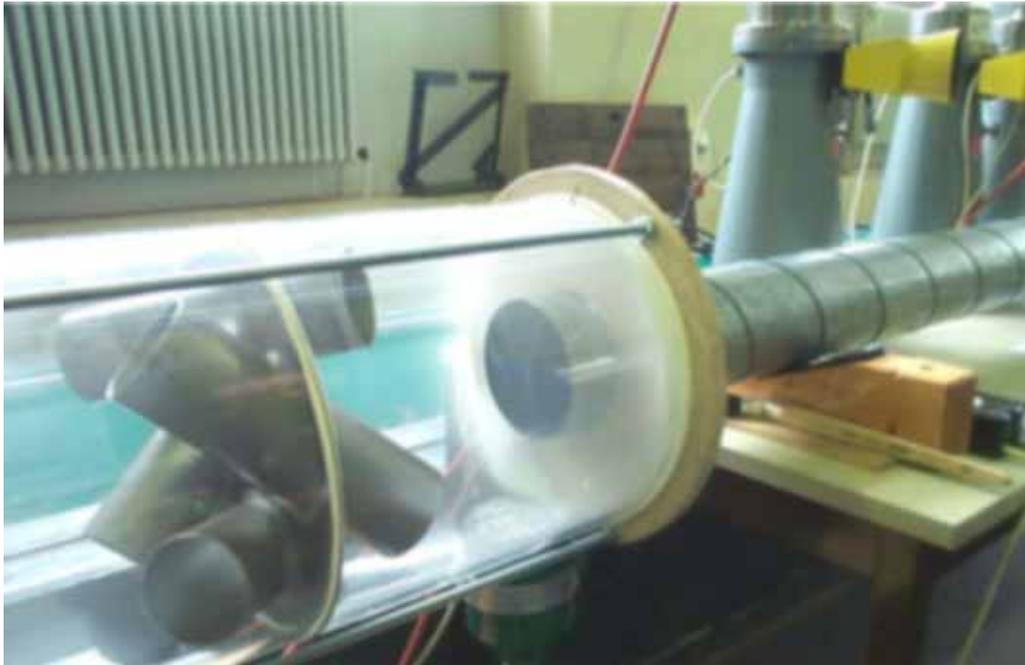


Abbildung 6.1.2: Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s, Prüfzeit 4 min 30 s

Die Prüfpartikel schieden sich so schnell ab, dass sich die Prüfzeit nicht sehr von der Zugabezeit unterschied.

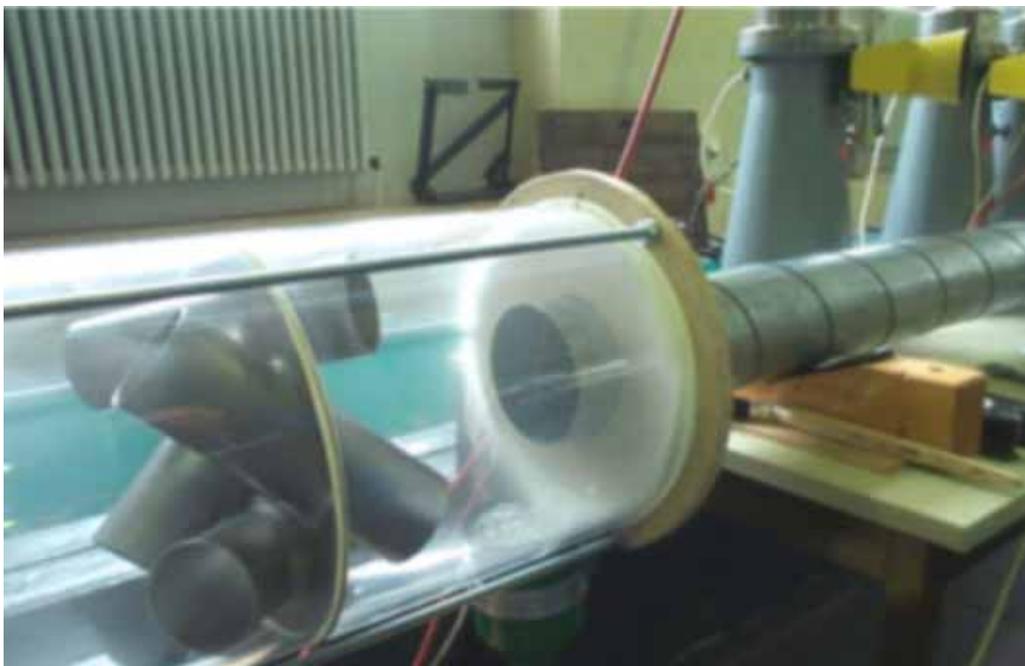


Abbildung 6.1.3: Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s, Prüfzeit 6 min



Wie in den vorangegangenen Messungen in Kapitel 4.1 wurde am Ende ein stationärer Zustand der Partikel beobachtet, so dass die Versuche nach einer gewissen Laufzeit abgebrochen wurden. Beim Abwiegen der aufgefängenen Partikel deutete sich allerdings bereits an, dass eine Verbesserung der Abscheideleistung nicht zu Stande kam. Aus diesem Grund verwarfen wir die Messergebnisse und widmeten uns stattdessen der Untersuchung des Effektes einer Verlängerung der Zugabezeit bei mittlerer Körnung. Unserer Augenmerk richtete sich hier vor allem auf die vermuteten Extremwerte der Abscheidung, d.h. bei 25 m/s (schlechtester Abscheidegrad im Normversuch) und 40 m/s (maximale Strömungsgeschwindigkeit).

### 6.1.2 Abscheidegrade bei mittlerer Körnung

Druckverlustmessungen:

Wieder mussten die Druckverluste mit der Beladung aufgenommen werden und mit den Messwerten der Druckverluste ohne Beladung für eine Geschwindigkeit von 40 m/s aus dem Kapitel 3.4. verglichen werden.

Messung	c in m/s	$\dot{V}$ in m <sup>3</sup> /s	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_i$ in mbar	t in min
1	25,05	0,307	-3,74	14,94	-5,31	4,25
2	25,08	0,308	-3,75	14,9	-5,31	5,73
3	25,12	0,308	-3,76	15,02	-5,33	5,28
1	39,92	0,490	-9,50	38,36	-13,25	5,33
2	39,88	0,489	-9,48	38,08	-13,18	5,33
3	39,88	0,489	-9,48	38,3	-13,21	4,78
4	39,92	0,490	-9,50	38,36	-13,26	4,82

Tabelle 6.1.1: Druckverluste bei Partikelbeladung mit mittlerer Körnung

	$\Delta p_{\text{Messreihe1}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{\text{Messreihe2}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{1,2}$ (mit Beladung)
$c_{\text{max}} = 40\text{m/s}$	3840	3845	3928

Tabelle 6.1.2: Druckverlust mit und ohne Beladung



## Auswertung des Abscheidegrades:

Messung	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgefangen}}$ in g	$m_{\text{Luft}}$ in kg/min	Verhältnis $\frac{\text{Partikel}}{\text{Luft}}$	Abscheidegrad in %	Mittelwert $\Delta m$
1	220	215,7	21,986	99,938	98,05	
2	220	214,8	22,016	100,071	97,64	4,70
3	220	215,4	22,045	100,205	97,91	
1	350	333,8	35,041	100,118	95,37	
2	350	335,2	35,004	100,012	95,77	15,30
3	350	335,1	35,004	100,012	95,74	
4	350	334,7	35,041	100,118	95,63	

Tabelle 6.1.3: Abscheidegrade bei mittlerer Körnung

Der Abscheidegrad für die Partikel der mittleren Körnung (0,22 mm bis 0,4 mm) ist bekanntlich durch die DIN EN 1834-1 <sup>[1]</sup> auf mindestens 99% festgelegt. Die Abscheidegrade bei den Strömungsgeschwindigkeiten 25 m/s und 40 m/s wurden bei fünffacher Zugabezeit ebenfalls nicht erreicht, sondern verschlechterten sich sogar um ca. 1 %-Punkt bzw. um ca. 4 %-Punkte.

Bemerkung zu den Ergebnissen bei geänderter Zugabezeit:

Da die Abscheidegrade sich verschlechterten, kann gefolgert werden, dass die Änderung der Zugabezeit sogar einen negativen Einfluss auf den Abscheidegrad hatte. Aus diesen Erkenntnissen heraus entschieden wir uns, bei allen weiteren Messungen die Zugabezeit wieder auf eine Minute zu verkürzen.

<sup>[1]</sup> vgl. DIN EN 1834-1



## 6.2 Einzelversuche nach Veränderung des Austrittsrohres

Begründung für eine Änderung am Drallrohrabscheider:

Die Unterschreitungen der vorgeschriebenen Abscheidegrade bei den Prüfungen nach Norm (Kapitel 5.1 bis 5.3) legten nahe, weitere konstruktive Modifikationen am Drallrohr-Abscheider vorzunehmen. Es war zu untersuchen, ob bei einer Änderung des Austrittsrohres, von 50 mm auf 100 mm Länge, diese Unterschreitungen ebenfalls auftreten. Wie im vorangegangenen Versuch konzentrierten wir uns dabei auf eine Verbesserung des Abscheidegrades bei den Strömungsgeschwindigkeiten 25 m/s und 40 m/s für Granulat mittlerer Körnung. Später führten wir außerdem Messungen für feine Prüfpartikel durch, weil hier besonders bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten inakzeptable Abscheideleistungen zu verzeichnen waren. Es wurde deshalb nur bei 40 m/s geprüft und zwar zum einen mit frischem, ungebrauchtem Granulat, zum anderen jedoch mit bereits gebrauchtem, welches auf Grund des schon erwähnten Verklumpungs-Verhaltens besonders gut zu beobachtende Effekte erwarten ließ.

### 6.2.1 Veränderung des Austrittsrohres

Die Messungen erfolgten formal nach DIN EN 1843–1 <sup>[1]</sup>. Zur Prüfung der Abscheidegrade wurde das Massenverhältnis zwischen Prüfpartikel und Luft also wieder auf etwa 1/100 eingestellt. Die Masse der Beladung richtete sich nach den Berechnungen in Kapitel 4.1 für die Partikel mittlerer Körnung und 4.3 für die Partikel feiner Körnung.



