



Diplomarbeit

# Aufbau einer Mehrbett-Wirbelschicht- Versuchsanlage

---

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Werner**  
**Institut für Energietechnik und Thermodynamik E302**

eingereicht an der  
Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

**von**

**Verena Sulzgruber BSc**

0726307

Stöberplatz 11/10; 1170 Wien

# Abstract

---

Die Arbeit befasst sich mit der Konstruktion einer zirkulierenden Zwei-Bett-Wirbelschicht-Versuchsanlage im Labormaßstab, die mit Sand und Umgebungsluft betrieben wird. Im Zuge der Auslegung werden die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit und die Sinkgeschwindigkeit der verwendeten Partikel und daraus abgeleitet die zur richtigen Fluidisierung notwendigen Luftvolumenströme berechnet. Weiters umfasst die Auslegung die Abschätzung der Druckverluste und die Konstruktion entsprechender Zykclone, Siphone und Siebböden. Außer der Planung der Messtechnik sind zum Aufbau der Zwei-Bett-Wirbelschicht noch detaillierte Zeichnungen aller Bauteile und die Konstruktion eines Gerüsts notwendig. Zusätzlich wurden mittels 3D-CAD-Programm dreidimensionale Modelle der Bauteile und des Zusammenbaus erstellt.

Neben der Planung der Versuchsanlage beschäftigt sich die Arbeit auch mit den wichtigsten Anwendungen von Mehrbett-Wirbelschichten. Außerdem wird die Ähnlichkeitstheorie behandelt und der komplette sowie der vereinfachte Satz an dimensionslosen Kennzahlen zum Scale-Up von Wirbelschichten vorgestellt.

This study attends with the construction of a dual circulating fluidized bed system in laboratory scale, which operates with sand and air at ambient conditions. In the course of dimensioning the minimum fluidization velocity and the terminal falling velocity are calculated. Derived from these values the volume flow rates for proper fluidization are calculated. Moreover the dimensioning involves the assessment of pressure drop and the design of cyclones, loop seals and sieve plates. Besides the planning of measurement detailed sketches of all components are necessary for the installation. Using a 3D-CAD-program three dimensional models of the components and the assembly were generated.

Among the design of the cold flow model the study attends with the most important industrial applications of dual fluidized bed systems. Furthermore theory of similarity is discussed and the full set of dimensionless numbers and the simplified scaling laws for fluidized beds are introduced.

# Danksagung

---

Besonders bedanken möchte ich mich bei Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Werner für die intensive Betreuung meiner Arbeit. Es hat mir sehr geholfen, dass er immer sehr flexibel und auch kurzfristig Zeit für mich hatte.

Außerdem danke ich Roswitha Steininger und den Mitarbeitern der Werkstätte herzlich für den Aufbau der von mir geplanten Anlage.

Auch meiner Familie bin ich dankbar für ihre finanzielle und organisatorische Unterstützung während meines gesamten Studiums.

# Inhalt

---

1.	EINLEITUNG .....	4
1.1.	<b>Wirbelschicht</b> .....	4
1.2.	<b>Anwendungsbeispiele der zirkulierenden Mehrbett-Wirbelschicht</b> .....	5
1.2.1.	Allotherme Vergasung .....	5
1.2.2.	Katalytisches Cracken – Fluid-Catalytic-Cracking FCC .....	7
1.2.3.	Chemical-Looping-Combustion .....	8
2.	AUFGABENSTELLUNG.....	10
3.	THEORIE.....	13
3.1.	<b>Dimensionslose Kennzahlen</b> .....	13
3.2.	<b>Reh-Diagramm</b> .....	15
4.	AUSLEGUNG.....	19
4.1.	<b>Rahmenbedingungen</b> .....	19
4.2.	<b>Wirbelgut</b> .....	19
4.3.	<b>Druckverlust im Steigrohr</b> .....	22
4.4.	<b>Minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit</b> .....	23
4.5.	<b>Sinkgeschwindigkeit des Einzelpartikels</b> .....	24
4.6.	<b>Benötigte Luftvolumenströme</b> .....	26
4.7.	<b>Auslegung des Zyklon</b> .....	26
4.8.	<b>Auslegung des Siphons</b> .....	30
4.9.	<b>Siebböden</b> .....	32
5.	PLANUNG DER MESSTECHNIK .....	34
5.1.	<b>Druckmessungen</b> .....	34
5.2.	<b>Durchflussmessungen</b> .....	35
5.3.	<b>Temperaturmessungen</b> .....	37
5.4.	<b>Feststoffumlauf</b> .....	37
6.	KONSTRUKTION .....	38
6.1.	<b>Allgemeines</b> .....	38
6.2.	<b>Steigrohr</b> .....	38
6.3.	<b>Siebboden im Steigrohr</b> .....	42
6.4.	<b>Zyklon</b> .....	44
6.5.	<b>Siphon</b> .....	45
6.6.	<b>Rückleitung</b> .....	48
6.7.	<b>Zusammenbau der gesamten Anlage</b> .....	48
6.8.	<b>Gerüst</b> .....	54
7.	NOMENKLATUR .....	59
8.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	62
9.	LITERATURVERZEICHNIS.....	64

# 1. Einleitung

## 1.1. Wirbelschicht

Wird eine Schüttung von Partikeln von unten nach oben von einer Flüssigkeit oder einem Gas so stark durchströmt, dass die Partikel in Schwebelage gehalten werden und herumwirbeln, so spricht man von einer Wirbelschicht. Obwohl in industriellen und praktischen Anwendungen meist wesentlich kleinere Partikel verwendet werden, kann die Ziehung von „Lotto 6 aus 45“ als anschauliches Beispiel für eine Wirbelschicht genannt werden. Eine stationäre Wirbelschicht in einem Behälter verhält sich ähnlich wie eine Flüssigkeit. Sie bildet eine ebene Oberfläche, auch wenn der Behälter geneigt wird, sodass die Höhe der Wirbelschicht in allen verbundenen Gefäßen gleich ist.

Je nachdem wie stark die Partikelschüttung fluidisiert wird, stellen sich unterschiedliche Zustände ein. Die verschiedenen Regime bei ansteigender Gasgeschwindigkeit sind in Abbildung 1 von links nach rechts dargestellt.

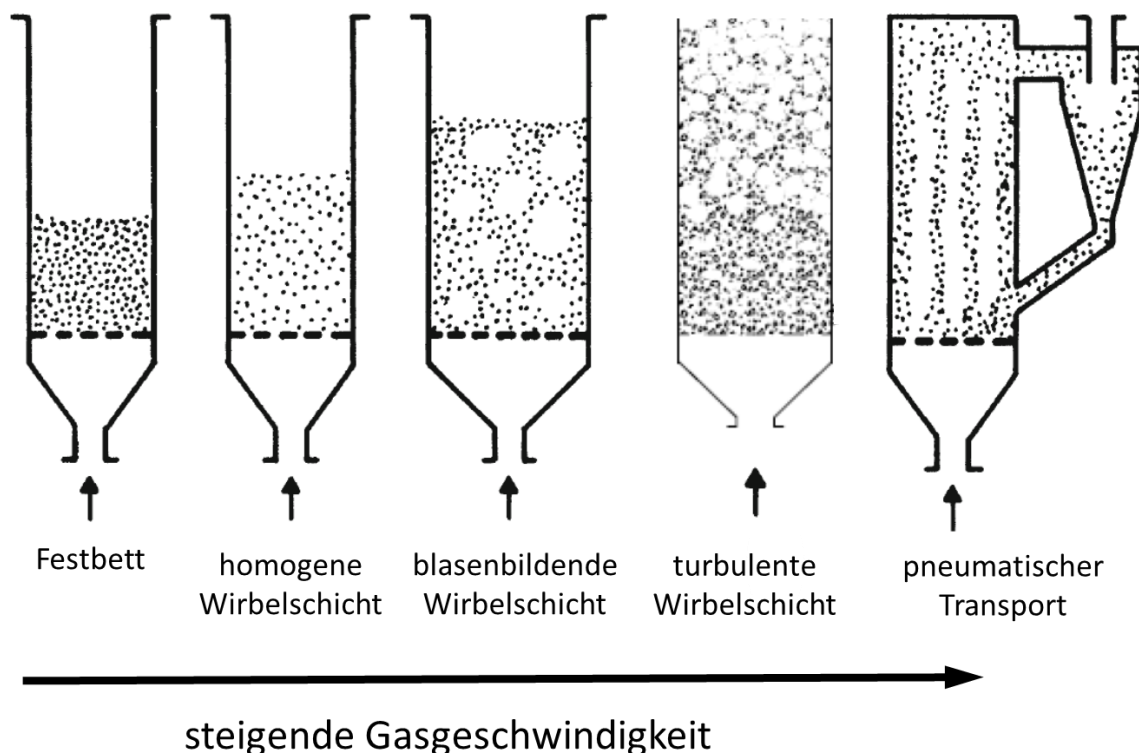


Abbildung 1: Wirbelschichtregime bei ansteigender Fluidisierung [1]

Bei schwacher Durchströmung liegt ein Festbett vor. Wird eine gewisse Gasgeschwindigkeit, minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit genannt, überschritten stellt sich je nach dem Schüttgut eine homogene oder blasenbildende Wirbelschicht ein. Bei stärkerer Fluidisierung bildet sich eine turbulente Wirbelschicht aus. Wird die Gasgeschwindigkeit weiter erhöht, erreicht man den pneumatischen Transport.

Charakteristisch ist auch der Druckverlust bei steigender Fluidisierung (Abbildung 2). Während im Festbett der Druckverlust ansteigt, bleibt er im Bereich der Wirbelschicht auch bei steigender Fluidisierung konstant bis das Regime des pneumatischen Transports erreicht wird.

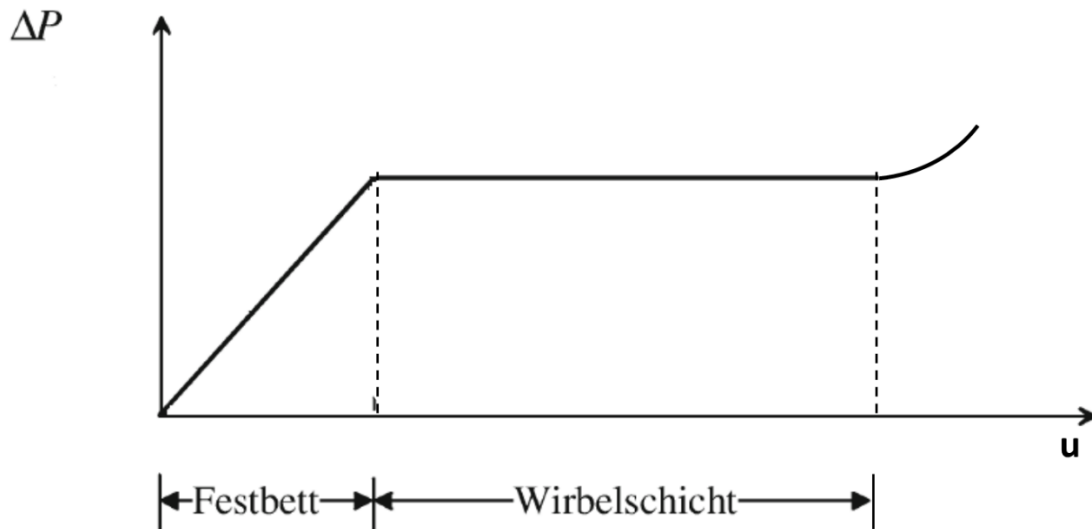


Abbildung 2: Druckverlust bei ansteigender Fluidisierung [1]

Die großen Vorteile einer Wirbelschicht sind die gute Feststoffvermischung, die gleichmäßige Temperaturverteilung und die günstigen Wärmeübergangsverhältnisse. Aufgrund dieser positiven Eigenschaften werden Wirbelschichtanlagen in immer mehr Bereichen der Industrie eingesetzt und haben in den letzten Jahren viele althergebrachte Prozesse, wie zum Beispiel das thermische Cracken und die  $\text{CO}_2$ -Adsorption im Festbett ersetzt. Die Einsatzgebiete von Wirbelschichtanlagen reichen von der Verbrennung und Vergasung über Adsorptionsprozesse und katalytische Reaktionen bis hin zur Trocknung.

## 1.2. Anwendungsbeispiele der zirkulierenden Mehrbett-Wirbelschicht

Bei einer Zwei-Bett- beziehungsweise Mehr-Bett-Wirbelschicht-Anlage handelt es sich um zwei oder mehrere zirkulierende Wirbelschichten, die miteinander verbunden sind. Das Wirbelgut wandert dabei von einem Wirbelbett zum anderen. Der große Vorteil solcher Anlagen besteht in der Möglichkeit in verschiedenen Wirbelbetten verschiedene Fluidisierungsmedien und Fluidisierungszustände einzusetzen beziehungsweise einzustellen.

### 1.2.1. Allotherme Vergasung

Bei der Vergasung wird zwischen autothermen und allothermen Prozessen unterschieden. Bei der autothermen Vergasung wird Luft oder  $\text{O}_2$  als Vergasungsmittel eingesetzt und die zur Vergasung notwendige Energie wird durch Teilverbrennung zur Verfügung gestellt. Bei der allothermen Vergasung hingegen muss die zur Vergasung notwendige Energie extern zugeführt werden. Als Vergasungsmittel wird dabei meist Dampf verwendet. Die allotherme Vergasung führt zu einem hochwertigeren Produktgas, weil dieses nicht wie bei der autothermen Vergasung durch das Abgas der Teilverbrennung verdünnt wird. Im Gegensatz zur autothermen Vergasung, die ohne großen Aufwand im Festbett durchgeführt werden

kann, ist bei der allothermen Vergasung ein Wärmetauscher zum Energieeintrag nötig. Eine andere Möglichkeit die allotherme Vergasung praktisch umzusetzen ist die zirkulierende Zwei-Bett-Wirbelschicht, [2], [3].

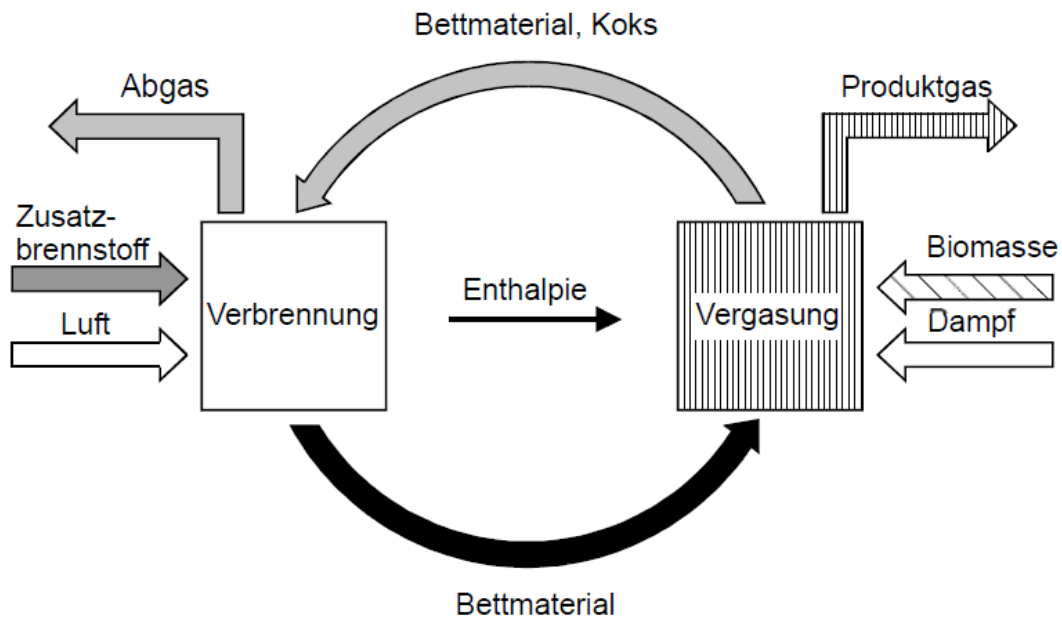


Abbildung 3: Grundprinzip der allothermen Vergasung [3]

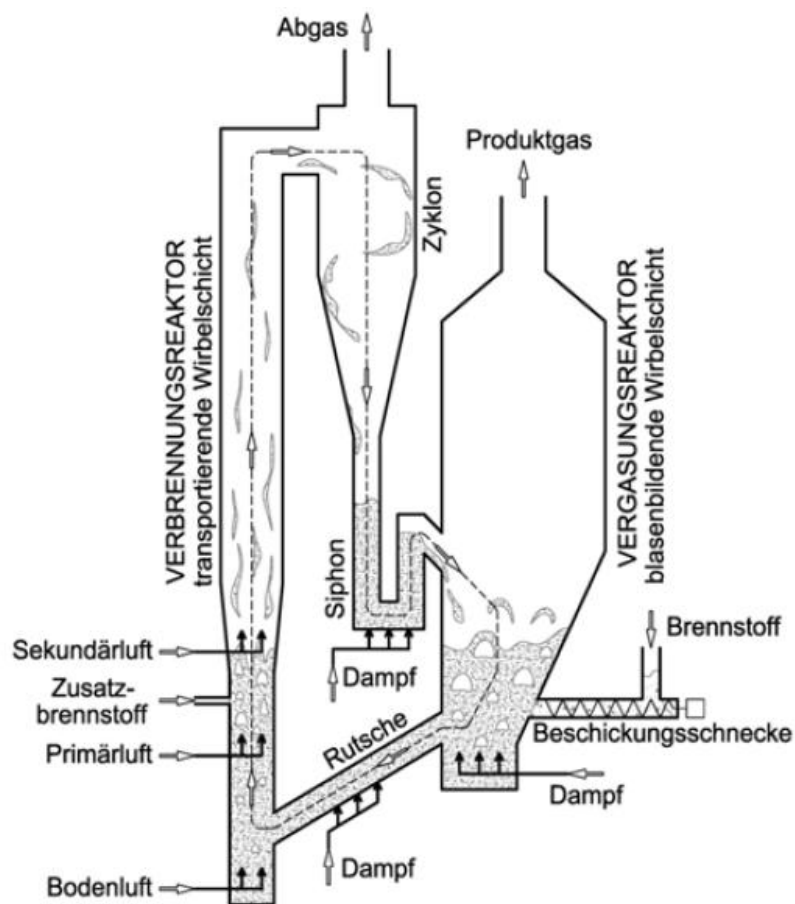


Abbildung 4: Design der allothermen Vergasung [4]

Die Anlage zur allothermen Vergasung, dargestellt in Abbildung 4, besteht aus zwei getrennten Reaktoren. Der Verbrennungsreaktor wird bei, im Vergleich zum Vergasungsreaktor, hoher Gasgeschwindigkeit mit Luft fluidisiert. Am Austritt aus dem Verbrennungsreaktor wird das Bettmaterial in einem Zyklon vom Abgas getrennt und gelangt anschließend in den Vergasungsreaktor. Die blasenbildende Wirbelschicht im Vergasungsreaktor wird mit Dampf fluidisiert. Im Verbrennungsreaktor herrscht dabei eine Temperatur von circa 950°C und die Vergasung wird bei circa 850°C durchgeführt. Der Energietransport vom Verbrennungs- zum Vergasungsreaktor wird vom Bettmaterial, das hauptsächlich aus Sand mit Brennstoff und Koks zusammengesetzt ist, übernommen.

### 1.2.2. Katalytisches Cracken – Fluid-Catalytic-Cracking FCC

Cracken ist einer der wichtigsten Raffinerieprozesse, bei dem schwere Erdölfraktionen, für die es weniger Verwendungsmöglichkeiten gibt, in leichtere Fraktionen gespalten werden. Während früher thermisch gecrackt wurde, kommen heute katalytische Verfahren zum Einsatz. Die ersten katalytischen Crackprozesse arbeiteten mit Festbetten, wobei allerdings das Problem auftrat, dass der Katalysator, meist Zeolithe, sehr schnell durch Koksablagerungen inaktiv wurde. Zur Reaktivierung der Zeolithe musste die Katalysatorschüttung mit Luft durchströmt werden um den Koks abzubrennen. Um dieses Problem zu lösen wurde der FCC-Prozess (Abbildung 5) entwickelt, bei dem eine zirkulierende Wirbelschicht eingesetzt wird.

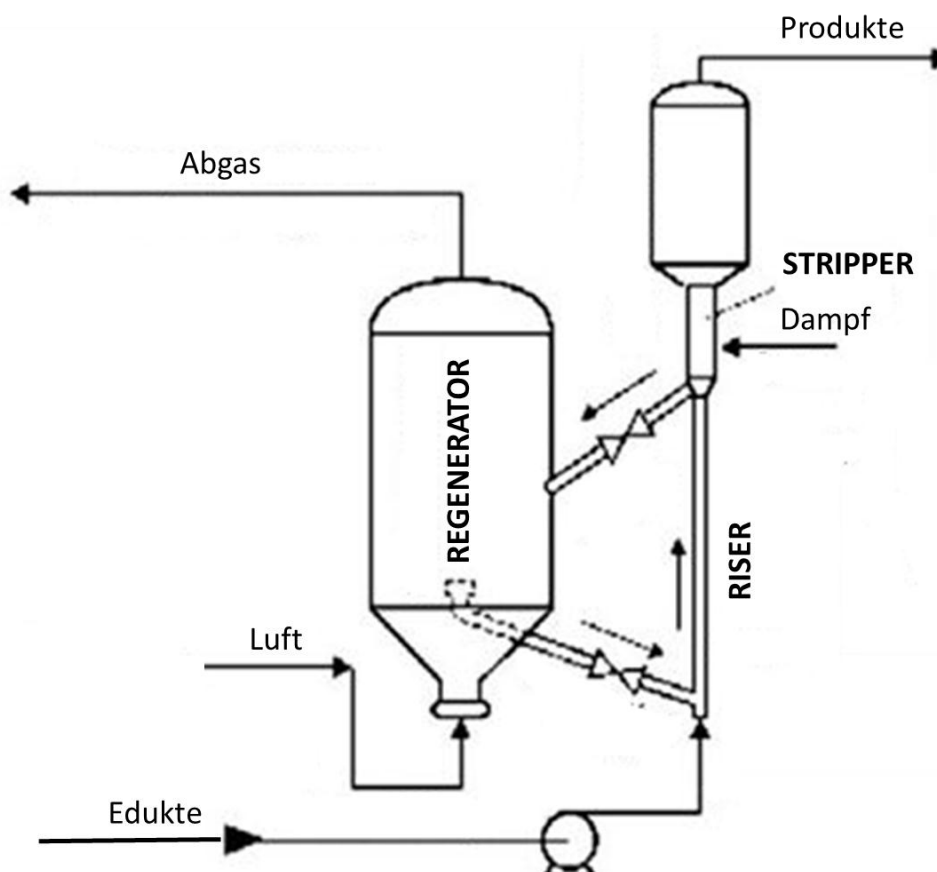


Abbildung 5: Schema einer FCC-Anlage [5]

Am unteren Ende des Risers treffen die Edukte mit dem heißen Katalysator zusammen und werden verdampft. Der Crackprozess findet im Riser statt, der mit den verdampften Edukten



fluidisiert wird. Im Riser herrscht eine sehr hohe Gasgeschwindigkeit über 4 m/s, die den Katalysator nach oben in den Stripper fördert. Dort werden auf den Katalysatorpartikeln anhaftende Kohlenwasserstoffe mit Dampf entfernt. Gleichzeitig bildet der Dampf im Stripper eine Abdichtung zwischen den brennbaren Produkten, die weiter zur Destillationskolonne geleitet werden, und dem mit Luft fluidisierten Regenerator. Im Regenerator, einer stationären Wirbelschicht, wird der beim Cracken entstandene Koks mit Luft verbrannt. Die reaktivierten Zeolithe gelangen anschließend wieder zurück in den Riser. Die im Riser zur Verdampfung der Edukte und für die endotherme Crackreaktion benötigte Energie wird durch das Abbrennen des Kokes im Regenerator zur Verfügung gestellt und durch den Katalysator vom Regenerator in den Riser transportiert.

