Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Dissertation

zum Thema

Untersuchung der Betriebs- und Konstruktionsparameter von Wassersprаysystemen bei der Abscheidung diffuser Feinstaubemissionen.

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften unter Leitung von

Betreuer: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.Wilhelm Höflinger

Institutsnummer: E 166

Institutsbezeichnung: Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften

Eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswirtschaften

von

Verfasser: Dipl. Ing. Jörg Faschingleitner

0325698

Vogelfängerweg 50

A-4030 Linz

Wien, am 20.05.2011

_____
eigenhändige Unterschrift

Danksagung:

Für meine Doktorarbeit schulde ich sehr vielen Menschen herzlichen Dank.

Besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wilhelm Höflinger bedanken. Immerhin wurde dieses Grundlagenforschungsprojekt aus den Ersparnissen der langjährigen Arbeit meines Doktorvaters sowie seiner Arbeitsgruppe für mechanische Verfahrenstechnik finanziert. Ohne diese Unterstützung wäre es nicht möglich gewesen, einen Beitrag zur Erschließung dieses weißen Feldes auf der wissenschaftlichen Landkarte zu leisten. Dank schulde ich ihm auch, da er mir sehr viel Geduld entgegen brachte und mit wertvollen Ratschlägen und Fachwissen für das Gelingen der Arbeit sorgte. Ohne sein Wissen, ohne seine Ideen und seine Kritik wäre mein Forschungsprojekt niemals soweit gediehen.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Eltern zutiefst bedanken. Meine Eltern, die immer für mich da waren, wenn ich sie brauchte, und ohne die ein Studium und eine Doktorarbeit niemals möglich geworden wäre.

Auch bei Mag. Peter Polz möchte ich mich besonders bedanken, er ist mir während des gesamten Studiums eine wertvolle Stütze gewesen.

Ein großer Dank geht aber auch an all meine Kollegen. Herausheben möchte ich dabei Dr. techn. Dipl. Ing. Gerd Mauschitz, der mir mit seinem fundierten Fachwissen und seiner konstruktiven Kritik viele Anregungen für meine wissenschaftliche Arbeit gab und einen wesentlichen Anteil an meiner Arbeit und vor allem meiner persönlichen Weiterentwicklung hat. Viel Anteil am Gelingen dieser Arbeit haben auch jene Kollegen, die ich im Zuge Ihrer Bachelor- oder Masterarbeit begleiten durfte und die mit ihrem unermüdlichen Fleiß und Einsatz einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieses Forschungsprojektes geleistet haben. Hier möchte ich mich bei den von mir betreuten Diplomanden Johannes Wolfslehner und Janina Gospodarek sowie den Bachelorstudenten Amon Purgar, Karl Leibrecht, Johannes Wolfslehner, Georg Kanitschar, Georg Hofer, Joseph Tauber sowie meinen Wahlpraktikanten Yvonne Leitner, Christoph Schrazer, Martin Hunyadi Gall, Christian Hemetzberger und Michael Lingitz bedanken. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen Dipl.Ing Thomas Lahminger und Dipl. Ing. Harald Zeman, Dipl. Ing. Felix Lebl und Dipl. Ing. Markus Stecher die mir mit Rat und Tat jederzeit zur Seite standen.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Vorgängern Dipl. Ing. Peter Werner Grundnig und Dipl. Ing. Jing Gao sowie meinem leider verstorbenen Kollgen Dipl. Ing. Christian Trenker, deren wertvolle Vorarbeit den Weg zu dieser Arbeit geebnet hat.

Besonderer Dank gebührt auch der Arbeitsgruppe thermische Verfahrenstechnik und hier besonders Dipl. Ing Christian Jordan sowie Ass. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Michael Harasek für die Unterstützung der CFD Simulation.

Ich möchte mich auch bei den administrativen Mitarbeitern des Institutes und der TU Wien bedanken. Vor allem Markus Hrbek und Hildegard Reiterer möchte ich hier meinen Dank aussprechen.

Kurzfassung

Diese Arbeit hat den Zweck, eine Optimierung und eine Berechnungsmethode der Wirksamkeit von Wasserspraysystemen zur Abscheidung diffuser Feinstaubemissionen zu entwickeln.

Um die Anwendbarkeit von Wasserspraysystemen in Bezug auf Wintertauglichkeit und Langzeitwirkung (erreichen einer auch im aufgetrockneten Zustand des Schüttgutes ausreichenden primären Staubabscheideeffektivität) zu ermöglichen, wurde im Zuge der experimentellen Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität durch Schüttgutabwurftests eine Messung von Emissionsfaktoren des Schüttgutes bei unterschiedlichen Schüttgutfeuchtegehalten bzw. Anteilen an Additiv im Schüttgut durchgeführt und Restmelasse als ein optimales Sprühwasseradditiv identifiziert.

Die Abscheidung diffuser Staubemissionen durch Düsensprays aus der Luft weist geringe sekundäre Staubabscheidegrade auf. Um zu verstehen, welche Einflüsse bei der Abscheidung diffuser Staubemissionen durch Düsensprays bestehen, wurde mit Hilfe der Aufklärung von Einflussgrößen auf die sekundäre Staubabscheidung durch experimentelle Betrachtungen (Messung der Abscheidung eines Teststaubes bei gerichteter Queranströmung eines Düsensprays) und durch theoretische Betrachtungen (CFD Simulation, Abscheidegradberechnungen) ein Verständnis für die, Zusammenhänge die zur Staubabscheidung aus der Luft führen, geschaffen. Daraus konnte gefolgert werden, dass die Ermittlung und Gegenüberstellung des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages und des ortsaufgelösten Staubeintrages bei sekundärer Staubabscheidung im horizontalen Schnitt durch den Sprühkegel für eine Beschreibung der sekundären Staubabscheideeffektivität notwendig ist.
Bevor der ortsaufgelöste Befeuchtungseintrag bei der primären Staubabscheidung einer Düse mit dem ortsaufgelösten Staubeintrag bei der sekundären Staubabscheidung in Verbindung gebracht werden kann, wurde zunächst geprüft, ob die primäre mit der sekundären Staubabscheideeffektivität in Relation gesetzt werden kann, was anhand der Anwendung eines Wasserspraysystems auf eine Förderbandübergabe durchgeführt wurde. Durch Adaption des Modells von zwei Separatoren, welche in Serie geschaltet sind, konnte für ein Wasserspraysystem einer Förderbandübergabe der Anteil der primären und sekundären Staubabscheideeffektivität an der Gesamtstaubabscheideeffektivität verknüpft werden. Dadurch können primäre und sekundäre Staubabscheideeffektivitäten in Relation gesetzt werden und festgestellt werden, dass bei gleichen Besprühungsparametern die primäre Staubabscheideeffektivität in etwa viermal wirksamer als die sekundäre Staubabscheideeffektivität ist.
Im nächsten Schritt wurde der ortsaufgelöste Befeuchtungseintrag eines Düsensprays bei verschiedenen Bedüsungsparametern (Wasservolumenstrom, Düsenhöhe) durch Messkompartimente erfasst und durch Messungen der Durchfeuchtung von Gutschüttungen festgestellt, dass sich der örtlich aufgelöste Befeuchtungseintrag durch die Gutschüttung fortpflanzt. Davon ausgehend wurde eine neue Auslegungs- und Berechnungsmethode für primäre Staubminderungsmaßnahmen entwickelt. Durch diese Auslegungsmethode kann das Schüttgut bei minimalem Wasserverbrauch optimal befeuchtet, und dabei gleichzeitig maximale primäre Staubabscheidung erzielt werden. Die Methode beruht darauf, dass der örtlich aufgelöste Befeuchtungseintrag einer Fläche unterhalb der Düse durch eine mathematische Glockenkurve beschrieben werden kann, welche für verschiedene Bedüsungsparameterwerte (z.B: für Wasservolumenstrom und Düsenposition) experimentell erfasst wird. Die Konstanten, die die Form

der Glockenkurve für bestimmte Bedüsungsparameter fixieren, werden in ein numerisches Datenfeld überführt, sodass das gesamte Betriebsspektrum der Düse erfasst ist. Weiters werden die von der Schüttgutfeuchte abhängigen materialspezifischen Emissionsfaktoren als Emissionsfunktion mit Hilfe einer Schüttgutfallapparatur ermittelt. Bei Verwendung des numerischen Datenfeldes und der Emissionsfunktion für die primäre Staubabscheideeffektivität wurde in einer Optimierungsrechnung, beispielsweise für eine Förderbandbedüsung, die optimale Auslegung des Bedüsungssystems (Optimalwerte für Wasservolumenstrom und Düsenposition) durchgeführt. Das anhand dieser Förderbandübergabestelle skizzierte Optimierungsverfahren könnte auch in analoger Weise zur Abschätzung der zu erwartenden Emission, sowie zur Ermittlung von optimalen Bedüsungsparametern anderer schüttgutbefeuchtender, staubunterdrückender Wasserspraysysteme dienen.

Für eine Beschreibung der sekundären Staubabscheideeffektivität ist neben dem örtlich aufgelösten Befeuchtungseintrag der örtlich aufgelöste Staubeintrag unterhalb des Düsensprays bei verschiedenen Betriebsbedingungen (Wasservolumenstrom, Düsenhöhe, Staubkonzentration) erfasst worden. Es konnte durch Gegenüberstellung des gemessenen ortsaufgelösten Staubeintrages und des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages festgestellt werden, dass beide in ihrer Form deckungsgleich sind. Das heißt, dass der ortsaufgelöste Staubeintrag mit einem fixen Faktor an den ortsaufgelösten Befeuchtungseintrag gekoppelt ist. Es konnte bei verschiedenen Betriebsbedingungen der Faktor, der es erlaubt den ortsaufgelösten Befeuchtungseintrag in den ortsaufgelösten Staubeintrag umzurechnen, bestimmt werden. Durch die experimentell ermittelten Zusammenhänge kann man aus dem ortsaufgelösten Befeuchtungseintrag die zu erwartende sekundäre Staubabscheideeffektivität berechnen.

Um Betriebsparameter zum Erreichen maximaler sekundärer Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems bei der Staubabscheidung diffuser Staubemissionen zu ermitteln, wurde das entwickelte Optimierungsverfahren für die primäre Staubabscheideeffektivität für die sekundäre Staubabscheideeffektivität adaptiert. Daraus können die optimale Düsenanzahl, der Düsenabstand sowie Wasservolumenstrom und Düsenhöhe in Anlehnung an das Optimierungsverfahren, das für die primäre Staubabscheidung erarbeitet wurde, für maximale Abscheidung diffuser Staubemissionen (primäre und sekundäre Staubabscheideeffektivität) ermittelt werden.
Für die sekundäre Staubabscheideeffektivität konnten anhand der Abscheidung eines Teststaubes bei gerichteter Queranströmung eines Düsensprays optimale Betriebsparameter des Wasserspraysystems ermittelt werden.

Durch die vorliegende Arbeit konnte erstmals ein Optimierungsverfahren für Wasserspraysysteme zum Erreichen maximaler primärer sowie sekundärer Staubabscheideeffektivität bei minimalem Wasserverbrauch erarbeitet werden. Des Weiteren konnte ein Berechnungsweg zur Abschätzung der primären und sekundären Stababscheideeffektivitäten aufgezeigt werden.

Dadurch wurden allgemein anwendbare Verbesserungsoptionen sowie erstmals Optimierungsschemata zur Abscheidung diffuser Staubemissionen geliefert.

Gliederung

Danksagung:		2
Kurzfassung		3
Gliederung		5
1	Einleitung	11
2	Diffuse Staubemissionen bei Schüttgutmanipulation	31
3	Problemstellung	40
4	Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystemes [60]	45
5	Untersuchung der sekundären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystemes	93
6	Vergleich der Staubabscheideeffektivitäten	212
7	Optmierungsverfahren der primären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystemes einer Förderbandübergabe	225
8	Ermittlung der sekundären Staubabscheideeffektivität anhand des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages einer Sprühdüse	316
9	Das Optimierungsverfahren im Vergleich zu Ergebnissen aus theoretischen und experimentellen Betrachtungen	343
10	Zusammenfassung	344
11	Kurzzusammenfassung	352
12	Formelzeichen	356
13	Literaturverzeichnis	363
14	Anhang	369
15	Appendix	396

Inhaltsverzeichnis

Danksagung:		2
Kurzfassung		3
Gliederung		5
1	Einleitung	11
1.1	Definition Staub	11
1.2	Definition Feinstaub	11
1.3	Gefahren von Staub	12
1.3.1	Auswirkungen auf den Boden	12
1.3.2	Auswirkungen auf den Menschen	13
1.3.3	Staubexplosionen	13
1.4	Richtlinien:	13
1.5	Bestimmungsmethoden für Stäube	14
1.5.1	Beispiele für gravimetrische Messtechniken	14
1.5.2	Beispiele für photometrische Messtechniken	16
1.5.3	Schwebstaubmessung auf Basis von Absorption von Betastrahlen [22]	18
1.6	Entstehung von Staub	19
1.6.1	Kräfte, die in ruhender Umgebungsluft auf das Teilchen wirken können	20
1.6.2	Beschleunigung der Staubteilchen durch eine äußere Kraft	21
1.7	Ausbreitung von Staub	22
1.7.1	Definition Emission:	25
1.7.2	Quellenarten:	25
1.7.1	Vergleich diffuse Quellen und Punktquelle	25
1.8	Anteilsmäßige Aufteilung der Staubemissionen	27
1.8.1	Anteil der Emission durch Schüttgutmanipulation an der Gesamtstaubemission	29
2	Diffuse Staubemissionen bei Schüttgutmanipulation	31
2.1	Bedeutung der Schüttgutmanipulation	31
2.2	Einflussfaktoren auf Emission der Schüttgutmanipulation	31
2.2.1	Umschlagsarten für Schüttgüter	31
2.2.2	Emissionsfaktoren für Schüttgüter	32
2.3	Staubabscheidetechnik:	33
2.3.1	Emissionsminderungsmaßnahmen	33

2.4	Anwendung von Wasserspraysystemen zur Abscheidung diffuser Staubemissionen bei Schüttgutmanipulation	35
2.5	Anwendung von Wasserspraysystemen zur Abscheidung diffuser Staubemissionen bei Förderbandübergabestellen	35
2.6	Literaturrecherche	38
2.6.1	Probleme bei der primären Staubabscheidung durch Wasserspraysysteme	38
2.6.2	Probleme bei der sekundären Staubabscheidung durch Wasserspraysysteme	39
3	Problemstellung	40
3.1	Allgemeine Problemstellung	41
3.1.1	primäre Staubabscheidung	41
3.1.2	sekundäre Staubabscheidung	42
3.2	Spezielle Problemstellung	43
4	Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspray-systemes [60]	45
4.1	Auswahl von Schüttgütern zur Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität	47
4.1.1	Eigenschaften und Stoffwerte der Schüttguter	47
4.2	Auswahl von Sprühwasserzusätzen zur Verbesserung der primären Staubunterdrückung	48
4.2.1	Einsatz von Restmelasse als Sprühwasserzusatz	50
4.3	Aufbau der Versuchsapparatur zur Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität	54
4.3.1	Verwendete Geräte	58
4.4	Festlegen der Messmethode zur Messung der Staubemission	62
4.5	Experimentelle Untersuchung der primären Staubabscheideffektivität	63
4.5.1	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung der Schüttgüter	63
4.5.2	Versuche zur Bestimmung des Emissionsfaktors	66
4.5.3	Versuchsplan für Wandschotter	67
4.5.4	Versuchsplan für Bruchkalk	68
4.5.5	Versuchsplan für Streusplitt	69
4.5.6	Probenvorbereitung	69
4.5.7	Versuchsdurchführung	70
4.5.8	Versuchsauswertung und statistische Interpretation der Ergebnisse	71
4.6	Ergebnisse der Fallversuche	73
4.6.1	Darstellungsformen	73
4.6.2	Ergebnisse der Versuche mit Wandschotter	76

4.6.3	Ergebnisse der Versuche mit Bruchkalk	82
4.6.4	Ergebnisse der Versuche mit Streusplitt	84
4.6.5	Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Emissionsminderung	85
4.7	Schlussfolgerung aus den erhaltenen Versuchsergebnissen	89
4.8	Zwischenzusammenfassung	90
4.9	Ausblick	92
5	Untersuchung der sekundären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystemes	93
5.1	Aufbau der Versuchsapparatur	94
5.1.1	Verdrängungseffekt	94
5.1.2	Verdünnungseffekt	95
5.1.3	Verwendete Geräte	96
5.2	Experimentelle Betrachtungen der sekundären Staubabscheidung	102
5.2.1	Bestimmung des Messablaufes	102
5.2.2	Einfluss der Düsenposition auf die sekundäre Staubabscheidung	105
5.2.3	Auswertung der Messungen der sekundären Staubabscheidung bei Standarddüsenposition	111
5.2.4	Ergebnisse der Messung der sekundären Staubabscheidung bei unterschiedlichen Bedingungen	115
5.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der sekundären Staubabscheidung	122
5.3	Theoretische Betrachtungen der sekundären Staubabscheidung	122
5.3.1	CFD Simulation der sekundären Staubabscheidung [52]	123
5.3.2	Adaption des Barth-Schuch-Löffler Modelles zur Berechnung der sekundären Staubabscheideeffektivität [79]	189
6	Vergleich der Staubabscheideeffektivitäten	212
6.1	Ableitung eines effektiven Wasservolumenstromes unter Berücksichtigung der Verdampfung	212
6.1.1	Wasserverlust durch Verdunstung	213
6.1.2	Berechnung der verdunsteten Wassermenge im Betrieb	213
6.1.3	Berechnung der maximal verdunstenden Wassermenge	218
6.1.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Berechnung der verdampfenden Wassermenge bei Wasserspraysystemen	222
6.1.5	Berechnung des effektiven Wasservolumenstromes bei den experimentellen Betrachtungen der sekundären Staubabscheidung	222
6.2	Vergleich der Staubabscheideeffektivitäten beim selben effektiven Wasservolumenstrom	223

7	Optmierungsverfahren der primären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystemes einer Förderbandübergabe	225
7.1	Einleitung und Aufgabenstellung	225
7.2	Aufbau der Versuchsapparatur zur Vermessung von Sprühbildern (flächenmäßige Befeuchtung)	228
7.2.1	Vermessung von Sprühbildern (=Befeuchtungsfeldern) von Zweistoffdüsen (Vollkegeldüse und Flachstrahldüse)	228
7.3	Modell zur Beschreibung des Befeuchtungsfeldes von Vollkegeldüsen in Abhängigkeit der Bedüsungsparameter (flächenmäßige Befeuchtung)	231
7.3.1	Befeuchtungsmodell	231
7.3.2	Ergebnisse der Beschreibung der Sprühbilder der Vollkegeldüse durch das Befeuchtungsmodell	234
7.3.3	Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse	234
7.4	Modell zur Beschreibung des Befeuchtungsfeldes von Flachstrahldüsen in Abhängigkeit der Bedüsungsparameter von Wasserspraysystemen (flächenmäßige Befeuchtung)	235
7.4.1	Erweiterung der Gauß‘schen Glockenkurve des Befeuchtungsmodelles [89]	237
7.4.2	Ergebnisse der Beschreibung der Sprühbilder der Flachstrahldüse durch das erweiterte Befeuchtungsmodell	239
7.4.3	Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse	253
7.5	Berechnung und experimentelle Ermittlung des Flüssigkeitsmassenstromprofils über die Förderbandbreite aus der flächenmässigen Befeuchtung	253
7.5.1	Diskretisierte Summation zur Berechnung des Flüssigkeitsmassenstromes	254
7.5.2	Experimentelle Ermittlung des Flüssigkeitsmassenstromprofils über die Förderbandbreite aus der flächenmässigen Befeuchtung	258
7.6	Vermessung und Ableitung der Schüttgutdurchfeuchtung ausgehend vom Flüssigkeitsmassenstrom der Vollkegeldüse (tiefenbezogenen Befeuchtung)	271
7.6.1	Versuchsanordnung zur Vermessung der Schüttgutdurchfeuchtung	272
7.6.2	Versuchsdurchführung der Vermessung der Schüttgutdurchfeuchtung	274
7.6.3	Auswertung der Schüttgutdurchfeuchtung	276
7.6.4	Ergebnisse der Vermessung der Schüttgutdurchfeuchtung	277
7.6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der Tiefendurchfeuchtungsanalyse	283
7.7	Berechnung der Auslegungsparameter eines Wasserspraysystems zum erreichen gleichmässiger Befeuchtung als Optimierungsziel	284
7.8	Berechnung der Auslegungsparameter eines Wasserspraysystems zum erreichen minimaler PM10 Emission	309
8	Ermittlung der sekundären Staubabscheideeffektivität anhand des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages einer Sprühdüse	316

8.1	Aufgabenstellung	316
8.2	Aufbau der Versuchsapparatur	317
8.3	Experimentelle Betrachtungen [97]	317
8.3.1	Vermessung des Staubabscheidefeldes in Abhängigkeit der Auslegungsparameter von Wasserspraysystemen	317
8.4	Modell zur Beschreibung des Staubabscheidefeldes von Sprühdüsen	328
8.4.1	Diskretisierte Summation zur Berechnung zur Berechnung der sekundären Staubabscheideeffektivität	330
8.4.2	Experimentelle Ermittlung des Flüssigkeitsmassenstromprofils über die Förderbandbreite aus der flächenmässigen Befeuchtung	335
8.5	Definition des Optimierungszieles	340
8.5.1	Zwischenzusammenfassung	341
9	Das Optimierungsverfahren im Vergleich zu Ergebnissen aus theoretischen und experimentellen Betrachtungen	343
10	Zusammenfassung	344
11	Kurzzusammenfassung	352
12	Formelzeichen:	356
13	Literaturverzeichnis	363
14	Anhang	369
14.1	Datenblatt des Mastersizer 2000	370
14.2	Datenblatt Dispergiermodule Hydro 2000S	371
14.3	Datenblatt Trockendispergiereinheit Scirocco	372
14.4	SOP-Konzept der automatischen Steuerung der	373
14.5	Datenblatt des Seitenkanalverdichters	374
14.6	PURAL NF Bestellschein	375
14.7	Partikelgrößenverteilung des verwendeten Teststaubes PURAL NF	376
14.8	Partikelgrößenverteilung des abgeschiedenen Teststaubes PURAL NF	377
14.9	Datenblatt der Vollkegel-Zweistoffdüse 1005 VSR	378
14.10	Lebenslauf des Verfassers	386
14.11	Publikationsliste des Verfassers	391
15	Appendix	396

1 Einleitung

1.1 Definition Staub:

Allgemein gesehen sind Stäube disperse Verteilungen fester Stoffe in Gasen z.B: Luft, entstanden entweder durch Kondensation aus Gasen und Dämpfen, durch Dispersion aus kompakten Massen oder auch durch Vermehrung von Mikroorganismen in der Luft. Der Begriff des Staubes wird umgangssprachlich oft auch für Teilchen verwendet, die bereits aus Gasen oder der Luft auf eine Oberfläche sedimentiert sind [1] [2].

1.2 Definition Feinstaub:

Feinstaub ist ein Teil des Schwebstaubs. Die Definition des Feinstaubs geht zurück auf den im Jahre 1987 eingeführten „National Air Quality"-Standard for **P**articulate **M**atter (kurz als PM-Standard bezeichnet) der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde EPA (Environmental Protection Agency). Die EPA klassifiziert particulate matter als eine von 6 Luftschadstoffen (PM, CO, Pb, NOx, O_3 und SO_2) [3]. Die Umweltschutzbehörde (Environmental Protection Agency) hat wegen der Lungengängigkeit von Feinstaub ihr Hauptaugenmerk auf die Ermittlung von Emissionsfaktoren für "PM-10" (Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner 10 µm) gerichtet. Als aerodynamischer Durchmesser eines Teilchens beliebiger Form und Dichte wird allgemein der Durchmesser einer Kugel mit der Dichte von (1,0 g/cm³) bezeichnet, welche die gleiche Sinkgeschwindigkeit in ruhender oder laminar strömender Luft, wie das betrachtete Teilchen, besitzt. In der Richtlinie 1999/30/EG des Rates der europäischen Union wird PM10 als jene Partikel definiert, welche einen größenselektiven Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist.[4] Diese Definition unterscheidet sich von der Definition der EPA deutlich, da man in der Richtlinie des Rates nur von einer Abscheidewirksamkeit von 50 % für Teilchen von 10 µm spricht. Die Definition des Rates wird für Immissionsmessungen und zur Definition von Grenzwerten in der EU herangezogen. (Anmerkung: Analog wird PM2.5 von der EU definiert). [4] Für die EPA sind ebenfalls Grenzwerte für PM-2,5 (Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner 2,5 µm) von Interesse, da diese Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2,5 µm beim Menschen bis in die Lungenbläschen vordringen können. Die US-EPA [4] unterscheidet daneben grundsätzlich zwischen:

TSP:"Total Suspended Particulate", emittierbare Staubpartikel, Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser< 57 µm

SP: "Suspended Particulate", Schwebstaub, wird oft als Ersatz für TSP verwendet, als "PM-30" bezeichnet.

IP: "Inhalable Particulate", einatembarer Feinstaub, Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 15 µm, als "PM -15" bezeichnet.

FP: "Fine Particulate", Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 2,5 µm, als "PM-2,5" bezeichnet

Wegen der einfacheren praktischen Zugänglichkeit wird in dieser Arbeit im Weiteren PM10 über die Definition nach EPA berechnet.

1.3 Gefahren von Staub

Staubemissionen stellen in der heutigen Zeit ein immer größer werdendes Problem für die Umwelt dar. Speziell Feinstäube im Bereich von 2,5 µm und darunter, die massenmäßig keinen großen Anteil liefern und daher in der Vergangenheit wenig beachtet wurden, rücken in das Zentrum des Interesses. Dies deswegen, da ihre Gesundheitsgefährdung erst in letzter Zeit erkannt wurde und die damit verbundene Maßnahmen neue Herausforderungen bei der Entwicklung von verbesserten Abscheidetechniken stellen.

Feinstäube können in den menschlichen Atmungstrakt eindringen und Krankheiten wie z.B. Silikose auslösen. Auch die erfolgte starke Zunahme von chronischen Atemwegserkrankungen wird der Feinstaubbelastung zugeordnet [4]. Zusätzlich wirkt der Feinstaub nicht nur als Schadstoff selbst, sondern ist noch in der Lage, im Gas befindliche andere Schadstoffe an der Partikeloberfläche durch Sorption zu binden. Die beim Feinstaub vorhandene extrem große Partikeloberfläche und dessen Möglichkeit zur Lungengängigkeit lässt daher diesen als besonders gesundheitsgefährlich ansehen [5].

Eine Studie von Wichmann deutet an, dass insbesondere Partikel <1 µm besondere gesundheitliche Auswirkungen haben [5]. In dieser Studie, in der Auswirkungen von Partikel mit Durchmesser zwischen 0,01 µm und 2,5 µm untersucht wurden, wurde festgestellt, dass Effekte wie "Husten" und "Krankfühlen während des Tages" bei den Staubfraktionen mit einem Durchmesser kleiner 1 µm am stärksten ausgebildet waren.

Auch im Bereich der Sicherheitstechnik muss darauf geachtet werden, dass hochkonzentrierte Staubaufwirbelungen von brennbaren und/oder oxidierbaren Stäuben, insbesondere von Feinstäuben, die eine relative hohe spezifische Oberfläche besitzen, explosionsgefährliche Gemische bilden können, die dann ein Gefährdungspotential für den Menschen darstellen.

Ein weiterer Aspekt im Bereich des Umweltschutzes stellt Bodenablagerung von Stäuben dar. Dadurch werden Wertminderungen von landwirtschaftlichen Flächen, zum Beispiel durch Bodenversalzungen in der Nähe von Steinsalz- und Kaliwerken, und Hemmungen des Wurzelwachstums durch Anreicherung von Metalloxiden, die auf Staubpartikeloberflächen durch Sorption gebunden sind, verursacht [7].

1.3.1 Auswirkungen auf den Boden

Nach [8] zählen hierzu:

- Verschiebung des pH-Wertes durch Flugaschen aus Braunkohlekraftwerken
- Hemmung des Wurzelwachstums durch Anreicherung von Metalloxiden
- Bodenversalzungen im Emissionsbereich von Steinsalz- und Kaliwerken
- Wertminderung von landwirtschaftlichen Produkten

1.3.2 Auswirkungen auf den Menschen

Stäube können vom Menschen eingeatmet oder geschluckt werden. Bekannt sind Krankheiten wie Asbestose oder Silikose, doch konnte bei epidemiologischen Studien auch eine starke Zunahme von chronischen Atemwegserkrankungen nachgewiesen werden [9]. Ferner können insbesondere durch Feinstaub (PM 10) mittels Hautresorptionen beträchtliche Schädigungen des menschlichen Organismus auftreten (auch durch Grobstaub) [10].

1.3.3 Staubexplosionen

In gewissen Industriezweigen können sich durch Staubaufwirbelungen von brennbaren Stäuben fest-gasförmig-Gemische entwickeln, die bei geeigneter Konzentration (ab etwa *100 g/m³)* durch Zündung explodieren.

1.4 Richtlinien:

In der EU wurden PM10 Emissionsrichtlinien durch die Richtlinie des Rates 1999/30/EG 1999 eingeführt. In dieser Richtlinie wurden 2 Phasen zur Reduktion der PM10 Emission auf einen festgelegten Standardwert definiert. Die erste Phase endete am 01.01.2005. Mit diesem Datum ist es in den Mitgliedsstaaten der EU Pflicht geworden eine PM10 Emission im Jahresmittel von 40 µg/m³ einzuhalten. Allerdings darf an 35 Tagen im Jahr ein Tagesmittelwert von bis zu 50 µg/m³ auftreten [11]. Überschreitungen jedes Landes werden im jährlich erscheinenden Emissionsreport publiziert.
Im Jänner 2010 endete auch die zweite Phase, demnach gilt es nun die festgelegten PM10 Emissionsstandards von 20 µg/m³ in Jahresmittel und 50 µg/m³ in Tagesmittel die maximal an 7 Tagen im Jahr erreicht werden dürfen einzuhalten. In Österreich werden die EU-Richtlinien als Gesetz im Imissionsschutzgesetz (IG-L) umgesetzt. Zusammen mit anderen Ländern innerhalb der europäischen Union hat Österreich Probleme die Richtlinie aus dem Jahr 2005 einzuhalten. Deshalb hat Österreich um eine Verlängerung der Gültigkeitsfrist der Richtlinie aus dem Jahr 2005 angesucht [12].

Um die Richtlinien einhalten zu können benötigen alle Länder effektivere Methoden um PM10 Emissionen zu reduzieren. Die Richtlinie RL 2008/50/EG ist der erste EU Standard welcher sogar PM2,5 Grenzwerte vorsieht [13]. Weitere politische Maßnahmen richten sich direkt an die Verursacher der Luftverschmutzung. Eine dieser Maßnahmen ist die Einführung des EUROPEAN POLLUTANT RELEASE AND TRANSFER REGISTER (E-PRTR) welches sich an die Industrie richtet. Das E-PRTR ist ein europaweites Register welches Emissionsdaten von Industrieanlagen erfasst. Es umfasst Emssisonsdaten von 24000 Industrieanlagen welche jährlich gemeldet werden müssen [14]. Das E-PRTR ist öffentlich zugänglich um die Auswirkung von Industriebetrieben vor Ort transparenter zu machen. Dadurch wird Druck auf Unternehmen aufgebaut, welche die Emissionsstandards nicht einhalten, um in eine Verbesserung der Abscheidemaßnahmen zu investieren um das Prestige des Unternehmens nicht zu gefährden.

1.5 Bestimmungsmethoden für Stäube

Nach [15] unterscheidet man folgende potentielle Messtechniken für die Bestimmung von Partikelkonzentrationen, die auf unterschiedliche physikalische Effekte und Gesetze beruhen:

- Gravimetrie
- Radiometrie
- Ultraschallabsorption
- Trägerkristallresonanzfrequenzmessung
- Photometrie
- Streulichtmessung

1.5.1 Beispiele für gravimetrische Messtechniken

Neben geeigneten Filtern wie High-Volume-Sampler können auch Kaskadenimpaktoren verwendet werden, die den Vorteil haben, dass die Partikelverteilung gemessen wird und eine chemische Analyse möglich ist.

1.5.1.1 Staubkammer nach Dale A. Lundgren [16]

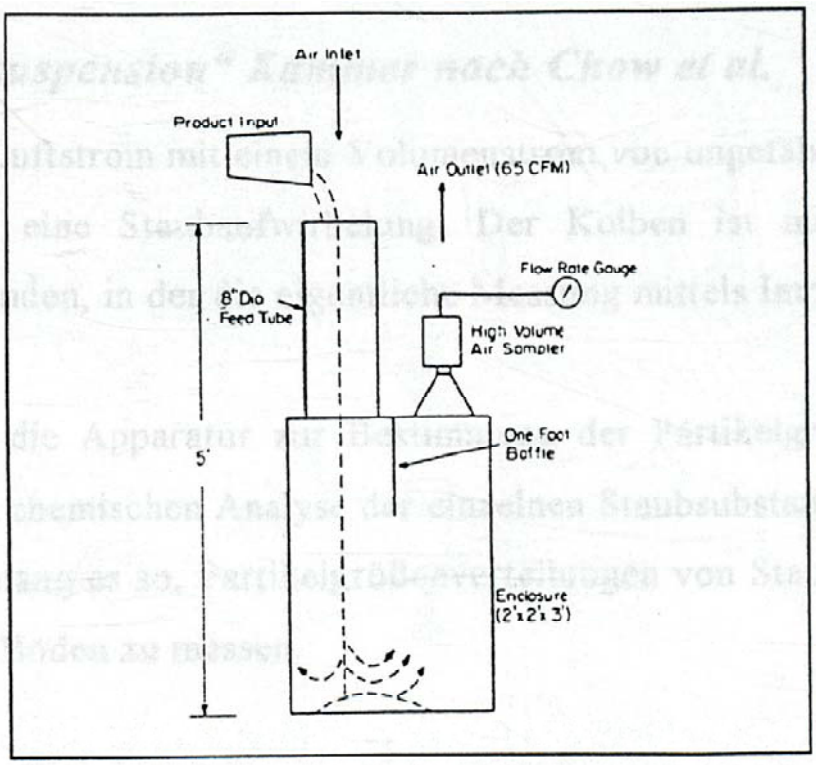


Abbildung 1-1: ***Grundschema der Staubkammer nach Lundgren [16]***

Um Emissionsfaktoren bestimmen zu können, entwickelte Dale A. Lundgren die in Abbildung 1-1 dargestellte einfache Staubkammer. 5 kg von der zu bestimmenden Probe werden abgeworfen und fallen durch ein Fallrohr mit 200 mm Durchmesser von 1,6 m Höhe auf eine Zementplatte. Der entstehende

Staub wird mit einem Gasvolumenstrom von 2 m^3/min abgesaugt und im High-Volume-Sampler gesammelt. Der Volumenstrom ist so dimensioniert, dass die Luft in der Staubkammer ungefähr 5-mal pro Minute ausgetauscht werden kann. Partikel, die einen kleineren aerodynamischen Durchmesser als 20 µm besitzen, können so angesaugt werden, während Partikel > 20 µm auf der Zementplatte sedimentieren. Nun wird der 200 x 250 mm große Glasfaserfilter abgewogen und so

die Masse des abgesaugten Staubes bestimmt. Um zu vermeiden, dass Material direkt vom Fallrohr auf den Filter gelangt, wurde in der Kammer ein Prallblech installiert.

Mit dieser einfach zu bedienenden Apparatur können Emissionsfaktoren von *1g/t* bis 1kg/t bestimmt werden. [16]

1.5.1.2 "Resuspension" Kammer nach Chow et al.

Ein gepulster Luftstrom mit einem Volumenstrom von ungefähr 45-50 *L/min* bewirkt in einem Kolben eine Staubaufwirbelung. Der Kolben ist mit der "Resuspension" Kammer verbunden, in der die eigentliche Messung mittels Impaktor erfolgt. Primär wurde die Apparatur zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und zur nachfolgenden chemischen Analyse der einzelnen Staubsubstanzen entwickelt. Chow et al. gelang es so, Partikelgrößenverteilungen von Staubproben landwirtschaftlich genutzter Böden zu messen (Abbildung 1-2) Dieses Verfahren ist nicht dazu geeignet, Emissionsfaktoren zu messen. Es können nur Fraktionsverteilungen bestimmt werden.

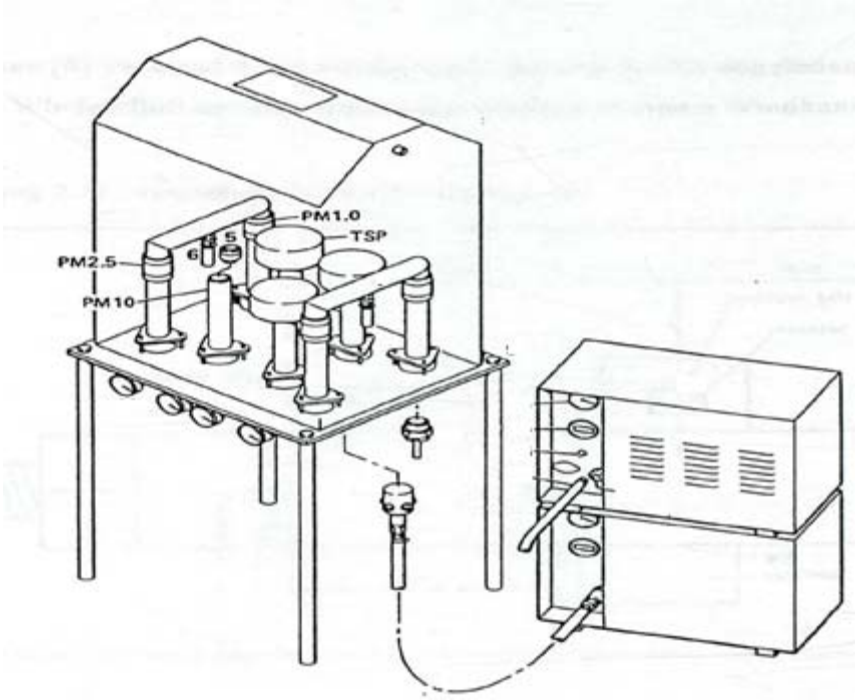


Abbildung 1-2 : ***Resuspendierungsapparat [17]***

1.5.1.3 Untersuchungen des Staubungsverhaltens von Schüttgütern im Windkanal

In obigen Messverfahren können zwar verschiedene Einflussfaktoren auf die Staubungsfähigkeit wie Feuchtegehalt des Gutes, Abwurfhöhe usw. variiert werden, die Windgeschwindigkeit wird aber nicht berücksichtigt. Einige Autoren versuchten in Windkanalstudien diesen Einfluss zu bestimmen:

G. T. Visser [18] verwendet ein Förderband, mit dem Kohle abgeladen wird, und untersucht den Windeinfluss auf das Staubbildungsverhalten in einem Windkanal (Abbildung 1-3).

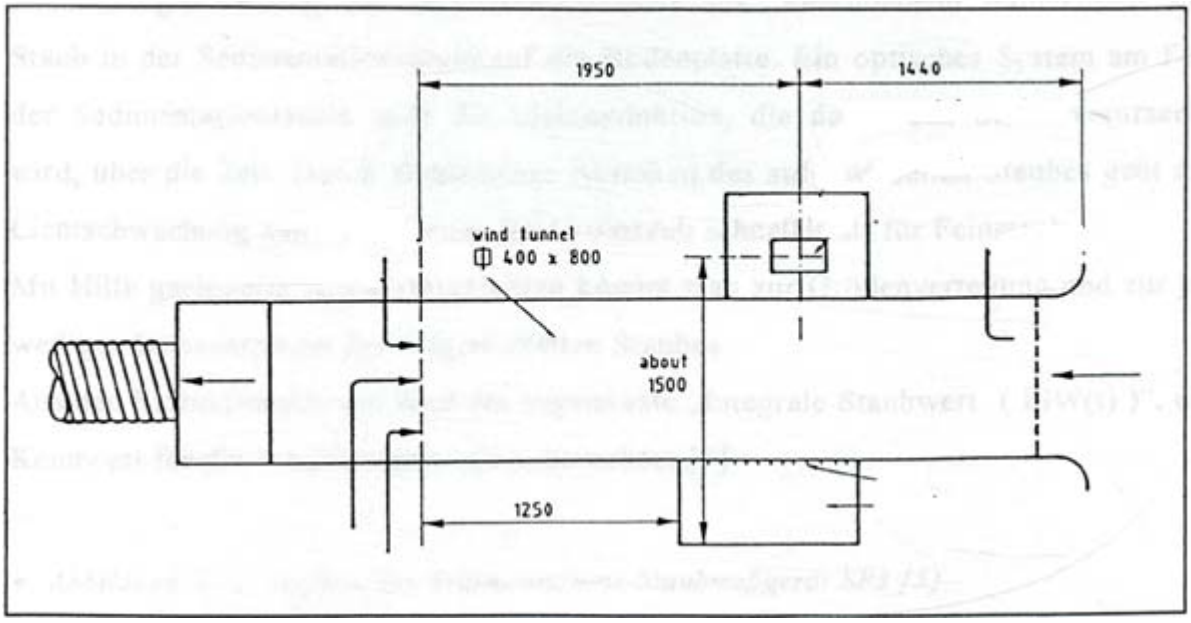


Abbildung 1-3 : ***Grundschema des Windkanals [18]***

Der Windkanal ist in seinem Querschnitt in 9 Sektoren geteilt. Je ein Probensammler, bestehend aus einem Filterhalter für vorgewogene Glasfaserfilter, befindet sich in der Mitte eines jeden Sektors. Nach jedem Versuch werden, die Filter abgewogen. Die Durchflussraten durch die Probensammler können in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit individuell eingestellt werden (isokinetische Probenname). Nach [18] werden die Staubemissionen in einen "impaction part" und einen "windsift part" unterteilt. Der "impaction part", wie er in den Staubkammern nach Dale A. Lundgren gemessen wird, ist nur von der Gutsfeuchte abhängig, während der "windsift part" auch von der Windgeschwindigkeit abhängig ist [18].

1.5.2 Beispiele für photometrische Messtechniken

1.5.2.1 Sedimentations-Staubmessgerät SP3, Lorentz Messgeräte [19]

Schüttgut in den durch die Doppelklappe verschlossenen Beschickungskonus eingefüllt. Zum Messbeginn wird die Doppelklappe geöffnet, sodass die Probe (zwischen 1 g und 5 g) auf die Bodenplatte fallen kann. Während des Fallens und beim Auftreffen auf die Bodenplatte wird Staub freigesetzt und füllt gleichmäßig die Sedimentationssäule aus. Anschließend sedimentiert der Staub in der Sedimentationssäule auf die Bodenplatte. Ein optisches System am Fuß der Sedimentationssäule misst die Lichtextinktion, die durch den Staub verursacht wird, über die Zeit. Durch allmähliches Absinken des aufgewirbelten Staubes geht die Lichtschwächung zurück und zwar für Grobstaub schneller als für Feinstaub. Mit Hilfe geeigneter Auswerteverfahren kommt man zur Größenverteilung und zur jeweiligen Konzentration des aufgewirbelten Staubes. Aus den Extinktionskurven wird der sogenannte ,,Integrale Staubwert (ISW(t))", ein Kennwert für die Staubkonzentration, berechnet. [19] siehe (Abbildung 1-4, Abbildung 1-5)

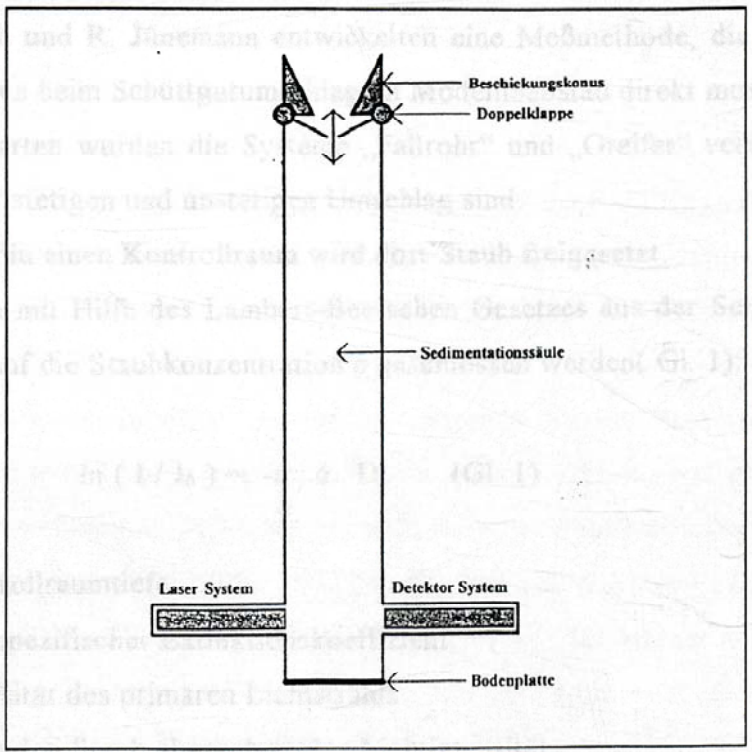


Abbildung 1-4 : ***Aufbau des Sedimentations-Staubmessgerät SP3*** **[19]**

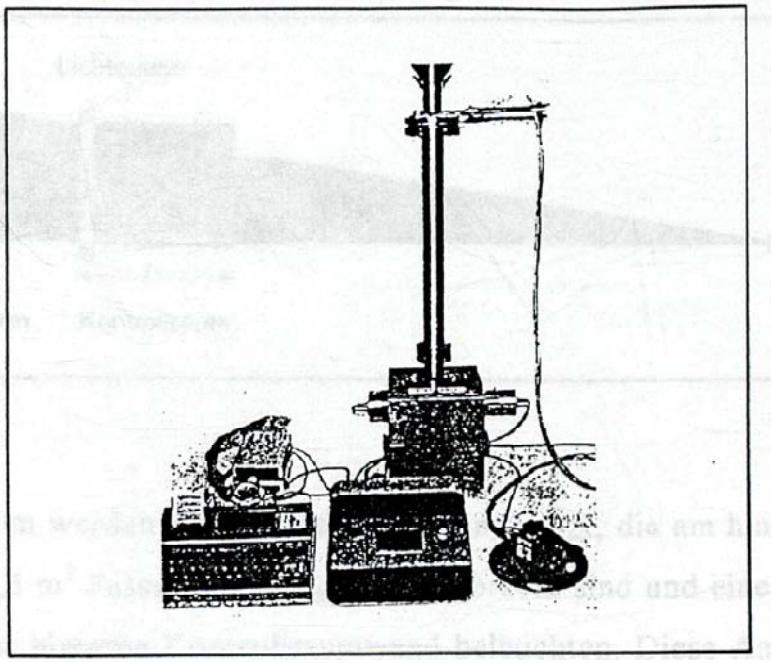


Abbildung 1-5: ***Staubfall-Fotosedimentometer mit Zusatzgeräten [19]***

1.5.2.2 *Methode zur Bestimmung diffuser Staubemissionen nach D. Eickelpasch und R. Jünemann [21]*

D. Eickelpasch und R. Jünemann entwickelten eine Messmethode, die es ermöglicht, Staubemissionen beim Schüttgutumschlag im Modellmaßstab direkt messen zu können (Abbildung 1-6). Als Umschlagarten wurden die Systeme "Fallrohr" und "Greifer" verwendet, die repräsentativ für stetigen und unstetigen Umschlag sind. Durch Abwurf in einen Kontrollraum wird dort Staub freigesetzt. Nach [21] kann mit Hilfe des Lambert-Beer'schen Gesetzes aus der Schwächung eines Lichtstrahles auf die Staubkonzentration c geschlossen werden (Formel 1-1)

$$\ln (I / I_0) = -\varepsilon \cdot c \cdot D \qquad (1\text{-}1)$$

D Kontrollraumtiefe
ε stoffspezifischer Extinktionskoeffizient
I_0 Intensität des primären Lichtstrahls
I durch den Staub abgeschwächte Lichtintensität

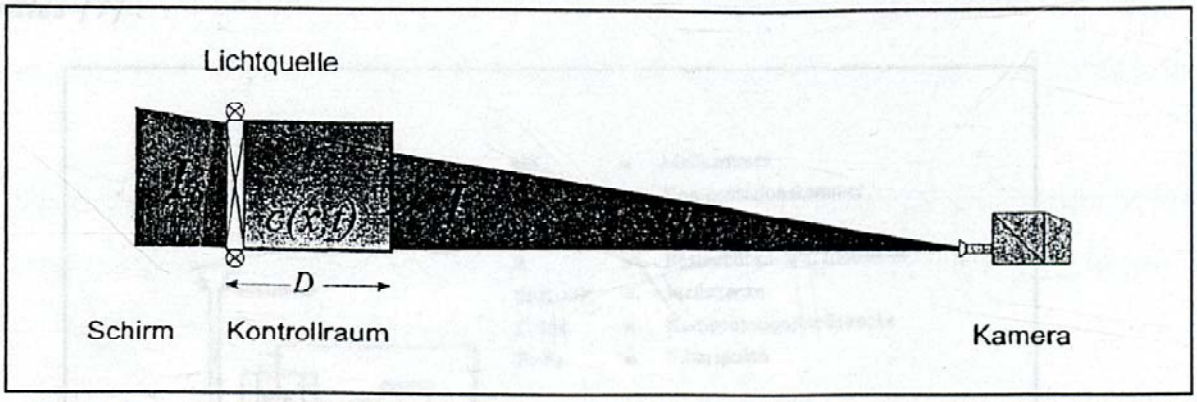


Abbildung 1-6: ***schematische Anordnung des kompletten Messsystems***

Als Lichtquellen werden Leuchtstoffröhren eingesetzt, die am hinteren Ende des Kontrollraums (1,5m³ Fassungsvermögen) angebracht sind und einen Schirm in etwa 1m Entfernung zur hinteren Kontrollraumwand beleuchten. Diese Anordnung führt zu einer weitgehend homogenen Ausleuchtung des Kontrollraumes. Als Lichtsensor wurde eine CCD-Kamera verwendet. Die Videoaufnahmen werden mittels PC mit Videokarte digitalisiert und ausgewertet [21].

1.5.3 Schwebstaubmessung auf Basis von Absorption von Betastrahlen [22]

Nach [22] ist zur Schwebstaubmessung ein Gerät der Firma F AG Kugelfischer geeignet (Abbildung 1-7). Mit dieser Apparatur ist es möglich, durch definiertes Absaugen der Luft an einer Stelle des Kontrollraumes die Staubkonzentration an dieser Stelle zu bestimmen. Die zu untersuchende Luft wird von der Zentralpumpe über die Probenahmeeinheit mit konstantem Durchsatz (standardmäßig 1 m³/h) in das Zentralgerät gesaugt, wo sich die in der Luft enthaltenen Staubpartikel auf einem Filterband abscheiden. Dieses Filterband wird mit einem ß-Strahler (Kr85 mit einer Halbwertszeit von 10,4 Jahren) durchstrahlt und die Intensität des Strahlenbündels mit Hilfe einer nachgeschalteten Ionisationskammer gemessen. Die Schwächung der Strahlung stellt ein Maß für die auf den Filter abgeschiedenen Staubmengen dar.

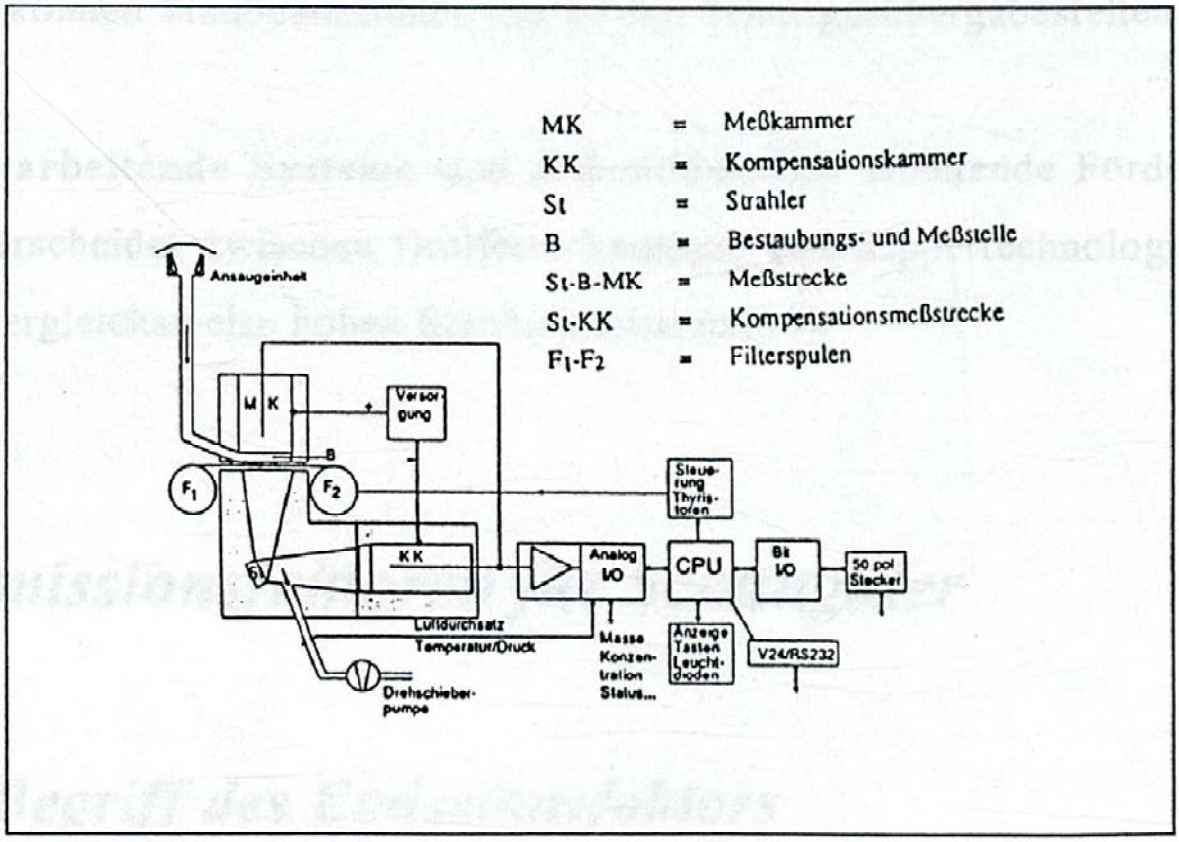


Abbildung 1-7: ***Funktionsprinzip des auf Prinzip ß-Absorption beruhenden Staubmessgerätes*** **[22]**

1.6 Entstehung von Staub

Staub kann sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs sein [22] :

Natürlichen Ursprungs:

- Vulkanausbrüche
- Winderosion
- natürliche Verbrennungsprozesse (z.B. Waldbrände)

Anthropogenen Ursprungs:

- Herstellung und Verarbeitung von Gütern
- Verladevorgänge (Schüttgutmanipulation)
- Verbrennungsprozesse
- Straßenverkehr
- Bergbau (hauptsächlich Tagebau) (Im Besonderen soll hier die Entstehung von Staub bei Schüttgutlagerung und Umschlag betrachtet werden)

Es werden zwei Mechanismen, die dazu führen, dass sich die im Schüttgut befindlichen Staubteilchen aus dem Teilchenverband lösen und emittiert werden, unterschieden [22]:

- bewegte Grenzschicht
- Impulsaustausch

1.6.1 Kräfte, die in ruhender Umgebungsluft auf das Teilchen wirken können

Für das Herauslösen eines Staubteilchens aus dem bestehenden Teilchenverband muss man eine Kraft zur Überwindung der vorhandenen Haftkräfte aufbringen. Die Haftkräfte stellen ein wesentliches Maß für die Neigung eines Schüttgutes zur Staubentwicklung dar siehe Abbildung 1-8.

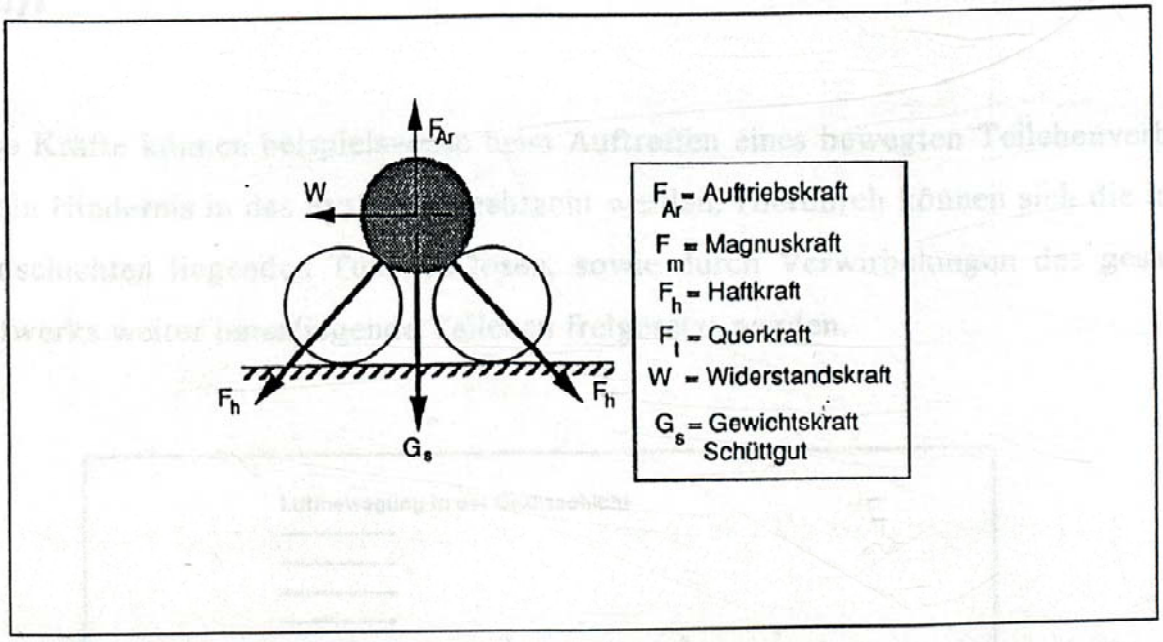


Abbildung 1-8*: An einem Teilchen angreifende Kräfte in einem Haufwerk [22]*

Ferner benötigt man eine Kraft, um das Staubteilehen für den Fall der Flugförderung in einen stationären Schwebezustand zu versetzen wie in Abbildung 1-9 dargestellt ist.

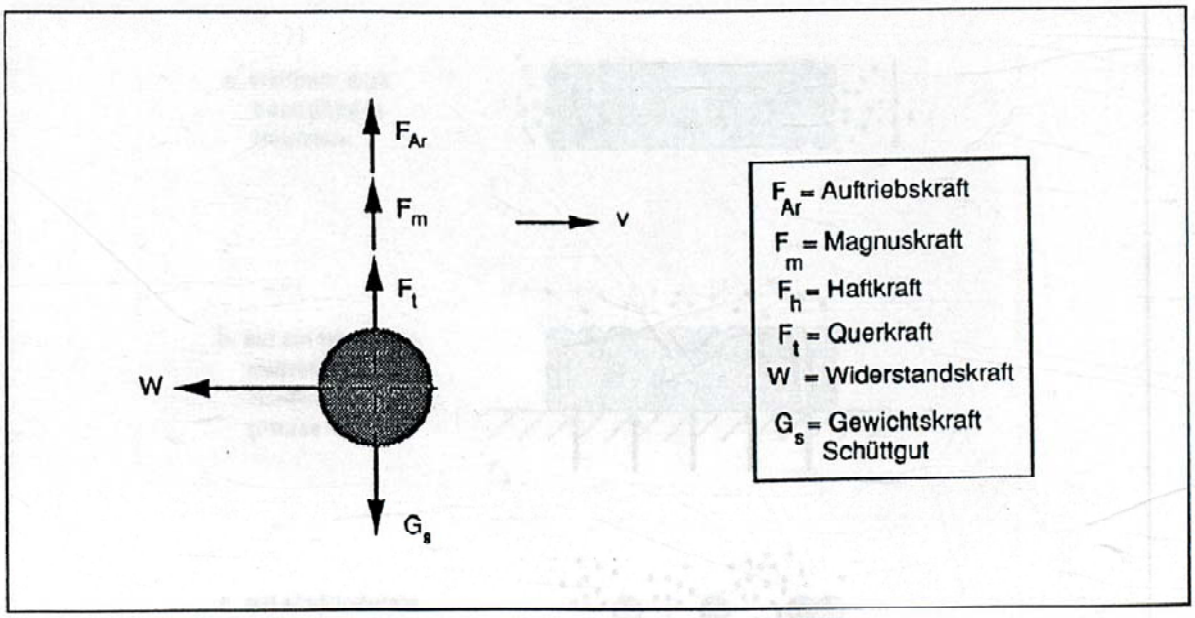


Abbildung 1-9: ***An einem Teilchen angreifende Kräfte beim freien Flug*** **[22]**

1.6.2 Beschleunigung der Staubteilchen durch eine äußere Kraft

Diese Kräfte können beispielsweise beim Auftreffen eines bewegten Teilchenverbands auf ein Hindernis in das System eingebracht werden. Hierdurch können sich die in den Randschichten liegenden Teilchen lösen, sowie durch Verwirbelungen des gesamten Haufwerks weiter innenliegende Teilchen freigesetzt werden (Abbildung 1-10).

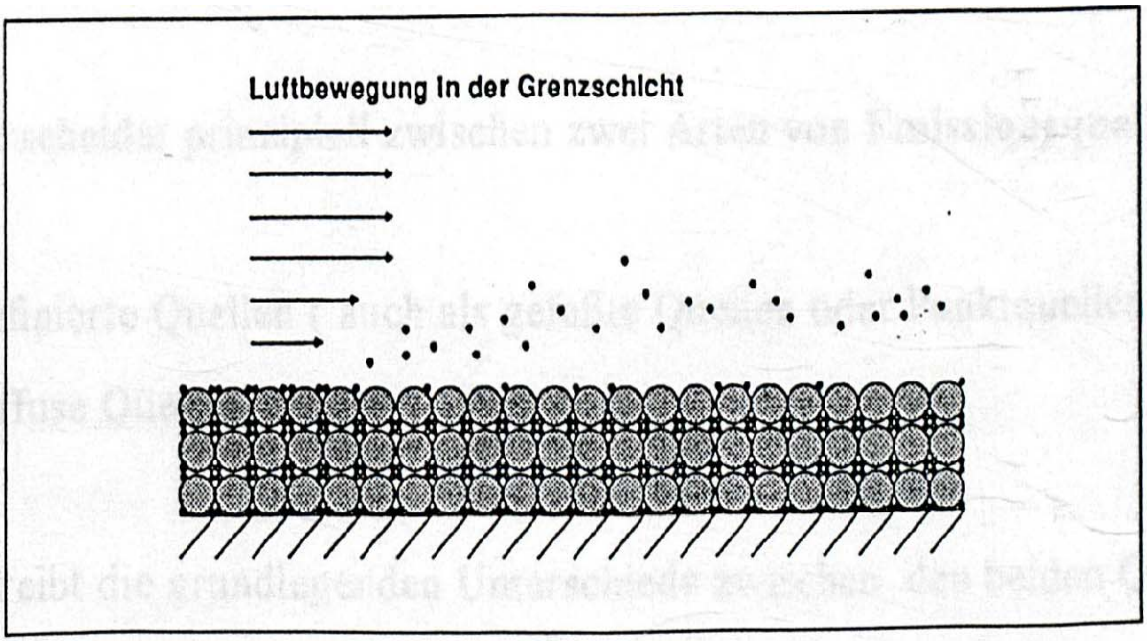


Abbildung 1-10: ***Staubablösung an einer Schüttung durch eine bewegte Grenzschicht*** **[22]**

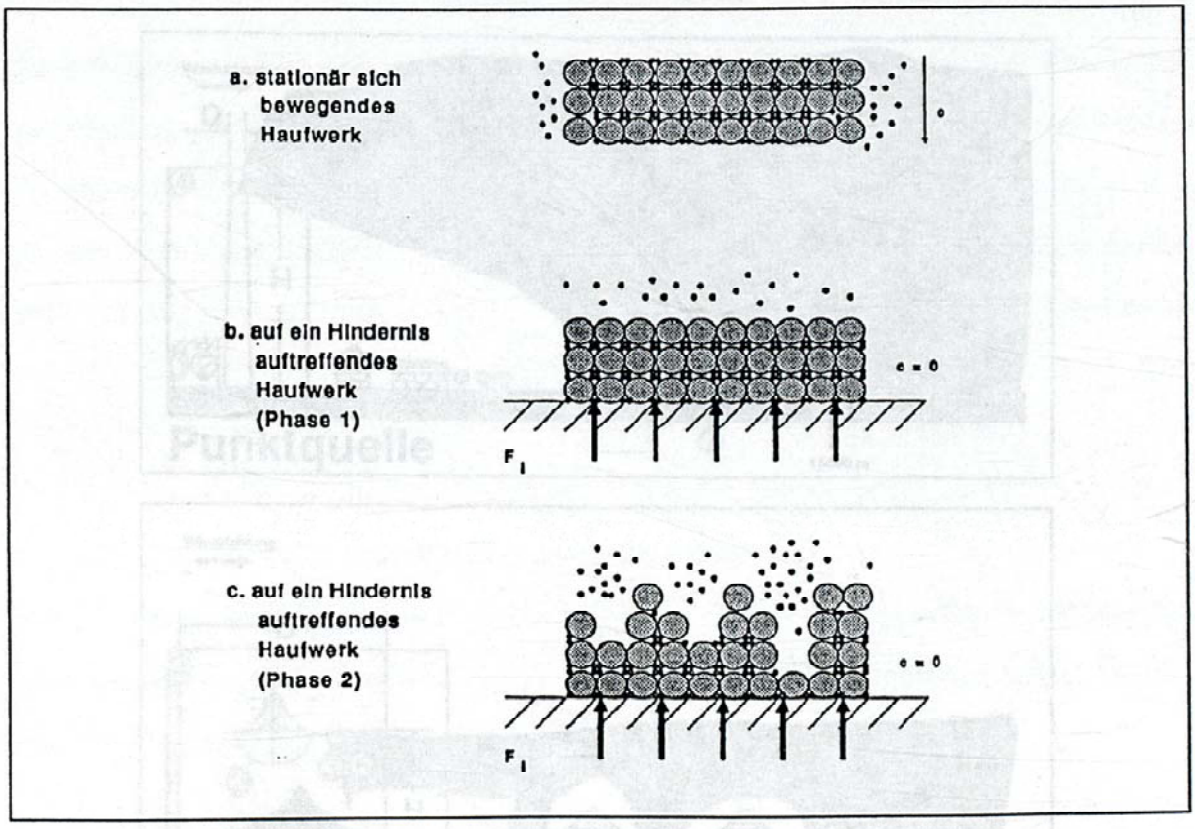


Abbildung 1-11 : ***Staubablösung aus einer Schüttung durch einen Impulsaustausch mit einem Hindernis***

Für die Höhe der Staubentwicklung sind die Größe der Kraft und die Bewegungsmöglichkeit der Teilchen im Haufwerk verantwortlich [22] (Abbildung 1-11).

1.7 Ausbreitung von Staub

Nach der Emission des Feinstaubes, egal ob durch definierte oder diffuse Staubquellen, kommt es wie in Abbildung 1-12 dargestellt zum Transport der Partikel durch Transmission und in weiterer Folge zur Immission.

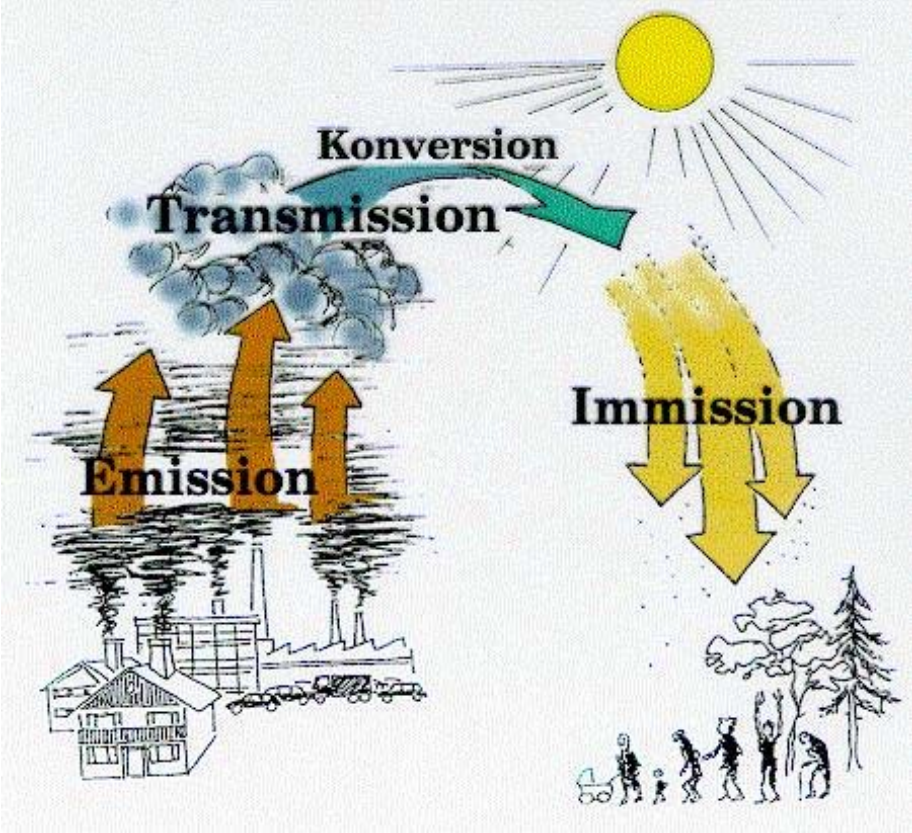


Abbildung 1-12 Ausbreitung des Staubes (von der Emission zur Imission) [23]

Einfluss auf Emissionen bei Schüttgütern allgemein:

Einflussgrößen auf die Emission von Schüttgütern allgemein sind:

- Meteorologie
  - Windrichtung und Geschwindigkeit, Turbolenzverhalten, Feuchtigkeit, …
- Haldenkenngrößen
  - Haldenform und Abmessungen, Böschungswinkel, Angriffsfläche, Umgebung, …
- Umschlaggrößen
  - Umschlagart, Abwurfhöhe Dichtheit von Greifern, …

Man unterscheidet prinzipiell zwischen zwei Arten von Emissionsquellen [25] .

- definierte Quellen (auch als gefasste Quellen oder Punktquellen bezeichnet)
- diffuse Quellen

[22] beschreibt die grundlegenden Unterschiede zwischen den beiden Quelltypen (Abbildung 1-13, Abbildung 1-14):

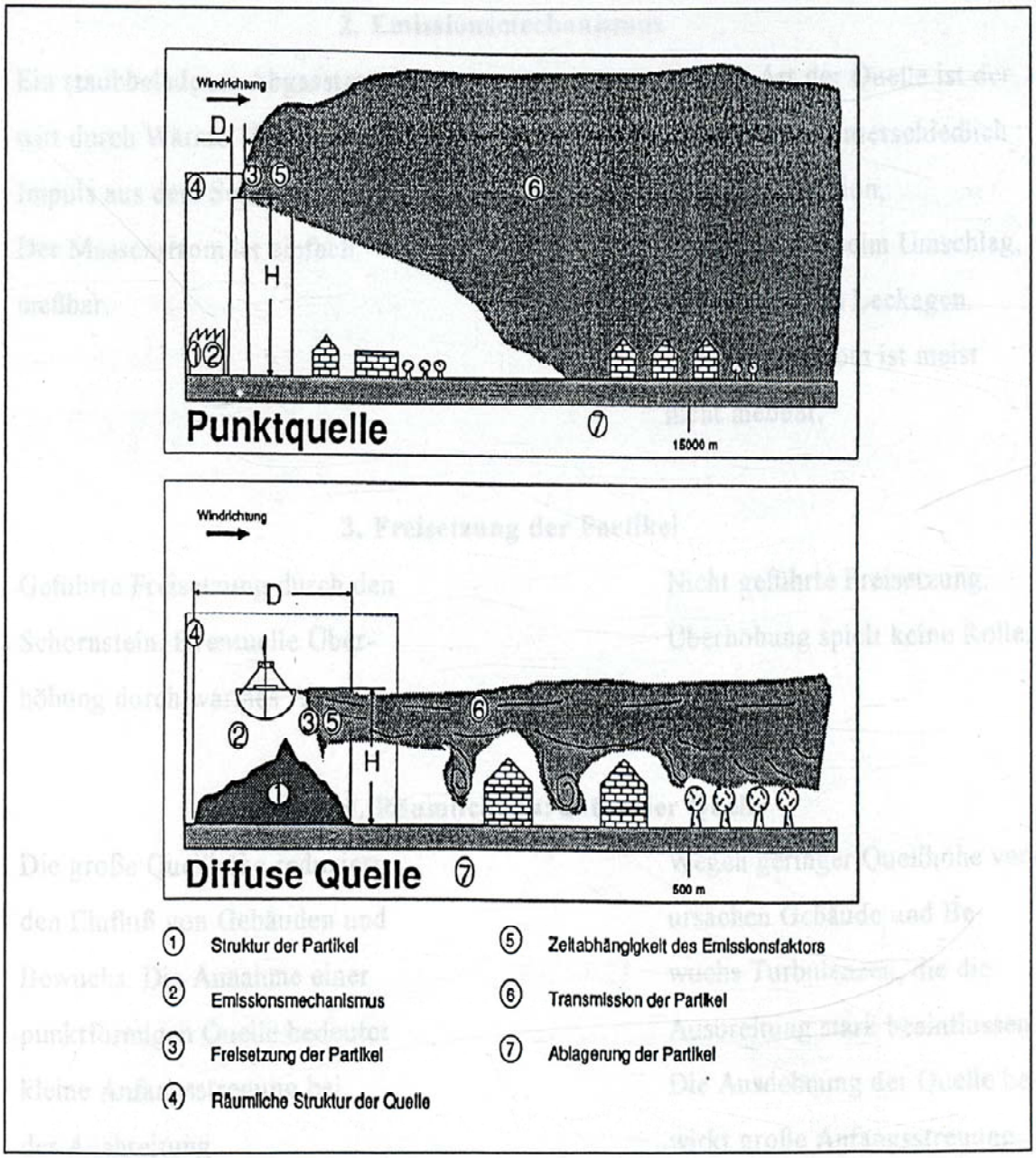


Abbildung 1-13 : ***Unterscheidungkriterien möglicher Quelltypen*** **[22]**

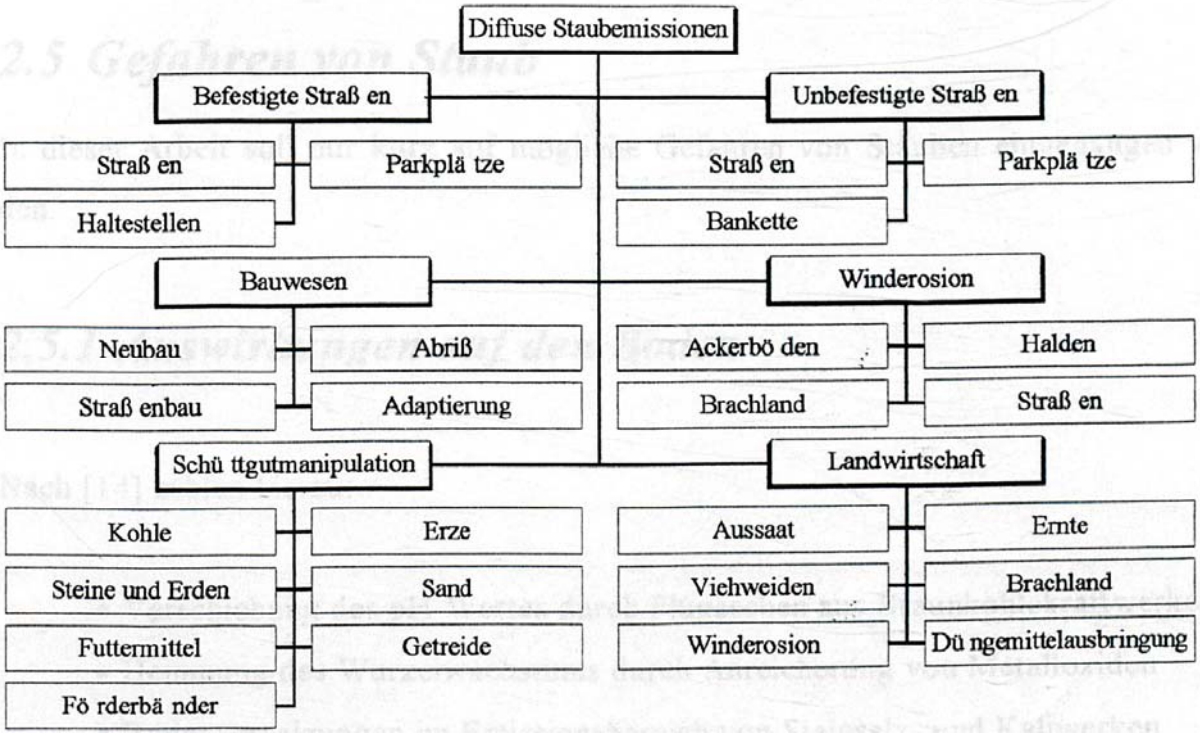


Abbildung 1-14 : ***Quellen diffuser Staubemissionen*** **[25]**

Die Ausbreitung von Staub kann nach [22] durch eine Quelle-Senke-Darstellung mit den Transportstrecken Emission, Transmission und Immission veranschaulicht werden wie in Abbildung 1-15 dargestellt ist:

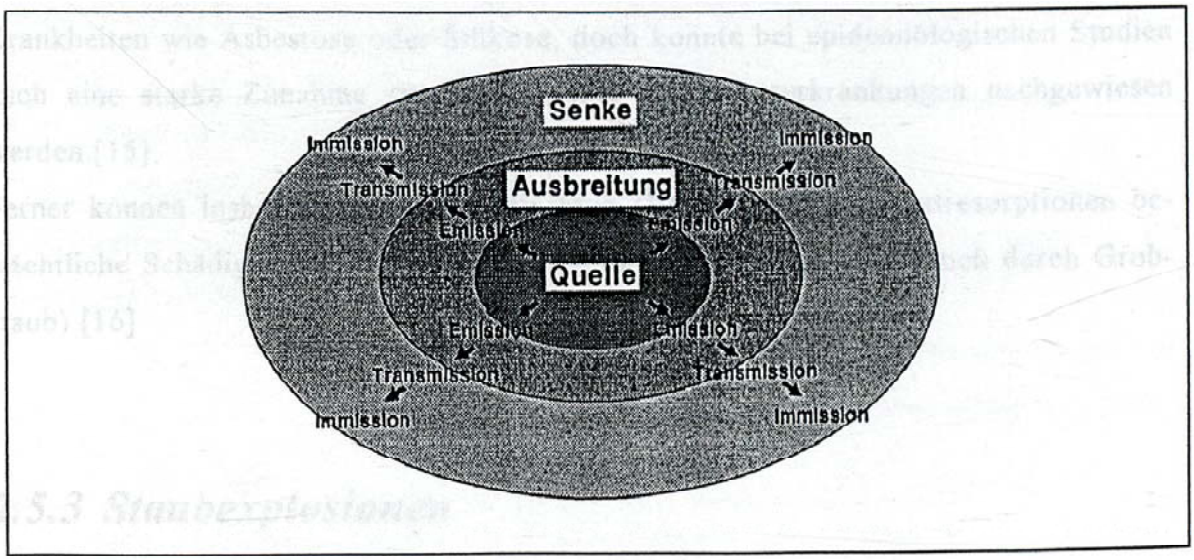


Abbildung 1-15: ***Quelle-Senke-Darstellung einer Staubquelle***

1.7.1 Definition Emission:

Ist der Ausstoß von Feststoffen, Flüssigkeiten oder Gasen welche nicht Bestandteil von Reinluft sind, aus einer Quelle.

1.7.2 Quellenarten:

Nach VDI 3790 Blatt 3 [26] wird prinzipiell zwischen definierten bzw. geführten Quellen und diffusen Staubemissionsquellen unterschieden. Zu den definierten bzw. geführten Quellen gehören z.B. Schornsteine. Diffuse Staubemissionen treten beim Umschlag, bei der Gewinnung, beim Transport, und bei Be- und Entladevorgängen von staubenden Schüttgütern auf. Zusätzlich zählen zu den Quellgebieten für diffuse Staubemissionen alle Flächen, auf denen abwehungsfähige Partikel gelagert (z.B. befestigte und unbefestigte Straßen, Ackerböden, Schüttguthalden) und so der Winderosion ausgesetzt sind. Nach [26] ergeben sich folgende Hauptunterschiede zwischen definierter Quelle (hauptsächlich Punktquellen) und diffuser Quelle (siehe Tabelle 1.1):

1.7.1 Vergleich diffuse Quellen und Punktquelle:

Tabelle 1-1: *Hauptunterschiede zwischen Punktquelle und diffuser Quelle* [26]

Punktquelle	Diffuse Quelle
1. Struktur der Partikel	
Die Korngrößenverteilung ist meist durch Filter abgeschnitten. Die Partikel sind klein und fliegen weit.	Die Partikel haben eine breite Korngrößenverteilung. Feuchtigkeit, Festigkeit, Temperatur und Wind der Umgebung beeinflußen die Emission.
2. Emissionsmechanismus	
Ein staubbeladener Abgasstrom tritt durch Wärme, Zug und Impuls aus dem Schornstein. Der Massenstrom ist einfach meßbar.	Je nach Art der Quelle ist der Mechanismus unterschiedlich : reine Winderosion, Verwehungen beim Umschlag, Emissionen aus Leckagen. Der Massenstrom ist meist nicht meßbar.
3. Freisetzung der Partikel	
Geführte Freisetzung durch den Schornstein. Eventuelle Überhöhung durch warmes Abgas.	Nicht geführte Freisetzung. Überhöhung spielt keine Rolle.

4. Räumliche Struktur der Quelle

Die große Quellhöhe reduziert den Einfluß von Gebäuden und Bewuchs. Die Annahme einer punktförmigen Quelle bedeutet kleine Anfangsstreuung bei der Ausbreitung.	Wegen geringer Quellhöhe verursachen Gebäude und Bewuchs Turbulenzen, die die Ausbreitung stark beeinflussen. Die Ausdehnung der Quelle bewirkt große Anfangsstreuung.

5. Zeitverhalten

Meist konstanter Emissionsmassenstrom. Eine Änderung der Ausbreitungssituation verändert die Konzentrationsverteilung stark.	Emissionsmassenstrom nicht konstant. Änderung der Ausbreitungssituation hat weniger Einfluß, weil die Windströmung von der Orographie beeinflußt wird. Alterungserscheinungen bei Lagerhalden.

6. Transmission

Ausbreitung auf Grund von Advektion und turbulenter Diffusion. Wegen großer Quellhöhe und kleinen Partikel kann der Flugweg sehr lang sein. Daher kleine Immissionskonzentration (große Verdünnung)	Ausbreitung auf Grund von Advektion und turbulenter Diffusion. Ausbreitung nur im Nahbereich der Quelle, deshalb große Immissionskonzentration.

7. Ablagerung

Klassierung ist nicht von Bedeutung.	Es tritt eine Klassierung nach Korngrößen auf.

Die nachfolgende Übersicht gibt eine Zusammenstellung der **wichtigsten Quellenarten diffuser Staubemissionen:**

- **Befestigte Straßen:** z.B. Straßen, Parkplätze
- **Unbefestigte Straßen:** z.B. Straßen, Parkplätze
- **Bauwesen:** z.B. Baustellen, Lagerplätze
- **Winderosion :** z.B. Halden, Brachland
- **Schüttgutmanipulation :** z.B. Schüttgutabwurf, Schüttgutaufnahme, Schüttguttransport
- **Landwirtschaft :** z.B. Ackerböden, Düngemittelausbringung

Der Begriff “diffuse Staubemissionen” bezieht sich auf luftgetragene Partikel, welche aus diffusen Staubquellen freigesetzt werden. Unter diffusen Staubquellen versteht man die zahlreichen kleinen oder verteilten Quellen, wie sie z.B.: durch Einwirkung von Wind oder mechanischer Beanspruchung auf partikelbeladene Flächen oder Schüttgüter gegeben sind, deren kombinierte Feinstaubemission erheblich sein kann.

Die Hauptemittenten diffuser Staubemissionen sind offene Flächen (z.B. Baustellen, bergmännische Abbauflächen oder landwirtschaftliche Anbaugebiete), befestigte und unbefestigte Straßen und Parkplätze, Schüttguthalden, sowie Schüttgutumschlag [27].

Es gilt Staubemissionen von diffusen Quellen bei Lagerung, Umschlag und Transport von Schüttgütern durch Ermittlung von Emissionsfaktoren zu beurteilen [28]. Die Emissionsfaktoren von Schüttgütern können durch unterschiedliche Prüfverfahren festgestellt werden [29].

1.8 Anteilsmäßige Aufteilung der Staubemissionen

Nach aktuellem Kenntnisstand sind in den einzelnen Regionen Österreichs unterschiedliche Quellen für die erhöhte PM10-Belastung verantwortlich:

Hohe Emissionsdichten primärer Partikel spielen in allen Städten eine wesentliche Rolle, wobei Belastungsschwerpunkte v. a. verkehrsnah beobachtet werden. Als dominierende Quellen lassen sich Straßenverkehr und Hausbrand identifizieren, gebietsweise auch Emissionen aus Industrie und Gewerbe [26].

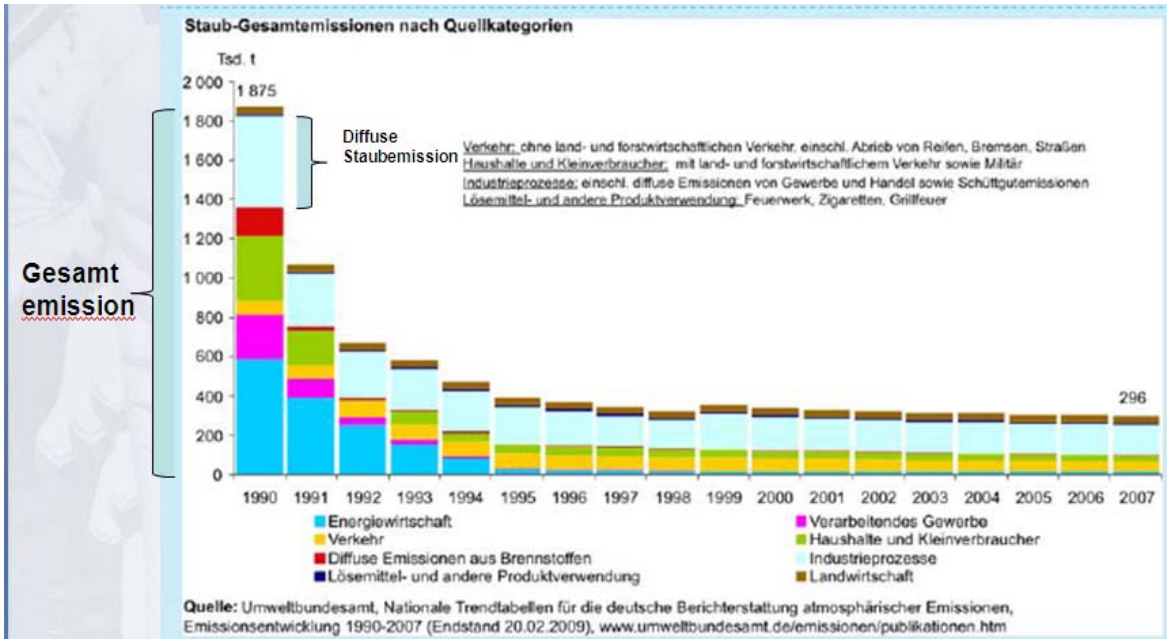


Abbildung 1-16: Entwicklung der Gesamtstaubemission und diffusen Staubemisson in Deutschland über 18 Jahre

Da diffuse Staubemissionen schwieriger zu reduzieren sind ist ihr Anteil an der gesamt PM10-Belastung mittlerweile erheblich. Einer der Hauptverursacher diffuser Staubemissionen in Österreich sind der Straßenverkehr sowie Schüttgutmanipulation zu nennen. Es mangelt hier nach wie vor universell einsetzbaren wirksamen Staubminderungsmaßnahmen.

Ein großer Anteil der PM10 Emission wird durch die Industrie verursacht. In Österreich wurden 2007 38% der anthropogenen PM10 durch die Industrie verursacht. Das Österreichische Umweltbundesamt führt die Bergbauindustrie als eine der Hauptemittierenden Industriespaten in Österreich auf [28].Weitere bedeutende PM10 Emittenten können von Abbildung 1-17 abgelesen werden.

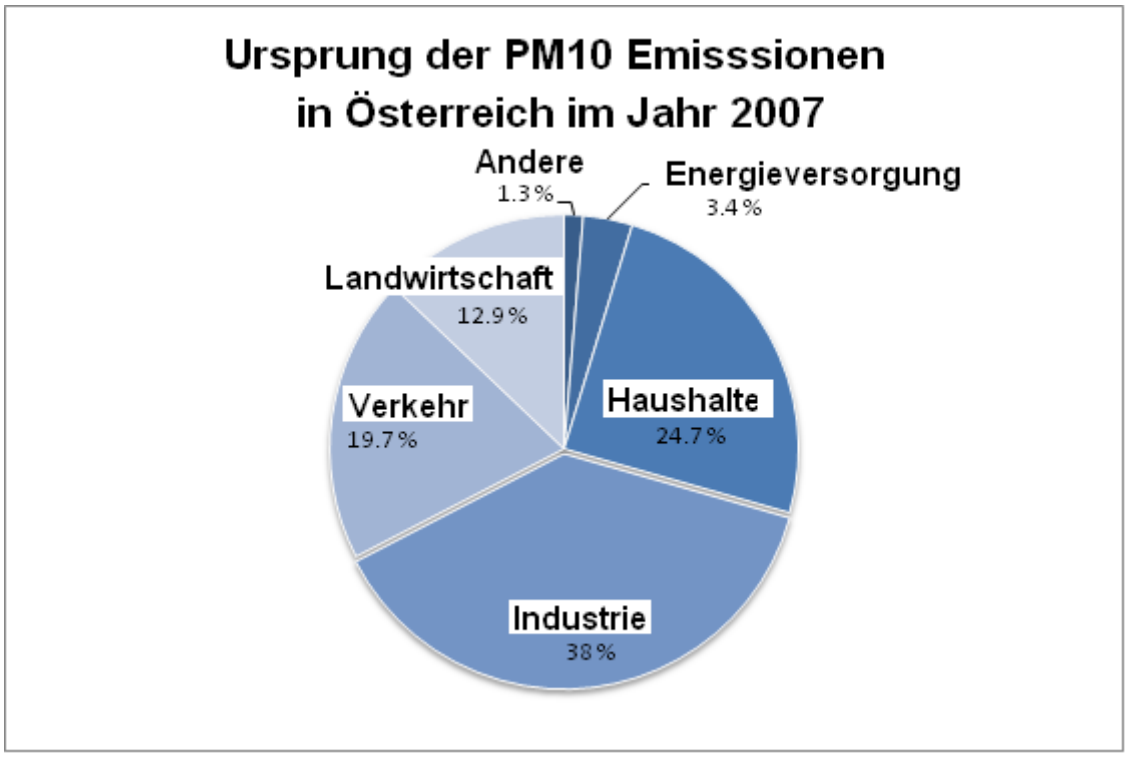


Abbildung 1-17: PM10 Hauptemittenten in Österreich 2007 laut österreichischem Umweltbundesamt [28]

Betrachtet man die Feinstaubmissionen der Industrie in [t PM10/a] siehe Tabelle 1-2 und unterscheidet in Emissionen aus gefassten Quellen und diffusen Quellen, so ist zu erkennen, dass die diffusen Staubemissionen den überwiegenden Anteil ausmachen. Bei den diffusen Emissionen machen vor allem nicht brennstoffabhängige Emissionen industrieller Prozesse den Löwenanteil aus. Nicht brennstoffabhängige Emissionen werden vor allem durch Schüttgutmanipulation verursacht siehe dazu [30].

Tabelle 1-2: Gefasste und diffuse Emissionen aus industriellen Quellen in Österreich [31]

SNAP	Gefasste PM10 Emissionen [t a^{-1}]	Diffuse PM10 Emissionen [t a^{-1}]
01 Energieumwandlung, Kraft- und Fernheizwerke	877	95
03 Verbrennungsprozesse in der produzierenden Industrie, Wärmeerzeugung für Prozesse	4.933	83
04 Nicht brennstoffabhängige Emissionen industrieller Prozesse	1.942	11.867
09 Abfallbehandlung	0	97
Gesamt	7.752	12.142
	19.894	

Wie signifikant der Anteil diffuser Staubemissionen an den Gesamtstaubemissionen (aus geführten Quellen und diffusen Quellen) ist, zeigt eine Schätzung des VDI, dass allein Staubemissionen aus

dem Schüttgutumschlag einen Anteil von 42 % an den Gesamtstaubemissionen der Bundesrepublik Deutschland haben [30].

Im Vergleich zu geführten Quellen ist es aufgrund von vielen verschiedenen Einflussfaktoren (räumliche Ausdehnung der Quelle, starke Schwankungen der Emissionen, Abhängigkeiten der Emissionen aufgrund von Schüttguteigenschaften, etc.) schwierig, diffuse Staubemissionen messtechnisch in den Griff zu bekommen. Man verwendet bei der Immissionsmessmethoden Messung kombiniert diffuser Staubemissionen entweder mit Ausbreitungsrechnungen oder Massenbilanzen, oder man verwendet Laborverfahren (siehe Anhang).

Luftverunreinigungen stellen ein immer größeres Problem für die Umwelt dar. Bis jetzt galten die Hauptanstrengung des Gesetzgebers Emissionen bei gefassten Quellen wie Feuerungsanlagen zu reduzieren.
Staubemissionen, die bei Lager- und Umschlagvorgängen oder bei Windverfrachtungen auftreten, wurden erst in den letzten Jahrzehnten Ziel wissenschaftlicher Betrachtungen. Die Gefährlichkeit dieser Emissionen kann von den physikalischen oder chemischen Eigenschaften des Staubes ausgehen und darf nicht unterschätzt werden. Nach [5] gehören zu den **physikalischen Eigenschaften** z.B.

- Partikelgröße (Lungengängigkeit)
- Kornform (fibrogene und silikogene Eigenschaften von Gesteinsstäuben)

Sowie zu den **chemischen Eigenschaften** z.B.:

- Gehalt an Schwermetallen
- Gehalt an toxischen organischen Stoffen
- Gehalt an persistenten, cancerogenen, mutagenen oder teratogenen Stoffen
- Löslichkeit
- Reaktionsvermögen unter Umweltbedingungen

1.8.1 Anteil der Emission durch Schüttgutmanipulation an der Gesamtstaubemission

Da man bei gefassten Quellen durch Einbau von Filtern die Staubemissionen reduzieren konnte, nimmt der relative Anteil der Staubemissionen beim Schüttgutumschlag an den Gesamtstaubemissionen zu. Beispielsweise wird der Anteil der diffusen Staubemissionen an den Gesamtstaubemissionen aus dem Schüttgutumschlag für die BRD auf 42 % geschätzt [30]. Siehe Abbildung 1-18

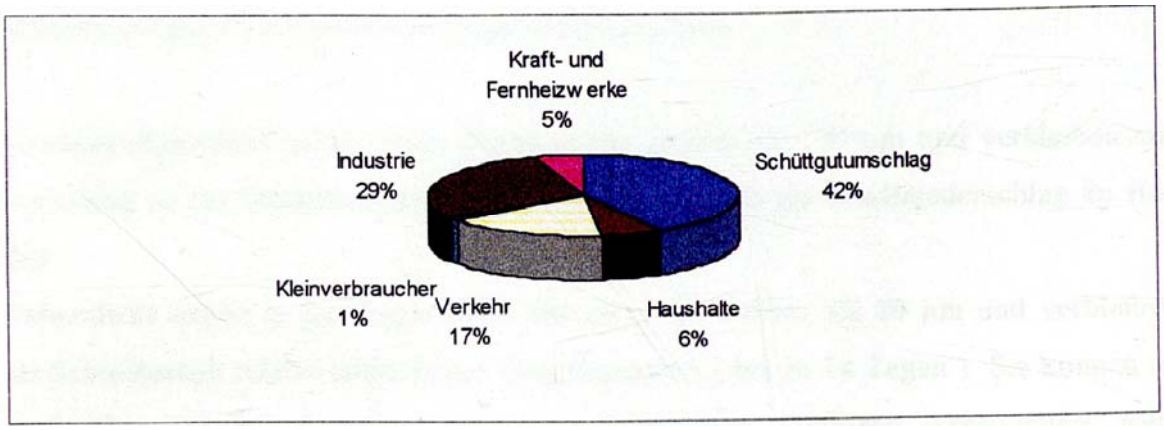


Abbildung 1-18: ***Entwicklung der Staubemissionen in der Bundesrepublik Deutschland [30]***

Die Aufklärung der Einflussfaktoren auf Staubemissionen beim Schüttgutumschlag ist für die Bestimmung von Emissionsfaktoren, sowie für die Optimierung von Maßnahmen zur Reduktion dieser Emissionen wichtig.

Messungen an der Universität Dortmund zeigten, dass bei Abwurfvorgängen, die beim Umschlag von Schüttgut hauptsächlich vorkommen, der **Impulsaustausch** beim Auftreffen des Schüttgutes auf eine feste Fläche die Hauptquelle der Staubentwicklung darstellt [22].

2 Diffuse Staubemissionen bei Schüttgutmanipulation

2.1 Bedeutung der Schüttgutmanipulation

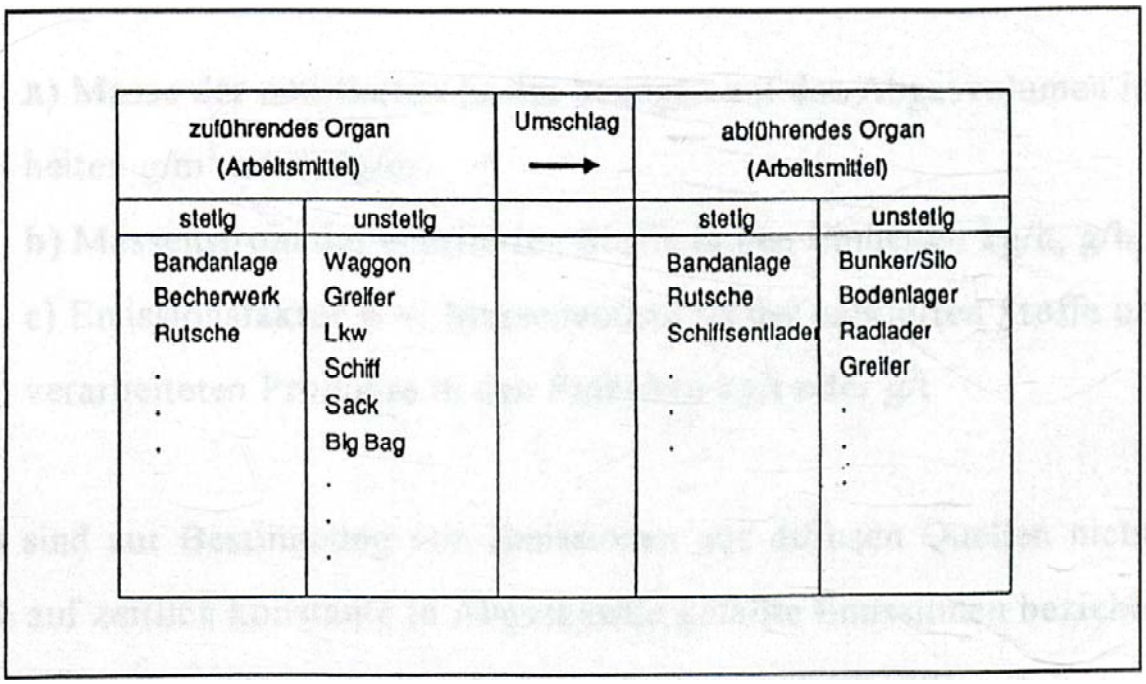
Es sind entweder existierende Methoden um PM10 Emissionen zu reduzieren zu verbessern oder neue Methoden zur PM10 Reduktion diffuser Staubemissionen für die Industrie zu entwickeln um die geltenden und zukünftigen Richtlinien einhalten zu können. Die passende Methode um Feinstaubemissionen optimal abzuscheiden muss auf die Entstehungsursache und Staubquelle zugeschnitten sein. Daher wird eine grundlegende Unterscheidung der angewendeten Methoden zwischen Punktquelle und diffuse Staubquelle vorgenommen. Die Emission von Punktquellen ist viel einfacher zu erfassen und zu reduzieren da Staubabscheidemechanismen auf einen spezifischen Bereich angewendet werden können. Diffuse Staubemissionen sind viel schwieriger zu erfassen, da die Staubemission von nicht geführten Quellen stammt und somit schwer ist eine Staubkonzentration zu messen. Aus diesem Grund ist es auch viel schwieriger Staubreduktionsmaßnahmen optimal anzuwenden. Diffuse Feinstaubemissionen werden von nicht geführten Quellen, wie Straßenverkehr oder Winderosion freigesetzt. In der Industrie ist ein großer Anteil der diffusen Staubemissionen der Schüttgutmanipulation zuzuordnen. Methoden um diffuse Feinstaubemissionen bei Schüttgutmanipulation zu reduzieren können aber auch in diesem Bereich wegen der Charakteristik diffuser Staubemissionsquellen (inhomogene Quellstuktur usw.) schwer optimal auf die Staubquelle hin optimiert werden. Durch die eingeführten PM10 Emissionsrichtwerte und die politischen Anstrengungen um PM10 Emissionen zu reduzieren ist dieser Industriezweig an einer Optimierung der diffusen Feinstaubreduktion sehr interessiert. Das E-PRTR kann die Erfassung, Überwachung und Veröffentlichung von PM10 Emissionen von Industrieanlagen mangels Unterlagen über Zuordnung diffuser Staubemissionen zu Industriebetrieben derzeit nur auf PM10 Emissionen aus Punktquellen beschränken. Laut europäischer Umweltschutzbehörde werden bereits Informationen über die Ausbreitung und Zuordnung diffuser Staubemissionen zu Quellbereichen gesammelt [32]. Die europäische Umweltschutzbehörde hat Interesse an einer wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit diffusen Staubemissionen. Wien in 2.1 dargelegt ist Schüttgutmanipulation eine der Hauptverursacher diffuser Staubemissionen deshalb ist eine wissenschaftliche Betrachtung der Abscheidungsmöglichkeiten in diesem Zusammenhang von entscheidender Bedeutung.

2.2 Einflussfaktoren auf Emission der Schüttgutmanipulation

Wie in Kapitel 1.8 bereits festgehalten wurde, stellt der Anteil der diffusen Staubemissionen aus den Schüttgutumschlag an den Gesamtstaubemissionen in der BRD bereits 42% dar [30]. Dar diffuse Staubemissionen durch Schüttgutmanipulation eine der Hauptprobleme darstellen müssen spezielle Vorsorgemaßnahmen getroffen werden um die Staubentstehung und Ausbreitung zu unterbinden. Schüttgutmanipulation umschließt Bereiche des Abbaus und der Produktion, des Transportes sowie der Lagerung. Die Staubentstehung bei der Schüttgutmanipulation ist von einer Vielzahl von Faktoren wie die Partikelgrößenverteilung, Partikeldichte, Partikelform, Oberflächeneigenschaften der Partikel und Haftkräfte im Haufwerk abhängig.

2.2.1 Umschlagsarten für Schüttgüter

Wie in der Fördertechnik allgemein, können Transportvorgänge in stetige und unstetige Prozesse unterteilt werden (Abbildung 2-1).



zuführendes Organ (Arbeitsmittel)		Umschlag →	abführendes Organ (Arbeitsmittel)	
stetig	unstetig		stetig	unstetig
Bandanlage Becherwerk Rutsche . . .	Waggon Greifer Lkw Schiff Sack Big Bag . . .		Bandanlage Rutsche Schiffsentlader . . .	Bunker/Silo Bodenlager Radlader Greifer . . . .

Abbildung 2-1:*Systematik der möglichen Anlagen für Umschlagvorgänge* [22]

Stetige Systeme sind kontinuierlich arbeitende Fördereinrichtungen, die einen nahezu konstanten Förderstrom transportieren. Da diese Systeme einen geschlossenen Aufbau besitzen, können Staubemissionen nur an den Schüttgutübergabestellen entstehen [21]. Unstetig arbeitende Systeme sind diskontinuierlich arbeitende Fördereinrichtungen. Man unterscheidet zwischen Greifertechnologie und Kippertechnologie, beide führen aber zu vergleichsweise hohen Staubemissionen [33].

2.2.2 Emissionsfaktoren für Schüttgüter

Zur Charakterisierung von diffusen Quellen dienen **Emissionsfaktoren,** die die Masse an emittiertem Staub pro Bezugsgröße angeben. Solche Bezugsgrößen können je nach Art der Quelle sein: Masse an umgeschlagenen Schüttgut, Länge an zurückgelegtem Fahrweg, landwirtschaftliche Fläche Emissionsfaktoren haben also keine genormte Einheit, sondern die Einheit variiert je nach Art der Staubquelle.

Während man früher für die Ermittlung der Emissionsfaktoren nur die emittierte Gesamtstaubmasse verwendete, berücksichtigt man heute auch die Korngröße des emittierten Staubes. Zum Beispiel legt die EPA, die US-amerikanischen Umweltschutzbehörde (Environmental Protection Agency), wegen der Lungengängigkeit ihr Hauptaugenmerk auf die Ermittlung von Emissionsfaktoren für "PM-10"

Begriff des Emissionsfaktors

Die Gesamtemissionen eines Prozesses können nach folgender Formel (2-1) berechnet werden:

Emissionen =Aktivität x Emissionsfaktor (2-1)

Nach [34] können folgende Maßzahlen für den Emissionsfaktor verwendet werden:

a) Masse der emittierten Stoffe bezogen auf das Abgasvolumen in den Einheiten
g/m³ oder *mg/m³*

b) Massenstrom der emittierten Stoffe in den Einheiten kg/h, g/h, *mg/h*
c) Emissionsfaktor E = Massenverhältnis der emittierten Stoffe und der verarbeiteten Produkte in den Einheiten kg/t oder *g/t*

a) und b) sind zur Bestimmung von Emissionen aus diffusen Quellen nicht geeignet, da sie sich auf zeitlich konstante in Abgaskanäle gefasste Emissionen beziehen. Stattdessen wird für diffuse Quellen Definition c) verwendet [21].

Wie Tabelle 2-1 sehr anschaulich zeigt, haben Schüttgutfeuchte und Materialeigenschaften einen erheblichen Einfluss auf die Höhe des Emissionsfaktors:
Schüttgut Emissionsfaktor [g/t]

Tabelle 2-1: ***Beispiele für Emissionsfaktoren für den Schüttgutumschlag [35]***

Schüttgut	Emissionsfaktor [g/t]
Feinerz trocken	1000
Feinerz feucht	50
Koks/Kohle mit schwach sichtbaren Emissionen	100
Sinter	700

2.3 Staubabscheidetechnik:

Es gibt verschiedene Herangehensweisen um Methoden zur Staubunterdrückung zu optimieren. Beim Lade und Entladeprozess zum Beispiel wird eine Minimierung der freien Fallhöhe durch automatische Fallhöhenanpassung erreicht. Auch eine apparative Verbesserung von Greiferarmen hat zur Staubreduktion beigetragen indem eine Überfüllung verhindert, ein gelinder Beladungsprozess sowie ein komplettes Schließen des Greifers erreicht werden. Eine weitere Methode zur Staubunterdrückung die jedoch viel breiter einsetzbar ist, ist durch den Einsatz von feinsten Sprühnebeldüsen bei Verladestationen oder Förderbändern gegeben. Allerdings kann diese Methode nur angewendet werden, wenn die umgeschlagenen Materialien unempfindlich gegenüber Feuchtigkeit bei Produktion und Lagerung sind. Die Methode Feinstaubreduktion bei Schüttgutmanipulation durch Wassersprays zu bewirken hat den Vorteil, dass Feinstaubreduktion am Entstehungsort diffuser Staubemissionen stattfindet.

2.3.1 Emissionsminderungsmaßnahmen

Man unterscheidet prinzipiell zwischen primären und sekundären Emissionsminderungsmaßnahmen.

Primäre Emissionsminderungsmaßnahmen versuchen die Emissionsentstehung zu verhindern, während **sekundäre Emissionsminderungsmaßnahmen** die weitere Abgabe der Stäube an die Atmosphäre zu reduzieren versuchen. Zu den sekundären Emissionsminderungsmaßnahmen gehört auch die Niederschlagung von Staubwolken durch freien Sprühregen. Tabelle 2-2 zeigt verschiedene Beispiele von Minderungsmaßnahmen beim Schüttgutumschlag

Tabelle 2-2: ***Emissionsminderungsmaßnahmen für die Schüttgutmanipulation nach [21]***:

primäre Emissionsminderungsmaßnahmen	sekundäre Emissionsminderungsmaßnahmen
Reduzierung der Abwurfhöhe	Anlagenkapselung
Zugabe von staubbindenden Chemikalien	Beregnungsanlagen
Schüttgutbefeuchtung	Absaug- und Entstaubungsanlagen
Anbringen von Prallplatten	Einhausungen
	DUSTEX-Verfahren (Niederschlagen von Staubwolken durch feinzerstäubtes Wasser)

Die Reduktion von Feinstaub aus diffusen Quellen wird zum einen durch primäre Maßnahmen die, die Staubentstehung verhindern, wie z.B. Schüttgutbefeuchtung oder Granulation oder apparative Maßnahmen vollzogen, zum anderen kommen sekundäre Maßnahmen zum Einsatz die den emittierten Feinstaub diffuser Staubquellen abscheiden, wie z.B. Einhausungen und Absaugen. Primär gilt es ein Ausbreiten der diffusen Staubemission örtlich abzugrenzen, was z.B. bei Schüttgutmanipulation durch Einhausungen realisiert wird [29], [36]. Es kommen in Folge unterschiedlichste Verfahren zur Anwendung, um den Staub abzuscheiden. Es besteht die Möglichkeit die Staubquelle einzuhausen und die Luft abzusaugen und zu filtrieren bzw. durch einen Wäscher zu führen [37]. Diese Methoden sind am wirkungsvollsten, jedoch hat die notwendige Absaugung den Nachteil, dass das Risiko von Staubexplosionen gegeben ist, bei der Filtration ist die Filterreinigung ein Problem, bei Wäschern besteht das Problem eines sehr hohen Wasserverbrauches, sowie der Nachteil, dass aus dem Luftverschmutzungsproblem ein Wasserverschmutzungsproblem wird. Es gibt auch eine Reihe von apparativen Detaillösungen je Entstehungsart diffuser Staubemissionen z.B. bei Förderbandübergaben die Reduzierung der Fallhöhe sowie Schüttgutrutschen, oder auch die Reduzierung von Feinstaubemissionen bei Schüttgutfallvorgängen durch die richtige Wahl des Betriebszustandes, so dass ein optimal dichter Schüttgutstrom entsteht [38]. Diese auf das Entstehungsproblem zugeschnittenen Maßnahmen zeigen oft hohe Staubminderungseffektivität, jedoch ist damit keine universell anwendbare Abscheidemöglichkeit gefunden. Außerdem besteht das Problem, das Einzelmaßnahmen oft nur Teillösungen sein können, da die Ursachen diffuser Staubemissionen, je Quelle oft vielfältig sind [39].

Eine kostengünstigere und universell anwendbare Methode um Staub zu binden, ist durch den Einsatz von Sprühdüsen zur Minimierung diffuser Staubemissionen gegeben. Sprühdüsen werden nicht nur beim Schüttgutumschlag, sondern auch beim Zerkleinern, dem Abbau und der Lagerung von Schüttgütern auf Halden eingesetzt. Um die Ausbreitung diffuser Feinstaubemissionen zu verhindern, wurde unter anderem die abscheidende Wirkung von Schneekanonen untersucht [40].

Die Staubabscheidung durch Wasserspraysysteme ist sofern eine Befeuchtung des Schüttgutes zulässig ist eine in vielen Bereichen der Schüttgutmanipulation anwendbare Methode.

Durch die universelle Anwendbarkeit hat die Untersuchung der Optimierungsmöglichkeiten der Staubabscheidung durch Wassersprays das Potential allgemeine Verbesserungsmöglichkeiten zur Abscheidung diffuser Staubemisssionen zu liefern. Aus diesem Grund wurde die Staubabscheidung durch Wassersprays im Weiteren untersucht.

2.4 Anwendung von Wasserspraysystemen zur Abscheidung diffuser Staubemissionen bei Schüttgutmanipulation

Angesichts der Problematik diffuse Feinstaubemissionen zu reduzieren ist der Bedarf für ein Optimierungsverfahren zur Auslegung von Wasser Spraysysteme zur maximalen Verhinderung von diffusen Feinstaubemissionen bei geringstem Wasserverbrauch, gegeben. Die Untersuchung von feinzerstäubenden Zweistoffdüsensystemen ist wegen der hohen spezifischen Oberfläche der Tropfen als Optimierungsansatz solcher PM10 Emissionsreduktionsmethoden sinnvoll. Die physikalischen Abscheidemechanismen von Feinstaubpartikeln durch Tröpfchen ist schwer eindeutig zu beschreiben und setzt sich im Allgemeinen aus: Impaktions- und Diffusionseffekten sowie Sieb und Sperreffekten zusammen. Um die geltenden PM10 Emissionsrichtlinien einhalten zu können gilt es nicht nur die Ausbreitung von diffusen Staubemissionen von Industriebetrieben abschätzen und Ihnen zuordnen zu können, sondern auch die Wirksamkeit von optimierten Abscheidemethoden abschätzen bzw. berechnen zu können.

2.5 Anwendung von Wasserspraysystemen zur Abscheidung diffuser Staubemissionen bei Förderbandübergabestellen

Die Art der Entstehung von diffusen Feinstaubemissionen ist im Weiteren von Interesse. Es kommt im Zuge der Schüttgutmanipulation bei Verladung, Transport, Zerkleinerung und Lagerung zu sehr vielfältigen Entstehungsursachen. Eingrenzend konzentrieren sich die weiteren Betrachtungen auf diffuse Staubemissionen bei Schüttgutübergabestellen, wobei hier die Übergabe Förderband-Förderband respektive Förderband-Halde am häufigsten erfolgt. Es wird also die Staubentstehung durch Schüttgutabwurf durch ein Förderband betrachtet. Die Förderbandübergabestelle wurde als Testobjekt deswegen gewählt, weil einerseits viele Verladungs, Transport und Lagerungsprozesse mit einer Förderbandübergabe verbunden sind und weil bei dieser eine sehr gerichtete, reproduzierbare Staubentstehung erfolgt. Als Staubminderungsmaßnahme wurde die Staubunterdrückung durch Wassersprays als universell einsetzbare Staubreduktionstechnik gewählt. Diese soll nun auf eine Förderbandübergabestelle angewendet werden und hier sind die primäre und sekundäre Staubabscheideeffektivität welche ein Wasserspray besitzt getrennt voneinander experimentell zugänglich, weshalb die Wahl einer Förderbandübergabestelle als repräsentatiever Prozess für die Schüttgutmanipulation ebenfalls Sinn macht. Die detailierte Betrachtung und Optimierung der Staubabscheideeffekte eines Wasserspraysystems als universell einsetzbare Staubabscheidetechnik soll Anhand einer Förderbandübergabestelle allgemein anwendbare Verbesserungsoptionen zur Abscheidung diffuser Staubemissionen liefern.

Eine Methode zur Unterdrückung von Staubemissionen ist also zum Beispiel die Verwendung von Zweistoffdüsen bei Schüttgutförderbändern. Diese sind ein bevorzugtes Staubreduktionsmittel, da sie leicht in bestehende Anlagen integriert bzw. installiert werden können jedoch besteht für eine

effektive Staubunterdrückung optimierungsbedarf. Werden Zweistoffdüsen auf eine Förderbandübergabestelle eingesetzt, so entfaltet die Zweistoffdüse folgende Wirksamkeit:

Befeuchtung des Schüttgutes (η_1): Das Schüttgut wird schon vor dem Entstehen der Feinstaubwolken befeuchtet. Dadurch werden die Haftkräfte zwischen den einzelnen Teilchen vergrößert, was wiederum die Agglomeration fördert und die Bildung von Feinstaub vermindert.

Staubabscheidung aus der Luft (η_2): Die entstandenen Feinstaubwolken werden direkt über dem Entstehungsherd gebunden. Mechanismus hierfür ist in erster Linie das Binden des Staubes an der Wassertröpfchenoberfläche.

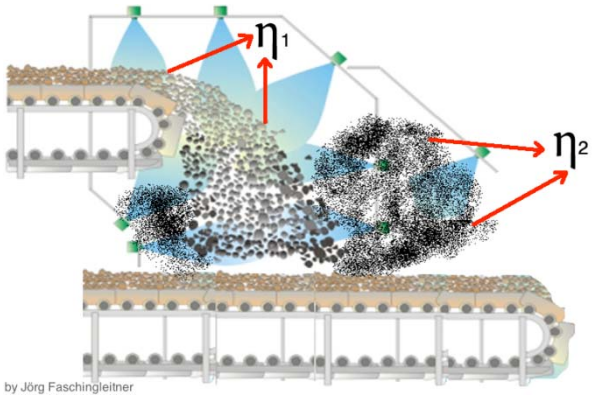


Abbildung 2-2 Schematische Darstellung der feinstaubbindenden Effekte von Wassersprays bei Schüttgutübergaben

Beide Arten der Staubabscheidung sind in obiger Abbildung 2-2 illustriert. Hierbei stellen η_1 und η_2 die Staubabscheideeffektivitäten der zuvor erläuterten Effekte dar.

In bereits durchgeführten Studien [42], [29] wurde die Gesamtstaubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems anhand einer Förderbandübergabestelle experimentell untersucht. In dieser Arbeit sollen nun die einzelnen staubunterdrückenden Effekte des Wasserspraysystemes η_1 und η_2 untersucht werden und Möglichkeiten zur Optimierung gefunden werden.

Zum Studium des Abscheideverhaltens von diffusen Staubemissionen durch Wasserspraysysteme eignen sich diffuse Staubquellen die nicht sehr großflächig sind. Um eine experimentelle Untersuchung möglichst reproduzierbar und somit unbeeinflusst von Umgebungseinflüssen zu gestalten wurde nach diffusen Staubquellen gesucht welche in abgegrenzten Bereichen auftreten. Bei Versuchen in nicht abgegrenzten Bereichen besteht das Problem der Staubverdünnung und Verlagerung von Staubfrachten weg vom Staubdetektor. Als Beispiel zur näheren Untersuchung der Wirksamkeit von Wasserspraysystemen zur Unterdrückung diffuser Staubemissionen bieten sich Förderbandübergabestellen an, welche im Bergbau in eingehausten Bereichen angewendet werden (Abbildung 2-2). Durch eine solche Einhausung gelingt es die Ausbreitung der diffusen Staubemission und die Wirksamkeit der Wasserspraydüsen örtlich abzugrenzen.

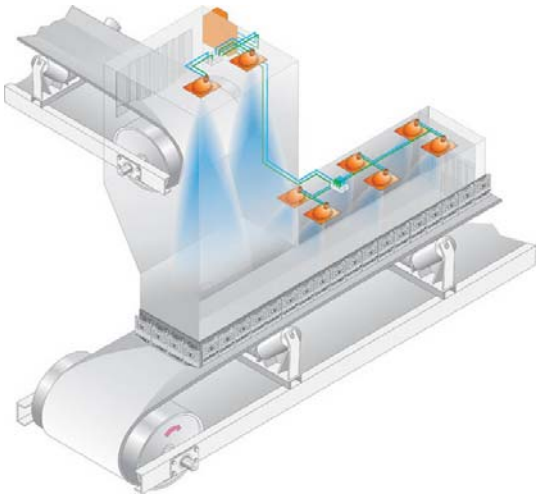


Abbildung 2-3: **Schematische Illustration eines Setups von Wassersprays in Einhausungen über Förderbändern**

Diffuse Staubemissionen, welche bei bewegten Schüttgütern entstehen, können ebenfalls durch Wasserbedüsung reduziert werden z.B. bei Förderbandübergabestellen aber auch Brechern oder Verladestationen (Abbildung 2-4). Bei Förderbandübergabestellen setzt sich der entstehende Minderungseffekt aus zwei Anteilen zusammen. Zuerst erfolgt eine Benetzung des Schüttgutes, die die Staubemission, welche ohne Benetzung entstehen würde, teilweise verhindert (=primärer Staubminderungseffekt). Danach wird die trotzdem noch entstandene Staubemission durch den verbleibenden Tropfenspray niedergenebelt (=sekundärer Staubminderungseffekt). Diese zwei Staubminderungseffekte laufen bei einer Förderbandübergabestelle ab wie bei 2 Separatoren die in Serie geschaltet sind [41]. Daher sind der primäre und sekundäre Staubminderungseffekt bei diesem Testobjekt zugänglich. Die gewonnen Erkenntnisse sind aufgrund der universellen Einsetzbarkeit von Wassespraysystemen und auch der sehr repräsentativen Staubquelle für Schüttgutmanipulation (Förderbandübergabestelle) auf andere Bereiche übertragbar und allgemein gültig.

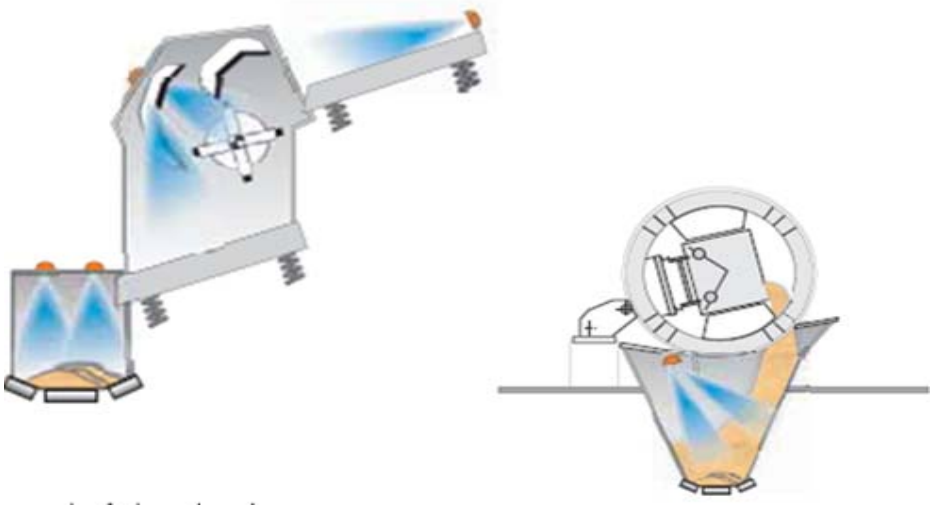


Abbildung 2-4: **Anwendung eines Wasserspraysystems auf Brecher oder Verladestationen**

2.6 Literaturrecherche

Es besteht Forschungsbedarf die Abscheidetechniken zur Unterdrückung diffuser Feinstaubemissionen zu optimieren. Der Forschungsbedarf besteht aufgrund der Tatsache, dass für geführte Staubquellen die Abscheidemaßnahmen (filternde Abscheider oder Wäscher) laufend verbessert wurden, bei der Abscheidung diffuser Staubemissionen ist dies nicht der Fall, wodurch sich der Anteil diffuser Staubmissionen am gesamten emittierten Feinstaub erhöht hat [26], [28]. Die Hauptquellen diffuser Staubemissionen sind offene Flächen (z.B. Baustellen, bergmännische Abbauflächen oder landwirtschaftliche Anbaugebiete), befestigte und unbefestigte Straßen und Parkplätze, Schüttguthalden, sowie Geräte des Schüttgutumschlages, des -transportes und der –verarbeitung. Die Schüttgutmanipulation wurde in diesem Zusammenhang als einer der Hauptverursacher diffuser Staubemissionen erkannt. Zur Unterdrückung dieser diffusen Feinstaubemissionen werden Wasserspraysysteme neben der Anwendung auf unbefestigte Strassen, auf Verladestationen, auf offene Abbauflächen und Halden auch häufig auf Förderbandübergaben angewendet.
Ein Wasserspraysystem kann eine primäre Staubabscheideeffektivität und eine sekundären Staubabscheideffektivität entfalten. Bei der primären Staubabscheidung kommt es zur Verhinderung der Staubentstehung durch Schüttgutbefeuchtung. Bei der sekundären Staubabscheideeffektivität kommt es zur Abscheidung des entstandenen Staubes aus der Luft.

Im Folgenden sollen die Probleme bei der primären und sekundären Staubabscheidung aufgezeigt werden und daraus Optimierungsmöglichkeiten für die Abscheidung diffuser Feinstaubemissionen durch Wassersprays abgeleitet werden.
Es sollen allgemein anwendbare Verbesserungsoptionen zur Abscheidung diffuser Staubemissionen anhand eines Wasserspraysystems erarbeitet werden, welche aufgrund der universellen Einsetzbarkeit von Wasserspraysystemen auch zur Verbesserung der Abscheidung diffuser Feinstaubemissionen verschiedener Bereiche (Befeuchtung unbefestigter Straßen, Befeuchtung von Halden und offener Abbauflächen usw.) verwendet werden können.

2.6.1 Probleme bei der primären Staubabscheidung durch Wasserspraysysteme

Probleme bei primären Staubminderungsmaßnahmen durch Befeuchten des Schüttgutes sind vor allem eine gleichmäßige Befeuchtung zu erzeugen [43] bzw. dass nach auftrocknen des Schüttgutes die Staubunterdrückende Wirkung verschwunden ist.

Schwierigkeiten wenn ungleichmäßige Benetzung durch Wasserspraysysteme bei der Schüttgutmanipulation erfolgt ist durch Akkumulationen, der Produktqualität als auch apparative Schwierigkeiten wie das durchrutschen des Förderbandes [44] gegeben. Es besteht auch das Problem der Schüttgutdurchfeuchtung sodass eine gleichmäßige Gutfeuchte vor dem Abwurf zur Verfügung steht. Eine Möglichkeit für gleichmäßigere bzw. eine emssionsmindernd-optimalere Benetzung zu sorgen ist die Anzahl an Düsen zu erhöhen [45]. Es ist erheblicher Optimierungsbedarf der Auslegungsgrößen von Spraysystemen gegeben um gleichmäßige Befeuchtung von Schüttgutoberflächen erzeugen zu können. Jedoch ist die notwendige Gutfeuchte die erforderlich ist je Material und Staubquelle unterschiedlich.

Es gilt Staubemissionen von diffusen Quellen bei Lagerung, Umschlag und Transport von Schüttgütern durch Ermittlung von Emissionsfaktoren zu beurteilen. Die Emissionsfaktoren von Schüttgütern können durch unterschiedliche Prüfverfahren festgestellt werden [45]. Über die Emissionsfaktoren für verschiedene fallende Schüttgüter kann die Staubungsfähigkeit je Gutfeuchte

beurteilt werden und ermittelt werden welche Gutfeuchte notwendig ist um gesetzlich vorgeschriebene PM10-Grenzwerte einzuhalten [11]. Für viele Schüttgüter ist oft nur eine geringe Gutfeuchte, z.B. 6g/kg bei Grubensad 0/7, notwendig, um die PM10-Grenzwerte einzuhalten [47]. In der Industrie hat man dadurch häufig das Problem den Staub mit möglichst wenig Wasser möglichst vollständig zu binden, und dabei sollte auch das Schüttgut möglichst wenig aber vollständig und gleichmäßig befeuchtet werden.

2.6.2 Probleme bei der sekundären Staubabscheidung durch Wassersprаysysteme

Das Niedernebeln des Staubes aus der Luft weist nur geringe Abscheideeffektivitäten auf [41],[48] Maßnahmen die Abscheideffektivität zu verbessern zeigten wenig praktischen Nutzen. Es wurde unter anderem versucht die Abscheideeffektivität durch verkleinern der Tropfengröße oder durch Aufladung zu bewirken, z.B. durch Einsatz von Hochdruckdüsen, Nebelzerstäuberdüsen, Ultraschallresonanzdüsen, Zweiphasensprays, Dampf sowie elektrisch aufgeladenen Sprays [49] [50]. Die verbesserte Staubabscheidung und der verminderte Wasserverbrauch durch Anwendung dieser Maßnahmen, werden durch Verdampfung der Tropfen und Wiederfreisetzug des gebundenen Staubes gemeinsam mit im Wasser gelösten Mineralien überkompensiert [51]. Durch Einsatz von staubbindenden Chemikalien [52],[53],[54],[55] welche die Wasserverdunstung reduzieren, den Energiebedarf der Zerstäubung durch Senkung der Oberflächenspannung senken und einen Einsatz von Wassersprаysystemen im Winter durch Gefrierpunktserniedrigung ermöglichen, konnte die Staubabscheidung zwar meist verbessert werden, jedoch trat das Problem auf, dass das Benetzungsmittel auf die Materialart abgestimmt sein muss, was zu Problemen bei sich ändernden Schüttgutzusammensetzungen führt [56],[57],[57].

Das Hauptproblem der Staubabscheidung aus der Luft stellt jedoch das Problem dar, dass es beim Einsatz von Spraydüsen bei der Staubabscheidung auch zur Verlagerung, Verdünnung und Wideraufwirbelung von Staub kommen kann. Dieses Problem wurde speziell bei feinzerstäubenden Düsen beobachtet [52]. Außerdem besteht das Problem dass die Relatievgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Partikel so groß wie möglich sein soll, damit die Abscheideeffektieveität steigt. Eine hohe Relatievgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Partikel zu realisieren ist jedoch bei Anwendung von Wassersprays in offenen Bereichen schwierig, da die Staubwolke dem Spray ausweichen kann und dessen Impuls steigt je höher die Tropfengeschwindigkeit des Düsensprays ist.
Die Staubabscheidewirkung der Tropfen des Düsensprays könnte gesteigert werden indem die Tropfengröße auf den abzuscheidenden Feinstaub (PM10) abgestimmt würde.

3 Problemstellung

Diese Arbeit hat den Zweck, eine Optimierung und eine Berechnungsmethode der Wirksamkeit von Wasserspraysystemen zur Abscheidung diffuser Feinstaubemissionen zu entwickeln.

Um die Anwendbarkeit von Wasserspraysystemen in Bezug auf Wintertauglichkeit, Langzeitwirkung und Reduktion des Schüttgutfeuchtegehaltes für ausreichende primäre Staubabscheideeffektivität zu ermöglichen, soll im Zuge der experimentellen Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität ein Sprühwasseradditiv identifiziert werden.

Die Abscheidung diffuser Staubemissionen durch Düsensprays aus der Luft weist geringe sekundäre Staubabscheidegrade auf. Um zu verstehen, welche Einflüsse bei der Abscheidung diffuser Staubemissionen durch Düsensprays bestehen, soll mit Hilfe der Aufklärung von Einflussgrößen auf die sekundäre Staubabscheidung durch experimentelle und theoretische Betrachtungen ein Verständnis für die Zusammenhänge, die zur Staubabscheidung aus der Luft führen, geschaffen werden.

Die primäre und sekundäre Staubabscheideeffektivität soll durch Entwicklung eines vereinfachten Modells zur Gesamtstaubabscheideeffektivität verknüpft werden. Dadurch soll es bei gleichen Betriebsbedingungen der Düse möglich sein, die primäre und sekundäre Staubabscheideeffektivität in Relation zueinander setzen zu können.

Sind diese Voraussetzungen für den Einsatz von Wasserspraysystemen geschaffen, soll durch Messung des Befeuchtungsfeldes einer Sprühdüse sowie der Emissionsfaktoren bei verschiedenen Gutfeuchten an einer Schüttgutfallapparatur und durch Formulierung eines Befeuchtungsmodelles ein Optimierungsverfahren zur Auslegung von Sprühdüsen anhand einer Förderbandübergabestelle entwickelt werden damit eine möglichst geringe entstehende Staubmenge bei geringstem Wasserverbrauch erreicht werden kann. Für die sekundäre Staubabscheideeffektivität sollen anhand der Abscheidung eines Teststaubes bei gerichteter Queranströmung eines Düsensprays und durch Ermittlung des Zusammenhanges von ortsaufgelöstem Staubeintrag und Befeuchtungseintrag für verschiedene Bedüsungsparameter optimale Betriebsparameter des Wasserspraysystems analog zur Optimierungsmethode für primäre Staubabscheidung ermittelt werden, und daraus eine vereinfachte Beschreibung der zu erwartenden sekundären Staubabscheideeffektivität erarbeitet werden.

3.1 Allgemeine Problemstellung:

3.1.1 primäre Staubabscheidung

Bei der primären Staubabscheideeffektivität (prozentuelle Reduktion der PM10 Emission eines trockenen Schüttgutes durch Befeuchtung) besteht das Problem, dass sich der notwendige Feuchteanteil im Schüttgut, der notwendig ist, um eine Staubentstehung zu verhindern, nachteilig auf die Produktqualität oder den Prozess, für den das Schüttgut verwendet wird, auswirken kann. Zudem besteht das Problem der Anwendbarkeit im Winter sowie der Tatsache, dass die Staubabscheidewirkung nach Auftrocknen des Schüttgutes verschwindet. Daher besteht Bedarf an Sprühwasseradditiven, die die Anwendbarkeit von Wasserspraysystemen zur Staubabscheidung verbessern und die Langzeitwirkung der Staubunterdrückung nach Auftrocknen des Schüttgutes erhalten.

Um die primäre Staubabscheideeffektivität zu untersuchen, ist im Folgenden eine Staubabwurfapparatur aufzubauen und durch Staubabwurftests die Staubungsfähigkeit verschiedener Schüttgüter in Abhängigkeit der Gutfeuchte zu beurteilen. Um die Anwendbarkeit von Wasserspraysystemen zu verbessern, ist ein universell einsetzbares bioverträgliches, gefrierpunkterniedrigendes, preisgünstiges Sprühwasseradditiv zu finden und auf die Verbesserung der Staubunterdrückung und auf seine Langzeit-staubunterdrückende Wirkung zu untersuchen.

Ist die ganzjährige Anwendbarkeit von Wasserspraysystemen als nachhaltige primäre Staubabscheidemaßnahme bei Schüttgutmanipulation durch Additive sichergestellt, besteht weiterhin generell das Problem, dass sich die Feuchteverteilung an der Schüttgutoberfläche häufig derart inhomogen gestaltet, dass es zur Ausbildung von Pfützen und trockenen Bereichen kommt. In diesem Zusammenhang besteht Bedarf für eine Optimierung der Auslegungsparameter (Wasservolumenstrom, Düsenhöhe, Düsenanzahl, Düsenabstand) von Wasserspraysystemen, damit maximale primäre Staubreduktion bei minimal versprühter Wassermenge und minimal notwendiger Gutfeuchte erreicht werden kann.

Für die Optimierung der Auslegungsparameter eines Wasserspraysystems für maximale primäre Staubabscheideeffektivität ist im ersten Schritt der örtlich aufgelöste Befeuchtungseintrag zu erfassen. Daraus soll ein Befeuchtungsmodell entwickelt und überprüft werden, ob dieses auf andere Düsenarten anwendbar ist. Im nächsten Schritt soll die Durchfeuchtungswirkung des örtlich aufgelösten Befeuchtungseintrages durch Gutschüttungen untersucht werden. Daraus soll ermittelt werden, ob sich der örtlich aufgelöste Befeuchtungseintrag auch durch die Gutschüttung fortpflanzt, sich also die Befeuchtung einer Gutschüttung über den oberflächlich aufgebrachten örtlich aufgelösten Befeuchtungseitrag berechnen lässt. Ist dies der Fall, soll aus der mathematischen Beschreibung des oberflächlichen Befeuchtungseintrages über eine Optimierungsrechnung die Optimalwerte für Düsenanzahl, Düsenabstand sowie Wasservolumenstrom und Düsenhöhe berechnet werden.

3.1.2 sekundäre Staubabscheidung

Es besteht Bedarf, die sekundäre Staubabscheideeffektivität bei der Abscheidung diffuser Staubemissionen zu erhöhen. Daher soll die Staubabscheidung aus der Luft bei Einsatz von feinzerstäubenden Zweistoffresonanzdüsen bei verschiedenen Betriebsbedingungen der Düse (Wasservolumenstrom, Düsenhöhe, Düsenanzahl, Düsenabstand) experimentell untersucht werden und strömungsmechanisch über CFD und die Abscheidung am Einzeltropfen über das Barth/Schuch/Löffler Modell studiert werden. Als Ergebnis soll der optimale Einsatz von Wasserspraysystemen zur Abscheidung diffuser Staubemissionen möglich sein.

Um die sekundäre Staubabscheideeffektivität zu untersuchen und Verbesserungspotentiale aufzuzeigen, ist eine Staubabscheidekammer aufzubauen, sodass die Zweistoffresonanzdüse partikelbeladener Luft bei verschiedenen Strömungsbedingungen, Positionen und Betriebsbedingungen ausgesetzt werden kann und die Veränderung der sekundären Staubabscheideeffektivität experimentell erfasst werden kann. In diesem Zusammenhang soll geklärt werden, welcher Wasservolumenstrom je quergerichteten partikelbeladenen Luftvolumenstrom zur ausreichenden Abscheidung von Feinstaub benötigt wird, um maximale sekundäre Staubabscheideeffektivität zu erreichen. Es soll darauf aufbauend untersucht werden, welche Position die höchste sekundäre Staubabscheideeffektivität liefert. Ist die wirkungsvollste Düsenpositon identifiziert, soll untersucht werden, ob eine oder zwei Düsen mit demselben Wasservolumenstrom in verschiedenen Abständen zueinander die höchste sekundäre Staubabscheideeffektivität bewirken. Um die experimentellen Ergebnisse phänomenologisch fassbar zu machen und die zuvor beschriebenen Verdrängungs- und Verlagerungseffekte bei der sekundären Staubabscheidung zu verstehen, sollen die durchgeführten Versuche einer theoretischen Betrachtung unterzogen werden. Zu diesem Zweck sind die Strömungssituation sowie Partikel- und Tropfenbewegungen während der Abscheidung der Staubpartikel bei den experimentell als vorteilhaft ermittelten Einstellungen mittels CFD zu simulieren. Aus den CFD Simulationen sollen Erkenntnisse des Verhaltens des Sprühkegels in Strömungen partikelbeladener Luft sowie mögliche Mischbereiche bei der Strömung von Partikel und Tröpfchen gefunden werden. Weiters soll untersucht werden, ab welchem Verhältnis der Geschwindigkeiten der quergerichteten Strömung die vertikale Komponente der Düse ausreicht, die Partikel umzulenken. Mittels des Barth/Schuch/Löffler-Modells soll der Abscheidegrad anhand eines Einzeltropfens für verschiedene Positionen und Geschwindigkeitsverhältnisse (anströmende Luftquerströmung zu Düsenluftströmung) berechnet werden und festgestellt werden welche Partikel und Tropfengrößen sich je Düseneinstellung wie auf die Abscheidung auswirken. In Summe soll aus den gewonnenen Einblicken des Verhaltens der Einzeltropfen bei der Abscheidung und dem Einfluss der Strömungssituation bei der Abscheidung im Zusammenhang mit den experimentellen Ergebnissen ein Verständnis für die sekundäre Abscheidung diffuser Staubemissionen erarbeitet werden. Daran anschließend soll eine vereinfachte Beschreibung der zu erwartenden sekundären Staubabscheideeffektivität erarbeitet werden. Um Bedüsungsparameter zum Erreichen maximaler sekundärer Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems bei der Staubabscheidung diffuser Staubemissionen zu ermitteln, soll neben dem Aufklären von Einflussgrößen auf die sekundäre Staubabscheidung durch experimentelle und theoretische Betrachtungen auch ein Optimierungsverfahren erarbeitet werden. Hierzu soll neben dem örtlich aufgelösten Befeuchtungseintrag auch der örtlich aufgelöste Staubeintrag unterhalb des Düsensprays erfasst werden. Es soll geprüft werden, ob ein Zusammenhang zwischen ortsaufgelösten Befeuchtungseintrag und ortsaufgelösten Staubeintrag bei verschiedenen Bedüsungsparametern

besteht. Ist dies der Fall, soll daraus die Optimalwerte für Düsenanzahl, Düsenabstand sowie Wasservolumenstrom und Düsenhöhe in Anlehnung an das Optimierungsverfahren, das für die primäre Staubabscheidung erarbeitet wurde, ermittelt werden.