Randbedingungen für die Berechnungen sind:

- Lufttemperatur  $t = 21^\circ\text{C}$
- Genormte Prüfzeit  $T = 60 \text{ s}$
- Spezifischer Druck  $p_s = 2490 \text{ Pa}$
- Luftdruck  $p_i = 100500 \text{ Pa}$
- Luftfeuchtigkeit  $\varphi_A = 0,40$
- Durchmesser  $D = 0,125 \text{ m}$
- Nennfläche  $A_N = 0,0123 \text{ m}^2$
- Spezifische Gaskonstante  $R_i = 287,3 \text{ J}/(\text{kgK})$

Beobachtungen während den Messungen mit feinem, bereits gebrauchtem Granulat:

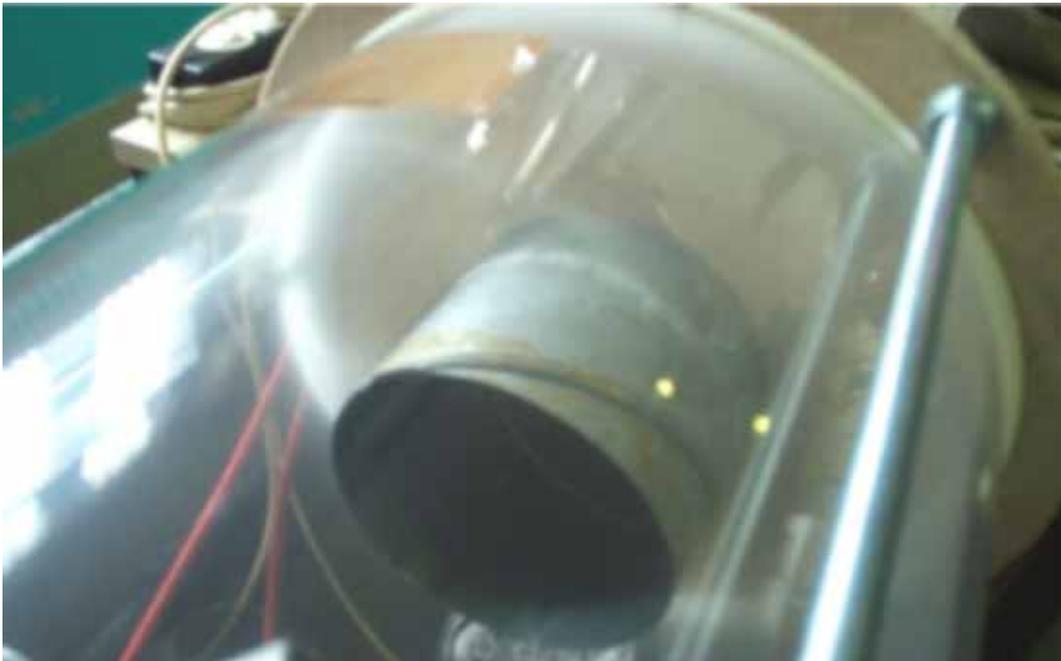


Abbildung 6.2.1: Mitnahme der Partikel bei Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s

Wie deutlich zu sehen ist, entstand ein Strömungsfaden, der die Partikel direkt über das Austrittsrohr führte und die Prüfpartikel in die Mündung förderte.

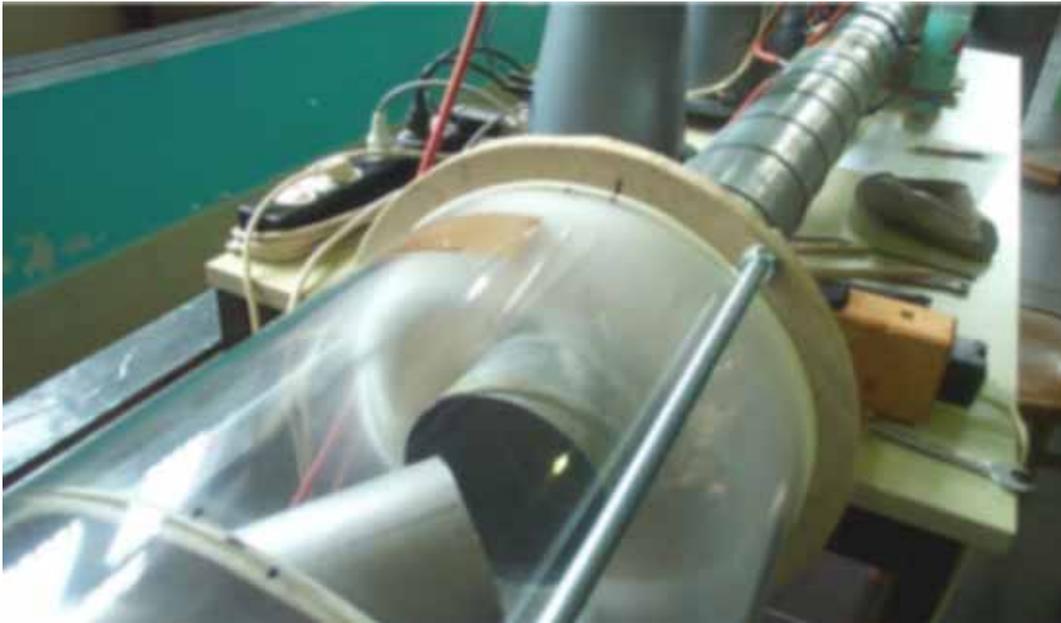


Abbildung 6.2.2: Strömungsfaden bei der Geschwindigkeit 40 m/s

Die Ausbildung charakteristischer Strömungsfäden aus Prüfpartikeln ließ sehr schlechte Abscheidegrade erwarten.



Abbildung 6.2.3: Mitreißen von Partikelhaufen bei 40 m/s

Wie in Abbildung 6.2.3 zu sehen ist, wurden bei dieser Strömungsgeschwindigkeit ganze Partikelhaufen durch die Strömung mitgerissen und am Austrittsrohr entlang zu dessen Mündung gefördert.

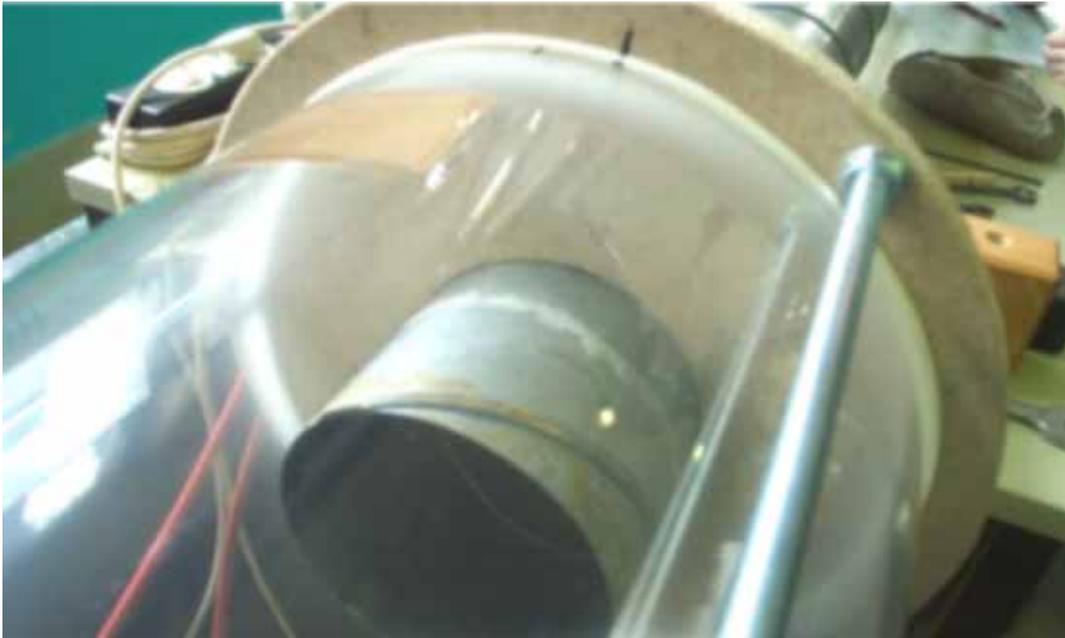


Abbildung 6.2.4: Endzustand bei 40 m/s und feinem Granulat

Wie auch in den früheren Messungen (Kapitel 4) entstand am Ende eine konstante Rotation der verbliebenen Teilchen, der Versuch wurde deshalb bei diesem stationären Zustand abgebrochen.

### 6.2.2 Abscheidegrad bei geändertem Austritt (mittlere Körnung)

Druckverlustmessungen:

Nach der Modifikation des Abscheiders waren die Druckverluste von besonderem Interesse, musste doch eine Erhöhung der Widerstandszahl des Abscheiders befürchtet werden.

Messung	$c$ in m/s	$\dot{V}$ in m <sup>3</sup> /s	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar
1	39,70	0,487	-9,34	39,9	-13,18
2	39,76	0,488	-9,37	39,94	-13,24
1	24,61	0,302	-3,59	15,04	-5,17
2	24,75	0,304	-3,63	15,18	-5,23

Tabelle 6.2.1: Druckverluste bei Partikelbeladung mit mittlere Körnung



	$\Delta p_{\text{Messreihe1}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{\text{Messreihe2}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{1,2}$ (mit Beladung)
$c_{\text{max}} = 40 \text{ m/s}$	3840	3845	3992

Tabelle 6.2.2: Druckverlust mit und ohne Beladung

Die Messungen bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s zeigten allerdings, dass die Erhöhung des Druckverlustes nur geringfügig war. Da bekanntlich schon die Normversuche ergeben hatten, dass der Unterschied mit / ohne Beladung vernachlässigbar war, konnte direkt mit den Werten der Druckverlustbestimmung aus Kapitel 3.3 bzw. 3.4 verglichen werden (40 m/s):

Wie man erkennt, waren die Druckverluste nun geringfügig höher als bei einem Austritt von 50 mm. Die Erhöhung stellte sich jedoch noch nicht kritisch dar ( $< 4 \%$ ), sodass auf die eingehende Untersuchung der Druckverlustwerte für weitere Strömungsgeschwindigkeiten bei mittlerem Granulat verzichtet werden konnte.

Auswertung des Abscheidegrades mittlerer Körnung:

Messung	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgefangen}}$ in g	$m_{\text{Luft}}$ in kg/min	Verhältnis Partikel/Luft	Abscheidegrad in %
1	351	344,8	34,645	98,704	98,23
2	351	345,2	34,701	98,863	98,35
1	220	216,7	21,479	97,632	98,50
2	220	216,9	21,598	98,175	98,59

Tabelle 6.2.3: Abscheidegrade bei mittlerer Körnung

Die vorgeschriebenen Abscheidegrade von 99 % für die Partikel der mittleren Körnung (0,22 mm bis 0,4 mm) wurden wie in Kapitel 4.1 ebenfalls nicht erreicht, sondern lagen immer noch um ca. 1 %-Punkt niedriger als gefordert. Im Vergleich zu den Werten bei den Versuchen mit 50 mm Austrittsrohr aber verbesserte sich der Abscheidegrad bei 25 m/s um 1 %-Punkt.



### 6.2.3 Abscheidegrad bei feinem, frischem Granulat

Druckverlustmessungen:

Auch hier wurden während der Messungen die Druckverluste notiert:

Messung	c in m/s	$\dot{V}$ in m <sup>3</sup> /s	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar
1	39,74	0,488	-9,36	39,76	-13,21
2	39,93	0,490	-9,45	40,02	-13,28

Tabelle 6.2.4: Druckverluste bei Partikelbeladung mit feiner Körnung (frisch)

	$\Delta p_{\text{Messreihe1}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{\text{Messreihe2}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{1,2}$ (mit Beladung)
$c_{\text{max}} = 40\text{m/s}$	3840	3845	3989

Tabelle 6.2.5: Druckverlust mit und ohne Beladung

Der Druckverlust war also wieder etwas höher, jedoch unproblematisch.

