

---

# Fachbericht

---

## Windsichter mit Zyklon

---



### **Projekt P6 - Bachelor Thesis**

Studiengang: Energie- und Umwelttechnik

Autor: Darko Cvetkovic

Auftraggeber & Projekt-Coach: Prof. Dr. Frédéric Vogel

Betreuendes Institut FHNW: Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz IBRE  
Hochschule für Technik

Fachliche Betreuung: Raphael Haymoz

Experte: Dr. Michael Studer  
Berner Fachhochschule

Projektdauer: September 2015 bis  
März 2016

---

## Kontaktdaten

### Autor

Vor- und Nachname: Darko Cvetkovic  
Adresse: Klosterzelgstrasse 1b  
5210 Windisch  
Telefon: +41 76 488 36 99  
E-Mail: darko.cvetkovic@students.fhnw.ch

### Auftraggeber und Projekt-Coach

Vor- und Nachname: Prof. Dr. Frédéric Vogel  
Fachhochschule Nordwestschweiz  
Hochschule für Technik  
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz  
Adresse: Klosterzelgstrasse 2  
5210 Windisch  
Telefon: +41 56 202 73 34  
E-Mail: frederic.vogel@fhnw.ch

### Experte

Vor- und Nachname: Dr. Michael Studer  
Berner Fachhochschule  
Hochschule für Agrar-, Forst-  
und Lebensmittelwissenschaften HAFL  
Adresse: Länggasse 85  
3052 Zollikofen  
Telefon: +41 31 910 29 36  
E-Mail: michael.studer1@bfh.ch

### Fachliche Betreuung

Vor- und Nachname: Raphael Haymoz  
Fachhochschule Nordwestschweiz  
Hochschule für Technik  
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz  
Adresse: Klosterzelgstrasse 2  
5210 Windisch  
Telefon: +41 56 202 86 38  
E-Mail: raphael.haymoz@fhnw.ch

---

## Management Summary

### *Ausgangslage:*

Die Themen dieser Bachelor Thesis sind Windsichter und Zyklone. Die Arbeit ist eine Fortsetzung des Projekts P5 „Auslegung eines Zyklons zur Auftrennung von Holzstaub“. Der Auftraggeber dieser Projektarbeit ist Prof. Dr. Frédéric Vogel vom Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz der Fachhochschule Nordwestschweiz. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Anlage bestehend aus einem Windsichter und einem Zyklon als Vorzeigeobjekt für den Unterricht zu bauen. Die Anlage soll als Vorzeigeobjekt im Modul Verfahrenstechnik dienen, welches von Prof. Dr. Frédéric Vogel im Bachelor-Studiengang Energie- und Umwelttechnik unterrichtet wird.

### *Vorgehen:*

Zu Beginn der Arbeit wurde die Auftragsklärung durchgeführt. Es galt herauszufinden wie eine Klassierung von mehreren hundert Kilogramm Holzstaub in wenigen Stunden zu bewerkstelligen und ob dies im Rahmen der Projektarbeit realisierbar ist. Dies wurde aufgrund der resultierenden Anlagengrösse und möglicher Kosten verworfen und der Fokus wurde auf eine Anlage gelegt, welche als Vorzeigeobjekt im Unterricht genutzt werden kann. Nach der Auftragsklärung wurde das Basic Engineering gestartet. Für die Anlage wurde nach passenden Komponenten gesucht. Diese wurden in die Auslegungsberechnungen eingesetzt und mit Hilfe eines 3D-CAD Modells wurde die Anlage entwickelt. Daraufhin wurden Offerten eingeholt und eine Budgetabschätzung erstellt, um die Finanzierung des Projektes zu klären. Im Detail Engineering wurde das Model optimiert, Fertigungszeichnungen erstellt und Komponenten bestellt. Nach dieser Phase folgten die Montage, Inbetriebnahme und ein erster Funktionstest.

### *Hauptergebnisse:*

Die Anlage wurde im Rahmen der Projektarbeit ausgelegt, gebaut, in Betrieb genommen und getestet. Sie steht als Vorzeigeobjekt für den Unterricht zur Verfügung.

Der Windsichter, die Rohrleitungen, der Behälter für das Aufgabegut, die Kübel und der Zyklon wurden aus durchsichtigem Kunststoff hergestellt. Dies erlaubt einen Einblick in die einzelnen Trennprozesse der Anlage sowie die Transportprozesse in den Rohrleitungen.

Der Ventilator, der Frequenzumrichter und das Manometer sind in der Anlage fest installiert. Über den Frequenzumrichter lassen sich die Drehzahl des Ventilators und so der Luft-Volumenstrom in der Anlage steuern.

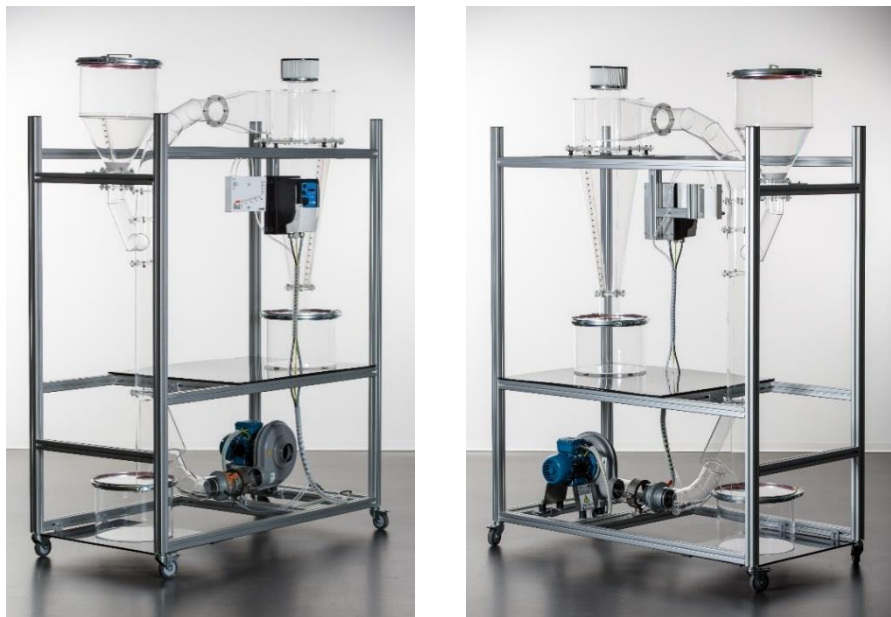
Für das Aufgabegut im Unterricht wurde Kunststoffgranulat aus Polypropylen gewählt. Ein kleiner Teil des Aufgabeguts wurde geschreddert, um eine Partikelgrößenverteilung im Aufgabegut zu erreichen. Das Aufgabegut ist weich genug, um die Apparate und Rohre nicht zu verkratzen.

---

Der Zyklon kann Partikel mit einem Durchmesser von 5 bis 25  $\mu\text{m}$  abscheiden. Dies in Abhängigkeit der Beladung und des Volumenstroms. Um kleinere Partikel aus dem Luftstrom abzuscheiden, ist ein HEPA-Filter am Luftaustritt des Zyklons installiert worden.

Die Luftgeschwindigkeit im Windsichter kann über den Luft-Volumenstrom berechnet werden. Den Luft-Volumenstrom kann man mithilfe der Irisblende bestimmen.

Die Anlage ist in einem Gestell aus Aluminium-Profilen aufgebaut und das Gestell steht auf Rollen. Die Anlage ist so konzipiert, dass sie einfach transportiert werden kann und sie passt durch Türen und in einen Warenlift.



***Ausblick:***

Als Einsatzzweck für die Anlage sind Laborversuche für die Studierenden denkbar. Die Studierenden könnten Auslegungsrechnungen zu der gegebenen Anlage durchführen, diese mit einem Versuch auf die Probe stellen und die Resultate diskutieren.

Es sind auch weitere Projekte möglich, um die Anlage zu verbessern oder zu erweitern. Die Dosiervorrichtung sollte überarbeitet werden. Zudem könnten weitere Messpunkte installiert werden.

Es gibt Pläne, die Anlage für das Klassieren von kleinen Holzstaubchargen zu benutzen. Basierend darauf, ob sich der Windsichter für diese Aufgabe gut eignet, kann eine grössere Anlage gebaut werden, welche den gewünschten Durchsatz ermöglicht.

---

## Vorwort

Ich möchte mich bei all denjenigen bedanken, die mich während meiner Bachelor-Arbeit motiviert und unterstützt haben.

In erster Linie bei Prof. Dr. Frédéric Vogel. Er war bei dieser Arbeit zugleich mein Auftraggeber und Projekt-Coach. Von ihm habe ich einen grossen Spielraum für die Bearbeitung der Aufgabe erhalten, was mich sehr motiviert hat. Durch kritisches Hinterfragen konnte er mir wertvolle Hinweise geben und mich, wenn nötig, auf den richtigen Weg zurück bringen. Vielen Dank für Ihr Vertrauen und die Wegweisung.

Des Weiteren danke ich Prof. Dr. Christoph Gossweiler, Leiter des Studiengangs Energie- und Umwelttechnik, und Prof. Dr. Timothy Griffin, Leiter des Instituts "Biomasse und Ressourceneffizienz", für die Finanzierung dieser Projektarbeit.

Ich danke auch Raphael Haymoz. Er hat mich als fachliche Betreuung in diesem Projekt begleitet. Die Möglichkeit mit Raphael die Auslegung und den Aufbau der Anlage zu diskutieren hat mir sehr geholfen.

Bei der Installation und Verdrahtung der Anlage wurde ich von Herrn Markus Birchmeier, Laborverantwortlicher, unterstützt. Er hat mir Material für die Verdrahtung zur Verfügung gestellt, mich wo nötig beraten und den elektrischen Aufbau überprüft.

Ich danke ebenso Herrn Geoffrey Engelbrecht, dass er sich Zeit genommen hat, um CFD-Analysen des Windsichters zu erstellen.

Einen weiteren Dank spreche ich Herrn Andreas Krauer von der Manometer AG aus. Er hat mir ein Schrägrohrmanometer für die Anlage geschenkt.

Und nochmals ein Dankeschön an Prof. Dr. Christoph Gossweiler. Als Studiengangleiter hat er uns Studierende stets unterstützt und hat sich immer wieder Zeit genommen, um mit uns zu sprechen und uns mit Tipps auf den richtigen Weg zu leiten.

Windisch, 27. März 2016  
Darko Cvetkovic

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Auftragsklärung.....	1
1.2	Projektziele.....	2
2	Glossar und Begriffsdefinitionen.....	3
3	Vorgehen und Methodik.....	4
4	Theoretische Grundlagen.....	6
4.1	Windsichter.....	6
4.2	Zyklon.....	10
5	Basic Engineering (Entwurfsplanung).....	13
5.1	Massenstrombilanz, Trenngrad und Verteilungsdichte.....	13
5.2	Verfahrensfließbild.....	19
5.3	Festlegung des Aufgabeguts.....	20
5.4	Werkstoffauswahl.....	21
5.5	Auswahl des Ventilators.....	22
5.6	Kostenermittlung.....	23
6	Gefahren-Analyse.....	24
7	Detail Engineering (Ausführungsplanung).....	26
7.1	Apparate.....	27
7.2	Behälter.....	36
7.3	Steuertechnik.....	39
7.4	Restliche Komponenten.....	42
7.5	3D-Anlageplanung.....	44
8	Ausführung & Montage.....	47
9	Inbetriebnahme und Funktionstest.....	48
10	Kritische Würdigung.....	49
11	Ausblick.....	50
12	Fazit.....	51
13	Ehrlichkeitserklärung.....	52
14	Verzeichnisse.....	53

---

14.1	Verzeichnis verwendeter Formelzeichen.....	53
14.2	Abkürzungsverzeichnis .....	55
14.3	Lieferantenverzeichnis.....	55
14.4	Abbildungsverzeichnis.....	57
14.5	Diagrammverzeichnis .....	59
14.6	Literaturverzeichnis.....	60
15	Ordnerstruktur Projekt DVD .....	61
16	Anhang.....	62

## 1 Einleitung

Die folgende Projektarbeit ist eine Fortsetzung des Projekts P5 „Auslegung eines Zyklons zur Auftrennung von Holzstaub“. Ziel des Projekts P5 war es, einen Zyklon auszulegen, welcher Holzstaub bei einer Trennkorngrösse von  $\leq 100 \mu\text{m}$  klassieren kann. Ausserdem hätte der Zyklon als Vorzeigebjekt im Unterricht zum Modul Verfahrenstechnik dienen sollen.

Im Projekt P5 war es nicht möglich einen Zyklon auszulegen, welcher unter den gegebenen Rahmenbedingungen zur Klassierung von Holzstaub geeignet war. Aus der Erkenntnis, dass sich ein Zyklon für diese Trennaufgabe nicht eignet, wurde nach anderen Optionen gesucht.

### 1.1 Auftragsklärung

Zu Beginn der Projektarbeit war das Ziel des Projektes noch offen. Es war klar, dass es eine Fortsetzung des Projekts P5 werden wird. Das Klassieren von Holzstaub stand im Vordergrund. Während der Auftragsklärung wurden verschiedene Optionen untersucht und die Projektziele festgelegt.

Es wurden mehrere mögliche Projektziele diskutiert. Die erste Option war, einen Zyklon auszulegen, welcher 300 kg Holzstaub in drei bis sechs Stunden aus einem Luftstrom abscheiden kann. Dieser sollte dann gebaut und getestet werden. Dies liess jedoch die Klassierung des Holzstaubes noch offen und machte aussagekräftige Versuche schwierig. Deshalb wurde diese Idee verworfen.

Die zweite Option war, einen Windsichter zu bauen, um den Holzstaub zu klassieren und das Feingut anschliessend mit einem Zyklon aus dem Luftstrom abzuscheiden. Im Rahmen der Auftragsklärung wurden einige Versuche mit einem Zick-Zack-Windsichter durchgeführt. Dieser gehört der Hochschule für Technik Rapperswil (HSR). Diese bestehende Anlage war nicht für die Sichtung von Holzstaub geeignet. Die Luftgeschwindigkeiten im Zick-Zack-Windsichter waren zu hoch, um Holzstaub klassieren zu können. Während der Versuche konnten leider keine Messergebnisse erzeugt werden, welche Erkenntnisse über das Verhalten des Zick-Zack-Windsichters beim Betrieb mit Holzstaub liefern.

Es wurden überschlagsmässige Abschätzungen für den Bau einer eigenen Anlage, bestehend aus einem Zick-Zack-Windsichter mit nachgeschaltetem Zyklon, welcher zur Klassierung von 300 kg Holzstaub in drei bis sechs Stunden geeignet wäre, durchgeführt und diskutiert. In Verbindung mit den noch unsicheren Anforderungen an die Trennaufgabe und den fehlenden Erfahrungen mit der Auslegung von Windsichtern wurde beschlossen, dass es nicht sinnvoll wäre, eine Anlage dieser Grösse komplett auszulegen und zu bauen.

Das Ziel aus dem Projekt P5, ein Vorzeigeobjekt im Unterricht zu haben, hat dazu geführt, dass beschlossen wurde eine kleine Anlage, bestehend aus einem einfachen Schwerkraft-Gegenstromsichter und einem Zyklon, als Vorzeigeobjekt für das Modul Verfahrenstechnik auszuwählen und zu bauen. Mit der Anlage können Versuche durchgeführt und Erkenntnisse für den Bau einer grösseren Anlage gesammelt werden.

## 1.2 Projektziele

Das Hauptziel dieser Projektarbeit war die Auslegung einer Anlage bestehend aus einem Windsichter mit einem nachgeschaltetem Zyklon. Die Rahmenbedingungen wurden im Projektauftrag festgehalten (siehe Anhang 1).

Die Anlage soll als Vorzeigeobjekt im Unterricht für das Modul Verfahrenstechnik dienen. Aus diesem Einsatzzweck wurden weitere Anforderungen abgeleitet. Die Anlage muss transportabel sein, um diese leicht in das gewünschte Klassenzimmer bringen zu können. Dadurch werden auch die maximalen Dimensionen der Anlage definiert. Diese muss durch eine Türe passen. So wurde festgelegt, dass die maximale Höhe 2000 mm nicht überschreiten und die Anlage nicht breiter als 800 mm werden darf. Die Länge der Anlage soll 1500 mm nicht überschreiten, um den Transport in einem Warenlift zu erlauben. Die Hilfsaggregate müssen fest installiert sein. Das heisst, dass keine weiteren Hilfsmittel benötigt werden, um die Anlage zu betreiben. Um einen Einblick in die Teilprozesse der Anlage zu ermöglichen, muss diese aus einem transparenten Material gefertigt werden.

Des Weiteren soll der Volumenstrom in der Anlage steuerbar sein. Die Auswahl eines geeigneten Aufgabeguts ist ebenfalls Ziel dieser Arbeit. Ein weiteres Ziel ist, Geschwindigkeitsmessungen im Windsichter und Druckverlustmessungen über dem Zyklon vorzubereiten und durchzuführen.

Im Projektauftrag wurde festgelegt, dass die Klassierung von Holzstaub keine Priorität in diesem Projekt hat.

## 2 Glossar und Begriffsdefinitionen

Dieser Abschnitt soll häufig verwendete Begriffe abgrenzen.

- Klassieren:** Das Klassieren ist ein mechanisches Trennverfahren für Feststoffe. Wird ein Partikelkollektiv anhand der Partikelgrösse in verschiedenen Grössenklassen getrennt, so spricht man von einer Klassierung.
- Sortieren:** Das Sortieren ist ebenfalls ein mechanisches Trennverfahren. Dabei wird ein Feststoffgemisch, welches aus verschiedenen Stoffen mit unterschiedlichen stofflichen Merkmalen besteht, in Fraktionen mit gleichen stofflichen Merkmalen aufgeteilt.
- Aufgabegut:** Das Aufgabegut beschreibt das disperse Partikelkollektiv, welches durch das Trennverfahren klassiert werden soll.
- Grobgut:** Das Grobgut beschreibt die im Zyklon oder Windsichter abgeschiedenen Partikel. In dieser Arbeit wird die Grobgutfraktion des Windsichters als Grobgut bezeichnet.
- Feingut:** Das Feingut beschreibt die Partikel, welche den Zyklon über das Reingas verlassen oder beim Windsichter diejenigen, welche mit dem Luftstrom ausgetragen werden. In dieser Arbeit wird die Grobgutfraktion des Zyklons als Feingut bezeichnet.
- Rohgas:** Das Rohgas beschreibt das mit Partikeln beladene Gas, welches in den Zyklon geführt wird, um die Partikel aus diesem abzuscheiden. In der hier vorgestellten Anlage kommt das Rohgas direkt aus dem Windsichter.
- Reingas:** Das Reingas beschreibt den Gasstrom, welcher den Zyklon mit einer kleineren Beladung verlässt als das Rohgas.
- Beladung:** Die Beladung beschreibt das Verhältnis der Masse des Feststoffs  $m_s$  zu der Masse des Fluids  $m_f$ , in welchem der Feststoff transportiert wird.

$$\mu_e = \frac{m_s}{m_f} \quad (2-1)$$

### 3 Vorgehen und Methodik

Im folgenden Kapitel werden der Verlauf der Arbeit und die gewählte Methodik während der Bearbeitung der Projektarbeit erläutert.

Parallel zu der Auftragsklärung wurde die Projektplanung durchgeführt. Die Projektplanung ist ein Teil des Projektauftrags. Die Projektstrukturen wurden basierend auf den in der Verfahrenstechnik üblichen Strukturen gewählt. Die Projektphasen bestanden aus der Auftragsklärung, dem Basic Engineering, dem Detail Engineering, der Montage, der Inbetriebnahme und dem Funktionstest. Die einzelnen Phasen überschneiden sich teilweise und wurden wo möglich parallel ausgeführt.

In der Auftragsklärung wurde beschlossen eine Anlage bestehend aus einem Windsichter mit einem nachgeschaltetem Zyklon auszulegen und zu bauen. Da der grobe Aufbau der Anlage beschlossen war, konnte mit dem Basic Engineering begonnen werden. Es wurde ein erstes 3D-CAD Modell der Anlage erstellt, die ersten Komponenten ausgewählt und Berechnungen bezüglich der Leistung der Anlage durchgeführt. Parallel dazu wurde hauptsächlich für die Auslegung des Windsichters noch Literaturrecherche durchgeführt.

Die Auslegung und Dimensionierung der Anlage wurde periodisch mit dem Auftraggeber und der fachlichen Betreuung diskutiert und angepasst. Ein Problem war, dass die Rahmenbedingungen für die Projektarbeit nicht von Anfang an definiert waren. Die Klassierung des Holzstaubes war in den ersten zwei Monaten ein gewünschtes Einsatzziel der Anlage, jedoch widersprach es der Anforderung, die Anlage als Vorzeigeobjekt im Unterricht zu benutzen. Dies hauptsächlich wegen den nötigen Dimensionen der Anlage. Ein weiterer wichtiger Punkt, welcher die Auslegung und Dimensionierung stark beeinflusst hat, waren die auf dem Markt verfügbaren Komponenten. Das Basic Engineering war ein langer und stark iterativer Prozess. Die Inbetriebnahme einer Anlage in der FHNW verlangt die Abnahme durch den Sicherheitsverantwortlichen. Das Konzept der Anlage wurde einer Gefahrenanalyse unterzogen und mit dem Sicherheitsverantwortlichen besprochen.

Als das Basic Engineering einen Status erreicht hatte, in welchem die Hauptkomponenten ausgewählt und somit gewisse Betriebsparameter definiert waren, konnte mit dem Detail Engineering gestartet werden. Es wurden ein detailliertes 3D-CAD Modell der Anlage erstellt und Fertigungszeichnungen abgeleitet. Parallel dazu wurden Offerten für die einzelnen Komponenten eingeholt. Basierend auf den Offerten und Schätzungen, wo Offerten fehlten, wurde ein Budget für die gesamte Anlage erstellt.

Die auf das Detail Engineering folgenden Projektphasen wurden teilweise parallel dazu ausgeführt. Anlageteile wurden ausgearbeitet und optimiert, Bestellungen in Auftrag gegeben, weitere Offerten eingeholt und je nach Verfügbarkeit der Bauteile wurde die Montage der Anlage durchgeführt.

Die Montage der Anlage begann mit dem Gestell. Die Komponenten dazu waren unter den Ersten, welche eingetroffen waren. Nach dem Gestell wurden der Frequenzumrichter und der Motor in die Anlage eingebaut und verdrahtet. Danach wurde noch das Manometer montiert. Aufgrund der Lieferzeit der Kunststoffteile wurden diese zuletzt in die Anlage eingebaut. Mit diesen war die Montage abgeschlossen und es konnte die Inbetriebnahme durchgeführt werden.