3.2 Spezielle Problemstellung:

Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems

Im Zuge der experimentellen Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität ist ein Sprühwasseradditiv zu identifizieren, das die Anwendbarkeit von Wasserspraysystemen in Bezug auf Wintertauglichkeit, Langzeitwirkung und Reduktion des Feuchtegehaltes ermöglicht. Die Einsetzbarkeit von Wasserspraysystemen für die Staubunterdrückung bei Schüttgutmanipulation zu verbessern ist Grundvoraussetzung, damit der Einsatz dieser Methode Sinn macht.

Untersuchung der sekundären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems

Die sekundäre Staubabscheideeffektivität eines Zweiphasensprühs soll bei verschiedenen Betriebsbedingungen (Luftvolumenstrom, Staubkonzentration, Wasservolumenstrom, Düsenhöhe, Düsenposition, Düsenanzahl) in einer Staubabscheidekammer untersucht werden, und so die Beeinflussbarkeit der sekundären Staubabscheideeffektivität durch Veränderung der Betriebsbedingungen erfasst werden. Durch CFD Simulation der Strömungsbedingungen sollen Mischbereiche zwischen Partikelströmung und Tropfenströmung je Betriebsparameter erfasst werden und durch Berechnung des Abscheidegrades am Einzeltropfen bei gerichteter Anströmung eine Abschätzung der zu erwartenden optimalen Tropfengröße erfolgen. Anhand dieser durchgeführten Analysen sollen Optimierungsmöglichkeiten für die Abscheidung diffuser Feinstaubemissionen durch Wassersprays abgeleitet werden können.

Vergleich der Staubabscheideeffektivitäten

Durch Adaption des Modells von zwei Separatoren welche in Serie geschaltet sind, soll für ein Wasserspraysystem am Beispiel einer Förderbandübergabe der Anteil der primären und sekundären Staubabscheideeffektivität an der Gesamtstaubabscheideeffektivität abgeschätzt werden. Dadurch sollen primäre und sekundäre Staubabscheideeffektivitäten in Relation gesetzt werden können.

Optmierungsverfahren der primären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems am Beispiel einer Förderbandübergabe

Für die primäre Staubabscheideeffektivität soll anhand einer Förderbandübergabe ein Auslegungsverfahren für Wasserspraysysteme erarbeitet werden, welches auf andere Anwendungsfälle (Straßenbefeuchtung, Befeuchtung von Abbauflächen oder Halden) übertragbar ist. Dazu soll zuerst die Erfassung und mathematische Beschreibung des örtlich aufgelösten Befeuchtungseintrages eines Düsensprays vorgenommen werden. Danach soll untersucht werden, ob sich der örtlich aufgelöste Befeuchtungseintrag durch die Gutschüttung fortpflanzt. Ist dies der Fall, soll ein Rechenalgorithmus entworfen werden, der das Staubungsverhalten eines Schüttgutes mit den Düsencharakteristika sowie den Auslegungsgrößen eines Förderbandes in Verbindung bringt und es zulässt, so die optimalen Bedüsungsparameter zu berechnen.

Ermittlung der sekundären Staubabscheideeffektivität anhand des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages einer Sprühdüse

Für die sekundäre Staubabscheideeffektivität sollen anhand der Abscheidung eines Teststaubes bei gerichteter Queranströmung eines Düsensprays und durch Ermittlung des Zusammenhanges von ortsaufgelöstem Staubeintrag und Befeuchtungseintrag für verschiedene Bedüsungsparameter des Wasserspraysystems analog zur Optimierungsmethode für primäre Stuababscheidung die sekundäre Staubabscheideeffektivität ermittelt werden. Daraus sollen optimale Betriebsparameter von Wasserspraysystemen für sekundäre Staubabscheidung ermittelt werden können

4 Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität eines Wassersprаysystemes [58]

Wie bereits in Kapitel 1.8 erwähnt, nimmt der relative Anteil der diffusen Staubemissionen an der Gesamtstaubemission immer mehr zu. Dies ist unter anderem deshalb der Fall, da in der Vergangenheit Staubminderungsmaßnahmen zur Unterdrückung von Emissionen von geführten Quellen laufend verbessert wurden. Bei Staubminderungsmaßnahmen von diffusen Staubquellen ist dies nicht der Fall. In der Industrie werden deshalb Staubminderungsmaßnahmen zur Unterdrückung diffuser Staubemissionen wie Wassersprаysysteme durch Zusatz von Additiven zum Sprühwasser (Salze [59], Tenside [60], Polyglycole [61]) verbessert.

Die Additive haben die Aufgaben den Einsatz von Wassersprаysystemen bei niedriger Temperatur zu ermöglichen bzw. die Staubunterdrückung durch Optimierung des Benetzungsverhaltens zu verbessern, jedoch besteht ein Problem der Bioverträglichkeit beim Einsatz dieser Substanzen.

Hierfür wird untersucht, ob mittels zudosieren von Restmelasse zum Sprühwasser (welche bioverträglich ist) eine Minderung der Staubentstehung erzielt werden kann. Dies soll durch Versuche mit drei ausgewählten Schüttgütern untersucht werden.

Da bei Wassersprаysystemen ohnne Zusätze die für die Unterdrückung von Feinstaub bei Wiederaufwirbelung von Straßen, bei Schüttgutumschlag wie bei Förderbandübergaben, angewendet werden oft hohe Wassermengen verbraucht werden und die Wirkung nach dem Trocknen wieder verschwindet, soll untersucht werden ob sich durch den Zusatz von Restmelasse zum Sprühwasser eine bessere und eine länger anhaltende Emissionsminderung erzielen lässt und dadurch Wasser gespart werden kann. Die Reduktion des für die Staubminderung eingesetzten Wassers ist besonders interessant bei Schüttgütern deren Feuchtegehalt in engen Grenzen gehalten werden soll z.B. bei der Förderung von Brennstoffen.

Daher soll neben der Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität durch Ermittlung des Emissionsfaktors bei verschiedenen Schüttgutfeuchten durch Fallversuche auch die Untersuchung der Langzeitwirkung eines bioverträglichen Zusatzstoffes (Restmelasse) durch Ermittlung des Emissionsfaktors in Abhängigkeit der Restmelassekonzentration im Schüttgut erfolgen. Im Folgenden sollen folgende vier Punkte bearbeiten werden.

1. Zur Bestimmung der staubmindernden Wirkung soll eine Schüttgutfallapparatur konstruiert und aufgebaut werden, welche die Ermittlung des Emissionsfaktors bei der Schüttgutmanipulation ermöglicht. Dieser Emissionsfaktor wird mittels der aus dem Fallversuch erhaltenen Körngrößenverteilung des Staubes berechnet. Dabei wird die Masse der Partikel die einen Durchmesser kleiner 10 µm haben, bestimmt, um diese dann durch die abgeworfene Schüttgutmasse zu dividieren.

2. Für die Durchführung der Versuche sollen drei Schüttgüter ausgewählt werden, die durch ihren häufigen Einsatz und das Verursachen von Staubproblemen von Interesse sind.

3. Mittels der Fallapparatur und den drei ausgewählten Schüttgütern soll der Emissionsfaktor (g Staub/kg Schüttgut) in Abhängigkeit des Schüttgutfeuchtegehalts sowie der Restmelassekonzentration im Sprühwasser ermittelt werden. Ziel ist zu erkunden wie weit die Restmelasse die Staubminimierung verbessern kann bzw. welcher Feuchtegehalt und welche Restmelassekonzentration optimal ist.

4. Weiters sollen auch Versuche durchgeführt werden, die die Langzeitwirkung der Melassebeimischung untersuchen. Dafür werden Melasse-Schüttgutmischungen vor der Versuchsdurchführung auf Gewichtskonstants getrocknet und nach verschiedenen Lagerzeiten die Emissionsfaktoren mittels Fallapparatur bestimmt.

Eine Verbesserung der Staubverminderung wird wegen des Feinstaubproblems vor allem bei diffusen Emissionen immer wichtiger.

Ziel dieser Arbeit war es festzustellen ob ein zudosiertes Gemisch aus Restmelasse und Wasser, im Vergleich zu reinem Wasser eine verbesserte staubmindernde Wirkung auf diffuse Staubquellen wie z.B. Schüttgutumschlag, usw. ausübt.

Dafür wurde eine Fallapparatur aufgebaut mittels der es möglich ist durch Schüttgutfallversuche die Staubungsneigung zu quantifizieren. Diese Quantifizierung der Staubungsneigung eines Schüttguts wird durch normgerechte Ermittlung [26] des Emissionsfaktors (mg entstandene PM10 Partikel / kg Schüttgut) aus dem Schüttgutfallversuch vorgenommen.

Der Emissionsfaktor ist wie in Kapitel 2.2.2 allgemein formuliert (Formel 2-1) das Verhältnis der Masse an emittierten PM10 zur Masse des umgeschlagenen Schüttgutes und hat die Einheit kg/t oder g/t. Er wird empirisch ermittelt und ist stoff- und prozessabhängig.

Die allgemeine Berechnung der Emission (Formel 2-1) soll nun für Schüttgutmanipulation konkret dargestellt werden (Formel 4-1)

Aus der umgeschlagenen Staubmenge und dem dazugehörigen Emissionsfaktor lässt sich die entstehende Emission wie folgt berechnen.

$$Q(PM10) = M_{Gesamt} \times E(PM10).. \quad (4\text{-}1)$$

Q(PM10)	Emittierte Masse an PM10 [g]
M_{Gesamt}	Gesamte umgeschlagene Masse [kg oder t]
E(PM10)	Emissionsfaktor [g/kg oder g/t]

Für diese Fallversuche wurden drei Schüttgüter (Wandschotter, Bruchkalk und Streusplitt), die als Verursacher von Staubproblemen gelten, herangezogen.

Diese Schüttgüter wurden, nachdem sie auf Gewichtskonstanz getrocknet wurden, mit verschiedenen Mengen verschiedener Mischungen aus Restmelasse und Wasser besprüht.

Neben diesen befeuchteten Proben wurden auch Proben hergestellt die nach dem Befeuchten getrocknet wurden, um die Langzeitwirkung von Restmelasse auf die Staubunterdrückung festzustellen.

Dabei zeigte sich, dass es sowohl bei Versuchen mit befeuchteten, als auch befeuchteten und dann getrockneten Proben zu einer deutlichen Reduktion der vom verwendeten Schüttgut ausgehenden Staubemission kommt.

Durch Versuche mit verschiedenen Verhältnissen von Restmelasse zu Wasser zeigt sich, dass durch die Verwendung von Gemischen mit einem hohen Anteil an Restmelasse, eine hohe Emissionsminderung erzielen lässt und weniger Wasser verbraucht wird.

4.1 Auswahl von Schüttgütern zur Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität

Es wurden sehr wichtige Problembereiche, welche zur Ausbreitung von diffusen Feinstaubemissionen in Österreich führen, abgegrenzt. Diese sind das Baugewerbe, der Bergbau und die Wiederaufwirbelung von Feinstaub auf Straßen.

Für das Baugewerbe wird **Wandschotter** als häufig angewendetes Material herangezogen, für den Bergbau **Bruchkalk** und für den auf der Straße aufgewirbelten Feinstaub wurde verwendeter **Streusplitt** (mit Straßenkehrich) gewählt.

Im Gegensatz zu Standard-Teststäuben, die z.B. in [47] verwendet wurden, haben die von den Schüttgütern entstehenden Stäube keine gleichbleibende Qualität der Korngrößenverteilung über die Zeit. Diese ist je nach Schüttgut-Charge unterschiedlich und wird durch die Lagerung, die meist ungeschützt im Freien erfolgt, durch die Witterung (Niederschläge, Wind, etc.) beeinflusst.

4.1.1 Eigenschaften und Stoffwerte der Schüttguter

Um die Komplexität dieser Systeme beschreiben zu können, muss man die dafür verantwortlichen Einflussgrößen zuerst definieren und kategorisieren.

- Materialeigenschaften
  - Stoffart, Dichte, Korngrößenverteilung, Feuchtigkeit, Partikelform, …

Hier geht man auf folgende Eigenschaften ein:

  - Kornbeschaffenheit [62]
  - Korngröße
  - Kornform
- Zusammenhalt [63]und [64]

  - Adhäsion
  - Kohäsion
  - Böschungswinkel
- Schüttgutfeuchtigkeit
- Schüttdichte [64]
- Besondere Eigenschaften
  - Staubneigung
  - Hygroskopizität

Der Emissionsfaktor bildet all diese Schüttguteigenschaften im Staubungsverhalten ab. Diese Stoffeigenschaften gilt es vor Bestimmung des Emissionsfaktors festzustellen.

Da für die Untersuchungen die Minderung der Feinstaubentstehung (speziell Partikel mit einem Durchmesser kleiner 10 µm) von Interesse ist, wurden die drei Schüttgüter nur hinsichtlich ihrer Körngrößenverteilung und ihrer Dichte untersucht, da diese zur Berechnung des Emissionsfaktors E(PM10) und der Auslegung der Staubkammer benötigt werden.

4.2 Auswahl von Sprühwasserzusätzen zur Verbesserung der primären Staubunterdrückung

Der Begriff “diffuse Staubemissionen” bezieht sich auf luftgetragene Partikel, welche von sogenannten diffusen Quellen, die hauptsächlich punktförmig, linienförmig oder flächenförmig sein können und nicht geführt sind, freigesetzt werden [26]. Dabei wird im Bereich eines Punktes, einer Linie oder einer Fläche, wo meistens kleine und verteilte Schüttgut- oder Staubhaufwerke vorhanden sind, durch Einwirkung von Wind oder mechanischer Beanspruchung (Impulsaustausch) Staub dispergiert, welcher zusammengefasst die diffuse Staubemission verursacht.

Die Hauptquellen diffuser Staubemissionen sind offene Flächen (z.B. Baustellen, bergmännische Abbauflächen oder landwirtschaftliche Anbaugebiete), befestigte und unbefestigte Straßen und Parkplätze, Schüttguthalden, sowie Geräte des Schüttgutumschlages, des -transportes und der -verarbeitung [26]. Der Oberfläche von Schüttgütern kommt bei der Entstehung von diffusen Staubemissionen oft eine entscheidende Rolle zu. Daher ist ein Ansatz diese Schüttgutoberflächen zu befeuchten und so die Entstehung diffuser Staubemissionen durch diese primäre Staubabscheidemaßnahme zu verhindern. Diese primäre Staubabscheideeffektivität soll im Folgenden durch Schüttgutfallversuche untersucht werden.

Das Schüttgut soll einerseits möglichst wenig Staubemission verursachen, andererseits hat der Feuchtegehalt den prozesstechnischen Regulativen zu entsprechen und darf nicht zu hoch sein. Um den zur Staubreduktion erforderlichen Feuchtegehalt im Schüttgut zu senken und auch die Anwendbarkeit dieser Methode im Winter zu gewährleisten werden daher von der Industrie dem Sprühwasser von Wasserspraysystemen Additive zugemischt.

Ein Zugang um den notwendigen Feuchtegehalt zu verringern ist das verwenden von Additiven welche die Benetzungseigenschaften von Schüttgutpartikeln verbessern. Dadurch wird also die Schüttgutdurchfeuchtung schon bei geringeren Feuchtegehalten sichergestellt. Hierfür werden eine Reihe von Benetzungsvermittlern wie Tenside, Polymerlösungen, Öl und Ölemulsionen sowie Asphalt und Asphaltemulsionen eingesetzt. Diese Additive führen jedoch häufig zu Problemen bei Versprühung durch Schaumbildung. Des weiteren sind die Benetzungseigenschaften des Additives auf die Schüttguteigenschaften abzustimmen, bei sich ändernden Schüttgutqualitäten kommt es hier häufig zu Problemen. Daher ist durch diese Additive keine allgemein anwendbare Staubreduktionsverbesserung sichergestellt [56], [57]. Aus diesem Grund ist der Ansatz einen mehr Generell anwendbaren Zugang zu schaffen. Dies wäre durch verwenden eines Additives der Fall welches durch Agglomeration der Schüttgutkörner zur Staubunterdrückung auf einer langen Zeitskala führt. Das Additiv hat auch den Gefrierpunkt des Sprühwassers zu erniedrigen. Zur Zeit werden als Gefreirpunktsverringernde Additive Salze wie NaCl, $CaCl_2$, KCl, KSCN ,$B_{10}O_{10}$, $KC_2H_5O_2$, $MgCl_2$, $NaC_2H_5O_2$, $NaNO_2$, und andere anionische oder amphotere Additive verwendet. Diese Additive werden eingesetzt um beim Kohle- oder Erzbergbau die Abbaueigenschaften sowie die Besprühung bei Frost zu verbessern. Hier ist das Problem vor allem, dass das Additive bioverträglich sein soll und für spätere thermische Verwertung des Schüttgutes (Erze, Kohle) einen Heizwert haben soll. Dies ist beides für Salze nicht erfüllt.

Ein Additiv welches sowohl die Benetzungseigenschaften verbessert zu Agglomeration der Schüttgutkörner führen kann sowie den Gefrierpunkt von Wasser verringert [65] sowie bioverträglich ist und einen Heizwert hat sowie mit Wasser unbegrenzt mischbar ist und zu keiner Schaumbildung führt sowie sehr billig ist stellt Restmelasse dar welche ein Abfallprodukt der Zuckerindustrie ist.

Dar sich in diesem Zusammenhang die Anwendung von Restmelasse als Additiv zur verbesserten primären Staubunterdrückung als Vielversprechend darstellt, soll die Erhöhung der primären Staubabscheideeffektivität durch Verwendung von Restmelasse Wassermischungen im Vergleich zur Anwendung von reinem Wasser untersucht werden.

Folgende Eigenschaften und Wirkungen von Restmelasse sollen im Folgenden Untersucht werden:

- Die Verbesserung der Staubabscheideeffektivität durch Zusatz von Restmelasse
- Das Feuchtegehalteinsparungspotential durch Zusatz von Restmelasse
- Die Nachhaltigkeit der Staubreduktion
- Die Universelle Anwendbarkeit von Restmelasse

Der Brennwert und die Gefrierpunktserniedrigung von Restmelasse sind bereits literaturbekannt [65].

Um die Verbesserung der Staubabscheideeffektivität sowie das Wassereinsparpotenzial bzw. Feuchtegehalteinsparpotential durch Zusatz von Restmelasse zu untersuchen wird Im Folgenden eine Untersuchung der Emissionsfaktoren von Schüttgütern welche mit unterschiedlichen Mengen an Restmelasse/Wasser Mischungen versetzt wurden dargelegt. Durch Vergleich des Abnahmetrends des Emissionsfaktors mit steigendem Wasser/Restmelassegehalt mit dem Abnahmetrend des Emissionsfaktors mit steigendem Feuchtegehalt des Schüttgutes wird eine

Abschätzung der Verbesserung der Staubabscheideeffektivität sowie des Feuchteeinsparpotentials durch Zusatz von Restmelasse zum Sprühwasser von Wasserspraysystemen möglich.

Um die Nachhaltigkeit der Staubunterdrückung durch Anwendung von Restmelasse zu untersuchen wird im Folgenden eine Analyse der Staubabscheideeffektivität welche nach auftrocknen des Schüttgutes noch vorhanden ist, erfolgen. Hier wird der Emissionsfaktor des Schüttgutes welches aufgetrocknet ist welches zuvor mit Wasser befeuchtet wurde mit dem Emissionsfaktor der aufgetrockneten Probe welche zuvor mit einer Restmelasse/Wasser Mischung befeuchtet wurde verglichen.

Um die universelle Anwendbarkeit von Restmelasse als Staubunterdrückendes Additiv zu untersuchen wurden die Emissionsfaktoren nach Anwendung verschiedener Restmelasse/Wassermischungen in unterschiedlicher Menge von drei verschiedenen Schüttgütern untersucht.

4.2.1 Einsatz von Restmelasse als Sprühwasserzusatz

Wie der Name schon sagt, handelt es sich bei Restmelasse um einen Reststoff und zwar von der Zuckerherstellung bzw. der Melasseentzuckerung. Restemelasse wird in vielen Anwendungsgebieten wie etwa in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt. Jedoch könnte sie sowohl luftreinhaltetechnisch, als auch wirtschaftlich besser genützt werden, als es bis jetzt der Fall ist. Diese Annahme basiert auf der Tatsache, dass Restmelasse einen sehr hohen Zuckeranteil besitzt. Dieser hohe Zuckeranteil könnte im Bereich der Luftreinhaltung dazu genützt werden, feinste Partikeln zu agglomerieren.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass Restmelasse in großen Mengen (25.000 m³/a) als Reststoff der Zuckerproduktion anfällt.

Da Restmelasse biologisch abbaubar ist besteht keine Gefahr für das Grundwasser. Auch dies ist eine wichtige Eigenschaft.

Bisher wichtigstes Anwendungsgebiet der Restmelasse ist ihre Verwendung als Düngemittel. Dafür eignet sie sich auf Grund der enthaltenen Mengen an Salzen und Nährstoffen. Diese Eigenschaft ermöglicht auch den Einsatz von Restmelasse zur Gefrierpunktserniedrigung. Welche bei der Verhinderung der Staubresuspension von Straßen durch Aufbringen von Restmelasse eine wichtige Eigenschaft ist. Denn die Gefrierpunktserniedrigung der Restmelasse kann bei Anwendung auf Straßen eine Reduktion der Ausbringung von Streusplitt, dessen Abrieb ein großer Feinstaubverursacher ist, ermöglichen. Außerdem könnte die Aufbringung von Restmelasse auf die Straße die Verwendung von Streusalz reduzieren, das nach dem Trocknen als feinste Partikel vorliegend ist und durch den Verkehr aufgewirbelt wird.

Wie bereits erwähnt kommt es durch die Salze in der Restmelasse zu einer Gefrierpunktserniedrigung, die die ganzjährige Verwendung von Restmelasse erlaubt. Das bedeutet, dass man Restmelasse bzw. Restmelasse-Wasser-Gemische auch im Winter einsetzen

kann. Dies ermöglicht den Einsatz von Düsensprays zur Staubunterdrückung bei Schüttgutumschlag, wo dieser bis jetzt, durch den hohen Gefrierpunkt von Wasser, nicht möglich war.

4.2.1.1 Ursprung von Restmelasse [61]

Die Melasse ist jener Sirup der bei der letzten Kristallisationsstufe in der Zuckerproduktion abgetrennt wird. Sie enthält den nicht auskristallisierten Zucker (6 bis 9 % des Zuckers aus der Rübe) und die aus den Rüben stammenden löslichen Nicht-Zuckerstoffe.

Ziel bei der letzen Kristallisationsstufe ist die Gewinnung von Extrakt, Betainmelasse und zuckerarmer Restmelasse aus der Rübenmelasse.

Hierfür wird die Melasse (aus enthärtetem Dünnsaft) auf ca. 50 % Trockensubstanz verdünnt, anschließend angewärmt, über Anschwemmfilter filtriert und in den Separator eingespeist.

Im Separator wird mit filtriertem Kondensat nach dem Prinzip der Ionenausschlusschromatographie eluiert und dabei die Melasse in drei Fraktionen getrennt:

1. Aus dem Extrakt wird in der Dicksaftkampagne Weißzucker gewonnen. Dabei fällt wieder Melasse an, die aber nicht mehr in der Melasseentzuckerung verwendet werden kann.
2. Betainmelasse wird als Rohstoff für die Betaingewinnung verkauft.
3. Die Restmelasse wird in Tanks gelagert und in der Zuckerrübenkampagne als Presshilfsmittel für melassierte Trockenschnitzel verwendet.

In Abbildung 4-1 ist die Produktion der Restmelasse in ihren einzelnen Schritten dargestellt.

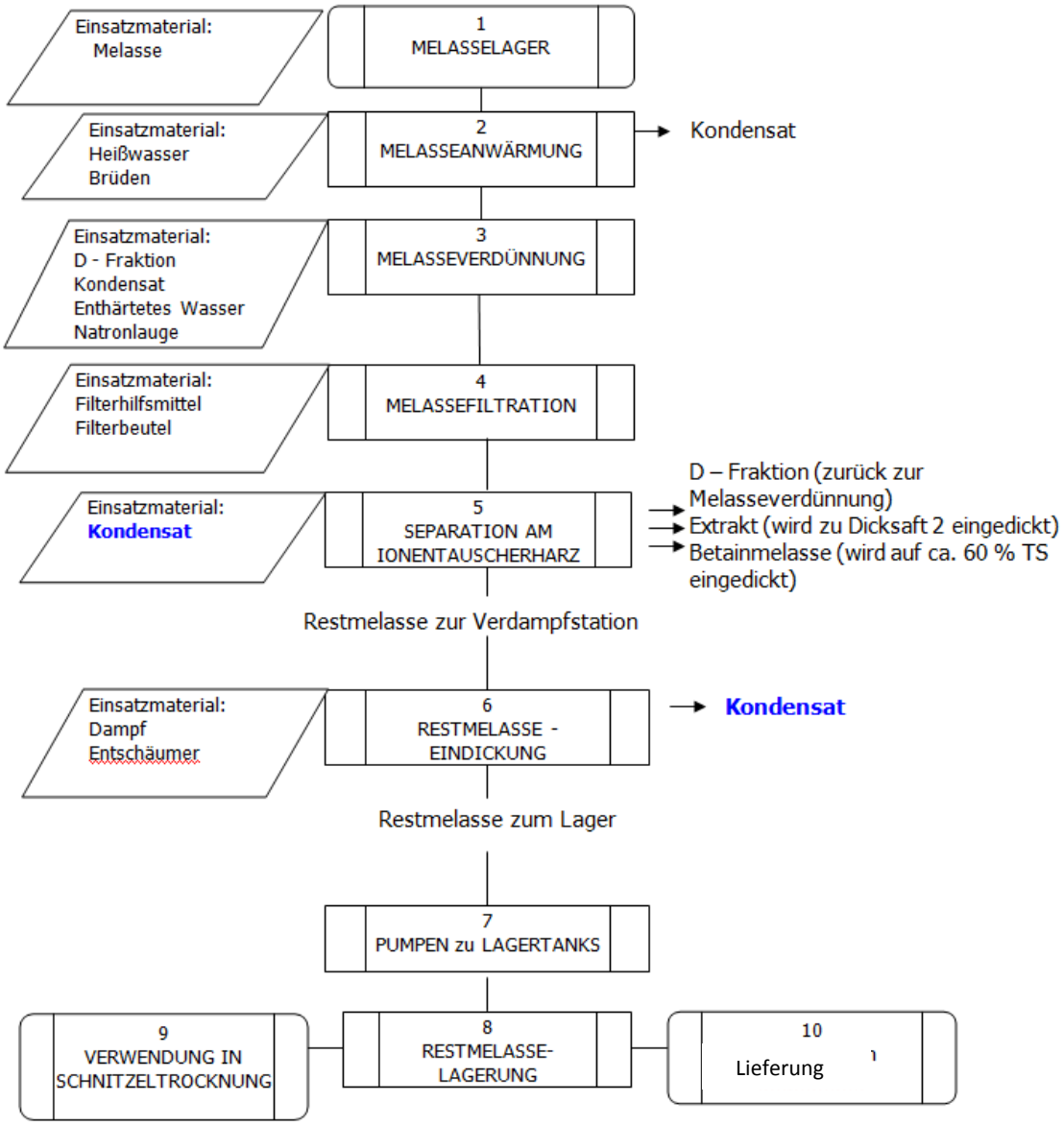


Abbildung 4-1: Produktion der Restmelasse [66]

Bisher findet Restmelasse Anwendung als Presshilfe für melassierte Trockenschnitzel und als Dünger für die Landwirtschaft bzw. in verdünnter Form als Kopfdünger.

4.2.1.2 Eigenschaften und Stoffwerte von Restmelasse [61]

Die Trockensubstanz TS (Reinheit) der Restmelasse hat einen Zuckeranteil der im Prozess Idealfall 6 % beträgt, aber auch bis 20 % schwanken kann.

Bei der in den Tanks gelagerten Restmelasse handelt es sich bereits um eine wässrige Lösung die unbegrenzt mit Wasser verdünnbar ist.

Die Viskosität und die Dichte kann mit einer Näherungsformel berechnet werden.

Einige Beispiele:

- Unverdünnt (70 % TS) bei einer Reinheit von 10 % und bei 10° C:

kinematische Viskosität	390509	cm^2/s
dynamische Viskosität	545,15	mPa.s
Dichte	1,396	g/cm^3

- Verdünnt auf 20 % TS bei einer Reinheit von 10% und bei 10°C:

kinematische Viskosität	2389,3	cm^2/s
dynamische Viskosität	2,59	mPa.s
Dichte	1,084	g/cm^3

Restmelasse ist bei Temperaturen von 0 °C bis 50 °C 12 Monate lagerbar bzw. haltbar.

Weiters ist Restmelasse nicht toxisch, biologisch abbaubar und erfordert beim Transport keine spezielle Sicherheitsvorkehrung. Eine Verdünnung kann Gärung verursachen.

Nun folgt eine Auflistung der Stoffwerte der verwendeten Restmelasse. Die angegebenen Werte sind unverbindliche Richtwerte und unterliegen rohstoffbedingten Schwankungen [61]. (Alle Angaben erfolgen in g je kg Produkt.)

Trockensubstanz	mind. 700 g
Rohasche	300 g
Organische Substanz	400 g
Gesamt-Kalium (K_2O)	124 g
Gesamt-Stickstoff (N)	22 g
Gesamt-Phosphat (P_2O_5)	1 g
Calcium (CaO)	1,1 g
Magnesium (MgO)	0,2 g
Natrium (Na_2O)	37 g

4.3 Aufbau der Versuchsapparatur zur Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität

Die für diese Messungen entwickelte Apparatur gehört im Grundprinzip zu der Kategorie der Staubfallgeräte und wird daher auch als Fallapparatur bezeichnet.

In Abbildung 4-2 ist die Fallapparatur schematisch dargestellt mit den in den folgenden Kapiteln beschriebenen verwendeten Geräten und geplanten Aufbau.

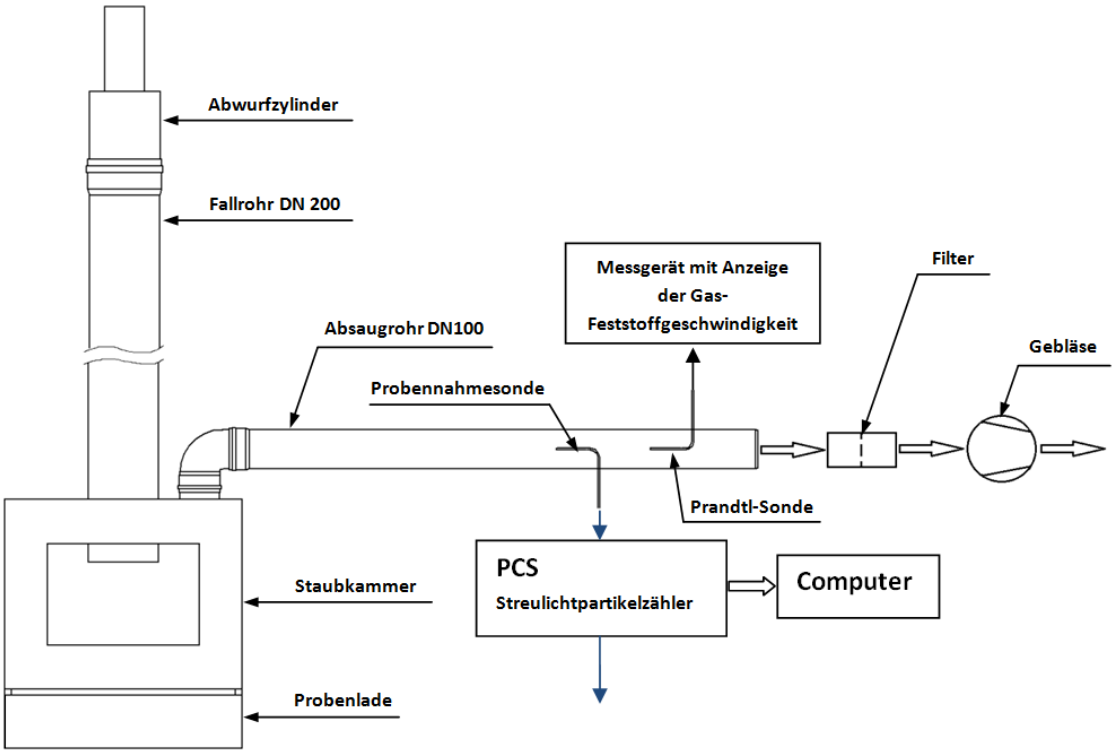


Abbildung 4-2: Grundschema der Fallapparatur

Die Bestimmung des Emissionsfaktors, welcher das Staubungsverhalten eines Schüttgutes charakterisiert verlangt nach einer Apparatur, welche den freien Fall eines Schüttgutpackets ermöglicht.

Daher wurde ein Abwurfzylinder zum Auslösen des Fallversuches, ein Fallrohr mit einer Höhe von 2,5 m, eine Staubkammer mit einem Volumen von ca. 0,22 m³ und eine Absaugung zur Messung des in der Kammer emittierten Feinstaubes aufgebaut (siehe Abbildung 4-3).

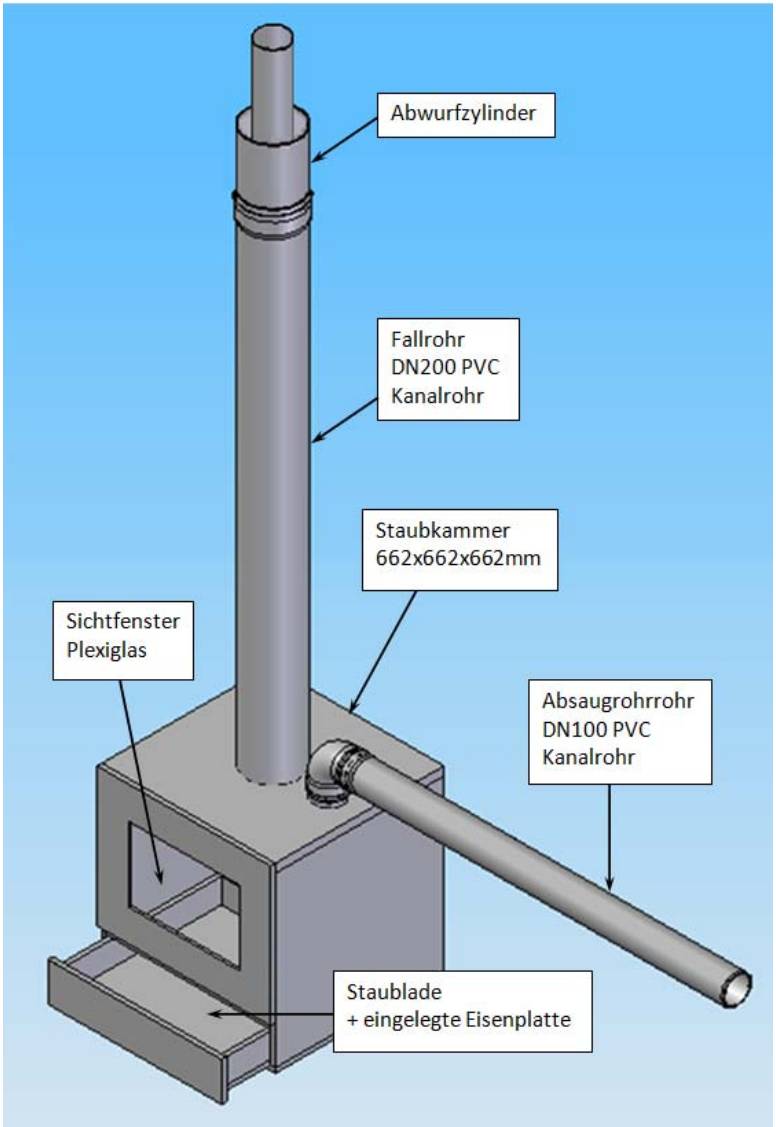


Abbildung 4-3: Fallapparatur

Aus räumlichen Gegebenheiten und Ergebnissen von [47] wurde eine maximale Fallhöhe von 3 m gewählt um einen größtmöglichen Impuls zwischen dem Schüttgut und der, in der Fallapparaturlade befindlichen Eisenplatte, die eine mögliche Dämpfung verhindern soll, zu erzeugen. Da die Probenmasse bei dieser Arbeit um einiges höher ist, als die Masse die in [47] für die Fallversuche gewählt wurde, wurden die Abmaße der Kammer sowie der Durchmesser des Rohres etwas vergrößert. Die Abmaße und Details siehe Abbildung 4-4.

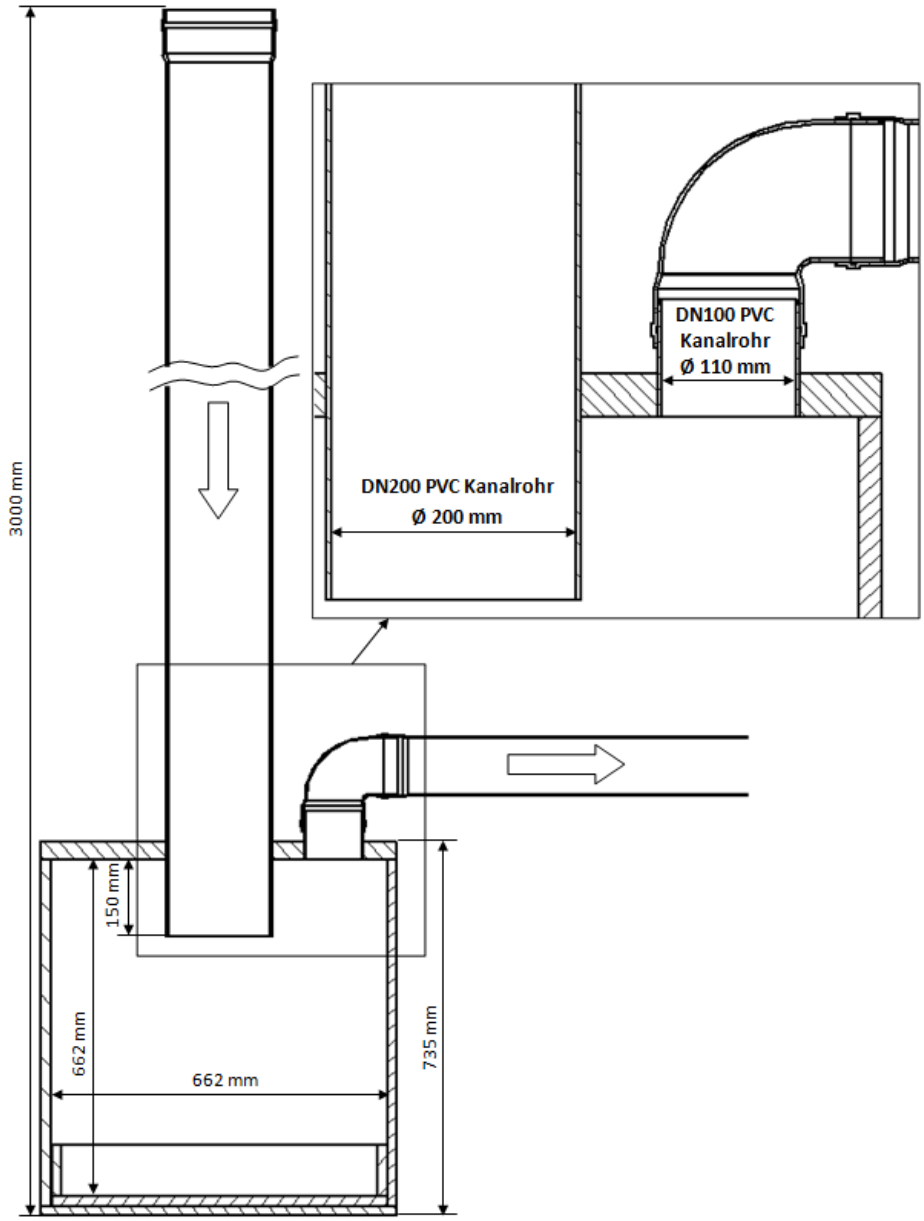


Abbildung 4-4: Abmaße und Details der Fallapparatur exkl. Abwurfzylinder

Wie man weiters erkennen kann, wurde das Fallrohr zentriert im Deckel des Kastens angebracht, um ein optimales Ausbreiten des durch den Aufprall entstandenen Staubes zu gewährleisten.

Die Absaugleitung konnte deswegen nicht zentriert gesetzt werden.

Um eine Kurzschlussströmung zwischen Fallrohrauslass und Absaugrohreinlass zu verhindern, ragt das Fallrohr 15 cm in die Staubkammer hinein, wie in Abbildung 4-3 ersichtlich ist.

Zum Beobachten des Aufpralls und der Staubentstehung wurde an der Front der Kammer eine Plexiglasscheibe eingesetzt und zur Entnahme der Probe nach dem Versuch wurde eine Lade vorgesehen, in der die Eisenplatte eingelegt wird.

Das Grundmaterial der Staubkammer, der Lade und der Verstrebungen zum Stabilisieren des Fallrohres sind 19 mm dicke Furnierplatten. Nur die Deckplatte ist aus Gründen der Stabilität aus einer 35 mm dicken Furnierplatte konzipiert.

Die in der Lade befindliche Eisenplatte hat eine Größe von 50x50x1 cm.

Das 2,5 m lange Fallrohr ist ein PVC DN 200 Kanalrohr.

Die Absaugung erfolgt über ein 90° PVC DN 100 Kanalrohr, das den Staub in ein waagrechtes 2 m langes Absaugrohr PVC DN 100 leitet, in dem die Messeinrichtungen (siehe Kapitel 4.3.1) eingebaut sowie das Gebläse angeschlossen sind.

Der Abwurfzylinder, der in Abbildung 4-5 dargestellt ist, besteht aus einem PVC DN 200 Rohr und ist direkt auf das Fallrohr aufgesteckt. In dem Rohr befindet sich ein PVC DN 100 Rohr, in das die Probe eingefüllt wird und eine Klappe am Boden durch die der Fallversuch ausgelöst wird. Um einen absolut dichten Abschluss zu erhalten, wurde auf der Klappe eine Gummimatte befestigt.

Der Zylinder fasst ein Volumen von ca. 4 dm^3. Da die Schüttgutdichte der Verwendeten Schüttgüter ca. bei 1 kg / dm^3 lag war es daher kein Problem die Probe mit einer Masse von 2,5 kg einzufüllen und diese notfalls noch zu steigern bzw. senken.

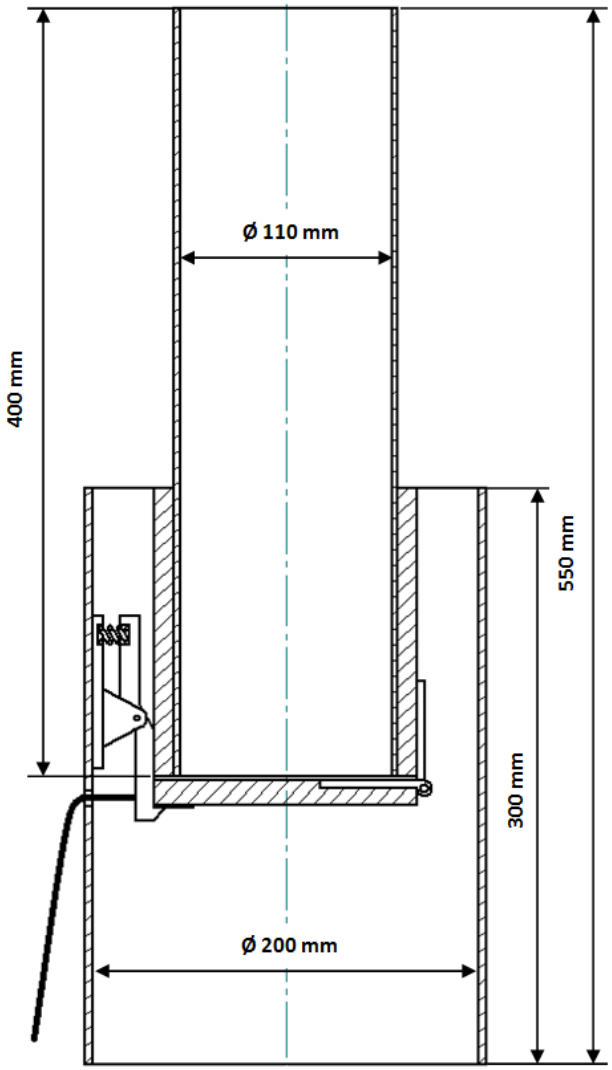


Abbildung 4-5: **Schnitt durch Abwurfzylinder**

4.3.1 Verwendete Geräte

Für die Fallversuche wurden folgende Geräte eingesetzt, die in weiterer Folge näher beschrieben werden: Prandtl-Sonde, Streulichtpartikelzähler, Messsonde, Gebläse, Waage und Hand-Drucksprüher.

4.3.1.1 Prandtl-Sonde

Das Messprinzip der Prandtl-Sonde beruht, wie in Abbildung 4-6 dargestellt, auf der Messung des Gesamtdruck und des statischen Drucks in der Strömung.

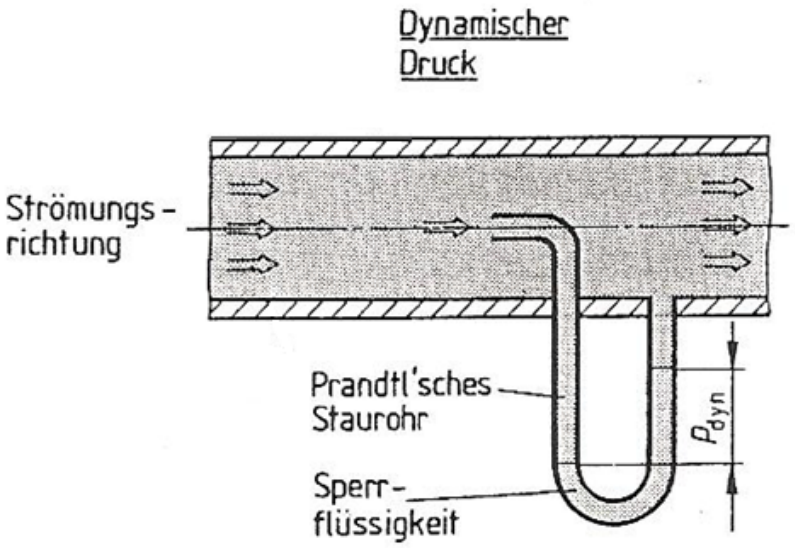


Abbildung 4-6: Prinzip der Prandtl-Sonde [67]

Die Differenz zwischen dem Gesamtdruck und dem statischen Druck in der Strömung ist der dynamische Druck, der mittels Prandtl-Sonde in einem Messgerät bestimmt werden kann und aus dem sich die Strömungsgeschwindigkeit durch Umformen von folgender Formel (4-2), bei bekannter Dichte des strömenden Mediums, berechnen lässt.

$$p_{dyn} = \frac{\rho}{2} * v^2 \tag{4-2}$$

Mittels der Beziehung $\dot{V} = v * A$ kann auch der Volumenstrom bestimmt werden, wenn der Rohrdurchmesser bzw. die durchströmte Fläche bekannt ist.

4.3.1.2 Streulichtpartikelzähler

Das Streulichtpartikelzählverfahren ist ein optisches Verfahren das am Einzelpartikel angewandt wird und im folgenden Text und Abbildung 4-7 näher beschrieben wird.

Ein mit Partikel beladener Gasstrom wird durch die Messküvette gesaugt. Mit einer Weißlichtquelle wird ein optisches Messvolumen impulsartig beleuchtet. Befindet sich ein Partikel im Messvolumen so wird normal zur Weißlichtquelle das gestreute Licht detektiert. Das gestreute Licht kann nun mit Kalibrierkurven verglichen werden und gibt damit Aufschluss über die Partikelgröße. Befinden sich mehrere Partikel gleichzeitig im Messvolumen so kommt es zu einer Überlagerung des Streulichtes (Koinzidenzfehler). Das heißt, das Messverfahren ist nur beschränkt für hohe Konzentrationen geeignet. [67] gibt als Obergrenze der Konzentration 10^5 Partikel pro cm³ und einen Partikelgrößenbereich von 0,3 bis 40 µm an. In der realisierten Apparatur wurde ein Streulichtpartikelzähler der Firma Palas (Karlsruhe, Deutschland) vom Typ PCS-2010 verwendet. Die Seriennummer lautet 0810.

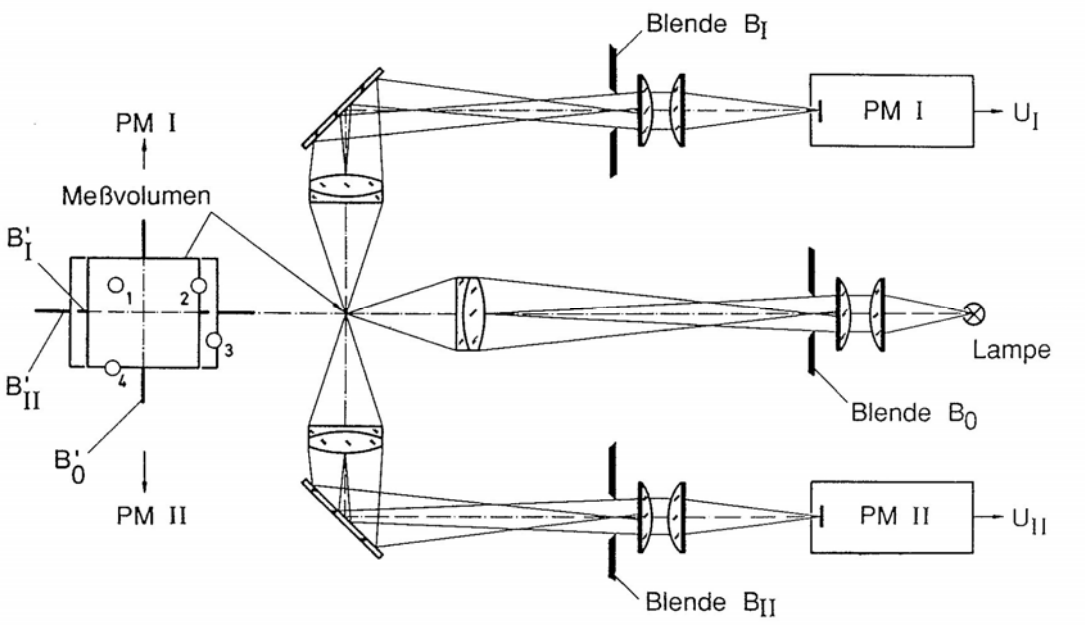


Abbildung 4-7: Messprinzip des Streulichpartikelzählers [67]

4.3.1.3 Sonde für die Probennahme

Bei der Probennahmesonde handelt es sich um ein Edelstahlrohr mit einem Durchmesser von 5 mm, das in die Absaugleitung eingeführt wird, um dort einen Teil der partikelbeladenen Luft zu entnehmen. Dieser wird dann dem im vorigen Kapitel beschrieben Streulichtpartikelzähler zugeführt. (siehe Abbildung 4-8).

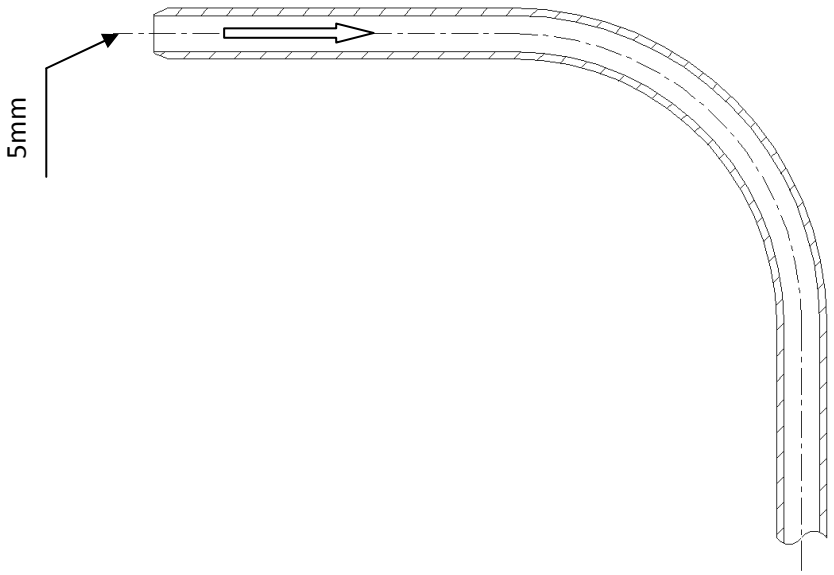


Abbildung 4-8: Schnitt der Probennahmesonde

4.3.1.4 Gebläse

Bei dem Gebläse handelt es sich um einen doppelstufigen Seitenkanalverdichter dem ein Filterkasten vorgeschaltet ist. Die Drehzahl des Gebläses bzw. der Volumenstrom wird mittels Frequenzumrichter eingestellt bzw. nachgeregelt um die Geschwindigkeit von 1,8 m/s im Absaugrohr über die Versuchsdauer konstant zu halten.

Das Datenblatt für das Gebläse vom Typ FJET1K11DS/22/2 des Herstellers CreativeBlowerAustria GmbH (Jennersdorf, Österreich) befindet sich im Anhang

4.3.1.5 Frequenzumrichter

Die Regelung des Luftvolumenstromes durch die Staubabscheidekammer fand über die Drezahlbeeinflussung des Seitenkanalverdichtermotors mittels Frequenzumrichters statt. Eingesetzter Frequenzumrichter: Dan Voss VLT HVAC Drive 22kW 400V Serien Nr. 012909G328

4.3.1.6 Waage

Bei der verwendeten Waage handelt es sich um ein Produkt der Firma Mettler Toledo des Typs PM 4000. Die Tischwaage besitzt eine:

- Ablesbarkeit von 0,01 g
- Höchstlast von 4100 g

4.3.1.7 Hand-Drucksprüher

Hand-Drucksprüher aus Kunststoff mit Messingdüse siehe Abbildung 4-9 .

- Füllmenge 1,5 Liter.
- Höhe ca. 30 cm.
- Druck ca. 3 bar

Abbildung 4-9: Hand-Drucksprüher

4.4 Festlegen der Messmethode zur Messung der Staubemission

Wegen der hohen Zahl an erforderlichen Messungen, wurde ein Kaskadenimpaktor als Messverfahren ausgeschlossen und ein optisches Verfahren (Streulichtpartikelzähler) mit einer Umrechnung von einer Anzahlverteilung auf eine Massenverteilung ausgewählt.

Um eine Messung durchzuführen, ist es nötig, einen Teilstrom aus der Partikelbeladenen Luftströmung zu entnehmen und dann dem Messgerät zuzuführen. Dies geschieht mittels Messsonde, die sich im Zentrum des Absaugrohres befindet.

Um eine ordentliche Probennahme durchzuführen, ist es nötig, dass bestimmte Regeln eingehalten werden.

- Am Probennahmeort muss eine beruhigte Strömung vorliegen. D.h. die Sondenöffnung darf sich erst nach einer gerade Absaugrohrlänge von 10mal dem Rohrdurchmesser befinden.
- Eine isokinetische Teilstromentnahme muss erfolgen. D.h. Die Geschwindigkeit des Gas-Feststoff-Gemisches muss im Absaugrohr dieselbe sein, wie in der Messsonde.

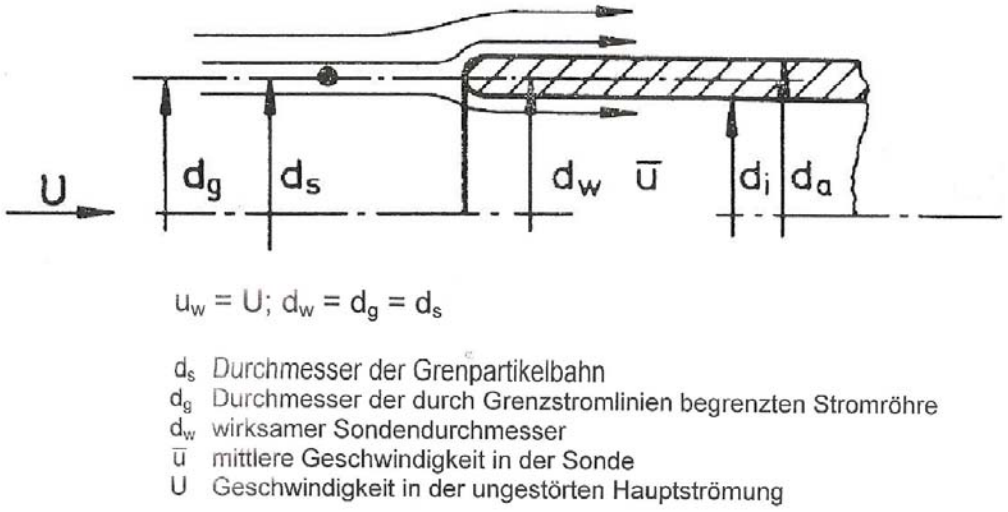


Abbildung 4-10: Darstellung der Isokinetische Absaugung [67]

4.5 Experimentelle Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität

4.5.1 Bestimmung der Partikelgrößenverteilung der Schüttgüter

Da es für die Schüttgüter keine expliziten Daten gibt, wurden mittels Siebanalyse die nachfolgenden Summenkurven gebildet, sowie die restlichen erforderlichen Daten von den Betreibern der Schotter- und Bruchkalkgruben, sowie der Streusplittlagerstätten erfragt.

Aufgrund der in den Abbildung 4-11, Abbildung 4-12, Abbildung 4-13 zu entnehmenden Daten ist ersichtlich, dass der Anteil an Partikel kleiner gleich 10 µm relativ gering ist (< 10%). Daher wurde die Probenmasse mit 2,5 kg festgelegt.

4.5.1.1 Wandschotter

Hierbei handelt es sich um einen Wandschotter der aus einer Schottergrube der Franz Hummer GmbH in Zwentendorf an der Donau am 09.10.2010 entnommen wurde. Die durchgeführte Siebanalyse ergab die in Abbildung 4-11 dargestellte Summenkurve. Aus dieser Kurve kann man sehen, dass der Anteil an Partikeln kleiner als 10 µm bei ca. 6,81 % liegt.

Die Dichte des Materials liegt bei 1,8 kg/dm³ und die Schüttdichte bei ca. 1 kg/dm³.

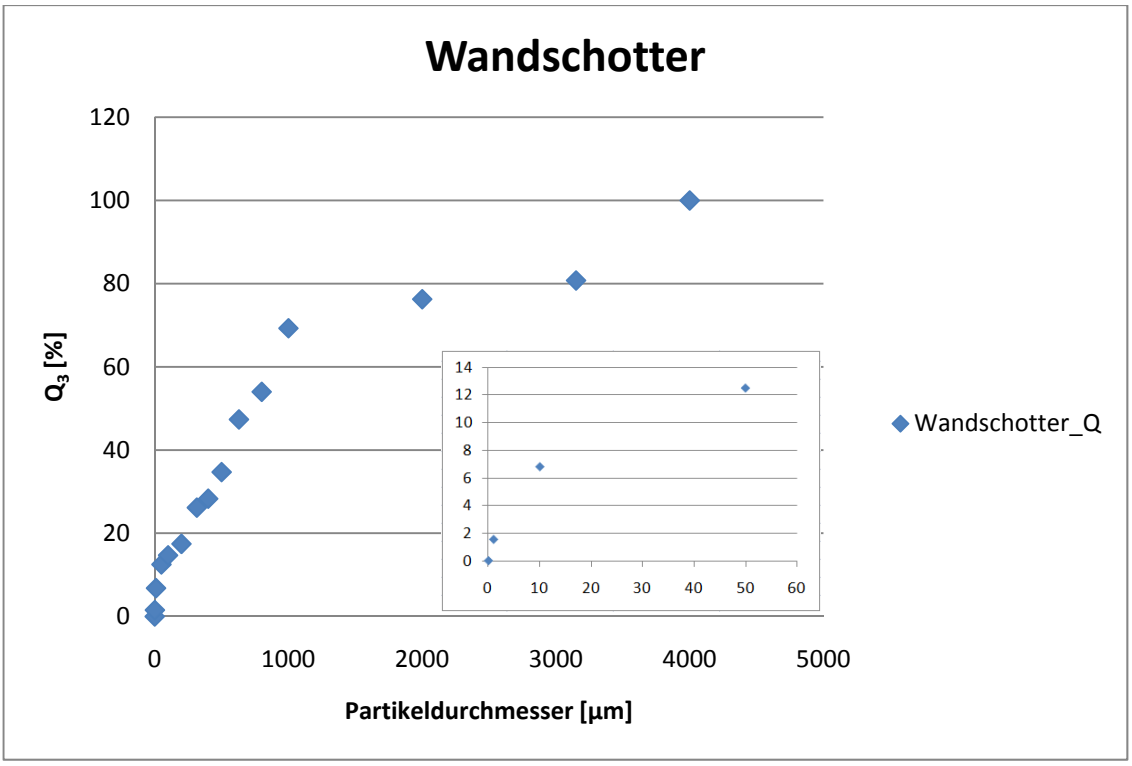


Abbildung 4-11: Summenverteilung von Wandschotter

4.5.1.2 Bruchkalk

Der Bruchkalk wurde in einer Grube in St. Andrä-Wörden von der Firma Karner Erdarbeiten abgebaut. Die Entnahme erfolgte am 09.10.2010. Mittels Siebanalyse ergab sich die in Abbildung 4-12 dargestellte Summenkurve. Partikel die kleiner als 10 µm sind haben einen Massenanteil von 7,07 %.

Die Dichte des Materials liegt bei 1,8 kg/dm³ und die Schüttdichte bei ca. 1 kg/dm³.

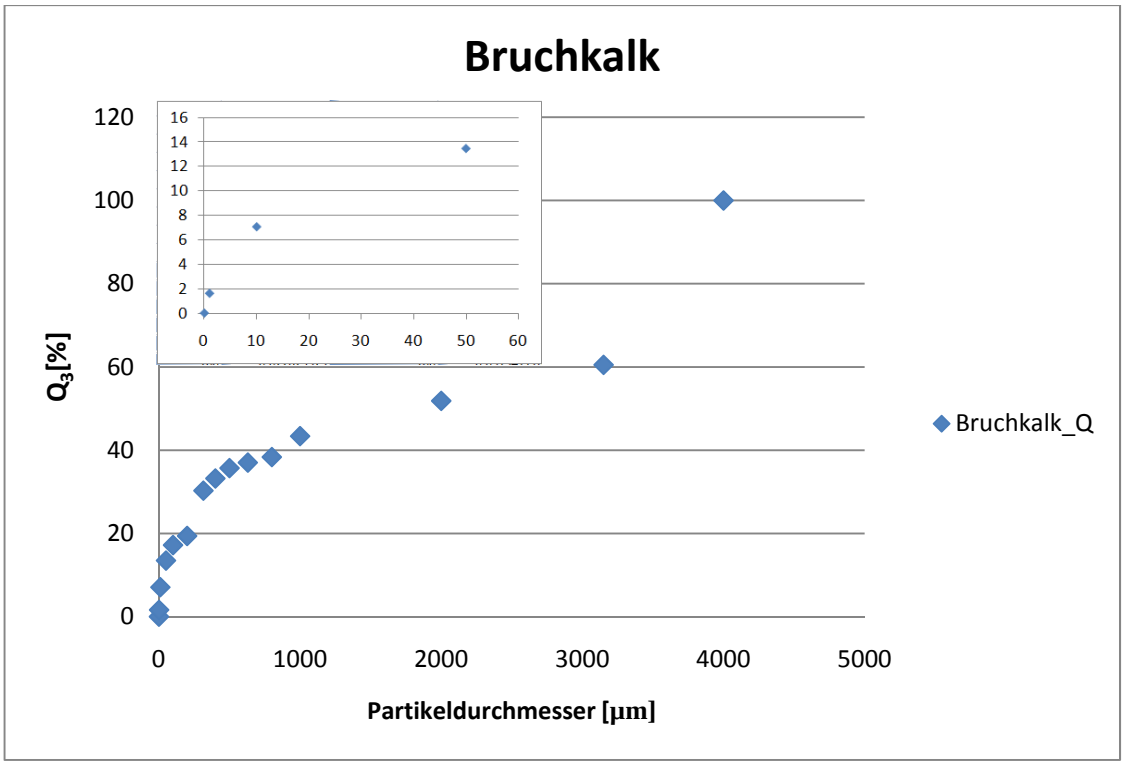


Abbildung 4-12: **Summenverteilung von Bruchkalk**

4.5.1.3 Streusplitt

Bei diesem Material handelt es sich um einen bereits auf den Straßen eingesetzten Streusplitt. Dieser wurde nach der Einbringung von der Straße gelagert und am 08.10.2011 von einer Lagerstätte der Bezirksverwaltung Tulln-Atzenbrugg entnommen und eine Siebanalyse durchgeführt, die einen Anteil von 3,12 % an Partikeln die kleiner als 10 µm sind ergab (siehe Abbildung 4-13).

Die Dichte des Materials liegt bei 1,8 kg/dm³ und die Schüttdichte bei ca. 1 kg/dm³.

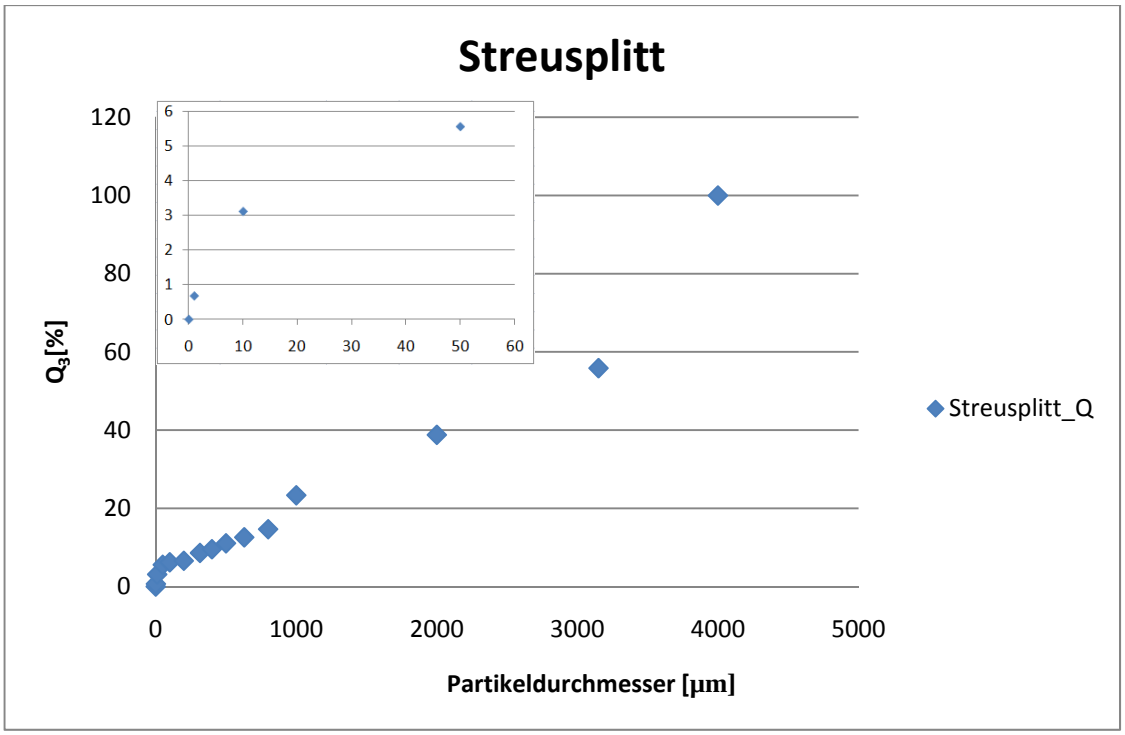


Abbildung 4-13: Summenverteilung von Streusplitt

4.5.2 Versuche zur Bestimmung des Emissionsfaktors

Die in diesem Kapitel näher beschriebenen Fallversuche wurden durchgeführt, um die Wirksamkeit von Restmelasse als Additiv zu Wasser im Gegensatz zu reinem Wasser zu untersuchen.

Dies wurde zum einen anhand von befeuchteten und zum anderen anhand von befeuchteten und danach getrockneten Schüttgutproben untersucht. Dabei wurde neben der Zusammensetzung des Restmelasse-Wasser-Gemisches (0%- bis 40%-Restmelasse pro Restmelasse-Wasser-Gemisch) auch die Menge an zum Schüttgut zugegebenen Gemisch variiert.

Mittels der befeuchteten Schüttgutproben sollte festgestellt werden ob sich bei der Verwendung von Restmelasse-Wasser-Gemischen im Gegensatz zu reinem Wasser eine bessere Reduzierung der Staubentstehung bei geringeren Mengen an zugegebener Flüssigkeit zum Schüttgut ergibt.

Um auch Informationen über die Langzeitwirkung des Restmelasse-Wasser-Gemisches zu erhalten wurden ebenfalls Schüttgutproben für die Fallersuche verwendet, bei denen sowohl die Zusammensetzung des Restmelasse-Wasser-Gemisches als auch die Menge an zum Schüttgut zugegebenen Gemisch variiert wurde. Diese wurden nach dem Befeuchten vor dem Abwurf auf Gewichtskonstanz getrocknet. Damit sollte das Auf- bzw. Eintrocknen der aufgebrachten Flüssigkeiten simuliert werden, um festzustellen ob nach dem Eintrocknen des Wassers die verbleibende Restmelasse die Staubemission verhindern kann.

Zur Bestimmung der chemischen Beständigkeit der aufgebrauchten Restmelasse wurden wie bereits im vorigen Absatz beschrieben befeuchtete und dann getrocknete Schüttgutproben

hergestellt, die in verschiedenen Zeitabständen (nach 4 Tagen, 7 Tagen, 13 Tagen und 24 Tagen) mittels Fallversuchen untersucht wurden.

Mittels Durchführen dieses Versuchsplans soll die Emissionsminderung von reinem Wasser und einem Restmelasse-Wasser-Gemisch festgestellt werden, um so die beiden vergleichen zu können und so die Höhe der emissionsmindernden Wirkung von Restmelasse festzustellen.

Dafür wurden Messserien durchgeführt, die im weiteren näher beschriebene werden. Um aus den zusammengehörigen Messungen der Messserien einen repräsentativen Messpunkt zu erhalten, wurde jede Messung 10-mal wiederholt und der Mittelwert und die zugehörige Streuung ermittelt.

Dabei wurden zuerst Messserien mit Wandschotter durchgeführt. Die für diese Fallversuche verwendeten Schüttgutproben wurden zum einen mit verschiedenen Anteilen an Flüssigkeit (reinem Wasser bzw. Restmelasse-Wasser-Gemische) pro kg trockenem Schüttgut befeuchtet und zum anderen wurde auch der Anteil an Restmelasse im Restmelasse-Wasser-Gemisch variiert. Dadurch wurde ein optimales Restmelasse-Wasser-Gemisch festgestellt, mittels dem die beiden anderen Schüttguter (Bruchkalk und Streusplitt) untersucht wurden. Dabei wurde bei diesen beiden Schüttgütern ebenfalls der Anteil an Flüssigkeit (reines Wasser bzw. optimales Restmelasse-Wasser-Gemisch) pro kg trockenem Schüttgut variiert.

4.5.3 Versuchsplan für Wandschotter

Wie bereits beschrieben, wurden die Messserien mit befeuchteten Schüttgutproben aus Wandschotter begonnen. Dabei starteten die Messserien mit Schüttgutproben die mit reinem Wasser befeuchtet wurden. Die erste Messung einer Messserie war dabei immer eine Blindwertmessung um die Homogenität des Schüttgutes zu gewährleisten. Bei dieser Blindwertmessung handelt es sich um den Emissionsfaktor der aus einem Fallversuch, der mit einer unbehandelten Schüttgutprobe die lediglich auf Gewichtskonstanz getrocknet wurde, erhalten wurde. Danach folgten Messungen bei denen der Anteil an reinem Wasser pro kg trockenem Schüttgut stetig erhöht wurde, bis es zu einer vollständigen Emissionsreduktion kam. So wurden Messpunkte mittels denen man das Emissionsverhalten des mit reinem Wasser befeuchteten Schüttgutes betrachten kann erhalten. Weiters wurden Messserien durchgeführt, deren Schüttgutproben mit Restmelasse-Wasser-Gemischen befeuchtet wurden. Wie bereits erwähnt, sollte durch Versuche mit diesem Schüttgut (Wandschotter) ein optimales Gemisch aus Restmelasse und Wasser bestimmt werden. Daher wurden verschiedenen Gemische hergestellt. Das Gemisch mit dem niedrigsten Anteil an Restmelasse wurde zuerst für die Versuche verwendet. Diese sahen wie bereits beim reinen Wasser so aus, dass der Anteil an Gemisch pro kg trockenem Schüttgut so lange gesteigert wurde, bis sich eine vollständige Emissionsminderung ergab. Natürlich begann auch hier jede Messserie mit der Bestimmung eines Blindwertes. Danach folgten die Messserien, mit dem Gemisch, mit dem nächst höheren Anteil an Restmelasse. Daraus ergaben sich zahlreiche Messpunkte bzw. verschiedene Trends je Restmelasse-Wasser-Gemisch, mittels denen man das Verhalten des Schüttgutes beim Befeuchten mit den verschiedenen Gemischen betrachten kann und die man auch untereinander vergleichen kann.

Da neben der Emissionsminderung unmittelbar nach dem Befeuchten auch die Emissionsminderung nach dem Eintrocknen des reinen Wassers bzw. Gemisches aus Restmelasse und Wasser von Interesse ist, wurden Messserien mit zuerst befeuchteten und dann getrockneten Schüttgutproben durchgeführt. Dabei erfolgte der Ablauf der Versuche genauso wie jene bereits im oberen Absatz beschriebenen. Allerdings wurden die befeuchteten Schüttgutproben im Trockenschrank auf Gewichtskonstanz getrocknet und erst dann die Versuche durchgeführt. Dadurch wurden wieder zahlreiche Messpunkte sowie verschiedene Trends je Restmelasse-Wasser-Gemisch, die man einzeln auf ihr Emissionsverhalten beurteilen kann oder auch miteinander vergleichen kann erhalten. Um einen Vergleich mit Fallversuchen mit Schüttgutproben die mit reinem Wasser befeuchtet und dann getrocknet wurden herzustellen, wurden die Blindwertmessungen herangezogen. Bei den Schüttgutproben, die für diese Fallversuche (Blindwertmessung) verwendet wurde, handelt es sich um Schüttgut, das direkt aus der Abbau bzw. Lagerstätte kam. Da dieses Schüttgut bereits eine bestimmte Feuchte besitzt, die vor dem Trocknen bestimmt wurde, war keine nochmalige Befeuchtung nötig.

Nach Durchführung der zahlreichen Messserien, konnte ein optimales Gemisch aus Restmelasse und Wasser bestimmt werden.

Mit dem optimalen Gemisch wurden mit dem Schüttgut Wandschotter noch zusätzlich Versuche durchgeführt, die Aufschluss über die chemische Beständigkeit von Restmelasse geben sollen. Dafür wurden Schüttgutproben mit dem optimalen Restmelasse-Wasser-Gemisch befeuchtet und danach getrocknet. Dies geschah immer mit demselben Anteil an Gemisch pro kg trockenem Schüttgut. Mit den so hergestellten Proben wurde dann in Abständen von mehreren Tagen Fallversuche durchgeführt, um so eine Änderung der emissionsmindernden Wirkung festzustellen.

4.5.4 Versuchsplan für Bruchkalk

Wie bereits beschrieben wurde, wurden die Messserien mit Bruchkalk mit reinem Wasser und mit dem optimalen Restmelasse-Wasser-Gemisch durchgeführt. Die Messserien starteten dabei ebenfalls mit befeuchteten Schüttgutproben mit reinem Wasser, denen jene mit dem optimalen Restmelasse-Wasser-Gemisch folgten. Vor jeder Messserie erfolgte auch beim Bruchkalk eine Blindwertmessung um die Homogenität des Schüttgutes (Bruchkalk) zu gewährleisten. Mittels den erhaltenen Messpunkten bzw. Trends lässt sich dann die Veränderung der Emission bei Erhöhung des Flüssigkeitsanteiles pro kg trockenem Schüttgut betrachten und man kann auch Vergleiche zwischen den Emissionsverhalten der Versuche mit Bruchkalk mit reinem Wasser und dem optimalen Restmelasse-Wasser-Gemisch anstellen.

Danach folgen weitere Messserien mit befeuchteten und dann getrockneten Schüttgutproben aus Bruchkalk. Die Befeuchtung erfolge genauso wie im Absatz zuvor beschrieben, allerdings wurden die befeuchteten Schüttgutproben danach im Trockenschrank auf Gewichtskonstanz getrocknet. Zum Vergleich der erhaltenen Messpunkte bzw. Trends aus den Versuchen mit befeuchteten und danach getrockneten Schüttgutproben mit dem optimalen Restmelasse-Wasser-Gemisch zu jenen mit reinem Wasser, wurde wie bereits beim Wandschotter die Blindwertmessungen herangezogen.

4.5.5 Versuchsplan für Streusplitt

Die Versuche die für das Schüttgut Streusplitt durchgeführt wurden, sind analog zu den Versuchen mit Bruchkalk, die in Kapitel 4.5.4 beschrieben wurden.

4.5.6 Probenvorbereitung

Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, wurden für die Fallversuche drei Schüttgüter ausgewählt, die von der Firma Agrana Zucker GmbH in 50 l Behältern geliefert wurden. Die Feuchte der Schüttgüter war dabei unbekannt.

Um ein Schüttgut für die Versuche vorzubereiten, wurden Anteile von diesem möglichst homogen, d.h. aus jedem Behälter und in verschiedenen Höhen der Behälter, in Kästen gefüllt, die dann bei 120 °C mindestens 16 Stunden getrocknet wurden. Aus dem trockenen Material wurde dann nach Abkühlung auf Raumtemperatur die für die Probe benötigte Masse entnommen.

Weiters wurde von der Firma Agrana Zucker GmbH auch die Restmelasse (Stoffwerte siehe Kapitel 4.2.1.2) bereitgestellt. Diese wurde dann mit Wasser in verschiedenen Verhältnissen verdünnt, um sie auf bzw. in das Schüttgut mittels Spray auf- bzw. einbringen zu können.

Dabei zeigte sich, dass ein problemloses Versprühen mit der in Kapitel 4.3.1.7 beschriebenen Hand-Drucksprüher erst unterhalb von einem Restmelasse-Wasser-Verhältnis von 40:60 möglich war. Daher wurde dieses Verhältnis für die Versuche auch als obere Grenze festgelegt.

Wie im im Folgenden beschrieben ist, wurden zur Ermittlung eines optimalen Restmelasse-Wasser-Gemisches Versuche mit dem Schüttgut Wandschotter durchgeführt. Dafür wurden Gemische mit Verhältnissen von Restmelasse:Wasser von 10:90, 25:75 und 40:60 hergestellt. Für die beiden anderen Schüttgüter wurden neben den Versuchen mit Proben, die mit reinem Wasser befeuchtet wurden nur Versuche mit Proben, die mit dem optimalen Restmelasse-Wasser-Gemisch befeuchtet wurden, durchgeführt.

Für die Befeuchtung wurde eine Schüttgutmasse von 2,5 kg flächig in einem Blech (Länge 70 cm, Breite 40 cm) verteilt. Die sich so ergebende ca. 1 cm hohe Schüttgutschicht wurde dann mittels dem Hand-Drucksprüher homogen mit einer bestimmten Menge an Flüssigkeit (reinem Wasser oder Restmelasse-Wasser-Gemisch) befeuchtet. Dabei wurde die zur Befeuchtung verwendete Flüssigkeitsmenge schrittweise (0,0025, 0,005, 0,0075, 0,01, 0,02, … kg Flüssigkeit / kg trockenem Schüttgut) gesteigert.

Bei den Versuchen mit befeuchteten und getrockneten Proben fand die Befeuchtung in derselben Variation des Restmelasse-Wasser-Verhältnisses im Gemisch sowie Anteil an Flüssigkeit pro kg trockenem Schüttgut statt, allerdings erfolgt zusätzlich die Trocknung der Probe auf Gewichtskonstanz im Trockenschrank (ebenfalls bei 120°C für mindestens 16 Stunden).

In Abbildung 4-14 sind die Schritte der Probenvorbereitung nochmal schematisch dargestellt.

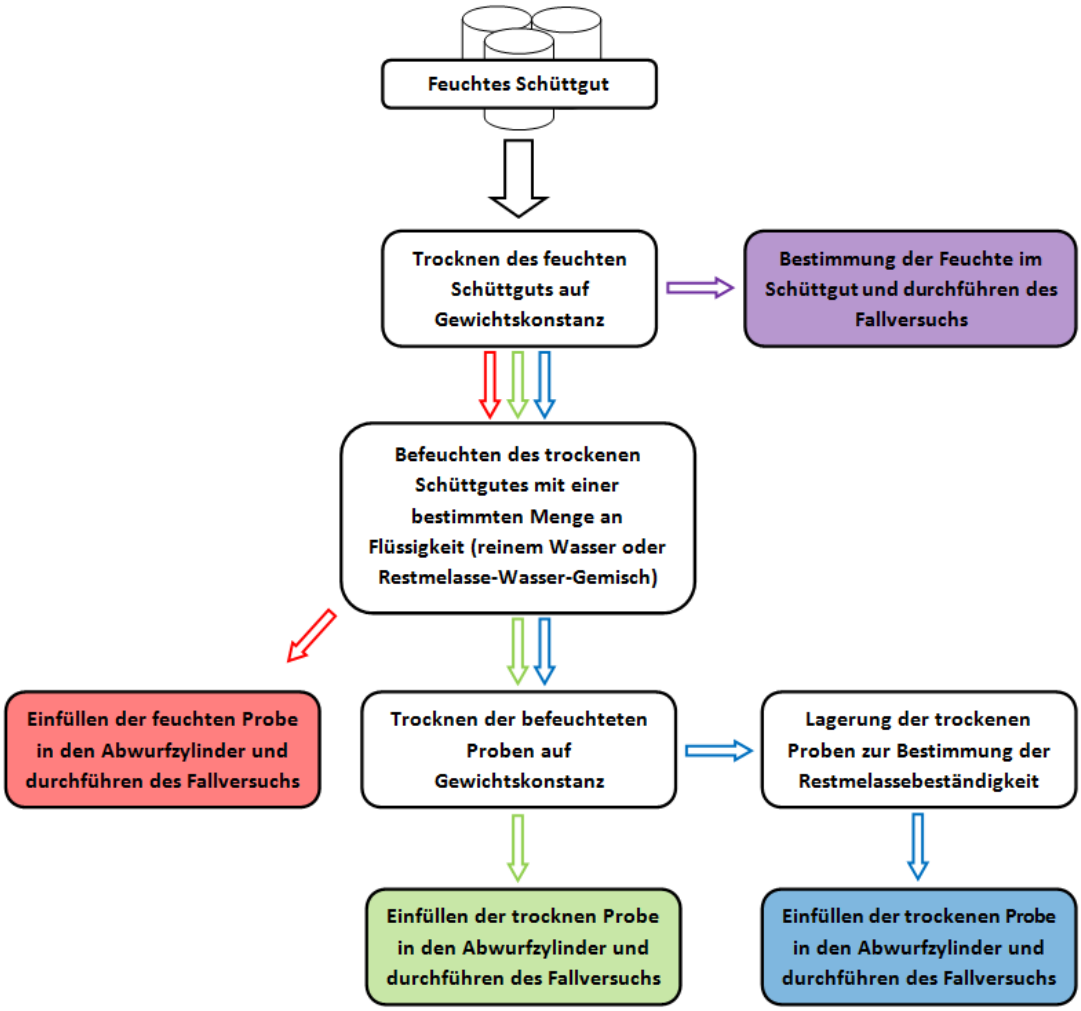


Abbildung 4-14: **Schritte der Schüttgutvorbereitung**

4.5.7 Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Versuche mussten folgende Schritte eingehalten werden.

1. Inbetriebnahme der Anlage:

Dafür mussten zuerst die einzelnen Teile des Partikelmessgerätes eingeschaltet werden. Das waren zum einen die Weißlichtlampe, die ca. 30 Minuten Warmlaufzeit benötigte, sowie die Absaugung, die den zu analysierenden staubbelandenen Luftstrom aus dem Ansaugrohr entnahm und durch die Messküvette des PCS leitete. Weiters wurde auch noch der PC zur Datenerfassung mittels PCS-Software in Betrieb genommen. Um eine isokinetische Absaugung zu gewährleisten bzw. einzustellen wurde in das Absaugrohr eine Prandtl-Sonde (siehe Kapitel 4.3.1.1) eingebaut, deren Differenzdruckmessung in Geschwindigkeit umgerechnet am Display abzulesen war. Durch Verstellen der Frequenz am Frequenzumrichter, für das Gebläse, konnte so der richtige Volumenstrom durch die Anlage bzw. Geschwindigkeit im Absaugrohr ein- bzw. nachgestellt werden.

2. Befüllung des Abwurfzylinders

Der Abwurfzylinder wird nach jedem Versuch abgenommen und mit der nächsten Schüttgutprobe befüllt. Danach wird er wieder aufgesetzt und der nächste Versuch durchgeführt.

3. Messdatenerfassung

Zur Erfassung der mittels PCS gemessenen Korngrößenverteilung des im Absaugrohr entnommenen Luftstromes, wurde kurz vor der Durchführung des Fallversuches die Software gestartet. Diese erfasst und speichert die Messung mit dem zuvor dafür festgelegten Messbereich und der festgelegten Messdauer von 180 Sekunden. Die so erhaltenen Daten konnten dann in Excel exportiert werden, mittels dem die weitere Auswertung stattfand.

4. Reinigung der Anlage

Nach jedem Versuch wurde dann die verbrauchte Probe aus der Fallapparatur entnommen und die Anlage auf Anfangszustand zurückgesetzt, um mit dem nächsten Versuch fortzufahren.

Da es nach der Durchführung mehrerer Messserien zu leichten Ablagerungen in den Rohren kam, wurde je nach bedarf die Frequenz am Frequenzumrichter erhöht um die Anlage von diesen Partikeln durch freisaugen zu befreien.

4.5.8 Versuchsauswertung und statistische Interpretation der Ergebnisse

Am Beispiel eines Fallversuches mit Wandschotter soll die Ermittlung des Emissionsfaktors durch die mittels PCS-Software erhaltenen Korngrößenverteilung beschrieben werden.

Dabei wurde die Anzahlverteilung in eine Massenverteilung umgerechnet um den Emissionsfaktor E(PM10) berechnen zu können (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 3-1: Partikelanzahl pro Größenklasse mit Emissionsfaktorberechnung

1	2	3	4	5	6
X µm	dN P	$dm_{Sonde\ 5mm}$ mg	$dm_{Rohr\ 110mm}$ mg	$\Sigma dm_{Rohr\ 110mm}$ mg	E(PM10) mg/kg
0,583	70	1,3073E-08	5,22919E-06	5,22919E-06	2,09168E-06
0,627	74	1,71912E-08	6,87647E-06	1,21057E-05	4,84227E-06
…	…	…	…	…	…
8,359	138	7,59649E-05	0,030385975	0,189608321	0,075843328
8,983	131	8,94966E-05	0,035798647	0,225406968	0,090162787
9,653	113	9,57936E-05	0,03831744	0,263724408	0,105489763
10,373	104	0,0001094	0,043760028	0,307484436	0,122993774

X .....Partikelgröße in der Mitte des Partikelgrößenintervalls in [µm}

dN.....detektierte Partikelanzahl des Partikelgrößenintervalls

$dm_{Sonde\ 5mm}$.....Masse der mit der 5mm Porbennahmesonde detektierten Partikelanzahl des Partikelgrößenintervalls in [mg]

$dm_{Rohr\ 110mm}$.....Masse der auf das Absaugrohr hochgerechneten Partikelanzahl des Partikelgrößenintervalls in [mg]

$\Sigma\ dm_{Rohr\ 110mm}$ .....aufsummierte Masse der Partikelanzahl bis zu einer bestimmten Partikelgröße in [mg]

E(PM10) .....Emissionsfaktor der durch Division der Partikelmasse kleiner 10 µm und der trockenen Schüttgutmasse bestimmt wird in [mg/kg]

Diese Tabelle beinhaltet folgende Daten und Berechnungen:

Spalte 3: In dieser Spalte wird die Masse der mittels Messsonde detektierten Partikeln je Klasse mit folgender Formel berechnet (Formel (4-3)):

$$dm_{Sonde\ 5mm} = \frac{\left(X*10^{-6}\right)^3*\pi}{6} * \rho_{Schüttgut} * dN * 10^6 \qquad (4\text{-}3)$$

Spalte 4: Diese Spalte enthält die Hochrechnung der in Spalte 3 angegebenen Masse für die Messsonde (5 mm) auf die gesamte Absaugfläche mit dem Durchmesser 110 mm

Spalte 5: Hier werden die Massen der Klassen aus Spalte 4 aufsummiert.

Spalte 6: Diese Spalte enthält den Emissionsfaktor der sich durch Division der in Spalte 5 errechneten Masse zur der im Schüttgutfallversuch verwendeten Masse ergibt. Im Beispiel beträgt dieser Wert 0,11393 mg/kg.

Um den Emissionsfaktor für Partikel bis zu einer Partikelgröße von 10 µm zu erhalten, muss man die beiden Emissionsfaktoren, die in der Tabelle 4-1 in den färbig hinterlegten Zeilen enthalten sind, mittels den mittleren Partikelklassengrößen interpolieren.

Bei den mittels PCS erfassten Daten handelt es sich um Partikelanzahlverteilungen, die man in Excel exportieren kann, um dort die Masse der Partikel, die einen Durchmesser kleiner gleich 10 µm haben, zu bestimmen. Mittels dieser Masse und der Masse an Schüttgut, die für den Fallversuch eingesetzt wird, kann der Emissionsfaktor E(PM10) berechnet werden.

Da die E(PM10)-Werte, die für einen Schüttgutfeuchtegehalt bzw. Restmelassekonzentration bestimmt werden, durch die Inhomogenität des Schüttgutes untereinander schwanken, muss für den empirischen Mittelwert ein Vertrauensbereich bestimmt werden.

Da der wahre Mittelwert der Zusammensetzung nicht bekannt ist, wird dieser über den empirischen Mittelwert abgeschätzt und von diesem der Vertrauensbereich a berechnet.

In den Vertrauensbereich gehen folgende Daten ein:

- Anzahl der Proben n
- Varianz s^2 bzw. Standartabweichung s
- Statistische Sicherheit S

Der Vertrauensbereich des Mittelwertes wird dann wie folgt berechnet Formel (4-4).

$$\bar{X} \pm a \qquad \text{mit} \qquad a = \frac{t(S,n)}{\sqrt{n}} * s \qquad (4\text{-}4)$$

Den sogenannte Student-Faktor t(S,n) erhält man aus der folgenden Tabelle 4-2.

Tabelle 4-2: Faktoren t/wurzel(n) zur Berechnung des Vertrauensbereichs von Mittelwerten

n=		4	6	8	10	15
S=	90%	1,18	0,825	0,672	0,579	0,454
	95%	1,59	1,05	0,836	0,715	0,554
	99%	2,92	1,65	1,24	1,03	0,769

Für jeden Messpunkt wurden ca. 10 Versuche durchgeführt, außer für die Blindwerte ca. dreifach so viele, da diese vor jeder Messerie stattfanden.

Der Vertrauensbereich ist in den Diagrammen durch einen senkrechten Balken beim zugehörigen Mittelwert eingezeichnet.

4.6 Ergebnisse der Fallversuche

4.6.1 Darstellungsformen

Da zur Auswertung und zum Vergleich der ermittelten Daten verschiedene Diagramme nötig sind, werden diese in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

Um den Trend, den der Emissionsfaktor E(PM10) mit zunehmendem Flüssigkeitsanteil (kg Restmelasse-Wasser-Gemisch / kg trockenem Schüttgut) annimmt zu verdeutlichen, wurden in den Diagrammen Trendlinien eingezeichnet.

Zum besseren Verständnis der Bedeutung der Diagramme werden die Legenden in den Diagrammen anhand von folgenden Beispielen erklärt.

Beispiel 1:

0 % Restmelasse / RWG, befeuchtet, nicht getrocknet	
0 % R. / RWG	Die 0 % Restmelasse / Restmelasse-Wasser-Gemisch bedeuten, dass bei diesem Fallversuch reines Wasser verwendet wurde.
befeuchtet	In die für den Fallversuch vorbereitete Probe wurde ein bestimmtes Restmelasse-Wasser-Gemisch (0% Restemelasse) eingebracht.
nicht getrocknet	Der Fallversuch mit dieser Probe wurde gleich nach dem Befeuchten durchgeführt.

Beispiel 2:

40 % Restmelasse / RWG, befeuchtet, getrocknet	
40 % R. / RWG	Bei diesem Fallversuch wurde ein Gemisch aus 40% Restmelasse und 60% Wasser verwendet.
befeuchtet	In die für den Fallversuch vorbereitete Probe wurde ein bestimmtes Restmelasse-Wasser-Gemisch (40% Restmelasse) eingebracht.
getrocknet	Die Probe wurde nach dem Befeuchten auf Gewichtskonstanz getrocknet und erst dann der Fallversuch durchgeführt.

4.6.1.1 Emissionsfaktor über Masseanteil an Flüssigkeit in der Probenmasse aufgetragen

Wie in Abbildung 4-15 ersichtlich, ist in diesem Diagramm auf der Ordinate der Emissionsfaktor E(PM10) und auf der Abszisse das Verhältnis zwischen kg Restmelasse-Wasser-Gemisch / kg trockenem Schüttgut aufgetragen. Daher eignet sich diese Darstellungsform zum Betrachten der Emissionsminderung im Bezug auf den Feuchteanteil in der Probe, sowie zum Bestimmen der benötigten Flüssigkeitsmenge, die gebraucht wird um die Emissionsfaktoren, die man nach dem Trocknen des zuvor befeuchteten Schüttgutes erhalten hat, zu bestimmen.

Neben den Informationen die man aus der Betrachtung der Messpunkte bzw. Trends die sich aus den Versuchen gleicher Messserien ergeben kann man auch die Ergebnisse verschiedener Messserien betrachten und vergleichen. So kann man zum Beispiel Ergebnisse von Messsereien die aus Versuchen, deren Schüttgutproben mit reinem Wasser befeuchtet wurden mit jenen vergleichen, die mit einem Restmelasse-Wasser-Gemisch befeuchtet bzw. befeuchtet und getrocknet wurden. Genauso kann man auch Ergebnisse von Versuchen, deren Schüttgutproben die mit verschiedenen Gemischen aus Restmelasse und Wasser befeuchtet bzw. befeuchtet und getrocknet wurden untereinander vergleichen.

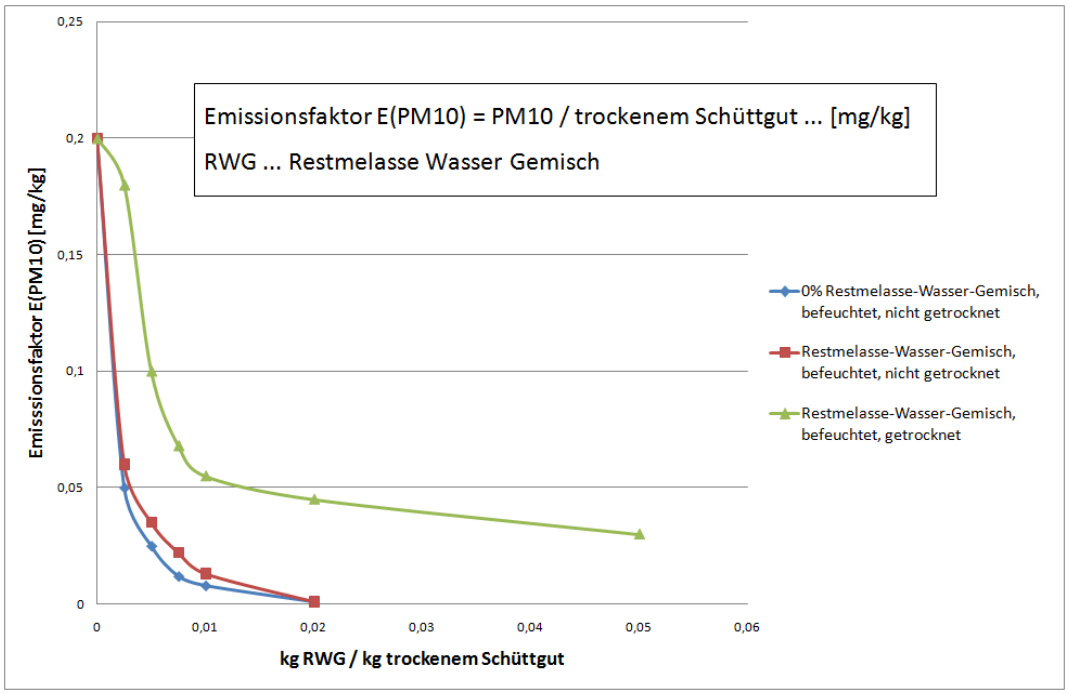


Abbildung 4-15: Beispiel für Emissionsfaktor E(PM10) über kg RWG / kg trockenem Schüttgut

4.6.1.2 Emissionsfaktor über Anteil Restmelassemasse in der Probenmasse aufgetragen

Abbildung 4-16 zeigt ein Diagramm in dem der Emissionsfaktor E(PM10) über dem Gewichtsanteil an Restmelasse in der Probenmasse aufgetragen ist.

Diese Darstellungsform eignet sich sowohl zur Darstellung von Ergebnissen aus Versuchen mit getrockneten Proben, als auch mit feuchten Proben. Man kann dadurch feststellen, welchen Einfluss der Restmelasseanteil auf das staubmindernde Verhalten hat.

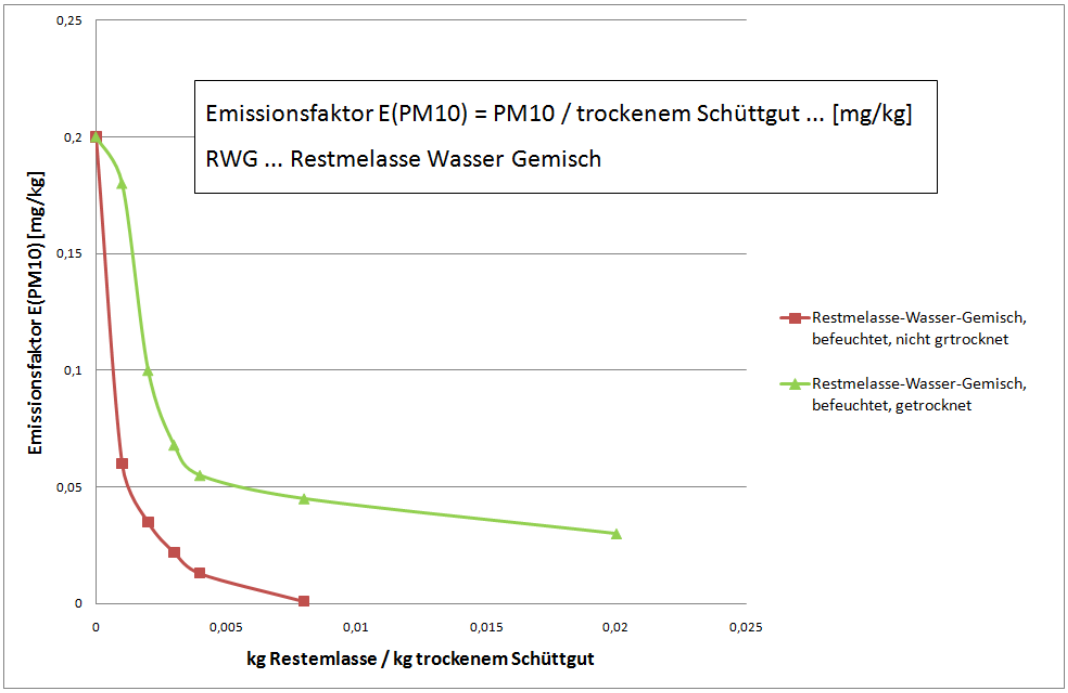


Abbildung 4-16: Beispiel für Emissionsfaktor E(PM10) über kg Restmelasse / kg trockenem Schüttgut

Die aus den Versuchen erhaltenen Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln genauer betrachtet. Dabei wird zuerst auf das Schüttgut Wandschotter eingegangen, mit dem Versuche mit verschiedenen Restmelasse-Wasser-Gemischen durchgeführt wurden. Aus den daraus erhaltenen Ergebnissen zeigte sich ein optimales Restmelasse-Wasser-Gemisch, das für die Versuche mit den beiden anderen Schüttgütern verwendet wurde.

4.6.2 Ergebnisse der Versuche mit Wandschotter

In diesem Kapitel wird untersucht welchen Einfluss verschiedene Restmelasse-Wasser-Gemische auf den Emissionsfaktor eines Schüttgutes haben. Mittels diesen soll zum Einen die staubmindernde Wirkung der Restmelasse betrachtet werden und zum Anderen bestimmt werden welche Restmelasse-Wasser-Gemische in welcher Menge aufzubringen sind, um eine optimale Staubreduktion zu erzielen.

4.6.2.1 Ergebnisse der Versuche mit befeuchteten und nicht getrockneten Proben

Dafür wurden wie zuvor beschrieben, Versuche mit Schüttgutproben durchgeführt, welche mit verschiedenen Restmelasse-Wasser-Gemischen besprüht und nicht getrocknet wurden. Die Versuche werden also im feuchten Zustand durchgeführt um die sofortige Wirkung von Restmelasse zu betrachten.

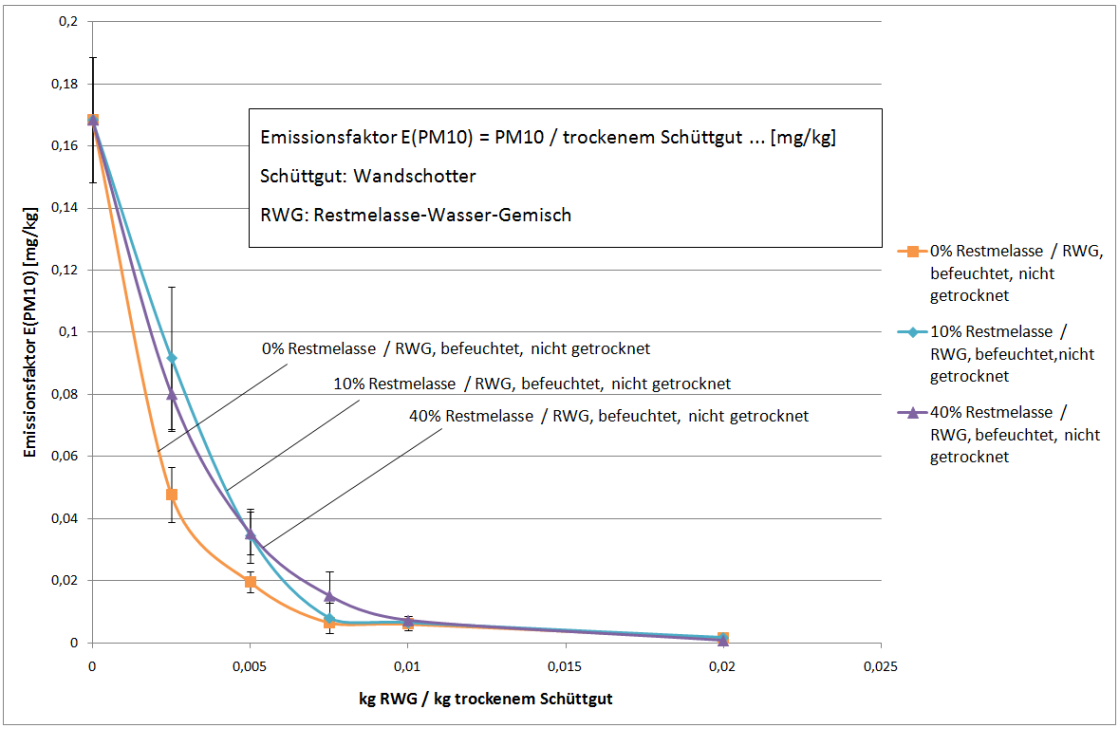


Abbildung 4-17: Emissionsfaktor E(PM10) über kg RWG / kg trockenem Schüttgut für Wandschotter

In dem Diagramm in Abbildung 4-17 sind Trendlinien, die aus Versuchen von befeuchteten und nicht getrockneten Proben, die mit verschiedenen Verhältnissen an Restmelasse-Wasser-Gemischen hergestellt wurden, aufgetragen. Bei jeder dieser Kurven ist bereits nach der Zugabe einer Menge von 0,0025 kg Restmelasse-Wasser-Gemisch / kg trockenem Schüttgut eine deutliche Reduktion der Staubemission ersichtlich.

Wie man in Abbildung 4-17 sieht, kann der Emissionsfaktor von diesem Schüttgut bereits bei nur 2 % Flüssigkeitsanteil (0,02 kg Restmelasse-Wasser-Gemisch / kg trockenem Schüttgut) auf null reduziert werden. D.h., dass 50 g eines Restmelasse-Wasser-Gemisches ausreichen, um den entstehenden Staub von 2,5 kg dieses trockenen Schüttguts zu beseitigen.

Trägt man den Emissionsfaktor E(PM10) gegen den Flüssigkeitsanteil (kg Restmelasse-Wasser-Gemisch / kg trockenem Schüttgut) auf so nimmt der Emissionsfaktor E(PM10) mit zunehmendem Flüssigkeitsanteil bei der Probe mit 0 % Restmalesse / Restmelasse-Wasser-Gemisch schneller ab, als es bei der Zugabe eines Restmelasse-Wasser-Gemisches mit 10 % oder 40 % Restmelasse / Restmelasse-Wasser-Gemisch der Fall ist. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich in dem schlechteren Eindring- bzw. Verteilungsvermögen des Restmelasse-Wasser-Gemisches im Vergleich zu reinem Wasser, für das die höhere Viskosität der Gemische verantwortlich ist.

Dagegen ist zwischen den beiden Kurven, die aus Versuchen mit Schüttgutproben mit Restmelasse-Wasser-Gemischen entstanden sind, kaum ein Unterschied ersichtlich. Das lässt darauf schließen, dass es bei sofortigem Abwurf des feuchten Gutes egal ist, wie hoch die Konzentration an Restmelasse im Restmelasse-Wasser-Gemisch ist.

4.6.2.2 *Ergebnisse der Versuche mit befeuchteten und getrockneten Proben*

In den nächsten beiden Abbildungen (Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19) sind Diagramme dargestellt, deren Trendlinien aus Versuchen mit befeuchteten und befeuchteten und dann getrockneten Schüttgutproben erzeugt wurden.

Wie man erkennen kann, handelt es sich bei den drei Trendlinien, die in Abbildung 4-18 ganz links zu sehen sind, um die in Abbildung 4-17 deutlicher dargestellten Trendlinien aus Versuchen mit befeuchten Schüttgutproben.

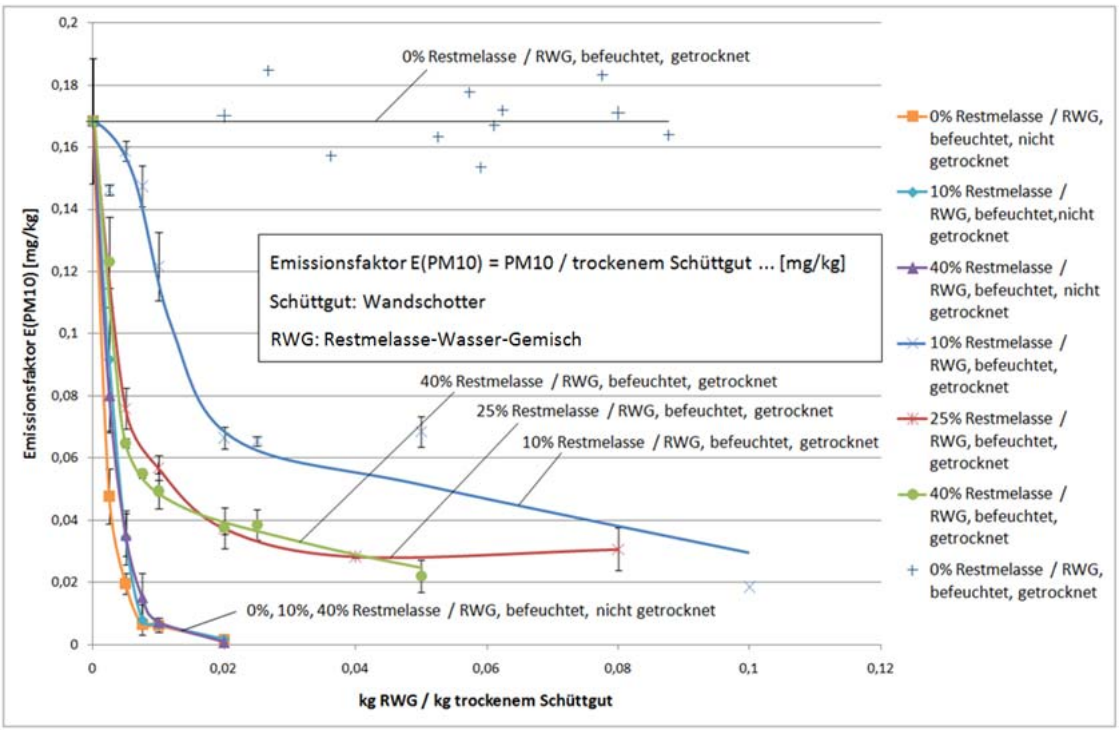


Abbildung 4-18: Emissionsfaktor E(PM10) über kg RWG / kg trockenem Schüttgut für Wandschotter

Wie in Abbildung 4-18 ersichtlich ist, ist auch bei den Versuchen nach dem Trocknen der Schüttgutproben, die zuvor durch Besprühen von 2,5 kg Schüttgut mit einem bestimmten Verhältnis eines Restmelasse-Wasser-Gemisches aufbereitet wurden, eine deutliche Staubminderung im Gegensatz zu der Emission die bei einem Versuch eines trockenen Schüttguts entsteht, das nicht mit Restmelasse besprüht wurde, sichtbar.

Wenn man demgegenüber das trockene Schüttgut mit reinem Wasser (0 % Restemelasse / Restmelasse-Wasser-Gemisch) befeuchtet und danach wieder auf Gewichtskonstanz trocknet, ist, wie man aus Abbildung 4-18 erkennen kann, keine Staubminderung sichtbar.

Dies lässt auf eine Langzeitwirkung der in das Schüttgut eingebrachten Restmelasse schließen. Betrachtet man diese speziell für das 40 %ige Restmelasse-Wasser-Gemisch, so kann man erkennen, dass bereits bei einer Zugabe von 0,05 kg Restmelasse-Wasser-Gemisch pro kg trockenem Schüttgut eine Emissionsverbesserung von ca. 85 % festgestellt werden kann.

Vergleicht man die Trendlinien die aus getrockneten Proben mit 10 %, 25 % und 40 % Restmelasse / Restmelasse-Wasser-Gemisch entstanden sind untereinander, so kann man erkennen, dass je

geringer der Anteil an Restmelasse im Restmelasse-Wasser-Gemisch ist, desto mehr Flüssigkeit wird benötigt um den selben Emissionsfaktor zu erzielen.

Daher ist es besser mit konzentrierten Restmelasse-Wasser-Gemischen zu arbeiten, da dadurch der Verbrauch an Wasser reduziert werden kann. Allerdings gibt es, wie bereits erwähnt, auch eine Grenze dieser Konzentration nach oben, da das Eindringen des feuchten Gemisches durch die höhere Viskosität in das Schüttgut erschwert wird und keine gleichmäßige bzw. nur oberflächliche Befeuchtung erreicht werden kann.

In Abbildung 4-19 sind die Trendlinien dargestellt, die aus Proben die mit einem 10 %, 25 % oder 40 % Verhältnis aus Restmelasse zu Wasser erzeugt wurden und getrocknet wurden über den Anteil an kg Restmelasse / kg trockenem Schüttgut aufgetragen. Dabei zeigt sich das alle drei Trendlinien nahezu übereinander liegen und dass nach dem Trocknen des Restmelasse-Wasser-Gemisches der Emissionsfaktor nur von der eingebrachten Restmelassemenge abhängig ist. In dem konkreten Fall ist eine Restmelassemasse von 0,008 kg pro kg trockenem Schüttgut ausreichend.

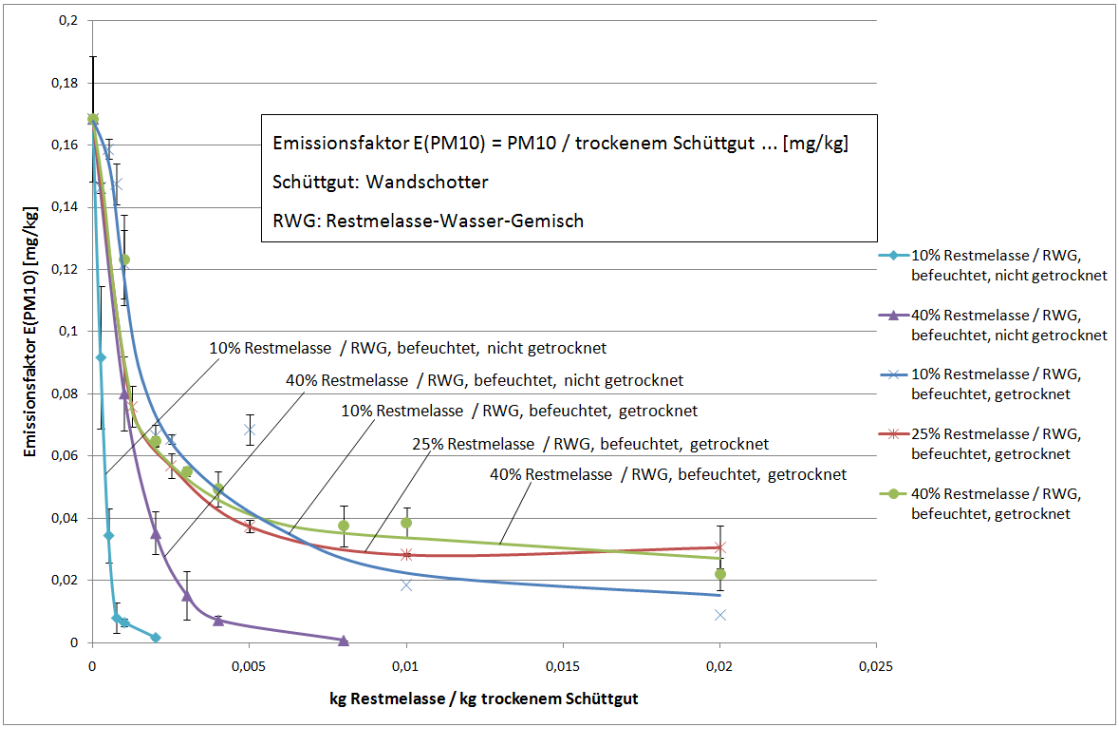


Abbildung 4-19: Emissionsfaktor E(PM10) über kg Restmelasse / kg trockenem Schüttgut für Wandschotter

Je konzentrierter das Restmelasse-Wasser-Gemisch desto weniger Restmelasse-Wasser-Gemisch wird benötigt und damit sinkt auch die Menge an verbrauchtem Wasser.

Das soll anhand des folgenden Beispiels verdeutlicht werden.

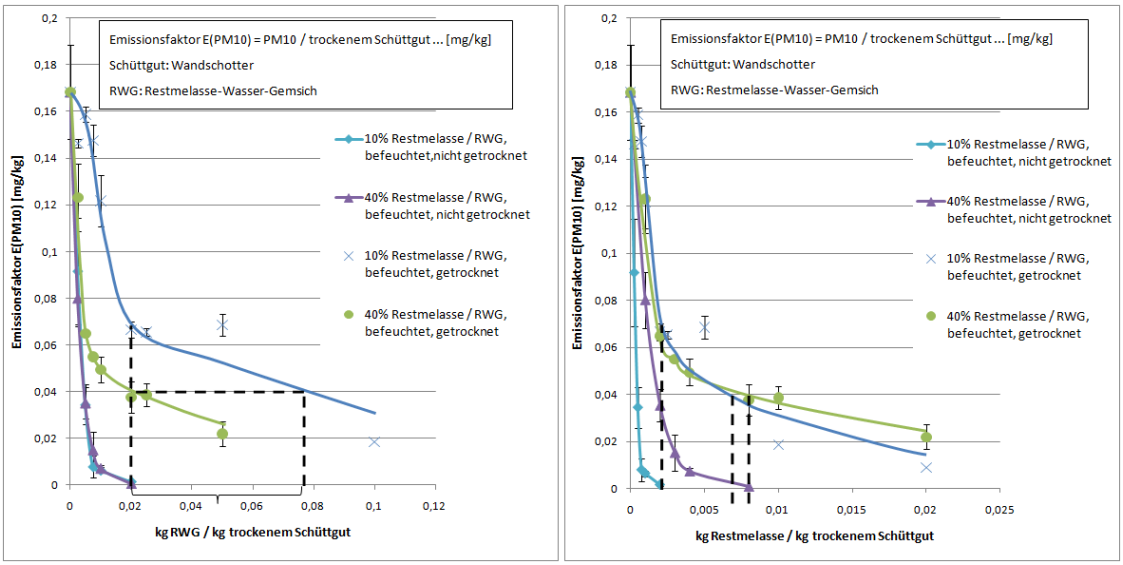


Abbildung 4-20: Vergleich der verbrauchten Wassermenge bei Einsatz von 10% bzw. 40% RWG

Da bei den Versuchen mit befeuchteten und nicht getrockneten Proben mit einem 10 % bzw. 40 % Restmelasse-Wasser-Gemisch bereits der Emissionsfaktor, bei einer Zumischung von 0,02 kg Restmelasse-Wasser-Gemisch / kg trockenem Schüttgut, null beträgt (siehe Abbildung 4-18), hat jede weitere Erhöhung der Menge an zugemischtem Restmelasse-Wasser-Gemisch keine weitere Auswirkung auf die Reduktion des Emissionsfaktors. Daher würde man unnötig Wasser verschwenden.

Betrachtet man dagegen die Langzeitwirkung, die die Restmelasse auf die vom Schüttgut ausgehende Staubemission hat, so zeigt sich, dass bei Restmelasse-Wasser-Gemischen, deren Konzentration an Restmelasse 10 % vom Restmelasse-Wasser-Gemisch beträgt, eine viel höhere Menge an Restmelasse-Wasser-Gemisch pro kg trockenem Schüttgut (ca. 4 mal so viel) benötigt, um dieselbe Emissionsminderung zu erreichen, die von einem 40 % Restmelasse-Wasser-Gemisch bei einem Anteil von 0,02 kg Restmelasse-Wasser-Gemisch pro kg trockenem Schüttgut erreicht wird.

Dies ist in Abbildung 4-20 links auch nochmal grafisch dargestellt und dort ist zusätzlich im rechten Diagramm die Masse an Restmelasse die pro kg trockenem Schüttgut aufgewendet werden muss eingezeichnet.

Aus dem Grund des geringeren Wasserverbrauchs wurde für die weiteren Untersuchungen der beiden anderen Schüttgüter nur noch Proben die mit 40 % Restmelasse / Restmelasse-Wasser-Gemisch befeuchtet wurden hergestellt.

4.6.2.3 Betrachtung der Restmelassebeständigkeit anhand von Versuchen mit Wandschotter

Wie in dem Kapitel 4.6.2 beschrieben wurde, zeigt sich bei den Versuchen die mit Proben die mit einem Restmelasse-Wasser-Gemisch befeuchtet und dann getrocknet wurden im Vergleich zu denen, die mit reinem Wasser durchgeführt wurden, eine Langzeitwirkung der Emissionsminderung durch die Restmelasse.

Um festzustellen wie beständig die durch die Restmelasse entstandene Emissionsminderung ist, wurden Versuche mit Proben durchgeführt die ebenfalls mit einem Restmelasse-Wasser-Gemisch befeuchtet und dann getrocknet wurden. Allerdings wurden die Fallversuche mit diesen Proben in Abständen von mehreren Tagen durchgeführt.

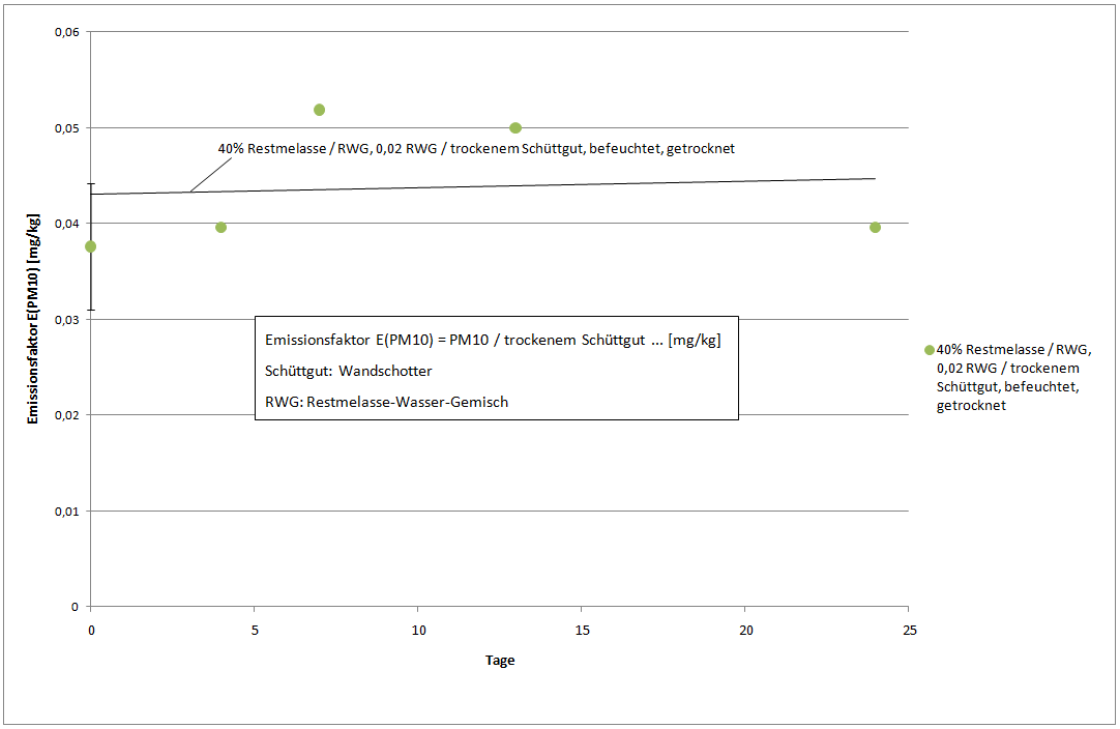


Abbildung 4-21: Emissionsfaktor E(PM10) über der Zeit für Wandschotter

Wie man der Abbildung 4-21 entnehmen kann ist über einen Zeitraum von über 20 Tagen nahezu keine Veränderung der emissionsmindernden Wirkung der Restmelasse eingetreten.

4.6.3 Ergebnisse der Versuche mit Bruchkalk

Wie bereits erwähnt, wurden für Bruchkalk neben den Versuchen mit Proben mit reinem Wasser (0 % Restmelasse / Restmelasse-Wasser-Gemisch) auch Versuche mit Proben mit einem Restmelasse / Restmelasse-Wasser-Gemisch von 40 % durchgeführt, da sich bei den Versuchen mit diesem Verhältnis bei Wandschotter die besten Ergebnisse zeigten.

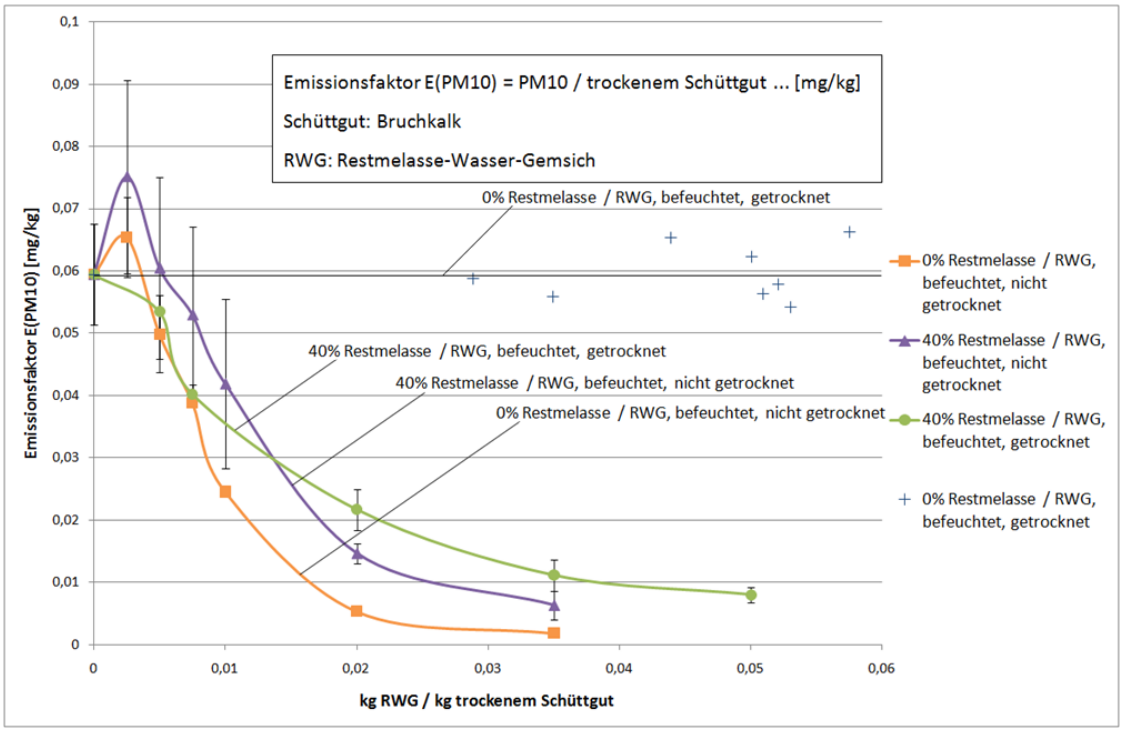


Abbildung 4-22: Emissionsfaktor E(PM10) über kg RWG / kg trockenem Schüttgut für Bruchkalk

In Abbildung 4-22 ist zu erkennen, dass sich bei Versuchen mit befeuchteten und nicht getrockneten Proben im Gegensatz zum Wandschotter eine kurzzeitige Zunahme des Emissionsfaktors ergibt und zwar bis zu einem Anteil von ca. 0,005 kg Restmelasse / kg trockenem Schüttgut. Bei höheren Anteilen ist dann eine deutliche Emissionsreduktion ersichtlich, die allerdings nicht so schnell wie beim Wandschotter erfolgt.

Dafür könnte verantwortlich sein, dass der Emissionsfaktor für den Blindwert (Versuch mit Probe aus trockenem Schüttgut, das nicht zusätzlich befeuchtet und getrocknet wurde) mit ca. 0,06 mg/kg im Vergleich zum gemessenen Wert für Wandschotter relativ niedrig ist. Das würde bedeuten, dass wenn ein Schüttgut eine geringe Grundemission besitzt, mehr Flüssigkeit zugefügt werden muss, um diese Emission weiter zu verringern.

Wie auch bereits bei den Ergebnissen von Wandschotter zu erkennen ist, erfolgt die Emissionsminderung von befeuchten und nicht getrockneten Proben, die mit reinem Wasser (0 % Restmelasse / Restmelasse-Wasser-Gemisch) befeuchtet wurden, etwas schneller als bei jenen, die mit einem 40 % Restmelasse-Wasser-Gemisch befeuchtet wurden. Der Grund dafür dürfte wie

bereits erwähnt bei der höheren Viskosität und damit schwereren Verteilung des Restmelasse-Wasser-Gemisches im Schüttgut liegen.

Eine weitere Gemeinsamkeit der Ergebnisse von Bruchkalk und Wandschotter ist, dass bei einer Zugabe von 0,05 kg Restmelasse-Wasser-Gemisch / kg trockenem Schüttgut eine Emissionsminderung von 85% erzielt werden kann.

In Abbildung 4-23 sind die Trendlinien, die aus Versuchen mit Proben die befeuchtet oder befeuchtet und getrocknet wurden, ersichtlich. Diese sind über der Masse an Restmelasse pro kg trockenem Schüttgut aufgetragen.

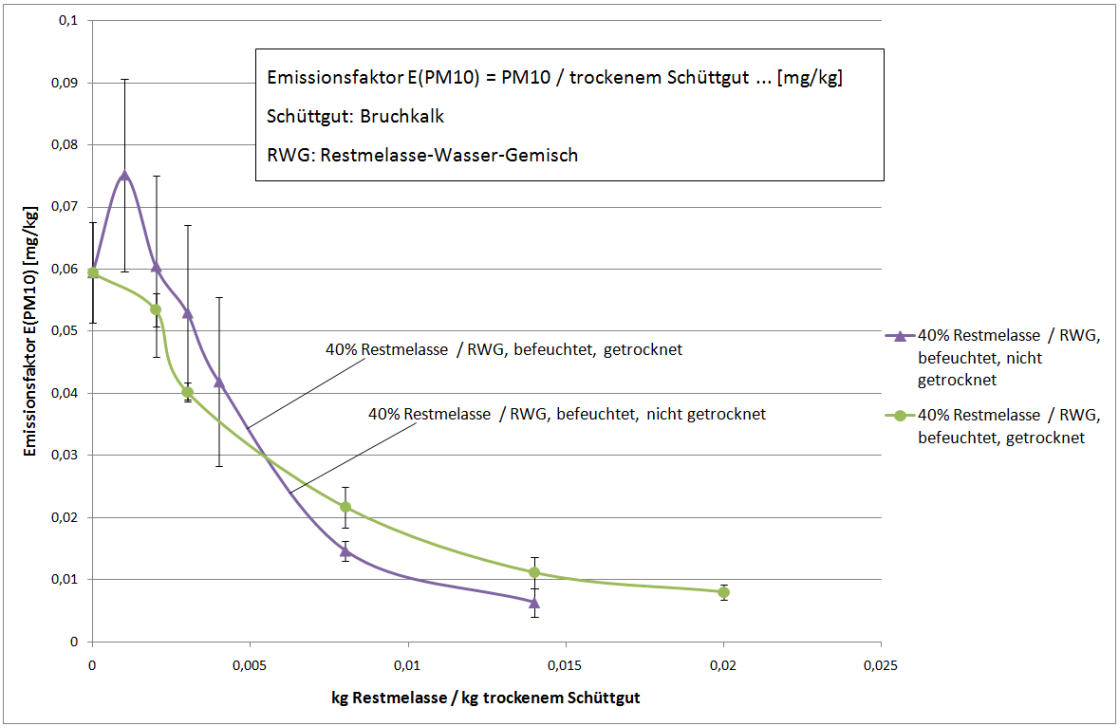


Abbildung 4-23: Emissionsfaktor E(PM10) über kg Restmelasse / kg trockenem Schüttgut für Bruchkalk

Aus dem in Abbildung 4-23 dargestellten direkten Vergleich der Trendlinien der Versuche mit Proben mit einem 40 % Restmelasse-Wasser-Gemisch die befeuchtete und getrocknet bzw. befeuchtet und nicht getrocknet wurden, lässt sich erkennen, dass die Trendlinie die aus Versuchen mit Proben die befeuchtet und getrocknet wurden keine Verschlechterung des Emissionsfaktors aufzeigen, jene aus Versuchen mit Problem die nicht getrocknet wurden jedoch schon. Daraus ergibt sich, dass bei der Zugabe von 0 bis ca. 0,006 kg Restemelasse / kg trockenem Schüttgut die Proben, die nach der Befeuchtung getrocknet wurden, eine bessere Emissionsminderung aufweisen, als jene die nicht getrocknet wurden.

Der sich dadurch bildende Kreuzungspunkt sollte deshalb unbedingt als unterste Grenze für die zuzumischende Menge an Restmelasse-Wasser-Gemisches pro kg trockenem Schüttgut betrachtet werden. Der Grund hierfür ist, dass ab dieser Grenze durch die Befeuchtung des Schüttguts mit dem Restemelasse-Wasser-Gemischs eine gute Emissionsminderung ergibt und eine akzeptable Emissionsminderung im getrockneten Zustand beibehält.

4.6.4 Ergebnisse der Versuche mit Streusplitt

Wie bereits beim Bruchkalk wurden auch hier nur Versuche mit Proben mit einer Einmischung von 40% Restmelasse / Restmelasse-Wasser-Gemischen neben denen mit reinem Wasser (0 % Restmelasse / Restmelasse-Wasser-Gemisch) durchgeführt.

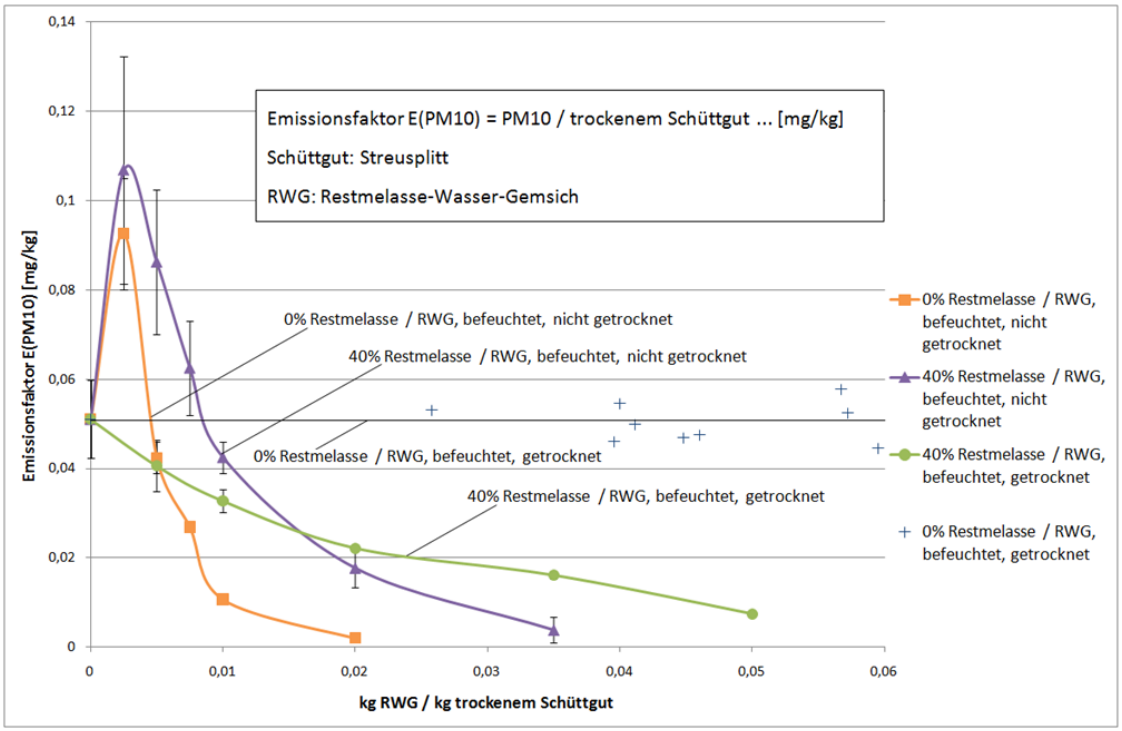


Abbildung 4-24: Emissionsfaktor E(PM10) über kg RWG / kg trockenem Schüttgut für Streusplitt

Wie man aus Abbildung 4-24 erkennen kann, kommt es hier bei den Trendlinien die aus befeuchteten und nicht getrockneten Proben entstanden sind, zu einer deutlichen Emissionsverschlechterung, bei der Zumischung von geringen Mengen an Flüssigkeit pro kg trockenem Schüttgut. Dies wurde auch bei den Versuchen mit Bruchkalk festgestellt, allerdings sind die Emissionserhöhungen beim Streusplitt deutlich höher als sie beim Bruchkalk der Fall waren.

Die Trendlinie, die aus den Versuchen mit den befeuchteten und dann getrockneten Proben entstanden ist, zeigt dagegen –wie es auch schon beim Bruchkalk der Fall war – keine Emissionsverschlechterungen.

Dafür verläuft die Emissionsabnahme bei Erhöhung des Restmelasse-Wasser-Gemisches pro kg trockenem Schüttgut allerdings etwas schleppender als beim Bruchkalk. Dafür könnte der geringe Anteil an kleinen Partikeln im Schüttgut verantwortlich sein (vgl. Abbildung 4-13), sowie der noch geringere Emissionsfaktor der Blindprobe.

In Abbildung 4-25 sind die Trendlinie von Versuchen mit Proben die befeuchtet und nicht getrocknet wurden und die Trendlinie von Versuchen mit Proben die befeuchtet und getrocknet wurden, dargestellt. Diese sind über den Masseanteil an Restmelasse / kg trockenem Schüttgut aufgetragen.

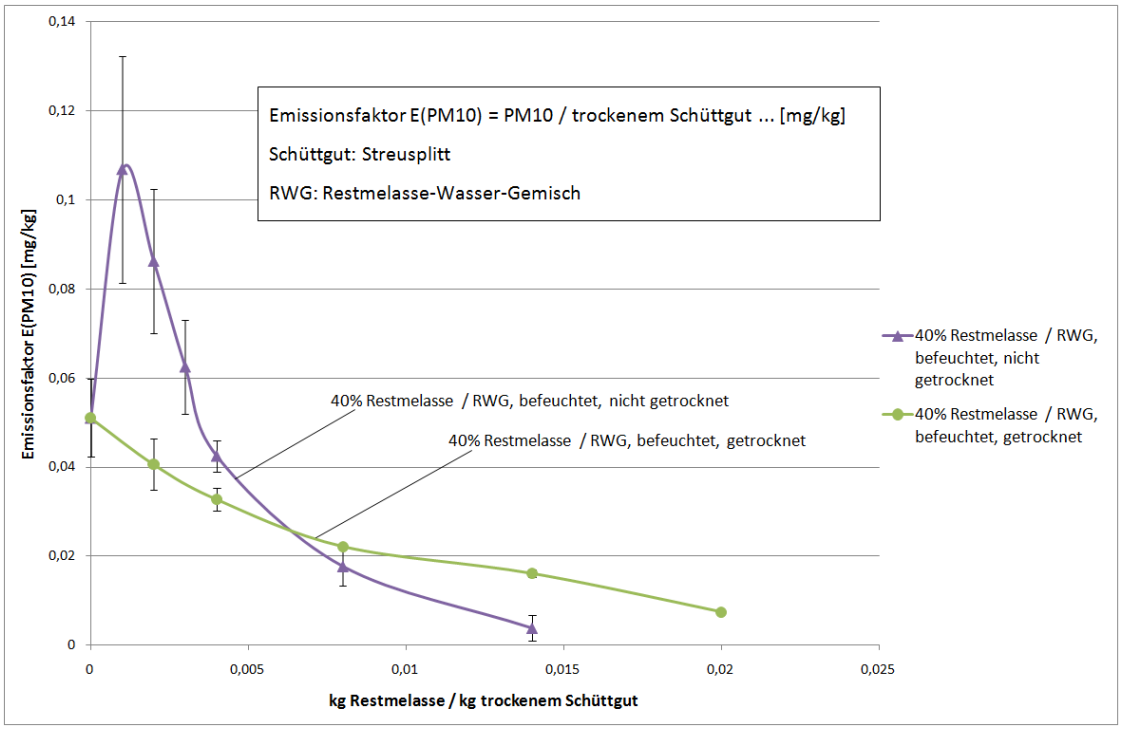


Abbildung 4-25: Emissionsfaktor E(PM10) über kg Restmelasse /kg trockenem Schüttgut für Streusplitt

Wie beim Bruchkalk ist auch bei den Versuchen mit Streusplitt zu erkennen, dass die Trendlinie von den Versuchen mit Proben, die befeuchtet und getrocknet wurden, keine Verschlechterung des Emissionsfaktors aufzeigt. Dadurch ergibt sich wiederum, wie in Abbildung 4-25 ersichtlich, ein Kreuzungspunkt der beiden Trendlinien. Dieser Kreuzungspunkt sollte deshalb abermals als unterste Grenze für die zuzumischende Menge an Restmelasse-Wasser-Gemisches pro kg trockenem Schüttgut betrachtet werden.

4.6.5 Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Emissionsminderung

Wie in den folgenden Kapiteln 4.6.5.1, 4.6.5.2 und 4.6.5.3 ersichtlich ist, hängt die Höhe der Emissionsminderung eines Schüttgutes sehr von seiner Korngrößenverteilung ab. So erhält man für Schüttgüter mit einem niedrigen Feinanteil eine geringere Emissionsminderung, als das bei Schüttgütern mit hohem Feinanteil der Fall ist. Es spielt jedoch nicht nur der Feinanteil eine Rolle beim Staubungsverhalten, sondern auch der Grobanteil.