Auswertung des Abscheidegrades feiner Körnung :

Messung	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgefangen}}$ in g	$m_{\text{Luft}}$ in kg/min	Verhältnis Partikel/Luft	Abscheidegrad in %
1	350	343,6	34,682	99,092	98,17
2	350	342	34,849	99,567	97,71

Tabelle 6.2.6: Abscheidegrade bei feiner Körnung (frisches Granulat)

Der Abscheidegrad für die Partikel der feiner Körnung (bis 0,22 mm), der nach DIN EN 1834-1 <sup>[1]</sup> mindestens 95 % betragen muss, verbesserte sich bei der Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s deutlich um ca. 16 %-Punkte gegenüber dem Verhalten bei kurzem Austritt. Diese unerwartete Verbesserung entstand vermutlich aufgrund einer geänderten Strömungsrichtung im Bereich der Austrittsmündung. Im Kapitel 6.3 wird auf den möglichen Einfluss der Geschwindigkeitskomponenten näher eingegangen.



## 6.2.4 Abscheidegrad bei feinem, gebrauchtem Granulat

Begründung für den Einsatz gebrauchter Prüfpartikel:

Bei der Messreihe mit frischen, feinen Prüfpartikeln in der vorangegangenen Messung wurde ein erheblich besserer Abscheidegrad erreicht, der sogar die Anforderungen der DIN EN 1834-1 <sup>[1]</sup> erfüllte. Da aber gebrauchte Partikel in den früheren Versuchen dazu neigten durch statische Aufladung zusammenzukleben, wollten wir wissen, wie sich nun dieser Effekt auf die Abscheideleistung auswirkte.

Druckverlustmessungen:

Messung	c in m/s	$\dot{V}$ in m <sup>3</sup> /s	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar
1	39,91	0,490	-9,44	39,96	-13,26
2	39,89	0,490	-9,43	39,8	-13,23
3	39,64	0,486	-9,31	39,9	-13,12
4	39,70	0,487	-9,34	39,94	-13,18

Tabelle 6.2.7: Druckverluste bei Partikeln feiner Körnung (gebrauchtes Granulat)

	$\Delta p_{\text{Messreihe1}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{\text{Messreihe2}}$ (ohne Beladung)	$\Delta p_{1,2}$ (mit Beladung)
$c_{\text{max}} = 40\text{m/s}$	3840	3845	3990

Tabelle 6.2.8: Druckverlust mit und ohne Beladung

Somit waren die Druckverluste wieder etwas höher als bei einem Austrittsrohr von 50 mm Länge, jedoch ähnlich denen bei frischem, ungebrauchtem Granulat.

Auswertung des Abscheidegrades gebrauchten Granulats feiner Körnung :

Messung	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgefangen}}$ in g	$m_{\text{Luft}}$ in kg/min	Verhältnis Partikel/Luft	Abscheidegrad in %
1	350	335,5	34,830	99,515	95,86
2	350	344	34,812	99,462	98,29
3	350	339	34,590	98,827	96,86
4	350	340	34,645	98,986	97,14

Tabelle 6.2.9: Abscheidegrade bei feiner Körnung (gebrauchte Partikel)



Der Abscheidegrad für die Partikel der feinen Körnung (bis 0,22 mm) verbesserte sich ebenfalls wie bei der Messreihe mit frischen Prüfparkeln um ca. 16 %-Punkte. Daher kann vermutet werden, dass bei diesen Prüfparkeln das Strömungsverhalten an der Austrittsmündung den Grad der Abscheidung bestimmt und die Konsistenz des Granulats nicht von Bedeutung ist.

Abschließende Betrachtung:

Es ist zu sehen, dass die Änderung des Austrittsrohres nur für die feinen Prüfparkel eine wesentliche Verbesserung der Abscheidegrade bewirkte. Somit wäre diese konstruktive Änderung nur für Partikel bis 0,22 mm Größe ausreichend, um die Normwerte zu erfüllen.

[<sup>1</sup>] vgl. DIN EN 1834-1



### 6.3 Aufnahme des Drallprofils im Drallrohr-Abscheider

Im Kapitel 2.4 wurde bereits darauf hingewiesen, dass im Nachgang zum Hauptversuch nach Norm und zusätzlich zu allen bereits durchgeführten Messungen eine Profilmessung der Drallströmung erfolgte, um eine räumliche Vorstellung von Strömungsrichtung und Geschwindigkeitsverteilung im Drallrohr-Abscheider zu erhalten. Von Interesse ist dabei vor allem die Ausbildung der Strömung in der zweiten Kammer, weil dort letztendlich die Trennung von Partikelbeladung und Fluidstrom stattfinden soll. Leider konnte nicht auf einer Achse exakt auf Höhe der Mündung in das Austrittsrohr gemessen werden, um die in Kapitel 2.4 ausgeführten Gesetzmäßigkeiten anwenden zu können, weil zur Einführung der Sonde in die Strömung eine vorhandene Bohrung im Plexiglasmanntel genutzt werden musste, die sich etwa  $30\text{ mm}$  näher an der Kopfplatte, also oberhalb der Mündung befand (vgl. Abbildung 2.4.1). Deshalb konnte hier auch zwangsläufig nicht bis auf den Mündungsradius  $r_i$  hineingefahren werden, sodass keine Erkenntnisse gewonnen werden konnten, die als Berechnungsgrundlage hätten dienen können.

Für die Messung kam eine Fünf-Loch-Sonde zum Einsatz, deren hochsensible Drucksensoren direkt mit einem Mess-PC verbunden sind. Dort werden die Messwerte von einem speziellen Messprogramm aufgenommen und in tabellarischer Form abgespeichert. Die verwendete Sonde zeichnet sich dadurch aus, dass mit Hilfe der Erfassung des dynamischen Druckes an fünf verschiedenen Stellen auf der Mantelfläche einer angeströmten Kugel ein dreidimensionales Bild des Fluidstromes, also letztlich Betrag und Richtung der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden können. Zu diesem Zweck sind die einzelnen Druckaufnehmer der Fünf-Loch-Sonde so kalibriert, dass die fünf Druckwerte zusammen mit Positionierung der Kugel, ausgedrückt durch den Horizontalwinkel  $\alpha$  und den Azimutwinkel  $\delta$ , genauen Aufschluss über die Strömungsrichtung geben. Aus der Höhe der Drücke lässt sich dann der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit errechnen. Diese Berechnung übernahm eine Tabellenkalkulation mit den entsprechenden Umrechnungsfunktionen.

Die folgende Abbildung zeigt die prinzipielle Ausführung der Sonde und die mit ihr ermittelbaren Größen. Wie auf der Darstellung deutlich wird, erfolgt die Richtungsbestimmung durch Vergleich der Druckwerte zwischen jeweils zwei symmetrisch angeordneten Messbohrungen.

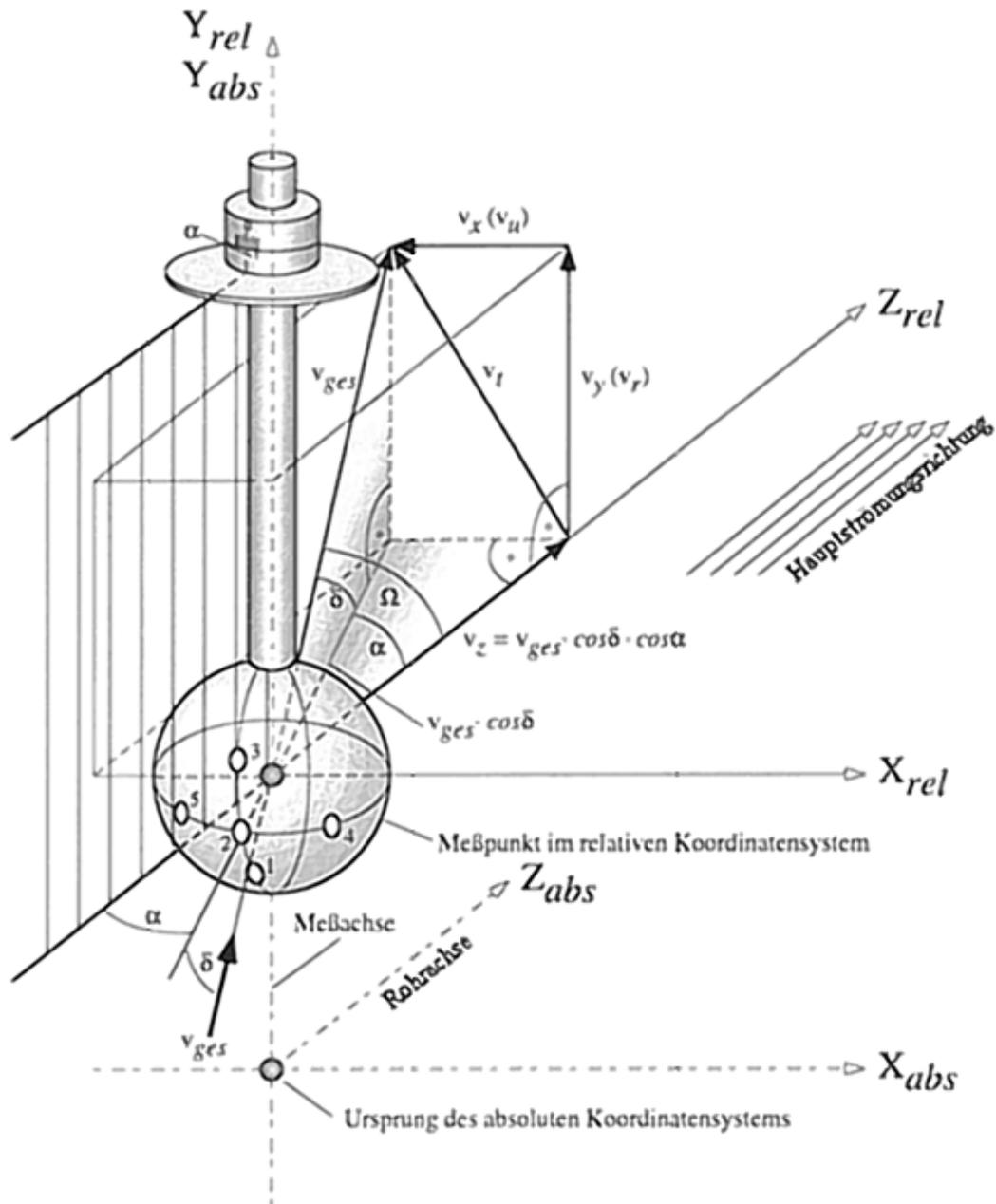


Abbildung 6.3.1: Prinzipielle Anordnung der Fünf-Loch-Sonde

Wie schon bei der Profilmessung mit dem Prandtl-Rohr beschrieben wurde, kann allerdings die absolute Strömungsgeschwindigkeit nur ermittelt werden, wenn der statische Druck des Fluids bekannt ist. Da die Sonde jedoch keine Messbohrung senkrecht zum Fluidstrom besitzt (vgl. Kap. 3.1), muss sie für jeden Messpunkt durch Abgleich des Druckes der beiden gegenüberliegenden Bohrungen in der horizontalen Ebene genau in Strömungsrichtung ausgerichtet werden.