Die Inbetriebnahme und der erste Funktionstest wurden unter Aufsicht der Vertretung des Sicherheitsverantwortlichen und der fachlichen Betreuung erfolgreich durchgeführt.

## 4 Theoretische Grundlagen

In den folgenden Kapiteln wird die zur Auslegung der Anlage notwendige Theorie erläutert. Dies betrifft vor allem den Windsichter. Der Zyklon und die dazugehörige Theorie wurden im Projekt P5 „Auslegung eines Zyklons zur Auftrennung von Holzstaub“ erläutert. Es wird nur das Wichtigste wiederholt.

### 4.1 Windsichter

Windsichter oder kurz auch Sichter genannt, sind verfahrenstechnische Apparate, welche zur mechanischen Trennung von Partikelkollektiven oder Feststoffgemischen eingesetzt werden. Sie können ein Partikelkollektiv in eine Grob- und eine Feinfraktion oder Fraktionen unterschiedlicher Dichte trennen. Letzteres wird bei Recyclingprozessen häufig eingesetzt.

Das einfachste Sichtprinzip ist das eines Schwerkraft-Gegenstromsichters (siehe Abbildung 1). Dabei wird das zu sichtende Gut seitlich in ein senkrecht mit aufwärts gerichtetem Luftstrom zugeführt [1].

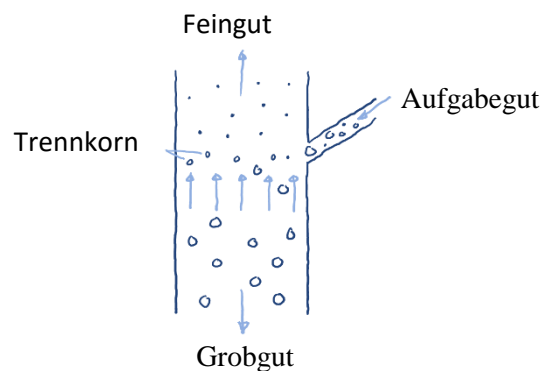


Abbildung 1: Skizze eines Schwerkraft-Gegenstromsichters

Die in die Strömung eingebrachten Partikel werden in Abhängigkeit ihrer Sinkgeschwindigkeit  $v_p$  aufgetrennt. Partikel, welche eine kleinere Sinkgeschwindigkeit als die theoretische konstante Luftgeschwindigkeit im Sichterrohr aufweisen, werden als Feingut nach oben ausgetragen. Die Partikel, welche eine grössere Sinkgeschwindigkeit aufweisen, werden entgegen der Strömung (Gegenstrom) nach unten aussedimentiert [2].

Sind die Luftgeschwindigkeit im Sichterrohr und die Sinkgeschwindigkeit eines Partikels gleich, so schwebt es in der Trennzone. Partikel dieser Grösse definieren somit die Trennkorngrösse des Sichters. Durch die Ansammlung dieser Partikel in der Trennzone, wird die bereits geringe Trennschärfe verringert. Dies, weil die Partikel in der Trennzone von schwereren oder leichteren Partikel aus dieser mitgerissen werden können. Aus diesem Grund eignen sich Schwerkraft-Gegenstromsichter zur Trennung von Partikelkollektiven mit zwei Häufigkeitsmaxima (bi-modale Verteilung) oder zur Trennung von Kollektiven bestehend aus zwei verschiedenen Stoffen [1].

### 4.1.1 Sinkgeschwindigkeit

Die Sinkgeschwindigkeit der Partikel lässt sich über den Absetzprozess bei der Sedimentation beschreiben. Für eine einfache formeltechnische Beschreibung des Absetzprozesses müssen zwei Voraussetzungen gegeben sein. Erstens muss das Partikel eine Kugelform aufweisen. Zweitens muss sich das Partikel in einem unbegrenzten und ruhenden fluiden Medium mit konstanter Geschwindigkeit bewegen [3].

Man geht zu Beginn von einem ruhenden kugelförmigen Partikel aus. Dieses wird dann in Richtung der grössten auf das Partikel wirkenden Kraft beschleunigt. Die zu Beginn wirkenden Kräfte sind die Gewichtskraft  $F_G$  und die Auftriebskraft  $F_A$ . Die Auftriebskraft  $F_A$  ist das Produkt des Volumens des Partikels  $V_P$ , der Dichte des Fluides  $\rho_f$  und der Erdbeschleunigung  $g$ . Die Gewichtskraft  $F_G$  ist das Produkt des Volumens des Partikels  $V_P$ , der Dichte des Partikels  $\rho_{P,S}$  und der Erdbeschleunigung  $g$ . Die beiden Kräfte berechnen sich folgendermassen [3]:

$$F_A = V_P \cdot \rho_f \cdot g \quad (4-1)$$

$$F_G = V_P \cdot \rho_{P,S} \cdot g \quad (4-2)$$

[3]

Die Geschwindigkeit des Partikels steigt aufgrund der Beschleunigung und damit steigt auch die Widerstandskraft  $F_S$ , welche entgegengesetzt der Bewegungsrichtung wirkt [3]. Die stationäre Sinkgeschwindigkeit der Kugel ergibt sich dann aus dem Gleichgewicht der Gewichtskraft  $F_G$ , der Auftriebskraft  $F_A$  und der Widerstands- oder Schleppekraft  $F_S$  [1].

Die Widerstandskraft  $F_S$  wird vom umgebenden Fluid aufgrund von Reibungs- oder Druckwiderständen entgegengesetzt. Diese ist nicht wie die Gleichgewichts- und Auftriebskraft konstant, sondern eine Funktion der Sinkgeschwindigkeit [1].

Die Widerstandskraft  $F_S$  wird durch den dimensionslosen Widerstandsbeiwert  $\zeta_P$ , der angeströmten Fläche  $A_A$ , der Dichte des Fluides  $\rho_f$  und der Geschwindigkeit des Partikels  $v_P$  bestimmt. Er berechnet sich wie folgt:

$$F_S = \zeta_P \cdot A_A \cdot \frac{\rho_f}{2} \cdot v_P^2 \quad (4-3)$$

[3]

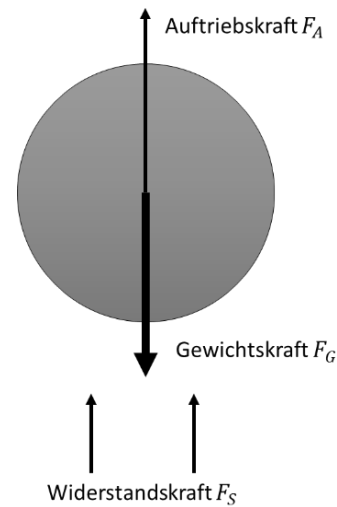


Abbildung 2: Kräfte an einem Partikel im Schwerfeld

Der Widerstandsbeiwert  $\zeta_p$  ist dabei eine Funktion der REYNOLDS-Zahl (siehe Abbildung 3). Aufgrund der Abhängigkeit der REYNOLDS-Zahl und des Widerstandsbeiwerts von der Partikelgeschwindigkeit ist eine einfache Berechnung des Widerstandsbeiwerts ohne Iteration nicht möglich [3].

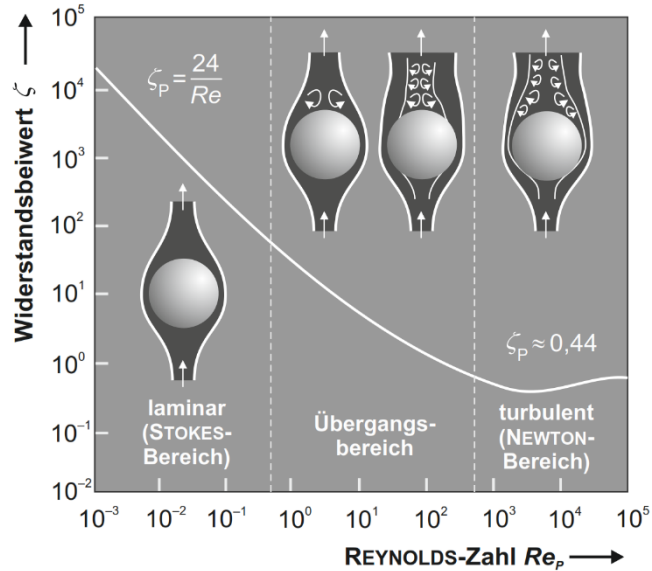


Abbildung 3: Widerstandsbeiwert als Funktion der Reynolds-Zahl und die Strömungsverläufe an einer Kugel [3]

Es ist möglich die REYNOLDS-Zahl und den Widerstandsbeiwert in eine dimensionslose Kennzahl zusammenzufassen. Dies ist die ARCHIMEDES-Zahl. Da es sich um kugelförmige Partikel handelt, wurden die Gleichungen so umgestellt, dass sie sich auf den Partikeldurchmesser  $d_p$  beziehen. Mithilfe der ARCHIMEDES-Zahl kann anhand der Stoffdaten direkt auf die REYNOLDS-Zahl geschlossen werden. Die ARCHIMEDES-Zahl berechnet sich nach [3] wie folgt:

$$Ar = \frac{d_p \cdot g \cdot \rho_f \cdot (\rho_{p,s} - \rho_f)}{\eta_f^2} = \frac{3}{4} \cdot Re_p^2 \cdot \zeta_p \quad (4.4)$$

[3]

Ist die ARCHIMEDES-Zahl kleiner als 9 wird das Partikel laminar umströmt (STOKES-Bereich) und es gilt nach [3]:

$$Re_p = \frac{Ar}{18} \quad (4.5)$$

Für ARCHIMEDES-Zahlen zwischen 9 und 82500 ist die Umströmung im Übergangsbereich (nach ZOGG) und es gilt nach [3]:

$$Re_p = 18 \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{\sqrt{Ar}}{9}} - 1 \right]^2 \quad (4.6)$$

Für ARCHIMEDES-Zahlen grösser 82500 ist die Umströmung turbulent (NEWTON-Bereich) und nach [3] gilt:

$$Re_p = 1.74 \cdot \sqrt{Ar} \quad (4-7)$$

Aus der so ermittelten REYNOLDS-Zahl  $Re_p$ , lässt sich nun die Sinkgeschwindigkeit eines Partikels berechnen [3].

$$v_p = \frac{Re_p \cdot \eta_f}{d_p \cdot \rho_f} \quad (4-8)$$

Die grundlegende Voraussetzung für die zuvor erwähnten Gleichungen ist die Kugelform der Partikel. Weicht die Partikelform von der Kugelform ab, ändert sich auch die Sinkgeschwindigkeit. Die Sinkgeschwindigkeit wird dann meistens kleiner als die Berechnete. Dies liegt daran, dass sich bewegte Partikel in der Strömung so ausrichten, dass sie der Strömung den maximalen Widerstand entgegensetzen [1].

#### 4.1.2 Luftgeschwindigkeit im Sichterrohr

Bei der praktischen Anwendung wird die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  im Sichterrohr laut [2] aus dem Rohrquerschnitt  $A$  und dem Volumenstrom  $\dot{V}$  wie folgt berechnet:

$$\bar{v} = \frac{\dot{V}}{A} \quad (4-9)$$

Dabei handelt es sich um eine gemittelte Geschwindigkeit, da die Strömungsgeschwindigkeit über dem Rohrquerschnitt nicht konstant ist. Ziel ist es, am oberen Ende des Windsichters ein ausgebildetes Laminar-Profil der Strömungsgeschwindigkeit zu erreichen. Deshalb ist es nötig, der Strömung genug Zeit zur Verfügung zu stellen, um sich ausbilden zu können. Die Stromfäden, welche sich ausbilden, sind in der Rohrmitte beschleunigt und in der Nähe der Wand verzögert.

## 4.2 Zyklon

Zyklone erlauben es, Feststoffe aus Gasen oder Flüssigkeiten abzuscheiden. Sie haben einen einfachen Aufbau, sind kompakt und haben keine beweglichen Teile. Dies führt zu tiefen Produktionskosten und einer einfachen Wartung. Der Zyklon konnte sich dadurch in vielen Industriezweigen etablieren [4].

Ein Zyklon funktioniert nach dem Prinzip der Fliehkraftabscheidung. Es wird ein mit Staub beladenes Gas in den Zyklon geleitet. Durch die tangentielle Anordnung des Einlaufs wird das Gas in eine spiralförmige Strömung gezwungen (siehe Abbildung 4). Das Gas strömt zunächst als äusserer Wirbel nach unten. In dieser Phase wirkt eine Zentrifugalbeschleunigung auf die Staubpartikel, welche diese entlang der Wände des Zyklons nach unten treibt. Im unteren Bereich des Zyklons angekommen, wechselt die Strömungsrichtung und das Gas strömt nach oben als innerer Wirbel. Das Gas verlässt anschliessend den Zyklon durch das Tauchrohr und die abgeschiedenen Feststoffe verlassen den Zyklon durch den Staubauslass [4].

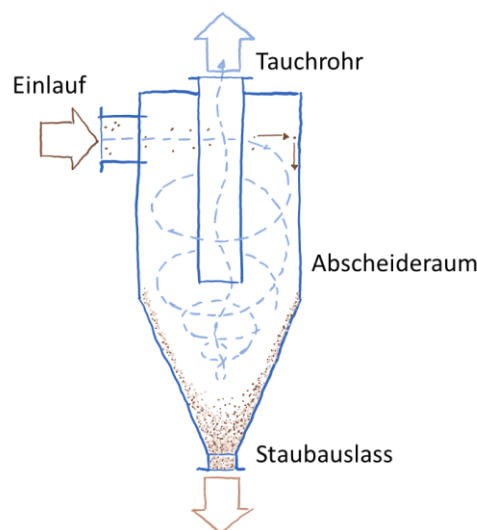


Abbildung 4: Skizze des typischen Aufbaus eines Gaszyklons [4]

### 4.2.1 Fluidmechanische Auslegung des Zyklons

Die fluidmechanische Auslegung des Zyklons wurde im Projekt P5 „Auslegung eines Zyklons zur Auftrennung von Holzstaub“ erläutert. Die dafür notwendigen Berechnungen werden hier nicht wiederholt.

Die fluidmechanische Auslegung des Zyklons erfolgte nach der Muschelknautz Methode. Das von Muschelknautz und Mitarbeitern entwickelte phänomenologische Trennflächenmodell ist die in der industriellen Praxis am häufigsten angewandte Auslegungsmethode [5].

In Zyklonen kommt es zu dreidimensionalen Zweiphasenströmungen. Dies schliesst eine theoretische Beschreibung der Strömung und damit eine exakte Auslegung aus. Aus diesem Grund wird auf das vereinfachte Trennflächenmodell zurückgegriffen. Dafür wird angenommen, dass

sich die dispersen Partikel in einer ebenen Wirbelströmung bewegen. Auf die sich bewegenden Partikel in dieser Strömung wirken verschiedene Kräfte. Das sind die von der Umfangsgeschwindigkeit verursachte Zentrifugalkraft, eine Schleppkraft, welche durch das zur Zyklon-Achse strömendes Gas induziert wird, und eine Verdrängungskraft [5].

Bei einer gewissen Partikelgrösse sind die drei Kräfte auf dem Tauchrohr Radius im Gleichgewicht. Diese Partikel werden zu 50% abgeschieden und zu 50% ins Reingas transportiert. Dies definiert den Grenzkorndurchmesser  $d^*$ . Die dem Model zugrundeliegende Trennfläche entspricht dabei der gedanklich nach unten verlängerten Tauchrohrwand [5].

#### 4.2.2 Die wichtigsten Parameter bei der Auslegung eines Zyklons

Von den Auslegungsrechnungen werden die Abmessungen des Zyklons, der Abscheidegrad und der Druckverlust verlangt [4].

Die Abmessungen des Zyklons können in gewissen Grenzen frei gewählt werden. Die Prozesse vor dem Zyklon müssen betrachtet werden, da diese die Dimensionen des Zyklons bestimmen. Der Rohgas Volumenstrom, welcher dem Zyklon zugeführt wird, und die Dimensionen des Zyklons legen den Druckverlust, die Grenzpartikelgrössen und den Abscheidegrad fest [4].

Der statische Druckverlust  $\Delta p_{ges}$  über dem Zyklon legt den Energieverbrauch für die Trennung fest [6]. Der Druckverlust verhält sich proportional zu den Grenzpartikelgrössen. Mit steigendem Druckverlust können immer kleinere Partikel abgeschieden werden. Für Zyklone werden üblicherweise Druckverluste von bis zu 2500 Pa zugelassen [7].

Es gibt zwei Abscheidemechanismen in einem Zyklon. Der Erste ist die Abscheidung durch Überschreitung der Grenzbeladung. Die Strömung im Zyklon kann nur eine gewisse Menge an Staub mit sich führen. Diese maximale Beladung des Gases mit Staub wird als Grenzbeladung  $\mu_g$  bezeichnet. Wird nun ein Rohgas zugeführt, welches eine Eintrittsbeladung  $\mu_e$  aufweist, welche grösser ist als die Grenzbeladung  $\mu_g$ , so wird der überschüssige Masseanteil direkt nach dem Betreten des Zyklons ausgeschieden [7].

Dieser Mechanismus führt zu einer ersten Klassierung des Aufgabeguts und die Trennung wird durch den Grenzkorndurchmesser für die Wandabscheidung  $d_e^*$  festgelegt. Partikel, welche grösser sind als der Grenzkorndurchmesser  $d_e^*$ , sedimentieren an der Zyklon-Wand aus. Partikel, welche kleiner sind, gelangen ins Zyklon-Innere und unterliegen dort der Abscheidung im inneren Wirbel [7].

Der zweite Abscheidemechanismus ist die Abscheidung im inneren Wirbel. Dieser Trennprozess wird durch den Grenzkorndurchmesser  $d^*$  festgelegt. Es ist wichtig, diese beiden Abscheidemechanismen getrennt zu betrachten. Der Grenzkorndurchmesser  $d_e^*$  für die Wandabscheidung ist unabhängig vom Grenzkorndurchmesser  $d^*$  für die Abscheidung im inneren Wirbel. Der Grenzkorndurchmesser  $d^*$  kann kleiner oder grösser sein als der Grenzkorndurchmesser  $d_e^*$  [7].

Die Eintrittsbeladung hat einen deutlichen Einfluss auf den Gesamtabscheidegrad. Mit steigender Beladung steigt auch der Gesamtabscheidegrad. Dies wird so erklärt, dass feine Partikel durch Feststoffstrahlen begraben und so direkt abgeschieden werden. Im Diagramm 1 ist die Abhängigkeit der einzelnen Abscheidemechanismen von der Eintrittsbeladung dargestellt [7].

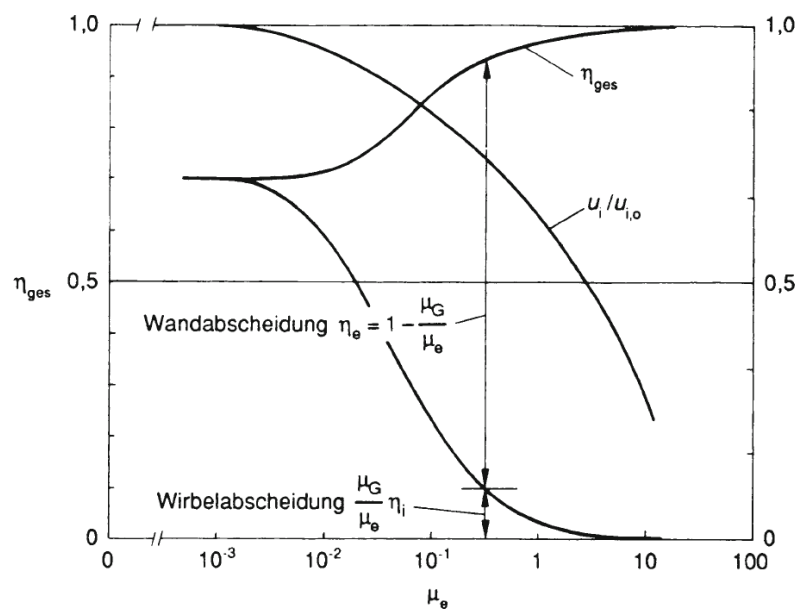


Diagramm 1: Abscheidegrade in Abhängigkeit der Eintrittsbeladung [5]

## 5 Basic Engineering (Entwurfsplanung)

Im Rahmen des Basic Engineerings wurde die Auslegung und Grobplanung der Anlage durchgeführt. Die Auslegung ist ein iterativer Prozess. Die Einzelkomponenten der Anlage sowie das potentielle Aufgabegut mussten bei einer Änderung immer wieder aufeinander abgestimmt werden. In diesem Kapitel wird jeweils der letzte Stand vorgestellt. Die Auslegung und Dimensionierungen der Apparate werden im Kapitel 7 diskutiert. Dies ist auch Teil des Basic Engineerings. Es wurde jedoch aufgrund unnötiger Wiederholungen darauf verzichtet, die Auslegung und Dimensionierung der einzelnen Apparate hier zu beschreiben.

### 5.1 Massenstrombilanz, Trenngrad und Verteilungsdichte

Die Massenstrombilanz und der Trenngrad der Anlage variieren in Abhängigkeit der gewählten Betriebs-Parameter und der Zusammensetzung des Aufgabegutes. In der Abbildung 5 ist das Grundfließbild der Anlage dargestellt, in welchem die Massenströme eingetragen sind.

