

Diplomarbeit

---

# Vergleich verschiedener Staubunterdrückungsverfahren

---

**Manuel Eckerstorfer, BSc**

Forschungspartner:

voestalpine Stahl Donawitz GmbH

04.11.2021



---

Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft –  
Fördertechnik und Konstruktionslehre  
Montanuniversität Leoben

A-8700 LEOBEN, Franz-Josef-Straße 18  
Tel.Nr.: +43 3842-402-2001  
Fax: +43 3842-402-2002  
bergbau@unileoben.ac.at

---

## Eidesstattliche Erklärung

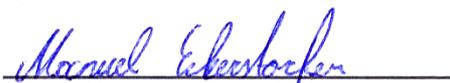
---

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 01.06.2022



Unterschrift Verfasser/in  
Manuel Eckerstorfer

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung, wie z.B. TeilnehmerInnen, in dieser Arbeit verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.

---

## **Vorwort, Widmung, Danksagung**

---

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Prenner und bei Jakob Müller für ihre hilfreichen Anregungen und ihre tatkräftige Unterstützung und bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Nikolaus August Sifferlinger für die Benotung und Begutachtung bedanken.

Ich danke den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt des Lehrstuhls für die Hilfe bei der Versuchsdurchführung sowie allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Fördertechnik und Konstruktionslehre für ihre Hilfe und die angenehme Zusammenarbeit.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Andreas und Regina bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

---

## **Zusammenfassung**

---

Im Zuge der Masterarbeit werden vergleichende Staubmessungen an einer Übergabestelle zwischen zwei Gurtbandförderern unter Laborbedingungen durchgeführt. Ziel der Untersuchungen ist die Dokumentation der Wirksamkeit verschiedener Staubunterdrückungsverfahren. Die Verfahren werden sowohl untereinander als auch mit Messungen ohne Staubunterdrückungsmaßnahmen verglichen. Im Labor des Lehrstuhles wird eine Übergabestelle des zum Einsatz kommenden Förderkreislaufes (4 Gurtbandförderer mit einer Gurtbreite von 400mm und einer Länge von je 5m) eingehaust und mit gravimetrischen Staubniederschlagsmessstellen ausgestattet. Bei dem zum Einsatz kommenden Schüttgut handelt es sich um Kalk mit einer Korngröße von bis zu 10mm.

---

## **Abstract**

---

Within the scope of this master's thesis, comparative dust measurements at a transfer point between two belt conveyors are carried out under laboratory conditions. The aim of this study is to document the effectiveness of various dust suppression methods. These methods are compared with each other and with measurements without any dust suppression measures. At the chair's laboratory, a single transfer point of the conveyor circuit is (4 belt conveyors with a belt width of 400mm and a length of 5m each) housed and equipped with gravimetric dust precipitation measuring points. The bulk material which is used is limestone with a grain size of up to 10mm.

---

# Inhaltsverzeichnis

---

Eidesstattliche Erklärung .....	I
Vorwort, Widmung, Danksagung .....	II
Zusammenfassung .....	III
Abstract .....	III
Inhaltsverzeichnis .....	IV
1 Einleitung .....	1
2 Theoretische Grundlagen.....	1
2.1 Entstehung staubfähiger Partikel in Schüttgütern.....	2
2.2 Staubeigenschaften.....	3
2.3 Einteilung der Staubarten .....	4
2.3.1 Natürliche und anthropogene Quellen .....	4
2.3.2 Primäre und sekundäre Quellen.....	5
2.3.3 Mobile und stationäre/ortsfeste Quellen .....	5
2.3.4 Partikelgröße und Verweilzeit.....	5
2.4 Haftmechanismen von Staub .....	8
2.4.1 Diffusion durch Brown'sche Partikelbewegung .....	9
2.4.2 Temperatureffekt, Thermophorese.....	9
2.4.3 Schwerkraft .....	9
2.4.4 Elektrostatische Kraft .....	9
2.4.5 Nasse Haftung, Kapillarkraft.....	10
2.4.6 Van-der-Waals-Kraft.....	10
2.4.7 Zubringerfunktion der Luft .....	10
2.4.8 Agglomeration .....	10
3 Staubentstehung an Übergabestellen .....	11
3.1 Fallhöhe / Abwurfgeschwindigkeit .....	13
3.2 Materialfeuchtigkeit .....	14
3.3 Abwurfmenge .....	14
4 Gründe für Staubunterdrückung.....	15
4.1 Arbeitsschutz.....	15
4.2 Technische Gründe .....	18
5 Staubunterdrückungsverfahren .....	19
5.1 Einteilung der Verfahren.....	19
5.2 Einhausung und Abdichtung .....	21

5.2.1	Spezielles Seitenabdichtungssystem (AirScrape®).....	22
5.3	Absaugung .....	23
5.3.1	Entstauber .....	25
5.4	Wasserbedüsung .....	26
5.4.1	Schaumzusatz.....	30
5.5	Optimierung der Schüttgutübergabe .....	31
6	Vergleich der Verfahren .....	33
6.1	Gegenüberstellung / Bewertung der Verfahren .....	33
6.2	Gewählte Staubunterdrückungsverfahren .....	35
7	Untersuchung der Staubunterdrückungsverfahren.....	35
8	Versuchsaufbau .....	36
9	Simulation .....	38
9.1	Aufbau.....	38
9.2	Ergebnisse .....	40
10	Schüttgut.....	42
10.1	Feuchtigkeit des Schüttguts .....	43
10.1.1	Messergebnisse Schüttgutfeuchtigkeit .....	45
10.2	Anmerkungen .....	46
11	Versuchsablauf .....	47
12	Durchführung der Versuche .....	49
12.1	Ohne Staubunterdrückung .....	49
12.1.1	Ergebnisse Versuch 1 .....	49
12.1.2	Ergebnisse Versuch 2 .....	50
12.1.3	Ergebnisse Versuch 3 .....	51
12.1.4	Anmerkungen .....	51
12.2	Staubunterdrückung durch Absaugung .....	52
12.2.1	Ergebnisse Versuch 4 .....	55
12.2.2	Ergebnisse Versuch 5 .....	56
12.2.3	Ergebnisse Versuch 6 .....	57
12.2.4	Anmerkungen .....	58
12.3	Staubunterdrückung durch Wasserbedüsung .....	60
12.3.1	Ergebnisse Versuch 7 .....	62
12.3.2	Ergebnisse Versuch 8 .....	63
12.3.3	Ergebnisse Versuch 9 .....	64
12.3.4	Anmerkungen .....	64

13	Vergleich der Versuche .....	68
14	Fazit .....	73
15	Verwendete Messgeräte .....	74
15.1	Messdosen .....	74
15.2	Laborwaage.....	75
15.3	Universal Waage .....	76
15.4	Anemometer.....	77
16	Literaturverzeichnis .....	78
17	Abbildungsverzeichnis .....	79
18	Tabellenverzeichnis .....	82

---

# 1 Einleitung

---

Die Vermeidung Staubemissionen, wie sie zum Beispiel an Übergabestellen bei Gurtbandförderern verursacht werden, gewinnt eine immer höher werdende Bedeutung für deren Betreiber bzw. Unternehmen. Die entstehenden Staubwolken sind nicht nur für die Gesundheit der Arbeiter schädlich, sondern haben auch einen negativen Einfluss auf Maschinen und Anlagen, welche sich in der näheren Umgebung befinden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Eigenschaften und die Entstehung des Staubes erläutert. Gründe weshalb eine Staubunterdrückung überhaupt notwendig ist und welche Möglichkeiten es gibt, um eine Ausbreitung des Staubes zu verhindern, werden besprochen. Abschließend werden die vielversprechendsten Maßnahmen miteinander verglichen und Untersuchungen bezüglich der Effektivität an einer Übergabestelle durchgeführt.

---

## 2 Theoretische Grundlagen

---

Laut der Norm VDI 3790 wird Schüttgut als ein Feststoff, der als loses Fördergut in schüttbarer Form vorliegt, definiert. Dieses Schüttgut kann in den unterschiedlichsten Arten vorkommen, zum Beispiel als Pulver, Granulat, Körner, Pellets, Stücke usw.

Nach der Norm DIN ISO 3435 wird Schüttgut mit dem Blick auf Eigenschaften wie Kornbeschaffenheit, Schüttdichte, Zusammenhalt und weitere besondere Merkmale unterteilt.

Durch diese Schüttguteigenschaften kann bereits ein erster Eindruck in Bezug auf die Höhe der Staubentstehung der Schüttgüter gewonnen werden. Bei Transport, Lagerung oder Umschlag von Schüttgut, welche die Hauptbestandteile der Logistik sind, entstehen die meisten Stäube. Eine weitere besondere Eigenschaft der Schüttgüter ist es, dass diese oft zwischen fluid und agglomerierend schwanken. [1]

---

## 2.1 Entstehung staubfähiger Partikel in Schüttgütern

---

Durch Vorgänge wie Brechen, Mahlen usw. werden Schüttgüter gewollt zerkleinert. Zerkleinerung durch Abrieb, beim Transport oder in Förderern ist eine ungewollte Nebenwirkung. Bei solchen Belastungen auf das Schüttgut entstehen unterschiedliche Partikel mit verschiedener Korngröße, welche als Staub austreten können. Dies passiert bei Mahlvorgängen, Brechen, sowie an Übergabestellen bei Förderern wobei das Schüttgut abgeworfen, gekippt, geschüttet etc. wird. Aus diesen Gründen ist die Korngrößenverteilung des Schüttguts nicht konstant. Das bedeutet, dass die Möglichkeit besteht das nicht nur verschiedene Schüttgüter, sondern auch ein und dasselbe Material zu einem unterschiedlichen Staubungsverhalten führen kann. Es ist also möglich, dass bei denselben Bedingungen wie Abwurfhöhe, Abwurfmenge und Feuchtigkeitsgehalt, eine unterschiedlich große Staubmenge beim Umschlag entstehen kann. Durch Aufhaltung des Materials kann es zu einer Entmischung der unterschiedlich großen Partikel kommen. Kleinere Partikel werden sich im fallenden Schüttgutstrom eher im Inneren sammeln. Durch Erschütterungen beim Transport wird dieses Phänomen noch weiter verstärkt, da die feineren Partikel durch die Zwischenräume der Gröberen hindurchfallen und somit ins Innere wandern. Durch die unterschiedliche Verteilung dieser Anteile kommt es bei wiederholter Bewegung des Guts zu einer Staubentstehung, die jedes Mal unterschiedlich stark ausfallen kann. Bei jeder weiteren Bewegung werden wiederholt flugfähige Schüttgutpartikel durch Loslösung, sowie neue Feinanteile durch Reibung, zwischen den Partikeln erzeugt. Das Verhältnis von abgeführtem zu neu erzeugtem Feinanteil ändert sich stetig und kann das Schüttgut nach mehreren Umschlagvorgängen zu einem mehr oder weniger stark staubendem Material verwandeln. Bei dem Umschlag von Schüttgut kommt es auch immer zu einer zwangsweisen Bewegung der Luft, welche das Schüttgut umgibt oder sich darin befindet. Nach dem Abwurf von Material wird Luft mitgerissen, welche beim Aufprall wieder plötzlich verdrängt wird und Partikel mit sich trägt. Diese beim Aufprall entstehenden Kräfte, welche teilweise stärker als die Haltekräfte zwischen den Partikeln sind, führen zu weiterer Staubentstehung. Je härter der Aufprall ist, umso höher sind diese Kräfte und umso größere Partikel können losgelöst werden und breiten sich als Staub aus. [1]

---

## 2.2 Staubeigenschaften

---

Stäube sind feste verteilte Stoffe, welche in Gasen aufgewirbelt, eine gewisse Zeit lang schweben können. Man kann Staub als ein Zweiphasensystem ansehen. Entweder liegt er als Wolke oder als Haufwerk vor. Partikelgröße und Dichte bestimmen Großteils die Ausbreitung von Stäuben. In der Regel wird die Partikelgröße als Durchmesser mit unterschiedlichen Zusätzen angegeben, z. B. Oberflächendurchmesser, aerodynamischer Durchmesser oder projizierter Durchmesser. Weiters gibt es noch eine Größe, die beschreibt, wie schnell sich Schwebestaub zu Staubniederschlag umformt, die Sedimentationsgeschwindigkeit. Diese ist abhängig von der Partikelgröße und steigt mit zunehmender Größe stark an. Nicht alle Staubeigenschaften lassen sich vollständig durch Messgrößen beschreiben und können teilweise nur quantitativ dargestellt werden, wie z. B. Schwebeverhalten oder Teilchenform. Weiters können Staubpartikel auch angesichts ihrer mineralogischen oder chemischen Zusammensetzung charakterisiert werden. Unterschieden wird hierbei zwischen den natürlichen organischen Stäuben wie z.B. Blütenpollen, natürlichen silikatischen Stäuben wie z. B. Asbest oder Quarz, synthetischen organischen Stäuben wie z. B. Polymerpartikel, schwermetallhaltige Stäube und kohlenstoffhaltige Stäube wie z. B. Ruß. Feinere Stäube können durchaus negative Effekte auf die Gesundheit haben (z. B. Asbeststäube), wobei gröbere Stäube lediglich unangenehm sind. Krankheiten wie Allergien, Schleimhaut-, Lungen-, Haut-, und Rachenerkrankungen und im schlimmsten Fall sogar bösartige Tumore können durch Stäube erzeugt werden. Darum ist die Reduzierung solcher Stäube von massiver Wichtigkeit. [1]

---

## 2.3 Einteilung der Staubarten

---

Bei Vorkommen von diffusen Luftverunreinigungen wird unterschieden zwischen

- natürlichen und anthropogenen,
- primären und sekundären sowie
- mobilen und stationären/ortsfesten

Quellen. [1]

---

### 2.3.1 Natürliche und anthropogene Quellen

---

Die emittierten Stoffe von natürlichen und anthropogenen Quellen sind in Tabelle 1 zu sehen. Auf die Quellstärken von natürlichen Quellen kann meist kein Einfluss genommen werden, womit sich eine Grundbelastung der Luft ergibt und zu ihrer natürlichen Zusammensetzung gezählt wird. Anthropogene Quellen hingegen können beeinflusst werden. [1]

Emittierter Stoff	Natürliche Quelle	Anthropogene Quelle
Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	Moore, Sümpfe, Ozeane, Vulkantätigkeit, Böden, Pflanzen, Mineralquellen	Kläranlagen, Kokereien, Erdölraffinerien, Erdgasaufbereitung, Gerbereien, Kunstfaserherstellung, Zellstoffherstellung, Papierfabriken, Abgaskatalysatoren, Deponien
Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	Zersetzung von Exkrementen, Böden	landwirtschaftliche Betriebe (Tierhaltung), Kunstdünger (Herstellung und Verwendung), Kälteanlagen, Gülleausbringung
Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> )	Zersetzung von Biomasse, Brände, Atmung, Vulkantätigkeit	Verbrennung fossiler Brennstoffe, Deponien, Straßenverkehr
Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	Vulkantätigkeit, Verbrennung von Biomasse	Verbrennung fossiler Brennstoffe, Verarbeitung schwefelhaltiger Bodenschätze (z. B. Rösten sulfidischer Materialien), Zellstoffherstellung
Methan (CH <sub>4</sub> )	Sümpfe, Lebewesen	Erdgasförderung und -Verteilung (Leckagen), Kläranlagen, Kohlenbergbau, Nutztierhaltung, Deponien, Altablagerungen, Biogasanlagen
Partikel	Pollen, Sporen, Bakterien, Pflanzenabrieb, Erosion und Abwehung, Vulkantätigkeit, Brände, Meeressgisch (Salze)	thermische und mechanische Prozesse, Straßenstaub

**Tabelle 1: Natürliche und anthropogene diffuse Quellen ausgewählter Stoffe [1]**

---

---

### **2.3.2 Primäre und sekundäre Quellen**

---

Die emittierten Stoffe bei primären Quellen können unverändert entweder kürzer oder länger in der Luft verbleiben. Primäre Quellen sind z. B. Abwehung, Erosion, Verkehr, Brände, Vulkantätigkeit, Industrie, Rohstoffgewinnung, Energieerzeugung und die mechanische Beanspruchung von Schüttgütern. [1]

Bei sekundären Quellen können Vorläuferstoffe wie z. B. Ammoniak, Stickstoff oder Schwefeldioxid freigesetzt werden. In der Atmosphäre ist es möglich, dass sich diese dann zu Partikel wie Sulfate oder Nitrate verwandeln. Diese umgewandelten Partikel haben einen kleinen Durchmesser von unter 0,1 µm, somit kann auch in weiter Entfernung dieser Quelle noch eine Staubbelastung festgestellt werden. [1]

---

### **2.3.3 Mobile und stationäre/ortsfeste Quellen**

---

Kraftwerke und Industrie gehören zu den ortsfesten Quellen. Der Verkehr stellt eine der größten mobilen Quellen dar. Darunter fallen Eisenbahn, Straßenverkehr sowie Luft-, und Schifffahrt. Durch den Abrieb von Reifen, Bremsen, Kupplungen, Schienen und Fahrbahnen oder aufgrund von Motoren, Aufwirbelung und den Transport von emittierenden Gütern entstehen Partikel. [1]

---

### **2.3.4 Partikelgröße und Verweilzeit**

---

Die Größenbereiche unterschiedlicher Partikel von z. B. Mehl oder Ruß, der Atemwege und auch verschiedener Mikroorganismen sind in Abbildung 1 dargestellt. Über sechs Zehnerpotenzen von Nanometer bis Millimeter erstreckt sich dieser Größenbereich. Die Unterteilung in Nano-, Fein- und Grobstaub ist ebenfalls vorhanden. Durch unterschiedliche Messmethoden schwanken die Größenangaben je nach Material zwischen diesen Bereichen. Partikel mit einer Größe unter 100 nm werden als Nanostaub bezeichnet. Der Grobstaubbereich beginnt bei einer Partikelgröße von 2,5 µm. Inmitten liegt der Feinstaub. Für Einzelpartikel liegt die Sichtbarkeitsgrenze um 60-80 µm, was ungefähr der Schwebstaubgrenze entspricht. Die Schwebefähigkeit ist in Richtung Millimeterbereich kaum mehr vorhanden. [1]

	Molekularbereich	Nanometerbereich	Mikrometerbereich	Millimeterber.
Technische Definitionen	Maßstäbe	10, 100, 1.000nm	10, 100, 1.000 µm	10 mm
	PM <sub>0,1</sub>	Nanostaub		
	PM <sub>2,5</sub>	Feinstaub		
	PM <sub>10</sub>	Grobstaub		
	Aerosol	flüssig: Nebel	fest: Rauch	Spray, Gischt, Regen
Bodenarten		Ton	Schluff, Sand	Kies
Primäre Partikel			Kohlenstaub, Weizenmehl	
Sekundäre Partikel		Dieselfuß, Zigarettenrauch		
Fasern	Nanoröhrchen		Asbest, Mikro-faser, Baum-wolle, Menschl. Haar	
Lebewesen	Viren (nicht frei in der Luft existierend)	Bakterien	Hausstaubmilben, Pollen, Sporen	Staublaus
Atemwege		rotes Blutkörperchen, „Staubzelle“ / Makrophage	Lungenarterien mit 17 Verzweigungen	Bronchien bis Lungenbläschen mit 23 Verzweigungen

Abbildung 1: Größenbereiche für Partikel [2]

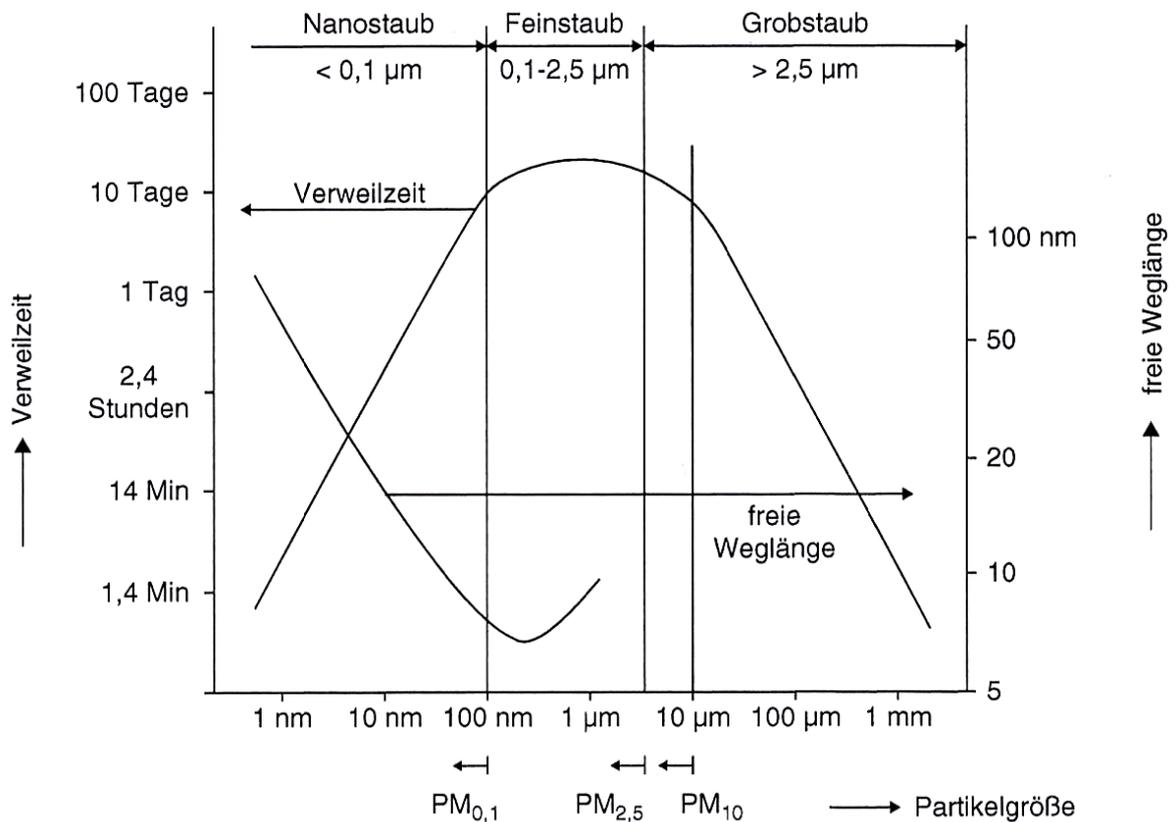


Abbildung 2: Verweilzeit von Aerosolen in der Atmosphäre [2]

