

Diplomarbeit

Thema:

Bunkerentstaubung



Eingereicht von

Markus Karl Suppan

Leoben, Februar 2017

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Prenner

Begutachter:

O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Franz Kessler

Vorstand des Lehrstuhls für Fördertechnik und Konstruktionslehre

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Mürzzuschlag, 01.2017

(Ort und Datum)

(Unterschrift)

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 Dipl.-Ing. Christoph Grübler für ihre hilfreichen Anregungen und ihre tatkräftige Unterstützung bedanken.

Ich danke den Mitarbeitern der mechanischem 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 Karl und Helga bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1 Schüttgut.....	3
2.1.1 Entstehung staubfähiger Partikel in Schüttgütern	3
2.2 Bunker	4
2.3 Staub.....	4
2.3.1 Einteilung nach Quellgruppen.....	5
2.3.1.1 Natürliche und anthropogene Quellen.....	5
2.3.1.2 Primäre und sekundäre Quellen	6
2.3.1.3 Mobile und stationäre/ortsfeste Quellen	6
2.3.2 Partikelgröße und Verweilzeit.....	7
2.3.2.1 Nanostaub	8
2.3.2.2 Feinstaub	8
2.3.2.3 Grobstaub	9
2.3.3 Haftmechanismen von Staub.....	9
2.3.3.1 Diffusion durch Brown'sche Partikelbewegung	10
2.3.3.2 Temperatureffekt, Thermophorese.....	10
2.3.3.3 Schwerkraft	10
2.3.3.4 Elektrostatische Kraft.....	10
2.3.3.5 Nasse Haftung, Kapillarkraft.....	10
2.3.3.6 Van-der-Waals-Kraft.....	11
2.3.3.7 Zubringerfunktion der Luft	11
2.3.3.8 Agglomeration.....	11
2.3.4 Staubentstehung beim Umschlag	11
2.3.4.1 Fallhöhe.....	14
2.3.4.2 Materialfeuchtigkeit	15

2.3.4.3 Abwurfmenge	16
2.4 Minderungsmaßnahmen und Staubbekämpfung	16
2.4.1 Einteilung der Maßnahmen	16
2.4.2 Staubbekämpfung	18
2.4.2.1 Entstauber	18
2.4.2.1.1 Schwerkraftentstauber	19
2.4.2.1.2 Kombinierte Schwer- und Fliehkraftentstauber	20
2.4.2.1.3 Fliehkraftentstauber	20
2.4.2.1.4 Elektroentstauber	21
2.4.2.1.5 Waschentstauber	22
2.4.2.1.6 Filtrationsentstauber	22
2.4.2.2 Staubbekämpfung durch Ultraschall	23
2.4.2.3 Wassersprühsysteme	23
2.4.2.4 Einhausungen	24
2.4.2.5 Pendelklappensystem, Staubsperren	25
2.4.2.6 Staubschutzwände	26
2.4.2.7 Staubunterdrückende Trichter (Dust Suppression Hopper)	27
2.4.2.8 Kaskadenförmiges Laderohr	27
2.4.2.8 Staubunterdrückung durch Schaum	28
3. Genauere Betrachtung und Bewertung der Methoden	29
3.1 Entstauber	30
3.1.1 Schwerkraftentstauber	30
3.1.2 Fliehkraftentstauber	30
3.1.3 Elektroentstauber	30
3.1.4 Waschentstauber	31
3.1.5 Filtrationsentstauber	31
3.2 Ultraschallentstaubung	32
3.3 Sprühwasseranlagen	33

3.4 Staubunterdrückung durch Schaum	35
3.5 Vermeidung der Staubentstehung	35
3.5.1 Staubunterdrückende Trichter (Dust Surpression Hopper, DSH)	35
3.5.2 Kaskadenförmiges Ausflussrohr (Cascading loading spout)	35
3.6 Vermeidung der Staubausbreitung	36
3.7 Bewertung der Entstaubungsmöglichkeiten	36
3.7.1 Technische Kriterien	36
3.7.2 Wirtschaftliche Kriterien	38
3.7.3 Technische Bewertung	38
3.7.4 Wirtschaftliche Bewertung	39
3.7.5 Stärkediagramm	42
4. Übersicht über mögliche Ausführungen und Ideen	43
4.1 Leitbleche	44
4.2 Trichter	45
4.3 Kaskade	48
4.4 Klappensystem	50
4.5 Leitblech mit angeschlossenem Prallabscheider	51
4.6 Geschlossene Konstruktion mit Klappen	52
4.7 Elektroabscheider	54
4.8 Besprühungssysteme	56
4.9 Bewertung der Konzepte	57
4.9.1 Wirtschaftliche Kriterien	57
4.9.2 Technische Kriterien	57
4.9.3 Technische Bewertung	59
4.9.4 Stärkediagramm	62
5 Aufbau des Versuchsbunkers und Messmethoden	63
6 Ausgewählte Staubminderungsmaßnahmen und Umsetzung im Versuchsbunker	69
6.1 Leitbleche	69

6.2 Klappensystem	74
6.3 Elektroentstauber.....	78
6.3.1 Aufladung der Teilchen.....	83
6.3.1.1 Aufladung durch die Wirkungen des elektrischen Feldes.....	83
6.3.1.2 Aufladung durch molekulare Diffusion	84
6.3.2 Wandergeschwindigkeit.....	85
6.3.3 Abscheidegrad	86
6.3.4 Aufbau und Elektroden	86
6.3.5 Elektrische Einrichtungen	89
6.3.6 Konstruktion.....	90
7 Messergebnisse.....	94
7.1 Messergebnisse Standard	95
7.1.1 Heckkipper	95
7.1.2 Seitenkipper.....	97
7.2 Messergebnisse Leitbleche.....	100
7.2.1 Heckkipper	100
7.2.2 Seitenkipper.....	102
7.3 Messergebnisse Klappensystem	105
7.3.1 Heckkipper	105
7.3.2 Seitenkipper.....	107
7.4 Vergleich der Ergebnisse	110
7.4.1 Vergleich Heckkipper und Seitenkipper	112
7.5 Vergleich der Einbauten.....	114
8 Zusammenfassung.....	116
9 Abbildungsverzeichnis	118
10 Tabellenverzeichnis.....	123
11 Literaturliste	125

1. Einleitung

Im Rahmen dieser Arbeit sollen staubmindernde Maßnahmen für die Entleerung von Schüttgütern in Tiefbunker für die Firma Voest-Alpine erarbeitet werden. Die Entleerung von Schüttgütern in Bunkeranlagen ist immer mit einer mehr oder weniger ausgeprägten Staubentwicklung verbunden. Sie ist maßgeblich abhängig von der Korngröße, der Materialfeuchtigkeit und der Fallhöhe. Der in dieser Arbeit zu Grunde liegende Bunker ist rechteckig mit pyramidenstumpfförmigem Auslauf. Er hat eine Länge von 5,2m, eine Breite von 3m und eine Höhe von 6,5m (siehe Abb. 1.1).

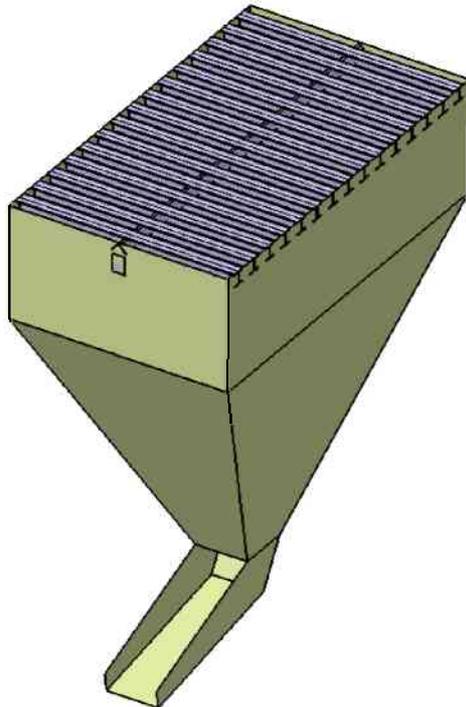


Abb. 1.1 Bunkeranlage

Das Einbringen des Schüttguts erfolgt über stirnseitiges oder seitliches Abkippen. Die staubmindernden Maßnahmen sollen das Fassungsvermögen nicht wesentlich verringern, das Material soll möglichst wenig Feuchtigkeit aufnehmen und die Überfahrbarkeit des Bunkers sollte, wenn möglich, erhalten bleiben. Im ersten Teil der Arbeit werden grundlegende Mechanismen der Staubentstehung, des Staubverhaltens, der Staubeigenschaften und der Staubminderung und Bekämpfung vorgestellt. Weiter folgt eine Bewertung der möglichen

Minderungsmaßnahmen auf ihre Verwendbarkeit in Tiefbunkern und die Vorstellung verschiedener möglicher Konzepte. Die vielversprechendsten Konzepte werden in einen Modellbunker mit dem Maßstab 1 zu 4 eingebaut und getestet. Am Ende folgen die Betrachtung und ein Vergleich der Messergebnisse und mögliche Empfehlungen für die Verwendung in der realen Bunkeranlage.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Schüttgut

Der Begriff Schüttgut bezeichnet laut VDI 3790 einen Feststoff, der als loses Fördergut in schüttbarer Form betrachtet werden kann. Es gibt verschiedenste Formen und Arten von Schüttgütern wie zum Beispiel Pulver, Körner, Granulat, Pellets, Stücke etc. Gemäß DIN ISO 3435 werden Schüttgüter hinsichtlich Kornbeschaffenheit, Zusammenhalt, Schüttdichte und besonderen Eigenschaften eingeordnet. Diese Eigenschaften beeinflussen entscheidend die Staubentstehung durch Schüttgüter bei Transport, Lagerung oder Umschlag, die die Hauptbestandteile der Logistikkette von der Gewinnung über die Verarbeitung bis hin zur Verwendung von Gütern darstellen. Die Besonderheit von Schüttgütern zeigt sich darin, dass ihre Eigenschaften zwischen fluid und agglomerierend schwanken können. [vgl. 1]

2.1.1 Entstehung staubfähiger Partikel in Schüttgütern

Schüttgüter werden entweder gewollt durch Brechen, Mahlen, etc. zerkleinert oder als ungewollte Nebenwirkung anderer Operationen wie zum Beispiel durch Abrieb, beim Transport, in Schneckenförderern usw. Durch mechanische Belastungen entstehen unterschiedliche Mengen an Partikeln mit verschiedenen Korngrößen, die als Staub austreten können. Solche Belastungen treten bei jedem Mahlen und Brechen und an allen Übergabestellen in der Förderung durch Werfen, Kippen, Schütten, etc. auf. Die Korngrößenverteilung eines Schüttguts ist daher nicht konstant. Es ist also möglich, dass nicht nur verschiedene Produkte, sondern auch ein und dasselbe zu unterschiedlichem Staubungsverhalten führt, je nach seiner Vorgeschichte. Das bedeutet, dass je nach Charge, bei gleichen Begebenheiten wie Abwurfhöhe, Abwurfmenge und Feuchtigkeitsgehalt, das Material beim Umschlag eine unterschiedlich große Menge an Staub erzeugt. Die Aufhaltung von Schüttgütern führt oft zu einer Entmischung der groben und feinen Partikelanteile. Die kleineren Partikel sammeln sich beim Abwurf bevorzugt im Inneren von Schüttungen. Dies wird weiter durch Erschütterungen, zum Beispiel bei einem langen Transport, verstärkt, da dadurch die feineren Partikel durch die Freiräume zwischen den Gröberen hindurch ins Innere wandern. Diese unterschiedliche Verteilung der Anteile führt bei einer erneuten Bewegung des Guts zu einer unterschiedlich starken Staubentstehung. Jede Bewegung des Schüttguts führt zur Loslösung von bereits vorhandenen flugfähigen Partikeln, erzeugt aber gleichzeitig neue Feinanteile durch Reibung. Je nach Verhältnis zwischen abgeführtem und neu erzeugtem Feinanteil kann ein zu Beginn schwach staubendes Material nach einigen

Umschlagvorgängen stark Stauben oder umgekehrt. Bei beinahe jeder Bewegung von Schüttgut kommt es außerdem zu Luftströmungen, so wird zum Beispiel beim Abwurf von Material Luft mitgerissen, die beim Aufprall schlagartig verdrängt wird und dabei Partikel mit sich trägt. Die beim Aufprall des Materials entstehenden Kräfte führen zur Überwindung von Haftkräften zwischen den Partikeln, wodurch es zu weiterer Staubentstehung kommt. Je stärker der Aufprall ist, umso größere Partikel werden losgelöst und breiten sich als Staub aus. [vgl. 1]

2.2 Bunker

Bunker speichern Schüttgüter und bestehen aus Stahl, Stahlbeton, Leichtmetall, mit Kunststoff beschichtetem Stahl oder Kunststoff. Ihre Form ist abhängig vom jeweiligen Schüttgut und den örtlichen Gegebenheiten. Zu unterscheiden sind prismatische Bunker mit rechteckigem oder quadratischem Querschnitt (Auslauf: Pyramiden- oder Keilstümpfe), zylindrische Bunker mit kreisförmigen Querschnitt (Auslauf: Kegelstumpf) und Taschenbunker bestehend aus aneinandergereihten prismatischen Bunkern. [vgl. 2]

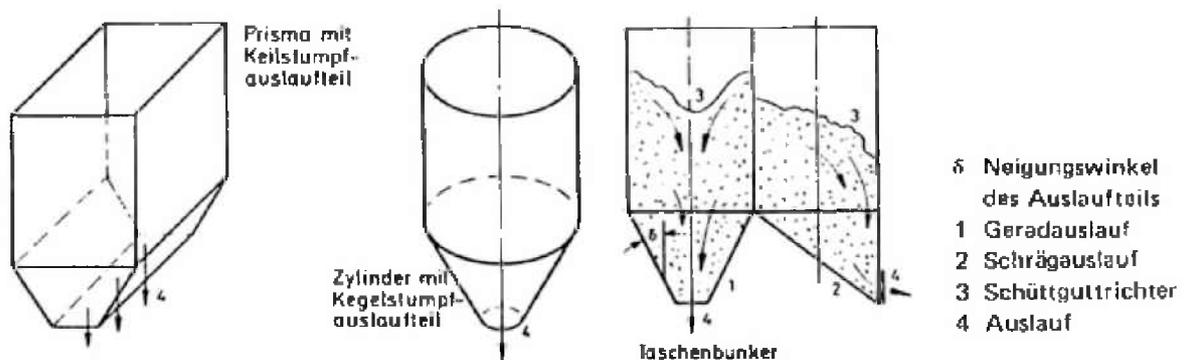


Abb. 2.1 Bauarten von Schüttgutbunkern [2]

2.3 Staub

Stäube sind in Gasen verteilte feste Stoffe, die, in Luft aufgewirbelt, mehr oder weniger lange schweben können. Staub ist also ein Zweiphasensystem, er kann entweder als Wolke oder als Haufwerk vorliegen. Die Ausbreitung von Stäuben ist großteils von der Partikeldichte und -

größe abhängig. Die Partikelgröße wird in der Regel als Durchmesser mit verschiedenen Zusätzen angegeben, z. B. Oberflächendurchmesser, projizierter Durchmesser oder aerodynamischer Durchmesser. Eine weitere erhebliche Größe ist die Sedimentationsgeschwindigkeit, die angibt, wie schnell Schwebstaub zu Staubniederschlag übergeht. Sie steigt mit zunehmender Partikelgröße stark an. Einige Eigenschaften von Staub lassen sich nicht vollständig durch Messgrößen bestimmen und können oft nur qualitativ beschrieben werden, z. B. Teilchenform oder Schwebeverhalten. Staubpartikel werden auch aufgrund ihrer chemischen oder mineralogischen Zusammensetzung charakterisiert. Man unterscheidet natürliche silikatische Stäube wie z. B. Quarz oder Asbest, natürliche organische Stäube wie z. B. Blütenpollen, synthetische organische Stäube wie z. B. Polymerpartikel, kohlenstoffhaltige Stäube wie z. B. Ruß und schwermetallhaltige Stäube. Während gröbere Stäube lediglich belästigend wirken, können feinere Stäube negative Auswirkungen auf die Gesundheit haben, z. B. Asbeststäube. Sie können Allergien, Haut-, Schleimhaut-, Rachen- und Lungenerkrankungen hervorrufen und schlimmstenfalls sogar bösartige Tumore erzeugen. Die Minderung solcher Stäube ist also von großer Bedeutung. [vgl. 1]

2.3.1 Einteilung nach Quellgruppen

„Beim Auftreten von diffusen Luftverunreinigungen wird oftmals zwischen

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

Quellen unterschieden.“ [1]

2.3.1.1 Natürliche und anthropogene Quellen

In Tabelle 2.1 sind die emittierten Stoffe aus natürlichen und anthropogenen Quellen dargestellt. Auf die Quellstärke anthropogener Quellen kann Einfluss genommen werden. Auf die von natürlichen meist nicht, wodurch sich eine Grundbelastung der Luft ergibt, die zu ihrer natürlichen Zusammensetzung gezählt wird. [vgl. 1]

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

Tab. 2.1: Natürliche und anthropogene diffuse Quellen ausgewählter Stoffe [1]

2.3.1.2 Primäre und sekundäre Quellen

Bei primären Quellen bleiben die emittierten Stoffe unverändert mehr oder weniger lange in der Luft. Zu den primären Quellen zählen unter anderem Erosion, Abwehung, Brände und Vulkantätigkeit, Verkehr, Industrie, Energieerzeugung, Rohstoffgewinnung und mechanische Beanspruchung von Schüttgütern.

Aus sekundären Quellen werden Vorläuferstoffe wie z. B. Schwefeldioxid, Ammoniak oder Stickstoff freigesetzt. Diese können sich in der Atmosphäre zu Partikeln wie Nitrate, Sulfate etc. umwandeln. Die entstehenden Partikel sind klein mit einem Durchmesser von <0,1 µm. Durch sie kann auch in von Quellen weiter entfernten Gebieten eine Staubbelastung beobachtet werden. [vgl. 1]

2.3.1.3 Mobile und stationäre/ortsfeste Quellen

Zu ortsfesten Quellen zählen z. B. die Industrie und Kraftwerke. Eine der größten mobilen Quellen stellt der Verkehr dar. Dazu zählen Straßenverkehr, Luft-, und Schifffahrt sowie die Eisenbahn. Partikel entstehen durch die Motoren, durch Aufwirbelung, durch Abrieb von Bremsen, Reifen, Kupplungen, Fahrbahnen und Schienen sowie durch den Transport von emittierenden Gütern. [vgl. 1]

2.3.2 Partikelgröße und Verweilzeit

In Abbildung 2.2 sind Größenbereiche verschiedener Partikel wie z. B. Ruß oder Mehl, verschiedener Mikroorganismen und auch der Atemwege dargestellt. Der Größenbereich erstreckt sich über sechs Zehnerpotenzen von Nanometer bis Millimeter. Eine Einteilung in Nano-, Fein- und Grobstaub ist ebenfalls dargestellt. Die Größenangaben schwanken je nach Messmethode und Material zwischen gewissen Bereichen. Unter Nanostaub versteht man Partikel bis zu einer Größe von 100 nm. Bei 2,5 µm beginnt der Grobstaubbereich. Dazwischen liegt der Feinstaub. Die Sichtbarkeitsgrenze liegt für Einzelpartikel bei 60-80µm und fällt etwa mit der Schwebstaubgrenze zusammen. Bei Übergang in den Millimeterbereich ist die Schwebefähigkeit des Staubes kaum mehr vorhanden. [vgl. 3]

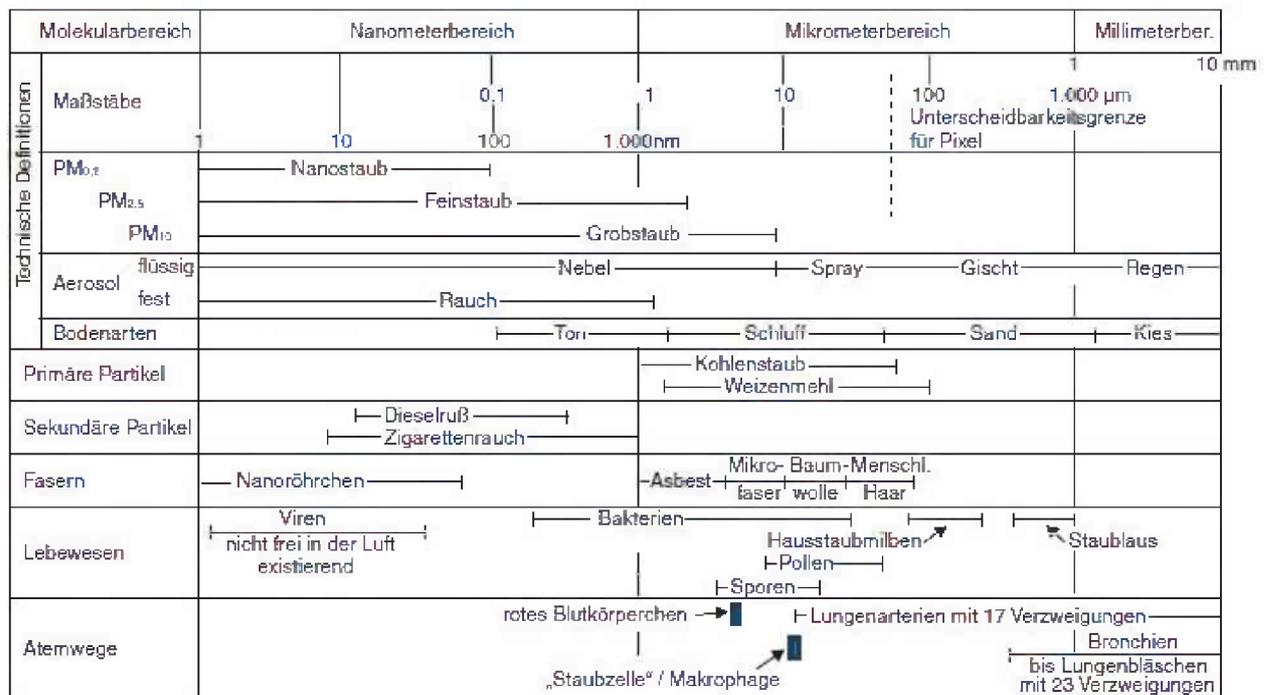


Abb. 2.2 Größenbereiche für Partikel [3]

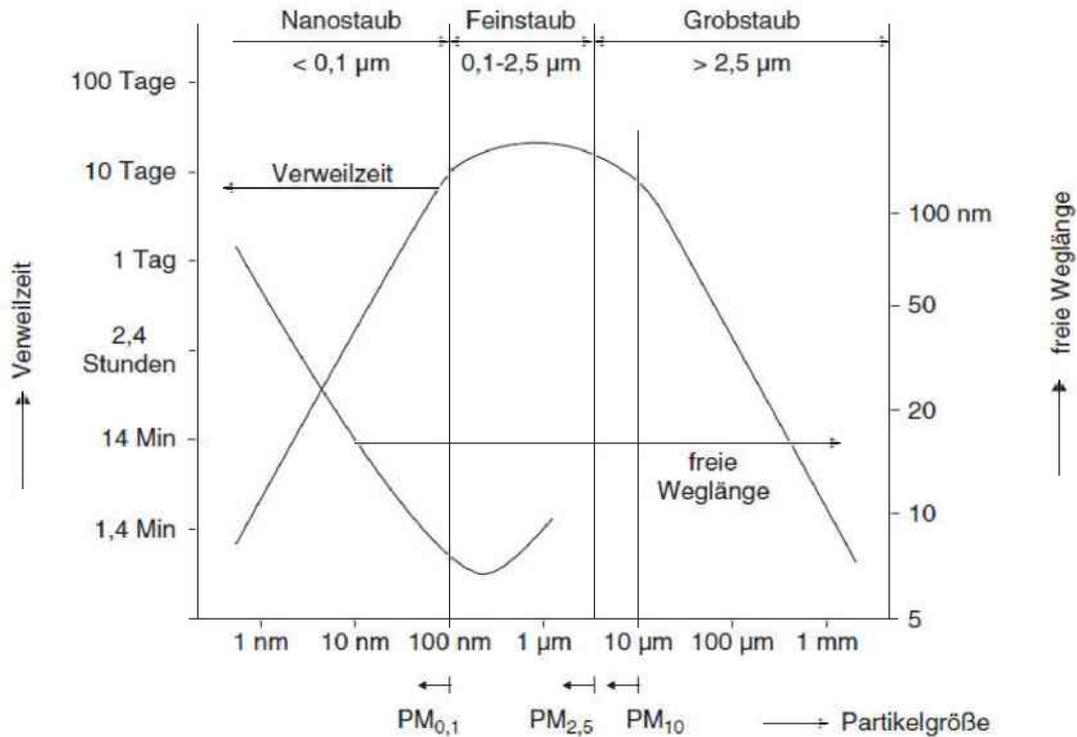


Abb. 2.3 Verweilzeit von Aerosolen in der Atmosphäre [3]

2.3.2.1 Nanostaub

In Abbildung 2.3 sind die Verweilzeiten der verschiedenen Staubgrößen in der Luft dargestellt. Im linken Bereich liegt der Nanostaub mit einer Größe bis 100 nm. Sie verhalten sich in der Luft ähnlich wie Dampfmoleküle. Da kleine Partikel bei Zusammenstößen schnell haften bleiben, liegt ihre Verweilzeit in der Luft bei eher niedrigen Werten. Da die Partikel auch aneinander haften bleiben, kommt es zu einer Zunahme der Partikelgröße bei gleichzeitiger Abnahme ihrer Anzahl. Die Masse an Staub in der Luft bleibt gleich, es findet aber eine Verlagerung zu größeren Partikelgrößen statt. Ab einer Größe von etwa 100 nm beginnt sich die gute Hafteigenschaft der Partikel zu verlieren. Hier liegt der Übergang zum Feinstaub. [vgl. 3]

2.3.2.2 Feinstaub

Im Größenbereich von 100 nm bis 2,5 µm liegt der Feinstaub. Hier erreicht die Verweilzeit der Partikel in der Luft ihr Maximum. Schwebezeiten bis 20 Tage und mehr sind möglich. Mit steigender Teilchenmasse steigt auch der Einfluss der Schwerkraft auf sie, durch deren Einwirkung sich die Verweilzeit der Partikel in der Luft erneut verringert. [vgl. 3]

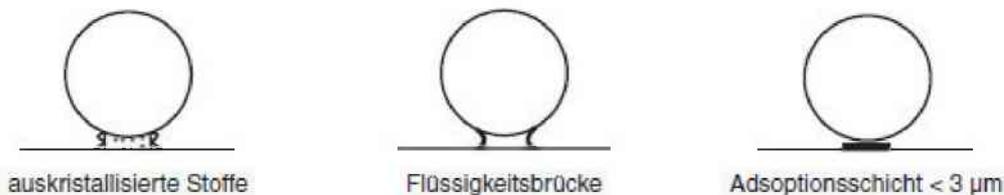
2.3.2.3 Grobstaub

Bei einer Größe von $2,5 \mu\text{m}$ beginnt der Grobstaubbereich. Der Einfluss der Schwerkraft nimmt weiter zu und die Partikel werden immer stärker nach unten gezogen, wodurch die Verweilzeit in der Luft weiter abnimmt. [vgl. 3]

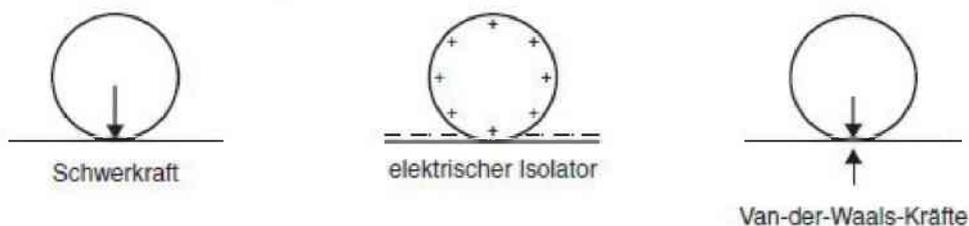
2.3.3 Haftmechanismen von Staub

Staubpartikel werden durch verschiedene Mechanismen an Oberflächen festgehalten. Diese sind in Abbildung 2.4 dargestellt. 2.4 a zeigt stoffliche Bindungen. Zu ihnen gehören Flüssigkeitsschichten und Stoffschichten. Sie zählen zu den wirkungsvollsten Bindungen. Unter 2.4 b sind Haftkräfte dargestellt, die ohne stoffliche Bindung wirken wie Schwerkraft, elektrische Kräfte und Van-der-Waals-Kräfte. Ein weiterer Haftmechanismus sind die formschlüssigen Verbindungen, die in 2.4 c zu sehen sind. [vgl. 3]

a mit stofflicher Bindung



b ohne stoffliche Bindung



c formschlüssige Verbindung

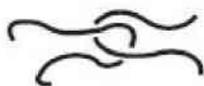


Abb. 2.4 Haftmechanismen zwischen Partikeln und Oberflächen [3]

Die Schwebezeit von Staub in der Luft ist begrenzt. Das Absetzen auf Oberflächen geschieht in zwei Schritten: dem Transport der Partikel zur Oberfläche und dem Übernehmen der Haftkräfte beim Berühren der Oberfläche. [vgl. 3]

2.3.3.1 Diffusion durch Brown'sche Partikelbewegung

Die Bewegungen von Nanostaub ergeben sich aus der thermisch getriebenen Bewegung der Gasmoleküle. Die auf die Partikel wirkende Schwerkraft hat wegen der kleinen Masse nur geringen Einfluss. Berühren die Partikel eine Oberfläche, bleiben sie daran haften. An der Oberfläche herrscht deshalb eine Partikelkonzentration von null, bezogen auf die angrenzende Luft. Das so entstehende Konzentrationsgefälle führt zu einem Partikelstrom in Richtung der Oberfläche. Die Reichweite der Diffusion ist auf etwa einen Millimeter begrenzt. Dieser Diffusionseffekt wird häufig in technischen Anlagen genutzt, um Feinstaub abzutrennen. Faserpakete (Filter) werden von Luft durchströmt und fangen den Staub ab. [vgl. 3]

2.3.3.2 Temperatureffekt, Thermophorese

Vor kalten Wänden bildet sich ein Temperaturgefälle in der Luftschicht, in der sich die Luftmoleküle wesentlich langsamer bewegen. Auf der wärmeren Seite dieser Luftschicht üben die Luftmoleküle wegen ihrer höheren Geschwindigkeit größeren Druck auf die Partikel aus als auf der kalten und es bildet sich so eine Druckdifferenz in Richtung Wand. Dieser Effekt wirkt stärker, je größer das Partikel bzw. seine Oberfläche ist. [vgl. 3]

2.3.3.3 Schwerkraft

Je größer und massereicher die Partikel werden, umso größer wird der Einfluss der Schwerkraft auf diese. Die Geschwindigkeit, mit der sich ein Partikel setzt, wird von seinem Luftwiderstand bestimmt. Der Einfluss der Schwerkraft beginnt bei einer Partikelgröße von ungefähr $0,5 \mu\text{m}$ zu dominieren. [vgl. 3]

2.3.3.4 Elektrostatische Kraft

Die zwischen geladenen Oberflächen entstehenden Feldkräfte wirken entweder anziehend oder abstoßend auf geladene Teilchen. Staubpartikel tragen oft unterschiedliche Ladungen, die durch Reibung oder Aufnahme eines Ions hervorgerufen werden. Durch Trennvorgänge werden Partikel meist negativ aufgeladen. Elektrostatische Kräfte werden in Elektroentstaubern zur Staubabscheidung eingesetzt. [vgl. 3]

2.3.3.5 Nasse Haftung, Kapillarkraft

Ein Flüssigkeitsfilm an einer Oberfläche führt für gewöhnlich zum sofortigen Haftenbleiben von Partikeln. Es bilden sich Flüssigkeitsbrücken zwischen den Haftpartnern. Flüssigkeitsfilme können beabsichtigt auf Oberflächen aufgebracht werden, aber auch zum Beispiel durch Kondensation unbeabsichtigt entstehen. [vgl. 3, 4]

2.3.3.6 Van-der-Waals-Kraft

Van-der-Waals-Kräfte sind schwache Wechselwirkungen, die zwischen Atomen oder Molekülen auftreten. Ihre Größe ist stark abhängig vom Abstand, was bedeutet, dass sie erst bei geringen Abständen eine Wirkung zeigen. Bei größeren Partikeln verhindert bereits die Oberflächenrauigkeit eine ausreichende Annäherung. Wenn allerdings ein genügend kleiner Abstand hergestellt werden kann, können diese Kräfte eine beachtliche Haftung hervorrufen, die die Partikel bindet und sie sogar gegenüber dem Abspülen mit Wasser resistent machen kann. Sie brauchen in der Regel allerdings etwas Zeit, um ihre volle Kraft zu entwickeln, da es zum Abbau von Rauigkeitsspitzen kommt. [vgl. 3, 5]

2.3.3.7 Zubringerfunktion der Luft

Staub kann durch Luftströmungen in alle Richtungen verteilt werden. Trägt die Luft die Partikel in den Einflussbereich einer der vorher beschriebenen Nahkräfte, beeinflusst diese den weiteren Weg des Partikels. Nicht nur atmosphärische Winde oder Fahrtwind verteilen Staubpartikel, schon Luftstöße durch einfache Muskelbewegungen reichen aus. [vgl. 3]

2.3.3.8 Agglomeration

Agglomeration ist hier die Zusammenballung von Partikeln. Damit es zu einer solchen Zusammenballung kommt, sind zwei Dinge notwendig, nämlich Berührung und ausreichend Haftkräfte. Je höher die Konzentration an Partikeln in einem Gebiet ist, umso wahrscheinlicher kommt es zu Zusammenstößen und Berührungen. Auch die Bewegung der Teilchen spielt dabei eine Rolle. Größere Teilchen über 1 µm werden meist durch Strömungs- und äußere Kräfte bewegt, während auf kleinere neben äußeren Kräften auch die molekulare Diffusion Einfluss hat. Van-der-Waals-Kräfte spielen wegen ihrer geringen Reichweite meist keine Rolle. [vgl. 4]

2.3.4 Staubentstehung beim Umschlag

Es gibt vier wesentliche Einflussparameter, die die Entstehung von Staub beim Umschlag von Schüttgütern bestimmen. Daher haben Maßnahmen, die auf die Änderung dieser Parameter abzielen, großen Einfluss auf die entstehende Staubmenge. Die effizientesten Maßnahmen setzen bei allen vier gleichzeitig an. Um die Staubentstehung zu mindern, sollten folgende Regeln beachtet werden:

2. Theoretische Grundlagen

- eine möglichst große Abwurfmenge,
- die möglichst geringe Abwurfhöhe,
- möglichst staubarmes Material und
- eine möglichst weitgehende Abschirmung der Abwurfstelle. [vgl. 1]

Die Entstehung von Staub durch einen fallenden Partikelstrom ist abhängig von der eingeschlossenen Luft, die dieser mitführt. Die Kräfte, die auf die fallenden Partikel wirken, werden vom Leerraum in der Partikelwolke beeinflusst. Die Kräfte auf Partikel A sind über seine Oberfläche hinweg verschieden. Der Luftstrom auf der rechten Seite des Partikels wird durch Partikel B behindert. Die Kräfte auf der linken Seite des Partikels sind also größer als jene auf der rechten. Dadurch kann Partikel A bei ausreichender Fallgeschwindigkeit aus dem Kern des Stroms in die umgebende Luft weggezogen werden. Die ruhende Umgebungsluft wird in den Partikelstrom induziert. Partikel C kann auf ähnliche Weise weggezogen werden. Die losgelösten Partikel und die eingezogene Luft formen eine Grenzschicht um den Partikelstrom, die mit zunehmender Fallhöhe wächst. [vgl. 7]

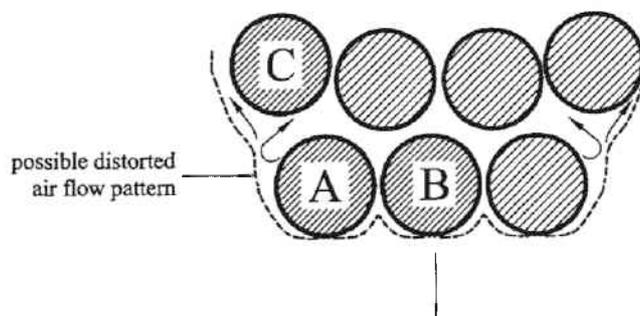


Abb. 2.5 Schematische Darstellung fallender Partikelcluster [7]

Jede Sekunde, in der sich das Material im freien Fall befindet, wird mehr Luft in den Partikelstrom gezogen. Beim Aufprall wird die gesamte eingezogene Luft ausgestoßen und reißt dabei Partikel mit. [vgl. 9]

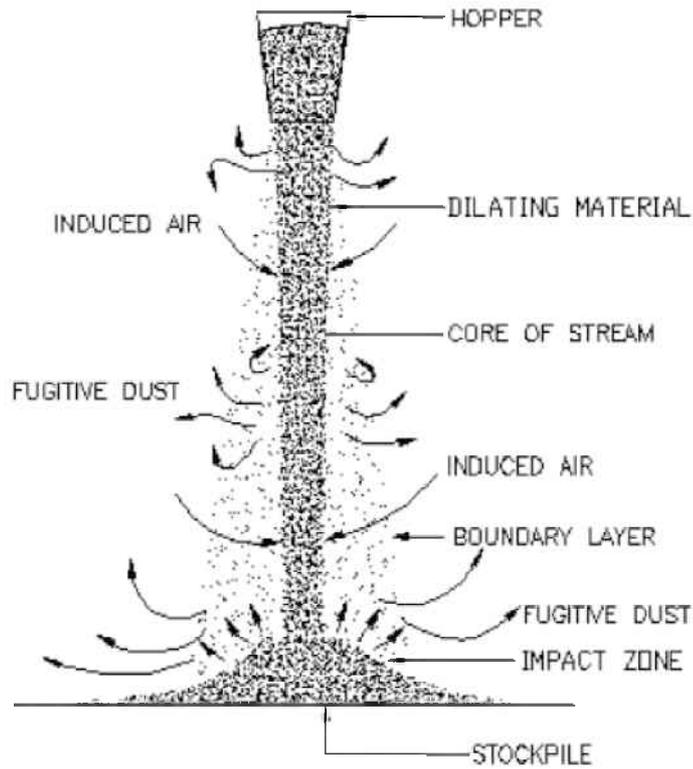


Abb2.6 Schematic of dust generation from a falling stream of bulk material [8]

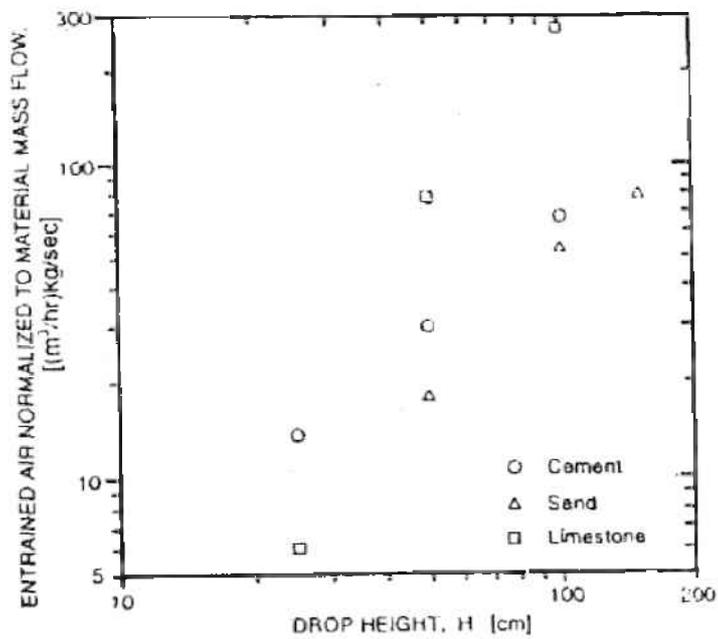


Abb. 2.7 Entrained Air vs. Drop Height [10]

Plinke (1991) führte Abwurfversuche an einer Fallturm-Modellanlage durch und hat dabei unter Verwendung statistischer Auswertungsmethoden Abhängigkeiten der Staubeinstehung

von Parametern wie Materialdichte, Abwurfhöhe, Abwurfmenge und Materialfeuchtigkeit festgestellt. Es wurden mineralische und organische Substanzen untersucht. Die Untersuchungen zeigten eine proportionale Abhängigkeit der Emissionsrate von der Abwurfhöhe und umgekehrt proportionale Abhängigkeiten der Emissionsrate von der Materialfeuchte und der Abwurfmenge auf, die jeweils materialspezifisch stark ausgeprägt war. [vgl. 6]

2.3.4.1 Fallhöhe

Mit *Impaction* wird die Auftrennung der Partikel in Abhängigkeit von Fallhöhe, Materialfeuchtigkeit, Partikelgröße und Partikeldichte beschrieben. Abbildung 2.8 und 2.9 zeigen den Zusammenhang zwischen Fallhöhe und *Impaction* bzw. Staubentstehung. Mit steigender Fallhöhe steigen die Fallgeschwindigkeit und damit die Menge des entstehenden Staubes. [vgl. 10]

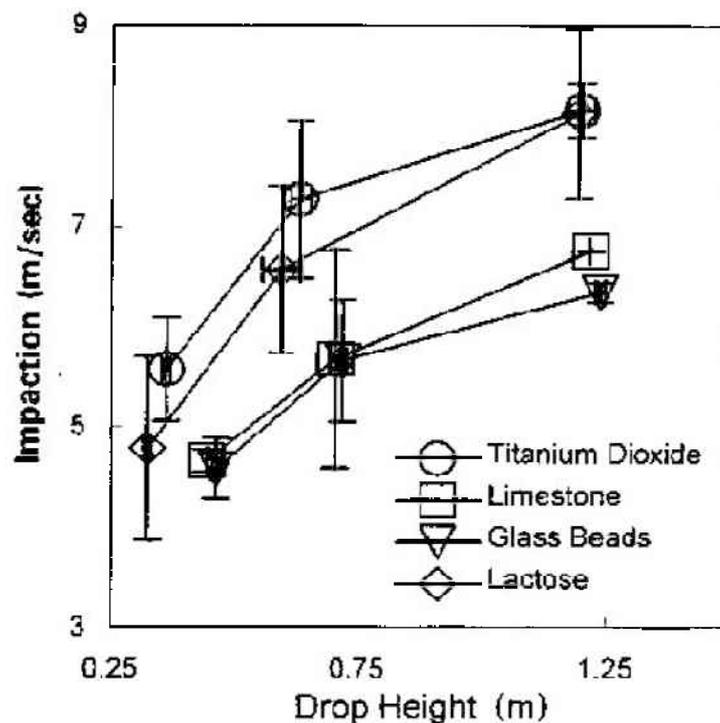


Abb. 2.8 Impaction vs. drop height [10]

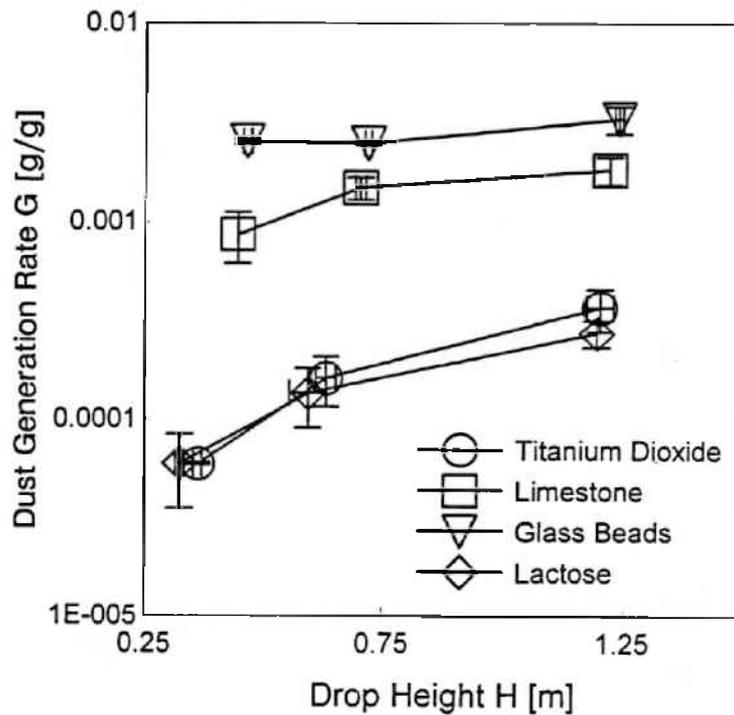


Abb. 2.9 Dust generation vs. drop height [10]

2.3.4.2 Materialfeuchtigkeit

Hohe Materialfeuchtigkeit erhöht die Kohäsion und mindert die Staubentstehung von fast allen Materialien. Siehe Abbildung 2.10 und 2.11.