Wegen einer sehr breiten Palette an möglichen Einsatzstoffen und Produkten hat das katalytische Cracken in der Raffinerie vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Bei den Edukten handelt es sich meist um Vakuumdestillate wie Vakuumgasöl, Schweröl und Schmieröl. Bei modernen Anlagen können auch Bitumen und Vakuumdestillationsrückstände verwendet werden. Durch Variation der Prozessparameter, wie Temperatur, Druck, Katalysatormenge und Verweilzeit, kann die Produktzusammensetzung beeinflusst werden. Die Produktpalette reicht von Raffineriegasen über Flüssiggase bis zur Benzin- und Dieselfraktion. Entstandene und nicht umgesetzte höher siedende Komponenten werden in der Destillation abgetrennt und zurückgeführt. Der größte Vorteil des katalytischen Crackens gegenüber dem thermischen Cracken ist, dass beim FCC-Prozess sehr hochwertige Produkte mit hohem Gehalt an Aromaten und Olefinen entstehen.

Die aktuelle Forschung arbeitet daran Fluid-Catalytic-Cracking nicht nur in der Erdölverarbeitung sondern auch für erneuerbare Kraftstoffe einzusetzen. Forschungsergebnisse [6] zeigen, dass es möglich ist verschiedenste erneuerbare Rohstoffe allein oder mit herkömmlichen Einsatzstoffen gemischt als Edukte für die bereits entwickelten FCC-Anlagen zu verwenden. Mögliche Ausgangsstoffe sind Pyrolyseöle, pflanzliche Öle und tierische Fette.

### 1.2.3. Chemical-Looping-Combustion

Forschungsergebnisse der letzten Jahre weisen darauf hin, dass der Klimawandel und die weltweit steigende Durchschnittstemperatur unter anderem auf die steigende CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre zurück zu führen sind. Es wurden daher einige Konzepte entwickelt um das bei der Verbrennung in thermischen Kraftwerken entstehende CO<sub>2</sub> abzutrennen, um es zu speichern statt in die Atmosphäre abzugeben. Chemical-Looping-Combustion ist eine energetisch vorteilhafte Methode, weil weder die energieintensive Abtrennung des CO<sub>2</sub> aus dem Abgas der Verbrennung erforderlich ist noch eine Luftzerlegung vor der Verbrennung notwendig ist.

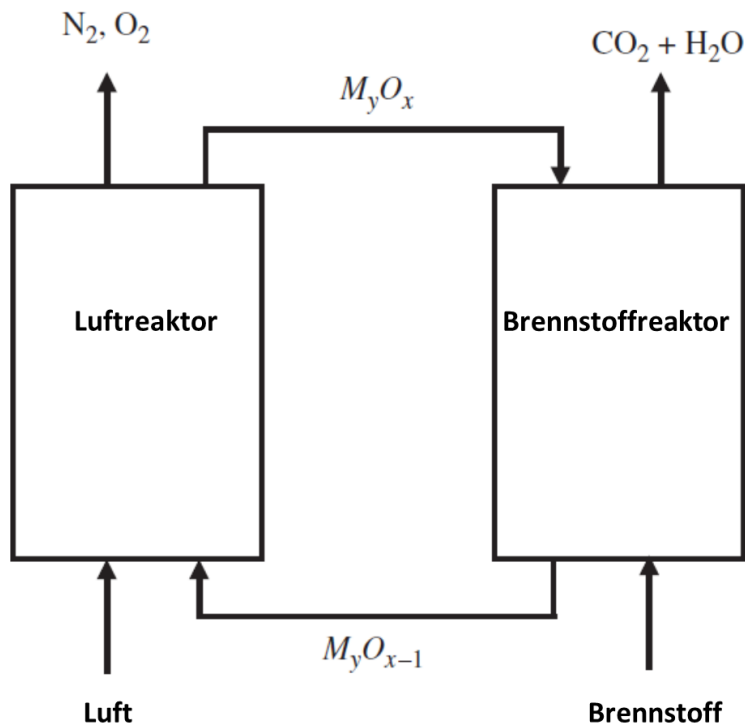
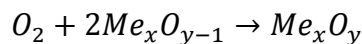
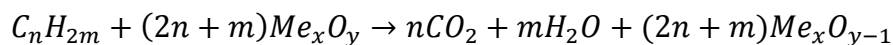


Abbildung 6: Grundprinzip der Chemical-Looping-Combustion [7]

Chemical-Looping-Combustion beruht auf der Verwendung von Metalloxiden als Sauerstoffträger. Wie in Abbildung 6 ersichtlich sind zwei miteinander verbundene Wirbelschichtreaktoren notwendig, in denen die Metalloxide als Bettmaterial umlaufen. Im Luftreaktor wird das Metalloxid oxidiert, wobei es sich um eine exotherme Reaktion handelt.



Im Brennstoffreaktor wird das Metalloxid wieder reduziert und der freiwerdende Sauerstoff für die Verbrennung verwendet.



Die notwendige Energie für die endotherme Reduktion wird dabei von der Verbrennung zur Verfügung gestellt. In beiden Reaktoren zusammen wird in Summe dieselbe Energie freigesetzt wie bei einer herkömmlichen Verbrennung.

Beim Abgas aus dem Brennstoffreaktor handelt es sich um eine Mischung aus Wasserdampf und  $CO_2$ . Nach der Kondensation des Wasserdampfes erhält man mit geringem Energieaufwand nahezu reines  $CO_2$ . Das Abgas aus dem Luftreaktor besteht aus Stickstoff und Sauerstoff und kann an die Umwelt abgegeben werden. Als Sauerstoffträger kommen verschiedene Metalloxide in Frage. Geforscht wird momentan mit Nickel, Kupfer, Eisen, Kobalt und Magnesium, [7], [8].

Auch wenn Chemical-Looping-Combustion derzeit aufgrund fehlender  $CO_2$ -Speicher beziehungsweise Senken keine industrielle Anwendung findet wird die Technologie laufend weiter entwickelt, wie zum Beispiel für die Verwendung fester Brennstoffe mit integrierter Vergasung [9].

## 2. Aufgabenstellung

Das Institut für Energietechnik und Thermodynamik der technischen Universität Wien benötigt für Lehr- und Forschungszwecke (thermochemische Energiespeicherung, chemische Wärmepumpe) eine zirkulierende Zweibett-Wirbelschicht-Versuchsanlage. Die Versuchsanlage soll Aufschluss über den Feststoffumlauf und die Druckverluste von Mehrbett-Wirbelschichtanlagen geben. Außerdem soll anhand der Versuchsanlage das Funktionsprinzip miteinander verbundener zirkulierender Wirbelschichten und der dazugehörigen Anlagenteile zukünftigen Studenten im Rahmen einer Laborübung möglichst anschaulich nahegebracht werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Planung und der Aufbau einer Zweibett-Wirbelschicht im Labormaßstab nach dem in Abbildung 7 dargestellten Fließschema. Die Versuchsanlage soll aus zwei symmetrischen Anlagenhälften bestehen, die zusammen einen Kreislauf bilden. Die Wirbelschicht soll mit Sand und Luft bei Umgebungsdruck und Umgebungstemperatur betrieben werden. Um die Fluidisierungszustände und Strömungszustände in der Anlage von außen sehen zu können soll möglichst die gesamte Versuchsanlage aus Plexiglas bestehen. Zur Trennung des Luft-Sand-Gemisches an den Reaktorausstritten soll ein passender Zyklon eingesetzt werden. Zur Rückleitung des Sandes in den jeweils anderen Reaktor soll ein Siphon entworfen werden.

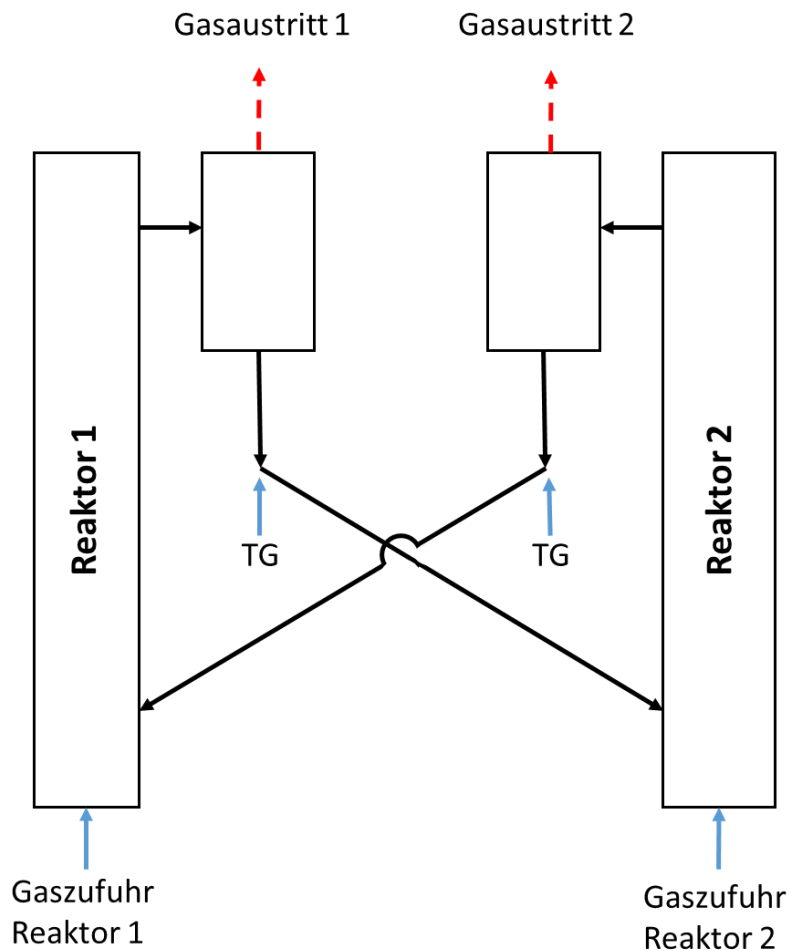


Abbildung 7: Fließschema der Zweibett-Wirbelschicht-Versuchsanlage

Bei Bedarf soll die Versuchsanlage zu einem späteren Zeitpunkt auf ein anderes Fließschema, dargestellt in Abbildung 8, umgebaut werden können. Dieses Anlagendesign mit zwei Kreisläufen ermöglicht einen unterschiedlichen Feststoffumlauf in den beiden Reaktoren, was für viele Anwendungen, wie zum Beispiel beim CLC-Prozess, notwendig ist. Bei der Konstruktion der Anlage soll darauf geachtet werden, dass der Umbau auf dieses Fließschema mit geringem Aufwand möglich ist.

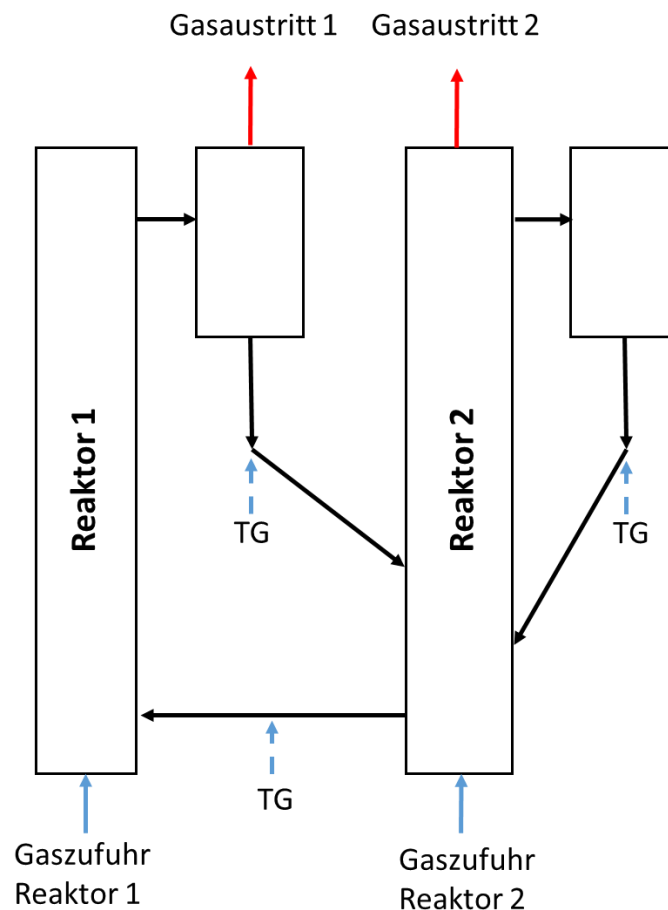


Abbildung 8: Fließschema der Zweibett-Wirbelschicht-Versuchsanlage nach dem Umbau

Ein zentraler Teil dieser Arbeit ist die Auslegung der Wirbelschichtanlage. Dazu sollen erst alle zur Fluidisierung nötigen Kennwerte, vor allem die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit und die Sinkgeschwindigkeit des Einzelpartikels, berechnet werden. Als nächstes sind die zur Fluidisierung in den Steigrohren und in den Siphonen notwendigen Luftmengen sowie die Druckverluste aller Anlagenteile zu bestimmen. Ausgehend von diesen Berechnungen sollen alle geometrischen Abmessungen festgelegt werden.

Im Anschluss an die Auslegung folgt die Konstruktion der Versuchsanlage, der zweite zentrale Teil der Arbeit. Von allen Teilen der Anlage sowie auch von deren Zusammenbau soll ein dreidimensionales Modell mit einem 3D-CAD-Programm erstellt werden. Für den Aufbau der Anlage sind detaillierte Werkstättenzeichnungen von allen Einzelteilen nötig. Auch Zusammenstellungszeichnungen und die dazugehörigen Stücklisten müssen erstellt werden. Der letzte Schritt ist die Konstruktion eines Gerüsts, sodass die Zweibettwirbelschicht sicher aufgestellt und montiert werden kann. Außerdem soll die Arbeit die Planung der Messtechnik und die Auswahl der passenden Messgeräte, so dass alle relevanten Messwerte erfasst werden können, umfassen.

Neben dem praktischen Teil der Arbeit soll ein theoretisches Kapitel die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse der Wirbelschicht im Labormaßstab auf größere und industrielle Anlagen beleuchten. Dazu soll Literatur über Ähnlichkeit und Scale-up von Wirbelschichtanlagen studiert werden um dimensionslose Kennzahlen, die das Verhalten von Wirbelschichten beschreiben, zu finden und zu erklären. Die Arbeit soll auch auf die im Wirbelschichtbereich am häufigsten verwendeten Diagramme näher eingehen.

# 3. Theorie

---

Sind ein Original und ein Modell geometrisch ähnlich und sind zudem alle dimensionslosen Kennzahlen, die das physikalische System beschreiben, für das Original gleich denen des Modells so spricht man von physikalischer Ähnlichkeit. Alle ablaufenden Vorgänge und festgestellten mathematischen Zusammenhänge können dann vom Modell auf das Original und umgekehrt übertragen werden. Die Ähnlichkeitstheorie wird vor allem in der Strömungsmechanik sowie der Wärme- sowie Stoffübertragung angewendet.

## 3.1. Dimensionslose Kennzahlen

Die meisten industriell verwendeten Wirbelschichtfeuerungen arbeiten etwa bei 800°C und mit Abmessungen von mehreren Metern. Fluiddynamische Versuche können aber bei Umgebungsdruck, Umgebungstemperatur und mit Modellen im Labormaßstab wesentlich leichter und billiger durchgeführt werden. Um die Versuchsergebnisse anschließend auf die industriell verwendeten Wirbelschichten übertragen zu können ist es notwendig Modelle zu entwickeln, die den heißeren und größeren Originalen physikalisch ähnlich sind.

### Kompletter Satz linear unabhängiger dimensionsloser Kennzahlen

Glicksman [10] hat ein komplettes Set von linear unabhängigen dimensionslosen Kennzahlen entwickelt. Indem man die beschreibenden Gleichungen, das sind die Kontinuitätsgleichung und die Impulserhaltung jeweils für die Partikel und das Fluid, dimensionslos anschreibt erhält man folgende (dimensionslose) Kennzahlen.

$$\frac{\beta d_p}{\rho_p u_0}, \frac{u_0^2}{g d_p}, \frac{\rho_f}{\rho_p}, \frac{D}{d_p}, \frac{L}{d_p}, \frac{P_0}{d_p u_0^2}$$

Formel 1: dimensionslose Kennzahlen aus den beschreibenden Gleichungen

Der in Formel 1 als letztes angeschriebene Druckterm kann vernachlässigt werden, wenn sich der Druck über die Höhe der Wirbelschicht nicht genug ändert um die Stoffgrößen maßgeblich zu beeinflussen. Diese Kennzahlen sind nicht komplett unabhängig, da sie den Widerstandskoeffizient  $\beta$  enthalten. Um den Widerstandskoeffizienten auszudrücken wird für dicht gepackte Wirbelschichten die Ergun-Gleichung (Formel 2) und für hohes Hohlraumvolumen der Widerstandskoeffizient für das Einzelpartikel verwendet. Beide Vorgehensweisen führen zu dem folgenden kompletten Set von linear unabhängigen dimensionslosen Kennzahlen.

$$\frac{\Delta P}{L} = \beta |u - v| = 150 \frac{\varepsilon(1 - \varepsilon)^2 \mu |u - v|}{\varepsilon^3 (\Psi d_p)^2} + 1,75 \frac{\varepsilon^2(1 - \varepsilon) \rho_f |u - v|^2}{\varepsilon^3 \Psi d_p}$$

Formel 2: Ergun-Gleichung

Reynoldszahl	$\frac{\rho_f u_0 d_p}{\mu}$
Froudezahl	$\frac{u_0^2}{g d_p}$
Dichteverhältnis	$\frac{\rho_f}{\rho_p}$
Längenverhältnis	$\frac{L}{d_p}$
Durchmesser	$\frac{D}{d_p}$
Formfaktor	$\psi$
Partikelgrößenverteilung	
Bettgeometrie	

**Tabelle 1: komplettes Set an dimensionslosen Kennzahlen [10]**

Weiters können die Archimedeszahl und der dimensionslose Feststoffumlauf, die aber nicht linear unabhängig sind gebildet werden. Die in Tabelle 1 genannten Kennzahlen können frei gewählt werden. Wenn diese festgelegt werden, sind dadurch automatisch auch die Archimedeszahl und der dimensionslose Feststoffumlauf festgelegt.

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{\mu_g^2}$$

**Formel 3: Archimedeszahl**

$$\frac{G_s}{\rho_p u_0}$$

**Formel 4: dimensionsloser Feststoffumlauf**

Die Archimedeszahl wird besonders häufig verwendet, weil sie ausschließlich Stoffwerte des verwendeten Fluides und der Partikel beinhaltet und von der Fluidisierungsgeschwindigkeit unabhängig ist. Die Archimedeszahl ist ein Maß für das Verhältnis der Auftriebskraft zur Trägheitskraft.

Mit den oben genannten Kennzahlen ist es möglich ein Wirbelbett, das mit Luft bei 800°C betrieben wird, im Experiment mit Umgebungsluft zu betreiben. Um das Dichteverhältnis konstant zu halten muss die Partikeldichte im Modell das 3,5-fache derer im Original betragen. Über die anderen Kennzahlen erhält man eine geometrisch ähnliche Wirbelschicht mit einem Viertel der Größe des Originals. Um größere Flexibilität im Modelldesign zu erreichen hat Glicksman [11] die dimensionslosen Kennzahlen vereinfacht.

## Vereinfachte dimensionslose Kennzahlen

Für niedere Reynoldszahlen dominiert der erste Term der Ergun-Gleichung (Formel 2) und der zweite Term kann vernachlässigt werden. Für hohe Reynoldszahlen dominiert der Trägheitsterm und der erste Term kann weggelassen werden. Diese beiden Vereinfachungen führen zu denselben dimensionslosen Kennzahlen.

Froudezahl	$\frac{u_0^2}{gd_p}$
Dichteverhältnis	$\frac{\rho_f}{\rho_p}$
Geschwindigkeitsverhältnis	$\frac{u_0}{u_{mf}}$
Feststoffumlauf	$\frac{G_S}{\rho_p u_0}$
Formfaktor	$\psi$
Partikelgrößenverteilung	
Bettgeometrie	

Tabelle 2: vereinfachte dimensionslose Kennzahlen [11]

Mit diesem vereinfachten Set von dimensionslosen Kennzahlen kann die Modellgröße variiert werden, solange die Froudezahl konstant gehalten wird, indem die Gasgeschwindigkeit angepasst wird. Dadurch ist es möglich weit größere Anlagen zu modellieren beziehungsweise kleinere Modelle zu bauen als mit dem kompletten Set von dimensionslosen Kennzahlen.

Da für beide Bereiche, hohe und niedere Reynoldszahl, dieselben vereinfachten Kennzahlen gefunden wurden liegt nahe, dass diese auch im Bereich dazwischen zumindest eine gute Näherung für physikalische Ähnlichkeit sind. In welchen Grenzen die vereinfachten dimensionslosen Kennzahlen gültig sind und wie groß die Abweichungen außerhalb der Grenzen sind wurde bereits ausführlich experimentell erforscht [11]. Physikalische Ähnlichkeit zwischen Modell und Original, selbst bei der Verwendung des kompletten Satzes an Kennzahlen (Tabelle 1), ist nicht gegeben bei besonders feinen Partikeln, weil die elektrostatischen Kräfte bei der Herleitung nicht einbezogen wurden. Auch direkt über dem Gasverteiler ist keine physikalische Ähnlichkeit gegeben.