#### **2.3.4.1 Nanostaub**

Die Verweilzeiten der unterschiedlichen Staubgrößen in der Luft sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Nanostaub, welche eine Größe unter 100 nm besitzt, ist im linken Bereich zu finden. In der Luft verhalten sich hier die Partikel wie Dampfmoleküle. Durch Zusammenstöße, bei denen diese kleinen Partikel schnell aneinander haften bleiben, ist die Verweilzeit eher bei den niedrigeren Werten. Durch dieses aneinanderhaften der Partikel, entsteht eine Zunahme der Partikelgröße und gleichzeitig eine Abnahme der Partikelanzahl. Die Masse an gesamten Staub in der Luft bleibt konstant, jedoch findet eine Verlagerung hin zu größeren Partikeln statt. Jene Hafteigenschaften beginnen ab einer Größe von etwa 100 nm ihre Wirkung zu verlieren. In diesem Bereich liegt auch der Übergang hin zum Feinstaub. [1]

#### **2.3.4.2 Feinstaub**

Der Feinstaub definiert sich in einem Größenbereich von 100 nm bis 2,5 µm. Die Verweilzeit der Partikel in der Luft ist hier am größten. Es können Schwebzeiten bis zu 20 Tagen erreicht werden. Der Schwerkrafteinfluss nimmt mit steigender Teilchenmasse zu, somit wird die Verweilzeit der schwereren Partikel erneut verringert. [1]

#### **2.3.4.3 Grobstaub**

Der Grobstaubbereich beginnt ab einer Größe von 2,5 µm. Die Schwerkraft wirkt hier mit einem immer größer werdenden Einfluss auf die Partikel ein, wodurch sie stärker zum Boden gezogen werden und die Verweilzeit in der Luft sich wieder verringert. [1]

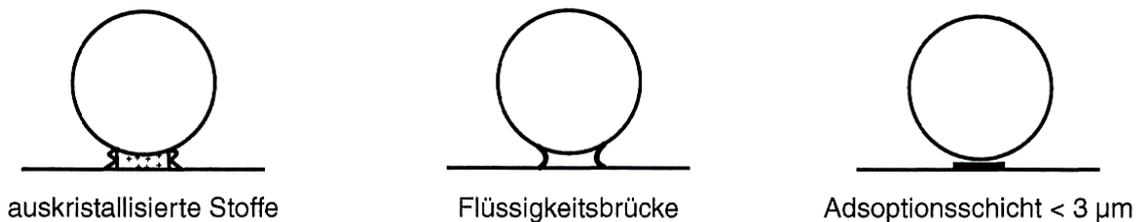
---

## 2.4 Haftmechanismen von Staub

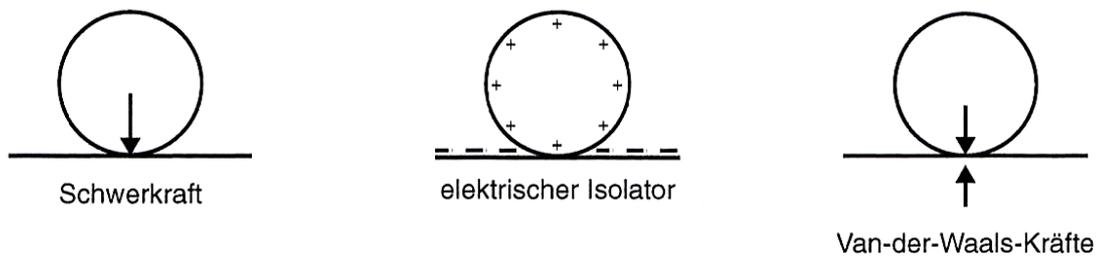
---

Staubpartikel werden an Oberflächen durch unterschiedliche Mechanismen festgehalten. In Abbildung 3 sind diese dargestellt. Stoffliche Bindungen sind in 3a zu sehen. Darunter fallen Stoffschichten und Flüssigkeitsschichten. Diese gehören zu den wirkungsvollsten Bindungen. Bei 3b sind Haftkräfte zu sehen, welche ohne stoffliche Bindung wirken wie z. B. Schwerkraft, elektrische Kräfte und Van-der-Waals-Kräfte. Ein anderer Haftmechanismus sind die formschlüssigen Verbindungen, welche in 3c abgebildet sind. [1]

### a mit stofflicher Bindung



### b ohne stoffliche Bindung



### c formschlüssige Verbindung



Abbildung 3: Haftmechanismen zwischen Partikeln und Oberflächen [2]

Die Zeit in der Staub in der Luft schweben kann ist begrenzt. Die Anhaftung an Oberflächen läuft in zwei Schritten ab: der Partikeltransport hin zur Oberfläche und das Aufbringen der Haftkräfte bei Berührung mit der Oberfläche. [1]

---

### **2.4.1 Diffusion durch Brown'sche Partikelbewegung**

---

Die thermisch getriebene Bewegung von Gasmolekülen verursacht auch die Bewegung von Nanostaub. Aufgrund der geringen Masse der Partikel hat die Schwerkraft hier nur einen kleinen Einfluss. Die Partikel bleiben an einer Oberfläche haften, wenn sie diese berühren. Dadurch ergibt sich in Oberflächennähe eine Partikelkonzentration von null. Im Vergleich mit der angrenzenden Luft führt dies zu einem Konzentrationsgefälle und somit zu einem Partikelstrom, der in Richtung der Oberfläche geht. Dieser Diffusionseffekt hat eine Reichweite von etwa einem Millimeter. Er wird meistens in technischen Anlagen benutzt, um Feinstaub zu entfernen. Es werden Filter (Faserpakete) mit Luft durchströmt und dadurch der Staub abgetrennt. [1]

---

### **2.4.2 Temperatureffekt, Thermophorese**

---

An kalten Wänden bildet sich in der Luftschicht ein Temperaturgefälle, in dieser sich Luftmoleküle bedeutend langsamer bewegen. An der wärmeren Seite der Luftschicht erzeugen die Luftmoleküle aufgrund ihrer schnelleren Geschwindigkeit einen größeren Druck auf die Partikel als auf der Kalten, wobei sich eine Druckdifferenz in Richtung Wand ausbildet. Je größer diese Partikel, bzw. deren Oberfläche ist, umso stärker ist dieser Effekt. [1]

---

### **2.4.3 Schwerkraft**

---

Bei größeren und schwereren Partikeln wird die Wirkung der Schwerkraft immer bedeutender. Der Luftwiderstand bestimmt die Geschwindigkeit, mit der sich ein Partikel setzt. Ab einer Partikelgröße von 0,5  $\mu\text{m}$  beginnt der Einfluss der Schwerkraft zu dominieren. [1]

---

### **2.4.4 Elektrostatische Kraft**

---

Die aufkommenden Feldkräfte inmitten geladener Oberflächen können entweder anziehend oder abstoßend auf geladene Teilchen wirken. Durch Reibung oder Aufnahme eines Ions können Staubpartikel mit unterschiedlichen Ladungen entstehen. Bei Trennvorgängen bilden sich meist negativ geladene Partikel. In Elektroentstaubern werden diese elektrostatischen Kräfte zur Staubabscheidung verwendet. [1]

---

#### **2.4.5 Nasse Haftung, Kapillarkraft**

Für gewöhnlich kommt es bei einer mit einem Flüssigkeitsfilm beaufschlagten Oberfläche zum augenblicklichen Haftenbleiben von Partikeln. Dabei bilden sich zwischen den Haftpartnern Flüssigkeitsbrücken aus. Es können absichtlich Flüssigkeitsfilme auf Oberflächen aufgetragen werden, um diesen Effekt hervorzurufen. Durch Kondensation zum Beispiel können auch unbeabsichtigt Flüssigkeitsfilme entstehen. [1]

---

#### **2.4.6 Van-der-Waals-Kraft**

Bei den Van-der-Waals-Kräften handelt es sich um eher schwache Wechselwirkungen zwischen den Atomen oder Molekülen. Die Größe dieser Kraft wird stark vom Abstand beeinflusst. Erst bei kleineren Abständen kommt eine Wirkung zum Vorschein. Die Oberflächenrauigkeit von größeren Partikeln verhindert hier bereits eine ausreichende Annäherung. Bei ausreichend geringen Abständen können diese Kräfte zu einem beachtlichen Ausmaß heranwachsen und ein Abspülen mit Wasser verhindern. Um die volle Kraft zu erreichen, braucht es in der Regel etwas Zeit, da es bei diesem Vorgang zu einem Abbau von Rauigkeitsspitzen kommt. [1]

---

#### **2.4.7 Zubringerfunktion der Luft**

Durch Luftströmungen kann Staub in alle Richtungen verstreut werden. Der weitere Weg eines Partikels wird beeinflusst, wenn Luft die Partikel in den Einflussbereich einer der vorhin beschriebenen Nahkräfte bringt. Neben den atmosphärischen Winden oder Fahrtwinden reichen auch schon Luftstöße von einfachen Muskelbewegungen aus, um Staubpartikel zu verteilen. [1]

---

#### **2.4.8 Agglomeration**

Die Zusammenballung von Partikeln nennt man Agglomeration. Es sind zwei Dinge notwendig damit es zu einer Zusammenballung kommt, nämlich ausreichend Haftkräfte und eine Berührung. Umso höher die Anhäufung an Partikeln in einem Bereich ist, desto wahrscheinlicher sind Berührungen und Zusammenstöße. Die Bewegung der Teilchen ist ebenfalls ein wichtiger Faktor. Bei größeren Teilchen über 1 µm wirken meist Strömungs- und äußere Kräfte. Bei Kleineren hat neben den äußeren Kräften auch noch die molekulare Diffusion einen Einfluss. Wegen der geringen Reichweite spielen Van-der-Waals-Kräfte meist keine Rolle. [1]

---

### 3 Staubentstehung an Übergabestellen

---

Die Ausbildung von Staub beim Schüttgutumschlag wird von vier wesentlichen Einflussparametern bestimmt. Maßnahmen, welche diese Parameter beeinflussen können, haben eine wesentliche Einwirkung auf die Staubentstehung. Am wirkungsvollsten sind Maßnahmen, welche alle vier Parameter gleichzeitig beeinflussen. Es gibt folgende Regeln, um die Staubmengen zu vermindern:

- möglichst staubarmes Material
- möglichst geringe Abwurfhöhe
- möglichst große Abwurfmenge
- eine möglichst weitgehende Abschirmung der Abwurfstelle [1]

Die vom fallenden Partikelstrom eingeschlossene Luft bestimmt unter anderem die entstehende Menge an Staub. Auf die fallenden Partikel wirken Kräfte, welche vom Leerraum in der Partikelwolke beeinflusst werden. Kräfte, welche auf Partikel A (siehe Abbildung 4) wirken, sind über seine Oberfläche hinweg unterschiedlich. Auf seiner rechten Seite wird der Luftstrom durch Partikel B behindert. Somit sind die Kräfte auf der linken Seite des Partikels größer als auf seiner rechten. Dadurch wird Partikel A bei genügender Fallgeschwindigkeit aus dem Kern des Schüttgutstroms gerissen und in die umgebende Luft weggeführt. Danach wirkt die ruhende Umgebungsluft in den Partikelstrom und als nächstes wird Partikel C auf ähnliche Weise weggezogen. Die eingezogene Luft formt mit den losgelösten Partikeln eine Grenzschicht um den Partikelstrom, welche mit zunehmender Fallhöhe anwächst. [1]

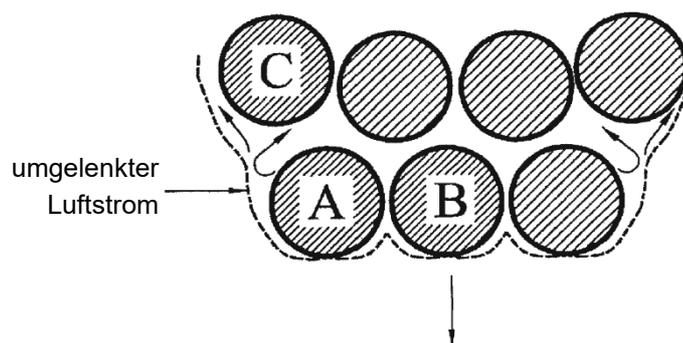
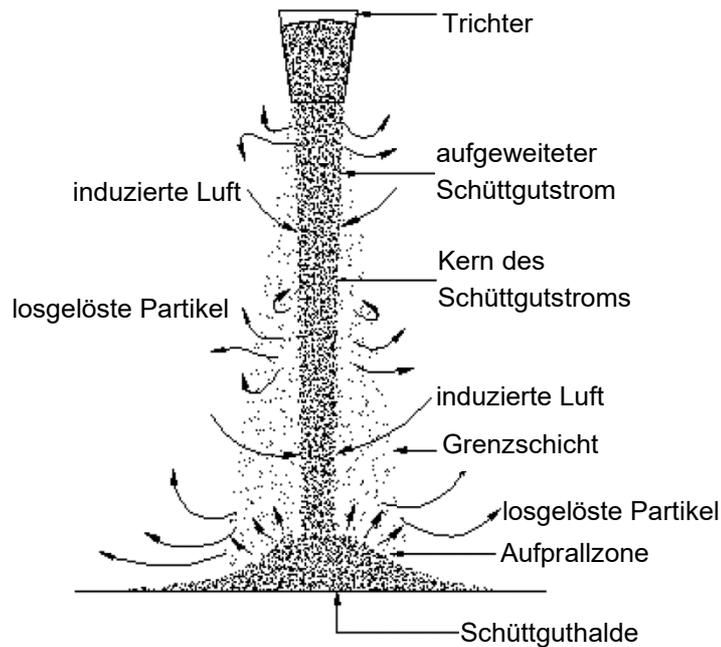


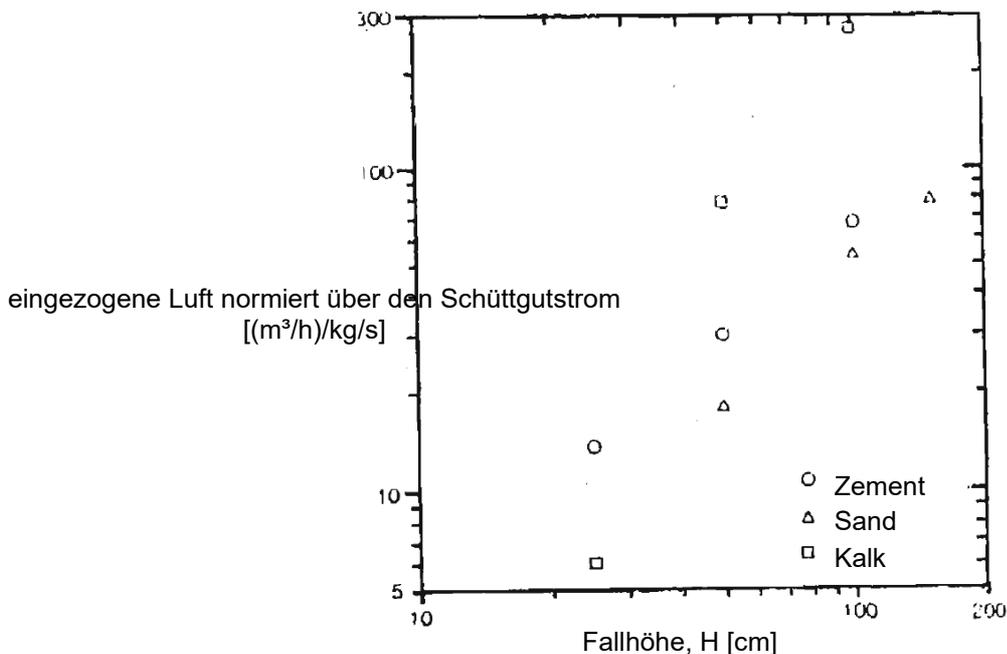
Abbildung 4: Schematische Darstellung fallender Partikelcluster [1]

In jeder Sekunde des freien Falls wird mehr Luft in den Partikelstrom induziert (siehe Abbildung 5). Diese Luft wird beim Aufprall ausgestoßen und reißt dabei Partikel mit sich. [1]

Neben der Abwurfmenge ist eben hierbei also auch ein kompakter Materialstrom entscheidend um die Staubentstehung zu verhindern.



**Abbildung 5: Staubentstehung in einem frei fallendem Schüttgutstrom [1]**



**Abbildung 6: Eingelegene Luft in Abhängigkeit von der Fallhöhe [1]**

Es wurden Abwurfversuche an einer Fallturm-Modellanlage von Plinke (1991) durchgeführt und dabei unter Verwendung von statistischen Auswertungsmethoden die Abhängigkeiten der Staubentstehung von Parametern wie Abwurfhöhe, Abwurfmenge, Materialdichte und Materialfeuchtigkeit festgestellt. Dabei wurden organische und mineralische Substanzen untersucht. Es wurde bei den Untersuchungen eine proportionale Abhängigkeit der Emissionsrate von der Abwurfhöhe (siehe Abbildung 6) und umgekehrt proportionale Abhängigkeiten der Emissionsrate von der Materialfeuchte und der Abwurfmenge festgestellt. Diese Abhängigkeiten waren jeweils sehr materialspezifisch ausgeprägt. [1]

### 3.1 Fallhöhe / Abwurfgeschwindigkeit

Die Auftrennung der Partikel wird in Abhängigkeit von Partikelgröße, Partikeldichte, Materialfeuchtigkeit und Fallhöhe beschrieben. In Abbildung 7 und 8 ist der Zusammenhang zwischen Auftrennung bzw. Staubentstehung und Fallhöhe zu sehen. Bei steigender Fallhöhe nimmt die Fallgeschwindigkeit und damit auch die Menge an entstehenden Staub zu. [1]

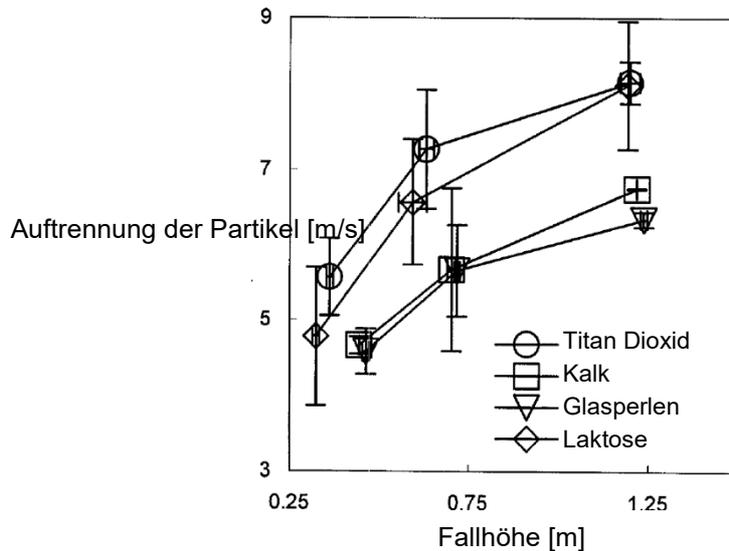


Abbildung 7: Auftrennung der Partikel in Abhängigkeit von der Fallhöhe [1]

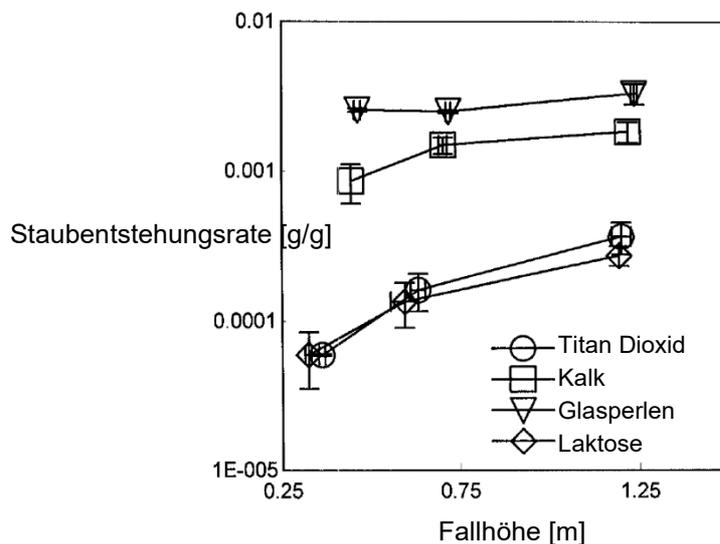


Abbildung 8: Staubentstehung in Abhängigkeit von der Fallhöhe [1]

Wesentlich ist auch die Abwurfgeschwindigkeit, mit der das Schüttgut das Förderband verlässt. Hierbei ist zu beachten das bei Übergabeschurren die Auftrennung der Partikel an den Prallflächen erfolgt. Da bei höheren Abwurfgeschwindigkeiten die Aufprallenergien größer werden ist eine möglichst geringe Abwurfgeschwindigkeit zu empfehlen.

## 3.2 Materialfeuchtigkeit

Durch eine hohe Materialfeuchtigkeit erhöht sich auch die Kohäsion und mindert somit die Staubentstehung von fast allen Stoffen. Siehe Abbildung 9 und 10. [1]

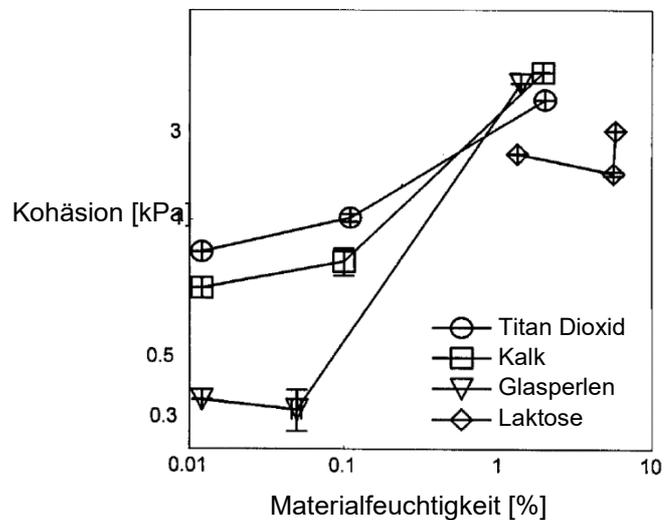


Abbildung 9: Kohäsion in Abhängigkeit von der Materialfeuchtigkeit [1]

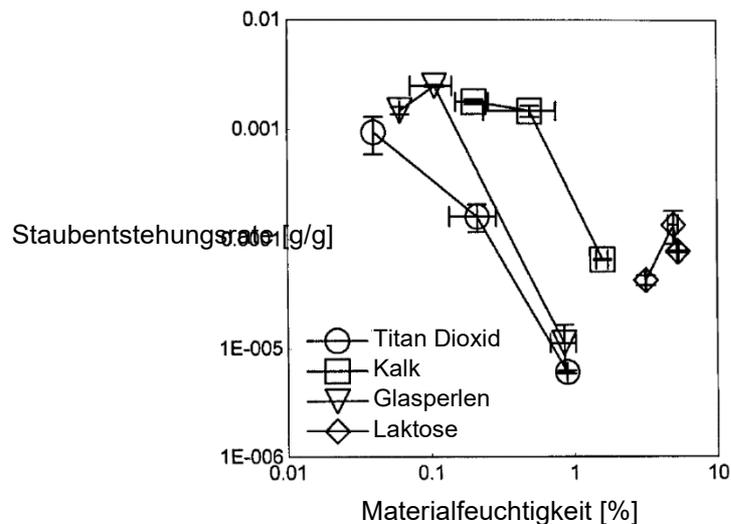


Abbildung 10: Staubentstehung in Abhängigkeit von der Materialfeuchtigkeit [1]

Schon eine leichte Erhöhung der Materialfeuchtigkeit bewirkt eine große staubunterdrückende Wirkung. Wird das Schüttgut zu feucht, kann dies jedoch den Prozess beeinflussen oder auch zu ungewünschter Agglomeration führen.