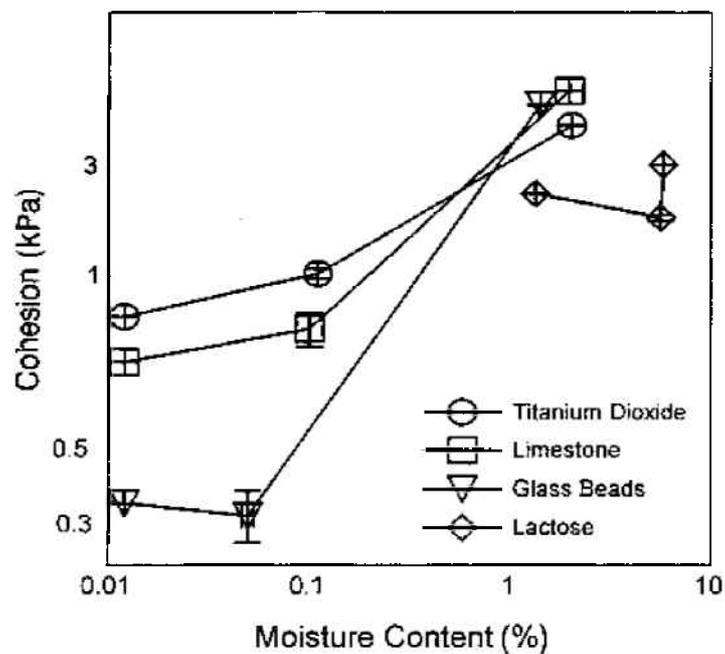


Abb. 2.10 Cohesion vs. Moisture Content [10]

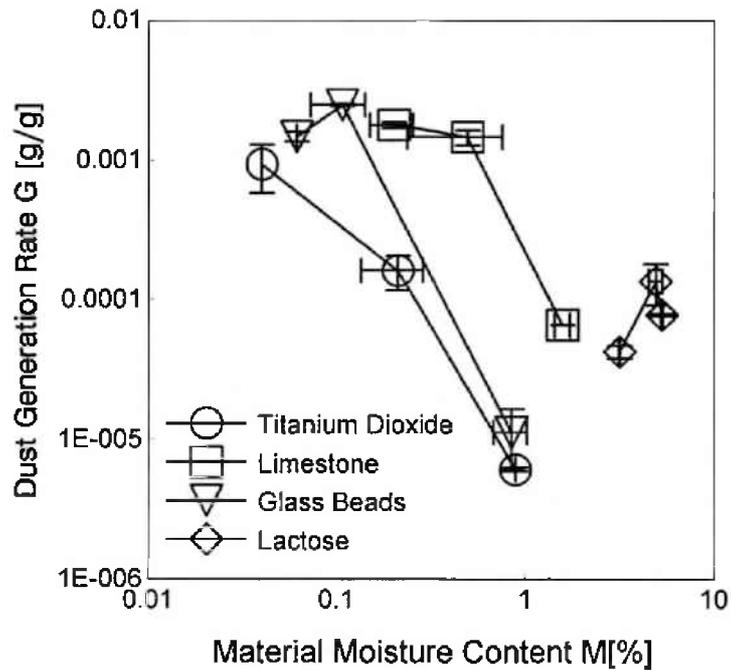


Abb. 2.11 Dust Generation vs. Moisture Content [10]

2.3.4.3 Abwurfmenge

Eine erhöhte Abwurfmenge bzw. ein erhöhter Materialfluss ermöglicht es den Partikeln, engeren Kontakt zueinander zu wahren, wodurch das Loslösen von Teilchen erschwert wird. Der Querschnitt des Partikelstroms steigt mit steigender Abwurfmenge, wodurch mehr Partikel im Inneren gegen die Umgebungsluft abgeschirmt sind. [vgl. 11, 12]

2.4 Minderungsmaßnahmen und Staubbekämpfung

2.4.1 Einteilung der Maßnahmen

Präprimäre Maßnahmen zielen auf die Veränderung des Materials ab, bevor es durch etwaige Prozesse zur Staumentwicklung kommen kann. Zu diesen Maßnahmen gehört z. B. die Herstellung von Pellets, wie bei der Formung von Eisenfeinerzen in Pelletieranlagen zu Kügelchen. [vgl. 1]

Primäre Maßnahmen werden in organisatorische, technische und bauliche Maßnahmen unterteilt. Ihr Ziel ist es, die Staumentstehung an der Quelle zu mindern [vgl. 1]:

- Organisatorische Primärmaßnahmen zielen in der Regel auf eine Änderung des Verhaltens von Bedienpersonal ab, z. B. kein Materialumschlag bei zu starkem Wind.
- Technische Primärmaßnahmen befassen sich mit Geräten und Techniken, die der Emissionsentstehung entgegenwirken.
- Bauliche Primärmaßnahmen setzen bei der Gestaltung von Anlagen an, durch die ein Teil der Emissionen vermieden wird, z. B. Lagerhallen.

Sekundäre Maßnahmen sollen bereits entstandene Emissionen an der Ausbreitung hindern wie z. B. [vgl. 1]:

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

Der Übergang zwischen den verschiedenen Maßnahmen ist fließend, so kann zum Beispiel eine sekundäre Maßnahme für eine Anlage eine präprimäre für eine nachfolgende sein. Meist werden verschiedene Minderungsmaßnahmen miteinander kombiniert wie z. B. geschlossene Anlagen mit Absaugungen. Jede Minderungsmaßnahme ist mit zusätzlichen Anschaffungs- und Betriebskosten verbunden, sodass immer zwischen Machbarkeit, Kosten und Nutzen abgewogen werden muss. [vgl. 1]

Maßnahmen bezogen auf das Gut [1]:

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

Maßnahmen bezogen auf das Umschlagverfahren [1]:

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

2.4.2 Staubbekämpfung

2.4.2.1 Entstauber

Entstaubung ist die Entfernung von festen Teilchen aus Aerodispersionen. Die Entstaubungstechnik befasst sich mit allen technischen Einrichtungen und Maßnahmen, die eine Entstaubung bewirken. Geräte, die zur Entstaubung von Aerodispersionen dienen, nennt man Entstauber oder auch Staubabscheider. Die Entstaubung erfolgt in zwei Schritten, und zwar der Verschiebung der Teilchen und deren Abtrennung. Für die Verschiebung der Teilchen können verschiedene Kräfte wie Schwer-, Flieh-, oder elektrische Kräfte herangezogen werden. Die Entstauber werden nach der vorherrschenden Kraft Schwerkraft-, Fliehkraft- und Elektroentstauber genannt. Eine weitere Möglichkeit der Staubabscheidung stellt die Filtration dar, bei der die Teilchen von einem porösen Stoff durch Diffusion aus der Luft gezogen werden. Bei Filterstoffen wirkt auch die Gitterstruktur bei der Entstaubung mit, in der Teilchen hängen bleiben. Eine weitere Option ist das Auswaschen von Teilchen aus dem Staub-Luftgemisch. Die Teilchen umströmen hierbei die Flüssigkeitstropfen und werden durch Trägheitskräfte aus der Luft in die Flüssigkeit übertragen. Diese Methode wird in den Waschentstaubern genutzt. [vgl. 4]

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

Abb. 2.12 Übersicht über Entstauber [4]

2.4.2.1.1 Schwerkraftentstauber

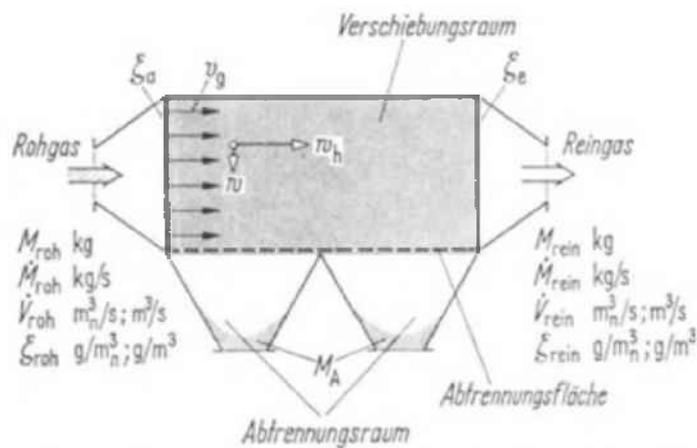


Abb. 2.13 Schema Schwerkraftentstauber [4]

Der Schwerkraftentstauber ist vom Aufbau her der einfachste der Entstauber. In Abbildung 2.13 sind der Aufbau und die Funktionsweise dargestellt. Das Staub-Luftgemisch durchströmt den Verschiebungsraum horizontal, wobei die Schwerkraft auf die Partikel wirkt. In der Abbildung strömt die Luft mit der Geschwindigkeit v_g und die Partikel mit w_h . Durch die Schwerkraft erhalten die Partikel eine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente w nach

unten. Dadurch gelangen die Partikel in den Strömungstotraum unterhalb der Abtrennfläche. Sowohl die Teilchenverschiebung wie auch die Abscheidung in den Bunker erfolgen hier durch dieselbe Kraft. Bei allen anderen Entstaubern werden diese Vorgänge durch verschiedene Kräfte bewirkt. Schwerkraftentstauber scheiden nur Partikel bis etwa $50\ \mu\text{m}$ ab, wodurch sie eher als Vorabscheider eingesetzt werden. [vgl. 4]

2.4.2.1.2 Kombinierte Schwer- und Fliehkraftentstauber

Da die Wirkung der Schwerkraft zur Verschiebung von Staubteilchen vergleichsweise klein ist, versucht man diese durch Fliehkräfte zu unterstützen. Diese werden durch ein- oder mehrmalige Strömungsumlenkung erzeugt. [vgl. 4]

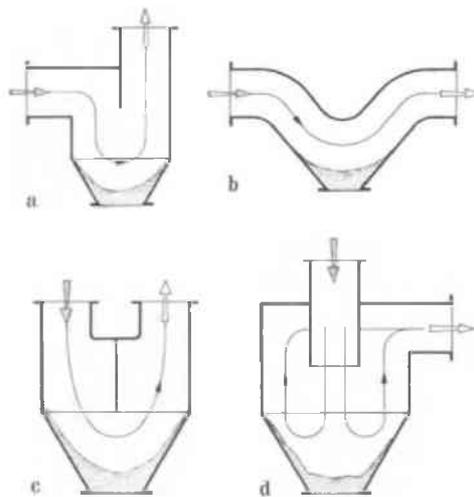


Abb. 2.14 Beispiele Kombinierte Schwer- und Fliehkraftentstauber [4]

2.4.2.1.3 Fliehkraftentstauber

In diesen Entstaubern wird die Verschiebung durch Fliehkräfte verursacht. Ein Hauptvertreter dieser Entstauberart ist der in Abbildung 2.15 dargestellte *Zyklon*. Die Staubteilchen bewegen sich hier entlang gekrümmter Stromlinien und durchlaufen dabei eine Vielzahl von Umläufen. Das Staub-Luftgemisch strömt tangential oben in den Zyklon ein und dann auf wendelförmiger Bahn in den Kegel. Von dort tritt es durch eine rotierende Kernströmung in das Tauchrohr ein und verlässt so den Entstaubungsraum. Die

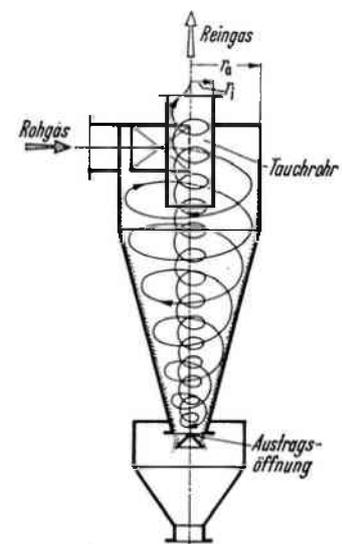


Abb. 2.15 Stromlinienverlauf im Zyklon [4]

dabei entstehenden Fliehkräfte verschieben die Staubteilchen an die Außenwand, von wo der Staub über die Austragsöffnung in den Staubbunker gelangt. Es lassen sich Korngrößen bis etwa $1\ \mu\text{m}$ abscheiden. [vgl. 4]

2.4.2.1.4 Elektroentstauber

In Elektroentstaubern erfolgt die Verschiebung der Partikel durch elektrische Kräfte. Auf elektrisch geladene Teilchen wirkt in einem elektrischen Feld eine verschiebende Kraft in Richtung des Potenzialgefälles. Da Staubpartikel meist un- oder gemischt geladen sind, reicht ihr Zustand für eine Verschiebung und Abscheidung nicht aus. Die Teilchen müssen also gleichmäßig geladen werden. In Abbildung 2.16 ist der schematische Aufbau eines Rohrelektroentstaubers dargestellt. Ein geerdetes Rohr bildet den Entstaubungsraum. In seiner Mitte ist ein gegen das Rohr isolierter dünner Draht aufgehängt, der Sprühdraht. An diesen Draht werden hohe negative Spannungen angebracht, etwa zwischen 30.000V und 80.000V , je nach Anforderungen.

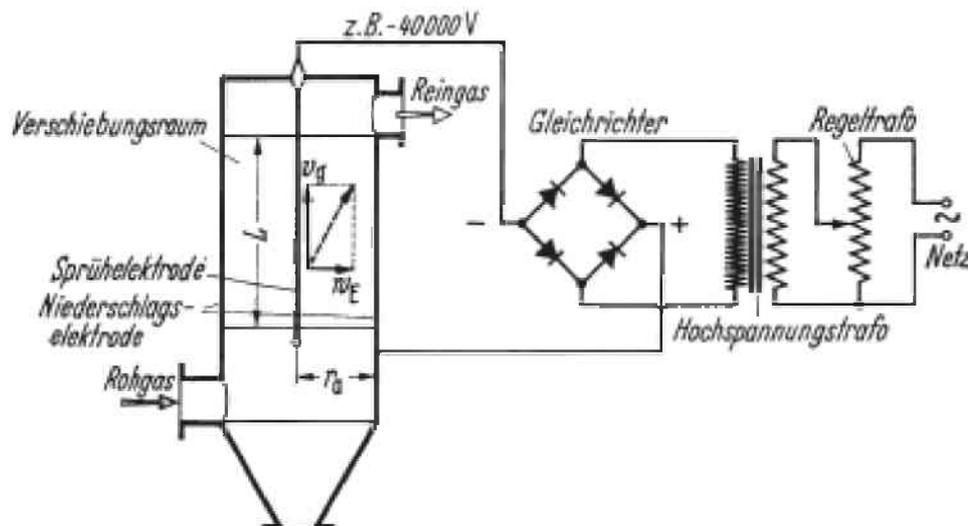


Abb. 2.16 Grundschemata einer Elektroentstaubers [4]

Zwischen Draht und Rohrwand, die als Niederschlags-elektrode bezeichnet wird, bildet sich so ein Potenzialgefälle. Die am Sprühdraht erzeugten Ladungen kollidieren mit den in den Entstaubungsraum eingetretenen Staubteilchen und laden diese auf. Dadurch wirkt eine Kraft auf die Partikel, die sie in Richtung Rohrwand verschiebt, wo sie anhaften. Der anhaftende Staub muss regelmäßig von der Wand entfernt werden, damit der Entstauber effektiv arbeiten kann. Dies kann durch Abklopfen oder Abwaschen geschehen. Neben den Rohrabscheidern gibt es auch noch Plattenabscheider, deren Funktionsweise dieselbe ist, jedoch sind die Elektroden anders aufgebaut. Die Niederschlags-elektroden sind als parallel zueinander

angeordnete Platten ausgeführt. Zwischen ihnen sind die Sprühelektroden angebracht. Sowohl Sprüh- als auch Niederschlagselektroden gibt es in verschiedenen Bauformen. Mit Elektroabscheidern lassen sich kleinste Partikel bis etwa $0,01 \mu\text{m}$ abscheiden. Eine genauere Betrachtung der Funktionsweise von Elektroentstaubern folgt in Kapitel 6.3. [vgl. 4]

2.4.2.1.5 Waschentstauber

In Waschentstaubern werden, wie in Kapitel 2.4.2.1 bereits erwähnt, die Staubpartikel durch Flüssigkeit aus der Luft entfernt. Die Flüssigkeit kann in verschiedenen Formen vorliegen, etwa als Tropfen, als Flüssigkeitsnetz oder Flüssigkeitsschicht. Das Staub-Luftgemisch wird also entweder mit Wassertropfen bedüst, wie im in Abbildung 2.17 dargestellten *Venturiwäscher*, oder es durchströmt einen mit Flüssigkeit besetzten Füllkörper oder eine Flüssigkeitsschicht. In allen Fällen erfolgt die Entstaubung durch Trägheitskräfte. Die Partikel kollidieren beim Umströmen mit den Wassertropfen (siehe Abbildung 2.19). Neben dem hier dargestellten Venturiwäscher ergibt sich, durch die verschiedenen möglichen Flüssigkeitsformen, eine Vielzahl von Bauformen für Waschentstauber. Die Abtrennung von Partikelgrößen bis $1 \mu\text{m}$ ist möglich. [vgl. 4]

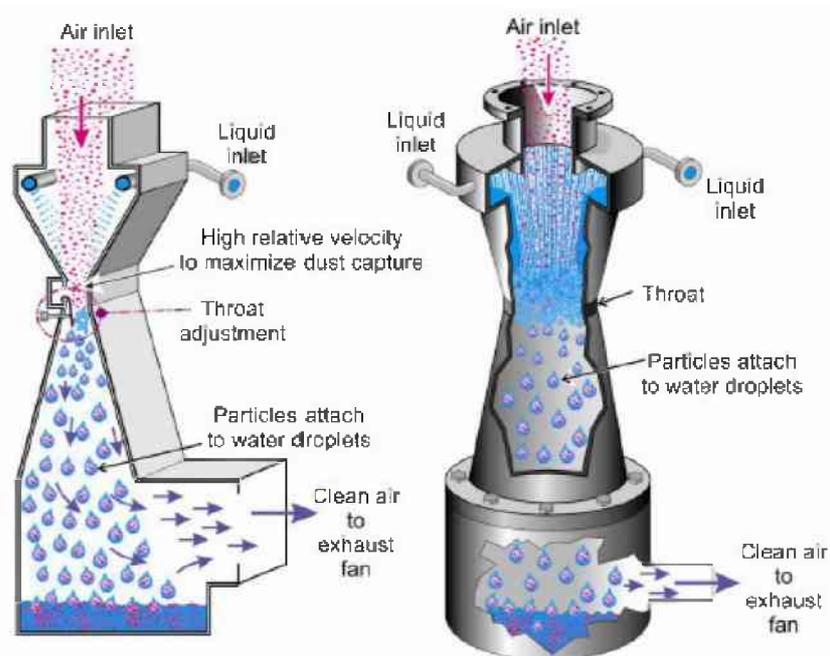


Abb. 2.17 Schema eines Venturiwäschers [11]

2.4.2.1.6 Filtrationsentstauber

In Filtrationsentstaubern durchströmt das Gemisch einen porösen Festkörper, der den Staub aus der Luft entfernt. Diese Filterkörper entstauben auf zwei Arten. Zum einen werden

Partikel durch die Gitterwirkung im Filter festgehalten, zum anderen werden sie durch Trägheits-, elektrische oder Diffusionskräfte zur Oberfläche verschoben, wo sie anhaften. Die Gitterwirkung zielt auf eher größere Partikel, während kleine Partikel eher verschoben werden. Eine Abscheidung ist bis zu einer Partikelgröße von $0,01 \mu\text{m}$ möglich. [vgl. 4]

2.4.2.2 Staubbekämpfung durch Ultraschall

Hier wird versucht, feine Staubpartikel durch Ultraschall zum Agglomerieren zu bringen. Die Schallwellen werden in die staubbeladene Luft eingebracht und lassen Vibrationen entstehen, die mehr Kollisionen der Staubpartikel verursachen, wodurch die Agglomeration erhöht wird.

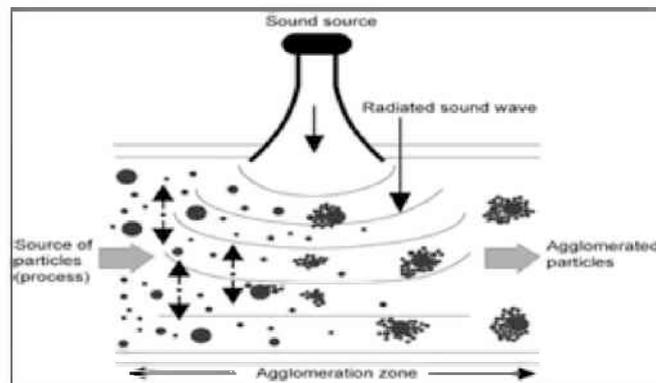


Abb. 2.18 Prinzip Ultraschall- Staubagglomeration [13]

2.4.2.3 Wassersprühsysteme

Das Besprühen mit Wasser ist eine der ältesten und am meisten verwendete Methode der Staubbekämpfung. Durch das Befeuchten der Partikel gewinnen sie an Masse, wodurch ihre Fähigkeit zu schweben verringert wird. Die Effektivität solcher Systeme ist abhängig von der Art und Platzierung der Düsen, der Menge an Flüssigkeit, der Größe der Tropfen und dem Besprühungsschema. Es gibt zwei Methoden zur Staubbekämpfung durch Besprühen:

- Verhinderung des Abhebens von Staub durch direktes Besprühen des Materials,
- Bekämpfung von schwebendem Staub durch Besprühen.

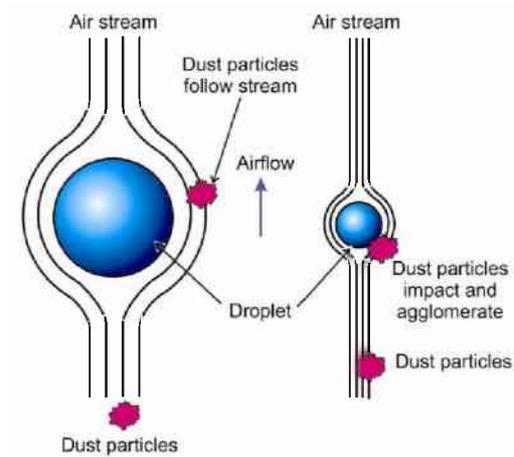


Abb. 2.19 Einfluss der Tropfengröße [11]

Die Verwendung der richtigen Tropfengröße ist ausschlaggebend für die Effektivität. Sind die Tropfen wesentlich größer als die Staubpartikel, folgen die Partikel einfach der Luftströmung um die Tropfen herum. Wenn die Tropfen und die Partikel ungefähr dieselbe Größe haben, berühren sie sich, wenn die Partikel den Stromlinien folgen. Bei der Besprühung des Materials zur Verhinderung der Staubentstehung sollten größere Tropfen verwendet werden. [vgl. 11]

Ein großes Problem der Wasserbesprühung ist der Feuchtigkeitseintrag in das Material. Um diesen zu verringern, wurden sogenannte *Dry-Fog*-Systeme entwickelt. Hierbei werden durch spezielle Düsen und Druckluft feine, 1 bis 10 μm große, Wassertropfen erzeugt, die sich an den Staub anlegen. Der Feuchtigkeitseintrag liegt hierbei nur um rund 0,1%.

2.4.2.4 Einhausungen

Einhausungen verhindern nicht die Entstehung von Staub, sondern vermeiden seine Ausbreitung. Einhausungen können aus festen Wänden, flexiblen Plastikstreifen, Vorhängen etc. bestehen.



Abb. 2.20 Einhausung aus Plastikstreifen [11]

2.4.2.5 Pendelklappensystem, Staubsperren

Für die Befüllung von Bunkern können Pendelklappen eingesetzt werden. Stabile Stahlplatten sind im Einfülltrichter schräg angebracht, zwischen jeder Platte hängt vertikal eine Pendelklappe. Der Druck des Verladeguts schiebt die Klappe zur Seite, die Geschwindigkeit der einströmenden Luft verhindert das Entweichen von Staub. Der Staub im Bunker wird durch eine Absaugung erfasst und über Filter abgeschieden.

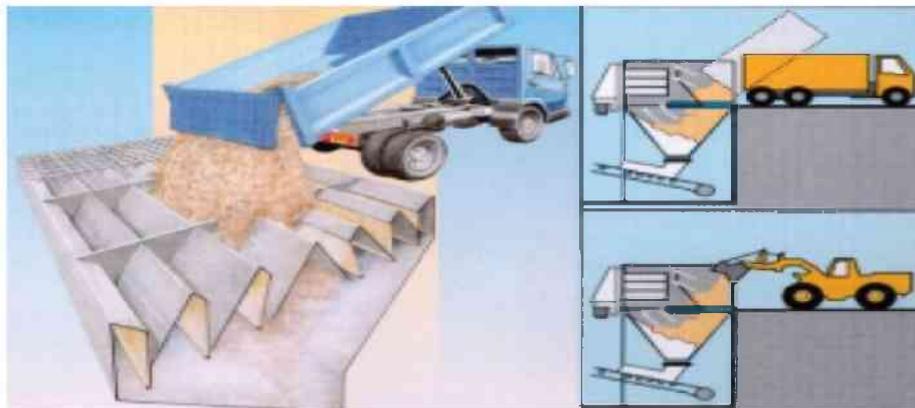


Abb. 2.21 Funktion Pendelklappensystem [14]

Staubsperren arbeiten ähnlich wie Pendelklappen. Sie verhindern, dass die verdrängte Luft nach oben entweichen kann. Meist sind solche Einrichtungen mit Filteranlagen verbunden.

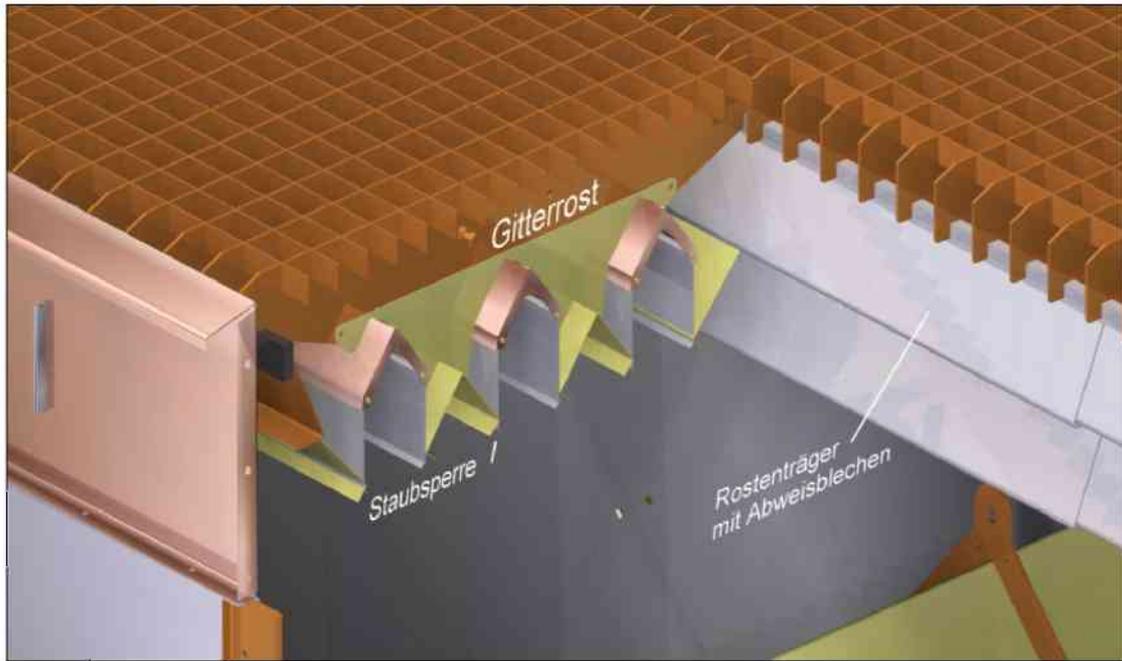


Abb. 2.22 Staubsperr [15]

2.4.2.6 Staubschutzwände

Staubschutzwände wie in Abb. 2.23 fangen den an den Bunkerwänden aufsteigenden Staubstrom ab und leiten ihn zurück in den Bunker, wodurch die Geschwindigkeit verringert und die Ausbreitung vermindert wird.

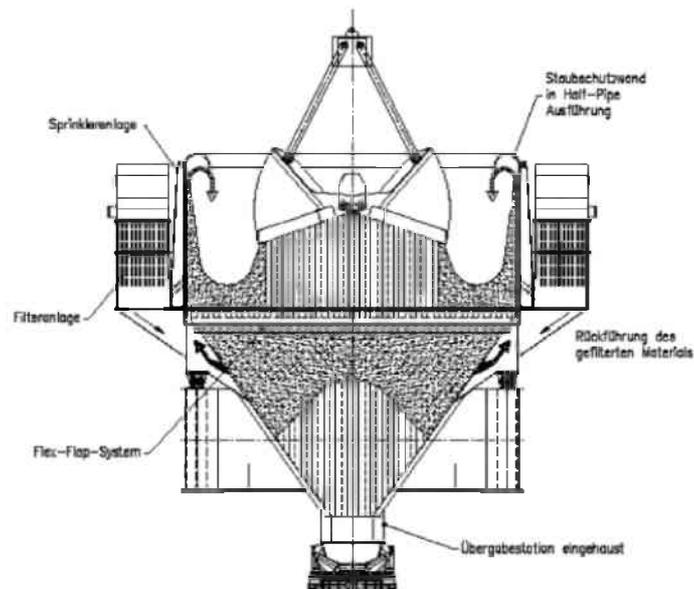


Abb. 2.23 Staubschutzwand in Halfpipeform [14]

2.4.2.7 Staubunterdrückende Trichter (Dust Suppression Hopper)

Staubunterdrückende Trichter sorgen dafür, dass das Material mehr wie eine feste Säule fließt, wodurch die Oberfläche verringert und die Aufnahme in die Umgebungsluft reduziert wird. Der Trichter hat am Boden einen zentralen Zapfen, der verhindert, dass Material vor dem Erreichen einer vorher definierten Menge austritt. [vgl. 11]



Abb. 2.24 Staubunterdrückender Trichter [11]

2.4.2.8 Kaskadenförmiges Laderohr

Diese Laderohre bestehen aus einer Reihe von geneigten Kegeln, die das freie Fallen des Materials verhindern. Die Geschwindigkeit des Materials wird verringert, indem das Material sanft von einem Kegel zum nächsten übergeht. [vgl. 11]

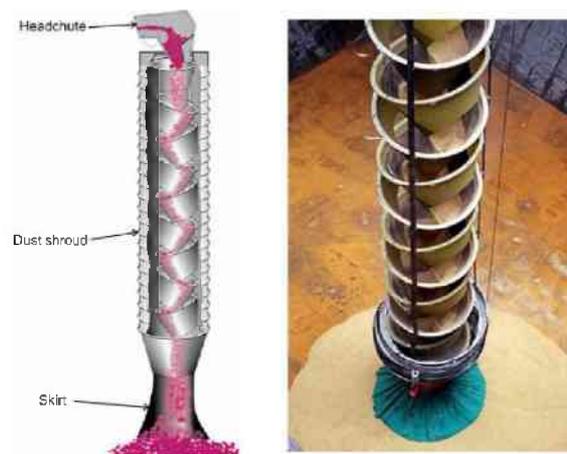


Abb. 2.25 Cascade loading spout [11]

2.4.2.8 Staubunterdrückung durch Schaum

Es gibt viele verschiedene Hersteller von staubunterdrückenden Schäumen. Im Allgemeinen werden alle aus Chemikalien, Wasser und Luft zusammengemischt. Die Vorteile dieser Schäume sind, dass der Feuchtigkeitseintrag in das Material wesentlich geringer ist als bei reinem Besprühen mit Wasser. Der Schaum wird vor Übergabestellen, Brechern oder Anderem auf das Material aufgesprüht. Die entstehenden Staubpartikel brechen die Schaumblasen auf, wodurch die enthaltene Flüssigkeit austritt und den Staub etwas befeuchtet.



Abb. 2.26 Funktionsweise von staubunterdrückendem Schaum [16]

3. Genauere Betrachtung und Bewertung der Methoden

In diesem Kapitel soll eine Bewertung der in Kapitel 2 vorgestellten Staubminderungsmaßnahmen der Anwendbarkeit auf die Problemstellung erfolgen. Alle Maßnahmen müssen auf einen 5,2 Meter langen, 3 Meter breiten Bunker, in den stirnseitig oder von der Seite Material aus einem Kipper eingeschüttet wird, anwendbar sein. Der Bunker ist mit Querstreben versehen, die dafür sorgen, dass er überfahrbar ist. Die Umbauten dürfen das Fassungsvermögen nicht wesentlich beeinträchtigen, der Bunker sollte vorzugsweise auch weiterhin überfahrbar bleiben.

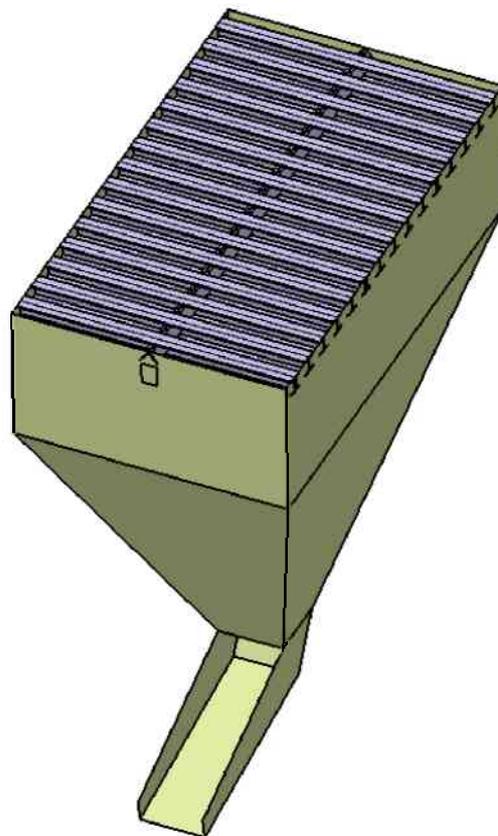


Abb. 3.1 Bunker

Das Material darf nicht zu viel Feuchtigkeit aufnehmen und braucht, um vollständig von etwaigen Anbauten abrutschen zu können, eine gewisse Schräge, die abhängig von deren Oberflächenbeschaffenheit ist.

3.1 Entstauber

3.1.1 Schwerkraftentstauber

Schwerkraftentstauber bieten eine einfache und kostengünstige Möglichkeit zur Entstaubung. Ihre Vorteile sind [vgl. 4]:

- geringe Bau- bzw. Anschaffungskosten,
- einfache Konstruktion,
- keine Temperaturbegrenzung,
- keine Verschleißprobleme bzw. geringer Wartungsaufwand.

Wegen ihrer großen Baugröße sind sie jedoch für die Anwendung in diesem Fall eher ungeeignet. Außerdem ist die Abscheidung in Schwerkraftentstaubung auf Teilchen $> 50 \mu\text{m}$ begrenzt, wodurch sie eher als Vorabscheider eingesetzt werden.

3.1.2 Fliehkraftentstauber

Auch Fliehkraftentstauber sind eine einfache Alternative für die Entstaubung. Sie bieten eine wesentlich bessere Entstaubung als Schwerkraftentstauber bei ebenfalls niedrigen Investitionskosten. Allerdings sind die Betriebskosten relativ hoch. Sie sind gastemperatur- und gasdruckunempfindlich. [vgl. 4, 17]

Der Entstaubungsvorgang ist abhängig von der Teilchengröße und der Gasgeschwindigkeit. Mit steigender Gasgeschwindigkeit und Teilchengröße steigt die Abscheidung. Auch hohe Luftfeuchtigkeit und elektrische Aufladung steigern die Abscheidung durch Agglomeration. Um hohe Gasgeschwindigkeiten zu erreichen, sind zusätzliche Gebläse oder Absaugungen nötig. Dies bedeutet zusätzliche Investitionen und Platzbedarf.

3.1.3 Elektroentstauber

Für den Betrieb eines Elektroentstaubers ist hochgespannter Gleichstrom notwendig. Dieser wird durch Transformatoren und Gleichrichter erzeugt. Die Entstaubungsleistung eines Elektroentstaubers ist abhängig vom spezifischen Widerstand des Staubes. Am besten funktioniert ein solcher Entstauber bei Werten zwischen 10^4 und $2 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$. Der spezifische Staubwiderstand ist auch abhängig von der Temperatur, was bei dieser Anwendung allerdings keine Rolle spielt, da keine nennenswerten Temperaturänderungen auftreten. Des Weiteren ist es nötig, die Niederschlags Elektrode regelmäßig durch Abklopfen zu reinigen. Es ist auch eine Reinigung durch eine Flüssigkeitsberieselung möglich. Da hier das Material allerdings nicht zu feucht werden darf, ist dies keine Option. Der Arbeitsbereich

von Elektroentstaubern reicht im Idealfall bis zu $0,01\ \mu\text{m}$ Partikelgröße. Elektroentstauber sind mit hohen Anschaffungskosten verbunden, die Betriebskosten sind aber relativ gering. Es ist zudem darauf zu achten, dass durch den Strom gegebene Gefahrenbereiche gut abgesichert werden. Im Allgemeinen sind Elektroentstauber eine gute Möglichkeit der Entstaubung, die auch im gegebenen Bunker einsetzbar wäre. [vgl. 4]

3.1.4 Waschentstauber

Entscheidend für die Entstaubung mit Waschentstaubern sind die Trägheitskräfte. Wichtig dafür sind eine hohen Anström- bzw. Relativgeschwindigkeit, Flüssigkeitsoberflächen mit einer starken Krümmung bzw. einem kleinen Krümmungsradius und häufige Umlenkvorgänge. Da die Trägheitswirkung mit sinkender Teilchengröße abnimmt, sind der Entstaubung Grenzen gesetzt. Die Untergrenze von Waschentstaubern liegt in etwa bei $1\ \mu\text{m}$. Die hohen Anschaffungskosten und der Feuchtigkeitseintrag sprechen gegen Waschentstauber. [vgl. 4]

3.1.5 Filtrationsentstauber

Die Entstaubung in Filtern wird durch Fliehkraft und Diffusion angetrieben. Die Filtration verbessert sich mit abnehmender Porosität und Faserstärke und mit zunehmender Schichtdicke. Für die Diffusionswirkung ist eine kleinere, für Trägheitsabscheidung eine größere Gasgeschwindigkeit von Vorteil. Für Partikel $< 1\ \mu\text{m}$ ist die Diffusion vorrangig, daher wird bei feinen Stäuben eine geringe Geschwindigkeit gewählt (nicht höher als 10cm/s). Der Filterstoff wird zunehmend verunreinigt, was bedeutet, dass der Filter in gewissen Abständen gereinigt oder ausgetauscht werden muss. Die Anschaffungs- und Betriebskosten von Filtrationsentstaubern sind ebenfalls relativ hoch. Durch die hohen Kosten und die Notwendigkeit einer Absaugung zum Betrieb solcher Entstauber wird von deren Verwendung abgesehen. Der Einsatz von Filterstoffen zur Unterstützung der Abscheidung anderer Konstruktionen verursacht geringere Kosten und wird in der Ideenfindung mit berücksichtigt. [vgl. 4]

3. Genauere Betrachtung und Bewertung der Methoden

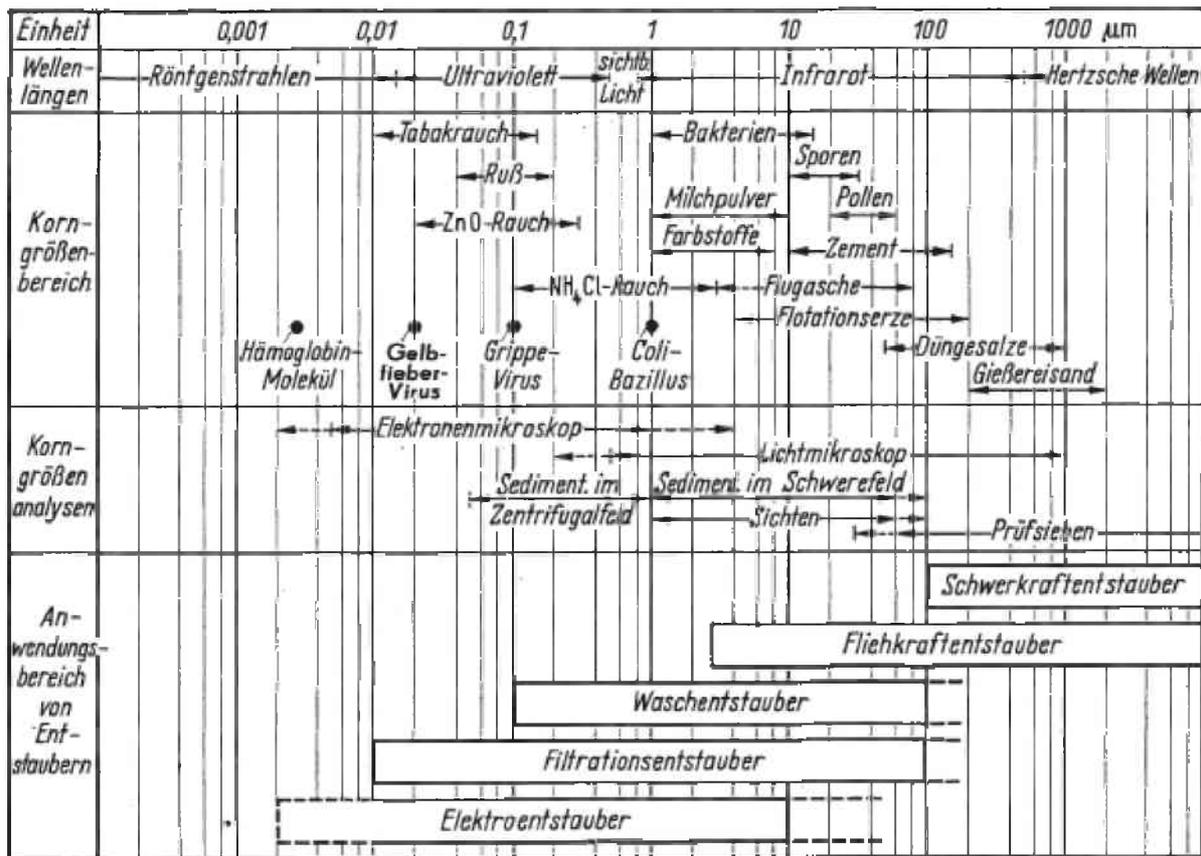


Abb. 3.2 Arbeitsbereiche verschiedener Entstauber [4]

Abscheider	abscheidende Kräfte	Arbeitsbereich (Richtwerte)	Anschaffungskosten	Betriebskosten
Schwerkraftentstauber	Schwerkraft	$d > 100 \mu\text{m}$	mittel	niedrig
Fliehkraftentstauber	Fliehkraft	$d > 5 \mu\text{m}$	niedrig	mittel-hoch
Waschentstauber	Trägheitskräfte Diffusion	$d > 0,1$ bis $5 \mu\text{m}$	hoch	hoch
Filtrationsentstauber	elektrische Kräfte Gitterwirkung	$d > 0,01$ bis $1 \mu\text{m}$	hoch	hoch
Elektroentstauber	Trägheits- u. elektrische Kräfte Diffusion	$d > 0,01$ bis $0,1 \mu\text{m}$	sehr hoch	niedrig

Abb. 3.3 Arbeitsbereiche und Kosten verschiedener Entstauber [4]

3.2 Ultraschallentstaubung

Die Staubabscheidung durch Ultraschall befindet sich erst in der Erprobung, zeigt aber bei kleinen Partikeln gute Ergebnisse. Im Bereich von 160 dB werden die besten Ergebnisse erreicht. Bei niedrigeren Werten verschlechtert sich die Abscheidungsleistung erheblich,

höhere Werte ändern das Ergebnis nicht mehr maßgeblich. Das akustische Level ist direkt mit dem Stromverbrauch verbunden. Auch die Einwirkzeit spielt eine große Rolle. Eine längere Wirkzeit bedeutet mehr Agglomeration und Abscheidung. Eine höhere Staubkonzentration begünstigt die Agglomeration ebenfalls, da die Wahrscheinlichkeit für Zusammenstöße steigt. Ein solches System ist, durch die nötige Einwirkzeit und die schwere Anpassbarkeit an den Bunker, eher nicht geeignet. [vgl. 13]

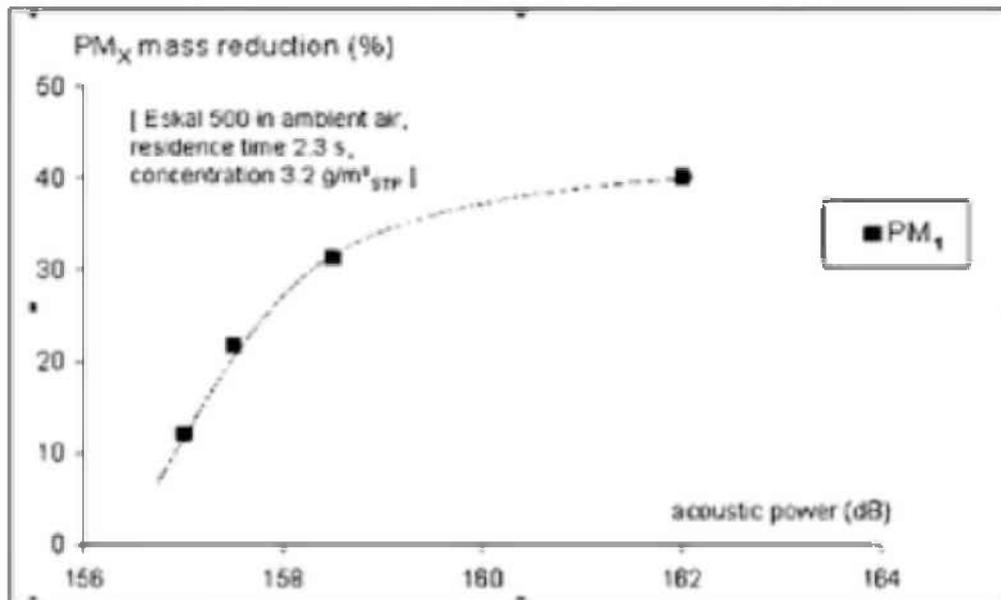


Abb. 3.4 Effect of ultrasounds power source on agglomeration [13]

3.3 Sprühwasseranlagen

Der Einsatz von Sprühwasseranlagen ist abhängig vom Material und der Feuchtigkeit, die es aufnehmen darf. Eine gut durchdachte Anlage mit fein versprühten Wassertropfen steigert die Feuchtigkeit nur um ca. 1%. Große Areale, die mit großen Tropfen besprüht werden, können eine Feuchtigkeitserhöhung von 1,5% und mehr verursachen.