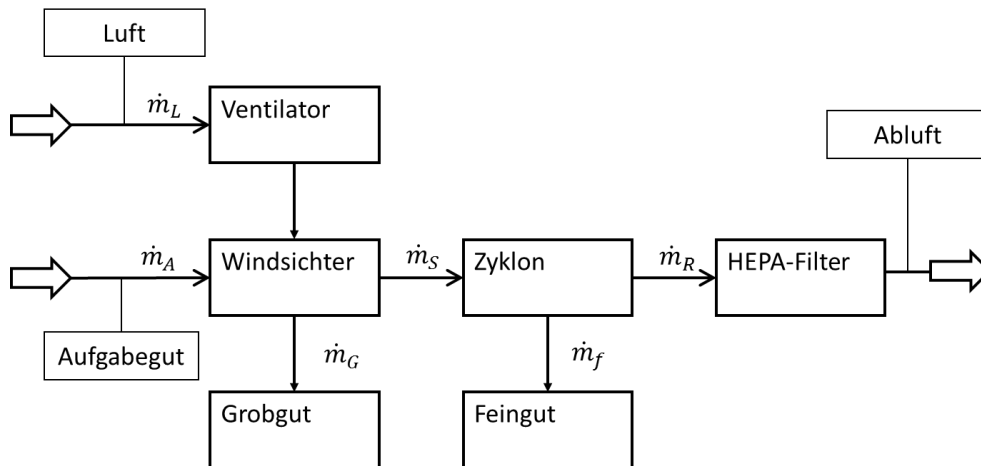


Abbildung 5: Grundfließbild der Anlage mit eingetragenen Massenströmen für die Massenstrombilanz

Der Massenstrom des Aufgabeguts  $\dot{m}_A$  wird im Windsichter in den Massenstrom des Grobgutes  $\dot{m}_G$  und des Feingutes aus dem Sichter  $\dot{m}_S$  aufgeteilt. Die Gesamtmassenbilanz des Windsichters lautet:

$$\dot{m}_A = \dot{m}_S + \dot{m}_G \quad (5-1)$$

Die Trennung wird dabei vom Trenngrad des Windsichters beschrieben. Der Trenngrad wird für jeden Punkt auf der X-Achse des Verteilungsdiagramms bestimmt. Im Diagramm 2 ist das Beispiel einer Trenngradkurve dargestellt. Der Trenngrad  $T(x)$  sagt aus, welcher Anteil der betrachteten Fraktion vom Aufgabegut in das Grobgut gelangt [1].

$$T(x) = \frac{g_S \cdot q_G(x)}{q_A(x)} \quad (5-2)$$

Beim Wert  $x_T$  sind die Anteile der Grob- und Feinfraktion gleich gross. Die Verteilungsdichte des Grob- und Feingutes schneiden sich in diesem Punkt (siehe Diagramm 2). Ist nun die Partikelgrösse  $x$  ein Teilchendurchmesser, ergibt sich der Ausdruck Trennkordurchmesser  $d_T$  [1].

Der Überschneidungsbereich zwischen der Grob- und Feinutkurve stellt das Fehlgut dar. Im Diagramm 2 stellt der Bereich, welcher mit (a) gekennzeichnet ist, den Fehlaustrag vom Grobgut ins Feingut dar. Der mit (b) gekennzeichnete stellt den Fehlaustrag vom Feingut ins Grobgut dar [1].

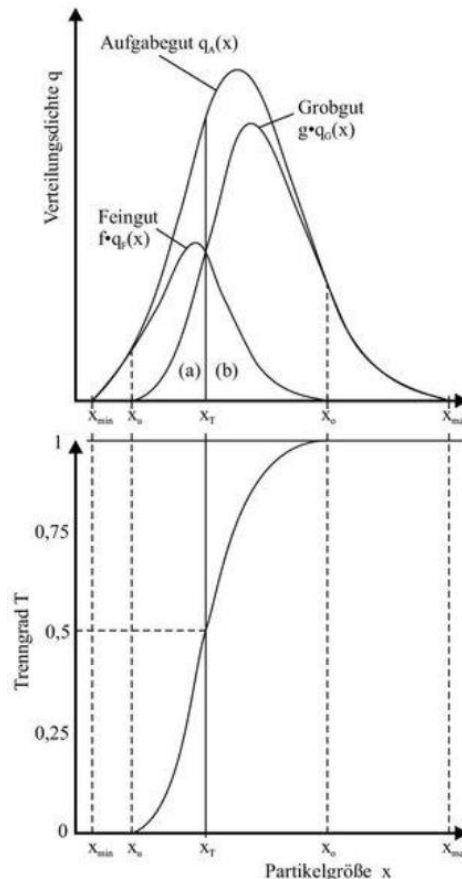


Diagramm 2: Beispiel eines Verteilungsdiagramms (oben) und einer Trenngradkurve (unten) [1]

Der Grobgutanteil nach dem Sieber  $g_S$  ist wie folgt definiert [1]:

$$g_S = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_A} \quad (5-3)$$

Dementsprechend kann man auch auf den Feingutanteil zurückschliessen, welcher den Sieber wieder verlässt [1]:

$$f_S = \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_A} \quad (5-4)$$

Für die Trennung im Windsichter gilt:

$$q_A(x) = g_S \cdot q_G(x) + f_S \cdot q_S(x) \quad (5-5)$$

Der Trennprozess im Zyklon kann analog zum Windsichter beschrieben werden. Für den Zyklon gilt somit:

$$q_S(x) = g_Z \cdot q_F(x) + f_Z \cdot q_R(x) \quad (5-6)$$

Zur Beschreibung der Trennung der ganzen Anlage werden beide Prozesse hintereinander geschaltet. Die Gleichung (5-6) wird dafür in die Gleichung (5-5) eingefügt:

$$q_A(x) = g_S \cdot q_G(x) + f_S \cdot (g_Z \cdot q_F(x) + f_Z \cdot q_R(x)) \quad (5-7)$$

### 5.1.1 Simulation einer Trennung mit der Anlage

Im Rahmen der Auslegung wurde ein Excel-Tool erstellt, welches die Trennung in der Anlage simulieren soll. Mit dem Excel-Tool konnten Untersuchungen für die Dimensionierung bezüglich der nötigen Massenströme der Anlage durchgeführt werden. Das Tool stammt noch aus der Zeit, in der die Klassierung des Holzstaubs Priorität hatte.

Das Diagramm 3 zeigt die Verteilungssumme und die Häufigkeitsdichte einer Holzstaubprobe. Anhand dieser Probe wird hier eine Simulation mit dem Excel-Tool vorgestellt. Das Excel-Tool befindet sich auf der Projekt DVD.

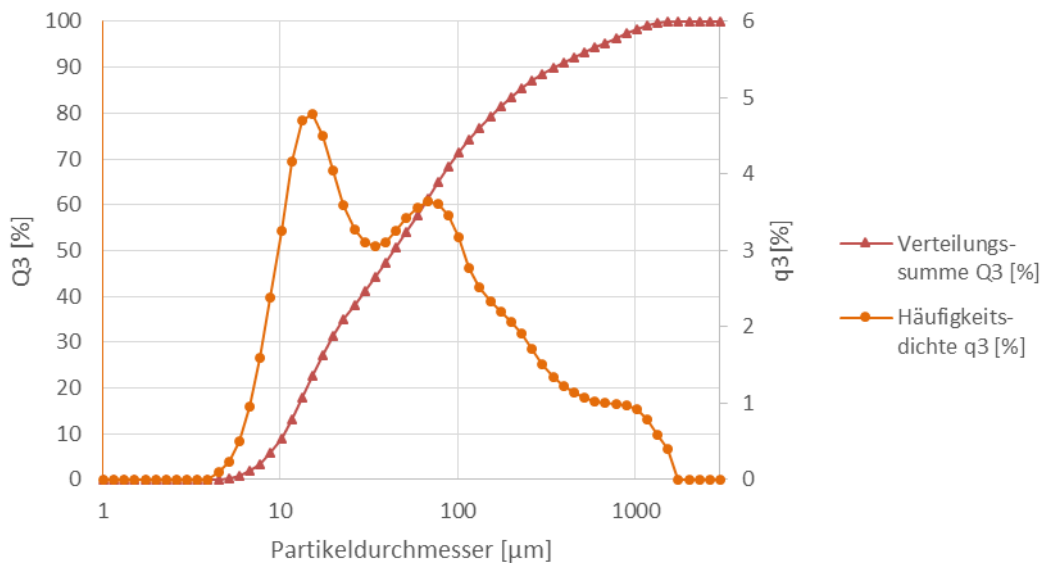


Diagramm 3: Verteilungsdichte und Verteilungssumme einer Holzstaubprobe

Der Trenngrad  $T(x)$  für den Windsichter und den Zyklon wurde mit folgender Gleichung angenähert:

$$T(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_T}{x}\right)^D} \quad (5-8)$$

Die Gleichung wird nach [8] zur Berechnung des Trenngrades in Zyklonen genutzt. Der Trenngrad  $T(x)$  bildet eine S-förmige Kurve und wird durch folgende Punkte limitiert [8]:

$$\begin{aligned} T(x) &\rightarrow 0 && \text{für} && x \rightarrow 0 \\ T(x) &\rightarrow 1 && \text{für} && x \gg x_T \\ T(x) &= 0.5 && \text{für} && x = x_T \end{aligned} \quad (5-9)$$

Die Variable  $D$  beschreibt die Steilheit der Kurve. Der Trennkorndurchmesser wird durch  $x_T$  beschrieben.

Das Diagramm 4 zeigt die Häufigkeitsdichte des Holzstaubs und einen angenommenen Trenngrad für den Windsichter. Die Parameter für den Trenngrad sind  $x_T = 100 \mu\text{m}$  und  $D = 2$ . Der Parameter  $D = 2$  wurde so gewählt, dass es zu einer unscharfen Trennung kommt, wie es bei einem Windsichter der Fall ist. Der Trennkorndurchmesser  $x_T$  wurde beliebig gewählt.

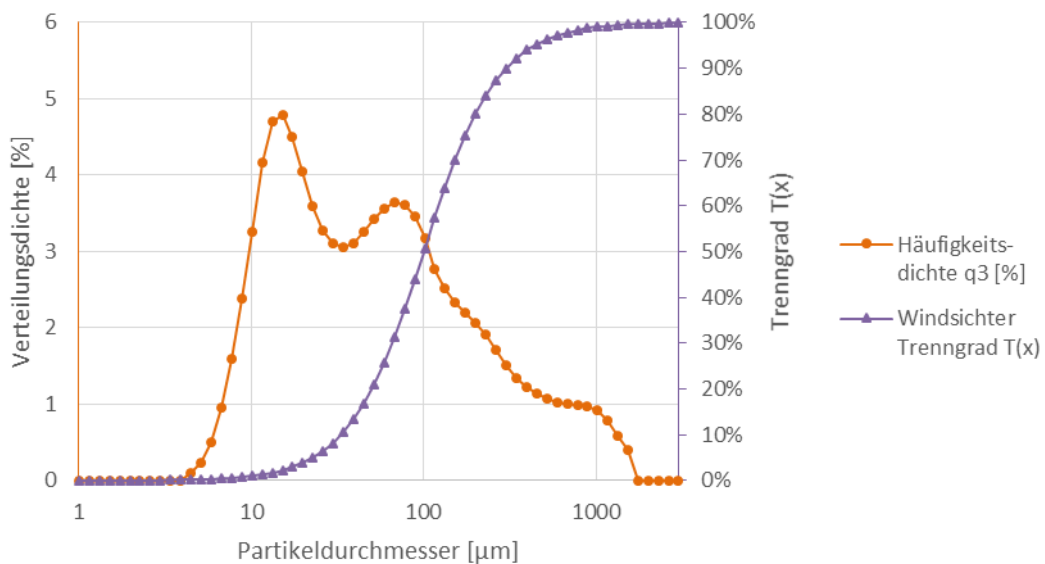


Diagramm 4: Häufigkeitsdichte des Holzstaubes und angenommener Trenngrad des Windsichters

Das Ergebnis der Trennung im Windsichter ist in Diagramm 5 dargestellt. In diesem Diagramm ist ersichtlich, dass sich die Verteilungsdichte des Grobguts und Feinguts bei der gewählten Trennkorngröße von  $100\ \mu\text{m}$  schneiden. Zudem sieht man den Fehlgutaustrag. Zum Fehlgutaustrag kommt es aufgrund der unscharfen Trennung.

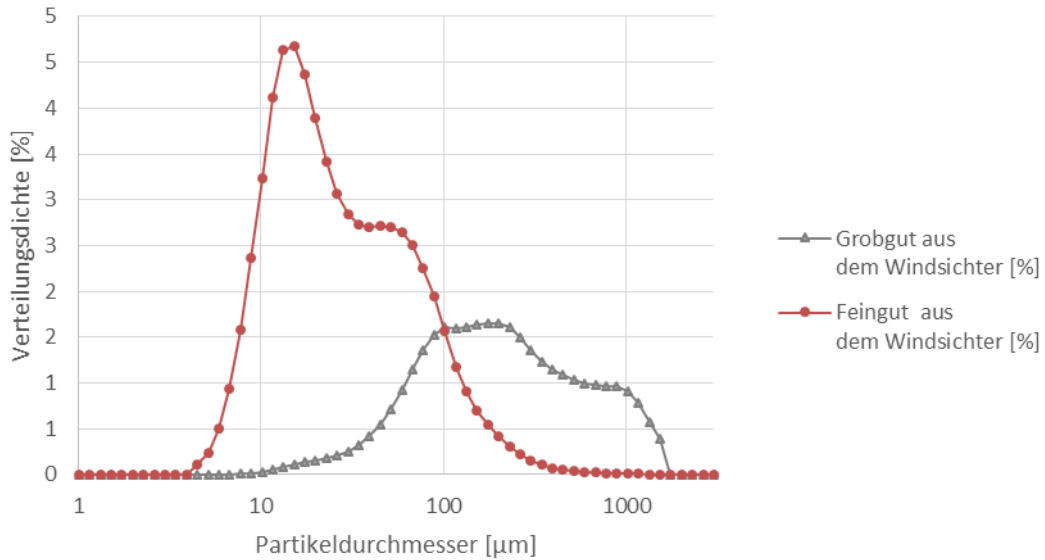


Diagramm 5: Häufigkeitsdichte des Grobguts und des Feinguts nach dem Windsichter

Nach dem Windsichter erfolgt die nächste Trennung im Zyklon. Die Parameter für den Trenngrad sind  $x_T = 25\ \mu\text{m}$  und  $D = 4$ . Der Parameter  $D$  wurde so gewählt, dass es zu einer scharfen Trennung kommt, wie es bei einem Zyklon der Fall ist. Der Trennkordurchmesser  $x_T$  wurde beliebig gewählt. Diagramm 6 zeigt den Verlauf des Trenngrads des Zyklons und die Häufigkeitsdichte des Holzstaubes nach dem Windsichter.

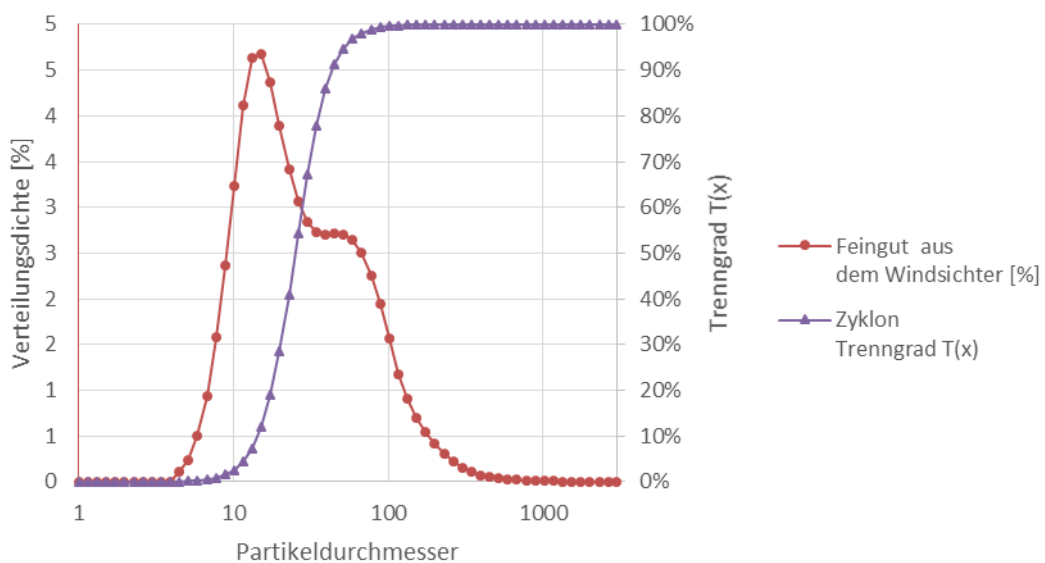


Diagramm 6: Häufigkeitsdichte des Holzstaubes und angenommener Trenngrad des Windsichters

Das Ergebnis der Trennung im Zyklon ist im Diagramm 7 dargestellt. In diesem Diagramm ist ersichtlich, dass sich die Verteilungsdichte des Grob- und Feinguts bei der gewählten Trennkorngrösse von 25  $\mu\text{m}$  schneiden. Vergleicht man den Fehlgutaustrag mit dem des Windsichters, stellt man fest, dass die Breite des Partikelgrössenbereichs des Fehlgutaustrags schmaler ist. Dies erfolgt aufgrund der schärferen Trennung.

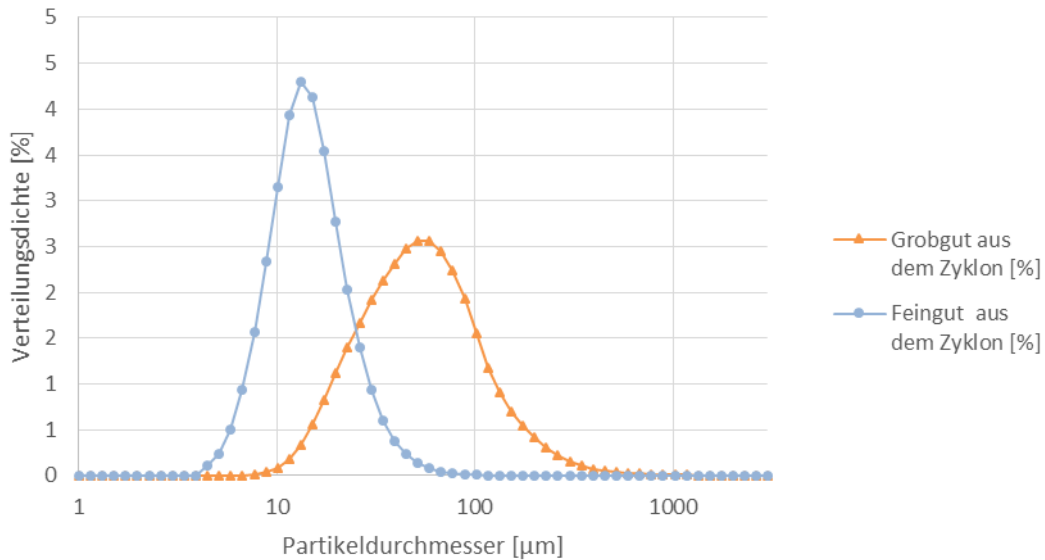


Diagramm 7: Häufigkeitsdichten des Grobguts und des Feinguts nach dem Zyklon

Da zu Beginn der Arbeit die Klassierung von Holzstaub eine Aufgabe war, lässt sich mit dem Excel-Tool berechnen wieviel Aufgabegut benötigt wird, um eine gewisse Menge an Holzstaub mit dem Zyklon abscheiden zu können.

Will man beispielsweise 300.0 kg Holzstaub im Grobgut des Zyklons, so müssen bei den hier gewählten Parametern 905.2 kg Aufgabegut in die Anlage gegeben werden. Mit diesen Mengenangaben und der gewünschten Zeit, welche man für die Klassierung einsetzen möchte, können die Massenströme in den einzelnen Teilen der Anlage bestimmt werden. Dies erlaubt es, die Anlage zu dimensionieren.

## 5.2 Verfahrensbild

Zu Beginn der Entwurfsplanung wurde ein Verfahrensbild erstellt (siehe Abbildung 6). Dieses zeigt alle notwendigen mechanischen Komponenten und gibt einen guten Prozessüberblick. Das Aufgabegut wird in den Behälter B1 gefüllt und gelagert. Dieses kann über eine Dosiervorrichtung X1 in den Windsichter F1 geleitet werden. Der Ventilator V1 erzeugt die für die Sichtung benötigte Luftströmung. Der Volumenstrom des Ventilators ist über eine Irisblende X2 steuerbar. Dieser Luftstrom trennt dann das Aufgabegut in zwei Fraktionen. Das Grobgut fällt in den Behälter B2 und das Feingut aus der Sichtung wird vom Luftstrom zum Zyklon F2 geleitet. Dieser scheidet nun die Partikel aus der Luftströmung ab und diese Partikel gelangen als Feingut in den Behälter B3. Die restlichen Partikel, welche sich noch in der Luftströmung befinden, werden direkt nach dem Zyklon vom Filter F3 herausgefiltert. Die Luft verlässt dann das System als Abluft.

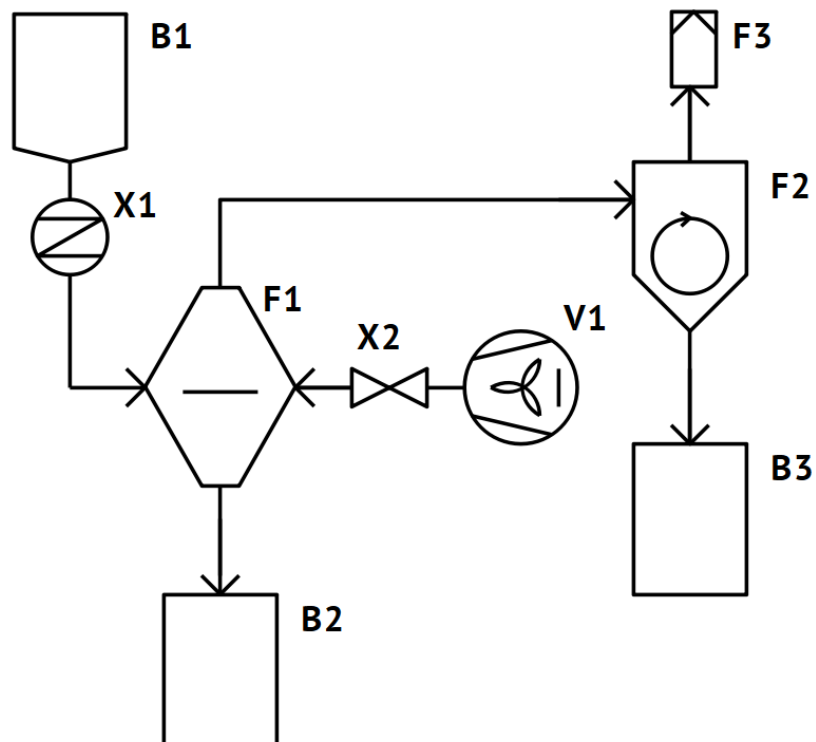


Abbildung 6: Verfahrensbild der Anlage

### 5.3 Festlegung des Aufgabeguts

Zu Beginn der Auslegung wurden die Sinkgeschwindigkeiten verschiedener Partikel berechnet. Die Sinkgeschwindigkeiten der Partikel sind, in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers und des Materials, im Diagramm 8 dargestellt. Es wurden sphärische Kugeln angenommen. Für Polyethylterephthalat (PET) wurde mit der Dichte  $\rho_{p,s}$  1360 kg/m<sup>3</sup> gerechnet, für Polypropylen (PP) mit der Dichte  $\rho_{p,s}$  910 kg/m<sup>3</sup> und für die Dichte  $\rho_{p,s}$  von Holzstaub wurden 500 kg/m<sup>3</sup> angenommen. Ziel bei der Auslegung der Anlage war es, einen möglichst grossen Bereich von Partikelgrössen und Materialien abzudecken. Das Diagramm 8 wurde als Grundlage für die restliche Auslegung genutzt. Es wurde dafür genutzt, die benötigten Luftgeschwindigkeiten im Windsichter abzuschätzen und so die Betriebsparameter zu definieren.