Nur dann gibt die speziell für solche Anwendungen von Müller <sup>[1]</sup> entwickelte Tabellenkalkulation den korrekten Wert für den Azimutwinkel  $\delta$  aus und berechnet daraus den statischen Fluiddruck. Zweckmäßigerweise wird also die Horizontale  $\langle XZ \rangle$  als Nullebene gewählt und die Kugelsonde anschließend so weit um den Winkel  $\alpha$  gedreht, bis die mittlere Bohrung (2) in dieser Ebene genau in Strömungsrichtung weist. Dieser Winkel muss natürlich bei der Aufzeichnung der Messwerte jeweils mit notiert werden, liefert er doch neben der Rotationsgeschwindigkeit eine der wichtigsten Informationen über die Drallströmung, nämlich den Steigungswinkel der gedachten Schraubenlinie.

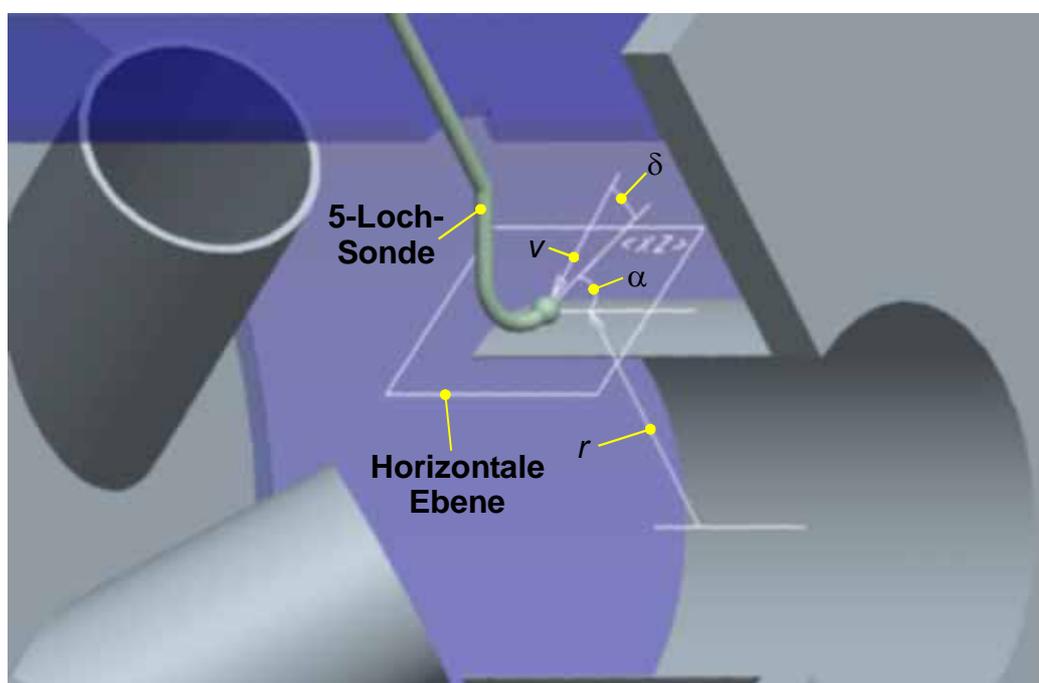


Abbildung 6.3.2: Anordnung der Sonde im Abscheider

Da eine Versuchsreihe und ihre Auswertung verhältnismäßig viel Zeit in Anspruch nahm, entschieden wir uns, zunächst lediglich das Drallprofil für die beiden (Nenn-) Strömungsgeschwindigkeiten  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  zu begutachten und nur für den Fall, dass sich prinzipielle Unterschiede im Verhalten zeigten, weitere Zwischenschritte zu untersuchen. Es erwies sich jedoch, dass sich die Strömungsverhältnisse auf der gewählten Messachse weitestgehend proportional zum eingestellten Volumenstrom verhielten, sodass Zwischenschritte nicht erforderlich waren. In den folgenden beiden Tabellen sind die für unseren Fall relevanten Ergebnisse aus der Tabellenkalkulation zusammengefasst.

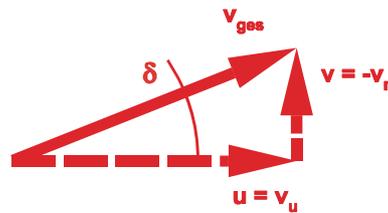


Abbildung 6.3.3: Geschwindigkeitsvektoren in der Rotationsebene

Nr.	Radius	$V_{ges}$	$\alpha_p$	$\delta_{korr}$	$V_r$	$V_u$
--/--	mm	m/s	°	°	m/s	m/s
1	67,5	12,63	77,50	-0,49	-0,11	12,13
2	72,5	14,86	82,50	0,98	0,25	14,49
3	77,5	15,41	84,50	3,04	0,80	15,06
4	82,5	15,34	86,00	4,31	1,13	14,99
5	87,5	15,14	85,00	4,40	1,14	14,77
6	92,5	14,92	85,00	4,18	1,07	14,54
7	97,5	14,38	85,00	4,39	1,08	14,00
8	102,5	13,82	85,00	4,03	0,95	13,46
9	107,5	13,46	85,50	3,95	0,91	13,11
10	112,5	13,08	87,00	3,79	0,85	12,75
11	117,5	13,16	89,50	3,01	0,68	12,85
12	122,5	12,98	91,50	2,88	0,64	12,67
13	127,5	12,95	94,00	2,61	0,58	12,60
14	132,5	12,56	95,50	3,97	0,85	12,17
15	137,5	12,23	97,00	7,47	1,55	11,74

Nr.	Radius	$V_{ges}$	$\alpha_p$	$\delta_{korr}$	$V_r$	$V_u$
--/--	mm	m/s	°	°	m/s	m/s
1	67,5	26,46	78,00	-0,40	-0,18	25,47
2	72,5	30,20	82,00	2,43	1,26	29,39
3	77,5	31,37	84,50	3,73	2,00	30,62
4	82,5	30,91	85,00	3,86	2,04	30,18
5	87,5	30,67	85,00	4,39	2,31	29,91
6	92,5	29,90	85,00	3,96	2,03	29,15
7	97,5	28,94	85,00	3,79	1,88	28,20
8	102,5	27,97	85,00	3,60	1,72	27,25
9	107,5	27,32	86,00	3,57	1,67	26,63
10	112,5	26,39	87,00	3,02	1,36	25,75
11	117,5	25,94	88,00	3,21	1,42	25,31
12	122,5	25,78	91,00	2,73	1,20	25,16
13	127,5	25,93	93,50	2,45	1,08	25,25
14	132,5	25,45	95,50	3,80	1,65	24,67
15	137,5	24,84	96,50	7,72	3,25	23,85

Tabellen 6.3.1 und 6.3.2: Ergebnisse der Messungen bei  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Die folgende Abbildung veranschaulicht die daraus gewonnenen Strömungsbilder:

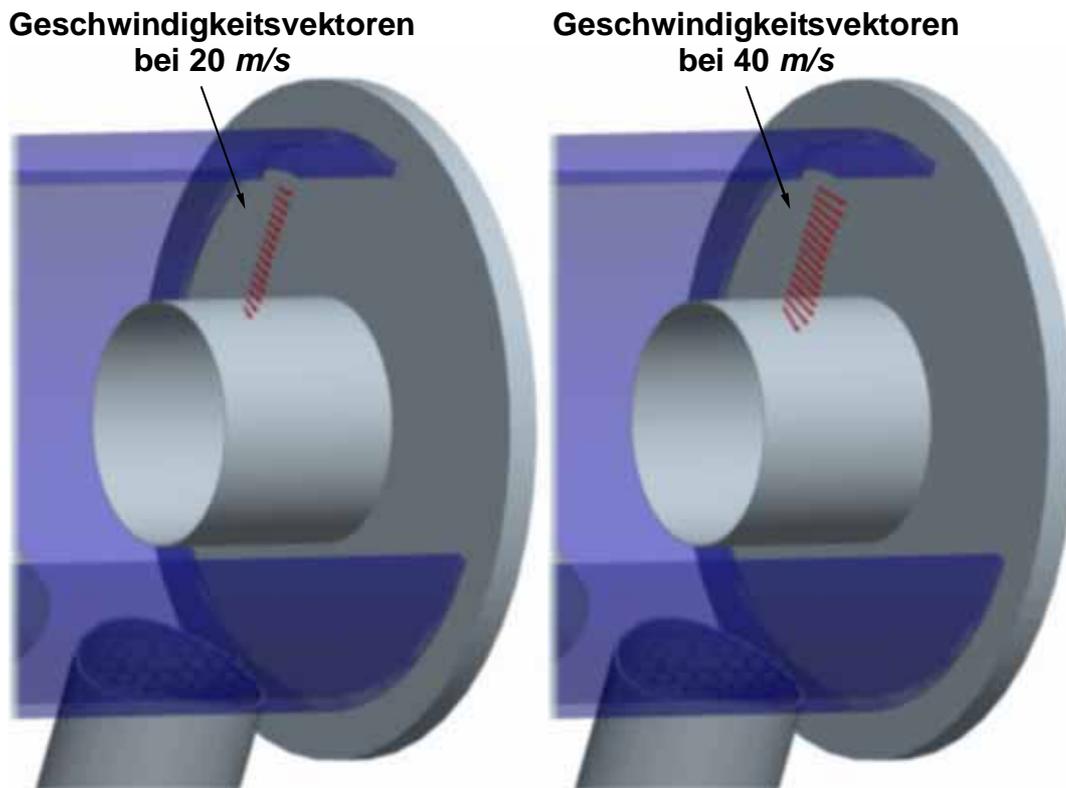


Abbildung 6.3.4: Durch Vektorpfeile dargestellte Profile der Drallströmung

Es ist zu beachten, dass die radiale Komponente der Drallströmung, so wie sie das Rechenprogramm ausgibt, nach außen, d.h. vom Zentrum weg orientiert ist. Daher entspricht ein negativer Wert für  $v_r$  einem positiven Wert für die bei Siegel <sup>[2]</sup> eingeführte Radialgeschwindigkeit  $v_i$  (vgl. Kapitel 2.4).

Bedauerlicherweise kann man nun die Partikelabscheidung für die gewählten Messpunkte nicht nachrechnen, weil diese, wie schon erwähnt, nicht auf Höhe der Austrittsmündung liegen. Die Werte für die Radialgeschwindigkeit zeigen jedoch qualitativ, dass nur in unmittelbarer Nähe des Austrittsrohres eine zum Austritt hin gerichtete Fluidströmung zu verzeichnen ist (negativer Azimutwinkel  $\delta$ ), was die Abbildung 6.3.5 verdeutlichen soll.