Da das Material so wenig Feuchtigkeit wie möglich aufnehmen soll, ist das Besprühen mit Wasser problematisch. Präventives Anfeuchten des Material zur Vermeidung von Staubentstehung ist keine Option und auch das Besprühen von bereits entstandenem Staub ist nur bedingt möglich, um das Material nicht zu feucht werden zu lassen.

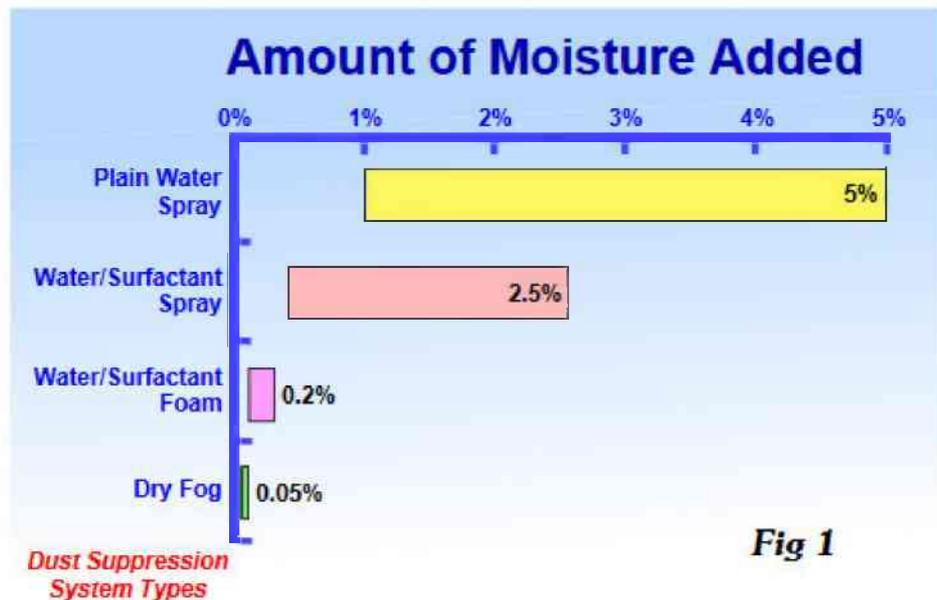


Abb. 3.5 Typical amounts of added moisture [18]

Eine Möglichkeit wäre der Einsatz von Trockennebel-Systemen (Dry Fog), wobei mit Hilfe von Druckluft Wassertropfen in der Größe von 1-10 μm hergestellt werden. Komprimierte Luft strömt mit hoher Geschwindigkeit durch die innere Bohrung der Düse und expandiert in den Resonatorhohlraum. Das Ergebnis ist ein Schallenergiefeld zwischen Düsenkörper und Resonator. Eine Flüssigkeit, die in dieses Schallfeld eindringt, wird in feinste Tröpfchen zerstäubt. Luft, die am Resonator vorbeizieht, trägt die Tröpfchen in einer Wolkenform davon.

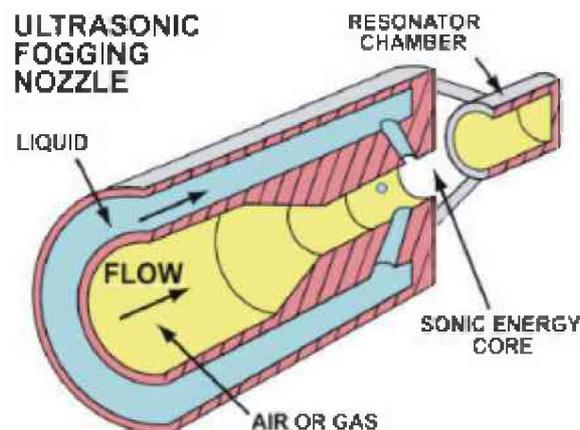


Abb. 3.6 Aufbau Dry Fog Düse [18]

Ein solches Dry-Fog-System wäre als zusätzliche staubmindernde Maßnahme in Erwägung zu ziehen. [vgl. 18]

3.4 Staubunterdrückung durch Schaum

Durch Mischen von Wasser mit Chemikalien entsteht ein Schaum, der auf das Produkt aufgesprüht wird, bevor es zur Stelle der Stauberzeugung kommt. Es wird aus wenigen Litern Wasser eine große Menge Schaum hergestellt, trotzdem kommt es zu einem Feuchtigkeitseintrag in das Produkt. Diese Methode ist nur einsetzbar, wenn das Material den Feuchtigkeitsanstieg und die eingebrachten Chemikalien verträgt. Ein weiterer wichtiger Punkt ist das Einbringen des Schaums in das Produkt. Während das Aufsprühen auf einem Bandförderer z. B. kein Problem darstellt, ist dies beim Abkippen eines LKWs in einen Bunker anders.

3.5 Vermeidung der Staubentstehung

Die effektivsten Staubbekämpfungsmaßnahmen setzen bei der Staubentstehung an. Die Verminderung des Staubes durch die Reduzierung der Fallhöhe oder der eingeschlossenen Luft durch verschiedene Systeme oder Konstruktionen hat also große Bedeutung. Die Reduzierung der Fallhöhe kann durch einfache Konstruktionen wie Rampen oder Kaskaden herbeigeführt werden.

3.5.1 Staubunterdrückende Trichter (Dust Suppression Hopper, DSH)

Eine der Möglichkeiten, die Staubentstehung zu unterbinden, stellen staubunterdrückende Trichter dar. Der *Dust Suppression Hopper* (DSH) wird direkt unter dem Zuführungspunkt angebracht. Der Materialfluss in den Trichter muss um die vertikale Achse zentriert und die Eintrittsgeschwindigkeit darf nicht zu hoch sein. Ein Problem solcher Systeme ist die Staubentstehung, zu der es bereits beim Eintritt in den DSH kommen kann. [vgl. 11]

Da die Materialzufuhr in den Trichter aus einem Kipplaster schwer durchführbar ist, ist die Verwendung eines solchen Systems kaum möglich.

3.5.2 Kaskadenförmiges Ausflussrohr (Cascading loading spout)

Solch ein Ausflussrohr (engl.: Cascading loading spout) verhindert, dass das Material in den freien Fall übergeht. Die Geschwindigkeit und eingeschlossene Luft werden verringert und somit auch die Staubentstehung. Auch wenn ein solches Rohr in diesem Fall nicht anwendbar ist, so ist das System in anderer Weise für die Bunkerentstaubung verwendbar. [vgl. 11]

3.6 Vermeidung der Staubausbreitung

Eine weitere einfache und effektive Maßnahme zur Staubbekämpfung bieten Einrichtungen, die die Ausbreitung von Staub verhindern oder verringern. Solche Einrichtungen umfassen Einhausungen, Staubsperren, Staubschutzwände, Leitbleche oder Klappensysteme. Auch die zuvor beschriebenen Sprühwassersysteme passen zum Teil in diese Kategorie. Vor allem Maßnahmen wie Klappensysteme und Staubsperren werden oft in Bunkern verwendet. Sie sind einfach zu installieren, kostengünstig und verhindern das Austreten der staubbeladenen Luft aus dem Bunker mehr oder weniger effektiv. Durch diese Vorteile werden solche Systeme eine große Rolle in Bezug auf weitere Überlegungen und Ideen zur Staubminderung im gegebenen Bunker spielen.

3.7 Bewertung der Entstaubungsmöglichkeiten

In diesem Kapitel wird eine Bewertung der vorgestellten Entstaubungsmaßnahmen anhand technischer und wirtschaftlicher Kriterien durchgeführt.

3.7.1 Technische Kriterien

Die betrachteten technischen Kriterien sind:

- Komplexität,
- Feuchtigkeitseintrag,
- Wartung,
- geschätzte Wirksamkeit,
- Materialverlust,
- Anpassbarkeit an den Bunker,

Diese Kriterien werden nachfolgend anhand eines paarweisen Vergleichs nach VDI-2225 gewichtet (siehe Tabelle 3.1) [vgl. 23].

Im Vergleich zu	Komplexität	Feuchtigkeitseintrag	Wartung	Geschätzte Wirksamkeit	Materialverlust	Anpassbarkeit an Bunker
Komplexität	1	1	1	1	0	2
Feuchtigkeitseintrag	1	1	1	1	1	2
Wartung	1	1	1	2	1	2
Geschätzte Wirksamkeit	1	1	0	1	0	1
Materialverlust	2	1	1	2	1	2
Anpassbarkeit an Bunker	0	0	0	1	0	1
Summe	6	5	4	8	3	10
Summe normiert (g_i)	0,60	0,50	0,40	0,80	0,30	1

Tab. 3.1 Vergleich der technischen Bewertungskriterien der Entstaubungsmöglichkeiten

Legende:

- 0 unwichtiger
- 1 gleich wichtig
- 2 wichtiger

3.7.2 Wirtschaftliche Kriterien

Zur wirtschaftlichen Bewertung werden

- Herstellkosten und
- Betriebskosten

herangezogen.

Auch diese Kriterien werden nach VDI-2225 anhand eines paarweisen Vergleichs gewichtet. Die Herstell- und Betriebskosten wurden als gleich wichtig eingestuft. [vgl. 23]

Im Vergleich zu	Herstellkosten	Betriebskosten
Herstellkosten	1	1
Betriebskosten	1	1
Summe	2	2
Summe normiert (g_i)	1	1

Tab. 3.2 Paarweiser Vergleich der wirtschaftlichen Kriterien der Entstaubungsmöglichkeiten

3.7.3 Technische Bewertung

Zu bewerten sind:

- Schwerkraftentstauber
- Fliehkraftentstauber
- Elektroentstauber
- Waschentstauber
- Filtrationsentstauber
- Ultraschallentstauber
- Sprühwasseranlagen
- Schaum
- Konstruktive Methoden

Unter konstruktiven Methoden sind alle Ein- und Umbauten am Bunker wie zum Beispiel Leitbleche, Rampen, Trichter etc. zusammengefasst. Obwohl sich solche Konstruktionen

stark unterscheiden können, haben sie doch viel Grundlegendes gemeinsam, weshalb sie hier gemeinsam bewertet werden.

Eine konkrete Bewertung erfolgt durch die oben beschriebenen Bewertungskriterien und den im Nachfolgenden dargestellten Bewertungsfaktoren über die folgenden Formeln.

Bestimmung der ungewichteten Wertigkeit [vgl. 23]:

$$W_j = \frac{\sum_i P_{ij}}{n_k * P_{max}}$$

Bestimmung der gewichteten Wertigkeit [vgl. 23]:

$$gW_j = \frac{\sum_i g_i * P_{ij}}{P_{max} * \sum_i g_i}$$

3.7.4 Wirtschaftliche Bewertung

Die wirtschaftliche Bewertung erfolgt analog zur technischen.

gi	Kriterium	Schwerkraft-entstauber		Fliehkraft-entstauber		Elektro-entstauber		Wasch-entstauber		Filtrations-entstauber		Ultraschall-entstauber		Sprühwasser-anlagen		Schaum		Konstruktive Methoden	
		Pi1	gi*Pi1	Pi2	gi*Pi2	Pi3	gi*Pi3	Pi4	gi*Pi4	Pi5	gi*Pi5	Pi6	gi*Pi6	Pi7	gi*Pi7	Pi8	gi*Pi8	Pi9	gi*Pi9
0,50	Komplexität	3	1,5	3	1,5	1	0,5	1	0,5	2	1	1	0,5	2	1	2	1	3	1,5
0,5	Feuchtigkeits-eintrag	4	2	4	2	4	2	0	0	4	2	4	2	0	0	1	0,5	4	2
0,4	Wartung	4	1,6	4	1,6	2	0,8	2	0,8	1	0,4	2	0,8	2	0,8	2	0,8	4	1,6
0,8	Geschätzte Wirksamkeit	1	0,8	1	0,8	3	2,4	3	2,4	3	2,4	2	1,6	2	1,6	1	0,8	2	1,6
0,3	Material-verlust	2	0,6	1	0,3	3	0,9	1	0,3	1	0,3	3	0,9	1	0,3	4	1,2	1	0,3
1	Anpassbarkeit an Bunker	0	0	2	2	3	3	0	0	2	2	0	0	4	4	1	1	3	3
3,50	Summe	14	6,5	15	8,2	16	9,6	7	4	13	8,1	12	5,8	11	7,7	11	5,3	17	10
	Wertigkeit	0,58	0,46	0,63	0,59	0,67	0,69	0,29	0,29	0,54	0,58	0,50	0,41	0,46	0,55	0,46	0,38	0,71	0,71
	Rangfolge		5		3		2		9		4		7		5		8		1

Tab. 3.3 Technische Bewertung der Entstaubungsmaßnahmen

Legende:

gi Gewichtungsfaktor, laut Kriteriengewichtung (0 . . . 1)

Pij Bewertungsfaktor (0 . . . 4), wobei:
 0.....unbefriedigend 1.....gerade noch tragbar
 2.....ausreichend 3.....gut 4.....sehr gut

3. Genauere Betrachtung und Bewertung der Methoden

gi	Kriterium	Schwerkraft-entstauber		Fliehkraft-entstauber		Elektro-entstauber		Wasch-entstauber		Filtrations-entstauber		Ultraschall-entstauber		Sprühwasser-anlagen		Schaum		Konstruktive Methoden	
		Pi1	gi*Pi1	Pi2	gi*Pi2	Pi3	gi*Pi3	Pi4	gi*Pi4	Pi5	gi*Pi5	Pi6	gi*Pi6	Pi7	gi*Pi7	Pi8	gi*Pi8	Pi9	gi*Pi9
1	Herstellkosten	2	2	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	2	3	3	3	3	3
1	Betriebskosten	4	4	2	2	4	4	2	2	3	2	2	3	3	2	2	4	4	4
2	Summe	6	6	5	5	6	6	4	4	5	3	3	5	5	5	5	7	7	7
	wertigkeit	0,75	0,75	0,625	0,625	0,75	0,75	0,5	0,5	0,625	0,375	0,375	0,625	0,625	0,625	0,625	0,875	0,875	0,875
	Rangfolge		2		3		2		4			5			3		3		1

Tab. 3.4 Wirtschaftliche Bewertung der Entstaubungsmaßnahmen

Legende:

gi Gewichtungsfaktor, laut Kriteriengewichtung (0...1)

Pij Bewertungsfaktor (0...4), wobei:

0.....unbefriedigend 1.....gerade noch tragbar
 2.....ausreichend 3.....gut 4.....sehr gut

3.7.5 Stärkediagramm

Mit den ermittelten technischen und wirtschaftlichen Wertigkeiten lässt sich ein Stärkediagramm erstellen.

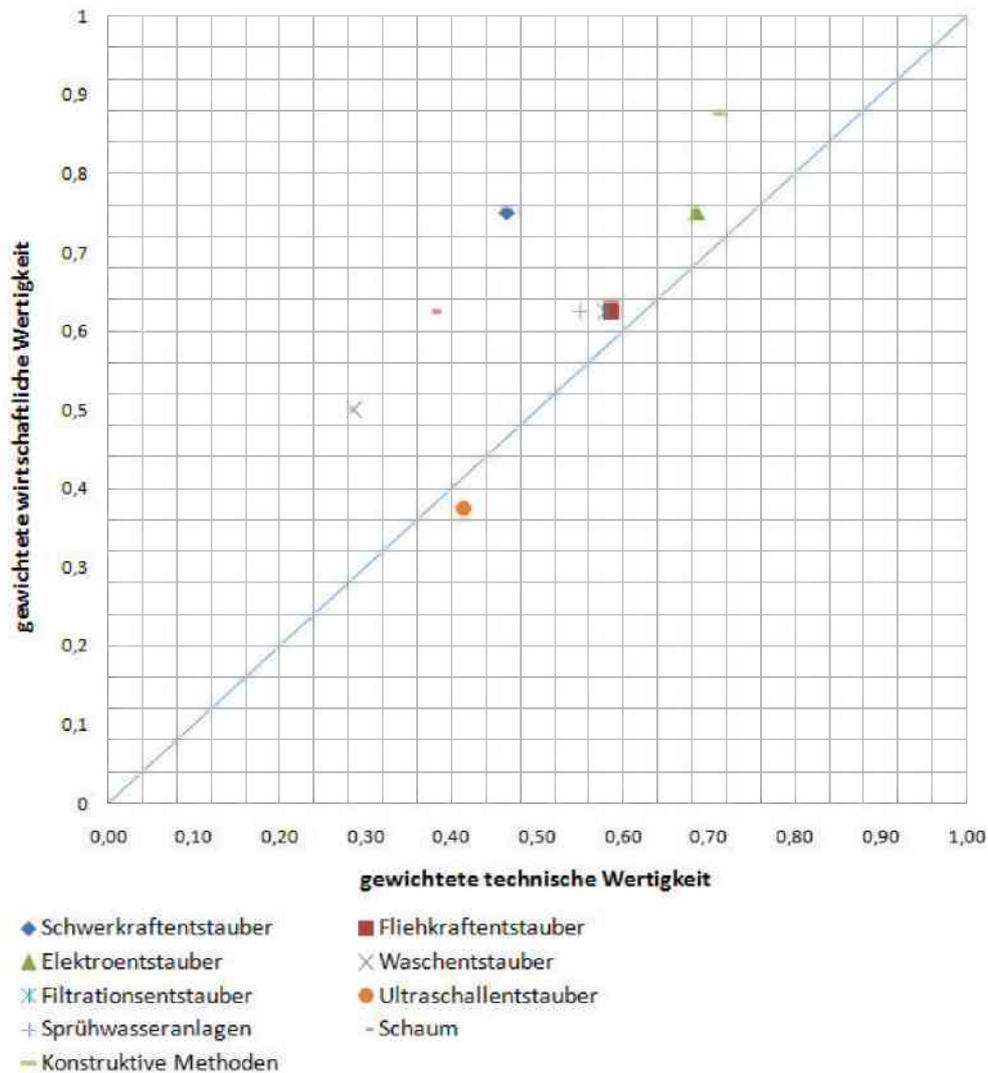


Abb. 3.7 Stärkediagramm der Entstaubungsmöglichkeiten

Aus dieser Bewertung ist ersichtlich, dass die technisch und wirtschaftlich am besten geeigneten Methoden konstruktive Einbauten und Elektroentstauber sind, gefolgt von Fliehkraft- und Filtrationsentstaubern sowie Sprühwasseranlagen. Bei der folgenden Erstellung von Konzepten und Ideen wird also hauptsächlich mit diesen Methoden gearbeitet.

4. Übersicht über mögliche Ausführungen und Ideen

In diesem Kapitel werden alle Ideen und Ausführungen, die in Betracht gezogen wurden, vorgestellt und auf ihre Funktion, Wirkung und Umsetzbarkeit hin bewertet. Einige dieser Ausführungen werden später in einen Versuchsbunker eingebaut und getestet. Die Vorschläge reichen von einfachen, leicht durchführbaren und kostengünstigen Um- und Anbauten bis hin zu schwierigeren und aufwendigeren Ideen, die höhere Investitionen bedeuten würden.

Von der Firma Voest wurde bereits eine Änderung vorgenommen, die das Aufsteigen des Staubes behindern sollte. Vorder- und rückseitig wurden dreieckige Sperren angebracht, siehe Abb. 4.1. Da diese Anbauten unten geschlossen sind, strömt das aufsteigende Luft-Staubgemisch an den Einbauten entlang und tritt ungehindert aus. Die Umbauten sind somit wirkungslos.

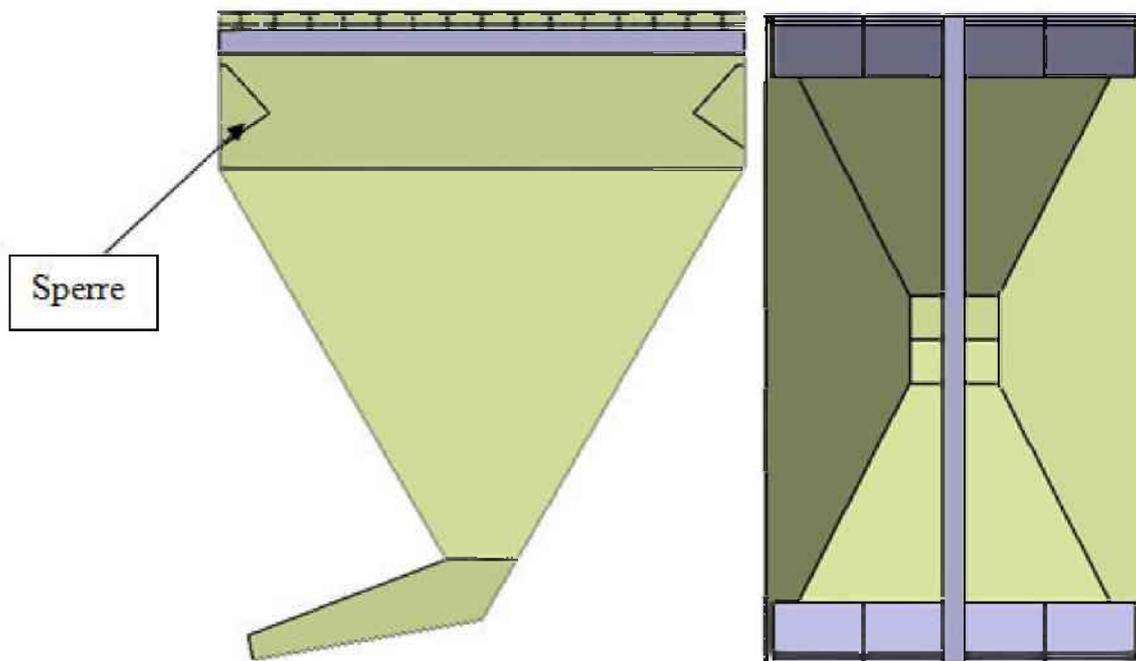


Abb. 4.1 Bunker mit Sperre

4.1 Leitbleche

Die ersten und einfachsten Ideen drehen sich um das simple blockieren der Strömung des aufsteigenden Staub-Luftgemisches, um den Großteil des Staubes im Bunker zu halten.

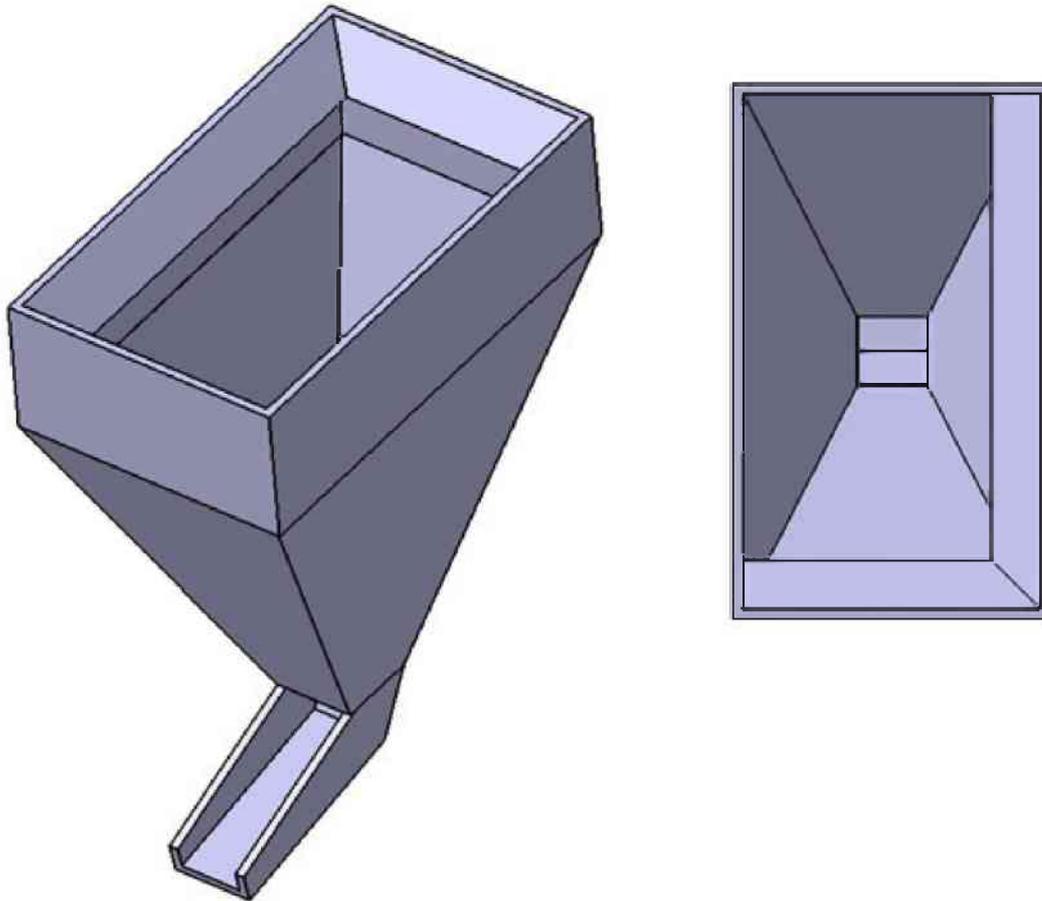


Abb. 4.2 Bunker mit Leitblechen

Eine der ersten Ideen war es, Leitbleche entlang des Bunkerrandes zu montieren, was der im vorigen Kapitel beschriebenen Idee der Firma Voest ähnelt. Allerdings sind diese Sperren unten offen, wodurch der Staub, der hauptsächlich an den Bunkerwänden gegenüber der Einkippseiten aufsteigt, wieder nach unten umgeleitet wird. Dem aufsteigenden Staub-Luftgemisch wird ein Großteil seiner Geschwindigkeit genommen, wodurch auch das Aufsteigen aus der Mitte eingeschränkt wird. Das Fassungsvermögen wird kaum beeinträchtigt und der Bunker bleibt weiter überfahrbar.

4.2 Trichter

Eine weitere einfache Möglichkeit, den Staub zu verringern, bietet der in Abb. 4.3 dargestellte Trichter. Durch die Rampen wird auf beiden Kippseiten die Fallhöhe reduziert, außerdem wird durch den Trichter der Schüttgutstrom etwas komprimiert und somit weniger Luft eingeblasen. Das aufsteigende Staub-Luftgemisch wird unter den Rampen nach unten zurückgeleitet, was den gleichen Effekt wie bei den zuvor genannten Leitblechen erzielt.

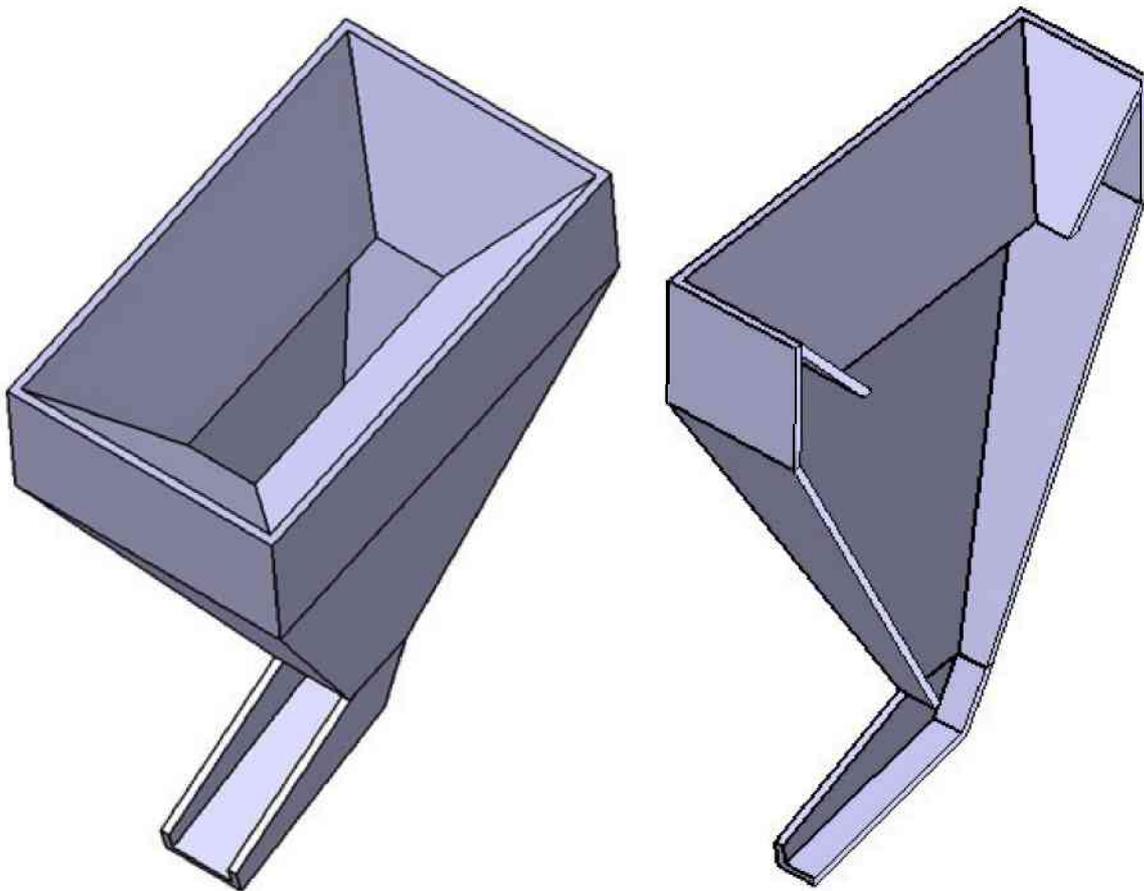


Abb. 4.3 Trichterförmige Rampen

Um allerdings eine merkliche Reduzierung der Fallhöhe zu erreichen, müssen die Rampen weit in den Bunker reichen. Das Fassungsvermögen wird dabei beträchtlich reduziert.

Eine Möglichkeit, die Minderung der Füllmenge zu verhindern, wäre, die Vorrichtung als Aufsatz auf den Bunker aufzusetzen, wie es in Abb. 4.4 dargestellt ist. Dadurch wäre der Bunker allerdings nicht länger überfahrbar. In Abb. 4.4 ist eine etwas andere Version des vorherigen Trichters dargestellt, die Funktion ist jedoch dieselbe. Die Rampen sollen die

4. Übersicht über mögliche Ausführungen und Ideen

Höhe verringern und den Schüttgutstrahl etwas komprimieren, auf zwei Seiten wurden sie durch einfache Leitbleche ersetzt, die den aufsteigenden Staub blockieren sollen.

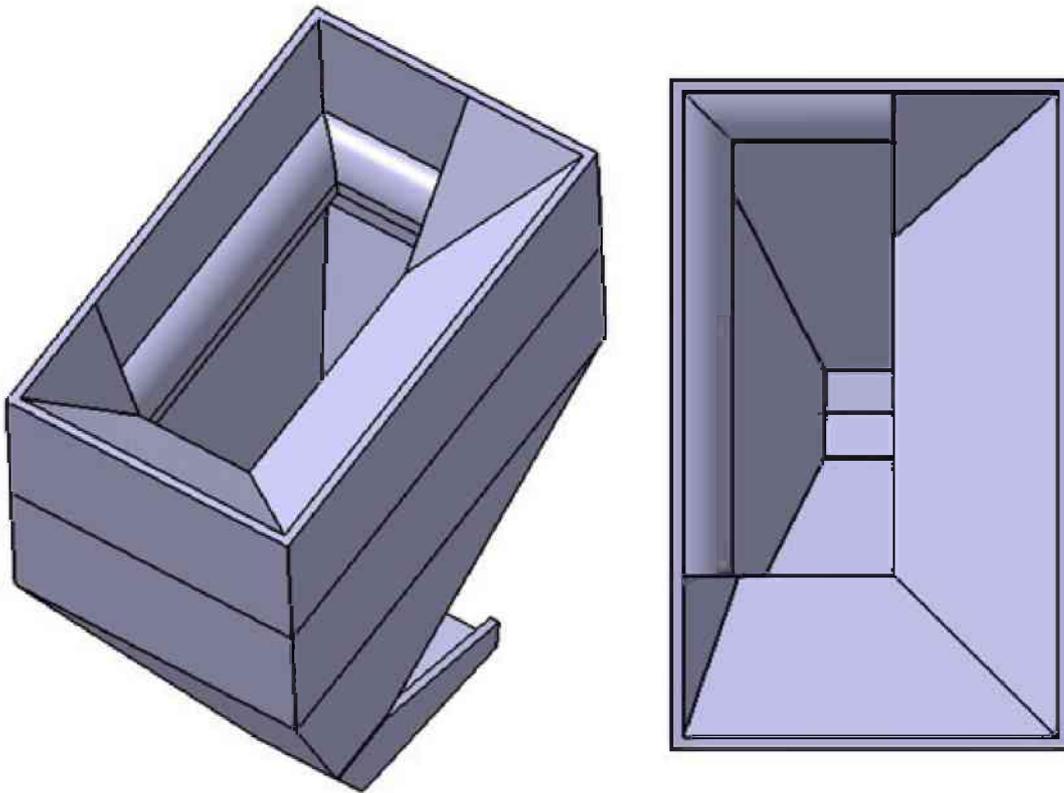


Abb. 4.4 Bunker mit Aufsatz



Abb. 4.5 Schnitt Bunkeraufsatz

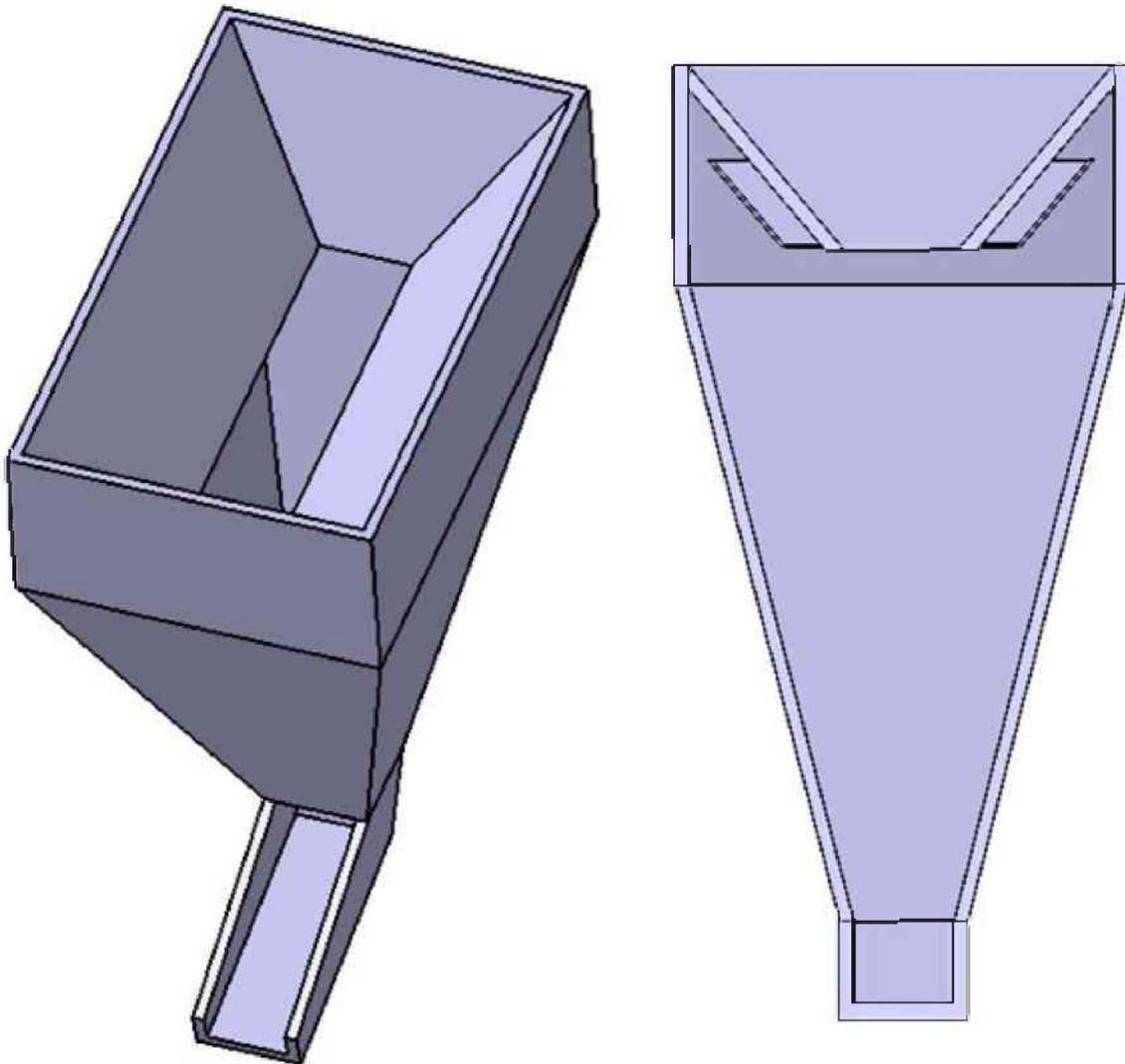


Abb. 4.6 Trichter mit Filter

In Abbildung 4.6 ist eine weitere Version des Trichters gezeigt. Diese besitzt unter dem Trichter eine extra Konstruktion zum Halten eines Filters. Das an der Wand aufsteigende Staub-Luftgemisch wird unter dem Trichter um- und in den Filter geleitet. So soll der Großteil des Staubes aus der Luft gefiltert werden, um zu verhindern, dass er in der Mitte aus dem Bunker aufsteigt.

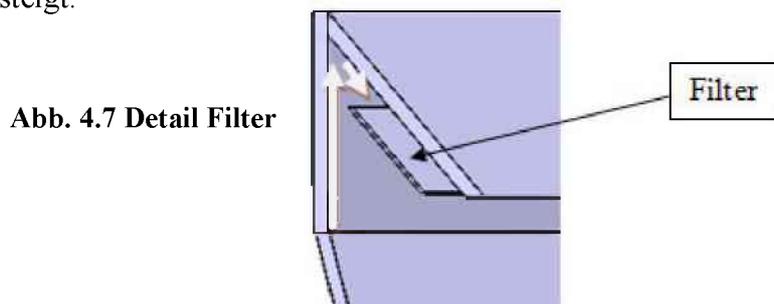


Abb. 4.7 Detail Filter

4.3 Kaskade

In dieser Ausführung, dargestellt in Abb. 4.8, wird eine Reduzierung der Fallhöhe und der Geschwindigkeit durch eine kaskadenförmige Konstruktion erreicht. Das Schüttgut wird über die äußeren und inneren Rampen in den Bunker geleitet. Die Rampen wirken auch hier als Staubschutzwand. Jedoch stellt sich dasselbe Problem wie bei den vorhergehenden Konstruktionen, und zwar der Verlust an Füllmenge. Ein Vorteil dieser Konstruktion ist, dass der Staub auch in der Mitte durch den Keil am Aufsteigen gehindert wird.