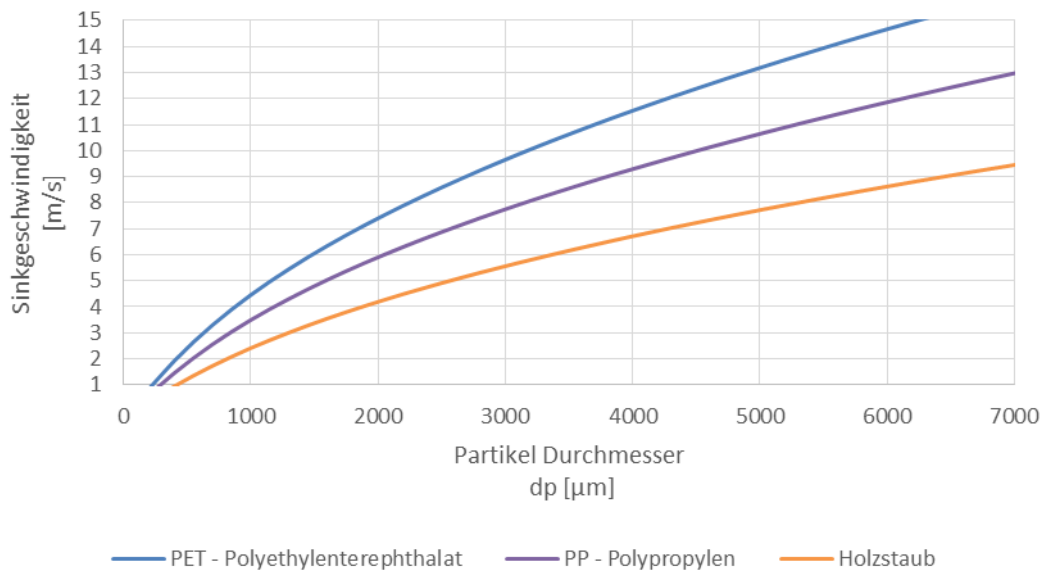


Diagramm 8: Sinkgeschwindigkeit von kugelförmigen Partikeln in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers und des Materials

Als Aufgabegut für die Vorführung der Anlage im Unterricht wurde Kunststoffgranulat aus Polypropylen (PP) gewählt. Dies, weil es eine kugelhähnliche Form aufweist und weich genug ist, um die Anlage nicht zu verkratzen. Die kugelhähnliche Form ist wichtig, um die Sinkgeschwindigkeit der Partikel berechnen zu können.

## 5.4 Werkstoffauswahl

Als Werkstoff für die Apparate und Behälter wurde Polymethylmethacrylat (PMMA) gewählt. PMMA ist auch als Acrylglas oder Plexiglas bekannt. PMMA ist durchsichtig und erlaubt somit Einblicke in die einzelnen Prozesse der Anlage, was eine wichtige Anforderung war.

Bei der Dimensionierung der einzelnen Komponenten der Anlage waren die auf dem Markt verfügbaren Halbfabrikate entscheidend. Es wurde schon beim Basic Engineering darauf geachtet, dass nur Rohrleitungen und Platten verwendet werden, welche auf dem freien Markt verfügbar sind. Damit wird die mechanische Bearbeitung der Einzelteile auf das Nötigste reduziert. Zusätzlich wurde darauf geachtet, Rohre mit gleichen Durchmessern und Platten gleicher Dicken zu verwenden. Dies erleichtert den Einkauf des Rohmaterials und beugt Verwechslungen bei der Herstellung vor.

Das Material hat natürlich auch Einfluss auf die Bearbeitung und Formgebung der einzelnen Komponenten. Zum Beispiel mussten die Bögen in den Rohrleitungen aus einzelnen Segmenten zusammengesetzt werden, da diese nicht ohne erheblichen Aufwand beim Lieferanten gebogen werden konnten. Auch der Einlauf des Aufgabeguts musste horizontal in das Sichterrohr ausgeführt werden. Dies hat den Nachteil, dass sich Aufgabegut in diesem Rohrstück sammeln kann.

Ein weiterer Nachteil ist, dass nicht jedes beliebige Aufgabegut in der Anlage genutzt werden kann. Je nach Aufgabegut können die PMMA Rohre verkratzen. Wenn anderes Aufgabegut genutzt wird als für die Vorführung im Unterricht geplant, sollte vorher geprüft werden, ob es härter als PMMA ist und zu Kratzern führt.

## 5.5 Auswahl des Ventilators

Bei der Anlage handelt es sich um ein Vorzeigobjekt. Die Anlage muss keine definierte Trennaufgabe in einer bestimmten Zeit erfüllen. Beim Ventilator wurde auf eine kleine Baugröße geachtet. Es wurde nach einem Ventilator mit einem niedrigen Volumenstrom gesucht, um Geschwindigkeiten im Sichtrohr erzeugen zu können, welche sich auch dafür eignen würden Holzstaub zu klassieren.

Bei dem gewählten Ventilator handelt es sich um den CCV 75 der Firma COLASIT AG. Die Ventilatorcharakteristik ist im Diagramm 9 dargestellt. Der Ventilator kann im blau schraffierten Bereich betrieben werden. Der Volumenstrom des Ventilators ergibt sich aus dem Schnittpunkt zwischen Anlagen- und Ventilatorcharakteristik. Der Ventilator kann einen Volumenstrom zwischen  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  und ca.  $390 \text{ m}^3/\text{h}$  erzeugen. Die Drehzahl des Ventilators kann mithilfe eines Frequenzumrichters gesteuert werden.

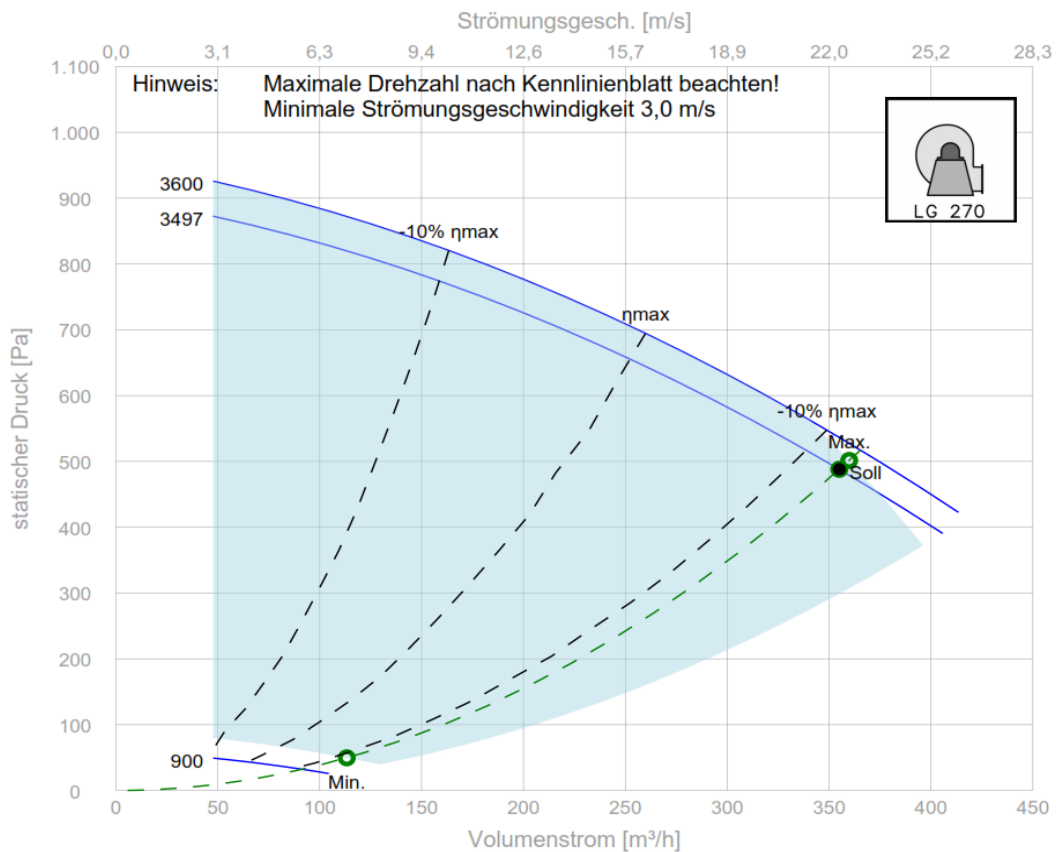


Diagramm 9: Ventilatorcharakteristik: CCV 75, Colasit AG

## 5.6 Kostenermittlung

Im Rahmen der Auftragsklärung wurde eine Abschätzung des Budgets verlangt. Anhand dieser Schätzung wurde entschieden, ob das Budget für den Bau der Anlage freigegeben wird oder nicht.

Für die Budgetabschätzung wurden die Komponenten der Anlage während des Basic Engineerings tabellarisch erfasst und die dazugehörigen Kosten basierend auf Offerten und Schätzungen addiert. Die nachfolgende Tabelle zeigt die erwarteten Kosten der einzelnen Komponenten.

Bezeichnung	Anzahl	Preis [CHF]/ [Stk.]	Preis	Notiz
Ventilator	1	713.90	713.90	Offerte
Peter Electronic VD i 037/E2/IP66 Frequenzumrichter	1	569.95	569.95	Preis bei Conrad
Spannschelle Typ C mit PVC-Pro- filgummi NW 315	3	17.05	51.15	Offerte
Zihlmann Profile	1	700.00	700.00	Schätzung
Herstellung aller Teile aus transpa- rentem Kunststoff	1	5500.00	5500.00	Offerte
Diverse Schrauben	1	100.00	100.00	Schätzung
Material für Elektrische Arbeiten	1	150.00	150.00	Schätzung
Dichtungsmaterial	1	150.00	150.00	Schätzung
Gerätegriff	1	3.80	3.80	Preis bei Distrelec
Schwingungsdämpfer	4	4.80	19.20	Preis bei Distrelec

Die Kosten basierend auf dieser Budgetschätzung betragen CHF 7'958.00. Das Budget für den Bau der Anlage wurde bewilligt und die Kosten wurden zum Teil vom Studiengang für Energie- und Umwelttechnik und vom Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz getragen.

Das Budget für den Bau der Anlage betrug nach einer ersten Schätzung CHF 6000.00. Es musste jedoch aufgrund einer Fehleinschätzung des Herstellers für die Komponenten aus Kunststoff aufgestockt werden.

Die Kosten für die gesamte Anlage können nicht angegeben werden. Dies liegt daran, dass zum Zeitpunkt der Abgabe noch nicht alle Rechnungen eingegangen sind. Es kann jedoch gesagt werden, dass das Budget überzogen wurde. Das liegt daran, dass nicht beachtet wurde, dass bei einigen Offerten der Preis ohne Mehrwertsteuer angegeben wurde.

## 6 Gefahren-Analyse

Für den Aufbau und die Inbetriebnahme einer Laborübung oder eines Prüfstandes muss an der FHNW ein Sicherheitsprozess durchlaufen werden. Das Konzept der Anlage wurde mithilfe einer Checkliste auf mögliche Gefahren überprüft (siehe Anhang 3). Daraufhin wurde das Konzept mit dem Sicherheitsbeauftragten diskutiert.

Da die Risiken als gering eingestuft wurden, wurde der Bau der Anlage genehmigt. Ein separater Prozess, welcher eine detaillierte Risiko-Analyse verlangt, musste nicht durchgeführt werden. Hier werden mögliche Risiken diskutiert.

### ***Staubexplosion***

- Gefahr:** Werden Versuche mit Holzstaub in der Anlage durchgeführt, besteht das Potential einer Staubexplosion.
- Einschätzung:** Für eine Explosion benötigt es Sauerstoff, eine Zündquelle und eine gewisse Staubkonzentration. Versuche mit Holzstaub können zu explosionsfähigen Staubkonzentrationen führen. Als Zündquellen innerhalb der Anlage sind der Ventilator und Funken aufgrund statischer Entladungen denkbar. Solange der Ventilator in Betrieb ist, ist es nicht möglich, dass Staub zum Ventilator gelangt. Deshalb wird das Risiko als gering eingestuft. Dass es zu Funken aufgrund statischer Entladungen kommt, wird auch als unwahrscheinlich gesehen und somit das Risiko als gering eingestuft.
- Massnahmen:** Um die statische Aufladung von Partikeln zu vermeiden, wurde ein geerdeter Kupferdraht in den Rohrleitungen und durch die Apparate gespannt. Die Anlage sollte auf Dichtigkeit geprüft werden bevor Holzstaub als Aufgabegut verwendet wird. Dies würde das Austreten von Holzstaub verhindern und somit das Risiko verringern, falls eine externe Zündquelle vorhanden sein sollte.

### ***Elektrische Apparate***

- Gefahr:** Bei Fehlern im Ventilator oder dem Frequenzumrichter könnte ein Fehlerstrom in den leitenden Teilen fließen.
- Einschätzung:** Alle elektrischen Arbeiten wurden mit der nötigen Sorgfalt durchgeführt. Alle Kabel sind mit Kabel Verschraubungen fest mit dem Ventilator und dem Frequenzumrichter verbunden. Aus diesem Grund wird das Risiko als gering eingeschätzt.
- Massnahmen:** Die Komponenten der Anlage wurden geerdet und die Verdrahtung wurde durch den Laborverantwortlichen überprüft.

***Kippen der Anlage***

Gefahr: Da die Anlage fast 2000 mm hoch ist und nur 680 mm breit, besteht die Gefahr, dass die Anlage kippen kann.

Einschätzung: Das kippen der Anlage wird als unwahrscheinlich eingeschätzt. Ein Kippen der Anlage könnte zu leichten Verletzungen oder zur Beschädigung der Anlage führen.

Massnahmen: Beim Bewegen der Anlage sollte darauf geachtet werden, dass diese nicht umkippt.

***Verkratzen der Anlage***

Gefahr: Da ein grosser Teil der Anlage aus PMMA hergestellt wurde, besteht je nach Aufgabegut die Gefahr, dass einige Teile von innen verkratzt werden.

Einschätzung: Es besteht die Gefahr, dass bei Versuchen das Aufgabegut gewechselt wird. Dies könnte schon aufgrund von Unachtsamkeit passieren.

Massnahmen: Vor dem Benutzen der Anlage mit einem neuen Aufgabegut sollte geprüft werden, ob das Aufgabegut zu Kratzern führt. In der Betriebsanleitung der Anlage wird auf dieses Risiko hingewiesen.

***Stromausfall***

Gefahr: Es besteht die Möglichkeit, dass die Stromversorgung unterbrochen wird oder diese ausfällt.

Einschätzung: Wird die Stromversorgung unterbrochen, läuft der Ventilator aus. Der Luft-Volumenstrom kommt zum Erliegen und somit auch die Sichtung. Das restliche Aufgabegut fällt in den Kübel für das Grobgut. Das Aufgabegut könnte auch in den Lufteintritt des Windsichters gelangen. Abgesehen von möglichen Reinigungsarbeiten kommt es zu keinen Anlagen- oder Personenschäden. Das Unterbrechen der Stromversorgung, durch Herausziehen des Netzsteckers, ist eine geplante Not-Ausmassnahme für die Anlage. Das Risiko wird als sehr gering eingestuft.

Massnahmen: Es mussten keine Massnahmen getroffen werden.

## 7 Detail Engineering (Ausführungsplanung)

In den folgenden Kapiteln werden die Auslegung, die Dimensionierung und die Auswahl der einzelnen Komponenten erläutert. Im Anhang 2 befindet sich eine Übersichtszeichnung der Anlage. Das 3D-CAD Modell sowie die Fertigungszeichnungen der Anlage befinden sich auf der beiliegenden DVD.

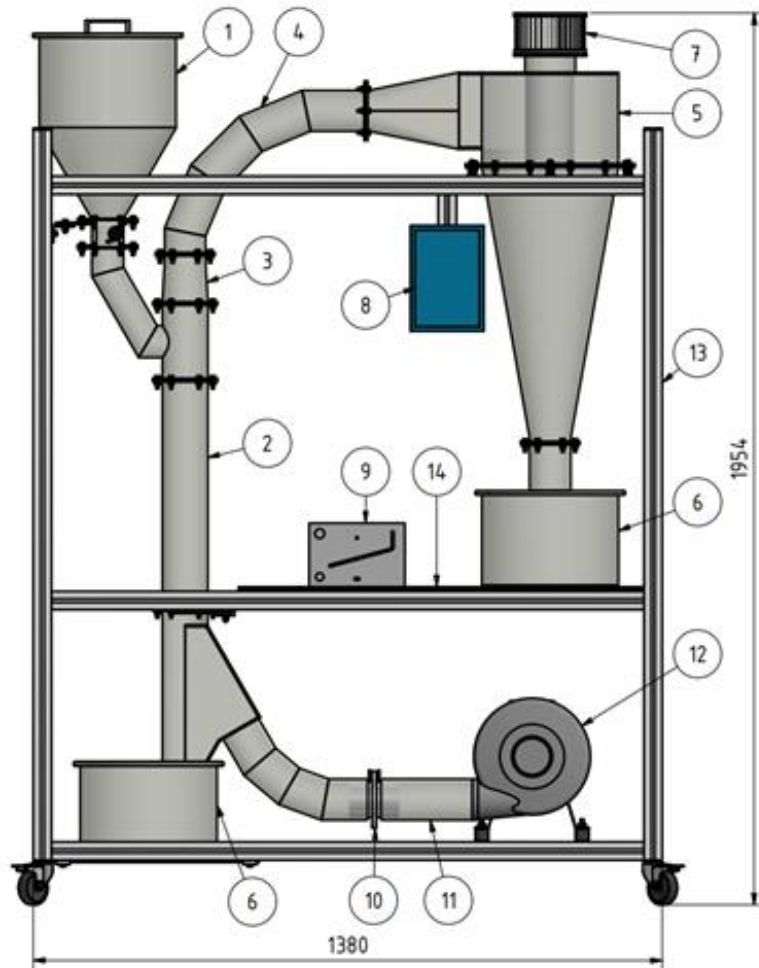


Abbildung 7: Übersicht der kompletten Anlage

Pos.	Bezeichnung
1	Behälter für das Aufgabegut und die Dosiervorrichtung
2	Windsichter
3	Konus
4	Verbindungsstück: Windsichter - Zyklon
5	Zyklon
6	Kübel für das Fein- und Grobgut
7	HEPA-Filter

Pos.	Bezeichnung
8	Frequenzumrichter
9	Manometer
10	Irisblende
11	Verbindungsstück: Ventilator – Windsichter
12	Ventilator
13	Gestell
14	Ablagefläche

## 7.1 Apparate

### 7.1.1 Windsichter

Eines der beiden Herzstücke der Anlage stellt der Windsichter dar. Dieser weist einen Innendurchmesser von 92 mm auf. Der Innendurchmesser bestimmt die theoretisch möglichen Luftgeschwindigkeiten im Sichter und so die Trennkorngröße des Sichters. In der Abbildung 8 ist ein Foto des Windsichters zu sehen. In der Abbildung 9 ist eine Schnittansicht des Windsichters dargestellt.



Abbildung 8: Eigenes Bild des Windsichters

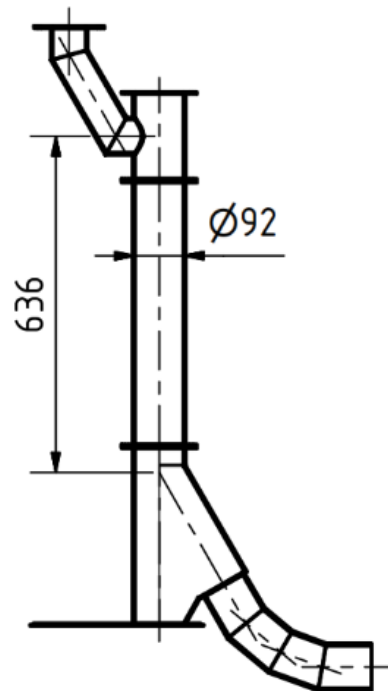


Abbildung 9: Schnittansicht des Windsichters

Der Ventilator kann einen Volumenstrom zwischen circa  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $350 \text{ m}^3/\text{h}$  erzeugen. Dies würde im Windsichter nach der Gleichung (4-9) zu Luftgeschwindigkeiten von  $2.1 \text{ m/s}$  bis  $14.6 \text{ m/s}$  führen (siehe Diagramm 10).

Die Länge zwischen dem Punkt, bei welchem das Aufgabegut in den Windsichter geführt wird und dem Punkt nach dem der Luftstrom in das Sichterrohr geleitet wird, beträgt  $636 \text{ mm}$ . Die Länge des Sichterrohres hat Einfluss auf das Geschwindigkeitsprofil der Strömung, den Druckabfall und die Trennschärfe. Diese Länge wurde so hoch wie möglich gewählt. Dies, um eine möglichst gute Geschwindigkeitsverteilung der Strömung zu erreichen und somit die Trennschärfe zu steigern. Die Länge des Sichterrohres ist durch die maximal mögliche Anlagenhöhe limitiert.