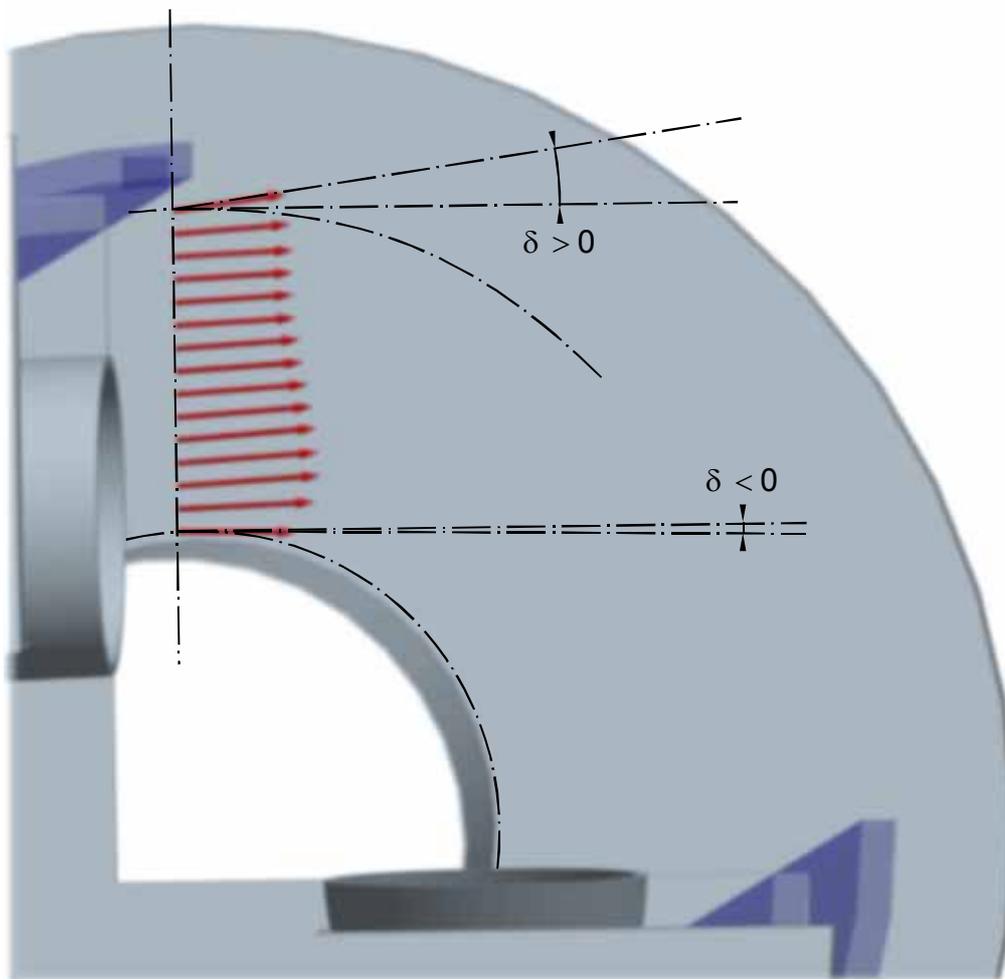


Abbildung 6.3.5:  $\delta$  bei ( $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) als Kennzeichen der Radialkomponente  $v_r$

In den weiter entfernt liegenden Bereichen strebt die Strömung stets nach außen (Azimutwinkel  $\delta$  positiv). Dieser Effekt ist wohl, wie bereits beschrieben, auf die von der entsprechenden Mantellinie abweichende Drallrohr-Achse zurückzuführen, sollte jedoch die Partikelabscheidung prinzipiell eher noch begünstigen.



Da der Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit etwa dem entspricht, was Siegel<sup>[3]</sup> für Abscheidezyklone beschreibt (vgl. Abbildung 2.4.1), können einige hypothetische Überlegungen anhand der Beziehung (3) aus dem Kapitel 2.4 angestellt werden. Dazu werden zunächst die beiden Geschwindigkeitskomponenten von den übrigen, als konstant angenommenen Größen isoliert:

$$d_P = \sqrt{18 \cdot \frac{\bar{\eta} \cdot r_i}{\rho_P} \cdot \frac{\sqrt{v_i}}{u_i}}$$

und anschließend wird nach diesem Quotient aufgelöst:

$$\frac{v_i}{u_i^2} = \frac{d_P^2 \cdot \rho_P}{18 \cdot \bar{\eta} \cdot r_i}$$

mit den Annahmen:  $v_i = -v_r (r \leq r_i)$  und  $u_i = v_u (r = r_i)$

Die Richtung von  $v_r$  (negatives Vorzeichen) ergibt sich aus der Tabellenkalkulation (siehe oben). Man kann nun die folgenden Werte einsetzen:

$d_p =$	$0,1 \dots 0,6 \text{ mm} = 1 \dots 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
$\rho_P =$	$600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\bar{\eta} =$	$1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
$r_i =$	$62,5 \text{ mm} = 0,0625 \text{ m}$

Tabelle 6.3.3: angenommene Werte

und erhält für das feinste Korn:

$$\frac{v_i}{u_i^2} = \frac{1^2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot 600 \text{ kg}}{18 \cdot 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot 0,0625 \text{ m} \cdot \text{m}^3} = 0,293 \frac{\text{s}}{\text{m}} \approx \underline{\underline{0,3 \frac{\text{s}}{\text{m}}}}$$



Währenddessen kann der Quotient bei grobem Korn folgende Größe erreichen:

$$\frac{v_i}{u_i^2} = \frac{6^2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot 600 \text{ kg}}{18 \cdot 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot 0,0625 \text{ m} \cdot \text{m}^3} = 10,549 \frac{\text{s}}{\text{m}} \approx \underline{\underline{11 \frac{\text{s}}{\text{m}}}}$$

Nimmt man nun beispielsweise für  $u_i = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  an, so müsste die Radialgeschwindigkeit zum Ausbleiben der Abscheidung von feinem Granulat:

$$v_i \approx \frac{0,3 \cdot u_i^2 \cdot \text{s}}{\text{m}} = \frac{0,3 \cdot 3^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = \underline{\underline{2,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

erreichen, für grobes Granulat dagegen den unrealistischen Wert von:

$$v_i \approx \frac{11 \cdot 3^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = \underline{\underline{99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Bei Ansatz von  $u_i = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ergäben sich  $v_i \approx 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  bzw.  $v_i \approx 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , was schon eher möglich erscheint. Die folgende Abbildung soll den Zusammenhang veranschaulichen:

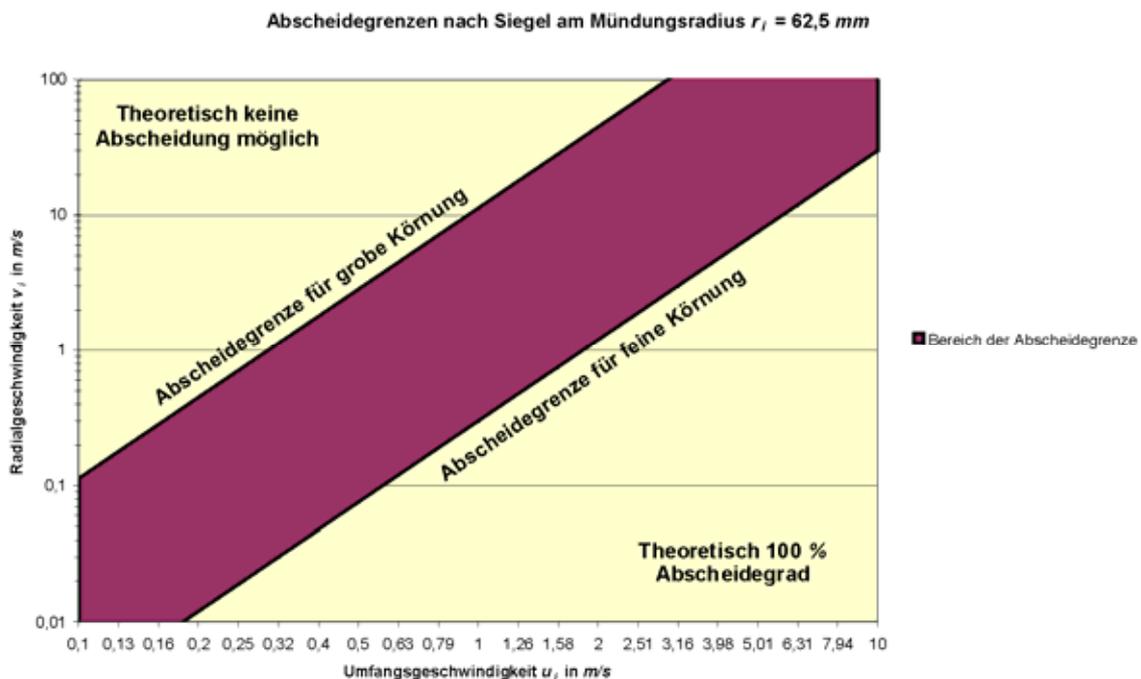


Abbildung 6.3.6: Abscheidungsgrenzen in Abhängigkeit der Geschwindigkeitskomponenten am äußeren Radius der Austrittsmündung



Man erkennt, dass bei etwa gleich großen Komponenten der Drallgeschwindigkeit bis hin zu einigen Metern pro Sekunde im Bereich der Austrittsmündung die Abscheidung von feinem Granulat behindert wird. Im Falle von grobem Granulat müsste bei einer Umfangsgeschwindigkeit  $u_i$  von maximal einem Meter pro Sekunde die Radialkomponente  $v_i$  schon eine ganze Größenordnung über der Umfangskomponente gelegen haben, um denselben negativen Effekt auszuüben.

Daraus lässt sich schließen, dass der mangelhafte Abscheidegrad bei feinerem Granulat durchaus auf ein schlichtes Versagen der Fliehkraft-Abscheidung zurückzuführen sein könnte. Allerdings müsste dies unbedingt messtechnisch überprüft werden. Bei grober Körnung, wo sich die Abscheideleistung gerade bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten verringerte, scheint diese Erklärung kaum plausibel. Es wurde jedoch schon im Kapitel 4.2 darauf hingewiesen, dass hier wohl andere Effekte (Rückprallen der Partikel) dominierten.

Mit den gewonnen Erkenntnissen aus der Entwicklung des Drallprofils an der untersuchten Stelle des Drallrohr-Abscheiders, nämlich außerhalb der Austrittsmündung, können die z.T. zu niedrigen Abscheidegrade also demnach nicht eindeutig erklärt werden. Einen Ansatz zur Verallgemeinerung, wie in Bezug auf die erweiterte Aufgabestellung dieser Arbeit (Skalierbarkeit) wünschenswert gewesen wäre, durfte man ohnehin kaum erwarten.

[<sup>1</sup>] MÜLLER: *Optimierung der Druckverlustkorrelation für Aerozyklone*; ebd.

[<sup>2</sup>] SIEGEL: *Pneumatische Förderung* S. 247 ff.

[<sup>3</sup>] SIEGEL: *Pneumatische Förderung* S. 246 Bild 9.3

[<sup>4</sup>] SIEGEL: *Pneumatische Förderung* S. 247 ff.