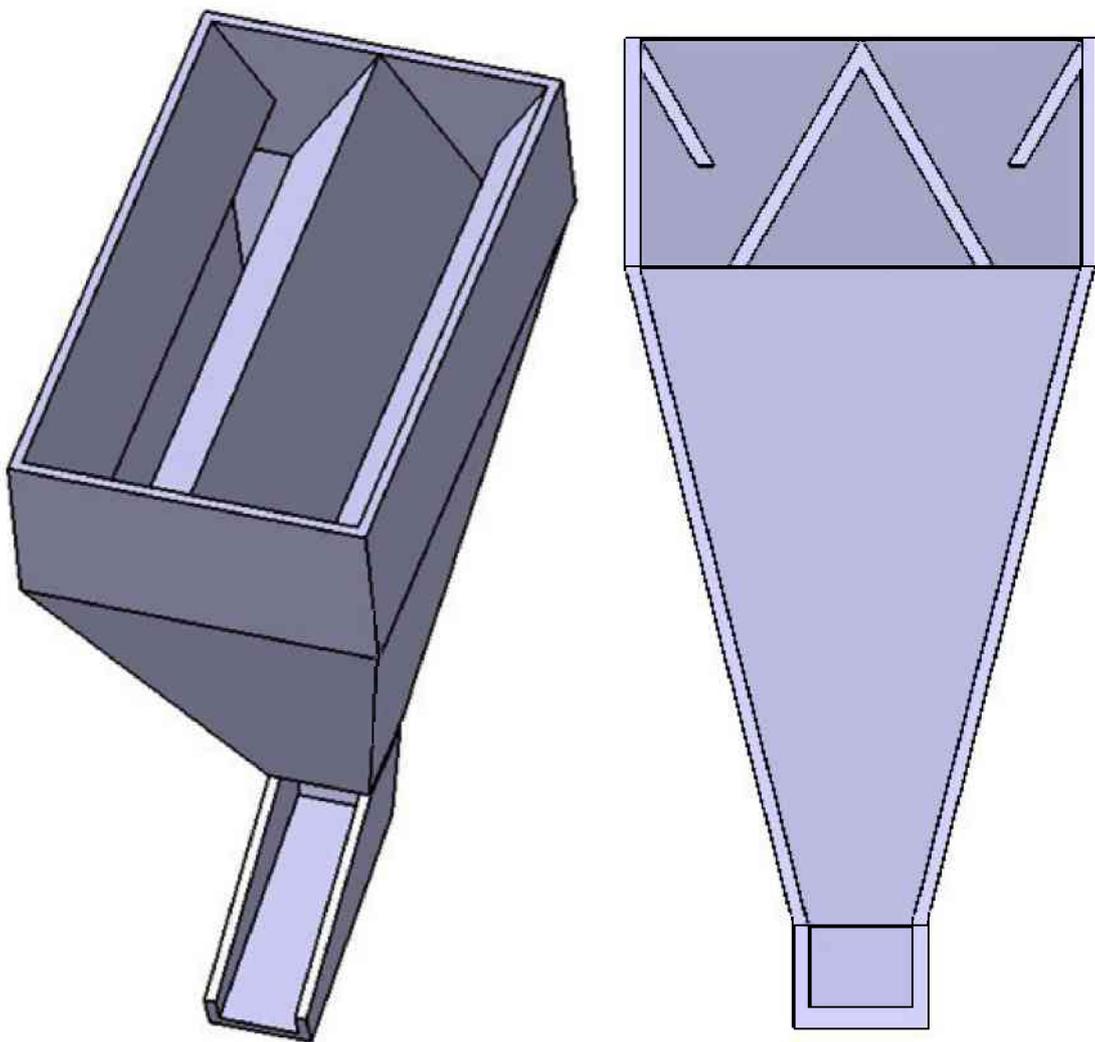


Abb. 4.8 Kaskade 1

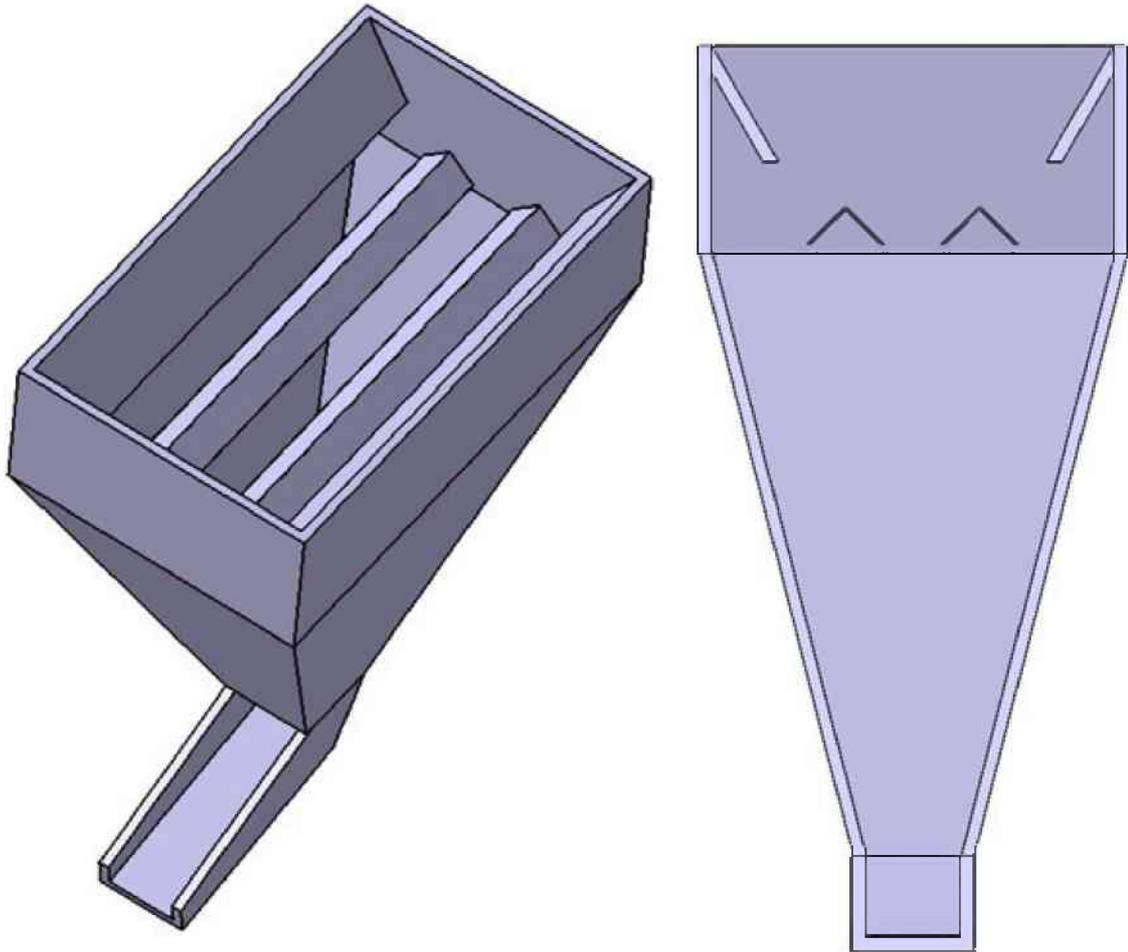


Abb. 4.9 Kaskade 2

Eine andere Version einer kaskadenförmigen Konstruktion zur Staubminderung ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Der große mittlere Keil aus der vorherigen Version wurde hier durch zwei kleinere ersetzt, die tiefer im Bunker liegen. Der Verlust an Füllmenge wird so erheblich reduziert. Jedoch bringt diese Änderung auch Nachteile mit sich, etwa indem Staub durch die offene Mitte wieder aufsteigen kann. Der Effekt der Kaskaden wird durch die Größe und die tiefe Lage reduziert. Die Fallhöhe und die Geschwindigkeit sind also nicht so stark reduziert wie im vorigen Beispiel. Durch die Aufweitung des Schüttgutstroms kann es auch zu einer erhöhten Staubentstehung kommen. An der Vorder- und Rückseite angebrachte Leitbleche könnten den Staub noch weiter blockieren.

4.4 Klappensystem

Abbildung 4.10 bzw. 4.11 zeigen ein in den Bunker montiertes Klappensystem. Die Klappen sind an den Querstreben des Bunkers angebracht. Sie öffnen sich durch das Gewicht des einströmenden Schüttguts und schließen sich anschließend wieder, um den aufsteigenden Staub im Bunker zu halten. Die Klappen sind als Pendelklappen ausgeführt, wie sie in Kapitel 2 vorgestellt wurden. Dieses System soll eine starke Minderung der Staubausbreitung verursachen, ohne dabei das Fassungsvermögen zu beeinträchtigen. Solche Systeme werden bereits kommerziell vertrieben und kommen oft in Bunkeranlagen zum Einsatz.

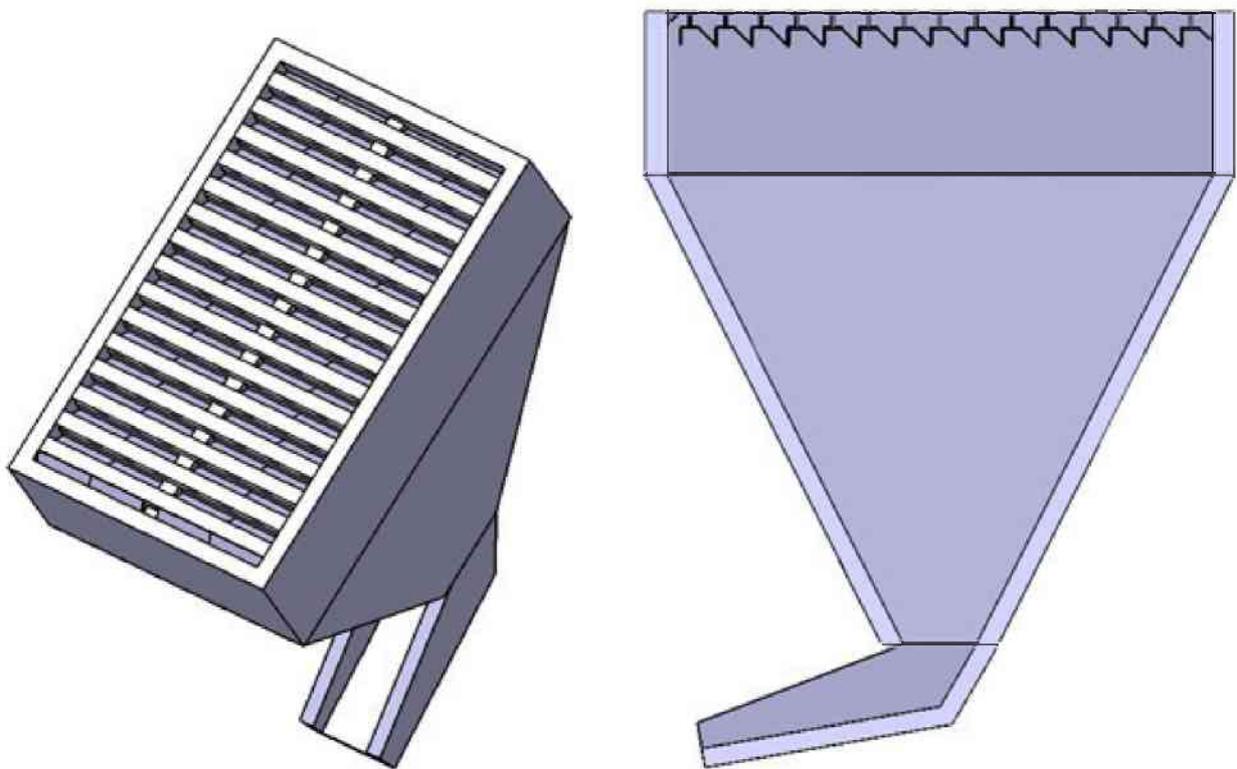


Abb. 4.10 Klappensystem

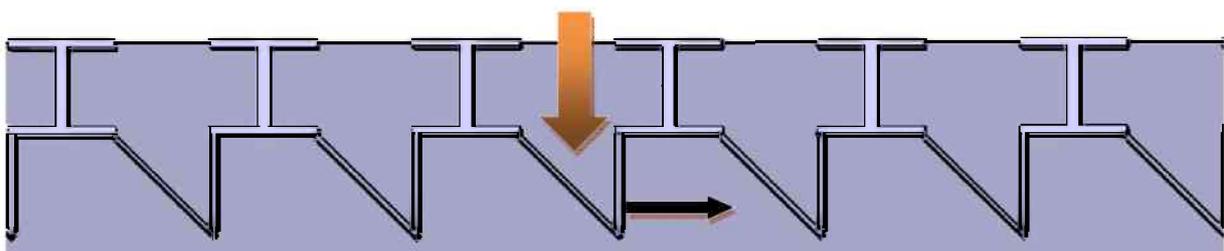


Abb.4.11 Klappen

4.5 Leitblech mit angeschlossenen Prallabscheider

Wie schon im ersten Vorschlag vorgestellt, sind auch hier zwei Leitbleche an den, den Einkippseiten gegenüberliegenden, Seiten angebracht. Hier wird das Staub-Luftgemisch allerdings nicht blockiert, sondern in einen angeschlossenen Prallabscheider geleitet.

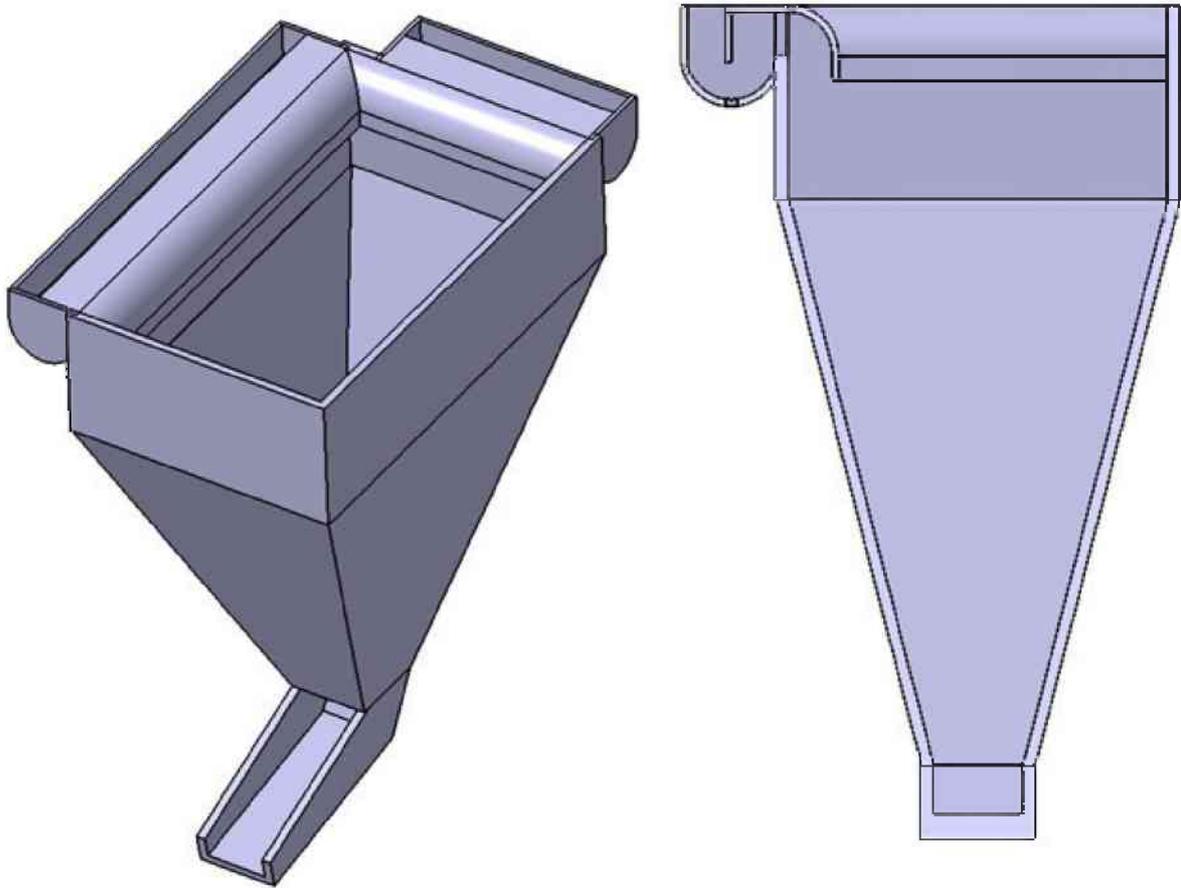


Abb. 4.12 Staubschutzwand mit Prallabscheider

Das Luft-Staubgemisch steigt mit hoher Geschwindigkeit an der Bunkerwand auf und tritt über die Leitbleche in den Prallabscheider ein. Die Partikel prallen gegen die Prallwand und fallen nach unten durch den offenen Boden. Hier kann er mit einer Wanne oder ähnlichen aufgefangen und zurück in den Bunker gebracht werden. Wie wirkungsvoll diese Konstruktion ist, ist abhängig von der Geschwindigkeit des aufsteigenden Gemisches und der Größe der Partikel. Die Abscheideleistung von Prallabscheidern ist begrenzt. Somit ist es möglich, dass immer noch beträchtliche Mengen Staub aus dem Abscheider aufsteigen. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Entstaubung würde eine Bedüsung mit Wasser bieten.

4. Übersicht über mögliche Ausführungen und Ideen

Wasserdüsen könnten am unteren Ende des Prallblechs angebracht werden und die durchströmende Luft bedüsen. Das Wasser und das feuchte Material können durch das Loch im Boden austreten (siehe Abb. 4.13). Da der Raum im Prallabscheider vom Bunkerraum und dem darin befindlichen Material getrennt ist, würden sich keine Probleme durch eine Befeuchtung des Materials ergeben. Allerdings ginge das aus der Luft ausgewaschene Material aufgrund der Feuchtigkeit verloren.

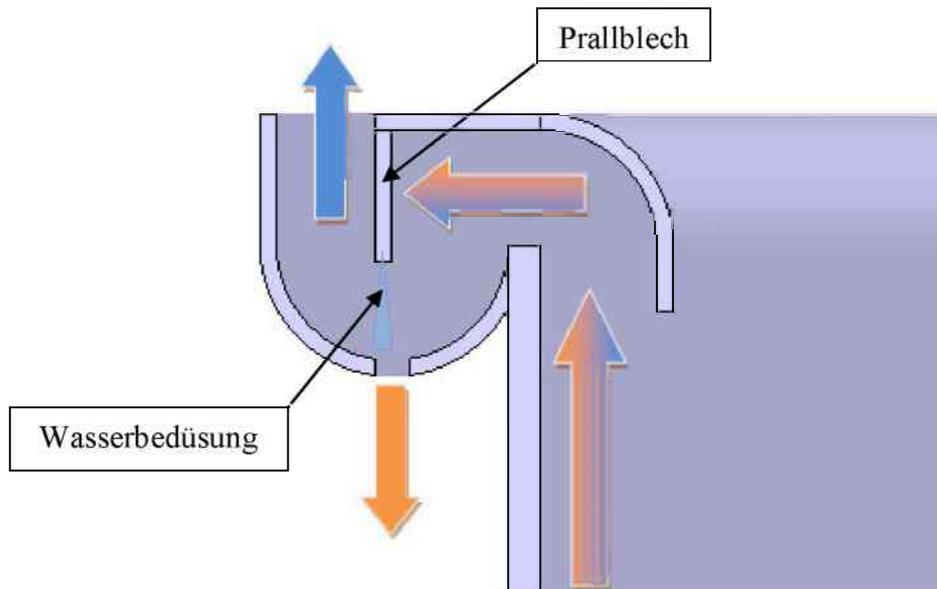


Abb. 4.13 Detail Prallabscheider

4.6 Geschlossene Konstruktion mit Klappen

Ein weiteres Klappensystem, jedoch nur mit zwei Klappen, ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Der gesamte Bunker ist geschlossen. Das Material wird auf die Rampen gekippt und drückt beim Abrutschen die jeweilige Klappe auf, ähnlich dem im Kapitel 2 vorgestellten Pendelklappensystem. Durch die Rampe wird die Fallhöhe verringert und der Schüttgutstrom etwas komprimiert. Der entstehende Staub kann den Bunker nicht verlassen. Durch die Größe der Klappen werden sie relativ schwer, weshalb darauf geachtet werden muss, dass das Material die Klappen noch öffnen kann. Auch hier ergibt sich das Problem, dass die Konstruktion eine große Menge des Fassungsvermögens verbraucht. Wiederrum bietet sich an, die Konstruktion als Aufsatz auf den Bunker aufzusetzen, mit dem Nachteil, die Überfahrbarkeit zu opfern.

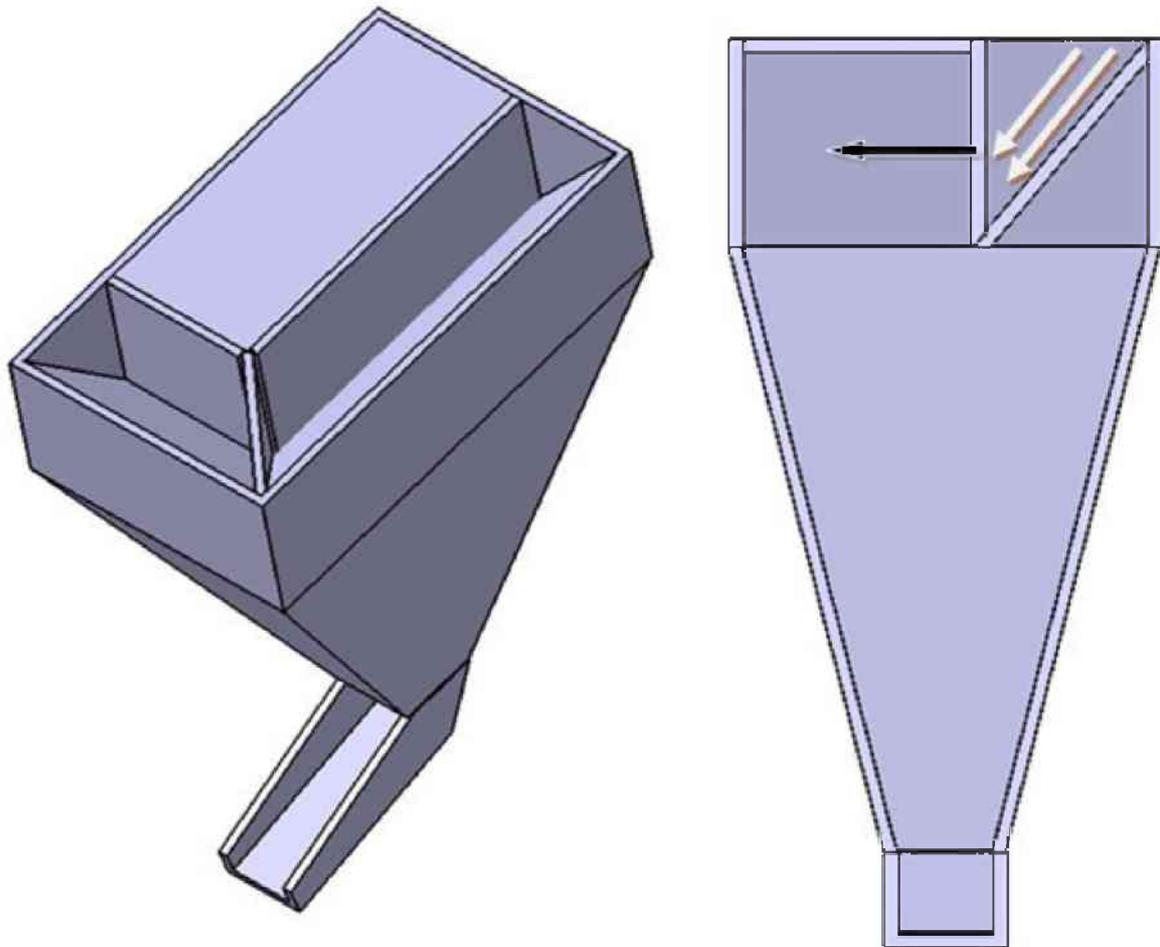


Abb. 4.14 Geschlossene Klappenkonstruktion

Falls es nötig sein sollte, die staubbeladene Luft im Bunker zu säubern, können bei dieser Konstruktion verschiedene Methoden verwendet werden. Zum Beispiel wäre der Einsatz von Filtern in der großen horizontalen Fläche möglich. Es können auch über Absaugungen verschiedene Entstauber wie zum Beispiel ein Zyklon angeschlossen werden. Auch ein Prallabscheider, eventuell mit Wasserbedüsung wie in der Konstruktion zuvor, wäre eine Möglichkeit. Siehe Abbildung 4.13 bzw. 4.15.

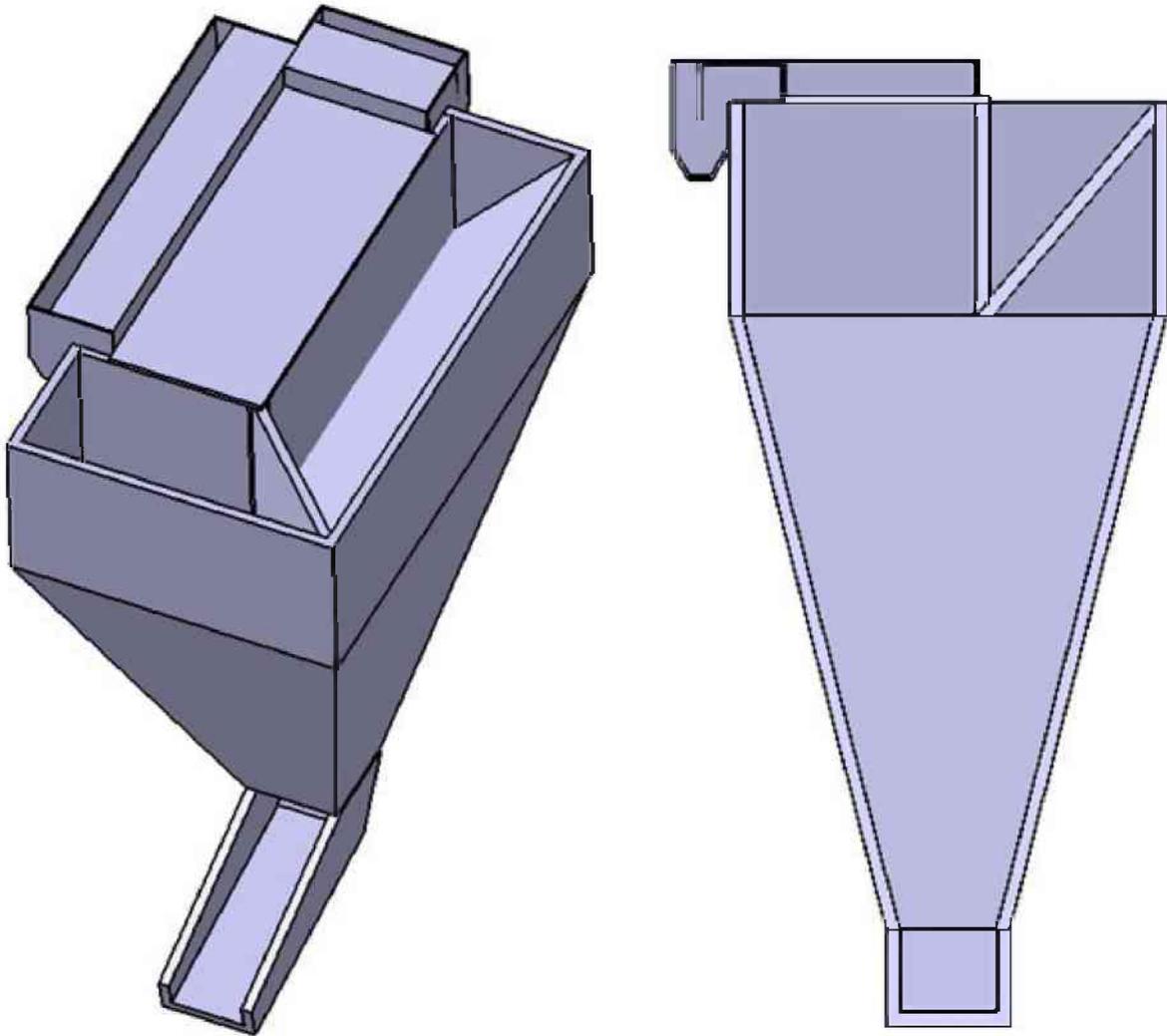


Abb. 4.15 Geschlossene Klappe mit Prallabscheider

4.7 Elektroabscheider

Eine aufwendigere und kompliziertere Methode der Entstaubung beruht auf dem Prinzip eines Elektroentstaubers. In der in Abbildungen 4.16 und 4.17 dargestellten Version besteht der Entstauber aus Leitblechen, die über den Bunkerrand erhöht montiert sind. Zwischen der Bunkerwand und diesen erhöhten Schutzwänden ist eine als Plattenelektrode ausgeführte Sprühelektrode montiert. Die am Bunkerrand aufsteigende staubbeladene Luft gelangt in den Abscheider, wo der Staub an die Bunker- bzw. die Schutzwand gedrückt wird. Diese wirken als Niederschlagselektroden.

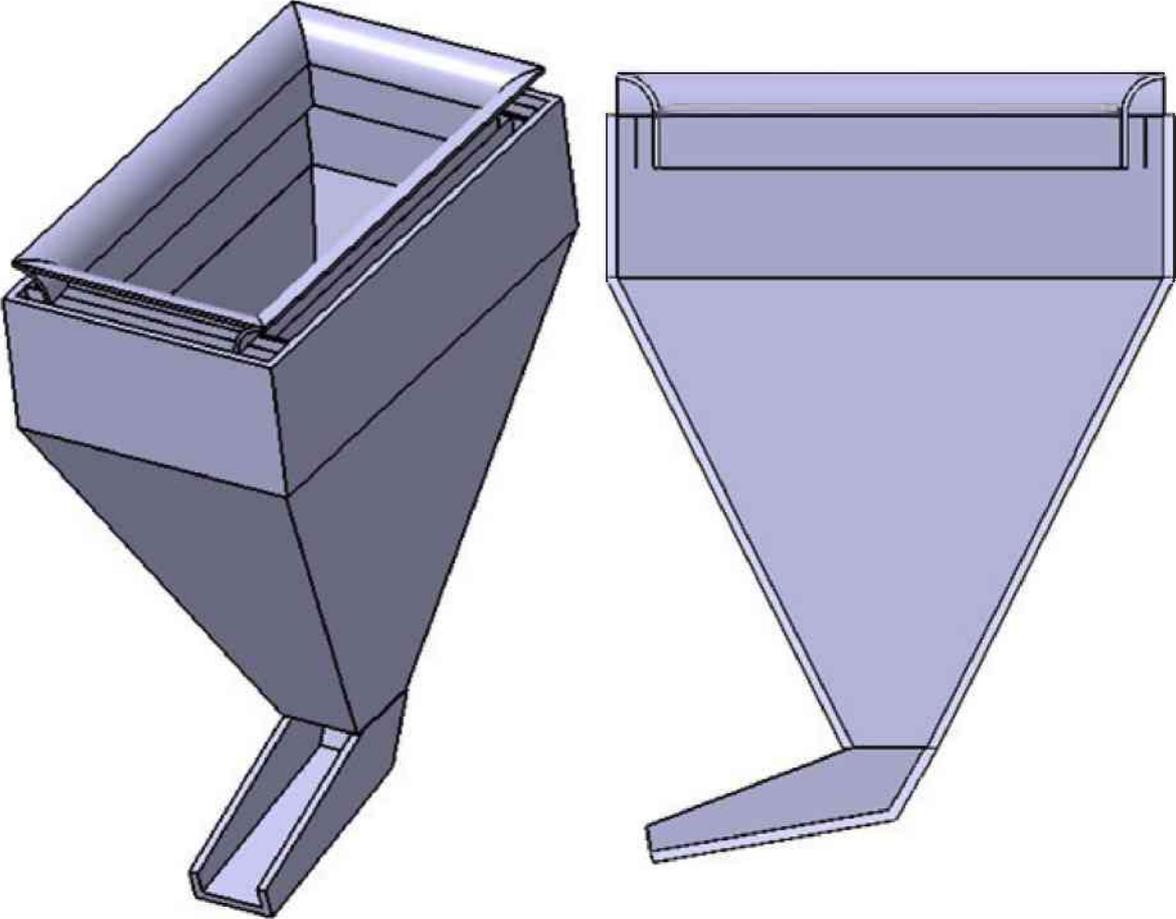


Abb. 4.16 Bunker mit Elektroentstauber

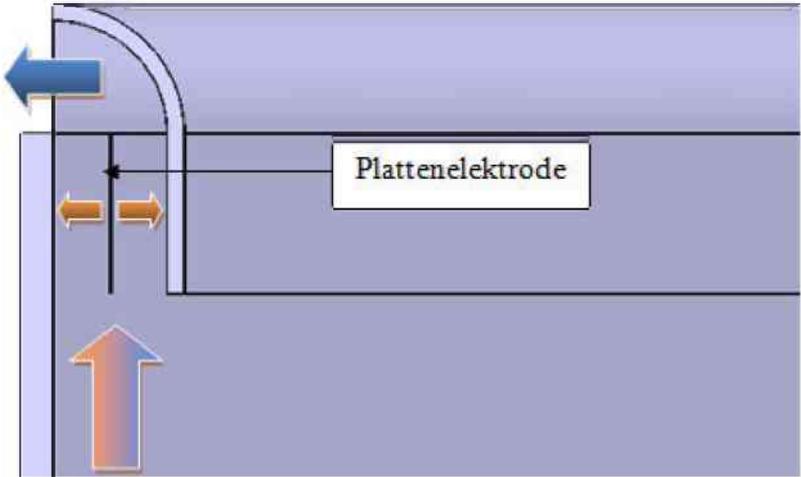


Abb. 4.17 Detail Elektroentstaubung

4. Übersicht über mögliche Ausführungen und Ideen

Elektroentstauber haben ausgezeichnete Entstaubungsgrade und können kleinste Partikel abscheiden. Sie bringen aber auch einige Nachteile mit sich. Zum einen benötigt man für den Betrieb eine hohe gleichgerichtete Spannung, also verschiedene elektrische Einrichtungen und eine Stromversorgung, was höhere Investitionen und laufende Kosten verursacht. Des Weiteren benötigt man Sicherheitseinrichtungen, um sicherzustellen, dass die unter Spannung stehenden Bauteile nicht zur Gefahr werden. Das in der Mitte aufsteigende Staub-Luftgemisch wird nicht am Austreten gehindert. Die in Abbildung 4.17 dargestellte Version ist auch nicht überfahrbar. Es wäre aber möglich, einen Entstauber nach diesem Prinzip in andere Konstruktionen einzubauen, um das Problem der Überfahrbarkeit zu lösen. Es wäre zum Beispiel möglich, einen solchen Abscheider anstatt eines Filters wie in Abb. 4.6 bzw. 4.7 zu verwenden oder ihn direkt unter die Leitbleche wie in Abb. 4.2 zu montieren.

4.8 Besprühungssysteme

Viele der vorgestellten Ideen wären mit Besprühungssystemen verbindbar, um die Entstaubungsleistung noch zu steigern, falls die Maßnahmen alleine nicht zufriedenstellend sind. Da das Material aber nicht zu viel Feuchtigkeit aufnehmen darf, wäre ein Dry-Fog-System zu empfehlen, das den Feuchtigkeitsanstieg gering (ca. 0,1%) hält. Die nötigen Anschlüsse wie Wasser und Druckluft sind einfach herzustellen. Die Düsen können am Bunkerrand und an dem Längsträger, der in der Mitte des Bunkers liegt, angebracht werden, wie in Abbildung 4.18 angedeutet.

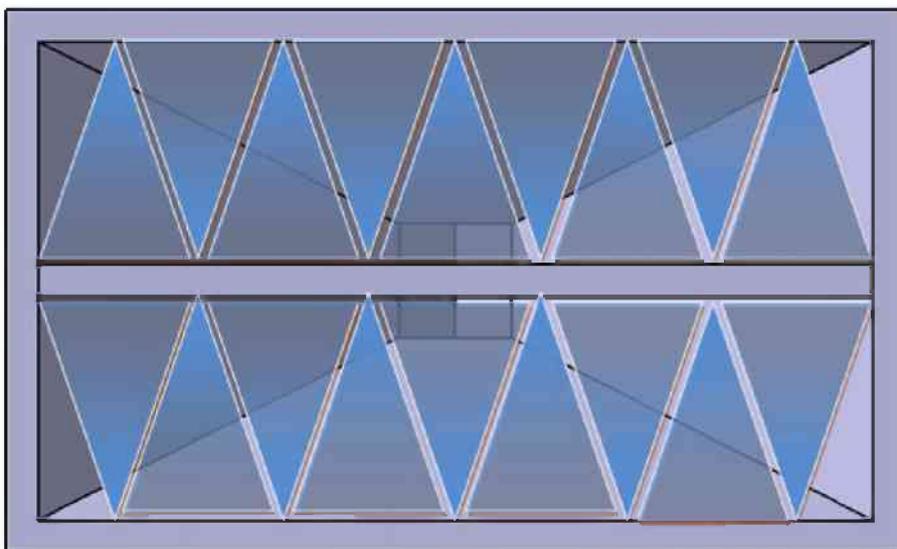


Abb. 4.18 Schema Wasserbedüsung

4.9 Bewertung der Konzepte

Wie schon zuvor bei der Bewertung der Entstaubungsmöglichkeiten in Kapitel 3.7, wird auch hier für die verschiedenen Konzepte eine Bewertung nach VDI 2225 vorgenommen, um die geeignetsten herauszufiltern. Die Vorgehensweise ist analog [vgl. 23].

4.9.1 Wirtschaftliche Kriterien

Zur wirtschaftlichen Bewertung werden

- Herstellkosten und
- Betriebskosten

herangezogen.

Im Vergleich zu	Herstellkosten	Betriebskosten
Herstellkosten	1	1
Betriebskosten	1	1
Summe	2	2
Summe normiert	1	1

Tab. 4.1 Paarweiser Vergleich der wirtschaftlichen Kriterien der Konzepte

Legende:

0 unwichtiger 1 gleich wichtig 2 wichtiger

4.9.2 Technische Kriterien

Die betrachteten technischen Kriterien sind:

- Komplexität
- Überfahrbarkeit
- Wartung
- Geschätzte Wirksamkeit
- Materialverlust
- Beeinträchtigung des Fassungsvermögens

4. Übersicht über mögliche Ausführungen und Ideen

Im Vergleich zu	Komplexität	Überfahrbarkeit	Wartung	Geschätzte Wirksamkeit	Materialverlust	Beeinträchtigung Fassungsvermögen
Komplexität	1	2	1	1	0	2
Überfahrbarkeit	0	1	0	1	0	1
Wartung	1	2	1	2	1	2
Geschätzte Wirksamkeit	1	1	0	1	0	1
Materialverlust	2	2	1	2	1	2
Beeinträchtigung Fassungsvermögen	0	1	0	1	0	1
Summe	5	9	3	8	2	9
Summe normiert	0,56	1,00	0,33	0,89	0,22	1

Tab. 4.2 Vergleich der technischen Bewertungskriterien der Konzepte

Legende:

0 unwichtiger

1 gleich wichtig

2 wichtiger

4.9.3 Technische Bewertung

Zu bewerten sind:

Konzept	Aufbau laut Abb.
<i>Leitblech</i>	4.2
<i>Trichter 1</i>	4.3
<i>Trichter 2</i>	4.4
<i>Trichter m. Filter</i>	4.6
<i>Kaskade 1</i>	4.8
<i>Kaskade 2</i>	4.9
<i>Klappen</i>	4.10
<i>Prallabscheider</i>	4.12
<i>Geschlossen Klappen ev. mit Abscheider</i>	4.14
<i>Elektroabscheider</i>	4.17

Tab. 4.3 Konzepte und zugehörige Abbildungen

4. Übersicht über mögliche Ausführungen und Ideen

gi	Kriterium	Leitblech		Trichter 1		Trichter 2		Trichter mit Filter		Kaskade 1		Kaskade 2		Klappen		Prallabscheider		Geschlossene Klappe ev. mit Abscheider		Elektroabscheider	
		P11	gi*P11	P12	gi*P12	P13	gi*P13	P14	gi*P14	P15	gi*P15	P16	gi*P16	P17	gi*P17	P18	gi*P18	P19	gi*P19	P110	gi*P110
0,56	Komplexität	4	2,24	3	1,68	2	1,12	2	1,12	3	1,68	3	1,68	2	1,12	1	0,56	2	1,12	2	1,12
1	Überfahrbarkeit	4	4	4	4	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0,33	Wartung	4	1,32	4	1,32	3	0,99	1	0,33	4	1,32	4	1,32	3	0,99	2	0,66	3	0,99	2	0,66
0,89	Geschätzte Wirksamkeit	2	1,78	3	2,67	2	1,78	3	2,67	3	2,67	2	1,78	4	3,56	2	1,78	4	3,56	4	3,56
0,22	Materialverlust	2	0,44	3	0,66	3	0,66	3	0,66	3	0,66	2	0,44	3	0,66	2	0,44	3	0,66	3	0,66
1	Beeinträchtigung Fassungsvermögen	3	3	1	1	3	3	1	1	0	0	2	2	4	4	3	3	0	0	3	3
4,00	Summe	19	12,78	18	11,33	13	7,55	14	9,78	17	10,33	17	11,22	20	14,33	14	10,44	16	10,33	18	13
	Wertigkeit	0,79	0,80	0,75	0,71	0,54	0,47	0,58	0,61	0,71	0,65	0,71	0,70	0,83	0,90	0,58	0,65	0,67	0,65	0,75	0,81
	Rangfolge		3		4		8		7		6		5		1		6		6		2

Tab. 4.4 Technische Bewertung der Konzepte

Legende:

gi Gewichtungsfaktor, laut Kriteriengewichtung (0...1)

Pij Bewertungsfaktor (0...4), wobei:

0.....unbefriedigend 1.....gerade noch tragbar
 2.....ausreichend 3.....gut 4.....sehr gut

4. Übersicht über mögliche Ausführungen und Ideen

gi	Kriterium	Leitblech		Trichter 1		Trichter 2		Trichter mit Filter		Kaskade 1		Kaskade 2		Klappen		Prallabscheider		Geschlossene Klappe ev. mit Abscheider		Elektroabscheider	
		Pi1	gi*Pi1	Pi2	gi*Pi2	Pi3	gi*Pi3	Pi4	gi*Pi4	Pi5	gi*Pi5	Pi6	gi*Pi6	Pi7	gi*Pi7	Pi8	gi*Pi8	Pi9	gi*Pi9	Pi10	gi*Pi10
1	Herstellkosten	4	4	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2
1	Betriebskosten	4	4	4	4	4	4	2	2	4	4	4	4	4	2	2	4	4	4	4	4
2	Summe	8	8	7	7	6	6	5	5	7	7	7	7	7	5	5	7	7	7	6	6
	Wertigkeit	1	0,875	0,875	0,875	0,75	0,75	0,625	0,625	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,625	0,625	0,875	0,875	0,875	0,75	0,75
	Rangfolge	1	1	2	2	3	3	4	4	2	2	2	2	2	4	4	2	2	2	3	3

Tab. 4.5 Wirtschaftliche Bewertung der Konzepte

Legende:

gi Gewichtungsfaktor, laut Kriteriengewichtung (0...1)

Pij Bewertungsfaktor (0...4), wobei:

0.....unbefriedigend 1.....gerade noch tragbar
 2.....ausreichend 3.....gut 4.....sehr gut

4.9.4 Stärkediagramm

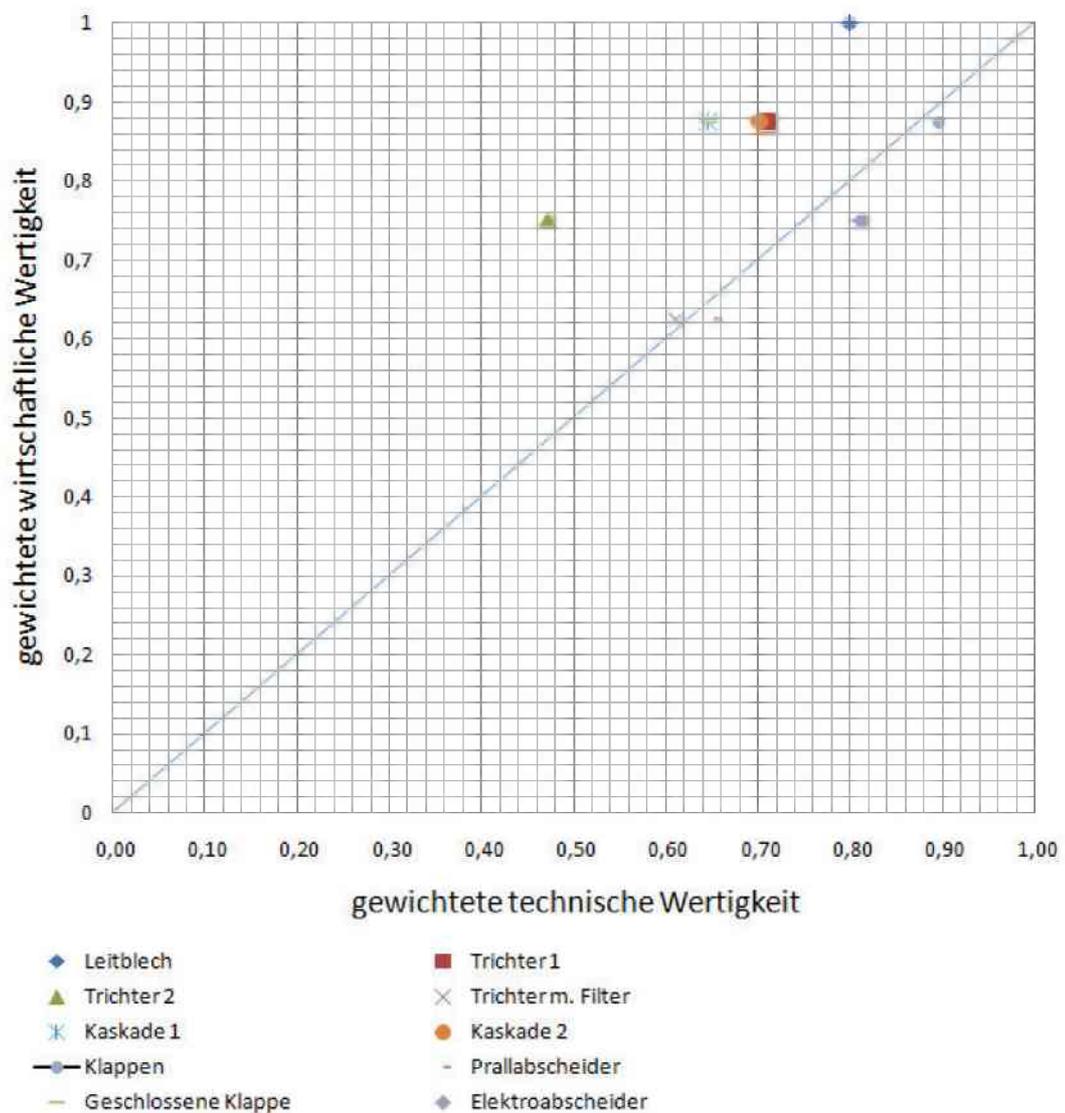


Abb. 4.19 Stärkediagramm der Konzepte

Es zeigt sich, dass die technisch und wirtschaftlich bestgeeignetsten Konzepte jene der Leitbleche, Klappen und Elektroentstauber sind. Diese drei Konzepte werden also weiter verfolgt, genauer ausgearbeitet und gegebenenfalls im Versuchsbunker getestet.