Die Trendlinien die aus Versuche, die mit befeuchteten und nicht getrockneten Proben mit z.B. Wandschotter als Schüttgut durchgeführt wurden, unterscheiden sich von denen der beiden anderen Schüttgüter. Der Zusammenhang dafür könnte in den Q_3 Summenkurve der Korngrößenverteilung der Schüttgüter zu finden sein.

4.6.5.1 Wandschotter

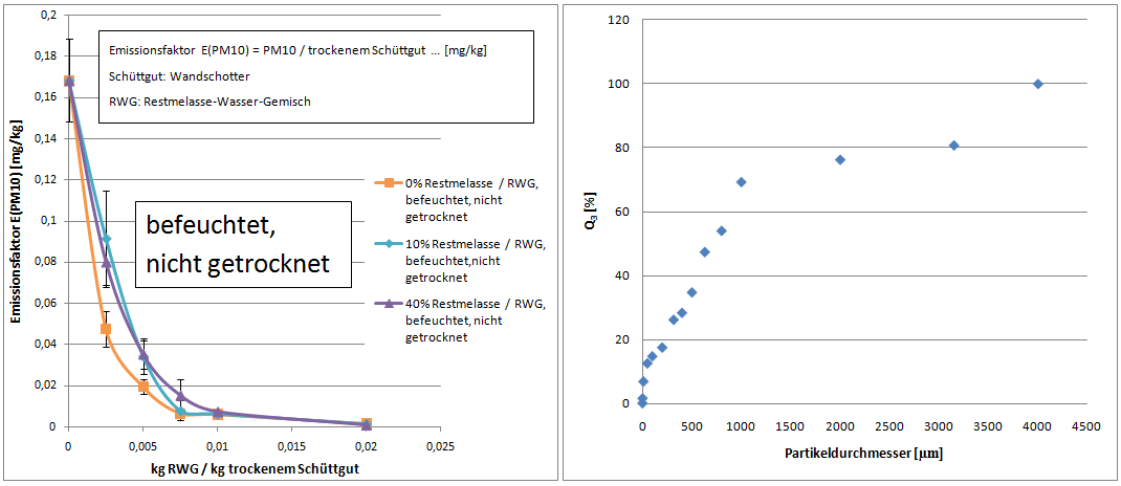


Abbildung 4-26: Zusammenhang befeuchtete Kurven mit Q_3 Summenkurve der Korngrößenverteilung von Wandschotter

Abbildung 4-26 stellt die Trendlinien der Versuche für Wandschotter (siehe auch Abbildung 4-17), der Summenkurve der Korngrößenverteilungen von Wandschotter (siehe auch Abbildung 4-11) gegenüber.

Betrachtet man die drei in Abbildung 4-26 links dargestellten Trendlinien (vgl. Abbildung 4-17), so kann man bei allen drei Trendlinien eine stetige Emissionsminderung feststellen. In der Summenkurve der Korngrößenverteilung die in Abbildung 4-26 rechts dargestellt ist (vgl. Abbildung 4-11), sieht man bis zu einer Partikelgröße von 1000 µm einen sehr steilen Anstieg der Summenkurve, was eine hohe Anzahl an kleinen Partikeln bedeutet. Danach flacht die Kurve ab und erst ab ca. 4000 µm fängt sie wieder an zu steigen. Da der Wandschotter im Gegensatz zu den beiden anderen Schüttgütern einen deutlich höheren Anteil an kleinen Partikeln aufweist (vgl. Abbildung 4-27, Abbildung 4-28), während im mittleren Bereich kaum Partikeln vorhanden sind, kann man vermuten, dass dies für die stetige Emissionsminderung bei den Versuchen mit Wandschotter verantwortlich ist.

4.6.5.2 *Bruchkalk*

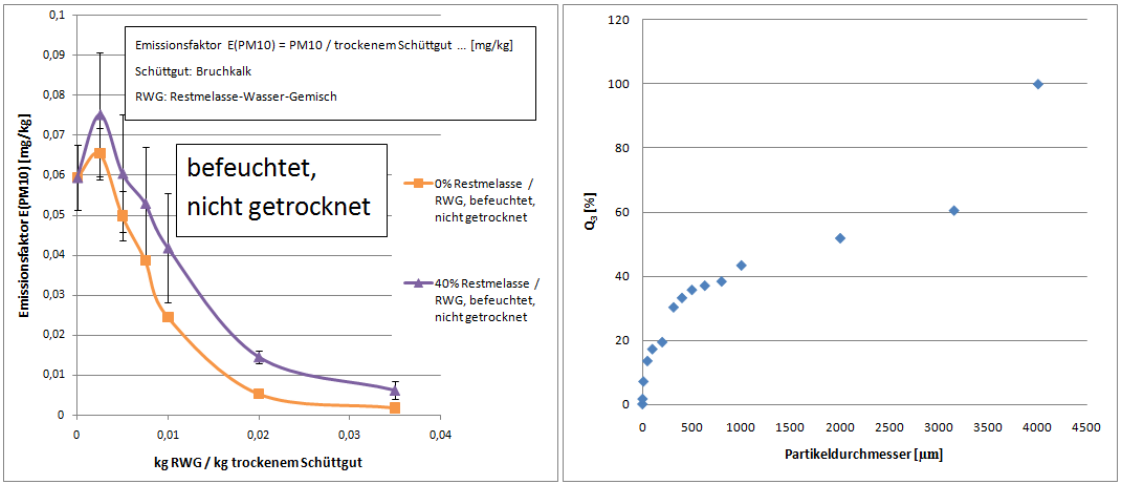


Abbildung 4-27: Zusammenhang befeuchteter Kurven mit Summenkurve der Korngrößenverteilung Q_3 von Bruchkalk

Abbildung 4-27 stellt die Trendlinien der Versuche für Bruchkalk (siehe auch Abbildung 4-22), der Summenkurve der Korngrößenverteilungen von Bruchkalk (siehe auch Abbildung 4-12) gegenüber.

Wie bereits in Kapitel 4.6.3 erwähnt, kommt es wie in Abbildung 4-27 links dargestellt, bei den Trendlinien, die aus Proben die befeuchtet und nicht getrocknet wurden, zu einer geringen Emissionserhöhung im Bereich niedriger Flüssigkeitsmengen pro kg trockenem Schüttgut (vgl. Abbildung 4-22) als bei Wandschotter wo eine stetige Emissionsverringerung festgestellt wurde. Der Anteil an Partikel, die kleiner als 10 µm sind, sind jedoch, wie in Abbildung 4-27 rechts dargestellt, mit 7.07 % (vgl. Abbildung 4-12) ca. gleich hoch wie bei Wandschotter. Die Ursache für den unterschiedlichen Verlauf der Trendlinien bei Bruchkalk und Wandschotter kann in der Korngrößenverteilung des Bruchkalks liegen.

Betrachtet man die Summenkurve des Schüttguts Bruchkalk, kann man bis zu einem Partikeldurchmesser von ca. 500 µm einen sehr hohen Anstieg erkennen, der danach wieder abflacht. Der starke Anstieg lässt auf eine hohe Anzahl an Partikeln mit einem Durchmesser bis 500 µm schließen. Dieser ist allerdings nicht so hoch, wie jener bei der Summenkurve des Wandschotters, was eine etwas geringere Anzahl von kleinen Partikeln erkennen lässt. Dagegen ist der Zwischenbereich etwas steiler, als bei der Summenkurve des Wandschotters, was auf eine höhere Anzahl an Partikel in diesem Bereich schließen lässt. Diese Konstellation, die bei dem Schüttgut Streusplitt noch deutlicher zu erkennen ist, könnte für die Emissionserhöhung der befeuchteten Schüttgutproben im Bereich geringer Flüssigkeitszumischung zum trockenen Schüttgut verantwortlich sein

4.6.5.3 Streusplitt

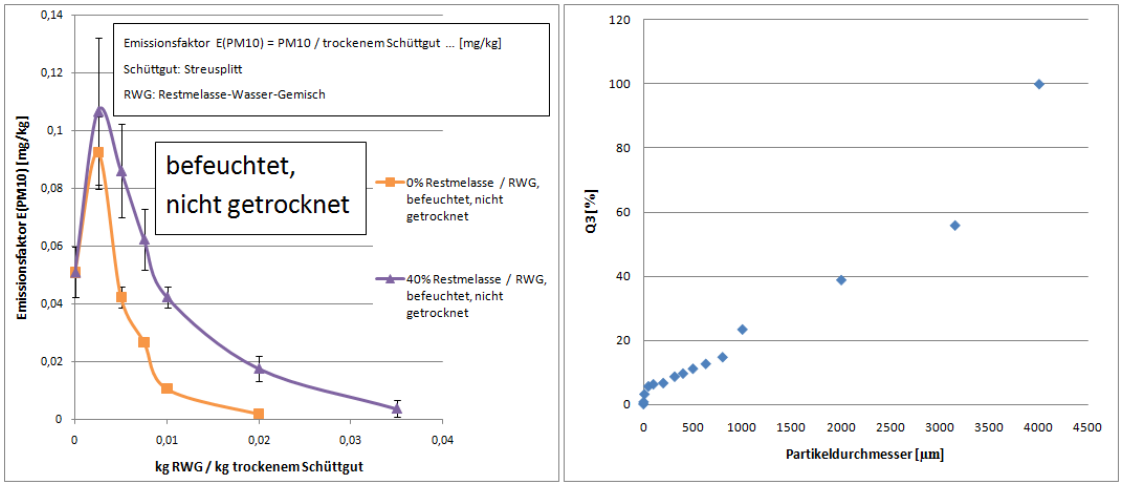


Abbildung 4-28: Zusammenhang befeuchteter Kurven mit Summenkurve der Korngrößenverteilung Q_3 von Streusplitt

Abbildung 4-28 stellt die Trendlinien der Versuche für Streusplitt (siehe auch Abbildung 4-24), der Summenkurve der Korngrößenverteilungen von Streusplitt (siehe auch Abbildung 4-13) gegenüber.

Die Trendlinien für die Versuche mit Streusplitt, die in Abbildung 4-28 links dargestellt sind, zeigen eine anfängliche Zunahme des Emissionsfaktors bei den Versuchen mit befeuchteten und nicht getrockneten Proben (vgl. Abbildung 4-24). Diese Zunahme fällt höher aus, als bei den beiden anderen Schüttgütern.

Der Grund dafür könnte wiederum in der Korngrößenverteilung zu finden sein. In Abbildung 4-28 rechts kann man erkennen, dass es beim Streusplitt nur in einem sehr kleinen Bereich bis ca. 50 µm zu einem steileren Anstieg der Summenkurve kommt, die dann im Bereich von 50 µm bis ca. 3500 µm in einen flacheren, aber nahezu linearen Anstieg übergeht. Darüber ist wieder ein steilerer Anstieg ersichtlich. Daher kann man davon ausgehen, dass im Gegensatz zum Wandschotter und Bruchkalk, auch im Zwischenbereich eine hohe Anzahl von Partikeln vorliegt. Da diese Summenkurve im Vergleich zu den beiden anderen einen Extremfall darstellt, ist bei diesem Schüttgut die Emissionserhöhung bei Versuchen mit befeuchteten und nicht getrockneten Proben bei geringen Mengen an zugemischter Flüssigkeit am höchsten. Daher kann man davon ausgehen, dass die Korngrößenverteilung einen direkten Einfluss auf die Emissionsminderung bei Zumischung geringer Flüssigkeitsmengen hat.

4.7 Schlussfolgerung aus den erhaltenen Versuchsergebnissen

Aus den durchgeführten Versuchen haben sich folgende wichtige Erkenntnisse ergeben.

- Ein Gemisch aus Restmelasse und Wasser führt, ebenso wie reines Wasser, beim Aufbringen auf ein trockenes Schüttgut bereits in geringen Mengen zu einer nahezu vollständigen Reduktion der bei Fallvorgängen von Schüttgütern entstehenden Emission. Dies wurde bei allen drei untersuchten Schüttgütern festgestellt.

- Nach dem Eintrocknen des Restmelasse-Wasser-Gemisches im Schüttgut ist im Gegensatz zu reinem Wasser, je nach Menge an eingesetztem Restmelasse-Wasser-Gemisch, eine nachhaltige und deutliche Reduktion der vom Schüttgut ausgehenden Emission vorhanden.

- Die nachhaltige Emissionsreduktion steht direkt im Zusammenhang mit der Restmelassekonzentration in dem Restmelasse-Wasser-Gemisch.

- Eine optimale Mischung aus Restmelasse und Wasser wurde bei einem Restmelasseanteil von 40% festgestellt. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich bereits bei einer geringen Menge an zugemischtem Restmelasse-Wasser-Gemisch / kg trockenem Schüttgut eine vollständige Emissionsreduktion bei den Fallversuchen mit befeuchteten und nicht getrockneten Proben einstellte. Außerdem konnte auch bei Fallversuchen mit befeuchteten und getrockneten Proben eine optimale Emissionsreduktion nachgewiesen werden. Dies gilt für alle drei untersuchten Schüttgüter.

- Ein höherer Anteil an Restmelasse im Restmelasse-Wasser-Gemisch führt dazu, dass weniger Menge von diesem Restmelasse-Wasser-Gemisch auf das Schüttgut aufgebracht werden muss, um dieselbe Emissionsreduktion zu erzielen. Die Verwendung eines höheren Anteils an Restemelasse im Restmelasse-Wasser-Gemisch bringt die folgenden drei Auswirkungen mit sich:

  - Der Wasserverbrauch für die Emissionsminderung kann gesenkt werden.

  - Eine Erhöhung der Restmelassekonzentration im Restmelasse-Wasser-Gemisch hat auch immer eine Erhöhung der Energie, die für das Aufsprühen des Gemisches benötigt wird (notwendiger Vordruck), zur Folge. Dies ist deswegen der Fall, da es bei der Konzentrationserhöhung der Restmelasse zu einer Steigerung der Viskosität im Gemisch kommt. Da der zum Versprühen verwendete Hand-Drucksprüher lediglich einen Druck von 3 bar aufbauen kann, war der Anteil an Restmelasse im Gemisch auf 40 % begrenzt.

  - Durch die Viskositätserhöhung wird auch die Verteilung des Restmelasse-Wasser-Gemisches im Schüttgut herabgesetzt, da es zu einer mangelhaften Diffusion des Gemisches im Schüttgut kommt. Daher kann ein Gemisch aus 40 % Restmelasse und 60 % Wasser als maximal angesehen werden.

- Das Emissionsverhalten ist sehr von der Korngrößenverteilung des Schüttguts abhängig.

- Der untersuchte Wandschotter wies einen deutlich höheren Anteil an kleinen Partikeln auf, während im mittleren Bereich kaum Partikel vorhanden waren, was vermutlich zu der bei den Fallversuchen festgestellten stetigen Emissionsminderung bei Erhöhung der auf das Schüttgut aufgetragenen Menge an Restmelasse-Wasser-Gemisch führte.

- Bei den untersuchten Schüttgütern Bruchkalk und Streusplitt wurde hingegen festgestellt, dass der Anteil an kleinen Partikeln geringer ist und dafür aber höhere Anteile an Partikeln im mittleren Größenbereich vorhanden sind. Dies wirkt sich vermutlich darin aus, dass es bei der Aufbringung geringer Mengen an Restemelasse-Wasser-Gemisch zunächst zu einer Verschlechterung der Emission kommt und bei Erhöhung der aufgebrachten Menge zu einer Verbesserung.

4.8 Zwischenzusammenfassung

Mittels Fallversuchen sollte festgestellt werden, ob sich durch Einbringung von Restmelasse in ein Schüttgut eine Emissionsreduktion erzielen lässt.

Dafür wurde eine Apparatur aufgebaut, mittels der über ein Fallrohr eine Schüttgutprobe 3 m tief in eine Staubkammer abgeworfen werden kann. Der dort entstehende Staub wird mittels Gebläse über eine Absaugleitung abgesaugt und dabei wird ein Teil dieses Staub-Luft-Stroms mittels Streulichtpartikelzähler hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung analysiert und aus diesen Daten ein Emissionsfaktor berechnet.

Für diese Versuche wurden zuerst Gemische mit verschiedenen Anteilen an Restmelasse und Wasser hergestellt, die dann vor dem Abwurf in verschiedenen Mengen auf das trockene Schüttgut aufgebracht wurden.

Um die Langzeitwirkung von Restmelasse festzustellen, wurden auch Versuche mit Proben durchgeführt, die nach Zugabe des Restmelasse-Wasser-Gemisches getrocknet wurden. Unter Langzeitwirkung versteht man die emissionsmindernde Wirkung, die nach dem Eintrocknen des auf das Schüttgut aufgebrachten Restmelasse-Wasser-Gemischs, im Vergleich zu eingetrocknetem reinem Wasser erzielt werden kann.

Bei den untersuchten Schüttgütern handelt es sich um Wandschotter, Bruchkalk und Streusplitt. Diese wurden gewählt da ihre zahlreichen Einsatzbereiche zu der diffusen Feinstaubemission in Österreich beitragen.

Als erstes sollte bestimmt werden, welches Gemischverhältnis von Restmelasse und Wasser die effektivste staubmindernde Wirkung auf ein Schüttgut ausübt. Dafür wurden Versuche mit Wandschotter mit verschieden Verhältnissen von Restmelasse zu Wasser durchgeführt (10:90, 25:75 und 40:60).

Dabei ergaben die Versuche mit Proben die befeuchtet und nicht getrocknet wurden, dass unabhängig vom verwendeten Verhältnis des Gemisches und bei Zugabe von reinem Wasser bereits bei einer geringen Menge von ca. 0,02 kg Flüssigkeit pro kg trockenem Schüttgut eine

vollständige Emissionsreduktion erreicht wird und hier nahezu kein Unterschied zum reinen Wasser vorliegt.

Bei Versuchen mit Proben die befeuchtet und getrocknet wurden, konnte festgestellt werden, dass je höher der Anteil an Restmelasse im Gemisch ist, desto höher ist die Emissionsminderung und desto weniger Flüssigkeit pro kg trockenem Schüttgut wird benötig um eine effektive Emissionsminderung zu erreichen.

So konnte bei den Versuchen mit Wandschotter mit einem Gemischverhältnis von 40:60 bereits bei der Zugabe von 0,05 kg Restmelasse-Wasser-Gemisch pro kg trockenem Schüttgut eine Emissionsverbesserung im Gegensatz zu Versuchen mit reinem Wasser von ca. 85 % festgestellt werden.

Daher wurde für die Untersuchung der beiden anderen Schüttgüter das Gemischverhältnis von 40:60 verwendet. Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf die Versuche mit allen drei Schüttgütern, die mit diesem Gemischverhältnis durchgeführt wurden.

Die Fallversuche ergaben, dass das Aufbringen von reinem Wasser auf das Schüttgut zu einem geringeren Emissionsfaktor führt, als das Aufbringen des Restmelasse-Wasser-Gemisches. Dafür könnte die durch die Restmelasse im Restmelasse-Wasser-Gemisch entstehende Viskositätserhöhung verantwortlich sein, die die Verteilung bzw. das Eindringen des Restmelasse-Wasser-Gemischs ins Schüttgut erschwert.

Allerdings zeigte sich, bei den Versuchen mit Proben die befeuchtet und getrocknet wurden, eine deutliche Emissionsreduktion bei allen drei Schüttgütern von ca. 85 %. Diese Reduktion wurde erzielt bei der Zugabe von 0,05 kg Restmelasse-Wasser-Gemisch pro kg trockenem Schüttgut.

Mittels der aus diesen Versuchen erhaltenen Ergebnisse konnte festgestellt werden, dass mit Restmelasse-Wasser-Gemischen mit einem hohen Anteil an Restmelasse die höchste Emissionsreduktion erzielt werden kann. Bereits bei der Aufbringung geringer Mengen an Restmelasse-Wasser-Gemisch auf das Schüttgut, konnte eine deutliche Emissionsminderung festgestellt werden und zwar sowohl bei den Fallversuchen mit Proben die mit diesem Gemischen befeuchtet und nicht getrocknet wurden, als auch mit Proben die befeuchtet und dann getrocknet wurden. Durch die Verwendung eines hohen Anteils an Restmelasse im Restmelasse-Wasser-Gemisch kann sowohl weniger vom Restmelasse-Wasser-Gemisch, als auch weniger Wasser verbraucht werden. Allerdings darf die Konzentration auch nicht zu hoch sein, weil dadurch auch die Viskosität dieses Gemisches ansteigt. Dies führt zum einen zu einer Verschlechterung des Diffusionsvermögens in das Schüttgut, wodurch keine gleichmäßige Verteilung des Gemisches gewährleistet wird und zum anderen zu einem Problem beim Versprühen des Gemisches. Daher konnte bei den Versuchen, auch nur ein Restmelasse-Wasser-Gemisch mit einem maximalen Anteil von 40 % an Restemelasse verwendet werden.

Das zentrale Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen ist, dass sich durch das Aufbringen von Restmelasse auf ein Schüttgut eine Emissionsreduktion erzielen lässt und dass auch eine Langzeitwirkung erreicht wird. Durch die Langzeitwirkung könnte das Sprühwasser, das bisher für die Emissionsminderung verwendet wurde, reduziert werden. Ein weiterer Vorteil des Einsatzes

eines Restmelasse-Wasser-Gemischs zur Emissionsminderung ist, dass dieses ganzjährig eingesetzt werden kann, da Restmelasse gefrierpunktserniedrigend wirkt.

4.9 Ausblick

In dieser Arbeit wurde das Potential, das Restmelasse im Bereich der Emissionsminderung hat, eindeutig festgestellt.

Allerdings sollten weitere Untersuchungen im Bereich der Versprühung des Restmelasse-Wasser-Gemisches zur Emissionsminderung angestellt werden. Etwa wäre es für die Verwendung eines Restmelasse-Wasser-Gemischs für Fließbänder, die Schüttgut transportieren, wichtig, dieses Schüttgut möglichst gleichmäßig mit dem Gemisch zu befeuchten, um eine gute Emissionsminderung zu erzielen. Für die Verwendung von Restemelasse-Wasser-Gemischen auf unbefestigten Straßen oder zur Verkrustung der Oberflächen von Schüttungen, wäre außerdem interessant, wie das Gemisch bis in eine gewisse Tiefe aufgebracht werden kann.

Im Folgenden wird die optimalen Verteilung einer Flüssigkeit auf eine bewegte Oberfläche untersucht. In dieser Arbeit wird zum einen das gleichmäßige Aufsprühen auf ein Schüttgut, das mittels Förderband weiterbewegt wird und zum anderen die Verteilung des versprühten Mediums im Schüttgut untersucht. Diese Untersuchungen wären auf die Versprühung von Restmelasse anwendbar und könnten so den Einsatz von Restmelasse beim Versprühen optimieren.

Durch die Verwendung von Düsen, die für die Versprühung hoch viskoser Meidien geeignet ist, könnte man außerdem die Konzentration an Restmelasse im Restmelasse-Wasser-Gemisch noch weiter erhöhen.

Da, wie bereits erwähnt, die Erhöhung der Restmelassekonzentration im Gemisch zu einer Erhöhung der Viskosität des Gemisches führt, ist es unbedingt nötig, die Verteilung im Schüttgut näher zu betrachten. Dadurch soll sichergestellt werden, dass es nicht nur zur oberflächlichen Benetzung (wenn nicht erwünscht) des Schüttguts durch das Gemisch kommt, sondern, dass ein homogenes Gemisch an Schüttgut und Restmelasse-Wasser-Gemisch zustande kommt.

5 Untersuchung der sekundären Staubabscheideeffektivität eines Wassersprаysystemes

Um die Abscheidung diffuser Staubemissionen zu untersuchen, wurden am Institut für Verfahrenstechnik in der Arbeitsgruppe (Luftreinhaltetechnik) der TU Wien bzw. in Kooperation an der Shandong Jianzhun Universität in Jinan in der Volksrepublik China bereits experimentelle Bestimmungen der Gesamtstaubabscheideeffektivität η_{tot} an einer eigens konzipierten Prüfapparatur welche eine Förderbandübergabestelle beinhaltet durchgeführt. Durch Versuche die bereits in diese Richtung geführt wurden [41], kann man die Annahme treffen, dass der Gesamtabscheidegrad sehr von dem Wasservolumenstrom, der durch die Düse geschickt wird, abhängt.

Des weiteren wurde im vorigen Kapitel die Reduktion der Staubentstehung beim Abwurf von Schüttgütern durch das Versprühen von Wasser mittels Zweistoffdüsen untersucht. Hier war auch eine starke Abhängigkeit der gemessenen primären Staubabscheideeffektivität η_1 vom verwendeten Wasservolumenstrom zu beobachten.

Neben dem Effekt des Befeuchtens (primäre Staubabscheideeffektivität) η_1 spielt aber auch der des Niedernebelns (sekundäre Stauabscheideeffektivität η_2 eine große Rolle. Darunter versteht man die Abscheidung des sich bereits in der Luft befindlichen Staubs. Um diesen Effekt untersuchen zu können, wurde am Institut eine Anlage errichtet, in der es möglich ist, solche diffusen Staubemissionen zu erzeugen und mittels Zweistoffdüsen zu reduzieren. Hierzu wird der von außen angesaugten Luft Feinstaub beigemengt und dieses Gemisch durch eine Kammer geleitet in der die Zweistoffdüse(n) positioniert sind. Es werden PCS (partical counter sizer) Messungen durchgeführt. Dafür wird ein kleiner Luftvolumenstrom am Ausgang aus der Kammer isokinetisch abgesaugt und die Verteilung bestimmt. Hierbei unterscheidet man zwischen einer Reingasmessung bei der die Zweistoffdüse in Betrieb ist und einer Rohgasmessung bei der nur das Staubluftgemisch durch die Kammer geleitet wird. Mittels dieser beiden Messungen ist man dann in der Lage, Aussagen zur Effektivität der Zweistoffdüse zu geben.

Im weitern soll überprüft werden ob die Positionen, sowie die Anzahl (1 oder 2 Düsen) der Zweistoffdüsen eine Rolle spielen bzw. welchen Einfluss der Luftvolumenstrom bzw. die Konzentration auf die Staubabscheidungseffektivität einer Zweistoffdüse hat.

5.1 Aufbau der Versuchsapparatur

Unter dem sekundären Effekt wird die Abscheidung des bereits entstandenen Staubes aus der Luft durch Niedernebeln verstanden. Aufgabe ist es nun, ein Verfahren, mit welchem der sekundäre Effekt und dessen Wirksamkeit untersucht werden kann, zur Verfügung zu stellen. Die Apparatur soll es erlauben, folgende Parameter zu variieren um deren Einfluss auf das abscheidende Verhalten des Zweiphasensprühs näher zu untersuchen.

- Position, Betriebszustand1 und Art des Sprühs
- Konzentration an Feinstaub im Rohgas
- Strömungsverhältnis in der Abscheidekammer
- Art der Staubemission

In [42] wurde das Betriebsverhalten der Düse betreffend Tröpfchengröße in Abhängigkeit von Volumenstrom, Druck und Wassermenge bereits näher untersucht.

Weiters soll auf zwei Effekte, den Verdrängungs- und den Verdünnungseffekt, die eine scheinbare Verminderung der Emission zur Folge haben, Rücksicht genommen werden.

5.1.1 Verdrängungseffekt

Wird bei einer Versuchsanordnung, die der Untersuchung der Verminderung der Staubemissionen mittels Zweiphasensprüh dient, das Messgerät zur Erfassung der Staubkonzentration direkt mit Frischluft aus dem Zweiphasensprüh angeströmt, kommt es zu einer signifikanten Abnahme der gemessenen Konzentration, ohne dass tatsächlich etwas abgeschieden wurde. (Abbildung 5-1) soll jenen Effekt verdeutlichen.

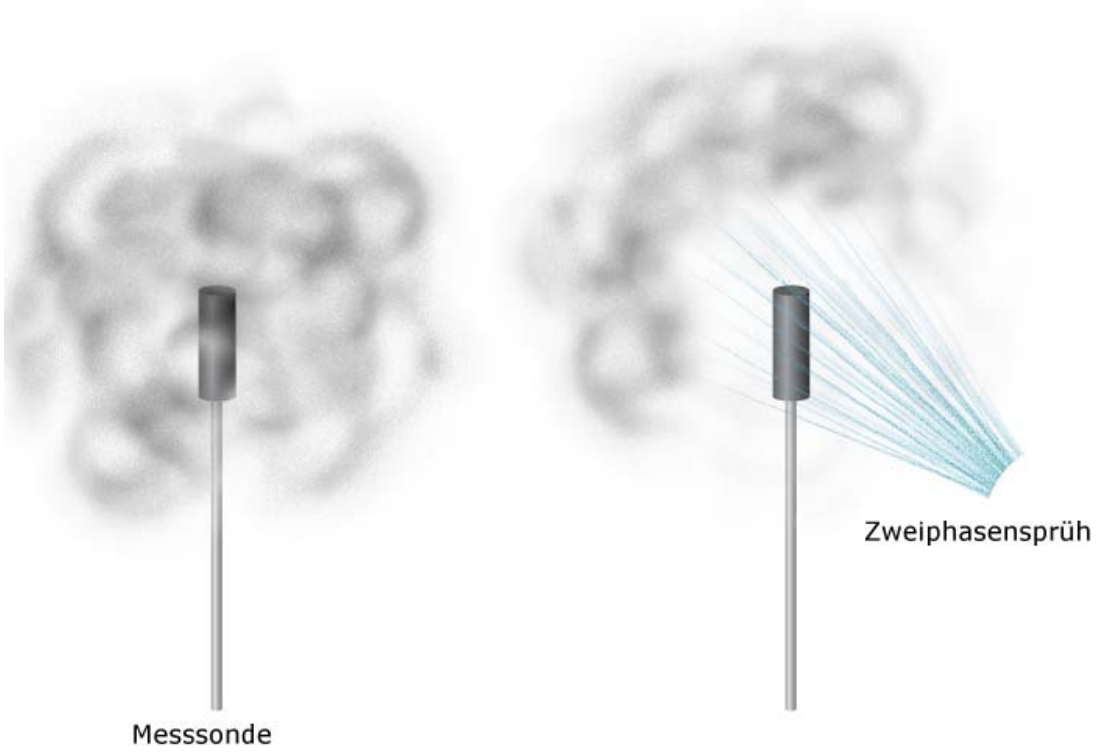


Abbildung 5-1: Verdrängungseffekt

5.1.2 Verdünnungseffekt

Wird ein Zweiphasensprüh, oder ein ähnlich arbeitendes Gerät, mit einem zu großen Luftvolumenstrom relativ zur Aufgabe betrieben, so wird diese lediglich verdünnt, dies soll am Beispiel einer im Freien stehenden Anlage erläutert werden. Eine im Freien gelegene Staubquelle mit der Emission *m* wird mit einer Systemgrenze in Form einer Halbsphäre umgeben. Die Luftströmung wird als laminar angenommen und es herrscht eine Windgeschwindigkeit *v*. An der windgewandten Seite der Systemgrenze wird, im stationären Zustand, eine Konzentration *c* erwartet, die sich wie folgt errechnet, wobei *A* die Schnittfläche der Halbsphäre normal zur Strömungsrichtung ist. Siehe (Abbildung 5--2), Formel (5-1) und (5-2).

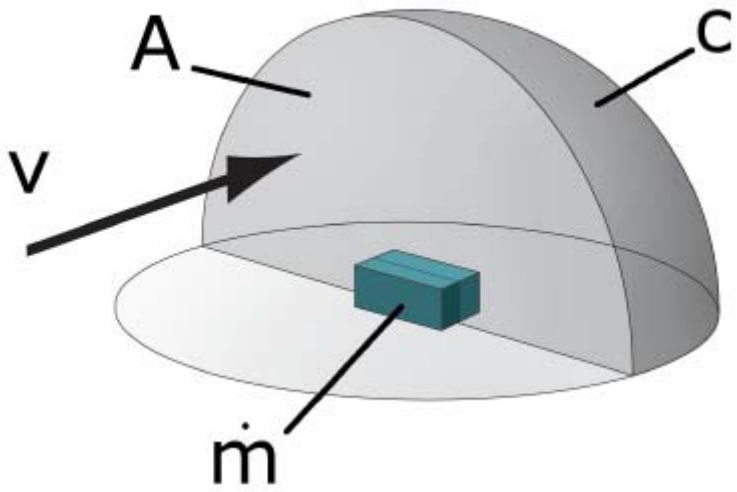


Abbildung 5--2: Verdünnungseffekt

$$c = \dot{m} / (v * A) \qquad (5\text{-}1)$$

$\dot{m}$	Emission der Staubquelle *[kg/s]*
v	Windgeschwindigkeit *[m/s]*
v_1	erhöhte Windgeschwindigkeit *[m/s]*
c	erwartete Konzentration *[kg/m³]*
c_1	erwartete Konzentration bei erhöhter Windgeschwindigkeit *[kg/m³]*
A	Schnittfläche der Halbsphäre normal zur Strömungsrichtung *[m²]*

Wird nun mit der vermeintlich staubunterdrückenden Apparatur die Windgeschwindigkeit v_1 erhöht, errechnet sich die zu erwartende Konzentration c_1 aus

$$c_1 = \dot{m} / (v_1 * A) \qquad (5\text{-}2)$$

und wegen $v_1 > v$ folgt $c_1 < c$

Wie man sehen kann, wurde auch hier die gemessene Konzentration erniedrigt, ohne das etwas abgeschieden wurde.

5.1.3 Verwendete Geräte

Die Versuchsapparatur wurde unter Berücksichtigung des Verdünnungs- und Verdrängungseffektes in Form einer Einhausung mit Wasserspraysystem durch das partikelbeladene Luft geleitet wird realisiert. Durch die sehr gerichtete Luftströmung können Verdünnungs- und Verdrängungseffekte vermieden werden. Die im Folgenden genannten Punkte beziehen sich auf Abbildung 5-3. In Punkt I wird Außenluft angesaugt und deren Temperatur sowie relative Luftfeuchtigkeit gemessen. Ebenso wird der Außenluftdruck gemessen. Mit Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Außendruck ist der thermodynamische Zustand der feuchten Außenluft vollständig bestimmt. In Punkt II wird der Volumenstrom an feuchter Außenluft gemessen und der Teststaub mit Hilfe des Staubgenerators eingeblasen. In Punkt III tritt das Rohgas in die Abscheidekammer ein und wird mit dem Zweiphasensprüh gereinigt. In Punkt IV wird wiederum relative Feuchte Temperatur und Druck gemessen. In Punkt V wird ein Teil des Volumenstromes isokinetisch abgesaugt und mit Hilfe eines Streulichtpartikelzählers die Konzentration an Teststaub in der Luft gemessen und deren Partikelgrößenverteilung bestimmt. In Punkt VI wird der Reingasstrom zum Schutz des Gebläses und der Umwelt durch einen Absolutfilter gereinigt. Der dadurch, mit fortschreitender Versuchsdauer, ansteigende Druckverlust kann durch Schließen des Falschluftventiles kompensiert werden um einen konstanten Volumenstrom zu garantieren. Das Gebläse fördert die gereinigte Luft in Punkt VII aus der Apparatur. Daraus ergeben sich zwei relevante Betriebsvarianten, die sich nur dadurch unterscheiden, ob der Zweiphasensprüh in Betrieb ist oder nicht. Ist er nicht in Betrieb, wird von einer Rohgasmessung gesprochen. Andernfalls bezeichnet sich der Betriebszustand als Reingasmessung. Werden Reingasmessung und Rohgasmessung nacheinander durchgeführt, so können die gemessen Konzentrationen und Partikelgrößenverteilungen verglichen und Gesamt- sowie Fraktionsabscheidegrade errechnet werden. Die Berechnung von Gesamt sowie Fraktionsabscheidegrad wird in 5.2.3 näher erläutert. Im Betrieb Reingasmessung können Feuchte, Druck und Temperatur vor und nach der Abscheidekammer, sowie der Volumenstrom feuchter Luft durch die Apparatur erfasst werden und dadurch die verdunstete Wassermenge errechnet werden. Die Berechnung der verdunsteten Wassermenge wird in 6.1 näher erläutert. Zur Regelung des Luftvolumenstromes kommt sowohl die Regelung über das Falschluftventil als auch die Regelung über die Drezahlbeeinflussung des Seitenkanalverdichtermotors mittels Frequenzumrichters zum Einsatz.

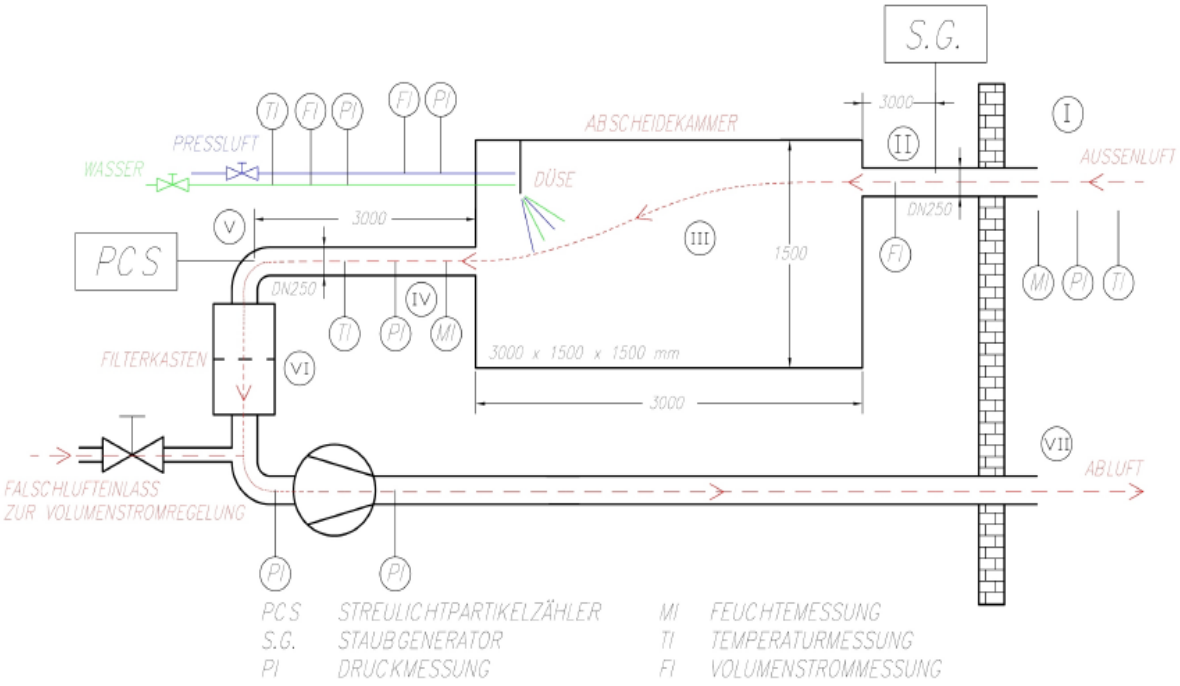


Abbildung 5-3 Aufbau der Versuchsapparatur zur Bestimmung der sekundären Staubabscheideeffektivität

Die Strömung der staubbeladenen Luft durch die Einhausung ist aufgrund des Aufbaus der Staubabscheidekammer eine Art Kurzschlussströmung. In dieser können nun in verschiedenen Abständen zur Seite Düsen Positioniert werden, sodass diese bei der Staubabscheidung unterschiedlichen Strömungsbedingungen ausgesetzt sind.
Die Variation der Düsenpositionen von 2 Düsen in unterschiedlichen Abständen zueinander und in unterschiedlichen Positionen im Kasten dient zum Feststellen der Abhängigkeit der sekundären Staubabscheidung von den Strömungsbedingungen sowie dazu zu untersuchen ob ein Verteilen des Wasservolumenstromes auf mehrere Düsen die sekundäre Staubabscheideeffektivität verbessert oder ob es wirksamer ist den gesamten Wasservolumenstrom zu fokussieren. Um dies untersuchen zu können wurde die Staubabscheidekammer also so konzipiert, dass eine Kurzschlussströmung staubbeladener Luft durch die Kammer geführt wird und seitlich davon jeweils andere Strömungsbedingungen herrschen. Somit kann die Wirksamkeit der Düsen bei unterschiedlichen Bedingungen experimentell untersucht werden. Im theoretischen Teil siehe CFD Simulation der sekundären Staubabscheidung Kapitel 5.3.1 werden die Strömungsbedingungen in der Staubabscheidekammer analysiert.

5.1.3.1 Zweiphasensprüh

Ein Zweiphasensprüh ist ein Gerät mit der Aufgabe, feinste Wassertröpfchen zu produzieren. Jene Wassertröpfchen sollen im freien Flug mit Staubkörnern kollidieren und diese somit niederschlagen. Die Geometrie und damit Funktionsweise des Zweiphasensprühs ist vom Hersteller vorgegeben. Grundsätzlich arbeiten sie aber nach einem ähnlichen Prinzip. Durch eine Düse wird Pressluft geführt, der durch feine Kanäle Wasser zugeführt wird. Durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit und diverse Einbauten kurz vor dem Austritt, wird das Wasser feinst zerstäubt. Siehe Abbildung 5-4 In der realisierten Apparatur wurden Düsen der Firma VSR

Industrietechnik GmbH (Duisburg, Deutschland) vom Typ 1005 eingebaut. Die Pressluftversorgung sowie der Wasseranschluss des Sprühs sind je mit einem Rotameter und einem Manometer versehen.
In der Zweistoffdüse der Firma VSR Industrietechnik GmbH (Duisburg, Deutschland) vom Typ 1005 wird Luft mit Überschallgeschwindigkeit zentral in die Resonanzkammer eingeblasen. Hier erzeugt diese ein Resonanzfeld im Ultraschallbereich. Das Wasser wird ringförmig zu diesem Feld geführt. Laut Firmenangaben wird das Wasser durch das Resonanzfeld und in Abhängigkeit der Luft und Wassermenge in Tropfen von 1 bis 50 µm zerrissen. Im Vergleich zu Tropfen von durchschnittlichen Einphasendüsen (nur Wasser) ist der Durchmesser um das 10fache kleiner, was eine 1000fach höhere Tropfendichte im Dispersionsnebel zur Foige hat. Auf dieser hohen Tropfendichte und der damit einhergehenden Erhöhung der spezifischen Oberflache begründet sich die gute Effektivität bei der Niedernebelung von Staub. Von Vorteil ist die unabhängige Einstellbarkeit von Luft- und Wasserzufuhr. Damit lässt sich die Tropfengröße, zum Unterschied bei der Verwendung einer Einstoffdüse, ohne Veränderung des Wasservolumenstromes variieren. Darüber hinaus ist sie für die Anwendung im Labormaßstab geeignet, da trotz geringer Vordrücke (Wasser < 1 bar, Luft < 4 bar) ein sehr geringer Wasservolumenstrom von 0,9 L/h eingestellt werden kann. Dieser geringe Wasserstrom ist notwendig, da er auf die geringe Schüttgutmenge abgestimmt sein muss.

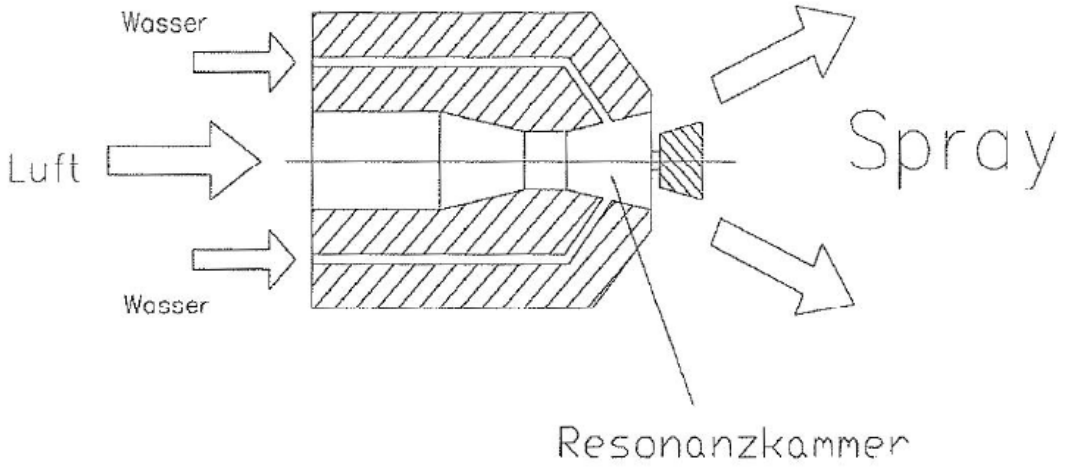
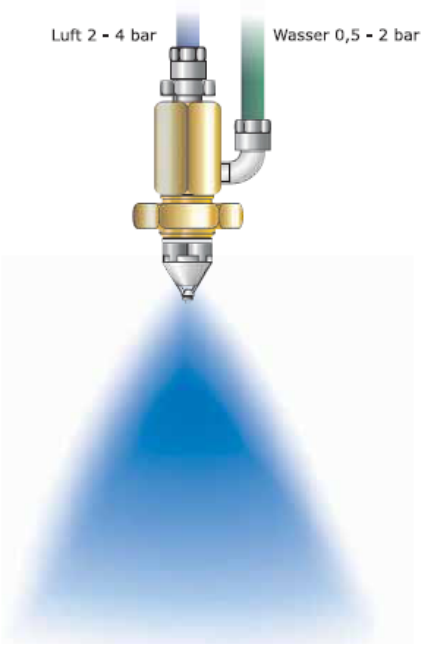


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung eines Zweiphasensprühs; (Quelle [30])

Der Vorteil der eingesetzten Zweistoffdüsen liegt in der Tatsache, dass bei geringerer Wassermenge eine höhere Stauabscheideeffektivität erzielt werden kann, dar eine höhere spezifische Oberfläche durch feinere Zerstäubung als bei Einstoffdüsen staubabscheidend wirksam ist. Der Nachteil liegt darin, dass der Energiebedarf einer Zweistoffdüse höher ist als bei einer Einstoffdüse und die Drucklufterzeugung und Versorgung apparativ aufwendiger und kostspieliger ist.

Die Abbildungen 5-5 und 5-6 zeigen schematisch den Sprüh und den Betriebsbereich der Düse.



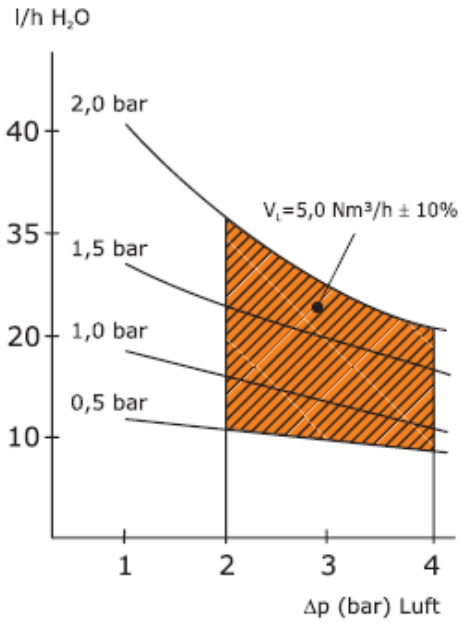


Abbildung 5-5: **Zweistoffdüse 1005**

Abbildung 5-6: **Betriebsbereich der Vollkegel-Zweistoffdüse 1005**

Ein Prospekt des Düsenherstellers VSR Industrietechnik GmbH befindet sich im Anhang.

5.1.3.2 Staubgenerator

Der Staubgenerator hat die Aufgabe einen konstanten Massenstrom an Teststaub in die Apparatur einzubringen. In der realisierten Apparatur wird ein Staubgenerator der Firma Palas (Karlsruhe, Deutschland) verwendet. Die Typenbezeichnung ist BEG1000 S, die Seriennummer ist 9035. Als Teststaub wird PURAL NF verwendet. Ein Auszug der Bestellung mit den Spezifikationen des Teststaubes befindet sich im Anhang. Siehe Abbildung 5-7 auf

Abbildung 5-7: **Staubgenerator Palas LTG; der Reihe nach: Dosiertrichter, Staubgenerator S , Dispergiereinheit D, Dispergierdüse**

Der Staubgenerator hat die Aufgabe einen konstanten Massenstrom an Teststaub in die Apparatur einzubringen. In der realisierten Apparatur wird ein Staubgenerator der Firma Palas (Karlsruhe, Deutschland) verwendet (Abbildung 5-7). Als Teststaub wird PURAL NF verwendet. Ein Auszug der Bestellung mit den Spezifikationen des Teststaubes, sowie die mit dem Malvern Instruments Mastersizer ermittelte Korngrößenverteilung der verwendeten Charge Pural NF befinden sich im Anhang.

5.1.3.3 Streulichtpartikelzähler

Es wurde ein Streulichtpartikelzähler der Firma Palas (Karlsruhe, Deutschland) vom Typ PCS-2010 verwendet. Die Seriennummer lautet 0810 wie in Kapitel 4.3.1.2. beschrieben verwendet

5.1.3.4 Thermo- und Hygrometer

Feuchte- und Temperaturmessgerät sind baulich vereinigt. Hersteller ist die Firma Testo (Deutschland) und das Gerät hat die Bestellnummer 05604450 und die Seriennummer 00561254/107. Ein Problem dabei ist die Verfälschung des Messergebnisses durch Tröpfchen die den Fühler direkt treffen. Als Abhilfe wird der Fühler mit einer einseitig geöffneten Kunststoffkappe geschützt.

5.1.3.5 Gebläse

Als Gebläse wurde ein Seitenkanalverdichter vom Typ FJET1K11DS/22/2 wie in Kapitel 4.3.1.4 beschrieben verwendet. Da der Seitenkanalverdichter nicht regelbar ist, kann das Falschluftventil soweit geöffnet werden dass, sich die am Anemometer ablesbare gewünschte Strömungsgeschwindigkeit einstellt. Des weiteren wurde zusätzlich ein Frequenzumrichter wie unter Kapitel 4.3.1.5 beschrieben zur Regelung der Drehzahl des Gebläses verwendet.

5.1.3.6 Anemometer

Das Anemometer hat die Aufgabe den Volumenstrom feuchter Luft der durch die Apparatur geführt wird zu ermitteln. Es ist darauf zu achten, dass das Anemometer an einer Stelle angebracht wird, an der sich die Strömung nach dem Einlauf bereits beruhigt hat. Als Faustregel hierfür gilt, dass die Beruhigungsstrecke etwa zehn Mal die Länge des Rohrdurchmessers hat. In der realisierten Apparatur wird ein Heizdrahtanemometer der Firma FCI (Fluid Components INTL) verwendet. Das Heizdrahtanemometer ist an einer geeigneten Stelle, d.h. unter Einhaltung einer ausreichenden Beruhigungsstrecke, eingebaut. Das Messgerät ist mit einem Messumformer ausgestattet, welcher für PC-Messtechnik geeignet ist. Der Einfachheit wegen wird das Messsignal aber mittels eines handelsüblichen Multimeters analog abgegriffen und am Prüfstand ’Filterprüfstand für Kühlschmierstoff Nebelabscheider’ kalibriert. Der Prüfstand ’Filterprüfstand für Kühlschmierstoff Nebelabscheider wird in [69] detailliert beschrieben. In Abbildung 5-8 ist jener Ort markiert, an dem das Signal abgegriffen wurde. Die Kalibrierung am Prüfstand Filterprüfstand für Kühlschmierstoff Nebelabscheider’ ergab den linearen Zusammenhang () welcher in Abbildung 5-9 dargestellt wird.

$$s = U * 1,8728 + 0,1259 \quad (5\text{-}3)$$

U abgegriffene Spannung am Anemometer [V]

s Strömungsgeschwindigkeit *[m/s]*

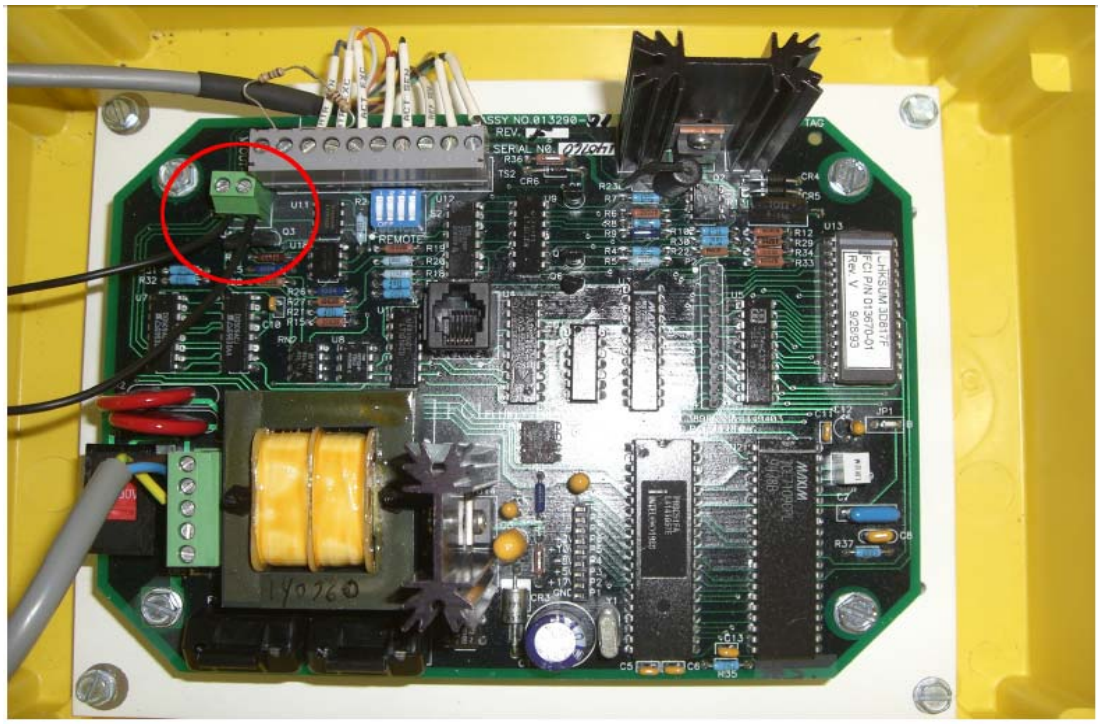


Abbildung 5-8: Signalerfassung des Anemometers der Firma FCI

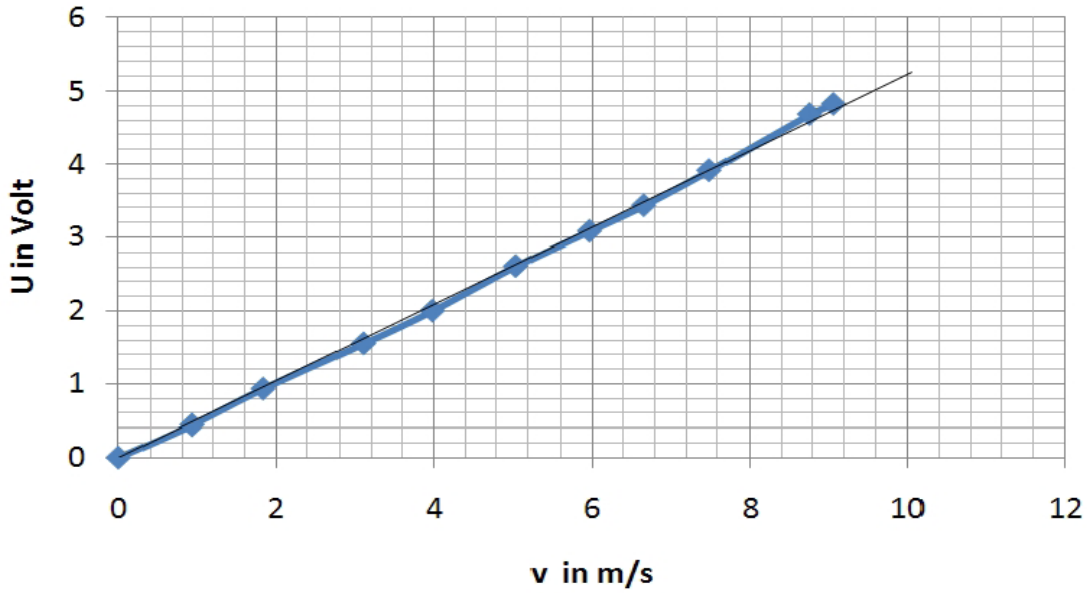


Abbildung 5-9: Kalibrierkurve des Anemometers

Die für die Messungen der Staubabscheidung erforderliche Versuchsapparatur wird nun anhand der [70] beschrieben.

5.2 Experimentelle Betrachtungen der sekundären Staubabscheidung

5.2.1 Bestimmung des Messablaufes

Bei der in Betrieb genommenen Anlage wird im Punkt I Frischluft von außen angesaugt. Von dieser werden dann die Temperatur, die relative Luftfeuchte, sowie der Außendruck bestimmt. Mit diesen Daten ist der thermodynamische Zustand der Außenluft genau bestimmbar. Weiters wird dann, wie in Punkt II ersichtlich, der Außenluft der Teststaub (Pural NF $x_{50,3}$=4µm) mittels Staubgenerator zugeführt und anschließend noch der Volumenstrom der Luft vor dem Eintritt in die Kammer bestimmt. Wie man im Punkt III erkennen kann, wird dann in der Kammer das Rohgas mittels Zweistoffdüse gereinigt. Danach folgen wieder Messungen der Temperatur, relativen Luftfeuchte und des Drucks. In Punkt V wird mittels Streulichtpartikelzähler der Firma Palas (Karlsruhe Deutschland) vom Typ PCS-2010 (Seriennummer 0810) die Konzentration an Teststaub durch isokinetisches Absaugen gemessen und weiters die Partikelgrößenverteilung bestimmt. Hierbei wir die Anzahl N der Partikel, die sich in den einzelnen Klassen befinden, gemessen, sowie die Größen der Klassen mit x_U und x_O festgelegt. Die Abluft wir nun zum Schutz der Umgebung und des Gebläses durch einen mehrstufigen filternden Abscheider (siehe Punkt VI) gereinigt. Zum Regeln des Luftvolumenstroms wurde vor dem Gebläse noch ein Ventil eingebaut, mithilfe dessen Falschluft zugemischt werden kann. Danach wird die Abluft aus der Apparatur im Punkt VII ins Freie geblasen. Mittels eines am Austritt befestigten Schlauchs wird noch verhindert, dass es zur Wiedereinsaugung bereits verunreinigter Luft kommt, um eine konstante Staubbeladung zu gewährleisten.

5.2.1.1 Isokinetische Probennahme

Die Messung erfolgt durch Absaugen eines Luft-Staubgemisches, das dann durch den Prüfraum des PCS geleitet wird. Da dies isokinetisch erfolgen soll und die Prüfraumeinstellungen am PCS und somit der Absaugvolumenstrom des PCS gleich bleiben soll, müssen bei Veränderungen des Volumenstroms durch die Kammer (dadurch verändert sich die Geschwindigkeit im Absaugrohr) auch die Geschwindigkeit an der Sondenöffnung verändert werden. Dies erfolgt durch Vergrößerung des Einlasses des Absaugkanals bei Verkleinerung des Luftvolumenstroms durch die Anlage bzw. Verkleinerung des Einlasses bei Vergrößerung des Luftvolumenstroms durch die Anlage Abbildung 5-3).

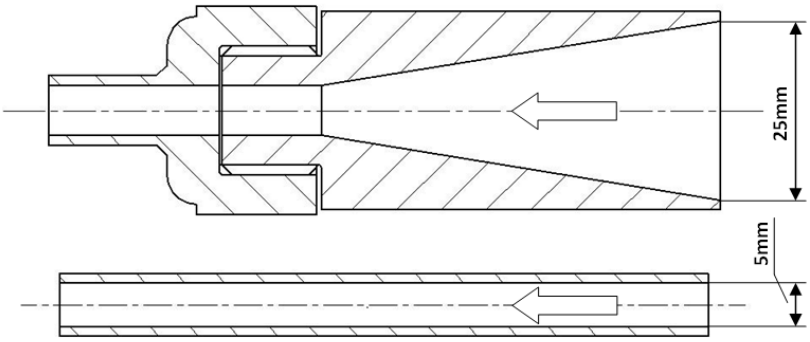


Abbildung 5-10: Einsaugöffnungen

5.2.1.2 Reproduzierbarkeit der Messungen

Um einen verlässlichen und reproduzierbaren Messablauf zu gewährleisten, werden zu Beginn der Untersuchungen Reihenmessungen durchgeführt. Die Reihenmessungen werden hier 45min lang durchgeführt, bestehend aus Einzelmessungen mit einer Messdauer von 40sec und einem Abstand zwischen den Messungen von 5sec. Diese werden sowohl für die Rohgasmessung als auch für die Reingasmessung durchgeführt. In weiterer Folge werden auch Messungen für die Zweistoffdüse alleine, d.h. ohne Zugabe von Teststaub zur angesaugten Außenluft gemacht. Da vermutet wird, dass ein Einfluss der Schwankungen des Systems und der Einstellung eines stationären Zustandes sowie der Tropfen auf die Partikelmessung besteht, wurden Reihenmessungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt. Durch diese drei Maßnahmen soll sichergestellt werden, dass die Messungen reproduzierbar sind.

5.2.1.3 Bestimmung der Messdauer

Wie man in Abbildung 5-11 erkennen kann, tritt bei der Reihenmessung des Rohgases und Reingases ein Pulsieren der Staubkonzentration auf, das vermutlich auf den Staubgenerator zurückzuführen ist. Da diese Schwankungen eine Periode von 3 Minuten aufwiesen, wird die Messdauer auf 200 Sekunden eingestellt. Dadurch wird verhindert, dass eine Messung gerade in einem Hoch bzw. Tief erfolgt.

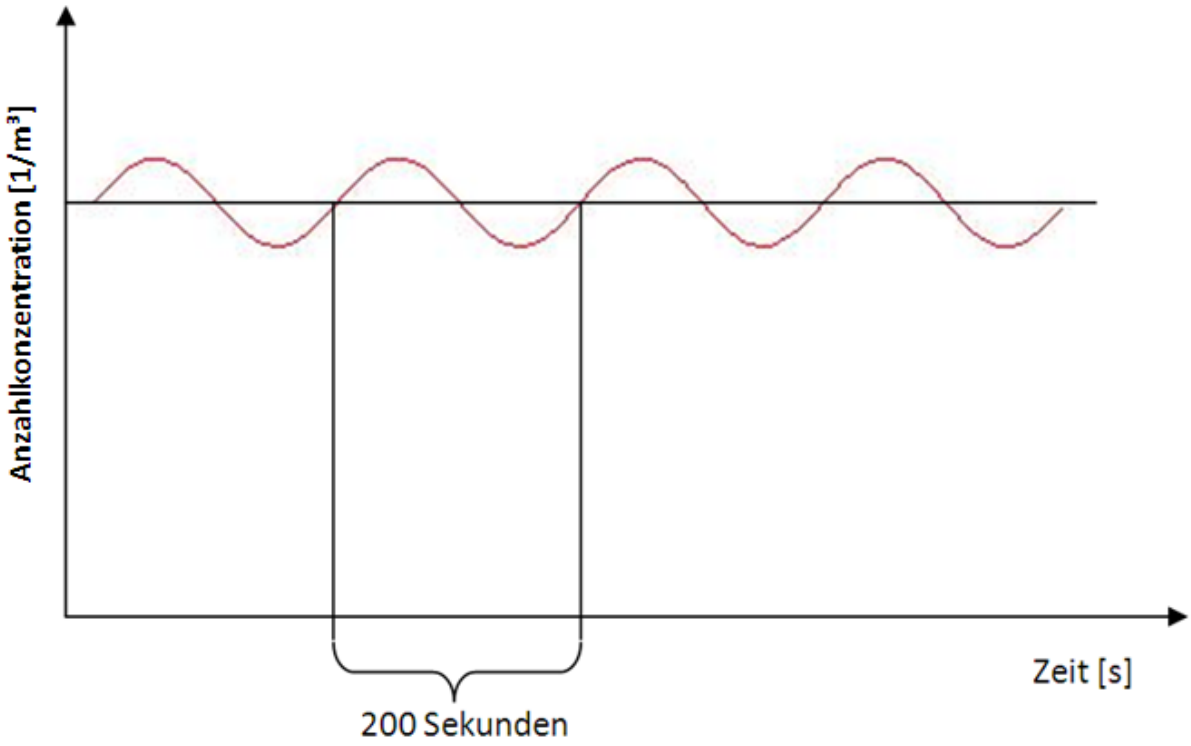


Abbildung 5-11: Pulsierende Staubkonzentration

5.2.1.4 Bestimmung der Wartezeit bis zum konstanten Zustand

Weiters wird wie in Abbildung 5-12 dargestellt, mit der Reihenmessung festgestellt, dass die Anlage eine Zeitspanne von ca. 20 min benötigte, um eine nahezu konstante Anzahl an Partikeln pro Klasse zu erhalten. Hierbei wird abwechselnd mit und ohne Zweistoffdüse gemessen, sowie mit verschiedenen Wasservolumenströmen. Daraus ist ersichtlich, dass nach jeder veränderten Einstellung ein Zeitraum von 20 min (Zeit bis in der Kammer ein stationärer Zustand erreicht ist) abgewartet werden muss, bevor die nächste Messung durchgeführt werden kann.

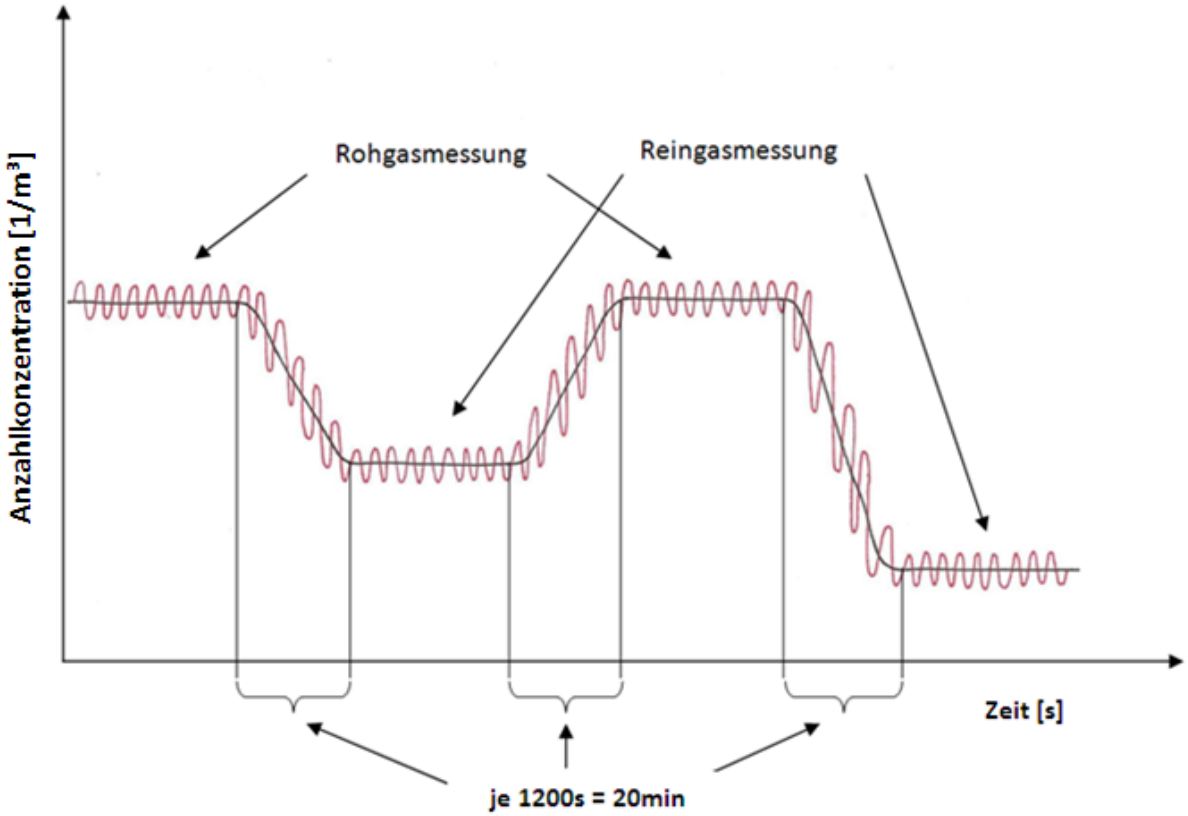


Abbildung 5-12: Langzeitmessung

5.2.1.5 Einfluss der Tropfen auf die Partikelmessung

Zusätzlich werden noch Reihenmessungen durchgeführt bei denen lediglich die Zweistoffdüse in Betrieb ist, d.h. es wird der Außenluft kein Staub beigemischt. Da bei diesen Messungen in manchen Klassen im Vergleich zur Messung mit reiner Außenluft eine sehr hohe Partikelanzahl gemessen wird, kann es sich bei diesen Partikeln nur um feine Tröpfchen der Zweistoffdüse handeln. Für diese Messungen werden dann wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben die Fraktionsabscheidegrade bestimmt und von den zugehörigen Reingasmessungen abgezogen.

Hierbei bewegte sich das Tropfengrößenspektrum im Bereich von $x_{3,50}$ =1 µm und betrug ca. 3 % der Masse der Reingasmessung.

5.2.1.6 Messablauf

Eine Messserie beginnt und endet je mit einer Rohgasmessung. Dazwischen finden die Reingasmessungen mit verschiedenen konstanten Wasservolumenströmen statt, z.B. mit 1 L/h; 2,5 L/h; 5 L/h; 10 L/h und 60 L/h. Da noch nicht geklärt ist, ob gesättigte Luft staubunterdrückend wirksam ist, werden die Wasservolumenströme vorerst nicht mittels der in [69] betrachteten Verdampfungsverluste korrigiert. Wie bereits in Kapitel 5.2.1.3 erwähnt, muss zwischen den Messungen eine Dauer von 20 min abgewartet werden, um diese in einem konstanten Bereich durchzuführen. Jede Messung besteht wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, aus fünf Teilmessungen, die jeweils 200sec dauern. Nach jeder Messserie werden wie in Kapitel 5.2.1.4 nochmals Reingasmessungen mit denselben Wasservolumenströmen, jedoch ohne das Beimischen von Staub, durchgeführt. Nach diesen erfolgt noch eine Rohgasmessung.

Solche Messserien werden nun für verschiedene Düsenpositionen in der Versuchskammer durchgeführt. Zusätzlich kann auch der Luftvolumenstrom durch die Anlage variiert werden.

Während der Messung ist allerdings darauf zu achten, dass der Luftvolumenstrom konstant gehalten wird.

5.2.2 Einfluss der Düsenposition auf die sekundäre Staubabscheidung

Da in diesen Versuchen festgestellt werden soll wie entscheidend die Positionierung der Zweistoffdüse für die Abscheidung des diffusen Staubes aus der Luft ist, werden verschiedene Positionsvarianten ausprobiert. Hierbei werden die Messungen zuerst mit 1 Düse und dann mit 2 Düsen, wobei bei 2 Düsen je nur der Halbe Wasservolumenstrom eingestellt wird als bei 1 Düse, durchgeführt, sodass in Summe bei 1 und 2 Düsen der gleiche Gesamtwasservolumenstrom versprüht wird.

In der Kap. 5.1 Beschrieben Versuchskammer welche aus einem Alu-Gerüst mit durchsichtigen Wänden, Boden bzw. Decke aus Glas bzw. Plexiglas besteht sollen die Staubabscheidewirkungen bei unterschiedlichen Düsenpositionen untersucht werden. Wien in Kap. 5.1 Beschrieben ist die Kammer ist ca. 1,5m hoch und breit und hat eine Länge von 3m. An den Enden der Kammer befindet sich der Luftein- bzw. Luftauslass. Bei der halben Länge der Kammer ist an der Decke ein Profilträger befestigt, um die Versuche durchzuführen. Bei den Positionen 1 und 2 werden die Düsen auf einem verstellbaren Steher in einer Höhe von 1,2m angebracht. Bei Versuchen mit nur einer Düse werden die Positionen genauso gewählt wie bei den Versuchen mit 2 Düsen, allerdings ist nur eine der beiden aktiv.

5.2.2.1 Beschreibung der untersuchten Düsenpositionen

5.2.2.1.1 Standarddüsenposition

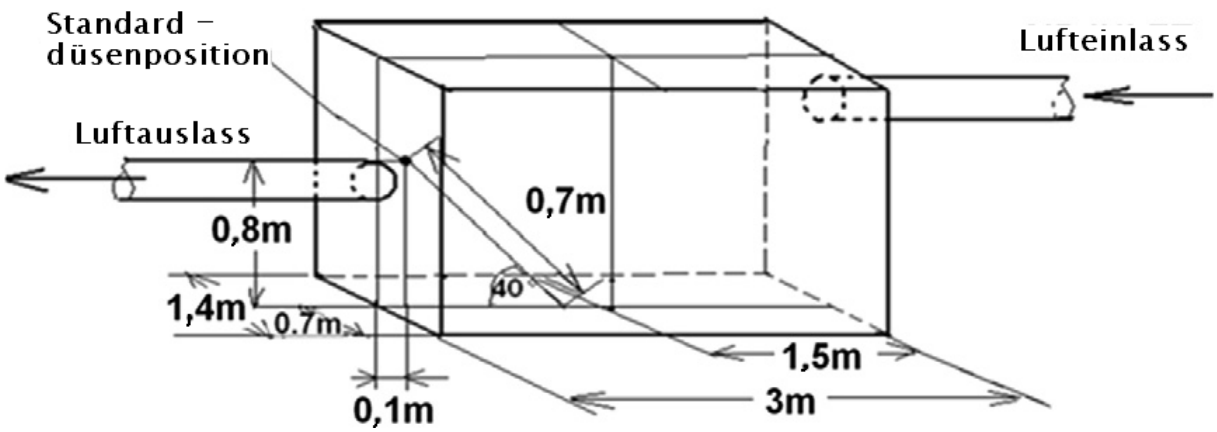


Abbildung 5-13: Standarddüsenposition

Abbildung Abbildung 5-13 zeigt die Standarddüsenposition für die $\eta_2 = 16\ \%$ bei 10L/h Versorgungswasservolumenstrom und zentraler Positionierung der Düse festgestellt wurde. Im Folgenden wird diese Position wegen der besonderen Verbreitung in der Praxis als Standardeinstellung definiert. Zudem ist diese Position bei der Messung der Gesamtstaubabscheideeffektivität $\eta_{\tau o \tau}$ (primäre und sekundäre Staubabscheidung zusammen) verwendet worden, weshalb in späteren Vergleichen auf diese Standardeinstellung Bezug genommen wird.

5.2.2.1.2 Düsenposition 1

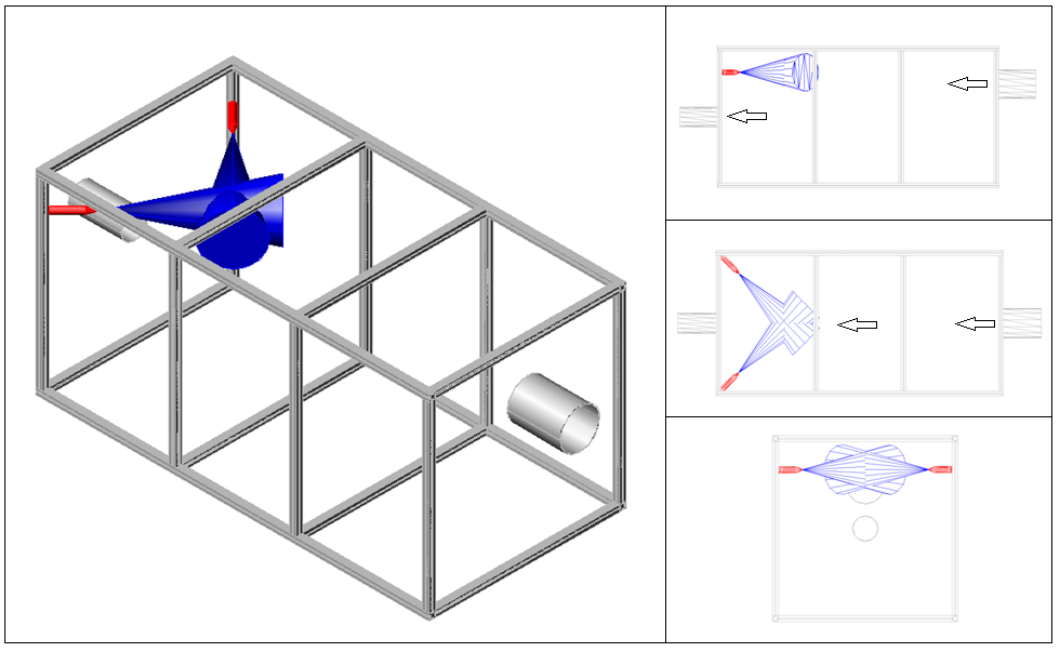


Abbildung 5-14: Düsenposition 1

In Abbildung 5-14 ist die erste Düsenposition dargestellt. Wie man sehen kann ist die Düse der Luft - Strömungsrichtung entgegengesetzt angebracht. Hierfür sind die Düsen in einer Höhe von 1,2 m angebracht und stehen zu der Seitenwand in einem Winkel von 45°.

5.2.2.1.3 Düsenposition 2

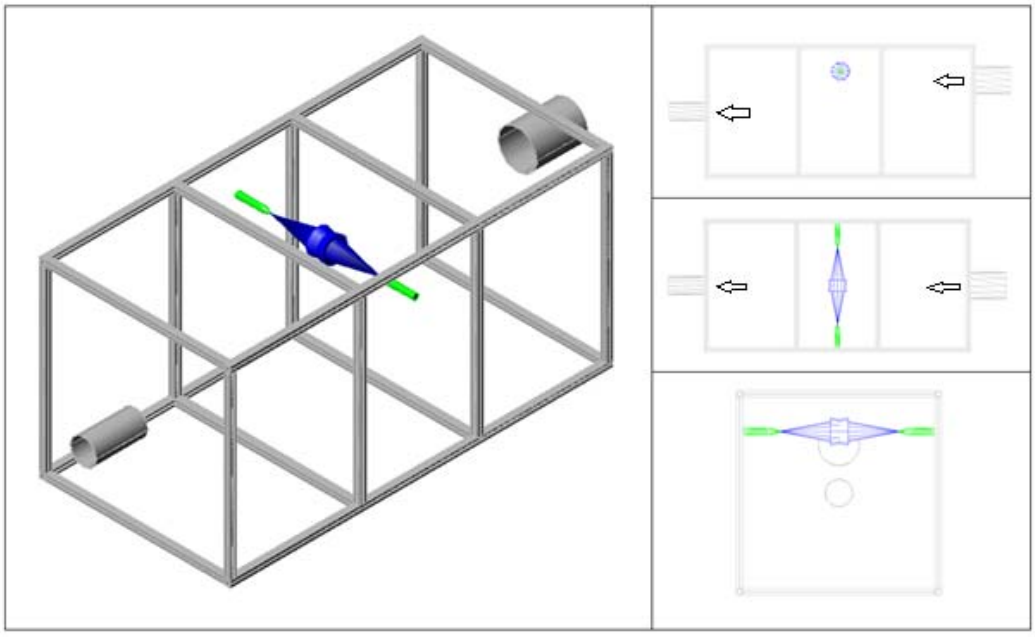


Abbildung 5-15: Düsenposition 2

In Abbildung 5-15 sind die Düsen einander gegenüber 90° zur Strömungsrichtung der Luft in der Mitte der Kammer, in einer Höhe von 1,2m aufgestellt.

5.2.2.1.4 Düsenposition 3

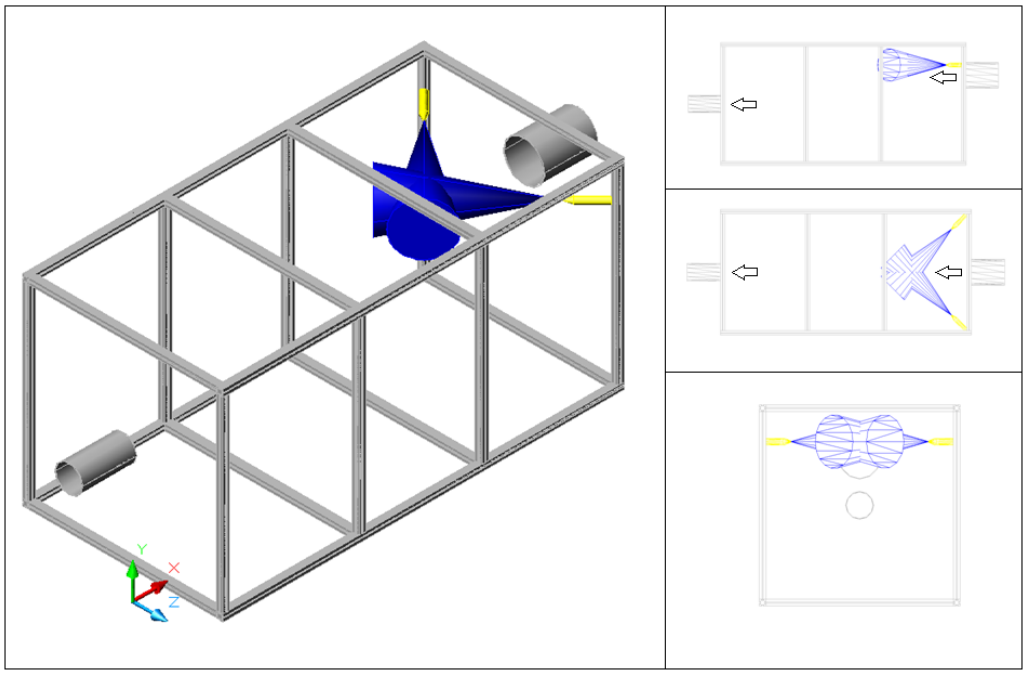


Abbildung 5-16: Düsenposition 3

In Abbildung 5-16 werden die Düsen ähnlich wie in Abbildung 5-13 positioniert, jedoch in Richtung der strömenden Luft. Die Höhe beträgt 1,2m und die Winkel zu den Seitenwänden 45°.

5.2.2.1.5 Düsenposition 4

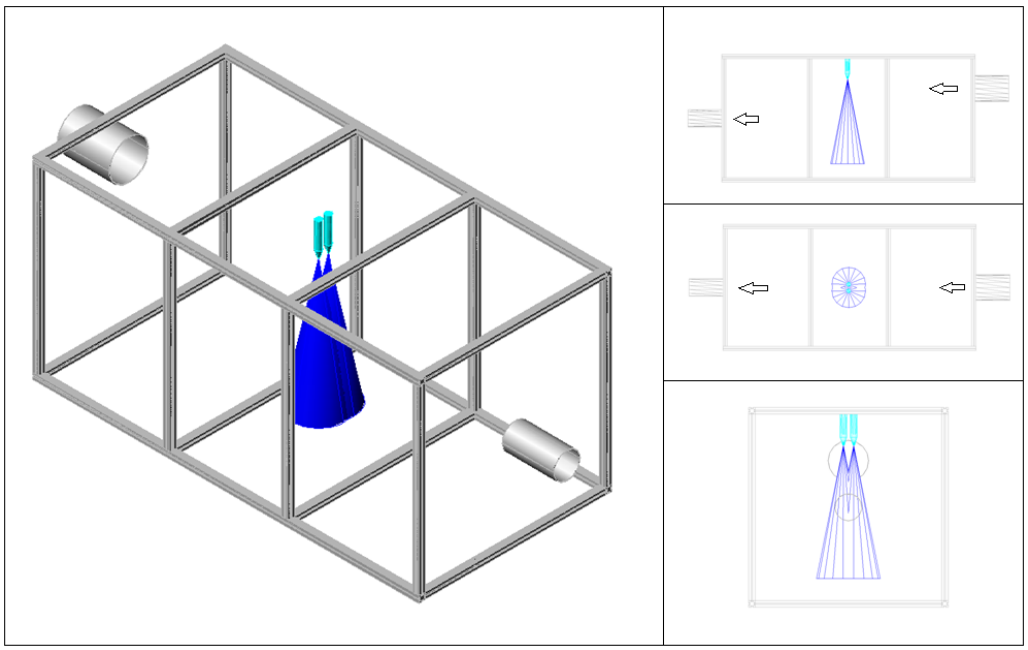


Abbildung 5-17: Düsenposition 4

In Abbildung 5-17 werden die Düsen in der Mitte der Kammer normal zu Decke angebracht. Der Abstand zwischen den beiden Düsen beträgt 2cm. Allerdings wird hier bei Messungen mit einer Düse, diese in der Mitte der Kammerbreite positioniert.

5.2.2.1.6 Variation von Position 4

Weiters werden noch Versuche durchgeführt, in denen die Düsen wie in Abbildung 5-17 senkrecht von der Decke hängen. Hierbei werden aber die Abstände zwischen den Düsen verändert:

- Düsen direkt nebeneinander (2cm Abstand)
- Düsen in einem Abstand von 10cm
- Düsen in einem Abstand von 20cm
- Düsen in einem Abstand von 40cm
- Düsen in einem Abstand von 80cm

Zusätzlich werden dann die 2 Düsen beim Punkt A, der genau in ihrer Mitte liegt, wie in Abbildung 5-18 ersichtlich ist, quer über die Kastenbreite verändert. Hierbei wird die Breite der Kammer (innen 1,4 m) in 10 cm Schritten (siehe Abbildung 5-18) unterteilt und bei jeder dieser Positionen, werden dann wie im vorigen Absatz beschrieben Versuche durchgeführt. Die so erhaltenen Positionen A – F sind in Abbildung 5-18 dargestellt.

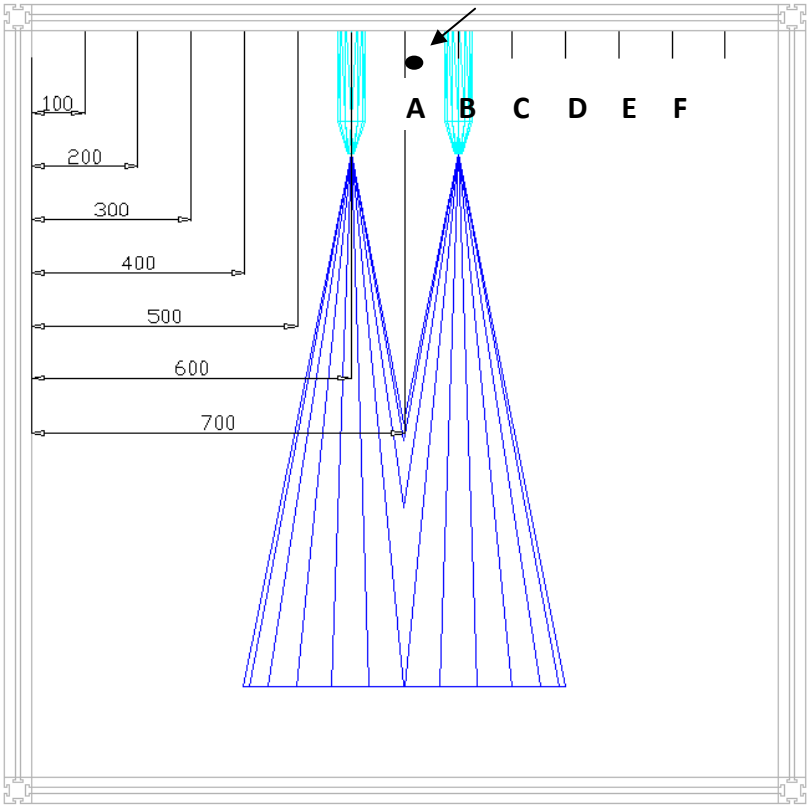


Abbildung 5-18: Variation der Düsenposition 4

In Abbildung 5-18 ist als Beispiel ein Abstand zwischen den Düsen von 20 cm gewählt, bei einem Seitenabstand zur Wand von 70 cm.

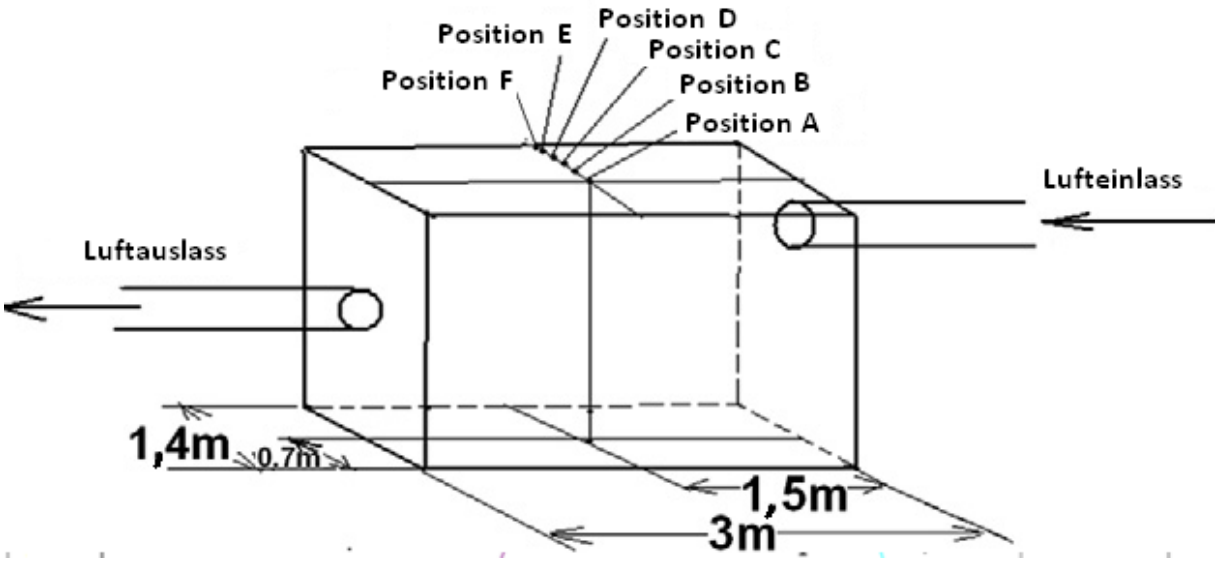


Abbildung 5-19: Variationen der Düsenposition 4A-F

Abbildung Abbildung 5-19 zeigt Variationen der Düsenposition 4 A-F in der Staubabscheidekammer. Jede dieser Positionen 4 A-F wurde mit 2 Düsen welche in unterschiedlichen Distanzen zueinander angebracht waren (Distanzen zwischen 0,02-0,8m) analysiert wie in Abbildung 5-20 zu sehen ist.

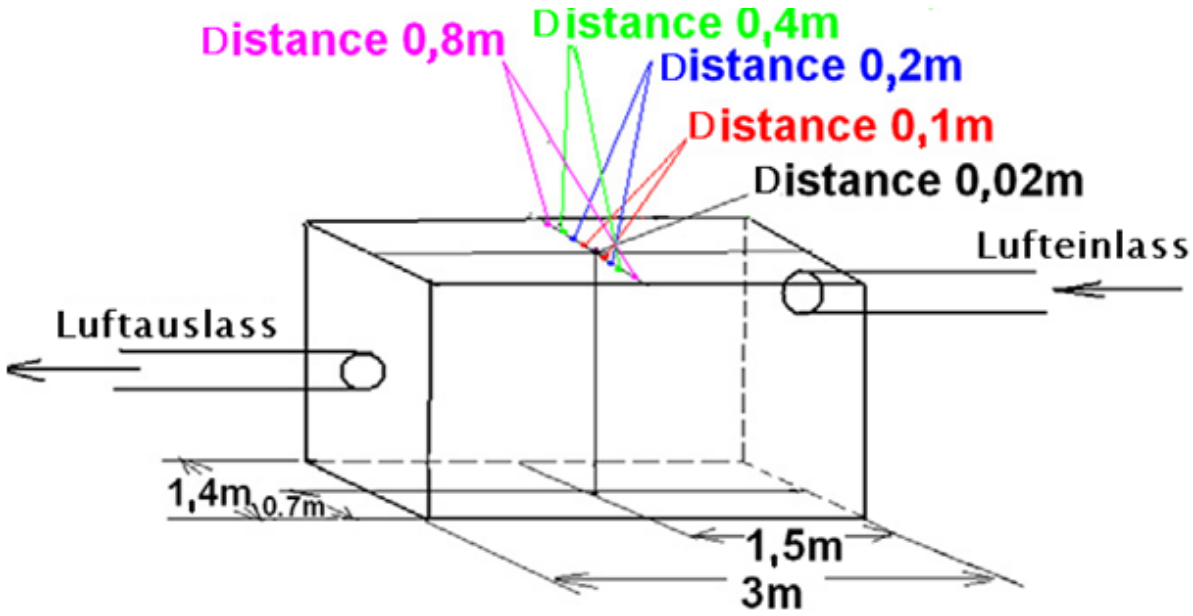


Abbildung 5-20: Variationen der Düsenabstände je Düsenposition

Die Düsenarrangements der experimentellen Versuche zu Position 4 sind:

1.	Position 4 A_0:	eine Düse im Zentrum.
2.	Position 4 A_2:	Zwei Düsen im Abstand von 2 cm voneinander.
3.	Position 4 A_{10}:	Zwei Düsen im Abstand von 10 cm voneinander.
4.	Position 4 A_{20}:	Zwei Düsen im Abstand von 20 cm voneinander.
5.	Position 4 A_{40}:	Zwei Düsen im Abstand von 40 cm voneinander.
6.	Position 4 A_{80}:	Zwei Düsen im Abstand von 80 cm voneinander.
7.	Position 4 B_0:	eine Düse im Zentrum.
8.	Position 4 B_2:	Zwei Düsen im Abstand von 2 cm voneinander.
9.	Position 4 B_{10}:	Zwei Düsen im Abstand von 10 cm voneinander.
10.	Position 4 B_{20}:	Zwei Düsen im Abstand von 20 cm voneinander.
11.	Position 4 B_{40}:	Zwei Düsen im Abstand von 40 cm voneinander.
12.	Position 4 B_{80}:	Zwei Düsen im Abstand von 80 cm voneinander.
13.	Position 4 C_0:	eine Düse im Zentrum.
14.	Position 4 C_2:	Zwei Düsen im Abstand von 2 cm voneinander.
15.	Position 4 C_{10}:	Zwei Düsen im Abstand von 10 cm voneinander.
16.	Position 4 C_{20}:	Zwei Düsen im Abstand von 20 cm voneinander.
17.	Position 4 C_{40}:	Zwei Düsen im Abstand von 40 cm voneinander.
18.	Position 4 C_{80}:	Zwei Düsen im Abstand von 80 cm voneinander.
19.	Position 4 D_0:	eine Düse im Zentrum.
20.	Position 4 D_2:	Zwei Düsen im Abstand von 2 cm voneinander.
21.	Position 4 D_{10}:	Zwei Düsen im Abstand von 10 cm voneinander.
22.	Position 4 D_{20}:	Zwei Düsen im Abstand von 20 cm voneinander.
23.	Position 4 D_{40}:	Zwei Düsen im Abstand von 40 cm voneinander.
24.	Position 4 D_{80}:	Zwei Düsen im Abstand von 80 cm voneinander.

25. Position 4 E_0: eine Düse im Zentrum.
26. Position 4 E_2: Zwei Düsen im Abstand von 2 cm voneinander.
27. Position 4 E_{10}: Zwei Düsen im Abstand von 10 cm voneinander.
28. Position 4 E_{20}: Zwei Düsen im Abstand von 20 cm voneinander.
29. Position 4 E_{40}: Zwei Düsen im Abstand von 40 cm voneinander.
30. Position 4 E_{80}: Zwei Düsen im Abstand von 80 cm voneinander.

31. Position 4 F_0: eine Düse im Zentrum.
32. Position 4 F_2: Zwei Düsen im Abstand von 2 cm voneinander.
33. Position 4 F_{10}: Zwei Düsen im Abstand von 10 cm voneinander.
34. Position 4 F_{20}: Zwei Düsen im Abstand von 20 cm voneinander.
35. Position 4 F_{40}: Zwei Düsen im Abstand von 40 cm voneinander.
36. Position 4 F_{80}: Zwei Düsen im Abstand von 80 cm voneinander.

Die Strömung der staubbeladenen Luft durch die Einhausung ist aufgrund des Aufbaus der Staubabscheidekammer eine Art Kurzschlussströmung. In dieser können nun in verschiedenen Abständen zur Seite Düsen Positioniert werden, sodass diese bei der Staubabscheidung unterschiedlichen Strömungsbedingungen ausgesetzt sind.
Die Variation der Düsenposition 4 von 2 Düsen in unterschiedlichen Abständen zueinander und in unterschiedlichen Positionen im Kasten dient zum Feststellen der Abhängigkeit der sekundären Staubabscheidung von den Strömungsbedingungen sowie dazu zu untersuchen ob ein Verteilen des Wasservolumenstromes auf mehrere Düsen die sekundäre Staubabscheideeffektivität verbessert oder ob es wirksamer ist den gesamten Wasservolumenstrom zu fokussieren.

5.2.3 Auswertung der Messungen der sekundären Staubabscheidung bei Standarddüsenposition

Die Messungen werden mit dem PCS durchgeführt. Hierfür gibt man dem Programm die Messdauer, die Anzahl der Messungen sowie die Dichte des zu vermessenden Teststaubs bekannt. Zusätzlich wählt man noch einen für die Messung passenden Partikel Größenbereich (0,6 µm bis 40 µm).

Der in 5.1.3.3 beschriebene Streulichtpartikelzähler liefert je Messung unter anderem eine Tabelle mit folgenden Werten.

x_u	Unterer Partikeldurchmesser
x_o	Oberer Partikeldurchmesser
x	Mittlerer Partikeldurchmesser
N	Partikelanzahl

5.2.3.1 Partikelgrößenverteilung

Aus diesen Daten (Partikelanzahl N je Größenklasse x) kann dann die Partikelgrößenverteilung ermittelt werden. Abbildung 5-21 zeigt ein Beispiel dafür. Hier werden eine Rohgasmessung und verschiedene Reingasmessungen gemeinsam in einem Diagramm aufgetragen.

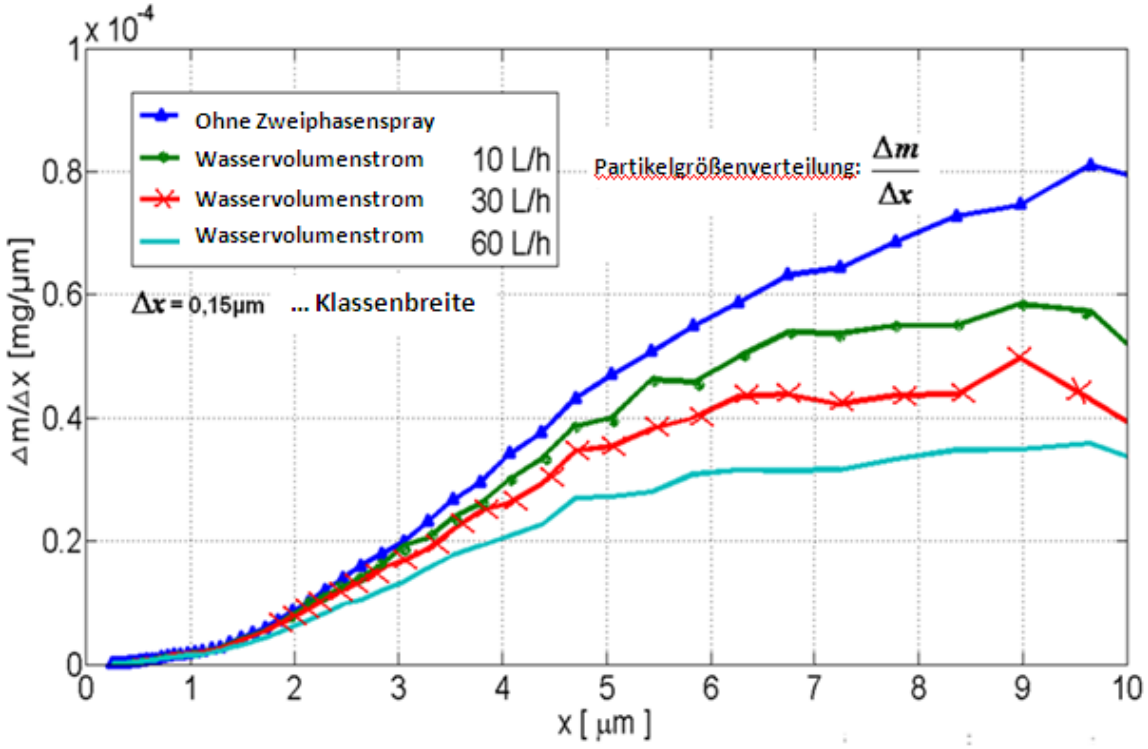


Abbildung 5-21: Partikelgrößenverteilung [69] bei einer Luftwechselzahl von 56/h und Standarddüsenposition

5.2.3.2 Fraktionsabscheidegrad

Aus den erhaltenen Daten, kann nun der Fraktionsabscheidegrad berechnet werden. Hierbei handelt es sich um den Abscheidegrad für vorgegebene Partikelgrößen bzw. Partikelgrößenklassen.

Der Fraktionsabscheidegrad ist für jede Partikelgröße oder jeden Partikelgrößenbereich definiert als das Verhältnis der abgeschiedenen Partikelanzahl zu der zugeführten Partikelanzahl.

Da das PCS die nach der Reinigung verbliebenen Partikel misst, erhält man den Fraktionsabscheidegrad pro Klasse indem die Partikelanzahl in einer Klasse der Reingasmessung durch die Partikelanzahl in der zugehörigen Klasse der Rohgasmessung dividiert und von 1 subtrahiert (5-1) wird.

$$T(\bar{x}) = 1 - \frac{\Delta N_{Reingas}(\bar{x})}{\Delta N_{Rohgas}(\bar{x})} \qquad (5\text{-}1)$$

$T(\bar{x})$ Fraktionsabscheidegrad der Partikelgröße x []

$\Delta N_{Rohgas}(\bar{x})$ Partikelanzahl die sich bei der Rohgasmessung in der Klasse x befinden []

$\Delta N_{Reingas}(\bar{x})$ Partikelanzahl die sich bei der Reingasmessung in der Klasse x befinden []

5.2.3.3 Korrektur des Fraktionsabscheidegrades

Bei jedem Wasservolumenstrom werden Reingasmessungen bestehend aus 5 Einzelmessungen durchgeführt und jeweils zu Beginn und am Ende eine Rohgasmessung bestehend aus 5 Einzelmessungen. Zusätzlich werden dann noch die Messungen wie in 5.2.1 beschrieben durchgeführt. Hierbei werden bei denselben Wasservolumenströmen wie bei der Reingasmessung je 5 Messungen durchgeführt bei denen der Außenluft kein Staub beigemischt wird. So steht zur Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades pro Reingasmessung eine über 15 Rohgasmessungen gemittelte Rohgasmessung zu Verfügung, mittels der man nun pro Volumenstrom 5 Fraktionsabscheidegrade ermitteln kann. Diese wieder gemittelt ergeben dann den in Abbildung 5-23 ersichtlichen Kurvenverlauf und die daraus ermittelten Standardabweichungen, die Fehlerbreiten pro Wasservolumenstrom.

In Formel **(5-2**) wird wie in Kapitel 5.2.3.1 beschrieben die Partikelanzahl der Tröpfchen die sich in der Klasse x befinden von der ermittelten Partikelanzahl der Reingasmessung in der Klasse x abgezogen und dann durch die Partikelanzahl die sich bei der Rohgasmessung in der Klasse x befindet dividiert und dann von 1 subtrahiert.

$$T(\bar{x}) = 1 - \frac{\Delta N_{Reingas}(\bar{x}) - \Delta N_{Tropfen}(\bar{x})}{\Delta N_{Rohgas}(\bar{x})} \tag{5-2}$$

$\Delta N_{Tropfen}(\bar{x})$ Partikelanzahl der Tröpfchen die sich in der Klasse x befinden []

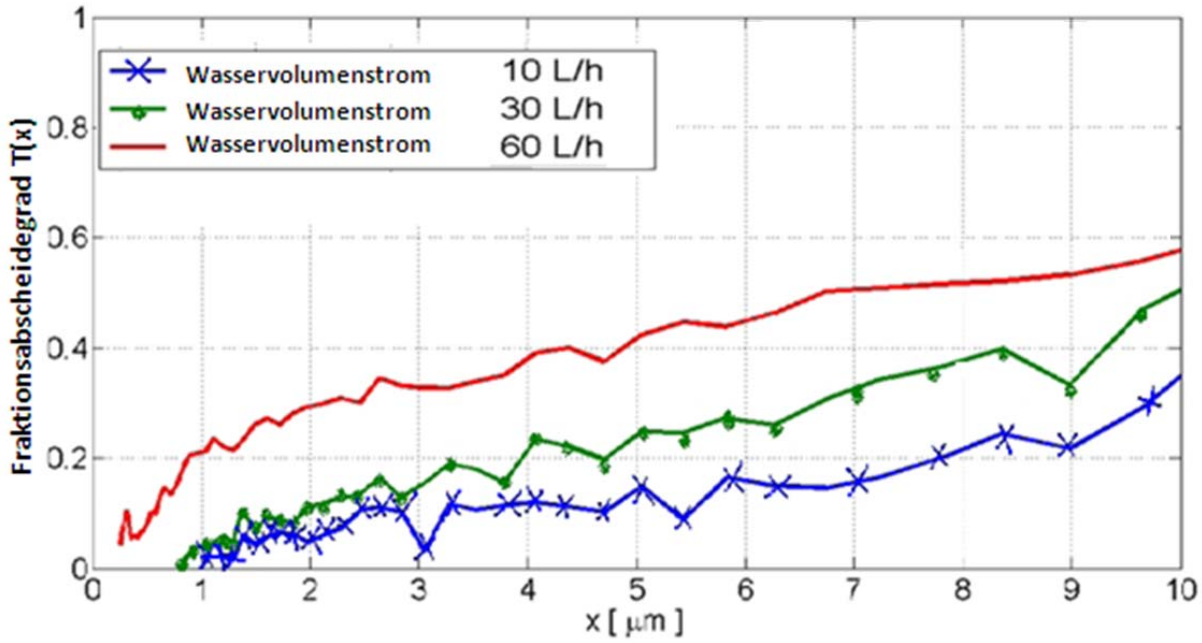


Abbildung 5-22: Fraktionsabscheidegrad [2] bei einer Luftwechselzahl von 56/h und Standarddüsenposition

In Abbildung 5-23 kann man anhand eines Beispiels die bestimmten Fraktionsabscheidegrade pro Klasse sehen.

5.2.3.4 Korrigierter Gesamtabscheidegrad bzw. sekundäre Staubabscheideeffektivität

Weiters kann nun der PM(x) Gesamtabscheidegrad mittels Formel (5-6) berechnet werden. Hierbei handelt es sich um die Abscheideleistung der Zweistoffdüse. Er ist definiert als das Verhältnis der gesamten zurückgehaltenen Partikelanzahl unterhalb einer bestimmten Partikelgröße ≤ x_O der Verunreinigungen zu der gesamten zugeführten Partikelanzahl unterhalb einer bestimmten Partikelgröße ≤ x_O der Verunreinigungen. Hierfür werden die berechneten Fraktionsabscheidegrade bis zu einer bestimmten Größe aufsummiert (Gesamtabscheidegrad PM10 ist die Summe der korrigierten Fraktionsabscheidegrade von 0,6 µm bis 10 µm).

$$\eta 2 = PM(x_O)\ Gesamtabscheidegrad = 1 - \frac{\sum_0^x \Delta N_{Reingas}(x_O) - \sum_0^x \Delta N_{Tropfen}(x_O)}{\sum_0^x \Delta N_{Rohgas}\ (x_O)} \qquad (5\text{-}6)$$

$PM(x_O)$: Gesamtabscheidegrad unterhalb einer bestimmten Partikelgröße ≤ x_O []

Durch Berechnung des Gesamtabscheidegrades für PM10 lässt sich die sekundäre Staubabscheideeffektivität für PM10 ermittln, da:

PM10 Gesamtabscheidegrad =η_2 sekundäre Staubabscheideeffektivität

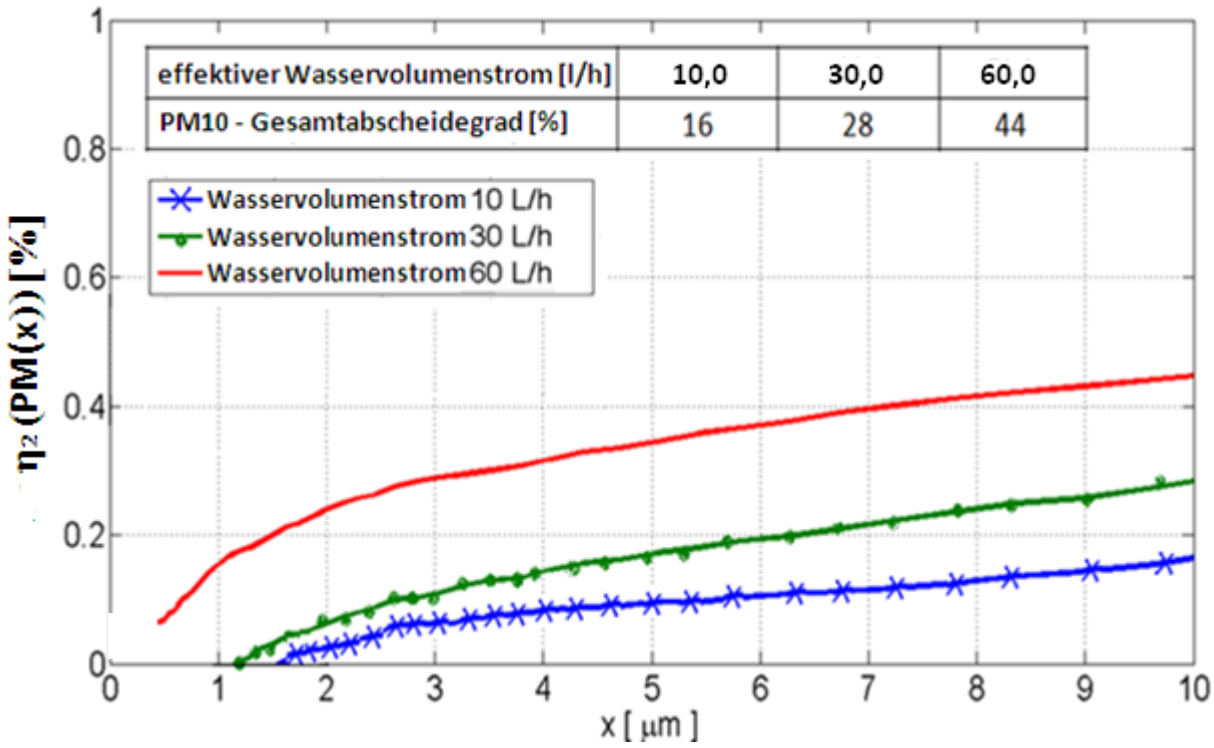


Abbildung 5-23: PM(x) Gesamtabscheidegrad [69]

Wie man am Beispiel in Abbildung 5-23 sehen kann, weisen die Kurven einen stetigen Anstieg auf. Hierbei ist auf der Ordinate der PM(x) Gesamtabscheidegrad aufgetragen und auf der Abszisse die Partikelgröße.

5.2.4 Ergebnisse der Messung der sekundären Staubabscheidung bei unterschiedlichen Bedingungen

Um die Auswirkungen des Luftvolumenstroms auf den Gesamtabscheidegrad zu bestimmen, werden bei den Versuchen zwei Luftwechselzahlen von 25 /h bzw. 77 /h eingestellt. Der Luftvolumenstrom durch die Kammer lässt sich dann durch Multiplizieren des Volumens in der Kammer (entspricht 6,8 m³) mit der Luftwechselzahl bestimmen.

Weiters werden auch der Wasservolumenstrom, die Düsenpositionen (1 – 4) (siehe Kapitel 5.2.2.1), sowie die Anzahl (1 der 2 Düsen) verändert.

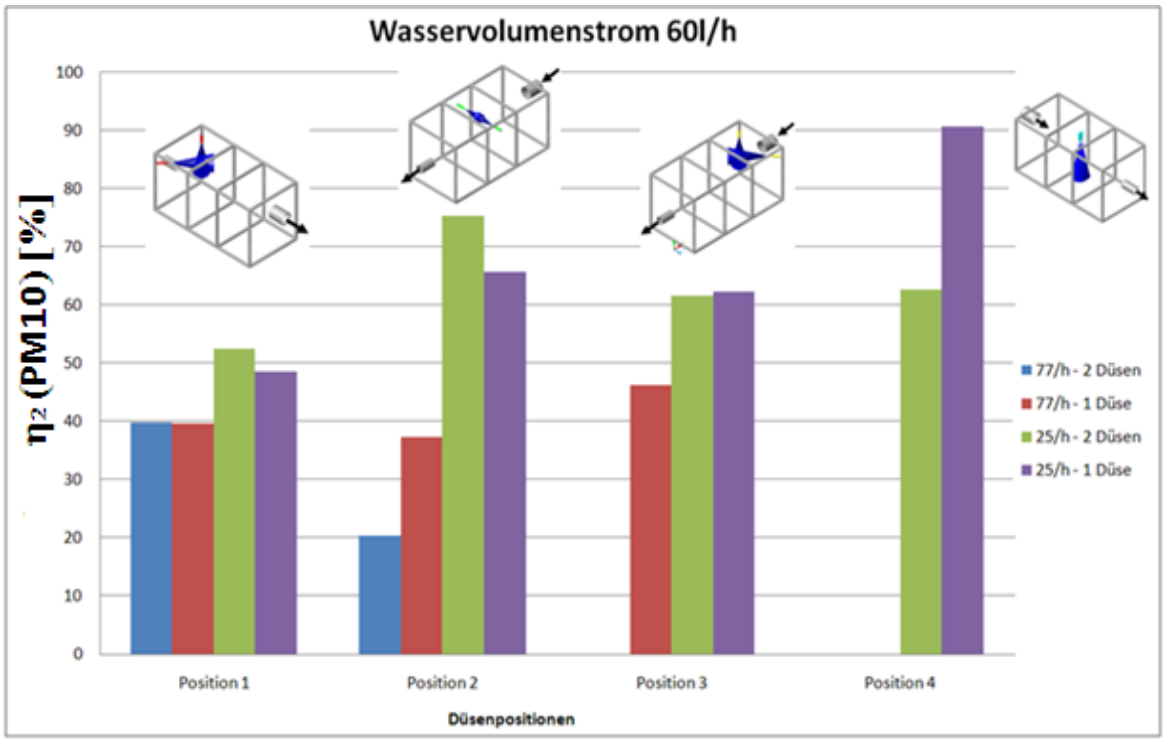


Abbildung 5-24: Gesamtabscheidegrad PM10 bei einem Düsenwasservolumenstrom von 60L/h

In Abbildung 5-24 ist der Gesamtabscheidegrad von PM10 über die Düsenposition aufgetragen. Als Beispiel wurde ein Wasservolumenstrom von 60 L/h herausgegriffen (Luftwechselzahl von 25/h sowie 77/h, bei einer oder zwei aktiven Düsen).

Aus Abbildung 5-24 kann man schließen, dass bei geringeren Luftvolumenströmen ein höherer Gesamtabscheidegrad zu erwarten ist als bei hohen Luftvolumenströmen. Jedoch ist der Unterschied der Abscheidegrade hervorgerufen durch verschiedene Luftvolumenströme auch von der Düsenposition und der Anzahl der Düsen abhängig. Je nach Düsenposition wirkt sich der Luftvolumenstrom unterschiedlich stark aus. z.B.: wirkt sich ein unterschiedlicher Luftvolumenstrom auf den Gesamtabscheidegrad einer Düse in Position 1 schwächer aus als auf den Gesamtabscheidegrad einer Düse in Position 2.

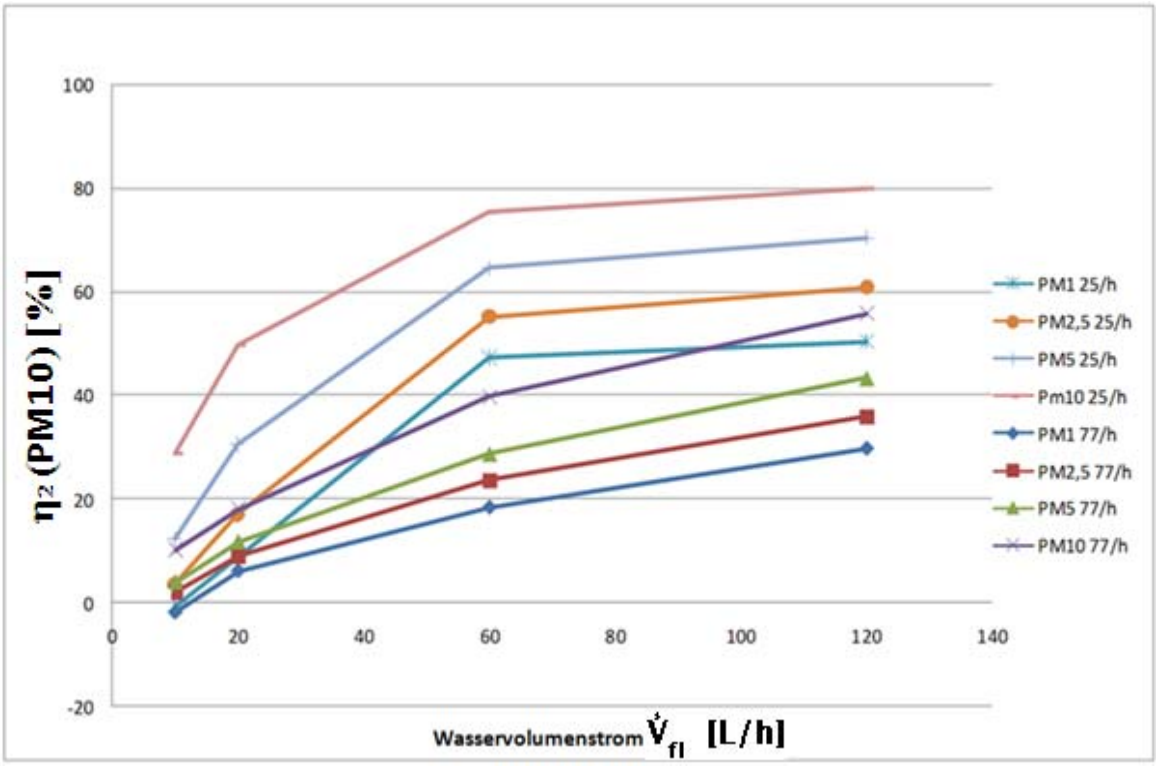


Abbildung 5-25: Gesamtabscheidegrad über verschiedene Wasservolumenströme bei der Düsenposition 2

In Abbildung 5-25 ist der Gesamtabscheidegrad von PM1-PM10 zweier Düsen über den Wasservolumenstrom aufgetragen. Diese Versuche werden bei einer Luftwechselzahl von 25/h und 77/h durchgeführt.

Aus Abbildung 5-25 kann man erkennen, dass sich je nach Partikelgröße und Wasservolumenstrom Veränderungen des Luftvolumenstromes stärker oder schwächer auf den Gesamtabscheidegrad auswirken. z.B.: Sind PM1 Gesamtabscheidegrade bis etwa 20L/h für beide Luftwechselzahlen ident und erst oberhalb von 20L/h unterschiedlich. Beim PM2,5 Gesamtabscheidegrad treten schon bei geringeren Wasservolumenströmen unterschiede durch verschiedene Luftvolmenströme auf. Dieser Trend setzt sich fort bis beim PM10 Gesamtabscheidegrad bei allen Wasservolumenströmen Unterschiede durch verschiedene Luftvolumenströme zu Tage treten.

Daraus kann man den Schluss ziehen, dass der Luftvolumenstrom je nach Partikelgröße erst bei höheren Wasservolumenströmen einen Einfluss auf die Staubabscheidung hat.

5.2.4.1 Auswirkung der Düsenposition und Düsenanzahl auf den Gesamtabscheidegrad

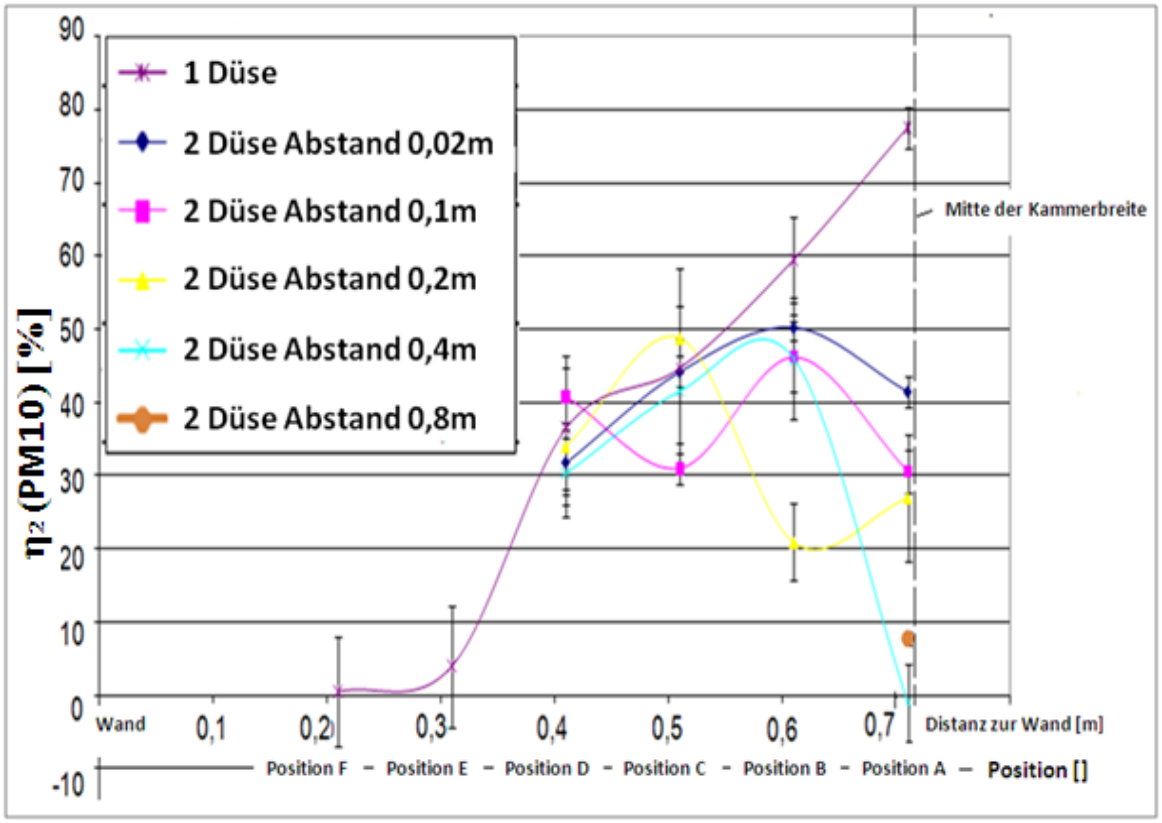


Abbildung 5-26: Variation der Düsenposition 4 bei einem Wasservolumenstrom von 10 L/h und einer Luftwechselzahl von 25/h

In Abbildung 5-26 ist der PM10 Gesamtabscheidegrad bei 10L/h Wasservolumenstrom und einer Luftwechselzahl von 25/h über verschiedene Düsenpositionen wie sie in Kapitel 5.2.2 beschrieben wurde aufgetragen. Da symmetrische Strömungsverhältnisse wegen der Kastengeometrie angenommen werden können, ist nur die halbe Kammer in der Abbildung 5-26 dargestellt.

In Abbildung 5-26 kann man sehen, dass sich bei Variation der Düsenposition 4 eine starke Veränderung des Gesamtabscheidegrades zeigt.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass die Wirkung der Düse sehr von ihrer Position abhängt und eng mit den Strömungsverhältnissen bzw. Konzentrationsverhältnissen in der Kammer verknüpft ist. (In der Abscheidekammer herrschen aufgrund der Geometrie unterschiedliche Strömungs- und Konzentrationsverhältnisse)

Man sieht umso größer der Abstand zwischen den beiden Düsen umso schlechter die Abscheidewirkung. Jedoch ist 1 Düse noch besser als 2 Düsen ganz knapp nebeneinander, was auf Koaleszenz der Tropfen schließen lässt falls 2 Düsen zu nahe nebeneinander wirksam sind. Dieser Trend wurde ebenfalls für verschiedene Wasservolumenströme gefunden siehe Abbildung 5-27.

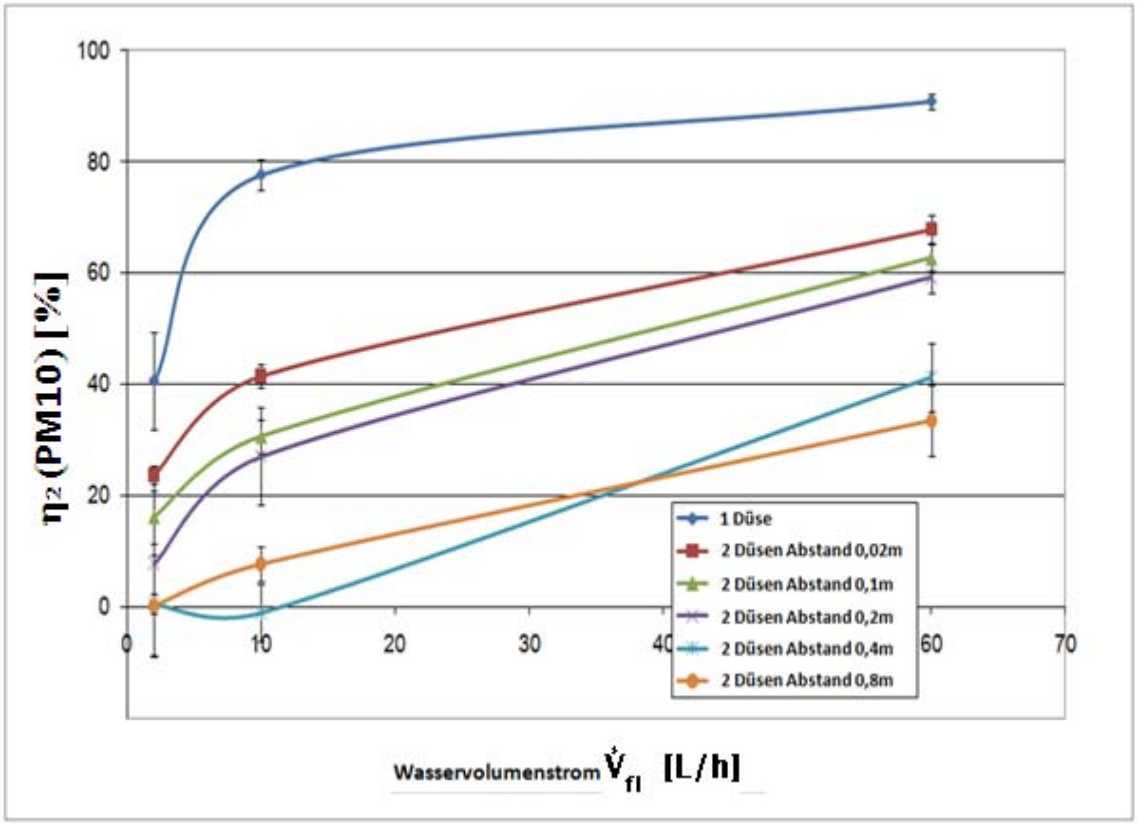


Abbildung 5-27: Gesamtabscheidegrad η_2 (PM10) über dem Wasservolumenstrom bei Düsenposition 4 bei einer Luftwechselzahl von 25/h

In Abbildung 5-27 ist der Gesamtabscheidegrad von PM10 über den Wasservolumenstrom aufgetragen. Dabei werden wieder, wie in Kapitel 5.2.2.1.6 beschrieben, verschiedene Variationen der Düsenposition 4, an der Position A vorgenommen.

Ob eine Düse besser ist als 2 Düsen nebeneinander hängt also stark vom Abstand der Düsen dem Wasservolumenstrom und der Düsenposition ab.

5.2.4.2 Auswirkung des Wasservolumenstroms auf den Gesamtabscheidegrad

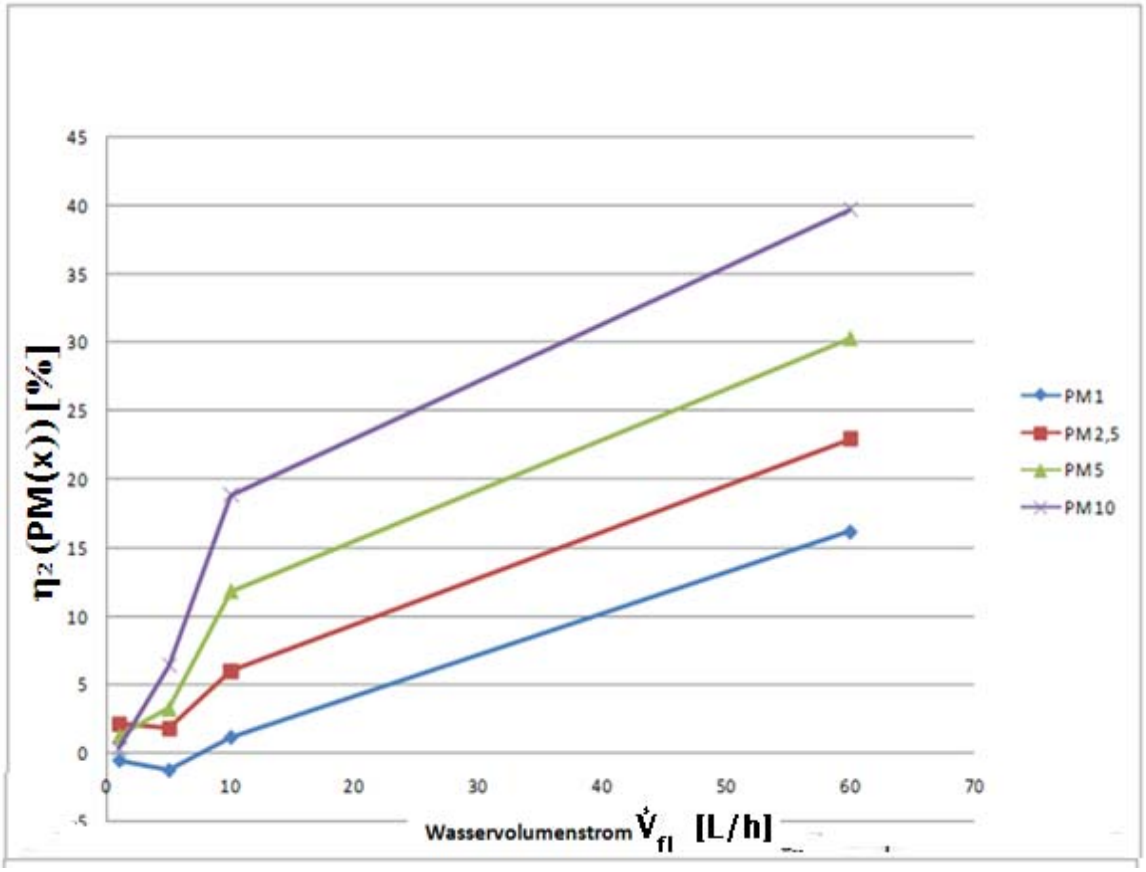


Abbildung 5-28: Gesamtabscheidegrad einer Düse über dem Wasservolumenstrom bei der Düsenposition 1 bei einer Luftwechselzahl von 77/h

In Abbildung 5-28 ist der Gesamtabscheidegrad von PM1-PM10 einer Düse über den Wasservolumenstrom aufgetragen. Diese Versuche werden bei einer Luftwechselzahl von 77/h durchgeführt.

Die Auswirkungen des Wasservolumenstroms bei Düsenposition 1 bzw. 2 werden in Abbildung 5-28 dargestellt. In Abbildung 5-26 wird die Düsenposition 4 bei steigendem Wasservolumenstrom variiert (wie in Kapitel 5.2.2.1.6 beschrieben wurde). Hierin ist ersichtlich, dass der Gesamtabscheidegrad von PM1 – PM10 bei einer bzw. zwei Düsen, bei verschieden Düsenpositionen und einer Luftwechselzahl von 25/h bzw. 77/h, also bei allen Variationsmöglichkeiten, mit steigendem Wasservolumenstrom exponentiell sich einem Endwert nähert. Jedoch ist die Krümmung des exponentiellen Anstieges des Gesamtabscheidegrades je nach eingestellten Parametern unterschiedlich.

5.2.4.3 Einfluss der Partikelgröße auf den Gesamtabscheidegrad je Düsenposition

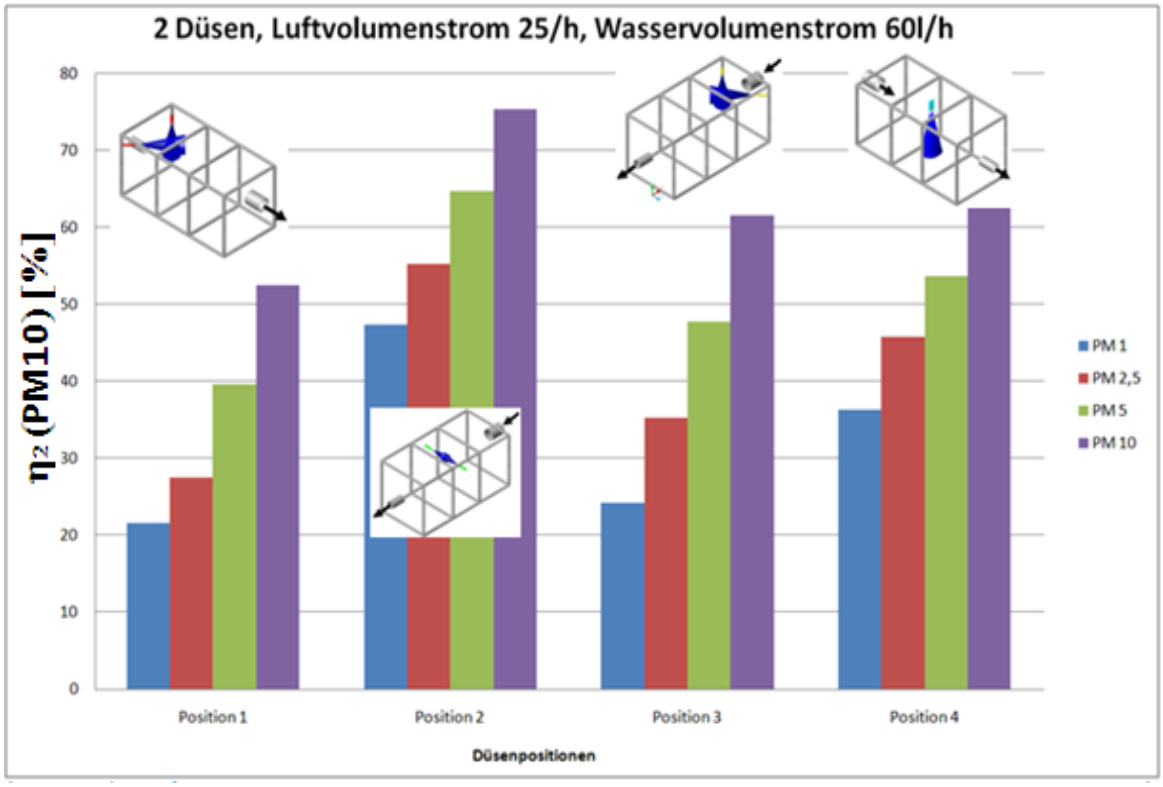


Abbildung 5-29: Gesamtabscheidegrad PM1 - PM10 von 2 Düsen mit 60l/h über die Düsenpositionen 1 – 4 bei einer Luftwechselzahl von 25/h und einem Wasservolumenstrom von 60L/h

In Abbildung 5-29 ist der Gesamtabscheidegrad von PM1 – PM10 über die vier Düsenpositionen, wie in Kapitel 5.2.2.1.2 bis 5.2.2.1.5 beschrieben, aufgetragen. Dies wird bei einer Luftwechselzahl von 25/h und 2 Düsen mit einem Wasservolumenstrom von 60lL/h durchgeführt.

Egal bei welcher Position ist der prozentuelle Unterschied zwischen dem Gesamtabscheidegrad von PM1 zu PM10 bzw. auch bei PM2,5 zu PM10 und PM5 zu PM10 gleich, das ist in Abbildung 5-30 ersichtlich.

Wie in Abbildung 5-29 ersichtlich, steigt der Gesamtabscheidegrad mit der Partikelgröße an und zwar mit fast gleicher Steigerung egal bei welcher Position. Die Differenz z.B.: zwischen PM1 und PM10 Gesamtabscheidegrad ändert sich mit der Düsenposition kaum.

Dadurch ergibt sich, dass es keine Einstellung gibt, wo prozentuell mehr feine und weniger grobe Partikel abgeschieden werden.

5.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der sekundären Staubabscheidung

Die Aufgabe bestand darin, eine Messmethode zu entwickeln, mit der es möglich ist, Aussagen über die Wirksamkeit einer Zweistoffdüse im Hinblick auf Ihre sekundäre Staubabscheidung zu machen. Es wurde ein Messverfahren ausgearbeitet mit dessen Hilfe die staubunterdrückende Wirkung einer Zweistoffdüse in der bestehenden Anlage reproduzierbar gemessen werden kann.

Hierfür wurde eigens eine Versuchsapparatur konstruiert, die es erlaubt, den optimalen Gesamtabscheidegrad einer Zweistoffdüse durch Variation folgender drei Größen zu bestimmen:

- Wasservolumenstrom durch die Zweistoffdüse
- Position der Zweistoffdüse in der Kammer
- Luftvolumenstrom durch die Kammer
- Wirksamkeit von 1 Düse im Vergleich zu 2 Düsen mit unterschiedlichen Abständen zueinander

Mittels der durchgeführten Messungen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Es wurde ein Diagramm erstellt durch das man abschätzen kann welchen Wasservolumenstrom man je Luftvolumenstrom (Windgeschwindigkeit) zur ausreichenden Abscheidung von PM1 bis PM10 benötigt.
- Es wurde die Staubabscheidung von 1 und 2 Düsen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass 2 Düsen nebeneinander umso wirksamer sind je kleiner der Abstand zwischen ihnen wird. Jedoch ist der Staubabscheidegrad 1 Düse beim selben Gesamtwasservolumenstrom besser als von 2 Düsen direkt nebeneinander (Koaleszenz der Tropfen).

5.3 Theoretische Betrachtungen der sekundären Staubabscheidung

Die sekundäre Staubabscheidungseffektivität η_2 wurde im vorigen Kapitel 5.2 in Abhängigkeit verschiedener Bedüsungsparameter (Wasservolumenstrom, Düsenhöhe (Düsenposition), Düsenanzahl, Abstand der Düsen zueinander) und verschiedener Einflussparameter der Strömung (verschiedene Luftvolumenströme) untersucht. Diese Untersuchung förderte interessante Zusammenhänge zwischen der sekundären Staubabscheideeffektifität η_2 für PM1 bis PM10 und den verwendeten Bedüsungsparametern sowie Luftvolumenströmen (Windgeschwindigkeit) zu Tage.

Es wurde also experimentell aufgeklärt wie das Niedernebeln des Staubes aus der Luft beeinflusst werden kann, durch verschiedene Düsenpositionen bzw. Düsenabstände und Düsenanzahlen. Um zu verstehen warum bestimmte Bedüsungsparameter sich vorteilhaft auf die Staubabscheidung aus der Luft auswirken sollen im nächsten Schritt die gefundenen Zusammenhänge (Staubabscheidung Bedüsungsparameter, Strömungsparameter) theoretisch analysiert werden. Durch Berechnung des Abscheidegrades des Staubes durch Tropfen sollen Einblicke welche Umgebungseinflüsse wie Luftgeschwindigkeit, Tropfengröße und Konzentration die Staubabscheidung beeinflussen. Damit diese Abscheidemechanismen die am Tropfen durch das Barth- Schuch-Löffler-Modell berechnet werden sollen, ablaufen können muss jedoch geklärt werden wie der Staub an den Spray herantransportiert wird (ob die Staubwolke dem Spray ausweicht), wo wirksame Bereiche des

Sprays liegen und welche Bedingungen dort herrschen. Das soll im Folgenden durch eine CFD Simulation geklärt werden. Zum einen soll die CFD Simulation der Strömungsbedingungen während der Abscheidung, welche über die Berechnung der Tropfen und Partikelflugbahnen aufgeklärt wird, einen Aufschluss über Verhältnisse geben welche sich Vorteilhaft auf die Staubabscheidung auswirken, zum anderen sollen theoretische Berechnungen des Abscheidegrades über das Barth/Schuch/Löffler Modell erkennen lassen wieviel theoretisch möglich wäre und wodurch die Praxis hier Grenzen setzt.