## 7 Diskussion

### 7.1 Beurteilung der Skalierbarkeit des Konstruktionsprinzips

Trotz aller Bemühungen und einiger ermutigender Ansätze zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Abscheider-Konstruktion kann auf Basis dieser Arbeit eine uneingeschränkte Skalierbarkeit der Apparatedimensionen noch nicht bejaht werden. Grund für diese Feststellung sind in erster Linie folgende Tatsachen:

1. Die von der Norm <sup>[1]</sup> für den Einsatz als Funkenfänger für Verbrennungsmotoren in explosionsgefährdeten Bereichen vorgeschriebenen, sehr strengen Anforderungen hinsichtlich Grad der Abscheidung konnten vom geprüften Drallrohr-Abscheider nicht oder nicht mit der notwendigen Zuverlässigkeit und Wiederholgenauigkeit erfüllt werden. So verliefen die zuerst aufgenommenen Messreihen mit Prüfpartikeln mittlerer Körnung bei der teilweise nur knapp verfehlten Vorgabe von mindestens 99 % Abscheidegrad noch viel versprechend. Bei feinem und vor allem grobem Korn entfernten sich unsere Ergebnisse dann allerdings soweit von den Normwerten (fein:  $\leq 85\%$  statt  $95\%$ ; grob:  $95\%$  an Stelle von  $100\%$ ), dass zunächst die Ursachen für diese Unregelmäßigkeiten zu klären und zu beseitigen waren, bevor eine prinzipielle Modifikation des Abscheiders diskutiert werden konnte.
2. Das zur Prüfung eingesetzte Beladegut aus Styropor-Granulat entsprach in seinen physikalischen Eigenschaften zwar den in der Norm <sup>[1]</sup> festgelegten Kriterien, jedoch betrug seine Dichte mit  $\rho = 0,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  deutlich weniger als der zulässige Wert von  $\rho = 0,9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , was zwar einerseits eher zur Unterbewertung der Abscheideleistung geführt haben sollte, andererseits aber auch die Aussagekraft des gesamten Prüfverfahrens in Frage stellt. Zudem unterlagen sowohl Granulat als auch Abscheider während der Versuche deutlicher elektrostatischer Aufladung, mit der Folge, dass die Prüfergebnisse teilweise stark negativ beeinflusst wurden.



3. In Folge der Konzentration auf das nur für einen bestimmten Anwendungsfall gültige Normprüfverfahren konnten in den durchgeführten Laborversuchen weder charakteristische Berechnungsgrundlagen in Bezug auf die Dimensionierung des Abscheiders bestätigt werden, noch konnten ebensolche Gesetzmäßigkeiten für eine Optimierung der Funktion abgeleitet werden.

Bei dieser kritischen Betrachtung muss man jedoch berücksichtigen, dass die Anwendung des Drallrohr-Prinzips in erster Linie darauf abzielte, Abgas-Funkenfänger für Verbrennungsmotoren größerer Bauart zu entwickeln und dabei ein möglichst günstiges Verhältnis zwischen den Herstellungskosten für den Abscheider und dem durch ihn verursachten Druckverlust im Abgasstrom zu erzielen. Aus diesem Grund wurde zur Prüfung des Modells ein in Frage zu stellendes Prüfverfahren angewendet, welches von der zuständigen Normierungsbehörde eben nur für diesen spezifischen Anwendungsfall formuliert wurde.

Kritikwürdig bei der Anwendung dieser europäischen Norm <sup>[2]</sup> ist vor allem die Annahme eines im Dauerbetrieb kaum zu erwartenden, hohen Beladeverhältnisses von 1/100 bei gleichzeitigem Ansatz einer auf eine Minute begrenzten Zugabezeit. Dass nämlich die abgeschiedenen Partikel bei einem Verbleib in der Abscheidekammer auch nach Ablauf des Zugabezeitraumes noch mitgerissen werden, vor allem wenn die Abscheidegrade deutlich unter 100 % liegen, wird dabei völlig außer Acht gelassen. Zwar unterscheidet die Norm im Definitionsteil <sup>[3]</sup> ausdrücklich zwischen Funkenfliehkraftabscheidung und Funkenabkühlung, die Ausführungen zu dem von uns angewendeten Prüfverfahren beziehen sich aber lediglich auf ersteres. Es bleibt demnach offen, ob die abgekühlten Rußpartikel letztendlich im Abscheider verbleiben müssen oder doch mit dem Abgas herausgefördert werden können, da eine Prüfdauer nach Ablauf der Zugabezeit keine Erwähnung findet. Wir schlossen daraus, dass es wohl sicherer war, jeweils die vollständige Abscheidung oder das Erreichen eines stabilen Zustandes abzuwarten, auch wenn sich natürlich dadurch die zu erzielenden Abscheidegrade eher noch verschlechtert haben dürften.



Als wichtigste Erkenntnis aus diesen teilweise widersprüchlichen Voraussetzungen lässt sich ziehen, dass es nach unserer Ansicht beim vorliegenden Entwicklungsstand des Drallrohr-Prinzips zu früh war, ein in diesen Abmessungen noch nicht erprobtes Versuchsmodell dem strengen und langwierigen Prüfverfahren nach dieser Norm zu unterziehen. Stattdessen hätten wir gleich von Beginn unserer Arbeit an mit der vorhandenen Messtechnik wie etwa der Fünf-Loch-Sonde, aber auch mit gezielten, schrittweisen konstruktiven Änderungen zügig daran gehen müssen, die zu Grunde liegenden Gesetzmäßigkeiten zu untersuchen und Schwachstellen wie die Durchförderung angehäuften Granulats zu eliminieren. Als Grundlage hätten dafür die genannten Literaturquellen zum Thema Abscheidezyklone dienen können. Eine Inangriffnahme dieser Aufgabenstellung sollte in einer weiteren Arbeit zum Drallrohr-Abscheider vorgenommen werden.

<sup>[1]</sup> vgl. DIN EN 1834-1

<sup>[2]</sup> vgl. DIN EN 1834-1; S. 12 Kap. 6.4.1

<sup>[3]</sup> vgl. DIN EN 1834-1; S. 7 Kap. 5.10.2

## **7.2 Konstruktive Verbesserungsmöglichkeiten am Drallrohr-Abscheider**

Die Laborversuche haben gleich zu Anfang gezeigt, dass der entscheidende Sprung hin zur Verbesserung der Abscheidegrade erst durch Anbringen eines Auffanggefäßes unternommen wurde. Nur dieser verhindert wirksam das Ablagern der Partikel in den Kammern und damit, dass durch Ausbleiben der Zentrifugalwirkung die austreibende Kraft fehlt. Verfolgt man diesen Ansatz konsequent weiter, so liegt die Vermutung nahe, dass die Wirkung des Auffanggefäßes um so effizienter ist, je größer die im Bereich der Austragung zur Verfügung stehende Öffnungsfläche gewählt wird. Man könnte also zunächst die Öffnungen auf die gesamten Länge des Drallrohr-Abscheiders ausdehnen, was an einen oder mehrere Schlitze im Mantel des ja für den Praxiseinsatz meist aus Metall zu fertigenden Abscheiders denken lässt.



Vergegenwärtigt man sich jedoch die konstruktive Ausführung des dafür notwendigen Auffanggefäßes, welches dann die Form einer oder mehrerer Längsrinnen besäße, wird schnell klar, dass neben der Einbringung der Schlitze im Mantel die Fertigung und vor allem die Anbringung des Gefäßes durch Schweißen hohe Kosten zur Folge hätte. Gelänge es, ein einzelnes, zusätzlich zu verbindendes Gehäusebauteil zu vermeiden, reduzierte sich der Aufwand auf konstruktive Elemente zur Trennung der abgelagerten Partikel von der sich im Drall befindenden Strömung.

Eine weitere, abzudichtende Verbindung ist aber auch dann nicht notwendig, wenn das Auffanggefäß den Drallrohr-Abscheider vollständig umschließt, also selbst die gasdichte Kapselung der Abscheidekammer gegenüber der Umgebung übernimmt. Dann wären im Innern nur noch Verbindungen zur Positionierung der Teile, z.B. durch Schweißpunkte anzubringen und zumindest die Schweißarbeiten verteuerten sich nicht wesentlich.

Allerdings muss unbedingt verhindert werden, dass das Fluid im Abscheideraum selbst in Rotationsströmung gerät und dadurch die Partikel nicht zur Ruhe kommen lässt. Man könnte dies durch Anbringen von Längsrippen in Form von angepunkteten Blech- oder Flachstahlstreifen am Umfang der Drallkammer realisieren.

Als weiterer störender Zusatzaufwand ist jedoch auch die Einbringung der Längsschlitze zu sehen. Hier könnte die Verwendung eines Mantels aus zu einem Rohr gewalzten Lochblech zur Kostenverringerung beitragen. Dabei muss allerdings darauf geachtet werden, dass die gesamte Öffnungsfläche (Summe aller Bohrungen) ein bestimmtes Verhältnis zur Manteloberfläche nicht überschreitet, da sonst möglicherweise erhöhte Druckverlustwerte zu erwarten sind.

Bei der vorgestellten Lösung zur Verbesserung der Abscheidegrade muss allerdings ein gravierender Nachteil in Kauf genommen werden: Der Durchmesser des Außenmantels ist zwangsläufig, mit zusätzlichem Abscheideraum, größer als ohne diesen. Man könnte diesem prinzipbedingten Nachteil eventuell dadurch begegnen, dass Drallrohre mit kleinerem Durchmesser verwendet werden. Zur Erhaltung des Gesamtdurchlassquerschnitts sind dann entsprechend mehr Rohre vorzusehen.



Da während der Versuche außerdem die Ausbildung einer merklichen Drallströmung schon in der ersten Kammer zu beobachten war, kann man auch davon ausgehen, dass zur Erzeugung des Dralls nicht notwendigerweise das gesamte Fluid die Drallrohre passieren muss. Somit könnte auch die Zwischenwand im äußeren Bereich durchlässig gestaltet werden, sodass dann einerseits nicht unbedingt mehr Rohre erforderlich wären, andererseits ein wirkungsvoller Beitrag zur Verringerung des Druckverlustes geleistet würde. Darüber hinaus könnte man dann auf die Einbringung der wegen der schrägen Anordnung der Rohre elliptisch geformten Durchbrüche in dieser Zwischenwand verzichten.