## 3.3 Abwurfmenge

Das Erhöhen der Abwurfmenge bzw. ein erhöhter Materialfluss erzeugt einen engeren Kontakt der Partikel zueinander, wodurch ein Loslösen aus dem Partikelstrom erschwert wird. Mit steigender Abwurfmenge, erhöht sich auch der Querschnitt des Partikelstroms, dadurch werden mehrere Partikel im Inneren gegen die Umgebungsluft abgeschirmt. [1]

---

## 4 Gründe für Staubunterdrückung

---

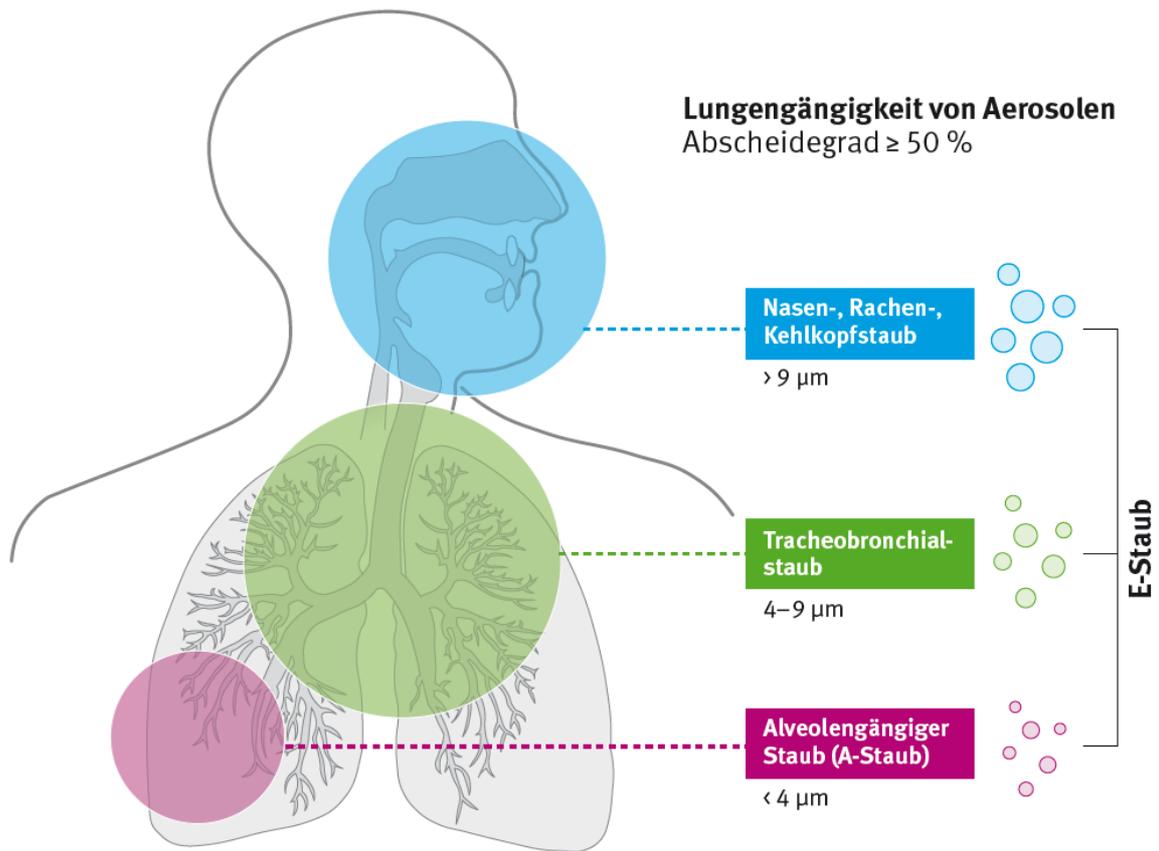
Das Einatmen großer Staubmengen beziehungsweise von toxischen Stäuben, kann den Reinigungsmechanismus der Lunge über eine längere Zeit stark beeinträchtigen oder sogar komplett zum Erliegen bringen. Die daraus entstehenden Folgen sind z. B. Hustenreiz, vermehrte Schleimabsonderungen, Bronchitis, Entzündungen des Lungengewebes und der Bronchien sowie Reizungen oder Entzündungen der oberen Atemwege. Toxische, krebserzeugende und allergische Staubpartikel wie Schwermetalloxide, Schweißrauche, Quarzstaub, Mehl oder Holzstäube können dann umso leichter ihre schädigende Wirkung in den Atemwegen und anderen Körperorganen entfalten. [3]

---

### 4.1 Arbeitsschutz

---

Die am Arbeitsplatz auftretenden Stäube, welche man über die Luft inhaliert, gelangen in unterschiedliche Bereiche der Atmungsorgane. Die größeren Partikel können in den oberen Atemwegen, also im Nasen- und Rachenraum, abgeschieden werden. Die kleineren Teilchen hingegen können in tiefere Atemwege bis hin zu den Alveolen oder Lungenbläschen vordringen. Um die gesundheitsschädliche Wirkung zu bewerten, ist neben der Teilchenkonzentration (Staubmasse pro Kubikmeter Atemluft in  $\text{mg/m}^3$ ) daher auch die Teilchengröße von wichtiger Bedeutung. [3]



**Abbildung 11: Lungengängigkeit von Aerosolen [3]**

Prinzipiell wird in zwei Größenklassen unterschieden: den **einatembaren** und den **alveolengängigen** Stäuben (siehe Abbildung 11). Staub, welcher durch Mund und Nase eingeatmet werden kann, fällt unter die einatembare Fraktion (E-Fraktion). Unter alveolengängigen Staub (A-Staub) versteht man jenen Teil des Staubes, welcher aufgrund der geringeren Größe bis in die Lungenbläschen vordringen kann. Je nach Art ihrer Entstehung können die einzelnen Schadstoffe in unterschiedlichen Teilchenfraktionen auftreten und dort, aufgrund ihrer toxischen Beschaffenheit, individuell über den Luftgrenzwert beschränkt sein. Bei der Beurteilung von gesundheitsgefährlichen Stoffen am Arbeitsplatz spielt deshalb auch neben dem Wissen der Anteile des A- und E-Staubes auch die Kenntnis um die Schadstoffverteilung innerhalb der einzelnen Fraktionen eine wichtige Rolle. Darum muss eine Unterscheidung nach Gestalt, Teilchengröße und stofflicher Zusammensetzung erfolgen. [3]

Nach der DIN EN 481 werden die Luftgrenzwerte für unterschiedliche Stäube entweder in der A- oder E-Fraktion festgelegt. Davon unabhängig sind für nicht toxische Stäube allgemeine Obergrenzen definiert. Bislang gibt es keine bindenden Grenzwerte für A- und E-Stäube in der EU. In den meisten EU-Mitgliedstaaten gilt jedoch bei E-Staub ein Grenzwert von 10 mg/m<sup>3</sup> und bei A-Staub von 1,25 bis 6 mg/m<sup>3</sup>. In der Tabelle 2 sind die international gültigen Staubgrenzwerte zu finden. [3]

<b>Land</b>	<b>A-Fraktion [mg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>E-Fraktion [mg/m<sup>3</sup>]</b>
Österreich	5	10
Belgien	3	10
Dänemark	5	10
Frankreich	5	10
Deutschland	1,25	10
Ungarn	6	10
Spanien	3	10
Schweden	5	10
Schweiz	3	10
USA	5	15

**Tabelle 2: Staub am Arbeitsplatz - Internationale Grenzwerte [3]**

Die Benützung von Atemschutz kommt bei der Liste der Maßnahmen immer erst abschließend zu tragen. Es müssen zuerst alle technischen und organisatorischen Maßnahmen ausgeschöpft werden, um einen Einsatz rechtfertigen zu können. Atemschutz sollte nur dann Anwendung finden müssen, wenn nur kurzfristig (zum Beispiel bei Unfällen oder Betriebsstörungen) die Staubbelastung erhöht ist, beziehungsweise die Grenzwerte überschritten werden. Bei gewissen staubintensiven Tätigkeiten (auch für eine begrenzte Zeit) führt leider kein Weg an Atemschutzmaßnahmen vorbei. [3]

---

## 4.2 Technische Gründe

---

Abgelagerter Staub kann auch bei Maschinen und Anlagen zu massiven Schäden führen. Durch Ritzen und Kanten kann feiner Staub eindringen.

Durch Staub häufig auftretende Schäden an Maschinen und Anlagen:

- elektrische Störungen (überhitzende Elektronik)
- Funktionsstörungen
- Schäden an Maschinenführungen und Lagern
- abrasiven Verschleiß von Maschinen durch kleine Partikel (oft härter als Stahl)
- Qualitätsminderung
- Verunreinigung des Produkts
- mehr Ausschusskosten
- Messfehler
- hohe Wartungskosten
- Stillstand von Maschinen zu Reinigungszwecken
- Staubexplosion [4]

---

## 5 Staubunterdrückungsverfahren

---

In diesem Kapitel wird gezeigt welche unterschiedliche Möglichkeiten der Staubunterdrückung es gibt. Es ist zu beachten, dass sich diese Verfahren hauptsächlich auf Übergabestellen bei Gurtbandförderern beziehen. Anlagen zur Staubbekämpfung gibt es auch in vielen anderen Bereichen, auf welche hier nicht näher eingegangen wird.

---

### 5.1 Einteilung der Verfahren

---

**Präprimäre Maßnahmen** befassen sich mit der Veränderung des Materials, bevor es durch etwaige Prozesse zur Staubeentwicklung kommen kann. Ein Beispiel dieser Maßnahmen ist z. B. die Herstellung von Pellets, wie bei der Formung in Pelletieranlagen von Eisenfeinerzen zu Kügelchen. [1]

**Primäre Maßnahmen** können in organisatorische, technische und bauliche Maßnahmen unterteilt werden. Ziel ist es, die Staubeentstehung am Ursprung zu reduzieren [1]:

- Organisatorische Primärmaßnahmen widmen sich der Änderung der Verhaltensweise von Bedienpersonal, z. B. kein Materialumschlag bei zu kräftigem Wind.
- Technische Primärmaßnahmen behandeln die Geräte und Techniken, welche der Emissionsentstehung entgegenwirken.
- Bauliche Primärmaßnahmen befassen sich mit der Gestaltung von Anlagen, durch die teilweise Emissionen vermieden werden, z. B. Lagerhallen.

**Sekundäre Maßnahmen** hemmen bereits entstandene Emissionen an der Ausbreitung wie z. B. [1]:

- geschlossene Ausführung von Anlagen
- Absaugung von Umschlagstellen
- Einsatz von Wasserschleiern

Eine Maßnahme kann in unterschiedliche Einteilungen fallen, wenn z. B. eine sekundäre Maßnahme nachfolgend eine präprimäre für eine andere Anlage ist. Für gewöhnlich werden mehrere verschiedene Minderungsmaßnahmen miteinander verknüpft wie z. B. geschlossene Anlagen mit Absaugungen. Es muss immer zwischen Kosten, Nutzen und Machbarkeit abgewogen werden, da jede Staubunterdrückungsmaßnahme mit zusätzlichen Betriebs- und Anschaffungskosten verbunden ist. [1]

#### **Maßnahmen in Bezug auf das Fördergut [1]:**

- Vereinheitlichung der Korngröße des Guts, Entfernen von Feinanteilen (Waschen, Sichten, Pelletieren und Ähnliches)
- Erhöhung der Gutfeuchtigkeit
- Vermeidung sperriger Verunreinigungen
- Aufbringung von Staubbindemitteln

#### **Maßnahmen in Bezug auf das Umschlagverfahren [1]:**

- Automatisierung des Umschlagbetriebs
- Minimierung der Abwurfhöhe
- Anpassung von Geräten (Greifern) an das jeweilige Produkt
- Rückführung von Greifern im geschlossenen Zustand
- Vergrößerung der Abwurfmasse bzw. des Abwurfmassenstroms
- Vermeidung von Zutrimmarbeiten
- Vermeidung des Einsatzes von Schleuderbändern

## 5.2 Einhausung und Abdichtung

Einhausungen verhindern nicht die Entstehung von Staub, sondern verhindern seine Ausbreitung. Einhausungen werden z. B. aus Vorhängen, flexiblen Plastikstreifen, festen Wänden etc. gefertigt. [1]

Um diese Ausbreitung zu verhindern, wird nach der Schüttgutaufgabe eine sogenannte "Beruhigungszone" etabliert. Diese Zone dient dazu, dass sich der Staub setzen kann und sich wieder an das Schüttgut anhaftet. In Abbildung 12 ist dieser Verlängerter Übergabebereich gut sichtbar. Über eine seitliche Abdichtung wird der Staub und auch Teile vom Schüttgut innerhalb der Einhausung gehalten. [5]

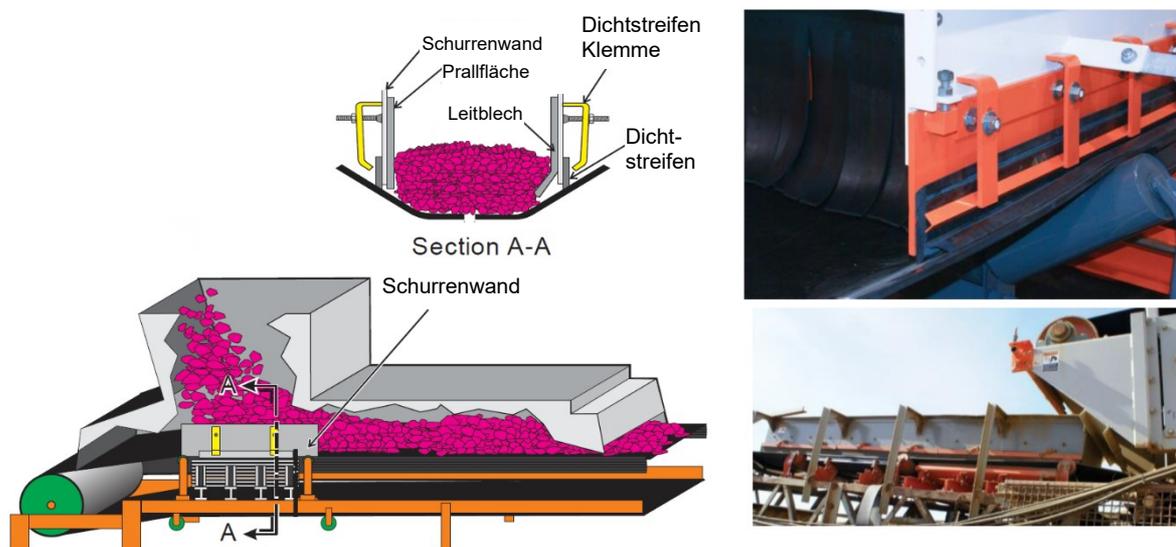


Abbildung 12: Verlängerte Aufgabeschurre mit seitlichen Abdichtungen [5]

An den Aus- und Eintrittsflächen der Übergabeschurren werden Staubvorhänge aus Gummistreifen angebracht. Um die Effektivität noch zu erhöhen, werden zwei Staubvorhänge mit etwas Abstand hintereinander angebracht. Diese Vorhänge befinden sich am Ende der Beruhigungszone wie in Abbildung 13 ersichtlich. [5]



Abbildung 13: Zweistufige Staubvorhänge an Ein- und Austritt [5]

### 5.2.1 Spezielles Seitenabdichtungssystem (AirScrape®)

Beim AirScrape® handelt es sich um eine neuartige seitliche Abdichtung zwischen der Schurre und dem Förderband (siehe Abbildung 14). Diese Abdichtung ist berührungsfrei, hat somit keinen Verschleiß und reduziert die Belastung des Antriebssystems. Schräg angebrachte Lamellen erzeugen einen Luftzug, der die Luft von außerhalb in Richtung Gurtmitte leitet. Durch das laufende Band und den Materialbewegungen wird dieser Sogeffekt noch verstärkt, sodass auch feine Partikel im Förderbereich gehalten werden. Grobes, nach außen drängendes Fördergut, wird durch die Lamellen wieder zur Gurtmitte gelenkt und dadurch die Verschüttung erheblich verringert. [6]

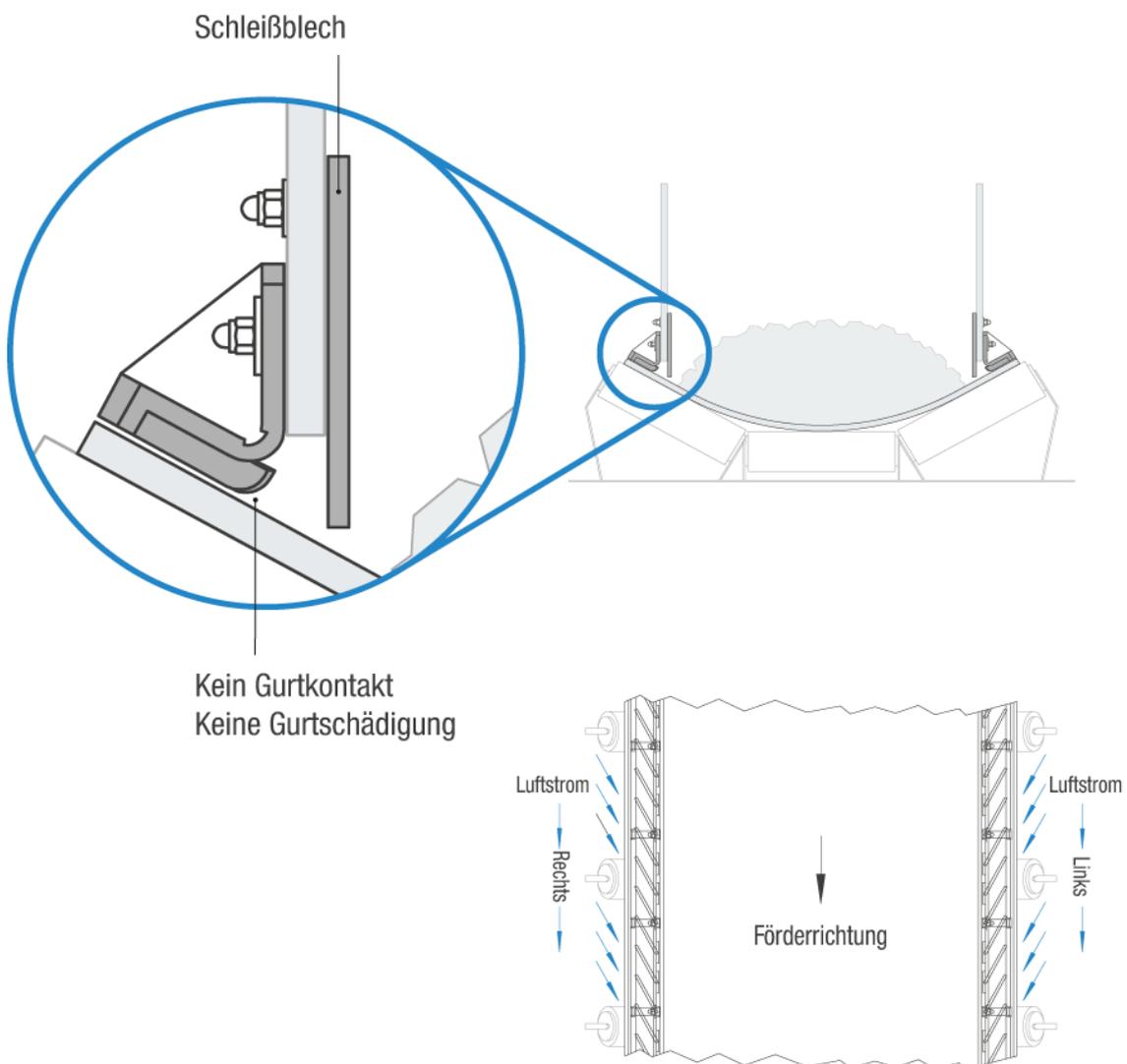


Abbildung 14: AirScrape® Seitenabdichtungssystem [6]

### 5.3 Absaugung

Die wesentlichen Bestandteile einer Absaugungsanlage sind in Abbildung 15 ersichtlich. Um eine effiziente Absaugung zu gewährleisten ist die korrekte Auslegung der einzelnen Komponenten essentiell. Bei falscher Dimensionierung der Anlage kann es zu ungewollter Staubeentwicklung und Stauffreisetzung kommen. [5]

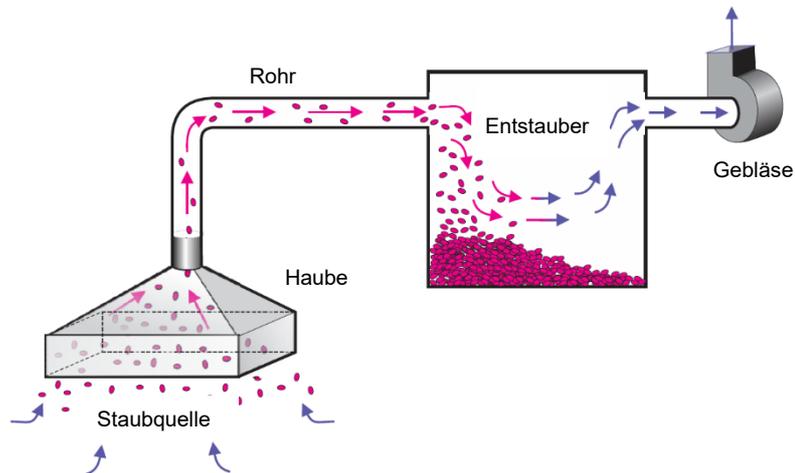


Abbildung 15: Aufbau einer Absaugungsanlage [5]

Abbildung 16 zeigt die Absaughaube einer Übergabestelle. Der eingesammelte Staub wird zentral gesammelt und kann später dem Förderkreislauf wieder hinzugefügt werden.