5.3.1 CFD Simulation der sekundären Staubabscheidung [52]

Die Strömung der staubbeladenen Luft durch die Einhausung ist aufgrund des Aufbaus der Staubabscheidekammer eine Art Kurzschlussströmung. In dieser können nun in verschiedenen Abständen zur Seite Düsen Positioniert werden, sodass diese bei der Staubabscheidung unterschiedlichen Strömungsbedingungen ausgesetzt sind.
Die Variation der Düsenpositionen von 2 Düsen in unterschiedlichen Abständen zueinander und in unterschiedlichen Positionen im Kasten dient zum Feststellen der Abhängigkeit der sekundären Staubabscheidung von den Strömungsbedingungen sowie dazu zu untersuchen ob ein Verteilen des Wasservolumenstromes auf mehrere Düsen die sekundäre Staubabscheideeffektivität verbessert oder ob es wirksamer ist den gesamten Wasservolumenstrom zu fokussieren. Um dies untersuchen zu können wurde die Staubabscheidekammer also so konzipiert, dass eine Kurzschlussströmung staubbeladener Luft durch die Kammer geführt wird und seitlich davon jeweils andere Strömungsbedingungen herrschen. Somit kann die wirksamkeit der Düsen bei unterschiedlichen bedingungen experimentell untersucht werden. Im Folgenden soll mittels CFD die Strömungsbeingungen in der Staubabscheidekammer analysiert werden.

Im Folgenden soll der Einfluss der Strömungsbedingungen auf die sekundäre Abscheideeffektivität einer Zweistoffdüse untersucht werden. Um die unterschiedlichen experimentellen Ergebnisse bei der sekundären Staubabscheidung bei Veränderung der Betriebsparameter der Zweistoffdüse zu verstehen, wurde eine numerische Simulation der Strömungsverhältnisse während des Staubabscheidens durchgeführt. Deshalb soll die Durchmischung zwischen Tropfen- und Partikelkollektiven genauso simuliert werden wie der Einfluss auf die Durchmischung durch unterschiedliche Besprühungsparameter der Düsen. Als unterschiedliche Bedüsungsparameter sollen ausgewählte Parameter die auch experimentell untersucht wurden gewählt werden und zwar 3 verschiedene Düsenpositionen sowie der Verglich von einer und 2 Düsen in unterschiedlichen Abständen zueinander sowie 2 verschiedene Luftvolumenströme.

Aufbauend auf die durchgeführten experimentellen Untersuchungen sollen folgende Aspekte durch die CFD Simulation abgedeckt werden:

- Welche Faktoren beeinflussen das Sprühbild des Sprays.
- Wie unterscheidet sich die Ausbreitung eines Tropfenkollektieves je Tropfengröße.
- Wie gestaltet sich die Ausbildung des Sprühbildes je Tropfengröße.
- Welche Faktoren beeinflussen die Strömung der Tropfen der Düse und wie kann die Bewegung der Tropfen beeinflusst bzw. kontrolliert werden.
- Wie wird der partikelbeladene Querstrom durch den Effekt einer Düse beeinflusst.

- Wie umströmen die Partikel der Luftströmung den Tropfenspray.
- Welche Bedüsungsparameter beeinflussen die Staubreduktionseffektivität der Sprühdüse.

Als Ziel sollen allgemeine Trends des Einflusses der Bedüsungsparameter auf die Staubabscheidung im Kontext der Beeinflussung der Umströmung eines Sprays mit partikelbeladener Luft bei verschiedenen Bedüsungsparametern gewonnen werden.

5.3.1.1 Theoretische Grundlagen der CFD Simulation

Computational fluid dynamics (CFD) ist ein modernes Werkzeug um die Bewegung eines Strömungsmediums analysieren zu können welches aufgrund der gesteigerten Speicherkapazitäten und Entwicklung von erschwinglichen Hochleistungsrechnern in den vergangenen 30 Jahren stark an Bedeutung gewonnen hat. Heute wird CFD als Problemlösungsstrategie neben theoretischen und praktischen Ansätzen von Industrie und Forschung auf breiter Basis in der Strömungsmechanik eingesetzt. CFD-Kodes finden Anwendung in zahlreichen Gebieten wie Konstruktion und Design sowie Problemanalyse und Leistungsanalyse.CFD Simulationen können gestützt durch experimentelle Daten einen detaillierteren Einblick in Phänomene der Durchmischung und Strömung zulassen als experimentelle Ergebnisse es tun.

Es soll im Folgenden Schritt für Schritt der Aufbau die Anwendung und Struktur einer CFD Modellierung unter Verwendung der kommerziellen CFD Software FLUENT 3.26 erläutert werden.

5.3.1.1.1 Einführung in CFD

CFD wendet numerische Methoden an um approximierte Lösungen für Strömungsgesetzte z.B.: Schwerpunktsatz, Momentenberechnung und Kräftebilanzen zu Erhalten. Diese partiellen Differenzialgleichungen (PDEs) werden numerisch gelöst.

Die am häufigsten verwendete Methode im CFD ist die Finite-Volumen-Methode (FVM), welche auch als Grundlage für Fluent verwendet wird. Die Finite-Volumen-Methode verweist auf einen Diskretisierungsansatz um ein strömungsmechanisches Problem lösen zu können. Die Finite-Volumen-Methode und verwandte andere numerische Methoden wie Finite-Element-Methoden und Finite-Differenzen-Methode involvieren allesamt eine Diskretisierungsprozedur, welche eine Aufteilung der physikalischen Domäne in eine Vielzahl kleiner Elemente in Raum und/oder Zeit beinhaltet. Um die mathematischen Gleichungen die die Lösungen je Element beschreiben, lösen zu können werden algebraische Gleichungssätze angewendet [73]. Bei der FVM werden die geometrischen Domänen in eine Vielzahl von Kontrollvolumina (CVs) aufgeteilt und die physikalischen Vorgänge je Element separat durch die algebraischen Gleichungssätze numerisch gelöst. Diese Kontrollvolumina werden allgemein als Elemente oder Zellen bezeichnet. Die diskretisierte Darstellung der physikalischen Domäne wird als numerisches Netz bezeichnet. Die PDEs werden durch algebraische Gleichungssätze ersetzt deren Lösungen auf ein numerisches Netz angewendet, durch die Rechenleistung eines Computers berechnet werden können. Nicht alle strömungsmechanischen Phänomene können mathematisch akkurat berechnet werden, in diesen Fällen (als Beispiel seien turbulente Strömungen genannt), müssen andere Approximationen zur Beschreibung der Strömungssituation herangezogen werden.

Die numerische Simulation kann grob in zwei Bereiche unterteilt werden.

1. Erarbeitung eines numerischen Netzes
2. Lösung der algebraischen Gleichungssätze

Im Fluent wird diese Unterteilung auch durch die Aufgliederung in zwei unabhängige Softwarepakete Rechnung getragen (Abbildung 5-30a): Zum einen gelangt Gambit zur Anwendung welche eine Software ist um eine Aufgliederung in ein numerisches Netz zu generieren, zum anderen wird ein sogenanntes Solver System (FLUENT) angewendet um die numerischen Lösungen der Gleichungssätze vorzunehmen.

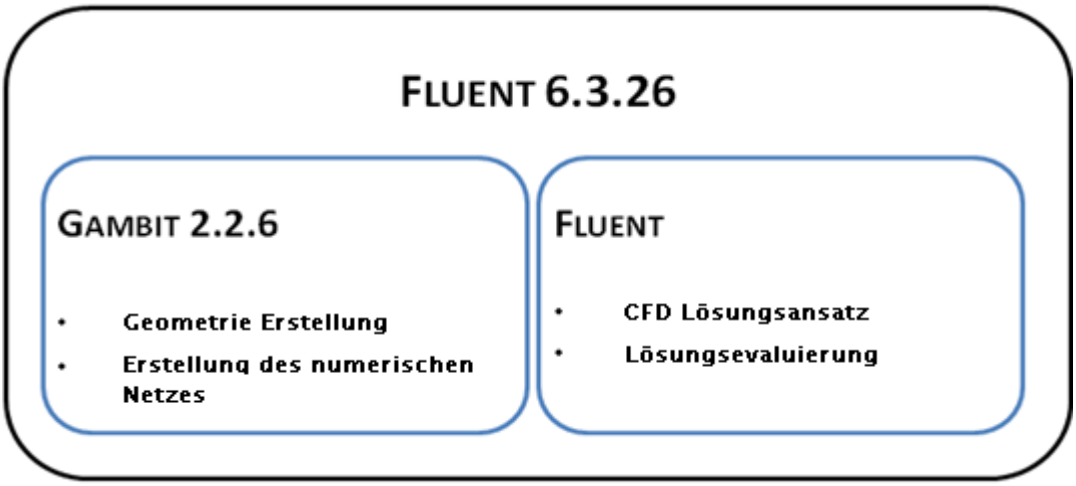


Abbildung 5-30a: ***Unterteilung derCFD Software Fluent 6.3.26***

Es existiert keine vorgefertigte Methode welche allgemein auf alle Arten von Problemen der Strömungslehre anwendbar wäre. Dies ist hauptsächlich aufgrund der Vielseitigkeit der Strömungssituationen und involvierten Geometrie nicht möglich. Für jedes strömungsmechanische Problem muss ein individueller Zugang gefunden werden um die Algorithmen die FLUENT zur Verfügung stellt optimal anzuwenden. In Anlehnung an die ERCOFTAC Best practice Guidelines [74] sollte eine gewöhnliche Prozedur um eine Fluent Simulation durchzuführen nach folgenden Schritten ablaufen (Abbildung 5-30b)

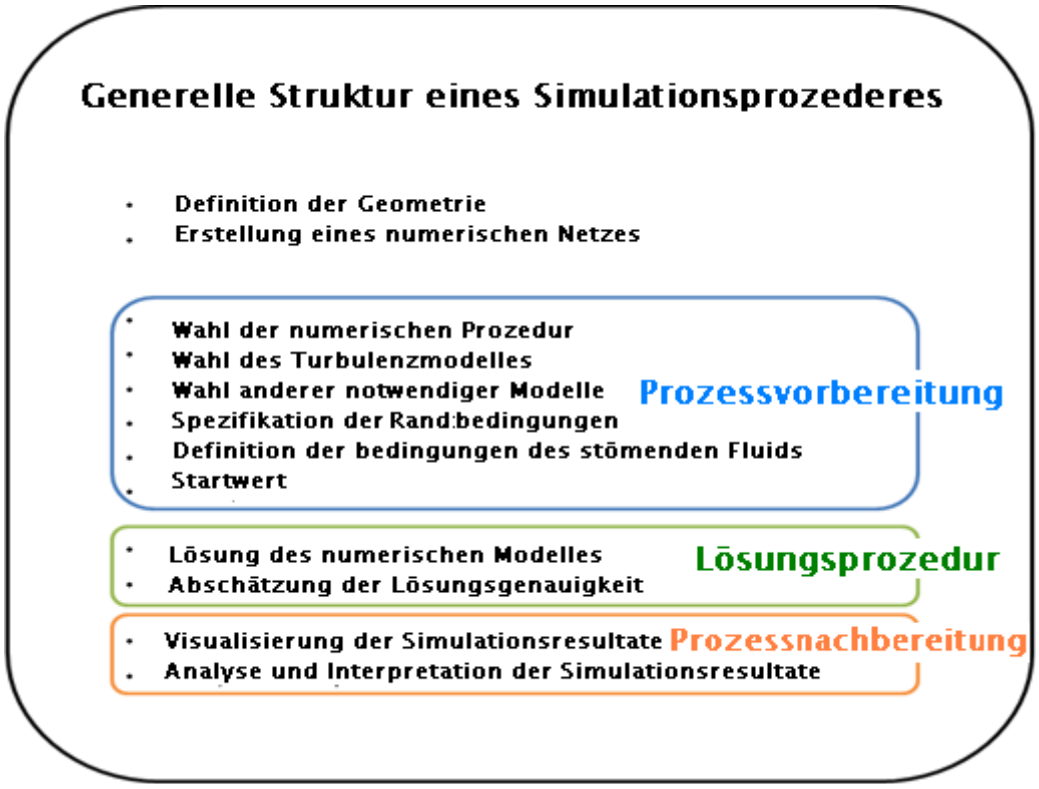


Abbildung 5-30b: ***Arbeitsschritte während einer CFD Simultion [74]***

5.3.1.1.2 Das numerische Netz:

Üblicherweise ist es nicht möglich ein komplettes System oder eine physikalische Domäne allumfassend zu simulieren. Es müssen also Bereiche, die im Detail berechnet werden sollen vom Gesamtsystem abgegrenzt werden. Diese Grenzen müssen sorgfältig gezogen werden. Denn in diesen Grenzbereichen müssen die lokalen Strömungsbedingungen definiert sein, weil die Strömungsbedingungen als Randwerte (sogenannte boundary conditions) bei der Simulation vorzugeben sind. Die Erstellung eines numerischen Netzes wird stark von der zuvor in Gambit nachgebildeten Geometrie des zu analysierenden Bereiches beeinflusst und ist ein sehr zeitaufwendiger wichtiger Schritt. Im finiten Volumen Ansatz besteht das Netz aus dreidimensionalen polyedrischen Volumenelementen. Es werden Würfel, Tetraeder, Hexagone und Hybridzellen zum Aufbau eines numerischen Netzes verwendet. Die präferierten Volumenelemente sollten aufgrund der einfacheren Rechenalgoryithmen die angewendet werden können hexaedrisch sein. Jedoch ist das Erstellen eines numerischen Netzes mit Hexagonen limitiert auf Bereiche welche aus Volumenfragmenten bestehen, die topographisch äquivalent zu einem Würfel oder Quadern bzw. welche auf Extrusion einer Oberfläche entlang einer Linie zurückzuführen sind. Daher muss die erstellte Geometrie in Volumenfragmente zerlegt werden welche auf eine einfache Ursprungsgeometrie zurückzuführen sind, damit diese durch hexagonale Volumenelemente aufgebaut werden können. Es können strukturierte oder unstrukturierte numerische Netze entstehen. Strukturierte Netzte haben den Vorteil, dass die Position der Zellen im drei Dimensionen identifiziert werden kann bei einem Satz von 3 Indizes, was den Lösungsalgorithmus vereinfacht. Natürlich können strukturierte Netze nur bei einfachen Geometrien erstellt werden. Eine Übersicht über die verwendeten Volumenelementtypen ist in Abbildung 5-30c gegeben.

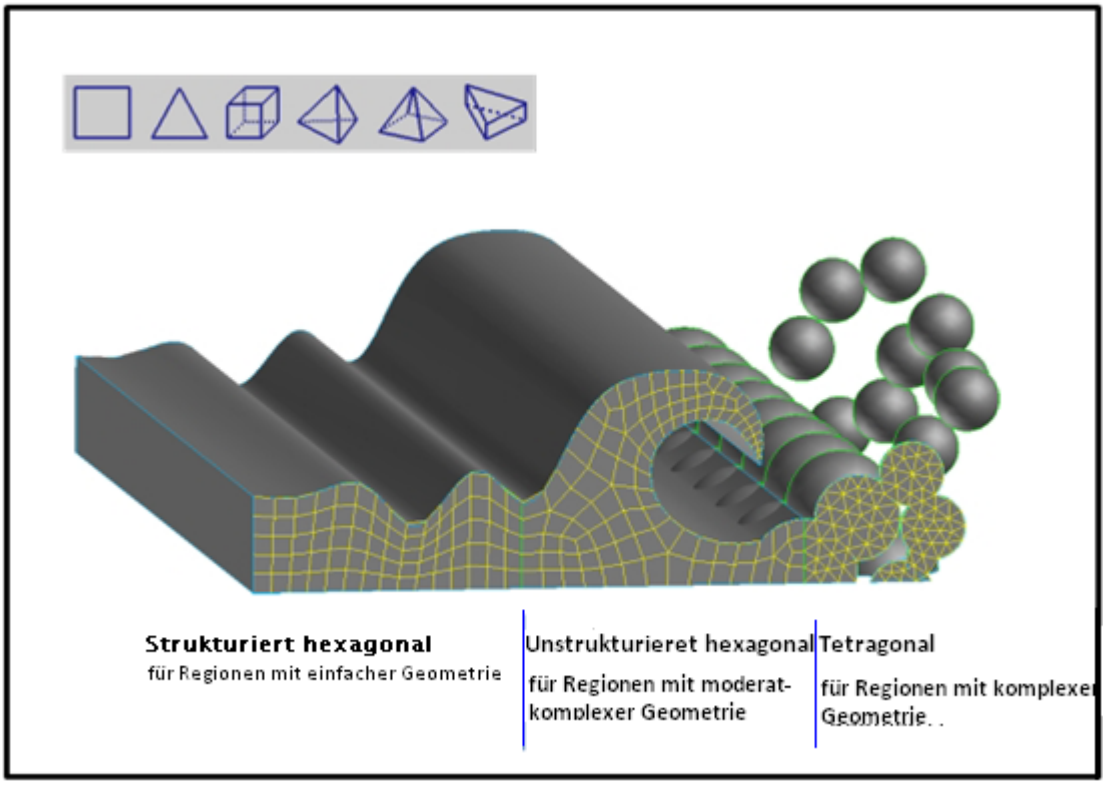


Abbildung 5-30c: ***Erstellung eines numerischen Netztes für komplexe Geometrien [75]***

Während des Erstellens des numerischen Netzes ist auch auf das zu erwartende Strömungsfeld Rücksicht zu nehmen, da das numerische Netz unterschiedliche Auflösung je Intensität der Strömung bedarf. Die Zahl an Volumenelementen darf, um mit der gegeben Rechenkapazität das Auslangen zu finden nicht zu hoch werden. Daher ist die Anzahl an Unterteilungen im System lokal den Anforderungen anzupassen. Wird das Erstellte Netz in die Lösungssoftware FLUENT geladen und es Stellt sich die Auflösung des numerischen Netzes an einer Stelle als zu gering heraus, so besteht zwar im FLUENT die Möglichkeit mittels einer Netzverdichtungsfunktion bzw. Adaptionsfunktion aufzurufen, jedoch ist diese bei Weitem nicht so flexibel und vielseitig wie die Möglichkeiten die GAMBIT in diesem Zusammenhang bietet. Ein numerisches Netz mit zu geringer Auflösung liefert unzutreffende Lösungen der Simulation. In GAMBIT kann daher die Qualität des erstellten numerischen Netzes durch Anwendung von Kontrollparametern überprüft werden. Eine derartige Funktion ist die Winkelgleichheitsfunktion (EQUI-ANGLE SKEW (EAS)) welche ein Maß für die Gleichförmigkeit der erstellten Volumina ist. EAS ist definiert als Zahl zwischen 0 und 1 wobei 0 eine komplett regelmäßige Zelle und 1 eine extrem ungleichförmige Zelle repräsentiert. Im FLUENT sollte ein EAS Wert von 0,97 nicht überschritten werden. Andere Kontrollparameter von GAMBIT die angewendet werden, sind in der GAMBIT Dokumentation [76]aufgeführt.

5.3.1.1.3 Numerische Methode

Numerische Methoden haben als Ziel die Gleichungssysteme der Strömungsmechanik im Bezugsrahmen der vorgegebenen Grenzwerte (boundary conditions) und unter Vorgabe von Startwerten so genau wie möglich zu lösen. Im Vergleich zu analytischen Lösungsansätzen, können numerische Methoden auf komplexe Geometrien angewendet werden, jedoch sind zu große Simplifizierungen auszuschließen. Die beim numerischen Ansatz gelösten PDEs sind dieselben wie jene des analytischen Lösungsansatzes, jedoch müssen diese in Gleichungssätze diskretisiert werden um in einem numerischen Verfahren integriert werden zu können. Die

Diskretisierungsansätze um die analytischen Gleichungssysteme zu zerlegen sind in [73] näher erklärt. Das physikalische Problem welches bei der Analyse der Strömung gelöst werden soll kann mathematisch durch Gleichungen des Schwerpunktsatzes, der Momentenberechnung und durch Kräftebilanzen gelöst werden [16]. Diese wurden abgeleitet vom newtonschen Geschwindigkeitsgesetz bzw. newtonschen Schubspannungsansatz in Flüssigkeiten welcher besagt, dass die Schubspannung (τ) proportional dem Geschwindigkeitsgradienten (δx/δy) ist, wobei die dynamische Viskosität (μ) den Proportionalitätsfaktor darstellt [77]. Die Gleichungen werden separat auf jedes Finite Volumenelement bilanziert. Diese Bilanz kann wie Folgt dargestellt werden Abbildung 5-31.

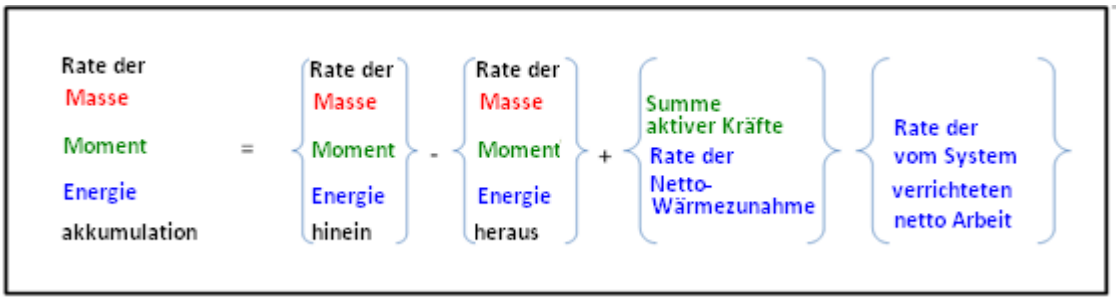


Abbildung 5-31: ***Kontinuitäts, Momenten und Energiebilanz über das Volumenelemet.***

Die angewendeten Gleichungssysteme sind in Vektorieller Schreibweise in Formel 5-7 bis 5-9 angeführt detaillierte Beschreibung dazu in [77].

Continuity $d\rho/dt + \nabla \cdot (\rho v) = 0$ (5-7)

Momentum $d(\rho v)/dt = -\nabla(\rho v v) - \nabla p - \nabla \tau + \rho g$ (5-8)

Energy $d(\rho E)/dt = -\nabla \cdot v \cdot (\rho E + p) - k\nabla\text{^}2\, T - \nabla \cdot (\tau v) + \rho g$ (5-9)

Where:

ρ:	*Dichte des Fluides*	kgm^{-3}
t:	*Zeit*	s
v:	*Geschwindigkeit des Fluides*	ms^{-1}
p:	*Druck*	Pa
τ:	*Schubspannung*	Nm^{-2}
g:	*Erdbeschleunigung*	ms^{-2}
E:	*Initiale und kinetische Energie*	kgm^2s^{-2}
k:	*Thermische Leitfähigkeit*	$Wm^{-1}K^{-1}$
T:	*Temperatur*	K

Eine exakte analytische Lösung dieser Gleichungssysteme kann in den meisten Fällen nur durch eine starke Simplifizierung erfolgen. Um diese Gleichungssysteme lösen zu können gilt es eine algebraische Beschreibung zu finde welche die Anwendung eines Computergestützten Rechenprogrammes ermöglicht.

Die FLUENT Bedienungsanleitung illustriert den angewendeten Diskretisierungsansatz unter Verwendung der Transportgleichung für den unstetigen Fall der skalaren Quantität ϕ [76]. Für ein arbiträres Kontrollvolumen V ist die Gleichung (5-10) wie Folgt gegeben:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla_\phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \qquad (5\text{-}10)$$

Wobei:

$\vec{v}$	*Geschwindigkeitsvektor*
$\vec{A}$	*Oberflächenvektor*
Γ_Φ	*Diffusionskoeffizient für φ*
∇_Φ	*Gradient für φ*
S_ϕ	*Quelle von φ per Bezugsvolumen*

Dar diese Gleichung auf jedes Kontrollvolumen angewendet werden muss, muss eine Diskretisierung vorgenommen werden, welche für eine gegebene Zelle ergibt:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \overrightarrow{v_f} \phi_f \cdot \overrightarrow{A_f} = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \overrightarrow{A_f} + S_\phi V \qquad (5\text{-}11)$$

Wonei:

N_{faces}	*Zahl der umschließenden Oberflächen einer Zelle*
ϕ_f	*Volumen von φ über die Fläche f angenähert*
$\rho_f \vec{v}_f \vec{A}_f$	*Massenfluss durch die Kontrollfläche*
$\vec{A}_f$	*Flächeninhalt von f*
$\nabla_{\phi f}$	*Gradient von φ über die Fläche f*
V	*Zellvolumen*

Die lokalen diskreten Werte von ϕ werden für die Zellmittelpunkte berechnet und gespeichert. Jedoch beinhaltet Gleichung 5-11 ϕ-Werte für die Zelloberflächen, diese müssen interpoliert werden. In einem normalen kartesischen Koordinatensystem findet konstantes Verhalten in der Zelle erster Ordnung statt, lineare Variation findet in zweiter Ordnung statt, sowie quadratische Variation in dritter Ordnung. Die Ordnung zeigt an bis zu welchem Term der Taylorreihe die diskretisierte Gleichung konsistent mit der originalen PDE ist [75]. In der vorgestellten Studie werden Interpolationen in Strömungsrichtung ausgeführt und angewendet. In diesem Schema wird

ϕ durch strömungsgerichtete Berechnungsverknüpfungen der Zielzelle approximiert. In zweiter Ordnung in Strömungsrichtung ist das variable Profil zwischen zwei Berechnungsverknüpfungen definiert als eine Linie. In der quadratischen strömungsgerichteten Interpolation (QUADRATIC UPWIND INTERPOLATION (QUICK)) wird der Zusammenhang durch eine Parabel approximiert.

Nachdem der strömungsgerichtete Ansatz eine unbekannte variable ϕ der benachbarten Zelle beinhaltet, kann die resultierende algebraische Gleichung im Bezug auf diese Variable nicht linear sein. Aus diesem Grund führt FLUENT eine Linearisierung, durch wobei die resultierende lineare Zelle auf alle Zellen angewendet werden kann. Der entstehende Satz an linearen Gleichungen kann numerisch gelöst werden. Im FLUENT besteht die Möglichkeit den gewünschten Linearisierungsansatz auszuwählen. Zum einen wird der Druckbasierte Lösungsalgorithmus angeboten zum anderen der Dichtebasierte Lösungsalgorithmus für hochgeschwindigkeitsverdichtbare Strömungen [76]. Beide Ansätze basieren auf FVM und folgen der oben beschriebenen Routine. Der fundamentale Unterschied zwischen beiden Algorithmen besteht im Diskretisierungsalgorithmus der angewendeten Transportgleichungen wie auch in [73] beschrieben wird.

Im druckbasierten Lösungsalgoritmus muss einer von zwei Lösungsansätzen ausgewählt werden, entweder der segregierte oder der gekoppelte Lösungsansatz. Bei Problemen schlägt FLUENT die Anwendung des SIMPLE algorithmusses vor, welcher auch in dieser Arbeit verwendet wurde. Diese Art eines segregierten Lösungsansatzes werden die Transportgleichungen eine nach der anderen aufgelöst. Dar die Ermittlung des Druckes indirekt über die Kontinuitäts- und Momentengleichungen erfolgen kann, treten Konvergenzprobleme auf. Um dieses Problem zu lösen wurden zeitlich gestaffelte Druckberechnungsalgoritmen entwickelt. Einer dieser Algorithmen (PRESTO) wurde in dieser Arbeit angewendet.

5.3.1.1.4 Turbulenz Modell

Strömungsprozesse in der Verfahrenstechnik sind meist turbulent. Diese sind charakterisiert durch irreguläre Fluktuationen der Strömungsvariablen, welche Impuls und Energieänderungen bewirken. Die Reynoldszahl Re (Gleichung 5-12) ist eine dimensionslose konstante welche eine dimensionslose Kennzahl für den Strömungszustand darstellt. Sie drückt das Verhältnis von Trägheits- zur Reibungskräften dar. Die Änderung vom laminaren zum turbulenten Strömungszustand hängt von den gegebenen Strömungsbedingungen ab.

$$\mathrm{Re} = \frac{u \cdot L}{\vartheta} \tag{5-12}$$

Wobei:

u:	*Geschwindigkeit*	ms^{-1}
L:	*characteristische Länge*	m
v:	*Kinematische Viskosität*	m^2s^{-1}

In der CFD wird häufig die statistische Turbulenzmodellierung angewendet in welcher die Änderung des Strömungszustandes über kurze Zeitintervalle gemittelt werden um Zeitgeglättete

Änderungsgleichungen zu erhalten [77]. Die momentane Geschwindigkeit v zum Beispiel wird beschrieben als Summe der zeitgeglätteten Geschwindigkeit $\bar{v}$ und der Geschwindigkeitsfluktuation$\acute{v}$. Das so vollzogene Ersetzen aller Strömungsvariablen, Geschwindigkeitskomponenten und Druckkomponenten in den Navier-Stokes-Gleichungen ergibt eine geglättete Form der Bewegungsgleichung welche als REYNOLDS-GEMITTELTE -NAVIER-STOKES bzw. REYNOLDS-AVERAGED-NAVIER-STOKES (RANS) Gleichungen [74] bezeichnet werden.

Diese Gleichungen beinhalten zusätzliche unbekannte welche von turbulenten Viskositätsfluktuationen herrühren und als REYNOLDS SPANNUNG bezeichnet werden [77]. Das Gleichungssystem wird daher unlösbar. Turbulenzmodelle lösen dieses Problem durch Einführung von zusätzlichen mathematischen Korrelationen. Die am häufigsten angewendeten Korrelationen sind die Boussineq Ansätze [73]. Boussineq führte einen unbekannten Proportionalitätsfaktor ein welcher als turbulente Viskosität μ_T bezeichnet wird. Die turbulente Viskosität ist keine materialspezifische Konstante sondern eine zu bestimmende Funktion. FLUENT bietet verschiedene Turbulenzmodelle in diesem Zusammenhang an. Das k-ε model ist ein Zweigleichungssystem. Es löst zwei zusätzliche Transportgleichungen zum einen für die kinetische Energie k und zum anderen für den Verlustfaktor ε. Die benötigte turbulente Viskosität μ_T wird berechnet als Funktion von k und ε. Details für die zugrundeliegenden Transportgleichungen und Modellkonstanten in diesem Zusammenhang können der FLUENT Bedienungsanleitung [76] entnommen werden. Dar das k-ε Modell für hohe Reynoldszahlen konzipiert wurde bestehen Probleme bei der Anwendung des Modelles in Gebieten wo Viskositätseffekte auftreten z.B.: in Wandbereichen. Unterschiedliche Maßnahmen schaffen hier Abhilfe um korrekte Berechnungen durchführen zu können .z.B. ist die dimensionslose Distanz zur Wand y^+ eine nützliche Kontrollvariable in diesem Zusammenhang welche FLUENT anbietet. Um gute Resultate für das k-ε Modell zu erhalten sollte y^+ im Größenbereich zwischen 30 und 120 liegen [76].

5.3.1.1.5 Diskretes Phasen Modell (DPM)

Die Herausforderung der Aufgabenstellung dieser Arbeit war unter anderem das die Spray sowie Partikelflugbahnsimulation die Anwendung eines zusätzlichen Modells notwendig machte. Dieses DISKRETE PHASEN MODELL [76] ist ein Modell um ein diskretisiertes Zweiphasensystem zu lösen. Die zweite Phase auf die DPM anzuwenden ist, besteht aus sphärischen Partikeln für die entsprechende Materialkonstante vorzugeben sind. FLUENT berechnet die Partikelflugbahnen sowie Wärme und Stofftransport auf die Partikel. FLUENT ermöglicht eine Vielzahl an Modellierungsmöglichkeiten für die diskrete Phase welche auch stetige und unstetige Partikelflugbahnberechnung Verdampfung Tröpfchenzerfall und Koaleszenz beinhalten. Die Anwendung dieses Modelles ist jedoch nur dann adäquat, wenn die zweite Phase nur einen sehr niedrigen Volumenanteil einnimmt was den Einsatz für Sprays und partielbeladene Luftströmungen durchaus ermöglicht. Ist der Volumenanteil der zweiten Phase nicht vernachlässigbar, so ist das Modell inadäquat.

Die Datensätze der Partikelbahnen der diskreten Phase werden durch Integration der Kräftebilanzen über das Partikel, welche Trägheits- und Gravitationskräfte mit anderen Kräften die auf das Partikel wirken gleichsetzt, ermittelt. Es ist möglich Interaktionen zwischen diskreter und kontinuierlicher Phase zu ermöglichen. Die Tropfen- oder Partikelbahnen werden berechnet für entsprechende Intervalle der kontinuierlichen Phase da dort zahlreiche Interaktionen per DPM Iteration zu höherer Stabilität der Rechnung führen, obwohl mehr Interaktionen bis zur Konvergenz der Rechnung notwendig sind [76].

Der Effekt der Turbulenz auf die Dispersion der Partikel wird durch verschiedene Modelle unterstützt. Fluent bietet Modelle an die eine Vorhersage des Einflusses der in der kontinuierlichen Phase auftretenden Turbulenz auf die diskrete Phase ermöglicht. Hierzu werden das stochastische Spurführungsmodell und das Wolkenmodell angewendet. Im stochastischen Spurführungsmodell von FLUENT wird die turbulente Dispersion abgeschätzt über die Integration der Spurführungsgleichungen je individuellem Partikel welche über die Integration der zeitgeglätteten Strömungsgeschwindigkeit der kontinuierlichen Phase entlang der Partikelbahn erhalten wird. Die Zufälligkeit einer turbulenten Strömung wird ausgeglichen durch eine hinreichende Anzahl an repräsentativen Partikelbahnen die berechnet wurden. Das davon abgeleitete diskrete Modell der Bewegungszufälligkeit ist samt Gleichungssätzen in [76] zu finden.

5.3.1.1.6 Gewählte Randbedingungen

Die Definition der Bedingungen an der Grenze ist ein kritischer Schritt bei der Simulation. Durch Definition der Bedingungen an der Grenze besteht die Möglichkeit gegebene Systembedingungen einfließen zu lassen. Da die Spezifikation der Bedingungen an der Grenze fundamentalen Einfluss auf die Simulation hat, ist die Definition und Lokalisierung von Grenzen und deren Bedingungen sorgfältig zu erfolgen bevor die Geometrie erstellt wird um Mangel an Informationen für die Berechnung zu verhindern. Im Folgenden werden die angewendeten Grenzwerte sowie Startwerte aufgezeigt. In Abhängigkeit vom Strömungstyp (Kompressibel oder Inkompressibel) müssen verschiedene Grenzwertbedingungen gewählt werden [76].

Gewählte Randbedingungen:

Anfangsgeschwindigkeit (für Inkompressible Strömung):

- Geschwindigkeit und Richtung der Bewegung
- Geschwindigkeitskomponente eines existierenden Strömungsprofiles (erarbeiten in vorangegangener Simulation)
- Turbulenzparameter
- Grenzwerte der Diskreten Phase

Anfangsmassenstrom (für kompressible Strömung)

- Massenfluss
- Absolute Temperatur
- Turbulenzparameter
- Grenzwerte der Diskreten Phase

Enddruck:

- Statischer druck
- Absolute Temperatur
- Turbulenzparameter
- Grenzwerte der Diskreten Phase

Wand:

- Scherbedingungen (kein Gleiten für zähviskosen Fluss)
- Wandbewegung
- Wandrauhigkeit
- Grenzwerte der Diskreten Phase

Diskrete Phase:

DPM verlangt teilweise die Spezifikation der Startposition, Startgeschwindigkeit, Größe und Temperatur. Sowie gilt es die physikalischen Bedingungen der diskreten Phase zu definieren. Trifft ein Partikel eine der oben definierten Oberflächen gibt es für dessen Verhalten folgende Möglichkeiten:

- Verlassen der Oberfläche
- Festsitzen an der Oberfläche
- Elastischer oder inelastischer Stoß
- Formierung eines dünnen Wandfilms

5.3.1.1.7 Eigenschaften der strömenden Phase

Die Materialeigenschaften der in der Simulation berücksichtigten Komponenten müssen spezifiziert werden. Die Materialeigenschaften der geläufigsten Substanzen kann einer FLUENT Datensammlung entnommen werden. Es ist dennoch manchmal erforderlich die Spezifikationen der Eigenschaften an die Strömungssituation anzupassen. Für kompressible Strömungen kann die Dichte sofern das Gas sich annähernd wie ein ideales Gas verhält, nach dem idealen Gasgesetz berechnet werden.

5.3.1.1.8 Betriebsbedingungen

Der Betriebsdruck als auch die Betriebstemperatur sind zu spezifizieren. Es ist auch möglich die Stärke und Richtung der Gravitation zu berücksichtigen.

5.3.1.1.9 Startbedingung

Die iterative Rechenmethode ermittelt die Strömung ausgehend von einer Initialen abgeschätzten Strömungssituation [76]. Startbedingungen beeinflussen die Konvergenz maßgeblich und sind daher mit Bedacht zu wählen.

5.3.1.1.10 Konvergenz

Die diskretisierten Methoden werden durch eine iterative numerische Rechenmethode gelöst, welche wiederholtes Annehmen der richtigen Lösung und jeweils darauffolgende Verbesserung der Lösung bis zur Konvergenz der Resultate beinhaltend. Bei Definition ist eine Lösung konvergent, wenn diese unabhängig von der Zahl der Iterationen wird [73].

$$\varphi\hat{}(n+1) = \varphi\hat{}n = \varphi \tag{5-13}$$

Wobei φ die skalare Quantität der Strömung welche auch in Gleichung (5-13) verwendet wurde und n die Anzahl der Iterationen bedeutet. Idealer Weise konvergiert eine Lösung gitterunabhängig.

Eine Lösung gilt als konvergiert, wenn die Größenordnung der Veränderung der Strömungsvariablen oder ein Fluss mit fortlaufenden Interaktionen ein definiertes Level erreicht hat. Dieser Level wird als Residuum bezeichnet. FLUENT berechnet die Residuen einiger Lösungssensitiver Parameter so wie z.B.: der Kontinuität oder der Geschwindigkeitskomponenten k und ε (falls das k-ε Turbulenzmodell angewendet wird) jeder Zelle und nach jeder Iteration. Die Summe aller Residuen eines Parameters wird gespeichert und graphisch im Konvergenzverfolgungsfenster dargestellt. Die Residuen werden bezogen auf ein für die Strömungsgeschwindigkeit repräsentative Größe φ der Simulationsdomäne [76]. Es ist erforderlich ein akzeptables Level der der Konvergenz bei welchem der Iterationsprozess gestoppt wird zu definieren. Für die referenzierten Residuen empfiehlt FLUENT eine Abweichung von 10^{-3} und 10^{-6} für Energiewerte. Diese Werte können zwar verwendet werden, sind jedoch nicht universell gültig. Um sicherzustellen, dass die Simulation komplettiert ist, d.h. die Lösung konvergiert ist, ist es üblich zusätzliche Parameter aufzunehmen. Hierzu wird beispielsweise ein Flächenintegral eines erforderlichen Parameters gebildet, so wie etwa beim statischen Druck an der Einlassoberfläche. Es werden aber z.B.: auch Volumenintegrale über charakteristische Parameter aufgezeichnet so wie etwa Geschwindigkeitsgrößen. Die Wahl der aufzuzeichnenden zusätzlichen Parameter ist dem Strömungsproblem anzupassen.

5.3.1.1.11 Abschätzung der Lösungsgenauigkeit

Die Genauigkeitsanforderungen an eine CFD Simulation wird durch den Zweck der Simulation stark beeinflusst. Eine CFD Simulation muss nicht notwendigerweise quantitativ korrekt sein und dem Zweck trotzdem gerecht werden. Das berechnete Strömungsfeld kann auch dem Zweck eines qualitativen Eindruckes der zu erwartenden Strömungsbedingungen dienen. Trotzdem ist in diesem Fall die Genauigkeit der Simulation abzuschätzen um die Resultate der Simulation entsprechend einordnen zu können.

Kritische Fehlerquellen beinhalten:

- Konvergenz
- Netz
- Grenzbedingungen
- Turbulenzmodell
- Modellunsicherheiten anderer Art

Daher werden im Folgenden diese Aspekte nach der numerischen Simulation berücksichtigt. Jedoch werden andrere Fehlerquellen wie z.B.: durch Diskretisierung, Kodierung und Rundungseffekte nicht berücksichtigt. Nähere Informationen dazu in [74].

5.3.1.2 Aufgabenstellung

Wie in Kapitel 5.2 beschrieben wurde, wurde der sekundäre Staubabscheideeffekt einer Zweistoffresonanzdüse bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen (Wasservolumenstrom, Windgeschwindigkeit, Düsenposition und Düsenanzahl) untersucht. Nachdem durch die experimentellen Versuche sich die Staubabscheidung stark je Betriebsbedingungen veränderte, war das weitere bestreben Informationen über die Veränderung der Strömungsbedingungen im Kasten je Betriebsparameter des Wasserspraysystems zu erhalten, um mechanistische Einblicke in die sekundäre Staubabscheidung zu erlangen. Daher ist das Ziel der hier präsentierten CFD Simulation das Strömungsfeld während der experimentellen Versuche mittels der Software FLUENT 6.3.26. zu berechnen. Die Anlage (Abbildung 5-3) ist so konzipiert, dass ein konzentrierter Partikelstrom durch die Anlage zieht. Es wurde bei experimentellen Versuchen durch der Variation der Düsenposition gefunden, dass die Düse im konzentriertesten Bereich der Wolke positioniert am wirksamsten ist. Und durchaus deutlich höhere Werte (bis zu 80%) annehmen kann als die bei Standardeinstellungen häufig gemessenen (Kapitel 5.2) 16%. Jedoch besteht bei der Abscheidung von diffusen Staubemissionen oft das Problem, dass so hohe Staubkonzentrationen nicht auftreten. Vor allem auch deshalb, weil es durch die Sprühdüse zum Auseinandertreiben bzw. Verlagern der Staubwolke kommt wie in Abbildung 5-1 und Abbildung 5--2 gezeigt ist.

Im Folgenden soll deshalb die CFD Simulation der Strömungsverhältnisse beim Abscheiden von Staubwolken Aufschluss geben ob die Düse auch so positioniert werden kann, dass auch bei geringen Staubkonzentrationen eine hohe Staubabscheidung erzielbar ist [79]. Durch den Aufbau der Versuchsapparatur, können unterschiedliche Strömungsbedingungen je Betriebsbedingungen erzeugt werden und so kann die Strömungssituation mit den gemessenen sekundären Staubabscheideeffektivitäten in Verbindung gebracht werden. Diese Ergebnisse sind auch auf die diffuse Staubabscheidung übertragbar, Die Intention ist, kennt man die Strömungssituation, so lässt sich die Staubabscheideeffektivität abschätzen.

Um einen Eindruck des Sprühbildes der Zweistoffresonanzdüse zu erhalten, ist eine CFD Simulation durchzuführen wobei das Strömende Fluid ein Zweikomponentensystem aus Luft und Wasser darstellt. Des Weiteren soll das erhaltene Sprühbild in das Simulationssystem der Einhausung implementiert werden und ein Eindruck entstehen wie sich Wassertropfen und Staubpartikeln bei verschiedenen Strömungssituationen je Betriebsparameter verhalten.

5.3.1.3 Methodologie

Es gilt eine auf das Strömungsproblem der aufgebauten Abbildung 5-3 abgestimmte Implementierung der CFD Simulation von der Problemstellung abzuleiten. Deshalb sind einige Annahmen zu treffen um die Berechnungsdomäne entsprechend definieren zu können. Die Grenzbedingungen der Berechnungsdomäne wurden von dem Zugrundeliegenden physikalischen Modell abgeleitet. Es wird zuerst überprüft ob ausreichende Daten zur Verfügung stehen um die Grenzbedingungen zu definieren. Auch muss zuerst geklärt werden, ob es im experimentellen Aufbau Regionen gibt, die aufgrund Ihrer Geometrie oder zu erwartenden Strömungsbedingungen gesondert zu behandeln sind. In den Abbildungen 5-32 bis 5-35 ist der ins CFD zu implementierende experimentelle Aufbau, für welchen im Folgenden eine Datenaufstellung, die dafür benötigt werden, gezeigt.

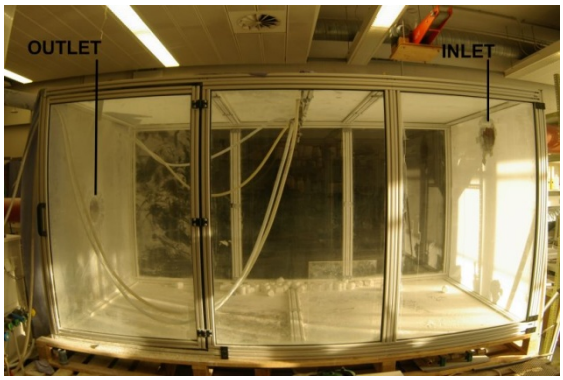


Abbildung 5-32: ***Staubabscheidekammer***

*Abbildung 5-33****: angewendete Zweistoffresonanzdüse***

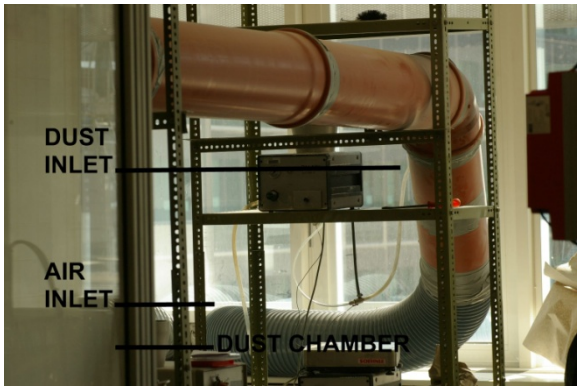


Abbildung 5-34: ***Ansaugstrecke mit Staubdosierer***

Abbildung 5-35: ***Zweistoffresonanzdüse***

5.3.1.3.1 Datenaufstellung des zu simulierenden Staubabscheidesystems

Die Staubabscheidekammer ist exakt so wie sie aufgebaut wurde mit CFD nachzubilden, denn vor allem die Einlaufstrecke kann der Strömung mögliche Turbulenzen aufprägen. Die Strömung durch die Einhausung wurde als inkompressibel angenommen. Daher kann der Druckbasierte Lösungsalgorithmus angewendet werden.

5.3.1.3.2 Integration der Zweistoffresonanzdüsen

Fünf Zweistoffresonanzdüsen sind in das System zu integrieren. Die Düsenköpfe befinden sich in unterschiedlichen Abständen zueinander in einer Linie auf halber Strecke zwischen Lufteinlass und Luftabsaugung 25 cm unter der Decke der Einhausung. Für die Simulation der Düsen sind Informationen über Wasservolumenstrom sowie Luftvolumenstrom am Düsenaustritt notwendig. Dabei treten folgende Probleme auf:

- Der angegebene Luftvolumenstrom von 15 m³/h durch die Düse bezieht sich auf Druckluft von 5bar. Es ist jedoch kein Geschwindigkeitsprofil der Gasströmung am Düsenaustritt vorhanden.
- Der Wasservolumenstrom sowie die Tropfengrößenverteilung [42] während der Experimente sind bestimmt. Jedoch ist die Tropfengeschwindigkeit nur in einem Abstand

von 20 mm von der Düsenöffnung aus bestimmt worden., da das Picture Image Velocimeter erst dort die Tropfen vereinzelt messen kann [80].

Daher ist es nicht möglich die Düsenaustrittsoberfläche als Grenzbedingung für die Berechnungsdomäne aufgrund unzureichender Datengrundlage zu implementieren. Da über die Strömung der Druckluft einzig und allein der Luftvolumenstrom zur Verfügung steht ist es notwendig zumindest ein Strömungsbild der Druckluft durch die auf das Strömungsbild im Kasten maßgeblichen Geometrien der Düse zu simulieren. Als für die Strömungsbild im Kasten maßgeblich wird die Geometrie der Düse ab dem kleinsten Strömungsdurchmesser von 2mm in der Düse angenommen. Bei einem Durchmesser von 2mm und einem Gasvolumenstrom von 15 m^3/h ist von einer Überschallgeschwindigkeit auszugehen. Ab einer Machzahl von (Ma > 1) darf jedoch nicht mehr von einer inkompressiblen Strömung ausgegangen werden. Daher ist vom Auftreten zwei grundlegend unterschiedlicher Strömungszustände auszugehen welche in die CFD Simulation zu implementieren sind; einerseits die inkompressible Strömung durch die Einhausung, andererseits die kompressible Strömung durch den Sprühkopf der Düse. Um akzeptable Simulationsergebnisse zu erhalten gilt es zuerst die detaillierte Simulation des Düsensprühkopfes vorzunehmen. Diese Simulation liefert dann die notwendige Information um in der Strömungssimulation in der Einhausung während der Staubascheidung implementiert zu werden.

Im Folgenden wird die Durchführung der Düsensimulation sowie die Implementierung der erhaltenen Daten über die Strömung in das Simulationssystem der Einhausung gezeigt.

5.3.1.4 CFD Simulation der Gasströmung und der Tröpfchenflugbahnen eines Zweistoffresonanzdüsensprays

Um einen Eindruck des Sprühbildes der Zweistoffresonanzdüse zu erhalten, wurde eine CFD Simulation durchgeführt wobei das strömende Fluid ein Zweikomponentensystem aus Luft und Wasser darstellt. Des Weiteren soll das erhaltene Sprühbild in das Simulationssystem der Einhausung implementiert werden und ein Eindruck entstehen wie sich Wassertropfen und Staubpartikeln in dieser Strömungssituation verhalten. Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine Berechnungsdomäne zu erstellen, anhand derer eine numerische Simulation durchgeführt wird. Es ist in diesem Zusammenhang eine Methode zu finden um eine numerische Lösung für die Strömung von Tröpfchen und der Luftströmung zu finden.

5.3.1.4.1 Annahmen

Es wurde die Annahme getroffen, dass es sich bei der flüssigen Phase in der Düse um keine kontinuierliche Phase handelt sondern um eine diskrete Phase welche aus bereits zerstäubten Tropfen besteht. Was problematisch ist, da ja die Tropfenbildung in der Düse noch nicht abgeschlossen sein kann. Der Tropfenzerfall in und nach der Düse wird nicht berücksichtigt. Die Verdampfung der Tropfen bzw. Tropfenkoaleszenz wurde nicht berücksichtigt. Die Tropfen verschiedener Größe wurden in die Gasströmung aufgegeben und ein inelastischer Stoß mit dem Zerstäubungskörper der Düse der sich in gewissen Abstand von der kleinsten Durchlassöffnung der Düse befindet angenommen. Die Tropfengrößenverteilung wurde durch Laserbeugungsanalyse in einem Abstand von 40 mm von der Düsenöffnung erhalten und auf die Düsenöffnung angewendet. Die Tropfenanzahl musste aufgrund der Rechenleistung bei der Simulation stark im Vergleich zur gemessenen Realität reduziert werden.

Der durchgesetzte Luftvolumenstrom durch die Düsenöffnung von 2 mm bei 5 bar Vordruck verändert sich je verwendeten Wasservolumenstrom von 3m³/h bis 15m³/h. Es wird daher angenommen dass die Geschwindigkeit in der Düsenöffnung annähernd gleich bleibt.

Um die Strömungssimulation durch die Düse zu ermöglichen wurden Folgende Annahmen bezüglich der Düse getroffen:

- Für die Ausbildung des Sprühbildes der Düse ist ausschließlich die Geometrie an der engsten Durchlassöffnung und die Geometrie nach dieser engsten Stelle entscheidend.
- Die Gasgeschwindigkeit an der engsten Stelle ist unabhängig vom Wasservolumenstrom
- Tropfenbildung wird nicht berechnet, die Tropfen treten durch die engste Stelle bereits gebildet durch.
- Bei den Tropfen handelt es sich um inerte Sphären die nicht miteinander agieren.
- Eine herabgesetzte Zahl an Tropfen repräsentiert den Spray.
- Der Spray arbeitet im stationären Zustand.
- Tropfenkoaleszenz sowie Tropfenzerfall werden ignoriert

5.3.1.4.2 Erstellung einer Berechnungsdomäne

Durch Verwendung der Geometriesoftware GAMBIT 2.24 wurde eine Geometrie des Düsenauslasses erstellt und in 831 632 diskrete Volumenelemente unterteilt. Die Geometrie wurde in hexagonale Elemente unterteilt. Das erstellte Netz ist hinsichtlich Qualität durch die in 5.3.1.1.11 vorgestellten Methoden zu beurteilen. Entspricht das erstellte Netz schließlich so kann es in den Lösungsalgorithmus der CFD Software implementiert werden.

Im Folgenden wird die Erstellung der Geometrie des Zweiphasensprays vorgestellt. In den Bildern Abbildung 5-36 und 5-37 sind der Sprühkopf der Düse sowie die Düsenöffnung (bei abmontiertem Sprühkopf zu sehen). Es sind auch der Durchmesser am engsten Durchlass (1), der Intermediäre Durchmesser (2) sowie der Düsenauslassdurchmesser (3) zu sehen.

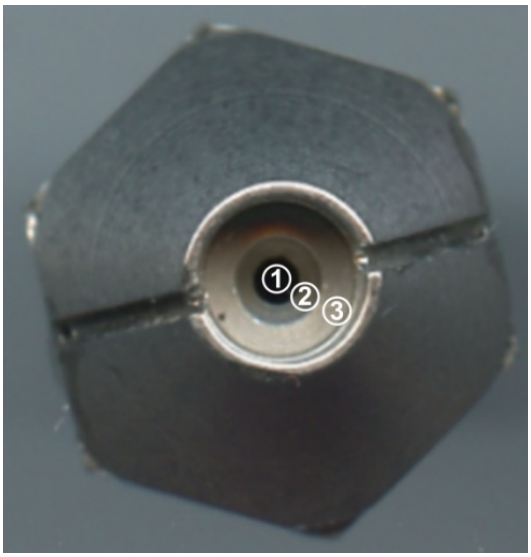


Abbildung 5-36: ***Zweistoffdüse mit Düsenkopf*** *Figure 5-37:* ***Düsenauslass***

In Abbildung 5-38 ist die Dimensionen sowie die Geometrie des Düsenauslasses und des Düsenkopfes im Detail dargestellt.

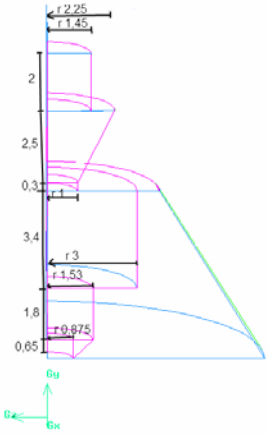


Abbildung 5-38: ***Düsenauslass sowie Düsenkopf***

Um die Strömung am Düsenauslass bzw. Düsenkopf berechnen zu können wurde eine geometrische Domäne in der Größenordnung von 0,36 m³ gebildet. Diese geometrische Domäne wurde in hexagonale Volumenelemente unterteilt um ein numerisches Netz bilden zu können. Die erstellte Geometrie ist in Abbildung 5-38 und 5-39 dargestellt.

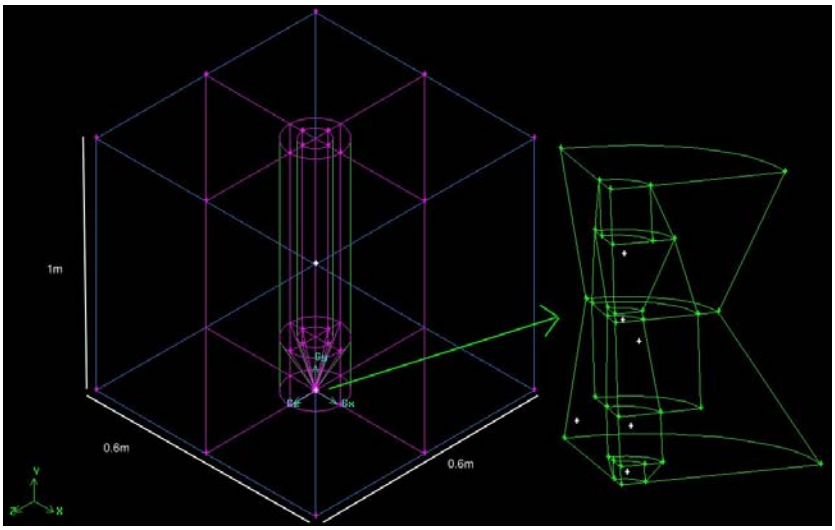


Abbildung 5-39: ***Erstellte Düsengeometrie in GAMBIT***

5.3.1.4.3 Erstellung eines numerischen Netzes

Ein unstrukturiertes Netz wurde für die gesamte Berechnungsdomäne erstellt. Um die kompressible Ultraschallströmung berechnen zu können, wurde eine entsprechend hohe Auflösung des Netzes gewählt. Die Qualität des erstellten Netzes wurde mittels EAS beurteilt. Die schlechteste Zelle im EAS zeigte einen Wert von 0,92 wobei festzuhalten ist, dass nur 0,1 % der Zellen einen EAS grösser als 0,9 besitzen. Daher wurde das Netz als entsprechend eingestuft. Abbildung 5-40 zeigt das erstellte Netz im Düsenauslass wobei eine Nahaufnahme die hohe Auflösung des numerischen Netzes direkt in der Auslassöffnung und an neuralgischen Punkten verdeutlichen soll.

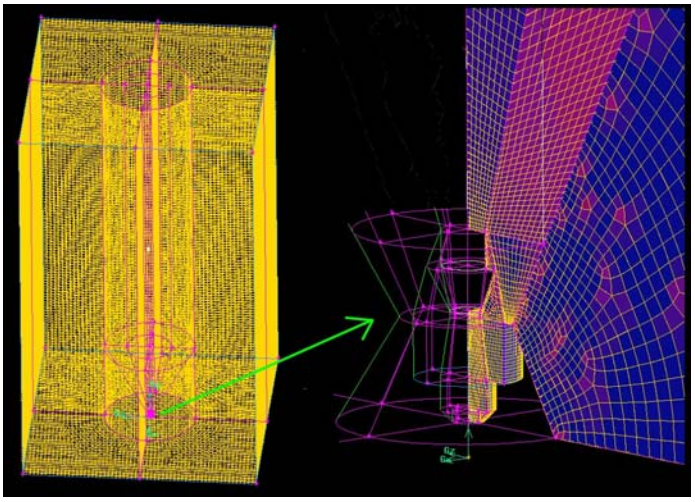


Abbildung 5-40: ***Erstelltes Netz im Düsenauslass***

5.3.1.4.4 Spezifikation der Simulationsparameter

Im Folgenden werden die gewählten numerischen Prozeduren, Turbulenzmodell, Grenzbedingungen sowie die Implementierung des diskreten Phasenmodelles um die Tropfenflugbahnen anzeigen zu können vorgestellt. Des Weiteren werden die eingestellten Materialeigenschaften des Gases sowie die Betriebsbedingungen definiert.

5.3.1.4.5 Wahl der numerischen Prozedur

Der dichtebezogene Lösungsalgorithmus wurde ausgewählt um die Lösung bei stationären Bedingungen berechnen zu können. Es wurde die implizite Linearisierung der verwendeten Gleichungen herangezogen, da diese eine höhere Stabilität der Rechnung erwarten last [76]. Für die kompressible Strömung müssen die Energiebilanzen gelöst werden. Für die Diskretisierung der Transportgleichungen müssen folgende Parameter gewählt werden: Strömungsmodell, die turbulente kinetische Energie (k) sowie die kinetische dissipationsrate (ε). Als Strömungsmodell wurde ein in Strömungsrichtung gerichtetes Schema zweiter Ordnung gewählt. Für k und ε wurde der QUICK Algorithmus gewählt

5.3.1.4.6 Auswahl des Turbulenzmodelles

Das k-ε Turbulenzmodell wurde aufgrund der Turbulenz die bei den hohen Strömungsgeschwindigkeiten in der Düse die zu erwarten sind, herangezogen. Zusätzliche Modelle welche Wandeinflüsse berücksichtigen wurden aufgrund Zeitmangels nicht angewendet, da der Einsatz solcher Modelle weitreichende Überarbeitungen des erstellten Netzes bedingt. Das angewendete Turbulenzmodell wurde stattdessen durch die Analyse anhand des dimensionslosen Parameters y+ verifiziert sowie durch lokale Modifikation des numerischen Netzes in kritischen Strömungsbereichen angepasst.

5.3.1.4.7 Auswahl des diskreten Phasenmodelles (DPM) um die Tropfenbahnen zu berechnen

Das diskrete Phasenmodell wurde implementiert um die Flugbahnen der Tropfen verschiedener Größenfraktionen unter der Annahme des abgeschlossenen Tropfenzerfalles berechnen zu können. Die Tropfengrößenverteilung des Sprays die nach einem Laserbeugungsverfahren ermittelt wurde [42] kann mittels DPM aufgrund der Rechenzeit nur mit einer sehr reduzierten aber repräsentativen Tropfenanzahl erfolgen. Daher wurden 4 verschiedene Tropfengrößen ausgewählt, welche Anzahlmäßig die gemessene Tropfengrößenverteilung nachbilden. Dazu wurde der Massenfluss jeder Tropfengröße berechnet (Dichte von H2O 20°C von 998kg/m³) (Tabelle 5-1)

Tabelle 5-1: Massenfluss der 4 repräsentativen Größenfraktionen

Durchmesser in µm	Massenfluss in g/s
3	0,05
12,5	0,2
35	0,2
100	0,05

Tropfenfraktionen können als Injektionen in das Simulationsmodell integriert werden. Diese Injektionen sind in der Software zu integrieren und zu definieren. Dazu ist ein Tropfendurchmesser sowie Massenstrom je Durchmesser genauso festzulegen wie eine Injektionsoberfläche und eine Startgeschwindigkeit der Tropfen. Die Injektionsoberfläche wurde an der engsten Stelle des

Sprühkopfes implementiert und die Startgeschwindigkeit der Tropfen musste angenommen werden. Als Annahme wurden 150 m/s herangezogen da diese ein Viertel der Gasgeschwindigkeit an der engsten Stelle beträgt und sich dieses Verhältnis bei anderen Simulationen bei ähnlichen Problemfällen bewährt hat [52] Interaktionen zwischen der kontinuierlichen Phase sowie der diskreten Phase wurden im Berechnungsmodell erlaubt um einen Impulsaustausch zwischen Druckluft und Tropfen zu ermöglichen. Die Tropfenflugbahnen wurden mit der Frequenz einer einfachen DPM Iteration von zehn Iterationen der kontinuierlichen Phase berechnet. Dieses Verhältnis von 1:10 wurde deshalb gewählt, um eine Stabilisierung der kontinuierlichen Phase nach erfolgten Impulsaustausch zu gewährleisten bevor ein erneuter Impulsaustausch berechnet wird. Es wurde ein stationärer Berechnungsalgorithmus der diskreten Phase gewählt werden, da die Tropfen als inerte Sphären nicht miteinander interagieren sollen. Das diskrete Zufallsmodell wurde zur Abschätzung des Turbulenzverhaltens angewendet und die Anzahl der zugelassenen Versuche mit 3 vorgegeben.

5.3.1.4.8 Spezifikation der Grenzbedingungen

Grenzbedingungen wurden festgelegt Luftein- und auslass, die Decke des Strömungskastens sowie die Sprühkopfwände werden. Diese Grenzbedingungen sind zum Lösen der Transportgleichungen sowie Energiebilanzen der kontinuierlichen Phase von entscheidender Bedeutung. Abbildung 5-41 und 5-42 verdeutlichen die definierten Grenzbedingungen.

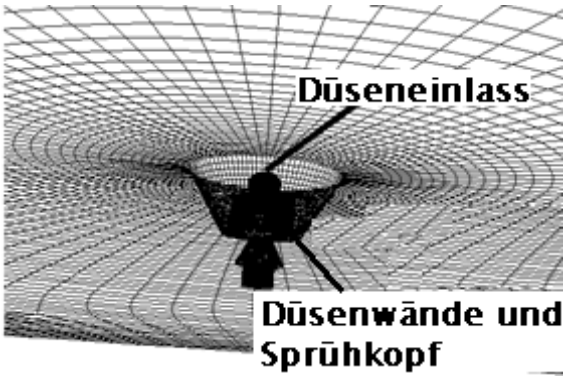


*Abbildung 5-41: **zeigt die definierten Grenzflächen des Düsenkopfes***

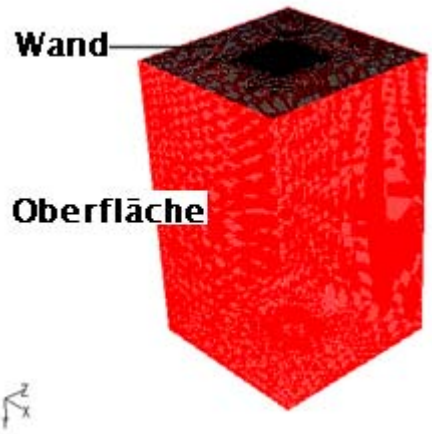


*Abbildung 5-42: **zeigt die definierten Grenzflächen der Einhausung***

Die Lufteinlassoberfläche wurde als Massenflusseinlass definiert:

Massenfluss	0,005	kg/s
Überdruck	0	Pa
turbulente Intensität	10	%
hydraulischer Durchmesser	0.00175	m
statische Temperatur	293	K
diskretes Phasen Modell	escape	

Der Luftauslassoberfläche wurde als Druckauslass definiert:

Überdruck	0	Pa
turbulente Intensität	5	%
hydraulischer Durchmesser	1	m
statische Temperatur	293	K
diskretes Phasen Modell	escape	

Die Wandbedingungen wurden als stationär angenommen und als Schubspannungsansatz wurde an der Wand die Abgleitung ausgeschlossen. Die Wandtemperatur wurde als 293 K festgelegt. Für das diskrete Phasenmodell wurden zwei Grenzbedingungen ausgesucht:

- *Wandfilmgrenzbedingung* für die Düsenkopfwände,
- *Standardreflexionsgrenzbedingung* für die Decke der Einhausung an der die Düsen befestigt sind.

Das Wandfilmmodell erlaubt einem Tropfen auf eine Oberfläche aufzutreffen und dort einen etwa 500 µm dünnen Flüssigkeitsfilm zu formen. Im Zuge dessen wird auch die Interaktion während dem Auftreffen des Tropfens mit der Wandoberfläche berechnet [76]. Um das Strömungsverhalten der richtigen Tropfengrößenfraktionen in der Einhausung studieren zu können, wurden Kollision, -Verdampfungs-, sowie Sekundärtropfenbildungseffekte nicht berücksichtigt. Die Decke der Einhausung wurde aufgrund der zu erwartenden Vorzugsrichtung der Tropfen als nicht maßgeblich identifiziert und deshalb die Standardeinstellungen die FLUENT vorsieht für Reflexion herangezogen.

5.3.1.4.9 Definition der Eigenschaften der kontinuierlichen Phase sowie der Betriebsbedingungen

Die Materialeigenschaften der Gasphase und der diskreten Phase sind zu definieren. Für die kontinuierliche Phase auch während der kompressiblen Strömung wurden die Eigenschaften eines idealen Gases angenommen. z.B: wurde die Dichte des Gases mit dem idealen Gasgesetz berechnet. Die Materialeigenschaften wurden auf eine Temperatur von 293K bezogen.

spezifische Wärmekapazität	1004.8	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
thermische Konduktivität	0.02529	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
Viskosität	$1.81\ 10^{-6}$	$Kg\ m^{-1}\ s^{-1}$
Molmasse	28.996	$Kg\ kmol^{-1}$

Die Wassertropfen wurden mit einer Dichte von 998 kg /m^3 spezifiziert.

Die Betriebsbedingungen wurden definiert als:

- Betriebsdruck von 101 325 Pa
- Betriebstemperatur von 293 K

Die Spezifikation der Betriebsbedingungen schließt die Gravitation mit ein. Die Gravitationsgeschwindigkeit wurde als 9.81 ms^{-2} in positive y Richtung definiert.

5.3.1.4.10 Gewählte Startbedingungen

Die Startbedingungen des Strömungsfeldes müssen festgelegt werden um FLUENT die numerische Iteration und Anpassung der Strömungsbedingungen zu ermöglichen damit das Strömungsmechanische Problem gelöst werden kann. Die Startbedingungen wurden an der Berechnungsoberfläche des Lufteinlasses vorgegeben. Als Geschwindigkeitskomponente wurde ein hoher Wert von 100m/s angenommen und für die Turbulenzparameter wurden niedrige Werte von jeweils 1 für die turbulente kinetische Energie und die turbulente Dissipation angenommen um eine hohe Stabilität der Rechnung herbeizuführen.

5.3.1.4.11 Numerische Simulation

Nachdem alle Startbedingungen und Materialeigenschaften festgelegt werden konnten, konnte der iterative Lösungsalgorithmus des Strömungsmechanischen Problems aufgerufen werden. Die Herausforderung dabei ist, die Lösung zum konvergieren zu bringen also die Lösung unabhängig von der Anzahl der Iterationen zu machen. Konvergiert ein Parameter nicht so kann die gesamte Lösung nicht konvergieren. Wurden Berechnungen der diskreten und kontinuierlichen Phase simultan in einem System durchgeführt traten die beschriebenen Konvergenzprobleme auf. Dieser Umstand machte es erforderlich die numerische Simulation der Gleichungen zu splitten in:

- Die iterative Lösung der kontinuierlichen Phase (Gasströmung)
- Die iterative Lösung der diskreten Phase (Wassertropfen), unter Impulsaustausch mit der kontinuierlichen Phase.

Um den Gasfluss durch die Düse zur Konvergenz zu bringen war es weiters notwendig den Massenfluss von 0,005kg/s schrittweise zu berechnen. Gestartet wurde graduell mit einem Massenfluss von 0,0005 kg/s (1/10 des finalen Gasflusses) womit eine konvergente Lösung erhalten wurde. Diese konvergente Lösung wurde als Startbedingung für den nächst höherem Massenfluss von 0,001kg/s verwendet usw.usf. Die Massenflussschritte für die graduell das Strömungsfeld berechnet wurde, sind in Tabelle 5-2 dargestellt. Nachdem dadurch eine konvergente Lösung für den finalen Massenfluss herbeigeführt wurde, wurde die Kalkulation der diskreten Phase in das System der kontinuierlichen Phase vorgenommen.

Tabelle 5-2: ***Schrittweise Berechnung der Strömung der kontinuierlichen Phase in der Düse:***

Lösungsschritt	Massenfluss [kg/s]	Anzahl der diskreten Elemente
1	0,0005	29 652
2	0,001	29 652
3	0,002	1 500 000
4	0,0025	1 500 000
5	0,003	1 500 000
6	0,0035	1 500 000
7	0,004	1 500 000
8	0,0045	1 500 000
9	0,005	4 000 000
DPM		

Insgesamt waren 29 652 Iterationen notwendig um eine Lösung des Strömungsproblems im Düsenkopf zu Beginn zu ermöglichen. Die Auflösung des Netzes musste ebenfalls Schrittweise an die anspruchsvolleren Verhältnisse bei gesteigerten Massenfluss angepasst werden. Die Verdichtung des Netzes im Düsenkopf war insgesamt 2mal auf schlussendlich 4 000 000 Elemente notwendig (Tabelle 5-2).

5.3.1.4.12 Beurteilung der Lösungsqualität

Das iterative Berechnen einer Lösung ist auch mit Unsicherheiten verbunden. Ziel der durchgeführten Simulation ist ein quantitativ korrektes Strömungsbild der Düse und der Tropfen über die vorgegebenen Düseneigenschaften zu erhalten. Um Fehler dahingehend ausschließen zu können wurden folgende Maßnahmen gesetzt. Die Illustration der Konvergenzhistorie der Residuen sowie der berechneten Strömungsgeschwindigkeit wurde graphisch dargestellt und bewertet. (Abbildung (5-43 und 5-44). Es ist hier sehr gut die Schrittweise Auslenkung des Systems und dessen Einschwingung bzw. Konvergenz zur jeweiligen Lösung zu beobachten.

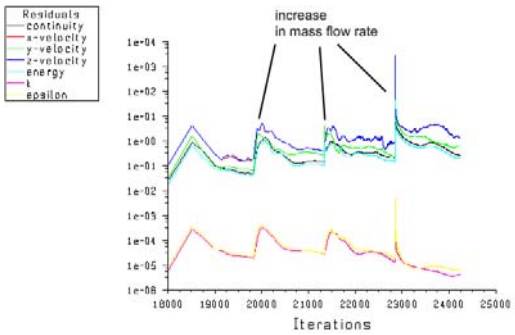


Abbildung 5-43: ***Konvergenzhistorie***

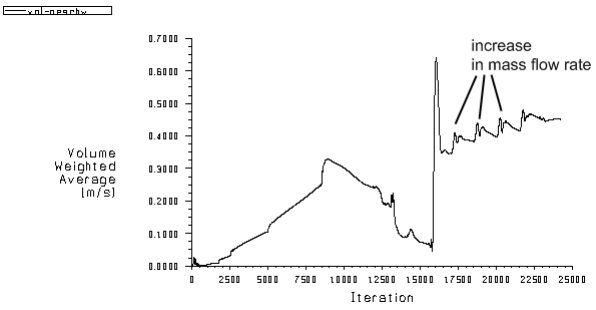


Abbildung 5-44: ***Volumen monitor***

Der flächengemittelte statische Druck am Lufteinlass, die Turbulenzintensität am Auslass sowie die über die gesamte Domäne gemittelte Geschwindigkeit sind die drei Lösungsbeeinflussenden Residuen welche berechnet wurden, um zu überprüfen ob eine physikalisch konsistente Lösung erreicht wurde (Abbildung 5-44). Die über das gesamte Kontrollvolumen gemittelte

Geschwindigkeit steigt sprunghaft bei jedem Simulationsschritt an was sich kohärent zum Verhalten des Massenflusses ergibt. Die Konvergenzhistorie zeigt, dass für diese Simulation die Standardresiduenwerte nicht erreicht wurden. Da aber die Residuen nach einer gewissen Anzahl an Iterationen einen konstanten Wert erreichen und die unabhängigen Parameter Konvergenz zeigen ist die Lösung Akzeptabel. Bei der zweifachen Verfeinerung des Netzes konnte auch die Unabhängigkeit des Konvergenzverhaltens von der Dichte des numerischen Netzes den jeweiligen Bedingungen entsprechend entnommen werden.

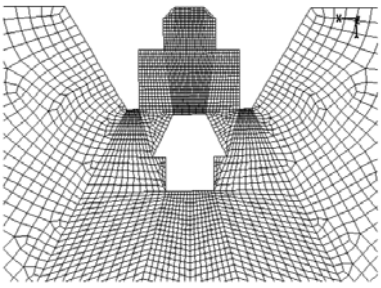


Abbildung 5-45: ***Originales Netz***

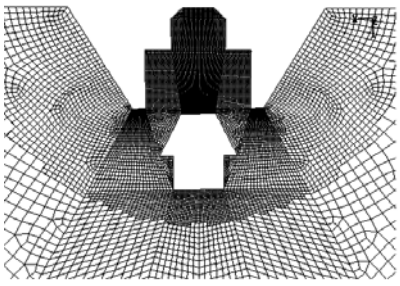


Abbildung 5-46: ***Erste Adaption***

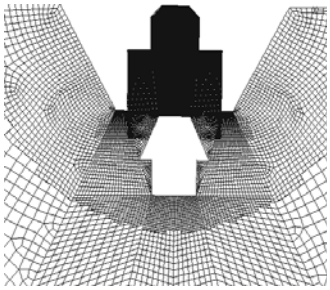


Abbildung 5-47: ***Zweite Adaption***

Die Verlässlichkeit der Lösung unterstützt auch die Tatsache, dass sich das ausgebildete Strömungsfeld je berechneten Massenfluss ähnlich ist. Auch treten die hohen Geschwindigkeitskomponeneten wie zu erwarten ist an den engsten Stellen auf (Abbildungen 5-45 bis 5-51).

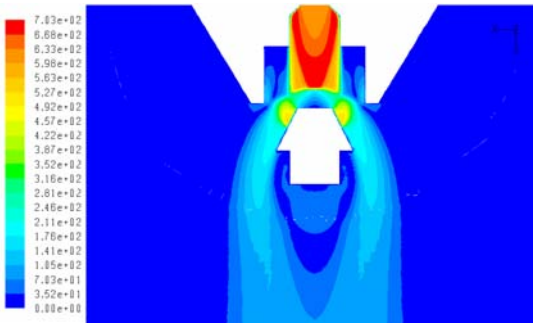


Abbildung 5-48: ***Massenstrom von 0.005 kg/s nach erster Adaption (Geschwindigkeitsmagnitude in Farbabstufungen dargestellt)***

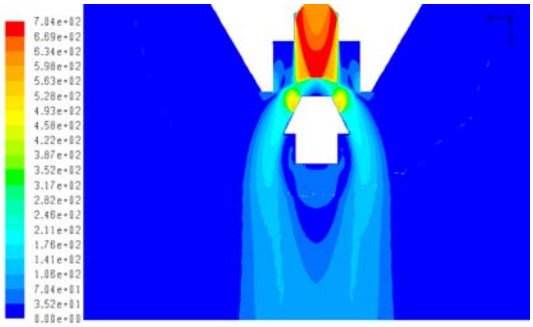


Abbildung 5-49: ***Massenfluss von 0.005 kg/s nach zweiter Adaption***

Um die Auflösung des numerischen Netzes sowie der Randbedingungen zu überprüfen dient der dimensionslose Parameter y+ als Anhaltspunkt, er soll Werte zwischen 30 -120 besitzen damit das verwendete Turbulenzmodell akkurate Resultate liefert [76].

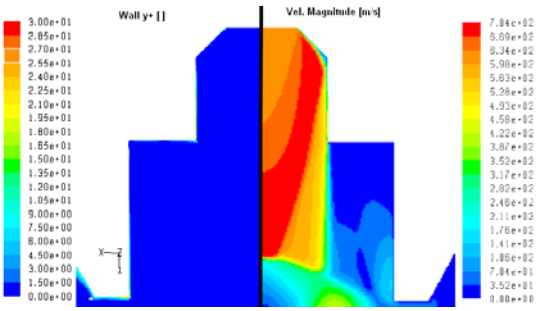


Abbildung 5-50: ***Düsensprühkopf***

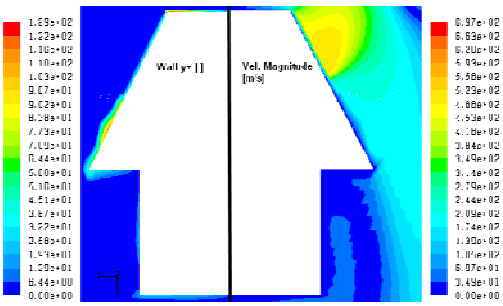


Abbildung 5-51: ***Düsenimpaktionskörper***

Im Düsensprühkopf wurden y+ Werte von 26-30 berechnet. Am Düsenimpaktionskörper traten y+ Werte von 30-120 auf. Um eine höhere Genauigkeit der erhaltenen Daten zu erhalten müsste das numerische Netz im Düsensprühkopf verbessert werden. Aufgrund der auftretenden Konvergenz und der Möglichkeit die erhaltenen Daten mit den experimentell ermittelten Werten vergleichen zu können wurde jedoch davon Abstand genommen, da die y+ Werte um einen qualitativen Eindruck zu gewinnen als durchaus akzeptabel anzusehen sind.

Der zu erwartende Systemdruck von etwa 5bar trat in der Düse auf und die Simulationsresultate bewegten sich um diesen Wert.(Abbildung 5-52 und 5-53)

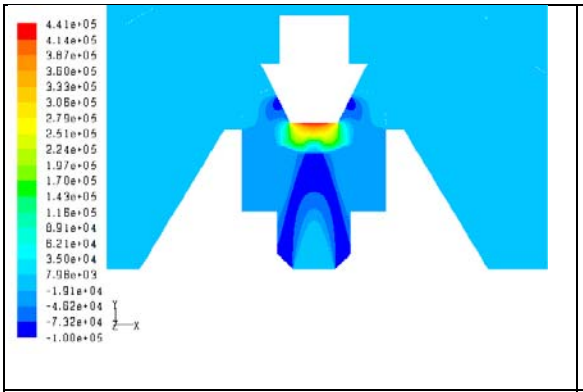


Abbildung 5-52: ***statischer Druck [Pa]***

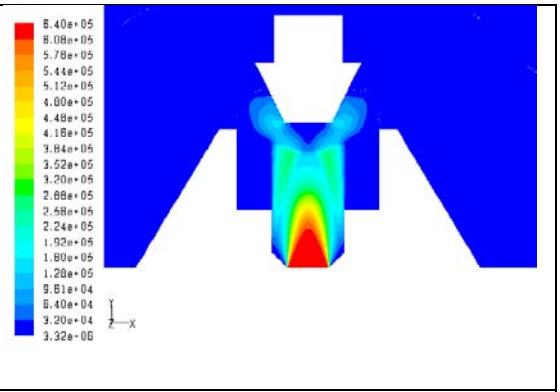


Abbildung 5-53: ***dynamischer Druck [Pa]***

Die folgenden 3 Abbildungen (5-54 bis 5-55) demonstrieren wie sich die Lösung mit Steigerung des Massenflusses ändert. Es findet eine Steigerung der Geschwindigkeit bis zur Überschallgeschwindigkeit statt was die Verwendung des dichtebasierenden Lösungsalgoritmusses genauso rechtfertigt wie die Verdichtung des numerischen Netzes. Die Resultate der Simulation bestätigen die gewählte Vorgangsweise.

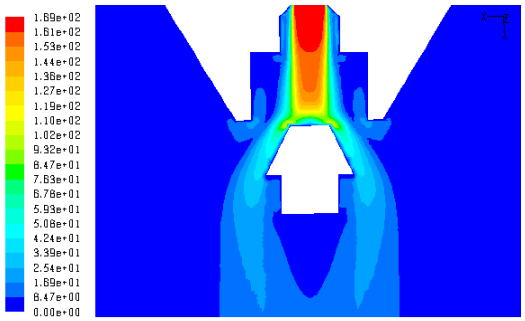


Abbildung 5-54: ***Massenfluss von 0.0005 kg/s (1600 Iterationen)***

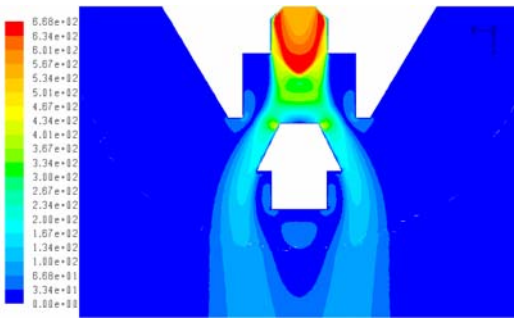


Abbildung 5-55: ***Massenfluss von 0.003 kg/s (16 840 Iterationen)***

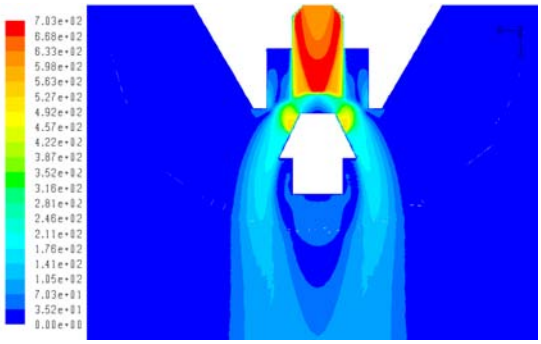


Abbildung 5-56: Massenfluss von 0.005 kg/s (22 840 Iterationen)

In Abbildung 5-54 ist das Ergebnis des berechneten Strömungsfeldes nach der ersten Massenflusssteigerung zu sehen. Es ist zu erkennen das es sich bei der maximal auftretenden Strömungsgeschwindigkeit von 169 m/s (Ma=0,5) um eine Unterschallströmung handelt welche sich in Form eines Freistrahles am Düseneinlass ausbildet. Abbildung 5-55 zeigt das Ergebnis nach vierfacher Massenflusssteigerung hier ist zu erkennen, dass sich der Freistrahl bereits im Düsenkopfinnenraum ausbildet sowie das Auftreten von Überschallstößen am Düsenkopf zu beobachten sind. Außerdem ist die Ausbildung einer Überschallströmung am Düsenkopf zu erkennen. Abbildung 5-56 zeigt dass am Düsenaustritt nach dem Düsenkopf etwa eine Strömungsgeschwindigkeit von 200 m/s vorherrscht. Punktuell treten aber im Düseninneren Geschwindigkeiten von etwa 700 m/s was eindeutig im Überschallbereich angesiedelt ist. Der kegelförmige Düsensprühkopf am Düsenauslass beeinflusst die Strömungsrichtung der Luft indem sie diesen umströmen muss. Die Impulsrichtung ändert sich jedoch viel weniger nachdem ersichtlich ist, dass die Luftströmung nach dem Verlassen der Düse wider in fast vertikaler Richtung weiter strömt. Als Ergebnis der Düsensimulation ist ein qualitativer Eindruck der Gasströmungsausbildung der verwendeten Zweistoffdüse in Abbildung 5-56 illustriert. Abbildung 5-57 zeigt, dass die Strömung nach Verlassen der Düse im größeren Maßstab. Es ist zu erkennen, dass bereits nach 2 cm die Gasgeschwindigkeit auf etwa 100 m/s abgenommen hat. Nach 10 cm hat die Geschwindigkeit auf 60m/s abgenommen und nach 30 cm auf 20 m/s. Außerdem ist ein graduelles Abnehmen der Gasgeschwindigkeit vom Düsenzentrum nach außen zu erkennen.

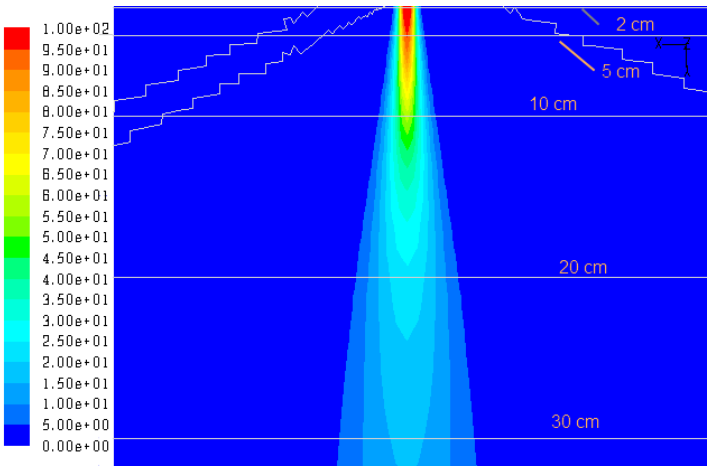


Abbildung 5-57: ***berechnetes Geschwindigkeitsprofil der Gasströmung unterhalb der Düse.***

5.3.1.4.13 Resultate der Tröpfchenströmung

In dieser Simulation wurden vier Tropfengrößenfraktionen, welche die Tropfengrößenverteilung der Zweistoffdüse repräsentieren, im Strömungsverhalten untersucht. Hierzu wurden 3 µm, 12.5 µm, 35 µm, und 100 µm Tröpfchen verwendet. Im Folgenden werden Illustrationen der Tropfenausbreitung die durch FLUENT berechnet wurde gezeigt. Abbildung 5-58 zeigt jede hundertste Tropfenflugbahn. Abbildung 5-59 zeigt jede fünfhundertste Tropfenflugbahn was einen genaueren Blick auf die Zentrumsregion am Düsenaustritt zulässt. Die grauen Hilfslinien in den Abbildungen zeigen eine Distanz von 100mm

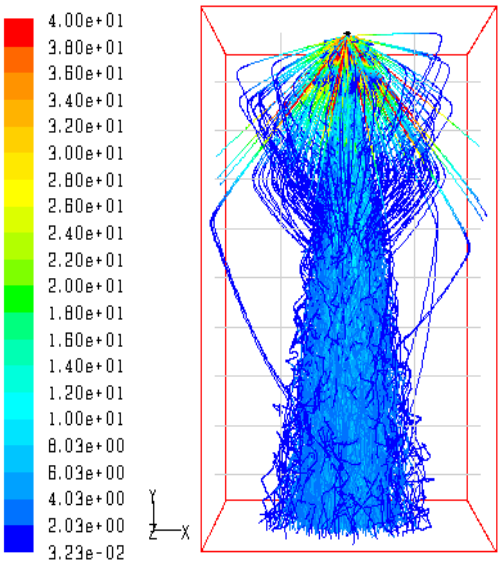


Abbildung 5-58: ***Tropfenflugbahnen jedes hundertsten Tropfens Geschwindigkeit in m/s***

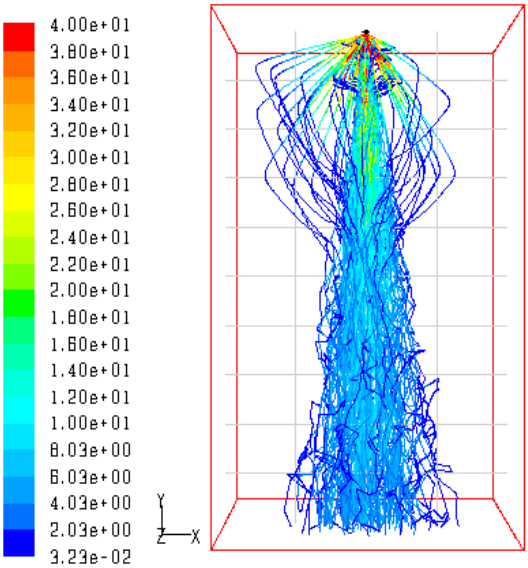


Abbildung 5-59: ***Tropfenflugbahnen jedes fünfhundertsten Tropfens Geschwindigkeit in m/s***

Es ist ersichtlich, dass einzelne Tropfen vom Düsensprühkopf reflektiert werden, die nach Abbremsung der Tropfen in den Zentralbereich des Sprühs eingesaugt werden. Die Mehrzahl der Tropfen wird allerdings nicht vom Düsesprühkopf reflektiert, sondern folgen der Gasströmung und verbleiben während des gesamten Fluges im zentralen Sprühkegel. Es wurde festgestellt, dass im Gegensatz zur Gasströmung der Düsensprühkopf die Impulsvorzugsrichtung der Strömung sehr wohl nachhaltig zumindest einzelner Tröpfchen beeinflusst (Abbildung 5-60).

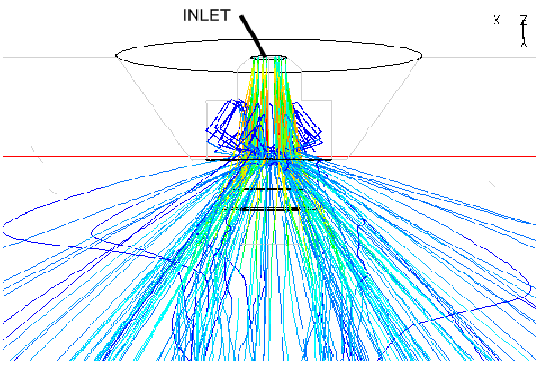


Abbildung 5-60: ***Aufsplittung der Tropfenflugbahnen durch den Düsensprühkopf***

Also wird die Tropfenflugbahn durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Die vertikale Gasströmung und
- Den Düsensprühkopf

Es ist ersichtlich, dass manche Tropfen stärker reflektiert werden als andere, jedoch ändern nach gewisser Flugzeit die Tropfen Ihre Flugrichtung und gelangen schlussendlich wieder in die Zentrale Luftströmung und folgen dieser. Die Luftströmung beeinflusst auch die Tropfenflugbahn in gewissem Abstand von der Düse, da die Tröpchen nachdem sie Fluggeschwindigkeit nach außen abgebaut haben in Richtung der Gasströmung geführt werden. Bezieht man sich darauf, kann der Spray in zwei Bereiche unterteilt werden:

- Expansionsregion wo Tropfen sich in unterschiedlichen Richtungen auseinander bewegen.
- Einsaugbereich wo abgebremste Tropfen in die Zentrumsbereiche des Sprays von außen eingesaugt werden.

Die Bewegung der Tropfen im Expansionsbereich ist demnach stark von der Geometrie bzw. dem Auftreffen und Abprallen am Düsensprühkopf beeinflusst. Die Bewegung der Tropfen im Einsaugbereich ist nach den Resultaten der Simulation demnach stark vom Geschwindigkeitsgradienten der Tropfen zwischen Düsensprühzentrum und Rand beeinflusst. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen und die Abhängigkeit von der Tropfengröße in diesem Kontext aufzuzeigen werden Folgende Bilder gezeigt (Abbildung 5-61 bis 5-64). Hier ist jede hundertste Tropfenflugbahn sowie die Geschwindigkeit in m/s in verschiedenen Farbabstufungen dargestellt.

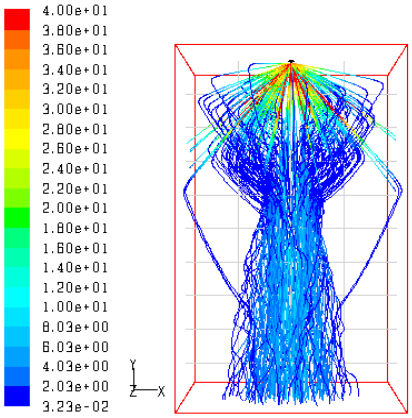


Abbildung 5-61: ***Tropfenflugbahnen von 100 µm Tropfen***

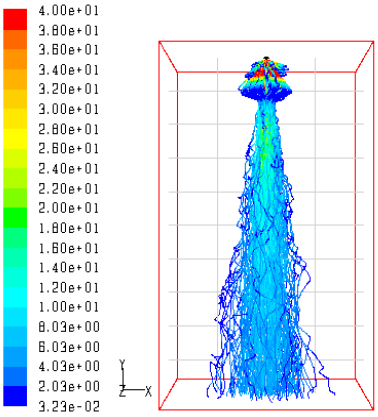


Abbildung 5-62: ***Tropfenflugbahnen von 35 µm Tropfen***

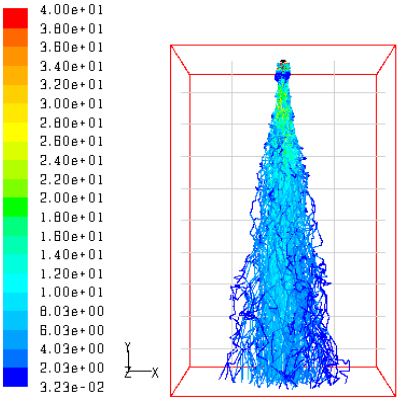


Abbildung 5-63: ***Tropfenflugbahnen von 12,5 µm Tropfen***

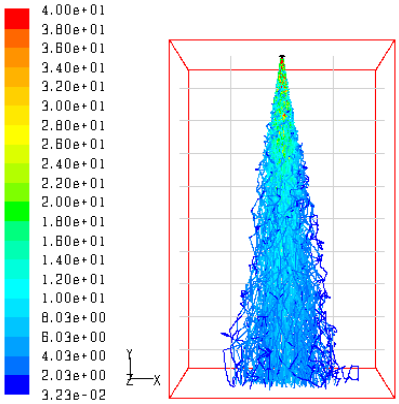


Abbildung 5-64: ***Tropfenflugbahnen von 3 µm Tropfen***

Die Simulationsresultate zeigen, dass das unter den getroffenen Annahmen das berechnete Reflexionsverhalten der Tröpfchen vom Düsensprühkopf stark von der Tropfengröße abhängig ist.

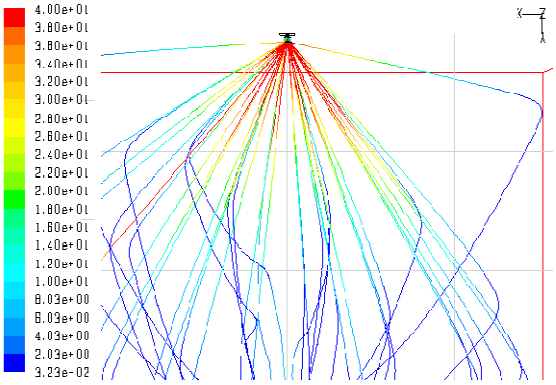


Abbildung 5-65: ***Tropfenflugbahnen von 100 µm Tropfen***

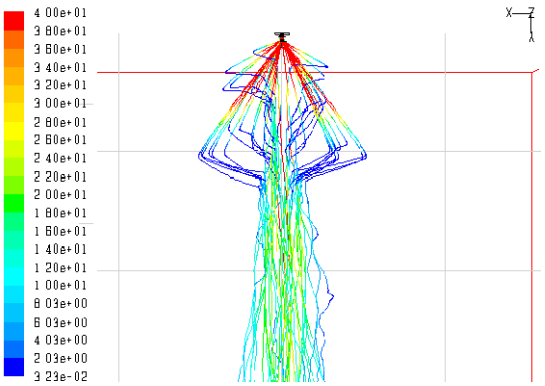


Abbildung 5-66: ***Tropfenflugbahnen von 35 µm Tropfen***

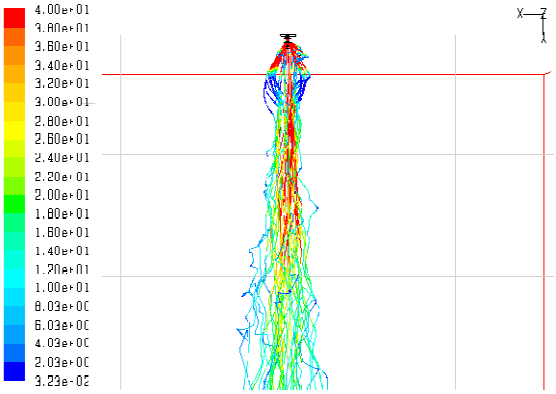


Abbildung 5-67: ***Tropfenflugbahnen von 12,5 µm Tropfen***

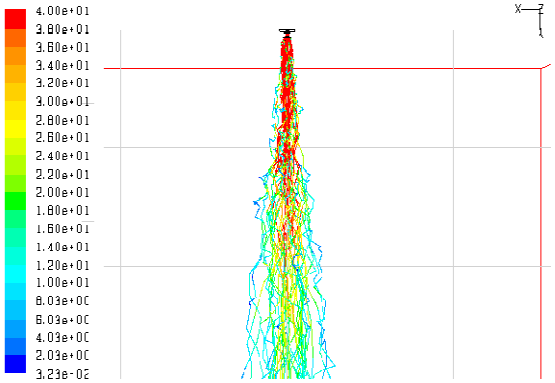
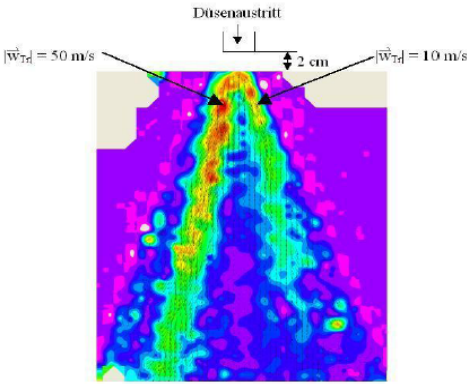


Abbildung 5-68: ***Tropfenflugbahnen von 3 µm Tropfen***

Wie in Abbildung 5-65 bis 5-68 anhand der Tropfenflugbahnen der 3 µm Tropfen zu erkennen ist, wird die Tropfenflugbahn von 3µm Tropfen kaum noch vom Düsensprühkopf beeinflusst sondern einzig und allein durch die Gasströmung. Es ist also kein Expansionsbereich oder Einsaugbereich erkennbar. Die Ausbildung eines Expansions- bzw. Einsaugbereiches ist also erst bei größer werdenden Tropfengrößen zu beobachten (Abbildung 5-65 und 5-66). Anhand der Simulationsergebnisse könnte man Düsensprays ähnlicher Bauart folgendermaßen interpretieren: Besteht der Spray aus feinsten Tropfen so breiten sie sich mit der Gasströmung im Zentrum des Sprays aus. Treten beim Düsenspray auch größere Tropfen auf, so sind diese Aufgrund Ihrer Trägheit im Expansionsbereich nahe dem Düsenaustritt zuerst im äußeren Bereich des Sprühkegels zu finden und erst nach dem Einsaugbereich im Düsensprühzentrum gemeinsam mit den feineren Tröpfchen. Der Abstand vom Düsenaustritt bis zum folgen der Tröpfchen mit der Gasströmung im Zentrum des Sprays, ist je nach Tropfengröße unterschiedlich, da der Expansions- und Einsaugbereich umso größer ist, umso größer die Tröpfchen und somit deren Trägheit ist. Dieses simulierte Sprühbild der Eingesetzten Zweistoffresonanzdüse kommt unter der Annahme zustande, dass die Tropfenbildung im Düsenraum der mit einem im Ultraschallbereich zerstäubenden Schwingkörper ausgestattet ist, abgeschlossen ist. Das Simulationsergebnis ist trotzdem substanziell, da ein Tropfenzerfall am Düsenaustritt oder danach laut Energiebilanz nur durch Umwandelung der kinetischen Energie stattfinden kann und diese Verlangsamung der gebildeten Tropfen zwangsläufig zum verbleiben in der Gasströmung führt. Das berechnete Sprühbild, das aus Expansions- und Einsaugbereichen großer Tropfen welche am Sprühkegel außen und fein

zerstäubter Tropfen welche der Gasströmung im Zentrum folgen, scheint daher plausibel. Ein Testresultat von PIV Messungen [80] wurde als Vergleich zu den berechneten Tropfenflugbahnen herangezogen. Die auftretenden Geschwindigkeitskomponenten sind in ähnlichen Bereichen in derselben Größenordnung (Abbildung 5-69 und 5-70). Die Geschwindigkeit der Tropfen der Zweistoffresonanzdüse VSR 1005 bei den simulierten Betriebsbedingungen wurde in einem Abstand von 2cm vom Düsenaustritt in einem 400x400mm großen Bereich aufgenommen. Als PIV wurde ein New Wave Solo 120 XT 15Hz PIV Ser. Nr. 25315. Die PIV Kamera erlaubte es in gepulsten Zeitabständen von 7,5 ms einen Bildausschnitt von 400x400mm mit 2048x2048 Pixel zu erfassen.



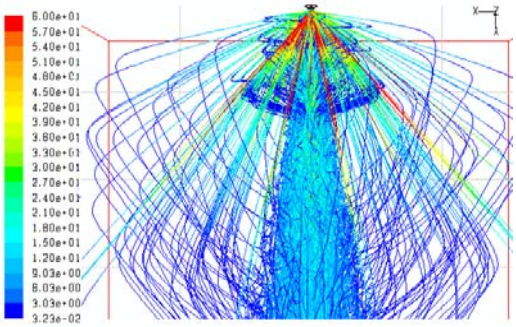


Abbildung 5-69: ***PIV Resultate***

Abbildung 5-70: ***Simulationsresultate***

Im Folgenden wurde zum überprüfen der Simulationsergebnisse und der Existenz der EInsaugbereiche die Tropfenausbreitung je Position im Sprühkegel des Düsensprays mit Hilfe einer Phasendoppleranemometrie vermessen. Als 2D-Phasendoppleranemometer wurde ein TSI System bestehend aus einem LA300-230 Argon-Ionen –Laser (300mW), einem Lasersplitter FBL-2 2D Fiber Light Multifarben Strahlgenerator mit Braggzelle und 40MHz Frequenzshift, TR260 Sendeoptik mit Lichtleitersonde 83mm einem RV2070 Fiber Optic PDA Empfänger sowie einem PDM10002LP Photomultiplier und einem FSA3500-2P Signalprozessor verwendet. Es wurde die Tropfengeschwindigkeit und Richtung im Zentrum der Düse in einem Abstand vom Düsenaustritt von 30cm sowie in diesem Abstand vom Düsenzentrum in der Mitte (10cm vom Düsenzentrum) zwischen Rand des Sprühkegels und dem Düsenzentrum sowie am Rand des Sprühkegels (20cm vom Düsenzentrum) aufgenommen. Es konnte festgestellt werden, dass die Geschwindigkeitsverteilung der Tropfen im Zentrum sehr eng ist und in mittel 6 m/s beträgt. Es ist zu erkennen, dass im Zentrum die Partikelgrößenverteilung ebenfalls sehr eng ist und kleine Tropfen (in mittel 8µm) dort angereichert sind siehe Abbildung 5-70a. In Seitlichen Abstand vom Zentrum ist eine Vergröberung der Tropfen sowie eine verbreiterung der Geschwindigkeitsverteilung festzustellen Abbildung 5-70b. Am Rand des Sprühkegels ist die Tropfengröße sowie die Breite der Tropfengrössenverteilung sowie die Breite der Geschwindigkeitsverteilung am grössten Abbildung 5-70c. Die mittleren Geschwindigkeitskomponeneten in y Richtung (quer zur Strömungsrichtung) nehmen nach aussen etwas zu. Die gemessnenen Tropfenbewegungen der Zweistoffresonanzdüse VSR 1005 bei Simulationsbetriebsbedingungen zeigten somit eine gute Übereinstimmung der durch die Simulation der Tropfenflugbahnen erhaltenen Trends der Sprühbilder sowie Geschwindigkeits und Tropfengrössenverteilungen im Sprühkegel. Durch Messung der Tropfenausbreitung mit Hilfe einer

Photron FASTCAM SA3 120K Hochgeschwindigkeitskamera mit 1024x1024 Pixel und 60.000 Frames/s konnten die Simulationsresultate ebenfalls untermauert werden.

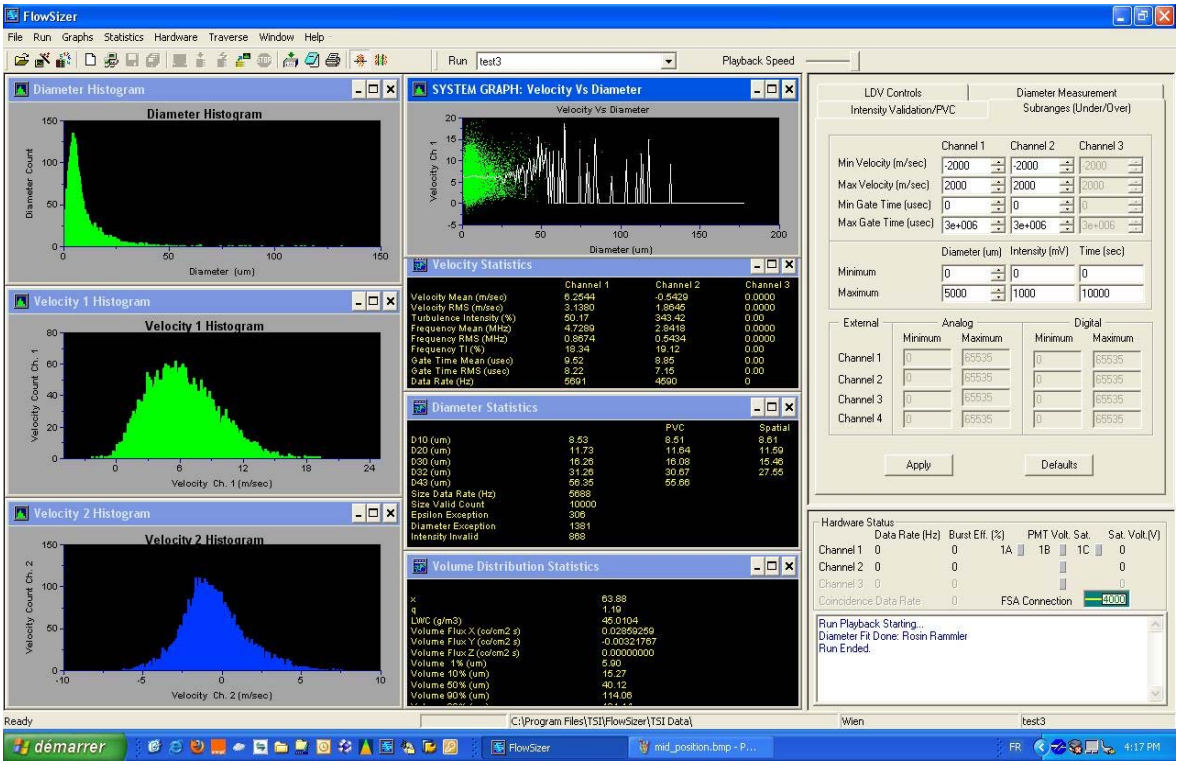


Abbildung 5-70a: Messung der Tropfengrössenverteilung und Geschwindigkeitsverteilung im Zentrum des Sprays mittels Phasendoppleranemometrie (40cm Abstand vom Düsenaustritt)

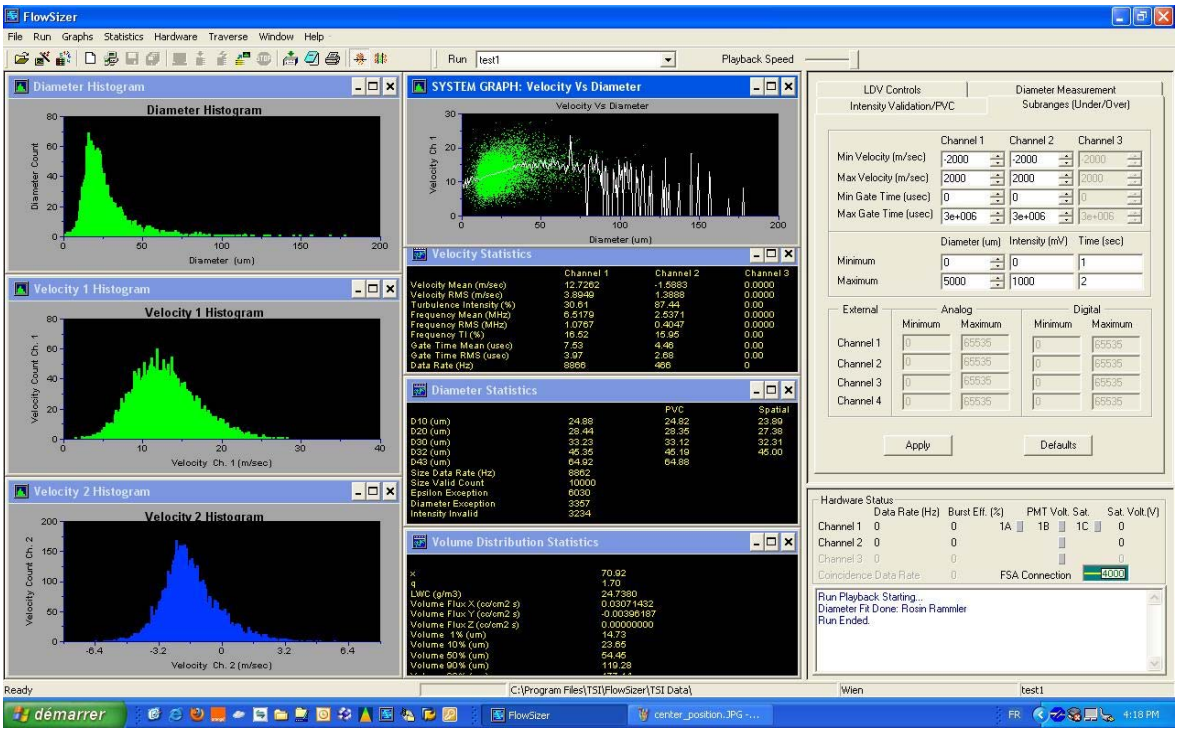


Abbildung 5-70b: Messung der Tropfengrössenverteilung und Geschwindigkeitsverteilung in 10cm Abstand vom Zentrum des Sprays mittels Phasendoppleranemometrie (40cm Abstand vom Düsenaustritt)

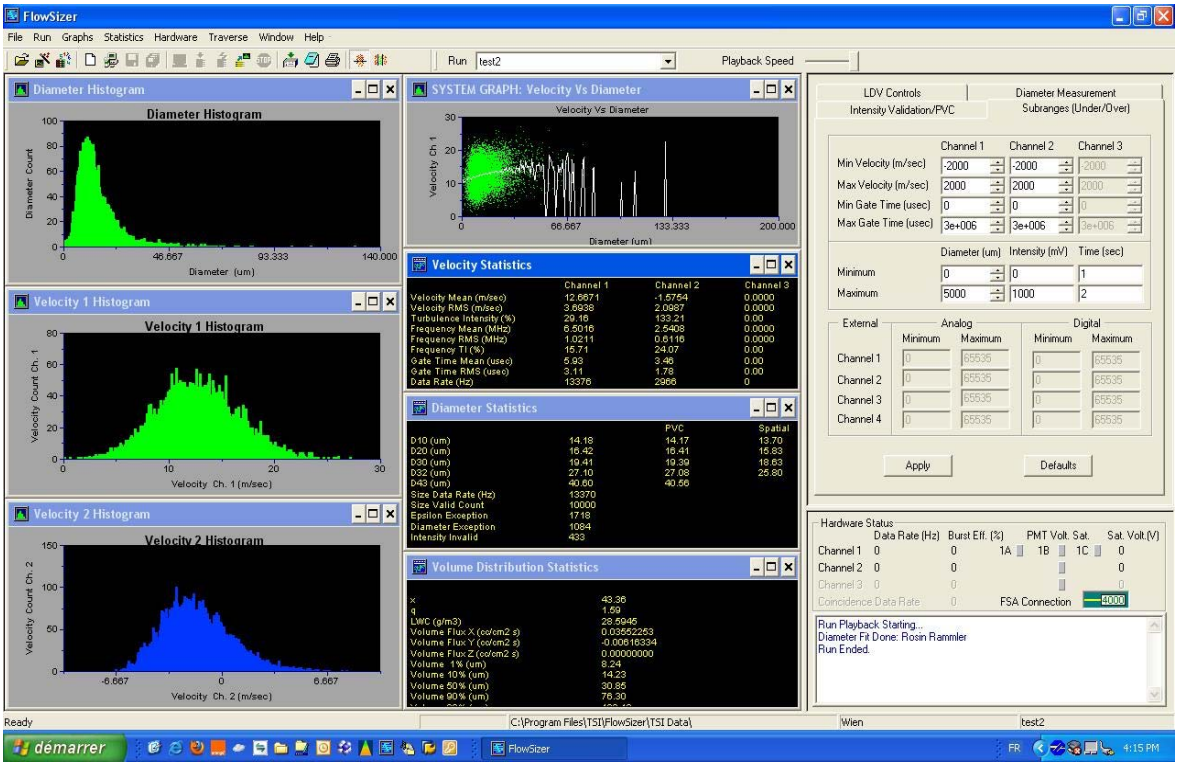


Abbildung 5-70c: Messung der Tropfengrössenverteilung und Geschwindigkeitsverteilung in 20cm Abstand vom Zentrum des Sprays (rand des Sprühkegels) mittels Phasendoppleranemometrie (40cm Abstand vom Düsenaustritt)

5.3.1.4.14 Generierung einer Grenzfläche

Wie bereits angeführt besteht, für einen in einer Einhausung implementierten Zweiphasendüsenspray keine definierte Grenzfläche welche alle erforderlichen strömungsmechanischen Informationen enthält. Die Gasströmung der Düse sowie die Tropfenflugbahnen wurden separiert vom staubbeladenen Strömungskanal berechnet, dessen Daten es nun in den Strömungskanal zu implementieren gilt. Hierzu ist jedoch die Erstellung einer Grenzfläche notwendig. Damit die Daten der Tropfenflugbahnen der Simulation der Strömungsverhältnisse in der Einhausung mitgeteilt werden war es notwendig VBA und MATLAB zu programmieren.

5.3.1.4.15 Auswahl einer geeigneten Grenzfläche

Die ausgewählte Grenzfläche muss Informationen über die berechnete Gasströmung sowie die berechneten Tropfenflugbahnen des Düsensprühs enthalten. Desweiteren hat die Grenzfläche die gesamte Düse samt Düsensprühkopf zu umschließen um alle geometrie bedingten Effekte der Tropfenausbreitung bei der Strömungsberechnung in der Einhausung zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist die Grenzfläche so zu wählen, dass dort niedrige Strömungsgeschwindigkeiten auftreten um den druckbasierenden Lösungsalgorithmus für inkompressible Strömung der für die Berechnungen der Strömungsverhältnisse in der Einhausung zielführend ist, anwenden zu können. Abbildung 5-71 zeigt das gewählte Grenzflächenprofil zwischen Düsensprühkopf und Düseninnenraum.

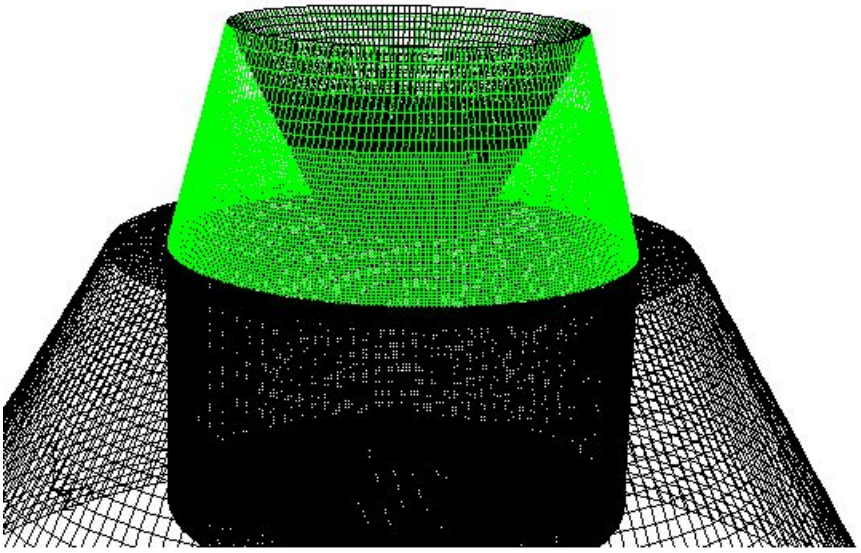


Abbildung 5-71: ***gewähltes Grenzflächenprofil in grüner Farbgebung dargestellt.***

Diese interne Grenzfläche ist durchlässig und hat keinerlei Strömungsbeeinflussende Effekte. Die erstellte Grenzfläche ermöglicht es aber die generierte Information der Strömungssimulation der Düse, über Textdateien, in die Simulation der Strömungsverhältnisse in der Staubabscheidekammer, zu implementieren. Die maximal auftretende Gasgeschwindigkeit (die Tropfengeschwindigkeiten liegen stets darunter) beträgt 180 m/s und ist für die Anwendung des druckbasierenden Lösungsalgorithmusses relativ hoch. Dies wurde jedoch akzeptiert, da diese hohen Geschwindigkeiten nur sehr lokal auftreten.
Es mussten zwei Datensätze in Textdateien exportiert werden, einerseits das Geschwindigkeitsprofil des Gases und andererseits die Daten der Tropfenflugbahnen an der festgelegten Grenzfläche.
Das Gasgeschwindigkeitsprofil beinhaltete folgende Daten welche jeweils am Zellenzentrum der Zellen des Grenzflächennetzes berechnet wurden:

- Koordinaten (x,y,z),
- Geschwindigkeitskomponenten (u,v,w), und
- die Turbulenzvariablen k und ε.

Die Daten der Tropfenflugbahnen sind für jede Tropfengrößenfraktion separat beschrieben. Diese Datensätze beinhalten alle notwendigen Informationen um eine Injektion der Tropfen stellvertretend für den Düsenspray, welche an der erstellten Grenzfläche ihren Ursprung haben, für die Berechnungsdomäne der Strömungsverhältnisse in der Staubabscheidekammer, vorzunehmen. Diese Datensätze umfassen:

- Koordinaten (x,y,z),
- Geschwindigkeitskomponenten (u,v,w),
- Tropfendurchmesser,
- Tropfentemperaturen,
- Massenstrom der Tropfen,

- Zeit,
- Tropfenzuordnung.

Damit FLUENT die exportierten Dateiformate verwenden kann müssen diese nach in [18] dargelegten Richtlinien erstellt werden.

5.3.1.4.16 Implementierung der erstellten Grenzfläche in die Staubabscheidekammer

Es ist eine Methode zu erstellen um die berechneten Daten der Düsensimulation in die Berechnungsdomäne der Simulation der Strömungsverhältnisse in der Staubabscheidekammer zu implementieren. In der Staubabscheidekammer sind, um den experimentellen Versuchsdaten gerecht zu werden, fünf Düsen in verschiedenen Positionen vorzusehen. Die Berechneten Daten wurden wie folgt auf die Simulation in der Staubabscheidekammer angewendet:

- Die erstellte Grenzfläche am Düsenaustritt zwischen Düseninnenraum und Düsensprühkopf wurde als Einlassgrenzfläche für die Berechnungsdomäne der Strömungssimulation der Staubabscheidekammer verwendet. Daher wurden fünf Einlassgrenzflächen in der Berechnungsdomäne berücksichtigt.
- Da die Einlassgrenzflächen in der Staubabscheidekammer in unterschiedlichen Positionen anzubringen sind, sind die Koordinaten der Datenpakete der Strömungssimulation der Zweistoffdüse an die Koordinaten der jeweiligen Einlassgrenzfläche anzupassen. Dies macht eine Koordinatentrasformation notwendig.

Um eine Koordinatentransformation für alle Datensätze durchzuführen, wurden Transformationsprogramme mittels VISUAL BASIC und MATLAB erstellt. Die Verwendung dieser beiden Programmiersprachen war notwendig um dem Textdesign das FLUENT anwendet zu entsprechen. Die erstellten Programmroutinen sind der Appendix zu entnehmen.

5.3.1.4.17 Zusammenfassung der Sprühdüsensimulation

Die numerische Simulation der Zweistoffdüse gewährte verwertbare Einblicke in das Sprühbild der Düse. Im Detail wurde folgendes festgestellt:

- Die Strömung in der Düse liegt im Überschallbereich
- Die Gasströmung verlässt die Düse in vertikaler Richtung und wird nur in sehr geringem Maße vom Düsensprühkopf in Ihren Richtungskomponenten beeinflusst
- Ein Zusammenhang zwischen der Richtung der Tropfenflugbahnen und der Tropfengröße konnte hergestellt werden. Wobei zwei Treiber für die Richtung der Tropfenflugbahnen identifiziert wurden: die Gasströmung zum einen und die Wirkung der Geometrie des Düsensprühkopfes (Expansionsbereich) zum anderen.
- Das Ausmaß der Tropfenumlenkung durch den Düsensprühkopf ist abhängig von der Tropfengröße und ist umso größer, je größer der Tropfen ist.
- Nach dem Abbremsen der Tropfen bewirkt die Gasströmung eine Richtungsänderung der Tropfen in Richtung Düsenzentrum (Einsaugbereich).

5.3.1.5 CFD Simulation der Strömungsverhältnisse in der Staubabscheidekammer mit implementierten Zweiphasensprays

Für die Simulation der Strömungsverhältnisse in der Staubabscheidekammer wurden 3 Düsenpositionierungen der experimentellen Versuche 5.2 ausgewählt. Diese ausgewählten Düsenpositionierungen sind in Abbildung 5-72 und 5-73 dargestellt. Alle Düsen wurden in einem Abstand von 1,5 m vom Lufteinlass der Einhausung in einem Winkel von 90° vertikal nach unten positioniert. Es wurden sodann eine Düse in zentraler Positionierung und je 2 Düsen in unterschiedlichen Abständen zueinander simuliert.

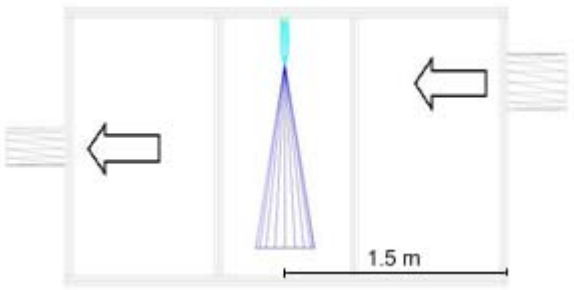


Abbildung 5-72: ***Düsenpositionierung im Seitenriss.***

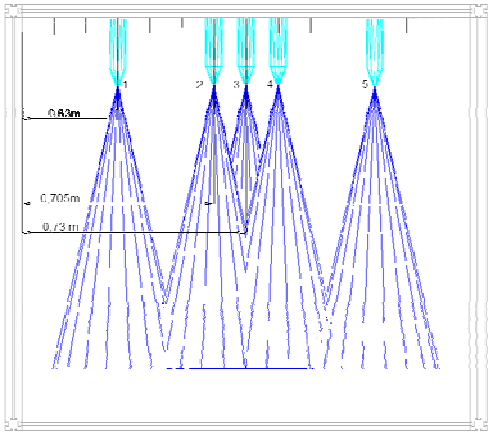


Abbildung 5-73: ***die 3 Ausgewählten Düsenarrangements***

Die 3 Düsenarrangements der experimentellen Versuche die berechnet wurden sind:

37. Position 4 A_0: eine Düse im Zentrum.
38. Position 4 A_2: Zwei Düsen im Abstand von 2 cm voneinander.
39. Position 4 A_{20}: Zwei Düsen im Abstand 20 cm voneinander

Diese Düsenpositionierungen wurden bei der Erstellung einer geometrischen Domäne, um ein numerisches Netz auf die Düsensprays abgestimmt konzipieren zu können, mit einbezogen. So können numerische Lösungen der Strömungsverhältnisse je Düsenarrangement erstellt werden.

In den vorangegangenen experimentellen Untersuchungen der Staubabscheidung wurden folgende zwei verschiedene Volumenströme angewendet:

1. 170 m³/h (Q_{low})= Luftwechselzahl 25/h
2. 520 m³/h (Q_{high})= Luftwechselzahl 77/h

Es wurde hierbei festgestellt, dass die Staubabscheidung unter Anwendung von einem Luftvolumenstrom von 170 m³/h höhere Staubabscheideeffektivitäten erzielt wurden. Um dies strömungsmechanisch zu analysieren wurden CFD Simulationen unter Verwendung beider Luftvolumenströme erstellt. Da zusätzlich auch je drei verschiedene Düsenarrangements analysiert wurden, sind zweierlei Vergleichsmöglichkeiten gegeben:

- Vergleich der Wirkung bei verschiedenen Anströmungsgeschwindigkeiten staubbeladener Luft auf die Staubabscheidung eines Düsenarrangements.
- Vergleich der Wirkung verschiedener Düsenarrangements auf die Staubabscheidung bei einer spezifischen Anströmgeschwindigkeit staubbeladener Luft.

Die Strömung in der Staubabscheidekammer besteht allgemein aus vier Komponenten, dem durch die Staubabscheidekammer gesaugten Luftvolumenstrom, der Feinstaubpartikelfracht welche in der Luftströmung dispergiert ist, der Druckluftströmung aus der Düse sowie den darin zerstäubten Tröpfchen. Der Vorteil bei der CFD Simulation ist dass diese die Darstellung aller 4 Komponenten unabhängig voneinander ermöglicht, obwohl die Berechnung der Strömungsverhältnisse unter gegenseitiger Beeinflussung erfolgt. Daher können die Strömungsbilder jeder Komponente einzeln beurteilt werden. Dadurch besteht die Möglichkeit die Beeinflussung der Strömung der staubbeladenen Luft und der Staubpartikel durch die Düse bei verschiedenen Luftvolumenströmen (Anströmgeschwindigkeiten) sowie verschiedenen Düsenpositionen zu erfassen und hinsichtlich zu erwartender Feinstaubabscheideeffektivität diffuser Staubemissionen zu interpretieren. Die quer durch die Staubabscheidekammer geführte Luftströmung sowie die Luftströmung der Zweistoffresonanzdüse unterscheiden sich in Richtung und Geschwindigkeit und bilden in der Staubkammer die Strömung der kontinuierlichen Phase aus. Die Implementierung der Daten der Simulation der Gasströmung sowie der Tropfen der Zweiphasendüse die die Strömung der quer durch die Staubabscheidekammer geführten Luftströmung je Düsenarrangement stark beeinflusst, ist daher von zentraler Bedeutung. Die Beeinflussung der Luftquerströmung durch den Spray sowie der Tropfen des Sprays durch die Luftquerströmung lässt die experimentell ermittelte Abscheidewirksamkeit eines Zweiphasensprays interpretieren. Genauso analysiert werden kann die Beeinflussung der Partikelflugbahnen des genauso wie in experimentellen Untersuchungen in der Luftquerströmung dispergierten Pural NF Teststaubes durch die vertikale Düsenluftströmung. Ein Vergleich der Partikel und Tröpfchenflugbahnen kann ebenfalls qualitativ im Hinblick auf zu erwartende Abscheidung interpretiert werden, jedoch ist eine Berechnung von Abscheideeffekten sowie Interaktionen zwischen Tropfen und Partikel mit den Annahmen die beim Verwenden des diskreten Phasenmodelles getroffen werden mussten nicht möglich, und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Im Folgenden werden also die Beeinflussung der Partikelflugbahnen durch die Gasströmung der Düse sowie die Beeinflussung der Tropfenflugbahnen des Sprays durch die quer gerichtete Luftströmung für die zwei verschiedenen Luftvolumenströme und jeweils bei den drei unterschiedlichen Düsenarrangements dargestellt werden.

5.3.1.5.1 Erstellung der Berechnungsdomäne

Die Geometriesoftware GAMBIT wurde zum erstellen der numerischen Domäne der Staubabscheidekammer herangezogen. Dazu war es notwendig die erstellte Geometrie der Einhausung in partielle Volumen notwendig um die Erstellung eines Netzes das aus hexagonalen Elementen besteht vornehmen zu können. Das erstellte Netz besteht aus 1 179 252 Zellen.

5.3.1.5.2 Erstellung der Geometrie der Staubabscheidekammer

Die Grenzoberfläche der geometrischen Domäne wurde in Kapitel 5.3.1.1.6 spezifiziert. Unter Verwendung dieser Spezifikationen wurde die geometrische Domäne der Staubabscheidekammer mittels der Geometrie Software Gambit originalgetreu so wie im Versuchsaufbau erstellt. Abbildung 5-74 zeigt diese erstellte Geometrie sowie den Luftein- und Auslass der Anlage zur Staubabscheidung.

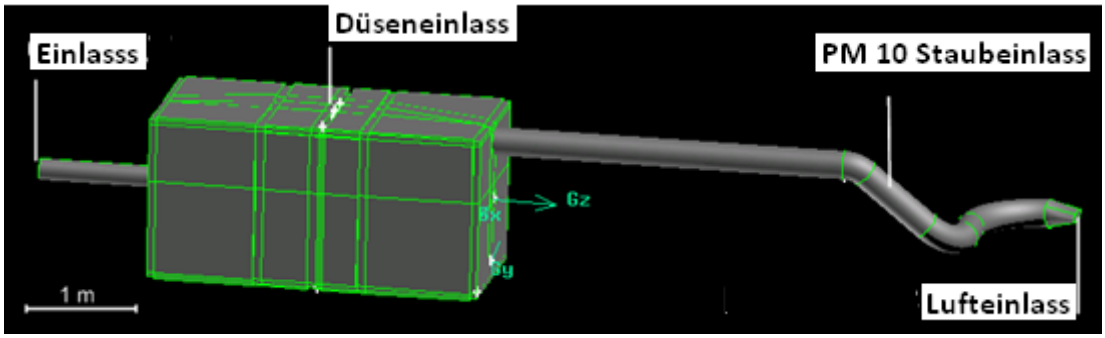


Abbildung 5-74: ***Erstellte geometrische Domäne der Staubabscheidekammer***

Die Düsen wurden wie in Abbildung 5-75 und 5-76 gezeigt, in die geometrische Domäne der Anlage implementiert. Die Düsenaustrittsöffnungen befinden sich etwa 250 mm unterhalb der Staubkammerdecke. Um die berechneten Daten der Strömung der Düsenluftströmung und Tropfenflugbahnen in die Simulation der Strömungsverhältnisse bei Queranströmung in der Staubabscheidekammer zu ermöglichen ist eine Einlassgrenzfläche die um die Düse gezogen wurde der Grenzfläche der Staubkammer anzupassen. Die geometrische Domäne der Staubabscheidekammer ist in partielle Volumen zu unterteilen um in diesen Bereichen jeweils ein hexagonales Netzt aus Volumenelementen zu erstellen. Da die Düsen in der Staubabscheidekammer positioniert sind, benötigte die Einlass und Auslassstrecke der Luftströmung bis zur Düsenposition eine komplexe Aufteilung des Volumens. Um die Erstellung eines hexagonalen Netzwerkes zu ermöglichen war es notwendig die Querschnittsflächen der Lufteinlass und Auslassöffnung sowie des Düsensprühkegels jeweils durch die Einhausung zu projizieren und so die Volumenbereiche in denen jeweils ein hexagonales Netz erstellt werden kann zu definieren. Dadurch überschneiden sich die abgegrenzten Volumenbereiche der Düsenströmung sowie der Lufteinlass und Auslassströmung aber. Daher war es notwendig die Volumenbereiche der Lufteinlass und Auslassströmung etwas um die Düse herumzuführen. Diese Vorgehensweise verschlechtert zwar die symmetrieeigenschaften der Rechnung beeinflusst aber nur die Rechenauflösung in bestimmten Bereichen und nicht das qualitative Strömungsbild als Endresultat. Daher erschien die gewählte Vorgehensweise als beste Lösung um ein Zerlegen der Geometrie der Staubabscheidekammer in Volumenelemente in welchen ein hexagonales Netz das zur numerischen Berechnung der Strömungsverhältnisse herangezogen werden kann, zu ermöglichen. Folgende zwei Bilder Illustrieren die Zerlegungsstrategie

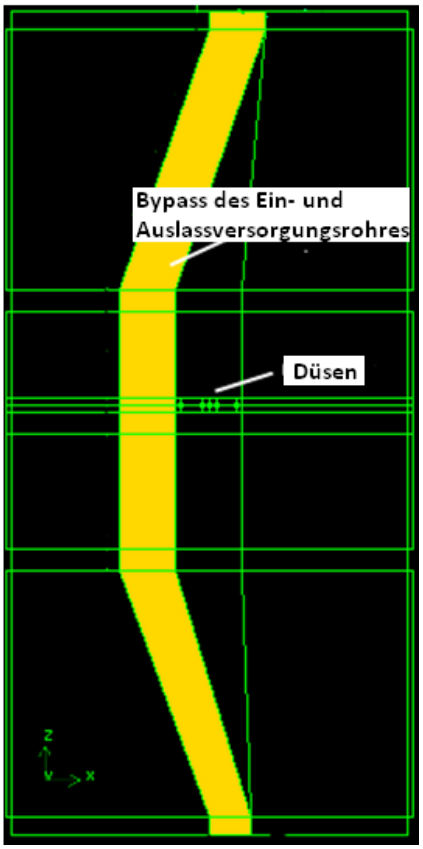


*Abbildung 5-75: **Unterteilung der Einhausungsgeometrie in Volumenbereiche im Grundriss.***

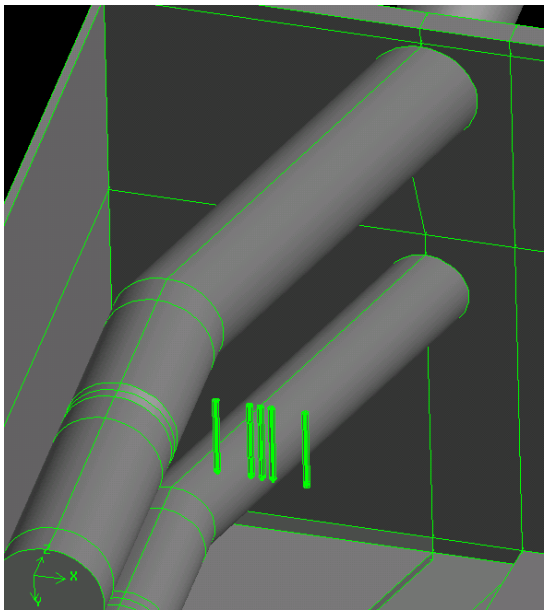


*Abbildung 5-76: **Illustration der Aufteilungslösung der Geometrie der Staubabscheidekammer***

5.3.1.5.3 Generierung eines numerischen Berechnungsnetzes

Für die unterteilte geometrische Domäne wurde ein numerisches Berechnungsnetz bestehend aus hexagonalen Zellen erstellt. Die Geometrie der Staubabscheidekammer und die notwendige Unterteilung in partielle Volumenbereiche macht eine herausfordernde numerische Netzerstellung notwendig. Die notwendige unsymmetrische Zerlegung in Volumenbereiche bedingt schlussendlich ein unsymmetrisches numerisches Netz. Es wurde trotzdem darauf geachtet, die Anzahl an Zellen auf beiden Seiten vom Düsenspray gleich zu gestalten. Ein weiterer Konflikt besteht darin, dass die Einlassgrenzfläche welche die Strömungsinformation der Düse in die Staubabscheidekammer implementiert wegen der hohen Geschwindigkeitskomponenten an dieser Stelle eine sehr hohe Auflösung erfordert. Da die Anzahl an numerischen Zellen die in vertretbarer Rechenzeit bewältigt werden können mit etwa 1 000 000 Zellen begrenzt ist, steht diese hohe Auflösung in Konflikt mit der Größe der Staubabscheidekammer. Dieser Umstand macht eine hohe Vergröberungsrate der Auflösung und hexagonalen Zellgröße hin zu den Grenzschichten der Staubkammerwände unabdingbar. Trotz der zu überbrückenden Konflikte gilt es die Qualität des hexagonalen numerischen Berechnungsnetzes aufrecht zu erhalten, was mit Hilfe der Werte des äquivalenten Winkelversatzes (EQI-Funktion) aller hexagonalen Zellen beurteilt werden kann. Mit Werten des EAS von 0.95 in Maximum lagen die Werte unterhalb der oberen Grenze von 0,97 wobei nur 0,07 % einen EAS von über 0,9 zeigten und 80% der erstellten Zellen einen EAS von 0 bis 0,4 hatten. Das erstellte Netz ist somit qualitativ als entsprechend zur Berechnung der Strömungsverhältnisse

herangezogen worden. Das erstellte hexagonale numerische Netz ist in Folgenden Abbildungen 5-77 bis 5-80 dargestellt.

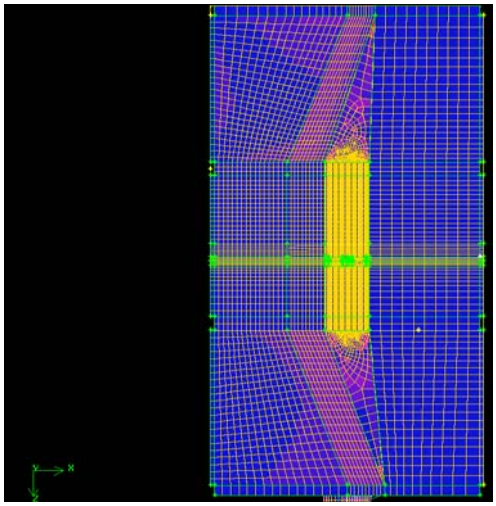


Abbildung 5-77: ***erstelltes numerisches Netz der Staubabscheidekammer im Grundriss***

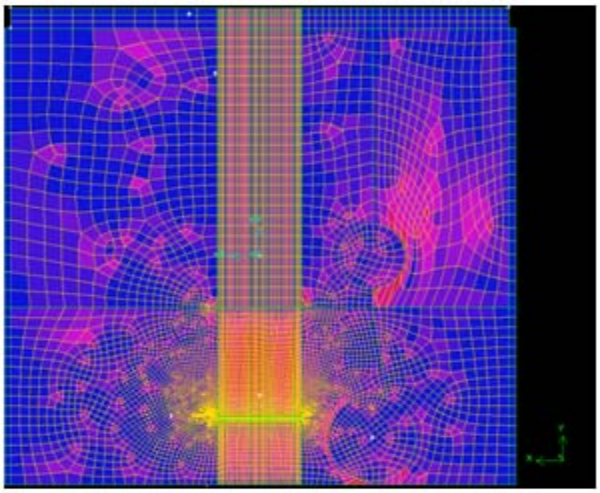


Abbildung 5-78: ***Darstellung des erstellten Netzes Luftauslassseitig im Zentrumsschnitt***

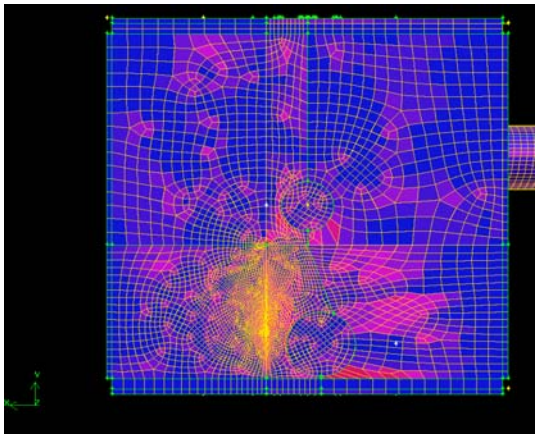


Abbildung 5-79: ***Darstellung des erstellten Netzes Lufteinlassseitig im Zentrumsschnitt***

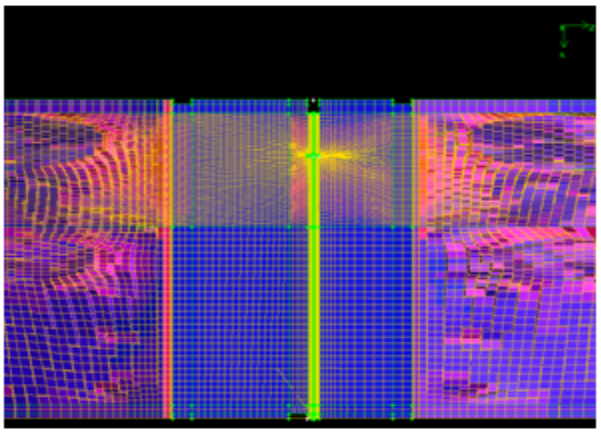


Abbildung 5-80: ***erstelltes numerisches Netz der Staubabscheidekammer im Aufriss***

5.3.1.5.4 Spezifikation der Simulationsvoreinstellungen

Um die Strömungsverhältnisse in der Staubabscheidekammer berechnen zu können wurden alle folgenden notwendigen Voreinstellungen in der Lösungssoftware FLUENT vorgenommen.