### 3.2. Reh-Diagramm

Von Reh [12] wurde auf Basis von dimensionslosen Kennzahlen ein allgemeines Zustandsdiagramm für Fluid/Feststoff-Systeme kugeligter Partikel entwickelt. Das Reh-Diagramm (Abbildung 9), das später zur leichteren Verwendung hinsichtlich der Achsen leicht modifiziert wurde [13], beinhaltet neben den bereits bekannten Kennzahlen (Reynolds-, Froude-, Archimedes-Zahl) noch die Partikel-Froude-Zahl  $Fr^*$  und die  $\Omega$ -Zahl.



$$Fr^* = \frac{3}{4} \cdot Fr \cdot \frac{\rho_f}{\rho_p - \rho_f} \quad \text{mit} \quad Fr = \frac{u_0^2}{gd_p}$$

**Formel 5: Partikel-Froude-Zahl**

$$\Omega = \frac{u_0^3 \rho_f}{\nu g (\rho_p - \rho_f)}$$

**Formel 6:  $\Omega$ -Zahl**

$$Fr^* = \frac{n}{C_w}$$

**Formel 7: Lastvielfaches**

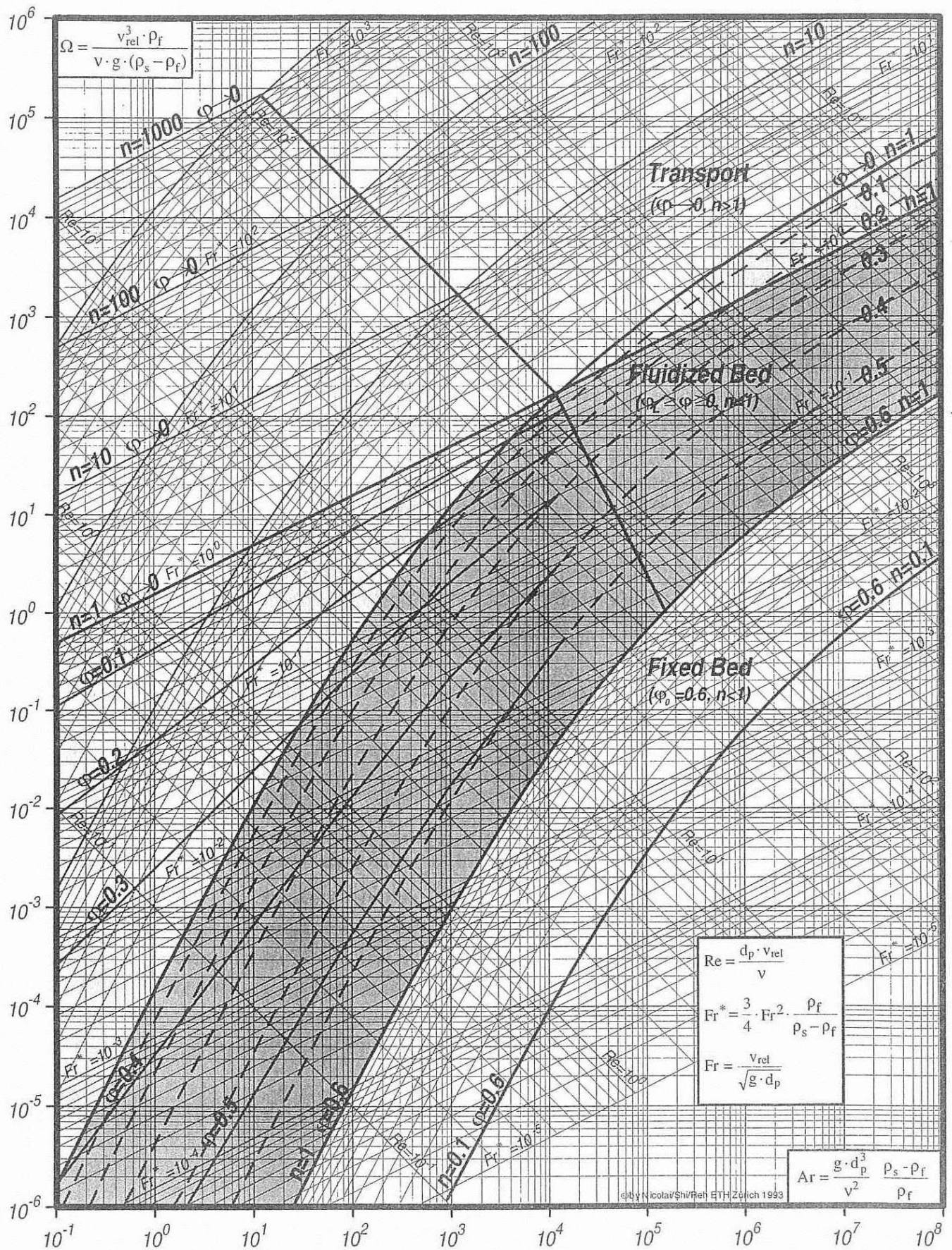


Abbildung 9: modifiziertes Reh-Diagramm

Das von Reh entwickelte Diagramm baut auf die Einführung des Lastvielfachen  $n$  auf, das über den Widerstandsbeiwert mit der Partikel-Froude-Zahl verknüpft ist (Formel 7). Das Lastvielfache ist das Verhältnis der auf das Einzelteilchen wirkenden Strömungskraft zu seinem Gewicht. Im Reh-Diagramm werden damit drei Bereiche unterschieden.

- $n < 1$ : durchströmtes Festbett
- $n = 1$ : Wirbelschicht zwischen Lockerungsgeschwindigkeit und Sinkgeschwindigkeit
- $n > 1$ : pneumatische Förderung

Im Bereich der Wirbelschicht sind auch Linien mit konstanter Feststoffvolumenkonzentration  $\varphi$  eingetragen ( $\varphi = 1 - \varepsilon$ ). Sie reichen von  $\varphi = 0,4$  am Lockerungspunkt bis  $\varphi \rightarrow 0$  für den pneumatischen Transport.

Während die Abgrenzung der Wirbelschicht gegenüber dem Festbett für alle Fluid/Feststoff-Systeme klar durch die Linie  $n = 1$  und  $\varphi = 0,6$  gegeben ist, ist die gebogene Linie  $n = 1$  und  $\varphi \rightarrow 0$ , die den grauen Bereich begrenzt nur für Systeme mit idealer Anströmung jedes einzelnen Partikels gültig. Diese ideale Fluidisierung ist nur bei Flüssigkeiten möglich. Bei Gas/Feststoff-Systemen hingegen bilden sich vor allem bei feinen Partikeln mit kleinen Archimedes-Zahlen durch Agglomeration Partikelcluster. Dadurch ergibt sich ein Übergangsbereich zwischen der Wirbelschicht und dem pneumatischen Transport, der nach links, hin zu feinen Partikeln, immer breiter wird.

# 4. Auslegung

---

## 4.1. Rahmenbedingungen

Ausgehend von folgenden Voraussetzungen sollen die geometrischen Abmessungen aller Bauteile sowie die zur Fluidisierung benötigten Luftmengen bestimmt werden.

- Größe der Versuchsanlage  
Das Steigrohr wird mit einer quadratischen Grundfläche mit einer Seitenlänge von circa 15 cm geplant. Die Höhe des Steigrohres soll circa 2 m betragen.
- Druck und Temperatur  
Bei der Versuchsanlage handelt es sich um ein Kaltmodell. Sie muss daher bei Umgebungstemperatur und bei Umgebungsdruck betrieben werden.
- Wirbelgut  
Als Wirbelgut soll Quarzsand der österreichischen Quarzwerke in Melk verwendet werden. Die Korngrößenverteilung ist durch das Datenblatt [14] gegeben und liegt zwischen 100 und 200  $\mu\text{m}$ .
- Fluidisierung  
Die Gasgeschwindigkeit im Steigrohr soll etwa bei der 3-fachen Sinkgeschwindigkeit des Einzelpartikels liegen. Im Siphon wird eine Gasgeschwindigkeit, die etwa das Dreifache der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit ausmacht, verlangt.

## 4.2. Wirbelgut

### Klassifikation nach Geldart

Von Geldart [15] wurde eine Einteilung aller Schüttgüter hinsichtlich ihres Verhaltens in einer Wirbelschicht vorgenommen. Dafür werden die Schüttgüter in einem Diagramm (Abbildung 10), in dem der Partikeldurchmesser gegen die Dichtedifferenz zwischen Partikel und Fluidisierungsmedium aufgetragen wird, eingetragen. In diesem Diagramm lassen sich vier Gruppen mit unterschiedlichen Eigenschaften unterscheiden.

- Gruppe C:  
Diese Gruppe umfasst kohäsive und sehr feine Partikel, die nur sehr schwer fluidisiert werden können, da sie zu Kanal- und Pfropfenbildung neigen.
- Gruppe A:  
Bei dieser Gruppe handelt es sich um feine Partikel. Sie wird dadurch charakterisiert, dass sich beim Überschreiten der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit zunächst eine homogene Wirbelschicht einstellt. Blasen treten erst bei höheren Gasgeschwindigkeiten auf.
- Gruppe B:  
In dieser Gruppe finden sich Schüttgüter, die sich ähnlich verhalten wie Sand. Wird bei dieser Gruppe die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit überschritten treten sofort Blasen auf.

- Gruppe D:

Zu dieser Gruppe gehören große und dichte Partikel. Wirbelschichten mit diesen Partikeln finden sich hauptsächlich in der Nahrungsmittelindustrie, wie zum Beispiel mit Getreide oder Kaffeebohnen.

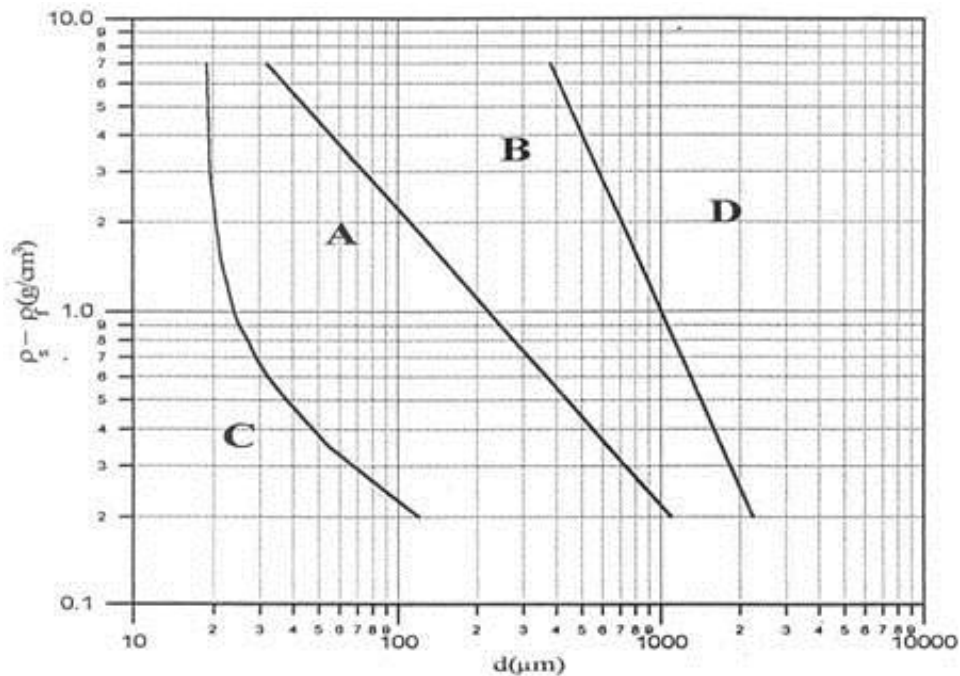


Abbildung 10: Klassifikation nach Geldart [15]

### Bestimmung des Berechnungsdurchmessers der Partikel $d_p$

Beim sogenannten Berechnungsdurchmesser handelt es sich um den durch einen Formfaktor korrigierten mittleren Durchmesser der Korngrößenverteilung, mit dem in Folge alle Berechnungen, im Besonderen die Berechnung der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit und der Sinkgeschwindigkeit, durchgeführt werden. Der mittlere Durchmesser wird aufgrund der Korngrößenverteilung laut Tabelle 3 und Abbildung 11 mit folgender Formel [15] bestimmt:

$$\bar{d} = \frac{1}{\sum_{\text{alle } i} (x_i/d_i)} = 0,154 \text{ mm}$$

Formel 8: mittlerer Durchmesser

Körnung mm	Siebrückstand %	Siebdurchgang %
0,5	0	100
0,355	0	100
0,25	5	95
0,125	75	20
0,063	19	1
kleiner	1	0

Tabelle 3: Korngrößenverteilung des verwendeten Sandes

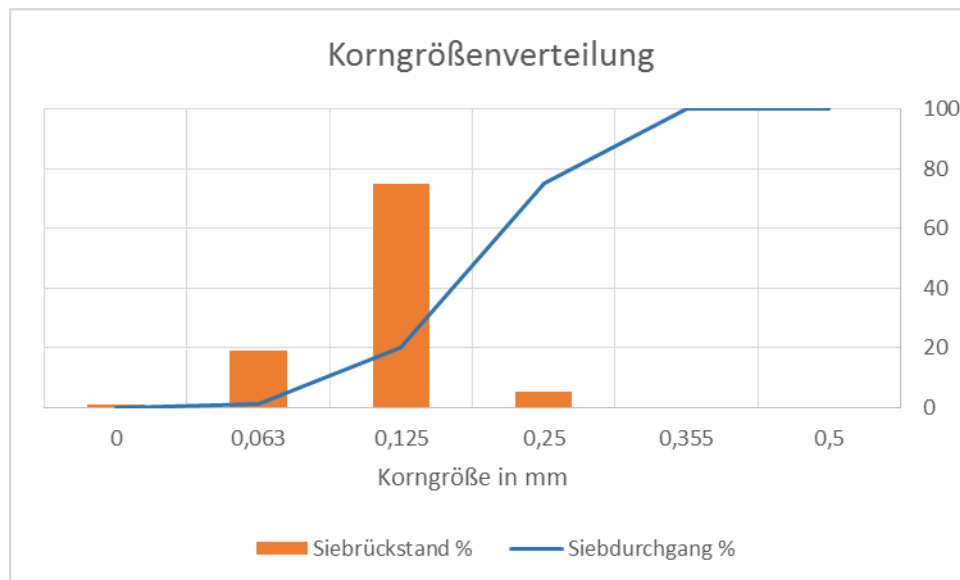


Abbildung 11: Korngrößenverteilung des verwendeten Sandes

Der Formfaktor berücksichtigt die Abweichung der wahren Partikelform von einer Kugel. Da Berechnungen für nicht kugelförmige Partikel kaum möglich sind, wird der mittlere Durchmesser mit dem Formfaktor multipliziert und fortan mit dem erhaltenen Berechnungsdurchmesser und mit Formeln, die strenggenommen nur für Kugeln gelten, gerechnet. Mit dem Formfaktor für abgerundeten Sand, der laut [15] 0,9 beträgt erhält man:

$$d_p = \bar{d} \cdot \Psi = 0,138\text{mm}$$

Formel 9: Formfaktor

### 4.3. Druckverlust im Steigrohr

Um den Druckverlust einer stationären Wirbelschicht zu berechnen wird das Kräftegleichgewicht formuliert [15]. Um die Partikel in Schwebelage zu halten muss die Widerstandskraft der Gasströmung genau der Gewichtskraft der Summe aller Partikel entsprechen.

$$\Delta P_B \cdot A = A \cdot H_L \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g$$

Formel 10: Druckverlust einer Wirbelschicht

Darin steht A für die Querschnittsfläche der Wirbelschicht und  $H_L$  für die Höhe der Schüttung am Lockerungspunkt.

Um den Druckverlust im Steigrohr vorhersagen zu können müssen mit Hilfe der Literatur [16], [17] einige Annahmen getroffen werden. Bei dieser Abschätzung wird vorausgesetzt, dass der Druckverlust in einer turbulenten Wirbelschicht, wie sie im Steigrohr vorherrscht, gleich dem Druckverlust einer stationären Wirbelschicht ist. Für diesen ist die Sandmasse maßgeblich. Die bestgeeignete Füllmenge wird sich während des Betriebs zeigen. Zur ersten Inbetriebnahme soll in jedes Steigrohr eine Sandschüttung von circa 25 cm eingefüllt werden. Das entspricht einer Sandmasse von 8,44 kg pro Steigrohr. Die Berechnung der Verteilung dieser Sandmenge auf das Steigrohr, den Zyklon und den Rückführzweig mit dem Siphon ist sehr aufwendig und ungenau. Daher wird die Verteilung an dieser Stelle grob abgeschätzt. Um die Druckverluste der Anlagenteile abschätzen zu können wird angenommen, dass sich im Betrieb 60% des Sandes im Steigrohr und 40% im Siphon befinden. Für die zur Berechnung des Druckverlustes nötige Höhe am Lockerungspunkt wird daher ein Wert von 15 cm eingesetzt.

Die zur Berechnung notwendigen Stoffwerte der Luft bei 25°C werden dem VDI-Wärmeatlas [1] entnommen.

$$\rho_g = 1,169 \text{ kg/m}^3$$

Die Stoffwerte des verwendeten Sandes werden dem Datenblatt [14] entnommen.

$$\rho_B = 1500 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_p = 2650 \text{ kg/m}^3$$

Aus der Partikel- und der Schüttdichte wird das Hohlraumvolumen der Schüttung bestimmt, das zugleich dem Hohlraumvolumen am Lockerungspunkt entspricht.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_p}$$

Formel 11: Hohlraumvolumen

Der prognostizierte Druckverlust im Steigrohr ergibt sich zu

$$\Delta P_B = H_L \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g = 2200 \text{ Pa}$$

#### 4.4. Minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit

Die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit ist jene Gasgeschwindigkeit, bei der das Festbett in eine Wirbelschicht übergeht. Man erhält die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit daher, indem man den Druckverlust im Festbett mit dem Druckverlust der Wirbelschicht gleichsetzt [15].

$$H_L \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g = H_L \cdot \left[ 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot u_{mf}}{d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot u_{mf}^2}{d_p} \right]$$

Formel 12: Herleitung der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit

Durch Umformen erhält man folgendes:

$$Ar = C_1 \cdot Re_{p,mf} + C_2 \cdot Re_{p,mf}^2$$

Darin ist  $Re_{p,mf}$  die auf die Partikel bezogene Reynoldszahl bei minimaler Fluidisierungsgeschwindigkeit und  $Ar$  die Archimedeszahl.

$$Re_{p,mf} = \frac{u_{mf} \cdot d_p \cdot \rho_g}{\mu}$$

Formel 13: Reynoldszahl

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\mu^2}$$

Formel 14: Archimedeszahl

Hierbei handelt es sich um eine quadratische Gleichung in  $Re_{p,mf}$ . Löst man die Gleichung und setzt für die Konstanten empirisch ermittelte Zahlenwerte ein [15], die an eine feine Schüttung angepasst sind, erhält man eine explizite Gleichung für die Reynoldszahl in Abhängigkeit der Archimedeszahl.

$$Re_{p,mf} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408Ar} - 33,7$$

Formel 15: Reynoldszahl bei minimaler Fluidisierung

Die zur Berechnung der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit notwendigen Stoffwerte der Luft bei 25°C werden wieder dem VDI-Wärmeatlas [1] entnommen.

$$\rho_g = 1,169 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 18,45 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

Für den verwendeten Sand und Umgebungsluft ergibt sich folgende Archimedeszahl:

$$Ar = 236$$

Aus der Archimedeszahl folgt die Reynoldszahl und aus dieser wiederum die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit für die verwendeten Partikel.

$$Re_{p,mf} = 0,143$$

$$u_{mf} = 0,0163 \text{ m/s}$$

Wie auch in Abbildung 12 ersichtlich hängt die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit hauptsächlich vom Partikeldurchmesser ab und variiert sogar für den verwendeten Sand mit enger Korngrößenverteilung stark.



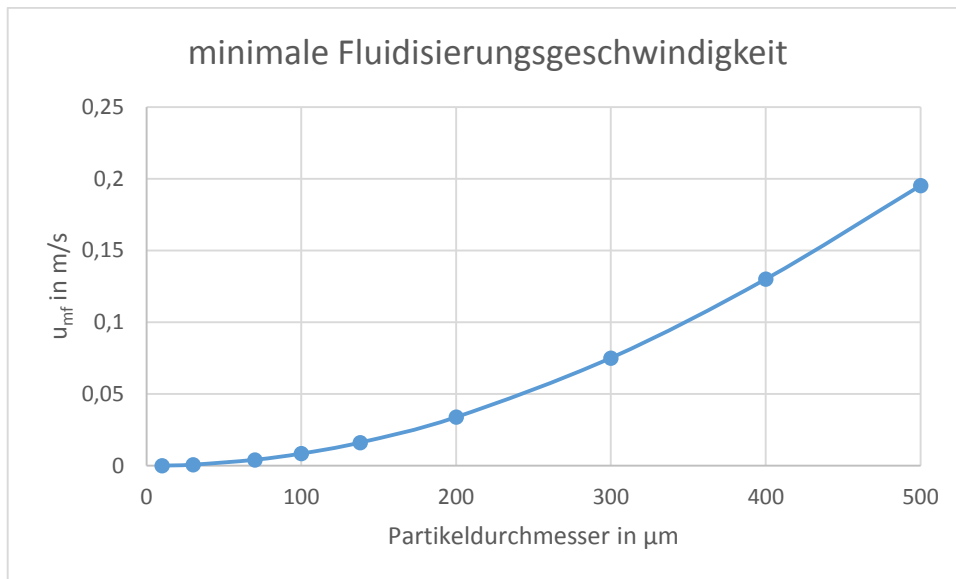


Abbildung 12: minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers

#### 4.5. Sinkgeschwindigkeit des Einzelpartikels

Fällt ein einzelnes Partikel frei im Raum stellt sich nach kurzer Zeit mit Beschleunigung ein stationärer Zustand mit konstanter Sinkgeschwindigkeit ein. Diese hängt besonders stark von der Form des Partikels ab. Hier werden kugelförmige Partikel vorausgesetzt, da eine Berechnung sonst unmöglich wäre.

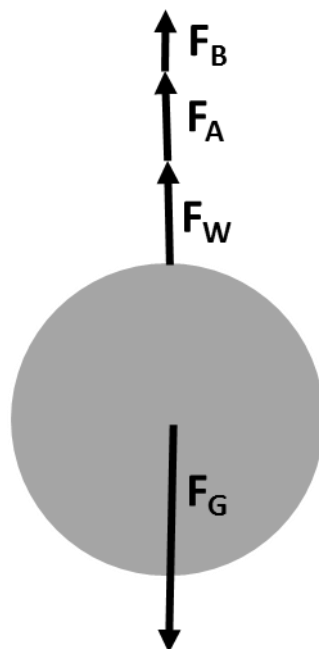


Abbildung 13:Kräftegleichgewicht für ein fallendes Partikel

Auf ein frei fallendes Partikel wirken im Allgemeinen folgende Kräfte, die im Gleichgewicht stehen müssen.