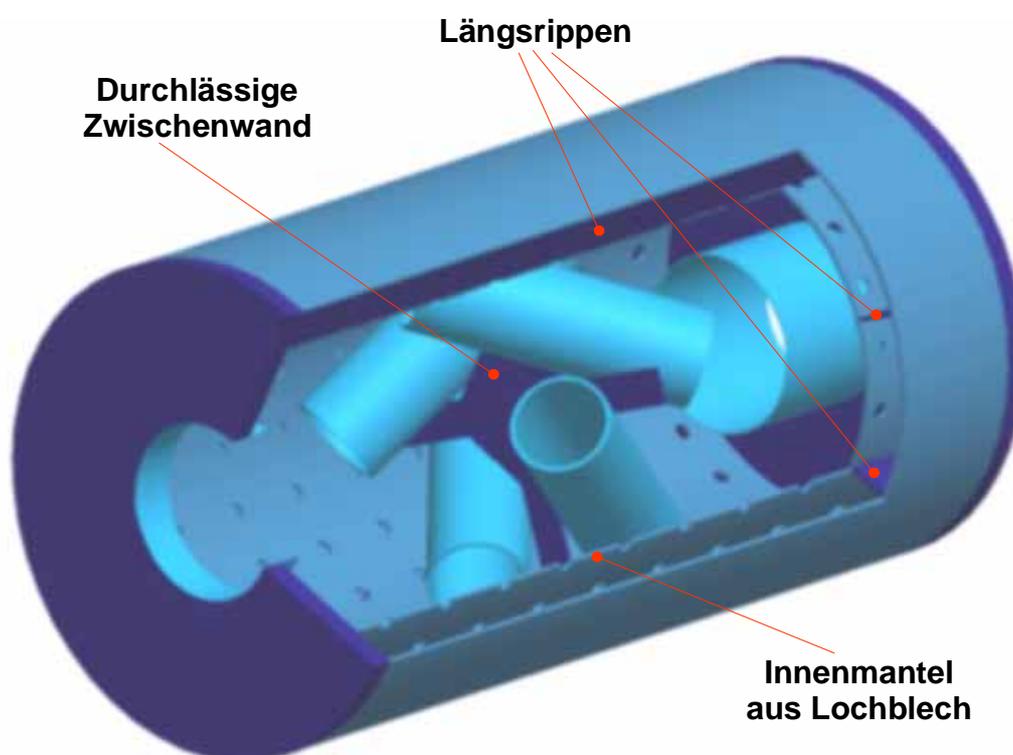


Abbildung 7.2.1: Vorschlag zur konstruktiven Verbesserung des Abscheiders

Vergleicht man den untersuchten Drallrohr-Abscheider mit dem ja ebenfalls nach dem Drallprinzip arbeitenden Abscheidezyklon, so muss klar festgestellt werden, dass letzterer bei der Austragung der Restpartikel in den Versuchen praktisch einen Abscheidegrad von hundert Prozent erzielte, während der Drallrohr-Abscheider in diesem, zugegebenermaßen nur bedingt zulässigen Vergleich weit schlechter abschneidet.



Dieser Unterschied geht sicher zum einen Teil auf das Konto der Einströmrichtung, die bezüglich der Drallrichtung bei dem hier eingesetzten Zyklon konsequent tangential, beim Drallrohrprinzip jedoch mehr oder weniger axial angeordnet ist. Zum anderen Teil ist hier aber auch der deutlich größere Manteldurchmesser zu nennen, der die Abscheidung mit einiger Sicherheit begünstigt. Folglich wird man trotz allem bei zukünftigen Lösungen für den Drallrohr-Abscheider wohl eher zu einer Vergrößerung des Außendurchmessers hin tendieren müssen. Zwar wirkt sich dies nachteilig auf die konstruktive Anordnung des Abscheiders in einer entsprechenden Anlage aus, jedoch ist der entscheidende Vorteil des Drallrohr-Prinzips ohnehin eher darin zu sehen, dass Ein- und Austrittsöffnung auf einer gemeinsamen Achse liegen.

### 7.3 Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass die Entwicklung eines Partikelabscheiders auf Basis einer Drallströmung, die durch Drallrohre zu Stande kommt, noch längst nicht am Ende steht. Die durchgeführten Versuche sind jedoch richtungweisend. Durch die Arbeit an einem Modell mit transparentem Plexiglasmantel war es erstmals möglich, die Vorgänge im Inneren des Abscheiders zu beobachten, gezielte Veränderungen durchzuführen und ihren Erfolg unmittelbar zu kontrollieren. Von dieser Möglichkeit sollte bei der Weiterentwicklung des Apparates auf jeden Fall ebenfalls Gebrauch gemacht werden.

Im Zuge der konstruktiven Veränderung des Drallrohr-Abscheiders ist außerdem der Einsatz in geänderter Einbaulage, vor allem mit vertikaler Strömungsrichtung zu untersuchen, da dies für die avisierte Anwendung zur Abgasreinigung ein häufig anzutreffender Fall ist.

Die Skalierbarkeit des Funktionsprinzips ist nach unserer Auffassung dann gegeben, wenn eine Vorausberechnung des Abscheidegrades auf analytischem Wege zumindest überschlägig möglich ist und mit deren Hilfe die Dimensionierung des Abscheiders in Bezug auf Vorgaben wie Volumenstrom und Gutbeladung vorgenommen werden kann. Dann werden auch die Prüfversuche nach der Norm DIN EN 1834-1 mit höherer Wiederholgenauigkeit zu absolvieren sein.



Des Weiteren könnte man Erfahrungen aus dem Praxiseinsatz in die Weiterentwicklung einfließen lassen, da ja bereits Abgas-Funkenfänger im Zuge der unserer Studienarbeit zu Grunde liegenden Diplomarbeit von Herrn Weber in Betrieb genommen wurden. Hier ist vor allem die Zuverlässigkeit der Funkenabscheidung und die Handhabbarkeit des Abscheiders bei seiner Reinigung von Interesse. Da auch die Fertigungskosten oft ein Thema bei der konstruktiven Gestaltung gewesen sind, wäre auch die Einbindung von Kostenvergleichen mit Hilfe der Firma G+H Schallschutz denkbar.

Es bietet sich also ein umfangreiches Feld für weitere Studien- und Diplomarbeiten, zumal die Möglichkeiten zur Computer-Simulation auf Basis der Finite-Elemente-Methode neue Dimensionen erschließen.

## 8 Anhang

### 8.1 Druckverlustmessung Reihe 1

#### Druckverlustmessung Drallrohr-Abscheider

(Austrittsstutzen ragt 50mm in die Kammer hinein)

Versuchsdatum: 19.02.2004 11:15 Uhr  
Versuchsreihe: 1

$D_N = 0,125$  m  
 $A_N = 0,0123$  m<sup>2</sup>  
 $L_\lambda = 1,750$  m

$f_a = 42,0$  %  
 $t_a = 22,5$  °C

$p_{Da} = 2733$  Pa  
 $p_a = 100700$  Pa  
 $\varphi_a = 0,420$  --/--  
 $T_a = 295,65$  K

Nr.	$\Delta p_D$	$\Delta p_1$	$\Delta p_{1-2}$
--/--	mbar	mbar	mbar
1	-0,390	-0,570	-1,56
2	-0,605	-0,880	-2,43
3	-0,810	-1,160	-3,22
4	-1,200	-1,680	-4,80
5	-1,690	-2,360	-6,76
6	-2,400	-3,320	-9,55
7	-3,410	-4,700	-13,52
8	-4,800	-6,600	-19,00
9	-5,710	-7,860	-22,80
10	-6,820	-9,360	-27,20
11	-7,960	-10,960	-31,90
12	-9,530	-13,100	-38,40



## 8.2 Druckverlustmessung Reihe 2

### Druckverlustmessung Drallrohr-Abscheider

(Austrittsstutzen ragt 50mm in die Kammer hinein)

Versuchsdatum: 19.02.2004 11:30 Uhr  
Versuchsreihe: 2

$$D_N = 0,125 \text{ m}$$

$$A_N = 0,0123 \text{ m}^2$$

$$L_\lambda = 1,750 \text{ m}$$

$$f_a = 42,0 \%$$

$$t_a = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_{Da} = 2733 \text{ Pa}$$

$$p_a = 100700 \text{ Pa}$$

$$\varphi_a = 0,420 \text{ --/--}$$

$$T_a = 295,65 \text{ K}$$

Nr.	$\Delta p_D$	$\Delta p_1$	$\Delta p_{1-2}$
--/--	mbar	mbar	mbar
1	-0,405	-0,620	-1,61
2	-0,595	-0,900	-2,36
3	-0,790	-1,160	-3,13
4	-1,180	-1,700	-4,72
5	-1,715	-2,440	-6,82
6	-2,400	-3,380	-9,55
7	-3,400	-4,740	-13,53
8	-4,780	-6,640	-19,05
9	-5,690	-7,880	-22,75
10	-6,800	-9,440	-27,35
11	-7,970	-11,060	-32,25
12	-9,520	-13,060	-38,45

### 8.3 Aufnahme des Geschwindigkeitsprofils bei 40 m/s

#### Geschwindigkeitsprofilmessung

Versuchsdatum : 17.02.04

$n_{\text{Geb}} = 3750 \text{ 1/min}$

$p_{\text{Düse}} = 9,5 \text{ mbar}$

$c_{\text{soll}} = 40 \text{ m/s}$

$p_a = 1014,0 \text{ mbar}$

$D = 0,125 \text{ m}$

$f_a = 50,0 \%$

$A = 0,0123 \text{ m}^2$

$t_a = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$

$L/D = 22,12 \text{ ---}$

Koordinate: Y

Nr.	y	$\Delta p_{\text{dyn}}^*$	Neigung	$\Delta p_{\text{stat}}^*$
---/--	mm	Pa*	---/--	Pa
1	5,0	700	1,000	-1350,0
2	10,0	820	1,000	-1340,0
3	15,0	980	1,000	-1330,0
4	30,0	1050	1,000	-1325,0
5	45,0	1200	1,000	-1325,0
6	62,5	1250	1,000	-1325,0
7	80,0	1180	1,000	-1320,0
8	95,0	1100	1,000	-1310,0
9	110,0	900	1,000	-1310,0
10	115,0	840	1,000	-1310,0
11	120,0	750	1,000	-1315,0

Koordinate: X

Nr.	y	$\Delta p_{\text{dyn}}^*$	Neigung	$\Delta p_{\text{stat}}^*$
---/--	mm	Pa*	---/--	Pa
1	5,0	700	1,000	-1340,0
2	10,0	850	1,000	-1340,0
3	15,0	950	1,000	-1340,0
4	30,0	1050	1,000	-1340,0
5	45,0	1250	1,000	-1330,0
6	62,5	1300	1,000	-1325,0
7	80,0	1250	1,000	-1320,0
8	95,0	1100	1,000	-1320,0
9	110,0	900	1,000	-1315,0
10	115,0	800	1,000	-1315,0
11	120,0	730	1,000	-1315,0

## 8.4 Aufnahme des Geschwindigkeitsprofils bei 20 m/s

### Geschwindigkeitsprofilmessung

Versuchsdatum : 17.02.04

$n_{\text{Geb}} = 1860 \text{ 1/min}$

$p_{\text{Düse}} = 2,45 \text{ mbar}$

$c_{\text{soll}} = 20 \text{ m/s}$

$p_a = 1014,0 \text{ mbar}$

$D = 0,125 \text{ m}$

$f_a = 50,0 \%$

$A = 0,0123 \text{ m}^2$

$t_a = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$

$L/D = 22,12 \text{ ---}$

Koordinate: Y

Nr.	y	$\Delta p_{\text{dyn}}^*$	Neigung	$\Delta p_{\text{stat}}^*$
---/--	mm	Pa*	---/--	Pa
1	5,0	320	0,500	-700,0
2	10,0	410	0,500	-700,0
3	15,0	480	0,500	-695,0
4	30,0	580	0,500	-695,0
5	45,0	630	0,500	-690,0
6	62,5	650	0,500	-690,0
7	80,0	620	0,500	-690,0
8	95,0	560	0,500	-690,0
9	110,0	450	0,500	-690,0
10	115,0	420	0,500	-690,0
11	120,0	350	0,500	-690,0