5.3.1.5.5 Wahl der numerischen Prozedur

Die Strömung durch die Staubabscheidekammer wurde als inkompressibel behandelt. Ein druckbasierter Lösungsalgorithmus wurde zur Berechnung einer Lösung im stationären Strömungszustand herangezogen. Der zugriffsbeschränkte Lösungsalgorithmus SIMPLE wurde gemeinsam mit dem druckverfolgenden Algorithmus PRESTO ausgewählt. QUICK wurde als Diskretisierungsschema für alle involvierten Strömungsparameter herangezogen. Die Energiegleichungen wurden aufgrund Irrelevanz bei inkompressibler Strömung deaktiviert.

5.3.1.5.6 Auswahl des Turbulenzmodelles

Das k-ε Turbulenzmodell wurde zur Berechnung der turbulenten Strömungsverhältnisse ausgewählt. Hier wurde der REALIZABLE Algorithmus ausgewählt. Da die interessanten Mischungsbereiche der Tropfenbeladenen Düsenströmung und der quergerichteten, partikelbeladenen, Luftströmung im Zentrum der Staubabscheidekammer zu erwarten sind wurde von der Definition von Wandbedingungen Abstand genommen.

5.3.1.5.7 Diskretes Phasenmodell

Um die Strömung der Tropfen des Zweiphasensprays zu berechnen wurde das diskrete Phasenmodell angewendet. Die erhaltenen Daten wurden für die Verwendung in der Strömungssimulation der Staubabscheidekammer aufbereitet. In der Simulation der Strömungsverhältnisse in der Staubkammer galt es das diskrete Phasenmodell auf die Partikelbewegung des Teststaubes Pural NF anzuwenden. Zum einen sind also die Tropfenflugbahnen in der Einhausung neu zu berechnen zum anderen gilt es die Partikelflugbahnen zu berechnen. Die Injektion der Tropfen in die Staubkammer bzw. die Übermittlung der Strömungsdaten der Tropfenflugbahnen und der Gasströmung wurde wie in Kapitel 5.3.1.4 beschrieben über eine definierte Einlassgrenzfläche vorgenommen. Die Injektion der Staubpartikel in die quergerichtete Luftströmung wurde über definierte Injektionszonen im Einlassrohr vorgenommen. Wie zuvor bei der Simulation des Düsensprühs kann die Partikelgrößenverteilung auch beim Teststaub nur durch ensprechende Massenanteile von ausgewählten Partikelgrößenfraktionen repräsentiert werden. Die Partikelgrößenverteilung von Pural NF [70] wurde aus 1 µm, 4 µm und 10 µm Partikeln im Massenverhältnis von 1:2:0,67 beschrieben. Ein Luftvolumenstrom von $\mathbf{Q}_{high}$ =520 m³/h transportierte 0,027 kg/h und ein Luftvolumenstrom von $\mathbf{Q}_{low}$ = 170 m³/h 0,08 kg/h an Teststaub. Dies resultiert in folgenden (Tabelle 5-3) Spezifikationen für den Massenfluss je Partikelgröße welche zur Definition des Staubeinlasses in FLUENT notwendig sind.

Tabelle 5-3: ***Partikelgrößenfraktionen welche die Partikelgrößenverteilung des Teststaubes Pural NF repräsentieren.***

Partikeldurchmesser in µm	**Massenfluss in kgs^{-1} bei Q_{low}**	**Massenfluss in kgs^{-1} bei Q_{high}**
1	6.06E-06	2.05E-06
4	1.21E-05	4.09E-06
10	4.06E-06	1.37E-06

Der Staubeinlass wurde als fester Konus mit einem Öffnungswinkel von 5° und einem Durchmesser der Staubversorgenden Düse von 15 mm definiert und wurde ins Zentrum des Lufteinlassrohres gesetzt. Die Position des Staubeinlasses ist in Abbildung 5-78 dargestellt. Die Zahl der gezeichneten Partikelflugbahnen wurde durch Darstellung jeder 50. Partikelflugbahn begrenzt. Für die Simulation in der Staubabscheidekammer wurden dieselben Lösungsalgorithmuseinstellungen gewählt wie für die Simulation des Zweiphasensprühs. Um den Impulsaustausch zwischen der diskreten Phase (Partikel) und der kontinuierlichen Phase (Luftstrom) zu ermöglichen wurde die Interaktion zwischen beiden Phasen freigeschaltet. Die diskrete Phase wurde mit einer Frequenz von einer diskreten Phaseniteration bezogen auf zehn kontinuierliche Phaseniterationen durchgeführt. Es wurde stationäre Partikelflugbahnberechnung festgelegt was die Interaktion zwischen Tropfen und Partikeln verunmöglicht. Das diskrete Zufallsbewegungsmodell wurde zur Turbulenzabschätzung

verwendet. Für die Tropfen wurde hierbei eine Anzahl an Berechnungsversuchen von 1 und für die Partikel von 10 festgelegt.

5.3.1.5.8 Spezifikation der Randbedingungen

Die Randbedingungen waren für die Luftein- und Auslassöffnung sowie die Zweistoffdüseneinlässe und allen Wandbereichen zu definieren. Da die quergerichtete Luftströmung mit 20° angenommen wurde konnte die Lufteinlassöffnung als Massenstromeinlass definiert werden (Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: ***Massenstromeinlassspezifikationen***

Modellierungsoptionen	**Q_{high}**	**Q_{low}**	**Dimension**
Massenfluss	0,175	0,0568	kgs^{-1}
Turbulenzintensität	10	10	%
hydraulischer Durchmesser	0,23	0,23	m
diskretes Phasenmodell	escape	escape	

Die Luftauslassoberfläche wurde als Druckauslass definiert

Überdruck	0	Pa
Turbulenzintensität	5	%
hydraulischer Durchmesser	0.19	m
diskretes Phasenmodell	escape	

Die Wände wurden als stationär und unter Ausschluss von Abgleiteffekten als Scherbedingung definiert. Für das diskrete Phasenmodell wurden zwei Grenzflächenbedingungen ausgewählt:

- *Haftabscheidung* als Grenzflächenbedingung der Staubkammerwände
- Standard *Reflektion* als Grenzflächenbedingungen der Lufteinlass und Auslassstrecke.

Die Zweiphaseneinlassgrenzflächen wurden als Geschwindigkeitseinlassflächen definiert. Daten für die Geschwindigkeitskomponenten sowie die turbulenzvariablen k und ε wurden zuvor erläuterten generierten Textdokumenten entnommen. Als DPM Option wurde „Ausflucht“ gewählt. Gerade nicht verwendete Düsen wurden über die Grenzfläche jeweils als interne Fläche definiert um etwaige Beeinflussungen der deaktivierten Düsen sicher ausschließen zu können.

5.3.1.5.9 Definition der Eigenschaften des Fluides und der Betriebsbedingungen

Die Materialeigenschaften der strömenden Luft wurde aus der FLUENT Datenbank für eine Temperatur von 293 K entnommen. Die Dichte der Luft wurde als 1,20038 kg/m³ und die Viskosität als $1{,}81*10^{-6}$ $kgm^{-1}s^{-1}$ in die Berechnungsdomäne eingepflegt. Die Wassertropfen wurden spezifiziert durch Einstellung der Dichte von 998 kg/m³ und der Teststaub Pural NF durch die Dichte 3900 kg/m³.

Die Betriebsbedingungen wurden spezifiziert durch:

- Betriebsdruck von 101 325 Pa
- Betriebsdruck von 293 K

Die Spezifikation der Betriebsbedingungen beinhalten auch die Implementierung der Gravitationsbeschleunigung welche mit 9,81 ms^{-2} in positiver y-Richtung festgelegt wurde.

5.3.1.5.10 Initialisierung des Systems und Startbedingungen

Als Startbedingung von der aus die numerischen Rechenalgorithmen sich auf eine konvergente Lösung einschwingen sollen wurden die Geschwindigkeitskomponenten als 0 m/s festgelegt. Die Turbulenzparameter k und ε wurden mit Werten von 1 als Startbedingung gewählt.

5.3.1.5.11 Numerische Lösung des Strömungssystems

Die Lösung des numerischen Modelles wurde in mehreren Schritten erarbeitet. Dies ist genau wie bei der Simulation der Zweistoffresonanzdüse notwendig um Konvergenzprobleme ausschließen zu können. Zum anderen ist es notwendig Lösungen für die involvierten Strömungskomponenten zu erhalten. Daher wurde die Simulationsprozedur in vier Schritte unterteilt.

1. Lösung der Strömungsbedingungen des Luftquerstromes im Einlass.
2. Lösung der Strömungsbedingungen in der Staubkammer welche aus der Strömungskomponente der Zweistoffresonanzdüse und der Luftquerströmung besteht.
3. Implementierung der Wassertröpfchen
4. Implementierung der Staubpartikel

Es wurde eine numerische Lösung für die beiden analysierten Luftvolumenströme Q_{high} und Q_{low} und je für 3 verschiedene Düsenarrangements berechnet. Die Düsen wurden im Simulationsschritt 2 aktiviert. Bei den Simulationen konnten die Richtlinien für die Kennwerte eingehalten werden. Um dies sicherzustellen waren für die Strömungssimulation unter Verwendung von Q_{low} doppelt soviele Iterationen wie bei der Berechnung für Q_{high} notwendig. Damit schlussendlich die Rechnung für das gesamte Strömungssystem konvergierte waren 20 000 Iterationen notwendig. Für weiterführende Kontrolle der Konvergenz wurden zwei weitere Ergebnisabhängige Variablen gewählt und aufgezeichnet. Das Verhalten des statischen Druckes wurde an der Einlassoberfläche verfolgt und das Verhalten der Turbulenzintensität würde für die Auslassoberfläche verfolgt.

5.3.1.5.12 Beurteilung der Berechnungsgenauigkeit

Die Erstellung eines Berechnungsnetzes war wie unter Kapitel 5.3.1.4.3. beschrieben komplex, da die notwendige Unterteilung der Geometrie in Volumenbereiche ein asymmetrisches Netz zur Folge hat. Außerdem war die Transformation der Zellen von 0,1 mm^3 Fassungsvermögen am Zelleinlass bis zu 200 mm^3 in den Randbereichen der Staubkammer problematisch. Dies Führte zu Streckungsverhältnissen von bis zu 20 was asymmetrische Zellen sowie eine ungleichmäßige und unstrukturierte Verteilung der Zellen im Netz unvermeidbar machte. Daher musste getestet werden ob die erhaltene numerische Lösung eine Netzabhängigkeit zeigt oder nicht. In Abbildung 5-81 ist der Gasfluss der Düse im Zentrum bei abgestellter Querluftströmung dargestellt. Wie zu sehen ist eine symmetrische Lösung erhalten worden FLUENT ist also in der Lage die Effekte eines unsymmetrischen Netzes zu kompensieren.

Um bei der Rechnung ein möglichst von der Anzahl der Iterationen unabhängiges Ergebnis zu erhalten, wurde die Berechnung erst nach einer sehr hohen Anzahl an durchgeführten Iterationen abgebrochen. Wie sich das berechnete Strömungsbild mit der Anzahl an Iterationen in der Anfangsphase verändert lässt sich in Abbildung 5-81 verfolgen. Hier wurde die Entwicklung des Strömungsbildes mit steigender Iteration für einen Querluftvolumenstrom von 170 m³/h illustriert.

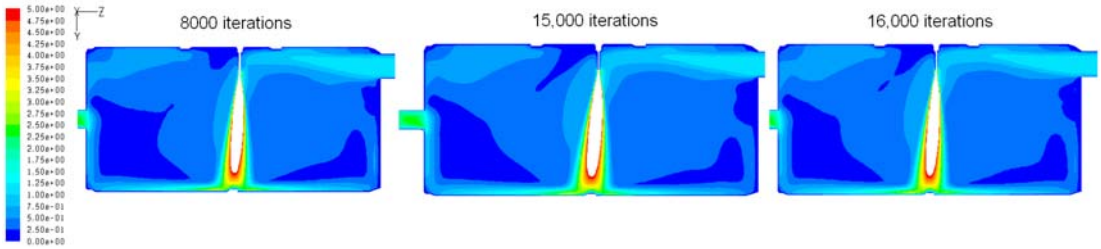


Abbildung 5-81: ***Test der Ergebniskonsistenz***

5.3.1.5.13 Visualisierung der Simulationsresultate

Um die Resultate der Staubkammer im Detail zu interpretieren wurde zuerst die Qerluftströmung durch die Einhausung analysiert. Bei der Simulation der Strömungsverhältnisse in der Zweistoffdüse konnte festgestellt werden, dass die Gasströmung der Düse den Hauptbeeinflussungsfaktor für die Gestalt des Sprühbildes darstellte. Daraus kann geschlossen werden, dass auch der Luftquerströmung durch die Einhausung und der Düsengasströmung eine tragende Rolle zukommen. Zuerst wird daher die Strömungsmechanik der Luftquerströmung exklusiv und sodann unter Beeinflussung durch die Düsengasströmung analysiert. Dieser Vergleich wurde je Querluftvolumenstrom sowie je Düsenarrangement separat dargestellt. Im Anschluss daran wurde auch je Einstellung das Verhalten der Wassertröpfchen sowie sodann der Staupartikel in den Strömungsbedingungen der Staubkammer analysiert.

5.3.1.6 Ergebnisse der simulierten Düsengasströmung bei der Staubabscheidung

Die Strömungsverhältnisse werden in färbigen Konturzeichnungen der drei Raumebenen der Staubkammer dargestellt. Die Farbabstufungen der Konturzeichnungen entsprechen den Geschwindigkeitsverhältnissen [m/s]. Abbildung 5-82 illustriert die gewählten Raumebenen. In diesem Zusammenhang sei darauf verwiesen, dass aufgrund der Strömungsbeeinflussenden Wirkung der Einlaufstecke die Gesamte Lufteinlassleitung samt Biegungen und Oberflächenrauhigkeiten in die Simulation miteinbezogen wurde. Die Biegungen der Lufteinlassleitung bewirken, dass die Querluftströmung in der Staubkammer einen nach rechts führenden Drall wie in Abbildung 5-83 des Schnittes Horizontal durch die Einhausung auf Höhe der Einlassöffnung dargestellt.

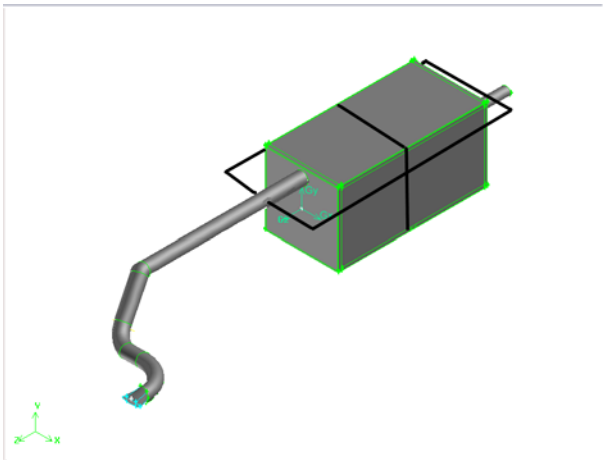


Abbildung 5-82: ***ausgewählte Raumebenen um die Geschwindigkeitsprofile in der Einhausung darzustellen.***

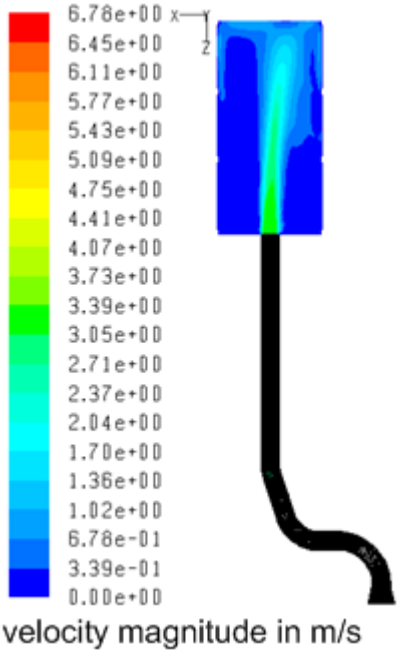


Abbildung 5-83: ***Drall der Querluftströmung durch die Geometrie der Einlassstrecke.***

Die nächsten sechs Abbildungen (5-84 bis 5-89) zeigen die Strömungsverhältnisse der reinen Querluftströmung in der Staubkammer je Raumebene und für beide Luftvolumenströme. Die Geschwindigkeiten sind über Farbabstufungen dargestellt.

5.3.1.6.1 Berechnete Luftquerströmung durch die Staubabscheidekammer

Luftquerstrom von 520 m³/h

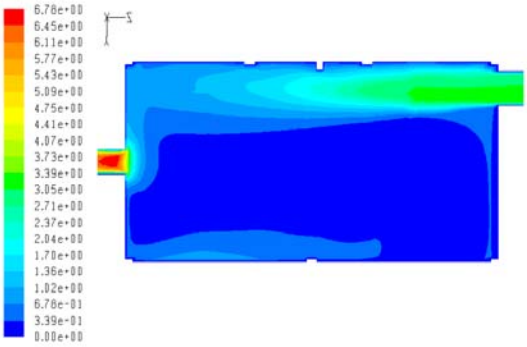


Abbildung 5-84: Kreuzstrom – Seitenansicht

Luftquerstrom von 170 m³/h

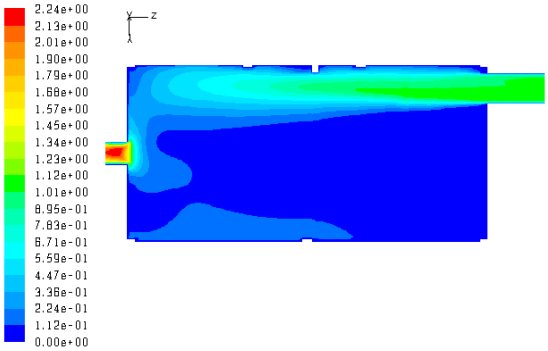


Abbildung 5-85: Kreuzstrom – Seitenansicht

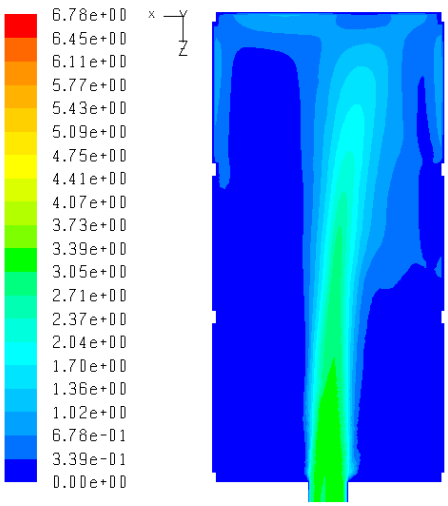


Abbildung 5-86: ***Kreuzstrom - Grundriss***

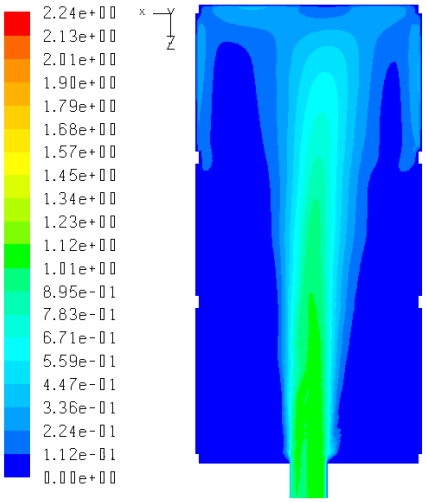


Abbildung 5-87: ***Kreuzstrom - Grundriss***

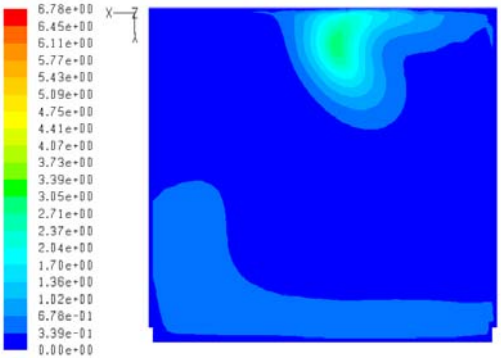


Abbildung 5-88. ***Kreuzstrom – Aufriss***

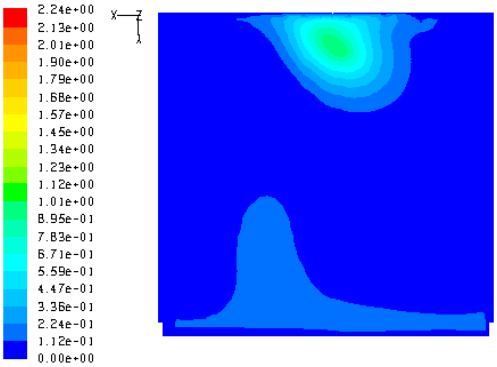


Abbildung 5-89. ***Kreuzstrom – Aufriss***

Die Seitenansicht auf die Staubabscheidekammer (Abbildungen 5-84 bis 5-85) illustriert den Querluftvolumenstrom durch die Einhausung. Die Strömungsprofile bei beiden Luftvolumenströmen bilden sich ähnlich aus nur die Geschwindigkeitsprofile ändern sich. Es ist zu erkennen, dass die Querströmung horizontal durch die Staubabscheidekammer geführt wird und nur in der Nähe der Luftauslassöffnung sich dessen Richtung ändert kurz bevor die Luft auf die Wand trifft. Aus dem Grundriss wird jedoch deutlich, dass die Strömung bei beiden Luftvolumenströmen einen leichten Drall nach rechts aufgrund der Einlassgeometrie zeigt.

Als nächstes werden die Simulationsresultate bei Düsenoperation aufbereitet. Numerische Lösungen wurden für beide Luftvolumenströme sowie jeweils drei verschiedenen Düsenpositionen D_3 (einzelne Düse im Zentrum), $4A_2$ (zwei düsen im Abstand von 20mm), $4A_{20}$ (zwei Düsen im Abstand von 200mm) durchgeführt.

5.3.1.6.2 Düsenarrangement $4A_0$: Düsengasströmung bei Luftquerströmung

Luftquerstrom von 520 m³/h

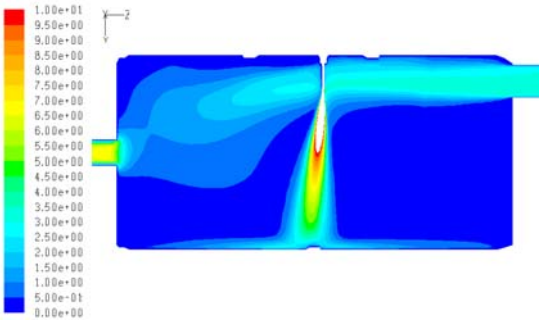


Abbildung 5-90: ***Kreuzstrom – Seitenansicht***

Luftquerstrom von 170 m³/h

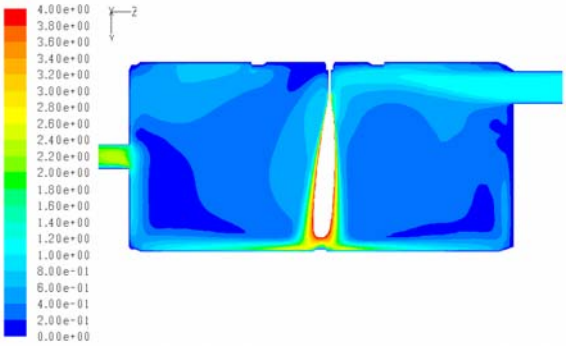


Abbildung 5-91: ***Kreuzstrom – Seitenansicht***

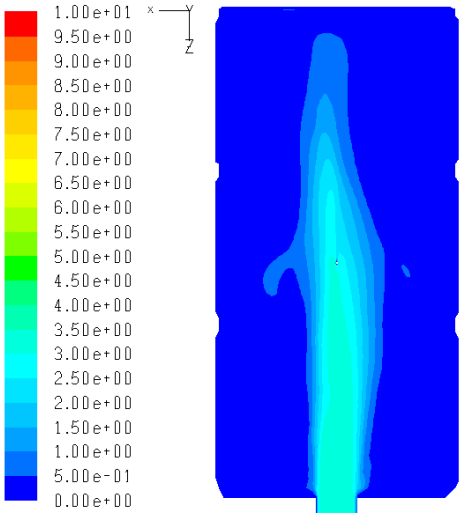


Abbildung 5-92: ***Kreuzstrom - Grundriss***

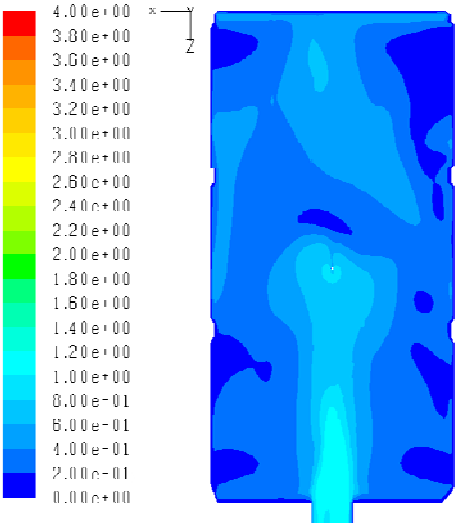


Abbildung 5-93: ***Kreuzstrom - Grundriss***

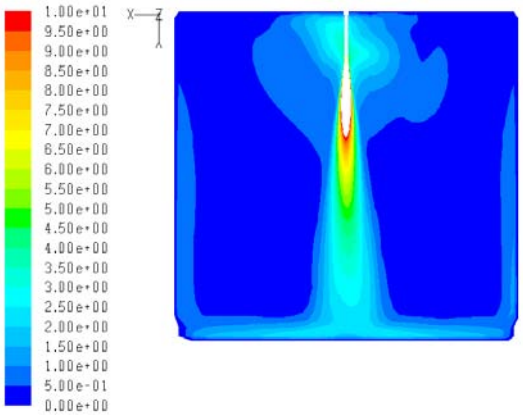


Abbildung 5-94. ***Kreuzstrom – Aufriss***

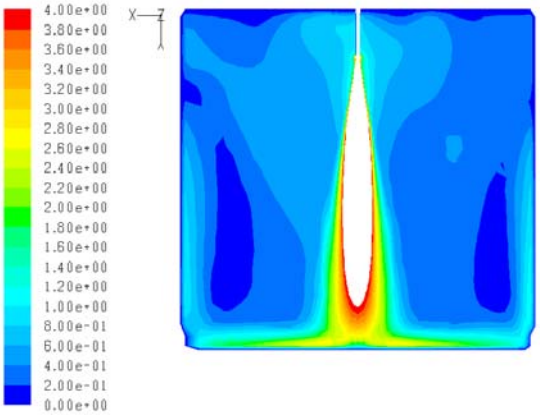


Abbildung 5-95. ***Kreuzstrom – Aufriss***

Wie die Abbildungen 5-90 bis 5-95 zeigen, ändert sich der Luftquerstrom durch die Präsenz der Düsenluftströmung in seinem Strömungsbild. Zwei Gasströmungen treten nun mit

unterschiedlicher Geschwindigkeit und Richtung in die Staubabscheidekammer ein. Die Versorgungsluftquerströmung tritt beim hohen Luftvolumenstrom Q_{high} mit 3m/s und beim niedrigen Luftvolumenstrom Q_{low} mit 1m/s in die Staubabscheidekammer ein in beiden Fällen tritt die Gasströmung der Zweistoffresonanzdüse vertikal von oben mit gleicher Geschwindigkeit in die Staubkammer ein.

Wie bereits beschrieben setzt die Luftquerströmung ihre Einlassstromrichtung durch die Einhausung fort, bis sie an der Auslassseitigen Stirnwand der Einhausung zu einer Umlenkung gezwungen wird. Durch die Einwirkung der vertikal nach unten gerichteten Düsenluftströmung wird dieses ursprüngliche Strömungserscheinungsbild der Luftquerströmung durch die Einhausung verändert. Die Luftquerströmung wird durch Einwirkung der Düsenluftströmung nach unten umgelenkt und folgt somit der Düsenluftströmung an dieser Stelle. Jedoch wird auch die vertikale Düsenluftströmung durch Einwirkung der Luftquerströmung verändert. An der von der Luftquerströmung angeströmten Seite des Düsensprühkegels wird der Winkel der Gasströmung um 10 Grad vermindert.

Aus dem Vergleich des Verhaltens beider Luftvolumenströme welche durch die Einhausung geführt werden ist ersichtlich, dass beim geringeren Luftvolumenstrom quer durch die Staubkammer (Q_{low}) der strömungsverändernde Einfluss der vertikalen Düsenluftströmung größer ist. Hier wird die Strömungsführung der Luftquerströmung unterbrochen und nach unten umgelenkt bzw. in die Düsenluftströmung eingesaugt. Beim hohen Luftvolumenstrom bleibt die Luftquerströmung bestehen und nur ein Teil wird nach unten umgelenkt und folgt der vertikalen Düsengasströmung.

Im Folgenden werden die Veränderungen der Luftquerströmung durch die Staubabscheidekammer bei zwei verschiedenen Düsenarrangements gezeigt (Abbildung 5-96 bis 5-101). Die Konturenzeichnungen zeigen in Farbabstufungen die Geschwindigkeitsprofile der Gasströmungen in m/s.

5.3.1.6.3 Düsenarrangement $4A_2$(0,02m Distanz) bei Luftquerströmung

Luftquerstrom von 520 m³/h

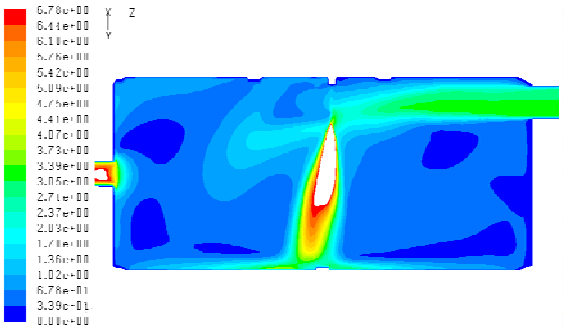


Abbildung 5-96: **Kreuzstrom – Seitenansicht (-0.01m)**

Luftquerstrom von 170 m³/h

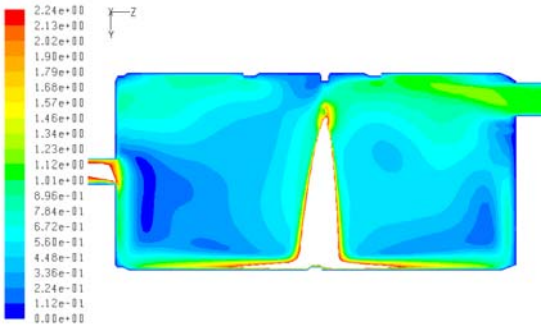


Abbildung 5-97: **Kreuzstrom – Seitenansicht (-0.01m)**

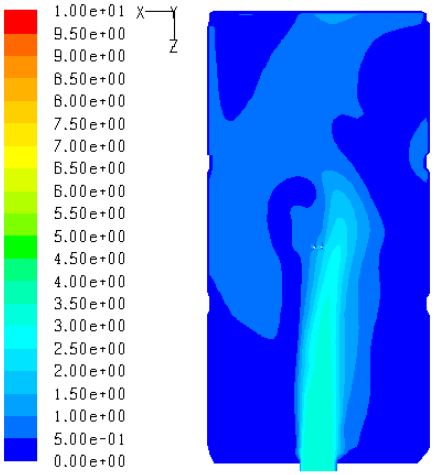


Abbildung 5-98: ***Kreuzstrom - Grundriss***

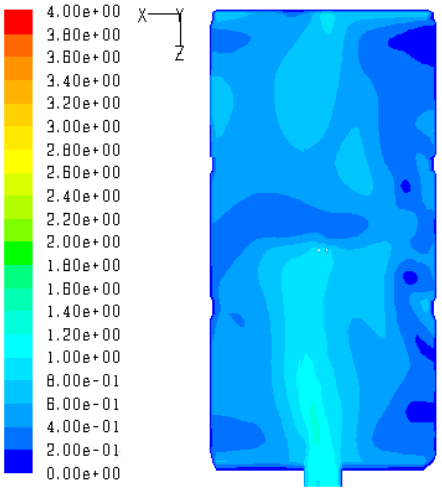


Abbildung 5-99: ***Kreuzstrom - Grundriss***

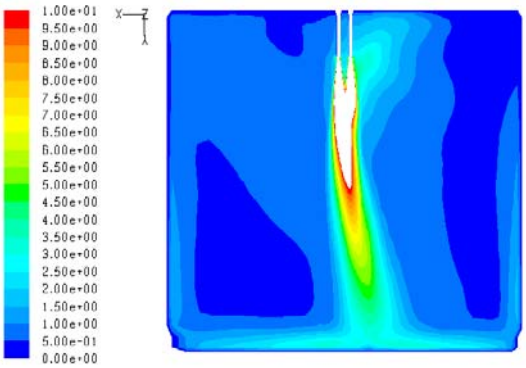


Abbildung 5-100: ***Kreuzstrom – Aufriss***

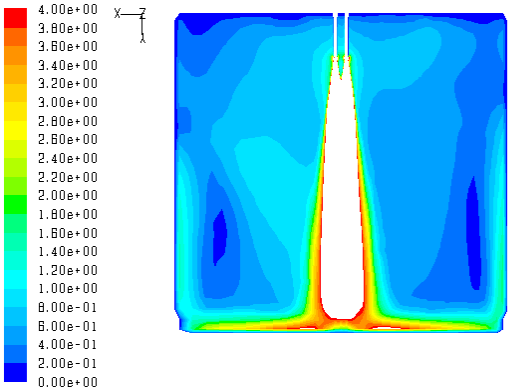


Abbildung 5-101: ***Kreuzstrom – Aufriss***

5.3.1.6.4 Düsenarrangement $4A_{20}$ (0,2m Distanz) bei Luftquerströmung

Luftquerstrom von 520 m³/h

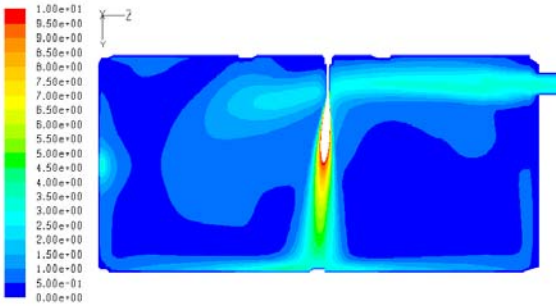


Abbildung 5-102: Kreuzstrom – Seitenansicht (+0.1m)

Luftquerstrom von 170 m³/h

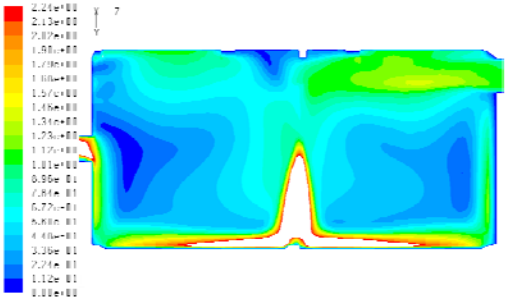


Abbildung 5-103: Kreuzstrom – Seitenansicht (+0.1m)

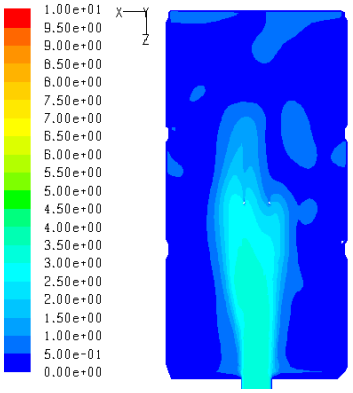


Abbildung 5-104: Kreuzstrom - Grundriss

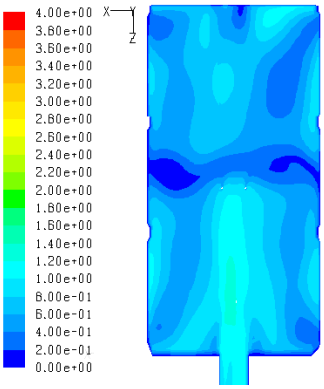


Abbildung 5-105: Kreuzstrom - Grundriss

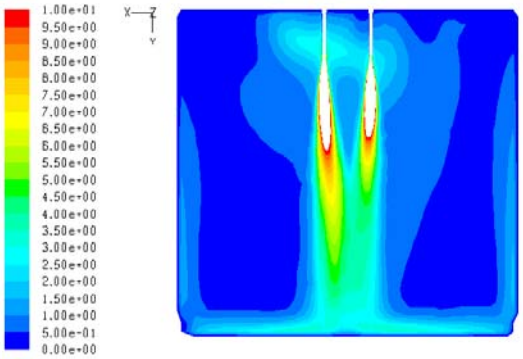


Abbildung 5-106: Kreuzstrom – Aufriss

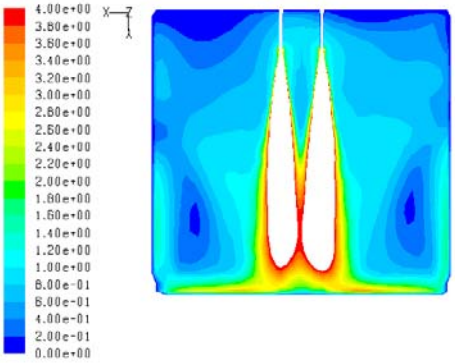


Abbildung 5-107: Kreuzstrom – Aufriss

Düsenarrangements $4A_2$ und $4A_{20}$ beinhalten die Verwendung von je zwei Zweistoffresonanzdüsen, was die vertikale Strömungskomponente im Vergleich zur Anwendung des Einzeldüsenarrangements ($4A_0$) verdoppelt. Daher trat die verstärkte Ablenkung der Luftquerströmung auch bei höheren Luftvolumenströmung der Luftquerströmung in Erscheinung. Jedoch ist die Wirkung der vertikalen Strömungskomponente auch eine Funktion des Abstandes zwischen den beiden Düsen. (Abbildung 5-102 bis 5-107). Es ist in Abbildung 5-100 und 5-101 zu erkennen, dass beim Düsenarrangement $4A_2$ bei welchem die Düsen in einer Distanz von 0,02 m

nebeneinander wirksam sind einen gemeinsamen Strömungsbereich ausbilden in welchem Sprühkegelartig eine Geschwindigkeit von über 10 m/s auftritt. Wie aus Abbildung 5-106 und 5-107 ersichtlich, ist dies für das Düsenarrangement $4A_{20}$ bei einer Distanz der Düsen zueinander von 0,2 m nicht der Fall, es werden zwei getrennte Strömungsbereiche ausgebildet. Bei einer hohen Luftquerströmung mit Luftvolumenstrom Q_{high} anhand der Geschwindigkeitsprofile illustrieren, dass die Umlenkung bei bei $4A_{20}$ Düsenarrangements $4A_2$und $4A_{20}$ im Vergleich zu $4A_0$ zunimmt. Für den geringeren Luftvolumenstrom Q_{low}, ist kein Unterschied erkennbar. Ein Unterschied des Strömungsverhaltens der Luftquerströmung zwischen den Düsenarrangements $4A_2$ und $4A_{20}$ ist anhand der Gasströmungen allein nicht extrahierbar.

Aus den Konturbildern der Geschwindigkeitsprofile der Gasströmungen in der Staubabscheidekammer sind Mischbereiche zwischen Düsenluftströmung und Luftquerströmung nicht ersichtlich. Daher wurden Flugbahnen masseloser Partikel (welche sich wie die Gasströmung verhalten) welche in die Strömung an einer festgelegten Einströmoberfläche aufgegeben wurden berechnet. Im Folgenden sind die Ergebnisse in Abbildung 5-108 bis 5-113 illustriert, wobei die Flugbahnen in farbiger Abstufung der Geschwindigkeiten in m/s illustriert sind. Es sind hier jeweils nur die Flugbahnen masseloser Partikel der Luftquerströmung dargestellt.

5.3.1.7 Ergebnisse der Simulation der Luftquerströmung bei der sekundären Staubabscheidung

Luftquerstrom von 520 m³/h

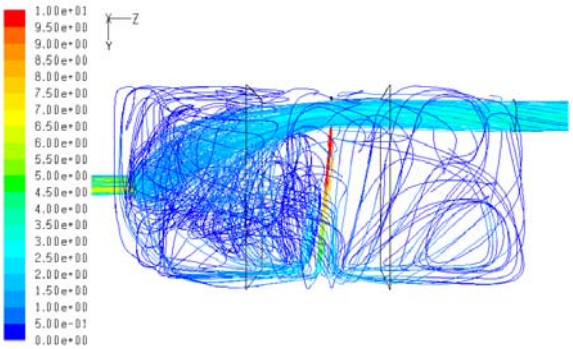


Abbildung 5-108: ***Kreuzstrom – Seitenansicht***

Luftquerstrom von 170 m³/h

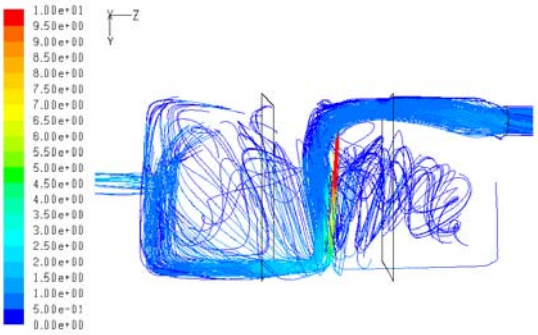


Abbildung 5-109: ***Kreuzstrom – Seitenansicht***

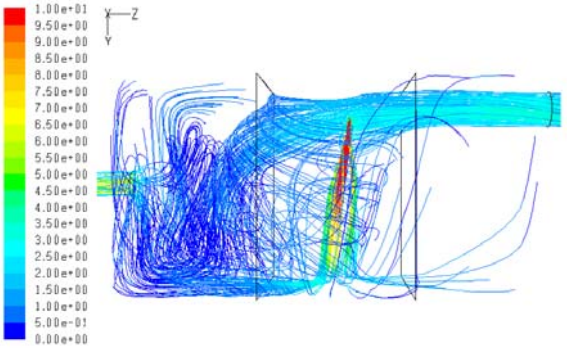


Abbildung 5-110: ***Kreuzstrom - Grundriss***

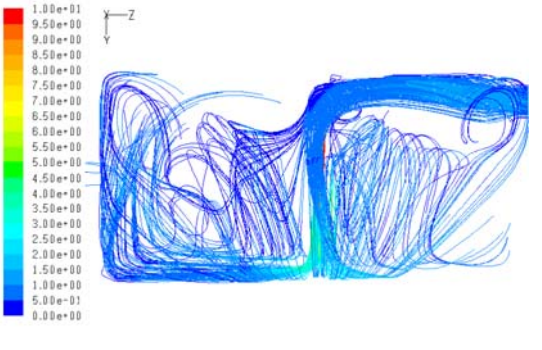


Abbildung 5-111: ***Kreuzstrom - Grundriss***

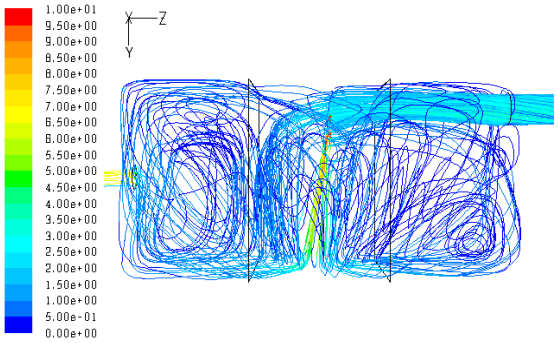


Abbildung 5-112: ***. Kreuzstrom – Aufriss***

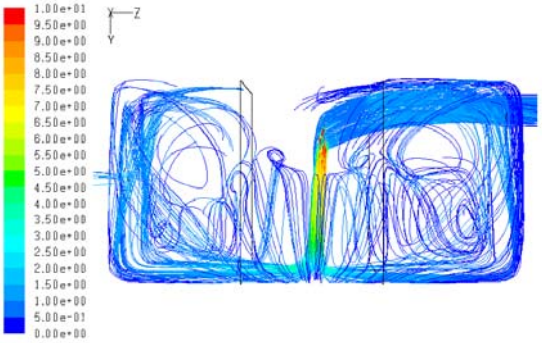


Abbildung 5-113: ***. Kreuzstrom – Aufriss***

Das Illustrieren der Flugbahnen masseloser Partikel in der Querluftströmung zeigt, dass die hohe vertikale Geschwindigkeitskomponente der Düsenluftströmung zu einem mitführen eines Teiles der Querluftströmung vertikal nach unten führt. Bei den hohen Luftvolumenstrom Q_{high} ist es offensichtlich, dass die Luftquerströmung global gesehen jedoch kaum beeinflusst wird. Bei niedrigen Ouerluftvolumenstrom Q_{low}, kann eine starke Beeinflussung der vertikalen Strömungskomponente beobachtet werden. Bei allen drei Düsenarrangements bildet sich eine Ablenkung des gesamten Querluftstromes vertikal nach unten aus. Diese findet aber mehrheitlich

erst kurz nach der Düse statt ein möglicher Mischbereich mit Ausnahme des nach Unten Führens eines Teilvolumestromes der Luftquerströmung findet erst nach Umlenkung kurz vor dem Boden statt Abbildung 5-109. Es sind jedoch auch Unterschiede je Düsenarrangement festzustellen. Durch die verstärkte vertikale Komponente unter Verwendung von zwei Düsen wir auch die hohe Luftquerströmung umgelenkt. Die Umlenkung ist egal ob hoher oder niedriger Querluftvolumenstrom verwendet wird bei Düsenarrangement $4A_2$ mit zwei Düsen im Zentrum mit Abstand von nur 20 mm voneinander am höchsten. Hier findet scheinbar die Ausbildung eines Mischbereiches des gemeinsamen Strömungsbereiches von zwei Düsen und der Luftquerströmung statt Abbildung 5-09 und 5-111.

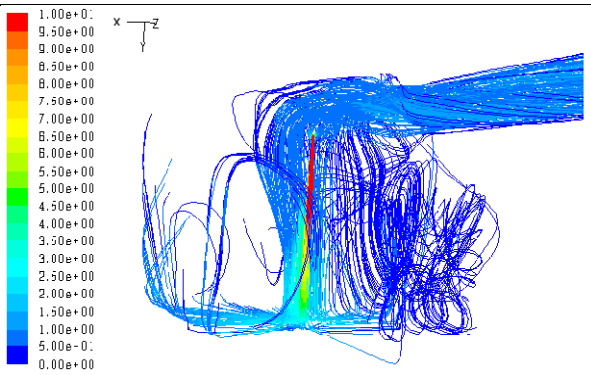


Abbildung 5-114: ***Q_{low}, $4A_0$***

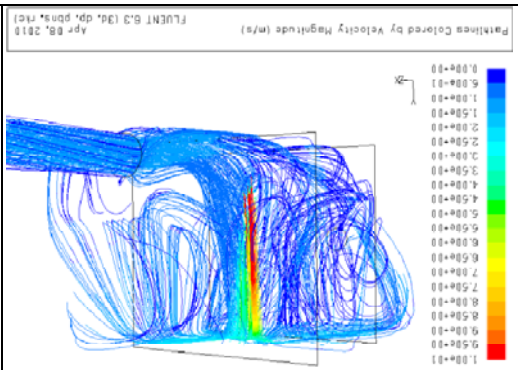


Abbildung 5-115: ***Q_{low}, $4A_2$***

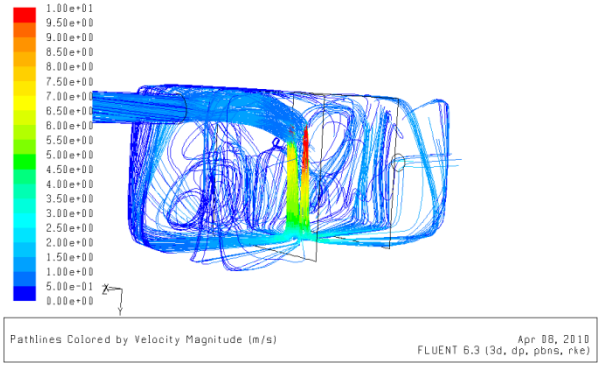


Abbildung 5-116: ***Q_{low}, $4A_{20}$***

In Abbildung 5-114 bis 5-116 ist zu erkennen, dass bei der Düsenanordnung jeweils im Zentrum der Staubabscheidekammer D3 und Düsenanordnung $4A_2$ mit einer Düsendistanz von 20mm zueinander bei niedrigen Düsenluftvolumenstrom es zu einer Teilentnahme von Querluftströmung kommt welcher der vertikalen Düsenluftströmung folgt. Die Umlenkung eines Großteils der Luftquerströmung erfolgt nach dem vertikalen Düsensprüh. Es ist aus den Resultaten zu erkenn, dass es sich um zwei konkurrierende Strömungskomponenten handelt, die vertikale Düsengasströmung sowie die horizontale Luftquerströmung. Je nach Starkenverhältnis zueinander bildet sich eine Vorzugsrichtung vertikal oder horizontal in der Staubabscheidekammer aus. Daher ist das Verhältnis der vertikalen Düsengasströmung zur Anströmgeschwindigkeit der Luftquerströmung eine Kennzahl ob Staubabscheidung zu erwarten ist oder nicht. Dies ist unter der Prämisse zu sehen, dass die Ausbildung eines zu Boden gerichteten Strömungsbildes eine Voraussetzung für die Staubabscheidung darstellt. Um dies nachzuprüfen gilt es im Folgenden das

Verhalten der Partikel und der Tropfen bei den verschiedenen Strömungssituationen und Düsenarrangements zu untersuchen.

5.3.1.8 Ergebnisse der Simulation der Tröpfchenflugbahnen bei sekundärer Staubabscheidung

Bei Betrachtung des Strömungsmechanischen Verhaltens des analysierten Zweiphasensprays in der Staubabscheidekammer wirken Zwei Erscheinungen zusammen. Zum einen die Strömungsbilder der beiden Gasströmungen die zuvor für verschiedene Betriebsparameter (verschiedener Luftvolumenstrom sowie verschiedene Düsenarrangements) berechnet wurde, sowie die Tropfenflugbahnen welche aufgrund des Einflusses des Düsensprühkopfes sowie der schnelleren Gasströmung im Zentrum zum ausbilden des in Kapitel 5.3.1.4.17 gezeigten Sprühbildes der Düse führen. Es wurde festgestellt, dass durch die Wirkungen des Düsensprühkopfes (Expansionswirkung auf grobe Tropfen) sowie der schnellen Gasströmung im Zentrum (Einsaugwirkung der zuvor abgelenkten groben Tropfen) ein charakteristisches Sprühbild der Düse (im Zentrum schnelle kleine Tröpfchen) am Sprühkegelmantel größere langsamere Tröpfchen zu beobachten ist. Nun ist die Veränderung dieses Sprühbildes bei Queranströmung zu untersuchen. Um das Verhalten der staubabscheidenden Tropfen bei den unterschiedlichen Strömungsbedingungen aufzuzeigen, um daraus ableiten zu können ob die Strömungssituation der Luft sich alleine schon entscheidend auf zu erwartende Staubabscheidewirkung auswirkt, wurden je Betriebsbedingung (Düsenarrangement und Luftvolumenstrom) die Tropfenflugbahnen in der Staubkammer berechnet und je fünfhundertste Tropfenflugbahn in farblicher Abstufung der Geschwindigkeit in m/s dargestellt (Abbildung 5-117 bis 5-134).

5.3.1.8.1 Simulationsergebnisse der Tropfenflugbahnen bei Düsenarrangement $4A_0$

Luftquerstrom von 520 m³/h

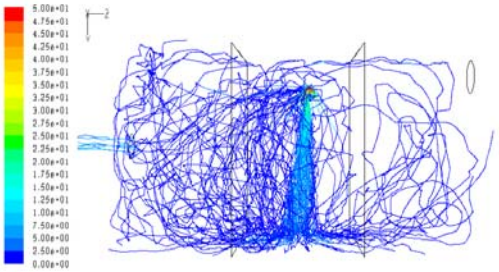


Abbildung 5-117: **Kreuzstrom – Seitenansicht**

Luftquerstrom von 170 m³/h

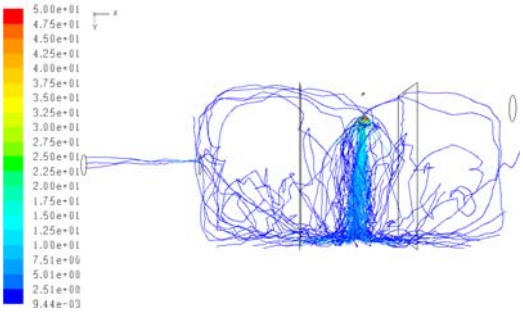


Abbildung 5-118: **Kreuzstrom – Seitenansicht**

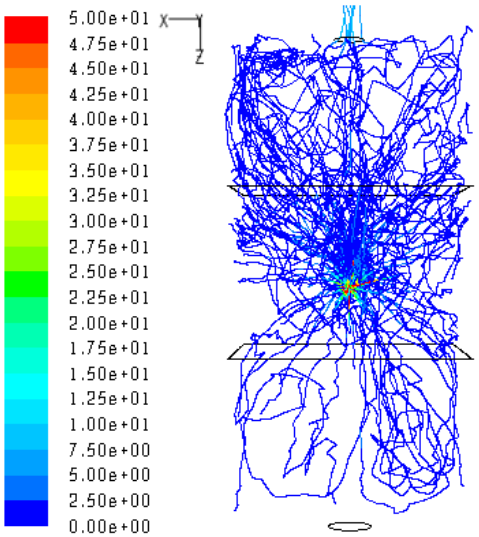


Abbildung 5-119: ***Kreuzstrom - Grundriss***

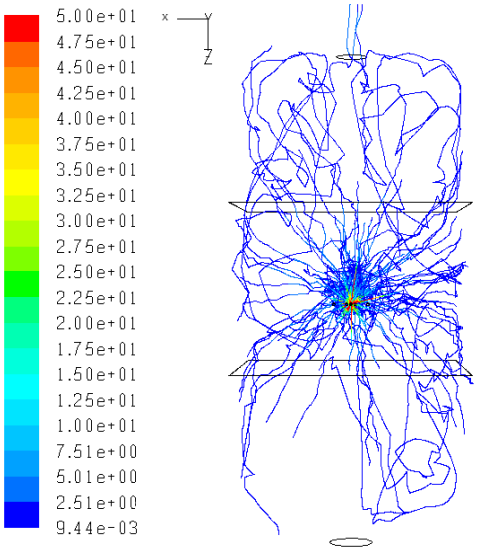


Abbildung 5-120: ***Kreuzstrom - Grundriss***

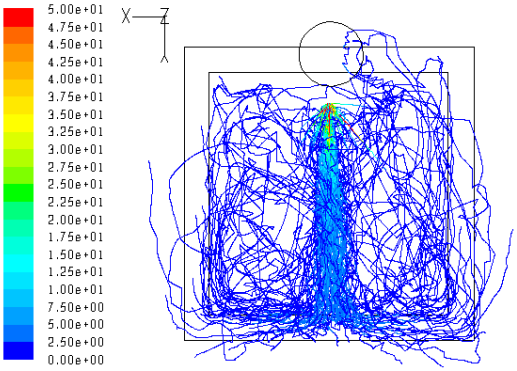


Abbildung 5-121: ***. Kreuzstrom – Aufriss***

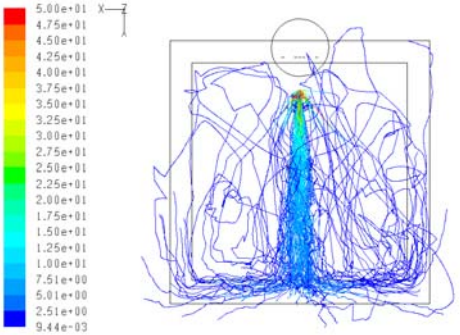


Abbildung 5-122: ***. Kreuzstrom – Aufriss***

5.3.1.8.2 Simulationsergebnisse der Tropfenflugbahnen bei Düsenanordnung $4A_2$:

Luftquerstrom von 520 m³/h

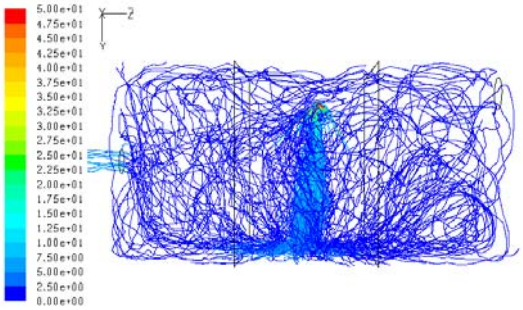


Abbildung 5-123: Kreuzstrom – Seitenansicht

Luftquerstrom von 170 m³/h

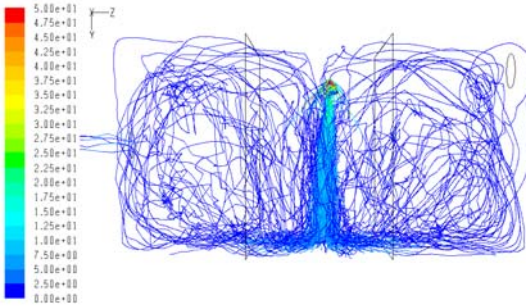


Abbildung 5-124: Kreuzstrom – Seitenansicht

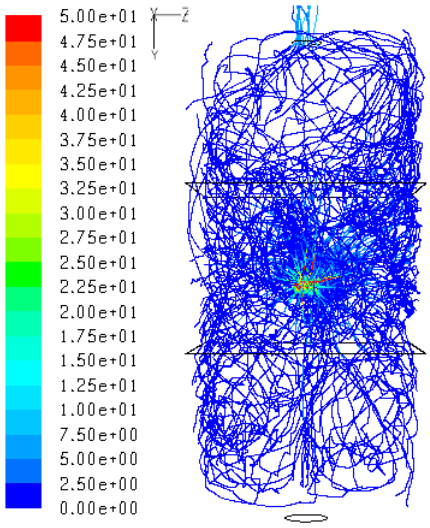


Abbildung 5-125: Kreuzstrom - Grundriss

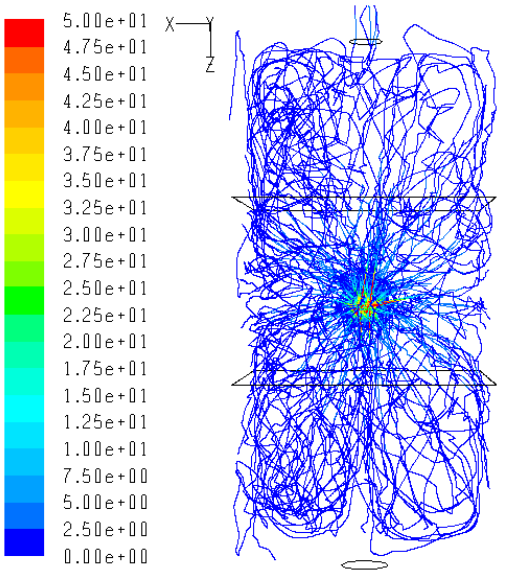


Abbildung 5-126: Kreuzstrom - Grundriss

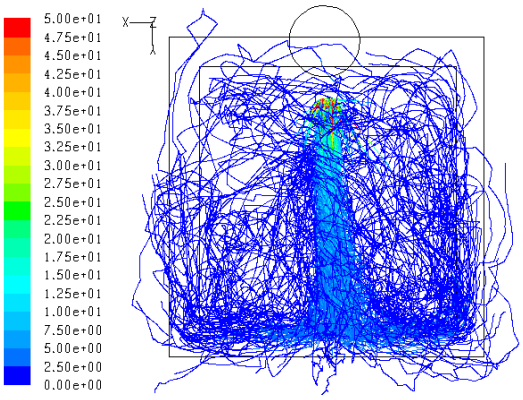


Abbildung 5-127: . Kreuzstrom – Aufriss

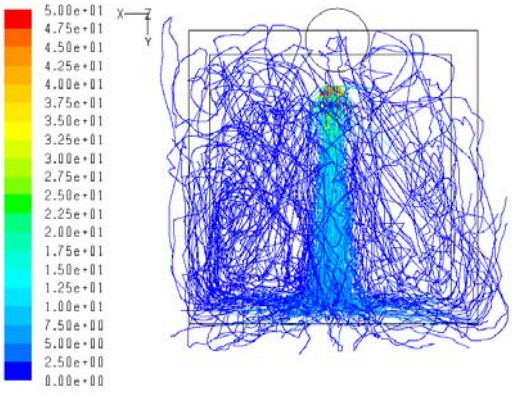


Abbildung 5-128: . Kreuzstrom – Aufriss

5.3.1.8.3 Simulationsergebnisse der Tropfenflugbahnen bei Düsenanordnung $4A_{20}$

Luftquerstrom von 520 m³/h

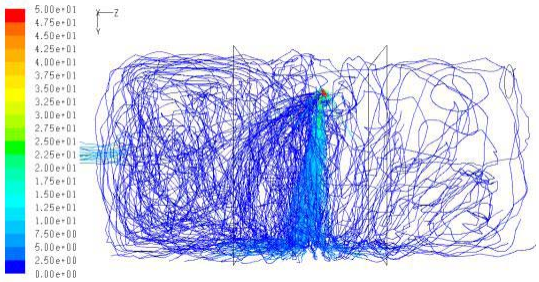


Abbildung 5-129: Kreuzstrom – Seitenansicht

Luftquerstrom von 170 m³/h

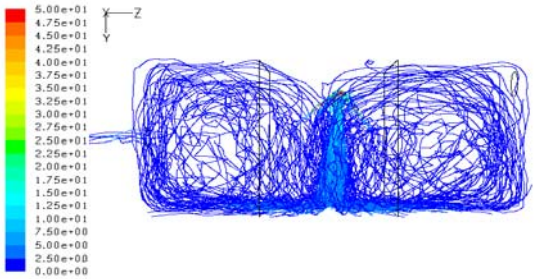


Abbildung 5-130: Kreuzstrom – Seitenansicht

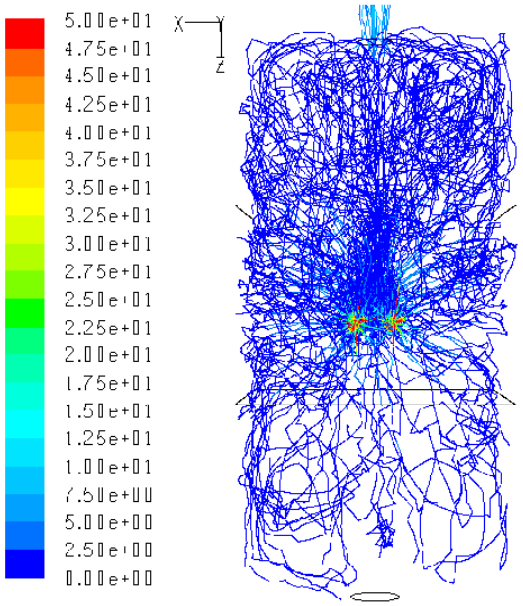


Abbildung 5-131: Kreuzstrom - Grundriss

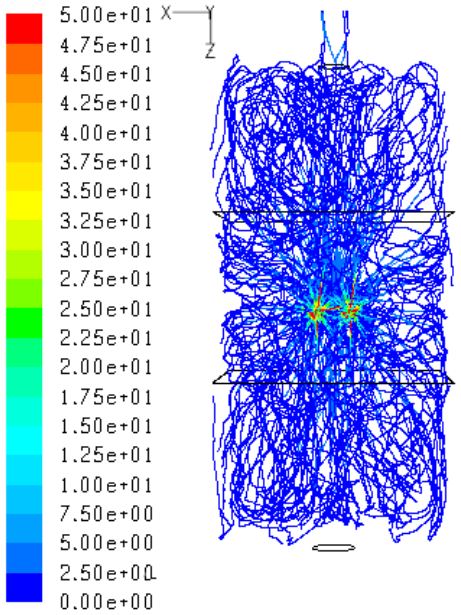


Abbildung 5-132: Kreuzstrom - Grundriss

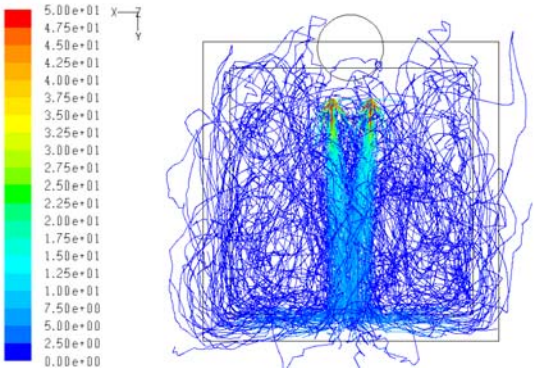


Abbildung 5-133: . Kreuzstrom – Aufriss

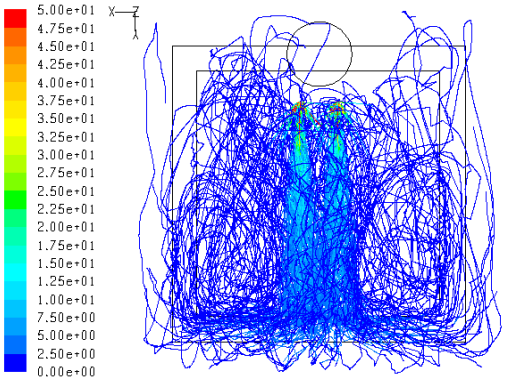


Abbildung 5-134: . Kreuzstrom – Aufriss

In der vorangegangenen Simulation der Zweistoffresonanzdüse wurde herausgefunden, dass das Strömungsverhalten der Tröpfchen stark von deren Größe abhängt. Diese Abhängigkeit des Strömungsverhaltens von der Tröpfchengröße wurde auch in der Simulation der Tropfenflugbahnen in der Staubabscheidekammer bei allen Düsenanordnungen (drei verschiedene) sowie Luftvolumenströmen gefunden. Diese Unterschiede im Strömungsverhalten treten durch die Analyse von feinen Tröpfchen 3 µm und 12,5 µm sowie größeren Tröpfchen 35 µm und 100 µm zu Tage.

Bei allen untersuchten Düsenanordnungen sowie Luftvolumenströmen konnte festgestellt werden, dass die kleineren Tröpfchen im zentralen Gasströmungskegel verbleiben und von der Luftquerströmung nur durch die in Kapitel 5.3.1.8 beschriebenen leichten Winkeländerung des Strömungskegels beeinflusst werden. Eine Änderung der Strömungsrichtung dieser Tröpfchen welche in den Konturzeichnungen der Tropfenflugbahnen ersichtlich ist, ist erst kurz vor Auftreffen am Boden der Staubabscheidekammer zu erkennen, was sich durch Verwirbelungen der Gasströmung in diesem Bereich einfach erklären lässt. Die Strömungsrichtung der größeren vom Düsensprühkopf reflektierten Tröpfchen jedoch, werden von der Luftquerströmung stark beeinflusst. Wie der Vergleich mit dem Strömungsbild der Zweistoffresonanzdüse und dem Sprühbild in der Staubabscheidekammer zeigt, so tritt der Expansionsbereich nahe des Düsensprühkopfes auf welcher die Tröpfchen reflektiert und aufgrund der Trägheit von der Düsengasströmung entfernt. Ab einer gewissen Anströmgeschwindigkeit der Luftquerströmung werden die Tröpfchen nicht mehr von der Gasgeschwindigkeit im Zentrum angesogen, sondern Folgen der Luftquerströmung. Dass es in diesem Zusammenhang auf die Anströmgeschwindigkeit der Tröpfchen durch die Luftquerströmung drauf an kommt, ob die Tröpfchen der Düsenluftströmung oder der Luftquerströmung folgen, fördern die Unterschiedlichen Ergebnisse bei niedrigen verwendeten Luftvolumenstrom Q_{low} und hohem Volumenstrom Q_{high} zu Tage. Diese Unterschiede beruhen aber vor allem auf dem unterschiedlichen Verhalten des Strömungsverhaltens der Luftquerströmung je Gasvolumenstrom. Diese wird bei niedrigen Luftvolumenströmen durch die vertikale Komponente der Düsengasströmung nach unten umgelenkt die Tröpfchen folgen in diesem Fall der zu Boden gerichteten Strömungsrichtung. Bei Beaufschlagung des Düsensprays mit hohen Querluftvolumenströmen wird die Luftquerströmung durch die vertikale Komponente des Düsesnsprays nicht beeinflusst und die größeren Tröpfchen folgen nach dem Expansionsbereich der Düse der Luftquerströmung. Das für zu erwartende Staubabscheidewirkung von Tröpfchen in der Staubkammer wichtige Strömungsverhalten der Tröpfchen ist durch die Gasströmungen determiniert und lässt sich somit auf das herausgebildete Strömungsverhalten der Luft in der Staubabscheidekammer zurückführen.

Durch die Simulation der Tropfenflugbahnen in der Staubabscheidekammer konnten die Schlussfolgerungen der experimentellen Untersuchungen untermauert werden. Die in Düsenanordnung $4A_2$bei einem Düsenabstand von 20 mm festgestellte, verhältnismäßig schlechte Staubabscheidung, wurde auf Tropfenkoaleszenz zurückgeführt. Diese scheint sich aufgrund der Simulationsergebnisse zu bestätigen, obwohl mittels des gewählten Lösungsalgorithmusses von Fluent keine Tropfen Tropfen Interaktionen berechnet werden konnten. Die Ausbildung eines gemeinsamen vertikalen Strömungsbereiches mit hoher Geschwindigkeitskomponente und starkem Kontakt der Tropfenflugbahnen in diesem Berechnung (Abbildung 5-127 und 5-128) macht eine Tropfenkoaleszenz wahrscheinlich. Bei Düsenanordnung $4A_{20}$ kommt es erst nach

entsprechender Entfernung vom Düsenaustritt zum Kontakt zwischen Tropfenflugbahnen beider Sprays aber auch hier besteht die Möglichkeit einer Koaleszenz.

Nachdem nun das Strömungsverhalten der Luft sowie der Tröpfchen studiert wurde muss noch die abzuscheidende diskrete Phase nämlich die Staubpartikelflugbahnen berechnet werden.

5.3.1.9 Ergebnisse der simulierten Partikelflugbahnen bei sekundärer Staubabscheidung

Die Partikelgrößenverteilung des normierten Teststaubes ist durch Verwendung von 4 Partikelgrößenfraktionen 1 µm, 4 µm, 10 µm in entsprechenden Massenanteilen repräsentiert. Die Staubpartikelfraktionen wurden in die Einlassöffnung der Staubabscheidekammer aufgegeben somit stehen die Partikelflugbahnen je Partikelgröße in der gesamten Staubkammer plus Einlaufstrecke zur Verfügung. Die Partikelflugbahnen wurden in Geschwindigkeitsfarbabstufungen in m/s illustriert (Abbildung 5-135).

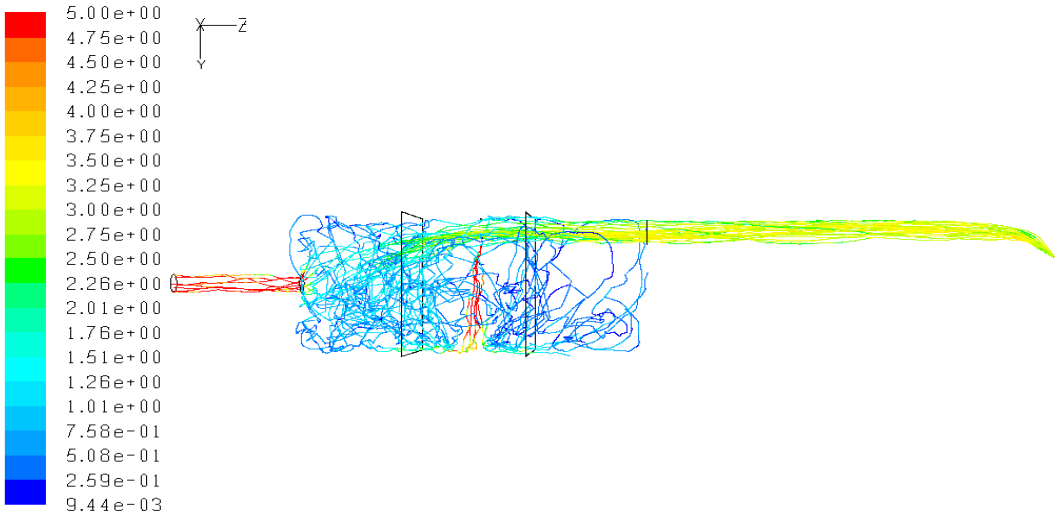


Abbildung 5-135: ***Partikelflugbahnen durch die Einhausung***

Im Folgenden werden die Partikelflugbahnen durch die Staubabscheidekammer für alle drei Partikelgrößenfraktionen je Luftvolumenstrom und je Düsenanordnung illustriert (Abbildung 5-136 bis 5-147)

5.3.1.9.1 Simulationsergebnisse der Partikelflugbahnen bei Düsenarrangement $4A_9$

Luftquerstrom von 520 m³/h

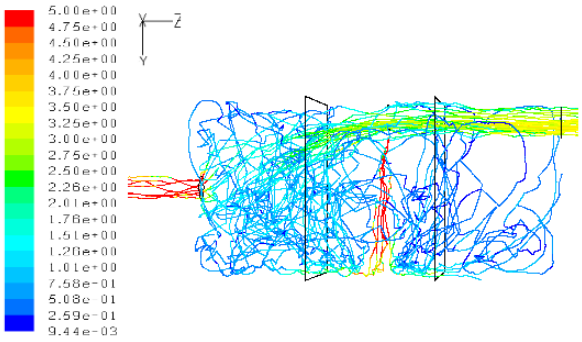


Abbildung 5-136: **Kreuzstrom – Seitenansicht**

Luftquerstrom von 170 m³/h

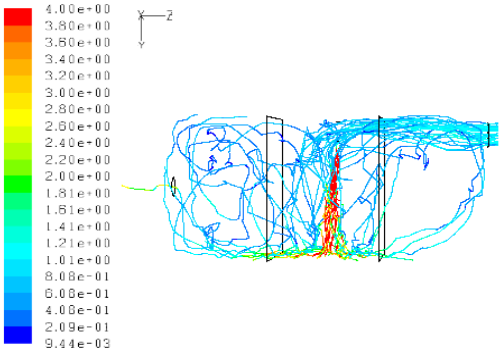


Abbildung 5-137: **Kreuzstrom – Seitenansicht**

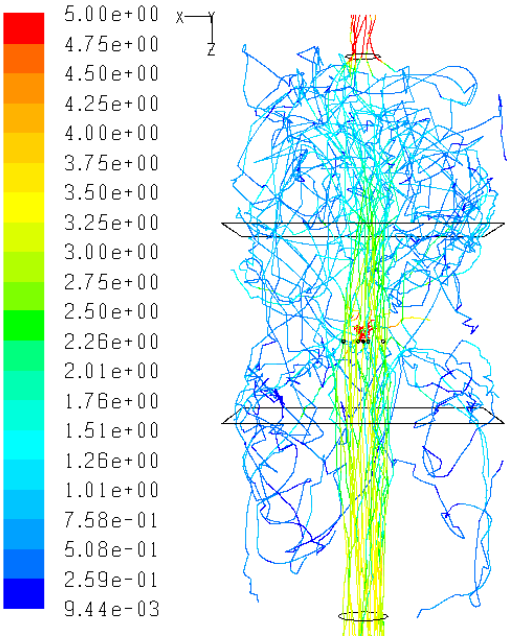


Abbildung 5-138: ***Kreuzstrom - Grundriss***

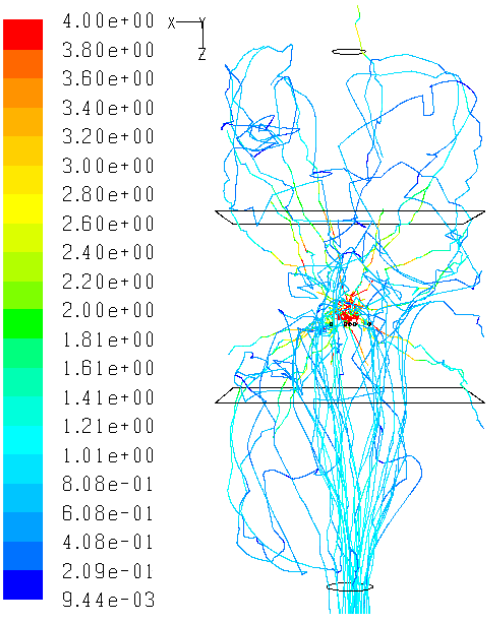


Abbildung 5-139: ***Kreuzstrom - Grundriss***

5.3.1.9.2 Simulationsergebnisse der Partikelflugbahnen bei Düsenanordnung $4A_2$

Luftquerstrom von 520 m³/h

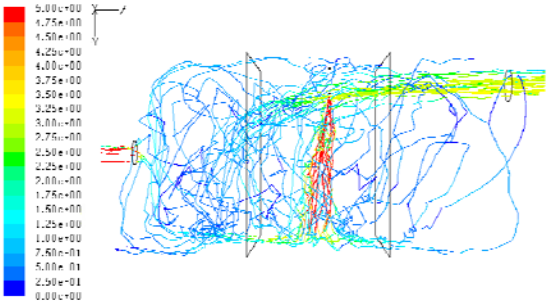


Abbildung 5-140: **Kreuzstrom – Seitenansicht**

Luftquerstrom von 170 m³/h

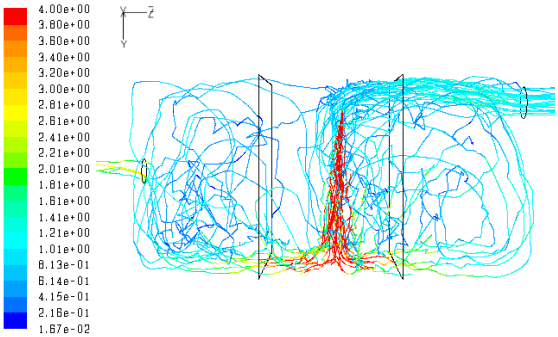


Abbildung 5-141: **Kreuzstrom – Seitenansicht**

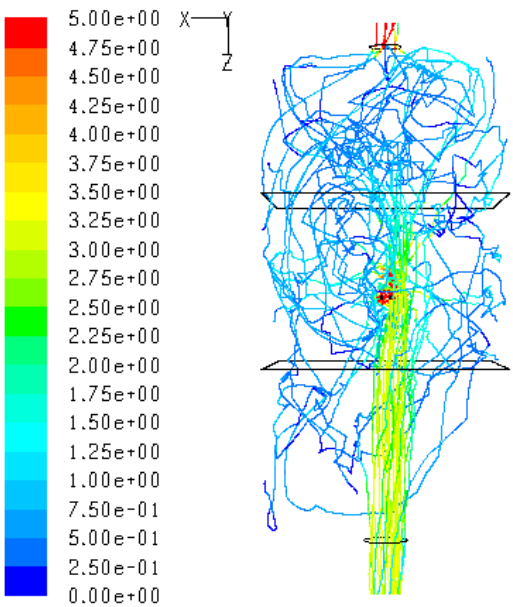


Abbildung 5-142: ***Kreuzstrom - Grundriss***

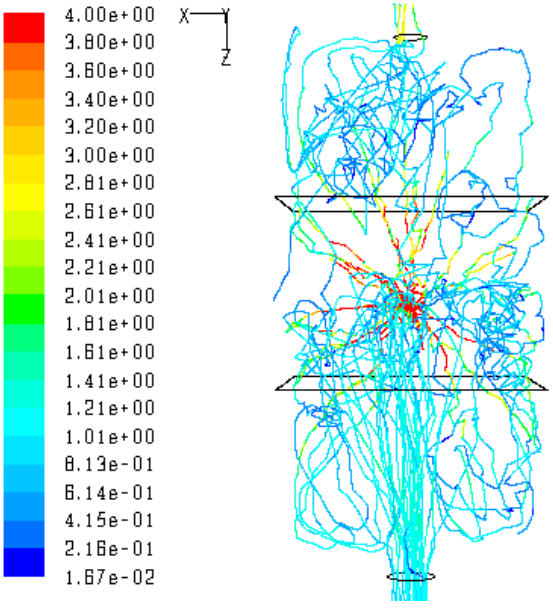


Abbildung 5-143: ***Kreuzstrom - Grundriss***

5.3.1.9.3 Simulationsergebnisse der Partikelflugbahnen bei Düsenanordnung $4A_{20}$

Luftquerstrom von 520 m³/h

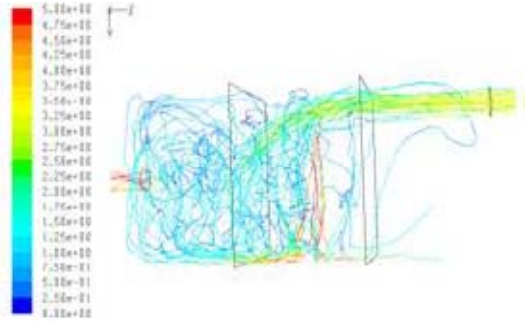


Abbildung 5-144: **Kreuzstrom – Seitenansicht**

Luftquerstrom von 170 m³/h

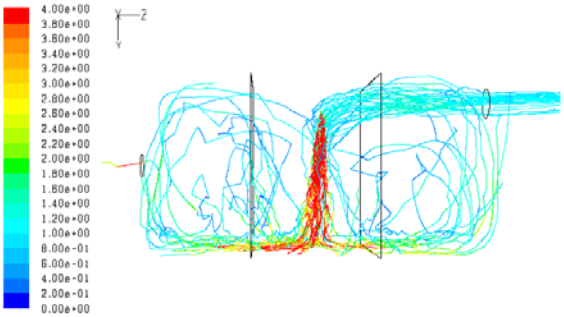


Abbildung 5-145: **Kreuzstrom – Seitenansicht**

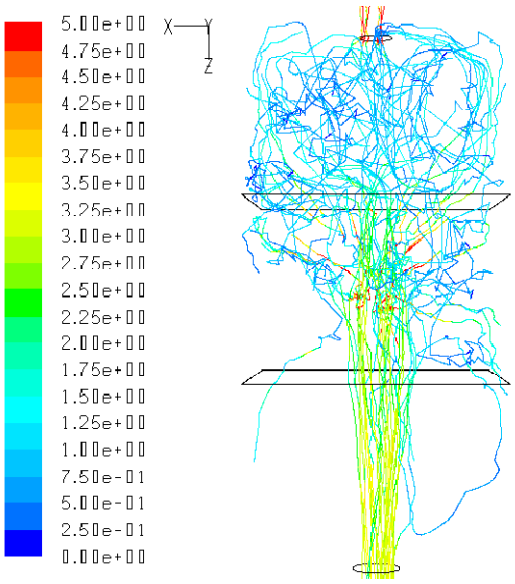


Abbildung 5-146: ***Kreuzstrom - Grundriss***

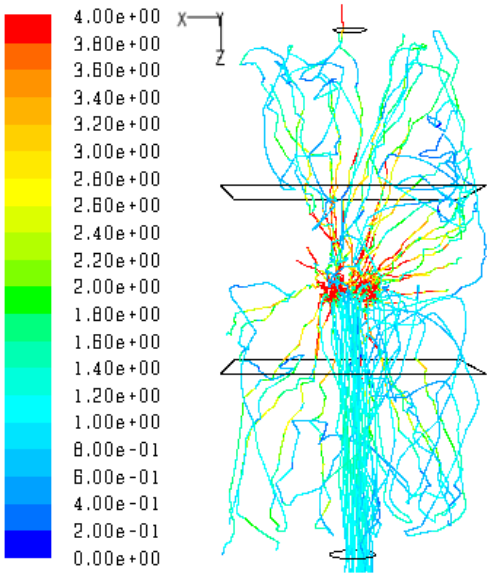


Abbildung 5-147: ***Kreuzstrom - Grundriss***

In der Simulation der Tropfenflugbahnen konnte festgestellt werden, dass 3 µm und 12,5 µm Tröpfchen in ihrem Strömungsverhalten der Düsengasströmung folgen, die größeren Tröpfchen nicht immer. Eine ähnliche Abhängigkeit des Strömungsverhaltens je Partikelgröße konnte auch bei den Partikeln festgestellt werden. Es gilt auch aufzuklären ob die Partikelflugbahnen der festgestellten Luftquerströmung folgen oder diese durch die vertikale Komponente der Düse im gleichem Maße beeinflusst werden, wie die Luftquerströmung. Um dies festzustellen spielt der Luftvolumenstrom eine entscheidende Rolle. Für hohen Luftvolumenstrom Q_{high} konnte festgestellt werden dass die Staubpartikel hauptsächlich der Luftquerströmung folgen und nur ein sehr kleiner Teil in die Düse eingesaugt wird. Bei der Düsenanordnung $4A_2$ werden aufgrund der stärkeren vertikalen Komponente im Zentralbereich der Querströmung mehr Partikel eingesaugt als bei der Düsenanordnung $4A_0$ Bei Anwendung des niedrigen Luftvolumenstromes Q_{low}, wird die Strömungsrichtung durch die vertikale Strömungskomponente der Düsen umgelenkt. Es konnte

festgestellt werden dass auch die Partikelflugbahnen diesem Strömungsbild angepasst sind. Bei der Düsenandordnung $4A_{20}$ werden im Vergleich zu anderen Düsenanordnungen die meisten Partikel aus der Luftquerströmung nach unten abgelenkt.

5.3.1.9.4 Simulationsergebnisse der Partikelflugbahnen der verschiedenen Partikelgrößenfraktionentionen

Um den Einfluss der Partikelgröße auf das Strömungsverhalten zu klären wurden die Partikelflugbahnen in der Staubkammer je Luftvolumenstrom für die Düsenanordnung $4A_0$ berechnet und für jede zehnte Partikelflugbahn in Farbabstufung der verschiedenen Geschwindigkeiten in m/s dargestellt (Abbildung 5-148 bis 5-153).

Luftquerstrom von 520 m³/h

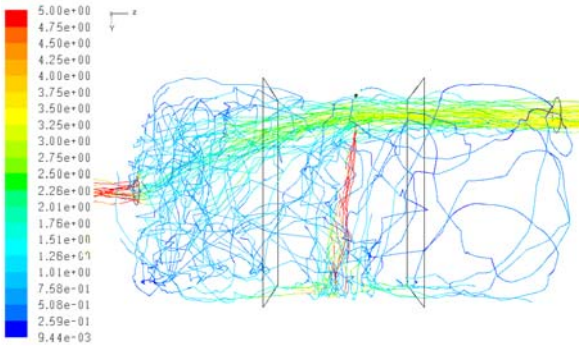


Abbildung 5-148: 10 µm

Luftquerstromvon 170 m³/h

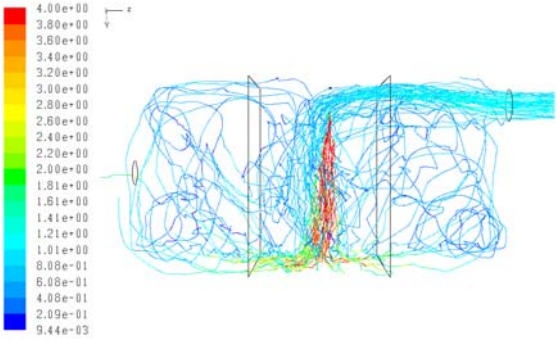


Abbildung 5-149: 10 µm

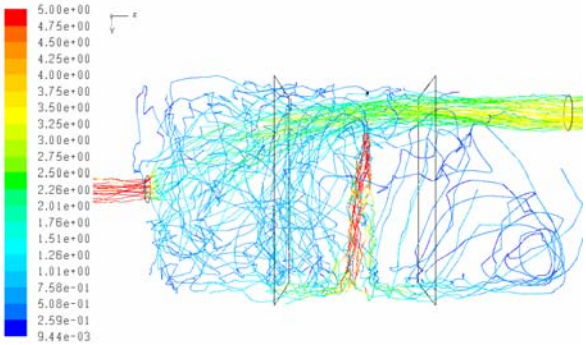


Abbildung 5-150: 4 µm

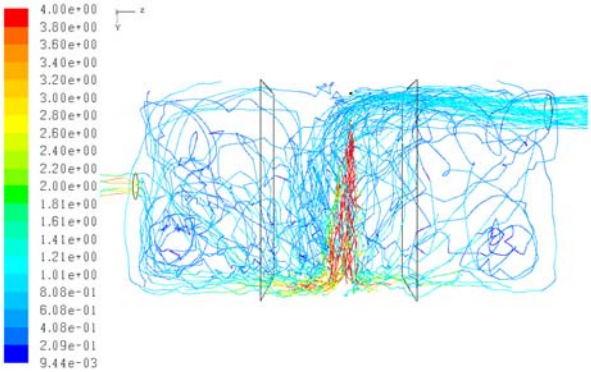


Abbildung 5-151: 4 µm

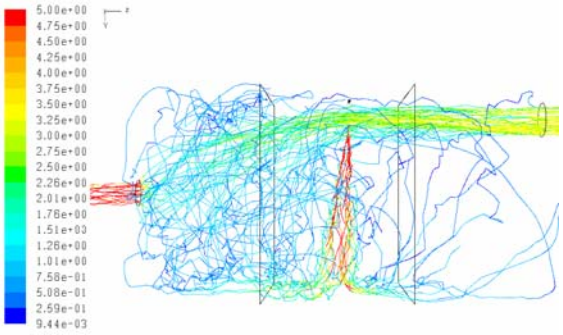


Abbildung 5-152: 1 µm

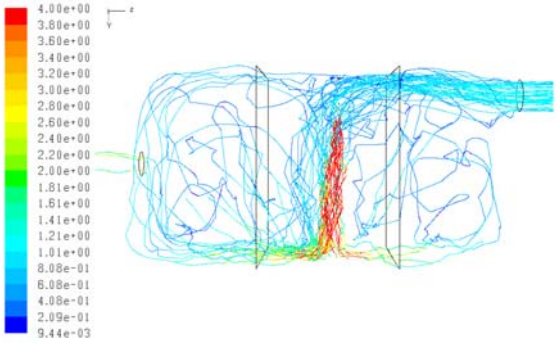


Abbildung 5-153: 1 µm

Die erstellten Bilder der Partikelflugbahnen zeigen deutlich dass in einem Partikelgrössenbereich von PM10 die Partikel der Gasströmung folgen und keine nennenswerten Unterschiede im Strömungsverhalten zu beobachten sind.

5.3.1.10 Analyse und Interpretation der Simulationsresultate

In diesen Kapitel sollen die Simulationsresultate der Gasströmung sowie der Tropfenflugbahnen des Zweiphasensprühs sowie der Gasströmung durch die Staubabscheidekammer bei zwei verschiedenen Luftvolumenströmung zuerst ohne Wirksamkeit der Düse dann unter Wirksamkeit der Düse in drei verschiedenen Düsenanordnungen und danach der Tropfen und Partikelflugbahnen in der Staubabscheidekammer von jeweils verschiedenen Partikel und Tropfengrößenfraktionen bei den jeweils unterschiedlichen Betriebsbedingungen im Lichte der zuerst getroffenen Annahmen und Simplifizierungen sowie experimentellen Untersuchungsresultaten zusammengeführt werden. Es sei nochmals angeführt, dass für die Tröpfchen als inelastisch stoßende Partikel gehandhabt wurden und bei der Simulation des Düsensprays der Tropfenzerfall vernachlässigt werden musste. Weiters wurde jegliche Interaktion in der diskreten Phase (Partikel-Partikel, Partikel-Tröpfchen, Tröpfchen-Tröpfchen) vernachlässigt. Zur Bestätigung der Simulationsresultate liegen experimentelle Untersuchungsergebnisse vor. Zum einen wurde festgestellt, dass bei kleinen Versorgungswasservolumenströmen der Düse der Düsenspray aus kleineren Tropfengrößen besteht. Bei steigendem Versorgungswasservolumenstrom steigt der Anteil größerer Tröpfchen im Zweiphasenspray an. Wie aus den Untersuchungen hervor geht, ist die Anzahl der Tropfen bei kleineren Versorgungswasservolumenströmen im Düsensprüh geringer als bei hohen Versorgungswasservolumenströmen. Trotzdem ist die Staubabscheidungseffektivität bei kleinen Versorgungswasservoluemenströmen als verhältnismäßig hoch festgestellt worden. Den kleineren Tröpfchen haben also eine verhältnismäßig hohe Staubabscheideeffektivität zuzuordnen was sich auch mit Berechnungen des Einzeltropfenabscheidegrades von Partikeln deckt, wo hohe Staubabscheidegrade gefunden wurden wenn Tropfen und Partikel etwa gleich groß sind. Weiters wurde in experimentellen Untersuchungen festgestellt, dass eine Einzelne Zweiphasendüse im Zentrum der Staubabscheidekammer (Düsenanordnung $4A_0$) höhere Staubabscheidegrade liefert als der Einsatz zweier Düsen in Anordnung ($4A_2$ in 20 mm Abstand zueinander). Dieser Sachverhalt wurde auf mögliche Tropfenkoaleszenz zurückgeführt welche aufgrund Tropfenvergröberung zu schlechteren Staubabscheidegraden führt. Die Düsenanordnung ($4A_{20}$ mit einen Abstand von 0,2m zueinander) zeigt den geringsten Staubabscheidegrad was auf ein durchdringen des Staubes zwischen den beiden Düsensprays zurückgeführt wurde.

Im Zuge der Simulation wurden die Strömungsverhältnisse aller vier Strömungskomponenten in der Staubabscheidekammer berechnet: Luftquerströmung Düsenluftströmung Tröpfchenflugbahnen sowie Staubpartikelbahnen.

Für die Gasströmung in der Staubabscheidekammer konnte festgestellt werden, dass es auf das Verhältnis zwischen Düsengasströmung (vertikale Komponente) und Luftquerströmung (horizontale Komponente) drauf an kommt ob die Staubpartikelbeladene Luftquerströmung in Abscheiderichtung durch den Düsensprüh umgelenkt werden kann oder nicht.

Für den Düsenspray konnte das Sprühbild geklärt werden, welches aus einer Gasströmung im Zentrum derer die feinen Tröpfchen folgen, während die größeren Tröpfchen durch den Düsensprühkopf reflektiert werden und in einem stumpferen Winkel an der Austrittsöffnung

austreten jedoch nach von der Tröpfchengröße abhängigen Distanz vom Austritt entfernt wider in die Gasströmung des Düsensprühs eingesaugt werden. Bei Beaufschlagung mit einem Luftquerstrom kommt es nicht mehr zu diesem Einsaugen sondern die größeren Tröpfchen werden durch die Luftquerströmung mitgeführt wenn dessen horizontale Komponente stark genug ist. Bei kleinen Luftvolumenstrom Q_{low}, jedoch wird die gesamte Luftquerströmung durch die vertikale Komponente der Düse umgelenkt. Dieser in Richtung des Düsengasstromes umgelenkten Strömung folgen die größeren Tröpfchen ebenfalls.

Werden nun die Strömungssituationen der Partikel mit jeden der Tröpfchen verglichen so können Bereiche und Betriebsbedingungen in der Staubkammer identifiziert werden welche unterstützend für die Staubabscheidung wirken können.

Als bedeutende Erkenntnis konnte durch die Simulation geklärt werden, dass die Staubpartikel als auch die Tropfenflugbahnen dem Strömungsbild der Gasströmung gleichen. Die für den PM10 des Teststaubes als besonders staubabscheidewirksamen kleinen Tröpfchenfraktionen in der Gasströmung im Düsenzentrum zeigen nur dann mit den Partikelflugbahnen Kontaktbereiche wo ein gewisses Verhältnis zwischen horizontaler Komponente und vertikaler Komponente gegeben ist. Ist die Anströmgeschwindigkeit zu hoch verlassen die Partikel ohne weiterer Umlenkung die Staubabscheidekammer. Staubabscheidung wird hier nur durch die größeren mit der Luftquerströmung mitgerissenen Tröpfchen und einer kleien in den Düsenspray eingesaugten Partikelfracht vollzogen. Dieser Sachverhalt konnte durch Simulationen bei zwei verschiedenen Querluftvolumenströmen untermauert werden. Bei hohen Luftvolumenstrom Q_{high} reicht die vertikale Komponente des Düsensprays scheinbar nicht aus um die Strömungsrichtung der Luftquerströmung global zu verändern, bei niedrigem Luftvolumenstrom Q_{low}, reicht diese aber aus um die Luftquerströmung zum Boden hin umzulenken. Nachdem die Partikelflugbahnen der Luftquerströmung folgen, konnte bei Q_{low}, eine Ablenkung der Partikel festgestellt werden. In diesem Fall konnte auch ein starker Kontakt zwischen Tropfenflugbahnen und Partikelflugbahnen festgestellt werden. Aus diesem Grund ist von einer höheren Staubabscheideeffektivität bei niedrigeren Luftquerströmungen auszugehen. Diese Tatsache wurde auch experimentell bestätigt.

Nachdem bei hohen Luftvolumenströmen die Luftquerströmung kaum umgelenkt wird, werden auch die Partikelflugbahnen vom Düsenspray kaum beeinflusst, mit Ausnahme einzelner in den Düsenspray eingesaugter Partikel. Daher kommt es zwischen Düsenspray und Partikel kaum zum Kontakt. Die hohe Anströmgeschwindigkeit der Luftquerströmung bewirkt jedoch ein mitführen mit der Luftquerströmung der größeren Tröpfchen aus dem Expansionsbereich. Diese mitgeführten Tropfen zeigen in der Folge in der Luftquerströmung wie aus Ihren Tropfenflugbahnen ersichtlich eine Kontaktmöglichkeit mit den Partikelflugbahnen. Bei Verwendung niedriger Luftvolumenströme erfolgt ein Großteil der Interaktion zwischen Partikelflugbahnen und Tropfenflugbahnen im Bereich des Düsensprühs. Hier sind auch die kleineren Tröpfchengrößenfraktionen staubabscheidewirksam was eine höhere Staubabscheideeffektivität erwarten lässt. Dies konnte durch experimentelle Untersuchungen bestätigt werden. Die Wahl eines geringen Versorgungswasservolumenstromes ist durch die feineren Tröpfchenkollektive die entstehen in diesem Zusammenhang von Vorteil. Es lässt also die Wahl eines kleinen Versorgungswasservolumenstromes bei kleiner Anströmgeschwindigkeit eine vergleichsweise hohe Staubabscheideeffektivität erwarten, da auch die Ausbildung größerer Tröpfchen welche die kleineren an der Sprühkegelmantelfläche stömungsmechanisch abschirmen unterbleibt. Dieser Zusammenhang bedingt aber auch den Einsatz mehrerer Sprühdüsen nebeneinander was im

weiteren optimiert werden soll. In jeden Fall ist die Düsenluftströmung auf die Anströmverhältnisse anzupassen damit die vertikale Komponente der Düse stark genug ist um eine Abscheidung der Partikel herbeiführen zu können.

Bei der Düsenanordnung $4A_0$ bewirkt die zentrale Anordnung der Düse eine starke Beeinflussung der Luftquerströmung bei den Düsenanordnungen $4A_2$ und $4A_{20}$ist eine Verdopplung der vertikalen Strömungskomponente der Fall dies bewirkt jedoch nur bei der Düsenanordnung $4A_2$mit geringen Düsenabstand von 20 mm eine verstärkte Strömungsbeeinflussung. Bei der Düsenanordnung $4A_{20}$ wo der Abstand zwischen den Düsen mit 0,2 m höher ist, ist mit geringerer Strömungsbeeinflussung zu rechnen. Bei der Düsenanordnung $4A_{90}$ ist jedoch mit Tropfenkoaleszenz zu rechnen, was die Ausbildung eines gemeinsamen Strömungsbereiches die bei der Simulation festgestellt wurde unterstützt. Dies ist weder bei der Düsenanordnung $4A_0$ noch $4A_{20}$ in bedeutenden Masse zu befürchten. Bei der Düsenanordnung $4A_{90}$ besteht jedoch der durch die Simulation aufgeklärte Mangel, dass Staubpartikel zwischen den Sprays durchtransportiert werden können. Die Beurteilung der Qualität der Düsenanordnungen ist im Kontext der Luftanströmgeschwindigkeit zu sehen. Die zu erwartende Staubabscheideeffektivität ist bei geringeren Luftquerstromgeschwindigkeiten höher. Jeoch ist bei hoher als auch bei niedriger Anströmgeschwindigkeit die Düsenanordnung $4A_0$ von Vorteil. Bei niedriger Anströmgeschwindigkeit wirkt sich die zentrale Anströmung positiv aus und bei hoher Anströmgeschwindigkeit bewirkt die zentrale Anströmung des Düsensprays ein verstärktes mitführen von großen Tröpfchen mit der Luftquerströmung was ebenfalls zu einer hohen Staubabscheideeffektivität bewirkt. Dieser Effekt wird über $4A_2$ bis zur Düsenanordnung $4A_{20}$ aufgrund der vom Zentrum abrückenden Positionierung des Sprays vermindert. Die durch die Simulation aufgeklärten Zusammenhänge werden durch die Messergebnisse der experimentellen Untersuchungen bestätigt. Bei den experimentellen Untersuchungen wurde der höchste Staubabscheidegrad bei zentraler Positionierung und geringsten Luftvolumenstrom festgestellt.

5.3.1.11 Zusammenfassung der Ergebnisse der Simulation der sekundären Staubabscheidung

Durch die Simulation der Strömungsverhältnisse in der Staubabscheidekammer und der Tropfen bzw. Partikelflugbahnen bei verschiedenen Betriebsbedingungen sollen Rückschlüsse auf die optimale Düsenbetriebsweise bei Abscheidung diffuser Staubemmisssionen ermöglicht werden. Anhand der Simulationsergebnisse wurde in Übereinstimmung mit experimentellen Untersuchungen festgestellt, dass bei der diffusen Staubabscheidung bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten höhere Abscheidegrade zu erwarten sind und dass der notwendige Luftvolumenstrom der Düse auf die Anströmgeschwindigkeit der staubbeladenen Luft abzustimmen ist. Die Wahl eines geringen Versorgungswasservolumenstromes ist durch die feineren Tröpfchenkollektive die entstehen in diesem Zusammenhang von Vorteil. Es lässt also die Wahl eines kleinen Versorgungswasservolumenstromes bei kleiner Anströmgeschwindigkeit eine vergleichsweise hohe Staubabscheideeffektivität erwarten da auch die Ausbildung größerer Tröpfchen welche die kleineren an der Sprühkegelmantelfläche stömungsmechanisch abschirmen unterbleibt. Dieser Zusammenhang bedingt aber auch den Einsatz mehrerer Sprühdüsen nebeneinander was im Weiteren optimiert werden soll. In jeden Fall ist die Düsenluftströmung auf die Anströmverhältnisse anzupassen damit die vertikale Komponente der Düse stark genug ist um eine Abscheidung der Partikel herbeiführen zu können.

5.3.2 Adaption des Barth-Schuch-Löffler Modelles zur Berechnung der sekundären Staubabscheideeffektivität [80]

Im vorigen Kapitel wurde durch CFD Simulation der Strömungsverhältnisse geklärt wie der Staub an den Spray herrantransportiert wird (ob die Staubwolke dem Spray ausweicht), wo wirksame bereiche des Sprays liegen und welche Bedingungen dort herrschen.

Da nun geklärt ist wie der Staub an den Spray herrantransportiert wird und welche Strömungsbedingungen dort herrschen kann im weitern der Abscheidegrad mittels Bart/Schuch/Löfflermodell berechnet werden.

Durch Berechnung des Abscheidegrades des Staubes durch Tropfen sollen Einblicke welche Umgebungseinflüsse wie Luftgeschwindigkeit, Tropfengröße und Konzentration die Staubabscheidung beeinflussen. Die Adaption dieses Modelles kann aufgrund zahlreicher Vereinfachungen nur grobe Abschätzungen liefern welche Einflüsse wie Umgebungseinflüsse wie Luftgeschwindigkeit, Tropfengröße und Konzentration die Staubabscheidung in welcher Art beeinflussen.

5.3.2.1 Aufgabenstellung

Für eine bekannte Tropfengrößenverteilung der verwendeten Zweistoffresonanzdüse VSR 1005 und einer bestimmten Gasgeschwindigkeit der partikelbeladenen Luft durch den aufgebauten Prüfstand [6] sollen die erreichbaren Abscheidegrade berechnet werden. Dazu wird das Barth/Löffler/Schuch-Modell verwendet. Dazu soll die Bewegungsgleichung der Tropfen der Zweiphasenströmung des Düsensprühs im Strömungsfeld partikelbeladener Luft aufgestellt und gelöst werden. Durch die erhaltene Bewegungsgleichung soll gezeigt werden, ob das Barth/Löffler/Schuch-Modell adaptiert werden kann, um Abscheidegrade bei verschiedenen Strömungssituationen berechnen zu können. Außerdem soll untersucht werden, ob durch bestimmte Maßnahmen, wie etwa das Verändern des Winkels, unter dem die partikelbeladene Luft von dem Zweiphasensprüh angeströmt wird, der Abscheidegrad verbessert werden kann. Weiters soll der Einfluss der Geschwindigkeit der partikelbeladenen Luft, der Partikelgröße und des Wasservolumenstroms der Düse auf den Abscheidegrad bei der Staubabscheidung berechnet werden. Als zweiter Themenbereich soll die Bewegungsgleichung der Partikel aufgestellt und gelöst werden, um herauszufinden, ob die Partikel in den Düsensprüh eindringen können.

5.3.2.2 Barth/Löffler/Schuch-Modell

Das von Barth vorgeschlagenen Modell [81] geht von folgender Vorstellung aus: Ein als kugelförmig angenommener Tropfen wird auf Grund seiner Relativgeschwindigkeit zum umgebenden Gas von diesem umströmt. Die in der Strömung mit gleicher Geschwindigkeit mitbewegten Partikel verlassen die Stromlinien der Gasmoleküle auf Grund ihrer Trägheit. Die Grenzpartikelbahn, ist jene Bahn der Partikel, die gerade noch zu einer Berührung zwischen Partikel- und Tropfenoberfläche führen. Liegen die Partikel innerhalb der Grenzpartikelbahn, treffen diese auf den Tropfen und können abgeschieden werden.(Abbildung 5-154)

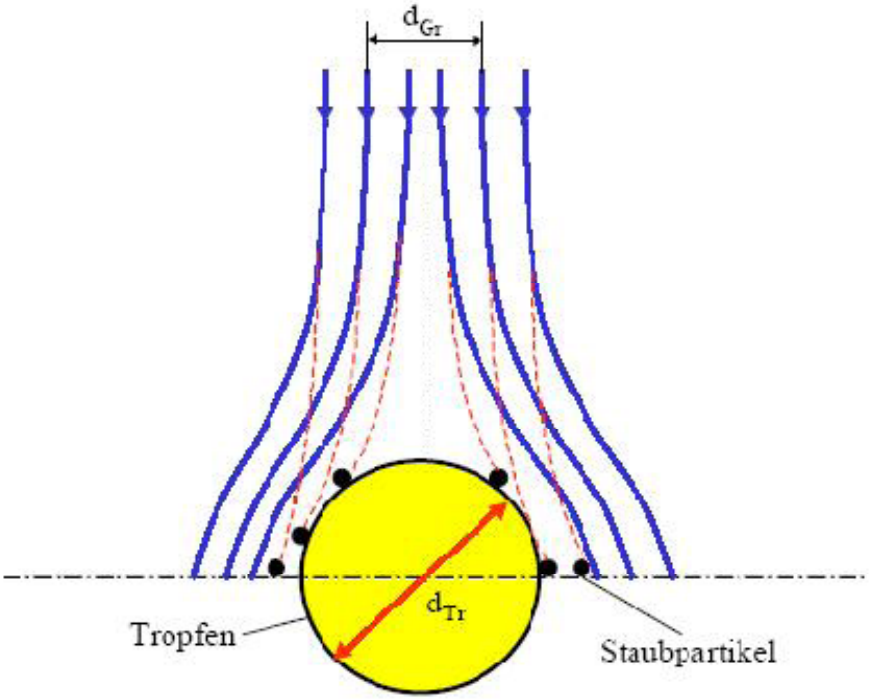


Abbildung 5-154: Strömung um einen Wassertropfen

Da die Abscheidung von der Relativgeschwindigkeit zwischen Partikel und Wassertropfen abhängt, muss deren Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt bekannt sein. Um den Abscheidegrad des gesamten Sprühs zu ermitteln, wird vereinfacht der Abscheidegrad eines Einzeltropfens ermittelt und dieser hochgerechnet.

5.3.2.3 Abscheidegrad eines Einzeltropfens

5.3.2.3.1 Bewegung eines Wassertropfens im Strömungsfeld

Zur Bestimmung des Abscheidegrades mittels des Barth/Löffler/Schuch-Modelles wird die Relativgeschwindigkeit zwischen Wassertropfen und Partikel benötigt. Um die Geschwindigkeit der Wassertropfen zu ermitteln, muss die Bewegungsgleichung gelöst werden. Es ist davon auszugehen, dass Tropfen, welche direkt mit der partikelbeladenen Luft angeströmt werden, eine höhere Wahrscheinlichkeit aufweisen, mit Partikeln zusammenstoßen zu können. Deswegen soll nur die Bewegung eines solchen Tropfens ermittelt werden. Dieser wird dann als repräsentativer Tropfen herangezogen, um den Abscheidegrad des gesamten Sprühs zu ermitteln.

5.3.2.3.2 Aufstellen der Bewegungsgleichung

Bei Vernachlässigung der Schwerkraft und der Auftriebskraft, wirken auf den Tropfen nur mehr seine Trägheitskraft F_T und die Widerstandskraft F_W zu Folge der umgebenden Strömungen auf ihn ein. Außerdem wird angenommen, dass der Wassertropfen kugelförmig ist und seine Größe und Gestalt während des Flugweges nicht verändert [82]. Mit dem zweiten Newton'schen Axiom (Schwerpunktsatz (Formel 5-14)) folgt

$$m_{Tr} \cdot \vec{a}_{Tr} = \vec{F}_{W_{Tr}} \tag{5-14}$$

In der folgenden Abbildung (5-155) sind die auf einen Tropfen wirkenden Kräfte zu Folge der umgebenden Luftströmungen dargestellt. Vereinfachend wird die dreidimensionale Problemstellung in einem zweidimensionalen Fall betrachtet.

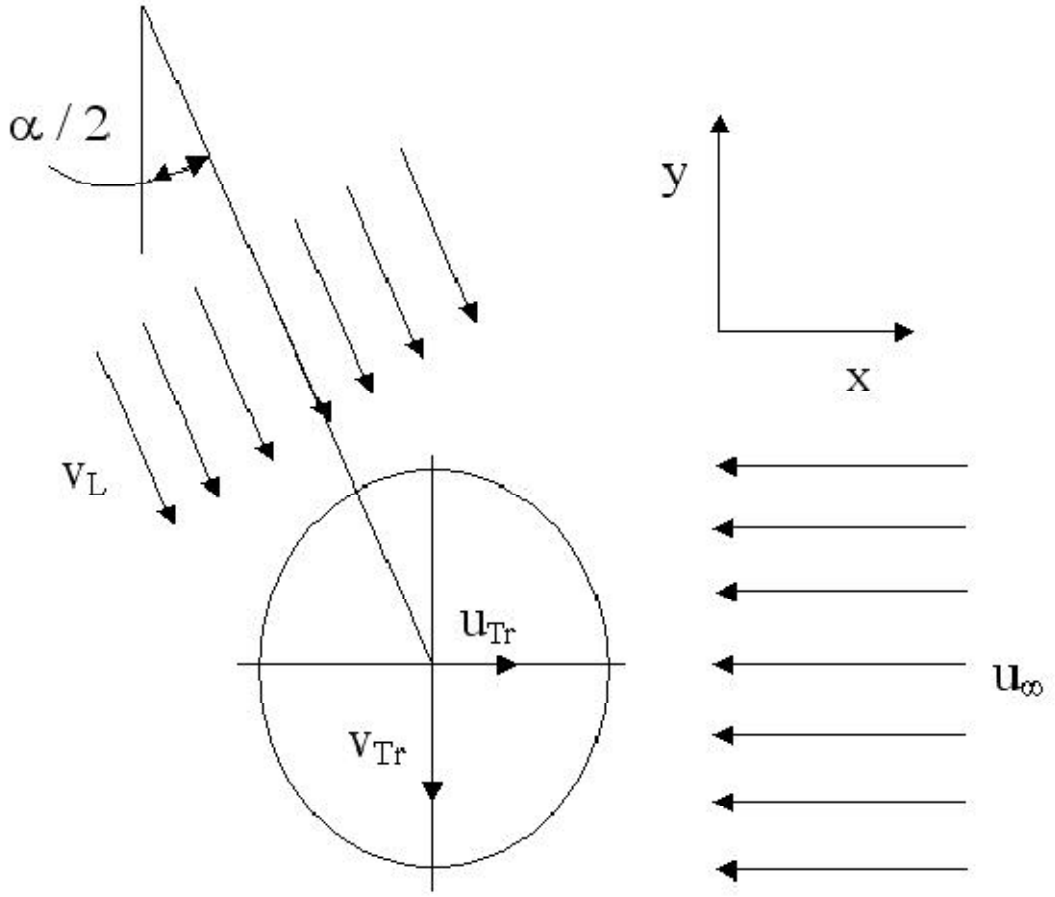


Abbildung 5-155: Wassertropfen unter den auf ihn einwirkenden Strömungen

v_L ist die Geschwindigkeit, von der aus der Zweiphasendüse austretenden Druckluft. u_1 ist die Geschwindigkeit der quer zur Düse anströmenden partikelbeladenen Luft. Für die quer anströmende Luft wurde eine reine Parallelströmung angenommen. In Realität ist diese im Prüfstand weitaus komplizierter. Folgende Abbildung zeigt eine Simulation der Strömung durch die Kammer (CFD Simulation siehe 5.3.1. Hier wurde die Strömung durch die Kammer einer staubfreien Luft bei ausgeschalteter Düse untersucht.

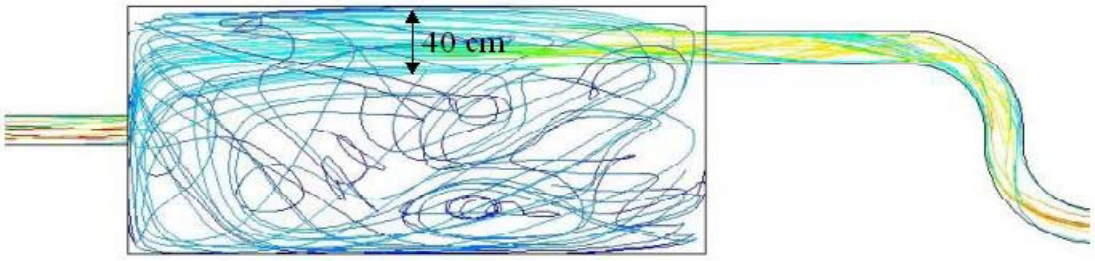


Abbildung 5-156: Simulation der Strömung staubfreier Luft durch die Kammer bei ausgeschaltener Düse

Die Düse ist in der Kammer an der Decke mittig angebracht Düsenposition $4A_0$. Aus dieser Strömungssimulation ist ersichtlich, dass in dem Bereich, in dem die Düse positioniert ist, nahezu

eine parallele Strömung vorliegt. Erst in einer Entfernung von 40 cm, von der Decke der Kammer aus gesehen, ist die Strömung nur schwer erfassbar. In guter Näherung kann also mit einer parallelen Strömung gerechnet werden. Wird nun der Schwerpunktsatz (Formel 5-14) für den in Abbildung 5-156 dargestellten Fall aufgeschrieben so folgt Formel 5-15:

$$\rho_{Tr} \cdot V_{Tr} \frac{d\vec{w}_{Tr}}{dt} = c_{W(Re_{Tr})} \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot |\vec{w}_{rel,Tr}| \cdot \vec{w}_{rel,Tr} \cdot A_{Tr} \tag{5-15}$$

Die Reynolds-Zahl der Tropfen wird dabei wie folgt definiert

$$Re_{Tr} = \frac{|\vec{w}_{rel,Tr}| \cdot d_{Tr}}{\nu_L} \tag{5-16}$$

Die Relativgeschwindigkeit ist dabei die Differenz zwischen Luft- und Tropfengeschwindigkeit.

$$|\vec{w}_{rel,Tr}| = |\vec{w}_L - \vec{w}_{Tr}| \tag{5-17}$$

$$\begin{pmatrix} u_{rel,Tr} \\ v_{rel,Tr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{Lx} - u_\infty \\ -v_{Ly} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_{Tr} \\ -v_{Tr} \end{pmatrix} \tag{5-18}$$

Wobei für den Betrag gilt

$$|\vec{w}_{rel,Tr}| = \sqrt{(v_{Lx} - u_\infty - u_{Tr}(t))^2 + (-v_{Ly} + v_{Tr}(t))^2} \tag{5-19}$$

Die beiden Geschwindigkeitskomponenten der Druckluft v_L folgen mit dem Winkel α zu

$$v_{Lx} = v_L \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{5-20}$$

$$v_{Ly} = v_L \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{5-21}$$

Die Tropfengeschwindigkeit ändert sich mit dem zurückgelegten Weg. Dies führt zu einer sich ständig ändernden Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und umgebender Luft, wodurch sich auch die Reynoldszahl ändert. Da der c_W-Wert von der Reynoldszahl abhängt, muss darauf geachtet werden, dass der für den jeweiligen Reynolds-Bereich entsprechende c_W-Wert eingesetzt wird. PIV-Messungen haben ergeben, dass die Geschwindigkeit einzelner Tropfen in der Größenordnung von 10 m/s liegt. Wie Laserbeugungsuntersuchungen [42] ergaben liegt die Tropfengröße in der Größenordnung von 10 bis 100 µm. Für eine Abschätzung der Reynoldszahl ergibt sich:

$$Re_{Tr} = \frac{|\vec{w}_{rel,Tr}| \cdot d_{Tr}}{\nu_L} \approx \frac{10 \cdot (10 - 100) \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-5}} = 10 - 100 \tag{5-22}$$

Daraus kann geschlossen werden, dass die Reynoldszahl (Formel 5-22) des Tropfens zu Beginn bei etwa 10 bis 100 liegt und bis auf 0 absinken wird. Für den c_W-Wert wurde die Schiller-Naumann-Korrelation verwendet, die in einem Bereich von $0< Re_{Tr}<1000$ liegt.

$$c_W(Re_{Tr}) = \frac{24}{Re_{Tr}}\left(1 + 0,15 \cdot Re_{Tr}^{0,687}\right) \quad (5\text{-}23)$$

Da die Druckluft v_L mit zunehmender Entfernung von der Düse abnimmt, muss ein entsprechender Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit der Druckluft und Entfernung von der Düse gefunden werden.

Abbildung (5-157) zeigt den in Experimenten beobachteten Verlauf der Wassertropfen. Wie daraus ersichtlich wird, verändert sich der Winkel α unter dem die Wassertropfen von der Druckluft aus der Düse angeströmt werden, mit dem Weg, den die Tropfen zurückgelegt haben.

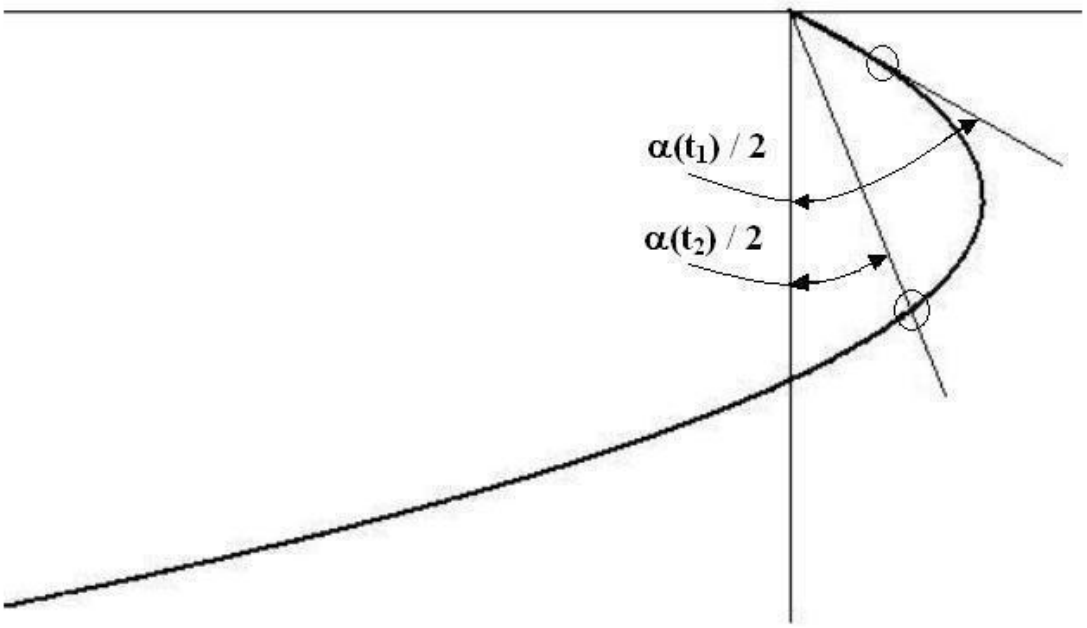


Abbildung 5-157: Veränderung des Winkels α mit der Position des Tropfens

Es wurde ein konstant bleibender Winkel von α=45° angenommen welcher durch PIV Messungen und phasendoppleranemometrische Messungen des Sprühbildes der Düse untermauert werden kann siehe Kapitel 5.3.1.4.13.
Wie mit folgender Abbildung (5-158) verdeutlicht wird, nimmt der Einfluss der Druckluft sehr stark mit den Weg in y-Richtung ab. Damit kann argumentiert werden, dass ein konstant gewählter Winkel durchaus zulässig ist.

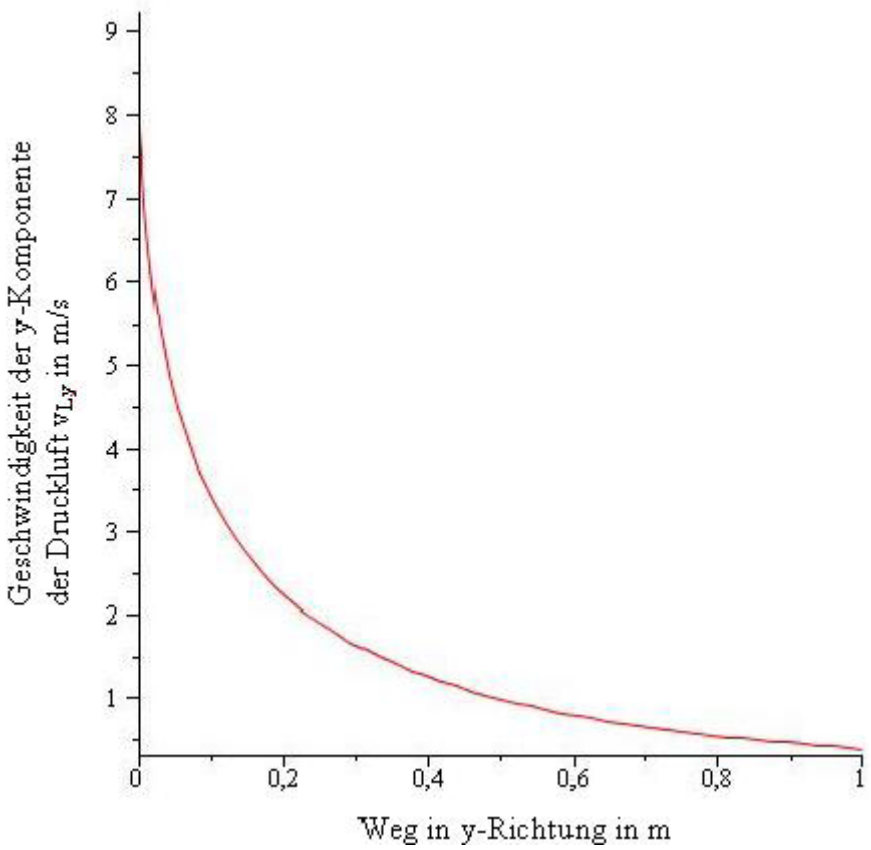


Abbildung. 5-158: Geschwindigkeit von der y-Komponente der Druckluft als Funktion des Weges in y-Richtung

Unter diesen Berücksichtigungen ergibt sich Formel 5-15 zu

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} u_{Tr}(t) \\ -v_{Tr}(t) \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\frac{\rho_L}{\rho_{Tr}}\frac{A_{Tr}}{V_{Tr}} \cdot c_{W(Re_{Tr})} \cdot |\vec{w}_{rel,Tr}| \cdot \begin{pmatrix} v_{Lx} - u_\infty - u_{Tr}(t) \\ -v_{Ly} + v_{Tr}(t) \end{pmatrix} \quad (5\text{-}24)$$

Einsetzen von $v_{Tr} = \frac{dy_{Tr}(t)}{dt}$ und $u_{Tr} = \frac{dx_{Tr}(t)}{dt}$ in die Differentialgleichung **5-24** und Gleichug **5-19** führt zu der Form:

$$\frac{d^2}{dt^2}\begin{pmatrix} x_{Tr}(t) \\ -y_{Tr}(t) \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\frac{\rho_L}{\rho_{Tr}}\frac{A_{Tr}}{V_{Tr}} \cdot c_W(Re_{Tr}) \cdot |\vec{w}_{rel,Tr}| \begin{pmatrix} -u_\infty + v_{Lx} - \frac{dx_{Tr}(t)}{dt} \\ -v_{Ly} + \frac{dy_{Tr}(t)}{dt} \end{pmatrix} \quad (5\text{-}25)$$

Mit den Anfangsbedingungen (Formeln 5-26 bis 5-29) kann dieses Differentialgleichungssystem numerisch gelöst werden.

$$x_{Tr}(t=0) = 0 \quad (5\text{-}26)$$

$$y_{Tr}(t=0) = 0 \quad (5\text{-}27)$$

$$u_{Tr}(t=0) = |\vec{w}_{Tr0}| \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (5\text{-}28)$$

$$v_{Tr}(t=0) = |\vec{w}_{Tr0}| \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \tag{5-29}$$

Wobei hier der Betrag der Austrittsgeschwindigkeit $Iw_{Tr0}I$ mit 10 m/s angenommen wurde. Dieser Wert wurde durch PIV-Messungen erhalten und gilt näherungsweise für die direkt der Querströmung ausgesetzten Wassertropfen. Der Winkel β wurde mit 60° angenommen (Berandung des Sprühkegels), der ebenfalls experimentell ermittelt wurde.

5.3.2.3.3 Geschwindigkeitsabnahme der Druckluft

Wie schon in Abschnitt 5.3.2.3.2 erwähnt, nimmt die Geschwindigkeit der Druckluft aus der Düse mit zurückgelegtem Weg ab. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, wurde als Näherung die in [83] angegebene Formel verwendet. In dieser Arbeit werden Gleichungen für die Tropfengeschwindigkeit auf der Freistrahlachse, sowie für die radiale Tropfengeschwindigkeit angegeben. Diese Gleichungen gelten für Zweiphasen-Freistrahle aus Gas und Flüssigkeit beim Ausströmen in ruhende Luft. Im betrachteten Fall wird der Freistrahl von partikelbeladener Luft quer angeströmt. Deswegen werden die in [83]angegebenen Formeln abgeändert.

In [83] ist folgende Gleichung für die Tropfengeschwindigkeit auf der Freistrahlachse angegeben:

$$u_{droplet_{cenerline}}(s) = u_{expansion-air} \cdot \underbrace{\left(1 + \left(1 - \exp\left(-A \cdot \sqrt{\frac{s}{d_{Nozzle}} - \frac{s^2_{virtual}}{d^2_{Nozzle}}}\right)\right)\right)}_{Beschleunigung} \cdot \underbrace{\exp\left(-0,158 \cdot \sqrt{\frac{s}{d_{Nozzle}} - \frac{s^2_{virtual}}{d^2_{Nozzle}}}\right)}_{Verzoegerung} \tag{5-30}$$

Der Beschleunigungsterm, der nur nahe am Düsenaustritt wirkt, wurde mit 1 angenommen. Diese Annahme wurde durch folgende Tatsachen begründet:

- Tropfenbildung nahe am Düsenaustritt
- abbremsende Wirkung der quer anströmenden Luft

Nahe am Düsenaustritt werden erst Tropfen aus dem zugeführten Wasser gebildet. In diesem Bereich ist noch nicht die endgültige Form der Tropfen erreicht. Da allerdings im Modell von einer definierten Größe ausgegangen wird, kann für diesen Bereich die Bewegung des Tropfens und damit die Geschwindigkeit der Druckluft nicht ermittelt werden. In der von Friedel und Al Rabadi [83] angegebenen Formel ist keine Querströmung berücksichtigt. Durch diese werden aber die Tropfen und die Luft aus der Düse zusätzlich abgebremst. In PIV-Messungen wurde eine Tropfengeschwindigkeit 2 cm von der Düsenöffnung entfernt von 10 m/s gemessen. Diese Geschwindigkeit gilt nur für den Teil des Freistrahls der direkt der Querströmung ausgesetzt ist. Abbildung 5-159 zeigt ein mittels PIV-Untersuchungen erhaltenes Bild des Freistrahls. Die Querströmung verläuft dabei von rechts nach links. Wie daraus ersichtlich wird, weisen die Tropfen in dem nicht direkt von der Querströmung angeströmten Teil des Freistrahls eine höhere Geschwindigkeit auf. Dies soll nicht weiter stören, da nur die Bewegung von Tropfen, welche direkt der Querströmung ausgesetzt sind, betrachtet werden soll. Die Geschwindigkeit der Tropfen der

Zweistoffresonanzdüse VSR 1005 bei den betrachteten Betriebsbedingungen wurde in einem Abstand von 2cm vom Düsenaustritt in einem 400x400mm großen Bereich aufgenommen. Als PIV wurde ein New Wave Solo 120 XT 15Hz PIV Ser. Nr. 25315. Die PIV Kamera erlaubte es in gepulsten Zeitabständen von 7,5 ms einen Bildausschnitt von 400x400mm mit 2048x2048 Pixel zu erfassen. Da die Geschwindigkeit der Druckluft mittels PIV nicht ermittelt werden kann, wurde angenommen, dass die Luft nahe am Düsenaustritt dieselbe Geschwindigkeit wie die Tropfen aufweist. Deswegen wurde für den Term $u_{expansion\text{-}air}$ = 10 m/s angenommen.

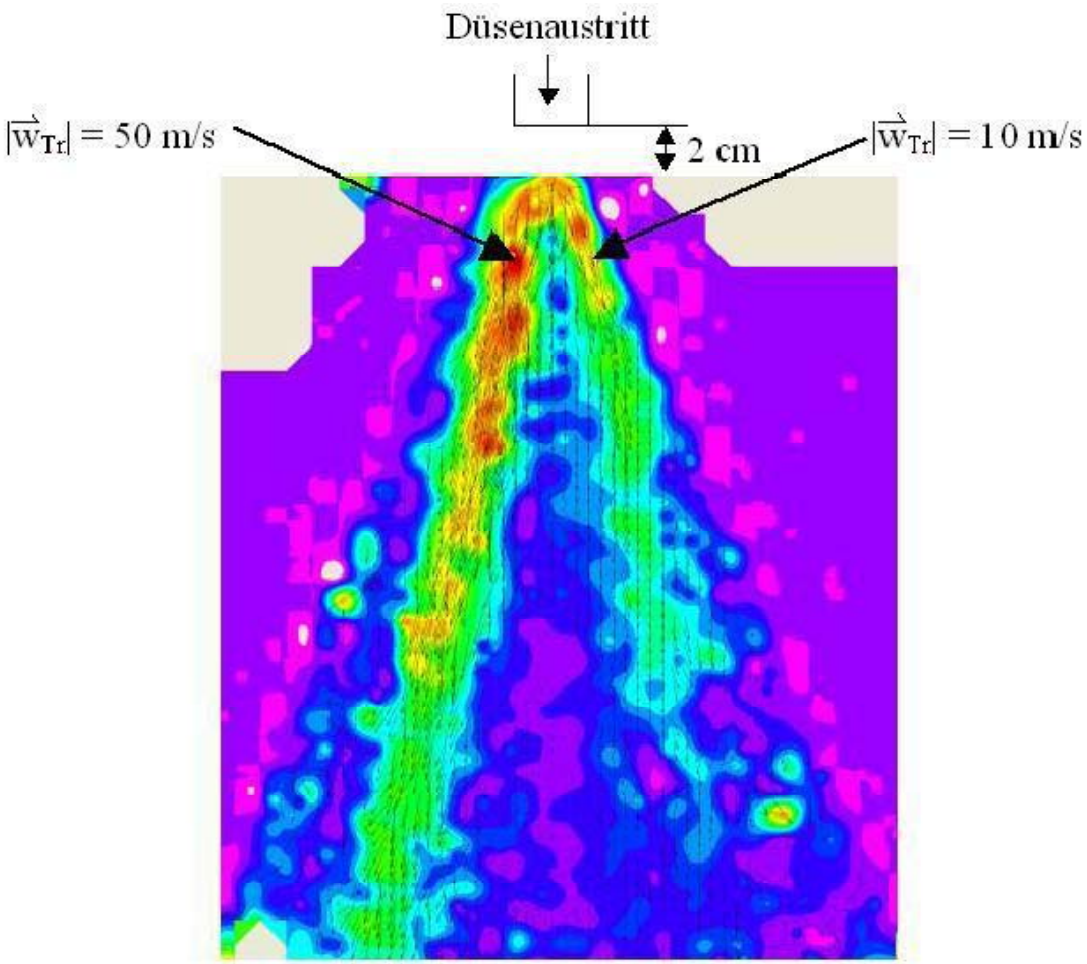


Abbildung. 5-159:: Durch PIV-Messung erhaltene Geschwindigkeitsverteilung der Tropfen

Da die Geschwindigkeit der Druckluft mittels PIV nicht ermittelt werden kann, wurde angenommen, dass die Luft nahe am Düsenaustritt dieselbe Geschwindigkeit wie die Tropfen aufweist. Deswegen wurde für den Term $u_{expansion\text{-}air}$ = 10 m/s angenommen.

Im Term $s_{virtual}$ aus Formel (5-31) geht die Reynoldszahl des Freistrahls und somit die Stoffwerte (Dichte, Zähigkeit) von diesem Zweiphasensystems ein. Die Stoffwerte hängen vom Anteil an Wasser und Luft ab und somit vom eingedüsten Wasservolumenstrom. Werden beispielsweise 10 L/h Wasser eingedüst und 15 m^3/s Druckluft, ergibt sich ein Massenanteil an Luft im Zweiphasensystem von 0,65 kg trockene Luft pro kg Wasser-Luftgemisch. Für geringe Wasservolumenströme können für die Stoffwerte des Zweiphasensystems diejenigen der Luft angenommen werden. Wenn man korrekt vorgehen möchte, muss bei höheren Wasservolumenströmen die sich verändernden Stoffwerte berücksichtigt werden. Der Einfachheit halber wurde von dieser Korrektur Abstand gehalten, mit der Begründung, dass auch Luft der

Querströmung in den Freistrahl gelangt und dadurch der Anteil von Wasser im Freistrahl gering ist. Mit diesen Vereinfachungen wurde folgendes Ergebnis erhalten:

$$v_L(y(t)) = 10 \cdot \exp\left(-3.16\sqrt{y(t)}\right) \tag{5-31}$$

5.3.2.4 Lösung der Bewegungsgleichung für einen Einzeltropfen

Die durch numerische Lösung von Gleichung (5-25) unter der Berücksichtigung von (5-31) erhaltene Bewegung der Tropfen ist in Abbildung (5-19) dargestellt. Dabei ist die Bewegung unterschiedlicher Tropfengrößen dargestellt.

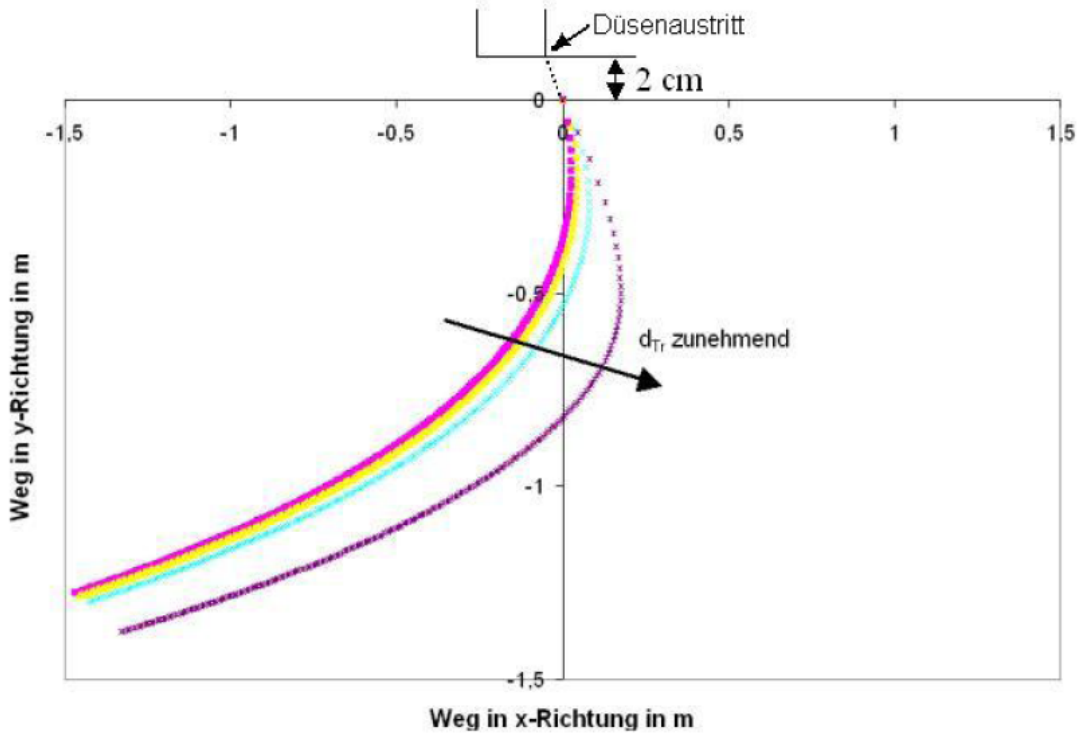


Abbildung 5-160: Flugbahn der Tropfen für d_{Tr} = 20, 50, 95 und 200 µm

Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass größere Tropfen auf Grund ihrer Trägheit einen größeren Weg zurücklegen, bis sie von der quer anströmenden Luft mitgerissen werden. Auf Grund theoretischer Überlegungen, muss sich die Bewegung der Tropfen der parallel anströmenden Luft annähern. Da im Modell eine exponentiell abnehmende Druckluftgeschwindigkeit angenommen wurde die immer unter demselben Winkel α auf die Tropfen einwirkt, stellt sich diese Tropfenbewegung stromabwärts nicht ein. Im Folgenden wird noch darauf eingegangen, wie dieser Effekt eliminiert wird.