- Gewichtskraft minus Auftriebskraft:

$$F_G - F_A = \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g$$

- Widerstandskraft:

$$F_W = C_w \cdot A_p \cdot \frac{\rho_g \cdot u_t^2}{2}$$

- Beschleunigungskraft:

$$F_B = \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot \rho_p \cdot \frac{du_t}{dt}$$

Ist die finale Sinkgeschwindigkeit erreicht fällt der Beschleunigungsterm weg. Für die Sinkgeschwindigkeit des Einzelpartikels erhält man durch Umformen:

$$u_t = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \cdot \frac{d_p \cdot g}{C_w}}$$

**Formel 16: finale Sinkgeschwindigkeit**

Diese Beziehung ist auch aus der Strömungsmechanik bekannt. Der Widerstandsbeiwert  $C_w$  ist von der auf das Partikel bezogenen Reynoldszahl abhängig. Für dessen Bestimmung gilt im Übergangsbereich ( $0,2 < Re < 1000$ ):

$$C_w = \frac{24}{Re_{p,t}} + \frac{4}{\sqrt{Re_{p,t}}} + 0,4$$

**Formel 17: Widerstandsbeiwert im Übergangsbereich**

Die Sinkgeschwindigkeit muss daher iterativ ermittelt werden. Für Partikel mit dem Berechnungsdurchmesser gilt:

$$u_t = 0,934 \text{ m/s}$$

So wie die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit variiert auch die Sinkgeschwindigkeit stark für unterschiedliche Partikeldurchmesser.

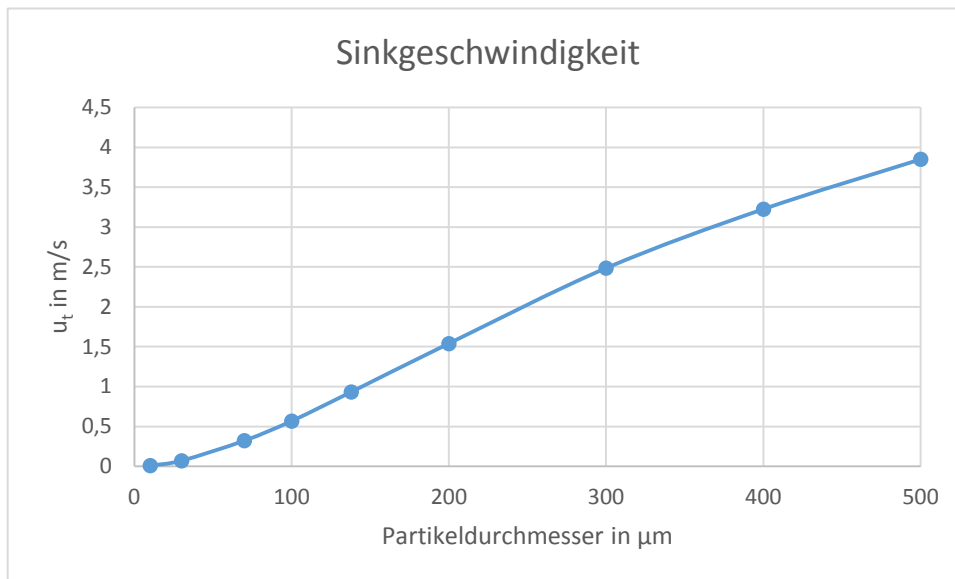


Abbildung 14: Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers

#### 4.6. Benötigte Luftvolumenströme

Da die Gasgeschwindigkeit im Steigrohr ca. das Dreifache der Sinkgeschwindigkeit, daher etwa 3 m/s betragen soll, ergibt sich für jedes der beiden Steigrohre folgender Luftvolumenstrom:

$$\dot{V}_{Luft} = 3 \cdot u_t \cdot A = 0,063 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ebenso berechnet man den Luftbedarf für den Siphon, der mit einer Leerrohrgeschwindigkeit von etwa 0,5 m/s betrieben werden soll. Er beträgt 29 L/min.

#### 4.7. Auslegung des Zyklon

Der Zyklon soll den ausgetragenen Sand vom Luftstrom trennen. Dafür wird der mit Sand beladene Luftvolumenstrom durch einen Schlitzeinlauf tangential in den Zyklon eingebracht. Dadurch entwickelt sich eine starke tangentielle Strömung, welche die Partikel einer Zentrifugalkraft unterwirft. Durch diese Kraft werden die Partikel an die Außenwand des Zyklons gedrückt und gleiten an dieser nach unten während die Luft den Zyklon durch ein in der Mitte angebrachtes Tauchrohr nach oben verlässt.

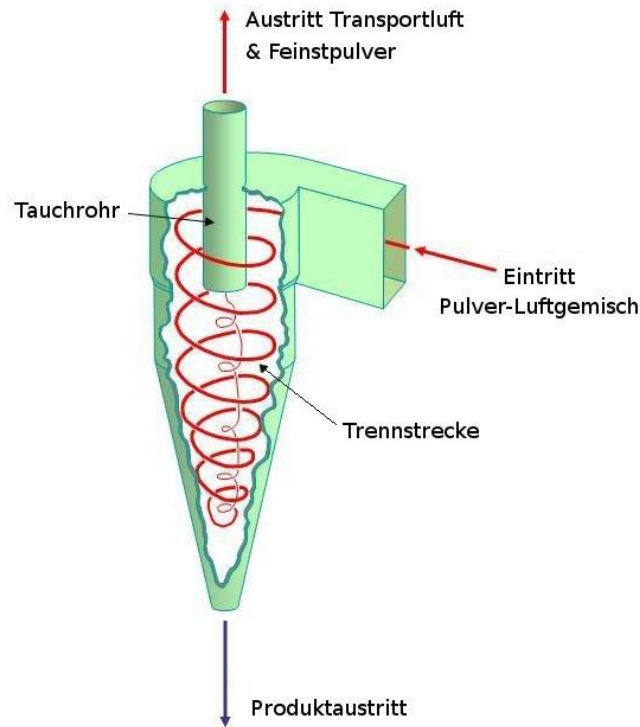


Abbildung 15: Funktionsweise des Zyklons [18]

Die Berechnung des Zyklons soll nach VDI-Wärmeatlas [1] ausgeführt werden. Dabei wird von einer vorhandenen Geometrie ausgegangen und der Druckverlust im Zyklon und die Abscheideleistung berechnet.

Ein zentraler Parameter in der Berechnung ist die Staubbeladung, in kg Sand pro kg Luft, am Zyklooneintritt. Diese resultiert aus der ausgetragenen Sandmenge und ist somit unbekannt. Mit Hilfe der verfügbaren Literatur [16] [17] wird das Hohlraumvolumen am oberen Ende der Wirbelschicht auf  $\varepsilon = 0,99$  geschätzt. Daraus ergibt sich eine Beladung von  $\mu_e = 23 \text{ kg/kg}$ . Sicherheitshalber wird eine eher hohe Beladung angenommen.

### Gewählte Geometrie

Folgende geometrische Abmessungen wurden nach den Empfehlungen des VDI-Wärmeatlas [1] gewählt:

- Radien:

$$\begin{aligned} r_a &= 140 \text{ mm} \\ r_i &= 40 \text{ mm} \\ r_3 &= 30 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Höhe:

$$\begin{aligned} h_Z &= 200 \text{ mm} \\ h_K &= 270 \text{ mm} \\ h_T &= 100 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Einlauf:

$$\begin{aligned} h_e &= 130 \text{ mm} \\ b &= 70 \text{ mm} \end{aligned}$$

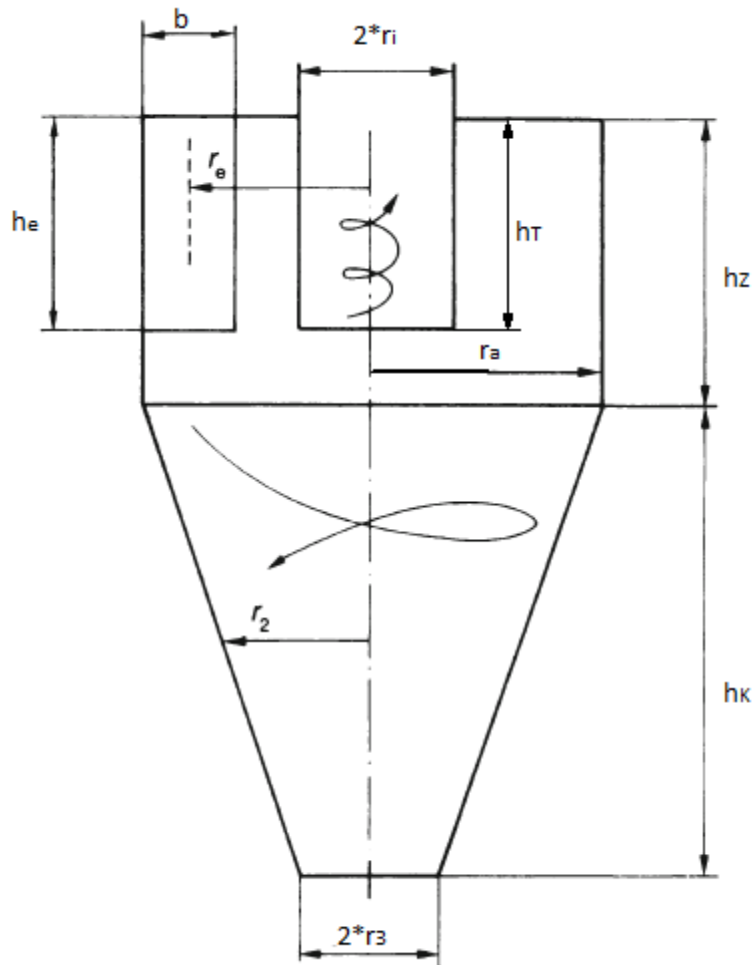


Abbildung 16: Abmessungen des Zyklon

### Im Zyklon auftretende Geschwindigkeiten und Wandreibungsbeiwert

Die äußere Umfangsgeschwindigkeit ergibt sich aus der Eintrittsgeschwindigkeit  $v_e$  beim Eintrittsradius  $r_e$  und dem Einschnürungsbeiwert  $\alpha$ , der von der Eintrittsgeometrie bestimmt wird.

$$u_a = \frac{v_e \cdot r_e / r_a}{\alpha} = 6 \text{ m/s}$$

Formel 18: äußere Umfangsgeschwindigkeit

Die innere Umfangsgeschwindigkeit wird maßgeblich von der äußeren Umfangsgeschwindigkeit und dem Wandreibungsbeiwert  $\lambda_s$  bestimmt. Bei  $A_R$  handelt es sich um die für die Reibung relevante Innenfläche des Zyklons inklusive Tauchrohr.

$$u_i = \frac{u_a \cdot r_a / r_i}{1 + \frac{\lambda_s}{2} \cdot \frac{A_R}{V} \cdot u_a \cdot \sqrt{r_a / r_i}} = 4 \text{ m/s}$$

Formel 19: innere Umfangsgeschwindigkeit

Der Wandreibungsbeiwert berücksichtigt die Staubbiladung, von der er hauptsächlich beeinflusst wird und ist daher wesentlich höher als der Wandreibungsbeiwert für reines Gas.

Er wird bestimmt indem man zum Wandreibungsbeiwert für reines Gas einen weiteren Term addiert, der den Feststoffteppich an der Wand berücksichtigt.

Ungewöhnlich ist hier die im Vergleich zur äußeren Umfangsgeschwindigkeit sehr niedrige innere Umfangsgeschwindigkeit. Diese Auffälligkeit ist über den Wandreibungsbeiwert auf die hohe Eintrittsbeladung zurückzuführen.

### Druckverlust

Der Druckverlust setzt sich aus drei Teilen zusammen.

$$\Delta P = \Delta P_{ek} + \Delta P_e + \Delta P_i$$

Formel 20: gesamter Druckverlust eines Zyklons

Beim Schlitzeinlauf gilt für den Druckabfall im Einlauf

$$\Delta P_{ek} = 0$$

Der Druckverlust im Abscheideraum  $\Delta P_e$  ist von den Umfangsgeschwindigkeiten und der Reibung abhängig.

$$\Delta P_e = -\lambda_s \cdot \frac{A_R}{0,9\dot{V}} \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot (u_a \cdot u_i)^{3/2} = 55 \text{ Pa}$$

Formel 21: Druckverlust im Abscheideraum

Den größten Anteil am gesamten Druckverlust hat im Allgemeinen der Druckverlust im Tauchrohr. Er wird stark von der Axialgeschwindigkeit im Tauchrohr  $v_i$  beeinflusst, welche aufgrund der Kontinuitätsgleichung leicht zu bestimmen ist.

$$v_i = \frac{\dot{V}_{Luft}}{\pi \cdot r_i^2}$$

$$\Delta P_i = \left[ 2 + 3 \left( \frac{u_i}{v_i} \right)^{4/3} + \left( \frac{u_i}{v_i} \right)^2 \right] \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot v_i^2 = 299 \text{ Pa}$$

Formel 22: Druckverlust im Tauchrohr

Der gesamte Druckverlust ergibt sich folglich zu 354 Pa.

### Abscheidegrad

Im Zyklon können zwei verschiedene Abscheidemechanismen auftreten.

- Abscheidung durch Überschreitung der Grenzbeladung
- Abscheidung im inneren Wirbel

Die Strömung im Zyklon kann nur eine bestimmte Beladung, die Grenzbeladung  $\mu_G$ , tragen. Ist die Eintrittsbeladung höher als die Grenzbeladung so wird der überschüssige Teil der Partikel gleich nach dem Eintritt in den Zyklon abgeschieden. Der Abscheidegrad durch Überschreitung der Grenzbeladung ergibt sich zu

$$\eta_e = 1 - \frac{\mu_G}{\mu_e}$$

Durch die Grenzbeladungsabscheidung wird das Aufgabegut klassiert, sodass das innere Aufgabegut feiner ist. Dieses wird dann der Abscheidung im inneren Wirbel unterworfen. Bei diesem Abscheidemechanismus wird ein Grenzpartikeldurchmesser berechnet, der hauptsächlich von der inneren Umfangsgeschwindigkeit abhängig ist. Der Aufbau einer Zweibett-Wirbelschicht-Versuchsanlage

Verena Sulzgruber BSC

Grenzpartikeldurchmesser legt eine Fraktionsabscheidegradkurve fest, die den Abscheidegrad in Abhängigkeit der Partikelgröße angibt. Der Abscheidegrad für die Abscheidung im inneren Wirbel  $\eta_i$  ist die Summe der jeweiligen Fraktionsabscheidegrade multipliziert mit den Anteilen der Partikel mit der jeweiligen (mittleren) Partikelgröße.

Der Gesamtabscheidegrad ergibt sich additiv zu

$$\eta = 1 - \frac{\mu_G}{\mu_e} + \frac{\mu_G}{\mu_e} \cdot \eta_i$$

**Formel 23: Gesamtabscheidegrad**

Die Grenzbeladung wird wie folgt bestimmt:

$$\mu_G = K_G \cdot \frac{d_e^*}{d_{50,A}} \cdot (10\mu_e)^k$$

**Formel 24: Grenzbeladung**

Bei  $d_e^*$  handelt es sich um die Grenzpartikelgröße, die im äußeren Umlauf der Strömung in Schwebe gehalten wird. Sie ist hauptsächlich von der äußeren Umfangsgeschwindigkeit abhängig und ist desto kleiner je größer die äußere Umfangsgeschwindigkeit ist.  $K_G$  und  $k$  sind staubabhängige Konstanten, für die im vorliegenden Fall gilt [1]:

$$K_G = 0,025$$

$$k = 0,15$$

Durch den mittleren Teilchendurchmesser  $d_{50,A}$  geht auch das Aufgabegut in die Grenzbeladung ein.

Für die oben angenommene Geometrie und Eintrittsbeladung und den in der Versuchsanlage verwendeten Sand sowie den berechneten Luftvolumenstrom ergibt sich die Grenzbeladung zu

$$\mu_G = 2,2 \text{ g/kg}$$

Für den Abscheidegrad aufgrund der Grenzbeladungsabscheidung folgt

$$\eta_e = 0,999$$

Da dieser Abscheidegrad allein bereits hoch genug ist wurde auf eine Berechnung der Abscheidung im inneren Wirbel verzichtet.

## 4.8. Auslegung des Siphons

Beim Siphon handelt es sich um jenen Teil des Rückführzweiges, der für einen stabilen und gleichmäßigen Feststoffrückfluss in das Steigrohr sorgen soll. Er wird als stationäre, blasenbildende Wirbelschicht mit eigener Fluidisierung ausgeführt. In der Mitte jedes Siphons befindet sich eine Umlenkplatte, die dafür sorgt, dass der Sand vom Eintritt in den Siphon zum Austritt einen U-förmigen Weg nehmen muss. Bei der ersten Inbetriebnahme füllt sich der Siphon solange mit Sand bis die Oberfläche der stationären Wirbelschicht die Höhe des Auslaufs erreicht. Ab dann fließt immer so viel Sand aus der Wirbelschicht im Siphon aus wie von oben nachkommt.

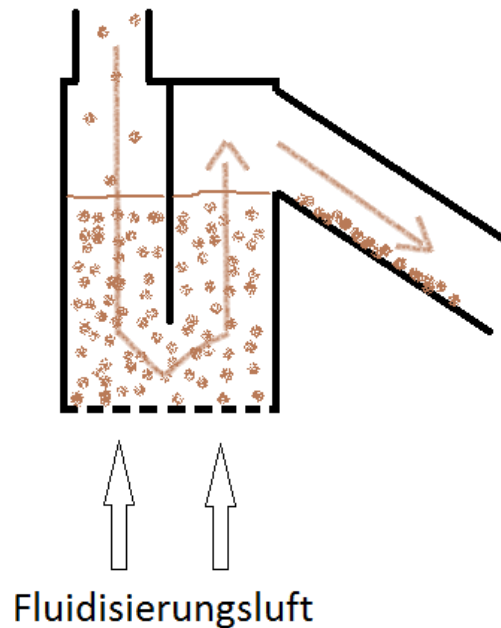


Abbildung 17: Funktionsweise Siphon

Bei industriellen Anwendungen mit verschiedenen Fluidisierungsmedien in miteinander verbundenen Wirbelschichten erfüllt der Siphon die entscheidende Rolle der Gasdichtung. Der Siphon selbst wird dabei mit Inertgas fluidisiert. Die Fluidisierung muss so eingestellt werden, dass kein Fluidisierungsgas aus dem Steigrohr, in das der Rückführzweig mündet, durch den Siphon in die vor dem Siphon liegenden Rohre strömen kann.

Um die Aufgabe der Gasdichtung erfüllen zu können muss der Siphon so ausgelegt werden, dass sein Druckverlust höher ist als der Druckverlust der restlichen Anlage. Dadurch wird erreicht, dass der Boden des Siphons der Punkt der Anlage mit dem höchsten Druck ist, was sicherstellt, dass immer alle Gase von dort wegströmen werden.

Der anzustrebende Druckverlust im Siphon entspricht daher der Summe der Druckverluste im Steigrohr und im Zyklon multipliziert mit einem Sicherheitsfaktor.

$$\Delta P_{Siphon} = 1,3 \cdot (\Delta P_{Steigrohr} + \Delta P_{Zyklon}) = 3249 \text{ Pa}$$

Da sich im Siphon eine Wirbelschicht befindet gilt für den Druckverlust selbstverständlich:

$$\Delta P_B = H_L \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g$$

Da der Druckverlust und die Stoffdaten vorgegeben sind, muss die Höhe der Schüttung am Lockerungspunkt angepasst werden.

$$H_L = \frac{\Delta P_B}{(1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g} = 0,22 \text{ m}$$

Aufgrund der Annahme, dass sich 40% des eingefüllten Sandes, was einem Schüttvolumen von  $0,00225 \text{ m}^3$  entspricht, im Siphon befinden, lässt sich die Grundfläche des Siphons berechnen. Der Siphon soll rechteckig mit der Tiefe  $a$  und doppelt so großer Breite ausgeführt werden.



$$a \cdot 2a = \frac{\text{Schüttvolumen}}{H_L}$$

$$a = 70 \text{ mm}$$

Die Höhe des Siphons muss etwas größer als die Höhe der Schüttung am Lockerungspunkt gewählt werden, weil sich das Bett in der Wirbelschicht abhängig von der Fluidisierungsgeschwindigkeit ausdehnt.

#### 4.9. Siebböden

Der Boden einer Wirbelschicht hat die Aufgabe das Fluidisierungsmedium gleichmäßig über den gesamten Querschnitt zu verteilen. Gleichzeitig soll in der Versuchsanlage beim Stillstand der Wirbelschicht das Wirbelgut nicht durch den Boden in den Windkasten fallen. In der Praxis haben sich für Versuchsanlagen Siebböden aufgrund ihrer einfachen Bauweise bewährt. In großen Industrieanlagen werden Düsenböden und die baulich sehr ähnlichen Glockenböden verwendet. Ein Sonderfall ist der offene Düsenboden, bei dem auch während des Betriebes Steine und zu große Partikel die Wirbelschicht durch den Boden nach unten verlassen können.