Koordinate: X

Nr.	y	$\Delta p_{\text{dyn}}^*$	Neigung	$\Delta p_{\text{stat}}^*$
---/--	mm	Pa*	---/--	Pa
1	5,0	320	0,500	-700,0
2	10,0	420	0,500	-700,0
3	15,0	440	0,500	-700,0
4	30,0	540	0,500	-690,0
5	45,0	640	0,500	-690,0
6	62,5	650	0,500	-690,0
7	80,0	650	0,500	-690,0
8	95,0	600	0,500	-690,0
9	110,0	420	0,500	-685,0
10	115,0	410	0,500	-685,0
11	120,0	330	0,500	-685,0



## 8.5 Prüfung nach Norm, mittlere Körnung

Abscheidegradmessungen nach DIN EN 1834-1

02.03.2004

Partikelgröße 0,22 - 0,4

Massenverhältnis Prüfpartikel : Luft = 1:100

 $p_A = 101800 \text{ Pa}$  $f_A = 42 \%$  $t_A = 20 \text{ °C}$  $T = 60 \text{ sec}$ 

Messung	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar	t in min	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgef.}}$ in g
1	-2,42	9,7	-3,46	6	177	175,9
2	-2,41	9,56	-3,48	6	177	176,9
3	-2,41	9,54	-3,45	6	177	175,2
4	-2,41	9,52	-3,45	6	177	175,6
5	-2,41	9,52	-3,45	6,5	177	172,7
1	-3,69	14,66	-5,25	3,5	222	220
2	-3,72	14,7	-5,28	4	222	218
3	-3,69	14,72	-5,18	-	222	218,2
4	-3,68	14,7	-5,22	4	222	219,5
5	-3,69	14,64	-5,22	3	222	219,4
1	-5,32	21,26	-7,45	3	266	263,9
2	-5,32	21,24	-7,46	3	266	263,9
3	-5,35	21,28	-7,49	3	266	264
4	-5,35	21,3	-7,49	3	266	263,7
5	-5,31	21,18	-7,45	3	266	263,5
1	-7,27	29,18	-10,2	2,5	310	306,7
2	-7,28	29,12	-10,17	2,5	310	308
3	-7,25	29,08	-10,18	2,5	310	306,7
4	-7,28	29,14	-10,15	3	310	307,2
5	-7,25	29,18	-10,16	2,5	310	307
1	-9,38	37,8	-13,05	2,5	355	352
2	-9,35	37,76	-12,96	2,5	355	352
3	-9,31	37,76	-12,98	2	355	352
4	-9,32	35,5	-12,18	2	355	352
5	-9,22	36,6	-12,65	2	355	352



## 8.6 Prüfung nach Norm, grobe Körnung

Abscheidegradmessungen nach DIN EN 1834-1

04.03.2004 (08.03.2004)

Partikelgröße 0,4- 0,6

Massenverhältnis Prüfpartikel : Luft = 1:100

 $p_A = 101600$  Pa $f_A = 40$  % $t_A = 21$  °C

T= 60 sec

Messung	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar	t in min	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgef.}}$ in g
1	-2,40	4,64	-3,36	6	177	160,5
2	-2,38	4,65	-3,38	8	177	159,1
3	-2,35	4,64	-3,39	7	177	162,1
4	-2,37	4,67	-3,38	10	177	160,4
5	-2,37	4,64	-3,36	6	177	160,2
1	-3,70	7,4	-5,17	3	222	210,3
2	-3,69	7,35	-5,16	2,5	222	211,3
3	-3,67	7,38	-5,17	2,5	222	209,8
4	-3,69	7,35	-5,19	2,5	222	209,3
5	-3,69	7,38	-5,19	2,5	222	211,2
1	-5,35	10,65	-7,58	2	266	249,9
2	-5,32	10,65	-7,55	2	266	250,5
3	-5,31	10,6	-7,55	2	266	251,1
4	-5,34	10,68	-7,53	2	266	251,2
5	-5,30	10,75	-7,58	2	266	251,7
1	-7,25	14,55	-10,05	2	310	291,8
2	-7,26	14,48	-10,04	2	310	291,3
3	-7,23	14,52	-10,04	2	310	291,7
4	-7,28	14,56	-10,07	2	310	292,5
5	-7,28	18,3	12,6	2	310	289,5
1	-9,37	38,9	-13,5	2	355	332,3
2	-9,45	38,94	-13,28	2	355	330,2
3	-9,43	38,76	-13,27	2	355	330,1
4	-9,35	38,1	-13,15	2	355	330,5
5	-9,45	38,38	-13,22	2	355	329,3



## 8.7 Prüfung nach Norm, feine Körnung

Abscheidegradmessungen nach DIN EN 1834-1

08.03.2004

Partikelgröße &lt; 0,22

Massenverhältnis Prüfpartikel : Luft = 1:100

 $p_A = 101500 \text{ Pa}$  $f_A = 41,5 \%$  $t_A = 22 \text{ °C}$  $T = 60 \text{ sec}$ 

Messung	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar	t in min	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgef.}}$ in g
1	-2,35	9,34	-3,37	11	176	172,3
2	-2,34	9,5	-3,38	12	176	172,4
3	-2,35	9,38	-3,36	10	176	173,2
4	-2,33	9,32	-3,33	10	176	172,9
5	-2,32	9,24	-3,3	10	176	173,3
1	-3,64	15,02	-5,25	6	220	216,8
2	-3,65	14,94	-5,24	6	220	217,9
3	-3,65	14,94	-5,2	6	220	218,3
4	-3,65	14,92	-5,26	7	220	216,9
5	-3,67	14,82	-5,28	8	220	216,1
1	-5,23	10,75	-7,43	5	263	260
2	-5,25	10,69	-7,52	5,5	263	255,4
3	-5,22	10,72	-7,49	5,5	263	251,4
4	-5,23	10,76	-7,44	8,5	263	253,6
5	-5,22	10,69	-7,48	8	263	255,3
1	-7,24	28,62	-10,05	5	307	256
2	-7,20	28,88	-10,06	4	307	264,6
3	-7,25	28,94	-10,09	4	307	273,5
4	-7,23	29,36	-10	9	307	270
5	-7,22	29,5	-10,05	5	307	281,7
1	-9,52	39,2	-13,44	4	351	289,1
2	-9,50	39,34	-13,37	4	351	286,7
3	-9,56	39,48	-13,48	4	351	291
4	-9,53	39,62	-13,46	7	351	282,9
5	-9,55	39,46	-13,48	8	351	293,9



## 8.8 Messwerte bei geringerem Beladeverhältnis

Abscheidegradmessungen bei geringerer Beladung

11.03.2004

Partikelgröße 0,22 - 0,4

Massenverhältnis Prüfpartikel : Luft = 1:500

$p_A = 100900$  Pa

$f_A = 42$  %

$t_A = 20,5$  °C

$T = 300$  sec

Messung	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar	t in min	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgef.}}$ in g
1	-3,74	14,94	-5,31	4,25	220	215,7
2	-3,75	14,9	-5,31	5,73	220	214,8
3	-3,76	15,02	-5,33	5,28	220	215,4
1	-9,50	38,36	-13,25	5,33	350	333,8
2	-9,48	38,08	-13,18	5,33	350	335,2
3	-9,48	38,3	-13,21	4,78	350	335,1
4	-9,50	38,36	-13,26	4,82	350	334,7

## 8.9 Messwerte nach Verlängerung des Austrittsrohres

Abscheidegradmessungen bei verlängertem Austritt

12.03.2004

Partikelgröße 0,22 - 0,4

Massenverhältnis Prüfpartikel : Luft = 1:100

$p_A = 100500$  Pa

$f_A = 40$  %

$t_A = 21$  °C

$T = 60$  sec

Messung	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgef.}}$ in g
1	-9,34	39,9	-13,18	351	344,8
2	-9,37	39,94	-13,24	351	345,2
1	-3,59	15,04	-5,17	220	216,7
2	-3,63	15,18	-5,23	220	216,9

Partikelgröße < 0,22 ( frisch )

Massenverhältnis Prüfpartikel : Luft = 1:100

Messung	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgef.}}$ in g
1	-9,36	39,76	-13,21	350	343,6
2	-9,45	40,02	-13,28	350	342

Partikelgröße < 0,22

( gebraucht )

Massenverhältnis Prüfpartikel : Luft = 1:100

Messung	$\Delta p_d$ in mbar	$\Delta p_{1,2}$ in mbar	$\Delta p_1$ in mbar	$m_{\text{Beladung}}$ in g	$m_{\text{Aufgef.}}$ in g
1	-9,44	39,96	-13,26	350	335,5
2	-9,43	39,8	-13,23	350	344
3	-9,31	39,9	-13,12	350	339
4	-9,34	39,94	-13,18	350	340



## 9 Literaturverzeichnis

BOHL, Willi: *Technische Strömungslehre*;  
11. Auflage; Vogel Verlag Würzburg 1998

DIN EN 1834-1: *Sicherheitsanforderungen für die Konstruktion und den Bau von Motoren zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen*;  
Normenausschuss Maschinenbau (NAM) im Deutschen Institut für Normung e.V.

EN ISO 5167-1...4 : *Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt*;  
Normenausschuss Primäre Messgeräte und -einrichtungen (NPM)  
im Deutschen Institut für Normung e.V.

GRASSMANN, Peter: *Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik*;  
3. Auflage; Salle+Sauerländer Verlag, Frankfurt/Aarau 1983

KOHLMANN, Prof. Dr.-Ing. habil. J., SLOWIK, Dr.-Ing. G., HARTKE, Dipl.-Ing. O.:  
*Die Steuerung der Abscheideleistung von Zyklonen im Betrieb*;  
Berlin  
VDI Berichte Nr. 1511, 1999

LOHRENGEL, Prof. Dr.-Ing. Burkhard: *Abgasreinigung / Immissionsschutz, Abscheidemechanismen von Partikeln aus Gasen, Zyklone*;  
Skripte zur Vorlesung im Studiengang Verfahrens- und Umwelttechnik;  
FH Heilbronn; [www.vu.fh-heilbronn.de/Lohrengel](http://www.vu.fh-heilbronn.de/Lohrengel); 2004

MÜLLER, Patric: *Optimierung der Druckverlustkorrelation für Aerozyklone auf der Basis experimenteller und theoretischer Untersuchungen*;  
Diplomarbeit bei der BASF AG, Ludwigshafen; September 1998 – Februar 1999



REICHARDT, H.: *Vollständige Darstellung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilung in glatten Rohren*;

Max Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen;

Z. angew. Math. Mech., Bd. 31 Nr. 7 Juli 1951, S.208 ff.

SIEGEL, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang: *Pneumatische Förderung*;

*Grundlagen, Auslegung, Anlagenbau, Betrieb*;

1. Auflage; Vogel Verlag Würzburg 1991

WAGNER, Walter: *Strömung und Druckverlust*;

5. Auflage; Vogel Verlag Würzburg 2001

WEBER, Alexander: *Neuentwicklung eines Funkenfängers DN250 für Verbrennungsmotoren in explosionsgefährdeten Bereichen*;

Diplomarbeit am Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik der Fachhochschule Mannheim; Juli 2003 – Dezember 2003