5.3.2.5 Berechnung des spezifischen Reinigungsvolumens m eines Einzeltropfens

Wie in [84], [81] angegeben, kann das spezifische Gasvolumen, welches ein Tropfen entlang seines zurückgelegten Weges reinigt, mit folgender Formel errechnet werden.

$$m = \frac{V_G}{V_{Tr}} = \frac{\frac{\Pi}{4} \cdot d_{Tr}^2 \cdot \int_{s_{rel,1}}^{s_{rel,2}} \varphi \cdot dS_{rel}}{\frac{\Pi}{6} \cdot d_{Tr}^3} \tag{5-32}$$

Darin steht V_G für das von einem Tropfen gereinigte Volumen und V_{Tr} bezeichnet das Tropfenvolumen. φ ist das Produkt aus Auftreffgrad η und Haftanteil h. Da der Haftanteil bei der Tropfenabscheidung als 1 angenommen wird, ist $\varphi = \eta$ [84]. In [84] wird für den Auftreffgrad

$$\eta = \left(\frac{\psi}{\psi + a} \right)^b \tag{5-33}$$

angegeben. Darin ist

$$\psi = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot |\vec{w}_{rel}|}{18 \cdot \eta_L \cdot d_{Tr}} \tag{5-34}$$

eine dimensionslose Zahl, welche als Trägheitsparameter bezeichnet wird. Der Auftreffgrad η ist definiert als das Verhältnis der pro Längeneinheit auf den Tropfen auftreffenden Partikelmenge, zu der durch die Tropfenprojektionsfläche ankommenden Menge [84]. Mit Abbildung (5-154) ergibt sich η für den zweidimensionalen Fall zu:

$$\eta = \frac{d_{Gr}}{d_{Tr}} \tag{5-35}$$

Der Weg dS_{rel}, entlang dessen eine Reinigung der quer anströmendem Luft durch den Tropfen stattfindet, kann mit der Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Partikel beschrieben werden.

$$dS_{rel} = |\vec{w}_{rel}| \cdot dt \tag{5-36}$$

Einsetzen von Gleichungen (5-36) in (5-32), sowie vereinfachen von letzterer führt zu

$$m = \frac{3}{2 \cdot d_{Tr}} \int_{t_1}^{t_2} \eta(d_p, t) \cdot |\vec{w}_{rel}(t)| \cdot dt \tag{5-37}$$

$|\vec{w}_{rel}|$ steht darin für die Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und der quer anströmenden partikelbeladenen Luft. Dabei wurde angenommen, dass die Geschwindigkeit der Partikel gleich der Luftgeschwindigkeit u_∞ ist.
Man führt also die 2 dimensionale Problemstellung in den Fall eines feststehenden Tropfens, der mit der Geschwindigkeit $|\vec{w}_{rel}|$ angeströmt wird, über.

$$\vec{w}_{rel} = \begin{pmatrix} u_{rel} \\ v_{rel} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{Tr} \\ -v_{Tr} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -u_\infty \\ 0 \end{pmatrix} \tag{5-38}$$

Für den Betrag der Relativgeschwindigkeit gilt wiederum

$$|\vec{w}_{rel}| = \sqrt{(u_{Tr} + u_\infty)^2 + (-v_{Tr})^2} \tag{5-39}$$

Die Parameter a und b in Gleichung (5.33) sind von der Reynoldszahl abhängig. Diese wurde wie folgt festgelegt

$$Re = \frac{|\vec{w}_{rel}| \cdot d_{Tr}}{\nu_L} \tag{5-40}$$

In [84] sind Werte von a und b für bestimmte Reynoldszahlen angegeben. Zwischen diesen Werten wurde linear interpoliert. Wie in Kapitel 5.3.2.4 erwähnt, weicht die errechnete Bewegung stromabwärts von der theoretisch zu erwartenden ab. Daher wurde m nur bis zu der Stelle ermittelt, bei der die Relativgeschwindigkeit $|\vec{w}_{rel}|$ nur mehr 5 % ihres anfänglichen Wertes zum Zeitpunkt t = 0 betrug, beziehungsweise die Tropfen in y-Richtung einen Weg von 1,5 m zurückgelegt haben (Boden der Kammer erreicht). Um das spezifische Reinigungsvolumen zu erhalten, wurde Gleichung (5-37) numerisch integriert (aufsummiert). Der Abscheidegrad T folgt aus [84]und [81] zu

$$T = 1 - \exp\left(-\frac{\dot{V}_W}{\dot{V}_G} \cdot m(d_{Tr})\right) \tag{5-41}$$

Darin ist V_W der über die Düse zugeführte Wasservolumenstrom und V_G der zu reinigende Gasvolumenstrom. Abbildung (5-161) zeigt das spezifische Reinigungsvolumen in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers.

Tabelle 5-5: **Verwendete Stoffwerte Medium Dichte kinematische Viskosität**

Medium	Dichte in kg/m^3	kinematische Viskosität in m^2/s
Luft	$1,2$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Wasser	1000	$1 \cdot 10^{-6}$
Partikel (Pural NF)	3900	

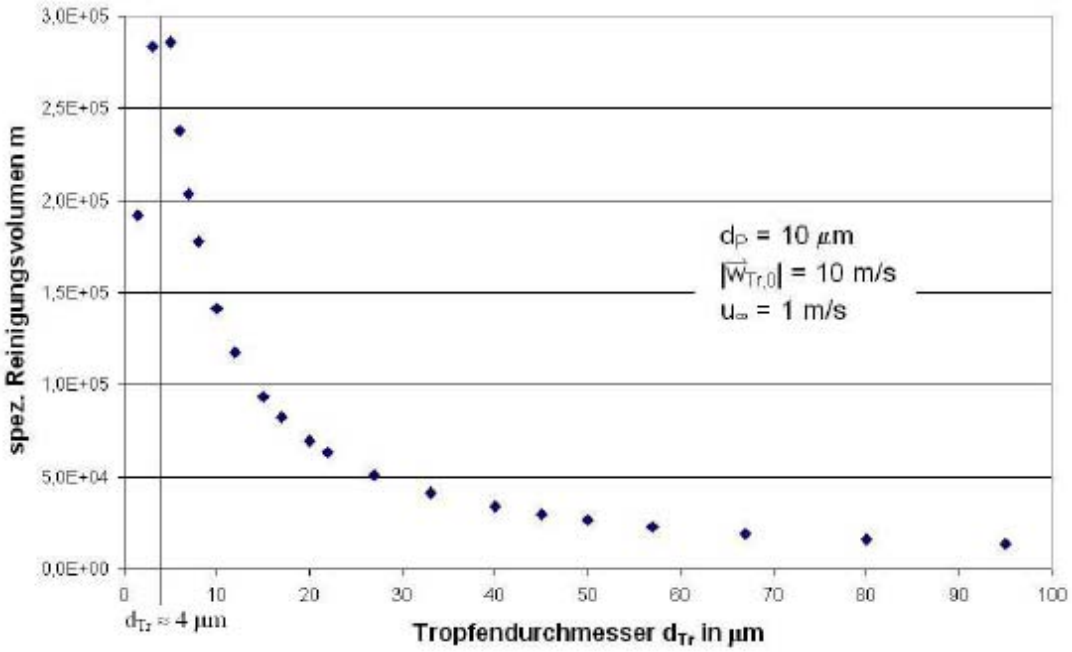


Abbildung 5-161: **spezifisches Reinigungsvolumen in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers**

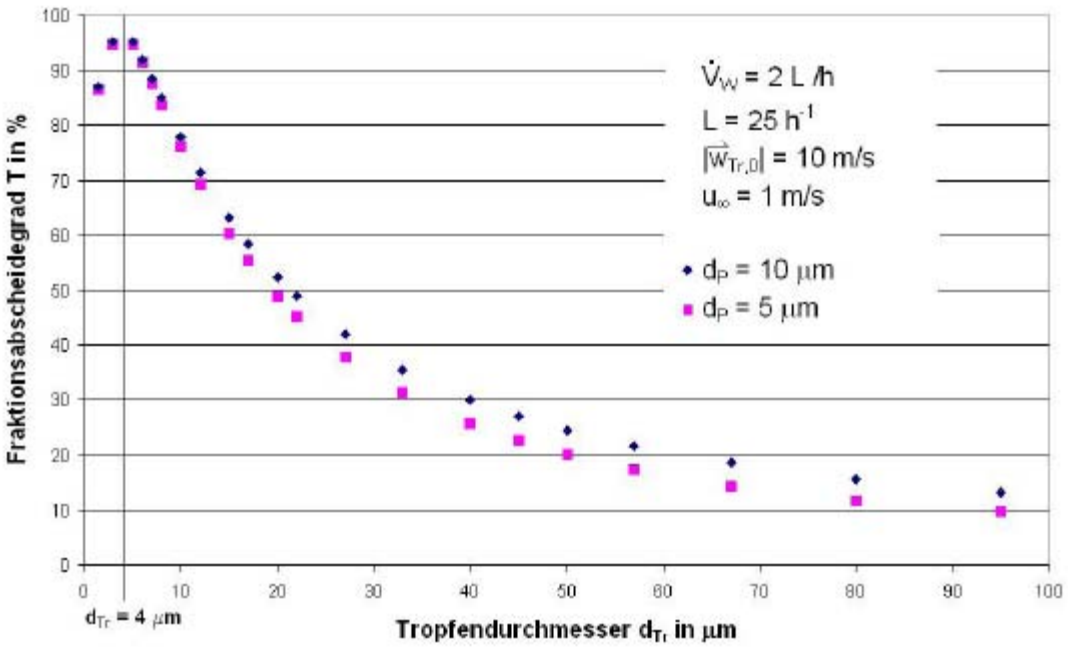


Abbildung 5-162: Fraktionsabscheidegrad in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers

Mit Gleichung (5-41) kann mit den m-Werten der Abscheidegrad T(d_P) errechnet werden. Dies ist in Abbildung 5-162 für 5 und 10 µm Partikel dargestellt. m und somit T nehmen mit zunehmenden Tropfendurchmesser ab. Dies liegt daran, dass m eine spezifische Größe ist. Aus Gleichung (5-37) folgt, dass m indirekt proportional dem Tropfendurchmesser ist. Mit abnehmenden Tropfendurchmesser sinkt m und somit T. Dies liegt daran, dass kleine Tropfen leichter von der Querströmung mitgerissen werden und daher nur für kurze Zeit eine Relativgeschwindigkeit zu den Partikeln aufweisen. Es sei hier noch angemerkt, dass zur Errechnung des Abscheidegrades als Funktion der Tropfengröße ein konstanter Gas- und Wasservolumenstrom eingesetzt wurde. Dies würde bedeuten, dass jeder Tropfen des eingedüsten Wasservolumenstroms gleich groß ist und somit jeder dasselbe spezifische Reinigungsvolumen m aufweist. Der Einfluss einer Tropfengrößenverteilung wird noch im Folgenden diskutiert.

Im Normalfall besteht ein Zweiphasensprüh nicht aus einer einzigen Tropfengröße, sondern weist eine Tropfengrößenverteilung $q_3(d_{Tr})$ auf. In [42] sind die Messergebnisse der Tropfengrößenverteilung bei unterschiedlichen Wasservolumenströmen und Düsenluftdrücken dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Wasservolumenstrom die Verteilung breiter wird und sich zu größeren Tropfen verschiebt.

In folgender Abbildung 5-163 ist die Tropfengrößenverteilung bei einem eingedüsten Wasservolumenstrom von V_W = 1,8 L/h und einem Düsen-Luftdruck von 3 bar dargestellt. Weitere Messergebnisse der Tropfengrößenverteilung sind in [70] auf den Seiten 94-100 dargestellt. Zur Berechnung wurden die Messergebnisse bei einem Düsen-Luftdruck von 3 bar eingesetzt.

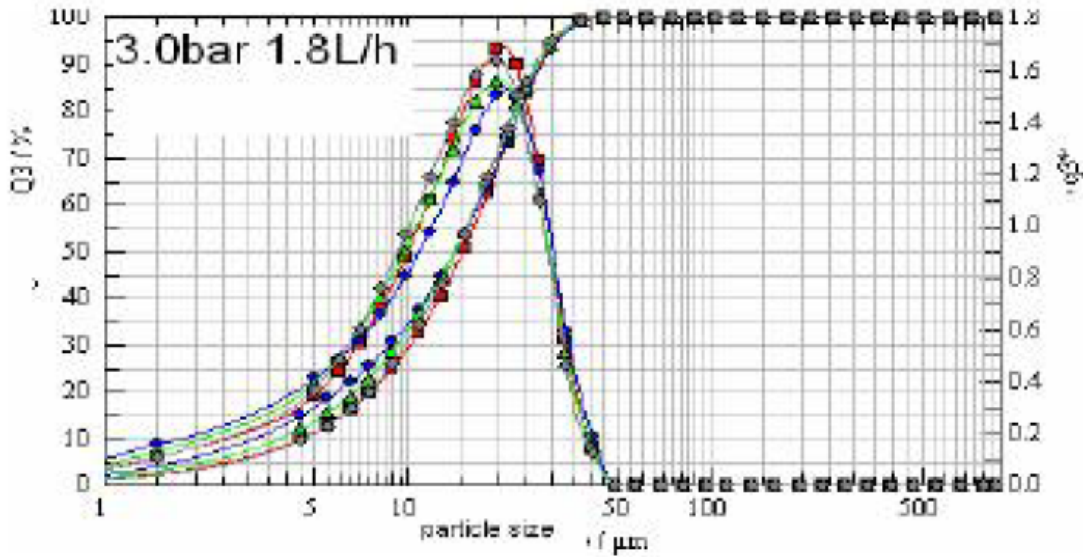


Abbildung 5-163: Tropfengrößenverteilung des Zweiphasensprühs

Das über alle Tropfengrößen gemittelte spezifische Reinigungsvolumen m ergibt sich aus [81] zu:

$$\overline{m} = \int_{d_{Tr,min}}^{d_{Tr,max}} m(d_p, d_{Tr}) \cdot q_3(d_{Tr}) \cdot dd_{Tr} \tag{5-42}$$

Durch Einsetzen in Gleichung (5-42) kann der Abscheidegrad des gesamten Sprühs für eine bestimmte Partikelgröße ermittelt werden. Dabei wird angenommen, dass sich jeder Tropfen des Sprühs wie der in Abschnitt 5.3.2.3.2 betrachtete verhält. In Abbildung 5-164 ist der errechnete Abscheidegrad als Funktion des Wasservolumenstroms dargestellt.

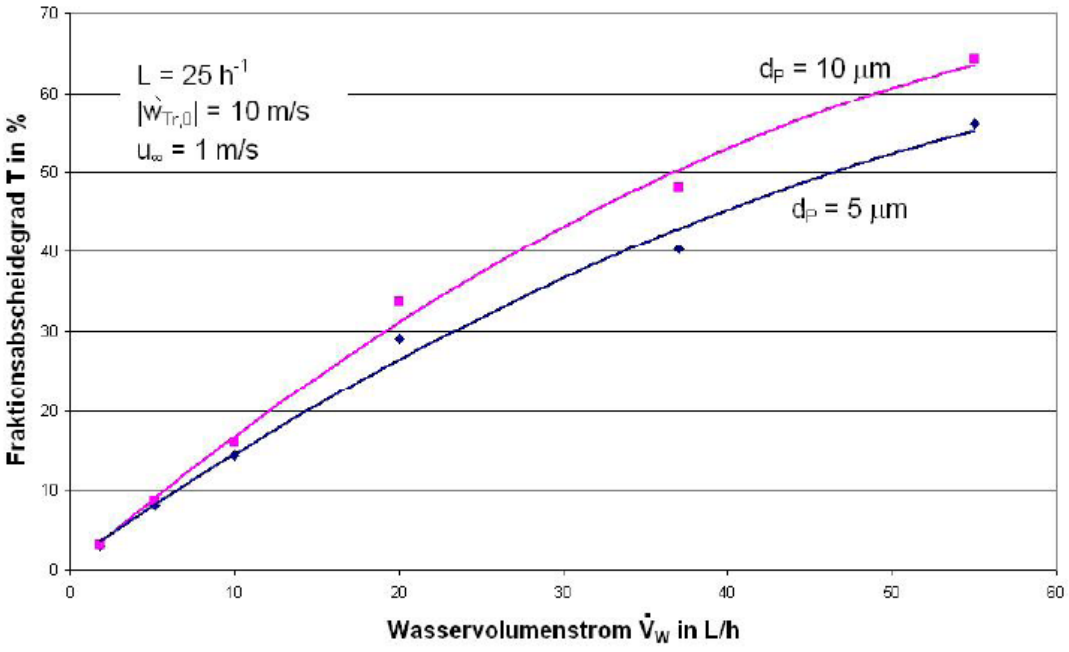


Abbildung:5-164: Fraktionsabscheidegrad als Funktion des Wasservolumenstroms

Die Zunahme des Abscheidegrades mit steigendem Wasservolumenstrom ist klar zu erkennen. Es ergibt sich aus Gleichung (5-41) der zu erwartende exponentielle Anstieg. Um diesen Verlauf bei unterschiedlichen Gasvolumenströmen zu ermitteln, bedarf es eines höheren Aufwandes. Mit sich verändernden Gasvolumenstrom ändert sich auch die Geschwindigkeit u_1 mit der die Tropfen angeströmt werden. Dies hat wiederum Auswirkungen auf deren Bewegung. Zusätzlich verändern sich verschiedene Faktoren innerhalb der Berechnung, wie zum Beispiel $|\vec{w}_{rel}|$. Deswegen wurde in dieser Arbeit mit einem konstant bleibendem Luftvolumenstrom von V_G = 168; 75 m^3/h, der einer Luftwechselzahl von L = 25 h^{-1} entspricht, gerechnet. Die in Abbildung (5-164) angegebenen Abscheidegrade gelten nur für eine Partikelgröße von d_p = 5µm und d_P = 10µm. Wie in [42] experimentell ermittelt, werden Tropfen kleiner 10 µm nicht stark ausgebildet. Besonders bei höheren Wasservolumenströmen ist ihr Anteil gering. Sie haben daher einen geringen Einfluss auf den Abscheidegrad des gesamten Sprühs, wodurch ihre Reinigungswirkung durchaus vernachlässigt werden kann.

5.3.2.6 Maßnahmen zur Erhöhung des spezifischen Reinigungsvolumens m

Aus Gleichungen (5-37)können Maßnahmen gezogen werden, um m und somit den Abscheidegrad zu verbessern. Da ein Maximum des Abscheidegrades T(d_P) bei einer Tropfengröße von 4 µm liegt, führt eine Verringerung des Tropfendurchmessers, bis zu dieser Tropfengröße, zu einer Steigerung von m. Dies wurde schon im Kapitel 5.3.2.5 gezeigt. Die erzielbare Tropfengröße hängt von den Eigenschaften und den Betriebsparametern (Wasservolumenstrom, Druck der Düsendruckluft) der Düse ab. Aus den Gleichungen (5-37), (5-34) und (5-33) kann geschlossen werden, dass eine Erhöhung der Relativgeschwindigkeit ebenfalls m und damit den Abscheidegrad erhöhen kann. Die Relativgeschwindigkeit kann dabei mit folgenden Maßnahmen verändert werden:

- Veränderung des Anströmwinkels δ
- Variieren des Wasservolumenstroms, um die Tropfenaustrittsgeschwindigkeit zu erhöhen
- Erhöhen der Querströmungsgeschwindigkeit u_∞

Diese drei Varianten sollen nun im Folgenden näher untersucht werden. Wie in [42] gezeigt liegt $x_{50;3}$ der Tropfengrößenverteilung bei 20 µm. Deswegen werden diese Betrachtungen nur für eine Tropfengröße von d_{Tr} = 20 µm betrachtet. Um die Abscheidegrade zu erhalten, wurde ein Wasservolumenstrom von V_W = 2 L/h und eine Luftwechselzahl von L = 25 h^{-1} eingesetzt. Das Einsetzen zu hoher Wasservolumenströme würde zu hohe Abscheidegrade ergeben und man könnte keinen Trend mehr erkennen.

5.3.2.6.1 Veränderung des Anströmwinkels δ

Eine Möglichkeit um $|\vec{w}_{rel}|$ zu erhöhen, wäre eine Gegenströmung von partikelbeladener Luft und Zweiphasensprüh anzustreben. Dazu wurde der Winkel, unter dem der Sprüh angeströmt wird, verändert siehe Abbildung 5-165.

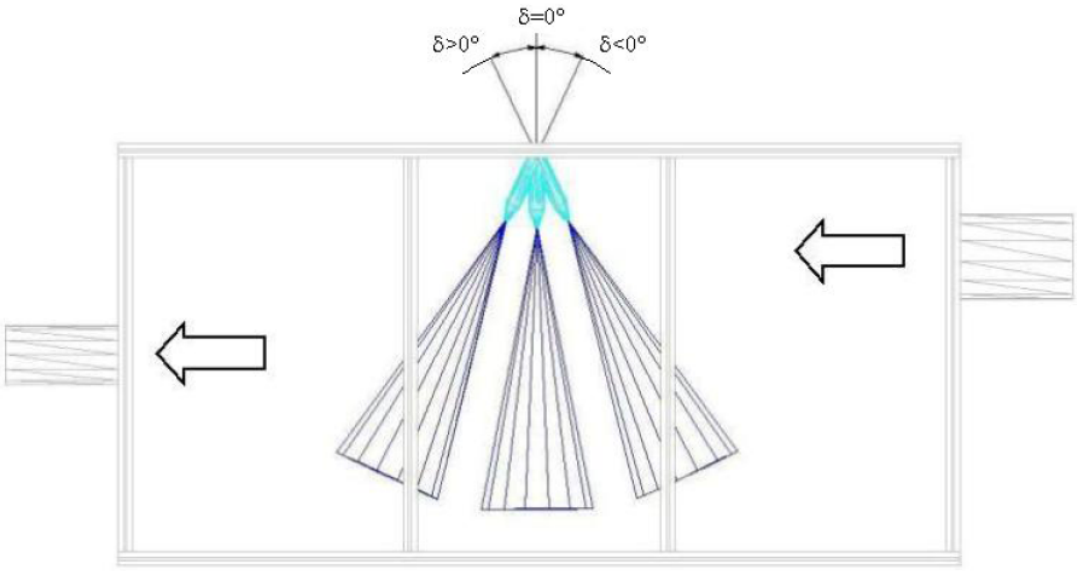


Abbildung 5-165: Änderung des Düsenwinkels δ

Abbildung 5-166 zeigt die Bewegung eines Tropfens bei Gegenstromanordnung, die mit dem verwendeten Modell erhalten wird. Da das Strömungsfeld außerhalb des Sprühkegels weitestgehend nicht abschätzbar ist, wurde das spezifische Reinigungsvolumen nur bis zu jenem Punkt ermittelt, an der die Relativgeschwindigkeit ein Minimum annimmt. Ab diesem Punkt kehrt der Tropfen um und wird von der anströmenden Luft mitgenommen. In diesem Bereich ist die Relativgeschwindigkeit sehr gering und führt nur zu einer geringen Erhöhung von m.

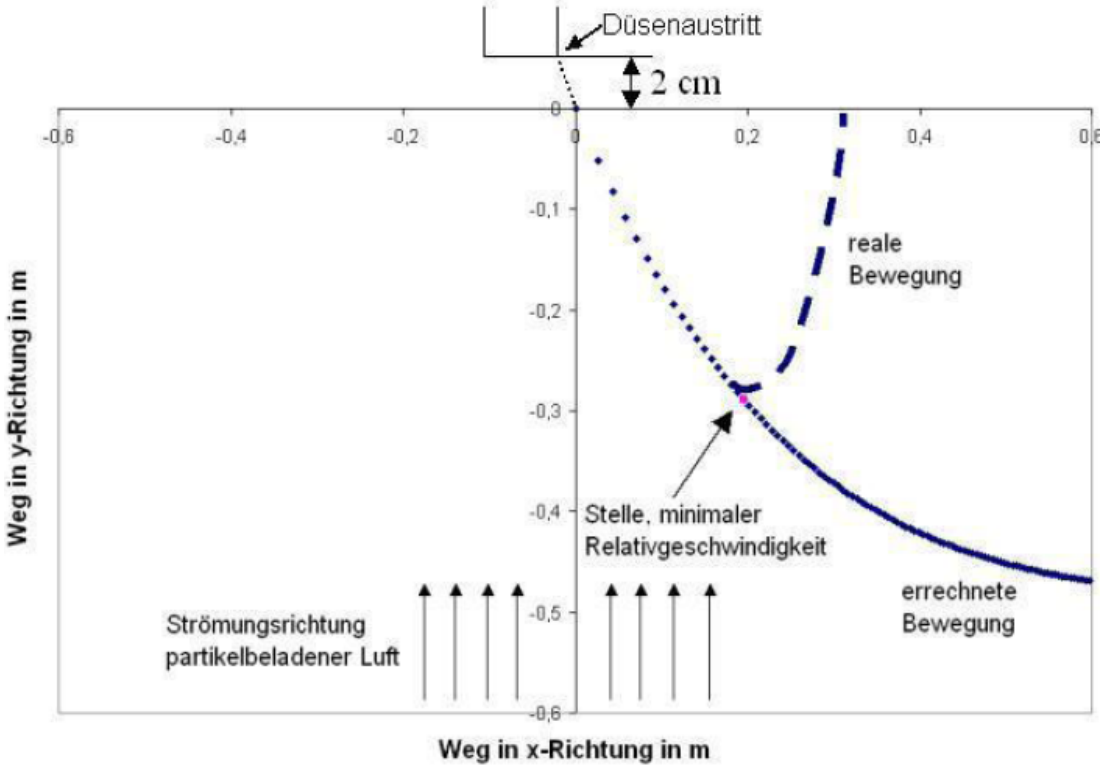


Abbildung 5-166: Tropfenbewegung bei Gegenstromanordnung

Im Folgenden wird das Ergebnis dieser Untersuchung im Detail gezwigt. Dabei gilt für den Winkel δ:

Die folgenden Abbildungen sollen zur besseren Vorstellung dienen.

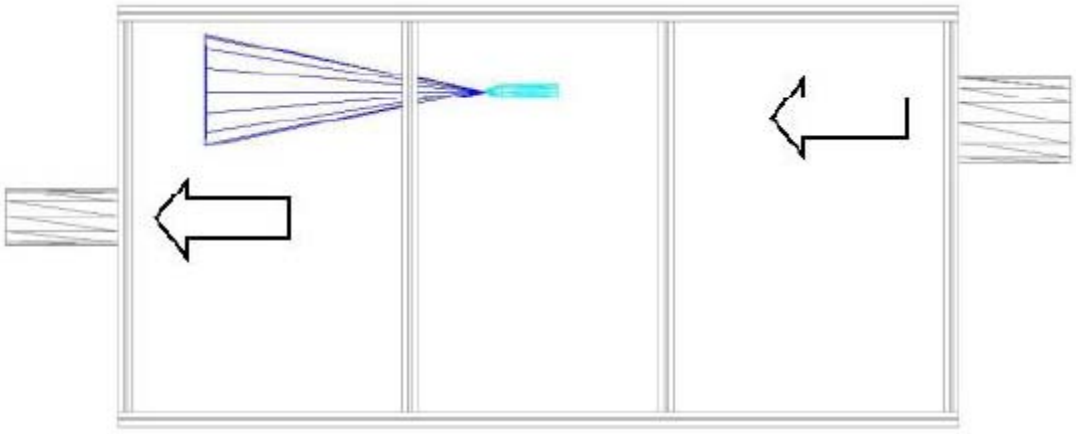


Abbildung 5-167: Düsenwinkel δ = -90°: Gleichstrom

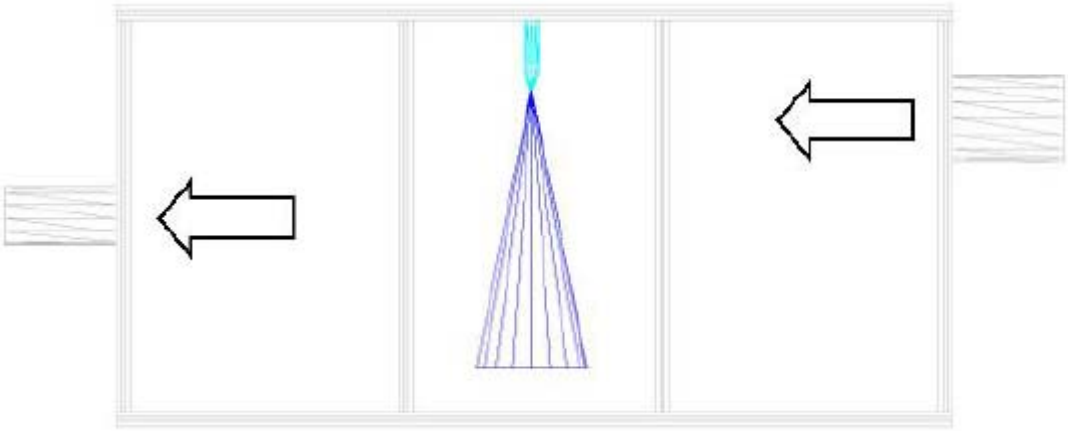


Abbildung 5-168: Düsenwinkel δ = 0°: Querstrom

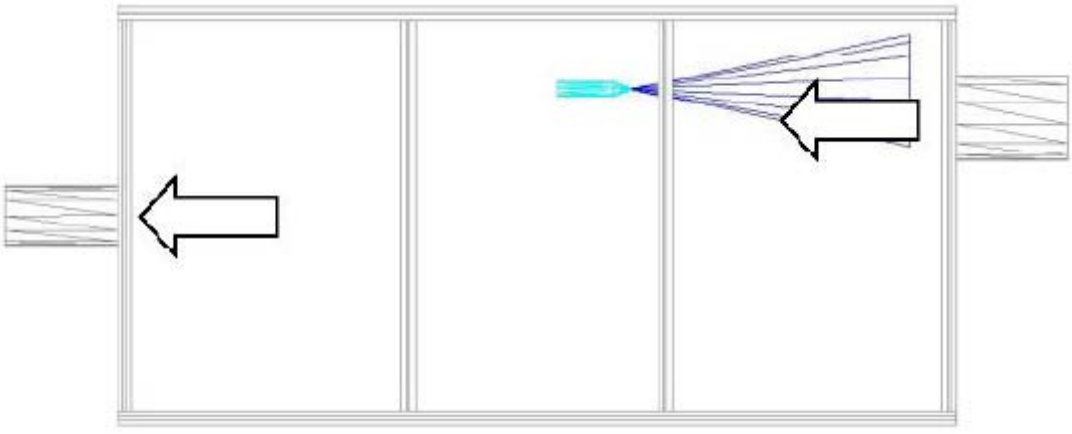


Abbildung 5-169: Düsenwinkel δ = 90°: Gegenstrom

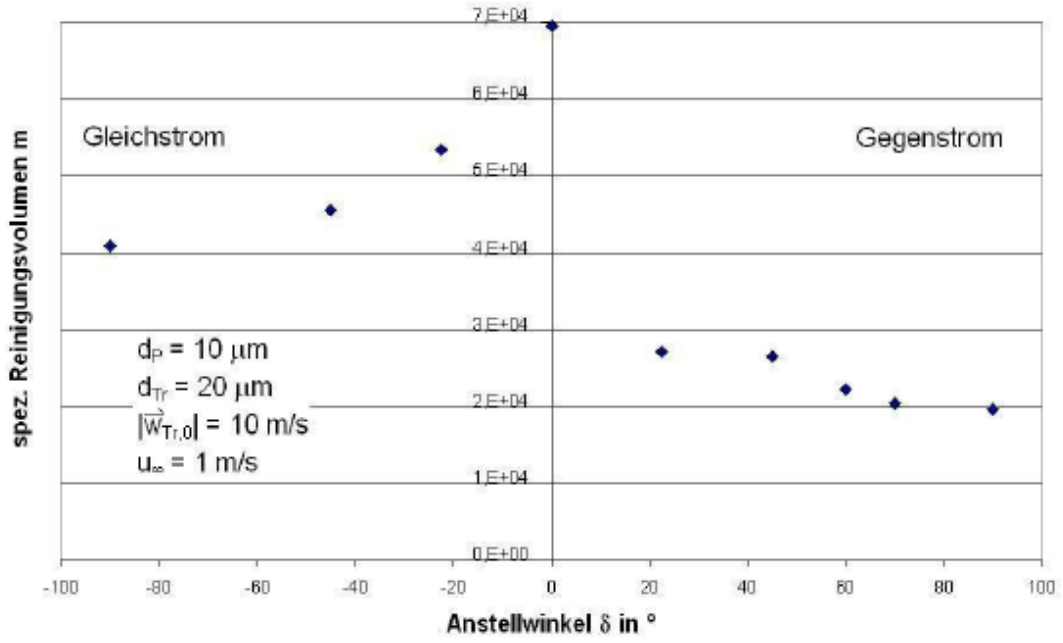


Abbildung 5-170: spezifisches Reinigungsvolumen als Funktion des Anstellwinkels

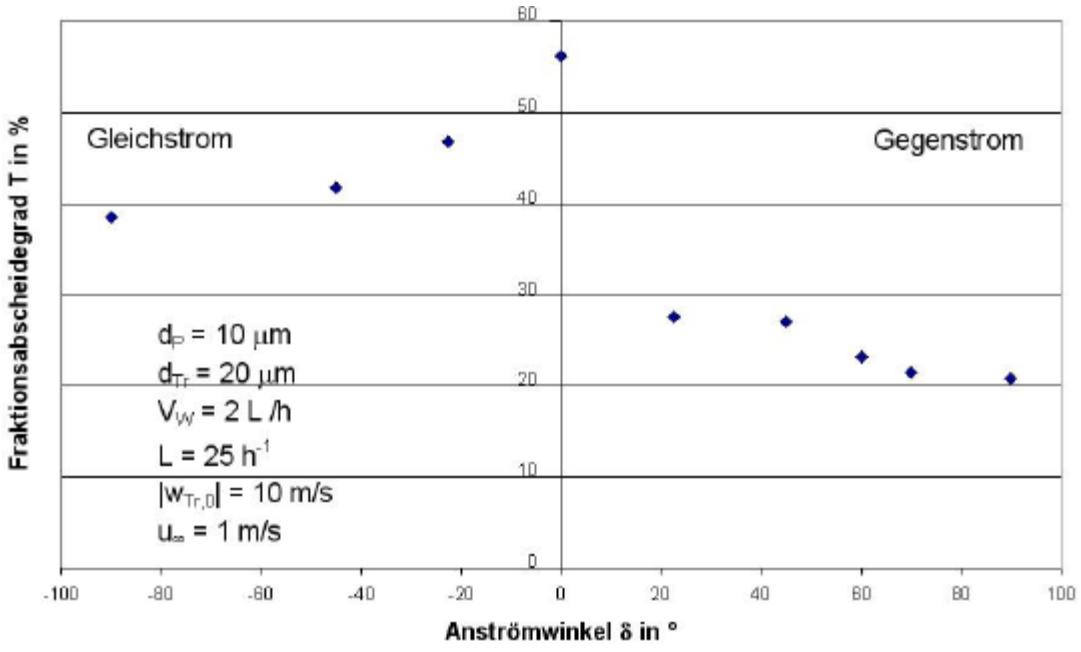


Abbildung 5-171: Fraktionsabscheidegrad als Funktion des Anstellwinkels

Es zeigt sich, dass ausgehend von einer Gleichstromanordnung (δ =-90°) ein schräg Anstellen der Düse den Abscheidegrad erhöht. Beim Übergang in eine Gegenstromanordnung nimmt hingegen die Reinigungswirkung ab. Die Werte der spezifischen Reinigungsvolumina zwischen Querstrom- und Gegenstromanordnung unterscheiden sich um den Faktor 2 bis 3. Es ist wahrscheinlich, dass auf Grund der stärkeren Abbremsung der Tropfen bei der Gegenstromanordnung eine hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und anströmender Luft nur für geringe Zeit vorhanden ist. Dadurch lassen sich nur geringe m-Werte erreichen. Resultierend kann daraus geschlossen werden, dass eine Querstromanordnung durchaus optimal ist. Ein schräges Anstellen der Düse, um bei einer Gegenstromanordnung, durch Erreichen höherer Relativgeschwindigkeiten, eine Verbesserung des

Abscheidegrades zu erzielen, kann damit nicht nachgewiesen werden. In [85] wurde dieses Ergebnis auch experimentell erhalten.

5.3.2.6.2 Erhöhung der Querströmungsgeschwindigkeit

Die Partikel bewegen sich mit derselben Geschwindigkeit wie die quer anströmende Luft. Aus Gleichung (2.38) kann daraus geschlossen werden, dass ein Erhöhen von u_1 auch die Relativgeschwindigkeit erhöht. Dies würde auch zu höheren m-Werten und Abscheidegrade führen. In Kapitel (5.3.2.4) hat sich herausgestellt, dass eine Querstromanordnung optimal ist. Deswegen soll der Einfluss des Veränderns von u_1 für diese Anordnung untersucht werden. Durch Verändern der Querströmungsgeschwindigkeit u_1 ändert sich auch die Flugbahn der Tropfen. Dies ist in Abbildung (5-172) dargestellt.

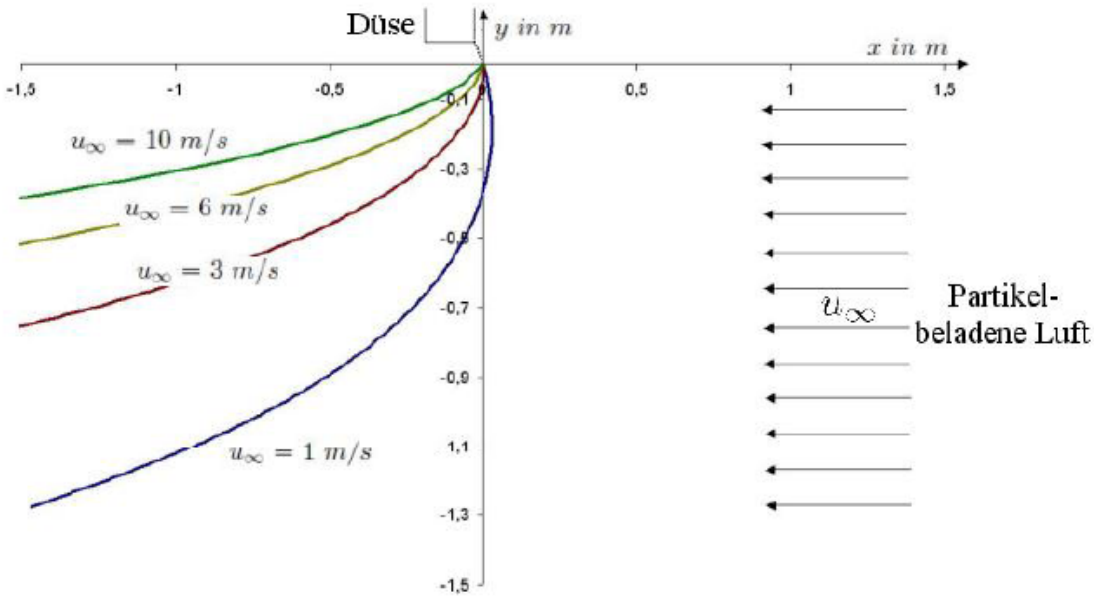


Abbildung 5-172: Veränderung der Flugbahn der Wassertropfen bei unterschiedlichen Querströmungsgeschwindigkeiten

Das erhaltene Ergebnis für die Abscheidegrade ist in Abbildung (5-173) dargestellt.

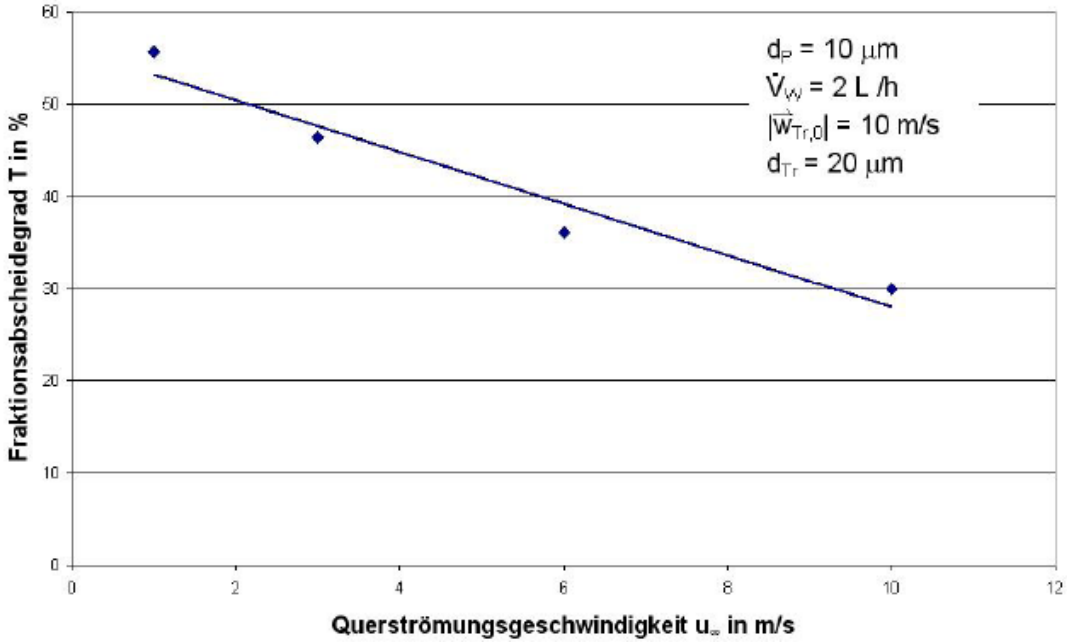


Abbildung 5-173: Abscheidegrad als Funktion der Querströmungsgeschwindigkeit

Durch Erhöhen der Querströmungsgeschwindigkeit steigt zwar die Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Partikeln, allerdings werden die Tropfen schneller von der Querströmung mitgerissen. In Summe führt dies zu einer Verringerung des Abscheidegrades. Dadurch kann die Aussage getroffen werden, dass beim Staubabscheiden mittels Zweiphasensprüh darauf zu achten ist, dass die Strömungsgeschwindigkeit der partikelbeladenen Luft nicht zu hohe Werte annehmen darf.

5.3.2.6.3 Variation des Wasservolumenstroms

Die Vermutung besteht darin, dass durch Erhöhen des Wasservolumenstroms die Austrittsgeschwindigkeit der Wassertropfen erhöht werden kann. Damit könnte die Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Partikel beeinflusst werden. Friedel und Al Rabadi [83] geben in ihrer Veröffentlichung eine Formel zur Bestimmung der Austrittsgeschwindigkeit einer Zweiphasenströmung aus einer Düse an.

$$u_{Nozzle} = \frac{\dot{M}_{Total(Nozzle)}}{\rho_{Nozzle} \cdot A_{Nozzle}} \tag{5-43}$$

Da es sich um ein Zweiphasengemisch handelt, geht der Wasservolumenstrom in den gesamten durch die Düse austretenden Massenstrom $M_{Total(Nozzle)}$, sowie in die Dichte ρ_{Nozzle} ein. Folgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit der Austrittsgeschwindigkeit von dem Wasservolumenstrom bei konstantem Luftvolumenstrom.

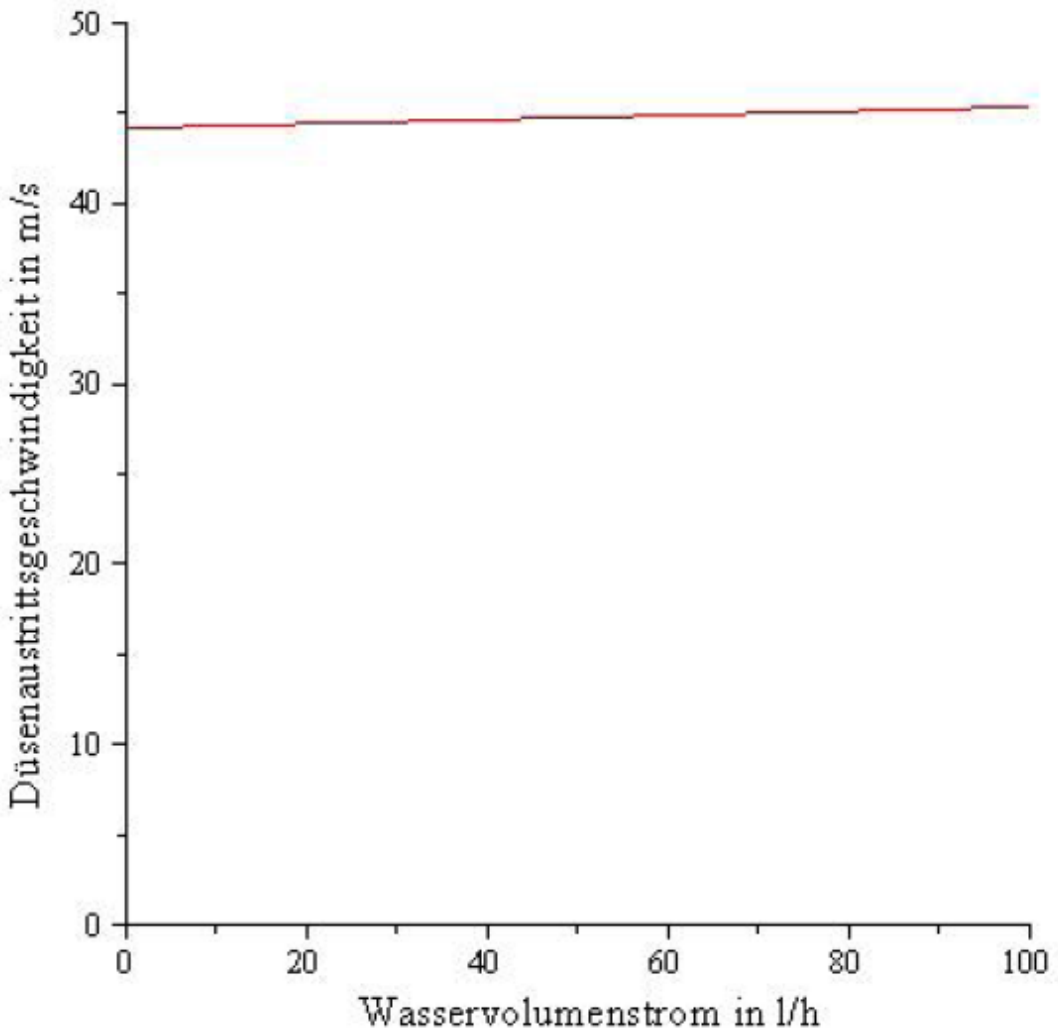


Abbildung. 5-174: Düsenaustrittsgeschwindigkeit als Funktion des eingedüsten Wasservolumenstroms

Der Anstieg ist nahezu linear. Die Steigung dieser Geraden ist sehr gering. Daraus kann geschlossen werden, dass eine Veränderung des Wasservolumenstroms kaum Auswirkungen auf die Düsenaustrittsgeschwindigkeit hat. Die Vermutung, dass damit die Relativgeschwindigkeit erhöht werden kann, kann somit nicht bestätigt werden. Hätte eine Erhöhung des Wasservolumenstroms eine Steigerung der Düsenaustrittsgeschwindigkeit zur Folge, müsste das in Abbildung (5-166) erhaltene Ergebnis neu überarbeitet werden. Vielmehr kann mit dem hier erhaltenem Resultat, die getroffene Annahme einer konstant bleibenden Düsenaustrittsgeschwindigkeit der Wassertropfen untermauert werden.

5.3.2.7 Berechnung der Partikelflugbahnen

Generell ist die Bewegung der Partikel von Interesse. Es stellt sich die Frage, ob unter den gegebenen Bedingungen Partikel überhaupt in den Freistrahl eindringen können, um mit den Wassertropfen in Kontakt zu geraten. Bis dato wurde davon ausgegangen, dass die Partikel unbeeinflusst von den Tropfen und der Druckluft aus der Düse sich gerade aus bewegen. Dies gilt zumindest außerhalb des Sprühkegels bei angenommener Parallelströmung der Luft. Es wurde, genau wie bei der Betrachtung eines Wassertropfens in Abschnitt (5.3.2.3.2), mittels des

Schwerpunktsatzes die Bewegung der Partikel errechnet. Das Partikel wird dabei innerhalb des Sprühkegels von denselben Strömungen wie ein Tropfen umgeben. Auf der einen Seite ist dies die Druckluft aus der Düse, deren Geschwindigkeit v_L von der Stelle abhängt an der das Partikel in den Sprühkegel eindringt und die Querströmung mit der Geschwindigkeit u_1. Abbildung 5-175 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung. In rosa ist eine Grenze des Freistrahls dargestellt, die aus der Bewegung eines Wassertropfens erhalten wurde. In schwarz ist die
Bewegung der Partikeln dargestellt. Unter den Annahmen, dass

- außerhalb des Freistrahls reine Parallelströmung vorliegt
- auf die Partikel erst nach dieser Grenze die Druckluft der Düse auf sie einwirkt
- der Winkel α, unter der vL auf die Partikel einwirkt, sich verändert

wurde diese Bewegung erhalten. Wie aus diesen Annahmen hervorgeht, wird davon ausgegangen, dass auf die Partikel schlagartig eine zusätzliche Kraft, hervorgerufen durch v_L, einwirkt, wenn sich diese auf der aktiven Grenze befinden. Dies ist natürlich nicht praxisnahe, aber es erlaubt schnell und ohne zusätzlichen Aufwand die Bewegung der Partikel abschätzen zu können. Aus Abbildung 5-175 kann geschlossen werden, dass Partikel vermutlich nicht weit in den Freistrahl eindringen können. Wie weit diese eindringen hängt von der Ortskoordinate des Partikels ab.

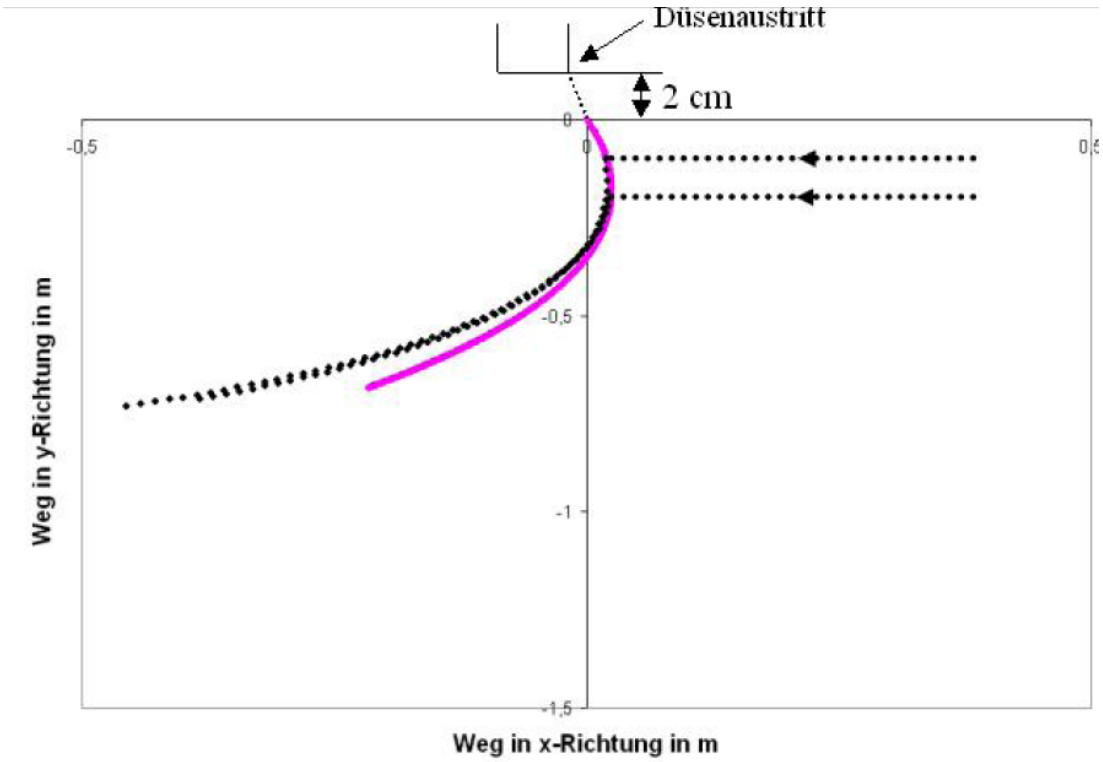


Abbildung 5-175: Bewegung von dp = 10µm großen Partikeln

5.3.2.8 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse des Abscheidegrades bei sekundärer Staubabscheidung

Das Barth/Löffler/Schuch-Modell eignet sich durchaus, um die gestellte Problemstellung zu lösen. Die optimale Tropfengröße liegt bei den betrachteten Bedingungen (Querströmung, Tropfenanfangsgeschwindigkeit) und je Partikelgröße (5 oder 10 µm) bei etwa 4 µm. Bei der betrachteten Querströmung sinkt, unter den getroffenen Annahmen, ab einer Tropfengröße von 4 µm die luftreinigende Wirkung mit zunehmendem Tropfendurchmesser. Es stellte sich heraus, dass eine Querstromanordnung von Düse und Strömungsrichtung der partikelbeladenen Luft unter den gewählten Bedingungen optimal für die Abscheidung ist. Dies konnte auch experimentell bestätigt werden siehe Kapitel 5.2. Ein Erhöhen der Strömungsgeschwindigkeit der partikelbeladenen Luft senkt bei dieser Anordnung den Abscheidegrad. Es stellte sich heraus, dass die Austrittsgeschwindigkeit der Wassertropfen aus der Düse unabhängig vom Wasservolumensrom ist und somit höhere Abscheidegrade bei höheren Wasservolumenströmen auf die erhöhte Tropfenanzahl zurückzuführen ist. Die Eindringtiefe der Partikel in den Freistrahl ist gering und hängt von der Ortskoordinate der Partikel ab.

6 Vergleich der Staubabscheideeffektivitäten

Diffuse Staubemissionen, welche bei bewegten Schüttgütern entstehen, können ebenfalls durch Wasserbedüsung reduziert werden z.B. bei Förderbandübergabestellen. Der dabei entstehende Minderungseffekt setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Zuerst erfolgt eine Benetzung des Schüttgutes, die die Staubemission, welche ohne Benetzung entstehen würde, teilweise verhindert (=primärer Staubminderungseffekt). Danach wird die trotzdem noch entstandene Staubemission durch den verbleibenden Tropfenspray niedergenebelt (=sekundärer Staubminderungseffekt). Diese zwei Staubminderungseffekte laufen ab wie bei 2 Separatoren die in Serie geschaltet sind. Die primäre und sekundäre Staubabscheideeffektivität eines Wassersprays bei Förderbandübergabestellen wurde in Kap.4 und 5 eingehend studiert. Die primäre und sekundäre Staubabscheideeffektivität sind mit der Gesamtabscheideeffektifität über Gleichung 2-2. wie zwei Separatoren welche in Serie geschalten sind verknüpft.

Um die Abscheidung diffuser Staubemissionen zu untersuchen, wurden am Institut für Verfahrenstechnik in der Arbeitsgruppe (Luftreinhaltetechnik) der TU Wien bzw. in Kooperation an der Shandong Jianzhu Universität in Jinan in der Volksrepublik China bereits experimentelle Bestimmungen der Gesamtstaubabscheideeffektivität η_{tot} an einer eigens konzipierten Prüfapparatur welche eine Förderbandübergabestelle beinhaltet durchgeführt. So wurde z.B. in [42] die Reduktion der Staubentstehung beim Abwurf von Schüttgütern von Förderbändern durch das Versprühen von Wasser mittels Zweistoffdüsen untersucht.

Es soll nun ein Vergleich der primären und sekundären Staubabscheideeffektivität erfolgen um die Wirksamkeit eines Wasserspraysystems bei eruierter Gesamtstaubabscheideeffektivität beurteilen zu können. Da jedoch die Wassermenge welche die Staubabscheideeffektivität η_1 , η_2 oder η_{tot} bewirkt wegen Verdampfungseffekten nicht der Wassermenge des versprühten Wassers entspricht muss für einen Vergleich der Staubabscheideeffektivitäten die Verdampfung der Tropfen berücksichtigt werden. Vor allem bei kleinen Wassermengen und kleinen Tropfen (was bei einer Ultraschall Zweistoff-Resonanzdüse der Fall ist) bzw. heißen Schüttgütern spielt die Verdampfung eine erhebliche Rolle. Daher wurde im Folgenden eine Berechnung eines effektieven Wasservoluemnstroms erarbeitet welche die Wassermenge darstellt die tatsächlich staubabscheidend wirksam ist.

6.1 Ableitung eines effektiven Wasservolumenstromes unter Berücksichtigung der Verdampfung

Wird aus Luft, mittels Wassersprüh, Staub abgeschieden, so verdunstet im Allgemeinen, sofern die Luft nicht 100% relative Luftfeuchtigkeit aufweist, ein Teil des gesprühten Wassers. Wie in 5.2 gezeigt, wird umso mehr Staub abgeschieden je mehr Wasser für die Abscheidung zur Verfügung steht. Es ist nun ein weiteres Ziel, Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung zu stellen, mit welchen der Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit des Trägerluftstromes quantitativ beschrieben werden kann und damit die abscheidende Wirkung des Sprühs getrennt von den vorherrschenden Luftbedingungen betrachtet werden kann.

6.1.1 Wasserverlust durch Verdunstung

Wird aus Luft, mittels Wassersprüh, Staub abgeschieden, so verdunstet im Allgemeinen, sofern die Luft nicht 100%relative Luftfeuchtigkeit aufweist, ein Teil des gesprühten Wassers. Wie in 5.2 gezeigt, wird umso mehr Staub abgeschieden, je mehr Wasser für die Abscheidung zur Verfügung steht. Verdunstet nun ein Teil des gesprühten Wassers, im schlechtesten Fall bis zu 100%, so steht dieses Wasser nicht mehr zur Abscheidung zur Verfügung. Im Weiteren soll diskutiert werden, wie die verdunstete Wassermenge bei Betrieb der Apparatur ermittelt werden kann und im Folgenden soll eine Abschätzung der maximal zu erwartenden verdunstenden Wassermenge gemacht werden. Ziel soll es sein, bei späteren Versuchen einen Zusammenhang zwischen verdunstender und maximal möglicher verdunstender Wassermenge zu finden.

6.1.2 Berechnung der verdunsteten Wassermenge im Betrieb

Die Apparatur erlaubt es folgende Größen zu bestimmen:

T_E	$°C$	Lufttemperatur am Eingang
P_E	Pa	Luftdruck am Eingang
φ_E		Relative Luftfeuchtigkeit am Eingang
T_A	$°C$	Lufttemperatur am Ausgang
P_A	Pa	Luftdruck am Ausgang
φ_A		Relative Luftfeuchtigkeit am Ausgang
T_W	$°C$	Wassertemperatur des Sprühs
$\dot{V}_{L,E}$	m^3/s	Volumenstrom an feuchter Luft am Eingang

Weiter können nach [86] folgende Stoffwerte für Wasser und Luft im Bereich von 0°*C* bis 70°*C* ohne größere Fehler als konstant angenommen werden.

P_{TR}	$611,657$	Pa	Trippelpunktsdruck
T_{TR}	$0,01$	$°C$	Trippelpunktstemperatur
$\Delta hv(T_{TR})$	2500900	J/kg	Spezifische Verdampfungsenthalpie bei Trippelpunktstemperatur
cp_L	$1004,6$	$J/(kg*K)$	spezifische isobare Wärmekapazität der Luft
cp_D	1863	$J/(kg*K)$	spezifische isobare Wärmekapazität des Wasserdampfes
cp_W	4191	$J/(kg*K)$	spezifische Wärmekapazität des Wassers
R_L	$287,05$	$J/(kg*K)$	Gaskonstante der Luft
R_W	$287,05$	$J/(kg*K)$	Gaskonstante des Wasserdampfes

Wenn die oben genannten Werte bekannt sind, lässt sich der Sättigungsdampfdruck als Funktion der Temperatur, nach [86] wie folgt berechnen.

$$p_{sw}(T) = 1000\, P_{TR}\, e^{17.2799 - 4102.99\,(T+237.431)^{-1}} \tag{6-1}$$

$p_{sw}(T)$	Pa	Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit der Temperatur
T	$°C$	Temperatur

Mit 6-1 kann nun die Wasserbeladung *Xi* der Luft in Abhängigkeit von Temperatur, Luftdruck und relativer Feuchte berechnet werden [86].

$$X_i\left(T_i,\varphi_i,P_i\right)=R_L\,p_{sw}\left(T_i\right)R_W{}^{-1}\left(\frac{P_i}{\varphi_{\,i}}-p_{sw}\left(T_i\right)\right)^{-1} \tag{6-2}$$

i		Index,wobei $_E$ für Eingang und $_A$ für Ausgang steht
X_A	$kg_{wasser}/kg_{trockeneLuft}$	Wasserbeladung am Ausgang
X_E	$kg_{wasser}/kg_{trockeneLuft}$	Wasserbeladung am Eingang

Die Differenz aus den Wasserbeladungen am Ein- und Ausgang ergibt nun jene spezifische Wassermenge die pro kg trockener Luft, die durch die Apparatur strömt, verdunstet.

$$q=X_A-X_E \tag{6-3}$$

q	$kg_{wasser}/kg_{trockeneLuft}$	spezifische verdunstete Wassermenge pro kg trockener Luft

Um nun den tatsächlichen Wassermassenstrom der pro Sekunde verdunstet zu bestimmen, muss der Volumenstrom an trockener Luft, der durch die Apparatur strömt, bekannt sein. Nach [86] berechnet sich das spezifische Volumen der feuchten Luft nach 6-4.

$$v^*{}_E\left(T_E,\varphi_E,P_E\right)=\frac{R_L\left(T_E+273.15\right)}{P_E-\varphi_E p_{sw}\left(T_E\right)} \tag{6-4}$$

$v^*{}_E$	$m^3{}_{feuchteLuft}/kg_{trockeneLuft}$	spezifisches Volumen der feuchten Luft am Eingang

Mit dem spezifischen Volumen der feuchten Luft v^*_E und dem Volumenstrom an feuchter Luft $\dot{V}_{L,E,}$ ergibt sich ein Massenstrom an trockener Luft, der im stationären Zustand am Ein- und Ausgang Gleichung 6-5 sein muss.

$$\dot{m}_{tL}=\dot{V}_{L,E}/v^*{}_E \tag{6-5}$$

$\dot{m}_{tL}$	$kg_{trockeneLuft}/s$	Massenstrom an trockener Luft der durch die Apparatur strömt

Die pro Sekunde verdunstete Wassermenge errechnet sich nun wie folgt.

$$Q=\dot{m}_{tL}*q \tag{6-6}$$

Q	kg_{wasser}/s	verdunstete Wassermenge pro Sekunde

Um nun während den Messungen schneller die gewünschte Größenordnung für den einzustellenden
Wasservolumenstrom zu erhalten, werden die Zusammenhänge für v^*_E und für X explizit ausgedrückt, obige Stoffwerte eingesetzt und grafisch dargestellt. Siehe Abbildungen 6.1 bis 6.3.

$$X=380.43\,e^{17.2799-4102.99\,(T+237.231)^{-1}}\left(\frac{P}{\varphi}-611.657\,e^{17.2799-4102.99\,(T+237.231)^{-1}}\right)^{-1} \tag{6-7}$$

$$v^* = 287.05\ (T + 273.15)\left(P - 611.657\,\varphi e^{17.2799 - 4102.99\,(T+237.231)^{-1}}\right)^{-1} \tag{6-8}$$

Wie in zuvor beschrieben, ist der Massenstrom an trockener Luft nur dann gleich bzw. annähernd gleich, wenn der Zweiphasensprüh mit wenig Druckluft, im Vergleich zum Trägergasstrom, betrieben wird. Andernfalls muss der Volumenstrom an trockener Luft, der durch die Düse in den Bilanzraum eintritt, zu jenem im Ausgang addiert werden. Mit verwendeter Apparatur müsste jedoch zusätzlich die Feuchte der hauseigenen Pressluft bestimmt und die Anlage modifiziert werden.

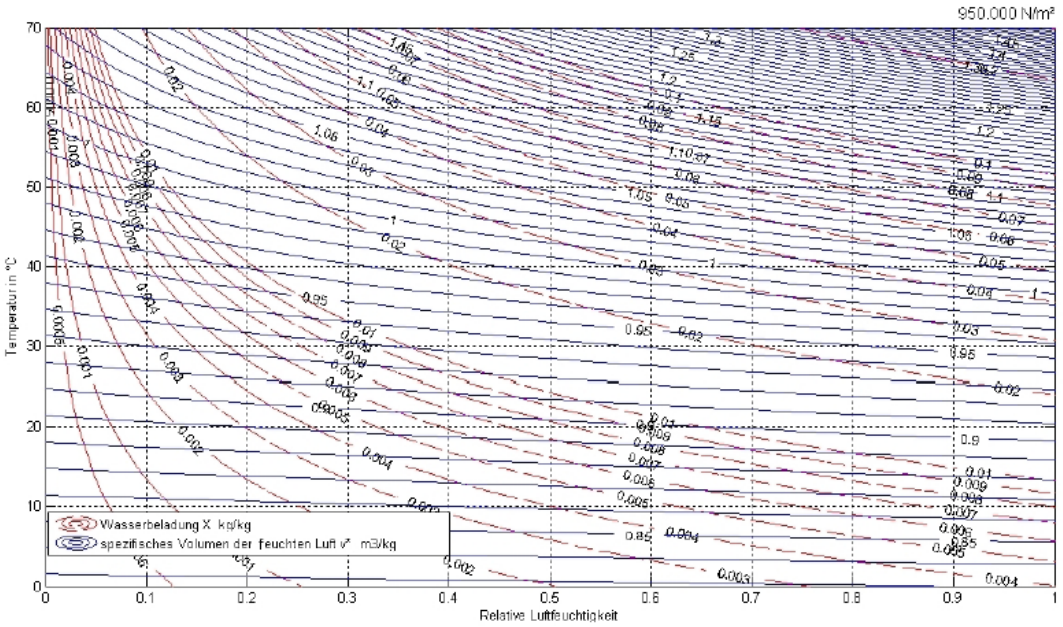


Abbildung 6.1: spezifisches Volumen der feuchten Luft v^*_E und Wasserbeladung *X* bei einem Druck von 95000*Pa* in Abhängigkeit der Temperatur *T* und der relativen Luftfeuchtigkeit

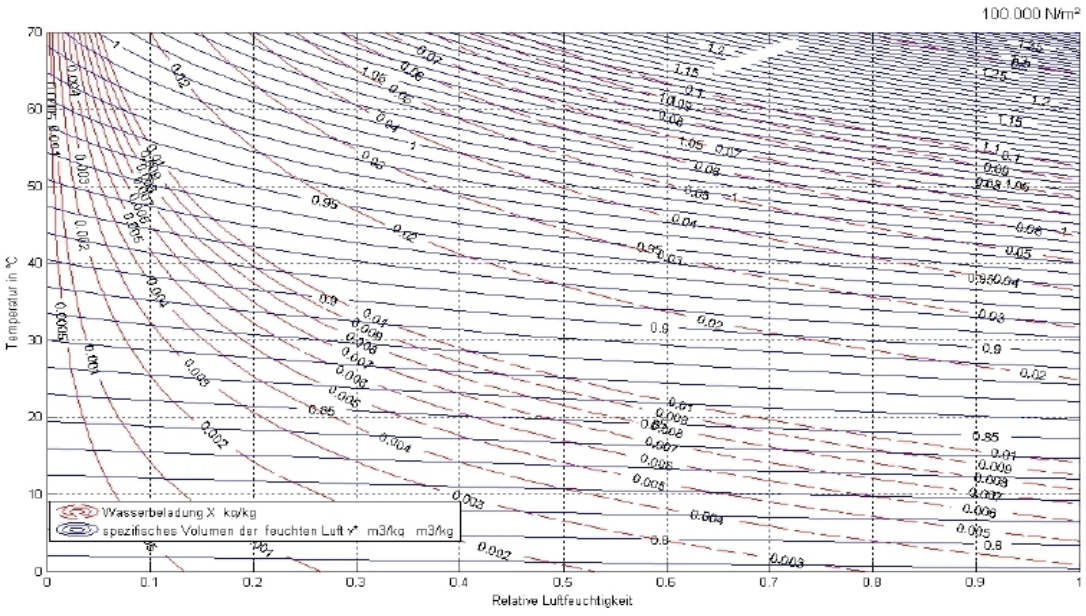


Abbildung 6.2: spezifisches Volumen der feuchten Luft v^*_E und Wasserbeladung *X* bei einem Druck von 100000*Pa* in Abhängigkeit der Temperatur *T* und der relativen Luftfeuchtigkeit

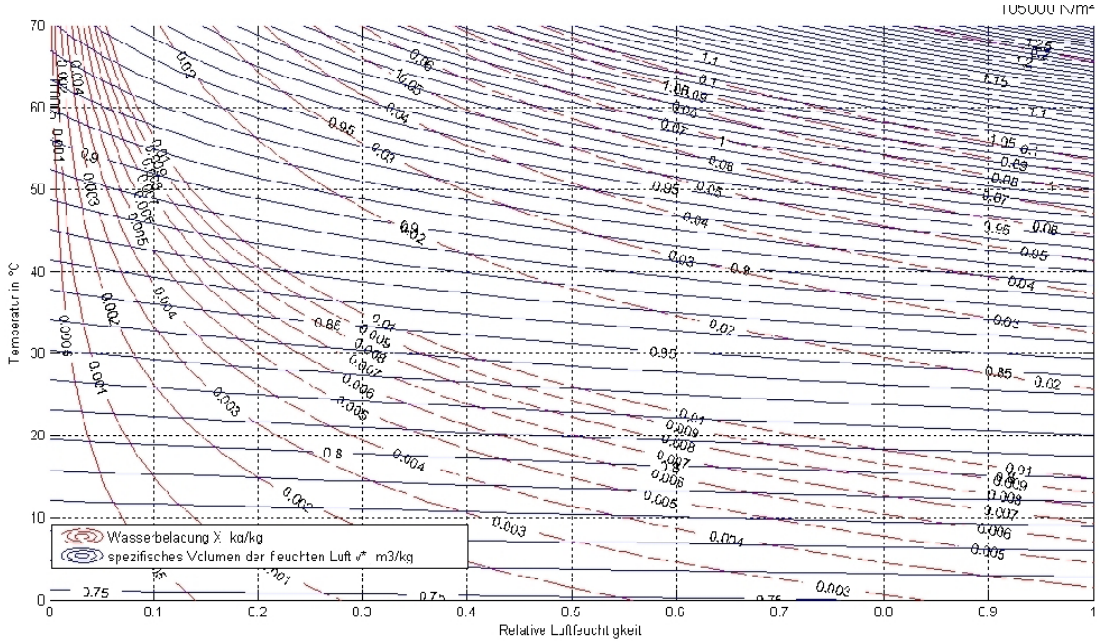


Abbildung 6.3: spezifisches Volumen der feuchten Luft v^*_E und Wasserbeladung *X* bei einem Druck von 105 000*Pa* in Abhängigkeit der Temperatur *T* und der relativen Luftfeuchtigkeit

6.1.2.1 Ablesebeispiel zur Ermittlung des verdampfenden Wasservolumenstromes bei Wassersprаysystemen

Folgendes Beispiel soll zeigen, wie nun mit den in Kapitel 6.1.2 entstandenen Diagrammen die verdunstete Wassermenge ermittelt werden kann. Mit der Strömungsgeschwindigkeit am Eingang, die mit dem Anemometer festgestellt wird und dem bekannten Rohrdurchmesser an der Messstelle, ergibt sich ein Volumenstrom an feuchter Luft von 2 m^3/s Die Außentemperatur soll 20 °*C*, der Luftdruck 100 000 N/m^2 und die relative Luftfeuchtigkeit der eintretenden Luft 20 % betragen. Der Druckverlust über die Abscheidekammer ist zu vernachlässigen. Am Ausgang soll eine Lufttemperatur von 15 °*C* und eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 % gemessen werden. Gesucht ist die pro Sekunde verdunstete Wassermenge.

T_E	20	$°C$	Lufttemperatur am Eingang
P_E	100000	Pa	Luftdruck am Eingang
φ_E	$0,2$		Relative Luftfeuchtigkeit am Eingang
T_A	15	$°C$	Lufttemperatur am Ausgang
P_A	100000	Pa	Luftdruck am Ausgang
φ_A	$0,5$		Relative Luftfeuchtigkeit am Ausgang
$\dot{V}_L$	2	m^3/s	Volumenstrom an feuchter Luft am Eingang

Daraus ergibt sich mit Abbildung 6-4

v^*_E	$0,845$	$m^3{}_{feuchteLuft}/kg_{trockeneLuft}$	spezifisches Volumen der feuchten Luft am Eingang
X_A	$0,0055$	$kg_{wasser}/kg_{trockeneLuft}$	Wasserbeladung am Ausgang
X_E	$0,003$	$kg_{wasser}/kg_{trockeneLuft}$	Wasserbeladung am Eingang

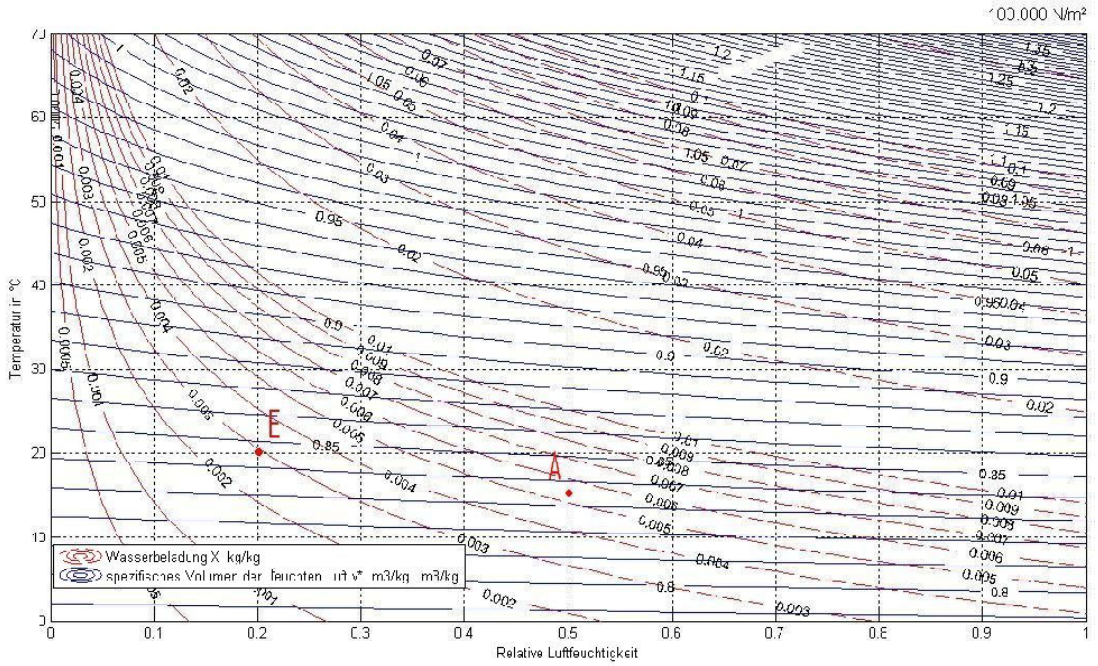


Abbildung 6-4: Spezifisches Volumen der feuchten Luft v^*_E und Wasserbeladung *X* bei einem Druck von 105000*Pa* in Abhängigkeit der Temperatur *T* und der relativen Luftfeuchtigkeit

'

Aus (6.3), (6.5) und (6.6) ergibt sich dann

$$\dot{m}_{tL} = \dot{V}_L / v^*_E = 2/0,845 = 2,367 kg_{trockeneLuft}/s \quad (6\text{-}9)$$

$$q = X_A - X_E = 0,0055 - 0,003 = 0,0025 kg_{wasser}/kg_{trockeneLuft} \quad (6\text{-}10)$$

$$Q = \dot{m}_{tL} * q = 0,0025 * 2,367 = 0,00592 kg_{Wasser}/s \quad (6\text{-}11)$$

$\dot{m}_{tL}$	$2,367$	$kg_{trockeneLuft}/s$	Massenstrom an trockener Luft der durch die Apparatur strömt
q	$0,0025$	$kg_{wasser}/kg_{trockeneLuft}$	verdunstete Wassermenge pro kg trockener Luft
Q	$5,92{*}10^{-3}$	kg_{Wasser}/s	verdunstete Wassermenge pro Sekunde

Es verdunsten also rund 6 g Wasser pro Sekunde.

6.1.3 Berechnung der maximal verdunstenden Wassermenge

Es stellt sich nun die Frage, wieviel Wasser kann maximal von der eintretenden Luft aufgenommen werden. Es werden zwei Bereiche unterschieden.

$$Bereich1 : 0 < m_w < q_s \tag{6-12}$$

$$Bereich2 : q_s < m_w < \infty \tag{6-13}$$

q_{max}	$kg_{wasser}/kg_{trockeneLuft}$	Menge Wasser, die pro kg trockener Rohgasluft maximal verdampfen kann
m_w	$kg_{wasser}/kg_{trockeneLuft}$	Menge Wasser, die mit dem Sprüh pro kg trockener Rohgasluft in die Abscheidekammer eingebracht wird
q_s	$kg_{wasser}/kg_{trockeneLuft}$	Menge Wasser, die zum Sättigen der Rohgasluft erforderlich ist, wenn q_s gleich m_w und T_E gleich T_W ist[2].
$X_{A,S}$	$kg_{wasser}/kg_{trockeneLuft}$	Wasserbeladung am Ausgang wenn die Luft gesättigt ist.

Weiters wird die Annahme getätigt, dass sich die Rohgasluft und das Wasser aus dem Sprüh optimal vermischen und genügend Zeit zur Verfügung steht um das thermodynamische Gleichgewicht zwischen feuchter Luft und Wasser aus dem Sprüh herzustellen.

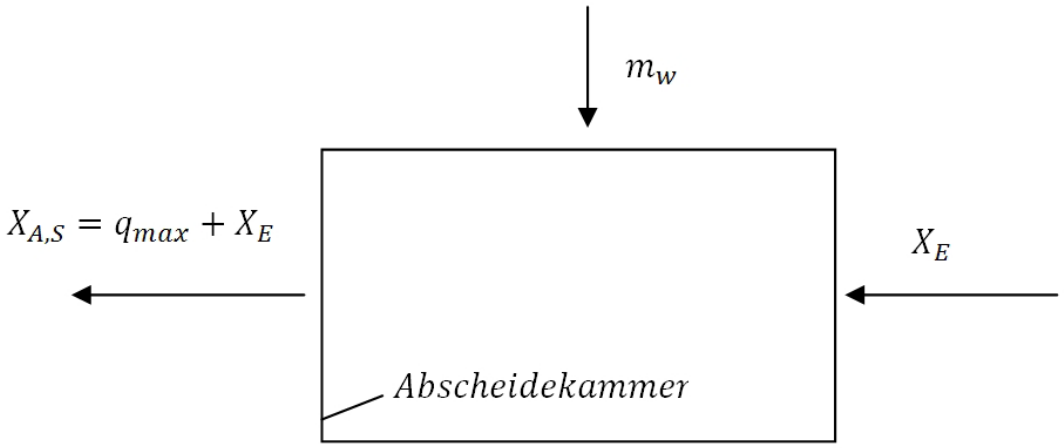


Abbildung 6-5: Ein- und austretende Wassermassen pro kg trockener Rohgasluft die durch die Abscheidekammer strömt

Bereich 1 Wird nun eine Wassermenge, die geringer ist als q_s , in die Abscheidekammer eingebracht, so wird nach den oben getroffenen Annahmen die gesamte Menge an Wasser verdunsten. Erst wenn m_w gleich q_s ist, wird die durchströmende Luft gesättigt sein. **Bereich 2** Ist nun m_w gleich q_s , ist die Luft am Ausgang gesättigt und eine Temperatur $T_{A,S}$ stellt sich ein. Wird nun m_w größer als q_s , so wird sich das nicht verdunstende Wasser mit der Temperatur T_W mit der Luft thermisch austauschen und die Luft erwärmen oder kühlen und damit die Aufnahmefähigkeit der Luft verändern. In Abbildung 6.6 können die Fälle I-III unterschieden werden. Zusätzlich können für den Punkt IV folgende Aussagen getroffen werden.

$T_{A,S}$ °C Lufttemperatur am Ausgang, wenn q_s gleich m_w

Die Annahme, dass T_E gleich T_W ist und die dadurch entstehenden Abweichungen, werden im Anschluß näher erläutert. Weiters wird der Druckverlust über den Abscheideraum vernachlässigt.

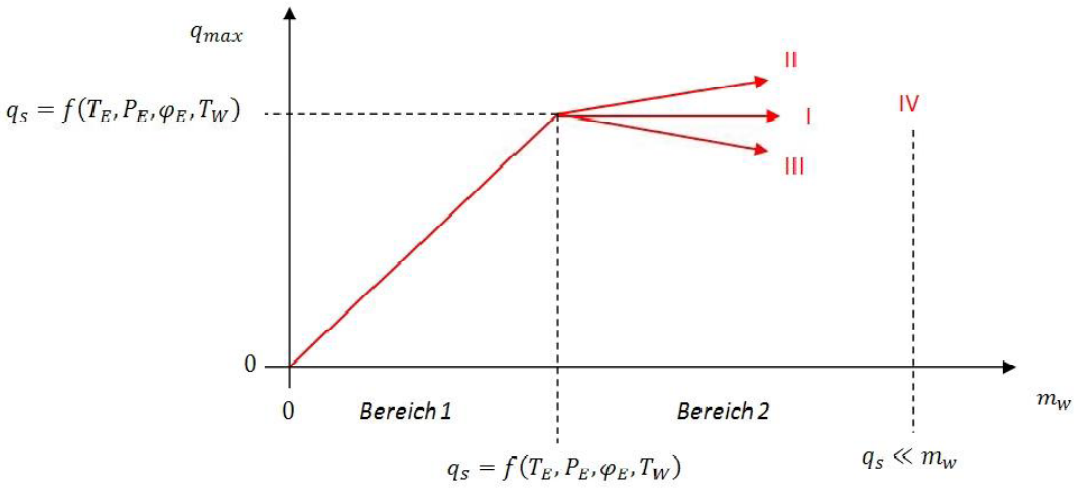


Abbildung 6.6: q_{max} in Abhängigkeit von m_w

I	$T_W = T_{A,S} \Rightarrow q_{max} = q_s$	Überschüssiges Wasser und Luft stehen im thermodynamischen Gleichgewicht
II	$T_W > T_{A,S} \Rightarrow q_{max} > q_s$	Überschüssiges Wasser erwärmt die Luft und es kann mehr Wasser aufgenommen werden
III	$T_W < T_{A,S} \Rightarrow q_{max} < q_s$	Überschüssiges Wasser kühlt die Luft und es kann weniger Wasser aufgenommen werden
IV	$q_s << m_w \Rightarrow T_{A,S} \rightarrow T_W$	Wird nun mit einem sehr großen Wasserüberschuss gearbeitet, so wird die Luft nahezu die Temperatur des Wassers aus der Düse annehmen und q_{max} kann wie in Kapitel 3.1 berechnet werden

6.1.3.1 Berechnung von q_s

Zur Berechnung von q_s wird die Abscheidekammer als Blackbox betrachtet. Siehe Abbildung 6.7.

$h_{A,L}(T_{A,S}, X_{A,S}, P_A)$	$J/kg_{trockeneLuft}$	spezifische Enthalpie der austretenden Luft
$h_{E,L}(T_E, X_E, P_E)$	$J/kg_{trockeneLuft}$	spezifische Enthalpie der eintretenden Luft
$h_W(T_W, q_s)$	$J/kg_{trockeneLuft}$	spezifische Enthalpie des durch die Düse eintretenden Wasservolumenstromes

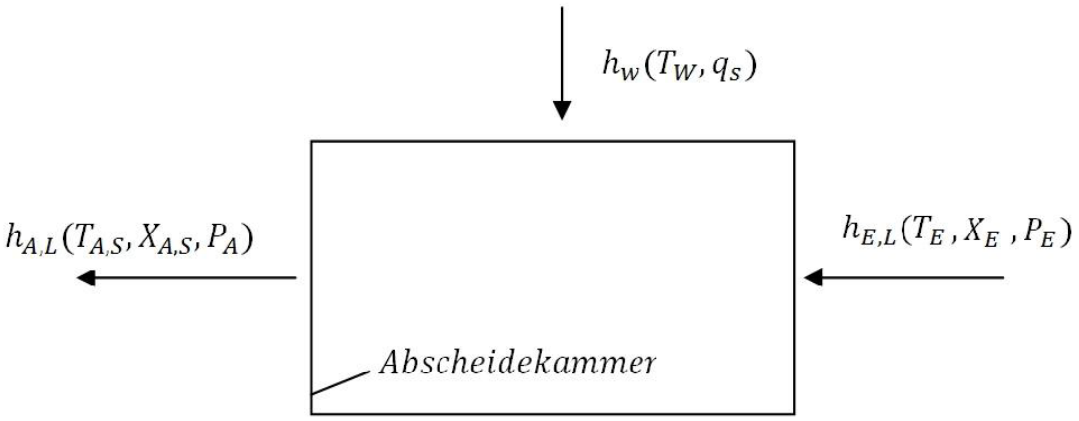


Abbildung 6-7: Enthalpieströme der Abscheidekammer

Nach [86] werden die oben genannten Enthalpien wie folgt berechnet.

$$h_{E,L}(T_E, X_E, P_E) = cp_L * (T_E - T_{TR}) + X_E[\Delta hv(T_T R) + cp_w(T_E - T_{TR})] \quad (6\text{-}14)$$

$$h_{A,L}(T_{A,S}, X_{A,S}, P_A) = cp_L * (T_{A,S} - T_{TR}) + X_{A,S}[\Delta hv(T_T R) + cp_w(T_{A,S} - T_{TR})] \quad (6\text{-}15)$$

$$h_W(T_W, q_s) = cp_w * q_s * (T_W - T_{TR}) \quad (6\text{-}16)$$

Weiter können nach Kapitel 6.1.2 folgende Zusammenhänge gefunden werden.

$$P_E = P_A \quad (6\text{-}17)$$

$$T_W = T_E \quad (6\text{-}18)$$

$$X_{A,S}(T_{A,S}, \varphi_A = 1, P_A) = (R_L/R_W) * p_{sw}(T_{A,S})/(P_A - p_{sw}(T_{A,S})) \quad (6\text{-}19)$$

$$X_E(T_E, \varphi_E, P_E) = (R_L/R_W) * p_{sw}(T_E)/(P_E/\varphi_E - p_{sw}(T_E)) \quad (6\text{-}20)$$

$$h_{A,L} = h_{E,L} + h_W \quad (6\text{-}21)$$

Da das Gleichungssystem bestehend aus den Gleichungen 6.14 bis 6.21 nicht symbolisch nach q_s aufgelöst werden kann, wird die Lösung für $q_s = f(T_E, \rho_E, P_E, T_W)$ numerisch ermittelt. Das Ergebnis wird in Abbildung 6-8 für einen Umgebungsdruck von 100 000 Pa dargestellt.

6.1.3.2 Abweichungen von qs wegen getätigter Annahmen

Dass die Annahme, die Wassertemperatur des Sprühs sei gleich der Lufttemperatur des Eintretenden Luftstromes, gerechtfertigt ist, da ein geringer bzw. abschätzbarer Fehler gemacht wird, soll im Folgenden gezeigt werden. Es wurde die numerische Auswertung aus Kapitel 3.3 für $q_s = f(T_E, \rho_E, P_E, T_W)$ erneut durchgeführt wobei einmal $T_W = T_{TR}$ und einmal $T_W = 70°C$ gesetzt wird. Die Ergebnisse wurden mit jenen aus Abbildung 6-8 verglichen und die Abweichungen in Abbildung 6-9 dargestellt. Die Annahme, dass über die Abscheidekammer kein Druckverlust verursacht wird, ist damit

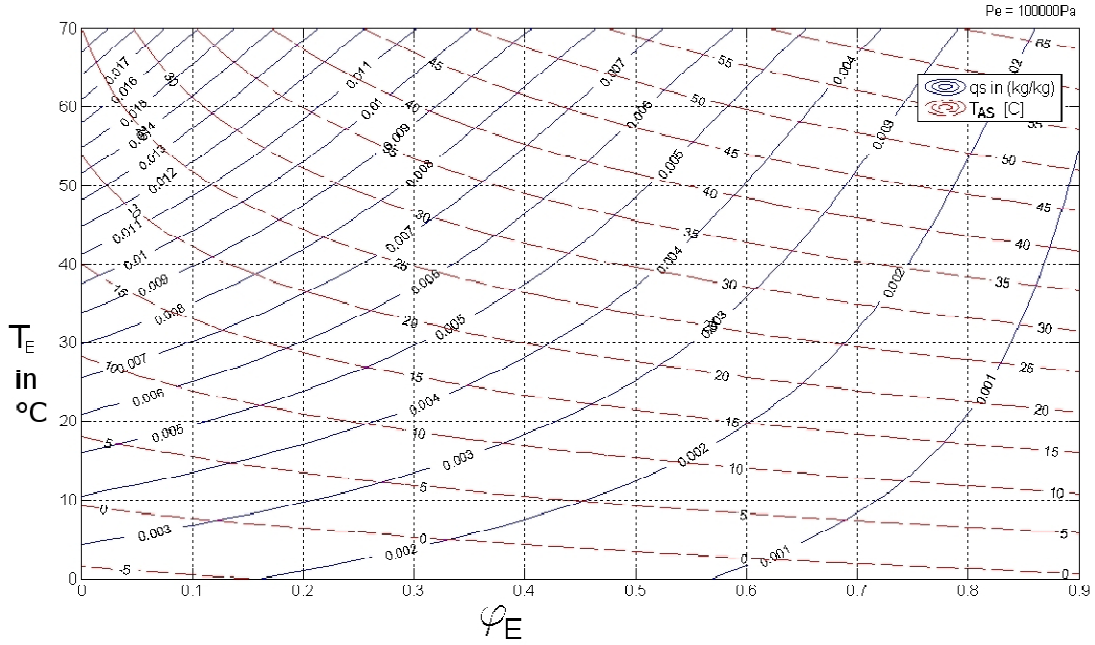


Abbildung 6-8: q_s und $T_{A,S}$ in Abhängigkeit von T_E und ρ_E bei einem Luftdruck von 100000Pa, wobei $T_W = T_E$

zu begründen, dass im Falle kleiner Druckverluste keine große Änderung von q_s zu erwarten ist. Erkennbar wird dies durch das Vergleichen von Abbildung 6.1, 6.2 und 6.3. Wird jedoch ein großer Druckverlust erwartet, so muss der Fehler bzw. q_s selbst für den jeweiligen Fall gesondert ermittelt werden. Nützliche Berechnungsansätze können in [86] gefunden werden.

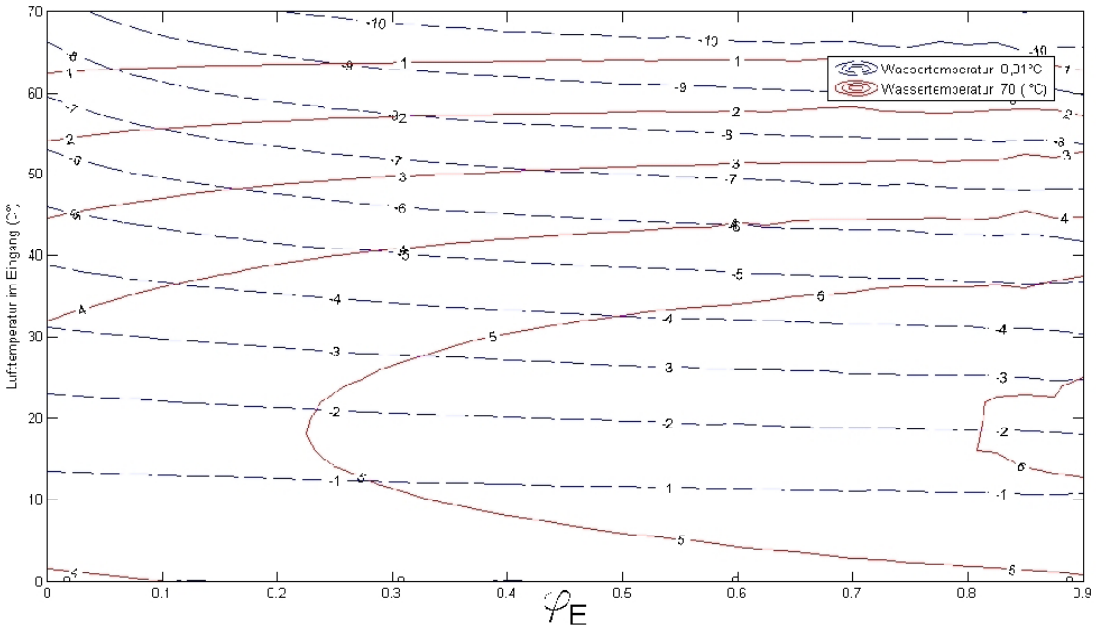


Abbildung 6-9: Abweichungen von q_s in Prozent

6.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Berechnung der verdampfenden Wassermenge bei Wasserspraysystemen

Die oben beschriebene Apparatur erlaubt es, die Wirksamkeit von Zweiphasensprühs zur Staubabscheidung aus der Luft zu untersuchen. Dabei können die Besprühungsparameter variiert werden und ihr Einfluss auf die Abscheidung untersucht werden. Auf den Verdrängungseffekt wird dahingehend Rücksicht genommen, in dem der Reingasstrom bevor er zum Messgerät geführt wird gut durchmischt wird. Auf den Verdünnungseffekt wird dadurch Rücksicht genommen, in dem der Volumenstrom an Luft, der durch den Sprüh der Rohgasluft zugegeben wird, gemessen und dadurch auf eine Reduktion durch Verdünnen rückgerechnet werden kann. Weiters werden, unter der Annahme dass im Kasten eine ideale Durchmischung vorherrscht und dass Wasser, bevor es verdunstet, keine Abscheidende Wirkung hat, Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt. Jene Berechnungsmöglichkeiten erlauben es die Einflüsse der Umgebungsluftbedingungen und der Düsenparameter auf die Abscheidung getrennt zu betrachten. Erste Messungen an der Apparatur wurden bereits durchgeführt und die Ergebnisse in [70] publiziert.

6.1.5 Berechnung des effektiven Wasservolumenstromes bei den experimentellen Betrachtungen der sekundären Staubabscheidung

Weiters können, da der Absaugvolumenstrom des Streulichtpartikelzählers bekannt ist, die dazugehörigen Konzentrationen ermittelt werden. Abbildung 5-20 (Kapitel 5.2) zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Messserie, bei der die abscheidende Wirkung eines Zweiphasensprühs bei verschiedenen Wasservolumenströmen, untersucht wurde. Es ist aber zu bemerken, dass wie in Kapitel 5.2 beschrieben, bei diesen Bedingungen (siehe Beschriftung Abbildung 5-20) ein Wassermassenstrom von rund 1,2*kg/h* verdunsten kann und bei einer guten Durchmischung auch wird. Um nun die Effektivität des Zweiphasensprühs, bezüglich der eingesetzten Wassermenge, untersuchen zu können, muss die tatsächlich zur Abscheidung zur Verfügung stehende Wassermenge als variabler Parameter herangezogen werden. Als tatsächlich zur Verfügung stehende Wassermenge wird nach [42]als jene Wassermenge verstanden die nicht verdunstet. Wie die verdunstende Wassermenge *Q* von 1,2 *kg/h* berechnet wird soll im Folgenden erläutert werden. Durch die Luftwechselzahl von 56*/h* und einem Volumen der Abscheidekammer von 6,8*m*3 ergibt sich ein Volumenstrom an feuchter Luft $\dot{V}_{L,E}$ von 380,8 m^3/h. Mit der Umgebungstemperatur T_E von 13,9°*C*, einer relativen Luftfeuchtigkeit *'E* von 42% und einem Luftdruck am Eingang *PE* von 998 *mbar* ergibt sich nach Gleichung 6.8 ein spezifisches Volumen der feuchten Luft $V_{L,E}$ von 0, 831 m^3/kg *trockener Luft*. Selbes Ergebnis kann unter Vernachlässigung von 2 *mbar* aus Abbildung 6.2 ermittelt werden. Mit Abbildung 6.8, T_E ,P_E und *'E* ergibt sich ein q_s von 0, 0026 $kg_{wasser}/kg_{trockener\ Luft}$. Mit Gleichung 6.5, dem spezifischen Volumen der Feuchten Luft *v*E* von 0, 831$m^3/kg_{trockener\ Luft}$ Als Wassermenge wird hier jene Menge verstanden, die durch die Düse in die Kammer eintritt. Unter Vernachlässigung von 2 *mbar* und dem Volumenstrom an feuchter Luft $\dot{V}_{L,E}$ von 380, 8 m^3/h ergibt sich für den Massenstrom an trockener Luft, $\dot{m}\ t_L$, 458, 24 *kgtrockeneLuft/h*. Nach der Definition von q_s, siehe Kapitel 6.1, kann nun der verdunstende Wassermassenstrom *Q*, unter Anlehnung an Gleichung 6.6, wie folgt angenähert werden.

$$Q = \dot{m}_{tL} * qs = 1,191 kg_{wasser}/h \tag{6-22}$$

Da in [3] keine Angaben über die Wassertemperaturen gemacht werden wird angenommen dass die Wassertemperatur und die Lufttemperatur annähernd gleich sind und daher q_s gleich q_{max},

siehe Abbildung 3.6 auf Seite 18. Ist die Differenz zwischen Wassertemperatur und Lufttemperatur am Ausgang jedoch sehr groß so muss für jeden vermessenen Wasservolumenstrom eine gesonderte Berechnung durchgeführt werden. Berechnungsansätze können in [86] gefunden werden.

6.2 Vergleich der Staubabscheideeffektivitäten beim selben effektiven Wasservolumenstrom

Im Folgenden wird Position 4 einer einzelnen Düse wegen der besonderen Verbreitung in der Praxis als Standardeinstellung definiert. Zudem ist nur diese Position 4 für die primäre Staubabscheidung (Befeuchtung von Schüttgütern) anwendbar, weshalb in späteren Vergleichen auf diese Standardeinstellung bezug genommen wird Bei 10L/h Versorgungswasservolumenstrom und zentraler Positionierung der Düse (Position 4) sowie einer Luftwechselzahl von 25/h steht ein effektiver Wasservolumenstrom von 8,8L/h zur Staubunterdrükung zur Verfügung (13,9°C Lufteinlasstemperatur, 42% Luftfeuchtigkeit am Einlass). Diese 8,8 L/h bewirkten eine sekundäre Staubabscheideeffektivität von $\eta_2 = 16\%$.

Beide Arten der Staubabscheidung sind in Abbildung 6-10 illustriert. Hierbei stellen η_1 und η_2 die Staubabscheideeffektivitäten der zuvor erläuterten Effekte dar.

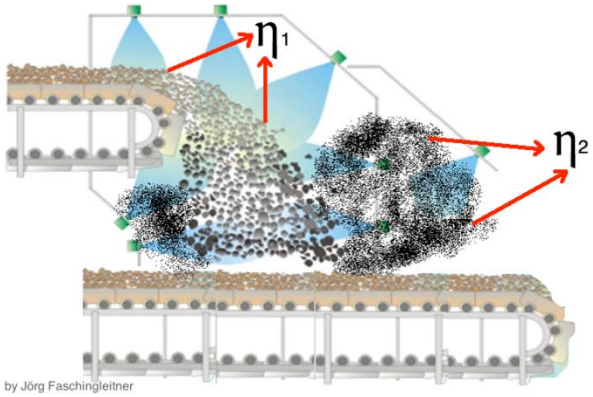


Abbildung 6-10 : Schematische Darstellung der feinstaubbindenden Effekte von Wassersprays bei Schüttgutübergaben

Diese beiden Staubabscheideffektivitäten wirken hintereinander, können daher wie zwei Separatoren welche in Serie geschalten sind behandelt werden [41]. Dadurch kann die gesamte Staubabscheideeffektivität des Wasserspraysystems berechnet weden. η_{tot} berechnet sich demnach mit 2-2:

$$\eta_{tot} = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \cdot \eta_2 \qquad (6\text{-}1)$$

η_{tot} ... gesamte Staubabscheideeffektivität [-]
η_1 ... primäre Staubabscheideeffektivität [-]
η_2 ... sekundäre Staubabscheideeffektivität [-]

Im Vergleich dazu wurde in vorangegangenen Arbeiten [70] in Untersuchungen der Gesamtstaubabscheideeffektivität η_{tot} festgestellt, dass bei vergleichbaren Betriebsbedingungen der Düse (Versorgungswasservolumenstrom 10L/h, effektiever Wasservolumenstrom 8,8L/h) η_{tot} ~ 70% beträgt.

Wendet man nun das Modell zweier in serie geschalteter Separatoren für die primäre und sekundäre Staubabscheideeffektivität, welche zusammen die gesamte Staubabscheideeffektivität ergeben, an so kann berechnet werden, dass die primäre Staubabscheideeffektivität bei diesen Betriebsbedingungen der Düse und einen effektiven Wasservolumenstrom von 8,8L/h $\eta_1 \sim 64\%$ beträgt.

Somit ist bewiesen, dass die primäre Staubabscheideeffektivität bei Standardeinstellungen als etwa 4mal wirksamer eingeordnet werden kann als die sekundäre Staubabscheideeffektivität. Dies wurde auch in [71]und [72] veröffentlicht.

Durch Untersuchung verschiedener Düsenpositionen und Düsenanzahlen sowie erreichen des durch CFD Simulation determinierten Verhältnisses zwischen Düsenluftvolumenstrom und Volumenstrom der staubbeladenen Querluftströmung konnte die sekundäre Staubabscheideeffektivität jedoch signifikant verbessert werden. Die primäre und sekundäre Staubabscheideeffektivität sind über das Modell zweier in serie geschaltener Separartoren verbunden. Dies und die Verbesserungsmöglichkeiten (Einflussfaktoren) die in vorangegangenen Kapiteln aufgezeigt wurden legt den Schluss nahe, dass sowohl für die primäre als auch sekundäre Staubabscheideeffektivität optimierungspotential gegeben ist.

Dieses Optimierungspotential soll im Folgenden Karpitel gehoben werden.

7 Optmierungsverfahren der primären Staubabscheide-effektivität eines Wasserspraysystemes am Beispiel einer Förderbandübergabe

7.1 Einleitung und Aufgabenstellung

Im Folgenden sollen die Bedeutung eines Optimierungsverfahrens eines Wasserspraysystems für die Unterdrückung diffuser Feinstaubemissionen aufgezeigt werden.

Wie bereits im Kapitel 1.7 beschrieben bezieht sich der Begriff “diffuse Staubemissionen” auf luftgetragene Partikel, welche von sogenannten diffusen Quellen, die hauptsächlich punktförmig, linienförmig oder flächenförmig sein können und nicht geführt sind, freigesetzt werden [26]. Dabei wird im Bereich eines Punktes, einer Linie oder einer Fläche-, wo meistens kleine und verteilte Schüttgut- oder Staubhaufwerke vorhanden sind, durch Einwirkung von Wind oder mechanischer Beanspruchung (Impulsaustausch) Staub dispergiert, welcher zusammengefasst die diffuse Staubemission verursacht.

Die Hauptquellen diffuser Staubemissionen sind offene Flächen (z.B. Baustellen, bergmännische Abbauflächen oder landwirtschaftliche Anbaugebiete), befestigte und unbefestigte Strassen und Parkplätze, Schüttguthalden, sowie Geräte des Schüttgutumschlages, des -transportes und -verarbeitung [26].

Da bei einer nicht geführten Staubquelle es schwieriger ist die freigesetzte Staubemissionen mengenmäßig zu erfassen, bzw. zu reduzieren, ist der Anteil diffuser Feinstaubemissionen am gesamten emittierten Feinstaub mittlerweile erheblich [28].

Die Reduktion von Staub aus diffusen Quellen wird zum einen durch primäre Maßnahmen, welche die Staubentstehung verhindern, wie z.B. durch Schüttgutbefeuchtung, Granulation von pulverförmigen Materialien, oder staubarme, prozesstechnische Maßnahmen, durchgeführt. Zum anderen wird der trotz primärer Maßnahmen entstandene Staub durch sekundäre Maßnahmen, wie z.B: durch Einhausen, Absaugen und Abscheiden oder durch Niedernebeln mittels Wassersprüh, abgeschieden. Wenn das Schüttgut keine Wasserempfindlichkeit aufweist, ist der Einsatz von Wassersprüh speziell bei explosionsgefährlichen Stäuben von Vorteil.

Berechnungsunterlagen zur Erfassung diffuser Emissionen, bzw. Auslegungsprozeduren von darauf abgestimmten Staubminderungsmaßnahmen sind bis heute noch sehr spärlich vorhanden, bzw. mit großen Unsicherheiten bei der praktischen Umsetzung verbunden, sodass vermehrte Anstrengungen in diese Richtung, Ziel zukünftiger Forschung sind [87]. Als Beispiel seien Arbeiten angeführt, die sich bei eingehausten Förderbandübergabestellen und Schüttgutfalleinrichtungen mit der Bestimmung des abzusaugenden Luftvolumenstromes beschäftigen [38], [88].

Auch zur Einschätzung der Staubungsneigung verschiedener Schüttgüter gibt es unterschiedliche Messverfahren. Eine diesbezügliche Zusammenstellung ist in [89] enthalten. Jedoch ist die Abschätzung der entstehenden Emission für verschiedene Schüttgutvorgänge nur durch sogenannte Emissionsfaktoren in sehr überschlägiger Weise möglich [26], was aber für die optimale Auslegung einer Staubminderungsmaßnahme nicht ausreichend ist. In [26] wird der Einfluß des Schüttgutmaterials nur durch einen Gewichtungsfaktor, der durch visuelle Beobachtung eine

Unterteilung in stark staubend, mittel staubend, schwach staubend und Staub nicht wahrnehmbar, vornimmt, berücksichtigt.

Vor diesem Hintergrund war es das Ziel im Bereich der Staubunterdrückung mit Sprühdüsen bei Vorgängen der Schüttgutmanipulation einen Beitrag zu deren Auslegung zu leisten.

Konkret wird dabei eine auf einer Fläche aufgebrachte Schüttgutmenge betrachtet, die durch Windeinwirkung oder mechanische Bewegung der Schüttgutmenge Staub emittieren kann. Mittels Sprühdüse soll dessen Entstehung verhindert, bzw. der entstehende Staub abgeschieden werden. Beispiel hierfür ist das Besprühen einer Schüttgutförderbandübergabe.

Das Besprühen von Schüttgütern zur Staubreduzierung kann dabei als eine Kombination einer primären Maßnahme (Befeuchtung des Schüttgutes) und einer sekundären Maßnahme (Niedernebeln des entstandenen Staubes) gesehen werden. Die Untersuchungen sowie die Vergleiche der entstehenden Staubemission zeigten (Kapitel6), dass der Primäreffekt im Vergleich zum Sekundäreffekt weit wirkungsvoller ist. Eine optimale Schüttgutbefeuchtung ist dann gegeben, wenn das Schüttgut gleichmäßig mit jener minimalen Wassermenge befeuchtet wird, die gerade sicherstellt, dass möglichst wenig Staubemission stattfindet. Eine ungleichmäßige Befeuchtung, beispielsweise an einer Schüttgutfläche, würde einerseits vermehrt Wasserpfützen oder trockene Stellen generieren, welche bei zu großem Wasserverbrauch eine ungenügende Staubminimierung zur Folge hat.

Wenn zum Beispiel eine mit Schüttgut beladene Fläche oder ein bewegtes Förderband senkrecht von oben mit Düsen besprüht wird, so hängt die gleichmäßige Befeuchtung von der Höhe der Düsen über dem Förderband, dem Wasservolumenstrom, der Anzahl und Art der Düsen und der Einwirkungszeit ab.

Ziel ist es im Folgenden die örtlichen flächenspezifischen Befeuchtungsmengen pro Zeit auf der Schüttgutfläche radial vom Düsenzentrum nach außen mit einem mathematischen Modell zu erfassen, sodass dann für den jeweiligen Anwendungsfall Optimalwerte für die vorhin angegebenen Bedüsungsparameter, bei möglichst wenig entstehender Staubmenge und geringstem Wasserverbrauch gefunden werden können.

Aufbauend auf das Ergebnis, dass bei der Staubunterdrückung bei Schüttgutmanipulationen mit Wassersprays der Effekt der Schüttgutbefeuchtung stärker ist als das nachfolgende Niedernebeln des entstanden Staubes (Kapitel 6), soll im Folgenden eine Auslegungs- und Berechnungsmethode entwickelt werden, bei der das Schüttgut bei minimalen Wasserverbrauch gleichmäßig befeuchtet wird und somit maximale Staubabscheidung zur Folge hat. Die Methode beruht darauf, daß der örtlich aufgelöste Befeuchtungseintrag einer Fläche unterhalb der Düse durch eine mathematische Glockenkurve beschrieben werden kann, welche für verschiedene Bedüsungsparameterwerte (z.B: für Wasservolumenstrom und Düsenposition) experimentell erfaßt wird. Die Konstanten, die die Glockenkurve für bestimmte Bedüsungsparameter fixieren, werden in ein numerisches Datenfeld gesammelt, sodass das gesamte Betriebsspektrum der Befeuchtungsdüse erfasst ist. Weiters werden die von der Schüttgutfeuchte abhängigen materialspezifischen Emissionsfaktoren als Emissionsfunktion mit Hilfe einer Schüttgutfallapparatur ermittelt. Bei Verwendung des numerischen Datenfeldes und der Emissionsfunktion wurde in einer Optimierungsrechnung, beispielsweise für eine Förderbandbedüsung, die optimale Auslegung des Bedüsungssystems (Optimalwerte für Wasservolumenstrom und Düsenposition), durchgeführt.

Die Einflussgrößen auf die Schüttgutbefeuchtung auf einem Förderband sind in Abbildung 7-0 dargestellt. Es kann hier unterschieden werden zwischen Einflussgrößen die das Sprühbild des Sprühs beeinflussen hier seien (Wasservolumenstrom, Düsenhöhe und Düsenart) genannt, sowie die Einflussgrößen des Befeuchtungsprofiles des Schüttgutes welches aus dem Sprühbild hervorgeht. Dieses Befeuchtungsprofil wird beeinflusst durch das Sprühbild der Düse die Bandgeschwindigkeit des Förderbandes die Schüttgutflächenmasse sowie die Art des Schüttgutes. Unabhängig davon ist auch neben der flächenmässigen Befeuchtung (Sprühbild der Düse) die tiefenmässige Befeuchtung der Schüttung am Förderband in Betracht zu ziehen.

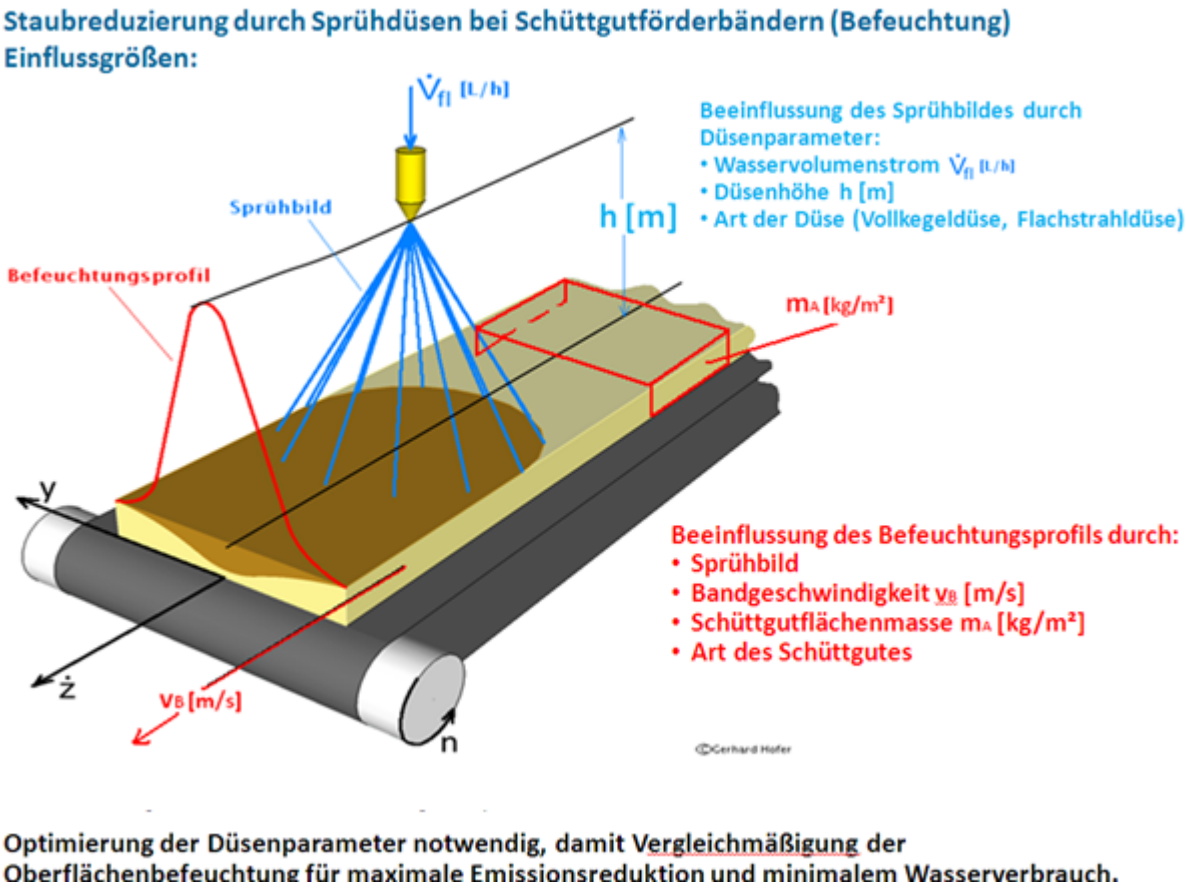


Abbildung 7-0: Einflussgrößen auf die Oberflächenbefeuchtung durch Sprühdüsen.

Aufgrund der genannten Einflussgrössen wird im Folgenden wie Folgt vorgegangen:

1) Zuerst wird das Sprühbild der Düse (flächenmäßige Befeuchtung) in Abhängigkeit der Düsenparameter (Wasservolumenstrom, Düsenhöhe und Art der Düse) erfasst und mathematisch beschrieben.
2) Dann wird die tiefenmäßige Befeuchtung durch eine Gutschüttung erfasst um nachzuweien bis zu welcher oberflächlich aufgebrachten Flüssigkeitsmenge eine Schüttgutdurchfeuchtung garantiert ist.
3) Als nächsten Schritt ist ein Optimierungsverfahren der durch die Sprühbilder der Düsen zur Verfügung gestellten Wassermenge über die Oberfläche unter Einbeziehung der Einflussgrößen Bandgeschwindigkeit sowie Flächenmasse des Schüttgutes am Förderband sowie der Art des Schüttgutes über materialspezifische Emissisonsfaktoren je Gutfeuchte zu erarbeiten.

Um diese Optimierung zu ermöglichen ist also als erster Schritt die Vermessung von Sprühbildern (Flüssigkeitsverteilung über die Fläche) vorzunehmen:

7.2 Aufbau der Versuchsapparatur zur Vermessung von Sprühbildern (flächenmäßige Befeuchtung)

Die Vermessung der Flüssigkeitsverteilung (Sprühbild) von zwei verschiedenen Zweistoff Resonanzdüsen soll im weiteren erarbeitet werden. Zum einen soll das Sprühbild der Vollkegeldüse VSR 1005 vermessen werden welche zur Unterdrückung diffuser Feinstaubemissionen aus der Luft (sekundäre Staubabscheideeffektivität) verwendet wurde, zum anderen soll das Sprühbild einer Flachstrahldüse VSR 5510F vermessen werden, da man sich von Flachstrahldüsen eine bessere strömungstechnische Barrierewirkung erwartet. Bei beiden Düsen handelt es sich um Ultraschall-Zweistoffresonanzdüsen welche sich durch eine besonders feine Tropfengrößenverteilung auszeichnen und daher für die sekundäre Staubabscheidung eine erhöhte Wirksamkeit erwarten lassen wie auch die Berechnung der optimalen Tropfengröße nach dem Barth/Schuch/Löffler Modell Kap. zeigten. Für die primäre Staubabscheideeffektivität spielt jedoch die Tropfengröße eine untergeordnete Rolle hier geht es vielmehr um die Flüssigkeitsverteilung auf einer Schüttgutoberfläche welche der Düsenspray verursacht und daher sollen im Folgenden Sprühbilder vermessen werden.

7.2.1 Vermessung von Sprühbildern (=Befeuchtungsfeldern) von Zweistoffdüsen (Vollkegeldüse und Flachstrahldüse)

Die Versuchsanordnung ist, so konzipiert, dass unter der Zweistoffdüse ein in allen drei Achsenrichtungen verstell- und arretierbares Gleitschienengestell, mit montierten Messkompartimenten, installiert ist.
Die gesamte Apparatur ist abermals in der Staubabscheidekammer Kapitel 5.1 untergebracht, um mögliche Verwehungen des Düsensprühs während der Versuchsdurchführung auszuschließen.
Zur Einstellung des jeweiligen Zweistoffsprühs steht ein Rotameter zur Messung des Wasservolumenstroms und ein Manometer für den zu wählenden Luftdruck zur Verfügung. Die Besprühungsdauer wurde mittels Stoppuhr kontrolliert.

Um die Befeuchtungsgeschwindigkeit bzw. das Sprühbild der vorliegenden Vollkegeldüse VSR 1005 und der Flachstrahldüse 5510F der Firma VSR Industrietechnik GmbH ermitteln zu können, wird die von der Düse versprühte Menge Wasser des Zweiphasensprühs bei verschiedenen Besprühungsparametern (Düsenhöhe h und Wasservolumenstrom V_{fl}) in geeigneten Messkompartimenten aufgefangen. Je nach Einstellung der Besprühungsparameter ist dabei eine unterschiedliche Anzahl von Messkompartimenten an dem Gleitschienengestell zu installieren. Der Wasserstand in jedem Kompartiment wird nacheinander mittels Messschieber vermessen und anhand der gewählten Sprühdauer in weiterer Folge auf eine Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) umgerechnet.

Die Messungen waren mit unterschiedlichen Bedüsungsparametern durchzuführen. Es wurden die Befeuchtungsgeschwindigkeiten bei jeweils vier Wasservolumenströmen V_{fl} (40L/h; 60L/h; 90L/h; 120L/h) in drei verschiedenen Kompartimentsabständen h zur Düse (0,35m; 0,55m; 1,08m) ermittelt. Die Druckluftversorgung der Zweistoffdüse blieb mit einem Druck von p=3bar bei allen Versuchsdurchgängen gleich. Zur Erfassung der Messschwankungen wurde jede Einstellung drei Mal vermessen.

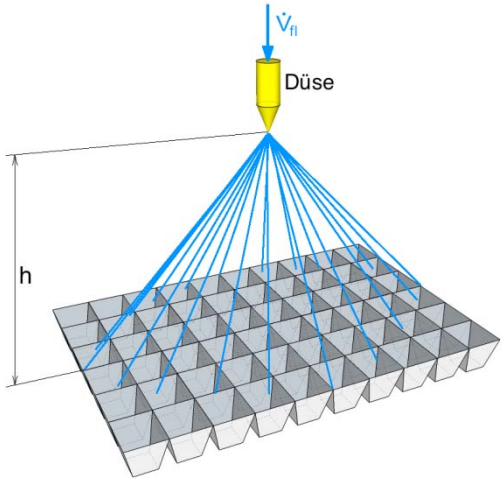


Abbildung 7-1: Darstellung der Versuchsanordnung zur Ermittlung des Sprühbildes der Flachstrahldüse (Düsenabstand h [m], Wasservolumenstrom V_{fl} [L/h])

4.3.1 Berechnung der Befeuchtungsgeschwindigkeit

Die Berechnung der Befeuchtungsgeschwindigkeit aus den gemessenen Wasser-ständen der einzelnen Messkompartimente erfolgt mit Gleichung 7-1:

$$v(x) = \frac{H \cdot A_M}{t \cdot A_A} \tag{7-1}$$

wobei

$$A_M = \left(L_o - \frac{L_o - L_u}{2}\right) \cdot \left(B_o - \frac{B_o - B_u}{2}\right) \tag{7-2}$$

und

$$A_A = L_o \cdot B_o \tag{7-3}$$

v(x)	... Befeuchtungsgeschwindigkeit [m/s]			
H	... Wasserstand im Messkompartiment [m]			
t	... Sprühdauer [s]			
A_M	... Mittlere Querschnittsfläche eines Messkompartiments [m^2],		A_M=	0,00211m^2
A_A	... Flüssigkeits-Auffangquerschnitt [m^2],		A_A=	0,00341m^2
L_o	... Öffnungslänge des Messkompartiments [m],	L_o=	0,062m	
L_u	... Bodenlänge des Messkompartiments [m],		L_u=	0,035m
B_o	... Öffnungsbreite des Messkompartiments [m],	B_o=	0,055m	
B_u	... Bodenbreite des Messkompartiments [m],		B_u=	0,032m
H_K	... Höhe des Messkompartiments [m],	H_K=	0,059m	

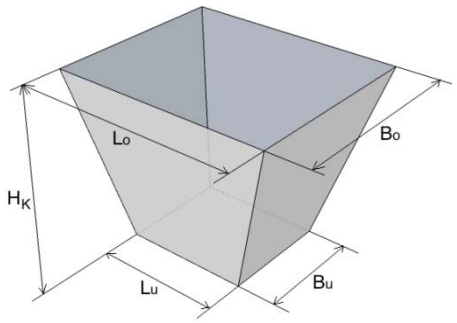


Abbildung 7-2: Skizze eines Messkompartiments mit den in Gleichungen 6 und 6a verwendeten Abmessungen

7.3 Modell zur Beschreibung des Befeuchtungsfeldes von Vollkegeldüsen in Abhängigkeit der Bedüsungsparameter (flächenmäßige Befeuchtung)

7.3.1 Befeuchtungsmodell

In einer einfachen Versuchseinrichtung (Abbildung 7-3), bei der eine Düse senkrecht zu einer in einem bestimmten Abstand (Düsenhöhe h [m]) waagrecht entfernten Platte positioniert ist, welche mit mehreren kleinen Auffangbehältern mit bestimmter Behälterfläche A in radialer Richtung x versehen ist, kann nach einer bestimmten Zeit t das in den einzelnen Behältern gesammelte Wasservolumen V(x) [m^3] festgestellt und daraus eine örtlich vom Düsenzentrum radial nach außen veränderliche Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) [m/s] ermittelt werden (Gleichung 7-4).

$$v(x) = \frac{V(x)}{A * t} \qquad (7\text{-}4)$$

v(x) Befeuchtungsgeschwindigkeit (m/s)

V(x) Flüssigkeitsvolumen gesammelt im Auffangbehälter nach der Zeit t (m^3)

x Befeuchtungsradius (m)

t Zeit (s)

A Grundfläche des Auffangbehälters (m^2)

Unter der Annahme, dass die Düse ein zentrisch symmetrisches Sprühbild erzeugt, kann der Befeuchtungsgeschwindigkeitsverlauf v(x) [m/s] des Wassers auf der Behälterebene von der Düsenmitte nach außen mit einer Glockenkurve (Gleichung 7-5) beschrieben werden (siehe Abbildung 7-3a).

$$v(x) = a * e^{-b * x^2} \qquad (7\text{-}5)$$

a Befeuchtungskonstante (m/s)

b Befeuchtungskonstante ($1/m^2$)

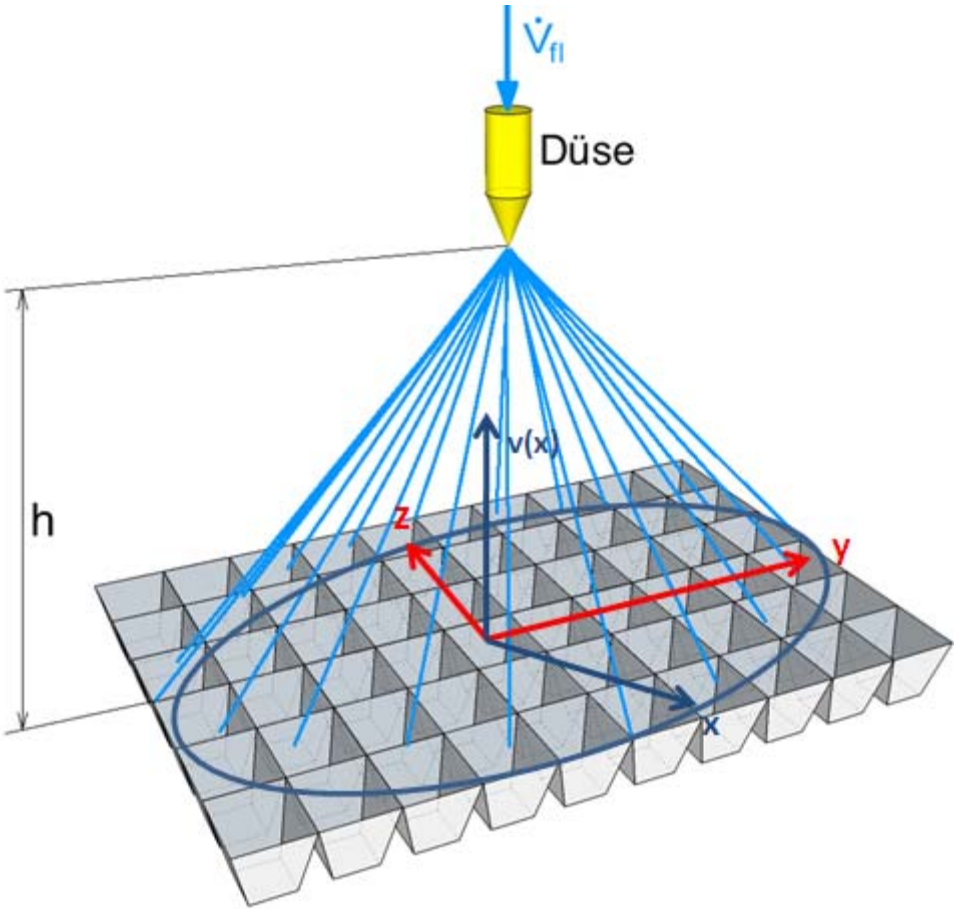


Abbildung 7-3: Messaufbau zur Erfassung von Sprühbildern

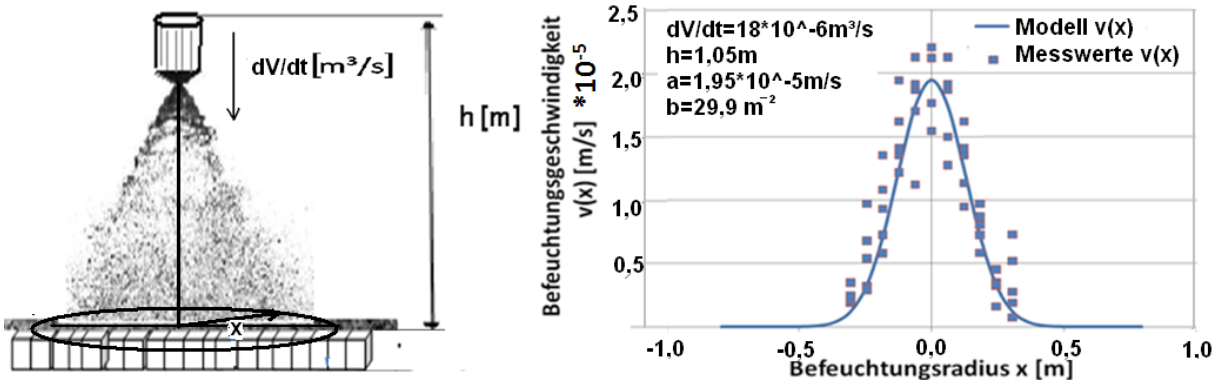


Abbildung 7-3a: Messung und Modellierung der vom Düsenzentrum nach aussen veränderlichen Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x)

Die beiden Konstanten a und b können durch Regressionsanalyse der Versuchsdaten ermittelt werden. Die Konstante a gibt Auskunft über das Maximum im Zentrum des Sprühbildes und die Konstante b über die Breite des Sprühbildes. Bei Variation der Düsenhöhe h und des Düsenwasservolumenstromes dV/dt, lässt sich für jeder dieser Kombinationen aus den Versuchsdaten ein Befeuchtungsgeschwindigkeitsverlauf ermitteln. Für eine konstante Höhe und verschiedene Volumenströme bzw. konstanten Volumenstrom und verschiedene Höhen sind die Ergebnisse dreidimensional in Abbildung 7-4 für eine Zweistoffresonanzdüse 1005 (VSR

Industrietechnik GmbH) dargestellt. Das gesamte Befeuchtungsspektrum der Düse ist dann durch ein Datenfeld der beiden Konstanten a und b, abhängig von h und dV/dt fixiert, bzw. in Diagrammform in Abbildung 7-5 dargestellt.

Das Glockenmodell zusammen mit dem Datenfeld stellt nun die Grundlage für etwaige Optimierungsaufgaben dar.

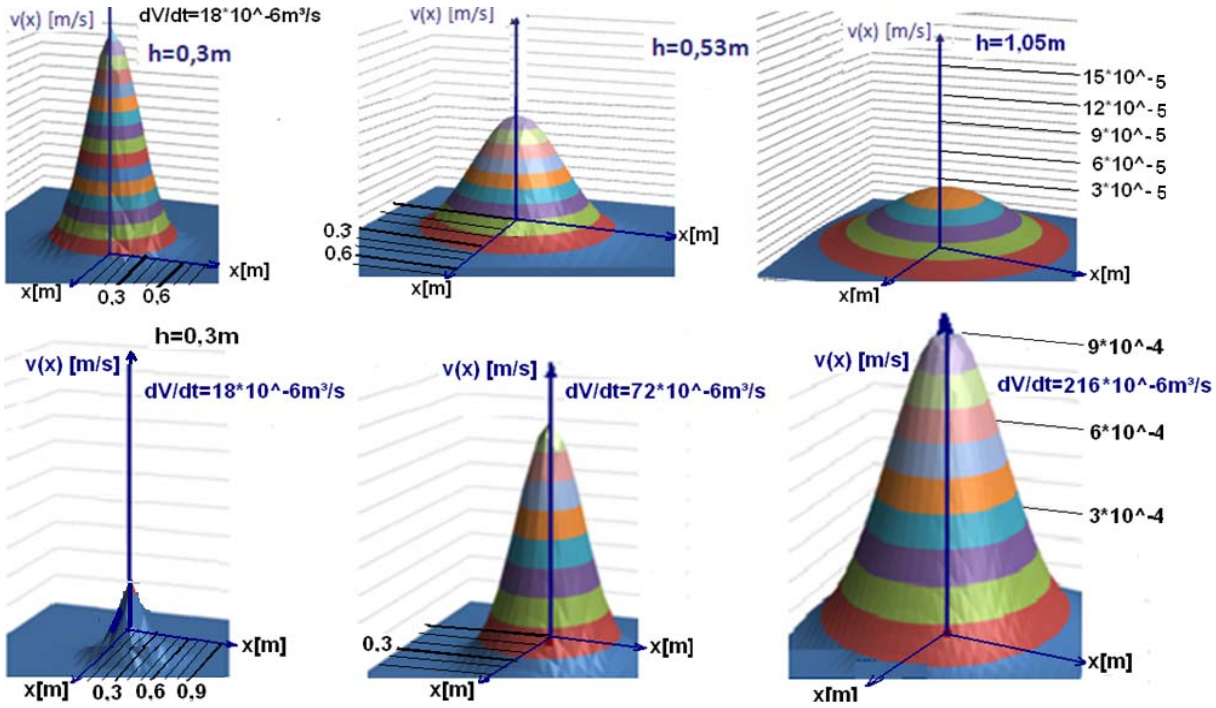


Abbildung 7-4: Radialer Befeuchtungsgeschwindigkeitsverlauf v(x) dargestellt durch die Glockenfunktion Gleichung 7-5 für einen konstanten Flüssigkeitsvolumenstrom dV/dt und verschiedene Höhhen h bzw. eine konstante Höhe und verschiedene Flüssigkeitsvolumenströme dV/dt (Zweistoffresonanzdüse1005 (VSR Industrietechnik GmbH))

7.3.2 Ergebnisse der Beschreibung der Sprühbilder der Vollkegeldüse durch das Befeuchtungsmodell

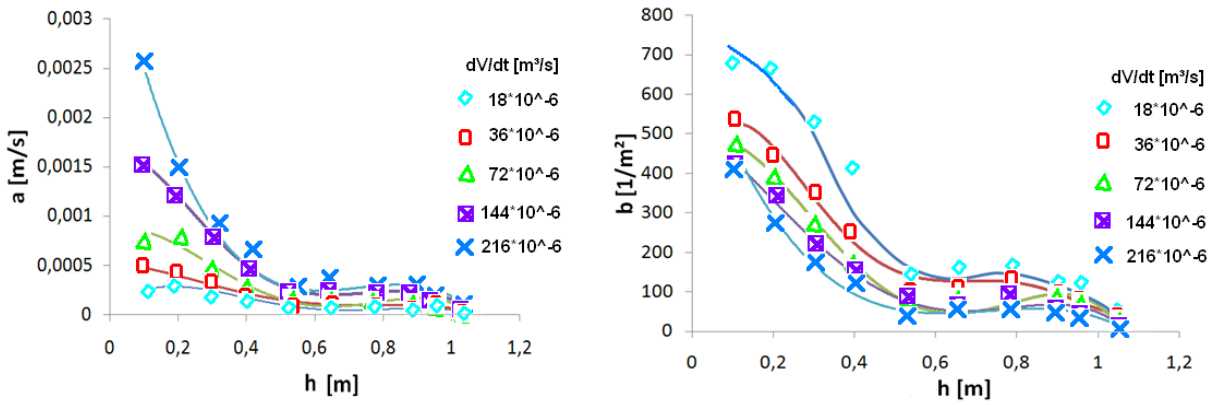


Abbildung 7-5: Befeuchtungskonstante a bzw b in Abhängigkeit von der Höhe h bzw. dem Flüssigkeitsvolumenstrom dV/dt (Zweistoffresonanzdüse 1005 (VSR Industrietechnik GmbH))

Der sigmuidale Verlauf der Befeuchtungskonstante b mit zunehmender Düsenhöhe bestätigt das durch CFD Simulation erhaltene Ergebnis 5.3.1 eines Sich verbreiternden Sprühbildes nahe Düsenaustritt (Expansionsbereich der Tropfenflugbahnen) sowie ein abflachen dieser Verbreiterung mit Steigender Distanz vom Düsenaustritt durch Ausbildung eines Einsaugbereiches der Tropfen. Danach tritt wider eine dem Sprühwinkel entsprechende Verbreiterung des Sprühbildes (Glockenfunktion) auf. Somit sind durch die detektierten Trends die das Sprühbild mit Variation der Bedüsungsparameter zeigt die CFD Simulationsergebnisse 5.3.1 bestätigt.

Die in Abbildung 7-5 dargestellte Veränderung des Sprühbildes wurde für die Luftwechselzahl 25/h 56/6 sowie 77/h aufgenommen, und festgestellt, dass es zu keiner signifikanten Veränderung von a bzw. b durch Veränderung der Anströmgeschwindigkeit kommt. Die Ansttrömgeschwindigkeit hat also in gewissen Grenzen nur sehr untergeordneten Einfluss auf die Ausformung des Sprühbildes.

7.3.3 Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse

Die mathematische Beschreibung durch das Befeuchtungsmodell der Sprübilder der Vollkegeldüse bei unterschiedlichen Bedüsungsparametern zeigt eine Veränderung des Sprühbildes. Diese Veränderung des Sprühbildes ist durch Veränderung des glockenförmigen Verlaufes der Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) mit dem Befeuchtungsradius x abgebildet. Die Gestalt des glockenförmigen Verlaufes ist durch die beiden Befeuchtungskonstanten a und b beschreibbar. Der Trend den die Befeuchtungskonstanten a und b über die Bedüsungsparameter (Düsenhöhe h und Düsenwasservolumenstrom V_{fl}) zeigen ist ein Darstellung der Veränderung der Sprühbilder im Betriebsbereich der Düse. Diese Veränderung der Sprühbilder ist nicht linear. Eine Steigerung der Düsenhöhe oder des Wasservolumenstromes kann zu unterschiedlicher Veränderung des Sprühbildes führen, also sowohl zu einer Verbreiterung und Erhöhung des radialen Feuchteeinrtrages in unterschiedlichem Maße führen

7.4 Modell zur Beschreibung des Befeuchtungsfeldes von Flachstrahldüsen in Abhängigkeit der Bedüsungsparameter von Wassersprаysystemen (flächenmäßige Befeuchtung)

Um die aus den Messwerten gewonnenen Verteilungen der jeweiligen Befeuchtungsgeschwindigkeiten theoretisch mit der Gauß'schen Glockenkurve (Gleichung 7-5) annähern zu können, müssen die darin enthaltenen Faktoren a und b ermittelt werden.

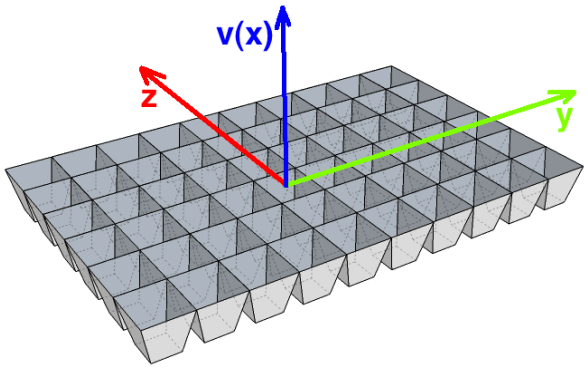


Abbildung 7-6: Darstellung der Messkompartimente im Koordinatensystem

Im Gegensatz zum bereits analysierten Sprühbild der Vollkegeldüse werden im Falle der vorliegenden Flachstrahldüse aus den aufgenommenen Datensätzen ausschließlich die Befeuchtungsgeschwindigkeiten in y-Richtung bei z=0m und in z-Richtung bei y=0m herangezogen. Bei der Vollkegeldüse wurden sämtliche Messkompartimente in die Sprühbildanalyse miteinbezogen, der Abstand x stellte hierbei jeweils den radialen, mittels Pythagoras bestimmten, Abstand von Düse zu m jeweiligen Kompartimentsmittelpunkt dar. Die Limitierung der Sprühbildanalyse bei der Flachstrahldüse auf zwei Achsenrichtungen (y und z) bei einerseits y = 0 m und andererseits z = 0 m wurde deshalb getroffen, weil die Flachstrahldüse kein rotationssymmetrisches Sprühbild aufweist. Weiters ging man davon aus, dass die Flachstrahldüse durch einen Faktor a und zwei sich unterscheidende Faktoren b (b_y und b_z) beschrieben werden könnte, wobei im Zuge dieser Arbeit eine weitere Verbesserung dieser Beschreibung vorgenommen wurde.

Somit stellen im Falle der Flachstrahldüse die horizontalen Abstände von der Düse in y- und z-Richtung dabei in Gleichung 7-5 den Abstand x dar. Der Betrag der Differenz zwischen der aus den Messwerten berechneten Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) und derer aus der Gauß'schen Näherung ist zu minimieren, um die optimale Gauß'sche Glocke, welche die gemessene Befeuchtungsgeschwindigkeitsverteilung im Raum beschreibt, zu erhalten. Hierzu sind in weiterer Folge a und b solange zu variieren, bis der Betrag der Differenz ein Minimum geworden ist. Um dies zu erreichen werden die erhaltenen Differenzbeträge jeweils in y- und z-Richtung aufsummiert. Die beiden erhaltenen Summen sollen in weiterer Folge mittels des Solver-Auswerteprozesses schlussendlich ein Minimum ergeben, welches, wie schon erwähnt, durch Variation der Beiwerte a und b erzielt wird. Ist das Minimum für die Summen der Differenzen in y- und z-Achsenrichtung ermittelt, so sind auch die einzelnen Beträge der Differenzen minimiert.

a und b werden anfangs willkürlich gewählt, wobei a die Höhe der Gauß'schen Glocke ergibt, welche genau dem Befeuchtungsgeschwindigkeitsmaximum bei y=z=0m entspricht. Anschließend werden mittels Solver in Excel, mit der Vorgabe des Minimums der zuvor erwähnten Summen der Differenzen, a, b_y und b_z berechnet.

Erstaunlicherweise weichen mit diesem Lösungsverfahren der Faktor b in y- und in z-Richtung kaum voneinander ab. Es konnte ermittelt werden, dass die prozentuelle Abweichung zwischen b_y und b_z kleiner ist, als die prozentuellen Messschwankungen von jeweils drei Messungen, welche mit gleichen Versuchsparametern durchgeführt wurden (gleicher Düsenabstand h, Volumenstrom V_{fl} und Luftdruck p). Daher ist es legitim aus beiden Werten b_y und b_z das arithmetische Mittel zu bilden. Dieses arithmetische Mittel stellt ab sofort den Faktor b dar. Somit besitzt jeder Versuch die beiden Koeffizienten a und b, wie auch schon bei der Beschreibung der Vollkegeldüse.
Wie in Abbildung 7-6 jedoch ersichtlich ist, werden die gemittelten Messdaten in y-Richtung bei z=0m mittels dem berechneten Faktor b nicht ausreichend gut regressiert. Die Gauß'sche Glockenkurve nähert sich zu schnell der Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x)=0m/s an und muss somit für die betrachtete Flachstrahldüse modifiziert werden.