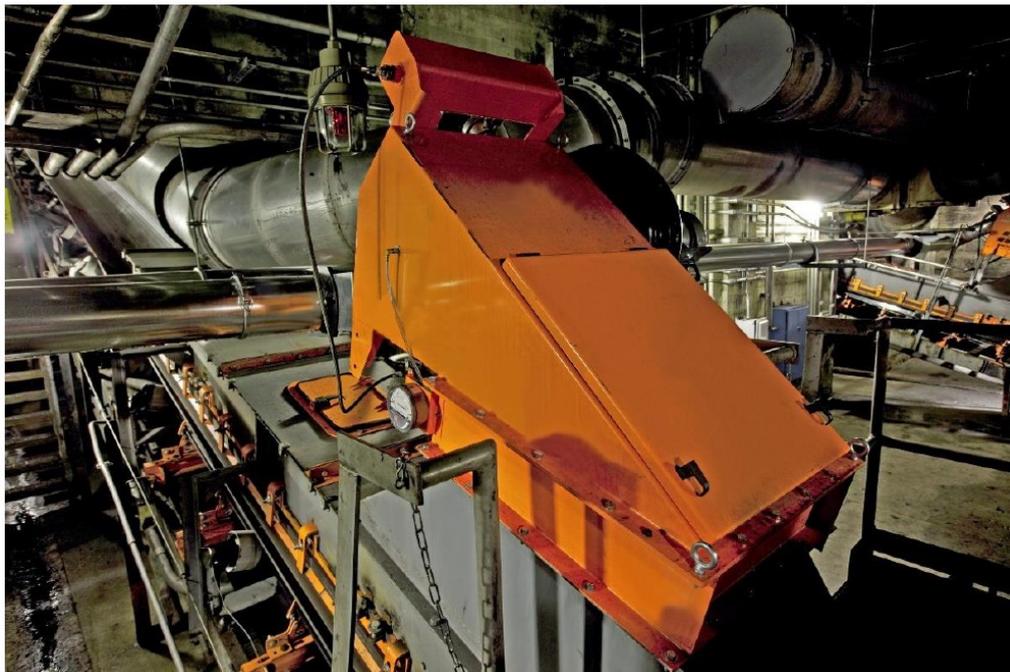
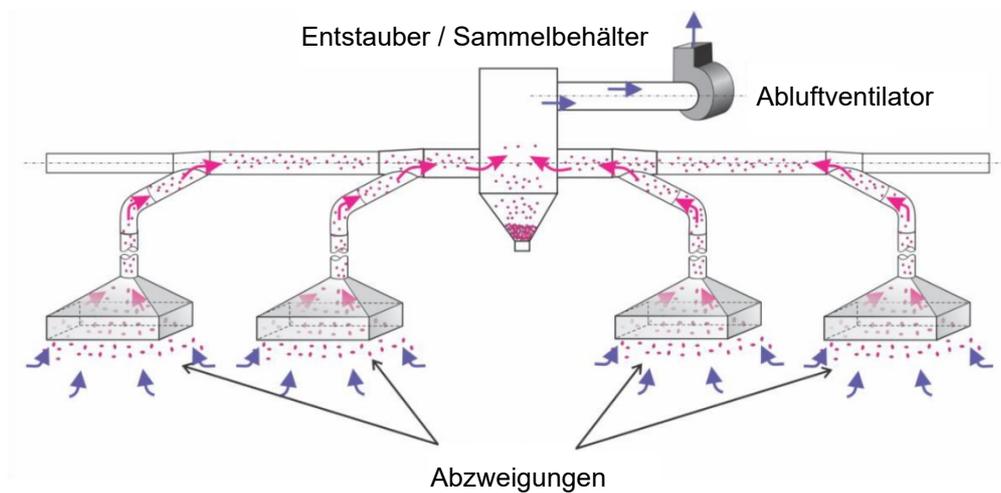


Abbildung 16: Absaugung an einer Übergabestelle [5]

Die Vorteile gegenüber der Staubunterdrückung mit Wasserbedüsung sind, dass dieses Verfahren es auch ermöglicht ultra-feine partikel abzusaugen und die Leistungsfähigkeit bei niedrigen Temperaturen nicht zurückgeht. Weiters können auch hygroskopische Staubpartikel abgesaugt werden. [5]

In Abbildung 17 ist die Absaugung mehrerer Übergabestellen vereinfacht dargestellt. Hieran kann man auch die negativen Seiten dieses Staubunterdrückungsverfahrens erkennen. Um eine wirkungsvolle Absaugung zu erreichen, dürfen im Ansaugbereich (Unterdruckbereich) keine größeren Druckverluststellen wie zum Beispiel Löcher und Verstopfungen, auftreten. Um diese Fehler zu kompensieren, benötigt das Staubgebläse mehr Energie und somit verringert sich der Wirkungsgrad der Absaugung. Auch die Kontrolle der Filter ist unabdingbar, um eine erfolgreiche Staubunterdrückung zu gewährleisten.



**Abbildung 17: Zentralisierte Absaugungsanlage [5]**

### 5.3.1 Entstauber

Die Wahl des korrekten Entstaubers für die Absaugungsanlage ist für deren Erfolg essenziell. Hierbei gibt es einige Punkte zu berücksichtigen [5]:

- Größe und Form der Partikel
- Staubmenge und Staubeigenschaften
- Feuchtigkeit und Temperatur des Luftstroms
- Abrasivität der Partikel

Je nachdem welche Eigenschaften der Staub mit sich bringt wird der passende Entstauber gewählt. Die folgenden Entstauber sind typisch für den Einsatz in Absauganlagen:

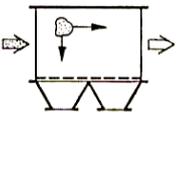
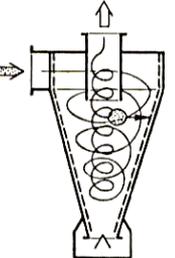
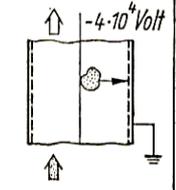
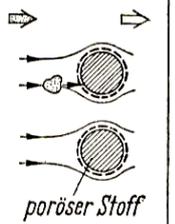
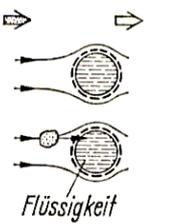
	<i>Schwerkraft-entstauber</i>	<i>Fliehkraft-entstauber</i>	<i>Elektro-entstauber</i>	<i>Filtrations-entstauber</i>	<i>Wasch-entstauber</i>
<i>Schema</i>					
<i>Abtrennungsfläche</i>				<i>poröser Stoff</i>	<i>Flüssigkeit</i>
<i>Verschiebungskräfte</i>	<i>Schwerkraft</i>	<i>Fliehkraft</i>	<i>elektrische Kräfte</i>	<i>Trägheits-,thermo-dynamische-(Diffusion) und elektr. Kräfte</i>	<i>Trägheitskräfte (thermo-dynamische- und elektr. Kräfte)</i>
<i>Abtrennungs-ursachen</i>	<i>Schwerkraft im Strömungs-totraum</i>	<i>Überschreiten der Grenzbelastung an der Wand</i>	<i>Haftkräfte</i>	<i>Gitterwirkung Haftkräfte</i>	<i>Grenzflächenkräfte</i>
<i>Reinigung des Abtrennungsraumes</i>	<i>mechanische Transportmittel</i>	<i>kontinuierlich durch Schwer- und Strömungskräfte; Flüssigkeitsfilm</i>	<i>periodisch durch Abrütteln des Staubes; Flüssigkeitsfilm</i>	<i>erneuern des porösen Stoffes; periodisches Abrütteln</i>	<i>Flüssigkeit im Durch-oder Umlauf</i>

Abbildung 18: Übersicht über Entstauber [7]

## 5.4 Wasserbedüsung

Es handelt sich hier um eines der ältesten und auch am meist angewendeten Verfahren im Bereich der Staubbekämpfung. Durch das Besprühen mit Wasser, werden die Partikel immer schwerer bis sie ihre Fähigkeit zu schweben verlieren. Die Art und Platzierung der Düsen, die Menge an Flüssigkeit, die Größe der Tropfen und das Besprühungschema haben eine große Einwirkung auf die Effektivität solcher Staubunterdrückungssysteme. Zwei Methoden zur Staubbekämpfung durch Besprühen werden eingesetzt (siehe Abbildung 19) [1]:

- Direktes Besprühen des Materials womit ein Abheben des Staubes verhindert wird
- Das Binden von schwebendem Staub durch Besprühen der Staubwolke

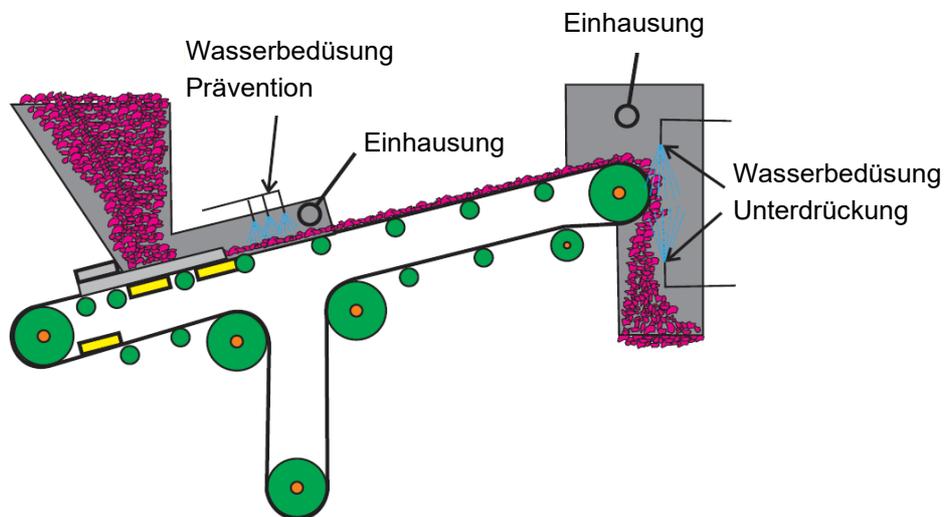
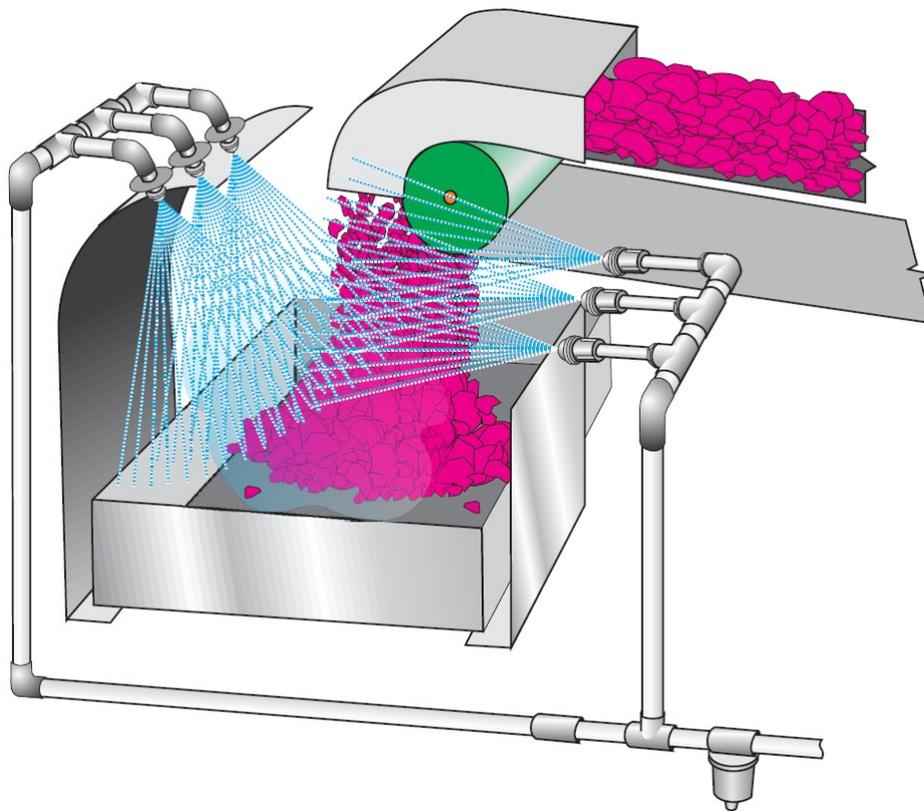


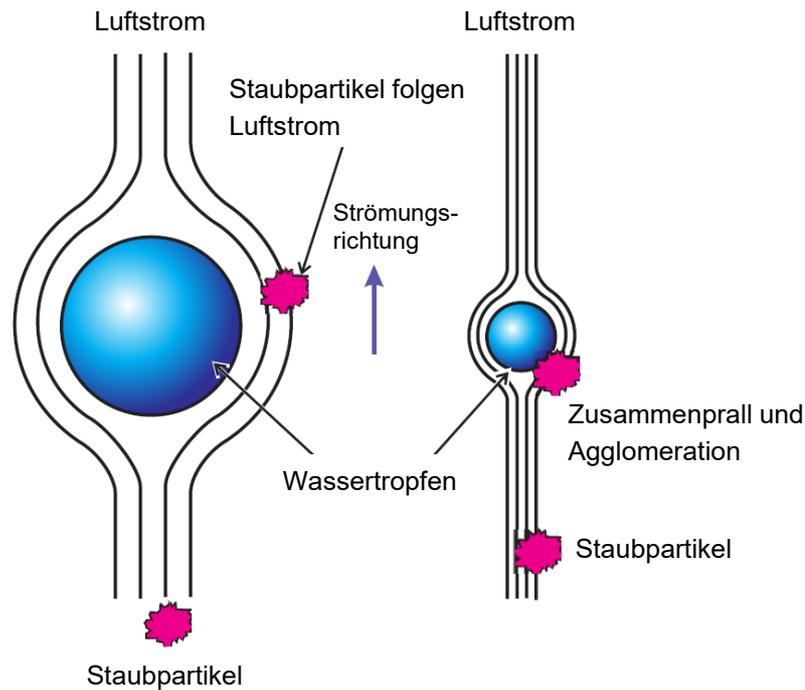
Abbildung 19: Die 2 Methoden der Staubbekämpfung [5]

Die Position der Düsen ist entscheidend für eine funktionierende Staubunterdrückung. In Abbildung 20 ist eine typische Positionierung der Wasserdüsen an einer Übergabestelle dargestellt. In den nachfolgend durchgeführten Versuchen wurde diese Positionierung nachgestellt und für optimal befunden.



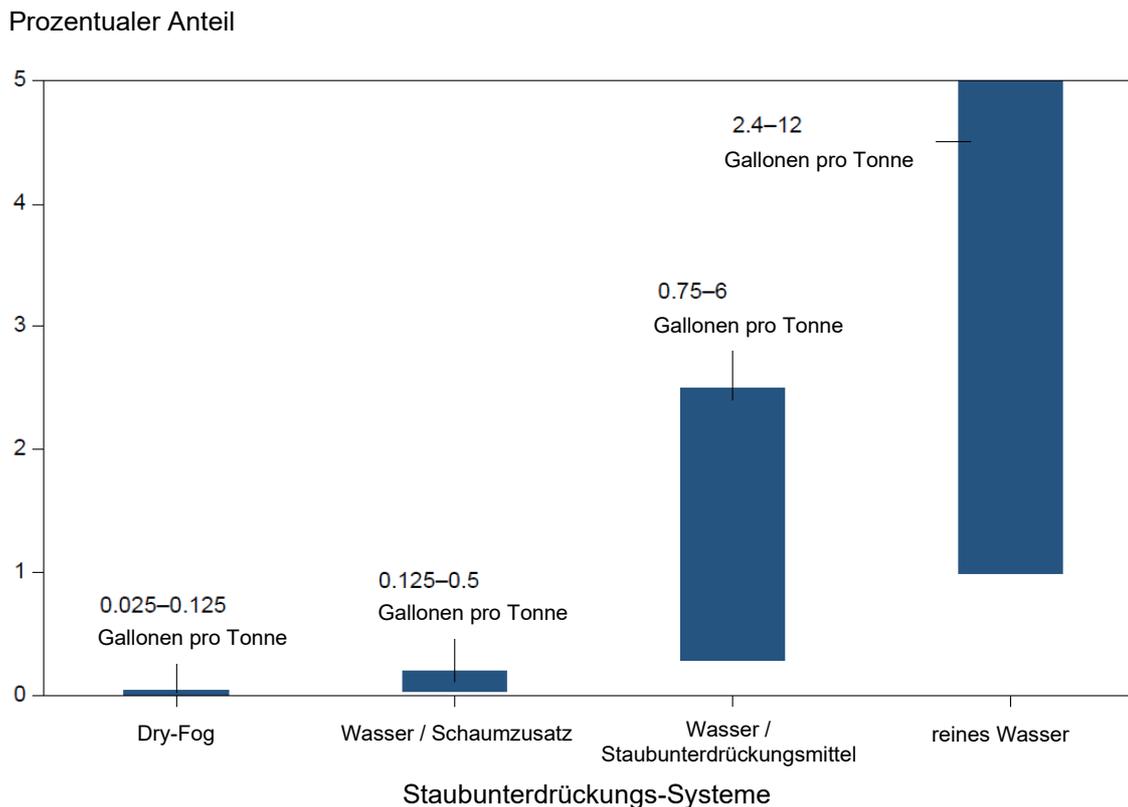
**Abbildung 20: Typische Düsenpositionierung an einer Übergabestelle [5]**

Die richtige Tropfengröße hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Wirksamkeit dieses Verfahrens. Bei Tropfen, die um einiges größer sind als die Staubpartikel, wird der Partikel dem Luftstrom um den Tropfen herum folgen. Haben die Partikel und der Tropfen ungefähr dieselbe Größe dann berühren sie sich, wenn die Partikel den Stromlinien folgen. Bei der Staubunterdrückung durch Besprühung von Schüttgut sollten immer größere Tropfen verwendet werden. [1]



**Abbildung 21: Einfluss der Tropfengröße [5]**

Der Feuchtigkeitseintrag in das Schüttgut stellt ein großes Problem bei der Besprühung mit Wasser dar. Neu entwickelte Dry-Fog-Systeme sollen dieses Problem lösen. Es werden hierbei spezielle Düsen verwendet, welche in Kombination mit Druckluft, feine 1 bis 10 µm große Wassertropfen erzeugen. Bei diesem System liegt der Feuchtigkeitseintrag nur etwa bei rund 0,1% (siehe Abbildung 22). [1]



**Abbildung 22: Feuchtigkeitseintrag der unterschiedlichen Systeme [5]**

Um die Performance einer Staubunterdrückungsanlage mit Wasserbedüsung zu erhöhen, können bestimmte Staubunterdrückungsmittel dem Wasser beigemischt werden. Diese Zusätze vermindern die Oberflächenspannung und verkleinern den Benetzungswinkel der Wassertropfen. Dies führt zu einem kleineren Tropfendurchmesser und erhöht die Fähigkeit ein Staubpartikel zu befeuchten. Somit wird weniger Wasser für denselben Grad an Staubbinding benötigt. Zu beachten ist, dass diese Mittel wesentlich teurer im Einsatz sind als reines Wasser und sie die chemischen Eigenschaften des Förderguts verändern oder sogar Teile der Förderanlage beschädigen können. [5]

Es können auch zusätzliche Lösungen beigemischt werden, welche eine Anti-Frost Wirkung haben und den Betrieb bei niedrigen Temperaturen ermöglichen. [5]

---

### 5.4.1 Schaumzusatz

Für staubunterdrückende Schäume gibt es viele verschiedene Hersteller. Sie bestehen im Allgemeinen aus Wasser, Luft und Chemikalien. Der große Vorteil dieser Schäume liegt darin, dass der Feuchtigkeitseintrag in das Material wesentlich niedriger ist als beim konventionellen Besprühen mit Wasser. Das Aufsprühen des Schaums auf das Schüttgut erfolgt vor Übergabestellen, Brechern oder Anderem. Die Schaumblasen werden durch die entstehenden Schaumpartikel aufgebrochen, wodurch die in den Blasen enthaltene Flüssigkeit freigesetzt wird, und den Staub befeuchtet (siehe Abbildung 23). [1]



Abbildung 23: Funktionsweise von staubunterdrückendem Schaum [8]

## 5.5 Optimierung der Schüttgutübergabe

Zu den effektivsten Staubunterdrückungsmaßnahmen gehören Verfahren, welche direkt bei der Staubentstehung ansetzen. Eine Reduzierung der Fallhöhe oder der eingeschlossenen Luft durch unterschiedliche Konstruktionen und Systeme und die damit einhergehende Verminderung des Staubes hat also eine große Bedeutung. Die Fallhöhe kann durch simple Konstruktionen wie Rampen oder Kaskaden reduziert werden. [1]

Die sogenannte „Hood & Spoon“ Methode (siehe Abbildung 24) ist eine konstruktive Lösung einer Fallrutsche, welche die Fallgeschwindigkeit des Schüttguts minimieren soll. Ein kompakter Schüttgutstrom und somit kaum eingeschlossene Luft im Fördergut tragen hier zu geringerer Staubentwicklung bei.