5 Aufbau des Versuchsbunkers und Messmethoden

Um die ausgewählten Staubbekämpfungsmaßnahmen auf ihre Effektivität hin zu überprüfen, wurde ein Modell des Bunkers im Maßstab 1:4 aufgebaut.

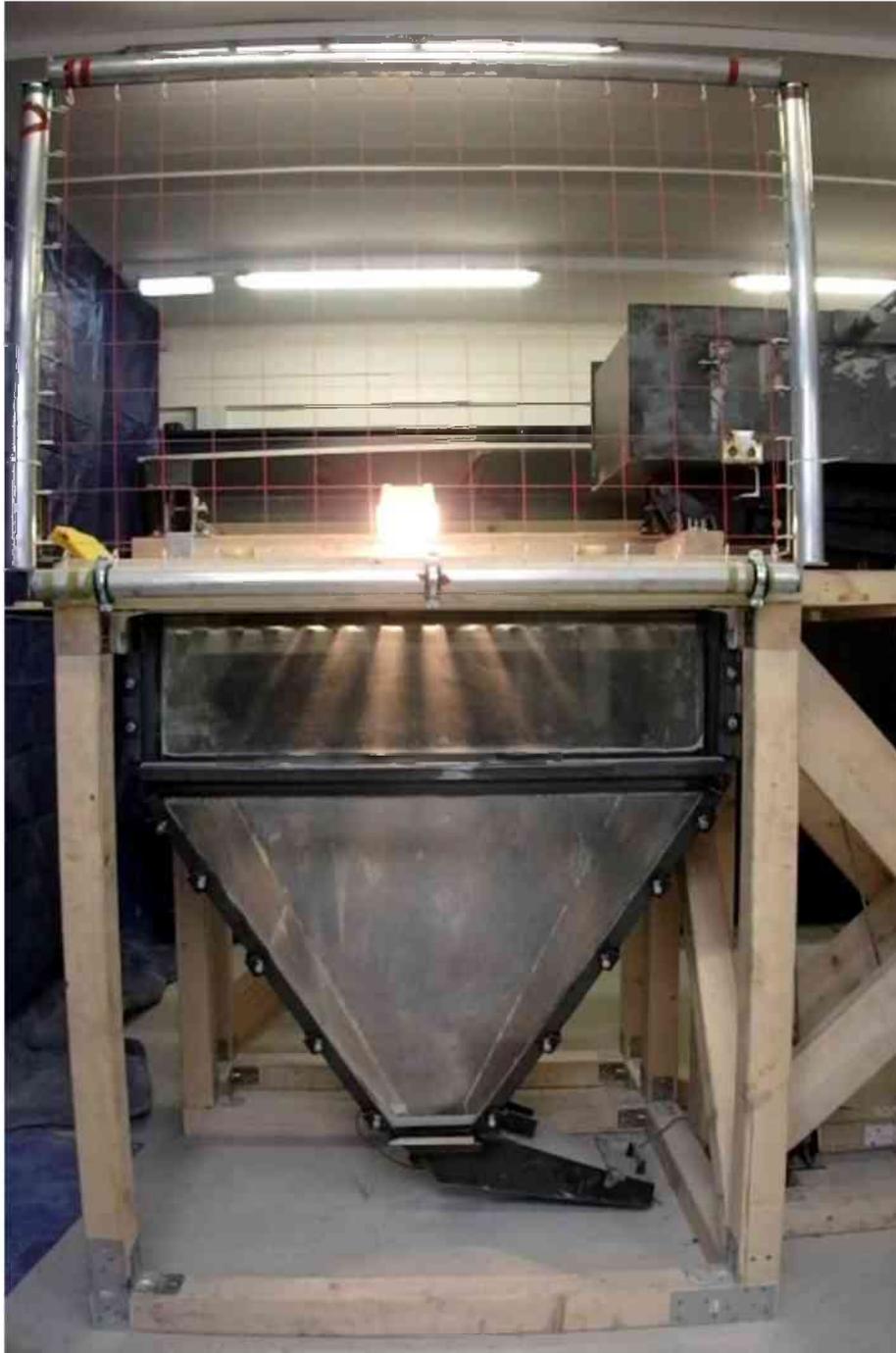


Abb. 5.1 Bunkermodell 1 zu 4

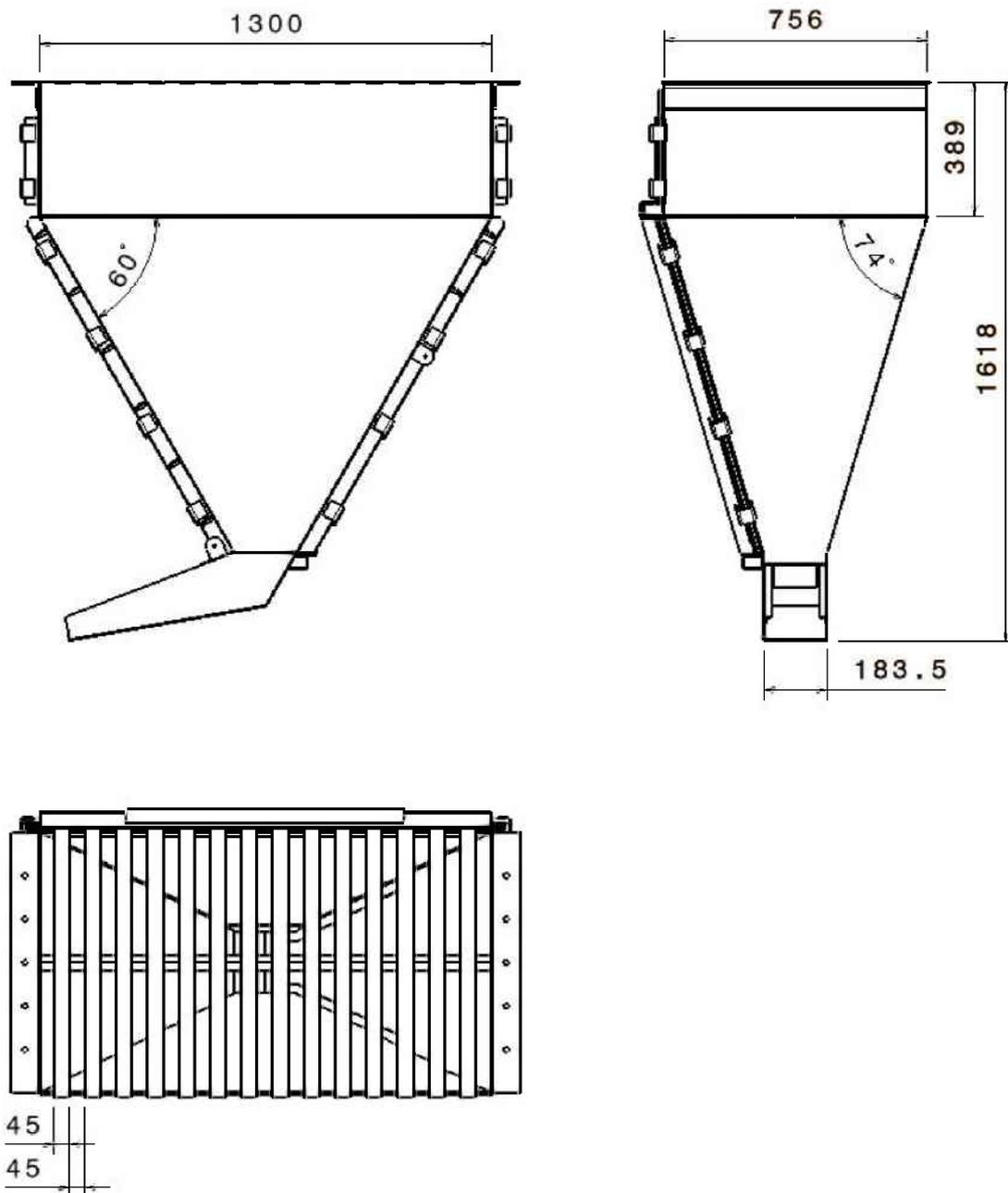


Abb. 5.2 Konstruktion Modellbunker

Der Bunker ist seitlich mit einem Sichtfenster ausgestattet. Das Material wird mittels einer Wanne mit zwei Klappen, eine für seitliches und eine für Heckabkippen, in den Bunker gekippt. Die Wanne ist 161 cm lang, 55 cm breit und 36 cm hoch und wird je nach Versuch seitlich oder stirnseitig 40 cm über dem Bunker befestigt. Die Abkippbewegung wird durch einen Deckenkran ausgeführt.

Zur Messung der entstehenden Staubmenge wurden an fünf ausgewählten Positionen Dosen platziert, die den sich legenden Staub auffangen sollen, um so einen Überblick über die

Menge und die Ausbreitung zu liefern. Außerdem wurde mittels eines feuchten Tuches die Flugstaubmenge gemessen.

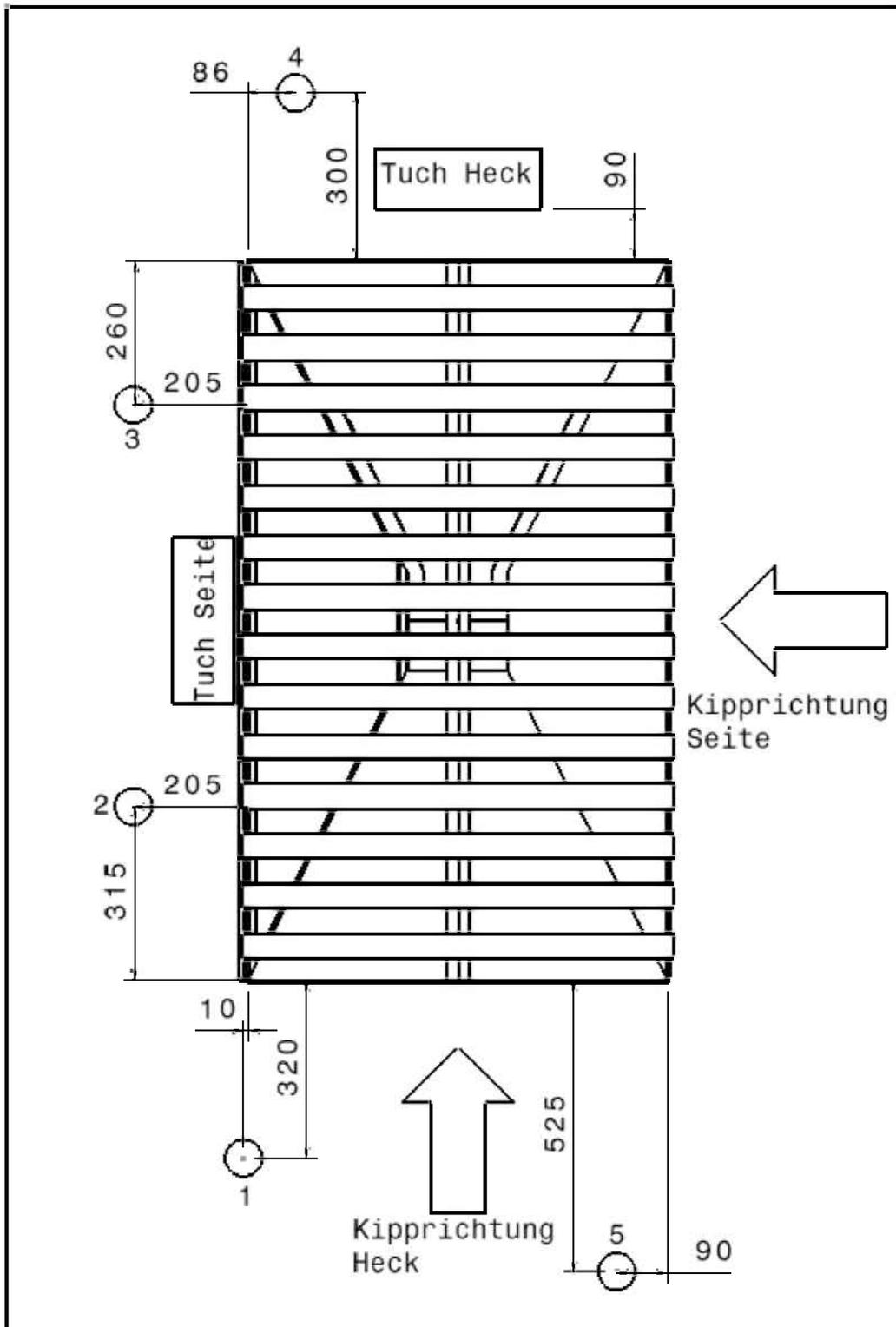


Abb. 5.3 Position der Messdosen und Tücher

In Abbildung 5.3 sind die Positionen der Messdosen und Tücher ersichtlich. Die Abstände vom Bunkerrand sind in Millimeter angegeben. Die Messdosen hatten einen Durchmesser von 66,5 mm. Die Dosen 1, 4 und 5 waren auf Höhe des Bunkerrandes aufgestellt, die Dosen 2 und 3 standen 10 cm über dem Bunkerrand.

Die Tuchhalterung hatte eine Kantenlänge von 30x30 cm. Der Halter hatte eine leichte Neigung von 20°.

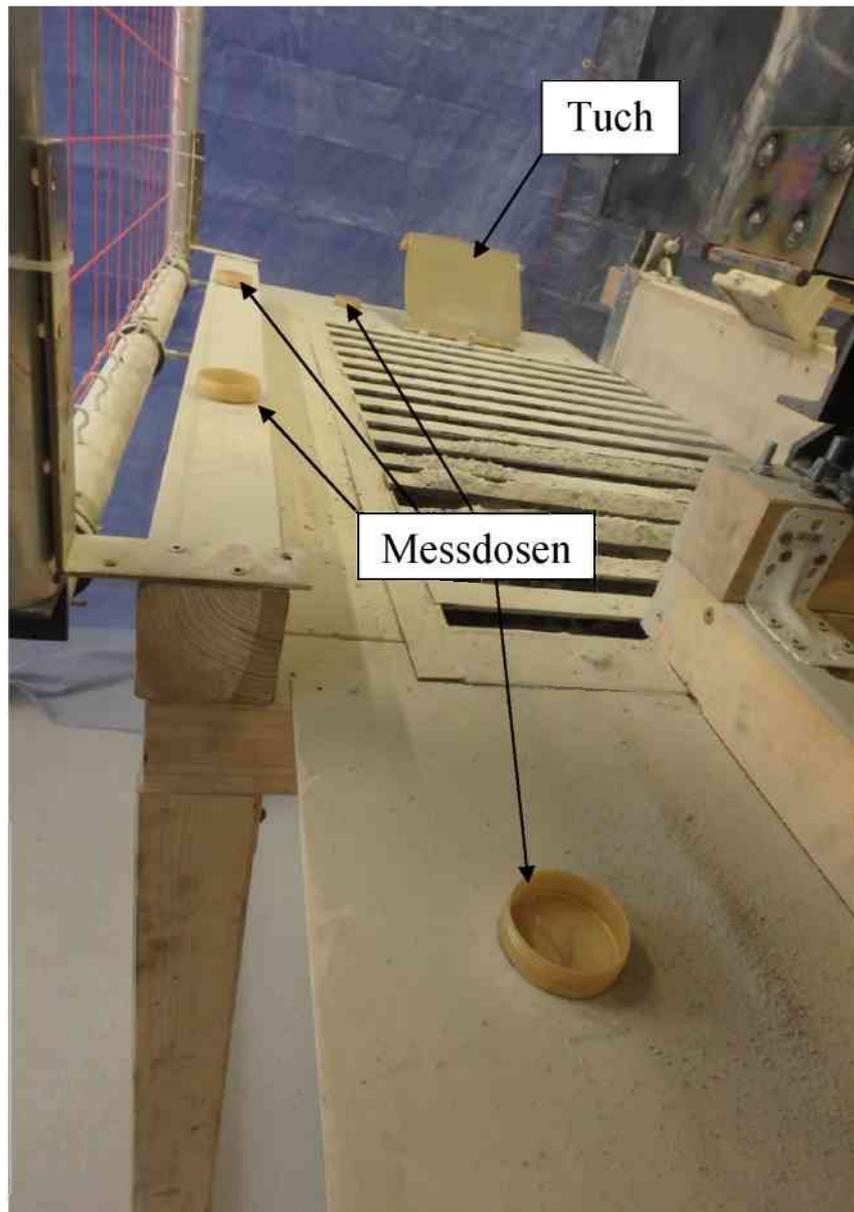


Abb. 5.4 Position Messdosen 1 bis 4 und Tuch



Abb. 5.5 Position Messdose 5

Die Position der Dosen blieb bei seitlichen und Heckabkippsversuchen unverändert. Das feuchte Tuch wurde jeweils gegenüber der Kippwanne am Bunkerrand aufgestellt.

Die Dosen wurden vor dem Platzieren sorgfältig gereinigt und getrocknet und auf tausendstel Gramm genau gewogen. Nachdem sich nach dem Abkippen der Staub gelegt hatte, wurden sie verschlossen und das Gewicht wurde erneut bestimmt.

Das saubere Tuch wurde zuerst trocken und dann befeuchtet verwogen. Anschließend wurde es für den Kippversuch in den Rahmen gespannt und am Bunker montiert. Nach dem Kippversuch folgte zuerst feuchtes und dann nach dem Trocknen in einem Trockenschrank getrocknetes Wiegen.

Für jede getestete Methode wurden jeweils 3 bis 4 Kippversuche für seitliches Abkippen und für Heckkippen durchgeführt. Das verwendete Material entsprach dem im originalen Bunker gelagerten Material. Das Material wurde zwischen den Versuchen ausgetauscht, um den Verlust an Feinanteil durch die Kippversuche wiederherzustellen. Da allerdings nicht genug Material vorhanden war, um zwischen allen Versuchen einen Austausch vorzunehmen, kann

es dadurch zu leichten Abweichungen in den Ergebnissen gekommen sein. Durch das häufige Umladen und Kippen entstand jedoch erneut ein feiner Materialanteil, wodurch der Einfluss wieder verringert wird.

Alle Kippversuche wurden mit Zeitlupenaufnahme mitgefilmt, um die Änderungen der Staubausbreitung auch visuell vergleichen zu können. Das in Abb. 5.1 sichtbare rote Netz diente der Abschätzung der Aufstiegshöhe und Geschwindigkeit der Staubwolke. Die Quadrate haben eine Seitenlänge von 10 cm.

Um Referenzwerte zu erhalten, wurde eine erste Versuchsreihe ohne jegliche Umbauten im Modell durchgeführt.

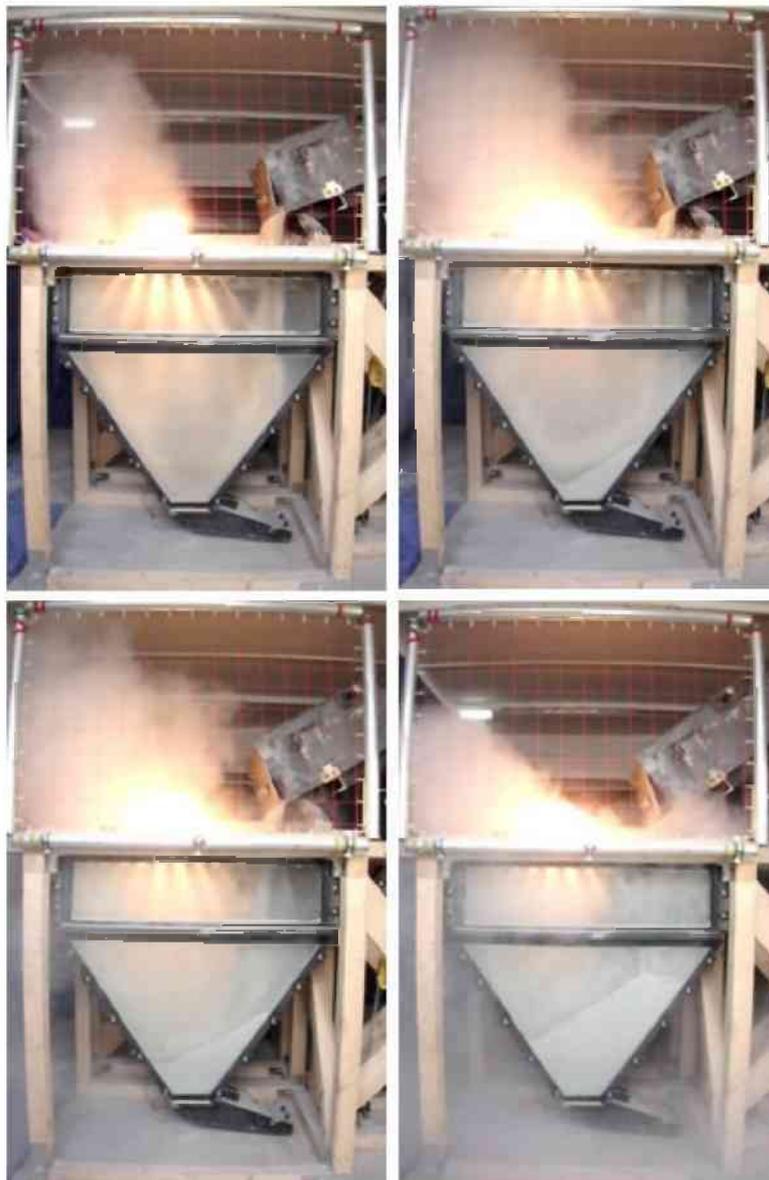


Abb. 5.6 Kippversuch ohne Umbauten

6 Ausgewählte Staubminderungsmaßnahmen und Umsetzung im Versuchsbunker

6.1 Leitbleche

Die erste und einfachste gewählte und getestete Variante bestand aus Leitblechen, die an den den Abkippsseiten gegenüberliegenden, Bunkerwänden direkt unter den Quer- und dem Mittelträger angebracht werden, wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben.

Simulationen haben bestätigt, dass der Hauptteil des Staub-Luftgemisches an der der Kippseite gegenüberliegenden Bunkerwand aufsteigt.

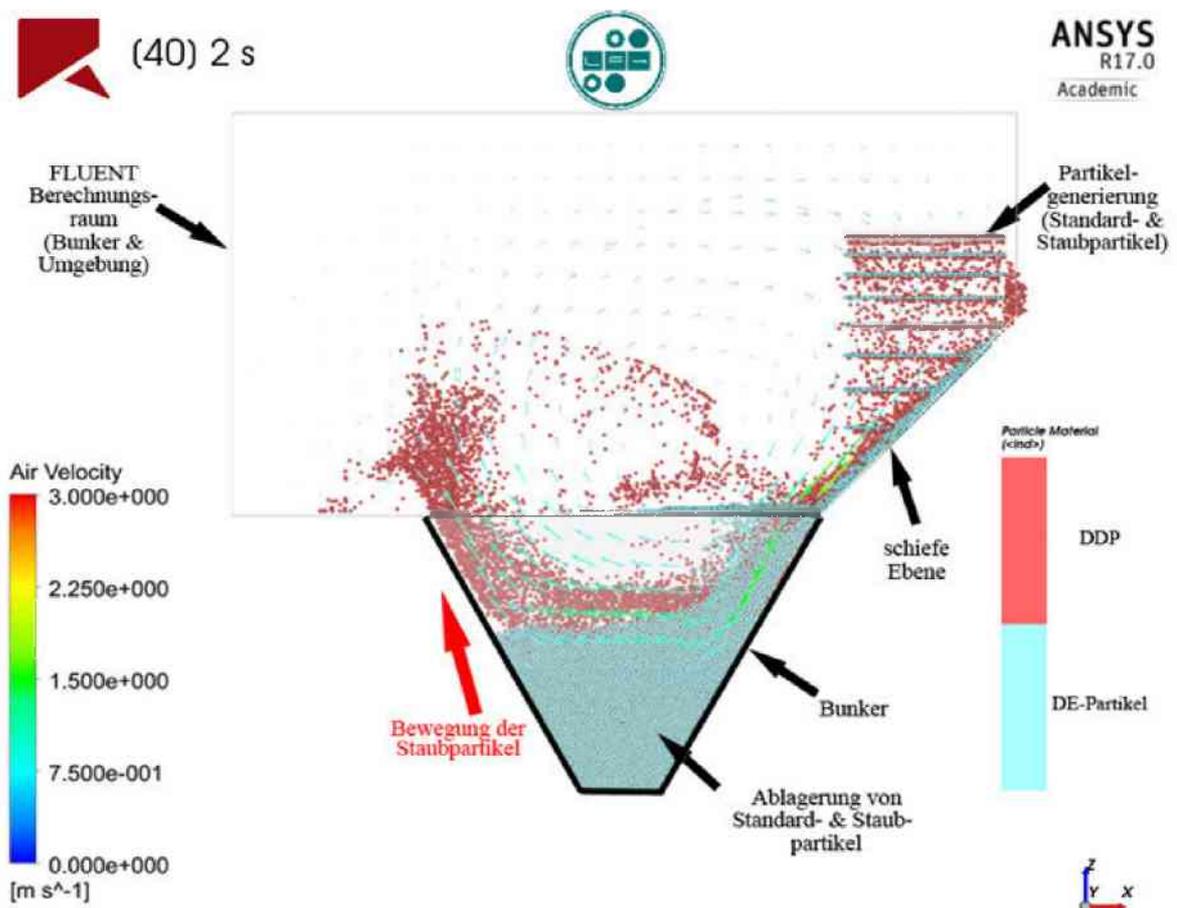


Abb. 6.1 Simulationsergebnisse für DE-Staubpartikel nach zwei Sekunden [22]

Abbildung 6.1 zeigt die Ergebnisse einer Diskreten Elemente (DE) – Staubpartikelsimulation gekoppelt mit einer Strömungssimulation für die Befüllung eines Bunkers über eine schiefe Ebene. Obwohl diese Simulation sich nicht auf diesen Bunker bezieht illustriert sie sehr gut,

wie die Staubpartikel an der gegenüberliegenden Wand durch die Luftströmung hinausgetragen werden. In Abbildung 6.2 ist zum Vergleich die Staubentwicklung im Modellbunker dargestellt. [vgl. 22]

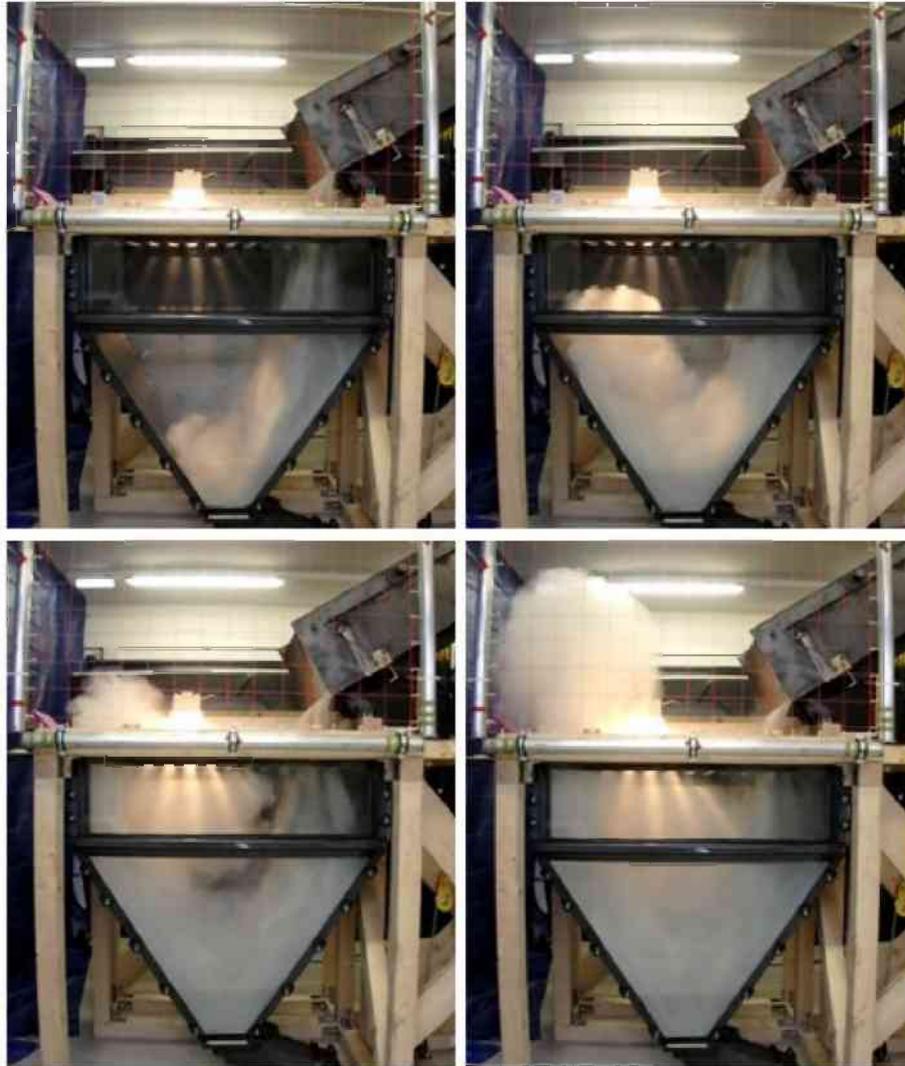


Abb. 6.2 Staubentwicklung im Modellbunker

Weiterhin belegten diese Simulationen, dass die Aufstiegsgeschwindigkeit zu Beginn stark ansteigt und bei ca. 1 Sekunde ihr Maximum erreicht, bevor sie wieder abfällt (siehe Abb. 6.3). [vgl. 22]

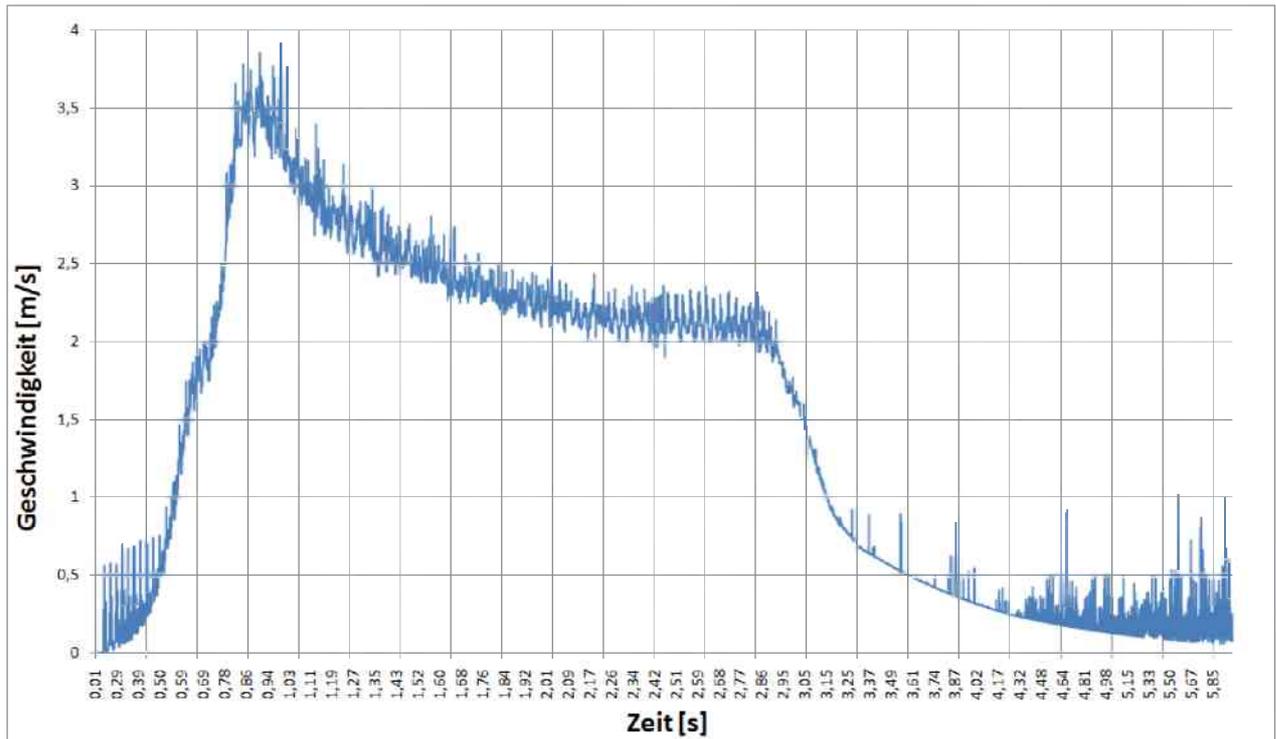


Abb. 6.3 Luftgeschwindigkeit der DE-Partikeln [22]

Dem in dieser Simulation beschriebenen Verhalten des Staubes soll mit den Leitblechen entgegengewirkt werden. Der aufsteigende Staub-Luftstrom soll sich unter den Leitblechen fangen und somit seine Geschwindigkeit verlieren und am Austreten aus dem Bunker behindert werden.

Wie bereits beschrieben, ist diese Lösung einfach durchführbar und erfordert praktisch keinerlei Wartung. Sie beeinträchtigt weder die Funktionen, Anforderungen oder das Fassungsvermögen des Bunkers.

Die einzigen Anforderungen an die Konstruktion bestehen darin, dass sie die Belastung durch das Einkippen des Materials ertragen und gegen die Reibung durch das Material beständig sein muss. Dies kann durch eine angemessene Montage und Materialdicke und durch eine entsprechende Materialhärte bzw. -beschichtung leicht erreicht werden.

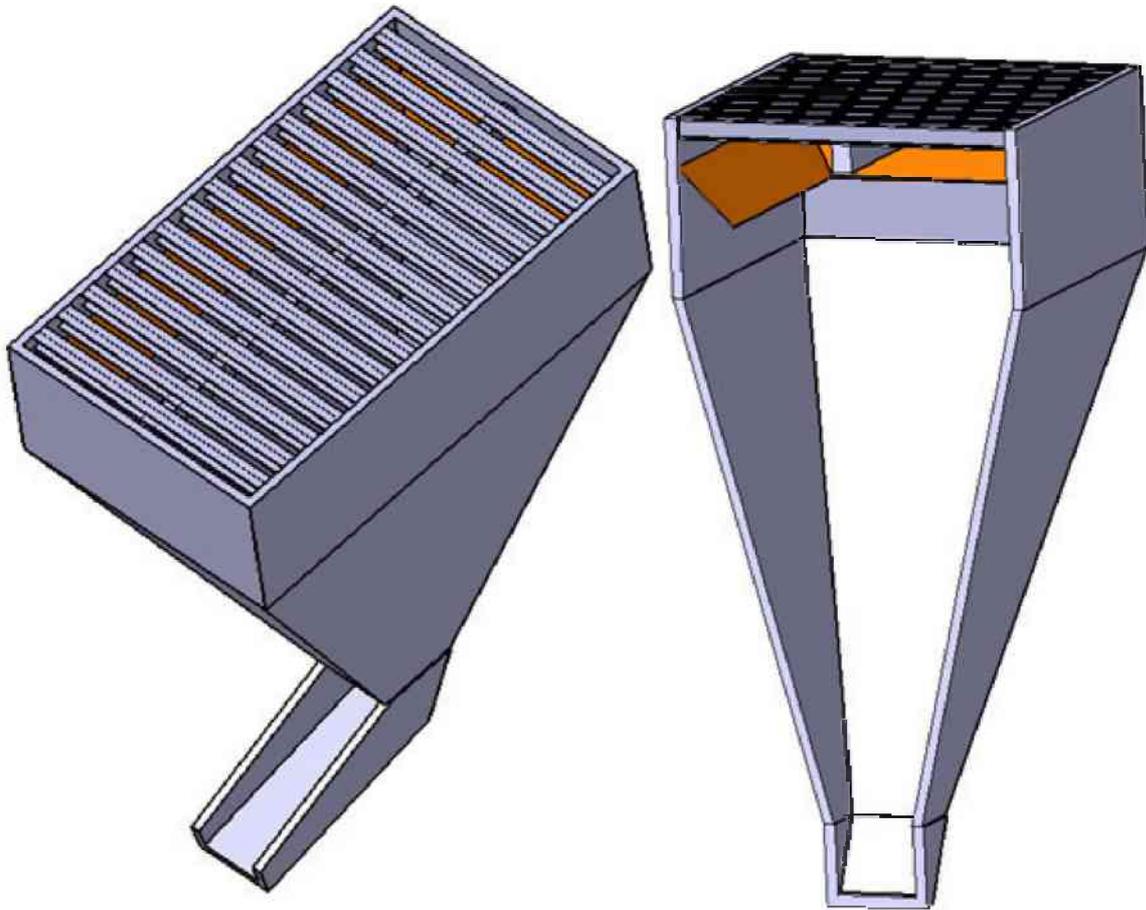


Abb. 6.4 Bunker mit Leitblechen

In Abbildung 6.4 sind die Leitbleche in orange dargestellt. Sie sind ca. 110 mm unterhalb des Bunkerrandes direkt unter dem Mittelträger angebracht. Der Winkel zur Bunkerwand beträgt 45° und sie haben eine Seitenlänge von 175 mm. Der 45° Winkel wurde gewählt, um möglichst viel Fläche abzudecken und zugleich sicherzustellen, dass das Material noch gut von den Blechen in den Bunker abgleiten kann. Auch die 175 mm wurden gewählt, um einen möglichst großen Teil des austretenden Luftstroms abzufangen, ohne das Fassungsvermögen durch Totraum zu stark zu beeinträchtigen. Die hier angegebenen Längen gelten für den Modellbunker mit dem Maßstab 1:4.

Für den Versuchsbunker wurden die Leitbleche aus Holz gefertigt und mit den Bunkerwänden verschraubt. Die Leitbleche wurden gegen die Bunkerwand mit Dichtmaterial abgedichtet.



Abb. 6.5 Versuchsbunker mit Leitblech

Das stark abgebremste Staub-Luftgemisch konnte jedoch noch immer unter den Leitblechen hervortreten und aus dem Bunker aufsteigen. Die Ausbreitung wurde jedoch durch das Abbremsen stark reduziert (siehe Abb. 6.6).