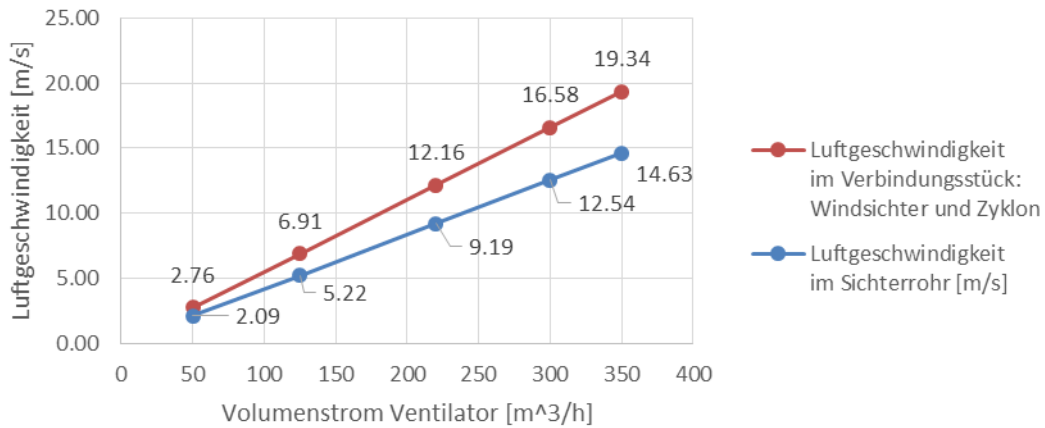


Diagramm 10: Theoretische gemittelte Luftgeschwindigkeiten im Sichterrohr und im Verbindungsstück, zwischen dem Windsichter und dem Zyklon

Der Konus nach dem Windsichter dient dazu, die Luftgeschwindigkeit im Verbindungsstück zum Zyklon zu erhöhen. Die Partikel, welche kleiner der Trennkorngrösse sind, werden theoretisch mit der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der Sinkgeschwindigkeit eines Partikels und der Luftgeschwindigkeit im Windsichter ausgetragen. Obwohl der Durchmesser vom Sichterrohr nur 12 mm grösser ist als der des Verbindungsstücks, steigt die Luftgeschwindigkeit (siehe Diagramm 10) und somit die Geschwindigkeit der Partikel in der Strömung.

Die Form des Windsichters, insbesondere des Luft Eintritts, wurde mithilfe einer Computational Fluid Dynamics (CFD) Analyse optimiert. Die CFD Analysen wurden von Geoffrey Engelbrecht, Angestellter beim IBRE, durchgeführt. Um einen Vergleich aufstellen zu können, wird hier auch die CFD Analyse einer früheren Version des Windsichters vorgestellt.

Für alle Simulationen wurde mit den folgenden Parametern gearbeitet. Für die Partikel wurde Holzstaub mit einer Dichte von  $500 \text{ kg/m}^3$  angenommen. Die Verteilung der Partikel entspricht der Probe aus Diagramm 3. Die in der Analyse angezeigten Partikelgrössen variieren zwischen 0 und  $40 \mu\text{m}$ . Es wurden rein sphärische Partikel angenommen.

Die Abbildung 10 zeigt die Geometrie des Windsichters, Stand Ende November 2015. In dieser Abbildung sind auch die Schnittebenen angezeigt, für welche die Geschwindigkeitsprofile gezeigt werden.

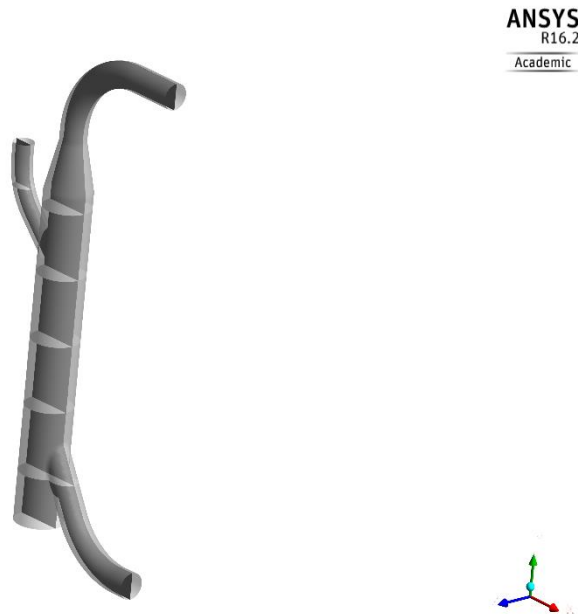


Abbildung 10: CFD Analyse, Stand der Anlage Ende November 2015, Schnittebenen für die Geschwindigkeitsprofile

Abbildung 11 zeigt den Weg der einzelnen Partikel durch den Sichter, Stand der Anlage Ende November 2015, bei einem Volumenstrom von  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ein Teil der Partikel im Grössenbereich von  $12 \mu\text{m}$  fällt hier ins Grobgut und ein Teil wird wie erwartet ausgetragen. Dies liegt daran, dass das Sichterrohr hier einen Innendurchmesser von  $144 \text{ mm}$  aufweist und die Strömung nach dem Luft Eintritt nicht genug Zeit hat sich auszubilden. Der Luft Eintritt weist einen Innendurchmesser von  $80 \text{ mm}$  auf. Des Weiteren fallen auch grössere Partikel (rot) in den Luft Eintritt, was nicht erwünscht ist.

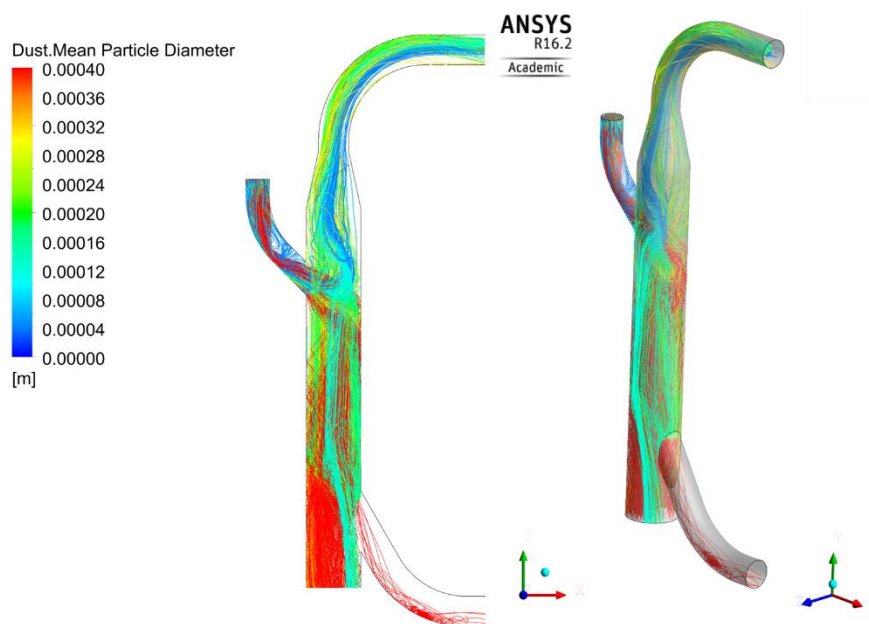


Abbildung 11: CFD Analyse, Stand der Anlage Ende November 2015, Weg der Partikel durch den Sichter bei  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , Partikel: Holzstaub  $0 - 40 \mu\text{m}$ , sphärisch, Dichte  $500 \text{ kg}/\text{m}^3$

In der Abbildung 12 sieht man wie sich die Luftgeschwindigkeit im Sichter entwickelt. Nach dem Luft Eintritt prallt die Strömung an die gegenüberliegende Wand und führt dort der Wand entlang nach oben. Auf der gegenüberliegenden Seite beträgt die Luftgeschwindigkeit zwischen 0 und 1 m/s. Es entsteht eine Art tote Zone. In dieser können die feinen Partikel in das Grobgut sedimentieren. Das Profil entwickelt sich schlecht, weil der Luft Eintritt einen kleineren Durchmesser hat als das Sichterrohr.

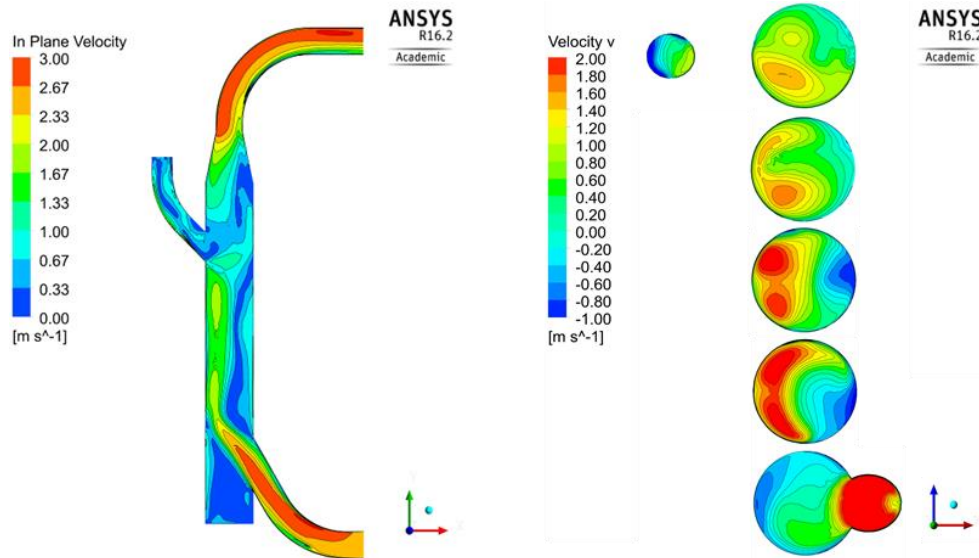


Abbildung 12: CFD Analyse, Stand der Anlage Ende November 2015, Luftgeschwindigkeit bei  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , Partikel: Holzstaub  $0 - 40 \mu\text{m}$ , sphärisch, Dichte  $500 \text{ kg}/\text{m}^3$

Dieses Phänomen wird sogar noch verstärkt, wenn der Volumenstrom und somit die Eintrittsgeschwindigkeit steigt. Dies ist im Vergleich von Abbildung 12 und Abbildung 13 gut ersichtlich.

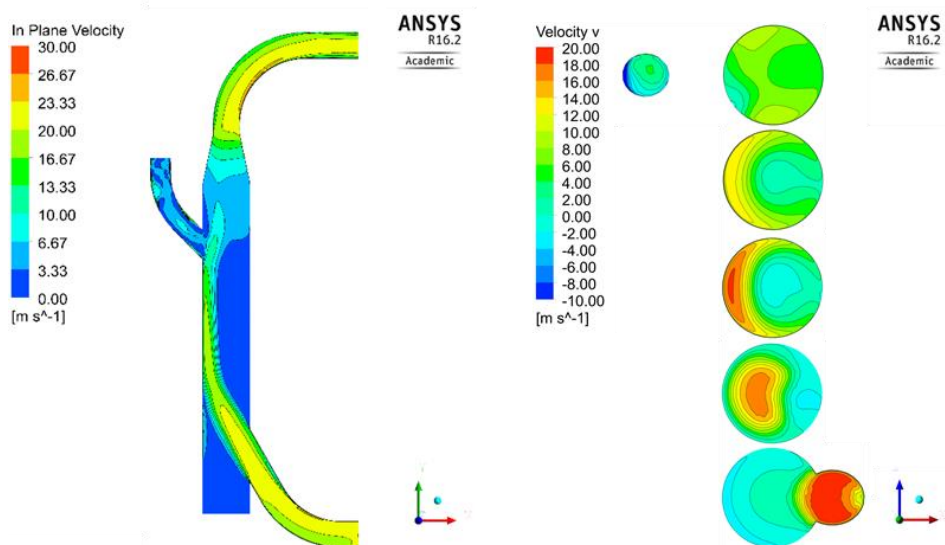


Abbildung 13: CFD Analyse, Stand der Anlage Ende November 2015, Luftgeschwindigkeit bei  $350 \text{ m}^3/\text{h}$ , Partikel: Holzstaub  $0 - 40 \mu\text{m}$ , sphärisch, Dichte  $500 \text{ kg}/\text{m}^3$

Die Ergebnisse der ersten CFD Analyse haben dazu geführt, dass der Sichter überarbeitet wurde. Der Fehlgutaustrag bei kleinen Volumenströmen war nicht akzeptabel und die Strömung konnte sich nicht wie gewünscht ausbilden. Der Innendurchmesser des Sichters wurde auf 92 mm reduziert sowie der Einlauf komplett überarbeitet. Dies wurde gemacht, damit sich die Strömung besser ausbilden kann. Abbildung 14 zeigt den Weg der Partikel in der aktuellen Version des Sichters bei einem Volumenstrom von  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ . Auch hier können grosse Partikel in den Luft Eintritt gelangen. Es sind jedoch weniger als in der Vorgängerversion. Dies liegt daran, dass der Luft Eintritt in den Sichter seitlich herausgezogen wurde und so der Weg für die Partikel länger wird. In dieser Version gibt es auch keinen Fehlgutaustrag von kleinen Partikeln wie beim Vorgänger.

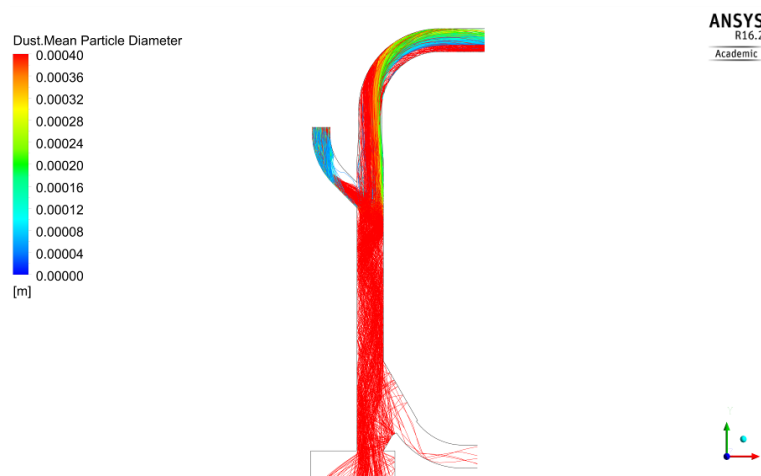


Abbildung 14: CFD Analyse, aktuelle Version des Windsichters, Weg der Partikel durch den Sichter bei  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , Partikel: Holzstaub  $0 - 40 \mu\text{m}$ , sphärisch, Dichte  $500 \text{ kg}/\text{m}^3$

In der Abbildung 15 sieht man den Weg der Partikel bei einem Volumenstrom von  $350 \text{ m}^3/\text{h}$ . Hier werden wie erwartet, aufgrund der höheren Geschwindigkeit im Sichterrohr, die grösseren Partikel komplett ausgetragen.

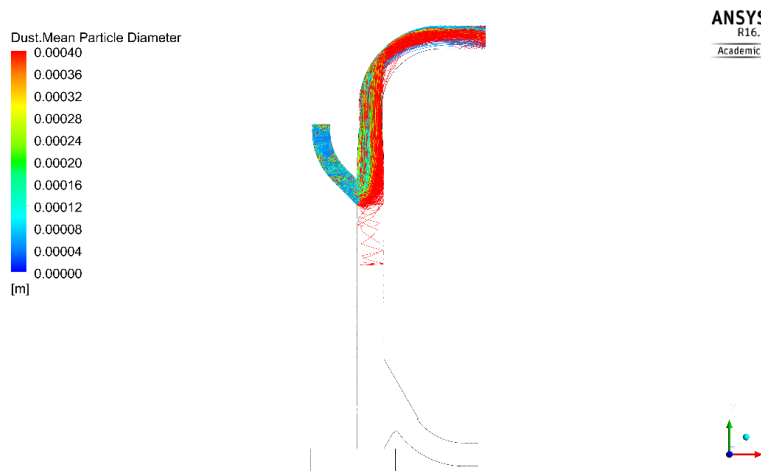


Abbildung 15: CFD Analyse, aktuelle Version des Windsichters, Weg der Partikel durch den Sichter bei  $350 \text{ m}^3/\text{h}$ , Partikel: Holzstaub  $0 - 40 \mu\text{m}$ , sphärisch, Dichte  $500 \text{ kg}/\text{m}^3$

Die Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen wie sich die Luftgeschwindigkeiten im Sichter bei einem Volumenstrom von  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  respektive  $350 \text{ m}^3/\text{h}$  entwickeln. Auch hier ist die Strömungsgeschwindigkeit auf der Seite des Luft Eintritts geringer, jedoch gibt es keine tote Zone und die Strömung kann sich besser ausbilden. Dies liegt hauptsächlich daran, dass der Innendurchmesser des Sichterrohres nur  $12 \text{ mm}$  grösser ist als der des Luft Eintritts.

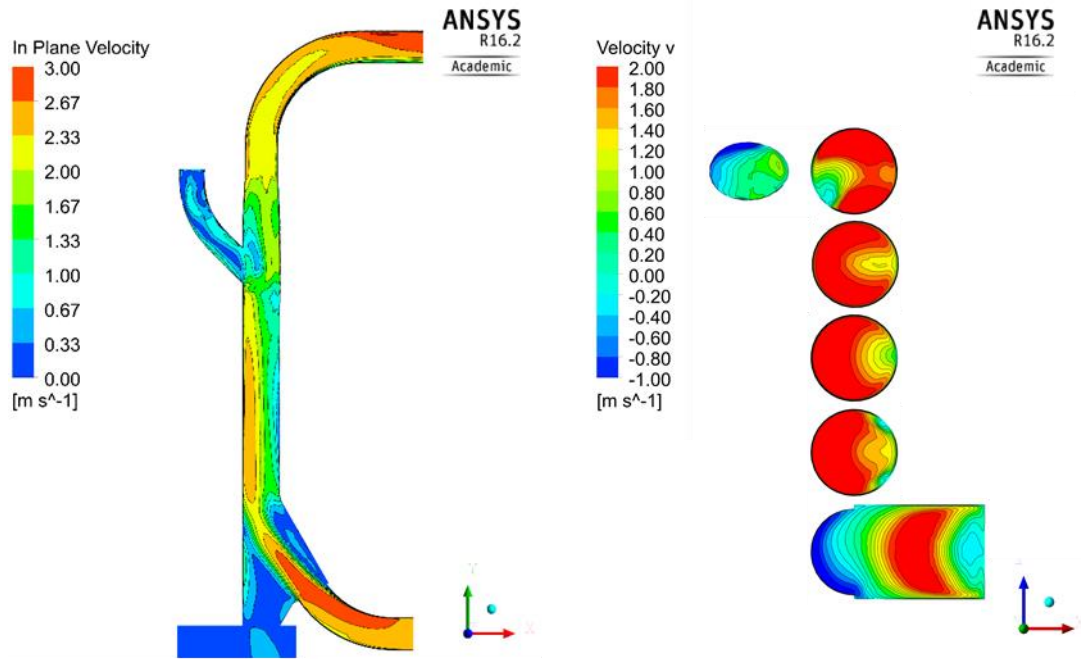


Abbildung 16: CFD Analyse, aktuelle Version des Windsichters, Luftgeschwindigkeit bei  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , Partikel: Holzstaub  $0 - 40 \mu\text{m}$ , sphärisch, Dichte  $500 \text{ kg}/\text{m}^3$

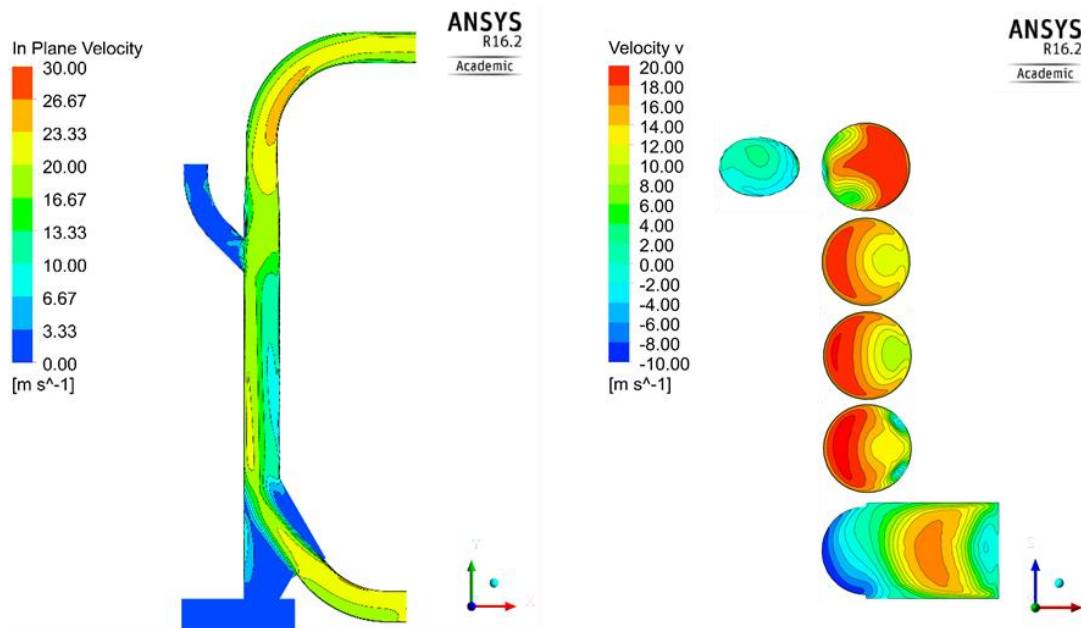
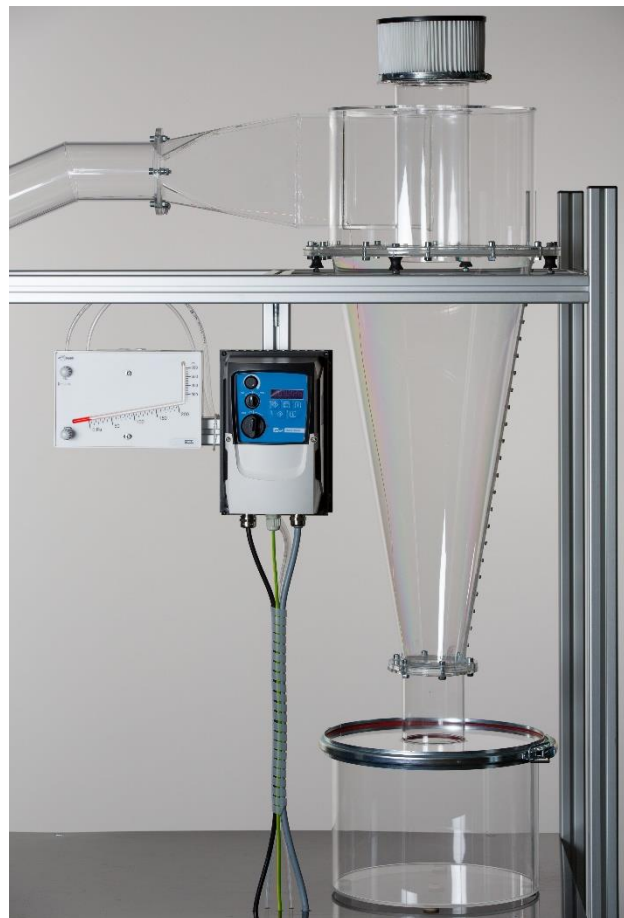


Abbildung 17: CFD Analyse, aktuelle Version des Windsichters, Luftgeschwindigkeit bei  $350 \text{ m}^3/\text{h}$ , Partikel: Holzstaub  $0 - 40 \mu\text{m}$ , sphärisch, Dichte  $500 \text{ kg}/\text{m}^3$

### 7.1.2 Zyklon

Die Auslegung des Zyklons wurde mithilfe des Zyklon Auslegungs-Tool aus dem Projekt P5 durchgeführt. Bei der Auslegung wurde darauf geachtet, dass der Zyklon einen möglichst kleinen Druckverlust verursacht. Dies, weil der Ventilator nur einen statischen Druck von maximal 900 Pa aufbauen kann. Im Anhang 4 ist als Beispiel ein Auszug aus dem Zyklon Auslegungs-Tool.