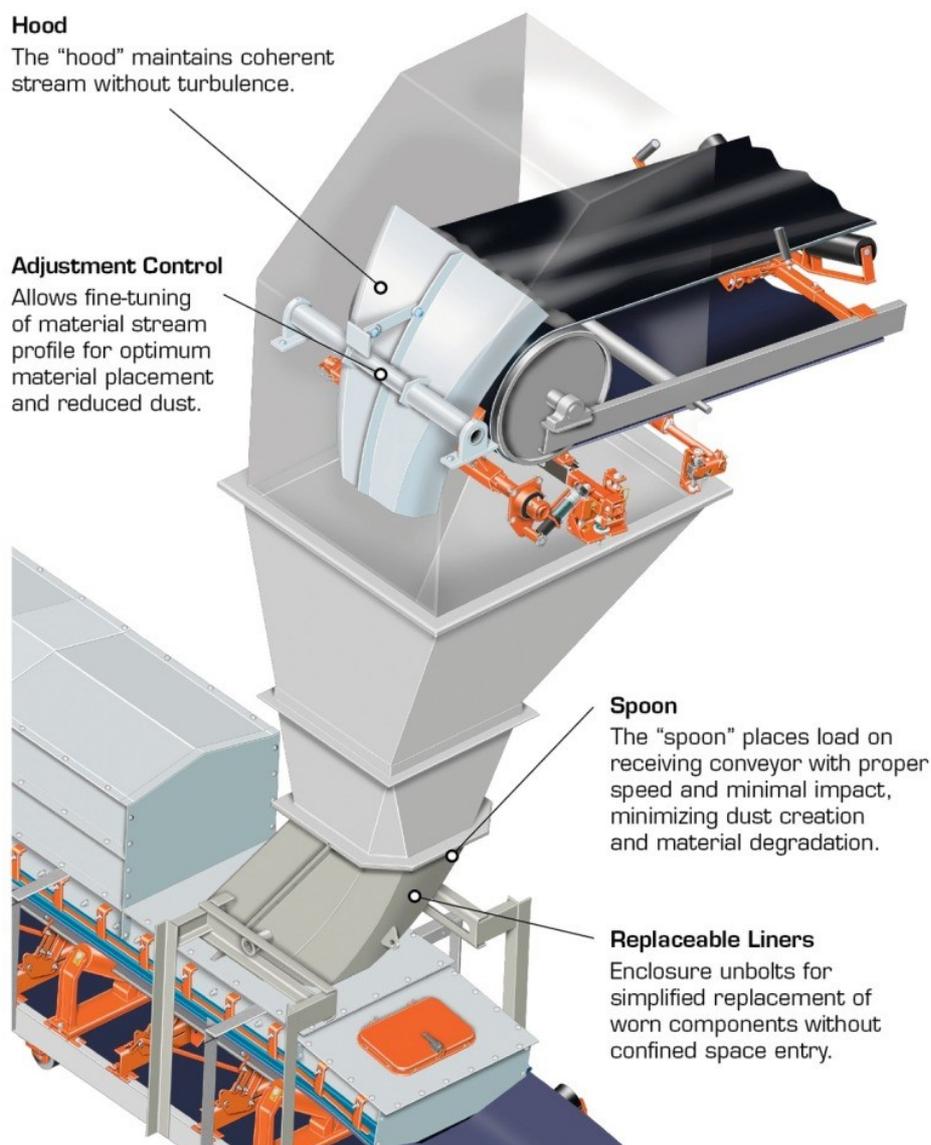
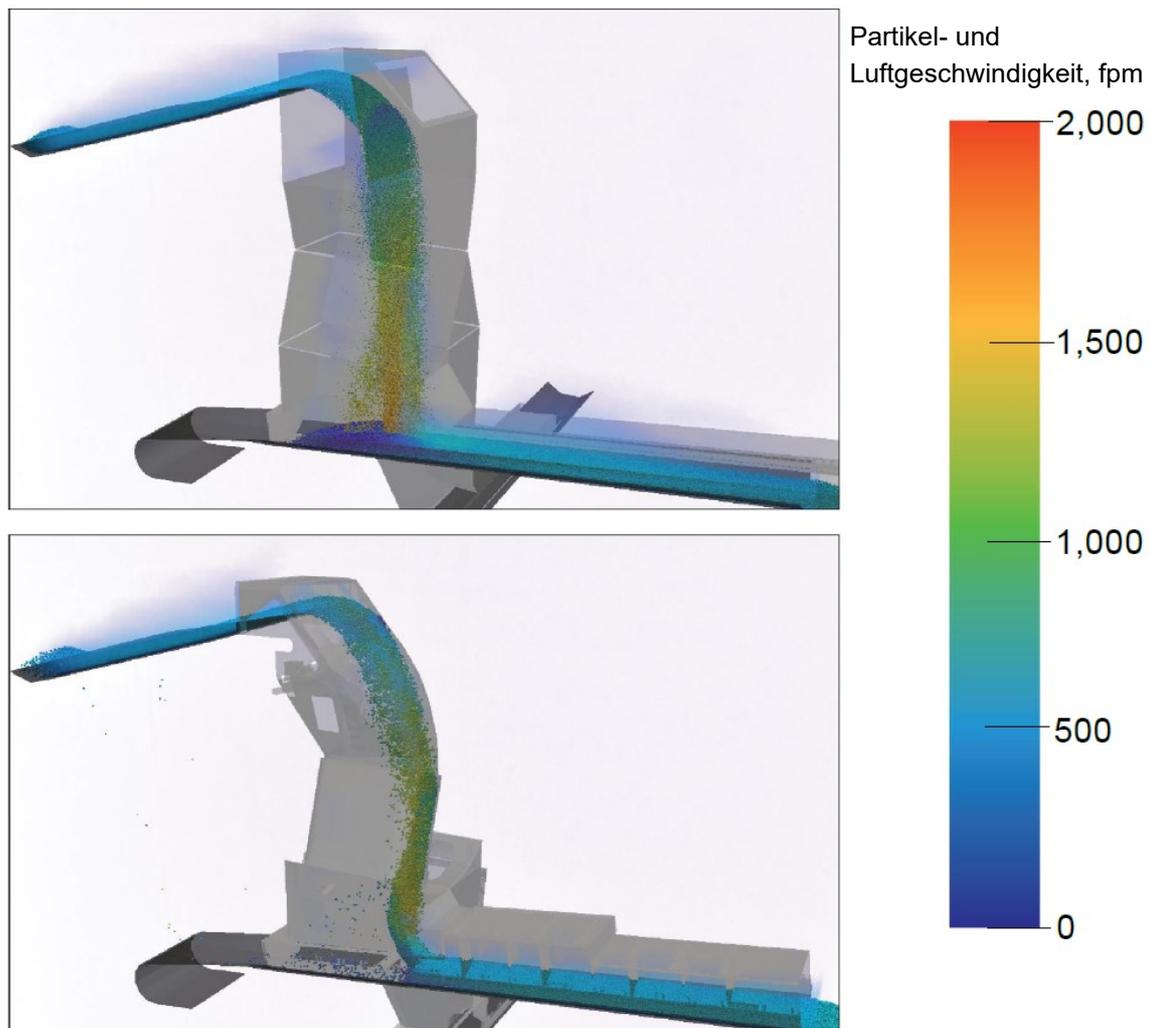


Abbildung 24: „Hood & Spoon“ Methode [9]

In Abbildung 25 ist eine DEM/CFD Simulation einer Übergabeschurre zu sehen. Im oberen Bild wird ein Negativbeispiel einer Schurre dargestellt, wobei eine Staubwolke im oberen Teil der Schurre entsteht und das Schüttgut mit einer hohen Fallgeschwindigkeit auf das untere Förderband trifft. Im unteren Bild ist eine Simulation einer „Hood & Spoon“ Übergabe zu sehen. Es ist ersichtlich, wie sich die Geschwindigkeiten der Schüttgutpartikel verringern und die Staubentstehung abnimmt.



**Abbildung 25: CFD/DEM Simulation verschiedener Übergaben [5]**

Die Auslegung solcher optimierten Schüttgutübergaben bedarf einem hohen konstruktiven Aufwand. Um die Funktionalität zu garantieren, müssen umfassende Berechnungen und Simulationen durchgeführt werden. Änderungen der Schüttguteigenschaften können ebenfalls einen großen Einfluss auf die Effektivität dieser Methode haben. Bei Veränderungen der Fördergeschwindigkeit oder des Massenstroms müssen neue Berechnungen und eventuell Adjustierungen der Übergabe stattfinden, um ein Anbacken des Materials oder übermäßigen Verschleiß zu verhindern.

---

## **6 Vergleich der Verfahren**

---

Um einen Überblick der in Kapitel 5 vorgestellten Staubminderungsmaßnahmen zu erhalten, soll in diesem Kapitel eine Gegenüberstellung und Bewertung der Verfahren erfolgen.

---

### **6.1 Gegenüberstellung / Bewertung der Verfahren**

---

Die Bewertung der Verfahren (siehe Abbildung 26) erfolgt nach dem Schulnotensystem. Von 1 bis 5, d.h. von sehr gut bis nicht genügend. Es wurden mehrere Kriterien zur Bewertung herangezogen. Die Punkte, mit denen die Verfahren beurteilt wurden, hängen stark von der jeweiligen Ausführung ab, die betrachtet wurde. Eine Variante kann in unterschiedlichen Dimensionen ausgeführt und auch unterschiedlich betrieben werden. Auch die Technologie der einzelnen Verfahren entwickelt sich stetig weiter. Hierbei werden je Variante die bestmöglichen Werte zur Betrachtung herangezogen. Die vergebenen Punkte werden jeweils mit einem Faktor gewichtet und anschließend aufsummiert. Die Verfahren mit den wenigsten Punkten ergeben die besten Lösungen. Die Gewichtung der einzelnen Kriterien wurde nach meinen Ansichten festgelegt. Hierbei wurde auch die momentane wirtschaftliche Lage und das Verlangen nach ökologisch sauberen Alternativen berücksichtigt. Eine abweichende Betrachtung ist möglich, da eventuell jemand anders den anderen Bereichen mehr Bedeutung zukommen lässt. Somit können unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden.

Kriterien:	Absaugung	Wasserbedüsung	Schaumzusatz	Einhausung / Abdichtung	Optimierte Übergabe	Gewichtung	1...5 (Schulnoten)
Komplexität der Anlage	3	2	3	1	2	1	niedrig...hoch
Feuchtigkeitsintrag Schüttgut	1	3	4	1	1	3	trocken...feucht
Wartungsintensivität	4	3	4	2	2	2	niedrig...hoch
geschätzte Wirksamkeit	2	2	1	3	3	4	stark...schwach
Materialverlust Schüttgut	2	1	1	2	3	3	wenig...viel
Flexibilität / Schwankung Schüttgut	3	3	4	2	4	2	hoch...wenig
Platzbedarf	4	2	3	2	2	1	wenig...viel
Anschaffungskosten	4	3	4	2	3	2	günstig...teuer
Betriebskosten	4	3	4	2	2	3	günstig...teuer
<b>Summe Punkte:</b>	<b>27</b>	<b>22</b>	<b>28</b>	<b>17</b>	<b>22</b>		
<b>Summe Punkte gewichtet:</b>	<b>58</b>	<b>51</b>	<b>61</b>	<b>42</b>	<b>52</b>		

Abbildung 26: Bewertung der Staubunterdrückungsverfahren

---

## 6.2 Gewählte Staubunterdrückungsverfahren

---

Aus den Punktesummen wird ersichtlich, dass die einfachsten und preiswertesten Verfahren auch die wirtschaftlichsten sind, jedoch nicht die effektivsten.

Es wird empfohlen die Maßnahmen mit Einhausung/Abdichtung bzw. eine Optimierung der Übergabe als erstes anzustreben. Eine optimale Staubunterdrückung wird erreicht in dem mehrere Verfahren miteinander kombiniert werden. So ist es zum Beispiel üblich, dass eine gut optimierte Übergabe mit einem Wasserbedüsungssystem ergänzt wird, um einen möglichst niedrige Staubeentwicklung zu gewährleisten. Weiters kann auch eine Absaugung ohne eine Einhausung der Übergabe nicht effizient betrieben werden.

Die Variante mit Schaumzusatz gehört zu den wirksameren Verfahren jedoch bringt sie einige Nachteile mit sich. Unter anderem ist der Feuchtigkeitseintrag in das Schüttgut höher und die Kosten im Betrieb sind im Vergleich mit den anderen Verfahren auch mehr.

Um eine wirklich effektive Staubunterdrückung zu gewährleisten wird der Einsatz von Sprühsystemen oder einer Absaugung unvermeidbar sein. Daher wurde mit Unterstützung der voestalpine Stahl Donawitz GmbH diese zwei Staubunterdrückungsverfahren näher untersucht. Es wurden diese Varianten in einem Versuchsaufbau auf ihre Wirksamkeit untersucht und geprüft welches dieser Verfahren besser ist.

---

## 7 Untersuchung der Staubunterdrückungsverfahren

---

Um die Effizienz verschiedener Staubunterdrückungsmaßnahmen zu begutachten, wurden im Auftrag der voestalpine Stahl Donawitz GmbH am Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft – Fördertechnik und Konstruktionslehre Untersuchungen am lehrstuhleigenen Schüttgutförderkreislauf, bestehend aus vier Gurtbandförderern, durchgeführt. Konkret sollte die Effizienz einer Staubabsaugung mit einer Unterdrückungsmaßnahme durch Wasserbedüsung verglichen werden. Als Referenz wurden auch Untersuchungen ohne Staubunterdrückungsmaßnahmen durchgeführt. Alle notwendigen Messungen wurden an der gleichen Übergabestelle zwischen zwei Gurtbandförderern des Förderkreislaufs unter den gleichen Rahmenbedingungen durchgeführt.

---

## 8 Versuchsaufbau

Alle Versuche wurden mit dem Förderkreislauf des Lehrstuhls durchgeführt. Dieser Förderkreislauf besteht aus vier Gurtbandförderern (mit einer Gurtbreite von 400 Millimetern und einer Länge von je 5 Meter), welche beliebig positioniert werden können. Jeder einzelne Gurtbandförderer kann mit einer variablen Fördergeschwindigkeit betrieben werden

Um den Staubniederschlag an der ausgewählten Übergabe von einem auf das nächste Förderband messen zu können, wurde eine Einhausung (siehe Abbildung 27) in Form einer Übergabeschurre konstruiert. Die Funktion dieser Schurre ist es, durch eine Fallhöhe von 1,7 Metern möglichst viel Staub aufzuwirbeln und diesen in der Einhausung zu behalten. In der Schurre befinden sich insgesamt sieben vorher definierte Messstellen (siehe Abbildung 28), welche den Staubniederschlag durch Messdosen (siehe Kapitel: „Verwendete Messgeräte“) auffangen.

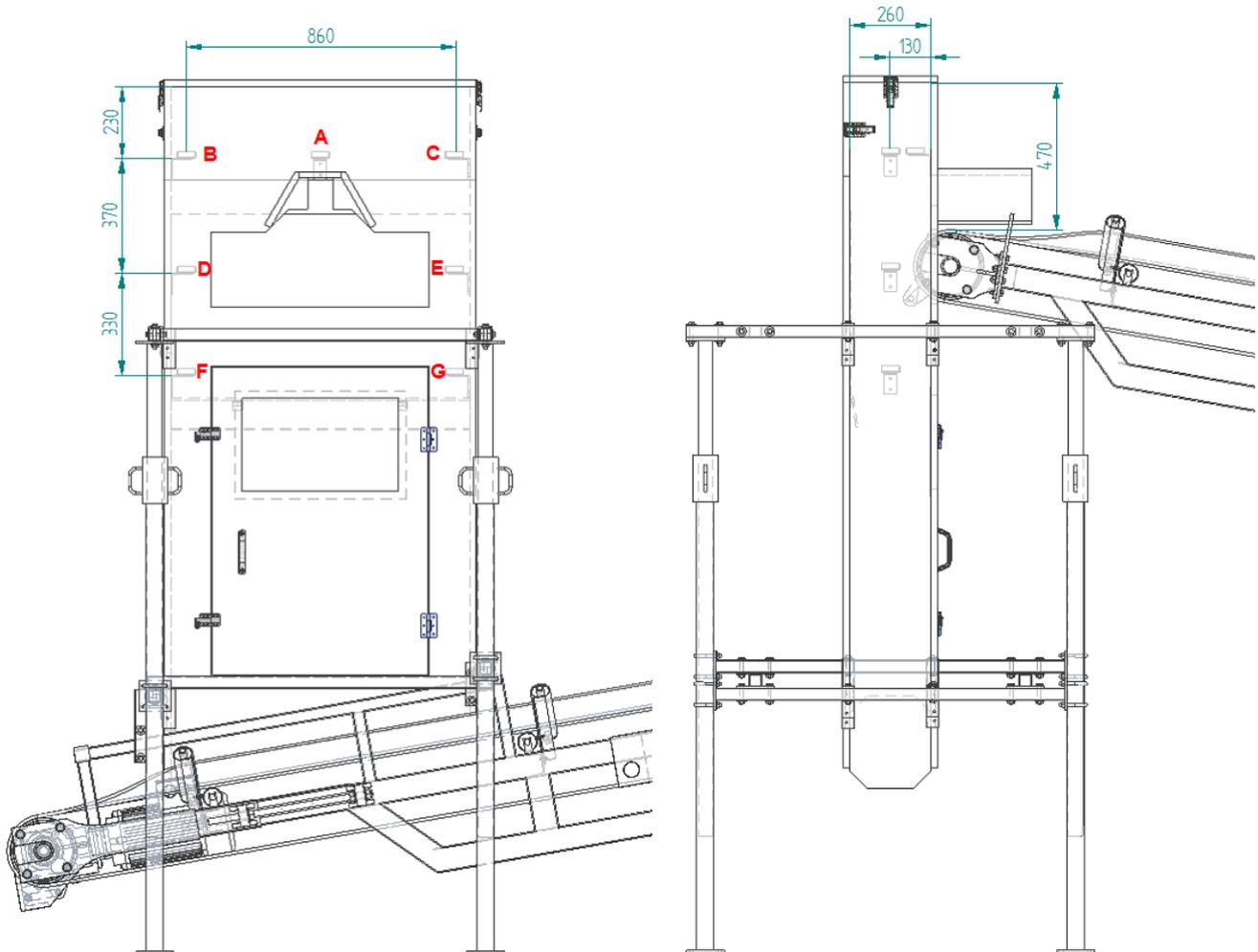


Abbildung 27: Ansichten des Versuchsaufbaus

Damit kein bzw. nur geringe Mengen an Staub entweichen können, wurde das Gehäuse mit Abdichtungen und Abstreifern versehen.

Für jeden Versuch wurden die Messdosen samt Deckel im Vorhinein abgewogen und dann an den Messstellen befestigt. Nach dem jeweiligen Versuch wurden diese erneut abgewogen und die Differenz als Staubniederschlag bewertet.

Die Positionen der Messstellen sind in Abbildung 28 dargestellt:



**Abbildung 28: Position der Messdosen**

Durch eine in der Tür angebrachte Plexiglasscheibe war es möglich, während der Versuche ins Innere der Schurre zu blicken. Ein weiteres Sichtfenster befand sich am obersten Punkt der Einhausung. Es wurden von jedem Versuch Videoaufnahmen gemacht, um die Effektivität der Staubunterdrückungsmaßnahmen einschätzen zu können.

Weiters befand sich ein Ablenklech unterhalb der Aufprallfläche an der Rückwand der Schurre, wodurch das Schüttgut mittig auf das nächste Förderband aufgegeben werden konnte.

---

## 9 Simulation

---

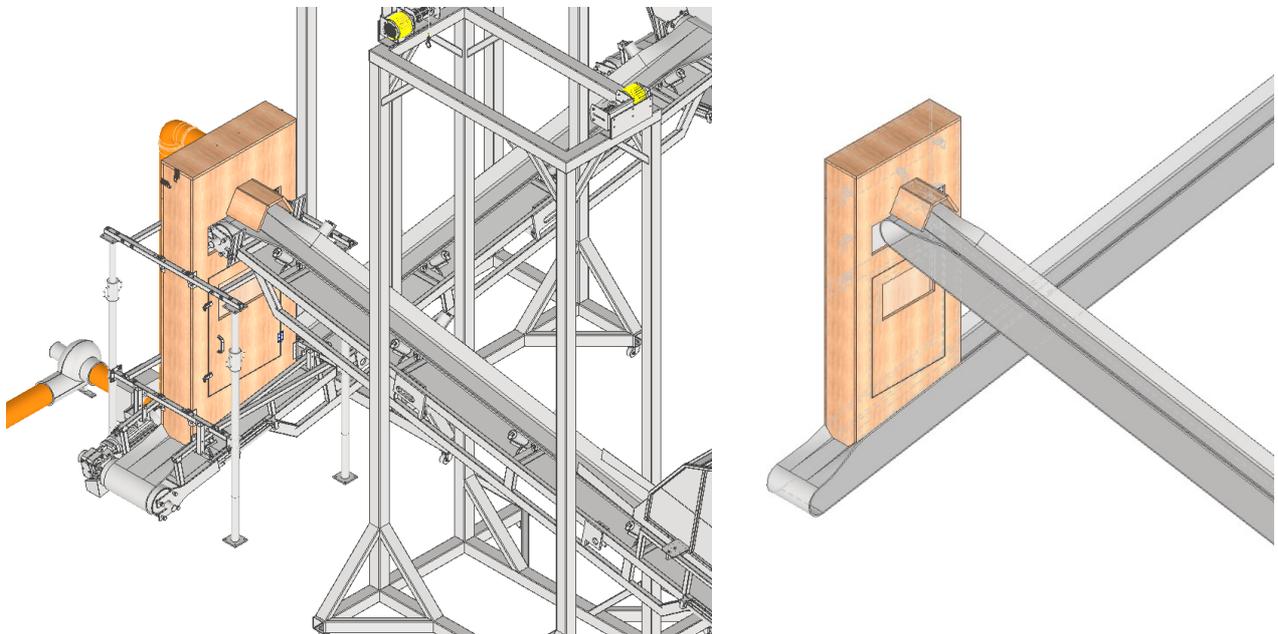
Um die Funktion der Übergabeschurre zu beurteilen, wurde der im CAD-Programm (Autodesk Inventor) erstellte Prototyp einer Simulation (Altair EDEM) unterzogen. Das Ziel war es hier zu erkennen, ob sich das Schüttgut gleichmäßig in der Schurre verteilt und die Messdosen nicht mit dem Schüttgutstrom in Kontakt kommen. Weiters wurde noch untersucht, wie sich unterschiedliche Positionen der Wasserbedüsung auf die Vermischung der Wassertropfen mit dem Schüttgutstrom auswirken.

---

### 9.1 Aufbau

---

Die für die Simulation benötigte STL-Datei wurde aus der CAD Konstruktion entnommen. Die Übergabeschurre, die unterschiedlichen Staubunterdrückungsverfahren und alle Anbauteile wurden in Autodesk Inventor Professional 2022 konstruiert. Für die Simulation wurde die Übergabe stark vereinfacht und auf die wichtigsten Geometrien reduziert (siehe Abbildung 29).



**Abbildung 29: Vereinfachung der Konstruktion für die Simulation**

Für die Simulation wurde das DEM-Programm Altair EDEM verwendet. Als Simulationsparameter wurden folgende Werte festgelegt:

- Wasseraustrittsgeschwindigkeit: 10 m/s
- Fördergeschwindigkeit: 1 m/s
- Förderstrom: 15 kg/m
- Sprühwinkel: 80°

Die Simulation des Schüttguts erfolgt durch kugelförmige Partikel. Die Wassertropfen wurden als wesentlich kleinere kugelförmige Partikel dargestellt. Weiters wurden den Wasserpartikeln Adhäsionseigenschaften hinzugefügt, um an dem Schüttgutpartikeln haften zu bleiben. Die farbliche Darstellung zeigt die Geschwindigkeit der Schüttgutpartikel.