Je größer der Druckabfall über den Boden ist, desto besser ist die Verteilung des Fluidisierungsmediums. Um mit Sicherheit eine ausreichende Verteilung zu erreichen sollte folgender Druckabfall angestrebt werden.

$$\Delta P_D = 0,3 \cdot \Delta P_B$$

**Formel 25: angestrebter Druckverlust des Siebbodens**

Der Druckabfall eines Siebbodens ist von der Lochgröße und Lochanzahl abhängig. Er wird aus der Luftgeschwindigkeit im Loch des Bodens  $u_{Loch}$  und aus einem Widerstandskoeffizienten berechnet.

$$\Delta P_D = \xi \cdot \frac{\rho_g \cdot u_{Loch}^2}{2}$$

**Formel 26: Druckverlust des Siebbodens**

Der Widerstandskoeffizient ist von der Reynoldszahl und der Lochgeometrie abhängig und wird [15] entnommen. Nachdem  $u_{Loch}$  aus dem erforderlichen Druckabfall bestimmt wurde bildet man das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit im Loch und der Leerrohrgeschwindigkeit in der Wirbelschicht. Dieses entspricht dem Verhältnis der Querschnittsfläche der Wirbelschicht zur Gesamtfläche aller Löcher.

$$\frac{u_{Loch}}{u_0} = \frac{A}{N \cdot A_{Loch}}$$

#### Siebboden im Siphon

Der angestrebte Druckabfall am Siebboden des Siphon errechnet sich zu:

$$\Delta P_D = 0,3 \cdot 3249 = 974,7 \text{ Pa}$$

Es folgt:

$$u_{Loch} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_D}{\xi \cdot \rho_g}} = 28,4 \text{ m/s}$$

Der Lochdurchmesser richtet sich nach der Korngröße. Für den verwendeten Sand empfiehlt sich ein Lochdurchmesser von 1 mm. Daraus ergibt sich die Lochanzahl.

$$A_{Loch} = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}$$

$$N = \frac{A \cdot u_0}{A_{Loch} \cdot u_{Loch}} \cong 21$$

### Siebboden im Steigrohr

Der erforderliche Druckabfall am Siebboden des Steigrohrs beträgt:

$$\Delta P_D = 0,3 \cdot 2200 = 660 \text{ Pa}$$

Für den Siebboden des Steigrohrs gilt:

$$u_{Loch} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_D}{\xi \cdot \rho_g}} = 20,2 \text{ m/s}$$

Da der Lochdurchmesser von der Korngröße des Sandes abhängt, sollte man auch im Steigrohr Löcher mit einem Durchmesser von maximal 1 mm verwenden. Mit diesem Lochdurchmesser würden 4420 Löcher benötigt. Der Lochboden für die Versuchsanlage soll händisch gebohrt werden, 4420 Löcher sind daher unmöglich, weil die Herstellung des Siebbodens zu aufwändig wäre. Für den Lochdurchmesser des Siebbodens im Steigrohr wird aus diesem Grund 5 mm gewählt. Die Lochanzahl wird wie oben berechnet.

$$N = \frac{A \cdot u_0}{A_{Loch} \cdot u_{Loch}} \cong 177$$

# 5. Planung der Messtechnik

## 5.1. Druckmessungen

Die Messung der Druckverluste des Kaltmodells ist ein zentrales Ziel der geplanten Forschung. Einerseits haben Druckverluste in industriellen Anlagen einen hohen Einfluss auf die Betriebskosten, da hohe Druckverluste mit hohem Energieaufwand für Gebläse einhergehen. Andererseits geben sie Aufschluss darüber, welches Regime in welchem Bereich des Steigrohrs und im Siphon vorherrscht. Außerdem ist der Vergleich der im Voraus berechneten Druckverluste mit den real auftretenden von Interesse.

### Anordnung der Druckmessstellen

Um die Druckverluste aller Anlagenteile messen zu können, sind auf jeder Anlagenhälfte 15 Druckmessstellen notwendig, die wie in Abbildung 18 dargestellt angeordnet werden.

- Zur Durchflussmessung mittels Blende vor und nach der Blende (Nummer 1 und 2)
- Druckverlust des Lochbodens im Steigrohr (Nummer 3 und 4)
- Druckverlauf im Steigrohr (Nummer 4 bis 9)
- Druckverlust im Zyklon (Nummer 10 bis 12)
- Druckdifferenz im Siphon (Nummer 12, 13 und 15)
- Druckverlust des Lochbodens im Siphon (Nummer 13 und 14)

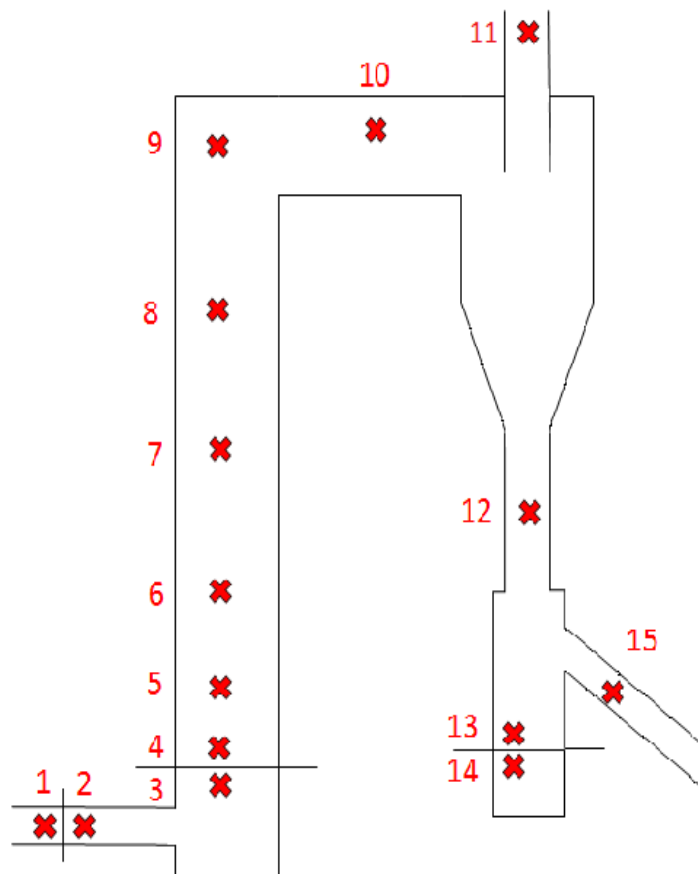


Abbildung 18: Anordnung der Druckmessungen

## Durchführung der Druckmessungen

Die jeweiligen Differenzdrücke zwischen zwei benachbarten Messstellen sollen aus Kostengründen mittels U-Rohr-Manometer gemessen werden. Zur besseren Übersicht werden alle U-Rohre nebeneinander auf ein mit Millimeterpapier und Maßbändern beklebtes Brett montiert. Wegen der einfacheren Fertigung werden nur gerade Glasrohre verwendet. Jeweils zwei Rohre werden bei der Montage mit einem Schlauch zu einem U-Rohr-Manometer verbunden. Um möglichst wenig Platz zu brauchen werden die U-Rohre, bei denen geringe Druckdifferenzen erwartet werden, kürzer ausgeführt. In Abbildung 19 wurden die U-Rohre den Messstellen zugeordnet. A und B stehen dabei jeweils für eine Anlagenhälfte.

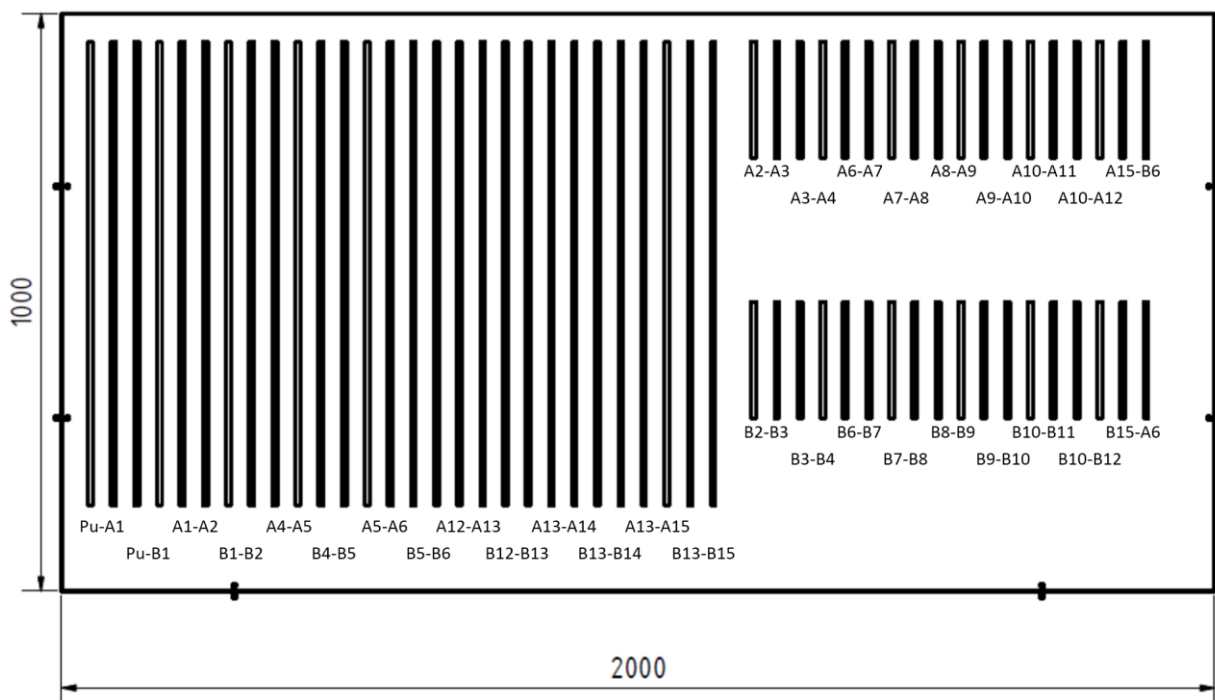


Abbildung 19: Anordnung der U-Rohr-Manometer

## 5.2. Durchflussmessungen

Um die genaue Fluidisierungsgeschwindigkeit im Steigrohr und im Siphon bestimmen zu können muss der Luftdurchfluss in die Windkästen gemessen werden. Der Luftdurchfluss für das Steigrohr wird mit einer Blende in der Zuleitung bestimmt. Der Luftdurchfluss für den Siphon ist wesentlich geringer und wird daher mit einem Schwebekörperdurchflussmesser gemessen.

### Blendenmessung laut EN ISO 5167-2

Die Durchflussmessung mittels Blende beruht auf einer durch die Blende hervorgerufenen Querschnittsverengung der durchströmten Rohrleitung. Die Rohrleitung muss dabei gerade und völdurchströmt sein und vor und nach der Blende müssen ausreichend lange ungestörte Ein- und Auslaufstrecken vorhanden sein. Durch die Querschnittsveränderung tritt eine Druckdifferenz zwischen Blendeneinlauf und Auslauf auf, die, abgesehen von geometrischen Gegebenheiten, nur vom Durchfluss abhängig ist.

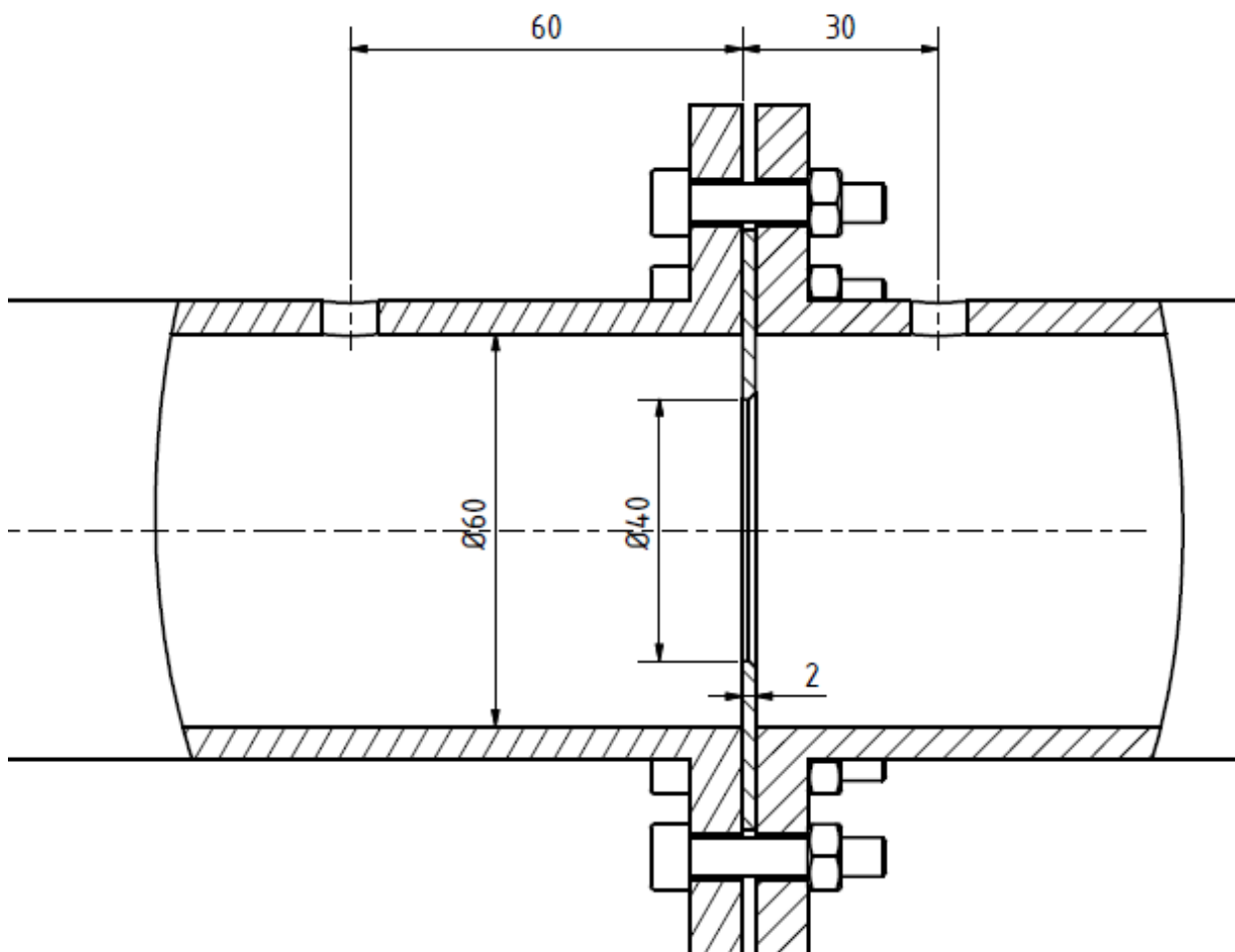
Bei der Berechnung des Durchflusses aus der Druckdifferenz wird nach der gültigen Norm EN ISO 5167-2 vorgegangen. Für den Massendurchfluss gilt demnach:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \delta^4}} \cdot e \cdot \frac{d^2 \pi}{4} \cdot \sqrt{2 \Delta P \rho_1}$$

**Formel 27: Massendurchfluss durch eine Blende**

Darin ist  $\delta$  das Verhältnis vom Blendendurchmesser zum Rohrdurchmesser. Der Durchflusskoeffizient  $C$  und die Expansionszahl  $e$  werden nach in der Norm angegebenen empirischen Formeln berechnet. Dabei hängt der Durchflusskoeffizient im Wesentlichen von der Geometrie ab und die Expansionszahl wird ebenfalls von der Geometrie und vom Verhältnis der Drücke vor und nach der Blende bestimmt.

Für die Druckentnahme werden in der Norm 3 Möglichkeiten angeboten. Es wurde die D- und D/2-Druckentnahme gewählt, bei der der Abstand von der Druckentnahme vor der Blende zur Blende gleich dem Rohrdurchmesser ist und der Abstand nach der Blende dem halben Durchmesser entsprechen muss. Die in Abbildung 20 dargestellte Blende wurde den konkreten Anforderungen der Anlage angepasst und erfüllt alle Vorgaben aus der Norm.



**Abbildung 20: Blende**

### 5.3. Temperaturmessungen

Die Dichte der Luft, die sowohl die Blendenmessung als auch die Messung mittels Durchflussschwebekörpermessgerät beeinflusst, ist temperaturabhängig. Um aus den Messwerten die tatsächlichen Massenströme bestimmen zu können, muss daher auch die Temperatur gemessen werden. In der Versuchsanlage ist die Messung der Temperatur an vier Messstellen notwendig und zwar in beiden Luftzuleitungen zu den zwei Steigrohren und in den beiden Windkästen der Siphone.

### 5.4. Feststoffumlauf

Ein besonders interessanter Wert in einer Mehrbettwirbelschicht ist der Feststoffumlauf, der für eine bestehende Anlage durch Veränderung der Fluidisierungsgeschwindigkeit im Steigrohr in einem bestimmten Stabilitätsbereich variiert werden kann. Der Feststoffumlauf kann nicht exakt berechnet werden und auch Näherungsverfahren liefern meist nur unzureichende Ergebnisse. Er lässt sich daher auch für die Versuchsanlage schwer vorhersagen.

Auch messtechnisch ist der Feststoffumlauf kaum zu erfassen. Die einzige praktisch und finanziell mögliche Methode ist die Messung mittels Absperrklappe. Dabei wird der in einer bestimmten Zeit umlaufende Sand auf einer geschlossenen Absperrklappe im Fallrohr unterhalb des Zyklon gesammelt und dessen Menge optisch näherungsweise bestimmt. Die Absperrklappe wird zu einem bestimmten Zeitpunkt rasch geschlossen und für einige Sekunden geschlossen gehalten. Der sich anhäufende Sand sollte zur besseren optischen Bestimmung der Sandmasse, das heißt Messung der Höhe und des Winkels des Schüttkegels und Berechnung des Volumens, mit einer Kamera gefilmt werden. Die Genauigkeit dieser Messmethode ist aus zwei Gründen nicht sehr hoch.

- Die optische Bestimmung der Sandmenge ist nicht eindeutig.
- Die Messung beeinflusst sich selbst, weil der Sand, der auf der Absperrklappe liegen bleibt, dem System nicht mehr zur Verfügung steht und sich der Feststoffumlauf längerfristig durch die Messung verringert.

# 6. Konstruktion

---

## 6.1. Allgemeines

Die gesamte Versuchsanlage soll aus Polymethylmetacrylat, umgangssprachlich Plexiglas genannt, gefertigt werden. Der größte Vorteil bei der Verwendung von Plexiglas ist, dass die Anlage dadurch durchsichtig ist, sodass man die verschiedenen Regime in der Wirbelschicht und die Verteilung des Sandes auch optisch beurteilen kann. Auch die Funktionsweise des Zyklons kann mit einer Anlage aus Plexiglas anschaulich erklärt werden. Die Messung des Feststoffumlaufes mit Hilfe einer einfachen Absperrklappe ist nur in einer durchsichtigen Anlage möglich. Ein weiterer Vorteil bei der Fertigung aus Plexiglas ist, dass dieses leicht zu bearbeiten ist und ohne Probleme gesägt und gebohrt werden kann. Zudem ist Plexiglas ein kostengünstiger Rohstoff, der leicht zu beschaffen ist.

Plexiglas wird in Platten und Rohren verkauft. Die Anlagenteile werden daher aus einzelnen Platten und Rohren zusammengeklebt. Für alle ebenen Teile werden Platten mit einer Dicke von 8 mm verwendet und alle Rohre haben eine Wandstärke von 5 mm. Zum Kleben wird Plexiglasleber verwendet, der die Platten miteinander verschmilzt.

Für die Druck- und Temperaturmessungen, die an allen Anlagenteilen durchgeführt werden, werden 1/4-Zoll Gewinde gebohrt, in die mit Hilfe eines Verbindungselements Schläuche eingeschraubt werden können. Diese Verbindungselemente finden sich in den meisten Zeichnungen und 3D-Darstellungen.

Von allen Anlagenteilen und deren Zusammenstellung wurden 3D-Modelle in einem 3D-CAD-Programm erstellt.

## 6.2. Steigrohr

Das Steigrohr ist mit einer Gesamthöhe von annähernd 2,3 m der größte und aufwendigste Teil der Anlage. Der Siebboden trennt den Windkasten von der Wirbelschicht. Das Rohr zur Luftzufuhr muss relativ lang sein, um die ungestörte Ein- und Auslaufstrecke für die Blendenmessung zu gewährleisten. Am oberen Ende des Steigrohrs führt ein rechteckiger Kanal zum Zyklon.

Das Steigrohr wurde konstruktiv in drei Teile geteilt. Das soll einerseits zu einer höheren Stabilität führen und andererseits ergibt sich die Möglichkeit zu einem späteren Zeitpunkt einen der Teile auszutauschen, damit weitere Versuchsanordnungen zum Beispiel mit Wärmeübergang verwirklicht werden können.

Da die Anlage eventuell zu einem späteren Zeitpunkt umgebaut werden soll wurden im untersten Teil des Steigrohrs Löcher vorgesehen, an denen man später die für das geänderte Anlagendesign notwendigen Rohre anschließen kann. Diese Löcher werden mit angeschraubten Deckeln verschlossen.

In Abbildung 21 und Abbildung 22 erkennt man neben den Deckeln, die für den eventuellen Umbau abgenommen werden können, noch den nach oben offenen Stutzen für den Anschluss des Rückführzweiges und einen Einfüllstutzen, sowie einige Pratzen, die der Montage dienen.