In der Abbildung 18 ist der Zyklon abgebildet. Als Größenvergleich können die Profile des Gestelles genutzt werden, welche 40 mm breit sind.



*Abbildung 18: Eigenes Bild des Zyklons, zu sehen sind auch der Frequenzumrichter, das Manometer, der HEPA-Filter sowie der Kühler für das Feingut.*

Im Diagramm 11 ist der Druckverlust des Zyklons in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Beladung zu sehen. Mit steigendem Volumenstrom, steigt auch der Druckverlust, den der Zyklon verursacht. Der Druckverlust im Zyklon entsteht hauptsächlich im Tauchrohr. Der Anstieg des Druckverlusts lässt sich durch die höheren Luftgeschwindigkeiten im inneren des Zyklons und so aufgrund höherer Reibungsverluste erklären.

Im Diagramm 11 ist auch zu sehen, dass der Druckverlust mit steigender Beladung abnimmt. Dies lässt sich damit erklären, dass bei steigender Beladung die Wandabscheidung zunimmt und so auch feine Partikel direkt durch Feststoffstrahlen abgeschieden werden. Bei gleichbleibendem Volumenstrom sinkt bei gleichbleibender Beladung der Druckverlust im Abscheideraum und im Tauchrohr.

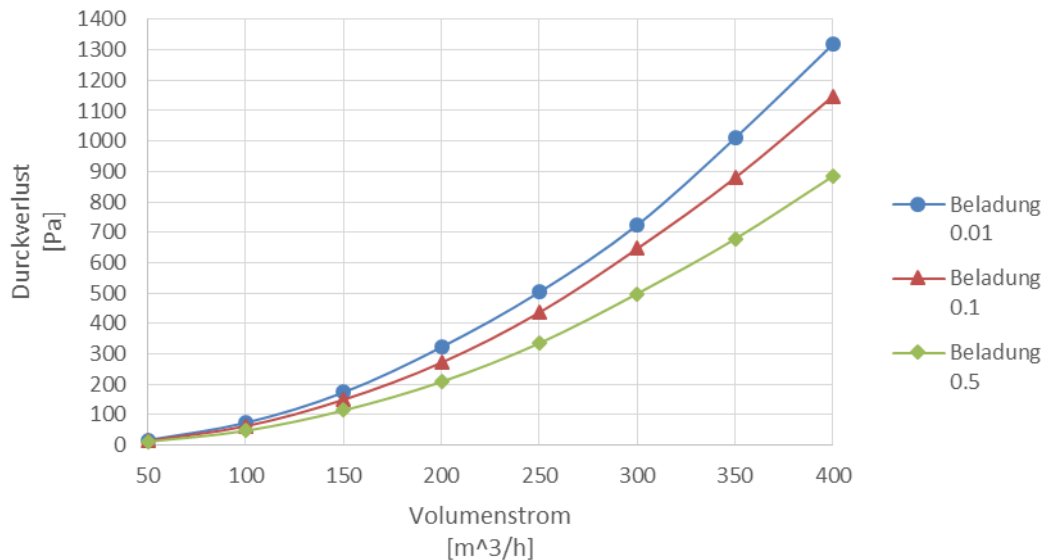


Diagramm 11: Druckverlust des Zyklons in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Beladung

Bei steigendem Volumenstrom steigt die Eintrittsgeschwindigkeit in den Zyklon. Die höheren Geschwindigkeiten haben zur Folge, dass die Grenzpartikelgrößen für die Wandabscheidung und die Abscheidung im inneren Wirbel abnehmen. Dieses Phänomen ist im Diagramm 12 und Diagramm 13 ersichtlich.

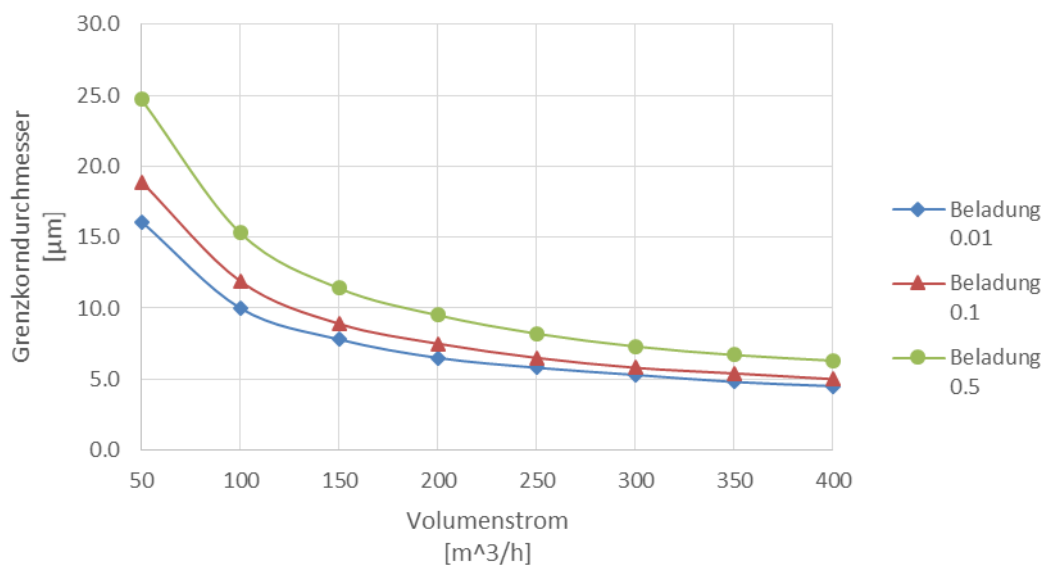


Diagramm 12: Grenzpartikeldurchmesser innerer Wirbel in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Beladung

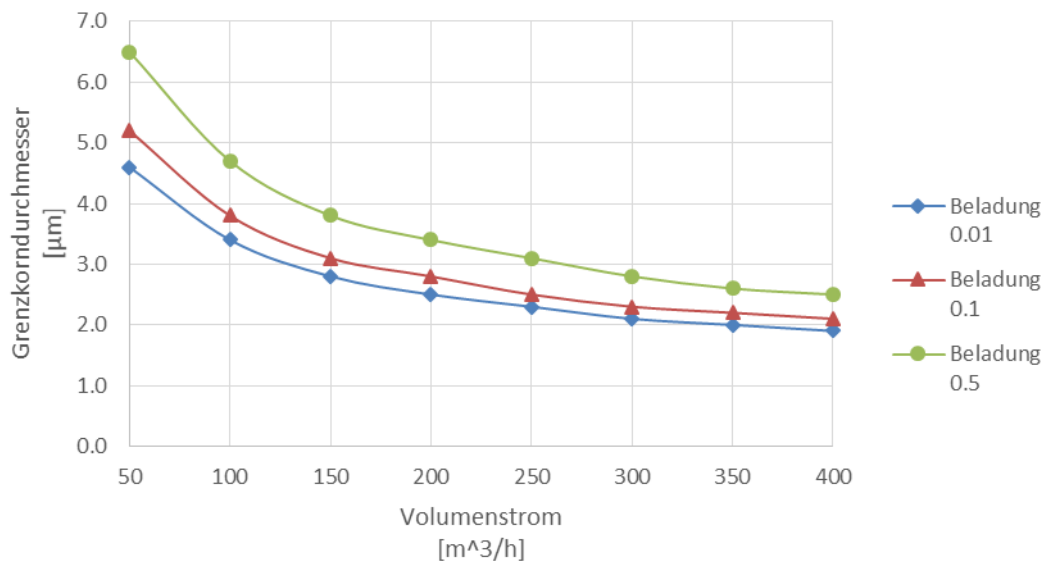


Diagramm 13: Grenzpartikeldurchmesser für die Wandabscheidung in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Beladung

## 7.2 Behälter

### 7.2.1 Behälter für das Aufgabegut und Dosiervorrichtung

Bei der Dimensionierung für den Behälter für das Aufgabegut war die, für die Vorführung im Unterricht, vorgegebene Laufzeit für einen Versuch sowie die maximalen Dimensionen der Anlage entscheidend. Eine Vorführung der Anlage sollte circa 5 Minuten dauern, um einen guten Einblick in die einzelnen Prozesse zu erlauben. Die Abbildung 19 zeigt den Behälter für das Aufgabegut sowie die Dosiervorrichtung. Der Behälter für das Aufgabegut wird mit einer Spanschelle verschlossen.



Abbildung 19: Eigenes Bild des Behälters für das Aufgabegut sowie der Dosiervorrichtung

Durch das Fassungsvermögen des Aufgabegutbehälters  $V_{A,B}$ , den Leervolumenanteil  $\varepsilon_{sch}$  einer Schüttung, der Dichte eines bestimmten Stoffes  $\rho_{P,S}$ , den Volumenstrom des Luftstromes  $\dot{V}_L$ , der Dichte der Luft  $\rho_f$  und der Beladung  $\mu_e$  kann auf die Laufzeit eines Versuches geschlossen werden.

$$t = \frac{V_{A,B} \cdot \rho_{P,S} \cdot (1 - \varepsilon_{sch})}{\dot{V}_L \cdot \rho_f \cdot \mu_e} \quad (7-1)$$

Die folgenden Diagramme zeigen die theoretische Laufzeit von Versuchen mit verschiedenem Aufgabegut. Die Diagramme basieren auf den folgenden Daten:

- $V_{A,B} = 0.019 \text{ m}^3$
- $\varepsilon_{sch} = 0.6$
- $\rho_f = 1.204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $\rho_{P,s,PP} = 910 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{P,s,PET} = 1370 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{P,s,Holz} = 500 \text{ kg/m}^3$

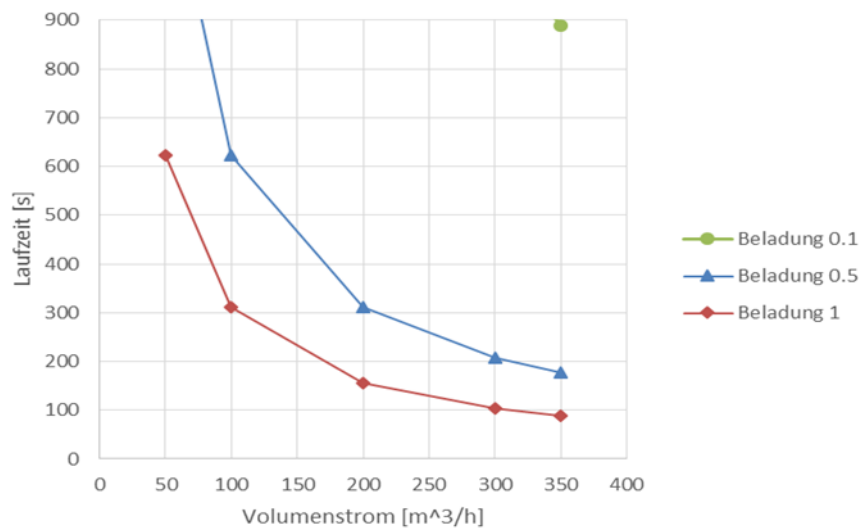


Diagramm 14: Theoretische Laufzeit eines Versuches mit Thermoplastischem Polyester, in Abhängigkeit der Beladung und des Volumenstroms.

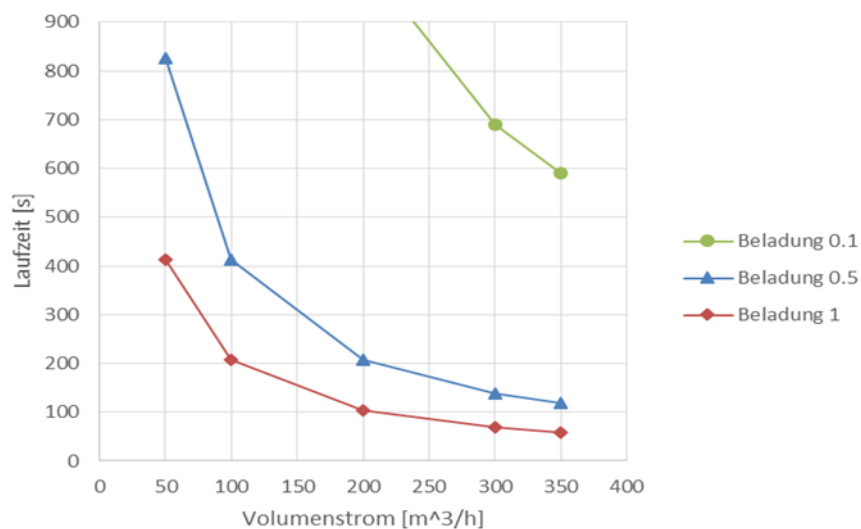


Diagramm 15: Theoretische Laufzeit eines Versuches mit Polypropylen, in Abhängigkeit der Beladung und des Volumenstroms.

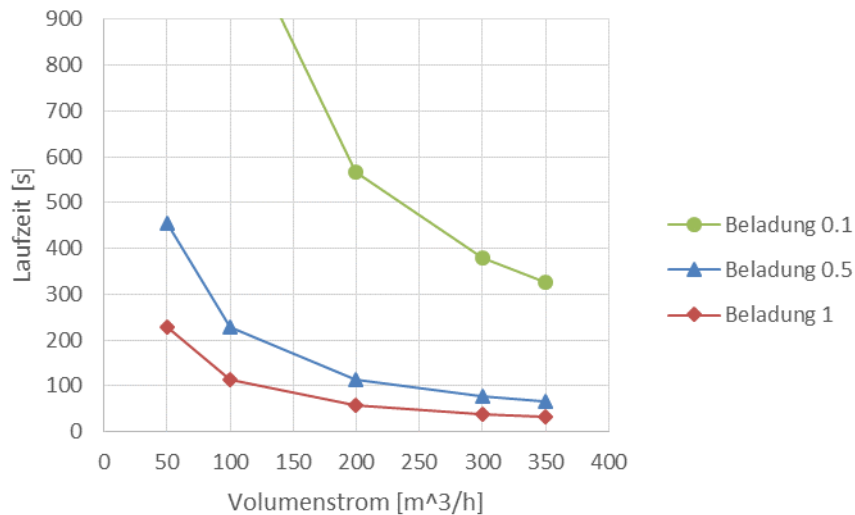


Diagramm 16: Theoretische Laufzeit eines Versuches mit Holz, in Abhängigkeit der Beladung und des Volumenstroms.

Die Diagramme wurden alle bei 900 Sekunden abgeschnitten. Dies entspricht einer Laufzeit von 15 Minuten. Wie erwartet, lässt sich aus den Diagrammen ablesen, dass die Laufzeit mit sinkendem Volumenstrom der Luft steigt.

Da die Versuche circa 5 Minuten laufen sollen, sollte eine Beladung zwischen 0.1 und 0.5 gewählt werden.

Über die Dosiervorrichtung lässt sich der Massenstrom des Aufgabeguts steuern. Die Dosiervorrichtung (siehe Abbildung 20) besteht aus einer einfachen Klappe in einem Rohr. Diese lässt sich über einen Zwischenstück drehen und mit einem Sterngriff in der gewünschten Position fixieren.

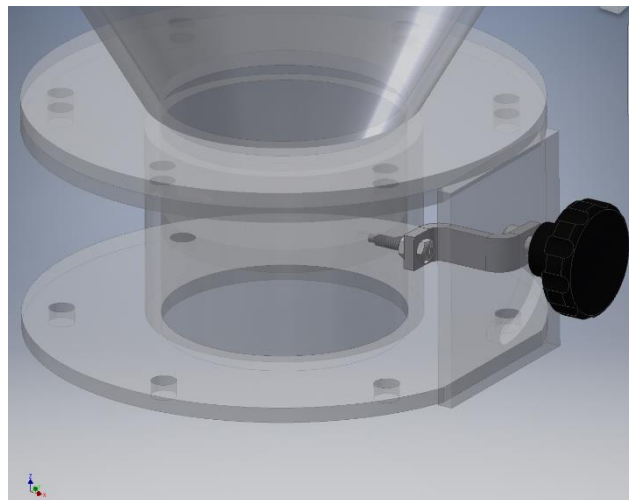


Abbildung 20: Dosiervorrichtung der Anlage

### 7.2.2 Kübel für das Fein- und Grobgut

Die Kübel fassen jeweils circa 13 Liter. Diese werden wie der Behälter für das Aufgabegut mit Spannschellen verschlossen. Wenn die Verteilungsdichte des Aufgabeguts nicht bekannt ist und die Trennung nicht mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit vorausgesagt werden kann, dann sollte der Behälter für das Aufgabegut nur zur Hälfte befüllt werden.

## 7.3 Steuertechnik

### 7.3.1 Frequenzumrichter

Der elektrische Aufbau der Anlage besteht aus dem Ventilator-Motor, einem Frequenzumrichter und dem Netzstecker. Die Abbildung 21 zeigt das Schema, nach welchem die Anlage verdrahtet wurde.

Für den Frequenzumrichter wurde der VersiDrive i 037/E2/IP66 der Firma Peter Electronic gewählt. Dieser kann direkt an das 1 phasige Netz angeschlossen werden und liefert am Ausgang dreiphasig 230V. Zusätzlich weist er eine kleine Bauform auf. Die Schutzart IP66 erlaubt es, den Frequenzumrichter direkt an das Gestell der Anlage anzubringen ohne einen zusätzlichen Schaltschrank installieren zu müssen. Dies erhöht den Benutzerkomfort, da die Anlage über den Frequenzumrichter gesteuert wird.

Um in einem Notfall die Anlage zu stoppen, reicht es, den Netzstecker zu ziehen. Der Motor weist eine geringe Leistung auf und so konnte auf einen Not-Aus-Schalter verzichtet werden.

Weil im Labor, in welchem die Anlage aufgebaut wurde, kein FI Schalter von Typ „B“ zur Verfügung steht, wurde ein zusätzlicher Schutzpotentialausgleich installiert. Mit dieser Sicherheitsmassnahme wird in einem Fehlerfall die Berührungsspannung unter  $50V_{AC}$  gehalten.

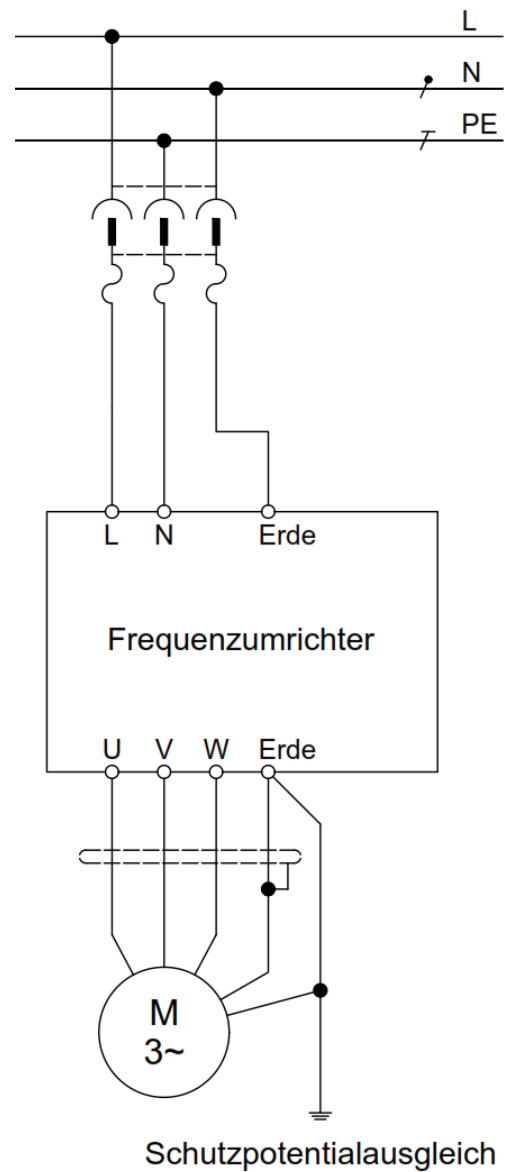


Abbildung 21: Elektroschema

### 7.3.1.1 Steuerung mit dem Frequenzumrichter

In diesem Abschnitt wird die Steuerung kurz erklärt.

1. Mit dem lokalen Netzschalter werden die Anlage und der Frequenzumrichter eingeschaltet.
2. Mit dem Vorwärts-Rückwärts (REV/0/FWD) Wählschalter wird ein Betriebsmodus eingestellt (weiter unten im Detail erklärt).
3. Mit dem lokalen Drehzahlpotentiometer lässt sich die Drehzahl des Ventilators manuell einstellen.
4. Über die Tastatur und die Displayanzeige wird der FU konfiguriert und sein Betrieb überwacht.



Abbildung 22: Bedienung des Frequenzumrichters

Da die Anlage als Vorzeigebjekt und für Versuche genutzt werden soll, wurde auf eine einfache Bedienung geachtet. Die über den Vorwärts-Rückwärts (REV/0/FWD) Wählschalter wählbaren Betriebsmodi wurden folgendermassen konfiguriert:

	Festfrequenz 1	Der Ventilator wird mit einer definierten Festfrequenz betrieben.
	STOPP	Stoppt den Motor.
	Vorwärtslauf	Die Drehzahl des Ventilators kann mit dem lokalen Drehzahlpotentiometer manuell gesteuert werden.

### 7.3.1.2 Frequenzbegrenzung

Die Drehzahlen mit denen der Ventilator betrieben werden kann, sind vom Hersteller festgelegt. Der Bereich liegt zwischen 900 und 3600 U/min. Da die Drehzahl über den Frequenzumrichter gesteuert wird, muss ein bestimmter Frequenzbereich, in welchem ein sicherer Betrieb möglich ist, in der Steuerung des Frequenzumrichters freigeschaltet werden.