Die Erstellung und Durchführung dieser Simulation, sowie auch die Anfertigung der Simulationsbilder erfolgte durch Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Prenner.

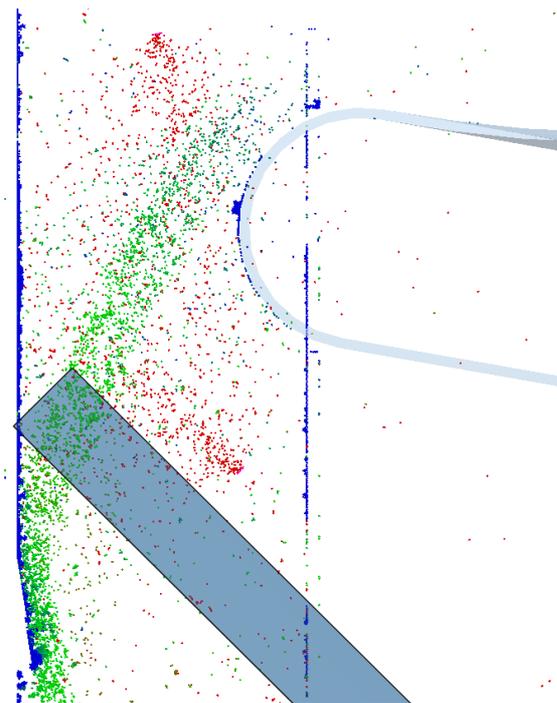
---

## 9.2 Ergebnisse

---

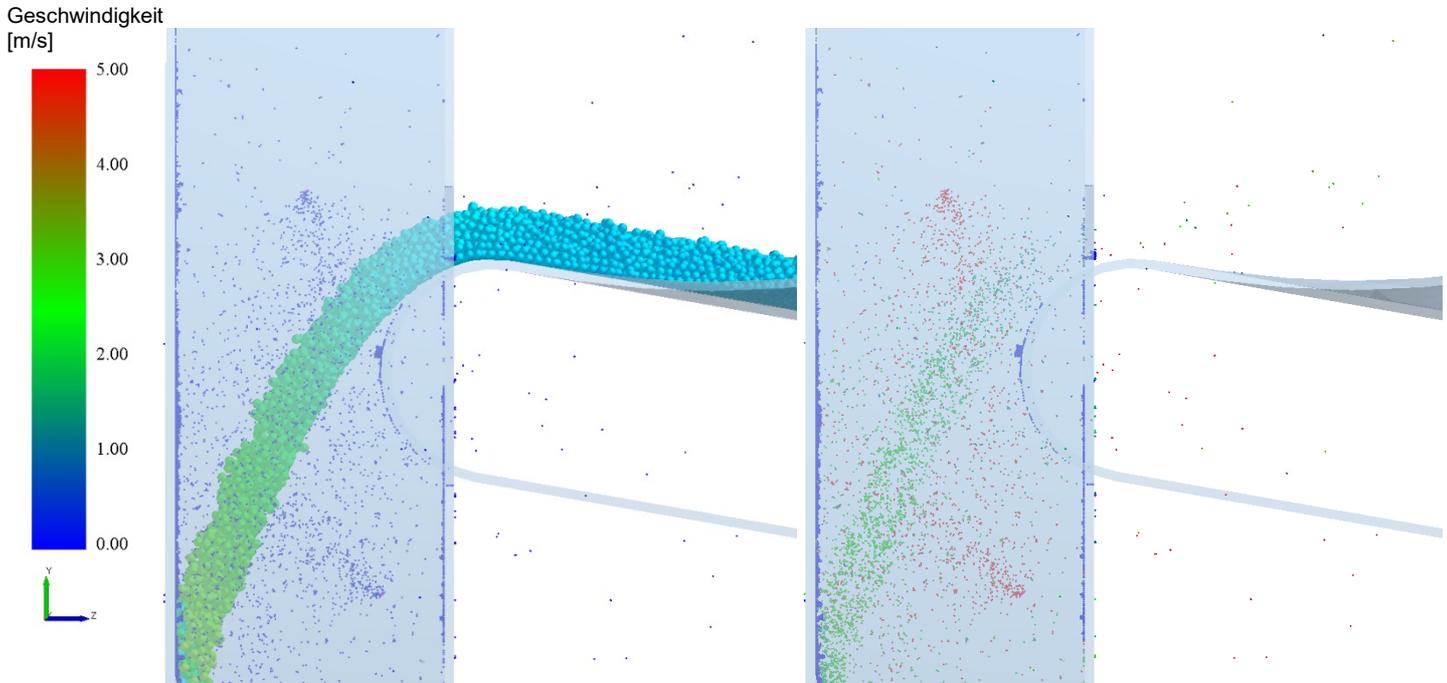
Die Simulation der Übergabe zwischen den Förderbändern brachte mehrere Erkenntnisse, welche dann zu einer neu modellierten Übergabeschurre führten. Im Weiteren wurde die Schurre mit einem einstellbaren Leitblech ausgestattet, um den Fallwinkel des Schüttguts zu steuern. Die Messdosen wurden ebenfalls neu positioniert, um eine Verfälschung durch Schüttgutpartikel in den Messdosen zu verhindern.

In der folgenden Abbildung 30 handelt sich um eine Seitenansicht der Schüttgutaufgabe in die Schurre. Auf der rechten Seite ist das Förderband dargestellt. Das Schüttgut ist ausgeblendet und nur die Wassertropfen sind ersichtlich. Links unten ist der Einfluss des Leitblechs gut zu erkennen. Die Positionen der Sprühbalken sind durch eine Konzentration an roten Punkten zu erkennen. Wassertropfen, welche sich mit dem Schüttgut vermischen sind Grün gefärbt da sie dieselbe Geschwindigkeit wie das Schüttgut besitzen.



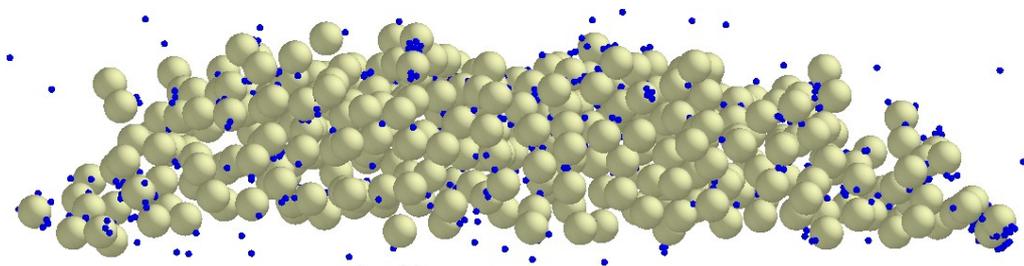
**Abbildung 30: Seitenansicht DEM Simulation (nur Wasserpartikel)**

In Abbildung 31 sind links Schüttgut und Wasserpartikel eingeblendet. Auf der rechten Seite sind nur die Wasserpartikel zu sehen. Es ist ersichtlich, wie sich im ganzen Innenraum der Übergabeschurre ein Wassernebel ausbreitet. Der Großteil des Sprühnebels setzt sich jedoch im Schüttgut ab.



**Abbildung 31: Verteilung des Sprühnebels in der Schurre**

In Abbildung 32 ist ein Querschnitt des Schüttgutstroms dargestellt. Die Schnittfläche ist in Abbildung 30 als graue Ebene zu erkennen. Gut ersichtlich ist hier die Anhaftung der kleinen blauen Wasserpartikel an den großen Schüttgutkugeln. Die Verteilung der Wassertropfen ist über den Querschnitt gleichmäßig, somit sollte eine gute Staubunterdrückung gewährleistet sein.



**Abbildung 32: Verteilung der Wasserpartikel im Schüttgut (Querschnitt)**

Das Endergebnis zeigte eine gute Auffächerung des Schüttgutstromes welcher anschließend mittig auf das untere Förderband fällt. Anhäufungen oder ähnliches konnten ebenfalls nicht beobachtet werden. Die Position der sieben Messdosen war nun optimal.

---

## 10 Schüttgut

---

Bei dem untersuchten Schüttgut (siehe Abbildung 33) handelt es sich um Kalk mit einer Korngröße von bis zu 10 Millimeter. Dieser Kalk beinhaltet einen hohen Anteil an feinen staubförmigen Partikeln. Das Schüttgut wurde von der voestalpine Stahl Donawitz GmbH zur Verfügung gestellt.



**Abbildung 33: Schüttgut Kalk**

Es konnte festgestellt werden, dass die schwankende Grundfeuchtigkeit des Schüttguts einen starken Einfluss auf die Staubentwicklung hatte. Somit musste der Kalk vor den Versuchen getrocknet werden, um eine möglichst konstante Staubentwicklung sicherzustellen.

Die Anlieferung des Schüttguts erfolgte in Fässern (siehe Abbildung 34). Für einen Versuch wurden ungefähr drei Fässer benötigt, wobei der Inhalt jedes Fasses ca. 70 Kilogramm betrug.



**Abbildung 34: Anlieferung des Schüttguts**

---

## 10.1 Feuchtigkeit des Schüttguts

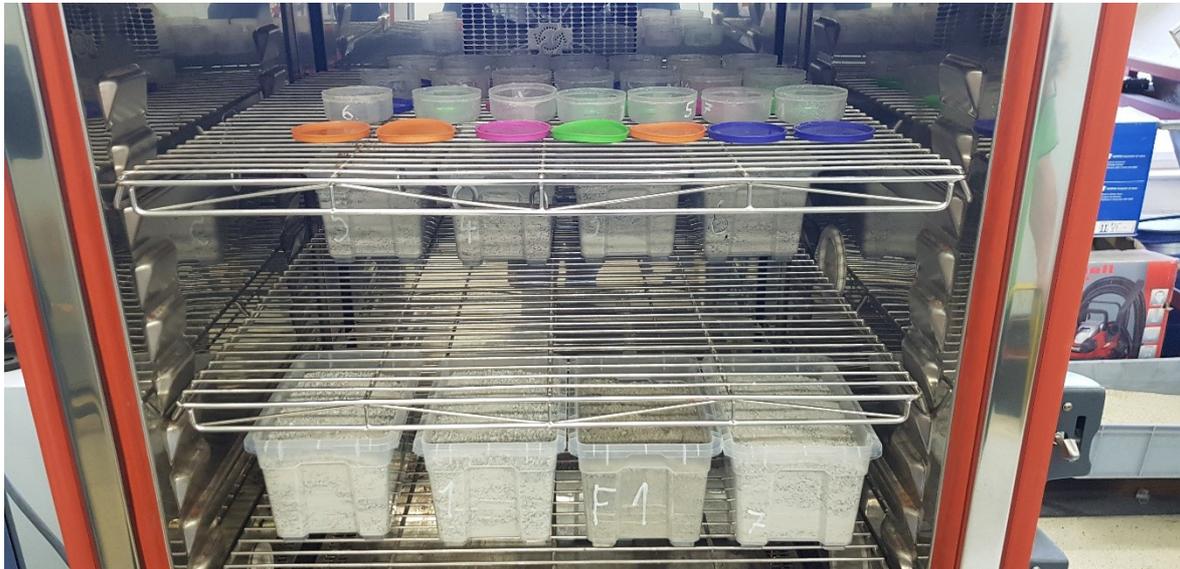
---

Um die Restfeuchtigkeit im Schüttgut zu ermitteln, wurde von jedem Fass eine Schüttgutprobe entnommen. Pro Versuch wurden etwa drei Fässer benötigt. Von diesen Fässern wurden jeweils ein paar Schaufeln Material entnommen und in einen Behälter (siehe Abbildung 35) gefüllt. Der Behälter hat ein Volumen von 5 Liter und wurde anschließend luftdicht verschlossen.



Abbildung 35: Schüttgutproben

Danach wurden alle Behälter mit den Schüttgutproben offen in einem Klimaschrank gestellt und bei 65 °C über mehrere Tage aufgetrocknet. Dabei wurde das Material immer wieder durchmischt, um für eine durchgehende Austrocknung zu sorgen. Sobald die Masse konstant blieb, wurde das Schüttgut als trocken betrachtet und der Messwert notiert.



**Abbildung 36: Probenbehälter im Klimaschrank**

In Abbildung 36, rechts unten, ist der Farbunterschied zwischen feuchtem und trockenem Schüttgut gut zu erkennen. Der Probenbehälter F1 ist eindeutig dunkler (= feuchter) als die restlichen Probenbehälter.

Bei den Messergebnissen (dargestellt in Tabelle 3) ist erkennbar, dass die Feuchtigkeit des Schüttguts nahezu durchgehend bei 0,3 % liegt. Dies ist ein sehr geringer Wert, der auch zu erwarten war, nachdem das Schüttgut bereits im Vorhinein in einer Trocknungsanlage aufgetrocknet wurde.

## 10.1.1 Messergebnisse Schüttgutfeuchtigkeit

Feuchtigkeitsproben / Schüttgut

Behälter Nr.	Fass Nr.	Versuch Nr.	gewogen am 23.9			gewogen am 27.9			gewogen am 29.9			gewogen am 30.9		
			Masse feucht	Masse trocken	Masse trocken	Masse trocken	Masse trocken	Masse trocken	Masse trocken	Masse trocken	Masse trocken	Masse trocken	Prozentuelle Massenabnahme	
F1	1+2+3+4	F1	5,32	5,24	5,20	5,18	5,18	5,18	5,18	5,18	2,70			
1	10+11+12	1	7,20	7,18	7,18	7,18	7,18	7,18	7,18	7,18	0,28			
2	12+13+14	2	6,88	6,88	6,88	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86	0,29			
3	15+16+17	3	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	0,00			
4	17+18+19	4	6,18	6,18	6,18	6,18	6,18	6,18	6,18	6,18	0,00			
5	20+21+22+23	5	6,62	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	0,30			
6	23+24+25+26	6	7,74	7,72	7,72	7,72	7,72	7,72	7,72	7,72	0,26			
7	26+27+28	7	7,02	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	0,29			
8	28+29+30	8	7,10	7,08	7,08	7,08	7,08	7,08	7,08	7,08	0,28			
9	30+31+32	9	6,92	6,92	6,92	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90	0,29			

Masse in kg

→ siehe Feuchtigkeitsbestimmung

---

## 10.2 Anmerkungen

---

Bei der Verarbeitung des Schüttguts wurden gewisse Unregelmäßigkeiten beobachtet:

- Ab Fass 15 handelte es sich um eine neue Lieferung von der Trocknungsanlage (vorher andere Charge)
- Fass 16 war eindeutig feuchter
- Fass 22 war feuchter
- Fass 21+20 waren halb voll
- Fass 17+18+19 beinhalteten größere Kalkpartikel

Bei Versuch 3 kam es zu einer wesentlich niedrigeren Staubentwicklung, was sich auf Fass 16 zurückführen lässt. Nach der Austrocknung des Schüttguts konnte jedoch keine wesentlich erhöhte Feuchtigkeit im Schüttgut festgestellt werden. Eine Begründung für diesen Widerspruch könnte die zu geringe Menge des feuchten Schüttguts von Fass 16 im Probenbehälter sein. Hier wäre eine gesonderte Probe mit Schüttgut ausschließlich aus Fass 16 von Vorteil.

In Abbildung 37 ist eindeutig die dunklere (= feuchtere) Schicht von Fass 16 bei der Probenentnahme erkennen.



**Abbildung 37: Dunklere Schicht bei Schüttgutprobe**

Bei dem im Probenbehälter F1 vorhandenen Schüttgut handelte es sich um wesentlich feuchteren Kalk. Dieser wurde zuerst von der voestalpine für die Staubversuche zur Verfügung gestellt. Das Schüttgut war jedoch so stark durchfeuchtet, dass es kaum zu einer Staubentwicklung gekommen ist.

---

## 11 Versuchsablauf

---

Über mehrere Vorversuche wurden die optimalen Parameter des Förderkreislaufs für die Versuchsreihen ermittelt:

- Förderbandgeschwindigkeit: 1 m/s
- Förderstrom: 15 kg/s
- Durchlaufzeit: ca. 20 Sekunden
- Fallhöhe: 1,7 m

Es wurden 3 von 4 Förderbändern mit Schüttgut belegt. Ein Förderband hat eine Länge von 5 Meter, somit ergab dies eine gesamte Schüttgutmasse von 225 Kilogramm pro Versuch.

Die Förderbänder wurden händisch mit dem Schüttgut (siehe Abbildung 38) belegt. Dafür wurden Eimer mit jeweils 15 Kilogramm Schüttgut befüllt, abgewogen und anschließen auf einen Meter Förderbandlänge aufgegeben



**Abbildung 38: Förderband mit Schüttgut**

Nachdem die Förderbänder mit Material belegt waren, wurden die leeren Messdosen abgewogen und deren Masse notiert. Anschließend wurden die Messdosen auf die vordefinierten Messstellen geklebt (siehe Abbildung 39).



**Abbildung 39: Anbringen der Messdosen**

Danach wurde die Einhausung verschlossen und undichte Stellen (Türspalt etc.) mit Klebeband abgedichtet.

Der Förderkreislauf wird über ein Bedienpult gesteuert. Hier wurden die Parameter eingestellt und der Versuch gestartet.

Sobald das Schüttgut den Kreislauf einmal durchlaufen hat, wurde der Versuch beendet, die Messdosen aus der Einhausung entfernt, ein weiteres Mal abgewogen und die Masse erneut notiert. Ein typischer Staubniederschlag in den Messdosen ist in Abbildung 40 ersichtlich.



**Abbildung 40: Messdosen mit Staub**

Nach jedem Versuch wurden die Einhausung wie auch die Messdosen gründlich gereinigt, um einen Grundzustand für den folgenden Versuch herzustellen.

---

## 12 Durchführung der Versuche

---

Es wurden 3 verschiedene Szenarien miteinander verglichen:

- Keine Staubunterdrückung
- Staubunterdrückung mittels Absaugung
- Staubunterdrückung mittels Wasserbedüsung

Pro Szenario wurden 3 Versuche durchgeführt.

---

### 12.1 Ohne Staubunterdrückung

---

Um eine Referenz für den Vergleich zu erhalten wie effektiv die jeweiligen Varianten der Staubunterdrückung sind, wurden als erstes Messungen von Versuchen ohne jeglicher Staubunterdrückung durchgeführt.

---

#### 12.1.1 Ergebnisse Versuch 1

---

##### Messprotokoll

Versuch Nr.: V1 Durchlaufzeit: ca. 20 Sekunden  
Art des Versuchs: Ohne Staubunterdrückung Förderstrom: 15 kg/m  
Datum / Uhrzeit: 6. Sept. 2021 / 14:00 Fördergeschwindigkeit: 1 m/s

Messdose Nr.	Platzierung	Masse Messdose		Masse Staub
		ohne Staub	mit Staub	
1	A	14,8056	14,8139	0,0083
2	B	14,9537	14,9583	0,0046
3	C	14,4946	14,5014	0,0068
4	D	14,9604	15,0935	0,1331
5	E	14,9127	15,0568	0,1441
6	F	14,6031	17,2127	2,6096
7	G	14,6562	16,4553	1,7991
Masse in g				<b>Summe: 4,7056</b>

**Tabelle 4: Ergebnisse Versuch 1**

---

## 12.1.2 Ergebnisse Versuch 2

---

### Messprotokoll

Versuch Nr.: V2 Durchlaufzeit: ca. 20 Sekunden  
Art des Versuchs: Ohne Staubunterdrückung Förderstrom: 15 kg/m  
Datum / Uhrzeit: 8. Sept. 2021 / 10:00 Fördergeschwindigkeit: 1 m/s

Messdose Nr.	Platzierung	Masse Messdose		Masse Staub
		ohne Staub	mit Staub	
1	A	14,8080	14,8133	0,0053
2	B	14,9592	14,9600	0,0008
3	C	14,4965	14,5004	0,0039
4	D	14,9625	15,1802	0,2177
5	E	14,9156	15,0258	0,1102
6	F	14,6058	18,1698	3,5640
7	G	14,6590	15,5075	0,8485

Masse in g **Summe: 4,7504**

---

**Tabelle 5: Ergebnisse Versuch 2**

---

### 12.1.3 Ergebnisse Versuch 3

---

#### Messprotokoll

Versuch Nr.: V3 Durchlaufzeit: ca. 20 Sekunden  
Art des Versuchs: Ohne Staubunterdrückung Förderstrom: 15 kg/m  
Datum / Uhrzeit: 8. Sept. 2021 / 11:30 Fördergeschwindigkeit: 1 m/s

Messdose Nr.	Platzierung	Masse Messdose		Masse Staub
		ohne Staub	mit Staub	
1	A	14,8076	14,811	0,0034
2	B	14,9558	14,9592	0,0034
3	C	14,4966	14,4996	0,0030
4	D	14,9596	15,0862	0,1266
5	E	14,9161	14,9743	0,0582
6	F	14,6029	15,8333	1,2304
7	G	14,6573	15,2639	0,6066
<b>Summe:</b>				<b>2,0316</b>

Masse in g

**Tabelle 6: Ergebnisse Versuch 3**

---

### 12.1.4 Anmerkungen

Bei Versuch 3 wurde ein erheblich geringerer Staubniederschlag gemessen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei Fass 16 eine deutlich erhöhte Feuchtigkeit im Schüttgut zu beobachten war. Die Messergebnisse bestätigen einen großen Einfluss von Wasser bzw. Feuchtigkeit im Schüttgut hinsichtlich der Staubunterdrückung bzw. Staubgenerierung.

---

## 12.2 Staubunterdrückung durch Absaugung

---

Die Absaugung besteht aus einem Radialgebläse (siehe Abbildung 41), welches mit einem Frequenzumrichter (siehe Abbildung 42) betrieben wird. Vor dem Gebläse wurde eine Filterbox installiert, um die Staubemissionen zu reduzieren.