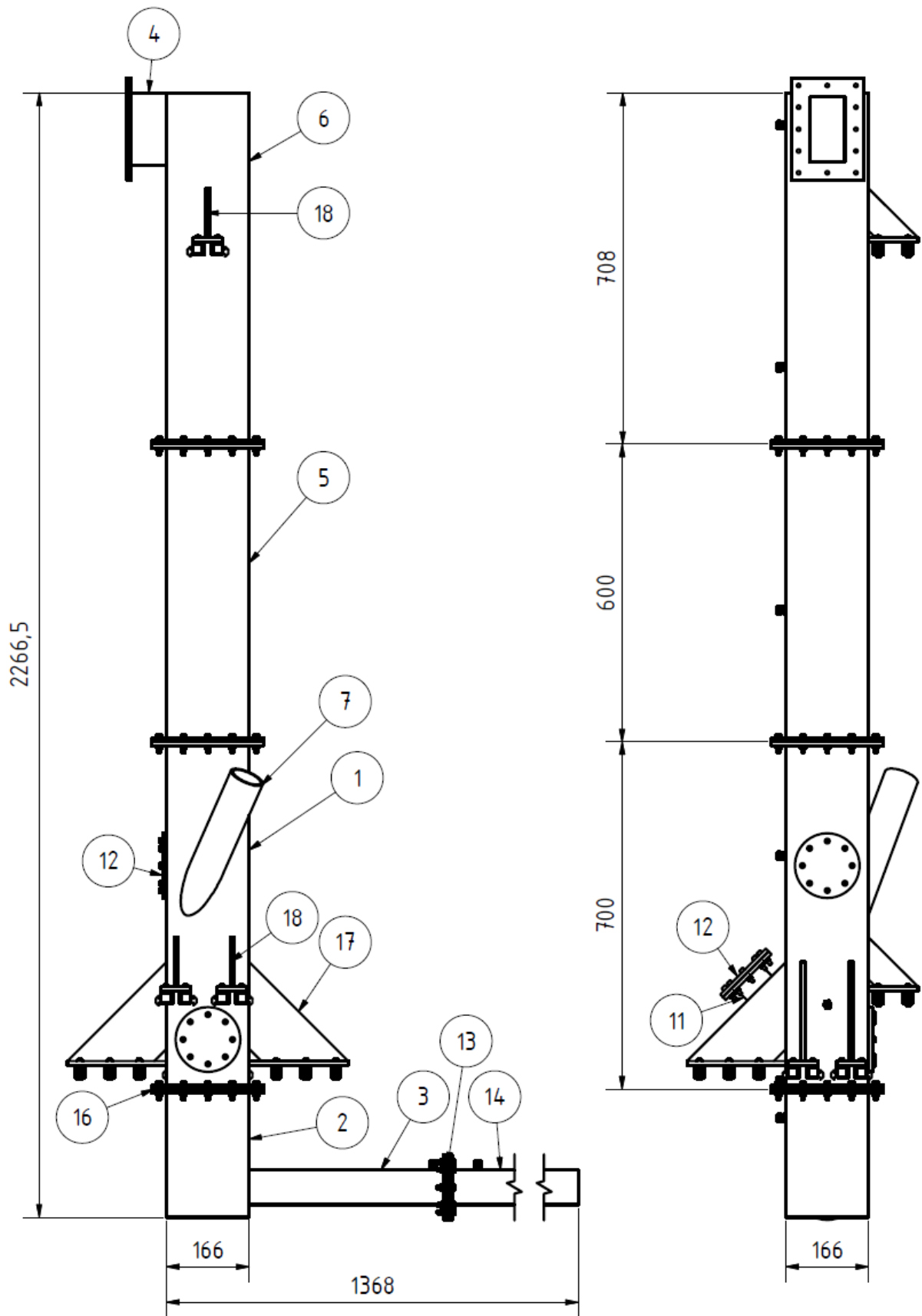


Abbildung 21: Zusammenstellungszeichnung des Steigrohrs



<b>Wirbelschicht</b>				
Nummer	Bezeichnung	Anzahl	Material	Anmerkung
1	Wirbelschicht unten	1	PMMA	
2	Windkasten Wirbelschicht	1	PMMA	
3	Luftzufuhr Wirbelschicht nach der Blende	1	PMMA	
4	Verbindung zum Zyklon	1	PMMA	
5	Wirbelschicht Mitte	1	PMMA	
6	Wirbelschicht oben	1	PMMA	
7	Zuleitung Wirbelschicht	1	PMMA	
8	Schraube M6 x 30	64	Stahl	
9	Sechskantmutter M6	80	Stahl	
10	Festo Schlaucheinschraubung	9		
11	Einfüllstutzen	1	PMMA	
12	Deckel	3	PMMA	
13	Blende	1	Metall	
14	Luftzufuhr Wirbelschicht vor der Blende	1	PMMA	
15	Schraube M6 x 25	16	Stahl	
16	Sieb Zusammenstellung	1	Metall	
17	Pratze groß	6	PMMA	
18	Pratze klein	3	PMMA	
19	Scheibe für M6	80	Stahl	in der Zeichnung nicht vorhanden
20	Anschluss zur Temperaturmessung	1		mit 1/8 Zoll Gewinde

Tabelle 4: Stückliste Steigrohr

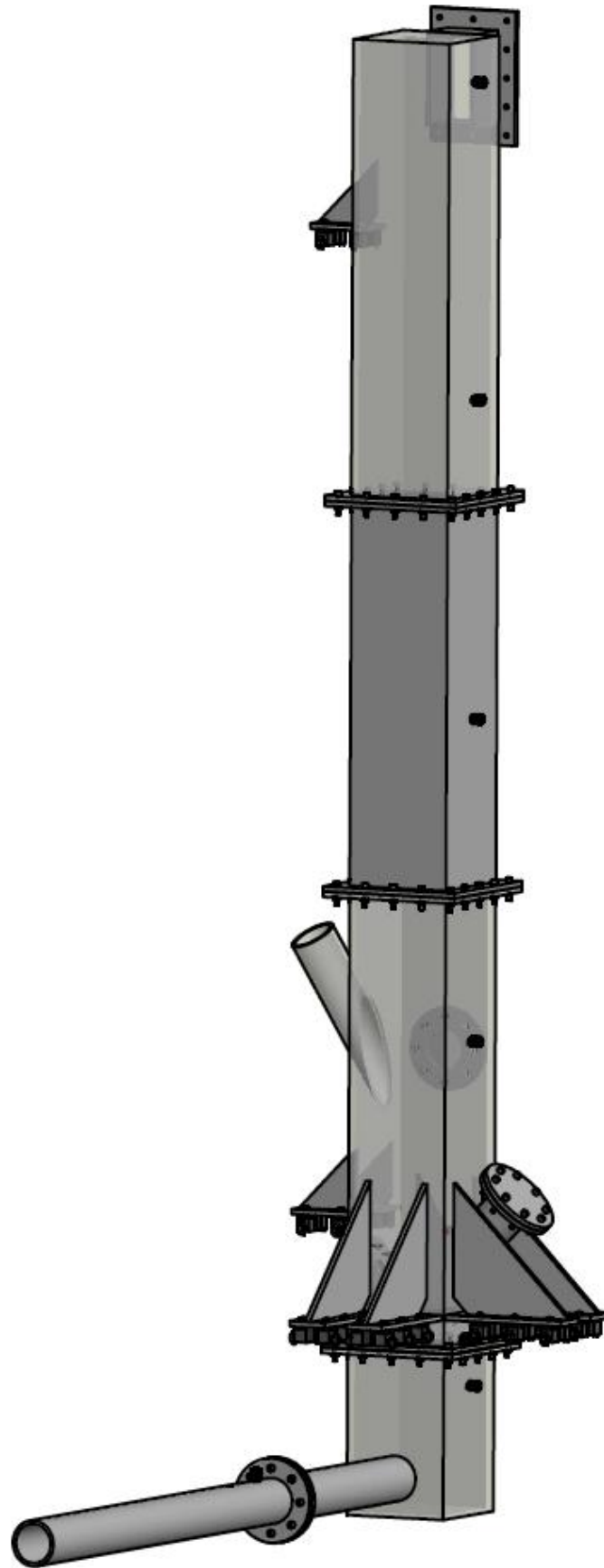


Abbildung 22: 3D-Darstellung des Steigrohrs

### 6.3. Siebboden im Steigrohr

Wie oben beschrieben ist es aus fertigungstechnischen Gründen notwendig, dass der Siebboden im Steigrohr Löcher mit einem Durchmesser von 5 mm hat. Damit der Sand im Stillstand nicht durchfallen kann muss über dem Siebboden noch ein feinmaschiges Sieb angebracht werden. Es wurde eine quadratische Lochanordnung mit 16 mal 16 Löchern gewählt. Das ergibt eine höhere Lochanzahl als oben berechnet um den durch das feinmaschige Sieb hervorgerufenen zusätzlichen Druckverlust auszugleichen.

Der Siebboden wird in der Anlage befestigt indem er in den Flansch zwischen dem Windkasten und dem Steigrohr eingespannt wird. Dieser Einbau ist für das feinmaschige Sieb unmöglich, weil der Flansch sonst nicht abgedichtet werden kann. Das feinmaschige Sieb wird daher, wie in Abbildung 24 ersichtlich, innerhalb des Flansches mit einem zusätzlichen Rahmen auf dem Siebboden befestigt. Der Rahmen wird möglichst schmal und flach aus Metall ausgeführt.

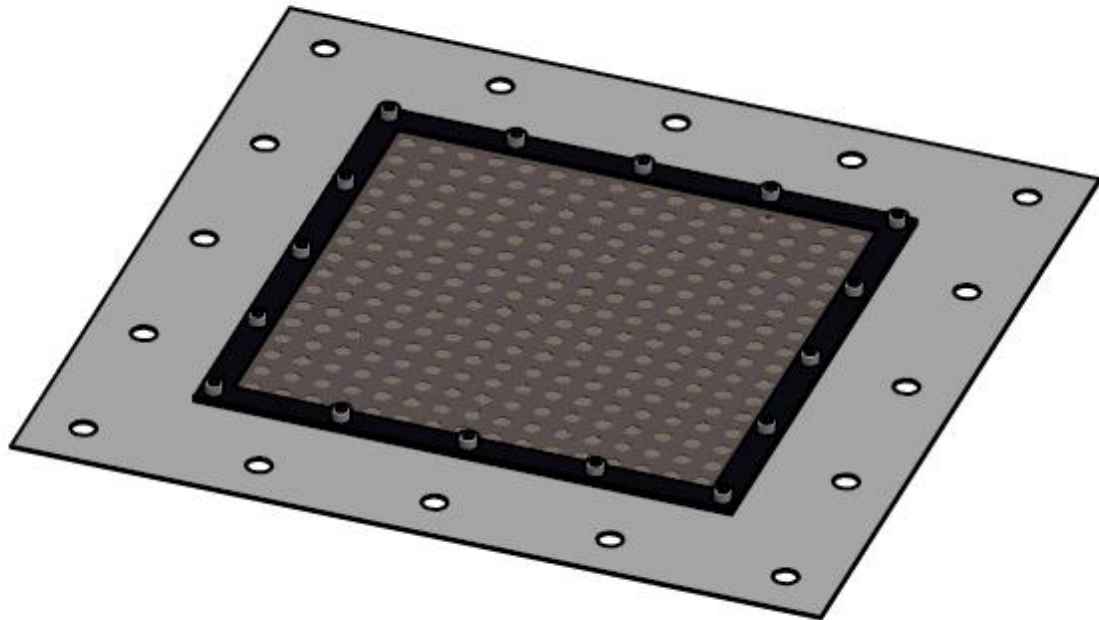


Abbildung 23: 3D- Darstellung des Siebbodens im Steigrohr

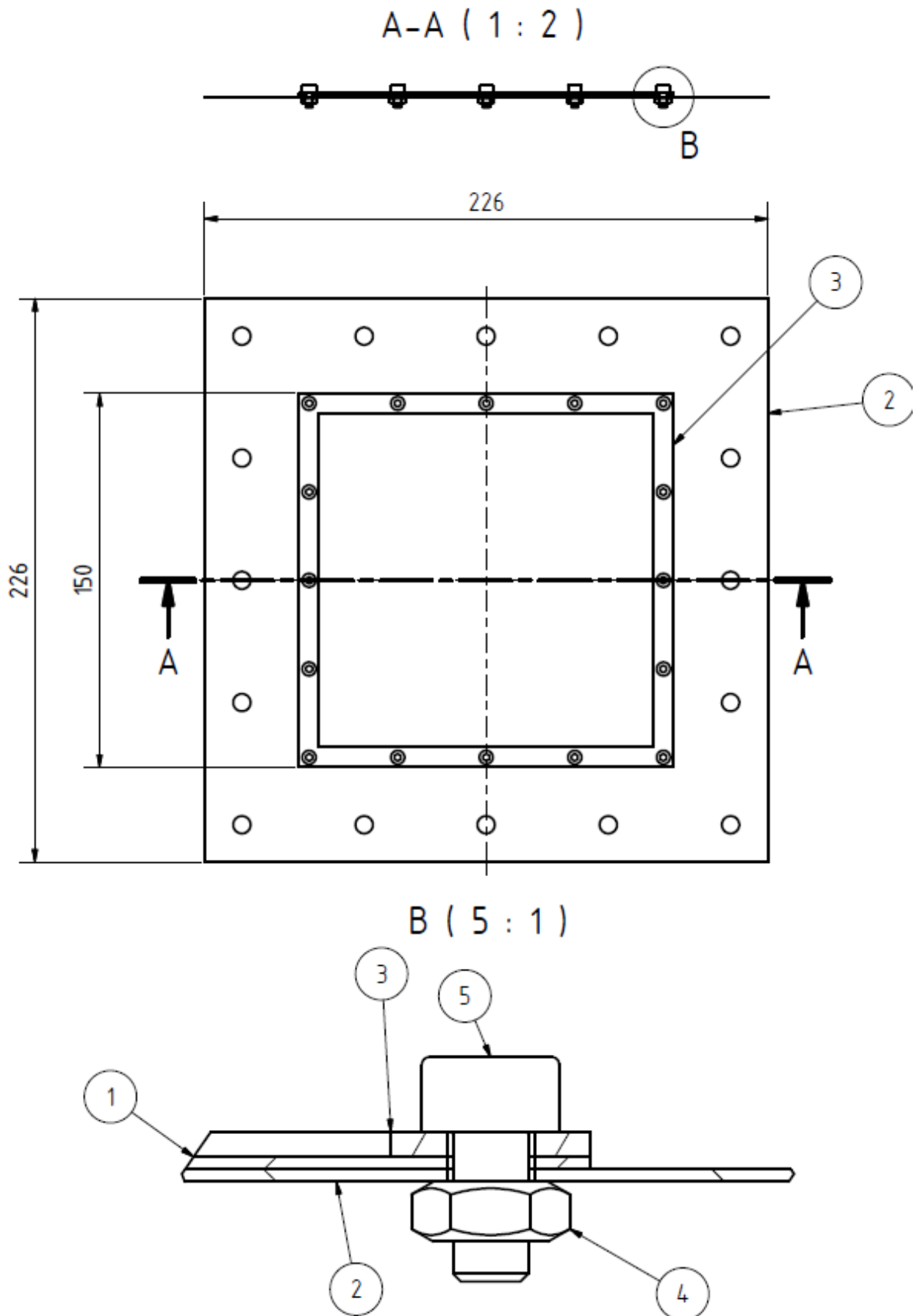


Abbildung 24: Zusammenstellungszeichnung Siebboden

<b>Siebboden</b>				
Nummer	Bezeichnung	Anzahl	Material	Anmerkung
1	Sieb	1	Metall	
2	Siebboden	1	Metall	
3	Rahmen	1	Metall	
4	Sechskantmutter M3	16	Stahl	
5	Schraube M3 x 6	16	Stahl	
6	Beilagscheibe für M3	16	Stahl	

Tabelle 5: Stückliste Siebboden

#### 6.4. Zyklon

Standardmäßig werden aus Plexiglas nur Platten und Rohre gefertigt. Der konische Teil des Zyklon muss daher aus Metall hergestellt und an die übrigen Plexiglasteile geklebt oder angeflanscht werden.

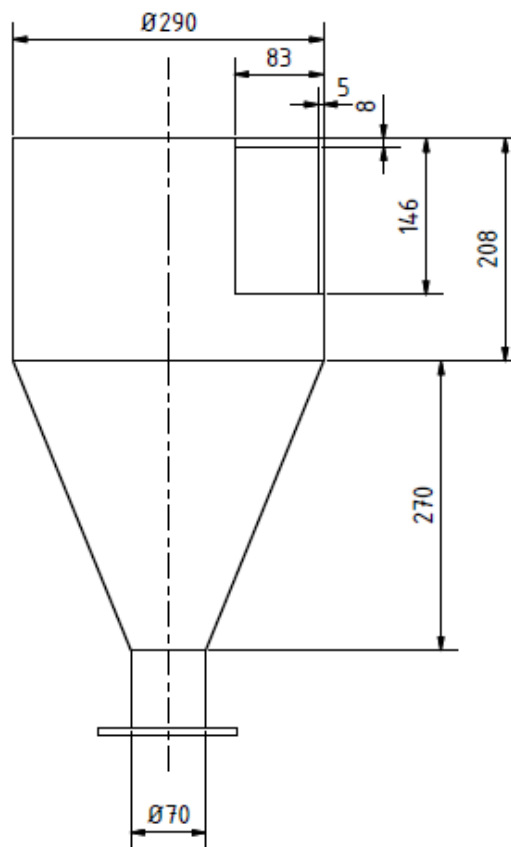


Abbildung 25: Mantel des Zyklon

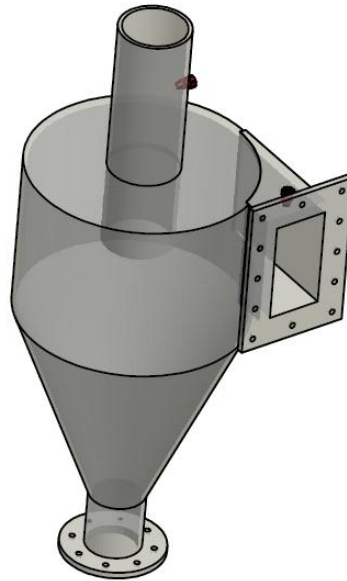


Abbildung 26: 3D-Darstellung des Zyklon

## 6.5. Siphon

Wie im Steigrohr wird auch im Siphon der Siebboden im Flansch zwischen dem Windkasten und dem Teil, in dem sich die Wirbelschicht befindet, eingespannt. Aufgrund der kleinen Löcher mit 1 mm Durchmesser ist kein zusätzliches Sieb nötig.

Die Luftzufuhr in den Windkasten erfolgt wegen der geringen Luftmengen durch einen Schlauch, der mittels eines Verbindungsstücks, wie es auch für die Druckmessungen verwendet wird, befestigt wird.

Betrachtet man den Siphon so wie er in Abbildung 28 dargestellt ist, fällt der Sand von oben in den linken Teil des Siphons. Nachdem der Sand die Wirbelschicht passiert hat, verlässt er den Siphon durch das schräge Rohr auf der rechten Seite. Dieses Rohr ist gegenüber der Waagrechten um  $60^\circ$  geneigt.

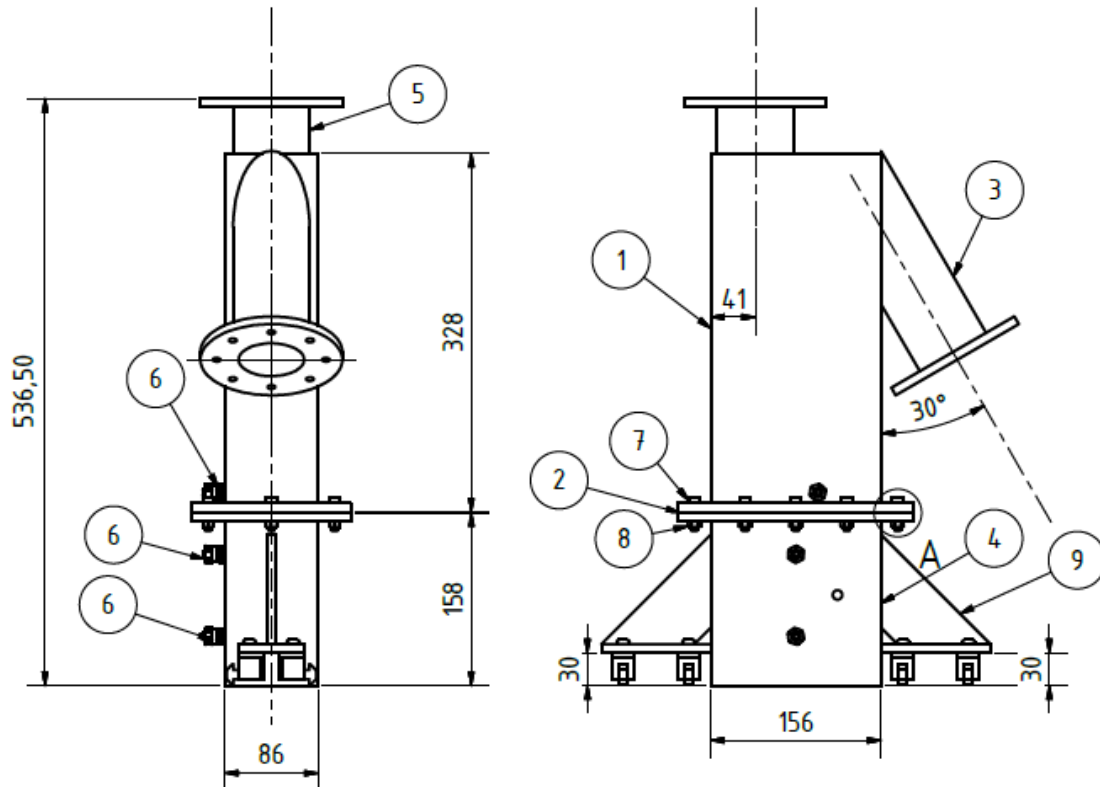


Abbildung 27: Zusammenstellungszeichnung Siphon

Siphon				
Nummer	Bezeichnung	Anzahl	Material	Anmerkung
1	Siphon	1	PMMA	
2	Sieb Siphon	1	Metall	
3	Ableitung Siphon	1	PMMA	
4	Windkasten Siphon	1	PMMA	
5	Zuleitung Siphon	1	PMMA	
6	Festo Schlaucheinschraubung	3		
7	Schraube M6 x 25	12	Stahl	
8	Sechskantmutter M6	12	Stahl	
9	Pratze klein	2	PMMA	
10	Scheibe für M6	12	Stahl	in der Zeichnung nicht vorhanden
11	Anschluss zur Temperaturmessung	1		mit 1/8 Zoll Gewinde

Tabelle 6: Stückliste Siphon

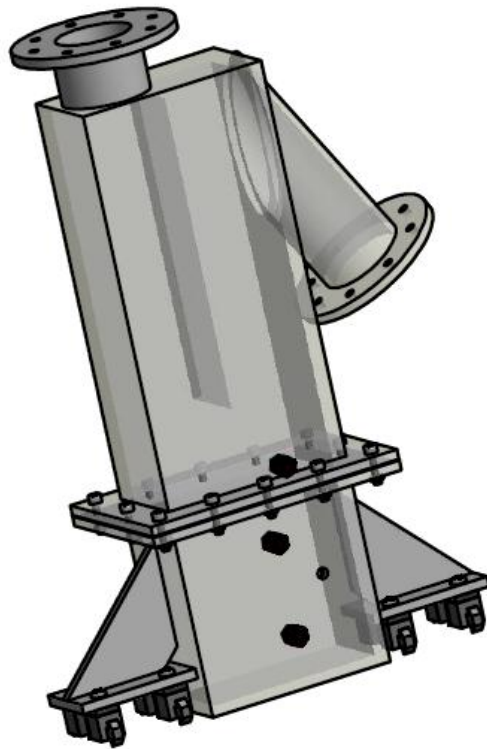


Abbildung 28: 3D-Darstellung Siphon

### Siebboden im Siphon

Um den nötigen Druckverlust zu erreichen benötigt man im Sieb im Siphon wie oben berechnet wurde 21 Löcher mit je 1 mm Durchmesser. Aufgrund der rechteckigen Form des Siphons bietet sich eine rechteckige Anordnung mit 3 mal 7 Löchern an.