Die Drehzahl, welche sich bei einem Asynchronmotor einstellt, wird durch die Polpaarzahl  $p$ , dem Schlupf  $s$  und der Netzfrequenz  $f$  bestimmt. Beim idealen, verlustfreien Leerlauf entspricht die Drehzahl  $n$  der Asynchronmaschine der synchronen Drehzahl  $n_S$ . Diese lässt sich nach [9] wie folgt berechnen:

$$n = n_S = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (7-2)$$

Wird die Asynchronmaschine belastet, so entsteht ein Schlupf. Die Rotorfrequenz  $f_R$  weicht von der Netzfrequenz  $f$  ab. Der Schlupf berechnet sich wie folgt [9]:

$$s = \frac{n_S - n}{n_S} = \frac{f_R}{f} \quad (7-3)$$

Der Ventilator-Motor hat eine Polpaarzahl von 1. Für die Betriebs-Drehzahl des Ventilators ist ein Wert 2800 U/min angegeben. Dies, wenn der Motor in Dreieck geschaltet ist bei einer Netzfrequenz von 50 Hz und 230 V<sub>AC</sub>. Somit lässt sich mit der Gleichung (7-3), ein Schlupf von 6.7% berechnen. Die Gleichungen (7-2) und (7-3) können wie folgt umgestellt werden:

$$f = \frac{p \cdot n}{60 \cdot (1 - s)} \quad (7-4)$$

Setzt man den Schlupf von 6.7%, welcher bei der höheren oder niedrigeren Frequenz nicht konstant bleibt, aber einen guten Richtwert liefert ein, so kann die Frequenz  $f$ , welche der Frequenzumrichter liefern muss, um die minimale und maximale Drehzahl zu erreichen, berechnet werden. Für die minimale Drehzahl von 900 U/min benötigt man demzufolge eine Frequenz  $f$  von rund 16.1 Hz. Für die maximale Drehzahl von 3600 U/min benötigt man eine Frequenz  $f$  von rund 64.3 Hz.

## 7.4 Restliche Komponenten

### 7.4.1 Irisblende und Manometer

Die Irisblende wird dazu genutzt den Luft-Volumenstrom in der Anlage zu regulieren. Misst man den Druckabfall  $\Delta p_m$ , welchen die Irisblende erzeugt, kann man im Diagramm 17 den dazugehörigen Volumenstrom ablesen. Denn Herstellerangaben zu Folge berechnet sich der Volumenstrom  $\dot{V}_L$  in Abhängigkeit des Druckverlusts  $\Delta p_m$  folgendermassen:

$$\dot{V}_L = k \cdot \sqrt{\Delta p_m} \cdot 3.6 \quad (7-5)$$

$k$  ist dabei die auf der Irisblende aufgedruckte Einstellung. Der Druckverlust wird in der Anlage mit einem Schrägrohrmanometer gemessen.

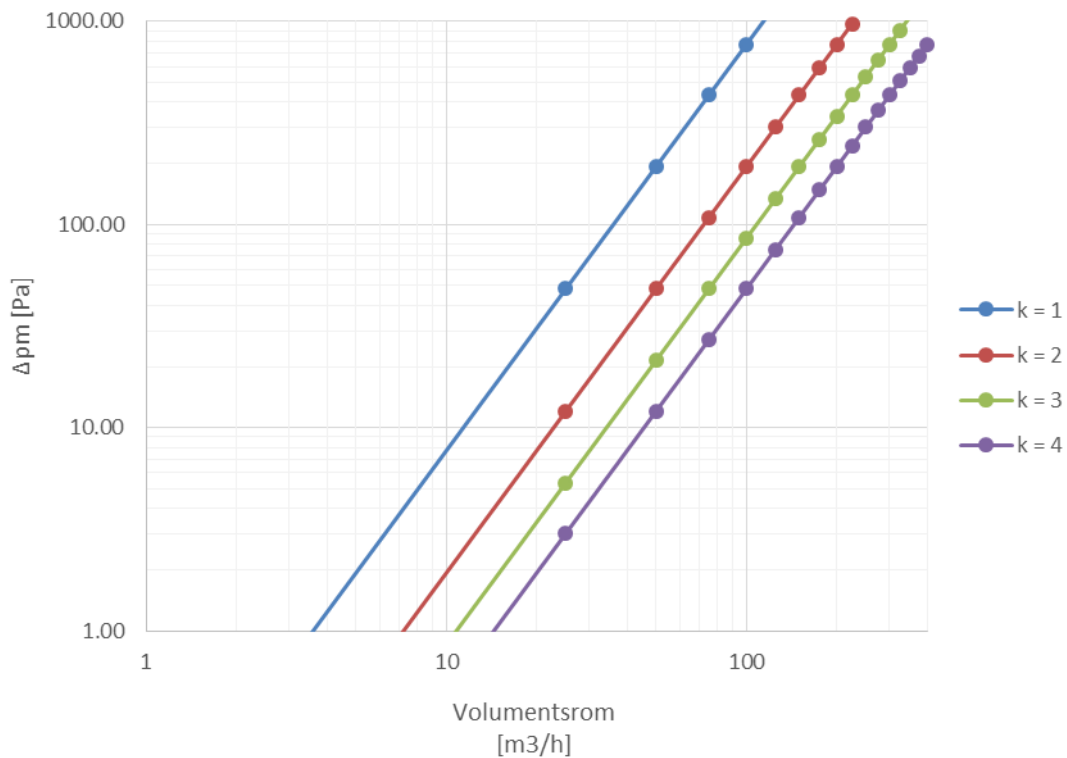


Diagramm 17: Druckverlustdiagramm der Irisblende, in Abhängigkeit des Volumenstroms

### 7.4.2 HEPA-Filter

Der HEPA-Filter ist ein handelsüblicher Staubsauger Filter. Dieser dient dazu den Feinstaub, welchen der Zyklon nicht abscheiden kann, aus der Abluft zu filtern. Der gewählte HEPA-Filter ist das Model NRJB02C-18L der Firma ayce.

### **7.4.3 Verbindungsstück: Windsichter – Zyklon**

Das Verbindungsstück ist wie alle anderen Bauteile aus PMMA gefertigt. Aufgrund der Empfehlung des Herstellers der Kunststoffteile wurde das Verbindungsstück aus einzelnen Segmenten gefertigt und nicht gebogen.

### **7.4.4 Dichtungen**

Die Dichtungen wurden aus Silikonplatten zugeschnitten. Die Silikonplatten sind 0.5 mm dünn und transparent. Der Temperaturbereich, für welchen die Dichtungen eingesetzt werden können, sind  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $+180^{\circ}\text{C}$ .

### **7.4.5 Gestell**

Für das Gestell wurden Aluminium Profile der Firma ZIHLMANN Profilvertechnik AG gewählt. Das Unternehmen bietet Profile und Zubehör, welche sich in einem Baukastenprinzip kombinieren lassen. Der Vorteil gegenüber einer geschweissten Konstruktion ist, dass sich die einzelnen Profile nach dem Zusammenbau verschieben lassen und das Gestell beliebig ausgebaut werden kann. In die Profile können Nutsteine mit Innengewinden verschiedener Größen nachträglich eingesetzt werden. Dies erlaubt es, auch wenn das Gestell zusammengebaut wurde, noch zusätzliche Elemente anzubringen oder weitere Anlageteile zu montieren.

## 7.5 3D-Anlageplanung

Im folgenden Abschnitt wird aufgezeigt wie sich die Anlage vom ersten Entwurf bis zum finalen Design entwickelt hat.

Die 3D Anlageentwurfsplanung wurde mit der Software Autodesk® Inventor® 2016 durchgeführt.

In der Abbildung 23 ist der erste Entwurf der Anlage zu sehen. Zu diesem Zeitpunkt war das Sichten von Holzstaub noch eine Anforderung. Zu sehen ist der Windsichter, welcher kleine Luftgeschwindigkeiten im Sichterrohr und so die Sichtung von feinem Holzstaub erlaubt. Für den Ventilator wurde ein kleiner Axialventilator gewählt, welcher die Luft in einem geschlossenen Kreislauf durch die Anlage zwingt.

Die Abbildung 24 zeigt das Design der Anlage Ende November. Aufgrund der hohen Anforderungen an den Ventilator und aufwändiger Auslegung wurde die Idee vom geschlossenen Luftkreis aufgegeben.

Ein Ventilator wurde ausgewählt und es wurde die Position der ersten Komponenten, wie zum Beispiel der Frequenzumrichter und die Irisblende geplant.

Zu dieser Zeit war für das Gestell eine geschweisste Konstruktion aus L-Profilen vorgesehen. Dies aufgrund der Robustheit der Anlage.

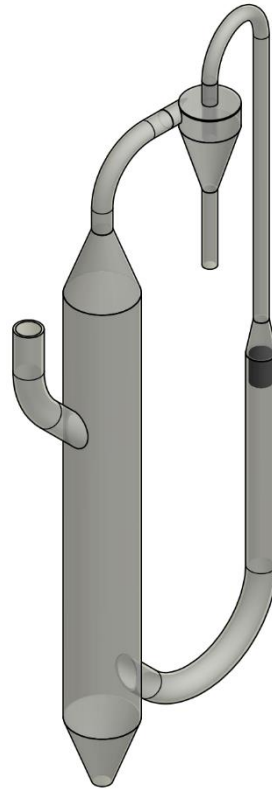


Abbildung 23: Erster Entwurf der Anlage - Mitte Oktober 2015



Abbildung 24: Gerendertes Bild der Anlage, Ende November 2015

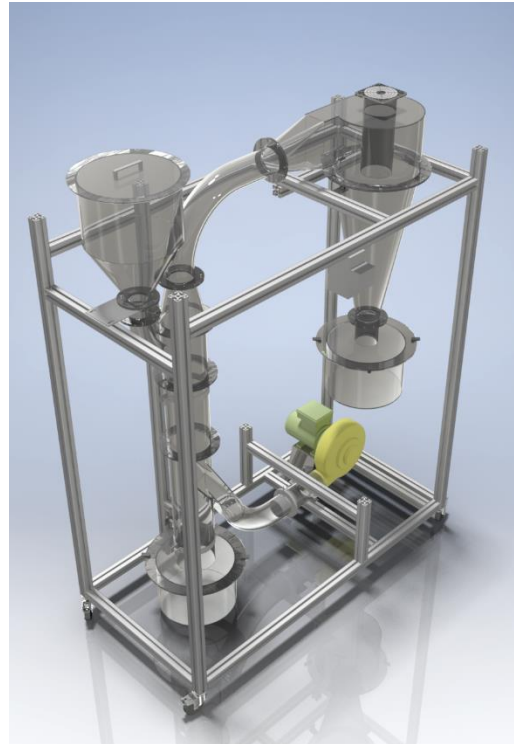
Abbildung 25 zeigt das Design der Anlage Mitte Dezember. Der Behälter für das Aufgabegut sowie die Dosiervorrichtung wurden design und ausgelegt. Dies hat dazu geführt, dass die Kübel für das Grob- und Feingut angepasst wurden. Bei der Auslegung wurde darauf geachtet, dass der Behälter für das Aufgabegut genug Material fassen kann, um einen Versuch 5 Minuten lang zu betreiben.

In der Abbildung 25 ist auch ersichtlich, dass die Anzahl der Flanschverbindungen gestiegen ist. Diese wurden aus zwei Gründen eingeführt. Zum einen erleichtert dies die Reinigungsarbeiten der Anlage, da einfach ein Teil herausgenommen werden kann und so der Zugang zum Grossteil der Anlage gewährleistet ist. Zum anderen soll dies den Schaden begrenzen, falls ein Teil der Anlage aufgrund von Beschädigung oder Abnutzung ausgewechselt werden muss.

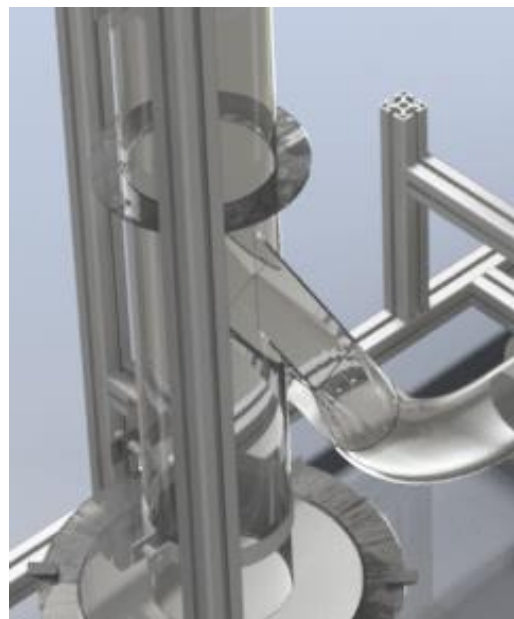
Das Übergangsstück von rund zu eckig vor dem Zyklon wurde verlängert, um der Strömung genügend Strecke zur Verfügung zu stellen um sich auszubilden.

Das Gestell der Anlage wurde auch überarbeitet. Für dieses wurden Aluminium Profile gewählt.

Basierend auf CFD Analysen wurde versucht den Luft Eintritt in den Sichter zu optimieren (siehe Abbildung 26).



*Abbildung 25: Gerendertes Bild der Anlage, Mitte Dezember 2015*



*Abbildung 26: Luft Eintritt in den Windsichter, Mitte Dezember 2015*

In der Abbildung 27 ist die Anlage mit einem weiter optimierten Luft Eintritt in den Sichter zu sehen. Die Optimierung des Einlaufs hat auch dazu geführt, dass der Innendurchmesser des Sichterrohres reduziert wurde. Die Reduzierung führt dazu, dass sich das Strömungsprofil besser ausbilden kann.

Die Anlage wurde noch mit Auflagen für die beiden Kübel ergänzt. Diese waren nötig, um das Gewicht des Grob- und des Feinguts zu tragen.

Ein weiteres Detail, welches dazugekommen ist, ist der zylindrische HEPA Filter, welcher auf das Tauchrohr des Zyklons aufgesetzt werden kann. Dieser filtert die Partikel, welche nicht abgetrennt werden konnten, aus dem Reingas des Zyklons.

Die Abbildung 28 zeigt das finale Design der Anlage. Die Auflage für den Kübel für das Feingut wurde verlängert, um als Ablagefläche während der Arbeit mit der Anlage zu dienen.

Die verlängerten Längsprofile haben zusätzlich noch die Möglichkeit geboten ein Querprofil einzusetzen, um eine zusätzliche Befestigung für den Sichter zu bieten.

Zu sehen ist auch, dass die Rohrbögen segmentiert ausgeführt werden mussten. Diese Änderung wurde aufgrund der Empfehlung des Herstellers durchgeführt.

Mithilfe des Models für den Bediener konnte die Position des Frequenzumrichters, welcher das hauptsächliche Bedienelement der Anlage ist, optimal gewählt werden.



Abbildung 27: Gerendertes Bild der Anlage, Mitte Januar 2016

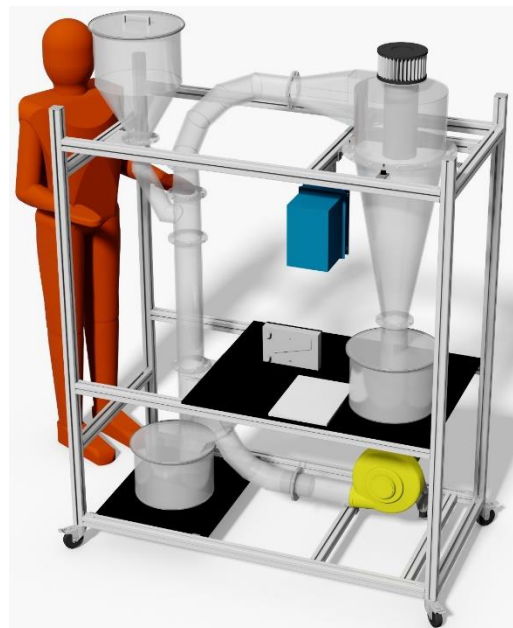


Abbildung 28: Gerendertes Bild der Anlage, Mitte Februar 2016

## 8 Ausführung & Montage

Die Hauptapparate, Kübel und Rohrleitungen wurden alle aus transparentem Kunststoff von der Firma Kunststoffpark GmbH hergestellt. Für die Herstellung wurden Rohre und Platten aus PMMA mechanisch bearbeitet und verklebt. Die konischen Bauteile wurden aus Kunststoffplatten gebogen, verklebt und vernietet.

Zu Beginn der Montage wurde das Gestell, welches aus Zihlmann Profilen besteht, zusammengebaut. Der Vorteil dieser Profile ist eine modulare und einfache Bauweise. Somit ist eine einfache Montage möglich. Das Gestell konnte problemlos von einer Person zusammengebaut werden.

Der Ventilator wurde mit Winkeln am Gestell befestigt und wurde durch Schwingungsdämpfer vom Gestell mechanisch entkoppelt. Die Schwingungsdämpfer wurden mit dem Motor zusammen geliefert und dienen dazu, die Vibrationen des Ventilators zu kompensieren.

Der Frequenzumrichter wurde über eine Aluminiumplatte mit dem Gestell verschraubt. Bei der Platzierung wurde auf einfache Zugänglichkeit geachtet. Zudem wurde darauf geachtet, genug Platz über dem Frequenzumrichter freizuhalten, damit es zu keinem Hitzestau kommt.

Als nächster Schritt folgte die Montage der Ablagefläche. In diese wurden nach der Montage noch Löcher für die Kabeldurchführungen gebohrt. Die Kanten der Bohrungen wurden beidseitig gebrochen, damit es keine scharfen Kanten gibt, welche die Isolation der Kabel verletzen könnten.

Als nächstes wurden der Frequenzumrichter und der Ventilator verdrahtet. Für das Motorenkabel wurde ein geschirmtes Kabel verwendet. Durch das geschirmte Kabel werden Störungen in angrenzenden Anlagen, aufgrund hochfrequenter Schaltvorgänge im Frequenzumrichter, vermieden.

Zu guter Letzt wurden die Bauteile aus Kunststoff und die dazugehörigen Unterstüztungen installiert. Der Zyklon ist ebenfalls über Schwingungsdämpfer vom Gestell entkoppelt worden und liegt auf diesem auf. Die Ablagefläche, auf welchem der Kübel für das Feingut liegt, dient als zusätzliche Stütze für den Zyklon.

Der Behälter für das Aufgabegut ist über einen Winkel und eine Aluminiumplatte mit dem Gestell verbunden. Dies dient dazu, das Gewicht des Aufgabeguts zu tragen, wenn die Anlage befüllt wird.

Der Windsichter wird auf der Flanschverbindung direkt nach dem Luft Eintritt gestützt. Zudem dient die Auflagefläche für den Kübel für das Grobgut als Stütze für den Windsichter.

## 9 Inbetriebnahme und Funktionstest

Vor der ersten Inbetriebnahme wurde der Aufbau der Anlage noch ein letztes Mal geprüft. Eine Sichtkontrolle aller Bauteile wurde durchgeführt. Die Verschraubungen und die Verschlüsse der Kübel mit den Spannschellen wurden geprüft. Die erste Inbetriebnahme der Anlage wurde unter Aufsicht der Vertretung des Sicherheitsverantwortlichen durchgeführt.

Die erste Inbetriebnahme wurde ohne Aufgabegut durchgeführt. In diesem Test wurde mit dem Potentiometer des Frequenzumrichters die Drehzahl des Ventilators von minimaler bis zur maximalen Drehzahl abgefahren.

Bei diesem ersten Test wurde überprüft, ob die Anlage Leckagen aufweist und irgendwo spürbar Luft austritt. Es wurde geprüft, ob das Manometer richtig mit der Irisblende verbunden wurde.

In diesem Testlauf sind keine unerwarteten Ereignisse aufgetreten. Einzig der HEPA-Filter, welcher nur provisorisch befestigt war, musste besser fixiert werden, da er von der Luftströmung weggeblasen wurde.

Die Wirbelströmung am Tauchrohrausgang ist deutlich spürbar. Wenn man die Hand über dem Tauchrohr hält, spürt man, dass im Zentrum des Tauchrohrs fast keine Strömung herrscht und dass sich diese an den Wänden des Tauchrohrs spiralförmig nach oben bewegt.

Die provisorische Fixierung des HEPA-Filters wurde durch eine Rohrschelle ersetzt. Der HEPA-Filter ist so gut fixiert und kann nicht mehr von der Strömung weggeblasen werden.

Für den Funktionstest wurde dann über die Dosiervorrichtung das Aufgabegut in den Windsichter zugeführt. Mit dem Frequenzumrichter wurde dann die Luftgeschwindigkeit im Windsichter geregelt und die Auswirkung auf die Trennung beobachtet.

Beim Funktionstest ist aufgefallen, dass die Dosiervorrichtung nicht gut genug durchdacht wurde. Aufgrund des Gewichts des Aufgabeguts kann dieses ab einem gewissen Füllstand des Aufgabegutbehälters nicht mehr geöffnet werden. Zudem lässt die Konstruktion keine genaue Dosierung des Aufgabeguts zu.

Weitere Tests und Messungen wurden aus zeitlichen Gründen nicht mehr durchgeführt.

## 10 Kritische Würdigung

In diesem Kapitel wird die Erreichung der Projektziele diskutiert.

- Auslegung und Bau eines Windsichters mit nachgeschaltetem Zyklon
  - Transportabel
  - Alle Hilfs-Aggregate (z.B. Ventilator, Steuerung) fest installiert
  - Windsichter und Zyklon transparent
  - Steuerbarer Volumenstrom

Die Anlage wurde erfolgreich ausgelegt und gebaut. Die Anlage steht auf feststellbaren Rollen und lässt sich in den gewünschten Unterrichtsraum schieben. Die Dimensionen der Anlage wurden so gewählt, dass sie durch Türen und in einen Warenlift passt.

Alle Hilfs-Aggregate sind fest installiert. Es wird lediglich ein Verlängerungskabel benötigt, um die Anlage zu betreiben.

Der Windsichter und der Zyklon sind aus transparentem Kunststoff gefertigt. Das erlaubt einen Einblick in die Trennprozesse. Die Rohrleitungen und Kübel der Anlage wurden auch aus transparentem Kunststoff gefertigt. Das erlaubt die Transportprozesse zu beobachten und der Füllstand der Kübel ist direkt ersichtlich.

Der Luft Volumenstrom in der Anlage ist über den Frequenzumrichter und über die Irisblende steuerbar. Damit lässt sich der Trennkorndurchmesser für die Trennung einstellen.

- Auswahl des Aufgabeguts

Als Aufgabe für die Vorführung im Unterricht wurde Kunststoffgranulat aus Polypropylen (PP) ausgewählt. Weil PP weicher ist als PMMA, verkratzt die Anlage nicht von innen. Das Kunststoffgranulat weist eine kugelähnliche Form auf. Dies erlaubt eine Berechnung der Sinkgeschwindigkeit der Partikel.

- Messungen vorbereiten und durchführen:
  - Gasgeschwindigkeit im Windsichter
  - Druckverluste für Windsichter und Zyklon

Die Luftgeschwindigkeit im Windsichter kann über den Druckabfall in der Irisblende berechnet werden.