Abb. 6.6 Vergleich Staubentstehung Standard (links) und mit Leitblech (rechts)

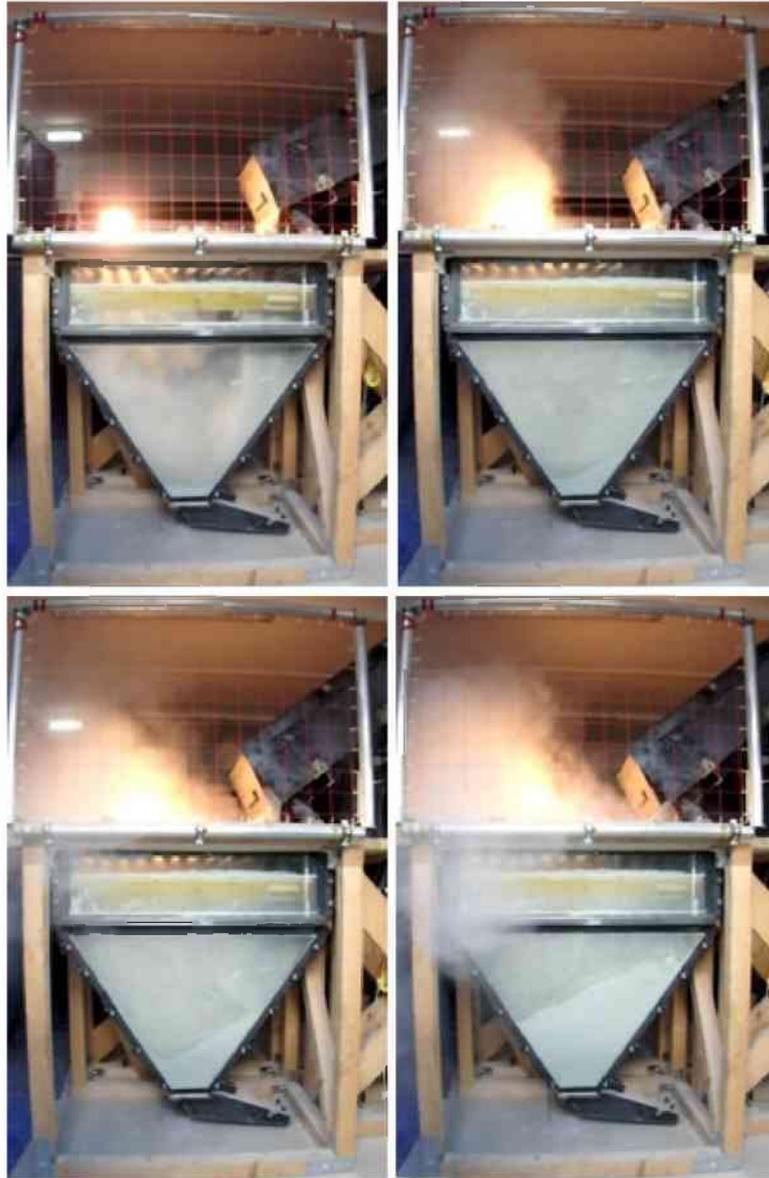


Abb. 6.7 Kippversuch mit Leitblechen

6.2 Klappensystem

Das zweite näher betrachtete und getestete System war ein Klappensystem, das die gesamte Bunkeröffnung abgedeckt hat. Die Wirkungsweise ist dieselbe wie zuvor bei den Leitblechen. Der aufsteigende Staub-Luftstrom soll gebremst und am Austreten aus dem Bunker gehindert werden. Da wie erwähnt hier die gesamte Öffnung abgedeckt wird, wird auch der aus der Mitte aufsteigende Teil blockiert, wodurch die Staubausbreitung noch wirkungsvoller verhindert werden soll. Solche Klappensysteme sind bereits kommerziell zu erwerben, ihre Einfachheit und Wartungsarmut machen sie zu einer ausgezeichneten Alternative.

Der Aufbau und die Funktionsweise solcher kommerziell erwerblicher Klappensysteme wurden bereits in Kapitel 2 vorgestellt.

Durch die engen Bedingungen und baulichen Beschränkungen im Versuchsbunker konnte nicht direkt ein Pendelklappensystem eingebaut werden. Es bestand die Befürchtung, dass durch die sich ergebenden engen Einfüllspalten bei einem normalen Pendelklappensystem das Schüttgut nicht mehr einwandfrei in den Bunker eingekippt werden kann und es zu Blockaden und Brückenbildung kommen könnte. Aus diesem Grund wurde für den Versuchsbunker ein anderer Ansatz gewählt, die Funktionsweise blieb jedoch dieselbe.

Anstatt die Klappen pendelnd aufzuhängen und das Material über schräge Platten in den Bunker gleiten zu lassen wurden die Klappen mittels federnden Scharnieren direkt an den Querträgern angebracht. Eine senkrecht am nächsten Querträger angebrachte Stahlplatte wurde als Gegenstück zum Schließen verwendet.

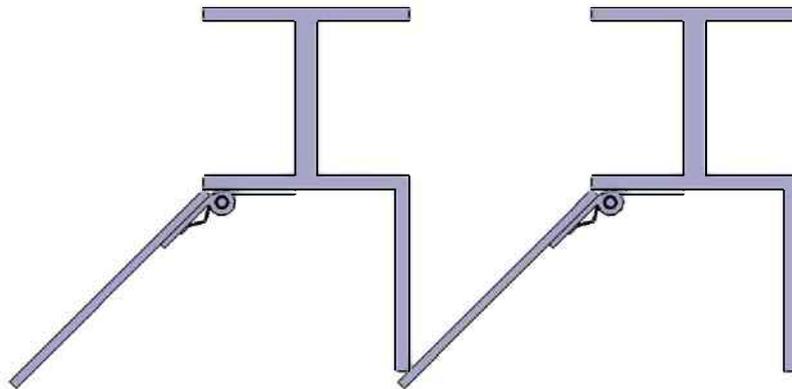


Abb. 6.8 Gefedertes Klappensystem

Beim Auftreffen des Materials auf die gefederten Klappen werden diese aufgedrückt und das Material kann senkrecht nach unten durchfallen. Aus Abb. 6.8 ist ersichtlich, dass bei der Verwendung pendelnder Klappen diese klein ausfallen würden. Die senkrechten Platten wären die pendelnd aufgehängten Klappen und der sich ergebende Spalt wäre nur schmal. In Abb. 6.9 ist das im Versuchsbunker eingebaute Klappensystem zu sehen. Es ist zu erkennen, dass solche Systeme das Fassungsvermögen kaum beeinflussen.



Abb. 6.9 Klappensystem im Modellbunker

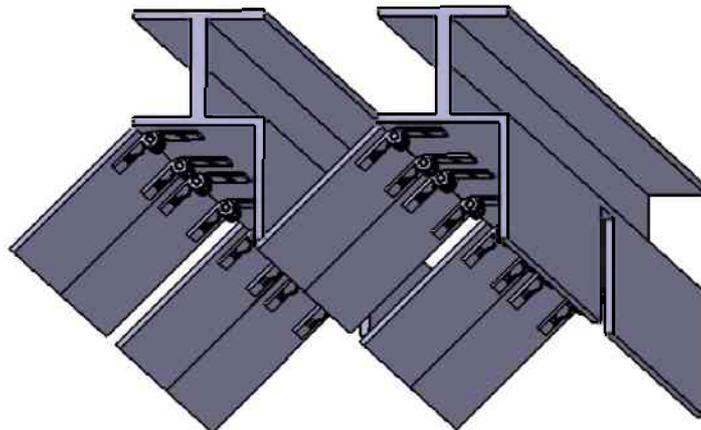


Abb. 6.10 Klappensystem von unten

Beim Heckkippen bleiben die Klappen der gesamten vorderen Hälfte geschlossen, bei seitlichem Abkippen beinahe alle Klappen der gegenüberliegenden Seite. Diese geschlossenen Klappen wirken wie die Leitbleche im vorhergehenden Punkt. Durch die geöffneten Klappen hindert das einströmende Material den Staub am Austreten, bis die Klappen schließen.

Im tatsächlichen Bunker kann und sollte ein Pendelklappensystem eingesetzt werden, da die hier im Versuchsbunker verwendeten Federklappen zu anfällig gegen Staub waren, um dauerhaft funktionieren zu können. Durch den Staub wurden die Scharniere schwergängiger, bis irgendwann die Federkraft nicht mehr zum Schließen der Klappen ausreicht.

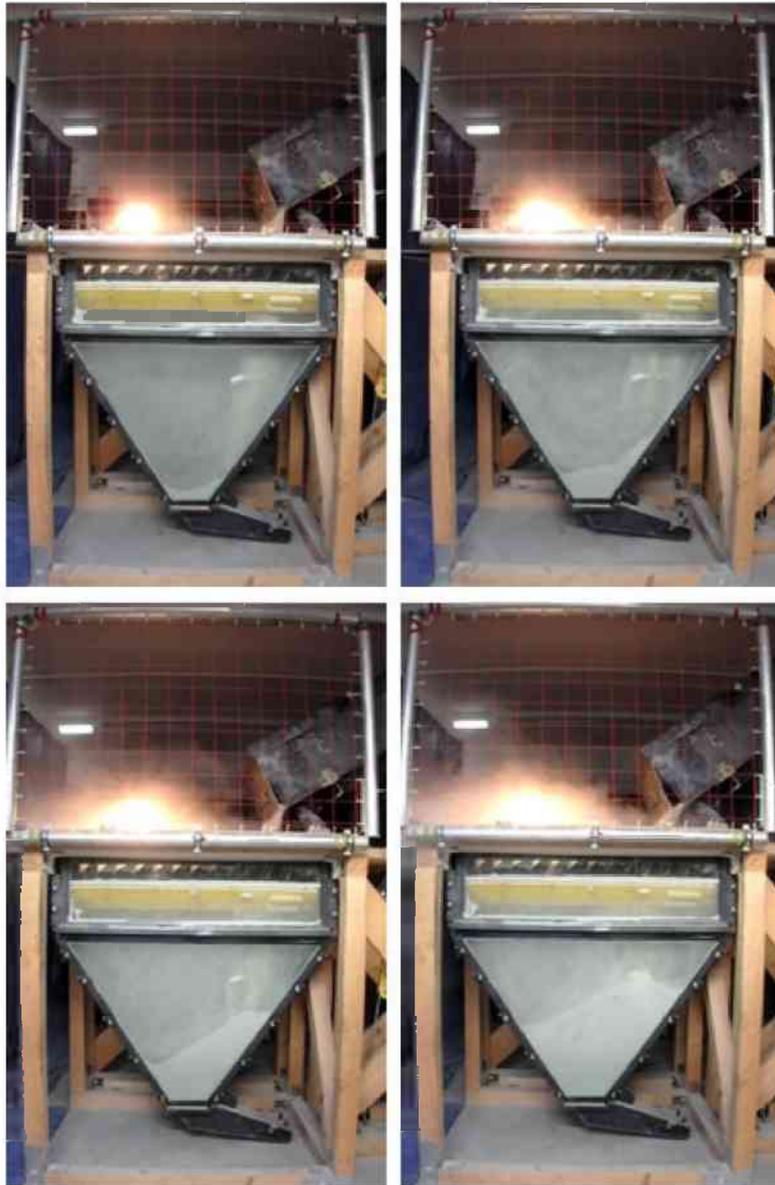


Abb. 6.11 Kippversuch mit Klappensystem



Abb. 6.12 Vergleich Staubentwicklung Standard (links), Leitbleche (mitte), Klappensystem (rechts)

6.3 Elektroentstauber

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, wird auf eine Ladung eine Kraft F_E in Richtung des Potenzialgefälles ausgeübt, wenn man sie in ein elektrisches Feld bringt. Die Potenzialdifferenz wird durch die Feldstärke E beschrieben.

$$F_E = q * E \quad (1)$$

Im Verschiebungsraum eines Elektroentstaubers müssen unipolare Ladungen erzeugt werden, die die Staubteilchen aufladen. Außerdem muss ein elektrisches Feld von ausreichender Stärke generiert werden, um eine Kraftwirkung auf die geladenen Teilchen zu erzielen. Das Potenzialgefälle ist in der Nähe des Sprühdrahtes am größten, wodurch es, bei ausreichend hoher Spannung, zu einer Koronaentladung kommt. Eine Koronaentladung ist eine elektrische Entladung in einem nichtleitenden Medium. Die durch diese Entladung entstehenden negativen Ladungen bewegen sich zur Niederschlagselektrode. Für eine solche Koronaentladung ist hochgespannter Gleichstrom notwendig, der durch einfache Transformatoren und Gleichrichter erzeugt werden kann. Der im Verschiebungsraum

auf tretende Stromfluss wird durch die Anzahl und die Geschwindigkeit der Ladungen bestimmt. [vgl. 4]

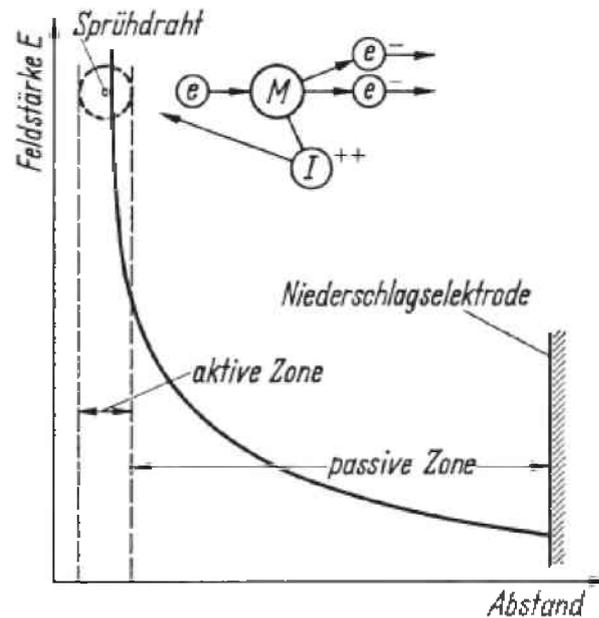


Abb. 6.13 Ladungserzeugung im Sprühfeld [4]

Die freien Elektronen, die sich in der Umgebung des Sprühdrahtes befinden, werden in diesem Potenzialgefälle stark beschleunigt. Treffen sie mit ausreichender Geschwindigkeit auf Gasmoleküle, so können weitere freie Elektronen aus dem Gas abgespalten werden, wodurch positiv geladene Gasionen entstehen, oder die Gasmoleküle nehmen die Elektronen auf, wodurch negative Gasionen entstehen. Dies geschieht vor allem im Bereich des hohen Potenzialgefälles, der aktiven Zone. Die positiven Ionen werden vom Sprühdraht angezogen, die negativen Ladungen werden durch die Kraftwirkung des elektrischen Feldes zur Niederschlagselektrode hin verschoben. So wird der gesamte Verschiebungsraum mit Ladungen gefüllt. Ein Maß für diese Ladungen ist der Sprühstrom.

Die Mindestspannung, die zur Entstehung einer Koronaentladung, führt wird Koronaeinsatz- oder Koronaanfangsspannung genannt. Um eine stabile Korona zu generieren, benötigt man neben dem erwähnten hohen Potenzialgefälle in der aktiven Zone auch eine gewisse Raumladung in der passiven Zone, da es sonst bereits bei leichter Überschreitung der Koronaeinsatzspannung zu einer Funkenentladung kommt. Dabei wird die erzeugte Ladung in einem Funkenüberschlag abgegeben. Eine solche Entladung ist für die Entstaubung ungeeignet und bringt außerdem das elektrische Feld zum Zusammenbrechen.

In Abbildung 6.14 sind Strom-Spannungskurven dargestellt, die für einen reibungslosen Betrieb eines Elektroentstaubers von großer Bedeutung sind. Sie geben den Sprühstrom und die Durchbruchfeldstärke an. Die Durchbruchfeldstärke ist abhängig von der Art des Gases und seinem Zustand wie Temperatur und Druck. Auch die Art der Korona, positiv oder negativ, spielt eine Rolle. In Elektroentstaubern wird meist mit negativer Korona gearbeitet, da positive Koronen eine wesentlich niedrigere Durchbruchfeldstärke besitzen. Auch die Vorgänge an der Niederschlagselektrode haben Einfluss. So kann es an der Niederschlagselektrode zu einer Entladung in der Staubschicht kommen, dem sogenannten Rücksprühen. Dadurch entstehen positive Ionen, die in den Entstaubungsraum treten und dort negativ geladene Staubteilchen neutralisieren oder zu Überschlägen führen, die dazu führen, dass die Koronaspannung nicht mehr aufrechterhalten werden kann. [vgl. 4]

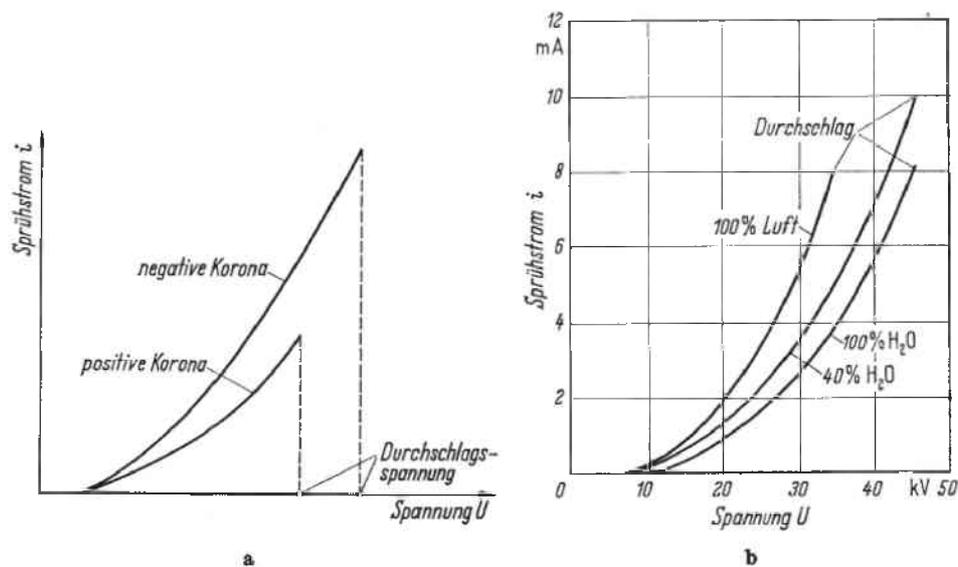


Abb. 6.14 Strom-Spannungskurven bei der Elektroentstaubung [4]

Die tatsächliche Koronaeinsatzspannung muss experimentell bestimmt werden.

Nach White lässt sich das elektrische Feld an der Oberfläche eines runden Drahtes wie folgt abschätzen:

$$E_0 = 3 * 10^6 * f * (sg + 0,03 * \sqrt{sg/r_w}) \quad (2)$$

- E_0 Koronaeinsatzfeld
- f Rauigkeitsfaktor
- sg relative Gasdichte
- r_w Radius Draht

Daraus ergibt sich die Koronaeinsatzspannung

$$V_0 = E_0 * r_w * \ln\left(\frac{d}{r_w}\right) \quad (3)$$

V_0 Koronaeinsatzspannung
 d $(4/\pi)W$ für Plattenabscheider
 W Abstand Draht - Platte

Die Durchbruchfeldstärke lässt sich laut Turner wie folgt abschätzen:

$$E_s = 6,3 * 10^5 \left(\frac{273 * P}{T}\right)^{0,8} \quad (4)$$

E_s Durchbruchfeldstärke
 T Absolute Temperatur
 P Gasdruck in atm

Das elektrische Feld ist am stärksten entlang der kürzesten Strecke zwischen Draht und Platte. Es lässt sich, außer nahe am Draht, gut abschätzen durch:

$$E_{max} = \frac{V}{W} \quad (5)$$

V angelegte Spannung

Das elektrische Feld ist nicht einheitlich. Laut Turner ist das durchschnittliche Feld in einem Elektroabscheider

$$E_{av} = \frac{E_{max}}{K} \quad (6)$$

K Konstante abhängig von der Filterkonfiguration und Rücksprühung, hier 1,75

Der Sprühstrom in einem elektrischen Feld ergibt sich aus der Anzahl der Ladungen, der beaufschlagten Fläche und der Ionengeschwindigkeit $u_i \cdot E$. Es gilt daher die Beziehung

$$i = n * e * S * u_i * E \quad (7)$$

i	Sprühstrom (A)	S	beaufschlagte Fläche (m ²)
n	Anzahl der Ladungen/m ³	u_i	Ionenbeweglichkeit (m ² /V*s)
e	Elementarladung (C)	E	Feldstärke (V/m)

Die Ionenbeweglichkeit beträgt bei Luft unter atmosphärischen Bedingungen etwa 1,8 cm/s pro V/cm (cm²/Vs). Sie muss ebenfalls experimentell bestimmt werden. [vgl. 4, 19]

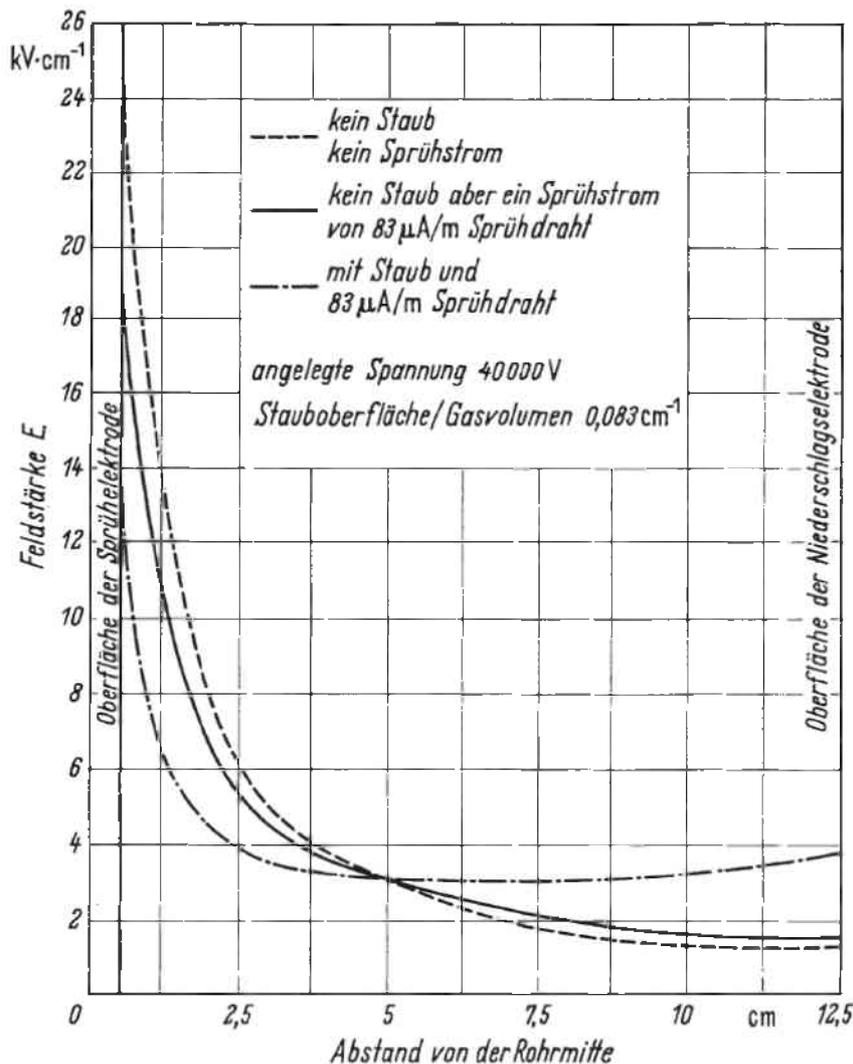


Abb. 6.15 Feldstärkeverlauf in einem Rohr-Elektroabscheider [4]

6.3.1 Aufladung der Teilchen

6.3.1.1 Aufladung durch die Wirkungen des elektrischen Feldes

Bei der Aufladung durch das elektrische Feld werden nur Stoßvorgänge der Ladungen und Partikel berücksichtigt. Die Ladungen folgen den elektrischen Feldlinien. In der Umgebung von Staubteilchen werden die Feldlinien verzerrt, da der Staub eine größere Dielektrizitätszahl besitzt als Luft (siehe Abbildung 6.16). Daher fließen den Staubteilchen mehr Ladungen zu, als ihrem Querschnitt entspricht. [vgl. 4]

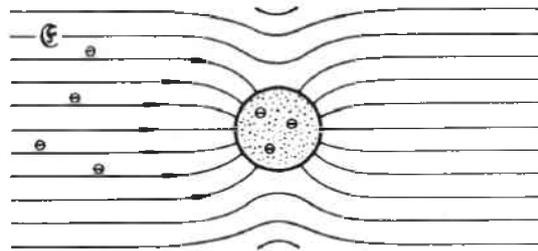


Abb.6.16 Verlauf elektrischer Feldlinien in der Nähe eines Staubteilchens [4]

Die Aufladung durch das elektrische Feld errechnet sich nach:

$$q_f(t) = \frac{q_s * t}{t + \tau_f} \quad (8)$$

q_f Ladung durch das elektrische Feld

q_s Grenzlading $t = \infty$

τ_f Zeitkonstante

$$q_s = \left(\frac{3 * \epsilon}{\epsilon + 2} \right) * \pi * \epsilon_0 * E * D_p^2 \quad (9)$$

ϵ Dielektrizitätskonstante; Für Kalk: $\epsilon = 2,6$

E Elektrisches Feld

D_p Partikeldurchmesser

ϵ_0 Permeativität des Vakuums $\epsilon_0 = 8,845 * 10^{-12} \text{C}^2/\text{Nm}^2$

Nach Untersuchungen von Lowe und Lucas ist die maximale Aufladung wegen der hohen Ionenkonzentration von 10^8 bis 10^9 Elementarladungen/cm³ im Elektroentstauber in weniger als 1/10 Sekunde erreicht. Man kann daher praktisch immer mit der Grenzladung rechnen. [vgl. 4, 19]

$$q_s = q_f \quad (10)$$

6.3.1.2 Aufladung durch molekulare Diffusion

Für kleine Teilchen wie z. B. $d < 0,1 \mu\text{m}$ verschwindet der Einfluss der Felddaufladung. Die Stoßvorgänge zwischen Ladungen und Staubteilchen sind für diesen Bereich vorwiegend nur noch eine Folge der Brown'schen Bewegung.

Die Diffusionsladung ergibt sich nach White aus

$$q_d(t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot k \cdot T \cdot D_p}{e} * \ln\left(1 + \frac{t}{\tau_d}\right) \quad (11)$$

- q_d Partikelladung durch Diffusion
- k Boltzmann Konstante $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
- e Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- T Absolute Temperatur
- τ_d Charakteristische Zeit für Diffusionsladung

$$\tau_d = \frac{\epsilon_0 \cdot \sqrt{8 \cdot m \cdot k \cdot \pi \cdot T}}{e^2 \cdot N \cdot D_p} \quad (12)$$

- m Ionenmasse
- N Ionenanzahl pro Volumen

Laut Crawford und Licht sind $N = 2 \cdot 10^{15}$ Ionen/m³ und $m = 5,3 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ typische Werte.

Die Partikelladung ergibt sich aus:

$$q_p = q_f + q_d \quad (13)$$

q_p Ladung des Partikels

Teilchen- größe in μm	Die in der Zeit t [s] aufgenommenen Elementarladungen							
	durch Feldaufladung				durch Diffusionsaufladung			
	t [s]				t [s]			
	0,01	0,1	1,0	∞	0,01	0,1	1,0	10
0,2	0,7	2	2,4	2,5	3	7	11	15
2,0	72	200	244	250	70	110	150	190
20,0	7200	20000	24000	25000	1100	1500	1900	2300

$r_a = 10 \text{ inch (25,4 cm)}$,

$r_i = 0,3 \text{ inch (0,762 cm)}$,

$n^* \approx 5 \cdot 10^7 \text{ Elementarladungen/cm}^3$,

$E \approx 2 \text{ kV/cm}$,

$i_1 = 40 \mu\text{ A/ft (1,31 } \mu\text{A/cm)}$,

$3 \epsilon_r / (\epsilon_r + 2) = 1,8$.

Abb. 6.17 Anzahl Ladungen auf einem Teilchen bei verschiedenen Aufladungsmechanismen [4]

Es zeigt sich, dass die Zahl der zugeführten Ladungen bei Teilchen von etwa $1 \mu\text{m}$ durch Feldaufladung und Diffusion etwa gleichgroß sind. [vgl. 4, 19]

6.3.2 Wandergeschwindigkeit

Die Wandergeschwindigkeit ist jene Geschwindigkeit, mit der die geladenen Partikel in Richtung Platte driften.

$$w_e = \frac{q^* E}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot D_p} \quad (14)$$

η Dynamische Viskosität = $17 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$

Die Geschwindigkeit steigt proportional mit der Feldstärke. Im Elektroentstauber können prinzipiell alle Teilchengrößen abgeschieden werden. Die Feldstärke sollte möglichst hoch gehalten werden, was aber durch die Durchbruchfestigkeit des Gases begrenzt ist. [vgl. 4, 20]

6.3.3 Abscheidegrad

Die Bestimmung des Abscheidegrades eines Elektrofilters kann analytisch mithilfe der Deutsch-Anderson-Gleichung erfolgen:

$$\eta_t = 1 - e^{\left(-\frac{A \cdot w_e}{\dot{V}}\right)} \quad (15)$$

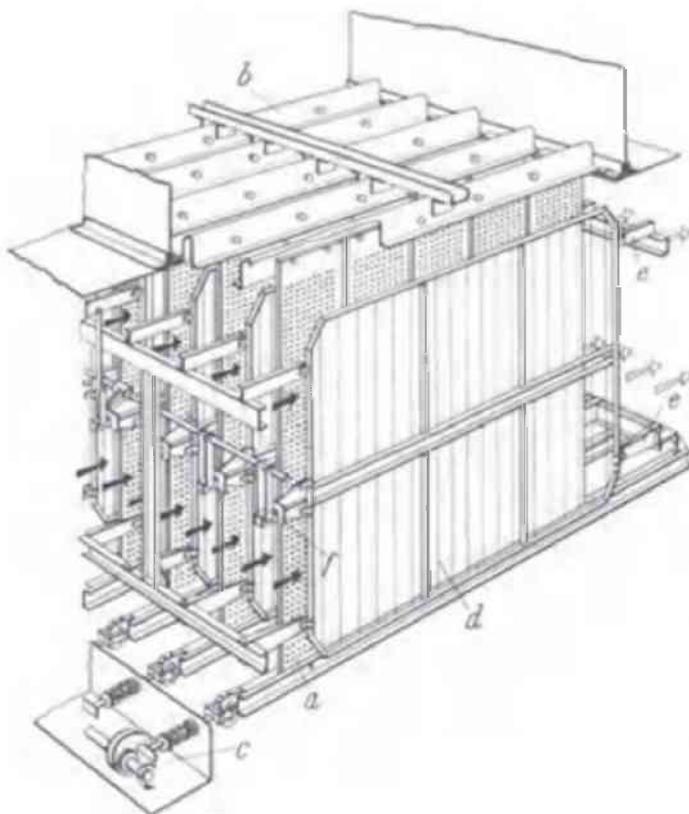
A Niederschlags Elektrodenfläche [m²]

\dot{V} Volumenstrom [m³/s]

η_t Abscheidegrad

Die tatsächliche Güte eines Elektroabscheiders lässt sich nur experimentell bestimmen. Die hier angegebenen Formeln sind größtenteils empirisch und dienen nur einer groben Abschätzung der tatsächlichen Werte. Sie sind die Grundlage für den Bau, Entwurf und die Weiterentwicklung von Elektroentstaubern. [vgl. 4, 20]

6.3.4 Aufbau und Elektroden



a Niederschlags Elektroden, b Träger für a, c Klopfvorrichtung für Niederschlags Elektroden, d Sprühelektrode, e Träger für Sprühelektrodenrahmen, f Klopfhämmer für Sprühelektroden.

Abb. 6.18 Aufbau Elektroentstauber [4]

In Abbildung 6.18 ist der Aufbau eines Plattenelektroentstaubers aufgezeigt. Die plattenförmigen Niederschlagselektroden sind parallel zueinander angeordnet und haben einen Abstand zueinander von 200 mm bis 300 mm. Das Gas strömt für gewöhnlich mit einer Geschwindigkeit von 1 bis 4 m/s durch den Entstauber, in Ausnahmefällen auch schneller. In der Mitte zwischen den Niederschlagselektroden sind die Sprühdrähte angebracht. In Plattenabscheidern werden die Sprühdrähte oft in Rahmen gespannt. Sie sind isolierend im Gehäuse aufgehängt.

Die durch das elektrische Feld hervorgerufenen Kräfte auf die Staubpartikel bewirken deren Verschiebung hin zu den Niederschlagselektroden, wo sie haften bleiben. Die Partikel gelten als abgetrennt, wenn die Kräfte, die sie an der Niederschlagselektrode halten, groß genug sind, um sie trotz der Schleppkräfte der vorbeiströmenden Luft festzuhalten. Um die Entstaubung effektiv aufrechtzuerhalten, ist es notwendig, die Niederschlagselektroden regelmäßig zu reinigen. Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, ist die trockene oder nasse Abreinigung möglich. Für gewöhnlich wird in Elektroentstaubern eine trockene Reinigung in Form von Rütteln oder Abklopfen eingesetzt. Durch die erzeugten Schwingungen löst sich der Staub und fällt nach unten in Auffangbehälter oder Bunker. Als Reinigungsvorrichtungen werden meist Fall- oder Federhämmer eingesetzt. Auch Vibratoren werden verwendet, erfordern aber höheren Aufwand.

Auch die Sprühelektroden müssen regelmäßig gereinigt werden, da sonst der Sprühstrom stark abnehmen kann. Dies wird ebenfalls durch Rütteln oder Klopfen bewirkt. Zu berücksichtigen ist dabei, dass bei aktivem elektrischen Feld die Haftkräfte um das bis zu 20fache höher sind als ohne Feld. [vgl. 4]

Sprühelektroden werden in verschiedensten Formen und Bauarten hergestellt. Von einfachen dünnen Drähten mit 0,5 bis 3 mm Stärke über Vierkant-, Stern- und Dorndrähte. Einige mögliche Bauformen sind in Abbildung 6.19 dargestellt. Um den Abstand zu den Niederschlagselektroden zu wahren, werden die Sprühdrähte entweder durch Gewichte belastet oder in Rahmen eingespannt. [vgl. 4]

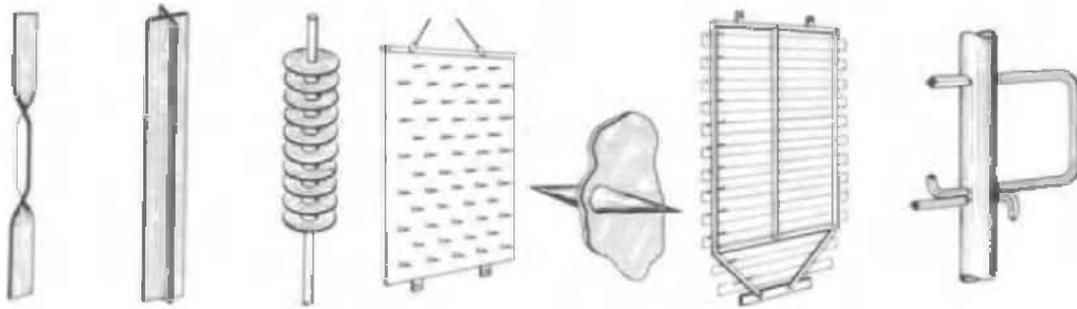


Abb. 6.19 Ausführungen von Sprühelektroden [4]

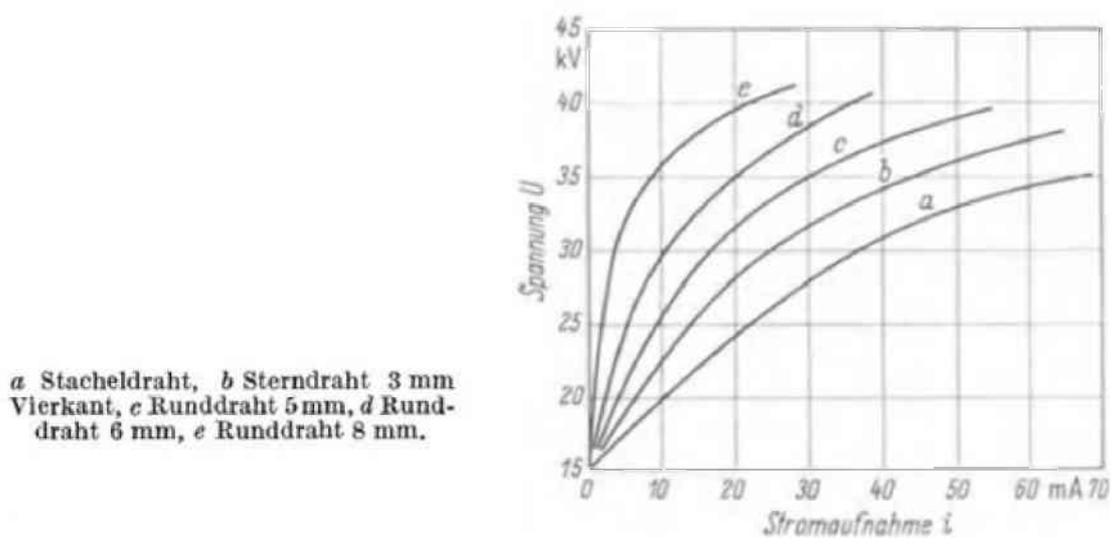
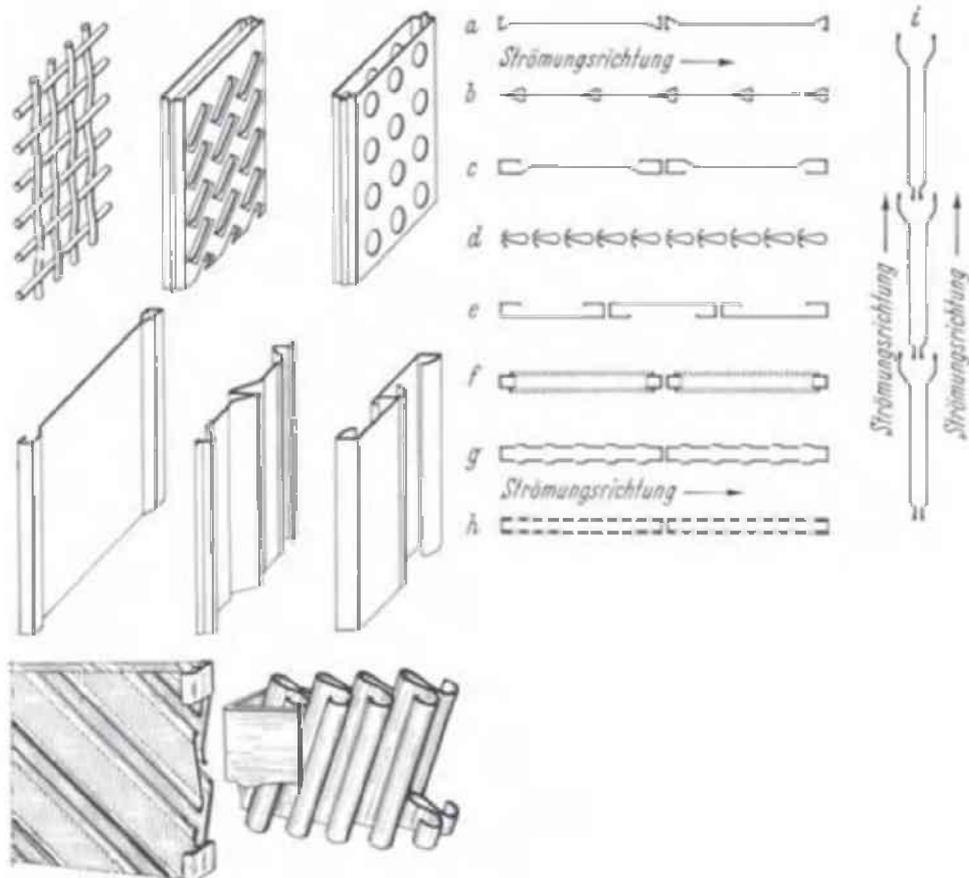


Abb. 6.20 Strom-Spannungskurven verschiedener Sprühdrahtformen [4]

Die Anzahl der erzeugten Ladungen ist abhängig von der Oberflächenkrümmung. Stahl bzw. Chromstahl haben sich als effektives Elektrodenmaterial herausgestellt. Auch reines Aluminium wird verwendet. Kupfer und Messing eignen sich hingegen nicht. [vgl. 21]

In Abbildung 6.21 sind Bauformen von Niederschlags Elektroden dargestellt. Von der Baugröße her erreichen Niederschlags Elektroden Dimensionen von 15 m Höhe, meist aber 5 bis 9 m. Die Länge liegt meist bei maximal 7 m. Sprühdrahte haben einen Abstand zueinander von 100 mm bis 200 mm. [vgl. 4]



a) Plattenelektrode (Büttner); b) Plattenelektrode (Research-Cottrell); c) Plattenelektrode (Rothe-
mühle); d) Rinnenelektrode (Walther); e) Plattenelektrode (Lurgi); f) Käfigelektrode (Koppers Ver-
St., aus Streckmetall); g) Fangtaschenelektrode (Lurgi); h) Lochkastenelektrode (Elex, Rothemühle);
i) Tulpenelektrode (allgemein für Vertikal-Elektroentstauber);
a) und b) einfache Plattenelektroden; c) bis e) Plattenelektroden mit Fangrinnen; f) bis i) Fang-
raumelektroden.

Abb. 6.21 Formen von Niederschlagselektroden [4]

6.3.5 Elektrische Einrichtungen

Zum Betrieb eines Elektroentstaubers ist Gleichstrom mit einer Spannung knapp unterhalb der Durchbruchsspannung nötig. Bei den elektrischen Einrichtungen wird auch auf eine möglichst hohe Lebensdauer und auf geringen Kontroll- und Wartungsbedarf geachtet. Der benötigte Gleichstrom wird durch das Gleichrichten von hochtransformiertem Wechselstrom erzeugt. Es werden keine besonderen Ansprüche an die elektrischen Anlagen gestellt, wodurch handelsübliche Geräte verwendet werden können. [vgl. 4]

6.3.6 Konstruktion

Die Abscheidefläche ist durch den vorhandenen Platz im Bunker begrenzt. Es muss also ein Kompromiss zwischen Abscheideleistung und Bunkervolumenverlust geschlossen werden.