Technische Daten des Asynchronmotors des Gebläses:

- Marke: AEG
- Typ: AD71 NZ2
- Leistung: 0,55 kW
- Drehzahl: 2.750 U/min bei 50 Hz



**Abbildung 41: Radialgebläse**

## Technische Daten des Frequenzumrichters:

- Marke: Dreston
- Typ: DS3-400/13B
- Ausgangsstrom: 13 A
- Nennspannung: 3 x 400 V



Abbildung 42: Frequenzumrichter

Alle Versuche wurden mit einer Umrichter-Frequenz von 65 Hz durchgeführt. Die dabei gemessenen Luftgeschwindigkeiten waren:

Nur Gebläse

- Saugseite: 14 m/s
- Druckseite: 13 m/s

Ganze Anlage (Gebläse + Filter + Leitungen) **vor** Versuch

- Eintritt: 8 m/s
- Austritt: 8,5 m/s

Ganze Anlage (Gebläse + Filter + Leitungen) **nach** Versuch

- Eintritt: 5,8 m/s
- Austritt: 6,5 m/s

Diese Luftgeschwindigkeiten wurden mit einem Anemometer (siehe Kapitel: „Verwendete Messgeräte“) gemessen. Die Messungen wurden genau im Mittelpunkt der Luftleitungen am Eintritt und am Austritt durchgeführt. Die Werte schwankten teilweise bis zu +/-1m/s.

Die Luftfilterbox (siehe Abbildung 43) beinhaltet einen Filter, welcher aus einem Vliesstoff aus synthetischen Chemiefasern besteht. Die Box hat beidseitig ein Anschlussmaß von  $\varnothing$  150 mm. Laut Hersteller eignet sich dieser Filter hervorragend zum Auffangen unerwünschter Schwebstoffe aus der Luft.



**Abbildung 43: Luftfilterbox**

Pro Versuch konnte eine deutliche Massezunahme des Filters verzeichnet werden. Nach jedem Versuch wurde ein neuer Filter eingesetzt. In Abbildung 44 ist ein benutzter neben einem neuen Filter zu sehen:



**Abbildung 44: Gebrauchter und neuer Filter**

---

## 12.2.1 Ergebnisse Versuch 4

---

### Messprotokoll

Versuch Nr.: V4 Durchlaufzeit: ca. 20 Sekunden  
Art des Versuchs: Mit Absaugung Förderstrom: 15 kg/m  
Datum / Uhrzeit: 9. Sept. 2021 / 13:30 Fördergeschwindigkeit: 1 m/s

Messdose Nr.	Platzierung	Masse Messdose		Masse Staub
		ohne Staub	mit Staub	
1	A	14,8127	14,8175	<b>0,0048</b>
2	B	14,9590	14,9702	<b>0,0112</b>
3	C	14,5000	14,5160	<b>0,0160</b>
4	D	14,9639	14,9790	<b>0,0151</b>
5	E	14,9172	14,9413	<b>0,0241</b>
6	F	14,6088	14,9167	<b>0,3079</b>
7	G	14,6605	14,7332	<b>0,0727</b>
Masse in g				<b>Summe: 0,4518</b>

**Tabelle 7: Ergebnisse Versuch 4**

---

## 12.2.2 Ergebnisse Versuch 5

---

### Messprotokoll

Versuch Nr.: V5 Durchlaufzeit: ca. 20 Sekunden  
Art des Versuchs: Mit Absaugung Förderstrom: 15 kg/m  
Datum / Uhrzeit: 9. Sept. 2021 / 15:00 Fördergeschwindigkeit: 1 m/s

Messdose Nr.	Platzierung	Masse Messdose		Masse Staub
		ohne Staub	mit Staub	
1	A	14,8102	14,8229	<b>0,0127</b>
2	B	14,9562	14,9719	<b>0,0157</b>
3	C	14,4973	14,5178	<b>0,0205</b>
4	D	14,9609	14,9806	<b>0,0197</b>
5	E	14,9156	14,9444	<b>0,0288</b>
6	F	14,6077	14,8111	<b>0,2034</b>
7	G	14,6607	14,7306	<b>0,0699</b>
<b>Summe:</b>				<b>0,3707</b>

Masse in g

**Tabelle 8: Ergebnisse Versuch 5**

---

### 12.2.3 Ergebnisse Versuch 6

---

#### Messprotokoll

Versuch Nr.: V6 Durchlaufzeit: ca. 20 Sekunden  
Art des Versuchs: Mit Absaugung Förderstrom: 15 kg/m  
Datum / Uhrzeit: 9. Sept. 2021 / 15:50 Fördergeschwindigkeit: 1 m/s

Messdose Nr.	Platzierung	Masse Messdose		Masse Staub
		ohne Staub	mit Staub	
1	A	14,8102	14,8187	0,0085
2	B	14,9562	14,9710	0,0148
3	C	14,4973	14,5143	0,0170
4	D	14,9609	14,9860	0,0251
5	E	14,9156	14,9446	0,0290
6	F	14,6077	14,8483	0,2406
7	G	14,6607	14,7667	0,1060

Masse in g **Summe: 0,441**

**Tabelle 9: Ergebnisse Versuch 6**

---

## 12.2.4 Anmerkungen

---

Bei den Vorversuchen wurden mehrere Positionen der Absaugung getestet. Zuerst wurde am oberen Punkt der Einhausung abgesaugt (siehe Abbildung 45). Bei dieser Variante wurden erheblich höhere Staubmengen in den Messdosen aufgefangen. Ein möglicher Grund dafür ist, dass der Luftstrom der Absaugung genau entgegengesetzt zum Strom des Schüttguts verläuft. Somit wurde die Flugrichtung des Staubs während des freien Falls komplett umgekehrt. Im oberen Teil der Einhausung herrschten eher turbulente Luftströmungen mit Verwirbelungen in den Gehäuseecken. Es konnte sich daher der Staub bevorzugt in den oberen Messdosen absetzen.



**Abbildung 45: Absaugung oben**

Eine weitere Position der Absaugung war auf halber Fallhöhe (siehe Abbildung 46). Hier wurden wesentlich bessere Ergebnisse beobachtet. Die Absaugrichtung war nun in Schüttgutstromrichtung. Der Staub konnte somit erfolgreich abgesaugt werden, bevor er sich verstärkt absetzen konnte. Dieses Setup wurde auch für die folgenden Versuche gewählt.



**Abbildung 46: Absaugung unten**

---

## 12.3 Staubunterdrückung durch Wasserbedüsung

---

Um den Staub mittels Wasserbedüsung zu unterdrücken, wurden zwei Sprühbalken mit jeweils drei Düsen im Gehäuse angebracht. Die Düsen sind von der Marke Veejet und ihre Bezeichnung lautet H-U 8015 ¼“. Diese Flachstrahldüse erzeugt einen Strahlwinkel von 80 Grad.

Die Düsen haben einen Abstand von 14cm zueinander. Bei einer Entfernung von 15cm zum Schüttgut wird dieses vollständig von dem Wasserstrahl erfasst.

Um eine gleichmäßige Verteilung des Volumenstroms auf die Düsen zu erhalten, wurde der Sprühbalken mit zwei Anschlüssen gespeist (siehe Abbildung 47).



**Abbildung 47: Sprühbalken**

Bei der verwendeten Kreiselpumpe handelt es sich um eine Nowax GPN 1500 mit folgenden technischen Daten:

- Leistung: 1.390 W
- Maximale Fördermenge: 4.300 l/h
- Maximale Förderhöhe: 50m
- Druck: 5 bar

Bevor der Versuch gestartet wurde, musste die Pumpe kurz in Betrieb genommen werden, um sicherzustellen, dass sich keine Luft in den Zuleitungen befindet. Bei den Versuchen wurde die Pumpe gleichzeitig mit dem Förderband per Hand eingeschaltet.

Auf der Druckseite der Pumpe wurde ein Absperrventil montiert (siehe Abbildung 48), um den Volumenstrom regeln zu können. Dieses Ventil wurde so eingestellt, dass beide Sprühbalken zusammen innerhalb von 30 Sekunden 9 Liter Wasser versprühen. Dies ergibt einen theoretischen Eintrag von 1,96 % Feuchtigkeit im Schüttgut. Da aber anzunehmen ist, dass nicht 100 % des versprühten Wassers in das Schüttgut übergeht, wird der tatsächliche Anteil an Feuchtigkeit im Schüttgut bei ungefähr 1,6 % liegen. Es wurden keine Proben des besprühten Schüttguts entnommen, um die tatsächliche Feuchtigkeit durch Auftrocknung zu bestimmen.



**Abbildung 48: Setup für Wasserbedüsung**

---

### 12.3.1 Ergebnisse Versuch 7

---

#### Messprotokoll

Versuch Nr.: V7 Durchlaufzeit: ca. 20 Sekunden  
Art des Versuchs: Mit Wasserbedüsung Förderstrom: 15 kg/m  
Datum / Uhrzeit: 22. Sept. 2021 / 10:00 Fördergeschwindigkeit: 1 m/s

Messdose Nr.	Platzierung	Masse Messdose		Masse Staub
		ohne Staub	mit Staub	
1	A	14,8075	14,8911	<b>0,0836</b>
2	B	14,9537	15,0048	<b>0,0511</b>
3	C	14,5000	14,5350	<b>0,0350</b>
4	D	14,9615	15,2272	<b>0,2657</b>
5	E	14,9165	15,0186	<b>0,1021</b>
6	F	14,6118	14,9378	<b>0,3260</b>
7	G	14,6620	14,9304	<b>0,2684</b>
Masse in g				<b>Summe: 1,1319</b>

Tabelle 10: Ergebnisse Versuch 7

---

### 12.3.2 Ergebnisse Versuch 8

---

#### Messprotokoll

Versuch Nr.: V8 Durchlaufzeit: ca. 20 Sekunden  
Art des Versuchs: Mit Wasserbedüsung Förderstrom: 15 kg/m  
Datum / Uhrzeit: 22. Sept. 2021 / 11:30 Fördergeschwindigkeit: 1 m/s

Messdose Nr.	Platzierung	Masse Messdose		Masse Staub
		ohne Staub	mit Staub	
1	A	14,3267	14,3495	<b>0,0228</b>
2	B	14,6610	14,7053	<b>0,0443</b>
3	C	14,5305	14,5509	<b>0,0204</b>
4	D	14,5943	14,8403	<b>0,2460</b>
5	E	14,3661	14,4168	<b>0,0507</b>
6	F	14,4922	14,9628	<b>0,4706</b>
7	G	14,3450	14,5163	<b>0,1713</b>

Masse in g **Summe: 1,0261**

---

**Tabelle 11: Ergebnisse Versuch 8**

---

### 12.3.3 Ergebnisse Versuch 9

---

#### Messprotokoll

Versuch Nr.: V9 Durchlaufzeit: ca. 20 Sekunden  
Art des Versuchs: Mit Wasserbedüsung Förderstrom: 15 kg/m  
Datum / Uhrzeit: 22. Sept. 2021 / 13:00 Fördergeschwindigkeit: 1 m/s

Messdose Nr.	Platzierung	Masse Messdose		Masse Staub
		ohne Staub	mit Staub	
1	A	14,7735	14,8088	0,0353
2	B	14,3277	14,3970	0,0693
3	C	14,3268	14,3566	0,0298
4	D	14,4297	14,7036	0,2739
5	E	15,0304	15,1060	0,0756
6	F	14,5881	14,9720	0,3839
7	G	14,2638	14,4035	0,1397
<b>Summe:</b>				<b>1,0075</b>

Masse in g

**Tabelle 12: Ergebnisse Versuch 9**

---

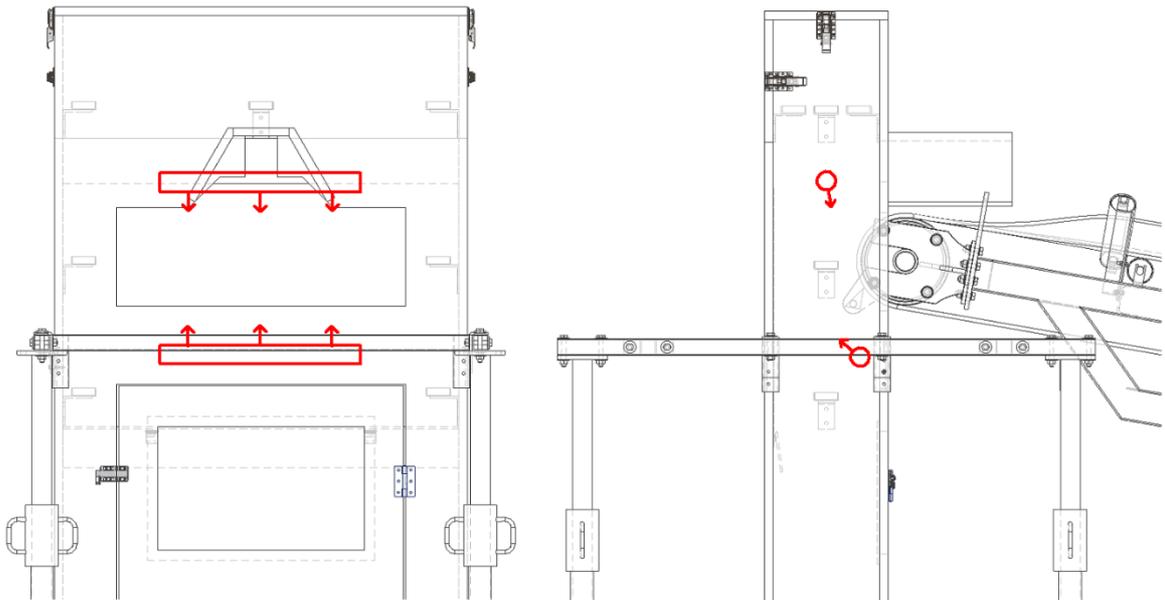
### 12.3.4 Anmerkungen

---

Bei den Vorversuchen wurden zwei für den Erfolg der Staubunterdrückung wichtige Parameter festgestellt.

Als erstes muss die Wassermenge eingestellt werden. Diese muss groß genug sein, damit die Düsen das Wasser gut zerstäuben können und sich ein Wassernebel bildet. Weiters darf auch nicht zu viel Wasser versprüht werden, da sonst das Schüttgut zu feucht werden kann und Wasser aus die Förderanlage läuft.

In einem zweiten Schritt wurde beobachtet, dass die Position der Sprühbalken essenziell für eine optimale Staubunterdrückung ist. Ist der Balken zu nahe am Schüttgut kann sich der Wassernebel nicht vollständig ausbilden. Ist der Sprühbalken zu weit entfernt, verteilt sich der Wassernebel in der ganzen Einhausung. Das ist gut, um den flugfähigen Staub aufzufangen, jedoch setzt sich das Staub-Wasser-Gemisch in der Einhausung ab und wird nicht im Schüttgut gebunden.



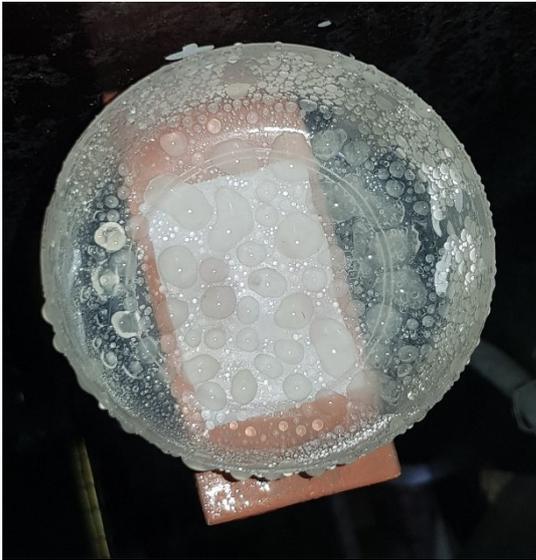
**Abbildung 49: Position der Sprühbalken**



**Abbildung 50: Eingebaute Sprühbalken**

Die Position der Sprühbalken ist in den Abbildungen 49 und 50 ersichtlich.

Durch den Sprühnebel wurden die Messdosen während der Versuche teilweise mit etwas Wasser gefüllt (siehe Abbildung 51). Um die aufgefangenen Staubmengen mit den anderen Staubunterdrückungsvarianten vergleichen zu können, wurden die Messdosen in einen Klimaschrank gestellt (siehe Abbildung 53) und aufgetrocknet, sodass nur der Staub übrig blieb (siehe Abbildung 52). Bei den angegebenen Messwerten handelt es sich ausschließlich um aufgetrocknete Messdosen.



**Abbildung 51: Messdose mit Sprühnebel**



**Abbildung 52: Aufgetrocknete Messdose**



**Abbildung 53: Messdosen im Klimaschrank**

Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass nach jeder Übergabe das trockene Schüttgut besser mit dem besprühten Anteil vermengt wurde (siehe Abbildung 54). Nach ein bis zwei Übergaben war das Schüttgut optisch homogen durchfeuchtet. Bei den darauffolgenden Übergaben wurde nahezu keine Staubentwicklung festgestellt.



**Abbildung 54: Angefeuchtetes Schüttgut**

# 13 Vergleich der Versuche

## Versuchsergebnisse

Messstelle	Ohne Staubunterdrückung			Mit Absaugung			Mit Wasserbedüsung*		
	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7	Versuch 8	Versuch 9
A	0,0083	0,0053	0,0034	0,0048	0,0127	0,0085	0,0836	0,0228	0,0353
B	0,0046	0,0008	0,0034	0,0112	0,0157	0,0148	0,0511	0,0443	0,0693
C	0,0068	0,0039	0,0030	0,0160	0,0205	0,0170	0,0350	0,0204	0,0298
D	0,1331	0,2177	0,1266	0,0151	0,0197	0,0251	0,2657	0,2460	0,2739
E	0,1441	0,1102	0,0582	0,0241	0,0288	0,0290	0,1021	0,0507	0,0756
F	2,6096	3,5640	1,2304	0,3079	0,2034	0,2406	0,3260	0,4706	0,3839
G	1,7991	0,8485	0,6066	0,0727	0,0699	0,1060	0,2684	0,1713	0,1397
<b>Summe:</b>	<b>4,7056</b>	<b>4,7504</b>	<b>2,0316</b>	<b>0,4518</b>	<b>0,3707</b>	<b>0,4410</b>	<b>1,1319</b>	<b>1,0261</b>	<b>1,0075</b>

Prozentuelle Feuchtigkeit des Schüttguts (siehe Tabelle 1)

0,28	0,29	0,00	0,00	0,30	0,26	0,29	0,28	0,29
------	------	------	------	------	------	------	------	------

**Summe korrigiert auf den trockenen Zustand**

4,6925	4,7366	2,0316	0,4518	0,3696	0,4399
--------	--------	--------	--------	--------	--------

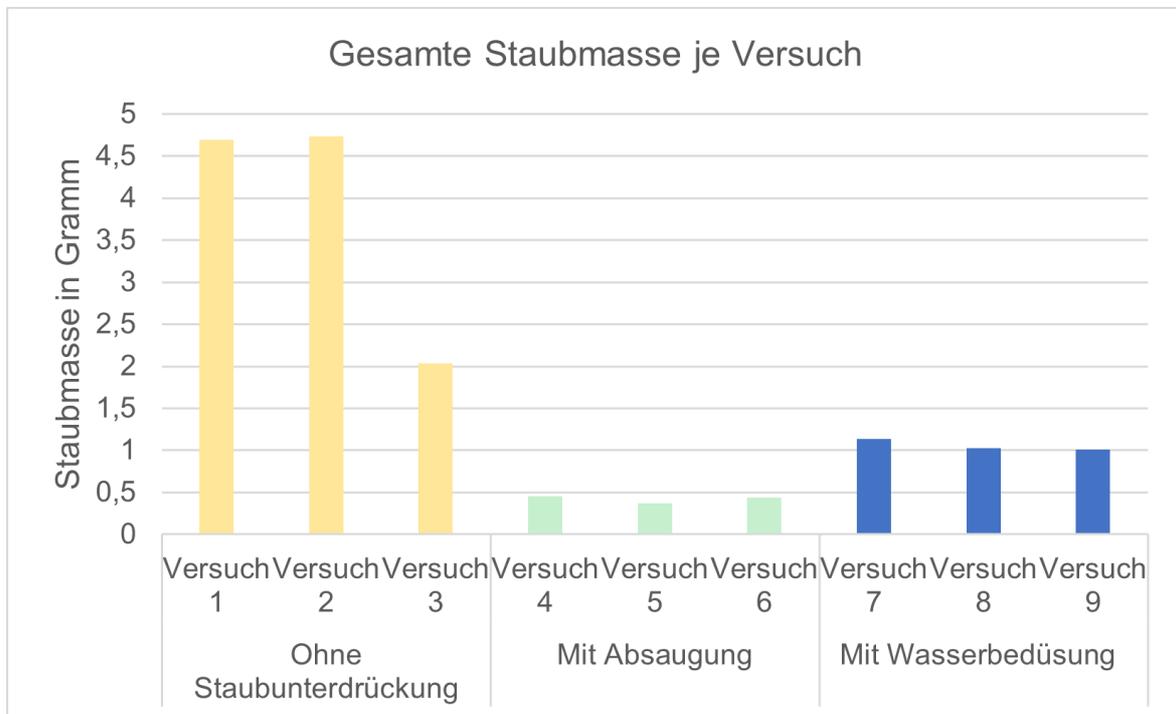
**Summe korrigiert auf den feuchten Zustand**

1,1351	1,0290	1,0104
--------	--------	--------

Alle Messergebnisse in Gramm

\*Proben getrocknet

**Tabelle 13: Vergleich der Versuche**



**Abbildung 55: Gesamte Staubmasse je Versuch**

Die Messdosen bei den Versuchen mit Wasserbedüsung wurden nur im getrockneten Zustand abgewogen, da diese nach den Versuchen teilweise mit Wasser gefüllt waren (siehe Kapitel 12.3.4 bzw. Abbildung 51). Bei den anderen Versuchen wurden die Messdosen direkt nach den Versuchen abgewogen und anschließend mit der Prozentuellen Schüttgutfeuchtigkeit (siehe Kapitel 10.1.1 bzw. Tabelle 3) auf den trockenen Zustand korrigiert, um alle Versuche miteinander vergleichbar zu machen. In den Abbildungen 55 und 56 werden ausschließlich trockene Staubmassen-Werte für die Darstellung verwendet.