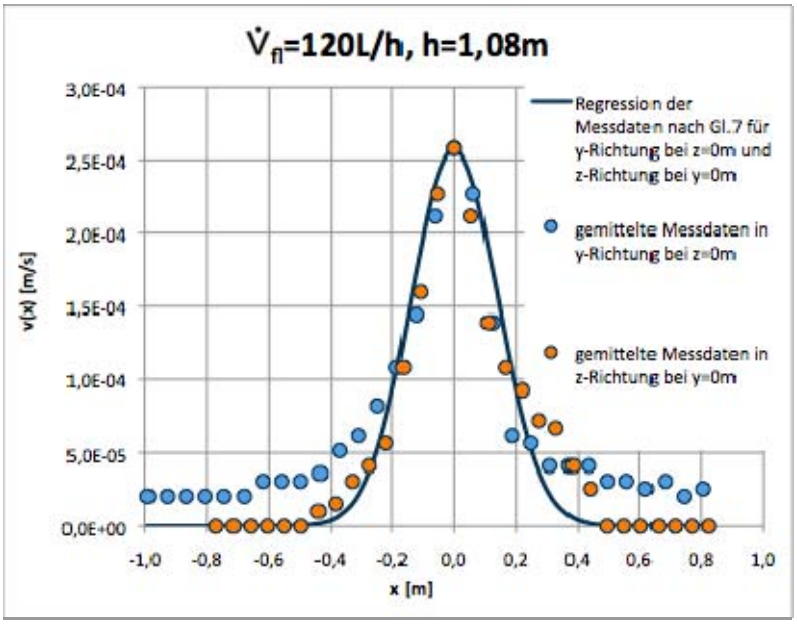


Abbildung 7-7: Sprühbild der Flachstrahldüse bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=120L/h und einem Düsenabstand h=1,08m

7.4.1 Erweiterung der Gauß'schen Glockenkurve des Befeuchtungsmodelles [90]

Wie in Abbildung 16 ersichtlich ist, lässt sich die vorliegende Zweistoff-Flachstrahldüse in y-Richtung bei z=0m nicht mit der schon bekannten und mehrmals verwendeten Gauß'schen Glockenkurve beschreiben. Um diese Ungenauigkeit zu beheben, schrieb man der schon vorhandenen Glockenkurve eine Gerade ein, welche durch die Signum-Funktion bei x=0m das Vorzeichen ihrer Steigung ändert, woraus eine Verschiebung der Gauß'schen Kurve nach oben resultiert. Da aber die Glocke bei dem Wert x=0m nicht nach oben verschoben werden soll, wird die Korrektur (a-d) verwendet.

Gleichung (7-6) zeigt das, für die Beschreibung der Feuchte-Oberflächenverteilung der Flachstrahldüse, adaptierte Modell.

$$v(x) = (a-d)\cdot e^{-b\cdot x^2} - \mathrm{sgn}(x)\cdot k\cdot x + d \qquad (7\text{-}6)$$

7.4.1.1 Ermittlung der Beiwerte k und d

Die beiden eingeführten Beiwerte k und d entsprechen der Steigung k sowie dem Achsenabschnitt d einer Geradengleichung y(x)= k*x+d. Um nun k und d ermitteln zu können, wurden die annähernd linearen Bereiche des gemessenen Sprühbildes herangezogen. Diese ausgewählten Messwerte werden hierzu, wie in Abbildung 17 ersichtlich, dargestellt und diesen Bereichen jeweils eine lineare Regressionsfunktion eingeschrieben. Hieraus lassen sich pro Regression ein Beiwert k und d ermitteln. Der Mittelwert aus beiden erhaltenen Beiwerten k bzw. d ergibt schlussendlich die für Gleichung 7-6 gesuchten Faktoren k und d.

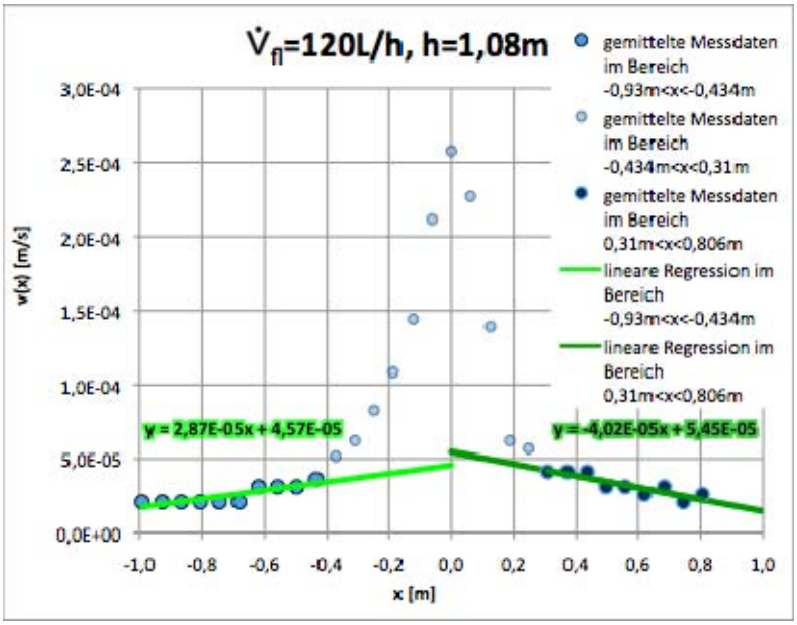


Abbildung 7-8: Ermittlung der Beiwerte k und d der Flachstrahldüse bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=120L/h und einem Düsenabstand x=1,08m

7.4.1.2 Die modifizierte Gauß'sche Glockenkurve

Werden die ermittelten Beiwerte k und d in Gleichung 8 eingesetzt und vergleicht man die mit den Gleichungen 7-5 und 7-6 erhaltenen Glockenkurven (siehe Abbildung 7-9) so wird ersichtlich, dass die radial von der Düse weiter entfernten Bereiche (in y-Richtung) besser angenähert werden können.

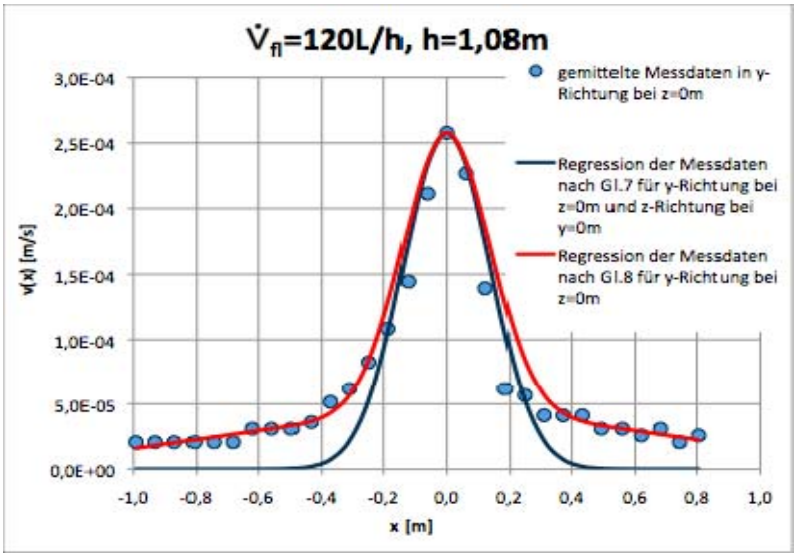


Abbildung 7-9: Vergleich der berechneten Sprühbilder der Flachstrahldüse bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=120L/h und einem Düsenabstand h=1,08m

7.4.2 Ergebnisse der Beschreibung der Sprühbilder der Flachstrahldüse durch das erweiterte Befeuchtungsmodell

7.4.2.1 Sprühbilder der Flachstrahldüse in y-Richtung bei z=0m

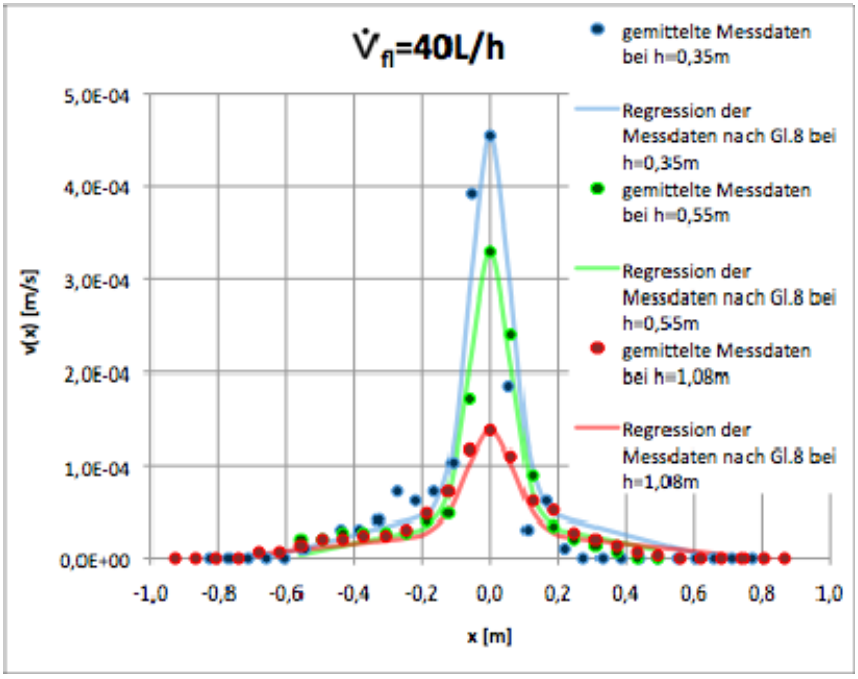


Abbildung 7-10: Sprühbilder in y-Richtung bei z=0m der gemittelten Messwerte und die zugehörigen Gauß'schen Glockenkurven nach Gleichung 8 bei V_{fl}=40L/h in Abhängigkeit des Düsenabstandes h

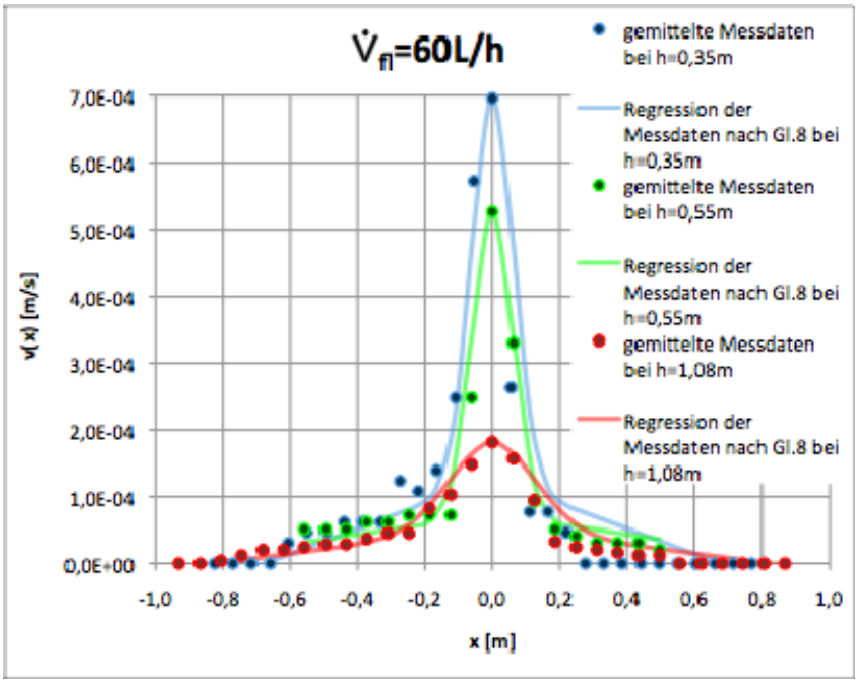


Abbildung 7-11: Sprühbilder in y-Richtung bei z=0m der gemittelten Messwerte und die zugehörigen Gauß'schen Glockenkurven nach Gleichung 8 bei V_{fl}=60L/h in Abhängigkeit des Düsenabstandes h

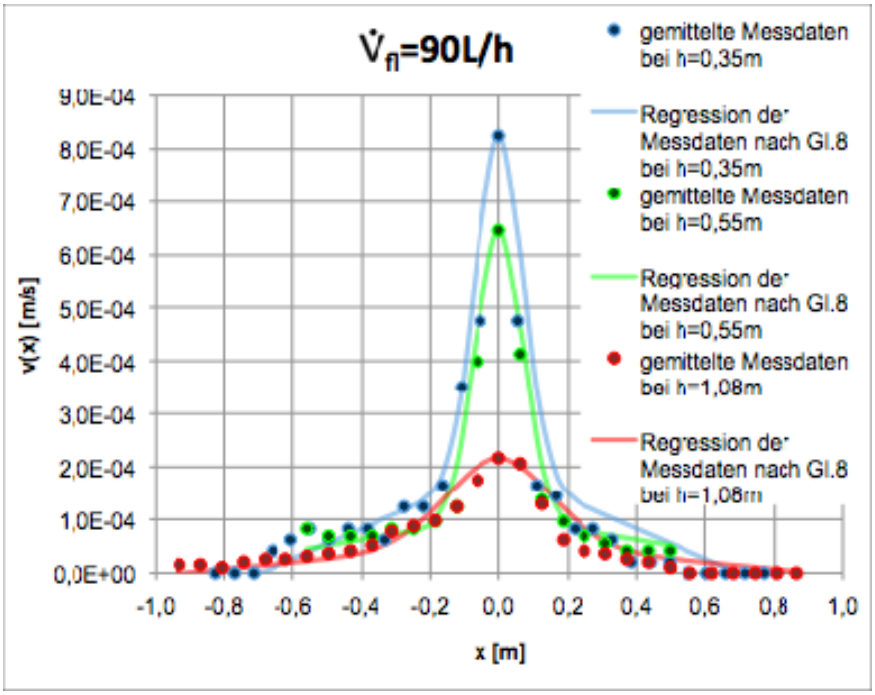


Abbildung 7-12: Sprühbilder in y-Richtung bei z=0m der gemittelten Messwerte und die zugehörigen Gauß'schen Glockenkurven nach Gleichung 8 bei V_{fl}=90L/h in Abhängigkeit des Düsenabstandes h

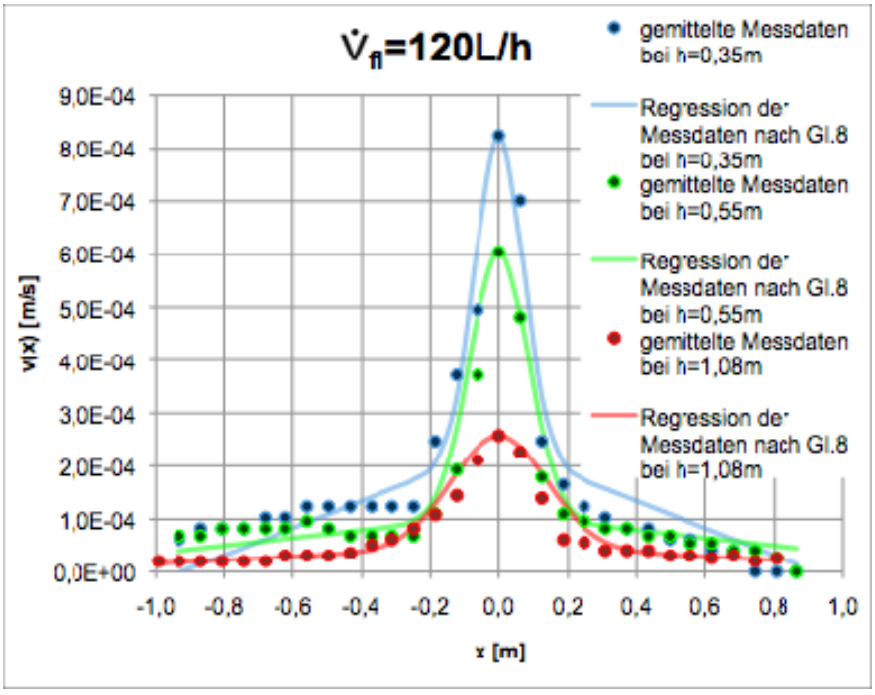


Abbildung 7-13: Sprühbilder in y-Richtung bei z=0m der gemittelten Messwerte und die zugehörigen Gauß'schen Glockenkurven nach Gleichung 8 bei V_{fl}=120L/h in Abhängigkeit des Düsenabstandes h

Aus obigen Abbildungen 7-10 bis 7-13 ist ersichtlich, dass bei jeweils gleichbleibenden Wasservolumenströmen die Befeuchtungsgeschwindigkeiten mit zunehmendem Düsenabstand h abnehmen, da sich das gleiche Flüssigkeitsvolumen auf eine größere Fläche verteilt. Die Glocke fällt

somit breiter und niedriger aus. Mit steigendem Wasservolumenstrom V_{fl} steigt bei gleicher Düsenhöhe h die Befeuchtungs-geschwindigkeit.
Diese Zusammenhänge werden vor allem durch die Trends, welche a und b bei verschiedenen Düsenbetriebsbedingungen zeigen, verdeutlicht; stellen doch a und b Kennwerte für die Glockenform der Gauß'schen Glockenkurve dar. Werden nun die Düsenkennwerte a und b sowie k und d bei verschiedenen Wasservolumenströmen V_{fl} über dem Düsenabstand h aufgetragen, so kann die Entwicklung und Gestalt des jeweiligen Sprühbildes je Betriebsparameter beschrieben werden.
Aus Gleichung 7-5 bzw. 7-6 kann folgender Zusammenhang zwischen a und b und der Glockenform extrahiert werden: Je größer der Wert für den Faktor a, desto höher fällt die Gauß'sche Glockenkurve aus, je größer der Wert für den Faktor b, desto schmäler wird sie.
Lediglich bei einer Volumenstromänderung von V_{fl}=90L/h auf V_{fl}=120L/h bleibt die maximale Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x), somit auch der Faktor a, annähernd gleich bzw. sinkt sogar ein kleinwenig. Grund hierfür ist, dass die Düse den Wasserstrahl bei diesen hohen Durchflüssen mehr auffächert und das Wasser bevorzugt in y-Richtung versprüht. Das ist vor allem durch die kleinen b-Werte bei V_{fl}=120L/h zu erkennen, welche auf eine Verbreiterung der Glocke hindeuten. Dieses Düsenmerkmal zeichnet sich auch in den Abbildungen 7-14 und 7-15 abermals ab.

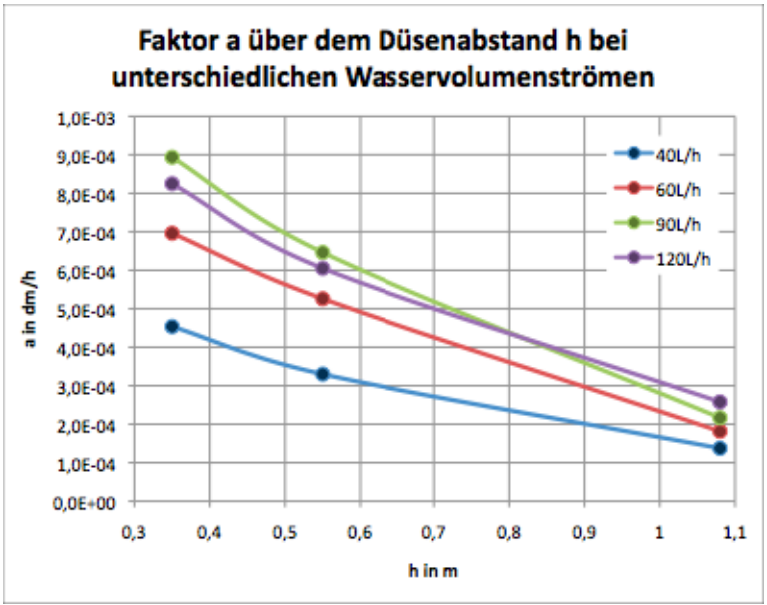


Abbildung 7-14: Verlauf des Faktors a über dem Düsenabstand h in Abhängigkeit des Wasservolumenstroms V_{fl}

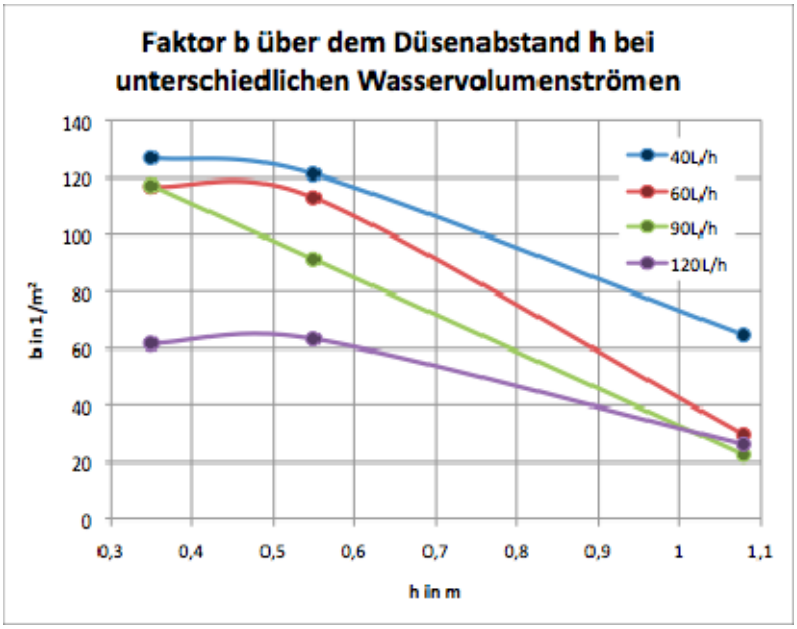


Abbildung 7-15: Verlauf des Faktors b über dem Düsenabstand h in Abhängigkeit des Wasservolumenstroms V_{fl}

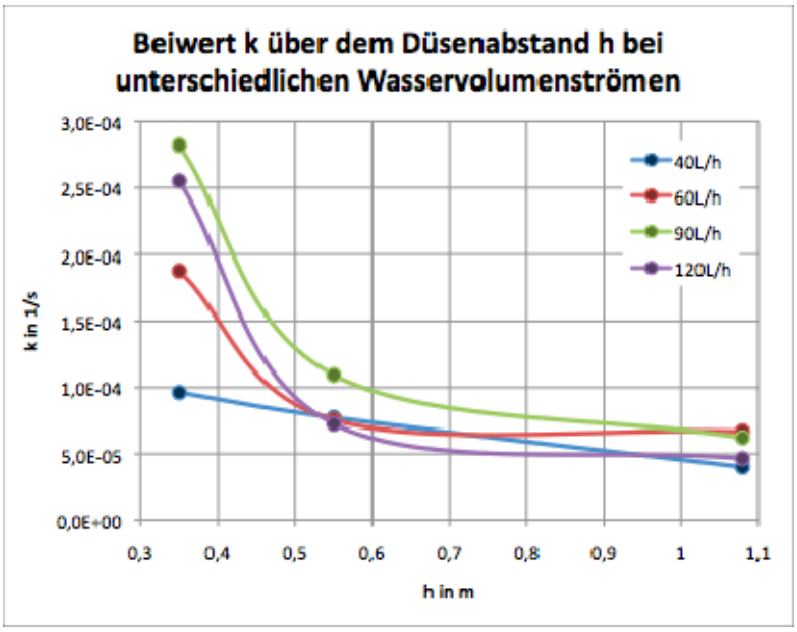


Abbildung 7-16: Verlauf des Beiwertes k über dem Düsenabstand h in Abhängigkeit des Wasservolumenstroms V_{fl}

Abbildung 7-16 zeigt, dass die Steigung, sprich der Beiwert k, der in die Gauß-Kurve eingeschriebenen Geraden, mit zunehmendem Wasservolumenstrom zunimmt. Allerdings verhält sich dies bei einem V_{fl}=120L/h, wie auch beim Faktor a (siehe Abbildung 7-14), konträr. Hierbei wirkt der schon erwähnte Effekt, dass die Düse den Wasserstrahl bei diesen hohen Durchflüssen mehr auffächert und das Wasser bevorzugt in y-Richtung versprüht. k nimmt auch mit zunehmendem Düsenabstand ab, was auf die bessere Auflösung des Sprühbildes bei weiter

aufgefächertem Sprüh zurückzuführen ist. Ist nun der Düsenabstand geringer, so wird der Flachstrahleffekt der Düse schlechter reproduziert.
Die eben beschriebenen Zusammenhänge gelten ebenso für den Beiwert d, dessen Verlauf in Abbildung 7-17 illustriert ist. Im Gegensatz zum Beiwert k nehmen die Werte für d bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=120L/h nicht ab, sondern steigen weiter an. Dies deutet abermals auf ein vermehrtes Auffächern des Düsensprühs in y-Richtung bei derartig hohen Volumenströmen hin.

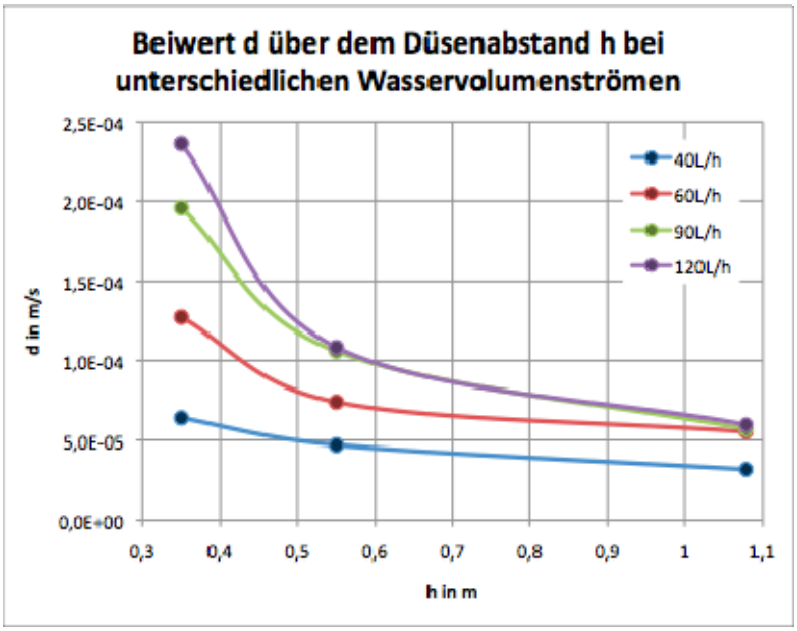


Abbildung 7-17: Verlauf des Beiwertes d über dem Düsenabstand h in Abhängigkeit des Wasservolumenstroms V_{fl}

7.4.2.2 Sprühbilder der Flachstrahldüse in z-Richtung bei y=0m

Folgende Abbildungen 7-18 bis 7-21 zeigen die Sprühbilder der Flachstrahldüse in z-Richtung bei y=0m. Die Regression zur Anpassung der Gauß'schen Glockenfunktion an die experimentellen Messdaten wurde hierbei mittels Gleichung 7 berechnet.

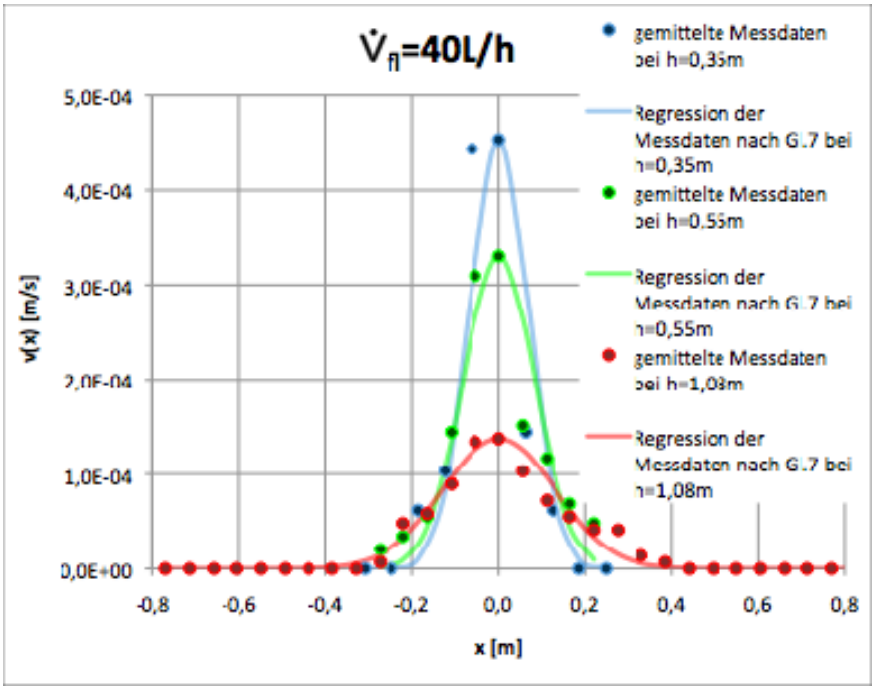


Abbildung 7-18: Sprühbilder in z-Richtung bei y=0m der gemittelten Messwerte und die zugehörigen Gauß'schen Glockenkurven nach Gleichung 7 bei V_{fl}=40L/h in Abhängigkeit des Düsenabstandes h

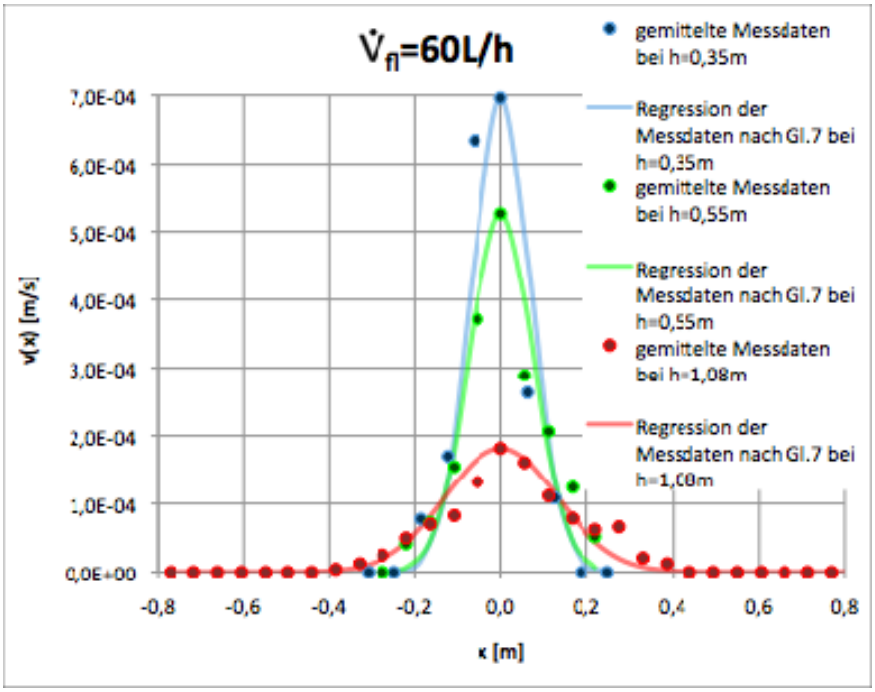


Abbildung 7-19: Sprühbilder in z-Richtung bei y=0m der gemittelten Messwerte und die zugehörigen Gauß'schen Glockenkurven nach Gleichung 7 bei V_{fl}=60L/h in Abhängigkeit des Düsenabstandes h

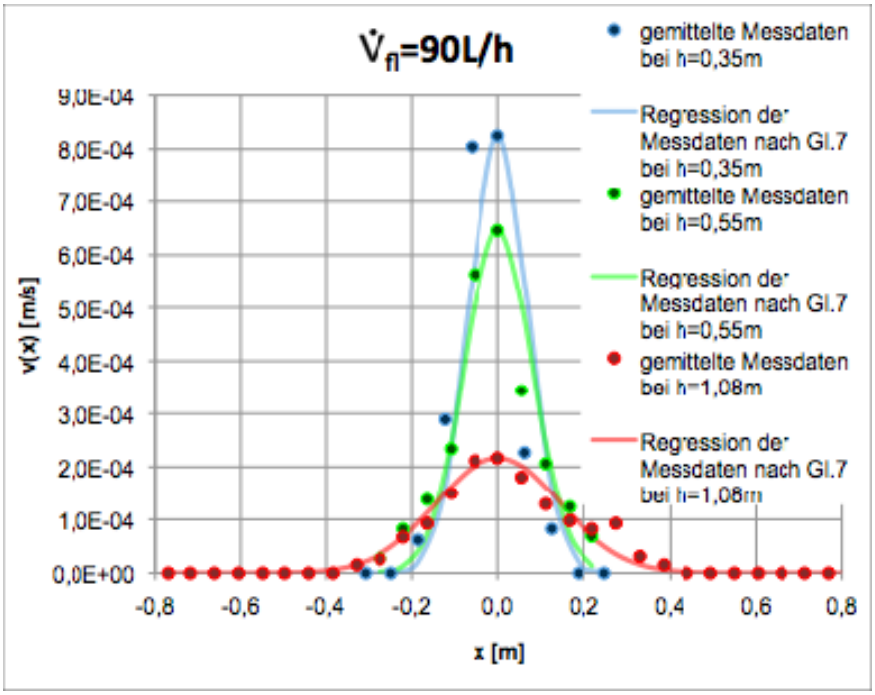


Abbildung 7-20: Sprühbilder in z-Richtung bei y=0m der gemittelten Messwerte und die zugehörigen Gauß'schen Glockenkurven nach Gleichung 7 bei V_{fl}=90L/h in Abhängigkeit des Düsenabstandes h

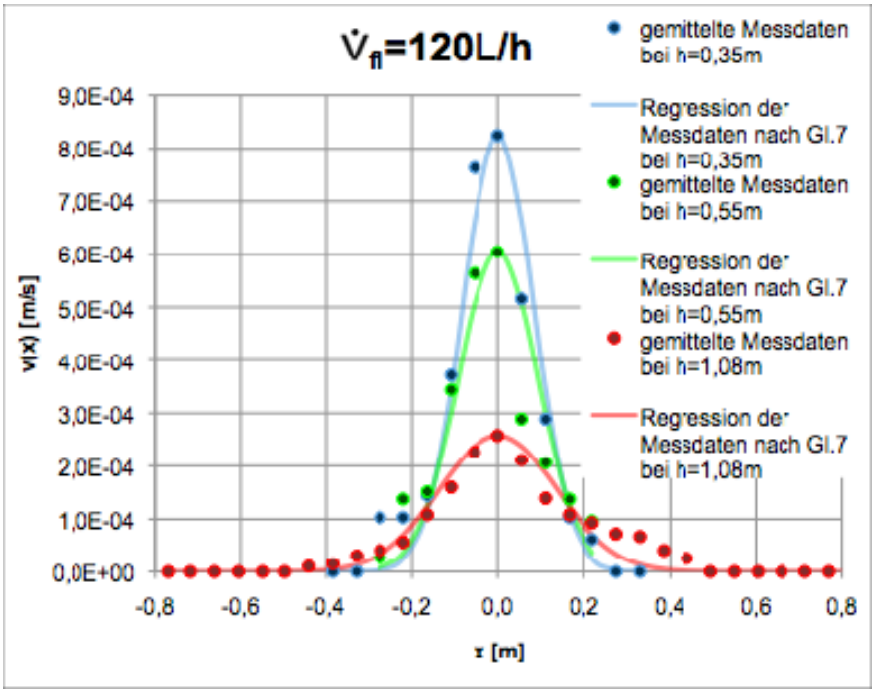


Abbildung 7-21: Sprühbilder in z-Richtung bei y=0m der gemittelten Messwerte und die zugehörigen Gauß'schen Glockenkurven nach Gleichung 7 bei V_{fl}=120L/h in Abhängigkeit des Düsenabstandes h

7.4.2.3 Sprühbilder als Oberflächendiagramme

Schlussendlich soll noch die Sprühform der Flachstrahldüse betrachtet werden. Hierzu wurden sämtliche, aus den Messdaten gemittelten, Befeuchtungsgeschwindigkeitswerte als Oberflächendiagramm mit geeigneter Höhenschichtenauflösung dargestellt (siehe Abbildung 7-22). Nun lässt sich in Abbildung 31 zwar gut erkennen wie die Sprühform aussieht, jedoch soll die oberflächenmäßige Sprühform noch besser dargestellt werden um zum Beispiel Rückschlüsse ziehen zu können, wie die Düse für eine oberflächenmäßige Schüttgutbefeuchtung am besten eingesetzt werden kann. Hierzu wird das Diagramm aus Abbildung 31 in eine Darstellungsform gebracht, welche in Abbildung 32 illustriert ist.

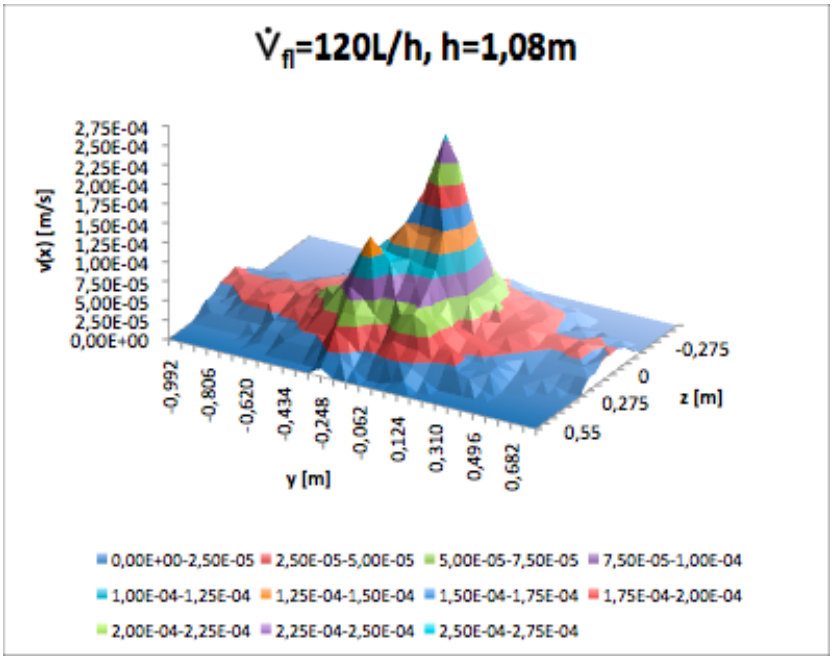


Abbildung 7-22: Sprühbild der Flachstrahldüse bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=120L/h und einem Düsenabstand h=1,08m

Abbildung 7-23 zeigt nun die gemessene Befeuchtungsgeschwindigkeitsverteilung des Sprühbildes aus Abbildung 7-22 als Oberflächendiagramm mit Höhenschichtenauflösung. Zusätzlich wurden einige Höhenschichten durch Einzeichnen von elliptischen bzw. kreisrunden Umrandungen hervorgehoben. So wird ersichtlich, dass die Flachstrahldüse im Flüssigkeitsaustrittsbereich ein kreisrundes Sprühprofil aufweist („Vollkegel-Anteil“), welches sich zur Schüttgutoberfläche hin glockenförmig öffnet („Flachstrahl-Anteil“). Entfernt man sich vom Flüssigkeitsaustritt, so wird deutlich, dass sich der Düsensprüh ellipsenförmig erweitert.

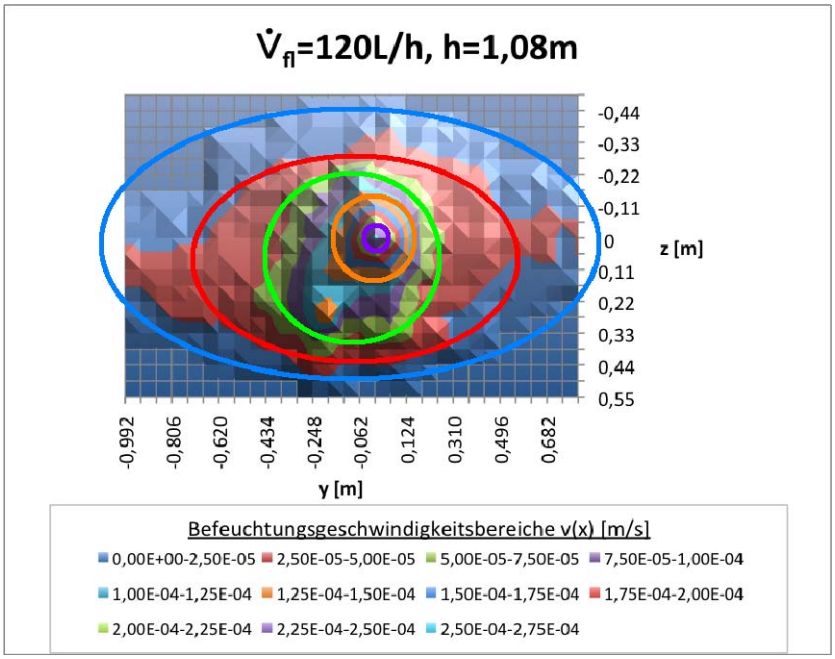


Abbildung 7-23: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=120L/h und einem Düsenabstand h=1,08m

Sämtliche aus den Versuchen ermittelten Sprühbilder der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung sind in den folgenden Abbildungen 7-24 bis 7-34 dargestellt.

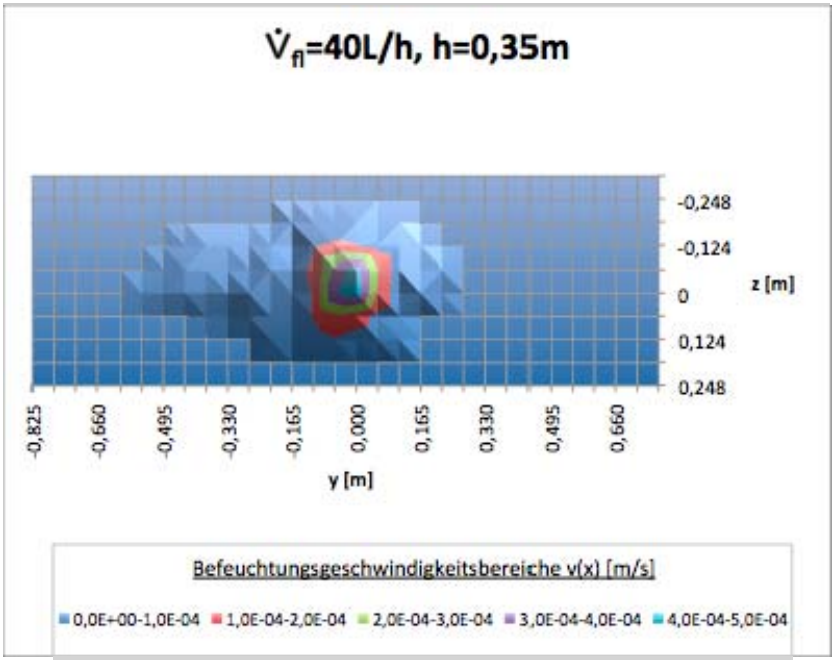


Abbildung 7-24: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=40L/h und einem Düsenabstand h=0,35m

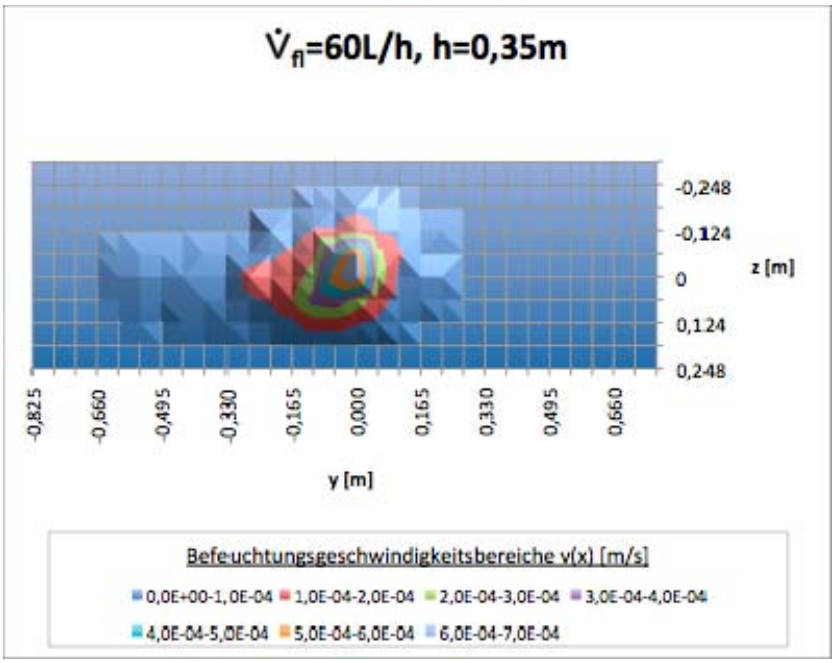


Abbildung 7-25: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=60L/h und einem Düsenabstand h=0,35m

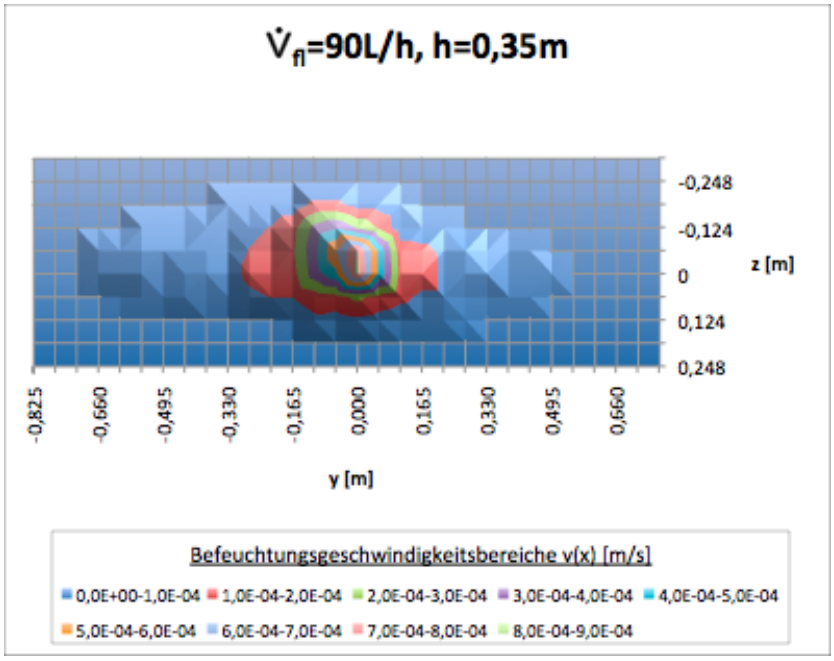


Abbildung 7-26: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=90L/h und einem Düsenabstand h=0,35m

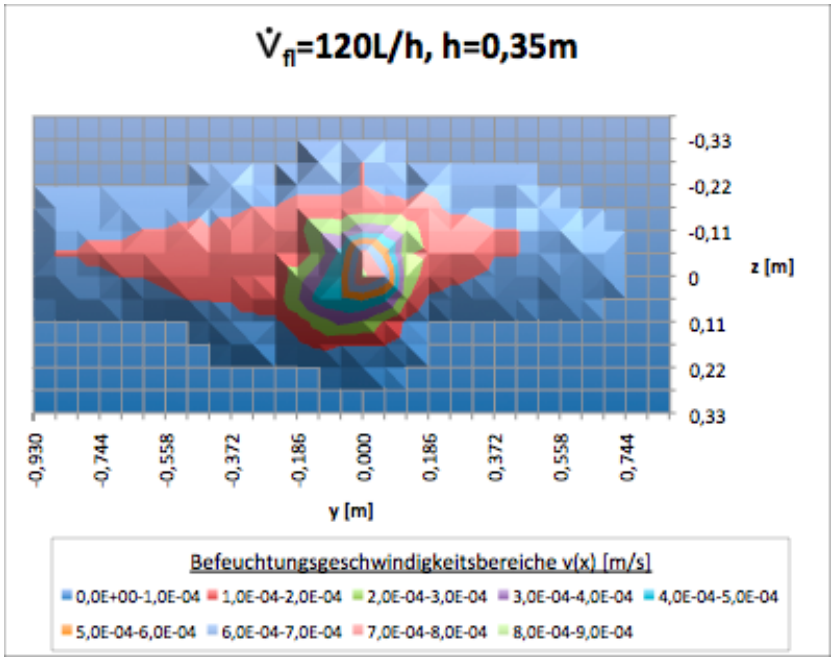


Abbildung 7-27: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=120L/h und einem Düsenabstand h=0,35m

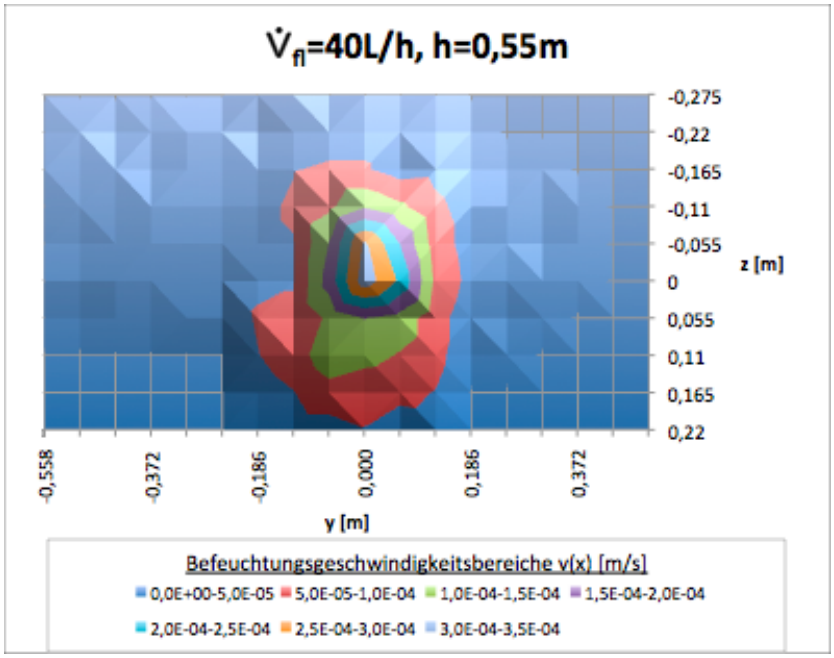


Abbildung 7-28: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=40L/h und einem Düsenabstand h=0,55m

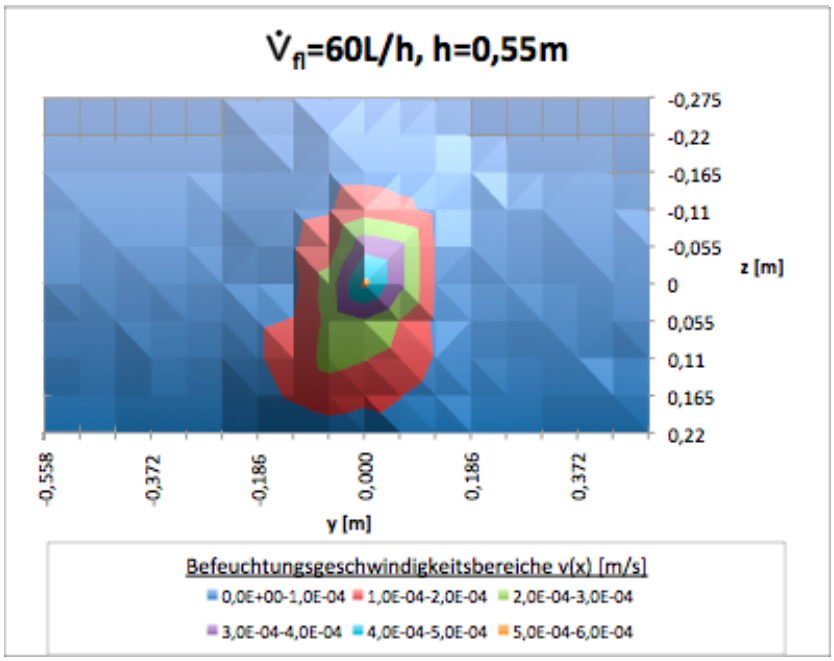


Abbildung 7-29: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=60L/h und einem Düsenabstand h=0,55m

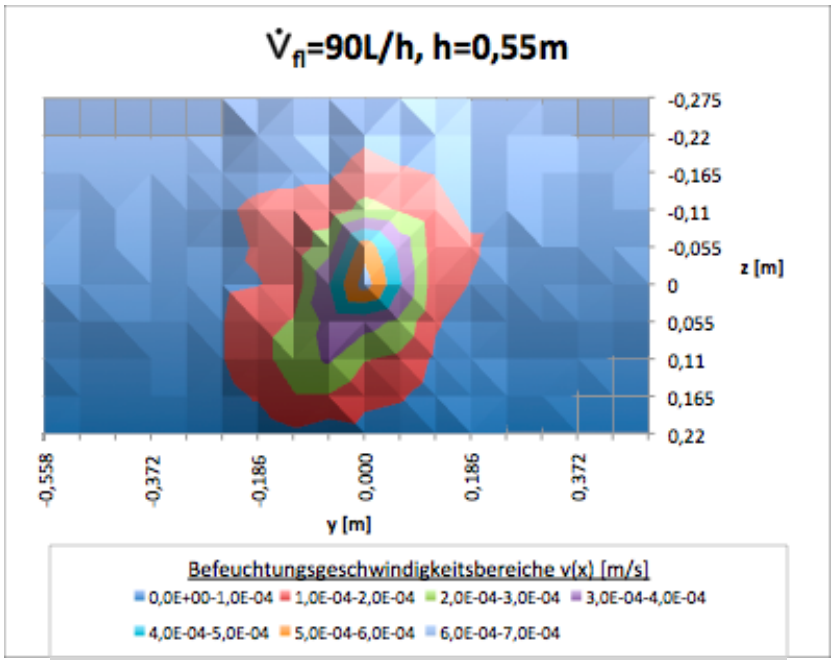


Abbildung 7-30: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=90L/h und einem Düsenabstand h=0,55m

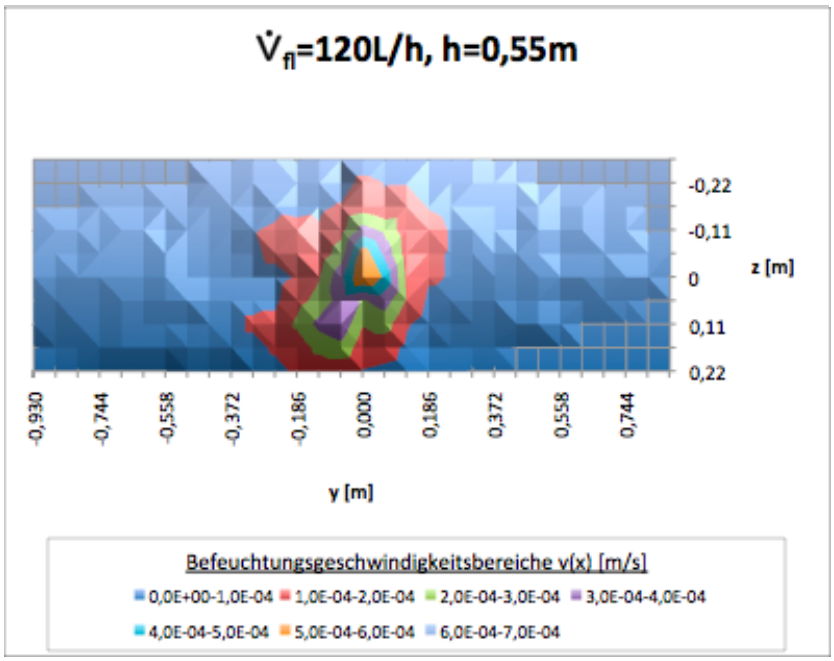


Abbildung 7-31: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=120L/h und einem Düsenabstand h=0,55m

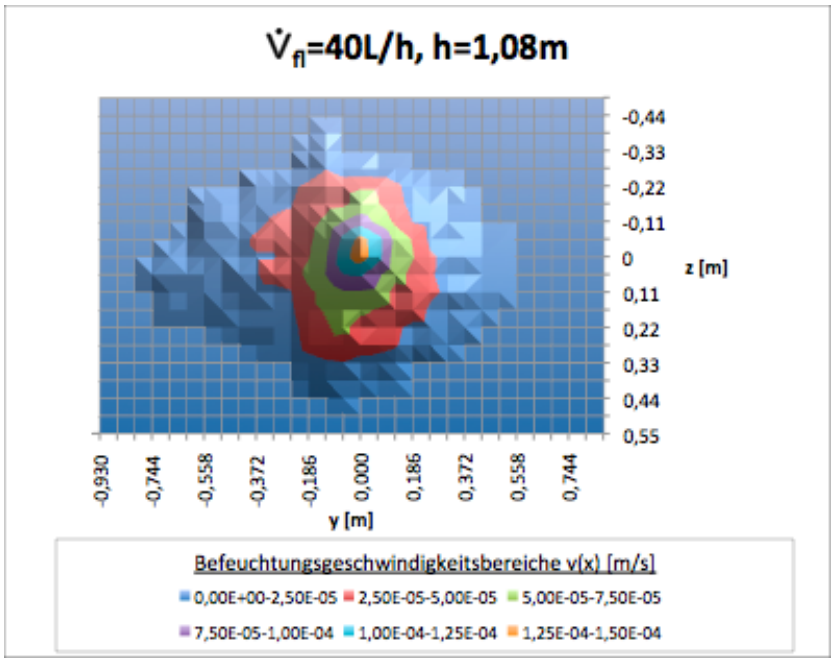


Abbildung 7-32: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=40L/h und einem Düsenabstand h=1,08m

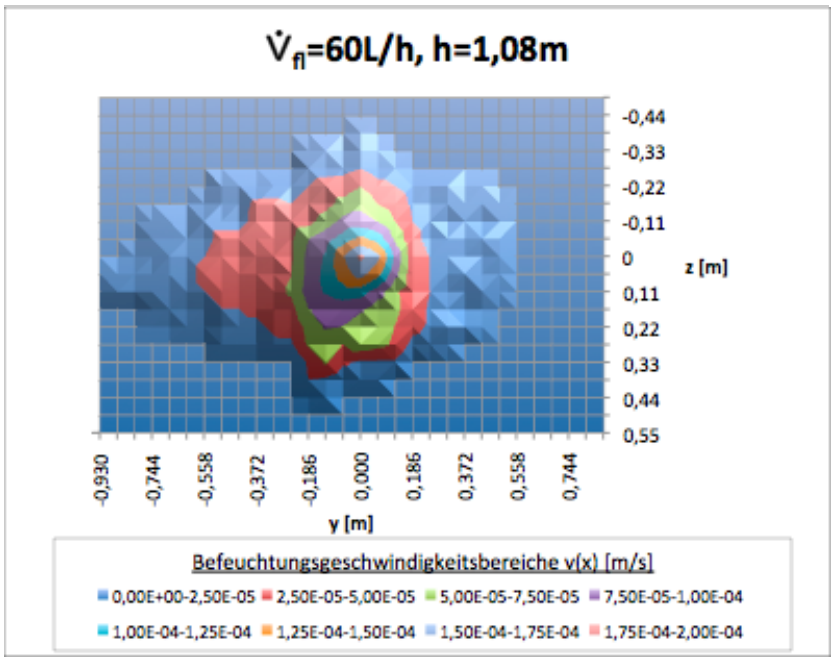


Abbildung 7-33: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=60L/h und einem Düsenabstand h=1,08m

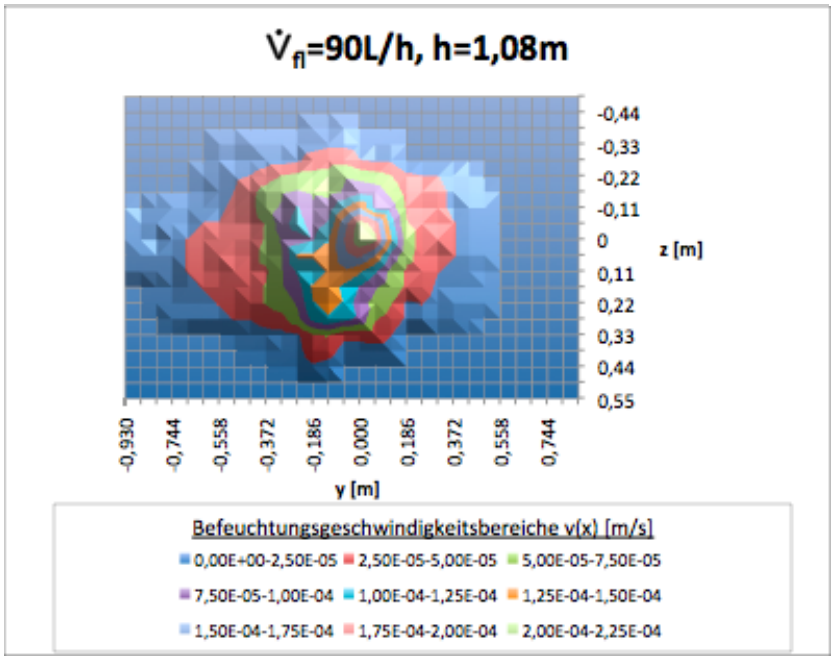


Abbildung 7-34: Sprühbild der Flachstrahldüse in Höhenschichtendarstellung bei einem Wasservolumenstrom V_{fl}=90L/h und einem Düsenabstand h=1,08m

7.4.3 Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse

Bei den Versuchen mit der Flachstrahldüse ergaben sich folgende Erkenntnisse:

- Die herkömmliche Gauß'sche Glockenkurve muss für die Flachstrahldüse adaptiert bzw. erweitert werden. Im düsennahen Bereich gibt es einen „Vollkegel-Anteil", welcher durch die Faktoren a und b gut beschrieben wird. Der „Flachstrahl-Anteil" wird durch die Beiwerte k und d beschrieben.
- Die Flachstrahldüse wird im Vergleich mit der Vollkegeldüse eine kaum bessere Schüttgutbefeuchtung in Breitenrichtung erzielen, denn die Befeuchtungsgeschwindigkeiten abseits des „Vollkegel-Anteils" fallen zu niedrig aus.

7.5 Berechnung und experimentelle Ermittlung des Flüssigkeitsmassenstromprofils über die Förderbandbreite aus der flächenmässigen Befeuchtung

Um PM-10 Grenzwerte bei Förderbandübergaben bei minimalem Wasserverbrauch zu verwirklichen, ist die Erzeugung einer gleichmäßigen Gutfeuchte über die Förderbandbreite anzustreben. Durch die von Messwerten gestützte Glockenfunktion (Gleichung 7-5) steht über die Befeuchtungskonstanten a und b eine Charakterisierungsmöglichkeit des Sprühbildes je Wasservolumenstrom und Düsenhöhe zur Verfügung. Wird nun ein Düsenspray zum Befeuchten des Schüttgutes auf einen Förderband eingesetzt, ist das durch die Glockenfunktion beschriebene Befeuchtungsgeschwindigkeitsfeld der Düse in Förderbandlaufrichtung aufzusummieren und in ein Gutfeuchteprofil über die Förderbandbreite umzurechnen (Abbildung 7-35). Dieses durch die Düse erzeugte Gutfeuchteprofil über die Förderbandbreite ist mit dem notwendigen Gutfeuchteprofil um PM10-Grenzwerte einhalten zu können zu vergleichen und die Abweichungen zu minimieren. Durch finden von Befeuchtungskonstanten a und b bei welchen die Abweichungen zum notwendigen Gutfeuchteprofil über die Förderbandbreite ein Minimum sind, kann über das experimentell ermittelte Datenfeld eine optimale Düsenhöhe h und ein optimaler Wasservolumenstrom $\dot{V}_{fl}$ gefunden werden.

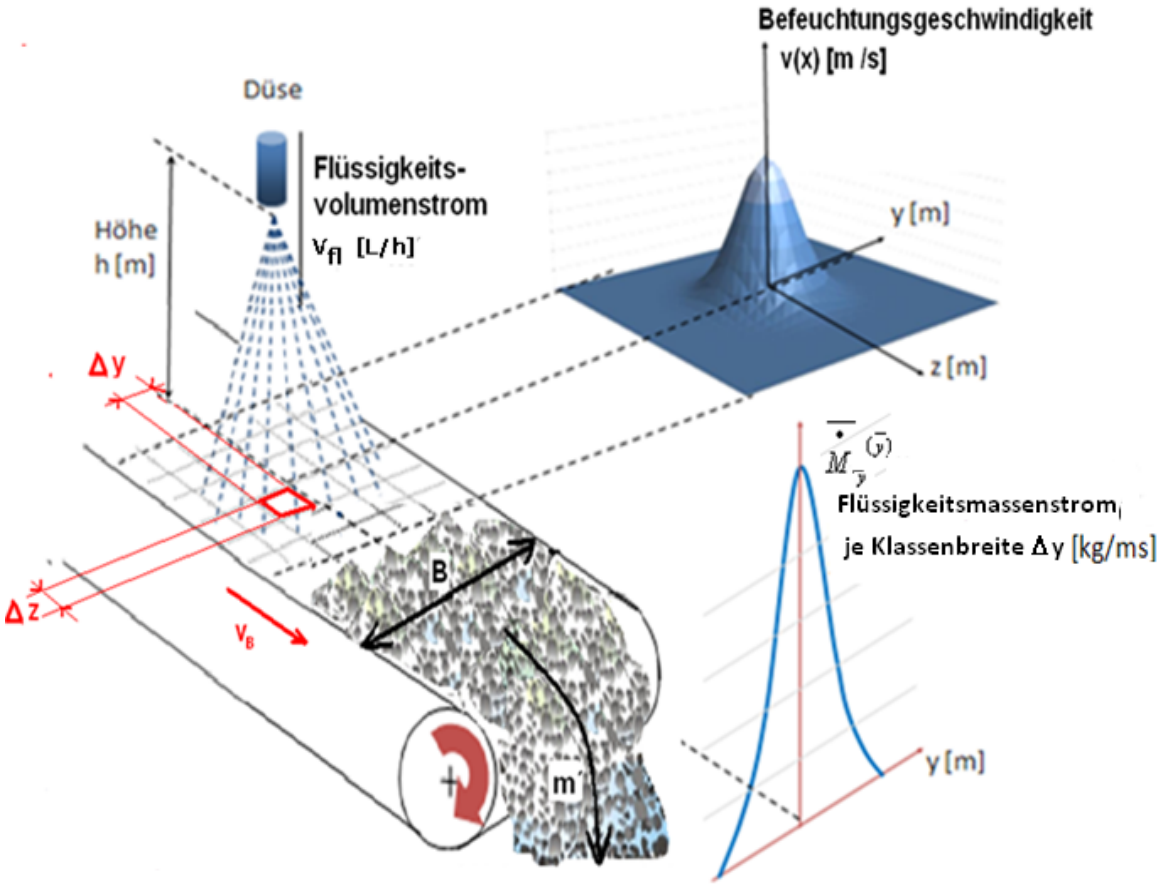


Abbildung 7-35: Umrechnung des v(x) in einen Flüssigkeitsmassenstrom über die Förderbandbreite M´$_y$´ je Klassenbreite

7.5.1 Diskretisierte Summation zur Berechnung des Flüssigkeitsmassenstromes

Ein ortsaufgelöstes Befeuchtungsgeschwindigkeitsfeld kann aus den radial gemessenen Befeuchtungsgeschwindigkeiten durch Gleichung 1 berechnet werden (Abbildung 7-35). Dieses

Ortsaufgelöste Befeuchtungsgeschwindiglkeitsfeld lässt sich als Funktion des Befeuchtungsradius x darstellen (Abbildung 7-36).

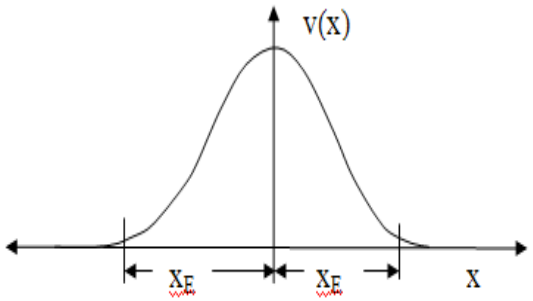


Abbildung 7-36: Befeuctungsgeschwindigkeit als Funktion des Befeuchtungsradius.

x_E Grenzwert = beidseitig wo $v(x_E)=0{,}01*v_{max}$ [m]

y_b Förderbandbreite [m]

Komponentenzerlegung des Befeuchtungsradius x (Abbildung 7-37).

$$x^2 = y^2 + z^2 \tag{7-7}$$

Einsetzten von Gleichung 7-7 in Gleichung 7-5:

$$v_y(z) = a * e^{-b*(y^2+z^2)} \tag{7-8}$$

$v_y(z)$ Befeuchtungsgeschwindigkeit in Förderbandlaufrichtung z an der Stelle y [m/s]

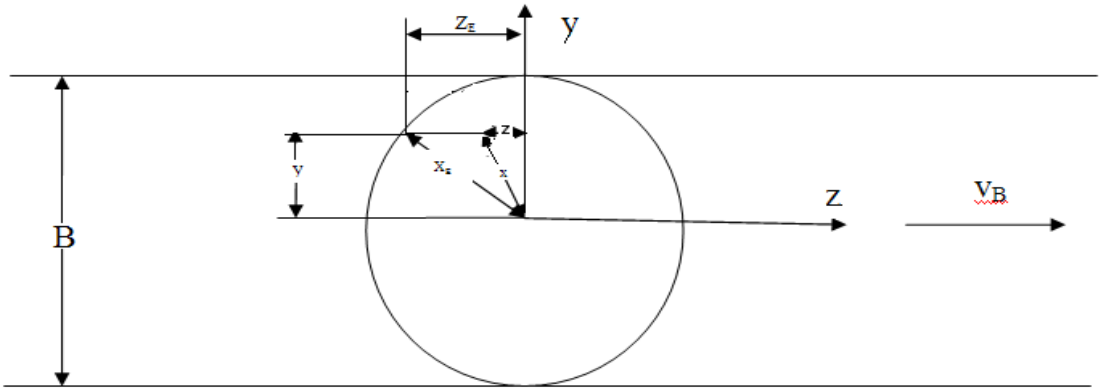


Abbildung 7-37: Befeuchtungsgeschwindigkeitsfeld in Abhängigkeit des in Komponenten y und z zerlegten Befeuchtungsradiuses x.

$$z_E = \sqrt{x_E^{\,2} - y^2} \tag{7-9}$$

Z Befeuchtungsdistanz in Förderbandlaufrichtung [m]

z_E limit in Förderbandlaufrichtung bei welchen der Grenzwert x_E erreicht ist [m]

y Befeuchtungsdistanz über die Förderbandbreite [m]

$$\Delta y = \frac{x_E}{20} = \frac{x_E}{N_y} \tag{7-10}$$

Δy Klassenweite in y Richtung [m]

N_y Gesamtanzahl an Klassen in y Richtung [ ]

$$\overline{y} = N_j * \Delta y + \Delta y / 2 \tag{7-11}$$

$\overline{y}$ Klassendurchschnittskoordinate in y Richtung zwischen den Grenzen $-x_E$ und $+x_E$ [m]

N_j=0,1,2..N_y-1: Laufvariable

$$v_B = \frac{\Delta z}{\Delta t} \tag{7-12}$$

v_B Förderbandgeschwindigkeit [m/s]

Δz Klassenweite in Förderbandlaufrichtung z [m]

Δt Zeitintervall in dem die Distanz Δz zurrückgelegt wird [s]

$$\Delta z = \frac{z_E}{20} = \frac{z_E}{N_z} \tag{7-13}$$

$$\bar{z} = \Delta z * N_i + \Delta z / 2 \tag{7-14}$$

$\bar{z}$ Klassendurchschnittskoordinate in z Richtung[m]

N_z Gesamtanzahl an Klassen in z Richtung [ ]

N_i=0,1,2...N_z-1: Laufvariable

Dar $\bar{y}$, $\bar{z}$ Koordinaten als Durchschnittskoordinaten definiert sind kann ein $v_{\bar{y}}(\bar{z})$ unter Verwendung von Gleichung 7-8 für jede Klasse formuliert werden

$$v_{\bar{y}}(\bar{z}) = a * e^{-b*(\bar{y}^2 + \bar{z}^2)} \tag{7-15}$$

$v_{\bar{y}}(\bar{z})$ Befeuchtungsgeschwindigkeit in Förderbandlaufrichtung z an der Stelle $\bar{y}$ [m/s]

$$\Delta\overline{V_{\bar{y}}} = v_{\bar{y}}(\bar{z}) * \Delta y * \Delta t \tag{7-16}$$

$\Delta\overline{V_{\bar{y}}}$ Wasservolumen in Förderbandlaufrichtung z

je Klassenweite Δy [m^3/m]

Umrechnung der Gleichung 7-12 und Einsetzten in Gleichung 7-16 ergibt:

$$\Delta\overline{V_{\bar{y}}} = v_{\bar{y}}(\bar{z}) * \Delta y * \frac{\Delta z}{v_B} \tag{7-17}$$

Beidseitiges aufsummieren in Förderbandlaufrichtung z ergibt:

$$\overline{V_{\bar{y}}} = \frac{2 * \Delta y}{v_B} * \sum v_{\bar{y}}(\bar{z}) * \Delta z \tag{7-18}$$

$\overline{V_{\bar{y}}}$ Wasservolumen per Förderbandlängeneinheit in Förderbandlaufrichtung z bis zum Grenzwert z_E je Klassenweite Δy an der Stelle $\bar{y}$ [m^3/m]

$$\overline{V_{\bar{y}}} = \frac{2*\Delta y}{v_B} * \sum_{N_i=0}^{N_i=N_z-1} v_{\bar{y}}(\Delta z * N_i + \Delta z/2) * \Delta z \qquad (7\text{-}19)$$

$$T = \frac{2*z_E}{v_B} \qquad (7\text{-}20)$$

T Zeit in der die Kontrollfläche Δz*Δy mit v_B von $-z_E$ zu $+z_E$ verschoben wird [s]

$$\overline{M_{\bar{y}}} = \overline{V_{\bar{y}}} * \rho \qquad (7\text{-}21)$$

ρ .Dichte des Wassers [kg/m^3]

$\overline{M}_{\bar{y}}$ Masse an Wasser per Förderbandlängeneinheit an der Stelle $\bar{y}$ [kg/m]

Berechnung eines Flüssigkeitsmassenstromes je Klassenweite Δy unter Verwendung der Gleichungen (7-19),(7-20),(7-21) ergibt:

$$\overline{\dot{M}_{\bar{y}}} = \frac{\overline{M}_{\bar{y}}}{T} = \frac{2*\Delta y}{v_B} * \rho * \sum_{0}^{N_z-1} v_{\bar{y}}(\Delta z * N_i + \Delta z/2) * \Delta z * \frac{v_B}{2*z_E} \qquad (7\text{-}22)$$

$\overline{\dot{M}_{\bar{y}}}$ Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenweite Δy in Förderbandlaufrichtung z aufsummiert zwischen $-z_E$ bis $+z_E$ an der Stelle $\bar{y}$ [kg/ms]

Da sich die Förderbandgeschwindigkeit v_B herauskürzt kann folgender Ausdruck formuliert werden:

$$\overline{\dot{M}_{\bar{y}}} = \frac{\Delta y}{z_E} * \rho * \sum_{0}^{Nz-1} v_{\bar{y}}(\Delta z * N_i + \Delta z/2) * \Delta z \qquad (7\text{-}23)$$

Durch berechnen von $\overline{\dot{M}_{\bar{y}}}$ bei verschiedenen $\bar{y}$ Positionen zwischen

- $(\overline{y} = N_y * \Delta y + \Delta y/2)$ und $(\overline{y} = N_y * \Delta y + \Delta y/2)$ in Δy Schritten durch Gleichung 7-23 kann $\overline{\dot{M}}_{(\bar{y})}$ über die Förderbandbreite aufgetragen werden (Abbildung 7-38) [kg/ms]

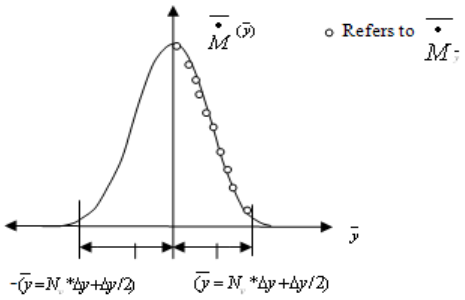


Abbildung 7-38: Flüssigkeitsmassenstrom je Klasse Δy über die Förderbandbreite

7.5.2 Experimentelle Ermittlung des Flüssigkeitsmassenstromprofils über die Förderbandbreite aus der flächenmässigen Befeuchtung

Aus der Vermessung des Sprühbildes der Vollkegel-Zweistoffdüse (1005 VSR Industrietechnik GmbH) mit Vorschub soll dürch diese experimentelle feststellung von $\overline{\dot{M}}\bar{y}$ der zuvor vorgestellte Rechenweg bewiesen werden.

Variiert werden:

- Wasserdurchfluss $\dot{V}_w$,
- Druck der Versorgungsluft p_L ,
- Düsenabstand h zum Messraster jeweils:
- Mit Vorschub v_b (Summation der Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) zu einem Flüssigkeitsmassenstrom $\overline{\dot{M}}\bar{y}$ je Klassenbreite Δy)
- Statische Aufzeichnung des Sprühbildes

7.5.2.1 Versuchsaufbau zur Ermittlung des Flüssigkeitsmassenstromprofils $\overline{\dot{M}}\bar{y}$

Die, von der Firma VSR Industrietechnik GmbH zur Verfügung gestellte Vollkegel-Zweistoffdüse Kapitel 5.1.3.1, wurde wie in Kapitel 5.2.2.1.5 beschrieben in die Anlage eingebaut (Position $4A_0$). Um das Sprühbild der Düse bei verschiedenen Betriebszuständen erfassen zu können, wurden Parameter, wie Wasserdurchfluss $\dot{V}_w$, Druck der Versorgungsluft p_L und Düsenabstand h zum Messraster variiert. Um den jeweiligen Betriebspunkt der Zweistoffdüse einzustellen, stand für die Durchflussmessung ein Rotameter, und für die Druckmessung ein Manometer zur Verfügung. Die Sprühdauer wurde mittels Stoppuhr kontrolliert. ($\dot{V}_w$ - Wasservolumenstrom durch die Zweistoffdüse [L/h]; p_L - Druck der Versorgungsluft [bar])

Wie schon in der Problemstellung erwähnt, stellt die Gleichmäßigkeit der oberflächen- wie auch tiefenbezogenen Befeuchtung von Schüttgütern ein Problem dar. Ein Beispiel, wo Wassersprühsysteme bei der Schüttgutmanipulation eingesetzt werden, stellt der Schüttguttransport durch Förderbänder dar. Wird ein Schüttgut mittels Förderband transportiert und dieses per Düsensprüh befeuchtet, so muss für einen anschließend staubemissionsarmen Schüttgutabwurf gewährleistet werden, dass das Schüttgut schon vor der Abwurfstelle einen optimalen Feuchtegehalt aufweist.

Die Versuche wurden in der unter Kapitel 5.1 beschriebenen Versuchsapparatur zur Untersuchung der sekundären Staubabscheideeffektivität durchgeführt.

Um die Reproduzierbarkeit der Messungen sicherzustellen, wird für alle Versuche die Düse 1005 VSR in der Position $4A_0$ verwendet, welche in der Abbildung 7-39 zu sehen ist. Außerdem ist auch das verwendete Koordinatensystem zu erkennen

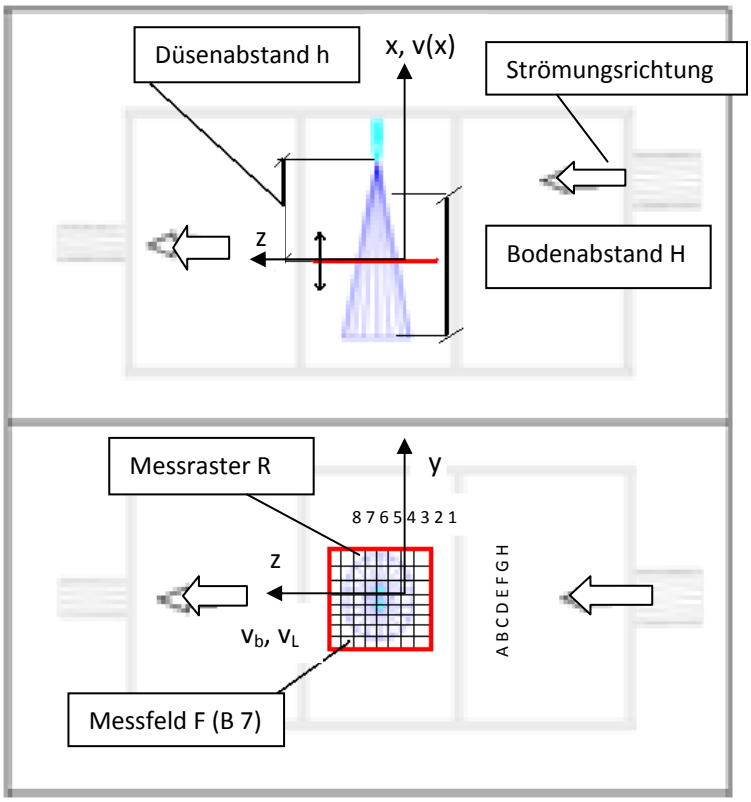


Abbildung 7-39: Anordnung des Messrasters unter der Düse

Der Messraster R ist eine virtuelle Ebene von 400 x 400 mm (die rote Ebene in Abbildung 8); er hat also eine Fläche von insgesamt 0,16 m^2 und liegt mit einem vertikalen Düsenabstand von h - dem Abstand zwischen Messraster R und der Düsenspitze - zentral unter der Zweistoffdüse. Der Messraster wird von einem kartesischen Koordinatensystem aufgespannt, dessen x - y Ebene aus einer Matrix von 8 mal 8 Messfeldern F besteht, welche Spaltenweise in y - Richtung mit A - H und Zeilenweise in z - Richtung (Strömungsrichtung) mit 1-8 benannt werden. Ein solches Messfeld hat eine Größe von 50 x 50 mm, also eine Fläche von 0,0025 m^2. Der Bodenabstand H wird von der Düsenspitze bis zum Boden der Versuchskammer gemessen und beträgt für alle Versuche konstant H = 1,3 m. Für die durchgeführten Versuche wurde lediglich der Düsenabstand h (Abstand zwischen Düsenspitze und Messraster) variiert. Der Messraster wird im Versuch aus 64 tarierten 125 ml Laborgläsern realisiert, dies zeigt Abbildung 4; er liegt dabei genau am oberen Rand der Gläser. Diese Laborgläser haben einen Außendurchmesser von d_A = 50 mm, sind 82 mm hoch, der Durchmesser der Öffnung beträgt d_i = 32 mm. Um zwei Sprühversuche pro Versuchstag durchführen zu können, wurden zwei Sätze aus je 64 Gläsern mit A1 - H8, und um sie leichter unterscheiden zu können mit I1 - P8 beschriftet und auf der Analysenwaage tariert siehe Abbildung 7-40.

Abbildung 7-40: Anordnung der 64 Messgläser zur Entstaubungsmessung

Verwendete Analysenwaage, Satorius BP211D d = 0,01mg (80g) In Abbildung 7-41 ist ein Messglas auf der Analysenwaage zu sehen.

Abbildung 7-41: Analysenwaage, Satorius BP211D

Es wurden dabei Messungen mit der Vorschubgeschwindigkeit v_R des Messrasters durchgeführt, um das Sprühbild zu summieren und Bedingungen, wie sie auf einem bewegten Förderband herrschen zu simulieren. Die Messungen werden bei verschieden Vorschubgeschwindigkeiten des Messrasters durchgeführt, um auch für kleine Wasservolumenströme durch die Zweistoffdüse $\dot{V}_w$ gut wägbare Wassermassen $m_{ij,}$, und damit eine möglichst hohe Auflösung des Sprühbildes zu erhalten. Die Vorschubgeschwindigkeit v_R beträgt je nach Wasservolumenstrom 0,00083 m/s bis 0,005 m/s. Um besser vergleichen zu können, werden die verschieden Geschwindigkeiten anschließend auf eine normierte Vorschubgeschwindigkeit v_b

umgerechnet (Gleichung 7-24). Diese, ist äquivalent zur Bandgeschwindigkeit eines gedachten Förderbandes. Anschließend kann die eingebrachte Flüssigkeit auf einen Flüssigkeitsmassenstrom $\overline{\dot{M}_{\bar{y}}}$ je Klassenbreite Δy umgerechnet werden. $\overline{\dot{M}_{\bar{y}}}$ ergibt sich also, aus dem dreidimensionalen Sprühbild der Zweistoff-Kegeldüse, weil der Messraster unter dieser mit einer Vorschubgeschwindigkeit v_b bewegt wird. Dies führt zu der oben erwähnten Summation der versprühten Flüssigkeit (Abbildung 7-42). Das kann auch als Summieren der Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) aufgefasst werden. Diese Befeuchtungsgeschwindigkeit wird später bei der statischen Bestimmung des Sprühbildes (v_b=0) und bei der Abscheidung von Prüfstaub aus strömender, beladener Luft erneut auftreten.

$$v_b = v_R * f_v \tag{7-24}$$

v_R …. Vorschubgeschwindigkeit des Messrasters [m/s]
v_b …. Normierte Vorschubgeschwindigkeit [m/s]
f_v ….. Normierungsfaktor [-]

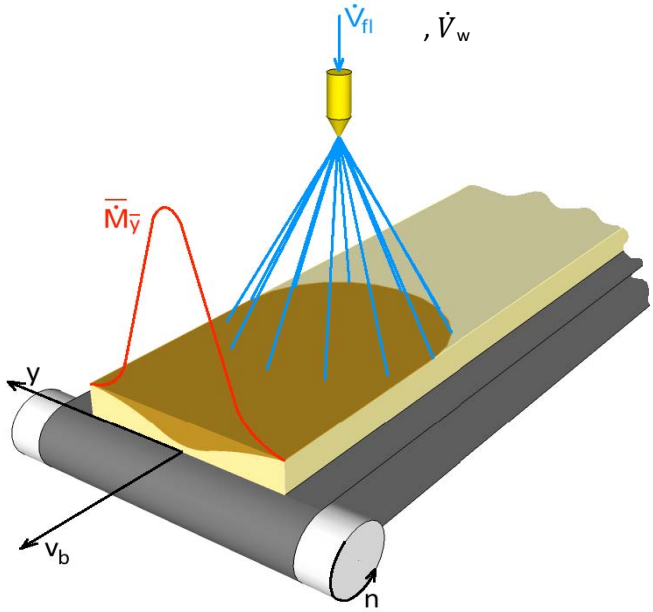


Abbildung 7-42: Befeuchtung von Schüttgut auf einem Förderband

7.5.2.2 Versuchsdurchführung

Um nun das Sprühbild der Vollkegeldüse 1005 VSR Industrietechnik GmbH zu erhalten, wurden über 30 Versuche mit den variierenden Düsenparametern, Düsenabstand h, Wasserdurchfluss $\dot{V}_w$ und Druck der Versorgungsluft p_L durchgeführt. Dabei wurde der Wassersprüh in den in den zuvor. beschriebenen Gläsern (Abbildung 7-40) (Kapitel 7.5.2.1) aufgefangen und anschließend mit der Analysenwaage (Kapitel 7.5.2.1) ausgewogen. Daraus ergaben sich mehr als 2000 Einzelmessungen. Die Wassermasse in jedem der 64 Gläser, wird nacheinander abgewogen, und mit der Querschnittfläche des Messglases, sowie mit der gewählten Sprühdauer auf eine Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) umgerechnet. Anschließend kann mit der Vorschubgeschwindigkeit v_b und der Klassenbreite y = 50 mm – die sich aus den Messfeldabmessungen ergibt – auf den Flüssigkeitsmassenstrom $\overline{\dot{M}_{\bar{y}}}$ je Klassenbreite Δy

umgerechnet werden. Diese Betrachtung als Massenstrom ist möglich, da die Geschwindigkeit unabhängig von der betrachteten Fläche des Feldes ist.

Jede Messung wurde drei Mal mit den gleichen Einstellungen durchgeführt, um Schwankungen und Fehler in der Messung aufzuzeigen, und die Reproduzierbarkeit sicherzustellen.

Es wurden Messungen des Sprühbildes über den gesamten Betriebsbereich der Düse durchgeführt:

- Vier unterschiedliche Volumenströme $\dot{V}_w$ (3,6L/h; 20L/h; 40L/h; 60L/h)
- Zwei verschiedene Drücke p_L (3bar; 5bar)
- Zwei Düsenabstände h (0,35m; 1,01m)

7.5.2.3 Auswertung

Die Befeuchtungsgeschwindigkeit erhalten werden aus Gleichung 7-25 erhalten.

$$v(x) = \frac{m_{ij}}{A_g * \rho_W * t_s} \tag{7-25}$$

mit

$$m_{ij} = m_{ijg} - m_{ijt} \tag{7-26}$$

und

$$A_g = \frac{d_i^{\,2} * \pi}{4} \tag{7-27}$$

Der Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ berechnet sich also nach folgender Gleichung 7-28.

$$\overline{\dot{M}\bar{y}} = \frac{v(x) * t_s * A_F * \rho_W * v_b}{A_B} \tag{7-28}$$

Dimensionsanalyse:

$$\left[\overline{\dot{M}\bar{y}}\right] = \left[\frac{m * s * m^2 * kg * m}{s * m^2 * m^3 * s}\right] = \left[\frac{kg}{m * s}\right]$$

v(x)	Befeuchtungsgeschwindigkeit	[m/s]	
m_{ij}	Wassermasse im Glas ij	[g]	
i	Zeile im Messraster	[-]	(1-8)
j	Spalte im Messrater	[-]	(A-H)
ρ_W	Dichte von Wasser	[kg/m^3]	ρ_W = 1000kg/m^3
A_g	Querschnittfläche eines Messglases	[m^2]	A_g =0,0080424m^2
m_{ijg}	Masse des Glases ij nach dem Sprühversuch	[g]	
m_{ijt}	Tara des Glases ij	[g]	
d_i	Innendurchmesser der Gläser	[mm]	d_i = 32mm
t_s	Sprühzeit	[s]	

$\overline{\dot{M}\bar{y}}$	Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite	[kg/m*s]	
A_F	Fläche des Messfeldes	[m^2]	$A_F = 0{,}0025m^2$
A_B	Bezugsfläche	[m^2]	$A_B = 1m^2$
v_b	Vorschubgeschwindigkeit	[m/s]	$v_b = 0{,}005m/s$

7.5.2.4 Sprühbild mit Vorschub

Für eine Messung ergeben sich somit aus der Differenzwiegung der 64 Gläser und Berechnung mit Gleichungen 7-25 – 7-28 beispielsweise die folgenden Datentabellen. Hier für $\dot{V}_w$ = 3,6L/h; p_L = 5bar; Vorschubgeschwindigkeit v_b = 0,005m/s, und einen Düsenabstand h = 0,35m.

Tabelle 7-1: m_{ij} für $\dot{V}_w$ = 3,6L/h; p_L = 5bar; h = 0,35m; v_b = 0,005m/s

mij [g]	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,131	0,308	0,736	1,619	1,412	0,687	0,327	0,174
2	0,099	0,263	0,562	1,503	1,364	0,564	0,241	0,122
3	0,105	0,224	0,673	1,469	1,194	0,669	0,278	0,132
4	0,068	0,208	0,683	1,430	1,122	0,619	0,297	0,132
5	0,069	0,221	0,564	1,434	1,198	0,659	0,349	0,193
6	0,080	0,231	0,848	1,764	1,428	0,619	0,265	0,158
7	0,103	0,256	0,635	1,624	1,199	0,564	0,244	0,099
8	0,083	0,190	0,585	1,586	1,077	0,433	0,184	0,085

Mit den Gleichungen 7-25 bis 7-27 erhalten wir somit für v(x):

Tabelle 7-2: v(x) für $\dot{V}_w$ = 3,6L/h; p_L = 5bar; h = 0,35m; v_b = 0,005m/s

v(x) [m/s]	A	B	C	D	E	F	G	H
1	2,73E-06	6,38E-06	1,53E-05	3,36E-05	2,93E-05	1,42E-05	6,78E-06	3,61E-06
2	2,05E-06	5,45E-06	1,16E-05	3,11E-05	2,83E-05	1,17E-05	4,99E-06	2,53E-06
3	2,18E-06	4,64E-06	1,39E-05	3,04E-05	2,47E-05	1,39E-05	5,76E-06	2,74E-06
4	1,41E-06	4,31E-06	1,42E-05	2,96E-05	2,33E-05	1,28E-05	6,16E-06	2,74E-06
5	1,43E-06	4,58E-06	1,17E-05	2,97E-05	2,48E-05	1,37E-05	7,23E-06	4,00E-06
6	1,66E-06	4,79E-06	1,76E-05	3,66E-05	2,96E-05	1,28E-05	5,49E-06	3,27E-06
7	2,13E-06	5,31E-06	1,32E-05	3,37E-05	2,48E-05	1,17E-05	5,06E-06	2,05E-06
8	1,72E-06	3,94E-06	1,21E-05	3,29E-05	2,23E-05	8,97E-06	3,81E-06	1,76E-06

Und mit Gleichung 7-28 für $\overline{\dot{M}\bar{y}}$:

Tabelle 7-3: $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ für $\dot{V}_w$ = 3,6L/h; p_L = 5bar; h = 0,35m; v_b = 0,005m/s

My [kg/m*s]	A	B	C	D	E	F	G	H
1	6,81E-06	1,60E-05	3,81E-05	8,39E-05	7,32E-05	3,56E-05	1,69E-05	9,01E-06
2	5,13E-06	1,36E-05	2,91E-05	7,79E-05	7,07E-05	2,92E-05	1,25E-05	6,32E-06
3	5,44E-06	1,16E-05	3,49E-05	7,61E-05	6,19E-05	3,47E-05	1,44E-05	6,84E-06
4	3,53E-06	1,08E-05	3,54E-05	7,41E-05	5,81E-05	3,21E-05	1,54E-05	6,84E-06
5	3,57E-06	1,14E-05	2,92E-05	7,43E-05	6,21E-05	3,41E-05	1,81E-05	1,00E-05
6	4,14E-06	1,20E-05	4,39E-05	9,14E-05	7,40E-05	3,21E-05	1,37E-05	8,19E-06
7	5,34E-06	1,33E-05	3,29E-05	8,41E-05	6,21E-05	2,92E-05	1,26E-05	5,13E-06
8	4,30E-06	9,84E-06	3,03E-05	8,22E-05	5,58E-05	2,24E-05	9,53E-06	4,40E-06

Pro Messung erhalten wir also für jede der 8 Reihen ein Befeuchtungsprofil:

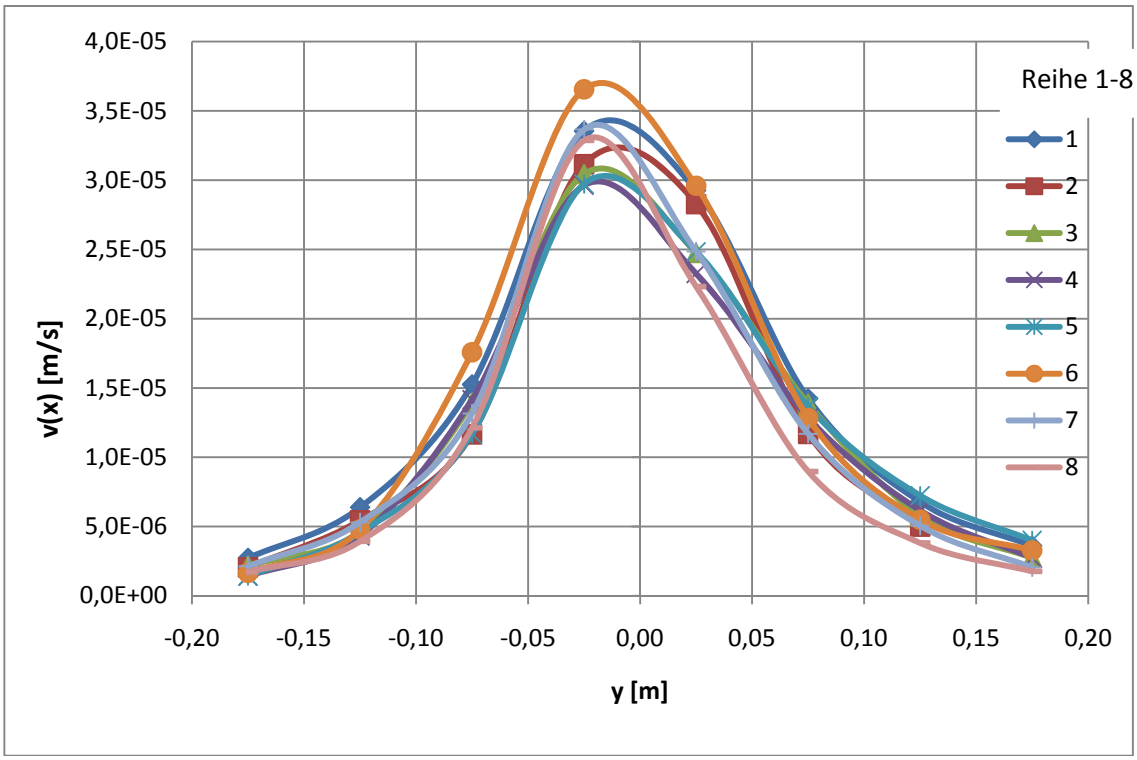


Abbildung 7-43: v(x) 8 Reihen für $\dot{V}_w$ = 3,6L/h; p_L = 5bar; h = 0,35m; v_b = 0,005m/s

Jede der 3 Wiederholungsmessungen für die gleichen Düsenparameter – Volumenströme $\dot{V}_w$ (3,6L/h; 10L/h; 20L/h; 40L/h; 60L/h), Drücke p_L (3bar; 5bar) und Düsenabstände h (0,35m; 1,01m) – besteht jeweils aus 8 Einzelmessungen des Befeuchtungsprofils (Abbildung 8). Insgesamt wurden 30 Wiederholungsmessungen mit 240 Einzelmessungen der 8 Messpunkte pro Reihe durchgeführt. Dies ergibt also 1920 Messungen der Wassermasse m_{ij} pro Messfeld.

Bildet man aus den 8 Profilen den Mittelwert, erhält man nun pro Versuch ein Befeuchtungsprofil. Für die in Tabelle 7-1 – Tabelle 7-3, sowie Abbildung 7-39 dargestellte Messung, ist dieses gemittelte Befeuchtungsprofil, sowie die Standardabweichung bezogen auf den Messwert in Abbildung 7-43 zu sehen.

Mittelwert

Der Mittelwert aus 8 Reihen ergibt sich aus:

$$v(x)_{Mij} = \frac{1}{8} * \sum_{j=1}^{j=8} v(x)_{ij} \qquad \text{für : i = A bis H} \quad [m/s] \qquad (7\text{-}29)$$

$v(x)_{Mij}$ …. Berechneter Mittelwert der Befeuchtungsgeschwindigkeit aus 8 gemessenen Reihen [m/s]

Standardabweichung :

Die Standardabweichung s, der Vertrauensbereich VB berechnet sich zu:

$$s := \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(v(x)_{ij} - v(x)_{Mij})^2} \qquad (7\text{-}30)$$

$$VB = s_{\%} = s * 100 \qquad [\%]$$

n	Anzahl der Messungen	[-]	n = 8
s	Standardabweichung der Stichprobe	[m/s]	
$s_{i\%}$	Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert	[%]	
s_{max}	Maximale Standardabweichung der Stichprobe	[m/s]	
$s_{max\%}$	Maximale Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert	[%]	

Die Standardabweichung s der Stichprobe wurde für $\dot{V}_w$ = 3,6L/h, die Messung in Abbildung 7-39, und für $\dot{V}_w$ = 60L/h berechnet. Da die Berechnung für den kleinsten und den größten verwendeten Volumenstrom $\dot{V}_w$ durchgeführt wurde, gibt dies Auskunft über den Vertrauensbereich VB – oder auch Konfidenzintervall – aller durchgeführten Messungen der Befeuchtungsprofile. Die Standardabweichung s beträgt im ungünstigsten Fall, am Rand des Messrasters und bei $\dot{V}_w$ = 3,6L/h maximal $s_{max\%}$ = 22 %, bezogen auf den Mittelwert einer Spalte des Messrasters $v(x)_{Mij}$. Dieser große Randfehler entsteht durch die sehr kleinen gemessen Wassermassen m_{ij} , in den dort positionierten Gläsern. Dies ist in Abbildung 7-43 dargestellt. Das ist aber ein Extremfall, denn für die Messungen mit größeren Volumenströmen (Abbildung 7-44) ergibt sich eine Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert der Spalte, von lediglich 3 %. Es entsteht also bei der Bestimmung der Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) und des Flüssigkeitsmassenstroms je Klassenbreite $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ ein geschätzter, durchschnittlicher Messfehler von F = 5 %. Bei den Versuchen mit Wasservolumenströmen $\dot{V}_w$ von mehr als 10L/h kann sogar von einem maximalen, absoluten Messfehler für v(x) und $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ von kleiner als 5 % ausgegangen werden.

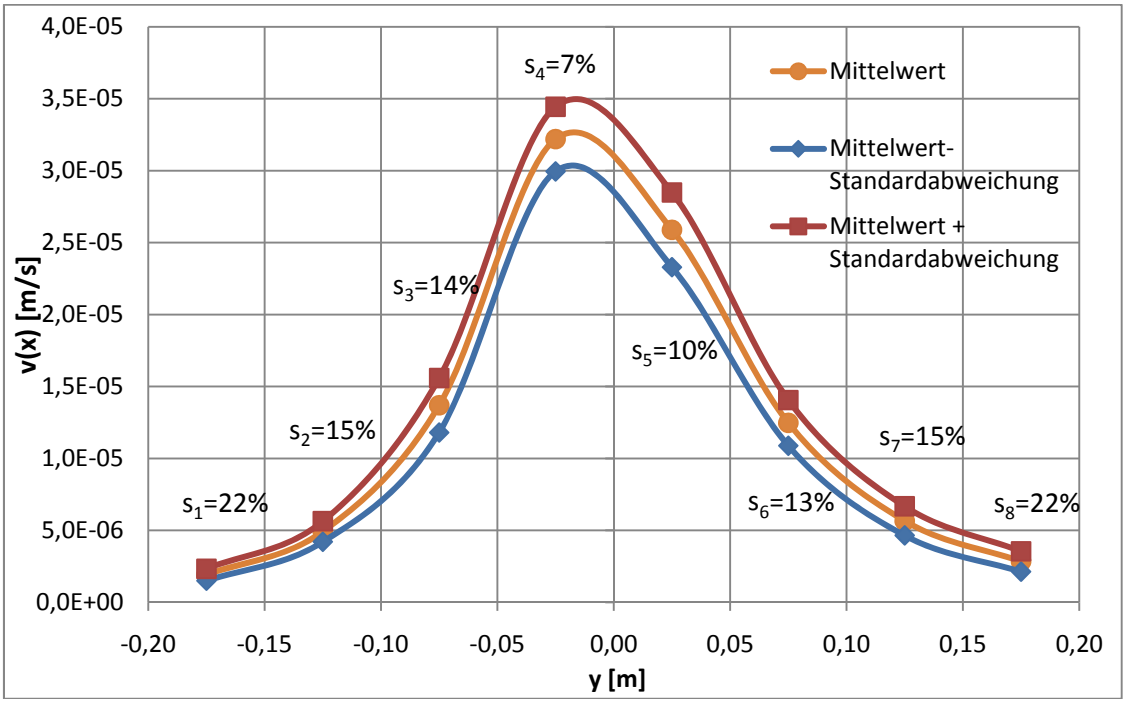


Abbildung 7-44: Mittelwert $v(x)_{Mij}$ und Standardabweichung *s* aus 8 Reihen einer Messung mit $\dot{V}_w$ = 3,6L/h; p_L = 5bar; h = 0,35m; v_b = 0,005m/s

Die folgende Abbildung 7-45 zeigt die hohe Genauigkeit der gravimetrischen Bestimmung der Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) für große Wasservolumenströme durch die Zweistoff-Kegeldüse. Dargestellt ist dies für $\dot{V}_w$ =60L/h.

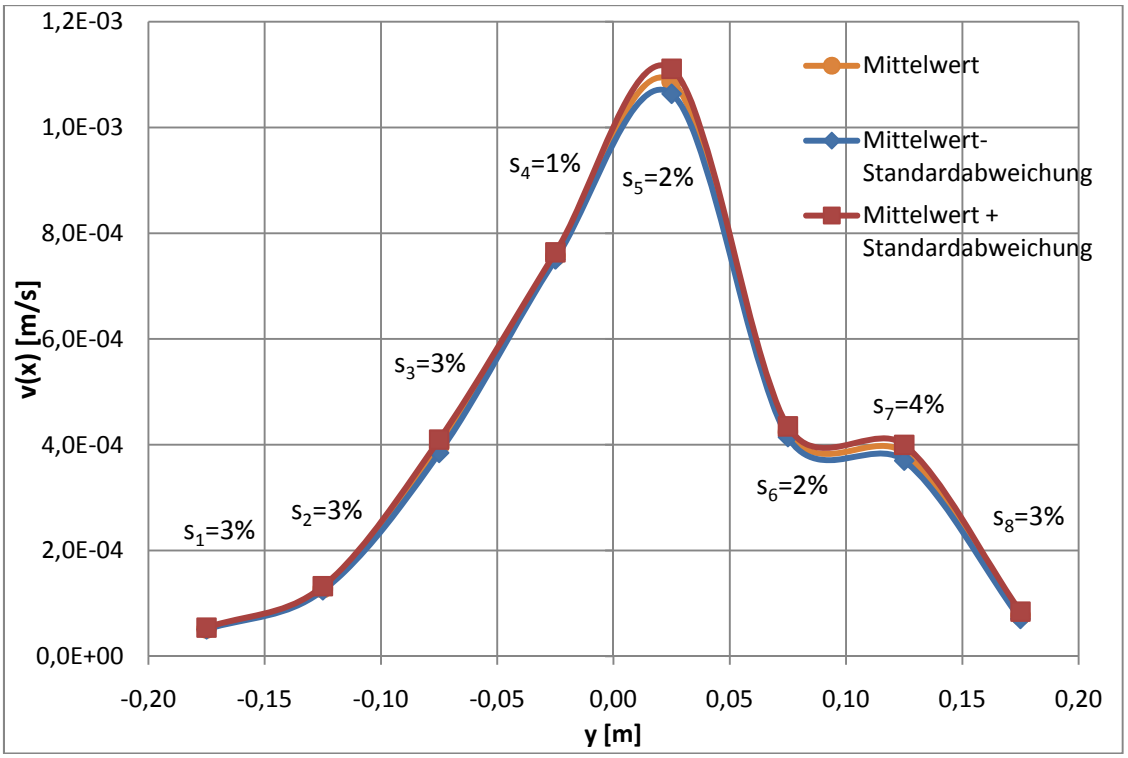


Abbildung 7-45: Mittelwert $v(x)_{Mij}$ und Standardabweichung s aus 8 Reihen einer Messung mit $\dot{V}_w$ = 60L/h; p_L = 3bar; h = 0,35m; v_b = 0,005m/s

In nachfolgender Abbildung 19 sind solche gemittelten Befeuchtungsprofile für drei Versuche mit $\dot{V}_w$ = 3,6L/h, p_L = 5bar und Düsenabstand h = 0,35m zu sehen. Sie wurden hintereinander durchgeführt, der Druck p_L schwankte jedoch bei Messung 2 sehr stark, was sich sofort im Absinken der Befeuchtungsgeschwindigkeit bemerkbar machte; dies zeigt die rote Linie in Abbildung 7-46.

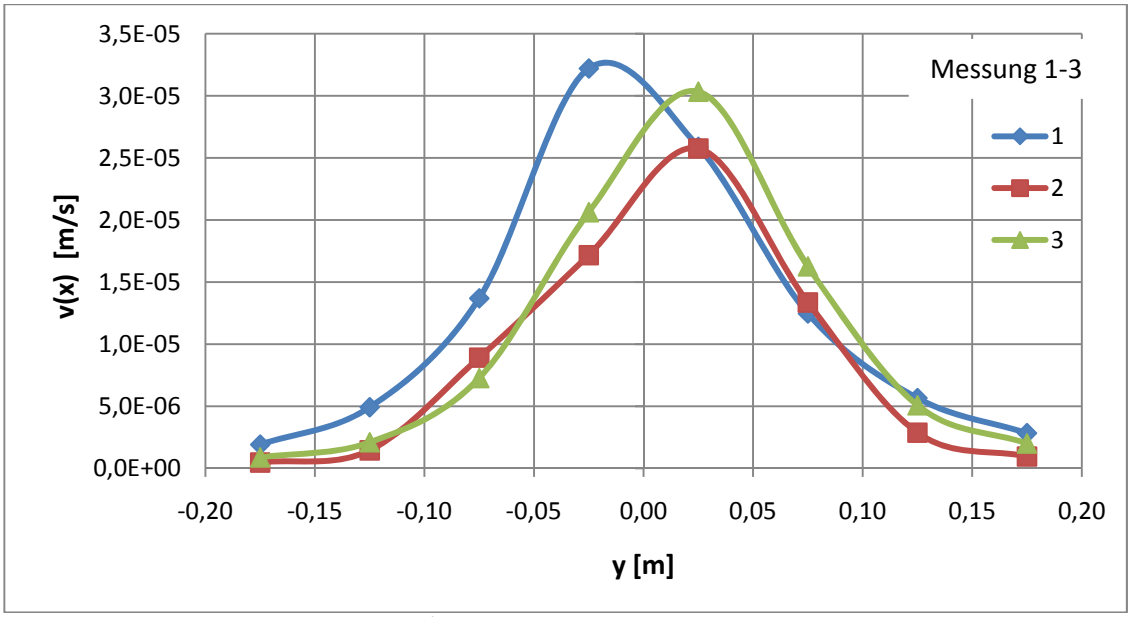


Abbildung 7-46: v(x) für $\dot{V}_w$ = 3,6L/h; p_L = 5bar; h = 0,35m; v_b = 0,005m/s

Die nächste Abbildung (7-47) zeigt nochmals die gleichen drei Versuche; diesmal ist aber der Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite $\overline{\dot{M}_{\bar{y}}}$ dargestellt, den wir aus Gleichung 7-28 erhalten. Dies ändert wie in der Auswertung gezeigt, lediglich die Skalierung und die Einheit der x – Achse von [m/s] auf [kg/m*s]. Bei den gewählten Düsenparametern und dem gewählten Vorschub ergibt das einen Normierungsfaktor f_V = 2,5 – also eine Streckung um das 2,5 Fache, gegenüber v(x) [m/s] in Abbildung 7-46.

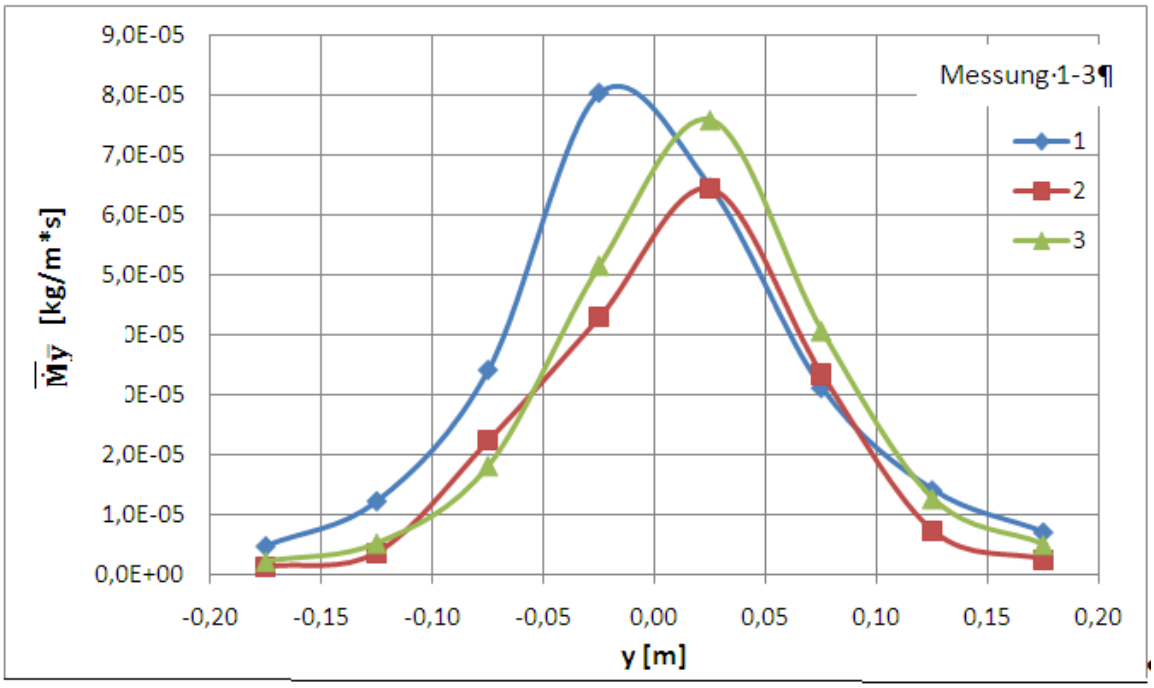


Abbildung 7-47: $\overline{\dot{M}_{\bar{y}}}$ für $\dot{V}_w$ = 3,6L/h; p_L = 5bar; h = 0,35m

Somit können also v(x) und $\overline{\dot{M}_{\bar{y}}}$ gleichsam dargestellt, und ineinander umgerechnet werden. In den folgenden Abbildungen 7-48 – 7-50 sind die Mittelungen der Befeuchtungsprofile (Gleichung 7-28) für die verschiedenen Düsenparameter Volumenstrom $\dot{V}_w$ (3,6L/h; 10L/h; 20L/h; 40L/h; 60L/h), Druck p_L (3bar; 5bar) und Düsenabstand h (0,35m; 1,01m) dargestellt.

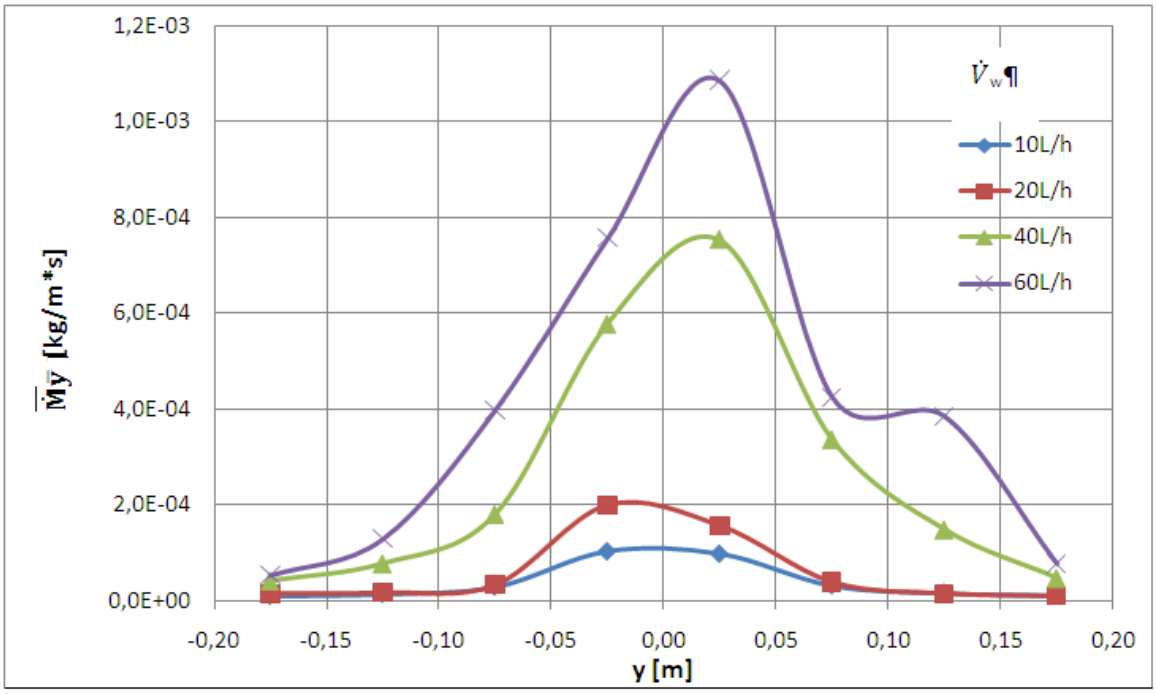


Abbildung 7-48: $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ für $\dot{V}_w$ = 10L/h; 20L/h; 40L/h; 60 L/h; p_L = 3bar; h = 0,35m

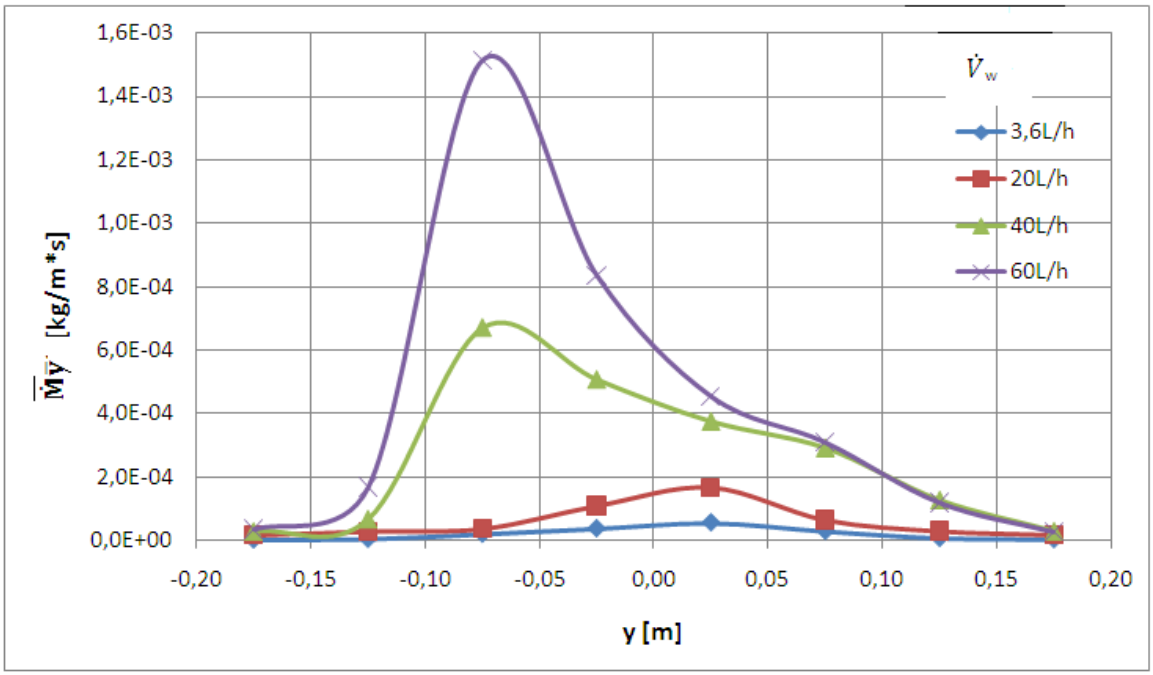


Abbildung 7-49: $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ für $\dot{V}_w$ = 3,6/h; 20L/h; 40L/h; 60L/h; p_L = 5bar; h = 0,35m

Für die Versuche mit einem Düsenabstand h = 1,01 m wurde der Messraster auf 16 x 4 Messfelder umgebaut, um die Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) über eine Breite von y = 0,8 m erfassen zu können. Das Sprühbild bei diesem Düsenabstand ist in Abbildung 7-50 dargestellt.

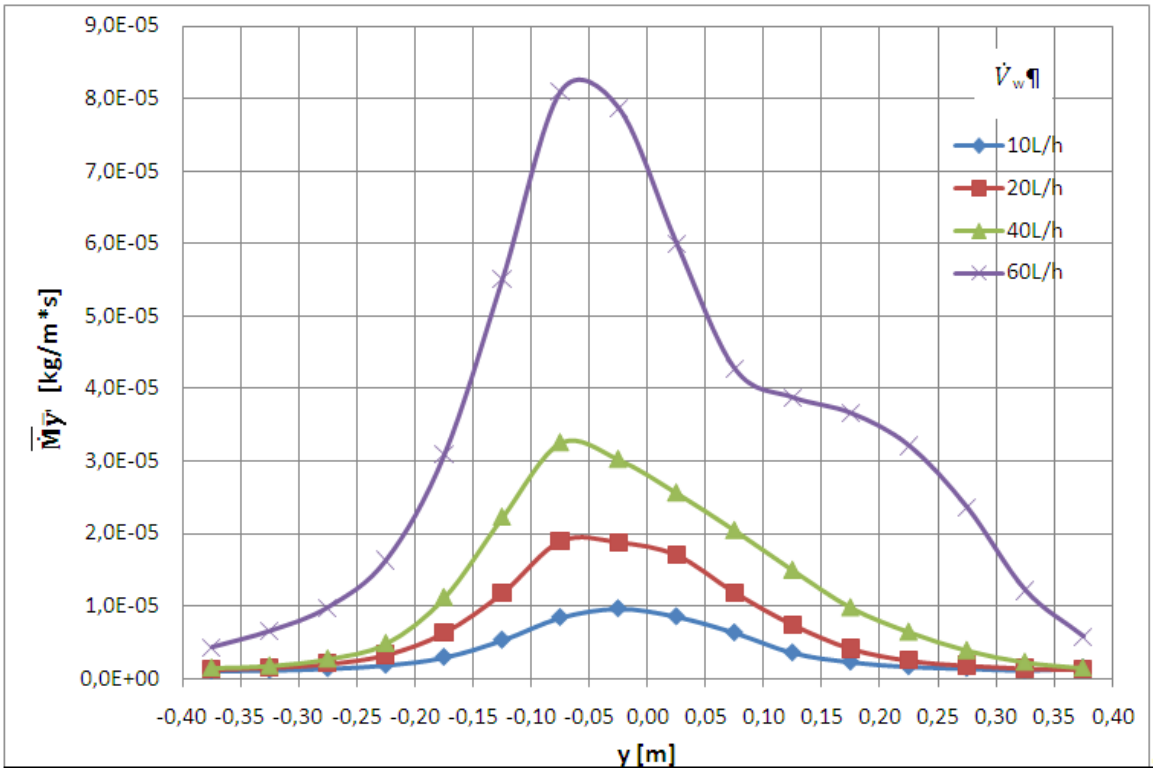


Abbildung 7-50: $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ **für** $\dot{V}_w$ **= 10L/h; 20L/h; 40L/h; 60L/h;** p_L **= 3bar; h = 1,01m**

7.5.2.5 Statische Aufzeichnung des Sprühbildes

Um, mit derin Kapitel 7.5.1 gezeigten Ableitung, für die Berechnung des Befeuchtungsprofiles von $\overline{\dot{M}\bar{y}}$, welches aus dem Sprühbild über die Förderbandbreite entsteht, zu überprüfen, wird auch eine statische Verteilung der Befeuchtungsgeschwindigkeit unter der Zweistoffdüse aufgenommen (Abbildung 7-51). Diese Werte werden dann, um sie mit den vorher experimentell ermittelten Daten für die das gemessene Befeuchtungsprofil von $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ vergleichen zu können, spaltenweise zu einem berechneten Befeuchtungsprofil $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ aufsummiert; zu sehen ist diese Summation in Abbildung 7-52.

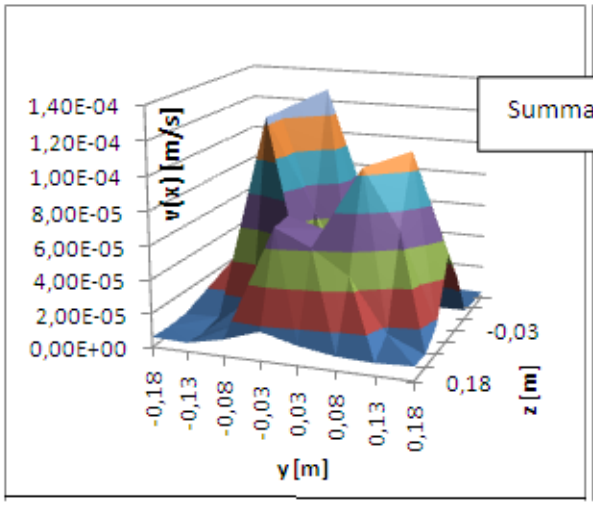


Abbildung 7-51: v(x) statisch für $\dot{V}_w$ **= 60 L/h;** p_L **= 3bar; h = 0,35m;** v_b **= 0,** t_s **= 80s**

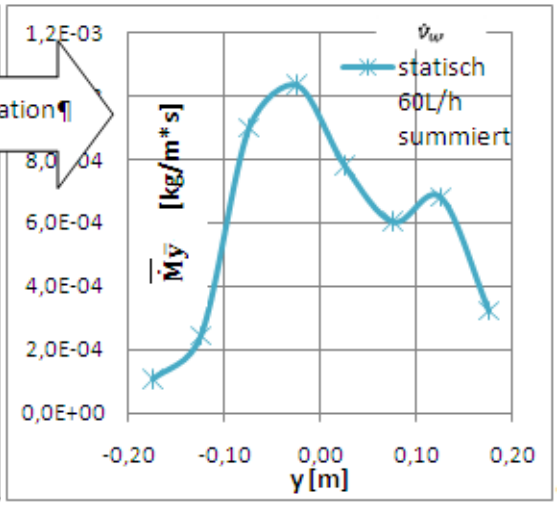


Abbildung 7-52: $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ **aus v(x) statisch summiert, berechnet**

Es zeigt sich je nach Durchfluss, Druck und Abstand, wie bei der Erfassung des Sprühbilds mit Vorschub, eine glockenförmige Verteilung. In Abbildung 7-52 ist der Vergleich zwischen der statisch aufgenommenen und dann summierten, sowie der, wie vorhin mit einem Vorschub v_b ermittelter Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) für $\dot{V}_w$ =60L/h dargestellt. Aus der Summation des statischen Sprühbildes in Abbildung 7-51, ergibt sich die blaue Linie in Abbildung 7-52.

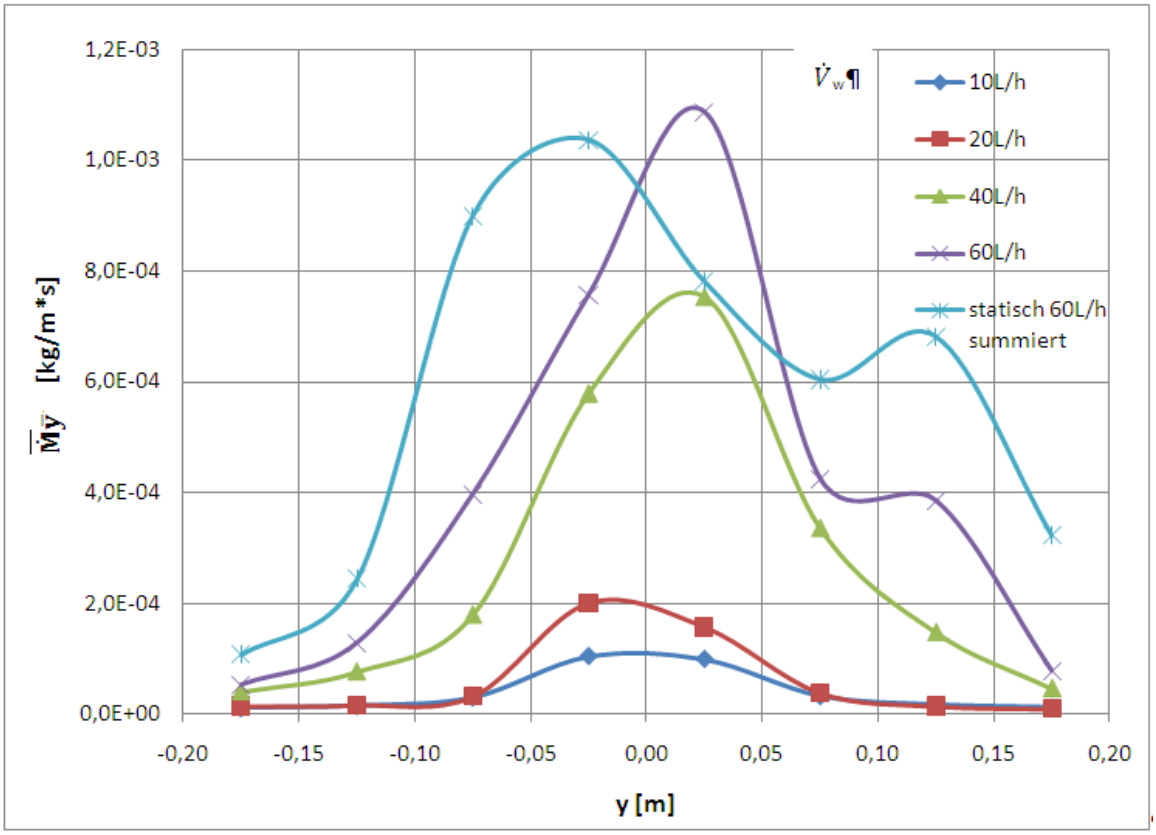


Abbildung 7-53: Vergleich zwischen v_b = 0,005 m/s und ohne Vorschub v_b = 0 m/s für $\dot{V}_w$ = 60 L/h; p_L = 3bar; h = 0,35m; t_s = 80s

Die $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ Profile wurden somit einmal experimentell durch die Versuche mit Vorschub v_b, und einmal durch das statische Vermessen des Sprühbildes, mit anschließender Berechnung des Befeuchtungsprofils über die Bandbreite ermittelt. Das Aufsummieren (Abbildungen 7-51 und 7-52) geschieht nach Ableitung Kapitel 7.5.1

Somit sind die Befeuchtungswirkungen, dargestellt als Geschwindigkeit v(x), bzw. als Massenstrom je Klassenbreite $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ des Sprühbilds in Abhängigkeit der Düsenparameter $\dot{V}_w$, p_L und h über die Förderbandbreite, experimentell erfasst und stehen für weitere Anwendungen im Folgenden zur Verfügung:

- Befeuchtungsprofil $\overline{\dot{M}\bar{y}}$, mit Vorschub v_b : Grundlage für die Schüttungs – Be- und Durchfeuchtung

- Befeuchtungsprofil $\overline{\dot{M}\bar{y}}$,ohne Vorschub v_b : Grundlage für die Staubabscheidung aus strömender Luft

Im nächsten Schritt ist ein Gutfeuchteprofil welches der Düsenspray erzeugt zu berechnen (Gleichung 7-31 bis 7-32). Dazu ist der Schüttgutmassenstrom an der Stelle $\bar{y}$ der Klassenweite Δy genauso zu definieren wie der Flüssigkeitsmassenstrom $\overline{\dot{M}}_{(\bar{y})}$ an der Stelle $\bar{y}$ der Klassenweite Δy [kg/ms] welche als Wassermassenstrom welche durch eine $z_E * \Delta y$ Kontrollfläche durchtritt definiert ist.

$$\overline{\dot{m}}_{\bar{y}} = \frac{\dot{m} * 2 * \Delta y}{B * z_E} \qquad (7\text{-}31)$$

$\dot{m}$ Schüttgutmassenstrom des Förderbandes [kg/s]

$\overline{\dot{m}}_{\bar{y}}$ Schüttgutmassenstromdichte in z Richtung zwischen $-z_E$ und $+z_E$ an der Stelle $\bar{y}$ [kg/ms]

$$\overline{G}_{\bar{y}} = \frac{\overline{\dot{M}}_{\bar{y}}}{\dot{m}_{\bar{y}}} \qquad (7\text{-}32)$$

$\overline{G}_{\bar{y}}$ Schüttgutfeuchte an der Stelle $\bar{y}$ der Klassenweite Δy [kg wasser/kg trockenes Schüttgut]

7.6 Vermessung und Ableitung der Schüttgutdurchfeuchtung ausgehend vom Flüssigkeitsmassenstrom der Vollkegeldüse (tiefenbezogenen Befeuchtung)

Die Befeuchtung von sich auf Förderbändern befindlichen Schüttgütern erfolgt düsenkonstruktionsbedingt nicht gleichmäßig dies wurde durch das Vermessen der Sprühbilder von Vollkegeldüsen und Flachstrahldüsen bewiesen.

Zusätzlich zur oberflächenbezogenen Befeuchtung stellt die Gleichmäßigkeit der tiefenbezogenen Befeuchtung, eines sich auf einem Förderband befindlichen Schüttgutes, ein Problem dar. Daher soll die Tiefenbefeuchtung im Schüttgut analysiert werden, um zu überprüfen, ob die erzielte Feuchtigkeitsverteilung über die Oberfläche Gy welche nach zuvor in 7.5.1 vorgestelleten Rechenalgorythmus berechnet werden konnte, auch in der Tiefe wirksam ist. Zu diesem Zweck soll mittels schon analysierter Zweistoff-Vollkegeldüse 1005 der Firma VSR Industrietechnik GmbH ein geeignetes Schüttgut befeuchtet und anschließend analysiert werden.

Die Untersuchung der tiefenmäßigen Schüttgutdurchfeuchtung ist Voraussetzung ,dass das Optimierungsziel durch optimieren der Bedüsungsparameter welche sich in der flächenmässigen Befechtung abbilden, zu erreichen. Damit eine Optimierungsrechnung über die Sprühbilder von Sprühdüsen vornehemn zu können muss zuvor geklärt werden bis zu welchen Bedüsungsparametern (Düsenhöhe, Düsenwasservolumenstrom) die flächenmässige Befeuchtung auch zu einer tiefenmässigen Schüttgutdurchfeuchtung führt.

Wie schon in der Problemstellung erwähnt, stellt die Gleichmäßigkeit der oberflächen- wie auch tiefenbezogenen Befeuchtung von Schüttgütern auf Förderbändern ein Problem dar. Wird ein Schüttgut mittels Förderband transportiert und dieses per Düsensprüh befeuchtet, so muss für einen anschließend staubemissionsarmen Schüttgutabwurf gewährleistet werden, dass das Schüttgut schon vor der Abwurfstelle einen optimalen Feuchtegehalt aufweist.

Die in das Schüttgut eingebrachte Flüssigkeit kann in demselbigen als Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite Δy ($M_{\dot{y}}$') betrachtet werden. ergibt sich folglich aus dem dreidimensionalen Sprühbild der vorliegenden Vollkegeldüse, weil das Schüttgut unter dieser mit einer Förderbandgeschwindigkeit v_b hinfortbewegt wird und man die von der Düse eingebrachte Flüssigkeit im Schüttgut praktisch in Bewegungsrichtung aufsummiert wieder-findet. Der in Abbildung 7-42 illustrierte Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite Δy $M'_{\dot{y}}$ kann, wie für die Vollkegel und Flachstrahldüse angewendet (Kapitel 7.4), mittels der Gauß-Glockenkurve dargestellt werden. Es soll durch Tiefenbefeuchtungsanalyse geklärt werden ob sich das Glockenförmige Sprühbild bzw. Feuchteverteilung durch die Gutschüttung fortpflanzt. Zu Vergleichszwecken werden die Messdaten, welche aus messtechnischen Gründen als Gutfeuchte je Klassenbreite Δy ($G'_{\dot{y}}$) vorliegen, später in den Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenweite Δy umgerechnet.

7.6.1 Versuchsanordnung zur Vermessung der Schüttgutdurchfeuchtung

Befeuchtung einer Quarzsand Schüttung:

In einer mit der Zweistoff-Vollkegeldüse besprühten Schüttung aus Quarzsand (Abbildung 7-54) werden Feuchtemessungen durchgeführt, aus denen die Schüttgut - Befeuchtung und Durchfeuchtung in Abhängigkeit vom Wassermassenstrom ermittelt werden soll.

Abbildung 7-54: Querschnitt durch eine besprühte Schüttung aus Quarzsand

Zur Besprühung eines Schüttgutes und anschließender Tiefenbefeuchtungsanalyse der eingebrachten Flüssigkeit in demselbigen wurde eigens ein Formkasten angefertigt (siehe Abbildungen 7-55 und 7-56). Dieser ermöglicht es in erster Linie das Schüttgut während der Versuchsdurchführung in Form zu halten und weiters, zu Auswerte-zwecken, eine schichtweise Probennahme durchzuführen. Somit ist es möglich, den Flüssigkeitsgehalt im Schüttgut sowohl oberflächen- als auch tiefenmäßig zu ermitteln. Für den Tiefenbefeuchtungsversuch wurde Quarzsand H 32, welcher eine mittlere Korngröße von 0,32mm und eine Schüttdichte von ρ_{Sch}=1400kg/m^3 aufweist, verwendet.

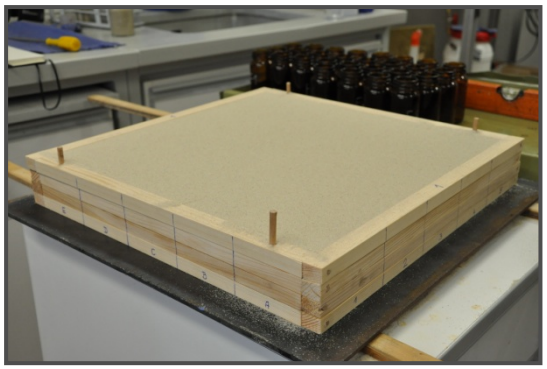


Abbildung 7-55: Mit trockenem Schüttgut (Quarzsand H 32) befüllter Formkasten

Die Versuchsanordnung ist so konzipiert, dass unter der Zweistoff-Vollkegeldüse 1005 der Firma VSR Industrietechnik GmbH ein in allen drei Achsenrichtungen verstell- und arretierbares Gleitschienengestell mit montiertem Formkasten installiert ist.
Die gesamte Apparatur ist in einer Einhausung untergebracht, um mögliche Verwehungen des Düsensprühs während der Versuchsdurchführung auszuschließen.
Zur Einstellung des jeweiligen Zweistoffsprühs steht ein Rotameter zur Messung des Wasservolumenstroms und ein Manometer für den zu wählenden Luftdruck zur Verfügung.

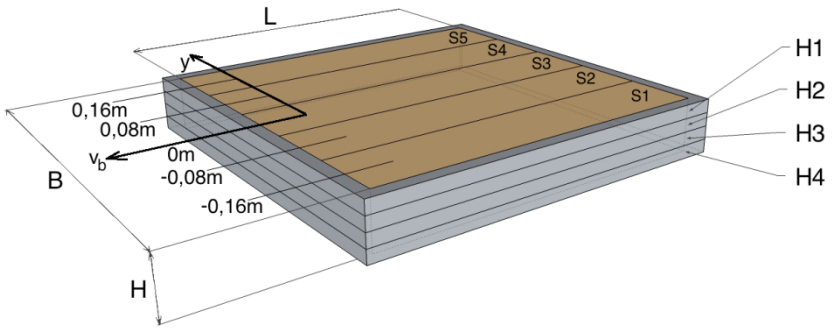


Abbildung 7-56: Abmessungen und Segmentierung des Formkastens (L=B=0,4m; H=0,06m; Segmente S1 bis S5; Höhenschichten H1 bis H4)

7.6.2 Versuchsdurchführung der Vermessung der Schüttgutdurchfeuchtung

Um die Tiefenbefeuchtung bestmöglich untersuchen zu können, wird der mit Quarzsand H 32 gefüllte Formkasten während des Sprühvorgangs mit einem geeignet gewählten Vorschub unter der Vollkegeldüse fortbewegt. Dies simuliert ein Schüttgut, welches mittels Förderband transportiert und dabei mit einer Zweistoffdüse befeuchtet wird. Einige Vorversuche zeigten, dass sich ein Vorschub v_b=0,0033m/s am besten für eine Schütthöhe H=0,06m eignet, welche mit einem Wasservolumenstrom V_{fl}=40L/h besprüht wird. Der an der Vollkegeldüse anliegende Luftdruck wird mit p=3bar gewählt und der Düsenabstand zur Schüttung beträgt h=0,35m.