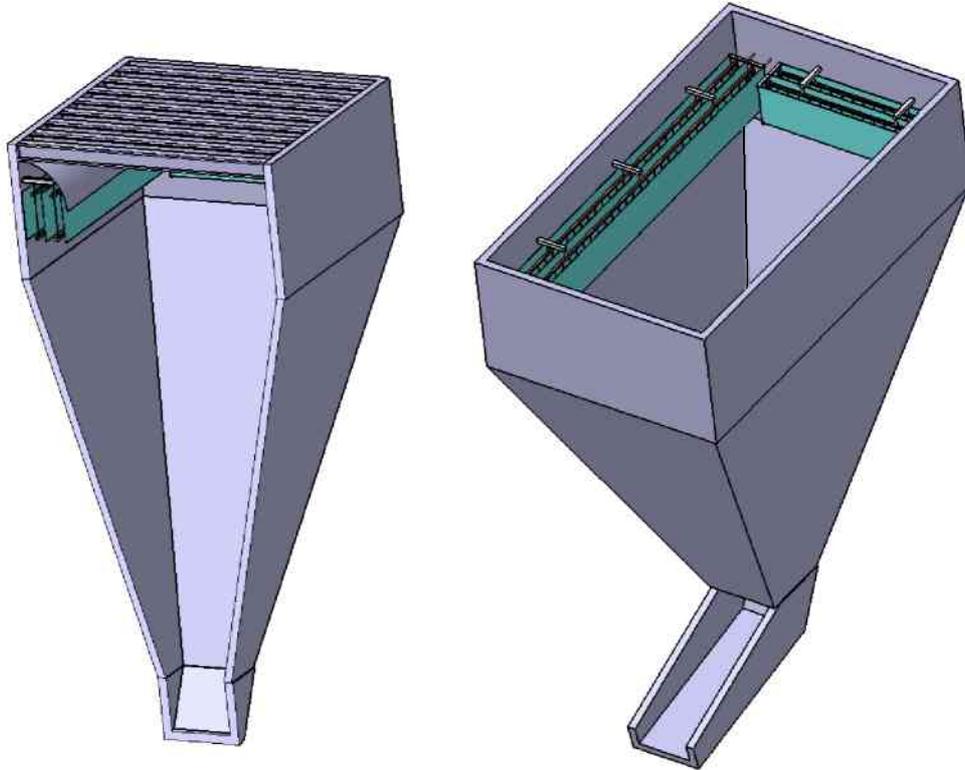


Abb. 6.22 Bunker mit Elektroabscheider

Unter halbrunden Leitblechen, die den Abscheider vor dem eingeschütteten Material schützen und den Staub am Aufsteigen hindern sollen, werden an den Abkippsseiten gegenüberliegenden Bunkerwänden Sprüh- (hier rot) und Niederschlags Elektroden (hier grün) montiert.

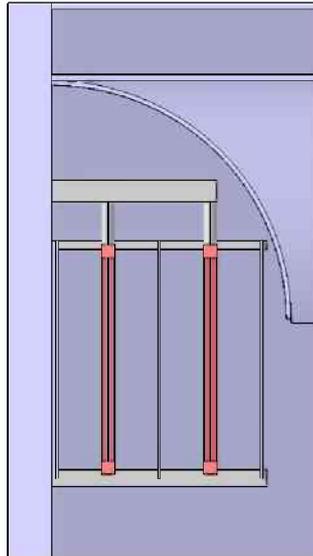


Abb. 6.23 Elektroabscheider Detail

Die Niederschlagselektroden haben eine Länge von 4,8 m und eine Höhe von 0,55 m. Der Abstand zwischen den Niederschlagselektroden beträgt 20 cm. Sie bestehen aus 2 mm starken Stahlplatten. Die Niederschlagselektroden werden geerdet und mit dem positiven Pol der Gleichstromquelle verbunden.

Die Sprühelektroden sind zwischen den Niederschlagselektroden angebracht. Sie bestehen aus 1 mm dünnen Stahldrähten, die in einem Rahmen montiert sind. Die Drähte haben einen Abstand von 15 cm zueinander. Die Sprühelektroden sind 10 cm von den Niederschlagselektroden entfernt aufgehängt. Alle Größenangaben beziehen sich auf den tatsächlichen Bunker.

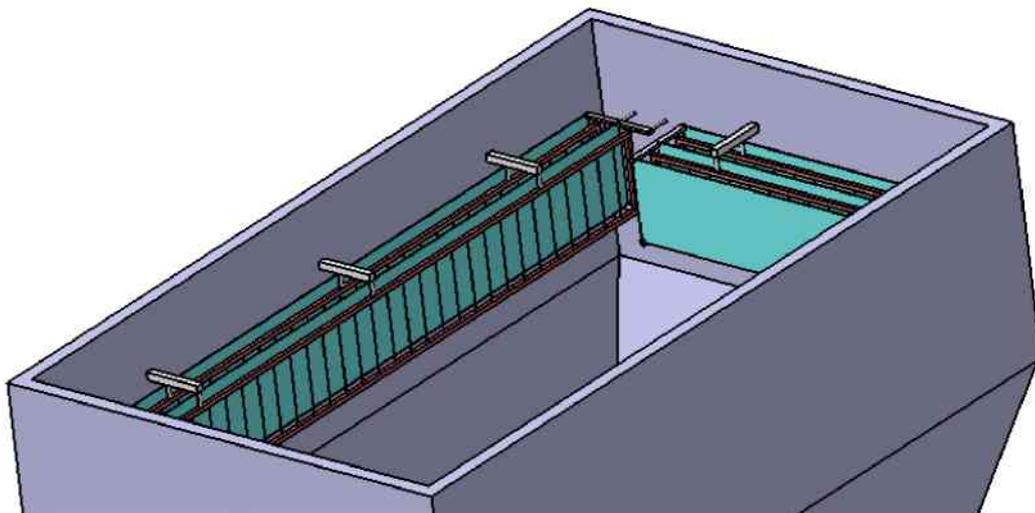


Abb. 6.24 Elektroden

Die Sprühelektroden müssen gut gegen die Niederschlagslektroden und den Bunker isoliert werden. Sie werden mit dem negativen Anschluss der Gleichstromquelle verbunden.

Nach Gleichung (2) ergibt sich das Koronaeinsatzfeld zu:

$$E_0 = 3 * 10^6 * f * (sg + 0,03 * \sqrt{sg/r_w}) = 7,025 * 10^6 \text{ V/m}$$

Für den Oberflächenfaktor f wurde 1 für glatte Oberflächen gewählt. Die relative Gasdichte beträgt 1, der Drahradius r_w beträgt 0,5 mm.

Daraus und aus Gleichung (3) ergibt sich die Koronaeinsatzspannung:

$$V_0 = E_0 * r_w * \ln\left(\frac{d}{r_w}\right) = 11370 \text{ V}$$

Für den Plattenabscheider errechnet sich d aus $(4/\pi)*W$. Der Abstand zwischen Draht und Platte W beträgt 10 cm.

Aus Gleichung (4) ergibt sich die Überschlagsfeldstärke:

$$E_s = 6,3 * 10^5 \left(\frac{273*P}{T}\right)^{0,8} = 587351 \text{ V/m}$$

Für eine Temperatur von 25°C und einem Druck von 1 atm.

Die maximale Feldstärke liegt etwas unterhalb der Überschlagsfeldstärke. Es wird angenommen:

$$E_{\max} = E_s$$

$$E_{\max} = \frac{V}{W} \Rightarrow V = E_{\max} * W = 58735 \text{ V}$$

Die angelegte Spannung ergibt sich aus Gleichung (5).

Das elektrische Feld im Abscheider ist nicht gleichmäßig. Aus (6) ergibt sich daher die Durchschnittsfeldstärke:

$$E_{av} = 335629 \text{ V/m}$$

Mithilfe der Durchschnittsfeldstärke wird die Ladung eines Partikels bestimmt. Die Zeit t , die für die Diffusionsaufladung zur Verfügung steht, wird auf 0,25s geschätzt. Die Zeit wurde durch die Länge der Elektroden (0,55 m) und der geschätzten Aufstiegsgeschwindigkeit des Luft-Staubgemisches abgeschätzt.

$$q_p = q_d + q_f = 3,003 \cdot 10^{-17} C$$

Aus Gleichung (14) ergibt sich die Wandergeschwindigkeit der Teilchen in Richtung der Niederschlagelektrode:

$$w_e = \frac{q \cdot E}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot D_p} = 6,3 \text{ cm/s}$$

Mithilfe der Deutschgleichung (15) ergibt sich der Abscheidegrad aus der Wandergeschwindigkeit, der Niederschlagselektrodenfläche $A = 105600 \text{ cm}^2$ und dem Gasvolumenstrom $\dot{V} = 3840000 \text{ cm}^3/\text{s}$, ausgehend von einer geschätzten Aufstiegsgeschwindigkeit von 2 m/s.

$$\eta_t = 1 - e\left(-\frac{A \cdot w_e}{\dot{V}}\right) = 0,16$$

Der Abscheidegrad von 16% liegt zwar niedrig, da aber das Luft-Staubgemisch in den Leitblechen gefangen wird, steht die staubbeladene Luft im Abscheider, was den Abscheidegradwert, der nur für Durchströmen gedacht ist, erhöht.

Die kurze Seite des Elektroabscheiders errechnet sich analog.

7 Messergebnisse

In diesem Kapitel folgen nun die ermittelten Messergebnisse der Kippversuche im Versuchsbunker. Es wurden zwischen 3 und 4 Versuche je Kippseite und Einbau durchgeführt. Die Messergebnisse der Dosen- und Tuchmessungen werden in Tabellen und graphisch dargestellt. Bei den Heckkippversuchen ergab sich das Problem, dass Material aus der Abkippanlage in eine der Messdosen rieseln konnte. Daher müssen die Messwerte der Dose 1 bei den Heckkippversuchen ignoriert werden. Bei den Seitenkippversuchen entstand dieses Problem nicht. Die ungültigen Messergebnisse sind in den Tabellen rot markiert und wurden nicht in die Vergleichsgraphen miteingearbeitet. Um Seiten- und Heckkippversuche vergleichen zu können, werden die Seitenkippergebnisse in den Tabellen auch ohne die in Dose 1 enthaltene Menge angegeben. Die teilweise stark schwankenden Messergebnisse lassen sich auf die Unterschiede der Staubausbreitung in den verschiedenen Versuchen, aber auch auf die Veränderung des Materials während der Versuche zurückführen. Wie bereits zuvor erwähnt, veränderte sich das Material durch den Verlust an Feinanteil und die Neubildung von diesem durch die Umladung und Reibung. Das Material wurde zwischen den Leitblech- und Klappenversuchen ausgetauscht.

7.1 Messergebnisse Standard

7.1.1 Heckkipper

Versuch	Gewicht (*) trocken vorher	Gewicht (*) trocken nachher	STAUBGEWICHT TUCH HECK	[EINHEIT]
1	99,190	115,327	16,137	g
3	101,532	127,012	25,480	g
5	99,690	119,943	20,253	g
7	34,147	45,394	11,247	g

Tab. 7.1 Ergebnisse Tuchmessung Heckkipper Standard [24]

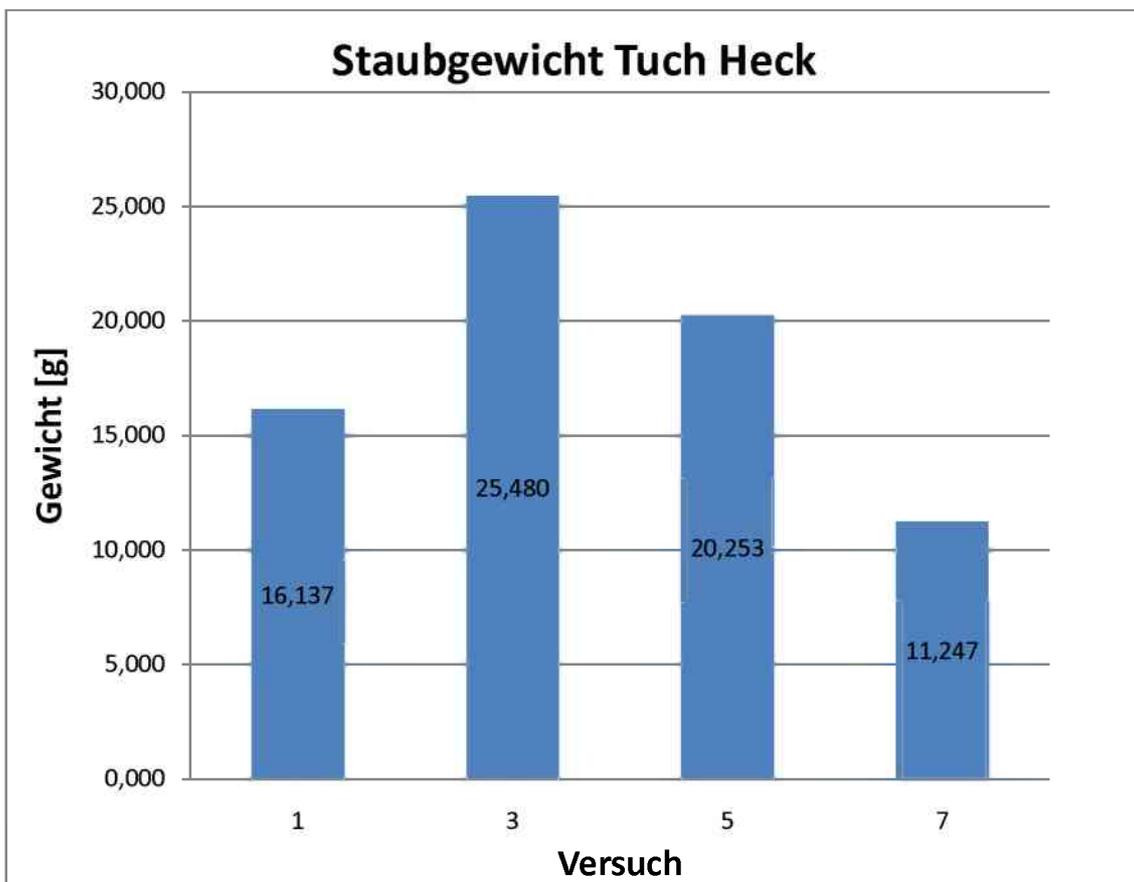


Abb. 7.1 Diagramm Ergebnisse Staubtuchmessung Heckkipper Standard [24]

7 Messergebnisse

Dosen - Messung V1		Dosendurchmesser 66,5mm		Dosenfläche 3473,23mm ²		
Dose	Gewicht vorher	Gewicht nachher		STAUBGE- WICHT HECK	[EINHEIT]	Bemerkung
1	10,567	10,652		0,085	g	nicht zu verwenden, da Material vom Kipper in die Dose gerieselt ist!
2	10,691	10,712		0,021	g	
3	10,578	11,183		0,605	g	
4	10,585	10,820		0,235	g	
5	10,683	10,704		0,021	g	
		Summe		0,967	g	
		Summe (ohne 1)		0,882	g	
Dosen - Messung V3						
1	10,564	10,626		0,062	g	nicht zu verwenden, da Material vom Kipper in die Dose gerieselt ist!
2	10,689	10,704		0,015	g	
3	10,598	10,818		0,220	g	
4	10,586	11,321		0,735	g	
5	10,682	10,698		0,016	g	
		Summe		1,048	g	
		Summe (ohne 1)		0,986	g	
Dosen - Messung V5						
1	10,565	10,590		0,025	g	nicht zu verwenden, da Material vom Kipper in die Dose gerieselt ist!
2	10,690	10,700		0,010	g	
3	10,578	10,702		0,124	g	
4	10,580	11,170		0,590	g	
5	10,682	10,692		0,010	g	
		Summe		0,759	g	
		Summe (ohne 1)		0,734	g	
Dosen - Messung V7						
1	10,567	10,624		0,057	g	nicht zu verwenden, da Material vom Kipper in die Dose gerieselt ist!
2	10,691	10,697		0,006	g	
3	10,578	10,641		0,062	g	
4	10,582	10,941		0,359	g	
5	10,686	10,691		0,005	g	
		Summe		0,489	g	
		Summe (ohne 1)		0,432	g	

Tab. 7.2 Ergebnisse Dosenmessung Heckkipper Standard [24]

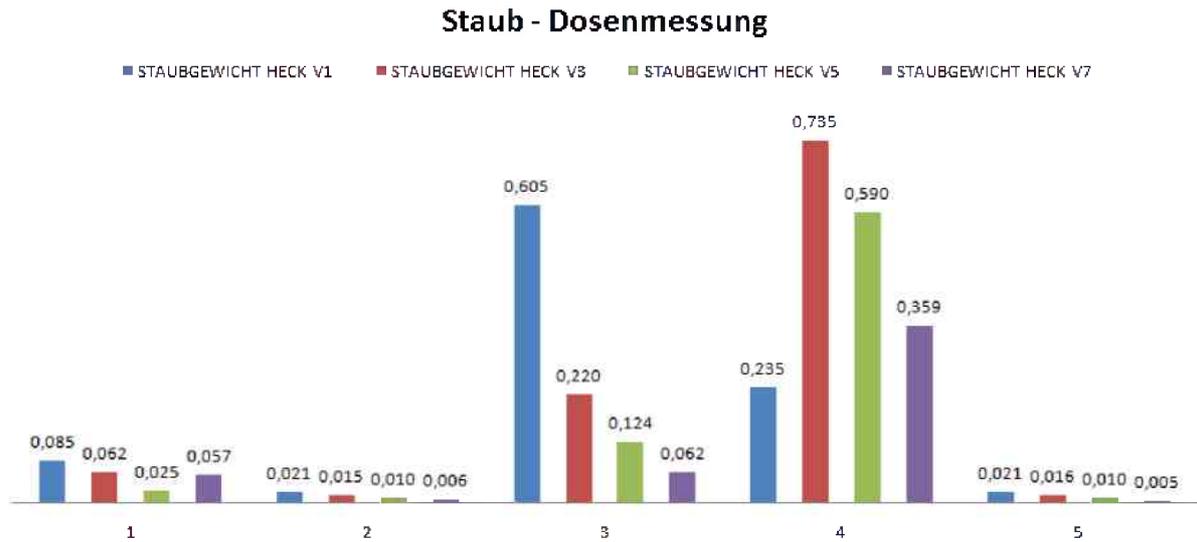


Abb. 7.2 Diagramm Dosenmessung Heckkipper Standard [24]

7.1.2 Seitenkipper

Versuch	Gewicht (*) trocken vorher	Gewicht (*) trocken nachher	STaubGEWICHT TUCH SEITE	[EINHEIT]
2	99,515	146,469	46,954	g
4	33,880	74,952	41,072	g
6	36,460	64,872	28,412	g

Tab. 7.3 Ergebnisse Tuchmessung Seitenkipper Standard [24]

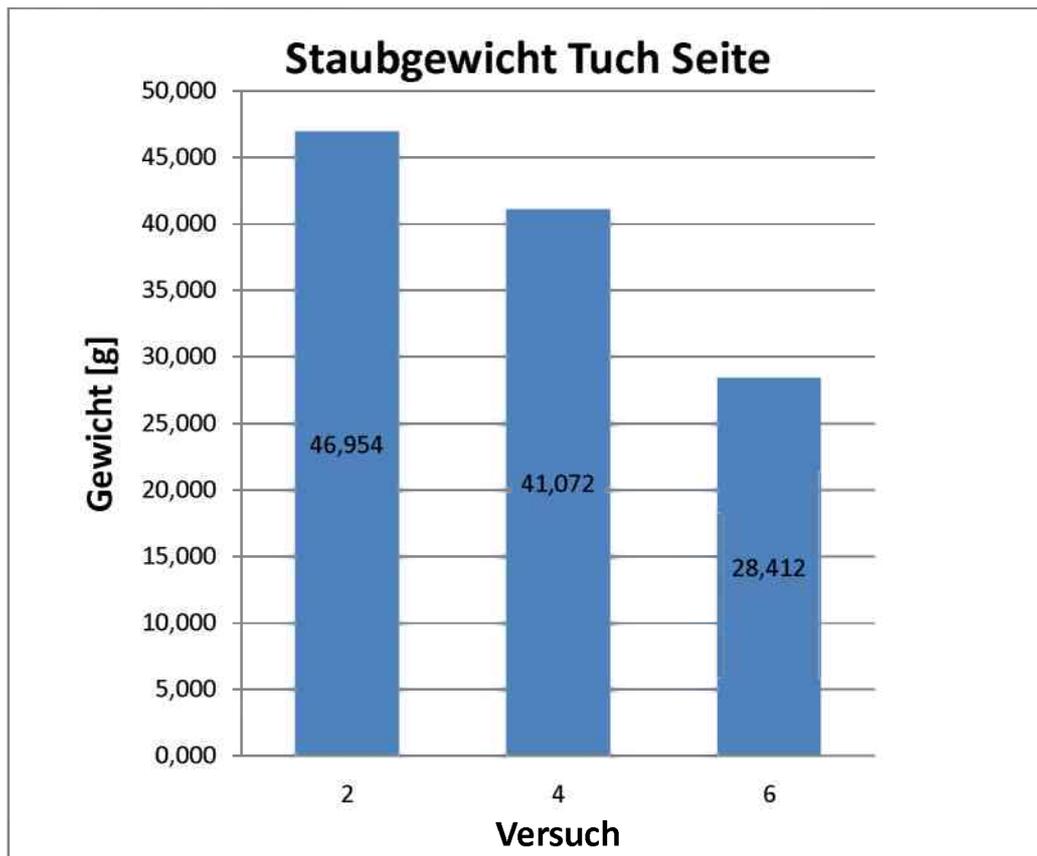


Abb. 7.3 Diagramm Ergebnisse Staubschichtmessung Seitenkipper Standard [24]

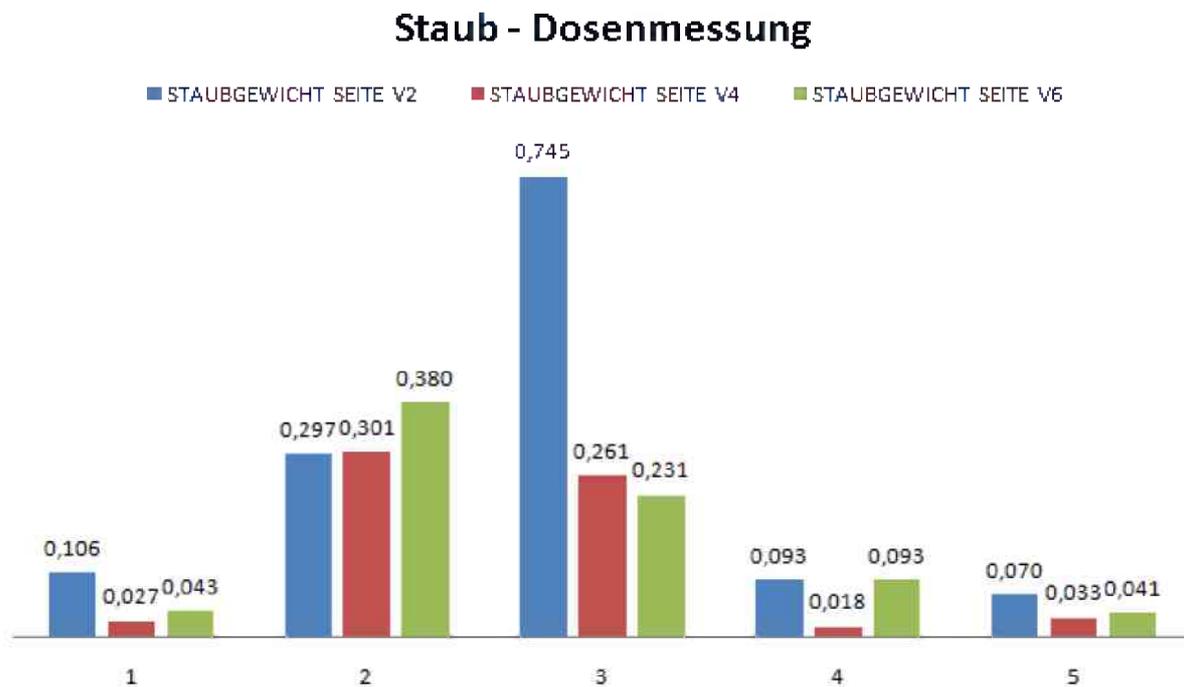


Abb. 7.4 Diagramm Dosenmessung Seitenkipper Standard [24]

Dosen - Messung V2		Dosendurchmesser 66,5mm		Dosenfläche 3473,23mm ²		
Dose	Gewicht vorher	Gewicht nachher		STAUBGE- WICHT HECK	[EINHEIT]	Bemerkung
1	10,563	10,669		0,106	g	
2	10,687	10,984		0,297	g	
3	10,576	11,321		0,745	g	
4	10,578	10,671		0,093	g	
5	10,680	10,750		0,070	g	
		Summe		1,311	g	
		Summe (ohne 1)		1,205	g	Zum Vergleich mit Heck
Dosen - Messung V4						
1	10,647	10,674		0,027	g	
2	10,748	11,049		0,301	g	
3	10,653	10,914		0,261	g	
4	10,651	10,669		0,018	g	
5	10,745	10,778		0,033	g	
		Summe		0,640	g	
		Summe (ohne 1)		0,613	g	Zum Vergleich mit Heck
Dosen - Messung V6						
1	10,620	10,663		0,043	g	
2	10,778	11,158		0,380	g	
3	10,636	10,867		0,231	g	
4	10,580	10,673		0,093	g	
5	10,734	10,775		0,041	g	
		Summe		0,788	g	
		Summe (ohne 1)		0,745	g	Zum Vergleich mit Heck

Tab. 7.4 Ergebnisse Dosenmessung Seitenkipper Standard [24]

7.2 Messergebnisse Leitbleche

7.2.1 Heckkipper

Versuch	Gewicht (*) trocken vorher	Gewicht (*) trocken nachher	STAUBGEWICHT TUCH HECK	[EINHEIT]
8	100,074	103,527	3,453	g
9	36,854	39,290	2,436	g
10	71,453	75,956	4,503	g
14	57,408	58,954	1,546	g

Tab. 7.5 Ergebnisse Tuchmessung Heckkipper Leitbleche [24]

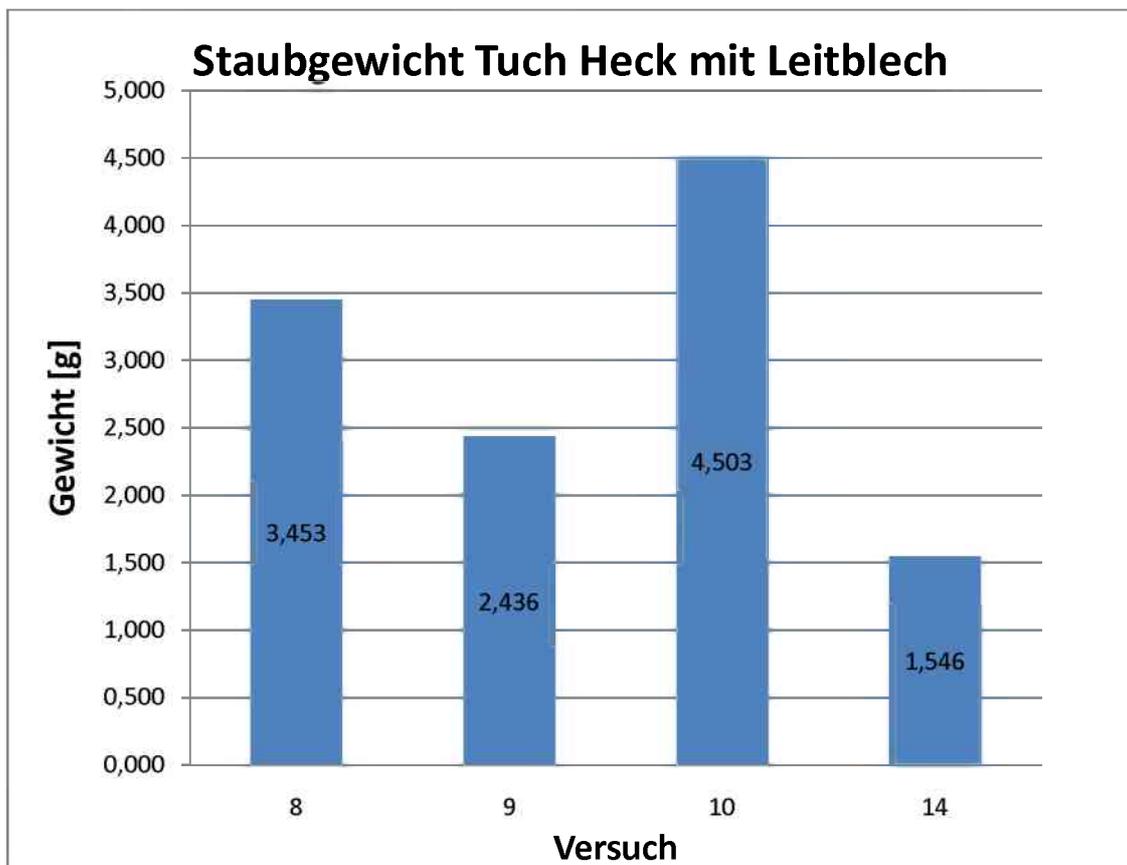


Abb. 7.5 Diagramm Ergebnisse Staubschmuckmessung Heckkipper Leitbleche [24]

7 Messergebnisse

Dosen - Messung V8		Dosendurchmesser 66,5mm		Dosenfläche 3473,23mm ²		
Dose	Gewicht vorher	Gewicht nachher		STAUBGE- WICHT HECK	[EINHEIT]	Bemerkung
1	10,557	10,608		0,051	g	nicht zu verwenden, da Material vom Kipper in die Dose geriesel ist!
2	10,681	10,715		0,034	g	
3	10,569	10,685		0,116	g	
4	10,574	10,707		0,133	g	
5	10,677	10,693		0,016	g	
		Summe		0,350	g	
		Summe (ohne 1)		0,299	g	
Dosen - Messung V9						
1	10,568	10,719		0,151	g	nicht zu verwenden, da Material vom Kipper in die Dose geriesel ist!
2	10,694	10,720		0,026	g	
3	10,577	10,736		0,159	g	
4	10,582	10,658		0,076	g	
5	10,687	10,690		0,003	g	
		Summe		0,415	g	
		Summe (ohne 1)		0,264	g	
Dosen - Messung V10						
1	10,571	10,668		0,097	g	nicht zu verwenden, da Material vom Kipper in die Dose geriesel ist!
2	10,701	10,713		0,012	g	
3	10,573	10,739		0,166	g	
4	10,580	10,727		0,147	g	
5	10,680	10,693		0,013	g	
		Summe		0,435	g	
		Summe (ohne 1)		0,338	g	
Dosen - Messung V14						
1	10,578	10,620		0,042	g	nicht zu verwenden, da Material vom Kipper in die Dose geriesel ist!
2	10,704	10,720		0,016	g	
3	10,578	10,654		0,076	g	
4	10,594	10,622		0,028	g	
5	10,683	10,696		0,013	g	
		Summe		0,175	g	
		Summe (ohne 1)		0,133	g	

Tab. 7.6 Ergebnisse Dosenmessung Heckkipper Leitbleche [24]

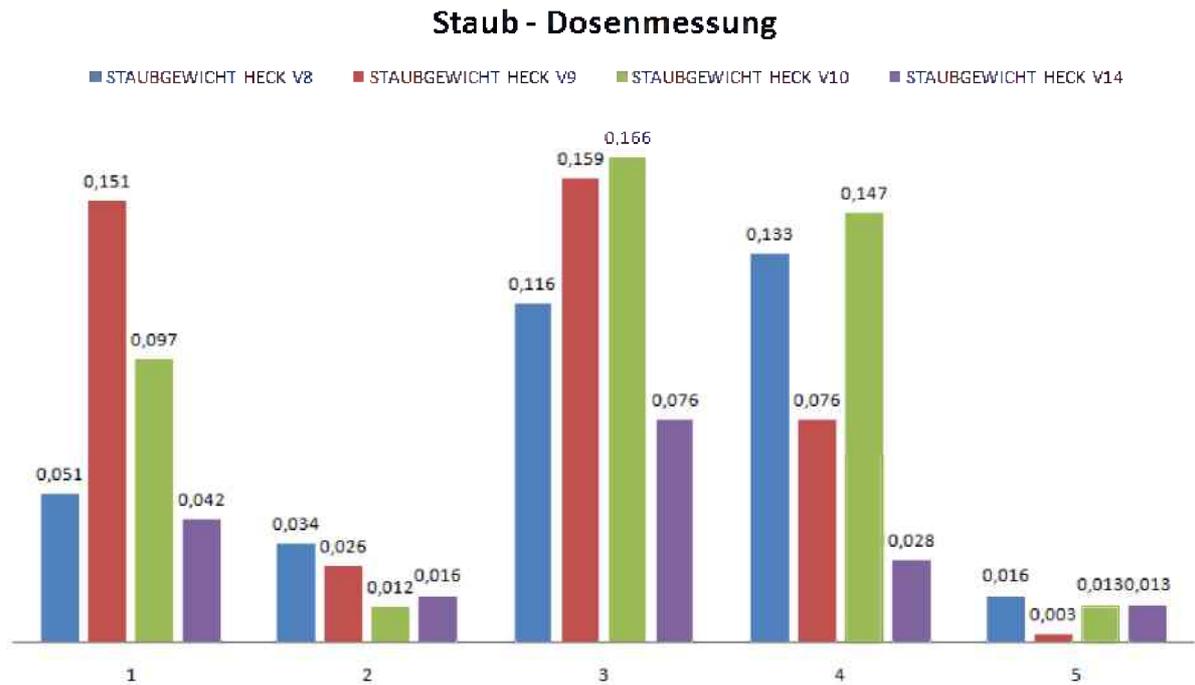


Abb. 7.6 Diagramm Dosenmessung Heckkipper Leitbleche [24]

7.2.2 Seitenkipper

Versuch	Gewicht (*) trocken vorher	Gewicht (*) trocken nachher	STAUBGEWICHT TUCH SEITE	[EINHEIT]
11	99,810	103,705	3,895	g
12	36,531	40,920	4,389	g
13	71,845	77,760	5,915	g

Tab. 7.7 Ergebnisse Tuchmessung Seitenkipper Leitbleche [24]

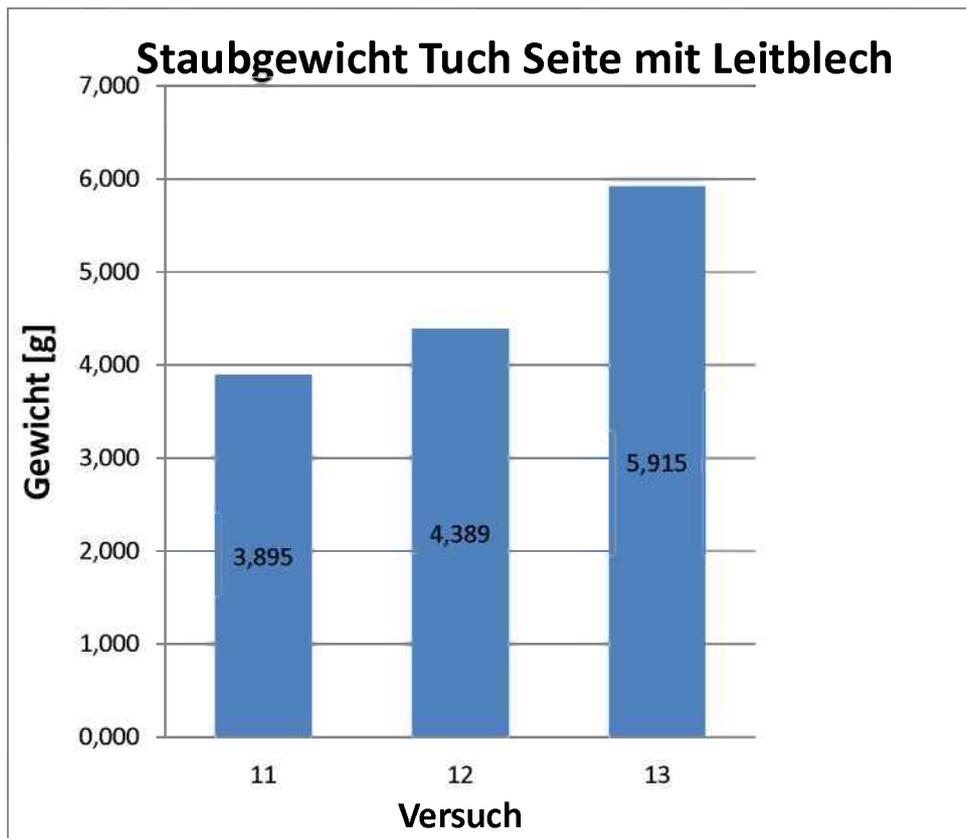


Abb. 7.7 Diagramm Ergebnisse Staubschichtmessung Seitenkipper Leitbleche [24]

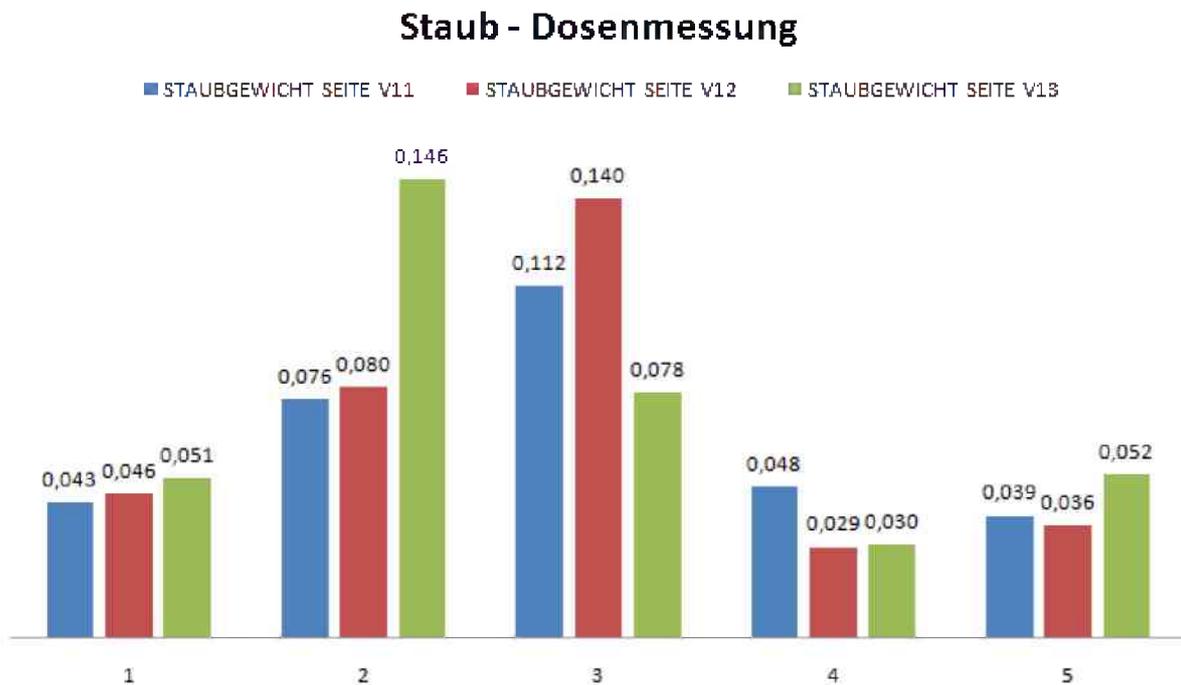


Abb. 7.8 Diagramm Dosenmessung Seitenkipper Leitbleche [24]

7 Messergebnisse

<u>Dosen - Messung V11</u>		Dosendurchmesser 66,5mm		Dosenfläche 3473,23mm ²		
Dose	Gewicht vorher	Gewicht nachher		STAUBGE- WICHT HECK	[EINHEIT]	Bemerkung
1	10,576	10,619		0,043	g	
2	10,704	10,780		0,076	g	
3	10,578	10,690		0,112	g	
4	10,585	10,633		0,048	g	
5	10,686	10,725		0,039	g	
		Summe		0,318	g	
		Summe (ohne 1)		0,275	g	Zum Vergleich mit Heck
<u>Dosen - Messung V12</u>						
1	10,575	10,621		0,046	g	
2	10,701	10,781		0,080	g	
3	10,578	10,718		0,140	g	
4	10,583	10,612		0,029	g	
5	10,685	10,721		0,036	g	
		Summe		0,331	g	
		Summe (ohne 1)		0,285	g	Zum Vergleich mit Heck
<u>Dosen - Messung V13</u>						
1	10,571	10,622		0,051	g	
2	10,697	10,843		0,146	g	
3	10,577	10,655		0,078	g	
4	10,582	10,612		0,030	g	
5	10,683	10,735		0,052	g	
		Summe		0,357	g	
		Summe (ohne 1)		0,306	g	Zum Vergleich mit Heck

Tab. 7.8 Ergebnisse Dosenmessung Seitenkipper Leitbleche [24]

7.3 Messergebnisse Klappensystem

Vor der Durchführung dieser Versuche wurde das Material ausgetauscht. Der Feinanteil im Material ist vermutlich höher als im alten, öfter verwendeten Material, was die Staubentwicklung verstärkt.