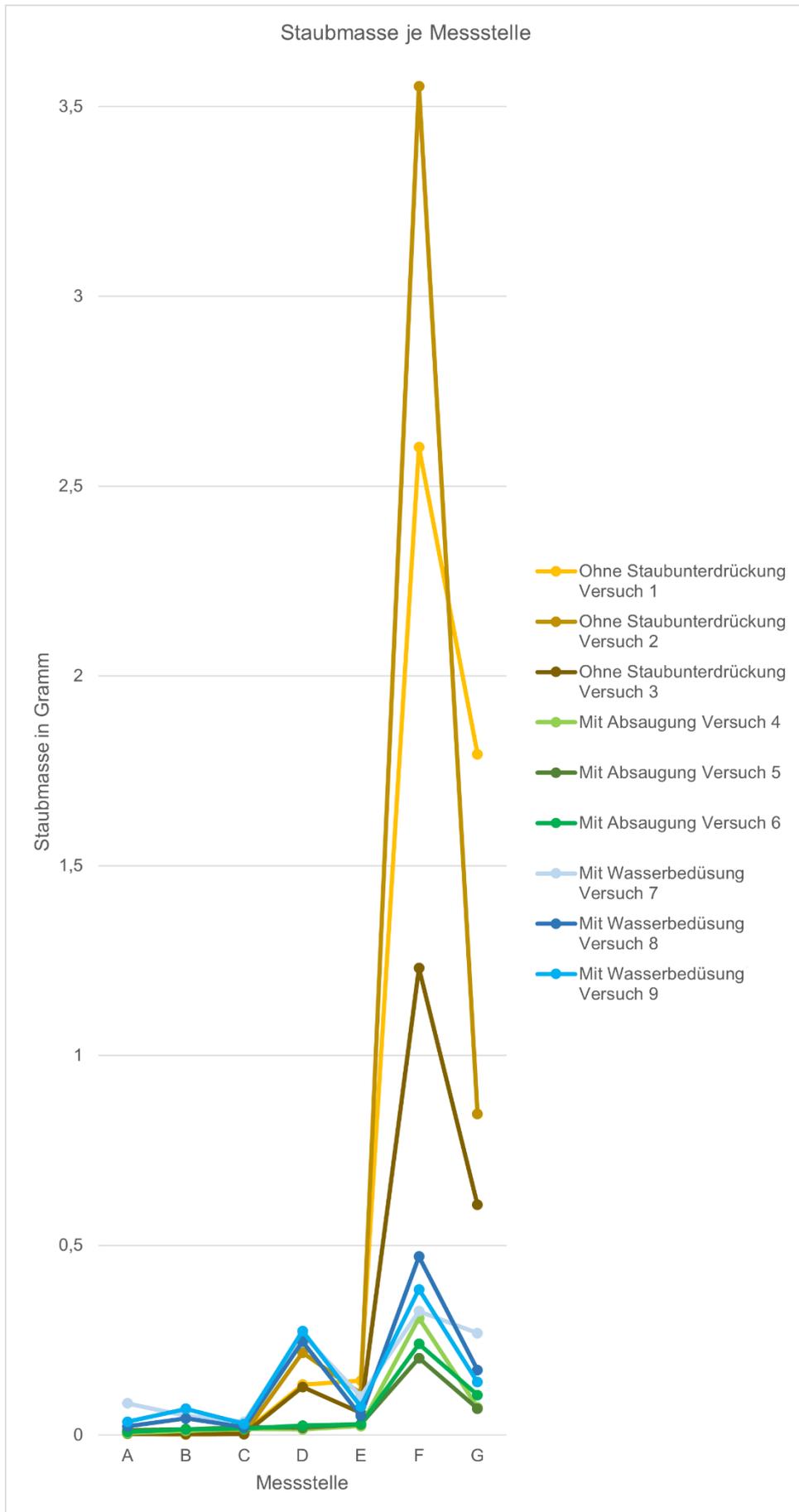
Bei den um die Feuchtigkeit korrigierten Messergebnissen ist zu beobachten, dass die Schüttgutfeuchtigkeit nur einen geringen Einfluss auf die Masse der Messwerte hat.

Bei Versuch 3 kam es zu einer wesentlich niedrigeren Staubentwicklung, was sich auf Fass 16 zurückführen lässt. Nach der Austrocknung des Schüttguts konnte jedoch keine wesentlich erhöhte Feuchtigkeit im Schüttgut festgestellt werden. Eine Begründung für diesen Widerspruch könnte die zu geringe Menge des feuchten Schüttguts von Fass 16 im Probenbehälter sein. Hier wäre eine gesonderte Probe mit Schüttgut ausschließlich aus Fass 16 von Vorteil, um diese Abweichungen genauer zu untersuchen. Weitere Informationen diesbezüglich siehe Kapitel 10.2 und Kapitel 12.1.4.

In Abbildung 55 werden die Summen der in den Messdosen aufgefangenen Staubmassen miteinander verglichen.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Staubunterdrückungsmaßnahmen sind (bis auf Versuch 3) durchwegs gleichbleibend. Auf den ersten Blick ist erkennbar, dass sich bei den Versuchen mit der Absaugung, im Vergleich zu den Versuchen mit der Wasserbedüsung, weniger Staub in den Messdosen abgesetzt hat. Der absolute Unterschied der Staubmenge beträgt jedoch nur ca. 0,6 Gramm pro Versuch.

Die Abbildung 56 zeigt die in den jeweiligen Messdosen bzw. Messstellen gemessenen Staubmassen je Versuch. Die Positionen der Messdosen werden in Kapitel 8 bzw. Abbildung 28 dargestellt. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Staubunterdrückungsmaßnahmen hauptsächlich in den unteren Messstellen merkbar sind. Dies lässt sich auf dem vom Schüttgutstrom verursachten Luftstrom und auf eine Auffächerung des Schüttguts im freien Fall zurückführen.



**Abbildung 56: Staubmasse je Messstelle**

Wie erfolgreich die jeweilige Staubunterdrückung war, konnte auch optisch während und nach den Versuchen festgestellt werden.

Die Halle, in der die Versuchsanlage steht, war nach den Durchgängen unterschiedlich stark mit Staub belastet. Ohne Staubunterdrückung waren die Sichtverhältnisse in der Halle massiv eingeschränkt. Bei den Versuchen mit der Absaugung wurde weniger Staub aus der Einhausung freigesetzt, jedoch wurde an den anderen Übergabestellen ähnlich viel Staub emittiert wie bei den Versuchen ohne Staubunterdrückung. Bei den Versuchen mit der Wasserbedüsung hingegen, wurde kein Staub aus der Einhausung emittiert und auch bei den drei anderen Übergabestellen kam es zu keiner Staubentwicklung.

Auf der folgenden Seite (siehe Abbildung 57 bis 59) befinden sich Momentaufnahmen der Videos der Versuche. Diese Videos wurden durch eine Plexiglasscheibe von der Oberseite des Gehäuses gefilmt. Die eindeutige Wirksamkeit der Staubunterdrückungsmaßnahmen ist hier gut zu erkennen. Zu beachten ist, dass bei den Versuchen mit der Wasserbedüsung der Wasserdampf dem Staub sehr ähnlich sieht.



**Abbildung 59: Ohne Staubunterdrückung**



**Abbildung 58: Mit Absaugung**



**Abbildung 57: Mit Wasserbedüsung**

---

## 14 Fazit

---

Um die unterschiedlichen Verfahren zu bewerten, sollte nicht nur nach den Messergebnissen beurteilt, sondern mehrere Kriterien für den Vergleich herangezogen werden.

Laut den Messergebnissen hat das System mit der Absaugung eine höhere Effektivität als das mit Wasserbedüsung. Beide Arten halten die Staubemissionen auf jeden Fall um ein Vielfaches geringer als ohne Staubunterdrückungsmaßnahmen. Der Unterschied, der in den Messdosen aufgefangenen Gesamtstaubmassen, ist jedoch mit 0,6 Gramm nur sehr gering.

Die Staubunterdrückung mittels Absaugung benötigt eine komplette Einhausung und ein System an Rohrleitungen, welche die verunreinigte Luft abtransportieren. Zusätzlich benötigt dieses Verfahren neben dem Gebläse auch noch einen Filter, um den Staub aufzufangen. Der Staub wird sozusagen nur an einen anderen Ort verlagert. Setzt sich dieser Filter zu oder hat das Rohrleitungssystem bzw. die Einhausung Undichtigkeiten, so verringert sich die Effektivität des Systems. Diese Verschlechterung kann weit über den Vorteil der oben erwähnten 0,6 Gramm hinausgehen.

Bei den Verfahren mit Wasserbedüsung wird der Staub im Schüttgut gebunden. Weiters findet auch bei den darauffolgenden Übergabepunkten keine Staubentwicklung mehr statt, da das Schüttgut nun eine gewisse Feuchtigkeit besitzt und den Staub bindet.

Während der Versuche könnte die Effektivität auch anhand der Staubentwicklung in der Halle optisch wahrgenommen werden. Bei den Tests mit Staubunterdrückung durch Wasserbedüsung war das Arbeiten in der Nähe des Förderkreislaufs möglich, bei den Versuchen mit der Absaugung hingegen, mussten Staubschutzmasken getragen werden. Eine hohe Staubentwicklung wurde weiterhin festgestellt. Um in diesem Fall die Staubbelastung in der Halle auf ein erträgliches Niveau zu senken, müssten alle Übergabestellen über eine Absaugung verfügen.

Nach Betrachtung all dieser Kriterien ist eine Staubunterdrückung mit Wasserbedüsung zu bevorzugen. Eine energetische Betrachtung der Unterdrückungsmaßnahmen wurde nicht durchgeführt. Es ist aber anzunehmen, dass eine Wasserbedüsung ebenfalls energetisch effizienter arbeitet.

Ob Flüssigkeiten im Schüttgut prozessbedingte Nachteile verursachen, wurde ebenfalls nicht betrachtet.

---

## 15 Verwendete Messgeräte

---

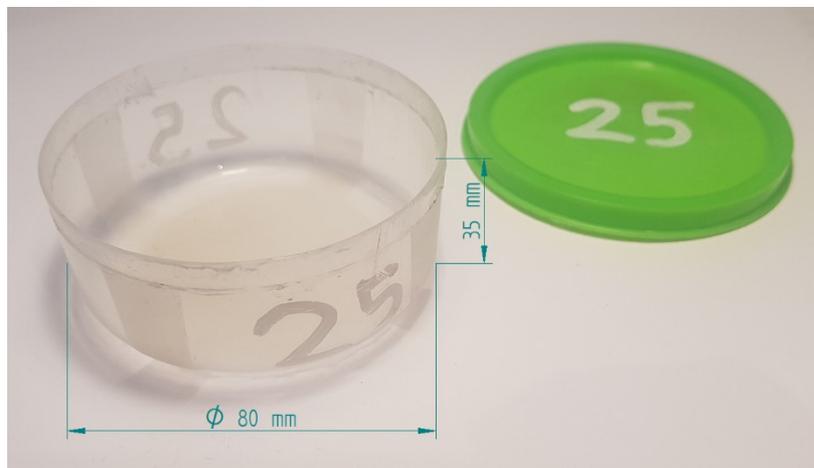
Zur Durchführung der Versuche wurden mehrere Messgeräte und Einrichtungen benötigt. Im folgenden Abschnitt werden diese kurz beschrieben und ihre technischen Daten angegeben.

---

### 15.1 Messdosen

---

Um den Staubniederschlag gravimetrisch messen zu können wurden Messdosen verwendet. Diese Dosen haben folgende Dimensionen (siehe Abbildung 60):



**Abbildung 60: Abmessungen der Messdose**

Die Dose und der dazugehörige Deckel wurden mit einem weißen Marker beschriftet und vor jedem Versuch mit der Laborwaage abgewogen.

---

## 15.2 Laborwaage

---

Für die genaue Messung des teilweise sehr geringen Staubniederschlags wurde eine Feinwaage (siehe Abbildung 62) benötigt. Die verwendete Laborwaage der Firma sartorius hat folgende technische Daten [10]:

### Modellspezifische technische Daten

Modelle: Entris		224-1S 224i-1S
Wägebereich		220 g
Ablesbarkeit		0,0001 g
Tarierbereich (subtraktiv)		220 g
Reproduzierbarkeit (Standardabweichung)	< ±	0,0001 g
Linearitätsabweichung	<±	0,0002 g
Einschwingzeit (typisch)	s	2,5
Empfindlichkeitsdrift +10 ... +30 °C	<±/K	$3 \cdot 10^{-6}$
Anpassung an Einsatz- und Aufstellbedingungen		4 optimierte Filterstufen; Anzeigefolge: 0,1–0,4 (je nach eingestellter Filterstufe)
Externer Justiergewichtswert	g	200 (E2)
Nettogewicht, ca.	kg	4,4   4,8
Waagschalenabmessung	mm	90 Ø
Wägeraumhöhe	mm	230
Abmessungen (B × T × H)	mm	230 × 303 × 330

Abbildung 61: Technische Daten sartoriusEntris [10]

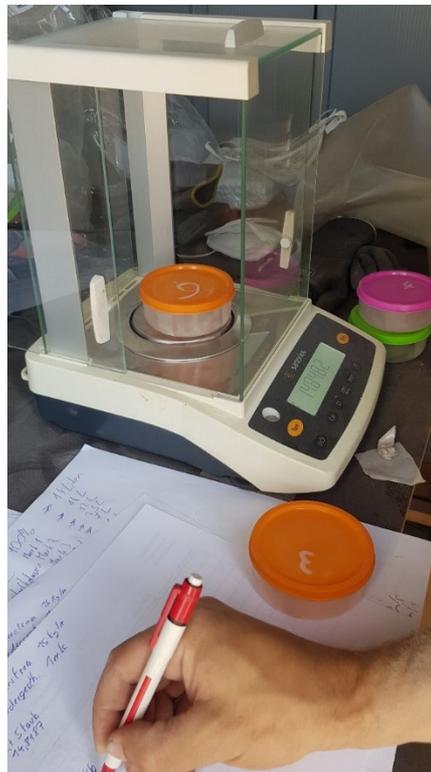


Abbildung 62: Abwiegen der Messdosen

---

## 15.3 Universal Waage

---

Für die konstante Belegung des Förderbandes mit Schüttgut, aber auch für die Trocknungsversuche wurde eine universelle Waage (siehe Abbildung 63) benötigt. Diese Waage stammt von der Firma Maul (Maximalmasse 50 kg, Genauigkeit 20 g). Genauere technische Daten zu dieser Waage lagen nicht vor.



**Abbildung 63: Universal Waage**

## 15.4 Anemometer

Um die Windgeschwindigkeiten der Absaugung bestimmen zu können, wurde ein Anemometer der Firma uni-trend mit der Bezeichnung UT363-BT (siehe Abbildung 64) verwendet. Die technischen Daten dazu finden sich in der folgenden Tabelle:

Spezifikationen	UT363 BT
Windgeschwindigkeit	0 ~ 30 m/s
Windgeschw. Toleranz	$\pm(5 \% \text{ rdg}+0.5)$
Windgeschw. Auflösung	0.1 m/s
Temperatur	-10 ~ 50 °C 14 ~ 122 °F
Temperatur Toleranz	$\pm 2 \text{ °C} / \pm 4 \text{ °F}$
Temperatur Auflösung	0.1 °C / 0.2 °F
Windskala	Level 0 ~ 12
Windskala Toleranz	$\pm 1$
Abtastrate	0.5 s

Tabelle 14: Technische Daten Anemometer [11]



Abbildung 64: Anemometer [11]

---

## 16 Literaturverzeichnis

---

- [1] Markus Karl Suppan: Bunkerentstaubung, Diplomarbeit. Leoben 2017.
- [2] Christian Rüger: Die Wege von Staub. Im Umfeld des Menschen 2015.
- [3] VBG: Gib dem Staub keine Chance! Zehn goldene Regeln zur Staubbekämpfung (2018).
- [4] Weducon® Web & Sheet Cleaning Technology B.V.: Wie Sie einen kleinen Feind, der Ihre Produktion bedroht, aufhalten.  
URL: <https://weducon.com/de/losung-von-staubproblemen-in-produktionsumgebungen/>.
- [5] Andrew B. Cecala, Andrew D. O'Brien, Joseph Schall, Jay F. Colinet, Robert J. Franta, Mark J. Schultz, Emily J. Haas, Jamie E. Robinson, Justin Patts, Brian M. Holen, Robert Stein, Jake Weber, Mark Strebel, Lindsie Wilson, and Mark Ellis: Dust control handbook for industrial minerals mining and processing. Second edition 2019.
- [6] ScrapeTec Trading GmbH: Das AirScrape® Funktionsprinzip.  
URL: <https://scrapetec-trading.com/produkte/airscrape/>.
- [7] Wilhelm Batel: Entstaubungstechnik. Grundlagen Verfahren Messwesen 1972.
- [8] Best-Chem Limited: What Is Foam Dust Suppression?  
URL: <https://www.best-chem.co.uk/dust-supression/what-is-foam-dust-suppression/>.
- [9] AT-Mineral Processing: Ausgabe 06/2010. URL: [https://www.at-minerals.com/de/artikel/artikel\\_938963.html](https://www.at-minerals.com/de/artikel/artikel_938963.html).
- [10] sartorius: Betriebsanleitung Entris.  
URL: <https://www.sartorius.com/shop/medias>.
- [11] uni-trend: UT363-BT Mini Anemometer. URL: [https://www.uni-trend.com/meters/html/product/Environmental/Environmental\\_Tester/Mini\\_BT/UT363-BT.html](https://www.uni-trend.com/meters/html/product/Environmental/Environmental_Tester/Mini_BT/UT363-BT.html).

---

## 17 Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Größenbereiche für Partikel [2].....	6
Abbildung 2: Verweilzeit von Aerosolen in der Atmosphäre [2] .....	6
Abbildung 3: Haftmechanismen zwischen Partikeln und Oberflächen [2].....	8
Abbildung 4: Schematische Darstellung fallender Partikelcluster [1].....	11
Abbildung 5: Staubentstehung in einem frei fallendem Schüttgutstrom [1] .....	12
Abbildung 6: Eingeogene Luft in Abhängigkeit von der Fallhöhe [1].....	12
Abbildung 7: Auftrennung der Partikel in Abhängigkeit von der Fallhöhe [1].....	13
Abbildung 8: Staubentstehung in Abhängigkeit von der Fallhöhe [1] .....	13
Abbildung 9: Kohäsion in Abhängigkeit von der Materialfeuchtigkeit [1] .....	14
Abbildung 10: Staubentstehung in Abhängigkeit von der Materialfeuchtigkeit [1] .....	14
Abbildung 11: Lungengängigkeit von Aerosolen [3] .....	16
Abbildung 12: Verlängerte Aufgabeschurre mit seitlichen Abdichtungen [5] .....	21
Abbildung 13: Zweistufige Staubvorhänge an Ein- und Austritt [5].....	21
Abbildung 14: AirScrape® Seitenabdichtungssystem [6] .....	22
Abbildung 15: Aufbau einer Absaugungsanlage [5].....	23
Abbildung 16: Absaugung an einer Übergabestelle [5] .....	23
Abbildung 17: Zentralisierte Absaugungsanlage [5] .....	24
Abbildung 18: Übersicht über Entstauber [7].....	25
Abbildung 19: Die 2 Methoden der Staubbekämpfung [5] .....	26
Abbildung 20: Typische Düsenpositionierung an einer Übergabestelle [5].....	27
Abbildung 21: Einfluss der Tropfengröße [5] .....	28
Abbildung 22: Feuchtigkeitseintrag der unterschiedlichen Systeme [5].....	29
Abbildung 23: Funktionsweise von staubunterdrückendem Schaum [8] .....	30
Abbildung 24: „Hood & Spoon“ Methode [9].....	31
Abbildung 25: CFD/DEM Simulation verschiedener Übergaben [5] .....	32
Abbildung 26: Bewertung der Staubunterdrückungsverfahren .....	34
Abbildung 27: Ansichten des Versuchsaufbaus .....	36
Abbildung 28: Position der Messdosen .....	37

Abbildung 29: Vereinfachung der Konstruktion für die Simulation .....	38
Abbildung 30: Seitenansicht DEM Simulation (nur Wasserpartikel) .....	40
Abbildung 31: Verteilung des Sprühnebels in der Schurre .....	41
Abbildung 32: Verteilung der Wasserpartikel im Schüttgut (Querschnitt) .....	41
Abbildung 33: Schüttgut Kalk .....	42
Abbildung 34: Anlieferung des Schüttguts .....	42
Abbildung 35: Schüttgutproben .....	43
Abbildung 36: Probenbehälter im Klimaschrank .....	44
Abbildung 37: Dunklere Schicht bei Schüttgutprobe .....	46
Abbildung 38: Förderband mit Schüttgut .....	47
Abbildung 39: Anbringen der Messdosen .....	48
Abbildung 40: Messdosen mit Staub .....	48
Abbildung 41: Radialgebläse .....	52
Abbildung 42: Frequenzumrichter .....	53
Abbildung 43: Luftfilterbox .....	54
Abbildung 44: Gebrauchter und neuer Filter .....	54
Abbildung 45: Absaugung oben .....	58
Abbildung 46: Absaugung unten .....	59
Abbildung 47: Sprühbalken .....	60
Abbildung 48: Setup für Wasserbedüsung .....	61
Abbildung 49: Position der Sprühbalken .....	65
Abbildung 50: Eingebaute Sprühbalken .....	65
Abbildung 51: Messdose mit Sprühnebel .....	66
Abbildung 52: Aufgetrocknete Messdose .....	66
Abbildung 53: Messdosen im Klimaschrank .....	66
Abbildung 54: Angefeuchtetes Schüttgut .....	67
Abbildung 55: Gesamte Staubmasse je Versuch .....	68
Abbildung 56: Staubmasse je Messstelle .....	70
Abbildung 57: Mit Wasserbedüsung .....	72
Abbildung 58: Mit Absaugung .....	72
Abbildung 59: Ohne Staubunterdrückung .....	72

Abbildung 60: Abmessungen der Messdose .....	74
Abbildung 61: Technische Daten sartoriusEntris [10].....	75
Abbildung 62: Abwiegen der Messdosen .....	75
Abbildung 63: Universal Waage .....	76
Abbildung 64: Anemometer [11] .....	77

---

## 18 Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Natürliche und anthropogene diffuse Quellen ausgewählter Stoffe [1] ..	4
Tabelle 2: Staub am Arbeitsplatz - Internationale Grenzwerte [3] .....	17
Tabelle 3: Messergebnisse Feuchtigkeitsbestimmung .....	45
Tabelle 4: Ergebnisse Versuch 1 .....	49
Tabelle 5: Ergebnisse Versuch 2 .....	50
Tabelle 6: Ergebnisse Versuch 3 .....	51
Tabelle 7: Ergebnisse Versuch 4 .....	55
Tabelle 8: Ergebnisse Versuch 5 .....	56
Tabelle 9: Ergebnisse Versuch 6 .....	57
Tabelle 10: Ergebnisse Versuch 7 .....	62
Tabelle 11: Ergebnisse Versuch 8 .....	63
Tabelle 12: Ergebnisse Versuch 9 .....	64
Tabelle 13: Vergleich der Versuche .....	68
Tabelle 14: Technische Daten Anemometer [11] .....	77