Es wurden keine Messpunkte und Messgeräte für die Druckverlustmessungen über dem Zyklon und den Windsichter installiert. Auf dies wurde hauptsächlich wegen der bereits hohen Kosten der Anlage verzichtet.

## 11 Ausblick

Die Anlage steht für das Modul Verfahrenstechnik zur Verfügung. Die erste Vorführung im Unterricht wird kurz nach der Abgabe der Arbeit stattfinden. Zudem bietet die Anlage Potential für Laborübungen und Folgeprojekte.

In folgenden Projekten könnte die Anlage schrittweise ausgebaut und verbessert werden. In erster Linie sollte die Dosiervorrichtung für das Aufgabegut ersetzt werden. Die jetzige Konstruktion ist nicht zuverlässig. Der Aufgabegutbehälter darf im Moment nur zur Hälfte befüllt werden und die Dosiervorrichtung lässt keine präzise Steuerung des Massenstroms vom Aufgabegut zu. Die momentane Dosiervorrichtung könnte durch ein Kugelhahn Ventil oder einen Schwingförderer ersetzt werden.

Der einzige Messpunkt an der Anlage ist zurzeit die Irisblende. Mit einem Manometer lässt sich der Druckverlust über der Irisblende messen und daraus der Volumenstrom berechnen. Es wäre interessant zusätzliche Messpunkte zu planen und zu installieren. Es wäre spannend den Druckverlust über die einzelnen Apparate messen zu können. Besonders die Messung des Druckverlusts über dem Zyklon wäre interessant, um das Auslegungstool zu verifizieren.

Ein weiteres Projekt könnten die Planung und der Bau eines Zick-Zack-Windsichters sein. Dieser müsste so dimensioniert werden, dass er gegen den jetzigen Windsichter einfach austauschbar ist. Mit dem Zick-Zack-Windsichter könnte man den Einfluss der Form des Sichters auf die Trennung von verschiedenen Stoffen prüfen. Beispielsweise Partikel, welche zur Agglomeration neigen, könnten vielleicht besser mit einem Zick-Zack-Windsichter klassiert werden.

Eine mögliche Laborübung wäre das Aufnehmen der Anlagekennlinie, da sich aus dem Schnittpunkt der Anlage- und Ventilator-kennlinie der Betriebspunkt des Ventilators einstellt. So könnte das Verhalten der Anlage vorhergesagt und mit Messungen verifiziert werden.

Eine weitere Laborübung wäre das Bestimmen der Verteilungsdichten des Aufgabeguts und der Fraktionen nachdem dieses mit der Anlage getrennt wurde. In einem ersten Schritt würden die Studierenden die Verteilungsdichte für das Aufgabegut bestimmen. Nach der Sichtung und Abscheidung im Zyklon kann die Verteilungsdichte für das Grob- und Feingut bestimmt werden. Mit diesen kann dann auf den Trenngrad der einzelnen Apparate geschlossen werden.

Ein bereits festgelegter Einsatzzweck der Anlage ist die Sichtung von Holzstaub. Anhand dieser Versuche wird vielleicht eine grössere Anlage gebaut.

## 12 Fazit

Im Folgenden ein kurzes persönliches Fazit.

Die Auslegung einer kompletten Anlage war sehr komplex und anspruchsvoll. Die Bearbeitung dieser Arbeit hat mir in vielerlei Hinsicht die Augen geöffnet und mir viel Erfahrung gebracht.

Mir wurde klar, wieso in vielen Unternehmen sehr viel Zeit und Geld in Lieferantenaudits investiert wird. Die Zusammenarbeit mit gewissen Lieferanten, obwohl zu Letzt erfolgreich, war zeitweise sehr anstrengend und hat viel mehr Zeit in Anspruch genommen als anfangs erwartet. Ich habe gelernt, menschliches Versagen als Risiko in der Projektplanung zu berücksichtigen, sowie die Auswirkungen so früh wie möglich zu evaluieren und Gegenmassnahmen vorzubereiten.

Die Probleme, welche sich ereignet haben, reichen von einfachem Vergessen von Bestellungen bis zu Produktionsfehlern gewisser Komponenten. Die Produktionsfehler konnten alle vor Ort beim Zusammenbau behoben werden oder es konnten schnell Ersatzbauteile besorgt werden.

Bei der Planung der Projektarbeit wurde nicht berücksichtigt, dass die Bearbeitung von Offerten Anfragen viel Zeit in Anspruch nehmen kann. Zudem ist eine Offerte noch lange keine Garantie dafür, dass die Arbeit im gewünschten Zeitraum durchgeführt werden kann.

Müsste ich diese Arbeit noch einmal wiederholen würde ich diese in zwei Semestern durchführen. Der zeitliche Aufwand wäre ungefähr derselbe, es würde aber die Problematik der Liefer- und Herstellungszeiten entschärfen. Die Auslegung, Planung, das Einholen von Offerten und die ersten Bestellungen könnten dann im ersten Semester durchgeführt werden. Im zweiten könnte dann der Zusammenbau und Funktionstest der Anlage stattfinden. So würde genügend Zeit bleiben, mögliche Probleme und Fehlkonstruktionen zu verbessern. Des Weiteren würde genügend Zeit bleiben, um Messungen durchzuführen und die Anlage besser kennenzulernen.

Schlussendlich hat mir die Arbeit Freude bereitet. Ich schätze es sehr, dass ich die Möglichkeit hatte, mein Wissen in der Verfahrenstechnik auszubauen und dieses in die Tat umzusetzen. Es war sehr aufschlussreich, das Projekt vom ersten Entwurf bis zur fertigen Anlage zu betreuen. Entscheidungen, welche ich während der Planung und Konstruktion getroffen habe, konnte ich beim Zusammensetzen der Anlage direkt spüren und so Erfahrung für die Zukunft sammeln.

## **13 Ehrlichkeitserklärung**

Mit der nachfolgenden Unterschrift bestätigt der Projektverantwortliche, dass die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig erarbeitet und geschrieben wurde. Es wurden nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Zitate oder paraphrasierte Stellen aus anderen Werken sind unter Angaben der Quellen kenntlich gemacht.

Darko Cvetkovic

Projektleiter

---

Ort/Datum/Unterschrift

## 14 Verzeichnisse

### 14.1 Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

#### 14.1.1 Lateinische Symbole

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$A$	m <sup>2</sup>	Fläche
$A_A$	m <sup>2</sup>	Angeströmte Fläche
$Ar$	-	ARCHIMEDES-Zahl
$d_p$	m	Partikeldurchmesser
$d^*$	m	Grenzdurchmesser innerer Wirbel
$d_e^*$	m	Grenzdurchmesser Wandabscheidung
$D$	-	Parameter in der Trenngradkurve
$f$	Hz	Frequenz
$f_S$	-	Feingutanteil nach dem Sichter
$f_Z$	-	Feingutanteil nach dem Zyklon
$F_A$	N	Auftriebskraft
$F_G$	N	Gewichtskraft
$F_S$	N	Widerstands- oder Schleppkraft
$g$	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
$g_S$	-	Grobgutanteil nach dem Sichter
$g_Z$	-	Grobgutanteil nach dem Zyklon
$k$	-	Auf der Irisblende aufgedruckte Einstellung
$n$	1/s	Drehzahl
$n_S$	1/s	Synchrone Drehzahl
$m_A$	kg	Masse des Aufgabeguts
$m_f$	kg	Masse Fluid
$m_s$	kg	Masse Feststoff
$\dot{m}_A$	kg/s	Massenstrom des Aufgabeguts
$\dot{m}_G$	kg/s	Massenstrom des Grobgutes aus dem Sichter
$\dot{m}_S$	kg/s	Massenstrom des Feingutes aus dem Sichter
$p$	-	Polpaarzahl
$\Delta p_{ges}$	Pa	Statischer Druckverlust
$\Delta p_m$	Pa	Druckverlust der Irisblende
$q_A(x)$	-	Verteilungsdichte des Aufgabeguts

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$q_F(x)$	-	Verteilungsdichte des Feingutes nach dem Zyklon
$q_G(x)$	-	Verteilungsdichte des Grobgutes nach dem Sichter
$q_R(x)$	-	Verteilungsdichte des Staubes im HEPA-Filter
$q_S(x)$	-	Verteilungsdichte nach dem Sichter (Feingut-Sichter)
$Re_P$	-	REYNOLDS-Zahl eines Partikels
$s$	-	Schlupf
$t$	s	Zeit
$T(x)$	-	Trenngrad
$\bar{v}$	m/s	Gemittelte Geschwindigkeit
$v_P$	m/s	Geschwindigkeit eines Partikels
$V_{A,B}$	m <sup>3</sup>	Volumen des Behälters für das Aufgabegut
$V_P$	m <sup>3</sup>	Volumens eines Partikels
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom
$\dot{V}_L$	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom der Luft

### 14.1.2 Griechische Symbole

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$\varepsilon_{sch}$	-	Leervolumenanteil einer Schüttung
$\eta_e$	-	Abscheidegrad durch Überschreiten der Grenzbeladung
$\eta_f$	Pa s	Dynamische Viskosität
$\eta_{ges}$	-	Gesamtabscheidegrad
$\eta_i$	-	Abscheidegrad im inneren Wirbel
$\zeta_P$	-	Widerstandsbeiwert
$\mu_e$	-	Eintrittsstaubbeladung
$\mu_G$	-	Grenzbeladung
$\rho_f$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte eines Fluides
$\rho_{P,S}$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte eines Partikels
$\nu_g$	m <sup>2</sup> /s	Kinematische Viskosität

## 14.2 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
CAD	Computer-aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen

## 14.3 Lieferantenverzeichnis

### **Amsler & Frey AG**

Lieferant für: Kunststoffplatten für Ablageflächen  
Adresse: Amsler & Frey AG  
Feldstrasse 26  
5107 Schinznach-Dorf  
Homepage: [www.amsler-frey.ch](http://www.amsler-frey.ch)  
E-Mail: [info@amsler-frey.ch](mailto:info@amsler-frey.ch)

### **Zihlmann Profiltechnik AG**

Lieferant für: Profile für das Gestell  
Adresse: Zihlmann Profiltechnik AG  
Grundstrasse 3  
5236 Würenlos  
Homepage: [www.zsb.ch](http://www.zsb.ch)  
E-Mail: [verkauf@zsb.ch](mailto:verkauf@zsb.ch)

### **Kubo Tech AG**

Lieferant für: Dichtungen  
Adresse: Kubo Tech AG  
Im Langhag 5  
8307 Effretikon  
Homepage: [www.kubo.ch](http://www.kubo.ch)  
E-Mail: [info@kubo.ch](mailto:info@kubo.ch)

### **Kunststoffpark GmbH**

Lieferant für: Bauteile aus Kunststoff  
Adresse: Kunststoffpark GmbH  
Voltastrasse 50a  
6005 Luzern  
Homepage: [www.kunststoffpark.ch](http://www.kunststoffpark.ch)  
E-Mail: [info@kunststoffpark.ch](mailto:info@kunststoffpark.ch)

**MANOMETER AG**

Lieferant für: Schrägrohrmanometer  
Adresse: MANOMETER AG  
Industriestrasse 11  
6285 Hitzkirch  
Homepage: [www.manometer.ch](http://www.manometer.ch)  
E-Mail: [info@manometer.ch](mailto:info@manometer.ch)

**COLASIT AG**

Lieferant für: Ventilator  
Adresse: COLASIT AG  
Kunststoffbau  
Faulenbachweg 63  
CH-3700 Spiez  
Homepage: [www.colasit.ch](http://www.colasit.ch)  
E-Mail: [info@colasit.ch](mailto:info@colasit.ch)

**WELAfix Schweiz GmbH**

Lieferant für: Spannschellen  
Adresse: WELAfix Schweiz GmbH  
Businesspark Giessenmatt 10  
5643 Sins  
Homepage: [www.welafix.ch](http://www.welafix.ch)  
E-Mail: [info@welafix.ch](mailto:info@welafix.ch)

**Distrelec Group AG**

Lieferant für: Schwingungsdämpfer  
Adresse: Distrelec Schweiz, Zweigniederlassung der Distrelec Group AG  
Grabenstrasse 6  
CH-8606 Nänikon  
Homepage: [www.distrelec.ch](http://www.distrelec.ch)  
E-Mail: [info@distrelec.com](mailto:info@distrelec.com)

**Conrad**

Lieferant für: Frequenzumrichter  
Homepage: [www.conrad.ch](http://www.conrad.ch)

## 14.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skizze eines Schwerkraft-Gegenstromsichters .....	6
Abbildung 2: Kräfte an einem Partikel im Schwerefeld .....	7
Abbildung 3: Widerstandsbeiwert als Funktion der Reynolds-Zahl und die Strömungsverläufe an einer Kugel [3].....	8
Abbildung 4:Skizze des typischen Aufbaus eines Gaszyklons [4] .....	10
Abbildung 5: Grundfliessbild der Anlage mit eingetragenen Massenströmen für die Massenstrombilanz.....	13
Abbildung 6: Verfahrensfliessbild der Anlage .....	19
Abbildung 7: Übersicht der kompletten Anlage.....	26
Abbildung 8: Eigenes Bild des Windsichters .....	27
Abbildung 9: Schnittansicht des Windsichters.....	27
Abbildung 10: CFD Analyse, Stand der Anlage Ende November 2015, Schnittebenen für die Geschwindigkeitsprofile .....	29
Abbildung 11: CFD Analyse, Stand der Anlage Ende November 2015, Weg der Partikel durch den Sichter bei 50 m <sup>3</sup> /h, Partikel: Holzstaub 0 – 40 µm, sphärisch, Dichte 500 kg/m <sup>3</sup> .....	29
Abbildung 12: CFD Analyse, Stand der Anlage Ende November 2015, Luftgeschwindigkeit bei 50 m <sup>3</sup> /h, Partikel: Holzstaub 0 – 40 µm, sphärisch, Dichte 500 kg/m <sup>3</sup> .....	30
Abbildung 13: CFD Analyse, Stand der Anlage Ende November 2015, Luftgeschwindigkeit bei 350 m <sup>3</sup> /h, Partikel: Holzstaub 0 – 40 µm, sphärisch, Dichte 500 kg/m <sup>3</sup> .....	30
Abbildung 14: CFD Analyse, aktuelle Version des Windsichters, Weg der Partikel durch den Sichter bei 50 m <sup>3</sup> /h, Partikel: Holzstaub 0 – 40 µm, sphärisch, Dichte 500 kg/m <sup>3</sup> .....	31
Abbildung 15: CFD Analyse, aktuelle Version des Windsichters, Weg der Partikel durch den Sichter bei 350 m <sup>3</sup> /h, Partikel: Holzstaub 0 – 40 µm, sphärisch, Dichte 500 kg/m <sup>3</sup> .....	31
Abbildung 16: CFD Analyse, aktuelle Version des Windsichters, Luftgeschwindigkeit bei 50 m <sup>3</sup> /h, Partikel: Holzstaub 0 – 40 µm, sphärisch, Dichte 500 kg/m <sup>3</sup> .....	32
Abbildung 17: CFD Analyse, aktuelle Version des Windsichters, Luftgeschwindigkeit bei 350 m <sup>3</sup> /h, Partikel: Holzstaub 0 – 40 µm, sphärisch, Dichte 500 kg/m <sup>3</sup> .....	32
Abbildung 18: Eigenes Bild des Zyklons, zu sehen sind auch der Frequenzumrichter, das Manometer, der HEPA-Filter sowie der Kübel für das Feingut. ....	33
Abbildung 19: Eigenes Bild des Behälters für das Aufgabegut sowie der Dosiervorrichtung.....	36
Abbildung 20: Dosiervorrichtung der Anlage.....	38
Abbildung 21: Elektroschema .....	39
Abbildung 22: Bedienung des Frequenzumrichters.....	40
Abbildung 23: Erster Entwurf der Anlage - Mitte Oktober 2015 .....	44
Abbildung 24: Gerendertes Bild der Anlage, Ende November 2015 .....	44

Abbildung 25: Gerendertes Bild der Anlage, Mitte Dezember 2015 .....45  
Abbildung 26: Luft Eintritt in den Windsichter, Mitte Dezember 2015 .....45  
Abbildung 27: Gerendertes Bild der Anlage, Mitte Januar 2016 .....46  
Abbildung 28: Gerendertes Bild der Anlage, Mitte Februar 2016.....46

## 14.5 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Abscheidegrade in Abhängigkeit der Eintrittsbeladung [5] .....	12
Diagramm 2: Beispiel eines Verteilungsdiagramms (oben) und einer Trenngradkurve (unten) [1] .....	14
Diagramm 3: Verteilungsdichte und Verteilungssumme einer Holzstaubprobe.....	15
Diagramm 4: Häufigkeitsdichte des Holzstaubes und angenommener Trenngrad des Windsichters .....	16
Diagramm 5: Häufigkeitsdichte des Grobguts und des Feinguts nach dem Windsichter .....	17
Diagramm 6: Häufigkeitsdichte des Holzstaubes und angenommener Trenngrad des Windsichters .....	17
Diagramm 7: Häufigkeitsdichten des Grobguts und des Feinguts nach dem Zyklon .....	18
Diagramm 8: Sinkgeschwindigkeit von kugelförmigen Partikeln in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers und des Materials .....	20
Diagramm 9: Ventilator Kennlinie: CCV 75, Colasit AG .....	22
Diagramm 10: Theoretische gemittelte Luftgeschwindigkeiten im Sicherrohr und im Verbindungsstück, zwischen dem Windsicher und dem Zyklon .....	28
Diagramm 11: Druckverlust des Zyklons in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Beladung .....	34
Diagramm 12: Grenzpartikeldurchmesser innerer Wirbel in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Beladung.....	34
Diagramm 13: Grenzpartikeldurchmesser für die Wandabscheidung in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Beladung.....	35
Diagramm 14: Theoretische Laufzeit eines Versuches mit Thermoplastischem Polyester, in Abhängigkeit der Beladung und des Volumenstroms. ....	37
Diagramm 15: Theoretische Laufzeit eines Versuches mit Polypropylen, in Abhängigkeit der Beladung und des Volumenstroms.....	37
Diagramm 16: Theoretische Laufzeit eines Versuches mit Holz, in Abhängigkeit der Beladung und des Volumenstroms.....	38
Diagramm 17: Druckverlustdiagramm der Irisblende, in Abhängigkeit des Voluenstroms .....	42

## 14.6 Literaturverzeichnis

- [1] W. Müller, Mechanische Verfahrenstechnik und ihre Gesetzmäßigkeiten, 2. Hrsg., Oldenbourg: De Gruyter, 2014.
- [2] DIN66119, *Partikelgrößenanalyse - Sichtanalyse mit Schwerkraft-Gegenstromsichter*, 2015-11.
- [3] K. Schwister und V. Leven, Verfahrenstechnik für Ingenieure, München: Hanser, 2014.
- [4] D. Cvetkovic, „Auslegung eines Zyklons zur Auftrennung von Holzstaub,“ Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Technik, Brugg-Windisch, 2015.
- [5] G. Wozniak, S. P. Klaus, K. Wozniak und H. H. Shalaby, *Über die Auslegung und den Entwicklungsstand von Zyklon-Abscheidern*, 3-4 Hrsg., Bd. 71, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, pp. 171-180.
- [6] M. Kraxner, „Empirische Ermittlung von Auslegungskriterien für Gleichstromzyklone in Multizyklonblöcken, unv. Diss.,“ Technische Universität München, 2012.
- [7] U. Mueschelknautz, „Zyklone zum Abscheiden fester Partikel aus Gasen,“ in *VDI-Wärmeatlas*, 11 Hrsg., Berlin, Springer-Verlag, 2013, pp. 1400-1411.
- [8] A. C. Hoffmann und L. E. Stein, Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation, 2 Hrsg., Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [9] A. Colotti und F. Jenni, Elektrische Antriebe - Effizient bewegen und fördern, Zürich: FAKTOR Verlag AG, 2015.

## 15 Ordnerstruktur Projekt DVD

<b>Ordner</b>	<b>Dateien</b>
00 - Vorgaben FHNW	Leitfaden Berichte 4.01.pdf P5_P6 Leitfaden_EUT.pdf
01 - Fachbericht	Windsichter mit Zyklon - Fachbericht.docx Windsichter mit Zyklon - Fachbericht.pdf Anhang 1 - Projektauftrag.pdf Anhang 2 - Übersichtszeichnung.pdf Anhang 3 - Checkliste Abnahme Prüfstand.pdf Anhang 4 - Auszug aus dem Zyklon Auslegungs-Tool.pdf
02 - Poster	Windsichter mit Zyklon - Poster.pptx Windsichter mit Zyklon - Poster.pdf
03 - Auslegung	Diagramme Zyklon.xlsx Druckverlust Irisblende.xlsx Erste CFD Anlayse.zip Zweite CFD Analyse.zip Sichter Auslegung.xlsx Sinkgeschwindigkeit Partikel.xlsx Trenngrad V0.6.xlsx Zyklon Auslegungs-Tool.xlsm
04 - Budget & Bestellungen	Ablageflächen - Offerte.pdf Dichtungen - Auftragsbestätigung.pdf Distrelec - Auftragsbestätigung.pdf Gestell - Auftragsbestätigung.pdf Kunststoffteile - Offerte.pdf Spannschellen - Auftragsbestätigung.pdf Ventilator - Auftragsbestätigung.pdf
05 - Zeichnungen und CAD-Modelle	Aufgabegut - Zwischenstück.pdf Auflagen.pdf Elektroschema.pdf Kunststoffteile - Fertigungszeichnungen - Rev A.pdf Kunststoffteile - Verkleben der Einzelteile.pdf Supports.pdf Winkel und Halterungen.pdf Zihlmann Profile.pdf Windsichter mit Zyklon - Autodesk Navisworks.dwfx Windsichter mit Zyklon - Inventor Files.7z
07 - Fotos	Diverse Fotos der Anlage
08 - Handbücher und Datenblätter	Frequenzumrichter - Montage- und Inbetriebnahme Anleitung.pdf Irisblende - Datenblatt.pdf Schrägrohrmanometer - Betriebsanleitung.pdf Schrägrohrmanometer - Datenblatt.pdf Ventilator - Datenblatt CCV 75.pdf

## 16 Anhang

Anhang 1: Projektauftrag .....	A
Anhang 2: Übersichtszeichnung.....	B
Anhang 3: Checkliste: Abnahme Prüfstand .....	C
Anhang 4: Auszug aus dem Zyklon Auslegungs-Tool .....	D

## Anhang 1: Projektauftrag

## Anhang 2: Übersichtszeichnung

## Anhang 3: Checkliste: Abnahme Prüfstand

## Anhang 4: Auszug aus dem Zyklon Auslegungs-Tool