Versuch	Gewicht (*) trocken vorher	Gewicht (*) trocken nachher	STAUBGEWICHT TUCH HECK	[EINHEIT]
15	99,960	100,130	0,170	g
16	73,250	73,861	0,611	g
17	56,629	56,945	0,316	g

Tab. 7.9 Ergebnisse Tuchmessung Heckkipper Klappensystem [24]

7.3.1 Heckkipper

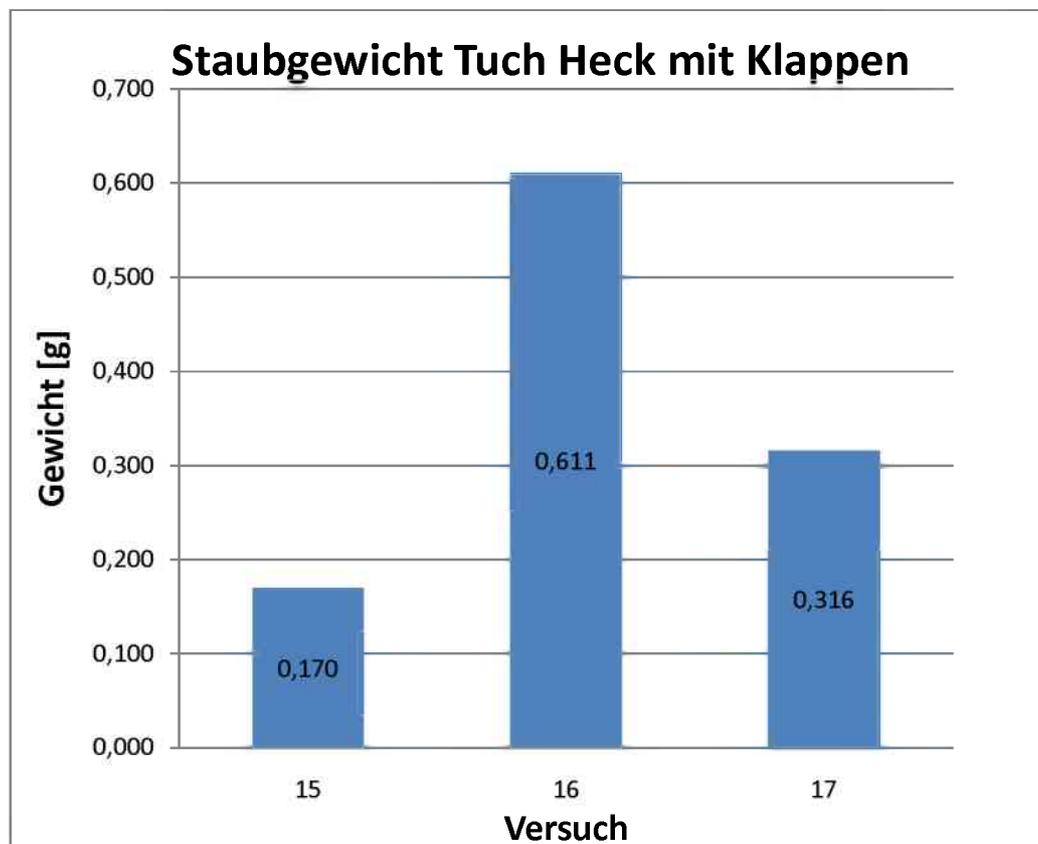


Abb. 7.9 Diagramm Ergebnisse Staubtuchmessung Heckkipper Klappensystem [24]

7 Messergebnisse

Dosen - Messung V15		Dosendurchmesser 66,5mm		Dosenfläche 3473,23mm ²		
Dose	Gewicht vorher	Gewicht nachher		STAUBGE- WICHT HECK	[EINHEIT]	Bemerkung
1	10,582	10,685		0,103	g	nicht zu verwenden, da Material vom Kipper in die Dose gerieselt ist!
2	10,709	10,718		0,009	g	
3	10,583	10,591		0,008	g	
4	10,588	10,609		0,021	g	
5	10,688	10,702		0,014	g	
		Summe		0,155	g	
		Summe (ohne 1)		0,052	g	
Dosen - Messung V16						
1	10,576	10,599		0,023	g	nicht zu verwenden, da Material vom Kipper in die Dose gerieselt ist!
2	10,703	10,712		0,009	g	
3	10,578	10,590		0,012	g	
4	10,586	10,604		0,018	g	
5	10,689	10,694		0,005	g	
		Summe		0,067	g	
		Summe (ohne 1)		0,044	g	
Dosen - Messung V17						
1	10,575	10,610		0,035	g	nicht zu verwenden, da Material vom Kipper in die Dose gerieselt ist!
2	10,700	10,711		0,011	g	
3	10,577	10,586		0,009	g	
4	10,582	10,609		0,027	g	
5	10,684	10,693		0,009	g	
		Summe		0,091	g	
		Summe (ohne 1)		0,056	g	

Tab 7.10 Ergebnisse Dosenmessung Heckkipper Klappensystem [24]

Staub - Dosenmessung

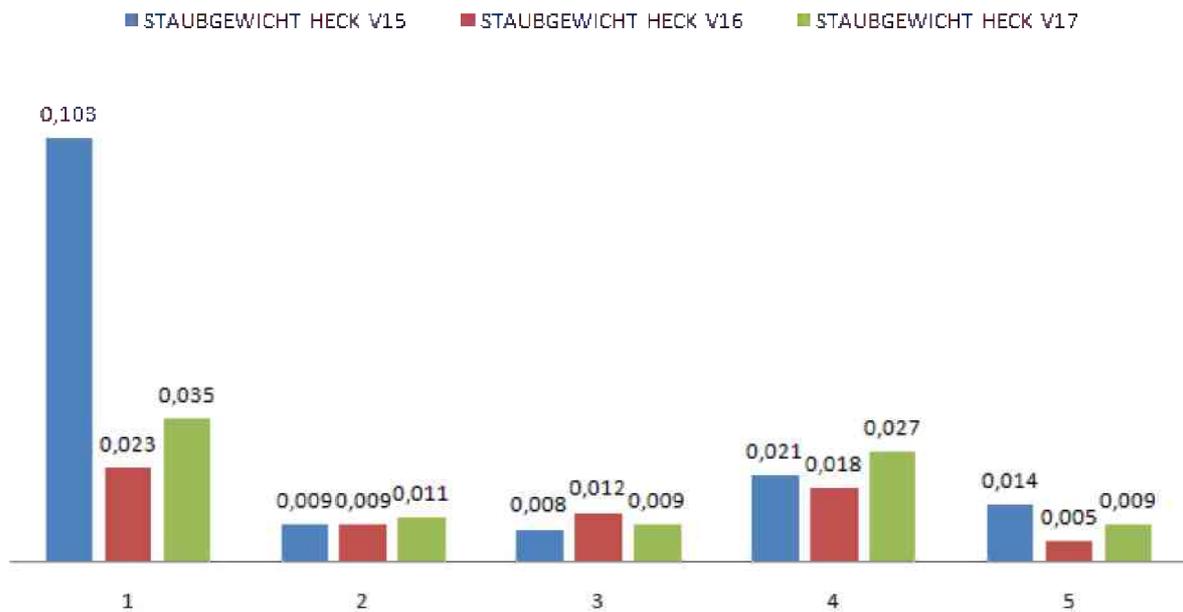


Abb. 7.10 Diagramm Dosenmessung Heckkipper Klappensystem [24]

7.3.2 Seitenkipper

Versuch	Gewicht (*) trocken vorher	Gewicht (*) trocken nachher	STAUBGEWICHT TUCH SEITE	[EINHEIT]
18	36,772	38,179	1,407	g
19	99,887	101,132	1,245	g
20	73,586	74,551	0,965	g

Tab. 7.11 Ergebnisse Tuchmessung Seitenkipper Klappensystem [24]

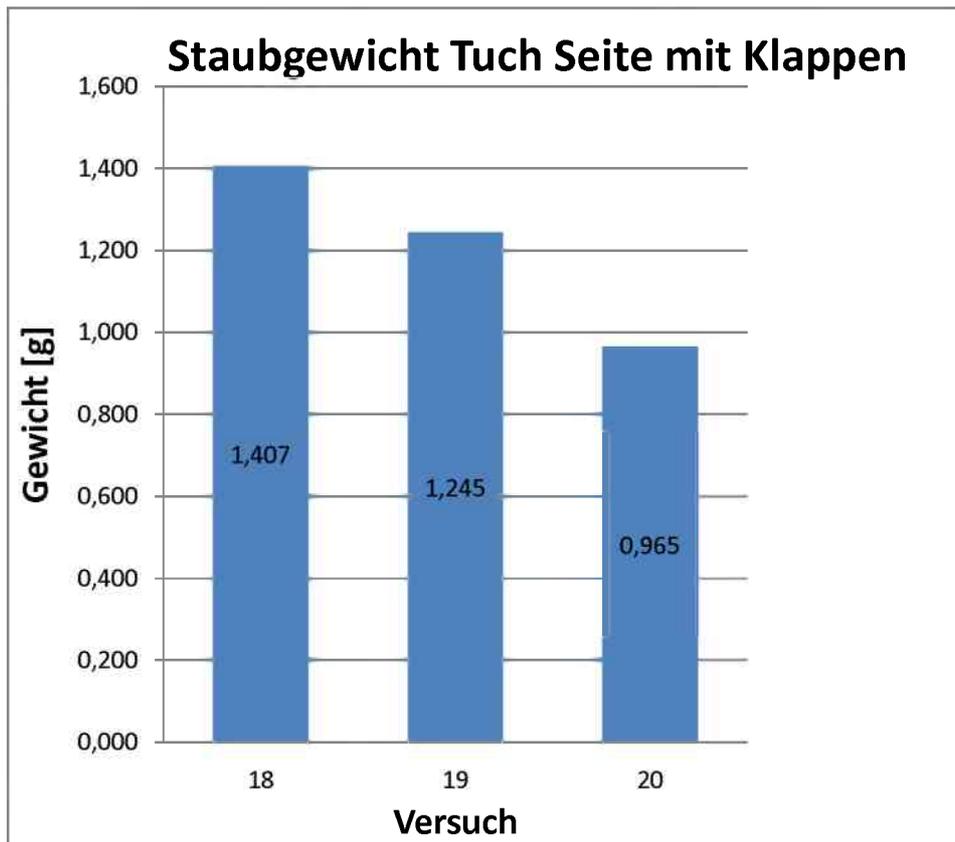


Abb. 7.11 Diagramm Ergebnisse Staubschichtmessung Seitenkipper Klappensystem [24]

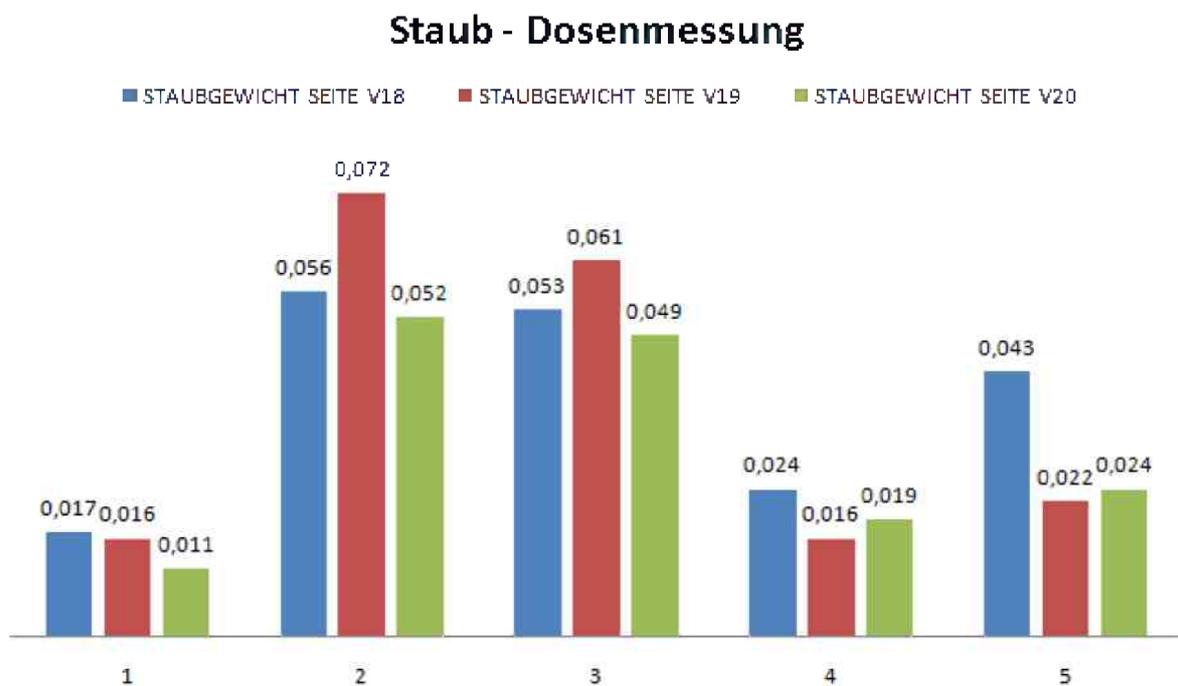


Abb. 7.12 Diagramm Dosenmessung Seitenkipper Klappensystem [24]

7 Messergebnisse

Dosen - Messung V18		Dosendurchmesser 66,5mm		Dosenfläche 3473,23mm ²		
Dose	Gewicht vorher	Gewicht nachher		STAUBGE- WICHT HECK	[EINHEIT]	Bemerkung
1	10,578	10,595		0,017	g	
2	10,705	10,761		0,056	g	
3	10,580	10,633		0,053	g	
4	10,587	10,611		0,024	g	
5	10,689	10,732		0,043	g	
		Summe		0,193	g	
		Summe (ohne 1)		0,176	g	Zum Vergleich mit Heck
Dosen - Messung V19						
1	10,575	10,591		0,016	g	
2	10,705	10,777		0,072	g	
3	10,581	10,642		0,061	g	
4	10,588	10,604		0,016	g	
5	10,688	10,710		0,022	g	
		Summe		0,187	g	
		Summe (ohne 1)		0,171	g	Zum Vergleich mit Heck
Dosen - Messung V20						
1	10,577	10,588		0,011	g	
2	10,705	10,757		0,052	g	
3	10,582	10,631		0,049	g	
4	10,588	10,607		0,019	g	
5	10,686	10,710		0,024	g	
		Summe		0,155	g	
		Summe (ohne 1)		0,144	g	Zum Vergleich mit Heck

Tab. 7.12 Ergebnisse Dosenmessung Seitenkipper Klappensystem [24]

7.4 Vergleich der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Messungen miteinander verglichen und die Auswirkungen der Minderungsmethoden betrachtet.

Aus den Tabellen und Graphen ist zu erkennen, dass bei Seitenkippen erheblich mehr Staub entsteht als bei Heckkippen. Dies ist auf den breiteren, nicht kompakten Staubstrahl und die dadurch erhöhte Menge an mitgerissener Luft zurückzuführen. Die größten Unterschiede ergaben sich dabei bei der Messung mit Tuch.

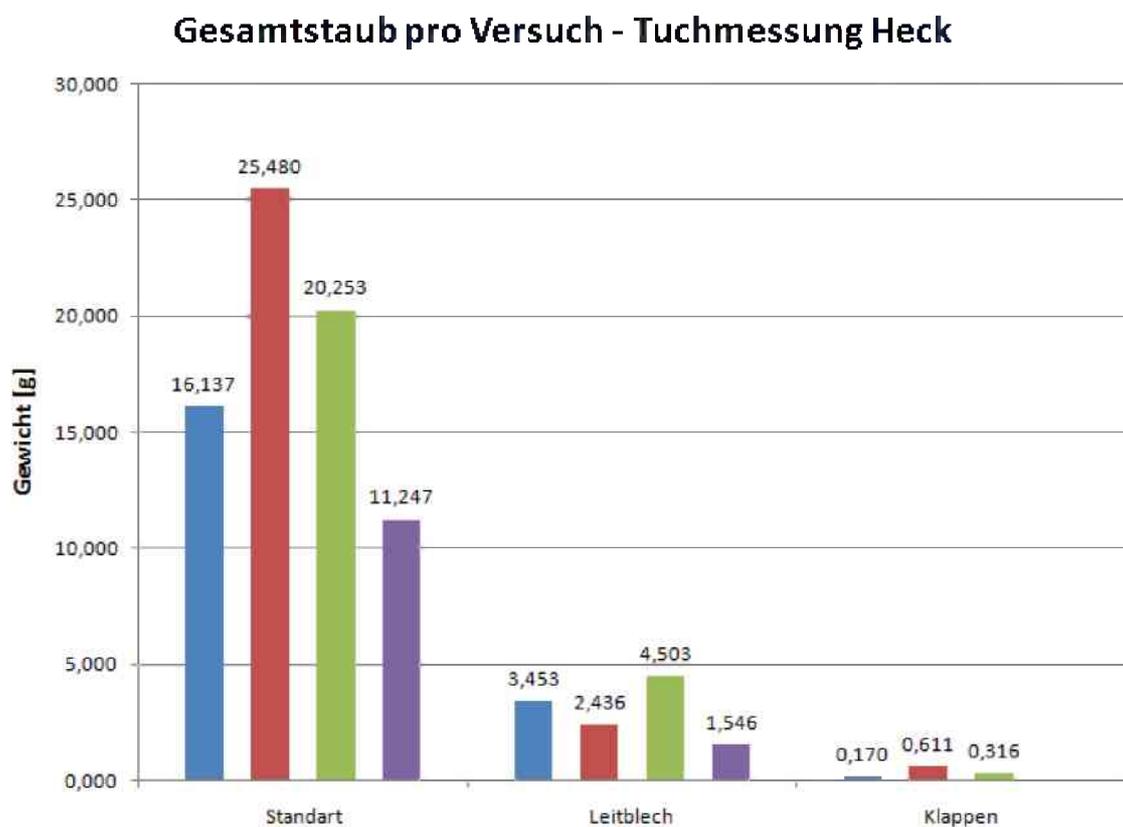


Abb. 7.13 Vergleich Gesamtstaub Tuchmessung Heck [24]

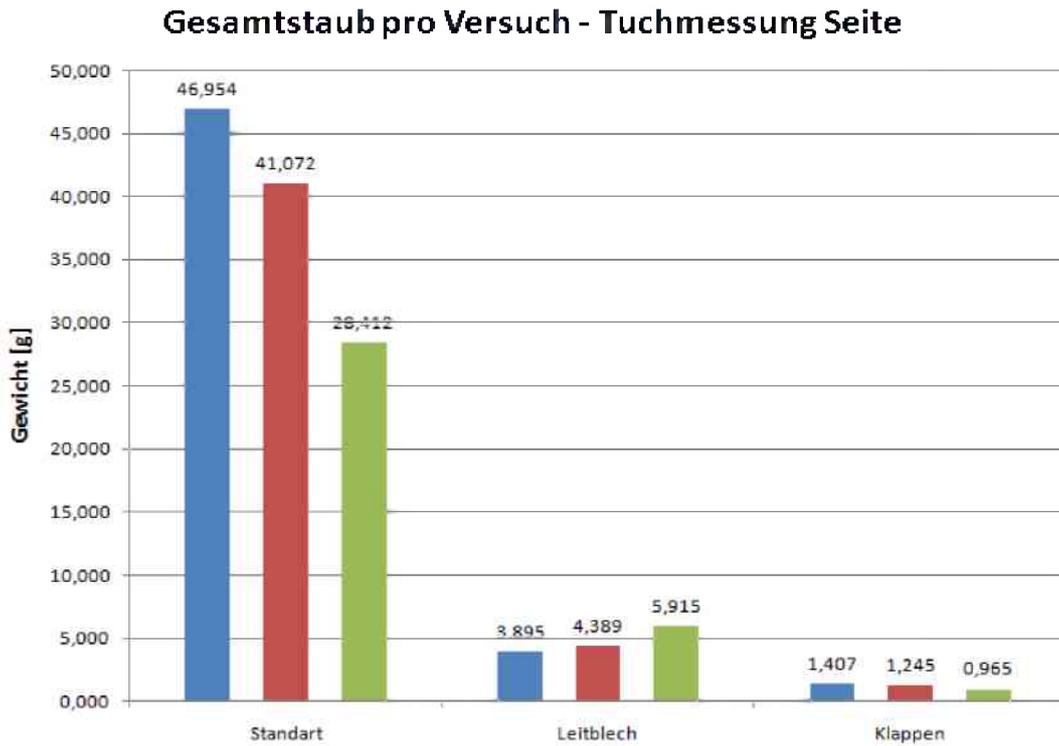


Abb. 7.14 Vergleich Gesamtstaub Tuchmessung Seite [24]

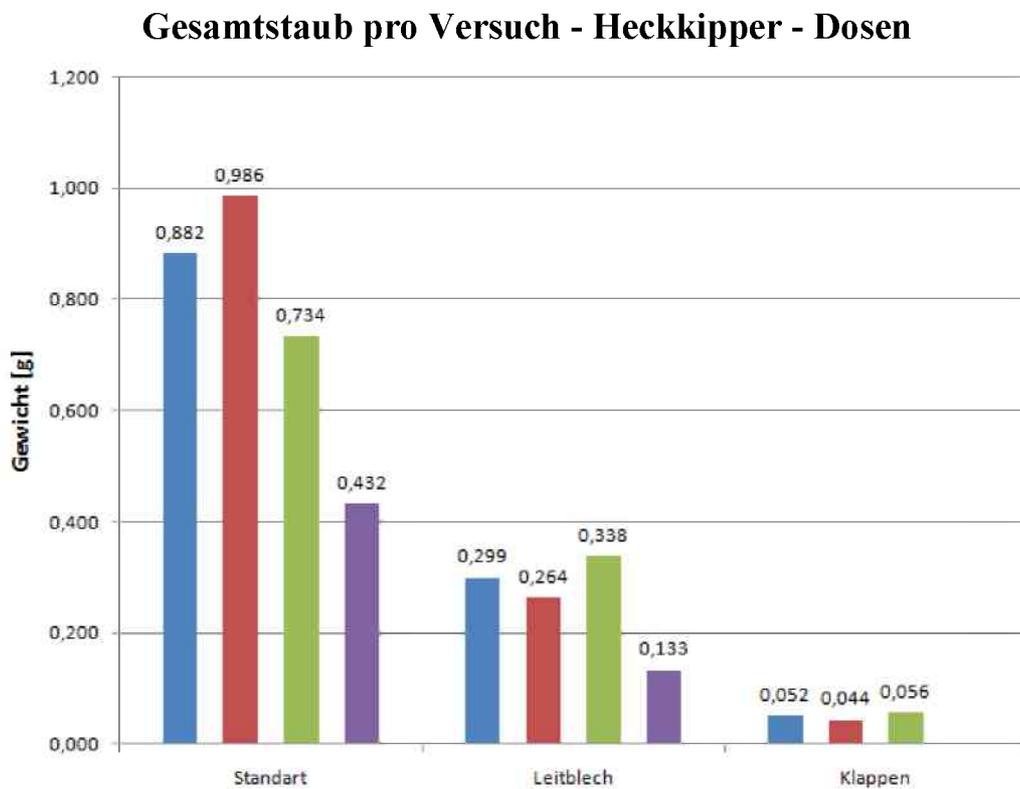


Abb. 7.15 Vergleich Gesamtstaub Dosenmessung Heck [24]

Gesamtstaub pro Versuch - Seitenkipper - Dosen

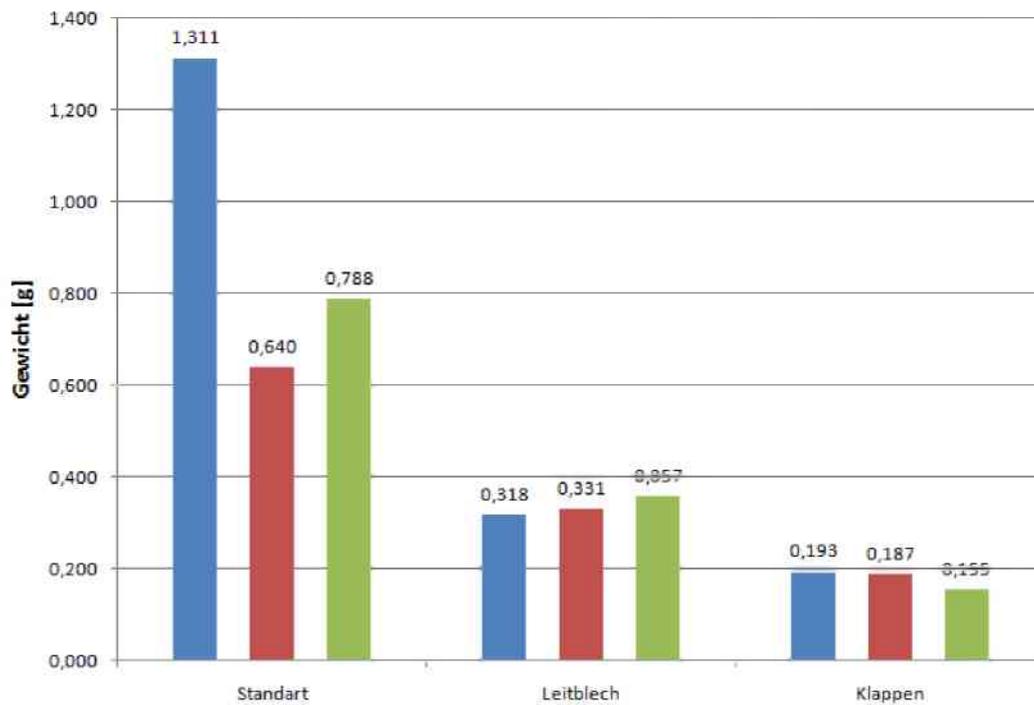


Abb. 7.16 Vergleich Gesamtstaub Dosenmessung Seite [24]

7.4.1 Vergleich Heckkipper und Seitenkipper

Für diese Vergleiche wurden die Messwerte der Dose 1 aus den oben angegebenen Gründen ignoriert.

Ausführung	Abkippsseite	Durchschnitt Gesamtstaubmenge	Prozentsatz Heck/Seite
Standard	Heck	18,279	47%
Standard	Seite	38,813	
Leitblech	Heck	2,985	63%
Leitblech	Seite	4,733	
Klappen	Heck	0,366	30%
Klappen	Seite	1,206	

Tab. 7.13 Prozentsätze Tuchmessung Heck zu Seite [24]

Ausführung	Abkippsseite	Durchschnitt Gesamtstaubmenge	Prozentsatz Heck/Seite
Standard	Heck	0,758	89%
Standard	Seite	0,854	
Leitblech	Heck	0,259	90%
Leitblech	Seite	0,289	
Klappen	Heck	0,051	31%
Klappen	Seite	0,164	

Tab. 7.14 Prozentsätze Dosenmessung Heck zu Seite [24]

Die im Tuch aufgefangene Staubmenge ist bei Heckkippen ohne zusätzliche Einbauten um ca. 50% geringer als bei Seitenkippen (siehe Tab. 7.13). Auch bei eingebauten Leitblechen ist die Menge in etwa halb so groß. Bei eingebautem Klappensystem reduziert sich die Staubmenge bei Heckkippen auf ca. ein Drittel der Seitenkippmenge. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass Staub beim Auftreffen auf die Klappen entsteht. Da bei Seitenkippen der Strahl, und daher auch die Aufprallfläche, größer sind, entsteht mehr Staub im Vergleich zum Heckkippen.

Bei der Dosenmessung ergaben sich geringere Unterschiede im Vergleich von Heck- und Seitenkippen. Ohne Einbauten und mit eingebauten Leitblechen ist die aufgefangene Staubmenge bei Heckkippen um ca. 10% geringer als bei Seitenkippen (siehe Tab. 7.14). Bei eingebautem Klappensystem reduziert sich die Heckkippmenge auf 30% der Seitenkippmenge.

7.5 Vergleich der Einbauten

Hier folgen die Vergleichswerte für die getesteten Einbauten für Dosen- und Tuchmessung.

	Heck	Seite
Staubreduktion von	Staubmenge reduziert um	
Standard auf Leitblech	66%	66%
Standard auf Klappen	93%	81%
Leitblech auf Klappen	80%	43%

Tab. 7.15 Vergleich Methoden Dosenmessung [24]

	Heck	Seite
Staubreduktion von	Staubmenge reduziert um	
Standard auf Leitblech	84%	88%
Standard auf Klappen	98%	97%
Leitblech auf Klappen	88%	75%

Tab. 7.16 Vergleich Methoden Tuchmessung [24]

Wie in Tabelle 7.15 dargestellt ist, reduzieren die Leitbleche die in den Dosen aufgefangene Staubmenge auf ca. ein Drittel. Das Klappensystem verringert die Menge noch weiter auf 7% bei Heck- und knapp 20% bei Seitenkippen.

Bei der Tuchmessung sind die gemessenen Reduktionen noch deutlicher. Hier verringerten die Leitbleche die Staubmenge auf ca. 15% für Heck- und Seitenkippen, die Klappen auf 2-3% (siehe Tab. 7.16). In beiden Messungen reduzierten die Klappen den Staub im Vergleich mit den Leitblechen ebenfalls noch einmal deutlich.

Beide Einbauten verringerten den gemessenen Staub deutlich ohne zu komplizierte Änderungen am Bunker zu verursachen. Die Leitbleche lieferten in Anbetracht ihrer Einfachheit erstaunlich gute Ergebnisse. Das Klappensystem war etwas komplizierter im

Aufbau, die hervorragenden Messergebnisse rechtfertigen diesen Umstand jedoch. Beide Systeme lieferten gute Werte in Bezug auf die Staubreduktion und können für den Einbau im realen Bunker empfohlen werden. Die Effektivität der Leitbleche ließe sich durch die in Kapitel 6.3 beschriebenen Elektroabscheider noch verbessern. Es ist hier zu hinterfragen, ob die Effektivität der Leitblech-Elektroabscheider-Kombination im Vergleich mit dem Klappensystem die höheren Kosten rechtfertigen würde. Wegen der hohen Effizienz des Klappensystems wurde vorerst gegen die Umsetzung des Elektroabscheider-Konzepts entschieden.

8 Zusammenfassung

Kapitel 2 liefert einen umfassenden Überblick über die Entstehung und Vermeidung von Staub, die Eigenschaften von Staub sowie über die Möglichkeiten der Staubbekämpfung.

In Kapitel 3 werden die vorgestellten Staubbekämpfungsmaßnahmen genauer betrachtet und auf ihre Anwendbarkeit in der Bunkeranlage überprüft. Anschließend erfolgt eine Bewertung der Methoden um die geeignetsten in die Ideenfindung mit einfließen zu lassen. Es stellte sich heraus, dass konstruktive Einbauten und Elektroentstauber die technisch und wirtschaftlich bestgeeigneten Möglichkeiten zur Staubbekämpfung im Bunker darstellen.

In Kapitel 4 werden die entwickelten Konzepte vorgestellt. Das Hauptaugenmerk liegt hier bei konstruktiven Lösungen, wie sie die Bewertung in Kapitel 3 nahelegt. Des Weiteren erfolgt in diesem Kapitel eine Bewertung der gefundenen Konzepte und die Auswahl derer die im Anschluss in einem Modellbunker erprobt werden. Die Wahl fiel auf eine Leitblechkonstruktion und ein Klappensystem. Außerdem wurde die Idee eines in den Bunker integrierten Elektroabscheiders für eine genauere Betrachtung ausgewählt.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit dem Aufbau des Modellbunkers und der Messmethode. Für den Bunker wurde der Maßstab 1 zu 4 gewählt. Die Messungen erfolgen über, an bestimmten Positionen aufgestellte, Dosen und Tücher. Der sich setzende Staub wird an 5 Punkten in den Messdosen aufgefangen und gewogen. Der Flugstaub wird mithilfe von feuchten Tüchern aufgefangen und ebenfalls gewogen. Die Position der Dosen bleibt bei Heck- und Seitenkippsversuchen unverändert, das Tuch wird gegenüber der Kippvorrichtung positioniert.

In Kapitel 6 werden die ausgewählten Konzepte genau vorgestellt und ihre Umsetzung im Modellbunker beschrieben. Die Staubentstehung bei den einzelnen Methoden wird dargestellt und es erfolgen Vergleiche der Methoden untereinander sowie zur Staubentstehung ohne Einbauten. Außerdem wird ein in den Bunker integrierter Elektroentstauber vorgestellt und berechnet. Der Elektroentstauber soll unter die Leitblechkonstruktion montiert werden um deren Effektivität noch weiter zu erhöhen. Die Abscheider werden gegenüber der Kippseiten angebracht und bestehen aus je 3 Niederschlagelektroden und 2 Rahmen mit Sprühelektroden.

Abschließend werden in Kapitel 7 alle Messergebnisse der verschiedenen Versuche genau dargestellt. Die Reduktion der Staubmenge ist deutlich zu erkennen. Die Leitblechkonstruktion verringert den Staub um ca. 85% bei den Tuchmessungen und um 70%

bei den Dosenmessungen. Das Klappensystem ist noch effektiver und reduziert den Staub bei den Tuchmessungen um ca. 98% und bei den Dosenmessungen um über 90% beim Heckkippen und um ca. 80% beim Seitenkippen. Wegen der hervorragenden Ergebnisse dieser beiden Methoden wurde davon abgesehen das Elektroabscheider-Konzept umzusetzen, da die zu erwartende Verbesserung die zusätzlichen Investitionen nicht rechtfertigen würden. Die Leitblechkonstruktion oder das Klappensystem liefern beide ausgezeichnete Ergebnisse bei geringen Investitionskosten und nur wenig Wartungsbedarf wodurch beide für die Verwendung in der tatsächlichen Bunkeranlage empfohlen werden können.

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1 Bunkeranlage	1
Abb. 2.1 Bauarten von Schüttgutbunkern [2]	4
Abb. 2.2 Größenbereiche für Partikel [3]	7
Abb. 2.3 Verweilzeit von Aerosolen in der Atmosphäre[3]	8
Abb. 2.4 Haftmechanismen zwischen Partikeln und Oberflächen[3]	9
Abb. 2.5 Schematische Darstellung fallender Partikelcluster [7]	12
Abb. 2.6 Schematic of dust generation from a falling stream of bulk material [8]	13
Abb. 2.7 Entrained Air vs. Drop height [10]	13
Abb. 2.8 Impaction vs. Drop height [10]	14
Abb. 2.9 Dust generation vs. drop height [10]	15
Abb. 2.10 Cohesion vs. Moisture Content [10]	15
Abb. 2.11 Dust Generation vs. Moisture Content [10]	16
Abb. 2.12 Übersicht über Entstauber [4]	19
Abb. 2.13 Schema Schwerkraftentstauber [4]	19
Abb. 2.14 Beispiele Kombinierte Schwer- und Fliehkraftentstauber [4]	20
Abb. 2.15 Stromlinienverlauf im Zyklon [4]	20
Abb. 2.16 Grundschemata eines Elektroentstaubers [4]	21
Abb. 2.17 Schema eines Venturiwäschers [11]	22
Abb. 2.18 Prinzip Ultraschall- Staubagglomeration [13]	23
Abb. 2.19 Einfluss der Tropfengröße [11]	24
Abb. 2.20 Einhausung aus Plastikstreifen [11]	25

Abb. 2.21 Funktion Pendelklappensystem [14]	25
Abb. 2.22 Staubsperre [15]	26
Abb. 2.23 Staubschutzwand in Halfpipeform [14]	26
Abb. 2.24 Staubunterdrückender Trichter [11]	27
Abb. 2.25 Cascade loading spout [11]	27
Abb. 2.26 Funktionsweise von staubunterdrückendem Schaum [16]	28
Abb3.1 Bunker	29
Abb. 3.2 Arbeitsbereiche verschiedener Entstauber [4]	32
Abb. 3.3 Arbeitsbereiche und Kosten verschiedener Entstauber [4]	32
Abb. 3.4 Effect of ultrasounds power source on agglomeration [13]	33
Abb. 3.5 Typical amounts of added moisture [18]	34
Abb. 3.6 Aufbau Dry Fog Düse [18]	34
Abb. 3.7 Stärkediagramm der Entstaubungsmöglichkeiten	42
Abb. 4.1 Bunker mit Sperre	43
Abb. 4.2 Bunker mit Leitblechen	44
Abb. 4.3 Trichterförmige Rampen	45
Abb. 4.4 Bunker mit Aufsatz	46
Abb. 4.5 Schnitt Bunkeraufsatz	46
Abb. 4.6 Trichter mit Filter	47
Abb. 4.7 Detail Filter	47
Abb. 4.8 Kaskade 1	48
Abb. 4.9 Kaskade 2	49
Abb. 4.10 Klappensystem	49

Abb.4.11 Klappen	50
Abb. 4.12 Staubschutzwand mit Prallabscheider	51
Abb. 4.13 Detail Prallabscheider	52
Abb. 4.14 Geschlossene Klappenkonstruktion	53
Abb. 4.15 Geschlossene Klappe mit Prallabscheider	54
Abb. 4.16 Bunker mit Elektroentstauber	55
Abb. 4.17 Detail Elektroentstaubung	55
Abb. 4.18 Schema Wasserbedüsung	56
Abb. 4.19 Stärkediagramm der Konzepte	62
Abb. 5.1 Bunkermodell 1 zu 4	63
Abb. 5.2 Konstruktion Modellbunker	64
Abb. 5.3 Position der Messdosen und Tücher	65
Abb. 5.4 Position Messdosen 1 bis 4 und Tuch	66
Abb. 5.5 Position Messdose 5	67
Abb. 5.6 Kippversuch ohne Umbauten	68
Abb. 6.1 Simulationsergebnisse für DE-Staubpartikel (DDP) nach zwei Sekunden [22]	69
Abb. 6.2 Staubentwicklung im Modellbunker	70
Abb. 6.3 Luftgeschwindigkeiten der DE-Partikel [22]	71
Abb. 6.4 Bunker mit Leitblechen	72
Abb. 6.5 Versuchsbunker mit Leitblech	73
Abb. 6.6 Vergleich Staubentstehung Standard (links) und mit Leitblech (rechts)	73
Abb. 6.7 Kippversuch mit Leitblechen	74

Abb. 6.8 Gefedertes Klappensystem	75
Abb. 6.9 Klappensystem im Modellbunker	76
Abb. 6.10 Klappensystem von unten	76
Abb. 6.11 Kippversuch mit Klappensystem	77
Abb. 6.12 Vergleich Staubentwicklung Standard (links), Leitbleche (mitte), Klappensystem (rechts)	78
Abb. 6.13 Ladungserzeugung im Sprühfeld [4]	79
Abb. 6.14 Strom-Spannungskurven bei der Elektroentstaubung [4]	80
Abb. 6.15 Feldstärkeverlauf in einem Rohr-Elektroabscheider [4]	82
Abb. 6.16 Verlauf elektrischer Feldlinien in der Nähe eines Staubteilchens [4]	83
Abb. 6.17 Anzahl Ladungen auf einem Teilchen bei verschiedenen Aufladungsmechanismen [4]	85
Abb. 6.18 Aufbau Elektroentstauber [4]	86
Abb. 6.19 Ausführungen von Sprühelektroden [4]	88
Abb. 6.20 Strom-Spannungskurven verschiedener Sprühdrahtformen [4]	88
Abb. 6.21 Formen von Niederschlagselektroden [4]	89
Abb. 6.22 Bunker mit Elektroabscheider	90
Abb. 6.23 Elektroabscheider Details	91
Abb. 6.24 Elektroden	91
Abb. 7.1 Diagramm Ergebnisse Staubtuchmessung Heckkipper Standard [24]	95
Abb. 7.2 Diagramm Dosenmessung Heckkipper Standard [24]	97
Abb. 7.3 Diagramm Ergebnisse Staubtuchmessung Seitenkipper Standard [24]	98
Abb. 7.4 Diagramm Dosenmessung Seitenkipper Standard [24]	98

Abb. 7.5 Diagramm Ergebnisse Staubtuchmessung Heckkipper Leitbleche [24]	100
Abb. 7.6 Diagramm Dosenmessung Heckkipper Leitbleche [24]	102
Abb. 7.7 Diagramm Ergebnisse Staubtuchmessung Seitenkipper Leitbleche [24]	103
Abb. 7.8 Diagramm Dosenmessung Seitenkipper Leitbleche [24]	103
Abb. 7.9 Diagramm Ergebnisse Staubtuchmessung Heckkipper Klappensystem [24]	105
Abb. 7.10 Diagramm Dosenmessung Heckkipper Klappensystem [24]	107
Abb. 7.11 Diagramm Ergebnisse Staubtuchmessung Seitenkipper Klappensystem [24]	108
Abb. 7.12 Diagramm Dosenmessung Seitenkipper Klappensystem[24]	108
Abb. 7.13 Vergleich Gesamtstaub Tuchmessung Heck [24]	110
Abb. 7.14 Vergleich Gesamtstaub Tuchmessung Seite [24]	111
Abb. 7.15 Vergleich Gesamtstaub Dosenmessung Heck [24]	111
Abb. 7.16 Vergleich Gesamtstaub Dosenmessung Seite [24]	112

10 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Natürliche und anthropogene diffuse Quellen ausgewählter Stoffe [1]	6
Tab. 3.1 Vergleich der technischen Bewertungskriterien der Entstaubungsmöglichkeiten	36
Tab. 3.2 Paarweiser Vergleich der wirtschaftlichen Kriterien der Entstaubungsmöglichkeiten	37
Tab. 3.3 Technische Bewertung der Entstaubungsmaßnahmen	39
Tab. 3.4 Wirtschaftliche Bewertung der Entstaubungsmaßnahmen	40
Tab. 4.1 Paarweiser Vergleich der wirtschaftlichen Kriterien der Konzepte	56
Tab. 4.2 Vergleich der technischen Bewertungskriterien der Konzepte	57
Tab. 4.3 Konzepte und zugehörige Abbildungen	58
Tab. 4.4 Technische Bewertung der Konzepte	69
Tab. 4.5 Wirtschaftliche Bewertung der Konzepte	60
Tab. 7.1 Ergebnisse Tuchmessung Heckkipper Standard [24]	92
Tab. 7.2 Ergebnisse Dosenmessung Heckkipper Standard [24]	93
Tab. 7.3 Ergebnisse Tuchmessung Seitenkipper Standard [24]	94
Tab. 7.4 Ergebnisse Dosenmessung Seitenkipper Standard [24]	96
Tab. 7.5 Ergebnisse Tuchmessung Heckkipper Leitbleche [24]	97
Tab. 7.6 Ergebnisse Dosenmessung Heckkipper Leitbleche [24]	98
Tab. 7.7 Ergebnisse Tuchmessung Seitenkipper Leitbleche [24]	99
Tab. 7.8 Ergebnisse Dosenmessung Seitenkipper Leitbleche [24]	101
Tab. 7.9 Ergebnisse Tuchmessung Heckkipper Klappensystem [24]	102
Tab. 7.10 Ergebnisse Dosenmessung Heckkipper Klappensystem [24]	103

Tab. 7.11 Ergebnisse Tuchmessung Seitenkipper Klappensystem [24]	104
Tab. 7.12 Ergebnisse Dosenmessung Seitenkipper Klappensystem[24]	106
Tab. 7.13 Prozentsätze Tuchmessung Heck zu Seite [24]	109
Tab. 7.14 Prozentsätze Dosenmessung Heck zu Seite [24]	110
Tab. 7.15 Vergleich Methoden Dosenmessung [24]	111
Tab. 7.16 Vergleich Methoden Tuchmessung [24]	111

11 Literaturliste

- [1] VDI 3790 Umweltmeteorologie Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen
- [2] Heinrich Martin: Transport- und Lagerlogistik: Planung, Aufbau und Steuerung von Transportsystemen 3. Auflage, Springer Verlag Wiesbaden 2000
- [3] Christian Rüger: Die Wege von Staub im Umfeld von Menschen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016
- [4] Wilhelm Batel: Entstaubungstechnik, Grundlagen Verfahren Meßwesen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1972
- [5] Karl-Heinrich Grote, Jörg Feldhusen: Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau 24.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [6] iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG: Ermittlung von Emissionsfaktoren für die Lagerung und den Umschlag von Kohle: Steinkohle
- [7] Ze Qin Liu: Air entrainment in free falling bulk materials, University of Wollongong 2003
- [8] Paul Cooper, Zeqin Liu and Peter W. Wypych: Plumes Driven by Free-Falling Streams of Solid Particles, Faculty of Engineering, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522, Australia
- [9] Daniel Marshall (Martin Engineering) and Greg Boggio (Dynegy Midwest Generation): Facts Concerning Dust and Air
- [10] Marc A.E. Plinke, David Leith, Maryanne G. Boundy, Friedrich Löffler: Dust Generation from Handling Powders in Industry 1995
- [11] Andrew B. Cecala, Andrew D. O'Brien et. Al.: Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing, DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health Office of Mine Safety and Health Research Pittsburgh, PA Spokane

- [12] Stefan Zigan: A Holistic research approach for the investigation of air current segregation in alumina silos, Faculty of Engineering and Physical Sciences University of Surrey, January 2008
- [13] B. Bergmans, M. Dormann et. Al.: Advanced technique to reduce emissions of fine particulate matter using ultrasounds, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 154, 2011 WIT Press
- [14] Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend: Technische Grundlagen zur Beurteilung diffuser Staubemissionen, 2013
- [15] Zuther, <http://www.zuther-online.de>, Juni 2016
- [16] Best-Chem Limited, <http://www.best-chem.co.uk>, Juni 2016
- [17] Erwin Brunnmair, Entwicklung und Modellierung eines neuen Hochleistungszyklons zur Trennung von Feststoff / Gas-Gemischen, Dissertation 2010
- [18] David Blyth, A Practicle Guide to Dust Surpression, Sealpump Engineering Ltd
- [19] Jaime Benitez, Process Engineering and Design for Air Pollution Control, Prentice Hall 1993
- [20] Muhammad Ahmad and Jhanzeb, Modeling and Simulation of an Electrostatic Precipitator, Degree Project Linnaeus University
- [21] Arnold Roth, Hochspannungstechnik, Springer Verlag, 1950
- [22] Christoph Grübler, Franz Kessler, Michael Prenner, Thomas Sommer; Sekundärstaubentstehung beim Schüttguthandling - Grundlagen, Simulationsansätze (DEM-CFD) und Ausblick, Beitrag bei 21. Fachtagung Schüttguttechnik, TU München, ISBN 978-3-941702-69-1
- [23] Markus Meier: Auswählen und Bewerten. ETH Zürich, diglib.ethz.ch, 2002.
- [24] Grübler C., Kessler F., Prenner M., Suppan M.: Prevention of secondary dust emission in ironmaking plants using dust suppressants, Midterm Report, 2017