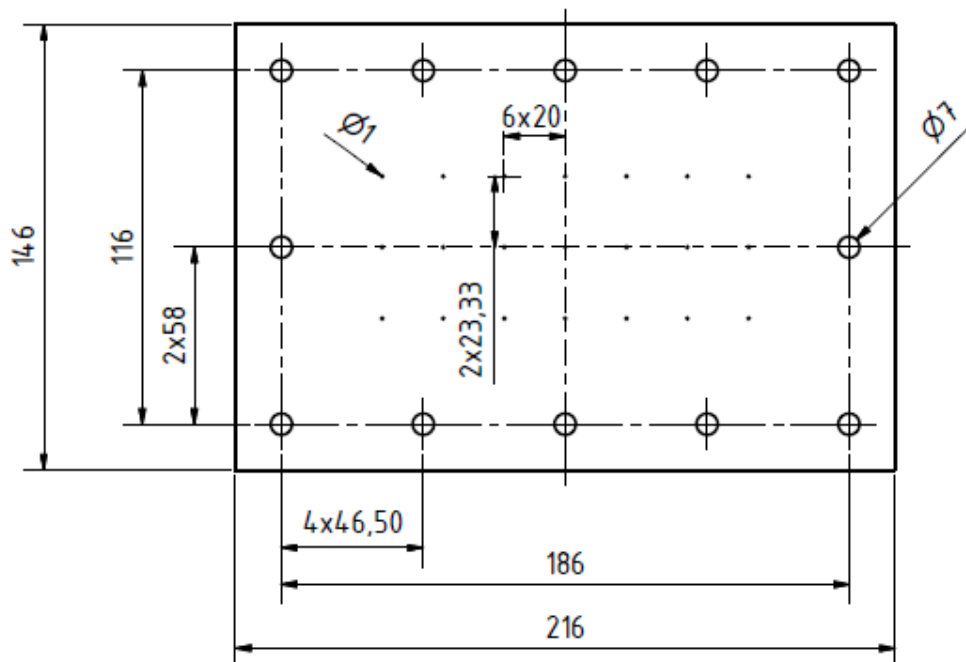


Abbildung 29: Siebboden im Siphon



## 6.6. Rückleitung

Die Rückleitung verbindet den Siphon der ersten Wirbelschicht mit dem Steigrohr der zweiten und umgekehrt. Die Rückleitung wird nicht zur Gänze aus Plexiglas gefertigt. Auf einer Länge von circa 10 cm wird das starre Plexiglasrohr durch einen flexiblen Schlauch, in Abbildung 30 rot dargestellt, aus Kunststoff ersetzt. Dieser Schlauch soll alle eventuell beim Zuschneiden der Teile oder beim Zusammenbau entstandenen Abweichungen von den geplanten Abmessungen ausgleichen. Bei einer fixen Verschraubung aller Teile würden hohe Spannungen entstehen, weil es kaum möglich ist alle geplanten Längen und Winkel genau einzuhalten. Der Schlauch wird über das Ende der Rückleitung und über das Ende des Stützens am Steigrohr gezogen und auf beiden Seiten mit einer Schlauchklemme befestigt. Wird ein Schlauch aus ausreichend weichem und flexiblem Material verwendet, kann eine Abweichung von mehreren Millimetern ausgeglichen werden.

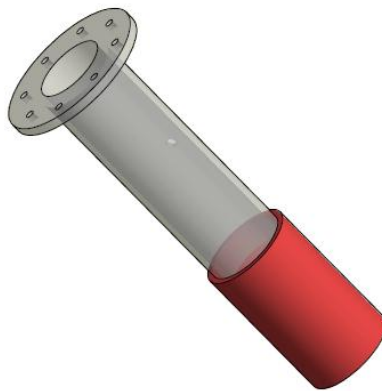


Abbildung 30: 3D-Darstellung der Rückleitung mit Schlauchstück

## 6.7. Zusammenbau der gesamten Anlage

Die einzelnen Anlagenteile werden an den entsprechenden Flanschen zusammengeschraubt. Alle Flansche werden dabei mit herkömmlichen Gummidichtungen abgedichtet. Die gesamte Anlage benötigt eine Grundfläche von circa 2,6 m mal 1 m und ist 2,5 m hoch.

Betrachtet man Abbildung 31, Abbildung 32 und Abbildung 33 fällt der nicht rechtwinkelige Zusammenbau der einzelnen Teile auf. Der Anschluss der Rückleitung an das Steigrohr unter einem Winkel von  $40^\circ$  (gut erkennbar in Abbildung 31) ist für die Funktion der Versuchsanlage nicht nötig und erscheint daher auf den ersten Blick unnötig kompliziert und aufwändig. Der Grund für diesen Zusammenbau liegt in dem möglichen Umbau der Anlage, bei dem die beiden Steigrohre eventuell mit einem zusätzlichen Siphon verbunden werden sollen. Dafür müssen die beiden Steigrohre in einem bestimmten Abstand parallel nebeneinander stehen. Ist der Abstand zu groß, wäre der Weg, den der Sand zurücklegen muss, um von einer Wirbelschicht in die andere zu gelangen, zu lang. Stehen die Steigrohre zu nahe beieinander bleibt nicht ausreichend Platz für einen zusätzlichen Siphon. Der Bereich, in dem der Siphon eingebaut werden kann, wurde in Abbildung 31 und Abbildung 33 mit einem blauen Rechteck markiert.

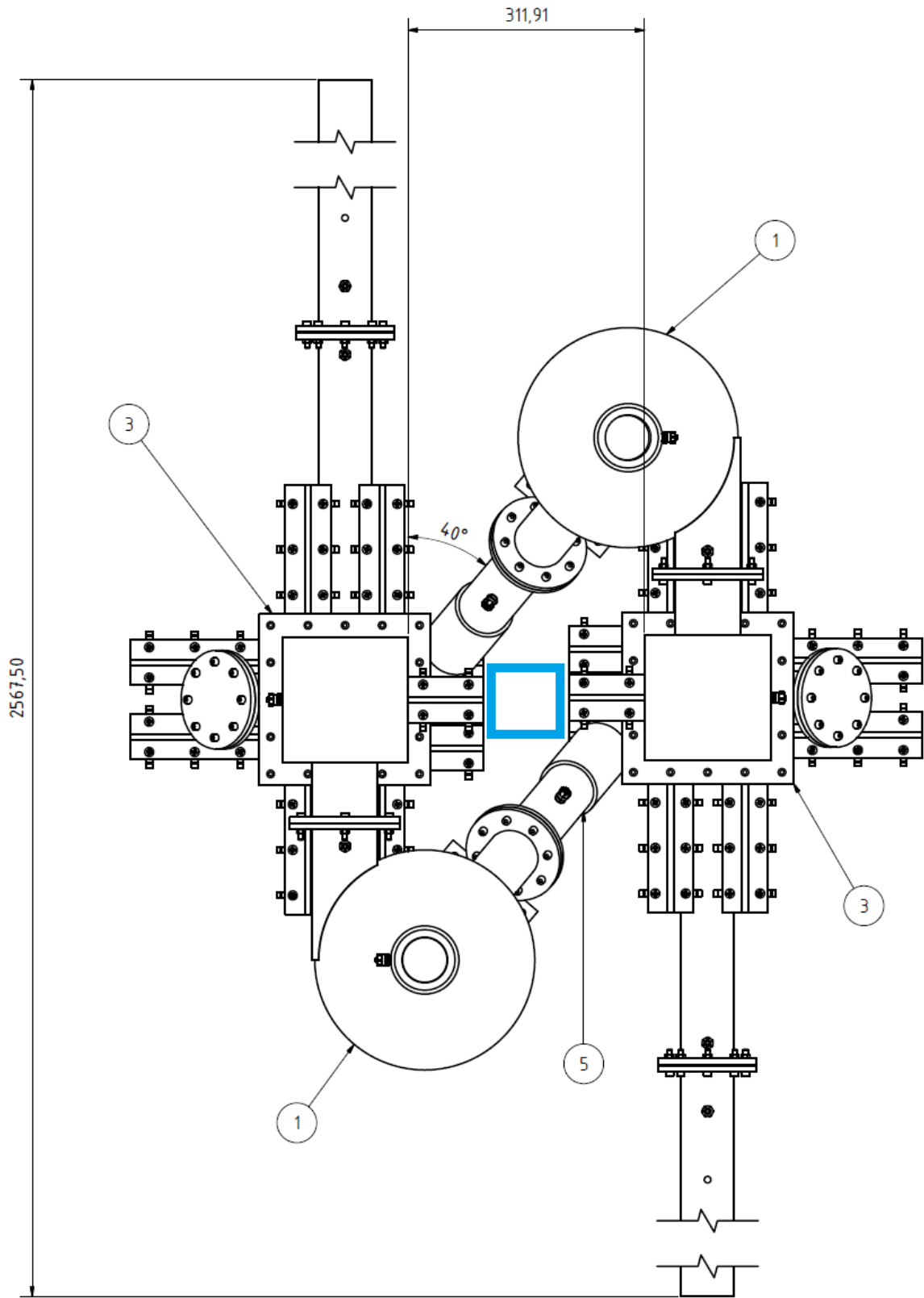


Abbildung 31: Zusammenstellungszeichnung der gesamten Anlage von oben

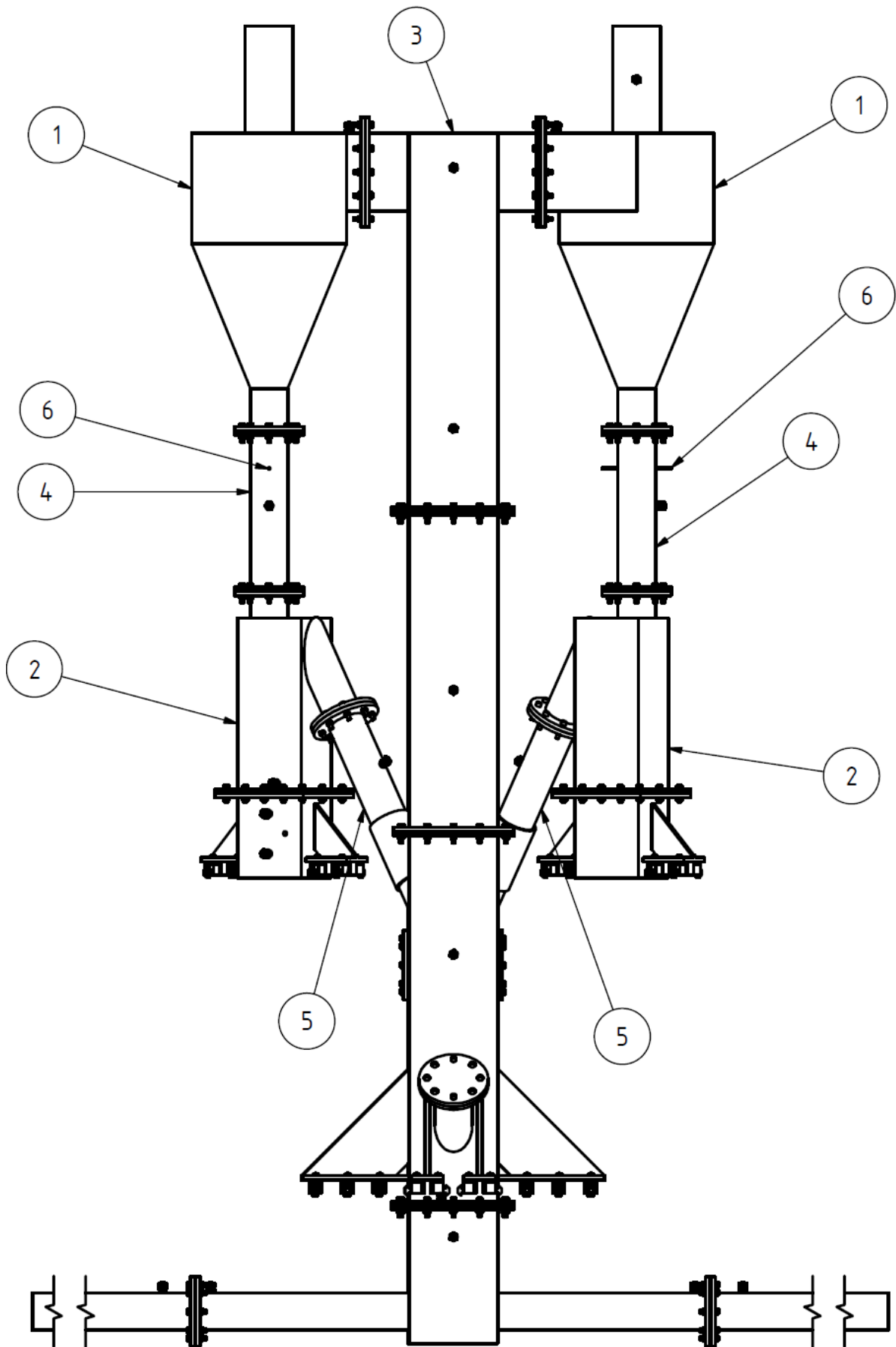


Abbildung 32: Zusammenstellungszeichnung der gesamten Anlage von vorne

Aufbau einer Zweibett-Wirbelschicht-Versuchsanlage

Verena Sulzgruber BSc

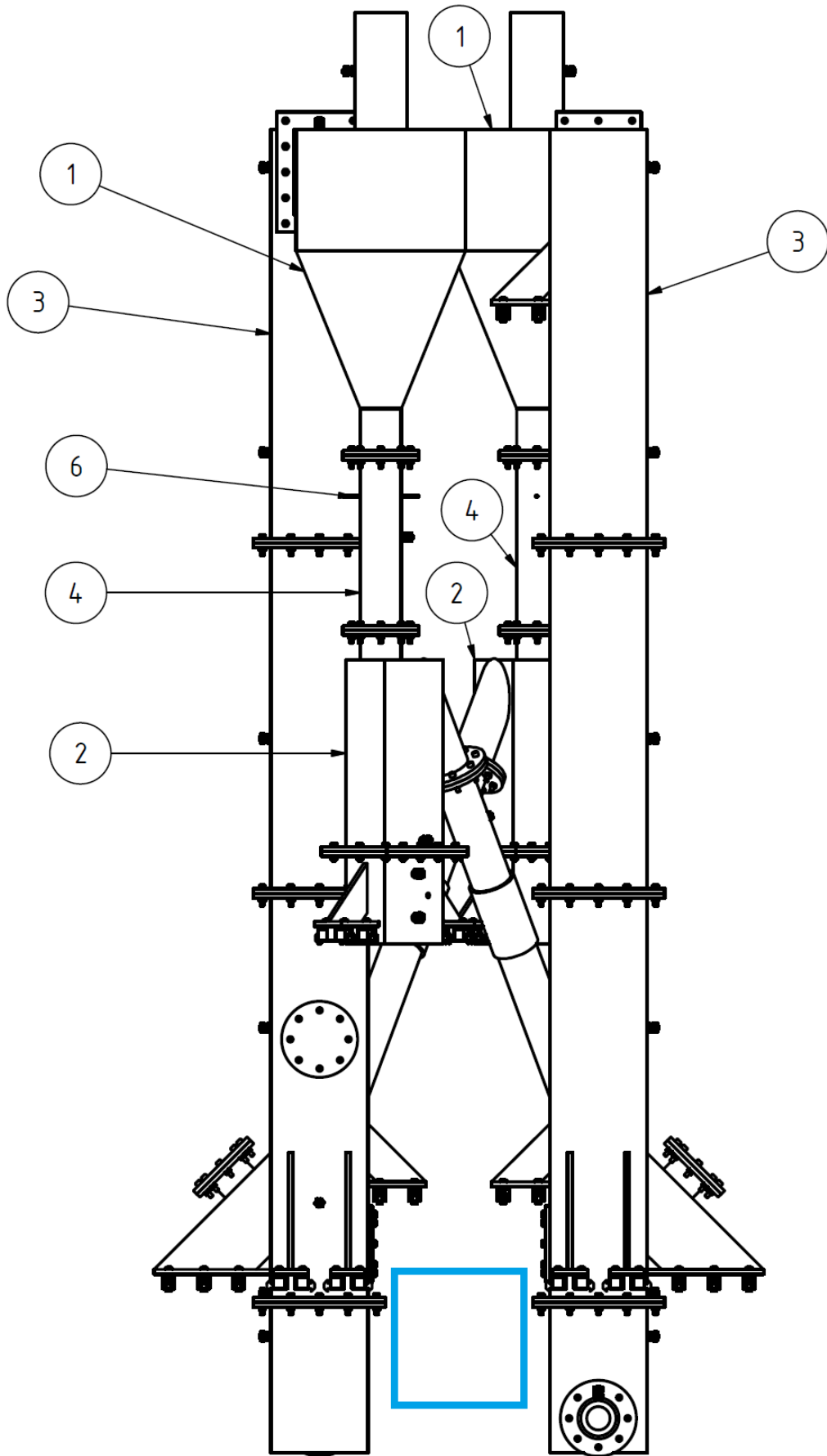


Abbildung 33: Zusammenstellungszeichnung der gesamten Anlage von links

<b>Anlage gesamt</b>				
Nummer	Bezeichnung	Anzahl	Material	Anmerkung
1	Zyklon	2	PMMA	
2	Siphon	2	PMMA	
3	Wirbelschicht	2	PMMA	
4	Fallrohr	2	PMMA	
5	Rückleitung	2	PMMA und Kunststoffschlauch	
6	Absperrklappe	2	Metall	
7	Sechskantmutter M2	4	Stahl	
8	Festo Schlaucheinschraubung	4		
9	Schraube M6 x 30	72	Stahl	
10	Sechskantmutter M6	72	Stahl	
11	Beilagscheibe für M6	72	Stahl	
12	Scheibe für M2	4	Stahl	

Tabelle 7: Stückliste der gesamten Anlage

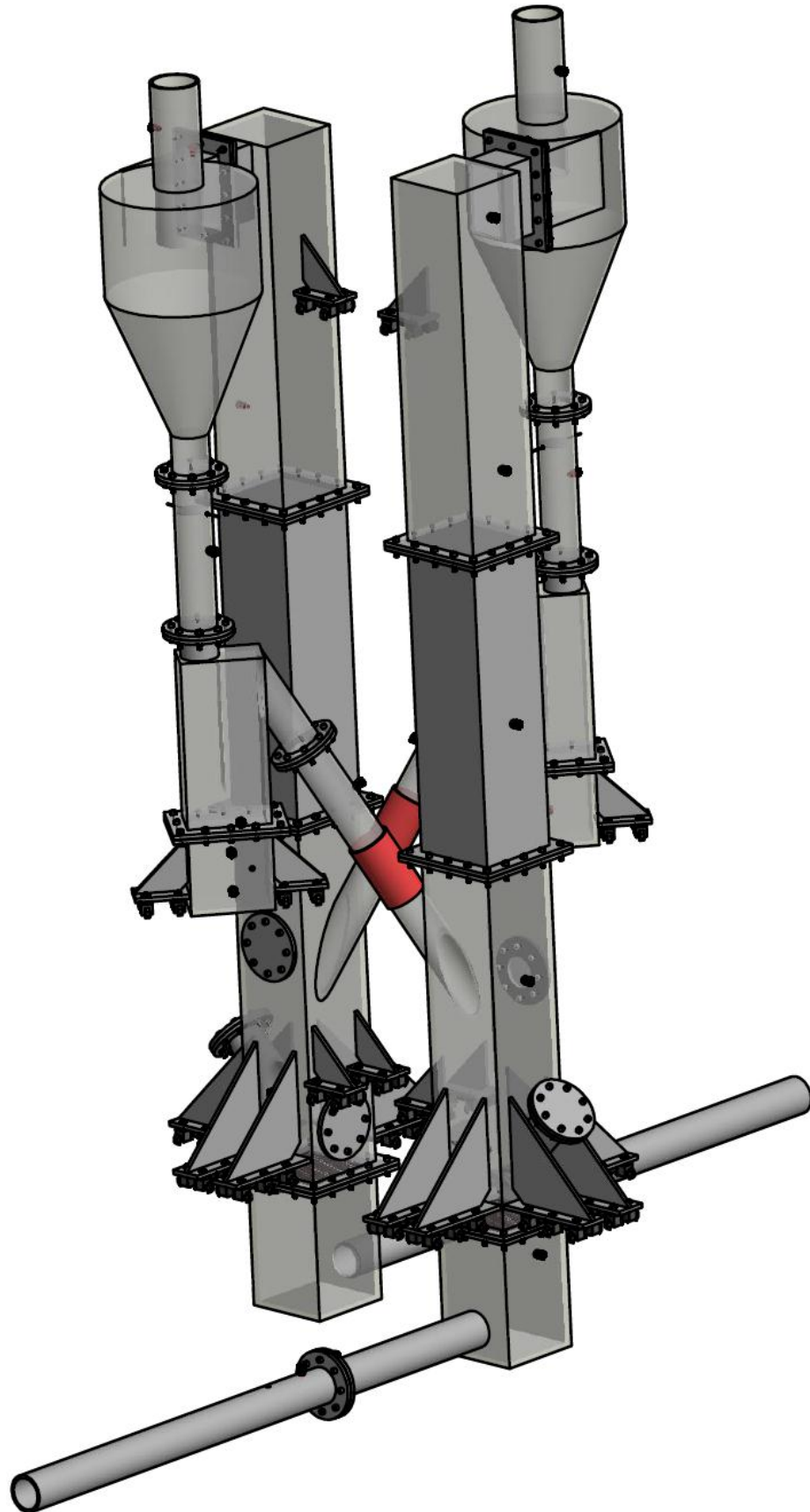


Abbildung 34: 3D-Darstellung der gesamten Anlage

## 6.8. Gerüst

Um die Versuchsanlage aufzustellen und an der Wand zu befestigen soll das System „item“ [19] verwendet werden, das von der Firma Haberkorn für kleine Gerüste entwickelt wurde. Das Gerüst baut auf vereinheitlichte Profile mit Nuten auf allen Seiten auf, die als Träger und Verstreben verwendet werden. Passend zu diesem Profil bietet „item“ eine Reihe von Verbindungsstücken an, mit denen die Profile ohne schweißen, bohren oder schneiden beliebig zusammengebaut werden können. Das verwendete Profil der Größe 8 sowie eine rechtwinkelige Verbindung sind in Abbildung 35 dargestellt.

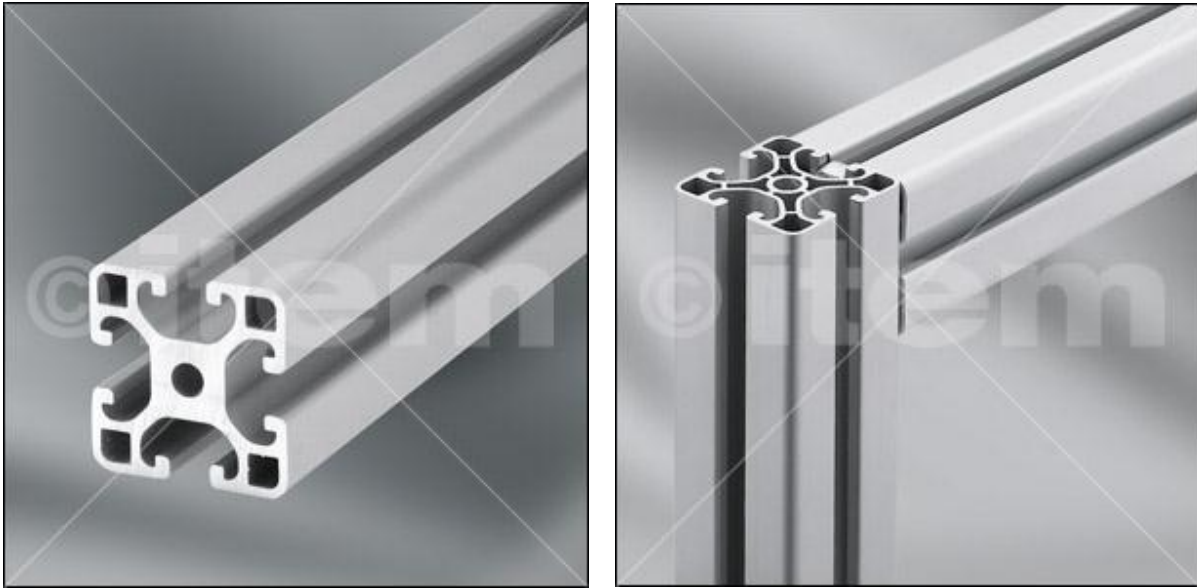


Abbildung 35: Profil des System „item“ [19]

Um die Anlage mit dem Gerüst von Haberkorn zu verbinden wurden zwei Typen von Pratzen entwickelt, eine große mit 20 cm (Abbildung 36) und eine kleine mit 10 cm (Abbildung 37), die auf die Außenseiten der Anlage geklebt werden. Auf die Unterseiten jeder Prätze werden Multiblöcke vom System „item“ geschraubt. Der Multiblock, dargestellt in Abbildung 38, dient der Befestigung von Flächen an einem Gerüst. Mit Hilfe der Multiblöcke kann die Prätze in die Nut des Gerüsts gesteckt werden kann.

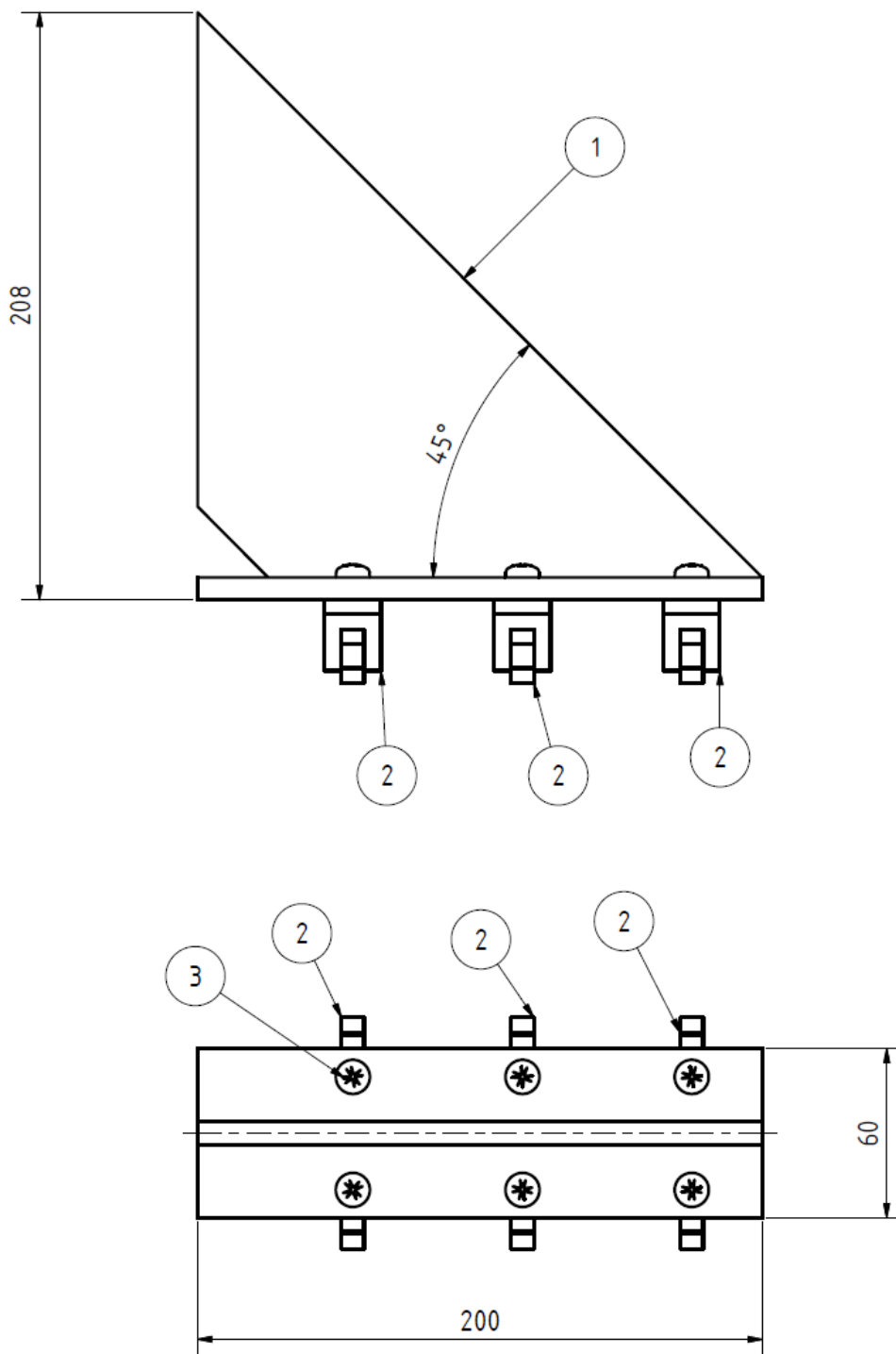


Abbildung 36: Zusammenstellungszeichnung der großen Pratte



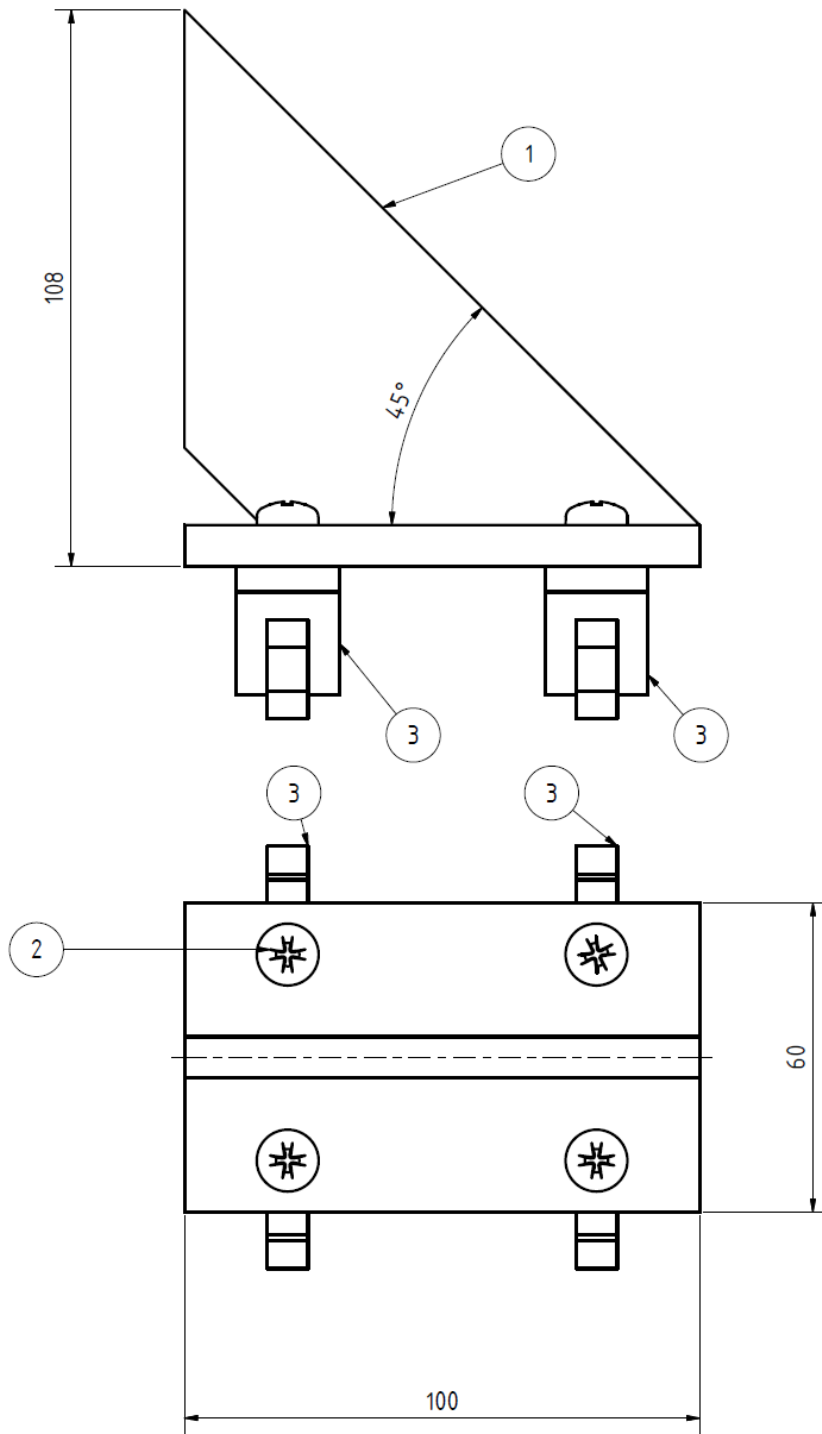


Abbildung 37 Zusammenstellungszeichnung der kleinen Pratzte



Abbildung 38: Multiblock vom System „item“

Die beiden Wirbelschichten sollen auf das Gerüst montiert werden, indem jeweils im unteren Bereich der Steigrohre aber über dem Flansch mit dem Sieb Pratzen angebracht werden. Diese Montage hat den Vorteil, dass ohne großen Aufwand der Windkasten abgenommen und die Wirbelschicht entleert werden kann. Da das Anbringen je einer Pratze in der Mitte jeder Seitenfläche aufgrund verschiedener Zu- und Ableitungen nicht möglich ist, werden auf jeder Seite je zwei Pratzen angebracht. Weil die Versuchsanlage relativ hoch und schmal ist wurde zusätzlich an jedem Steigrohr auch oben eine kleine Pratze vorgesehen damit man die Anlage oben noch gegen die Wand abstützen kann. Auch die Siphone werden durch jeweils zwei kleine Pratzen abgestützt. Die Pratzen wurden in den folgenden Abbildungen blau eingefärbt.

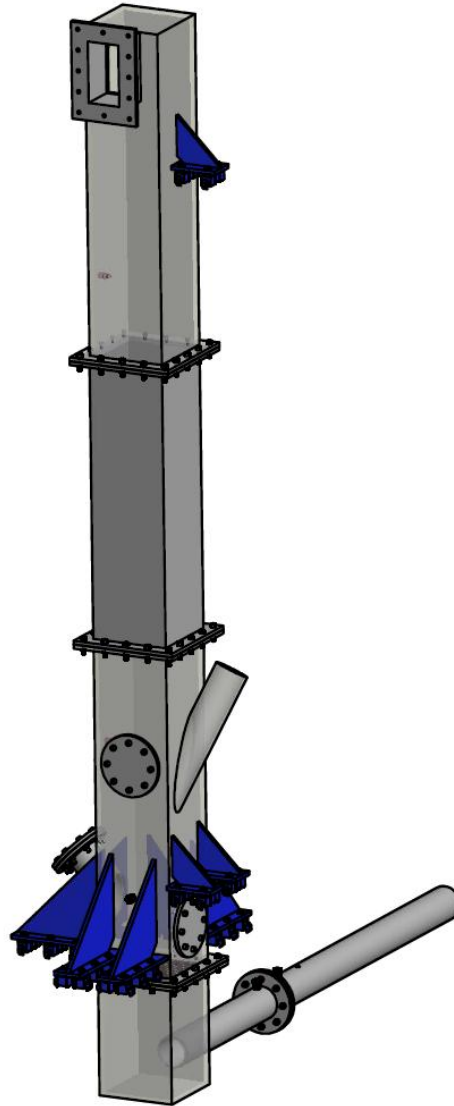


Abbildung 39: 3D-Darstellung des Steigrohrs mit eingefärbten Prätzen

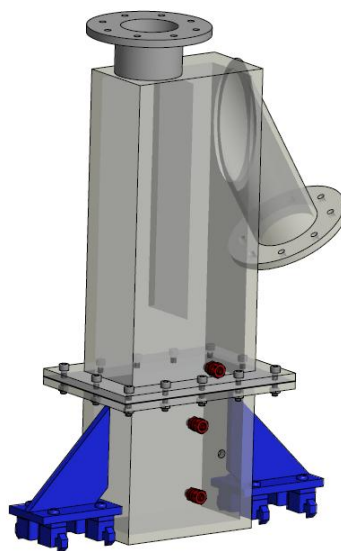


Abbildung 40: 3D-Darstellung des Siphons mit eingefärbten Prätzen

# 7. Nomenklatur

---

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Querschnittsfläche	m <sup>2</sup>
a	Seitenlänge des Siphons	mm
A <sub>Loch</sub>	Querschnittsfläche eines Lochs	m <sup>2</sup>
A <sub>R</sub>	Reibfläche	m <sup>2</sup>
b	Breite des Einlaufschlitzes	mm
C	Durchflusskoeffizient	-
C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub>	Konstanten	-
C <sub>w</sub>	Widerstandsbeiwert	-
$\bar{d}$	mittlerer Partikeldurchmesser	μm
d	Blendendurchmesser	mm
D	Durchmesser der Anlage	m
d* <sub>e</sub>	Grenzpartikeldurchmesser	μm
d <sub>0</sub>	Lochdurchmesser	mm
d <sub>50,A</sub>	mittlerer Partikeldurchmesser des Aufgabeguts	μm
d <sub>i</sub>	Partikeldurchmesser des i-ten Intervall	μm
d <sub>p</sub>	Partikeldurchmesser	μm
e	Expansionszahl	-
F <sub>A</sub>	Auftriebskraft	N
F <sub>B</sub>	Beschleunigungskraft	N
F <sub>G</sub>	Gewichtskraft	N
F <sub>w</sub>	Widerstandskraft	N
g	Erdbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
G <sub>s</sub>	Feststoffumlauf	kg/m <sup>2</sup> s
h <sub>e</sub>	Hohe des Einlaufschlitzes	mm
h <sub>k</sub>	Kegelhöhe	mm
H <sub>L</sub>	Höhe am Lockerungspunkt	m
h <sub>T</sub>	Tauchrohrhöhe	mm
h <sub>z</sub>	Zylinderhöhe	mm
k, K <sub>G</sub>	Konstanten	-
L	Länge der Anlage	m
n	Lastvielfaches	-

N	Lochanzahl	m
$P_0$	Druck	Pa
$\Delta P$	Druckverlust	Pa
$\Delta P_B$	Druckverlust des Wirbelbetts	Pa
$\Delta P_D$	Druckverlust des Siebbodens	Pa
$\Delta P_e$	Druckverlust im Abscheideraum	Pa
$\Delta P_{ek}$	Druckverlust im Einlauf	Pa
$\Delta P_i$	Druckverlust im Tauchrohr	Pa
$q_m$	Massendurchfluss	kg/s
$r_3$	Radius am unteren Austritt des Zyklon	mm
$r_a$	Zyklonradius	mm
$r_e$	Eintrittsradius	mm
$r_i$	Tauchrohrradius	mm
u	Gasgeschwindigkeit	m/s
$u_0$	Lehrrohrgeschwindigkeit	m/s
$u_a$	äußere Umfangsgeschwindigkeit	m/s
$u_i$	innere Umfangsgeschwindigkeit	m/s
$u_{Loch}$	Geschwindigkeit im Loch	m/s
$u_{mf}$	minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit	m/s
$u_t$	Sinkgeschwindigkeit	m/s
v	Partikelgeschwindigkeit	m/s
$\dot{V}_{Luft}$	Luftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /s
$v_e$	Eintrittsgeschwindigkeit	m/s
$v_i$	axiale Geschwindigkeit im Tauchrohr	m/s
$x_i$	Breite des i-ten Intervall	µm
$\alpha$	Einschnürungsbeiwert	-
$\beta$	Widerstandskoeffizient	kg/m <sup>2</sup> s
$\delta$	Durchmesser Verhältnis	-
$\varepsilon$	Hohlraumvolumen	-
$\eta$	Gesamtabscheidegrad	-
$\eta_e$	Abscheidegrad durch Überschreitung der Grenzbeladung	-
$\eta_i$	Abscheidegrad im inneren Wirbel	-
$\lambda_s$	Wandreibungsbeiwert	-
$\mu$	dynamische Viskosität	kg/sm

$\mu_e$	Eintrittsbeladung	-
$\mu_G$	Grenzbeladung	-
$\nu$	kinematische Viskosität	$m^2/s$
$\xi$	Widerstandskoeffizient eines Lochs	-
$\rho_1$	Dichte vor der Blende	$kg/m^3$
$\rho_B$	Schüttdichte	$kg/m^3$
$\rho_f$	Fluiddichte	$kg/m^3$
$\rho_g$	Partikeldichte	$kg/m^3$
$\rho_p$	Gasdichte	$kg/m^3$
$\Psi$	Formfaktor	-
$\varphi$	Hohlraumvolumen	-

# 8. Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Wirbelschichtregime bei ansteigender Fluidisierung [1] .....	4
Abbildung 2: Druckverlust bei ansteigender Fluidisierung [1] .....	5
Abbildung 3: Grundprinzip der allothermen Vergasung [3] .....	6
Abbildung 4: Design der allothermen Vergasung [4] .....	6
Abbildung 5: Schema einer FCC-Anlage [5] .....	7
Abbildung 6: Grundprinzip der Chemical-Looping-Combustion [7] .....	9
Abbildung 7: Fließschema der Zweibett-Wirbelschicht-Versuchsanlage .....	10
Abbildung 8: Fließschema der Zweibett-Wirbelschicht-Versuchsanlage nach dem Umbau .....	11
Abbildung 9: modifiziertes Reh-Diagramm .....	17
Abbildung 10: Klassifikation nach Geldart [15] .....	20
Abbildung 11: Korngrößenverteilung des verwendeten Sandes .....	21
Abbildung 12: minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers ...	24
Abbildung 13: Kräftegleichgewicht für ein fallendes Partikel .....	24
Abbildung 14: Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers .....	26
Abbildung 15: Funktionsweise des Zyklons [18] .....	27
Abbildung 16: Abmessungen des Zyklon .....	28
Abbildung 17: Funktionsweise Siphon .....	31
Abbildung 18: Anordnung der Druckmessungen .....	34
Abbildung 19: Anordnung der U-Rohr-Manometer .....	35
Abbildung 20: Blende .....	36
Abbildung 21: Zusammenstellungszeichnung des Steigrohrs .....	39
Abbildung 22: 3D-Darstellung des Steigrohrs .....	41
Abbildung 23: 3D-Darstellung des Siebbodens im Steigrohr .....	42
Abbildung 24: Zusammenstellungszeichnung Siebboden .....	43
Abbildung 25: Mantel des Zyklon .....	44
Abbildung 26: 3D-Darstellung des Zyklon .....	45
Abbildung 27: Zusammenstellungszeichnung Siphon .....	46
Abbildung 28: 3D-Darstellung Siphon .....	47
Abbildung 29: Siebboden im Siphon .....	47
Abbildung 30: 3D-Darstellung der Rückleitung mit Schlauchstück .....	48
Abbildung 31: Zusammenstellungszeichnung der gesamten Anlage von oben .....	49
Abbildung 32: Zusammenstellungszeichnung der gesamten Anlage von vorne .....	50
Abbildung 33: Zusammenstellungszeichnung der gesamten Anlage von links .....	51
Abbildung 34: 3D-Darstellung der gesamten Anlage .....	53

Abbildung 35: Profil des System „item“ .....	54
Abbildung 36: Zusammenstellungszeichnung der großen Prätze .....	55
Abbildung 37 Zusammenstellungszeichnung der kleinen Prätze.....	56
Abbildung 38: Multiblock vom System „item“ .....	57
Abbildung 39: 3D-Darstellung des Steigrohrs mit eingefärbten Prätzen .....	58
Abbildung 40: 3D-Darstellung des Siphons mit eingefärbten Prätzen.....	58



## 9. Literaturverzeichnis

---

- [1] Vereine Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, VDI-Wärmeatlas, Karlsruhe, Düsseldorf: Springer-Verlag, 2005.
- [2] Jürgen Karl, Dezentrale Energiesysteme, München; Wien: Oldenbourg, 2006.
- [3] Hans Hartmann, Hermann Hofbauer, Martin Kaltschmitt, Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren, Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [4] Christoph Pfeifer, Reinhard Rauch, Skriptum zur Vorlesung "Thermische Biomassennutzung", 2012.
- [5] J. G. Speight, The Refinery of the Future, William Andrew Publishing, 2010.
- [6] Mustafa Al-sabawi, Jinwen Chen, Siau Ng, „Fluid Catalytic Cracking of Biomass-Derived Oils and Their Blends with Petroleum Feedstocks: A Review,“ *Energy & Fuels*, Nr. 26, pp. 5355-5372, 2012.
- [7] Mohammed M. Hossain, Hugo I. de Lasa, „Chemical-looping combustion (CLC) for inherent CO<sub>2</sub> separations—a review,“ *Chemical Engineering Science*, Nr. 63, pp. 4433 - 4451, 2008.
- [8] A. Lyngfelt, B. Leckner, T. Mattisson, „A fluidized-bed combustion process with inherent CO<sub>2</sub> separation; application of chemical-looping combustion,“ *Chemical Engineering Science*, Nr. 56, pp. 3101-3113, 2001.
- [9] Alberto Abad, Francisco Garcia-Labiano, Pilar Gayan, Luis F. de Diego, Juan Adanez, „Progress in Chemical-Looping Combustion and Reforming technologies,“ *Progress in Energy and Combustion Science*, Nr. 38, pp. 215-282, 2012.
- [10] L. R. Glicksman, „Scaling relationships for fluidized bed,“ *Chemical Engineering Science*, Nr. 39, p. 1373 - 1379, 1984.
- [11] M. Hyre, K. Woloshun, L. R. Glicksman, „Simplified scaling relationships for fluidized beds,“ *Powder Technology*, Bd. 77, p. 177-199, 1993.
- [12] Lothar Reh, „Verbrennung in der Wirbelschicht,“ *Chemie Ingenieur Technik*, Nr. 40, p. 509, 1968.
- [13] Rainer Nicolai, Experimentelle Untersuchungen zur Strömungsmechanik in einer hochexpandierten zirkulierenden Gas/Feststoff-Wirbelschicht, Zürich: ETH Zürich, 1995.
- [14] Melker Quarzwerke, Datenblatt Quarzsand ME 0,1-0,2.
- [15] Daizo Kunii, Octave Levenspiel, Fluidization Engineering, Butterworth - Heinemann, 1991.

- [16] Pontus Markström, Anders Lyngfelt, „Designing and operating a cold-flow model of a 100kW chemical-looping combustor,“ *Powder Technology*, Nr. 222, pp. 182-192 , 2012.
- [17] A. Charitos, C. Hawthorne, A. Bidwe, L. Korovesis, A. Schuster, G. Scheffknecht, „Hydrodynamic analysis of a 10 kW th Calcium Looping Dual Fluidized Bed for post-combustion CO<sub>2</sub> capture,“ *Powder Technology*, Nr. 200, pp. 117-127, 2010.
- [18] „www.wikipedia.org,“ [Online].
- [19] „www.haberkorn.com,“ [Online].