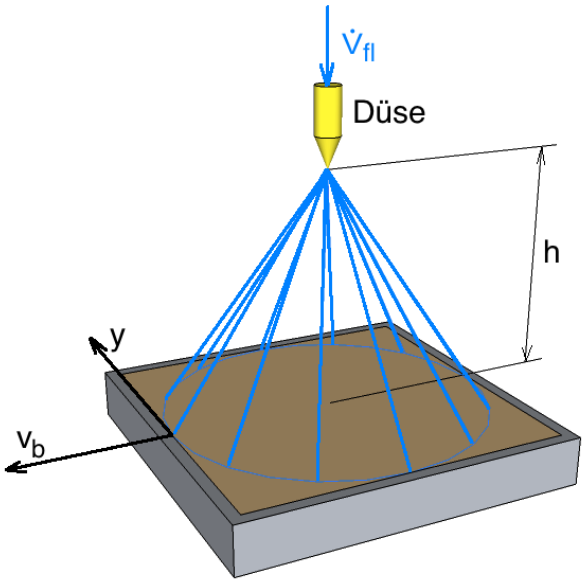


Abbildung 7-57: Versuchsanordnung zur Ermittlung der Tiefenbefeuchtung in einem Schüttgut (Düsenabstand h [m], Wasservolumenstrom V_{fl} [L/h], Vorschub v_b [m/s])

Wie in Abbildung 7-57 dargestellt, wird der Formkasten unter dem Düsensprüh mit v_b hinfortbewegt. Nach dem Sprühvorgang erfolgt die Probennahme. Pro Höhenschicht werden fünf Proben genommen. Die Gesamtbreite B des Formkastens wird hierzu in fünf gleich große Segmente S1 bis S5 unterteilt, wobei die Schüttgutproben möglichst segmentmittig mittels geeigneter, tarierter Probengläser entnommen werden. Dieses Prozedere ist bei den Höhenschichten H1 bis H4 (siehe Abbildung 7-56), welche jeweils 0,015 m hoch sind, ident und man erhält somit insgesamt 20 Proben.
Die, sich in den Probengläsern befindlichen, feuchten Schüttgutproben wurden nach der Probennahme nacheinander gewogen und die Daten aufgezeichnet (entspricht der Probenmasse $m_{P,feucht}$). Um in weiterer Folge die Gutfeuchte je Klassenbreite Δy ($G´_{ý}$) ermitteln zu können, wurden die Schüttgutproben im Trockenschrank getrocknet und das trockene Schüttgut inklusive der Probengläser abermals gewogen (entspricht der Probenmasse $m_{P,trocken}$).

Um die zeitabhängige Diffusion betrachten zu können, wurde eine Probenserie direkt nach dem Besprühen genommen, dies entspricht der Probennahme bei t_1=0h, wobei hierbei die Probennahme etwa 15 Minuten dauerte. Weiters wurden Proben nach t_2=1h und t_3=3h genommen.

7.6.3 Auswertung der Schüttgutdurchfeuchtung

Die in das Schüttgut eingebrachte Menge Wasser stellt in Bezug auf die Masse an trockenem Schüttgut die Gutfeuchte je Klassenbreite Δy ($G´_{ý}$) dar, welche zu Vergleichszwecken in einen Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite Δy ($M´_{ý}$) umgerechnet werden soll. Dies geschieht mittels Gleichung 7-33.

$$\overline{\dot{M}}\bar{y} = \overline{G}\bar{y} * m_A * v_b \tag{7-33}$$

wobei

$$\overline{G}\bar{y} = \frac{m_{P,feucht} - m_{P,trocken}}{m_{P,trocken}} \tag{7-34}$$

und

$$m_A = \rho_{Sch} * \frac{V_{Segment}}{A_{Segment}} = \rho_{Sch} * \frac{H}{4}. \tag{7-35}$$

mit

$$V_{Segment} = L * \frac{B}{5} * \frac{H}{4} \tag{7-36}$$

sowie

$$A_{Segment} = L * \frac{B}{5} \tag{7-37}$$

$\overline{\dot{M}}\bar{y}$	Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite Δy	[kg/(m·s)]
$\overline{G}\bar{y}$	Gutfeuchte je Klassenbreite Δy	[-]
m_A	Flächenmasse des Schüttgutes	[kg/m^2] , m_A = 140kg/m_2
v_b	Formkastenvorschub	[m/s], v_b = 0,0033m/s
$m_{P,feucht}$	Masse der feuchten Schüttgutprobe	[kg]
$m_{P,trocken}$	Masse der getrockneten Schüttgutprobe	[kg]
ρ_{Sch}	Schüttdichte des Schüttgutes	[kg/m^3], ρ_{Sch} = 1400kg/m^3
$V_{Segment}$	Volumen je Segment und Höhenschicht	[m^3], $V_{Segment}$=0,00048m^3
$A_{Segment}$	Fläche je Segment	[m^2], $A_{Segment}$ = 0,032m^2
L	Länge des Formkastens	[m], L = 0,4m
B	Breite des Formkastens	[m], B = 0,4m
H	Höhe des Formkastens	[m], H = 0,06m

7.6.4 Ergebnisse der Vermessung der Schüttgutdurchfeuchtung

7.6.4.1 Zeitabhängigkeit der Schüttgutdurchfeuchtung

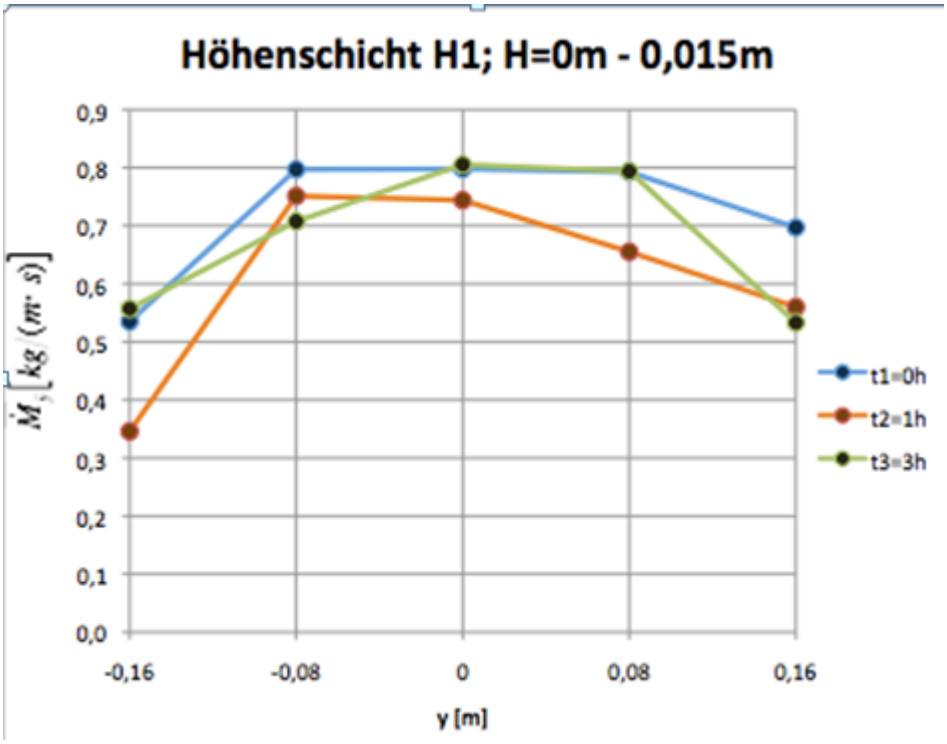


Abbildung 7-58: Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite Δy in der Höhenschicht H1 des Schüttgutes

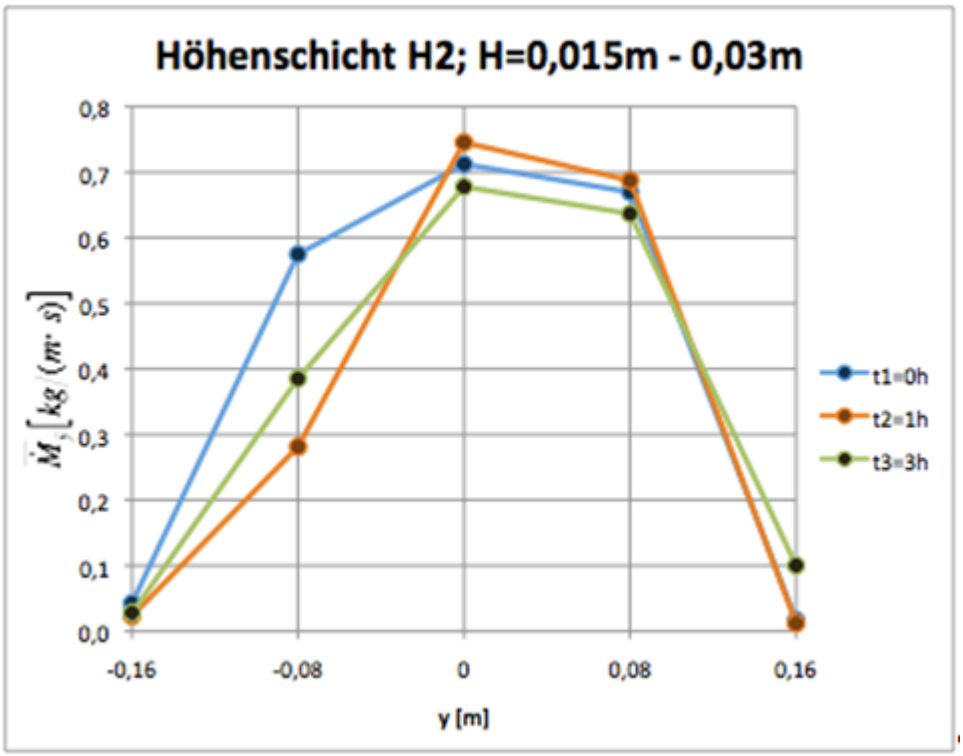


Abbildung 7-59: Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite Δy in der Höhenschicht H2 des Schüttgutes

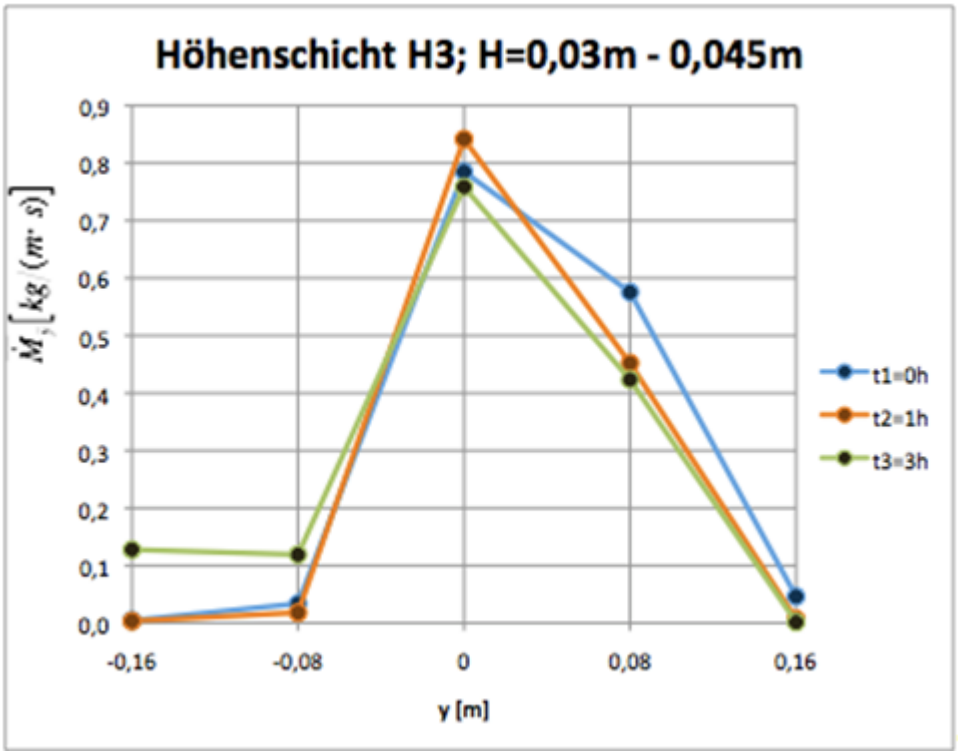


Abbildung 7-60: Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite Δy in der Höhenschicht H3 des Schüttgutes

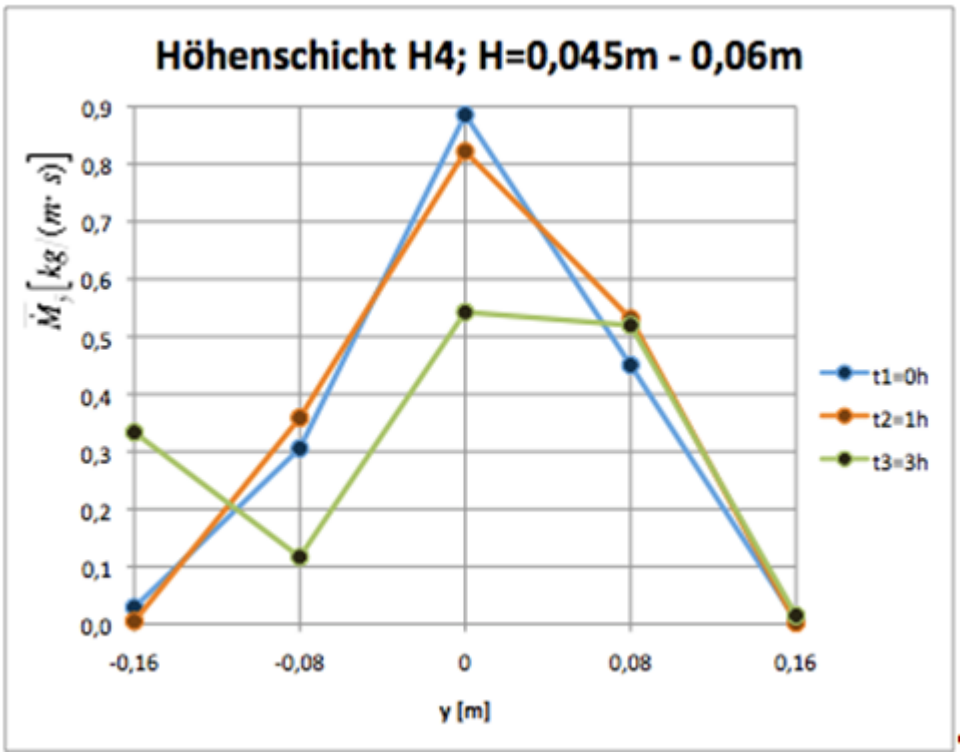


Abbildung 7-61: Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite Δy in der Höhenschicht H4 des Schüttgutes

Die Abbildungen 7-58 bis 7-61 zeigen die Flüssigkeitsmassenströme je Klassenbreite Δy über der gesamten Probenbreite B bei den Probenahmezeiten t_1, t_2 und t_3.

Diese Darstellungen zeigen, dass bei y=0m einen annähernd konstanten Wert annimmt, das heißt, dass die Feuchte im Schüttgut hier gleichmäßig verteilt vorliegt. Je weiter man sich nun von y=0m entfernt, desto geringer wird sowohl der oberflächen- als auch der tiefenmäßige Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite Δy. Herrscht an der Schüttgutoberfläche eine noch relativ gleichmäßige Feuchteverteilung, so nimmt diese Gleichmäßigkeit mit der Schüttguttiefe ab. Im Schüttgut zeichnet sich die eingebrachte Flüssigkeit in Form einer Befeuchtungsglocke ab (siehe Abbildung 7-62). Dies verdeutlicht, dass ein bestimmter Feuchtegrad für eine gleichmäßige Tiefen-befeuchtung nicht unterschritten werden darf, da ansonsten mit zunehmender Schüttguttiefe die ordnungsgemäße Befeuchtung nicht mehr gewährleistet ist und somit beim Schüttgutabwurf mit erheblichen Staubemissionen gerechnet werden muss.

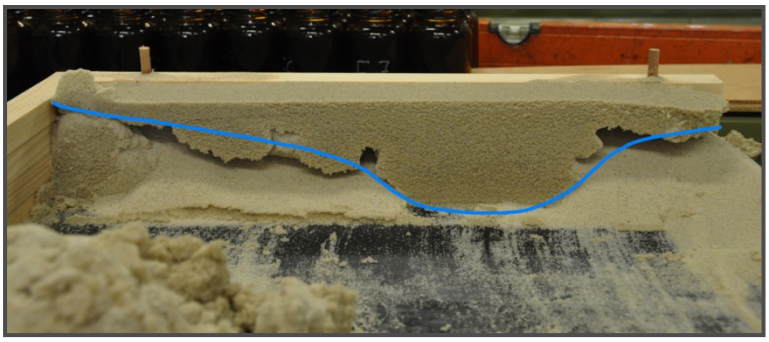


Abbildung 7-62: Formkasten mit befeuchtetem Schüttgut (Quarzsand H 32) nach der Probennahme

Eine zeitabhängige Diffusion kann aus obigen Abbildungen 7-58 bis 7-61 nicht erkannt werden. Die Kurven weisen, bis auf wenige Ausnahmen, welche durch Ungenauig-keiten bei der Probennahme erklärt werden können, sehr ähnliche Verläufe auf. Daraus kann weiters geschlossen werden, dass die Diffusionsvorgänge in Quarzsand H32 schnell vor sich gehen und ein schüttgutbezogenes Flüssigkeitsgleichgewicht schon kurz nach dem Besprühvorgang eingestellt ist.

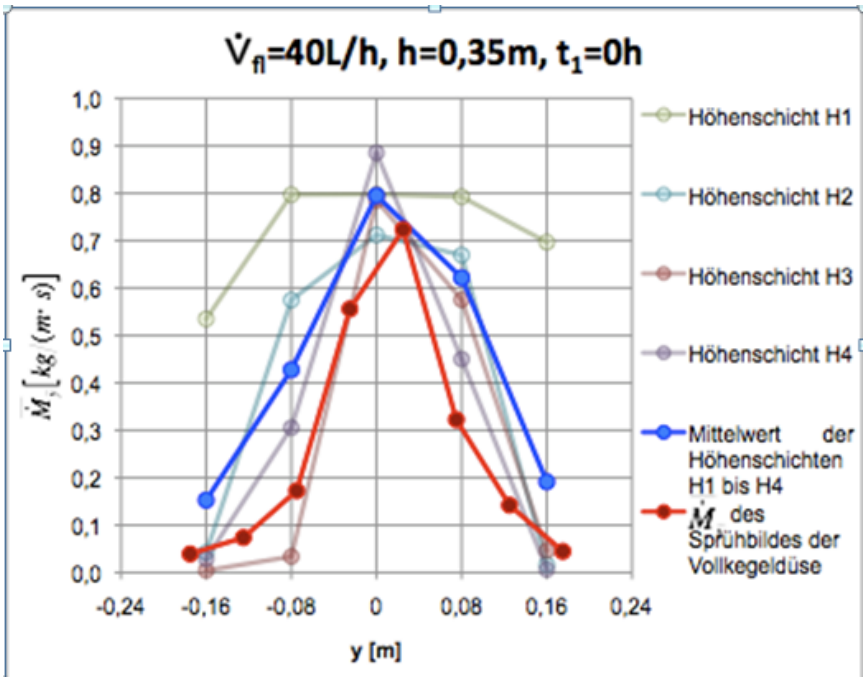


Abbildung 7-63: Vergleich der Flüssigkeitsmassenströme je Klassenbreite Δy der Vollkegeldüse

Abbildung 7-63 zeigt einerseits die Flüssigkeitsmassenströme je Klassenbreite Δy in den Höhenschichten H1 bis H4, die Kurve der arithmetischen Mittelwerte aus $\dot{M}'_{\acute{y}}$ und andererseits, zum direkten Vergleich mit der Mittelwertkurve, die Messwerte der Flüssigkeitsmassenströme je Klassenbreite Δy des Sprühbildes der Vollkegeldüse, welche schon im Vorfeld ermittelt und

analysiert wurde [91]. Die Messwerte für $M'_{\dot{y}}$ des Sprühbildes der Vollkegeldüse wurden dabei mit den gleichen Besprühungsparametern ermittelt.
Es wird ersichtlich, dass die Mittelwertkurve (in blau dargestellt) etwas breiter ausfällt als das Sprühbild der Vollkegeldüse (in rot dargestellt). Der Effekt hierfür ist die Diffusion der ins Schüttgut eingebrachten Flüssigkeit in der Breite. Die Flüssigkeit diffundiert hierbei zu den Bereichen im Schüttgut, welche beim Besprühvorgang keine ausreichende Feuchtigkeit erhielten.

7.6.4.2 Schüttgutdurchfeuchtung bei verschiedenen Volumenströmen

Neben der Feuchteverteilung in Abhängigkeit von der Tiefe soll abschließend auch noch der Zusammenhang zwischen der Feuchteverteilung in der Gutschüttung und den verschiedenen Volumenströmen $\dot{V}_w$ = 10L/h, 20L/h, 40L/h, 60L/h untersucht werden. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 7-64 bis 7-67 dargestellt. Wie zu erkennen ist, pflanzt sich die flächenmäßige Schüttgutbefeuchtung in der tiefe fort. Das Sprühbild (die flächenmäßige Schüttgutbefeuchtung) bildet sich also in der tiefe unverändert glockenförmig ab. Jedoch ist festzustellen, dass bei Unterschreitung eines gewissen Wasservolumenstromes sich die flächenmäßige Schüttgutbefeuchtung nicht durch die tiefe Fortpflanzt. Wie in Abbildung 7-66 und 7-67 zu erkennen ist reichen 10L/h nicht mehr aus die Höhenschicht H3 und H4 zu durchfeuchten. In diesen Höhenschichten ist also keine Durchfeuchtung des Schüttgutes mehr feststellbar.

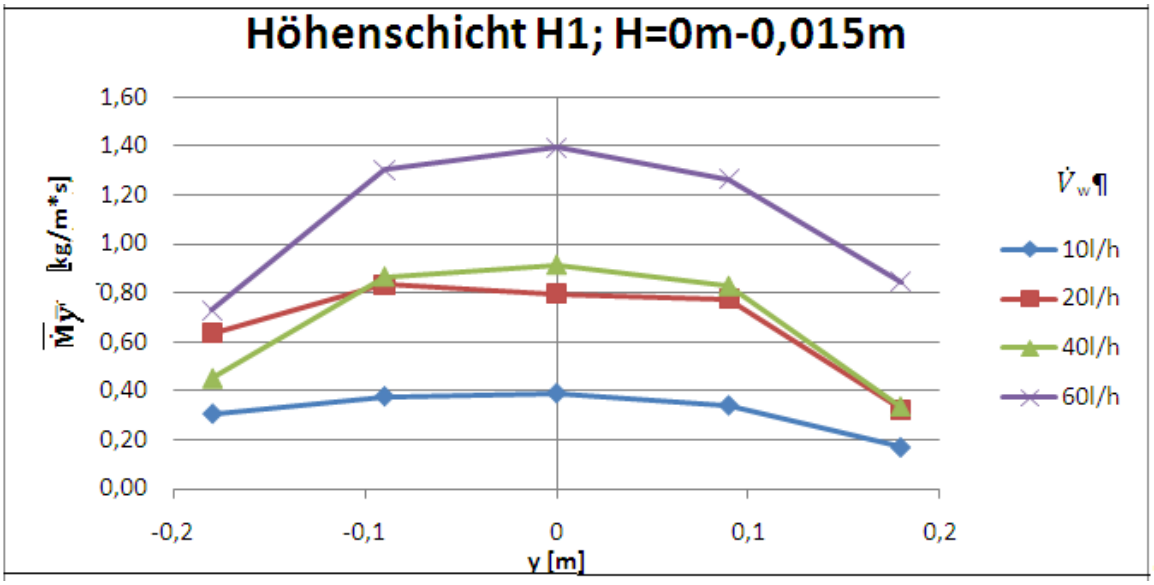


Abbildung 7-64: $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ für Höhenschicht H1 in Abhängigkeit von $\dot{V}_w$

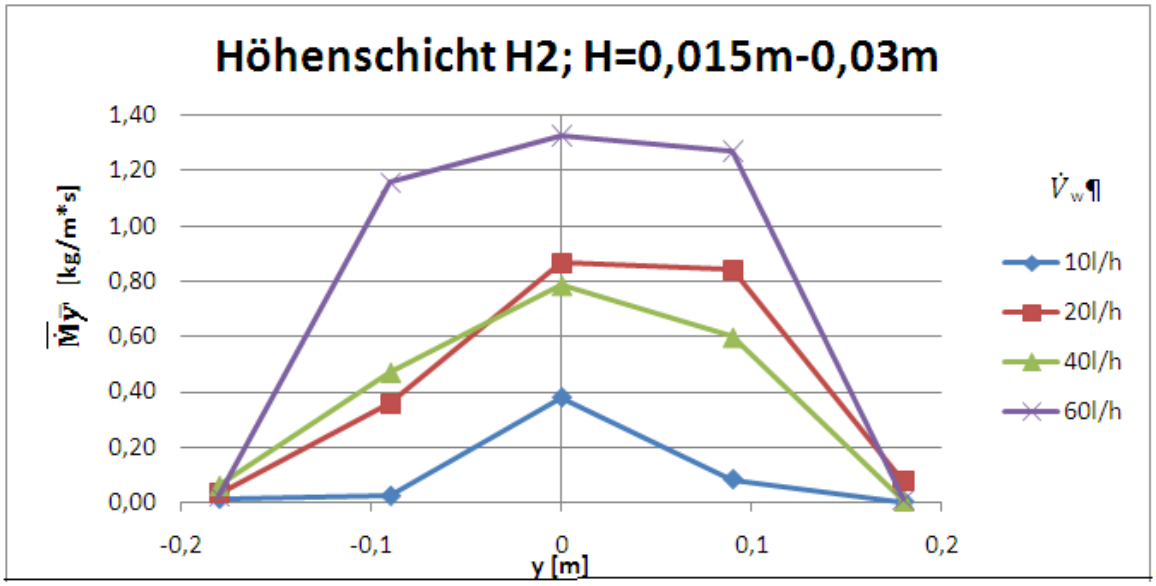


Abbildung 7-65: $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ für Höhenschicht H2 in Abhängigkeit von $\dot{V}_w$

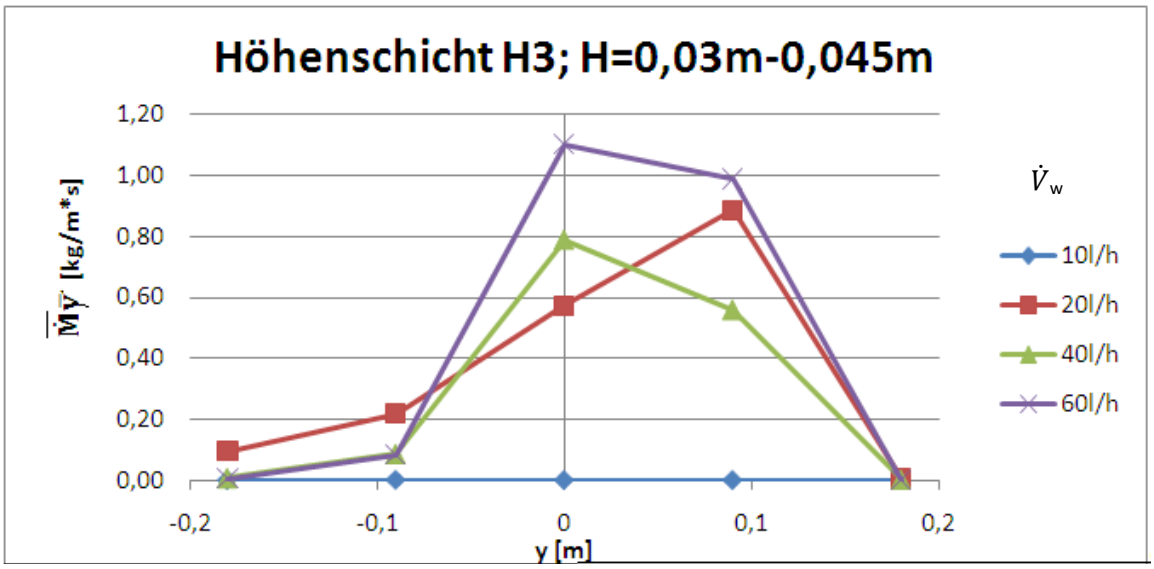


Abbildung 7-66: $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ für Höhenschicht H3 in Abhängigkeit von $\dot{V}_w$

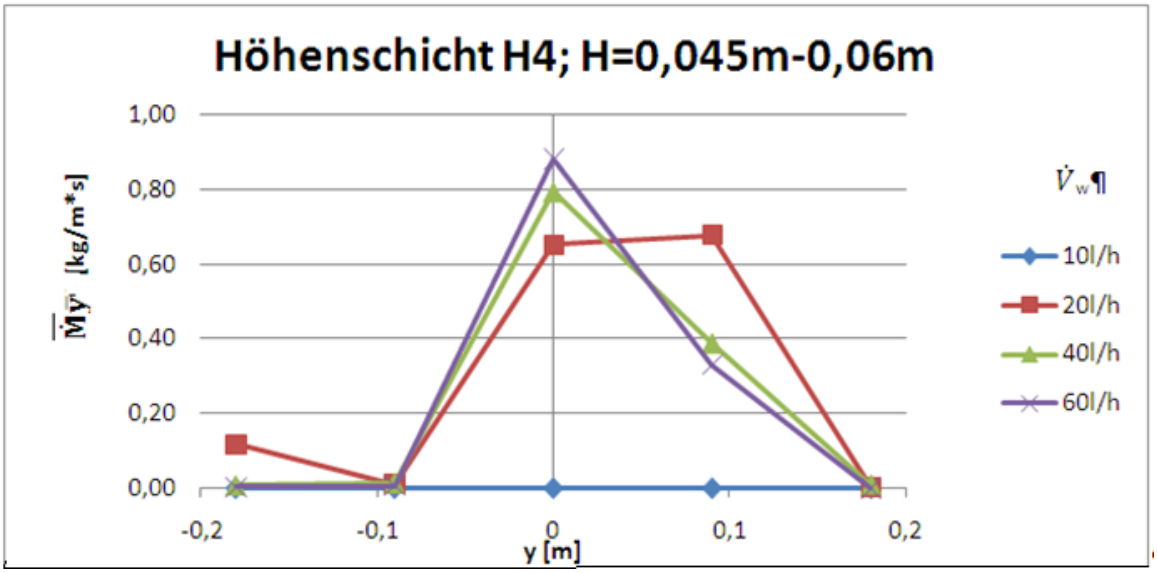


Abbildung 7-67: $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ für Höhenschicht H4 in Abhängigkeit von $\dot{V}_w$

7.6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Tiefendurchfeuchtungsanalyse

Die durchgeführte Tiefenbefeuchtungsanalyse half folgende Einblicke zu gewinnen:

- Das schon ermittelte Sprühbild der verwendeten Vollkegeldüse zeichnet sich im Schüttgut abermals ab. Die eingebrachte Flüssigkeit verteilt sich ebenfalls glockenförmig.
- Eine optimale Tiefenbefeuchtung eines Schüttgutes ist nur dann gewährleistet, wenn ein bestimmter Feuchtegrad desselbigen nicht unterschritten wird.
- Flüssigkeitsdiffusionsvorgänge in einem Schüttgut geschehen schnell, ein schüttgut-bezogenes Flüssigkeitsgleichgewicht ist schon kurz nach dem Besprühvorgang eingestellt ist.

Um nun eine wirklich gleichmäßige Schüttgutbefeuchtung sowohl oberflächen- als auch tiefenmäßig garantieren zu können, muss eine ausreichend große Wassermenge, welche durch ausreichend viele Düsen in bestmöglicher Positionierung versprüht wird, in das Schüttgut eingebracht werden. Nur so kann eine optimale und effiziente Feinstaubemissionsreduktion beim Schüttgutabwurf gewährleistet werden.

Die Untersuchung der tiefenmäßigen Schüttgutdurchfeuchtung ist Voraussetzung ,dass das Optimierungsziel durch optimieren der Bedüsungsparameter welche sich in der flächenmässigen Befechtung abbilden, zu erreichen.

Durch erfassen des Sprühbildes von Sprühdüsen und deren mathematischen Beschreibung durch eine Glockenfunktion deren Gestalt durch die Befeuchtungskonstanten a und b festgelegt ist und über die Zusammenhänge von a und b mit den Bedüsungsparametern Wasservolumenstrom und Düsenhöhe, kann eine Optimierung der Schüttgutbefeuchtung erfolgen. Die Glockenfunktion wurde in kartesische Koordinaten zerlegt und die Befeuchtungsgeschwindigkeiten in Förderbandlaufrichtung aufsummiert. Durch einbeziehen von Auslegungsgrößen des Förderbandes wie Förderbandgeschwndigkeit, Förderbandbreite und Schüttgutmassenstrom konnte das Gutfeuchteprofiel welches über die Förderbandbreite entsteht berechnet warden. Nun gilt es im Weiteren ein Optimierungsziel festzulegen.

7.7 Berechnung der Auslegungsparameter eines Wassersprayssystems zum erreichen gleichmäßiger Befeuchtung als Optimierungsziel

Als Optimierungsziel kann entweder eine gleichmäßige Oberflächenbefeuchtung definiert werden für die die optimalen Bedüsungsparameter gefunden werden sollen, oder es ist ein Befeuchtungsprofil über die Förderbandbreite zu erzeugen welche zu einer maximalen Staubreduktion bei minimalen Wasserverbrauch führt.

Das Erreichen von gleichmäßiger Befeuchtung über Oberflächen ist in vielen unterschiedlichen Bereichen (aufbringen von Klebstoffen, Lacken oder Beschichtungen genauso wie bei Druckereine oder gleichmäßiger Bewässerung)ein Ziel. Das Erreichen gleichmäßiger Feuchte spielt aber auch bei anderen diffusen Staubemittenten eine Rolle. Diffuse Feinstaubemissionen werden z.B. freigesetzt bei Einwirkung von Mechanischer Beanspruchung oder Wind auf (Abbildung 7-68):

- Offen Flächen open (Bau-,Abbau-,Anbauflächen),
- Straßen oder Parkplätze,
- Halden oder
- Schüttgutumschlag (Transport, Zerkleinerung, Verladung),

Abbildung 7-68: zeigt verschiedene Diffuse Feinstaubemissionsquellen wo gleichmäßige Schüttgutbefeuchtung eine optimierte Staubunterdrückung darstellen könnte [94].

Das Erreichen gleichmäßiger Gutfeuchte über bei Besprühen einer Schüttguthalde kann zur optimalen Staubunterdrückung um Winderosion von Staub zu unterbinden genauso ein Optimierungsziel darstellen wie die gleichmäßige Befeuchtung von Strassen zur Verhinderung der Wideraufwirbelung von Straßenstaub als auch die gleichmäßige Befeuchtung von Abbaustätten (Tagebau).

Die gleichmäßige Befeuchtung einer Schüttung auf einem Förderband dient uns im Folgenden als Studienobjekt um eine Optimierungsstrategie welche auch auf die zuvor genannten Anwendungsfälle anwendbar sein soll, dienen. Deshalb wird hier einmal zum erreichen gleichmäßiger Gutfeuchte anhand eines konkreten Förderbandes vorgestellt.

Anhand eines Schüttgutförderbandes (B=0,4m v_b=0,3m/s m_A=10,8kg/m^2) soll im Folgenden die Ermittlung der Bedüsungsparameter zum errreichen der gleichmässigen Aufbringung von Feuchte erarbeitet werden.

Um homogene Schüttgutfeuchte über die Förderbandbreite zu erzeugen ist die Minimierung der Abweichung von der Erzeugten zur gewünschten gleichmäßigen Gutfeuchte über die Förderbandbreite notwendig was der Minimierung der Abweichung von $\overline{G}_{\bar{y}}$ zu $\overline{G}_{optimum}$ entspricht. $\overline{G}_{optimum}$ stellt hier eine optimale Schüttgutfeuchte dar die erreicht werden soll. (hier zum Einhalten eines PM10 Grenzwertes)

$$F_{\bar{y}} = \left| \overline{G}_{\bar{y}} - \overline{G_{optimum}} \right| \tag{7-38}$$

$F_{\bar{y}}$ .Abweichung von $\overline{G}_{\bar{y}}$ zu $\overline{G}_{optimum}$ an der Stelle $\bar{y}$ der Klassenweite Δy

[kg $_{wasser}$/kg$_{trockenes\ Schüttgut}$]

$\overline{G}_{optimum}$ optimale Schüttgutfeuchte zum Einhalten eines PM10 Grenzwertes

[kg $_{wasser}$/kg$_{trockenes\ Schüttgut}$]

$$N_B = \frac{B}{\Delta y} \tag{7-39}$$

N_B Anzahl an Klassen über die Förderbandbreite B [ ]

$$F = \sum_{0}^{N_B - 1} F_{\bar{y}} \tag{7-40}$$

F Abweichung von $\overline{G}_{\bar{y}}$ zu $\overline{G}_{optimum}$ über die Förderbandbreite y_b unter Einbeziehung der Düsenhöhe h und eines Wasservolumenstromes $\dot{V}_{fl}$ [kg $_{Wasser}$/kg$_{trockenes\ Schüttgut}$]

F wird für eine bestimmte Förderbandbreite bei verschiedenen Düsenhöhen h und Wasservolumenströmen $\dot{V}_{fl}$ berechnet. Dadurch können ($\dot{V}_{fl}$,h)-kombination bei welchen die Abweichung ein Minimum darstellt gefunden werden. Wird eine apparativ realisierbare Düsenhöhe h festgelegt, so kann ein Wasservolumenstrom $\dot{V}_{fl}$ bei welchen die Befeuchtung über die Förderbandbreite gleichmäßig erfolgt gefunden werden.

Die Abweichungen des durch den Düsenspray erzeugten Schüttgutfeuchteprofiles über die Förderbandbreite zum gleichmäßigen Schüttgutfeuchteprofil zum einhalten von PM10 Grenzwerten (Abbildung 7-69) werden zu F aufsummiert. Durch die Flächenvergleichsmethode (Gleichung 7-40) kann F bei unterschiedlichen Düsenhöhen und Volumenströmen berechnet werden (Abbildung.7-70). Daher kann F in Abhängigkeit der Auslegungsgrößen Düsenhöhe h und Wasservolumenstrom $\dot{V}_{fl}$ dargestellt werden und ein Abweichungsminimum gefunden werden (Abbildung 7-71).

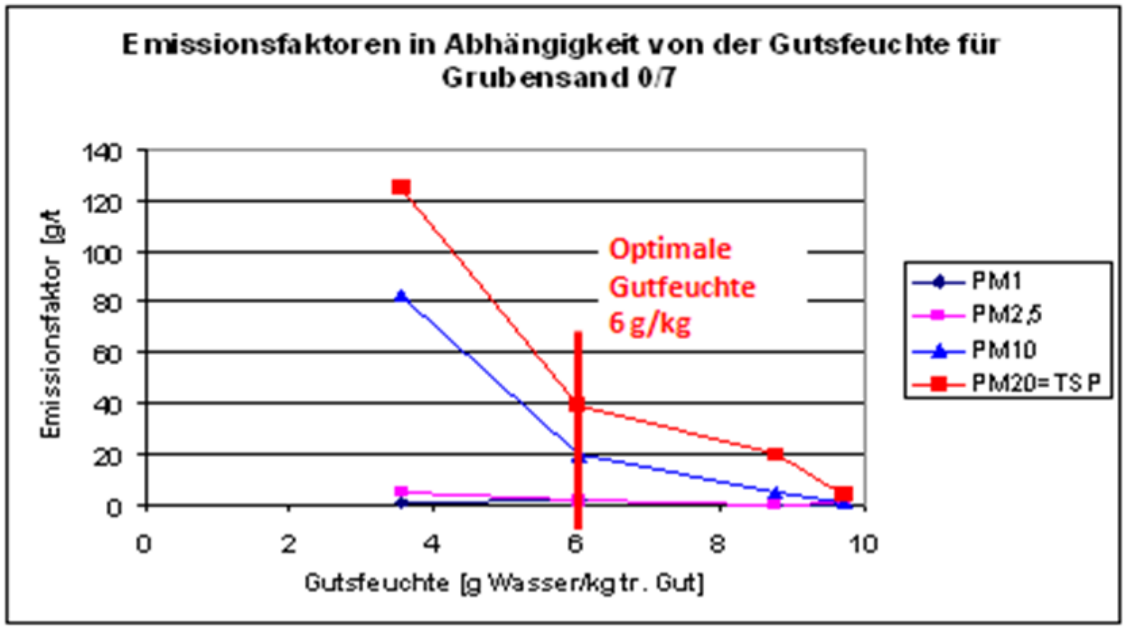


Abbildung 7-69: **optimale Gutfeuchte um PM10 Grenzwerte einzuhalten [92],[93],[94].**

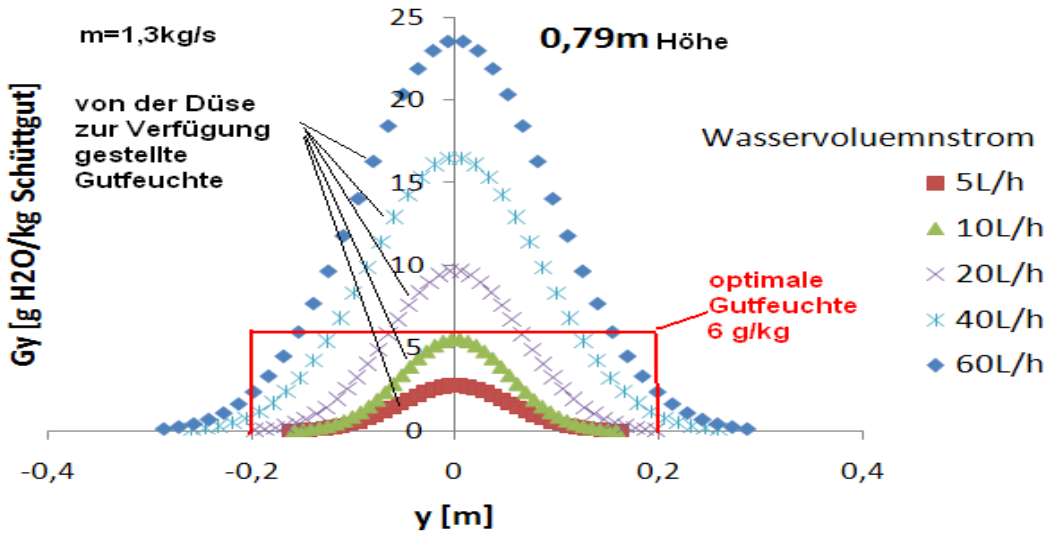


Abbildung 7-70: **Flächenvergleichsmethode**

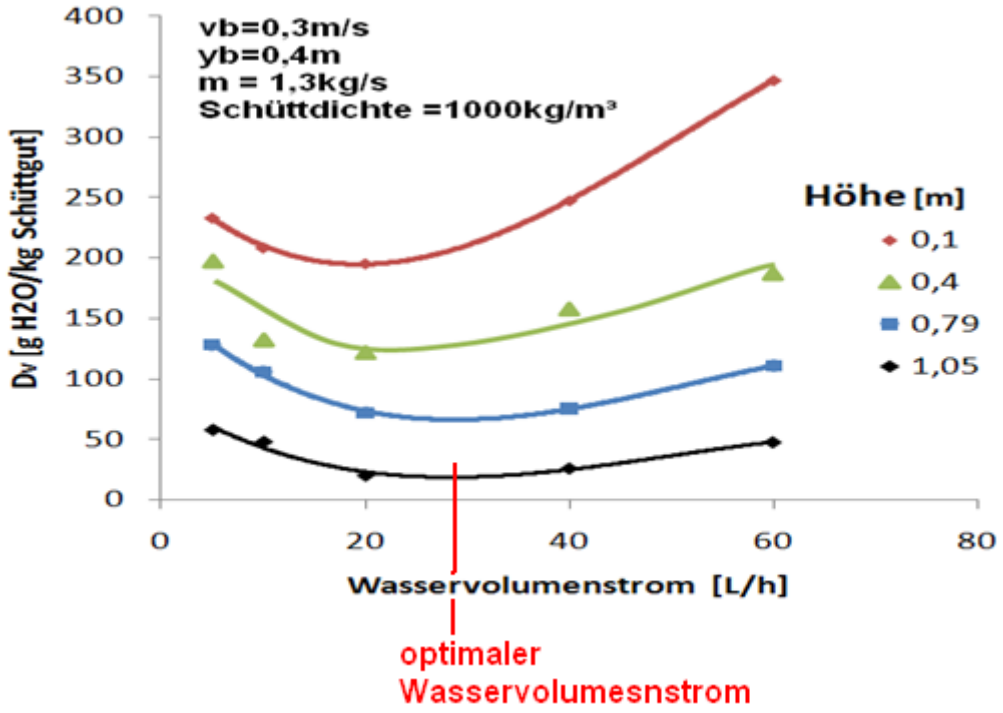


Abbildung 7-71: F **in Abhängigkeit der Auslegungsgrößen**

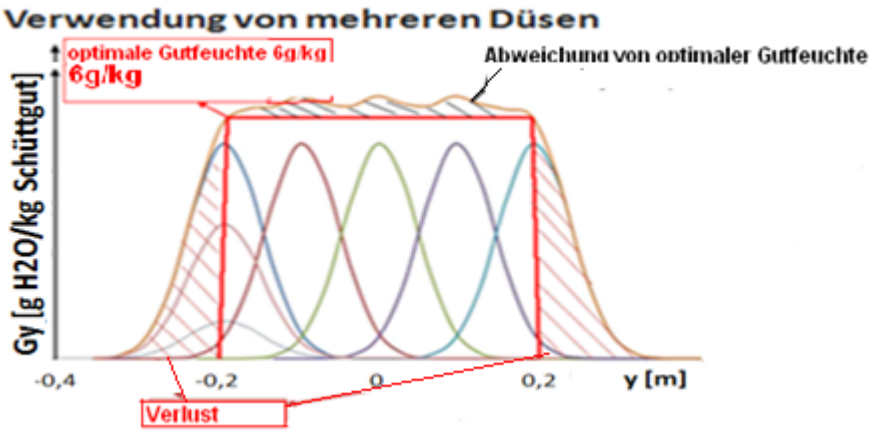


Abbildung 7-72: Ermittlung von optimalen h , V_{fl} sowie der optimalen Düsenanzahl zum Erreichen einer gleichmäßigen Gutfeuchte unter Minimierung des Wasserverbrauches

Durch das aufgestellte Rechenchema kann der optimale Befeuchtungszustand durch berechnen optimaler Auslegungsgrößen des Wassersprays ystemes (Düsenhöhe h und Wasservolumenstrom V_{fl}) erreicht werden. Die Auslegungsgrößen des Förderbandes (Schüttgutflächenmasse m_A, Förderbandbreite B sowie Förderbandgeschwindigkeit sind bei diesem Verfahren vorzugeben). Das abgeleitete Optimierungsverfahren dient als Ausgangspunkt für die Optimierung der Düsenanzahl und des Abstandes der Düsen zueinander Abbildung 7-72. Dies wird im Folgenden durch Erstellung eines Rechenprogrammes mit Hilfe der Mathematiksoftware Maple Version 13 erarbeitet. Hierzu wird jedoch der Flüssigkeitsmassenstrom My für die Optimierungsrechnung herangezogen und nicht die Gutfeuchte Gy. My stellt nämlich eine von den Auslegungsgrößen des Förderbandes

unabhängige Kennzahl des Befeuchtungszustandes dar. Der optimale Flüssigkeitsmassenstrom My welcher über die Förderbandbreite aus dem Sprühbild der Düse resultiert wird zum erreichen eines optimal gleichmässigen Flüssigkeitsmassenstromes durch optimieren der Düsenhöhe und des Wasservolumenstromes berechnet.

7.7.1.1 Rechenprogramm zur Optimierung der Düsenzahl und des Düsenabstandes von Wasserspraysystemen zum erreichen gleichmäßiger Gutfeuchte über verschiedene Schüttgutprofile [95]

Es gilt im Folgenden eine analytische Berechnungsmethode zu entwickeln, um eine gleichmäßige Befeuchtung eines Schüttgutes auf einem Förderband zu erreichen. Dabei wurden über einer Schüttung mit Rechtecksprofiel über die Förderbandbreite sowie für eine Schüttung mit Dreiecksprofil über die Förderbandbreite eine bis zehn Düsen über einem modellhaften Förderband angeordnet, und anschließend die Düsenparameter, sowie der Abstand zwischen den Düsen m optimiert.

Ausgehend von den erfassten Sprühbildern der Zweistrahl Vollkegeldüse VSR 1005 wurden Befeuchtungsgeschwindigkeiten v(x) radial in Form einer dreidimensionalen Glockenfunktion (Gleichung 7-5) beschrieben. Diese wurde in kartesische Koordinaten zerlegt und numerisch in Förderbandlaufrichtung je Klassenbreite Δy (Förderbandsteifen) aufsummiert um den Flüssigkeitsmassenstrom M_y je Klassenbreite Δy zu ergeben. Diese berechneten Werte M_y an bestimmten Stützstellen y. werden nach Gleichung (7-23) berechnet (siehe Abbildung (7-73)) Diese M_y Werte über die Förderbandbreite aufgetragen weisen in etwa den Trend einer Glockenfunktion auf. Daher wurde der Verlauf der M_y Werte über die Förderbandbreite auf eine Glockenfunktion der Form nach Gleichung (7-41) regressiert.

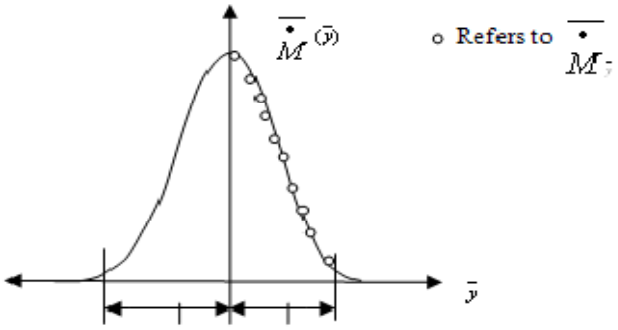


Abbildung 7-73: Datenpunkte des Sprühbildes nach Summation in Förderbandlaufrichtung

$$\widetilde{\dot{M}}_y = \alpha * e^{-\beta * y^2} \qquad (7\text{-}41)$$

α: : :Regressionskonstante in kg/ms

β: : : Regressionskonstante in $1/m^2$

y : : :Koordinate über die Förderbandbreite in m

M_y : :Massenstrom an der Stelle y in kg/ms

Durch die Vermessung der Düse bei verschiedenen Volumenströmen und Höhen steht nach der Regression des Profils des Flüssigkeitsmassenstromes je Klassenbreite über die Förderbandbreite ein Datenfeld welches die Funktionsparameter α und β mit den Düsenparametern V_{fl} und h verknüpft zur Verfügung.

Das Profil des Flüssigekitsmassenstromes M_y je Klassenbreite zeigt welche Befeuchtungswirkung über die Förderbandbreite durch das Sprühbild über die Schüttgutoberfläche letzt endlich resultiert. Der Flüssigekitsmassenstrom M_y je Klassenbreite ist wie in der Ableitung Kapitel 7.5 Gleichung 7-23 ersichtlich von den Auslegungsgrößen des Förderbandes unabhängig und stellt somit eine allgemein gültige Darstellung der Befeuchtungswirkung die aus einem Sprühbild resultiert dar. Erst bei der Berechnung des Gutfeuchteprofiles G das aus der Befeuchtungswirkung des Sprühbildes hervorgeht fließen Auslegungsgrößen des Förderbandes (Bandgeschwindigkeit, Bandbreite, Schüttgutflächenmasse am Förderband) in die Berechnung mit ein. Um eine analytische Berechnungsmethode zur Berechnung des Optimums der Auslegungsgrößen allgemein anwendbar zu machen (nicht nur für Förderbänder, sondern auch andere Bereiche wie: aufbringen von Klebstoffen, Lacken oder Beschichtungen genauso wie bei Druckereien oder gleichmäßiger Bewässerung), gilt es M_y zu verwenden da M_y eine allgemeingültige Darstellung der Befeuchtungswirkung die aus einem Sprühbild resultiert darstellt welche unabhängig von den Auslegungsgrößen des Förderbandes ist.

7.7.1.1.1 Definition des Förderbandes als konkreten Anwendungsfall

Das in Kapitel 7.5 erwähnte Förderband hat eine Breite von 0,5 m und eine Geschwindigkeit von 1 m/s. Es wurden zwei einfache Schüttgutverteilungen auf dem Förderband angenommen: ein rechteckförmiges und ein dreieckförmiges Profil. Diese wurden derart gestaltet: Das Dreiecksprofil begann genau an den Rändern des Förderbands, und stieg mit einem Böschungswinkel von 35° an. Dieser Winkel kann aufgrund der inneren Reibungen im Schüttgut als sehr gute Annahme vertreten werden. Somit ergab sich eine

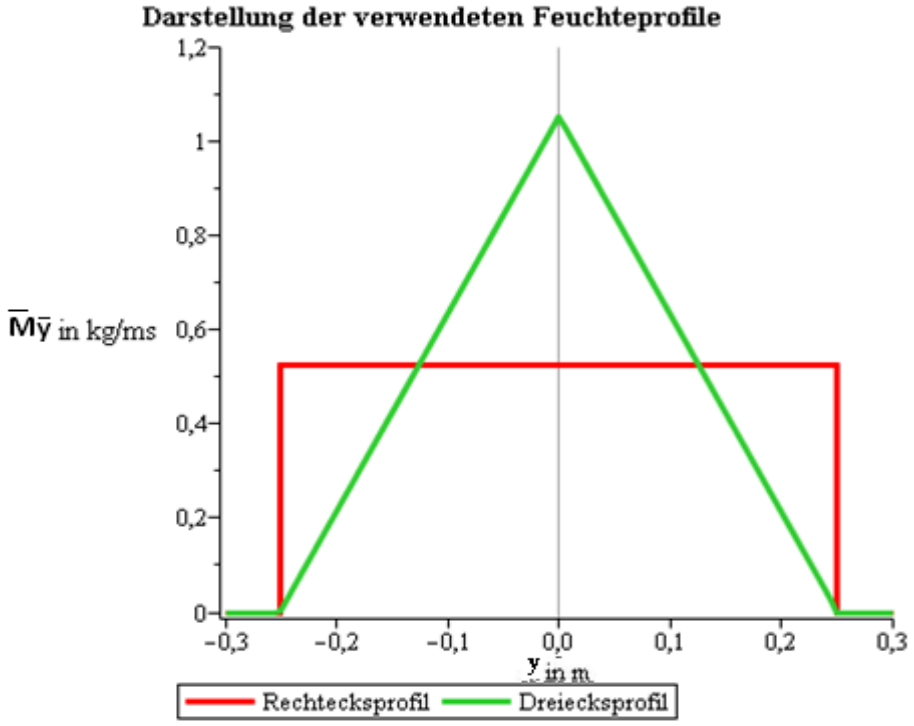


Abbildung 7-74: Darstellung der verwendeten Schüttgutprofile über die Förderbandbreite

maximale Schüttguthöhe von 17,51 cm. Das Rechtecksprofil wurde durch eine Flächengleiche Transformation auf eine Höhe von 8,75 cm angepasst. Mit einer aus Vorversuchen [92], [93],

[94] bekannten Wassermenge von 6 g Wasser pro kg Schüttgut und einer Schüttgutdichte von 1000 kg/m^3 ergaben sich die Feuchteprofile wie in Abbildung (7-74) dargestellt. Die zugehörigen Gleichungen sind bei (7-42) und (7-43) angegeben.

$$g_{Rechteck} = \begin{cases} 0,525 & |y| \leq 0,25 \\ 0 & |y| > 0,25 \end{cases} \tag{7-42}$$

$g_{Rechteck}$: : : Feuchteprofil bei rechteckiger Profilvorgabe

$$g_{Dreieck} = \begin{cases} -4,2sgn(y)\,y + 1,05 & |y| \leq 0,25 \\ 0 & |y| > 0,25 \end{cases} \tag{7-43}$$

$g_{Dreieck}$: : : Feuchteprofil bei dreieckiger Profilvorgabe

Für die Düsenanordnung wurden jeweils eine bis zehn Düsen betrachtet. Wobei mehrere Düsen zueinander äquidistant Angeordnet wurden. Dieser Abstand wurde durch den Parameter m beschrieben, wobei m bei einer ungeraden Düsenanzahl den tatsächlichen Abstand zwischen den Düsen beschrieb, bei einer geraden Anzahl den halben Abstand. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, damit die Verschiebungsterme in der Berechnung eine einfachere Gestalt annehmen, siehe Gleichungen (7-44) und (7-45). Die Gleichungen für drei beziehungsweise vier Düsen sind im Folgenden Angegeben:

$$f_3 = \alpha \left(e^{-\beta(y+m)^2} + e^{-\beta y^2} + e^{-\beta(y-m)^2} \right) \tag{7-44}$$

f_3 : : : Feuchteprofil von drei Düsen

$$f_4 = \alpha \left(e^{-\beta(y-3\,m)^2} + e^{-\beta(y-m)^2} + e^{-\beta(y+m)^2} + e^{-\beta(y+3\,m)^2} \right) \tag{7-45}$$

f_4 : : : Feuchteprofil von vier Düsen

Um das Ziel einer Optimierung zu erreichen, werden im Folgenden die Funktionen f_n, für jeweils n Düsen, durch Parameteroptimierung möglichst gut an die Funktionen P_{rofil} angepasst.

7.7.1.1.2 Unterscheidung der Fehlerarten Profilfehler und Gesamtfehler die zu minimieren sind um das Optimum zu ermitteln

Gesamtfehler: unter Gesamtfehler wird die Abweichung des durch die Düsenbesprühung erzeugten Flüssigkeitsmassenstromes je Klassenbreite My [kg/ms] zum gleichmäßigen erforderlichen Niveau an Flüssigkeitsmassenstrom welches erzeugt werden soll, auch außerhalb des Förderbandrandes verstanden (Abbildung 7-56). Es wird in diesem Zusammenhang also die Wassermenge welche außerhalb des Förderbandes niedergeht berücksichtigt. Der Gesamtfehler evaluiert somit die Zielgenauigkeit der Befeuchtung hin auf ein gewünschtes Niveau unter Vermeidung der Besprühung außerhalb des Förderbandes.

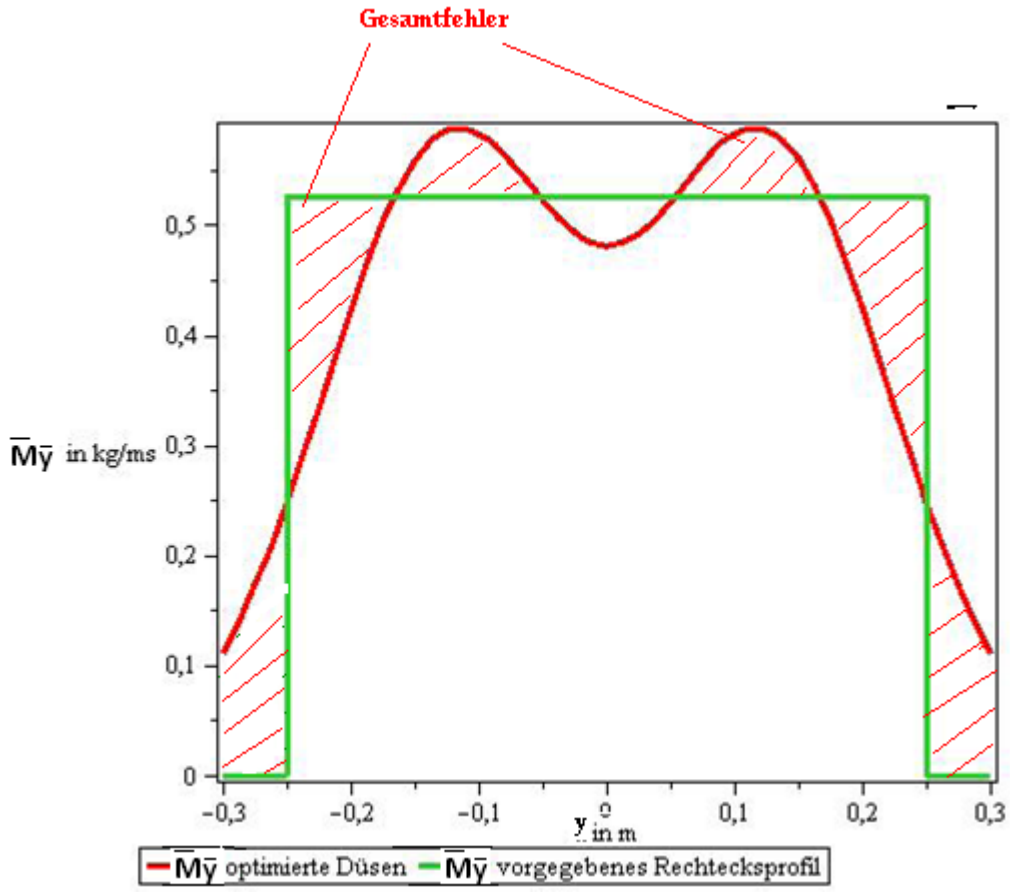


Abbildung 7-75:Darstellung der Abweichung vom Rechtecksfeuchteprofil (Gesamtfehler)

Die Vermeidung von Befeuchtungsverlusten durch die Optimierungsrechnung kann auf Kosten der Zielgenauigkeit der Befeuchtung gehen. Deshalb wurde die Abweichung des erzeugten Befeuchtungszustandes zum gewünschten Befeuchtungszustand ohne Berücksichtigung des Wasserverlustes am Rand als Profilfehler ebenfalls berechnet.

Profilfehler: unter Profilfehler wird die Abweichung des durch die Düsenbesprühung erzeugten Flüssigkeitsmassenstromes je Klassenbreite My [kg/ms] zum gleichmäßigen erforderlichen Niveau an Flüssigkeitsmassenstrom welches erzeugt werden soll, bis zum Förderbandrand verstanden. Es wird in diesem Zusammenhang also jegliche Abweichung außerhalb des Förderbandes bzw. die Wassermenge welche unnötig versprüht wird und außerhalb des Förderbandes niedergeht nicht berücksichtigt (Abbildung 7-76). Der Profilfehler evaluiert somit die Zielgenauigkeit der Befeuchtung hin auf ein gewünschtes Niveau ohne Wasserverluste zu berücksichtigen.

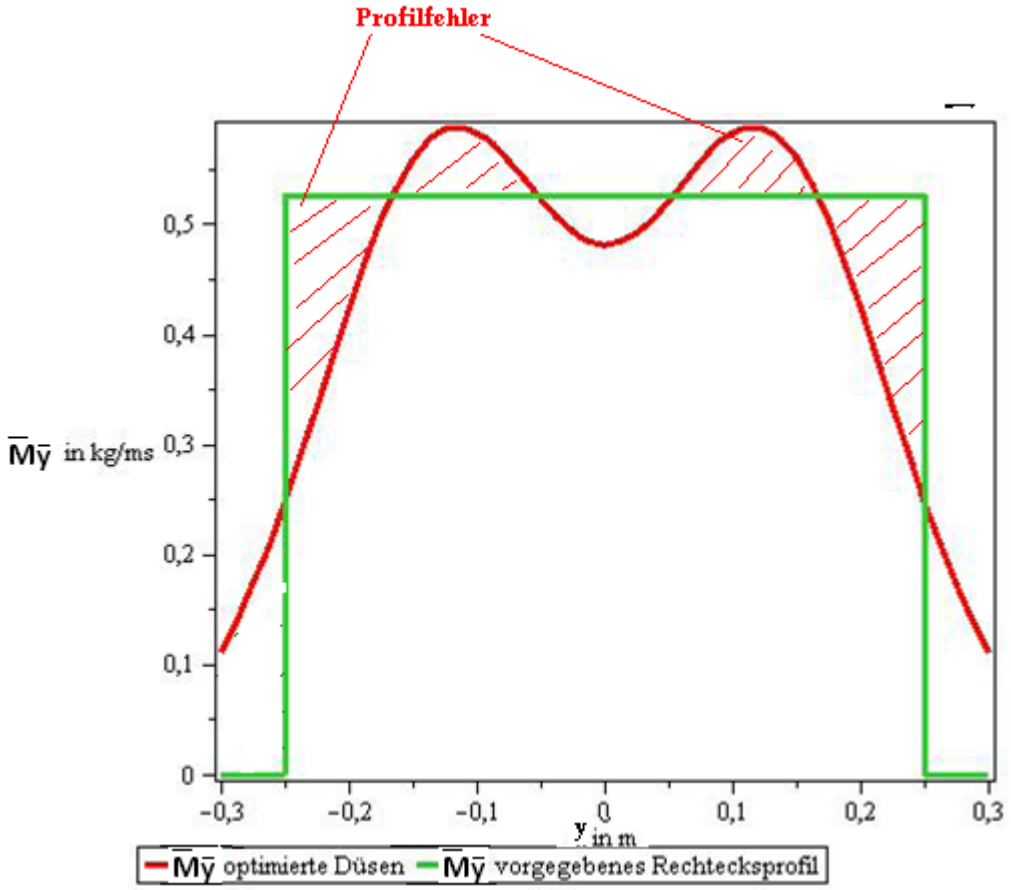


Abbildung 7-76:Darstellung der Abweichung vom Rechtecksfeuchteprofil ausschließlich am Förderband (ohne Berücksichtigung von Randverlusten)(Profilfehler)

Durch die beiden Kennzahlen (Gesamtfehler und Profilfehler) gelingt es nun die Qualität der Befeuchtung zu Evaluieren und einem Optimierungsverfahren zu unterwerfen. Das Optimierungsverfahren berechnet jeweils für die Schüttung am Förderband (Rechtecksprofil oder Dreiecksprofil) die Gesamtfehler und Profilfehler und versucht diese durch Variation der Bedüsungsparameter Düsenabstand m , Düsenanzahl N, sowie die Befeuchtungskonstanten α und β (also Wasservolumenstrom V_{fl} und Düsenhöhe h) zu minimieren und so das Optimum zu identifizieren.

7.7.1.1.3 Berechnung des Optimums für zwei verschiedene Schüttgutprofile über die Förderbandbreite (Rechtecksprofil, Dreiecksprofil)

Diese Funktion ist in Abbildung (7-77) gemeinsam mit der Vorgegebenen Rechtecksfuntkion dargestellt. Dieses Verfahren wurde für alle betrachteten Vorgaben nach Kapitel 7.7.1.1.2 durchgeführt:

- Düsenzahl von eins bis zehn
- Rechtecks- und Dreiecksprofil
- Gesamt- sowie Profilfehler

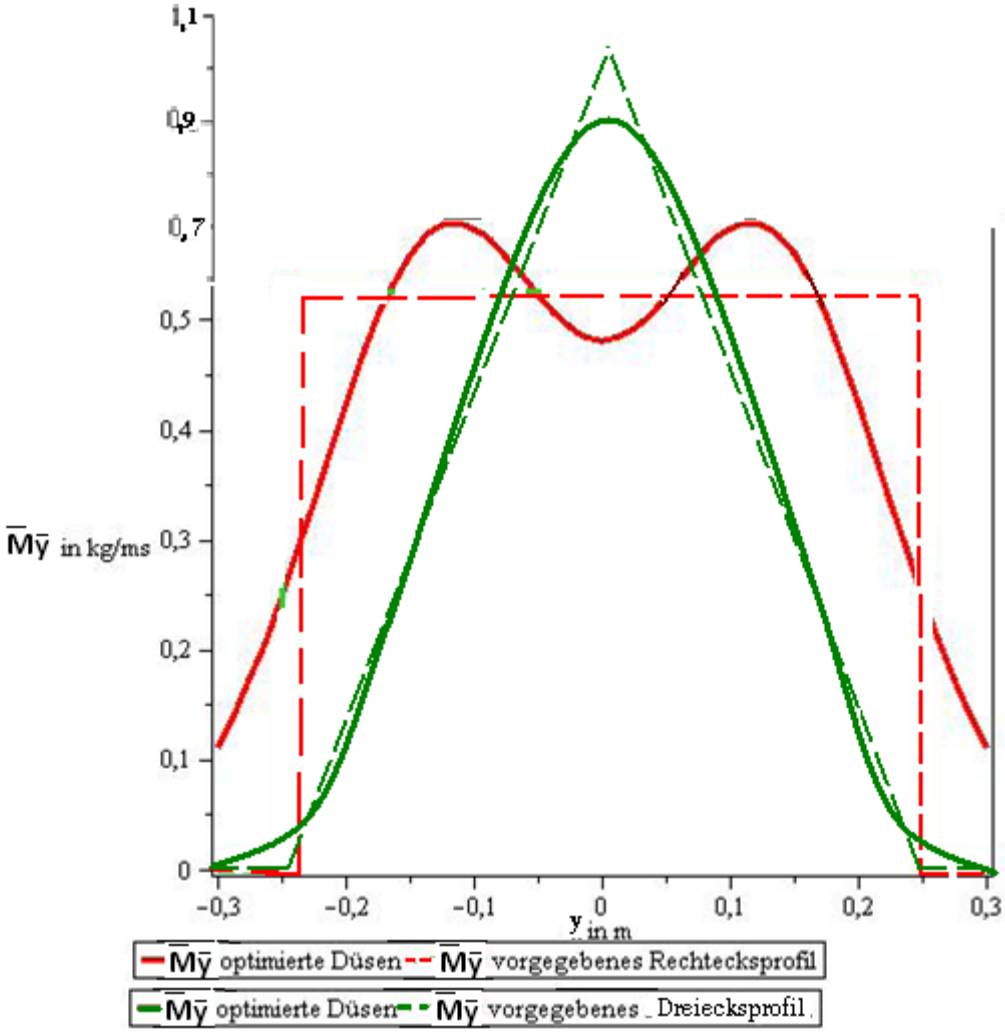


Abbildung 7-77: Vergleich der optimierten Düsenparameter für zwei Düsen sowie das vorgegebene Rechtecksprofil

Weiters wurde für das Dreiecksprofil eine weitere, spezielle Düsenkombination betrachtet. Für drei und fünf Düsen wurde das Maximum der Befeuchtungswirkung α (maxima des Glockenprofiles des Flüssigkeitsmassenstromes je Klassenbreite über die Förderbandbreite) der nicht zentral gelegenen Düsen nach dem Abstand von der Mitte gewichtet, Gleichung (7-46). Dadurch sollte eine bessere Annäherung an das Dreiecksprofil erreicht werden.

$$f_{3,angepasst} = \alpha \left(\frac{0,25-m}{0,25} e^{-\beta(x-m)^2} + e^{-\beta x^2} + \frac{0,25-m}{0,25} e^{-\beta(x+m)^2} \right) \quad (7\text{-}46)$$

7.7.1.1.4 Durchführung der Berechnung

Um die notwendigen Berechnungen durchzuführen wurde auf die Mathematiksoftware Maple in der Version 13 zurückgegriffen. Mit dieser Software ist es möglich, Berechnungen symbolisch durchzuführen. Weiters sind eine breite Palette an Plots und Diagrammen darstellbar. Für die Optimierung der Düsenparameter und dem Abstand zwischen den Düsen wurde die Methode

der kleinsten Quadrate gewählt. Für die Fehlerminimierung wurden jeweils unbestimmte Ansätze aus den Gleichungen (7-42 bis 7-45) gebildet, wobei jeweils die Unterschiede zwischen gewünschten Gutfeuchteprofil Gleichung (7-42-7-43) zu erzeugter Gutfeuchte Gleichung (7-44 bis 7-45) minimiert wurden siehe Gleichung 7-47.

$$F = \int_k^l (f_n - g_{Profil})^2 dx \tag{7-47}$$

Es wurden zwei Fehlerbetrachtungen herangezogen:

Gesamtfehler mit Integrationsgrenzen von $-\infty$ bis ∞
Profilfehler mit Integrationsgrenzen von -0,25 bis 0,25, also genau über dem Förderband

Da die Funktionsterme sehr groß werden, ist im Folgenden exemplarisch die gewählte Vorgehensweise für zwei Düsen und das Rechtecksprofil für den Gesamtfehler ausführlich dargestellt. Für den Ansatz nach Gleichung (7-47) sind folgende Funktionen (7-48) (7-49) verwendet worden:

$$f_2 = \alpha(e^{-\beta(\mathfrak{y}+m)^2} + e^{-\beta(\mathfrak{y}-m)^2}) \tag{7-48}$$

$$g_{Rechteck} = \begin{cases} 0,525 & |\mathfrak{y}| \leq 0,25 \\ 0 & |\mathfrak{y}| > 0,25 \end{cases} \tag{7-49}$$

Womit der Ansatz (7-47) folgende Gestalt (7-50) annimmt:

$$F_2 = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\alpha(e^{-\beta(\mathfrak{y}+m)^2} + e^{-\beta(\mathfrak{y}-m)^2}) - \begin{cases} 0,525 & |\mathfrak{y}| \leq 0,25 \\ 0 & |\mathfrak{y}| > 0,25 \end{cases} \right)^2 d\mathfrak{y} \tag{7-50}$$

Dieses Integral berechnet sich zu Abbildung (7-78).

$$F := -\frac{1}{\sqrt{b}}\left(1.253314137\, a^2 \left(-2.\, e^{2.\, b\, m^2} - 2. + \operatorname{erf}\left(0.3535533906\, \sqrt{b} + 1.414213562\, \sqrt{b}\, m\right) e^{2.\, b\, m^2} + 2.\, \operatorname{erf}\left(0.3535533906\, \sqrt{b}\right) - 1.\, \operatorname{erf}\left(-0.3535533906\, \sqrt{b} + 1.414213562\, \sqrt{b}\, m\right) e^{2.\, b\, m^2}\right) e^{-2.\, b\, m^2}\right) + \frac{1}{\sqrt{b}}\left(0.00031250000000 \left(4010.605239\, a^2 \operatorname{erf}\left(0.3535533906\, \sqrt{b} + 1.414213562\, \sqrt{b}\, m\right) e^{2.\, b\, m^2} + 8021.210479\, a^2 \operatorname{erf}\left(0.3535533906\, \sqrt{b}\right) + 441.\, \sqrt{b}\, e^{2.\, b\, m^2} - 5955.444939\, a \operatorname{erf}\left(0.2500000000\, \sqrt{b} + \sqrt{b}\, m\right) e^{2.\, b\, m^2} - 4010.605239\, a^2 \operatorname{erf}\left(-0.3535533906\, \sqrt{b} + 1.414213562\, \sqrt{b}\, m\right) e^{2.\, b\, m^2} + 5955.444939\, a \operatorname{erf}\left(-0.2500000000\, \sqrt{b} + \sqrt{b}\, m\right) e^{2.\, b\, m^2}\right) e^{-2.\, b\, m^2}\right)$$

Abbildung 7-78: Gesamtfehler für zwei Düsen und Rechtecksprofil. Die Parameter α und β sind hier mit a und b bezeichnet.

Da der Parameter α als einziger weder in erf- noch Exponentialtermen vorkommt wurde mit der Berechnung des Minimums nach α begonnen, das heißt, folgende Gleichung (7-51) wurde nach α gelöst:

$$\frac{\partial F_2}{\partial \alpha} = 0 \tag{7-51}$$

Die Nullstelle befindet sich bei Abbildung (7-79):

$$> \ solve\left(\frac{\partial}{\partial a} F = 0, a\right)$$

$$\left(1.488861235\ 10^{10}\ e^{2.\,b\,m^2}\left(\mathrm{erf}\left(0.2500000000\sqrt{b} + \sqrt{b}\,m\right) - 1.\ \mathrm{erf}\left(-0.2500000000\sqrt{b} + \sqrt{b}\,m\right)\right)\right) \Big/ \left(4.010605238\ 10^{10}\ e^{2.\,b\,m^2} + 4.010605238\ 10^{10}\right.$$
$$\left. + 3.\ \mathrm{erf}\left(0.3535533906\sqrt{b} + 1.414213562\sqrt{b}\,m\right) e^{2.\,b\,m^2} + 16.\ \mathrm{erf}\left(0.3535533906\sqrt{b}\right) - 3.\ \mathrm{erf}\left(-0.3535533906\sqrt{b} + 1.414213562\sqrt{b}\,m\right) e^{2.\,b\,m^2}\right)$$

Abbildung 7-79: Nullstelle von α, welches hier mit a bezeichnet wurde, sowie β mit b.

Diese Lösung für α wurde anschließend in die Funktion (7-50) rückeingesetzt. Die dadurch gebildete Funktion ist nur mehr von β und m abhängig. Diese wird hier nicht angegeben, da diese den Rahmen sprengen würde. Allerdings ist ersichtlich, dass aufgrund der zahlreich auftretenden erf- und Exponentialterme eine analytische Berechnung der Terme $\frac{\partial F}{\partial \beta} = 0$ und $\frac{\partial F}{\partial m} = 0$ unmöglich ist. Die in Maple vorhandenen numerischen Verfahren versagen ebenfalls, da in Maple die Fehlerfunktion komplex definiert ist, auch wenn ausschließlich reelle Argumente eingesetzt werden. Aus diesen Gründen wurde auf ein graphisches Verfahren zurückgegriffen. Bei diesem wurde die Darstellung des optimalen α nach Abbildung (7-60) in die Gleichung des Gesamtfehlers eingesetzt. Anschließend wurde ein Plot folgender Art angewendet:
Auf der Ordinate wurde der Gesamtfehler aufgetragen, auf der Abszisse der Parameter m. Der Parameter β war durch einen Schieberegler einstellbar, siehe Abblidung (7-80).

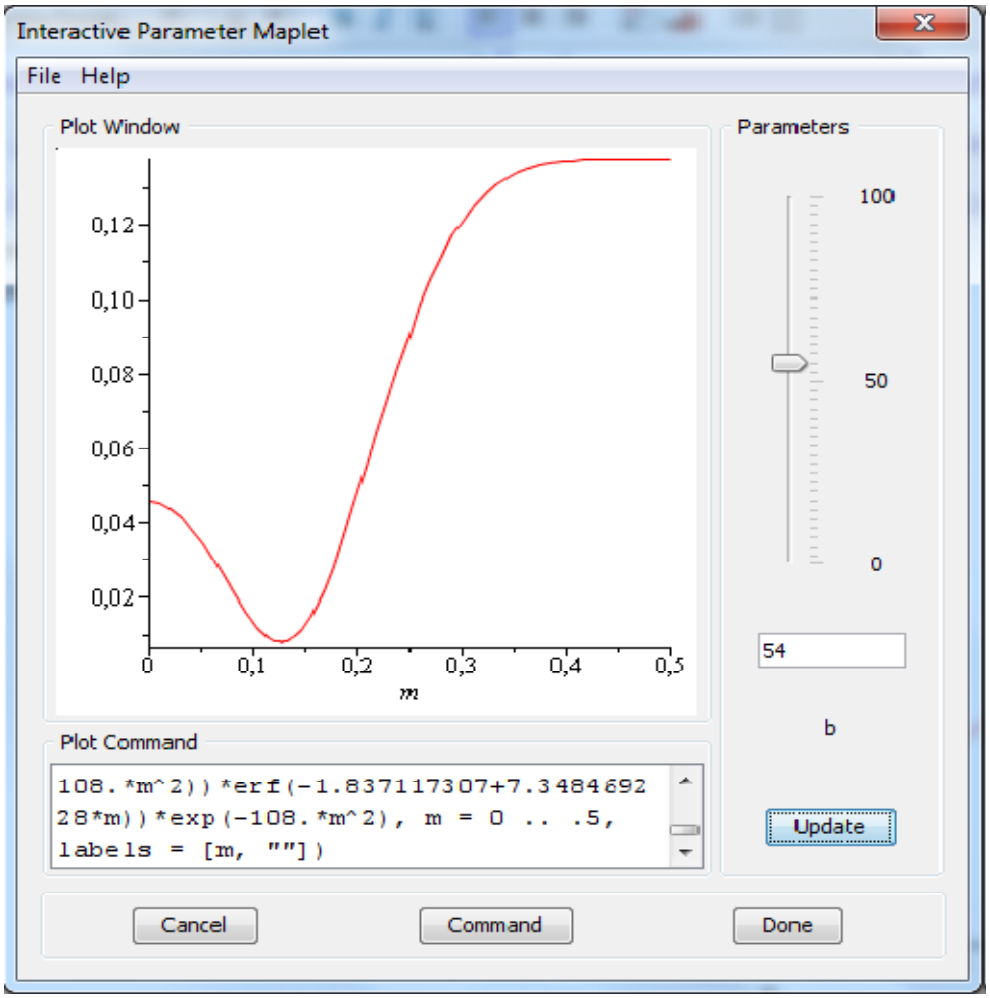


Abbildung 7-80: Maple Plot Fenster zum Variieren des Parameters β, der in Maple mit b bezeichnet wurde. Auf der Ordinate ist der Fehler F_2 in kg^2/ms^2 aufgetragen, auf der Abszisse der Parameter m in m.

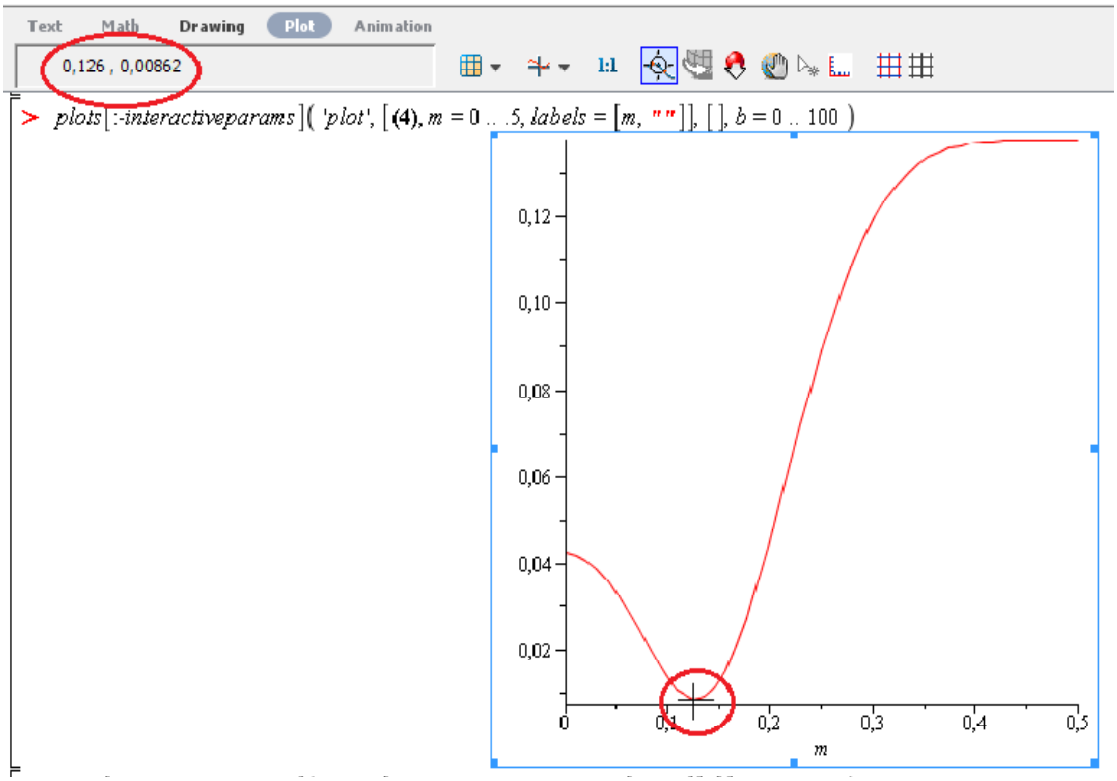


Abbildung 7-81: In Maple vorhandene Möglichkeit zum Ablesen der Funktionswerte. Auf der Ordinate ist der Fehler F_2 in kg^2/ms^2 aufgetragen, auf der Abszisse der Parameter m in m.

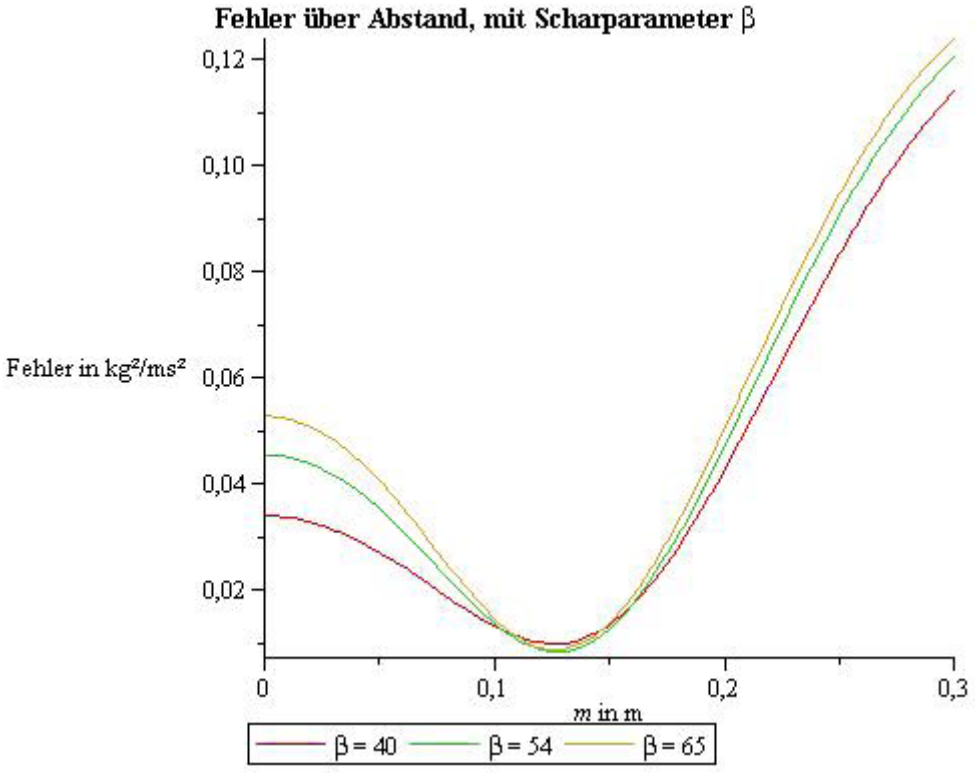


Abbildung 7-82: Darstellung von drei Ausgewählten Scharkurven für β in $1/m^2$ über m

Das entspricht einer Kurvenschar mit Scharparameter β. Durch Variation des Parameters konnte das Minimum sehr gut gefunden werden, siehe Abbildung (7-81). Es hat sich gezeigt, dass das optimale m in einer Umgebung vom optimalen β nahezu unabhängig von β ist, sich der optimale Düsenabstand bei kleiner Änderung von β um das Optimum nicht darstellbar ändert. (Abbildung (7-82)) Daraus kann geschlossen werden, dass eine optimale Befeuchtung robust ist gegen kleine Änderungen des Düsenparameters β, dort als eine größere Toleranz beziehungsweise größere Schwankungen toleriert werden können. Somit konnten die Werte für β_{opt} und m_{opt} sowie der Fehler $F|_{\alpha_{opt},\beta_{opt},m_{opt}}$ abgelesen werden. Dabei kam die in Maple vorhandene Koordinatenanzeige der Mauszeigerposition zum Einsatz Abbildung (7-81). Es wurden die Werte in Tabelle ermittelt, wobei zu beachten ist, dass m hier den halben Abstand zwischen den Düsen beschreibt, da die Düsenzahl gerade ist. Durch das gewählte Verfahren können α_{opt} , β_{opt} sowie m_{opt} gefunden werden bei welchem der minimale Fehler zum gewünschten gleichmäßigen Gutfeuchteprofil von 0,5 kg/ms erreicht werden kann.

F	α	β	m
0,00862	0,567	54	0,126

Somit ergibt sich die Funktion f_2 zu:

$$f_2 = 0,567\left(e^{-54(\mathfrak{y}-0,126)^2} + e^{-54(\mathfrak{y}+0,126)^2}\right) \tag{7-52}$$

7.7.1.1.5 Ergebnisse der Berechnung

Nach der in Kapitel 7.8.1.3 genannten Rechenprozedur konnten für das Rechtecksprofil die Parameter für eine bis zehn Düsen optimiert werden. Beim Dreiecksprofil war dies nur bis zu sieben Düsen möglich, da Maple auf Funktionen bis 10^6 Zeichen beschränkt ist, und diese Grenze erreicht wurde. Im Folgenden sollen die Werte präsentiert und diskutiert werden. Die Parameter α und β können dabei wie folgt interpretiert werden:

- α ist der Wassermenge direkt unter der Düse proportional
- β ist der Breite des Sprühbildes indirekt proportional, große Werte für β bedeuten daher eine schmale Glocke.

Düsenzahl	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rechtecksprofil - Gesamtfehler										
F	0,0151	0,00862	0,00661	0,00465	0,00417	0,00331	0,00325	0,00265	0,00262	0,00247
α	0,6156	0,567	0,5122	0,5375	0,5296	0,4914	0,4978	0,4767	0,5901	0,4892
β	15	54	100	200	310	400	550	650	950	1100
m	0	0,252	0,167	0,127	0,1	0,08	0,07	0,062	0,0554	0,0488
Rechtecksprofil - Profilfehler										
F	0	1,46E-09	2,52E-07	1,15E-10	9,54E-10	8,62E-11	1,34E-07	4,83E-10	1,34E-07	6,86E-09
α	0	0,431	0,3625	0,3286	0,2986	0,2778	0,2962	0,2962	0,237	0,237
β	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
m	0	1,426	1,221	1,108	1,008	0,938	1	1	0,8	0,8
Dreiecksprofil - Gesamtfehler										
F	0,000769	0,000906	0,000717	0,000769	0,000769	0,000712	0,000769			
α	0,9727	0,6381	0,4309	0,2402	0,1945	0,223	0,1373			
β	42	75	75	40	42	80	40			
m	0	0,126	0,083	0	0	0,0416	0			
Dreiecksprofil - Profilfehler										
F	0,00048	0,00048	0,00048	0,00079	0,00048	0,00079	0,00079			
α	0,9624	0,482	0,3213	0,233	0,1951	0,1551	0,133			
β	40	40	40	35	40	35	35			
m	0	0,01772	0,0103	0	0,0185	0	0			
Dreiecksprofil - Angepasst										
F			0,000733		0,000123		F in	kg^2/ms^2		
α			0,4206		0,7591		α in	kg/ms		
β			50		230		β in	1/m^2		
m			0,0582		0,0827		m in	m		

Abbildung 7-83: Auflistung der optimierten Funktionsparameter

Die optimierten Werte sind in Abbildung (7-83) angegeben. Weiters sind in Abbildungen (7-79 bis 7-83) die Verläufe graphisch über der Düsenanzahl dargestellt.

7.7.1.1.5.1 Rechtecksprofil - Gesamtfehler

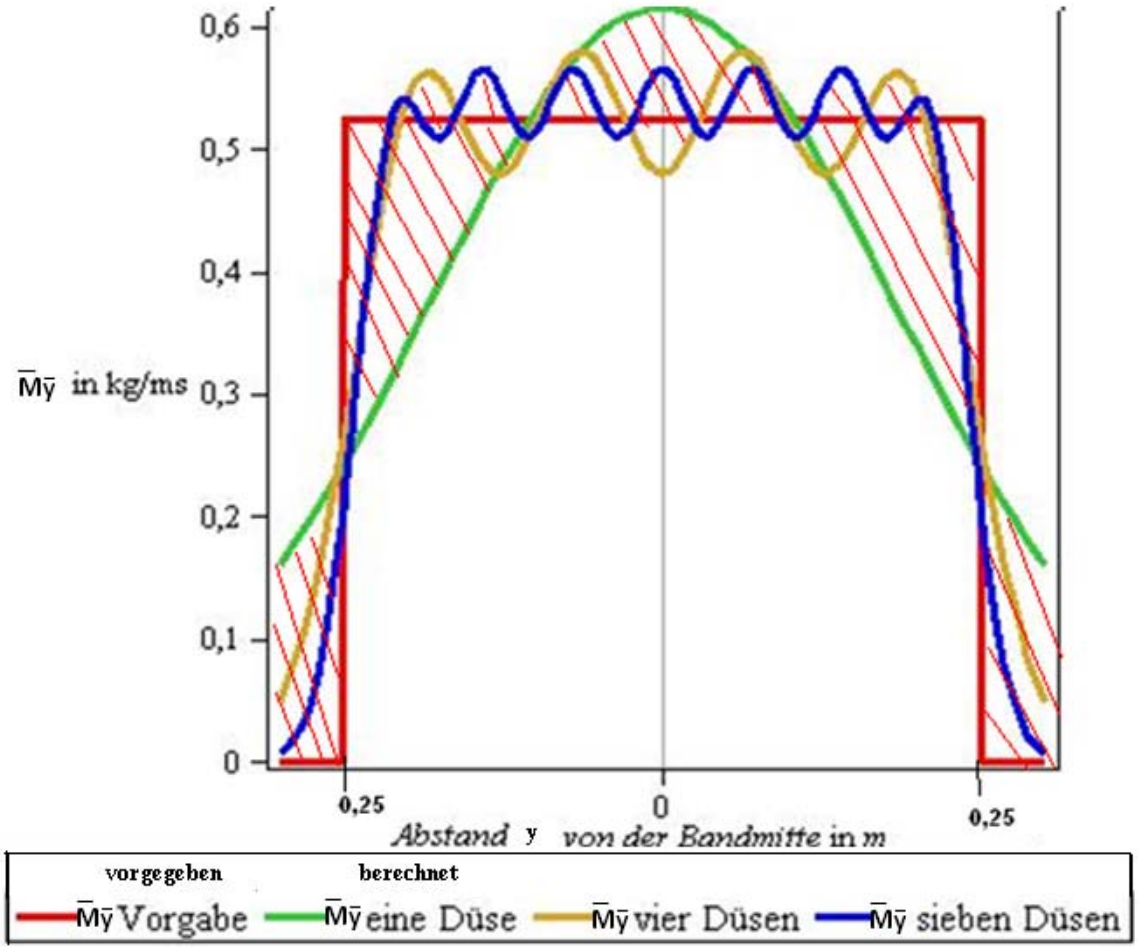


Abbildung 7-84: Darstellung von mehreren Düsenzahlen bei Rechtecksprofil – Gesamtfehler Vereinfachung berechnet wurde.

Für den Fall des Rechtecksprofils bei Betrachtung des Gesamtfehlers (Abbildung (7-85)) fällt folgendes auf:

- Der Fehler sinkt mit steigender Düsenzahl.
- α ändert sich nicht wesentlich.
- β steigt stark an.
- m sinkt.

In Abbildung (7-84) sind die optimierten Sprühbilder mehrerer Düsen sowie das vorgegebene Rechtecksprofil dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit mehr Düsen, das Profil besser angenähert werden kann, was im absinken des Fehlers wiedergespiegelt wird. Da die Gewünschte Wassermenge über das Band hin konstant bleibt, ist auch α im wesentlichen unverändert. Da mit mehreren Düsen jede einzelne einen immer schmäleren Bereich abdecken muss, ist das ansteigen von β ebenfalls erkennbar. Die äußersten Düsen 13 bleiben immer etwas innerhalb vom Förderband, weshalb m mit steigender Düsenzahl sinkt. Es ist ein Trend dahin erkennbar, dass möglichst viele, möglichst schmal sprühende Düsen das Rechtecksprofil in dieser Fehlerbetrachtung am besten befeuchten.

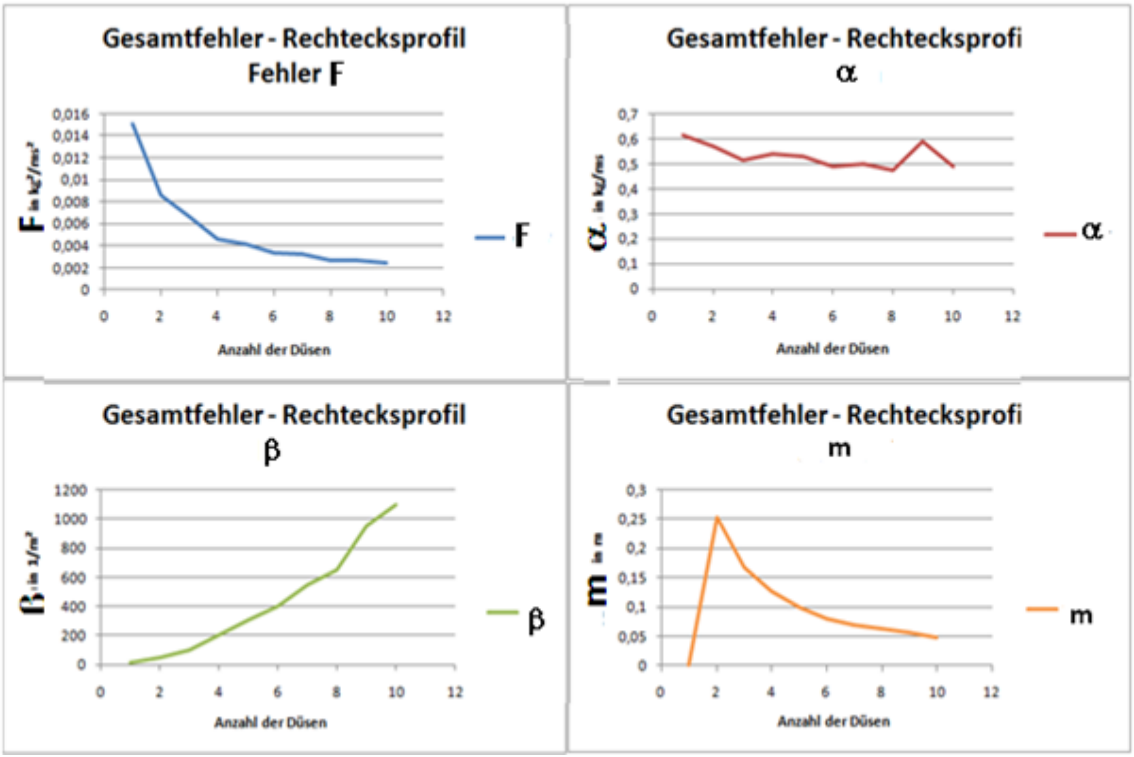


Abbildung 7-85: Darstellung des Fehlers sowie der optimierten Parameter für Rechtecksprofil-Gesamtfehler

7.7.1.1.5.2 Rechtecksprofil- Profilfehler

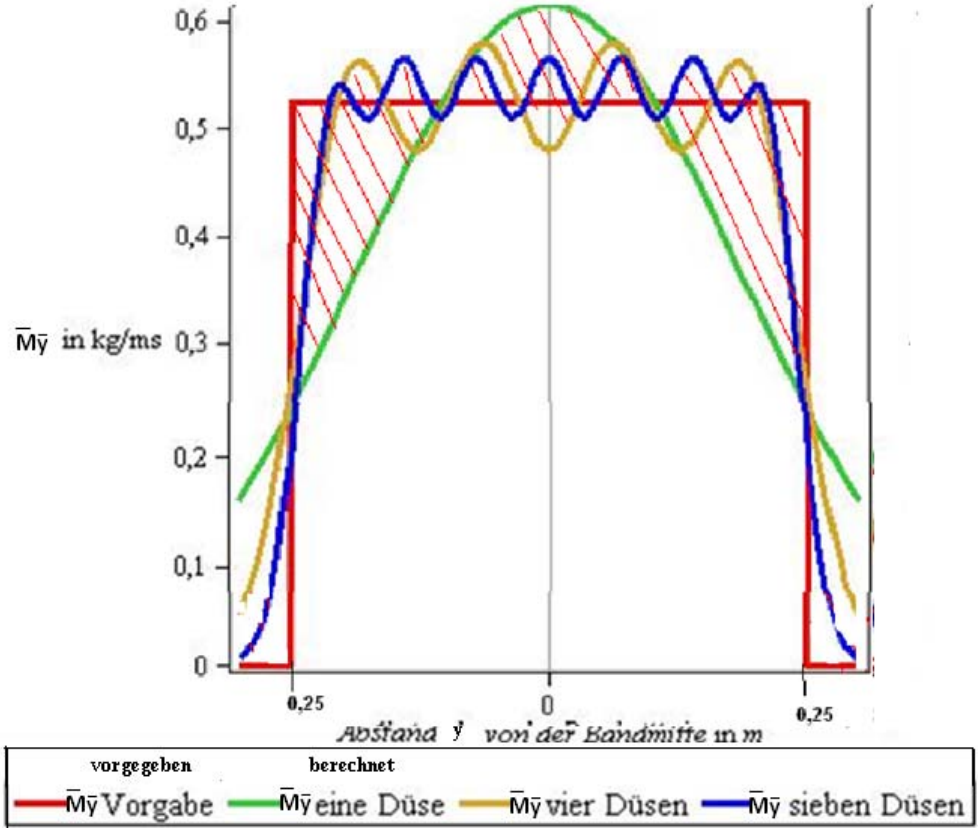


Abbildung 7-86: Darstellung von mehreren Düsenzahlen bei Rechtecksprofil –Profiltfehler Vereinfachung berechnet wurde.

Bei Rechtecksprofil und Profilfehler erkennt man folgendes, Abbildung (7-87):

- Der Fehler pendelt auf sehr niedrigem Niveau.
- α nimmt etwas ab.
- β ist immer 1.
- m nimmt auf hohem Niveau ab.

Hier zeigt sich ein im Vergleich zum Gesamtfehler konträres Bild. Es scheint, als ob der Fehler von der Düsenzahl unabhängig ist. Das ist damit zu begründen, dass β den Wert 1 annimmt. Dieses ist mit einem extrem breiten Sprühbild verbunden. Es wäre zu erwarten, dass für den Grenzfall $\beta \rightarrow 0$ der Fehler $F \rightarrow 0$ geht. In diesem Grenzfall würden die Funktionen f_n von überlagerten Glocken auf eine Gerade nach Gleichung 7-53 übergehen. Der Fall $\beta = 0$ konnte nicht behandelt werden, da in der Berechnung des Fehlers durch Null dividiert würde.

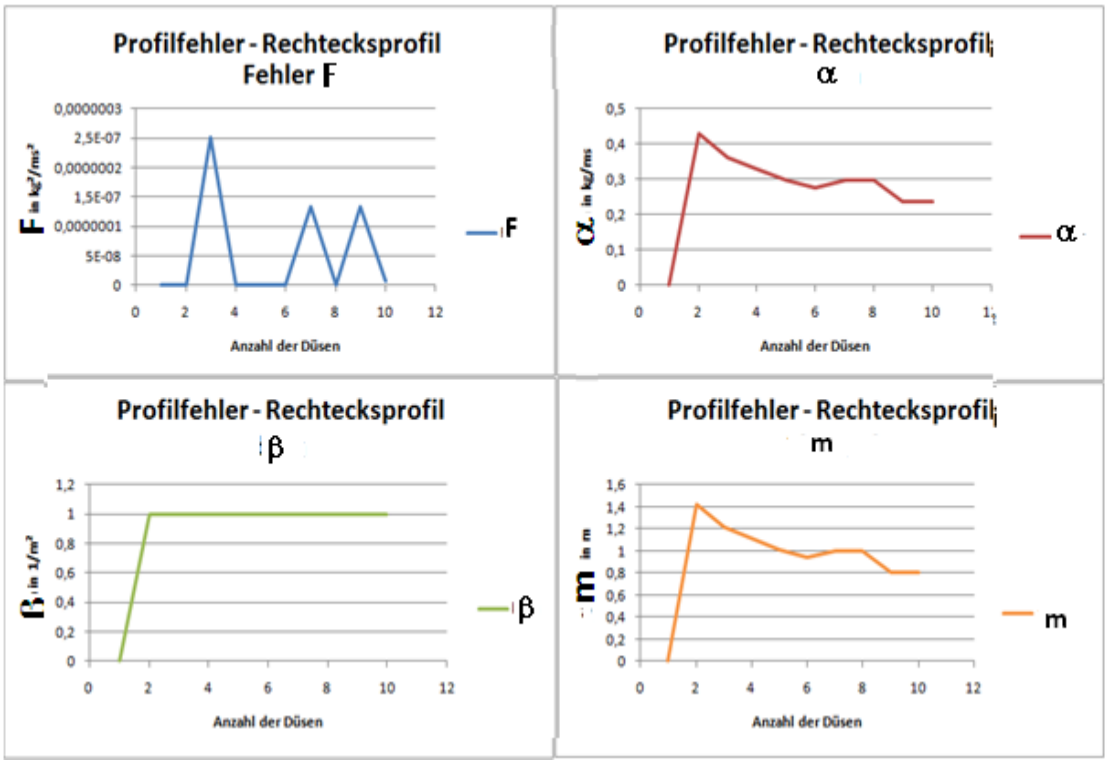


Abbildung 7-87: Darstellung des Fehlers sowie der optimierten Parameter für Rechtecksprofil-Profilfehler

$$\lim_{\beta \to 0} f_n = \alpha \tag{7-53}$$

Diese Gerade würde das gewünschte Rechtecksprofil natürlich ideal annähern. Allerdings würde dieses Sprühbild unendlich weit über das Band hinaus gleich bleiben, was einen unendlichen Verlust bedeutet. Weiters ist durch die sehr hohen m-Werte erkennbar, dass im interessanten Bereich über dem Förderband lediglich eine bis drei Düsen wirksam sind.

5.1.3 Dreiecksprofil - Gesamtfehler

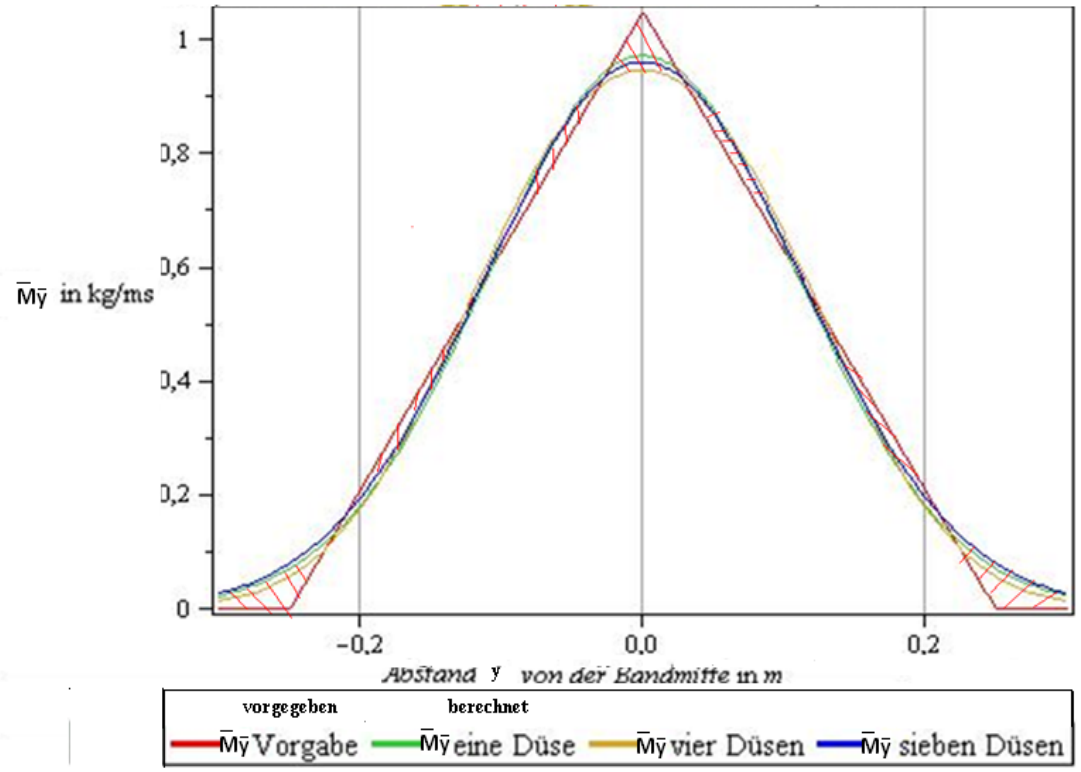


Abbildung 7-88: Darstellung von mehreren Düsenzahlen bei Dreiecksprofil –Gesamtfehler Vereinfachung berechnet wurde.

- Der Fehler ist in etwa konstant.
- α nimmt ab.
- β hat zwei mögliche Werte.
- m geht ab vier Düsen gegen Null.

Hier zeigt sich (Abbildung 7-88), dass bereits eine Düse eine gute Befeuchtung ermöglicht. In Abbildung (7-88) sind mehrere Düsenzahlen sowie die vorgegebene Dreiecksfunktion dargestellt. Diese Abbildung zeigt, dass ein Dreiecksprofil sehr gut durch eine Glockenkurve angenähert werden kann. Ebenfalls dafür spricht, dass für höhere Düsenzahlen der Abstand zwischen den Düsen null ist, was wieder einer Düse entspricht. Daraus folgt, dass für das Dreiecksprofil die Düsenzahl n = 1 optimal ist. Die Abweichungen von m bei einigen Düsenzahlen lassen sich darauf zurückführen, dass bereits kleinste Rundungsfehler bei Funktionstermen mit über 10^5 Zeichen wesentliche Auswirkung haben können. Weiters sei erwähnt, dass β in relativ kleinen Grenzen schwankt, etwa zwei Größenordnungen unter dem Bereich der beim Rechtecksprofil auftritt. Abbildung 7-89: Darstellung des Fehlers sowie der optimierten Parameter für Dreiecksprofil – Gesamtfehler

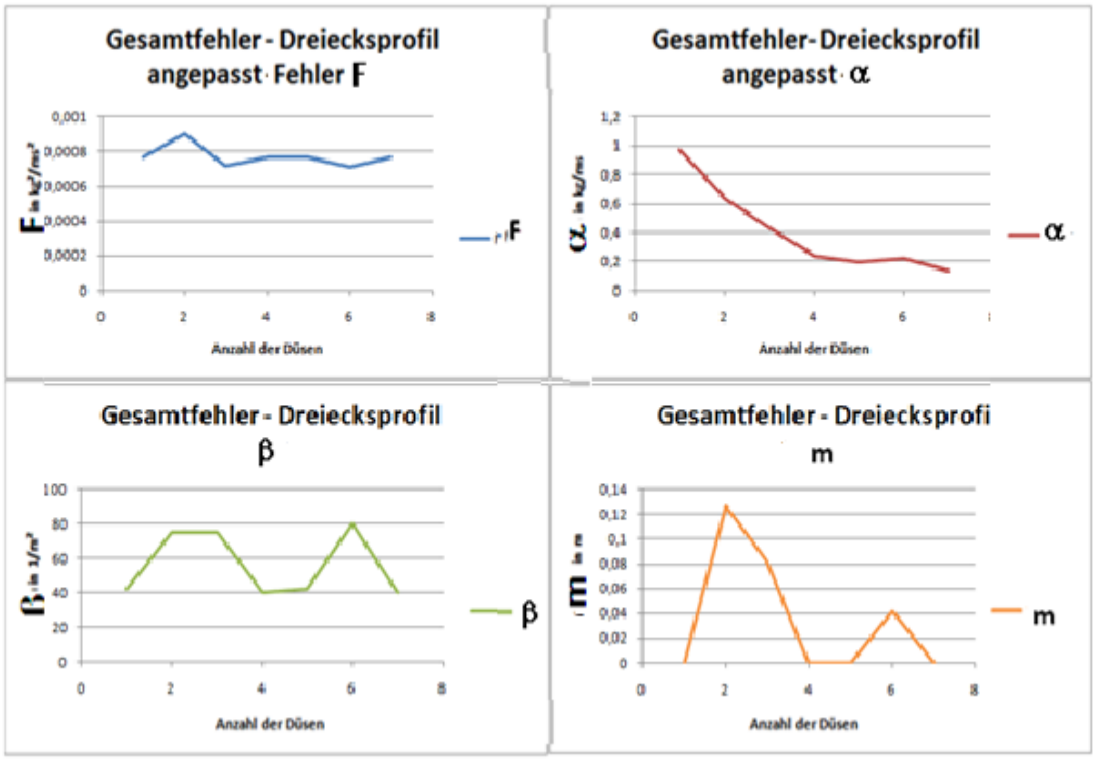


Abbildung 7-89: Darstellung des Fehlers sowie der optimierten Parameter für Dreiecksprofil - Gesamtfehler

7.7.1.1.5.3 Dreiecksprofil – Profilfehler

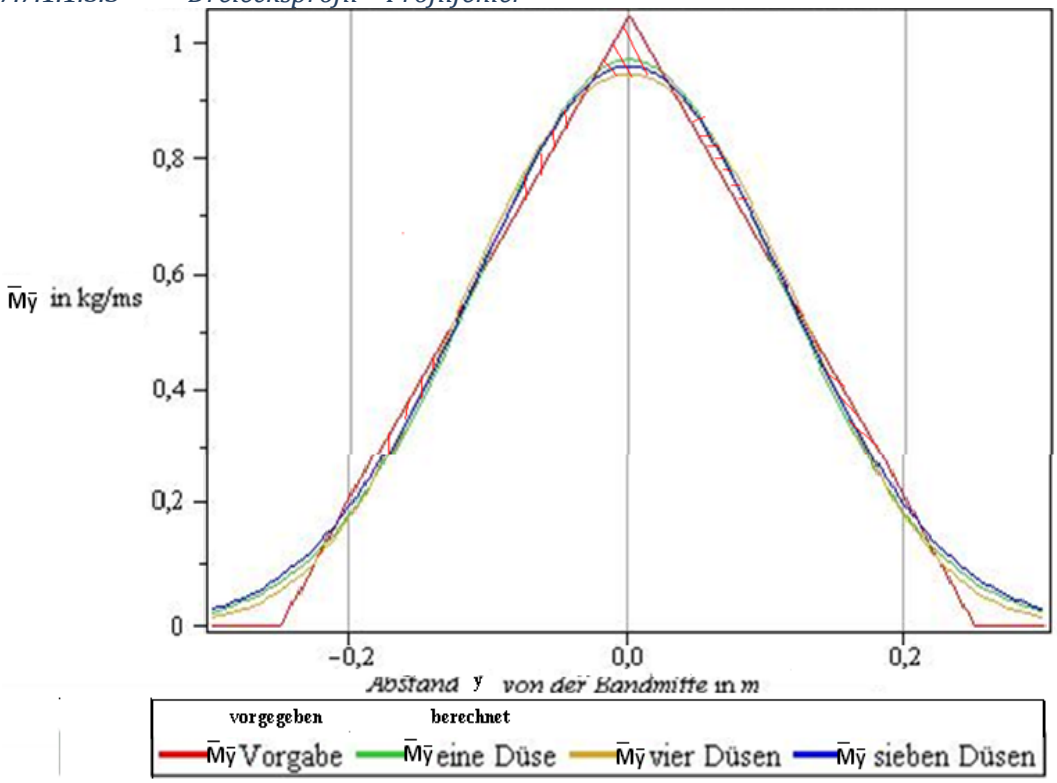


Abbildung 7-90: Darstellung von mehreren Düsenzahlen bei Dreiecksprofil –Profiltfehler Vereinfachung berechnet wurde.

- Der Fehler hat zwei mögliche Werte.
- α nimmt ab.
- β hat zwei mögliche Werte.
- m schwankt auf niedrigem Niveau.

Der Profilfehler Zeigt ein sehr ähnliches Bild wie der Gesamtfehler, wobei β in noch engeren Grenzen schwankt und der Fehler etwas geringer ist, Abbildung (7-91).

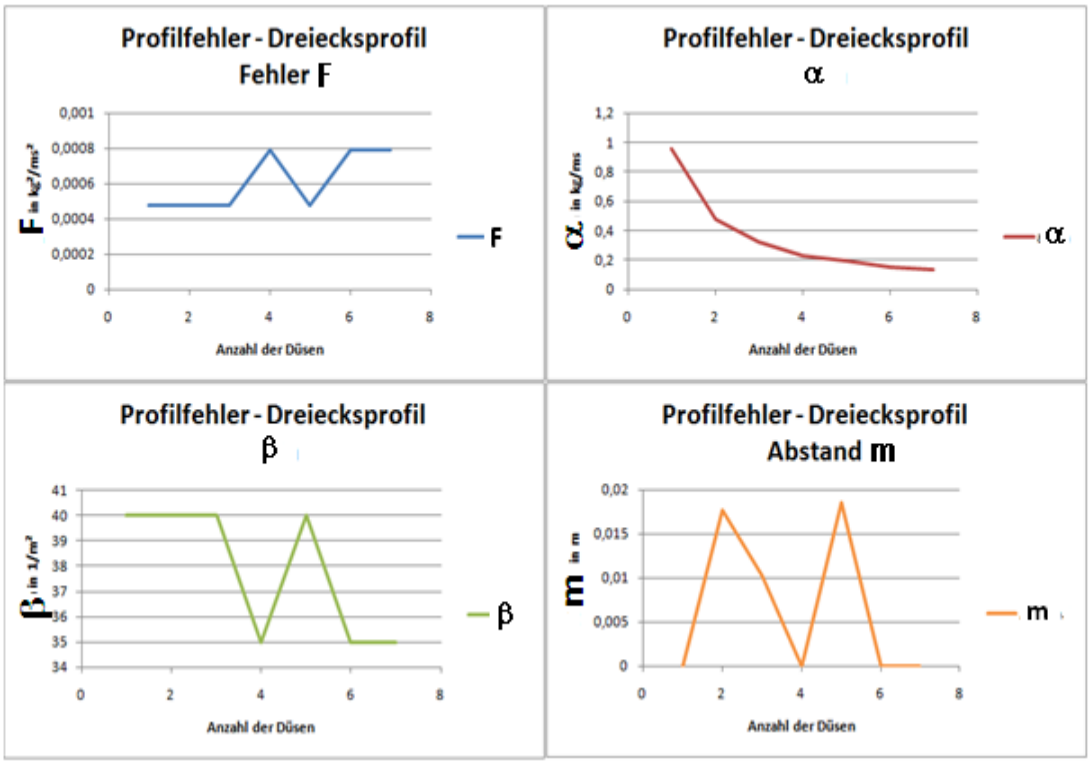


Abbildung 7-91: Darstellung des Fehlers sowie der optimierten Parameter für Dreiecksprofil - Profilfehler

7.7.1.1.5.4 Dreiecksprofil - Angepasst – Gesamtfehler

- Der Fehler ist bei 5 Düsen niedriger.
- α, β und m steigen.

Die optimierten Parameter sind in Abbildung (7-92) dargestellt. Diese Methode der Anpassung der Düsenstärken ist lediglich bei 5 Düsen merklich besser als konstante Düsenstärken. Der Fehler bei 5 Düsen ist etwa ein Sechstel des Fehlers bei konstanter Düsenstärke. Allerdings zeigt sich im Vergleich der Sprühbilder, Abbildungen (7-89) und (7-92), dass sich diese Fehlerreduktion bereits auf sehr niedrigem Niveau abspielt.

7.7.1.1.6 Diskussion der Ergebnisse

7.7.1.1.6.1 Diskussion der Ergebnisse für das Rechtecksprofil des Schüttgutes

Es hat sich gezeigt, dass lediglich der Gesamtfehler praktisch verwertbare Ergebnisse liefert. Der Profilfehler führt auf ein Sprühbild in der Form einer Geraden. Dieses ist mit

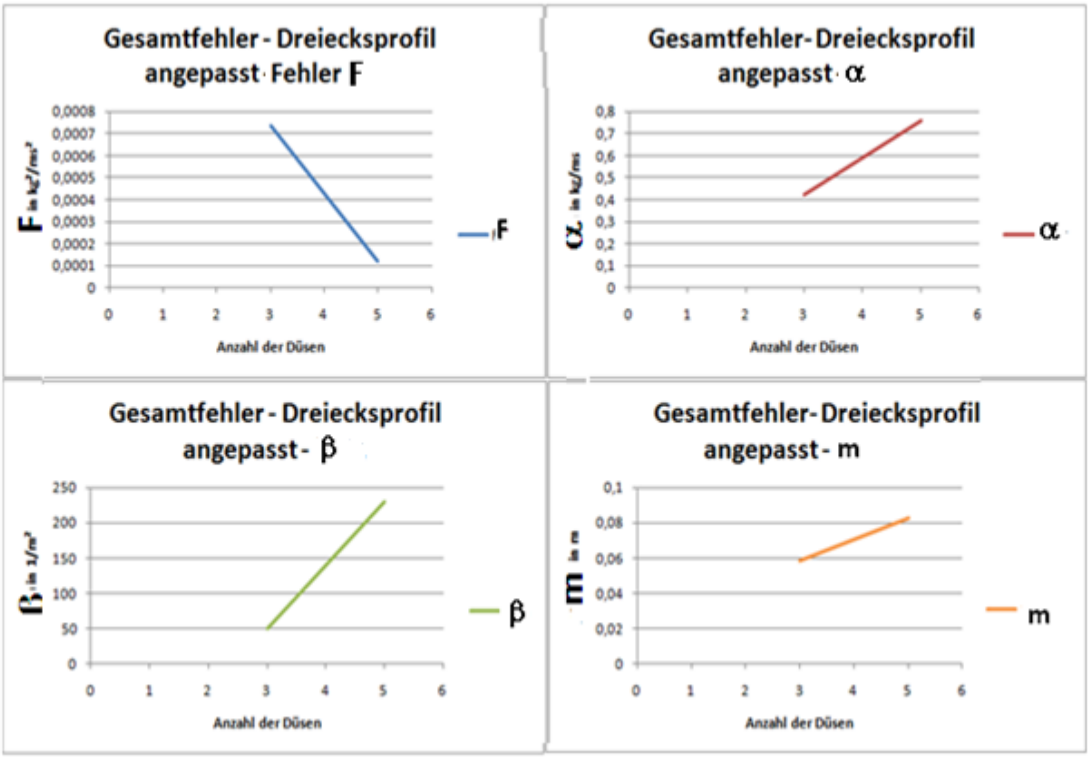


Abbildung 7-92: Darstellung des Fehlers sowie der optimierten Parameter für Dreiecksprofil - Gesamtfehler – Angepasst

der vorgegebenen Düsenart nicht sinnvoll. Der Gesamtfehler hingegen zeigt einen klaren Trend: Je mehr Düsen mit immer schlankerem Sprühbild verwendet werden, desto gleichmäßiger und effektiver ist die Befeuchtung. Allerdings ist hier durch eine Kosten-Nutzen Rechnung der entstehende Wasserverlust gegen die Kosten von weiteren Düsen abzuwiegen. Die Rechnung zeigt, dass es für das Rechtecksprofil besser wäre, andere Befeuchtungsmaßnahmen zu ergreifen, etwa eine Wasserwand. Die Verwendung von Flachstrahldüsen welche ebenfalls fein zerstäubte Tröpfchennebel welche eine hohe Staubabscheidung aus der Luft (sekundäre Staubabscheideeffektivität) erwarten lassen zeigten wie in 7.4 experimentell ermittelt wurde ebenfalls kein wesentlich schlankeres sondern auch ein glockenförmiges Sprühbild. In Anbetracht der Tatsache, dass nicht nur die primäre Staubabscheidung sondern gleichzeitig auch die sekundäre Staubabscheidung optimiert werden sollen, ist der Einsatz von den gewählten Zweistoffresonanzdüsen mit glockenförmigen Befeuchtungsprofil sinnvoll. Im Folgenden wird dieses Befeuchtungsprofil auf eine dreiecksförmige Schüttung angewendet.

7.7.1.1.6.2 Diskussion der Ergebnisse für das Dreiecksprofil des Schüttgutes

Für das Dreiecksprofil sind sowohl der Gesamt- als auch der Profilfehler aussagekräftig, und zeigen Trends in dieselbe Richtung. Es ist bereits mit einer Düse eine gute Befeuchtung möglich, die auch bei höheren Düsenzahlen durch m -> 0 bestätigt wird. An dieser Stelle ist noch zu erwähnen, dass das Dreiecksprofil im Bereich der Spitze eine Vereinfachung erfahren hat, da Schüttkegel dort im Allgemeinen eine Rundung aufweisen. Diese Rundung ist durch die Glockenfunktion auch im Sprühbild vorhanden, weshalb zu erwarten ist, dass die Befeuchtung in diesem Bereich sogar noch effektiver ist als in dieser.
Der Spezialfall der angepassten Düsenstärken zeigt einen geringeren Fehler gegenüber der gleichmäßigen Düsenstärken, allerdings auf bereits niedrigem Niveau. Es ist daher durch Kostenrechnung zu überprüfen, ob der konstruktive Mehraufwand von vier weiteren, verschieden stark betriebenen Düsen durch die bessere Befeuchtung gerechtfertigt ist. In Abbildung 7-92 sind sowohl das Dreiecksprofil als auch mehrere Düsenzahlen dargestellt.

7.7.1.1.7 Zwischenzusammenfassung

Durch Verwendung von Volumensammelkompartimente kann die Befeuchtungsverteilung eines Düsensprays an einer Schüttgutoberfläche radial erfaßt werden. Diese Befeuchtungsverteilung kann über ein Glockenmodell beschrieben werden, wobei die Befeuchtungsparameter a und b die Gestalt der Glocke definieren. Durch erfassen der Befeuchtungsverteilung, die sich durch a und b definieren läßt, bei verschiedenen Düsenhöhen und Volumenströmen kann ein Datenfeld erstellt werden, welches die Befeuchtungskonstanten a und b mit der Düsenhöhe h und dem Wasservolumenstrom $\dot{V}_{fl}$ in Verbindung bringt. Das durch die Glockenfunktion beschriebene Befeuchtungsgeschwindigkeitsfeld der Düse kann im weiteren in Förderbandlaufrichtung aufzusummiert werden und in ein Gutfeuchteprofil über die Förderbandbreite umgerechnet warden. Dieses durch die Düse erzeugte Gutfeuchteprofil über die Förderbandbreite wird mit dem notwendigen Gutfeuchteprofil um PM10-Grenzwerte einhalten zu können verglichen und die Abweichungen minimiert. Durch den hier aufgezeigten Lösungsweg kann durch finden optimaler Auslegungsgrößen (Düsenhöhe und Wasservolumenstrom) eine gleichmäßige Befeuchtung über die Förderbandbreite erzeugt werden .

Es wurde eine analytische Berechnungsmethode entwickelt, mit der Befeuchtungsaufgaben auf Förderbändern mit beliebig vorgegebenen Schüttgutprofilen gelöst werden können. Dadurch können die Kosten für den Betrieb einer solchen Feinstaubunterdrückung minimiert werden. Es hat sich gezeigt, dass mit den hier betrachteten Düsen rechteckförmige Schüttgutverteilungen sowie dreiecksförmige Schüttgutverteilungen sehr gut befeuchtet werden können, wenn die nach der hier vorgestellten Berechnungsmethode ermittelten optimierten Parameter α, β und m verwendet werden.
In diesem Zusammenhang ist die Tiefenwirkung welche zuvor untersucht wurde für die Wirksamkeit der Feinstaubunterdrückung von essentieller Bedeutung.

Um aber maximale Staubreduktion einer diffusen Staubquelle bei minimalen Wasserverbrauch unter Einhaltung von PM10 Grenzwerten erreichen zu können gilt es im Folgenden optimale Bedüsungsparameter zu bestimmen welche auf die Auslegungsgrößen des Förderbandes als auch auf das Staubungsverhalten des Schüttgutes besser abgestimmt sind. Hierfür ist das Staubungsverhalten von Schüttgütern welches über den Emissionsfaktor (Kapitel 4) beschrieben wird in Abhängigkeit von der Gutfeuchte zu ermitteln und in das Optierungsverfahren einzubeziehen. Dieses Optimierungsverfahren hat nun ausschließlich das Ziel jene Bedüsungsparameter zu bestimmen bei denen bei maximaler PM10 Emissionsreduktion ein minimaler Wasserverbrauch notwendig ist.

7.8 Berechnung der Auslegungsparameter eines Wasserspray-systems zum erreichen minimaler PM10 Emission

Um maximale Staubreduktion einer diffusen Staubquelle bei minimalen Wasserverbrauch unter Einhaltung von PM10 Grenzwerten erreichen zu können gilt es im folgenden dargestellten Optimierungsverfahren optimale Bedüsungsparameter zu bestimmen welche auf die Auslegungsgrößen des Förderbandes als auch auf das Staubungsverhalten des Schüttgutes abgestimmt sind.

Dieses Optimierungsziel zu erreichen, dass bei minimalem Wasserverbrauch maximale Staubreduktion möglich ist, ist vor allem deswegen von Bedeutung, weil die Gutfeuchte von Schüttgütern, Erzen oder Kohle (wegen kalorischer Verarbeitung) so gering wie möglich zu halten ist, da diese eine Qualitätsminderung darstellen kann bzw. wegen Verschlechterung des Heizwertes zu Problemen bei der Weiterverarbeitung führen kann. Sehr oft sind dies die Hauptgründe warum Wasserspraysysteme ungern eingesetzt werden. Durch drastische Minimierung der notwendigen Wassermenge werden nicht nur Energie und Ressourcen geschont, sondern es kann auch bei minimal notwendiger Gutfeuchte zu maximaler Staubunterdrückung dazu führen, dass die Verwendung von Wasserspraysystemen für Anwender attraktiv und einsetzbar wird.

Aus diesem Grund soll nun Anhand einer konkreten Förderbandübergabestelle die Optimierungsstrategie erarbeitet werden.

7.8.1.1 Definition des Förderbandes als konkreten Anwendungsfall

Gegeben ist vom Förderband die Breite B (0,4 m), die flächenbezogene Beladungsmasse m_A (10,8 kg/m^2), die Förderbandgeschwindigkeit v_B (0,3 m/s) und die Annahme, dass das Schüttgut gleichmäßig über die Breite verteilt ist. Gesucht sind die Höhenposition und der Wasservolumenstrom einer vorgegebenen Düse, welche geringsten Wasserverbrauch bei maximaler Staubminimierung sicherstellen.

7.8.1.2 Beschreibung von Emissionsfaktoren in Abhängigkeit der Gutfeuchte

Zum ersten kann die Staubungsneigung des Schüttgutes durch eines der in [89] bzw. Kapitel 4 beschriebenen Messverfahren festgestellt werden. Dabei soll die entstehende Staubemission pro Menge Schüttgut bei verschiedenen Feuchtgehalten des Schüttgutes bestimmt werden. In [92] wurde dies beispielsweise an einer Schüttgutfallapparatur, bei der das Schüttgut vor dem Abwurf mit verschiedenen Flüssigkeitsmengen befeuchtet wird, dargestellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 7-93 für Grubensand dargestellt [96] und zeigt, dass mit zunehmender Schüttgutfeuchte die Emission sinkt und dass ab einer gewissen Flüssigkeitszugabe keine wesentliche Staubminderung mehr eintritt.

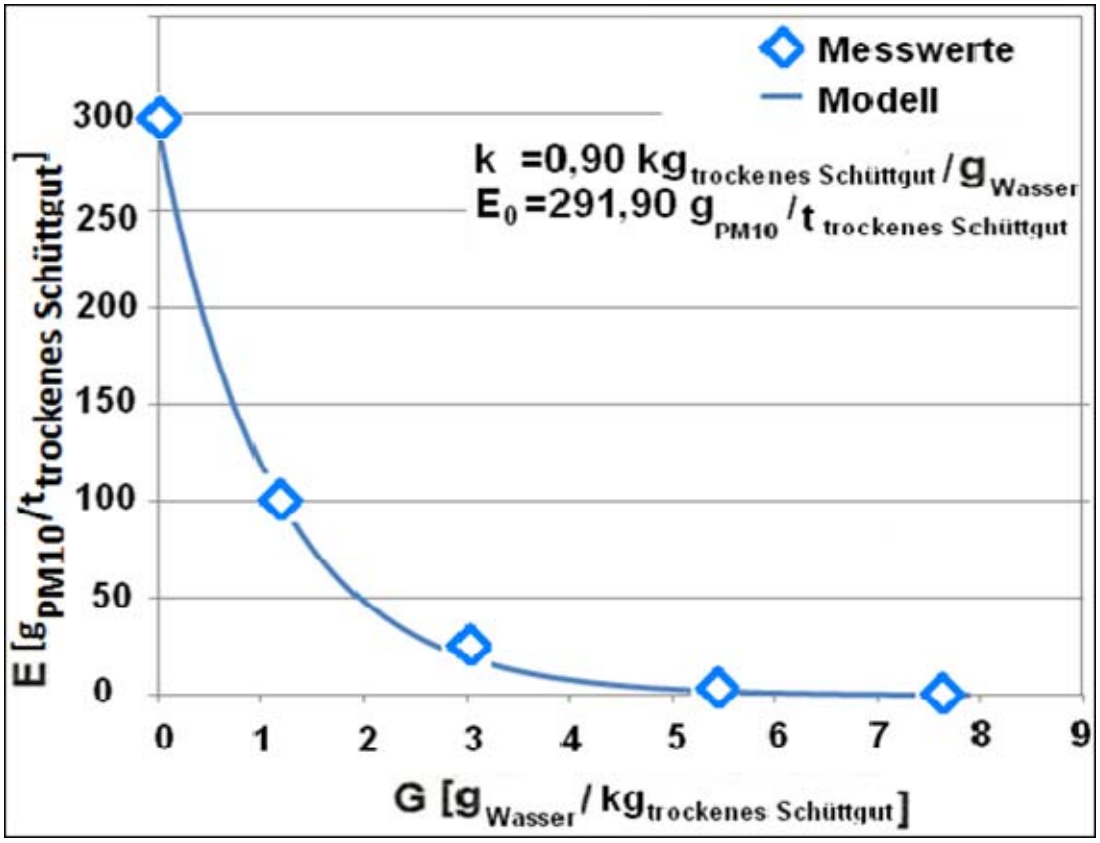


Abbildung 7-93: Emissionsfaktor von Grubensand in Abhängigkeit von der Gutfeuchte aufgenommen mit einer Schüttgutfallapparatur und modelliert durch Gleichung 7-58

Die weitere Optimierungsaufgabe hängt vom Ziel der Optimierung ab. Ein Berechnungsalgorythmus der auf einen möglichst gleichmäßigen Befeuchtungswert über die Förderbandbreite abzielt wurde in [91] dargestellt. Damit konnte für eine Düse die optimale Höhenposition und der notwendige Wasservolumenstrom gefunden werden.

Wenn nun jene Düsenposition bei geringstem Wasservolumenstrom gefunden werden soll, bei dessen weiteren Steigerung keine nennenswerte Emissionsminderung mehr auftritt, wird in ähnlicher Weise wie folgt vorgegangen:

7.8.1.3 Rchenalgorytmus zur Optimierung eines Düsensprühsystems für ein Schüttgutförderband

Wie in Kapitel 7.3 dargestellt wird von dem auf die Förderbandfläche aufgesetzten, rotationsförmigen Glockenkörper (Düsenabstand h), die Förderbandfläche in eine bestimmte Anzahl von Teilflächen $\Delta y * \Delta z$ unterteilt.

Bei Bewegung des Förderbandes mit der Geschwindigkeit v_B kann nun für jedes dieser Flächenelemente die auftreffende Flüssigkeitsmenge pro Förderbandbewegungslänge z über die Befeuchtungsgeschwindigkeit wie folgt ermittelt werden:

$$\Delta V'_{y'} = \frac{v_{y'}(z') * \Delta y * \Delta z}{v_B} \tag{7-54}$$

In Gleichung 7-54 bedeutet $v_{ý}(z')$ die Befeuchtungsgeschwindigkeit jeweils an der konstanten Stelle y´, jedoch bei variable z´, wenn von den Polarkoordinaten auf ein rechtwinkeliges Koordinatensystem umgerechnet wird. y´ und z´ bezeichnen die örtlichen Koordinatenmitten der Flächenelemente.

Wenn nun das Förderband in N_y Förderbandstreifen mit der Breite Δy unterteilt wird und unter Einbeziehung der Förderbandgeschwindigkeit v_B jeder Streifen den Glockenkörper mit veränderlicher Befeuchtungsgeschwindigkeit durchfährt, lässt sich für jeden Streifen mit der Breite Δy durch Aufsummation die pro Zeit aufgenommene Flüssigkeitsmenge ermitteln.

Durch Division dieses Wertes durch den auf die differentielle Förderbandbreite Δy entfallenden Schüttgutmassenstroms lässt sich nun ein über die Breitenkoordinate des Förderbandes y´ veränderlicher Schüttgutfeuchtgehalt $G'_{ý}$ ($g_{Wasser}/kg_{trockenes\ Schüttgut}$) berechnen.

$$G_{y'} = \frac{\rho * \sum_{0}^{N_{y'}} v_{y'} * (\Delta z * N_i + \frac{\Delta z}{2}) * \Delta z * B}{m'} \tag{7-55}$$

$$m' = B * v_B * m_A \tag{7-56}$$

$$G_{y'} = \frac{\rho * \sum_{0}^{N_{y'}} v_{y'} * (\Delta z * N_i + \frac{\Delta z}{2}) * \Delta z}{v_B * m_A} \tag{7-57}$$

Nähere Details zur mathematischen Darstellung dieses numerischen Berechnungsverfahrens sind zum Teil in [91] enthalten.

Ausgehend von Schüttgutfallversuchen, die bei verschieden Schüttgutfeuchten G die entstehende Emission E ($g_{PM10}/t_{trockenes\ Schüttgut}$)vermessen haben (siehe [94] bzw. Kapitel 4), lässt sich hierfür eine empirische Ausgleichsfunktion angeben (siehe Abbildung 7-93).

$$E = E_0 * e^{-k*G} \qquad (7\text{-}58)$$

Anhand Gleichung 7-58 lässt sich nun für jeden Förderbandstreifen und den zugehörigen Feuchtewert $G'_{ý}$ die Emission $E_{ý}$ berechnen. Wenn die Emissionen aller Förderbandstreifen gemittelt werden, ergibt dies für die zugehörige Glockenkurve (festgelegte Düsenhöhe und Düsenvolumenstrom) die gesamt-PM10 Emission E_{ges} des Schüttguttförderbandes in $g_{PM10}/t_{trockenes\ Schüttgut}$.

7.8.1.4 Bestimmung der optimalen Bedüsungsparameter

Wird nun numerisch diese Emission für relevante Düsenhöhenpositionen und Wasservolumenströme durchgerechnet, so erhält man Abb.6. Darin ist erkenntlich dass ab einem Wasservolumenstrom dV/dt von $36*10^{-6}m^3/s$ bei der Höhe h von 1,05m keine nennenswerte Reduzierung der Emission erfolgen kann, sodass diese Werte die Optimalwerte für die Bedüsungsparameter und die Materialdaten, der ausgewählten Einzeldüse darstellen. Dieses Diagramm macht auch das komplexe Zusammenwirken der von der Höhe h und dem Wasservolumenstrom abhängigen glockenförmigen Befeuchtungsprofilen mit der Bereichsabgrenzung durch die Förderbandbreite und der von dem Feuchtgehalt abhängigen Emission nach Gleichung 7-58 sichtbar.

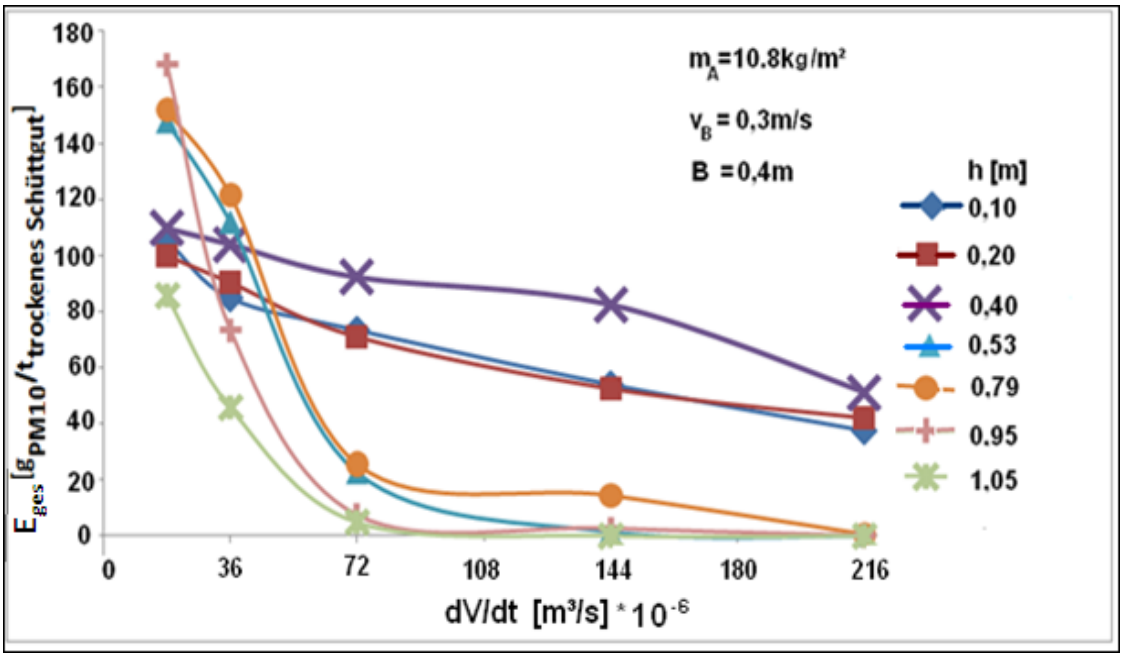


Abbildung 7-94: PM10-Emission E pro Masse Schüttgut bei vorgegebenen Förderbanddaten (m_A, v_B, B) und bei verschiedenen Werten der Bedüsungsparameter h und dV/dt

Beispielsweise nimmt bei kleinen Wasservolumenströmen mit steigender Düsenhöhe die Emission zu, hingegen bei größeren Volumenströmen ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei kleinen Volumenströmen die Erhöhung der Düsenhöhe eine schlechtere Befeuchtung bewirkt, da die Glocke breiter und niedriger wird, in der Förderbandmitte mehr Emissionen durch geringe Befeuchtung entstehen und von der Breitenbegrenzung des Förderbandes mehr Flüssigkeit außerhalb des Bandes niedergeht. Bei hohen Volumenströmen wirkt sich das Niedrigwerden der Glocke nicht so drastisch aus, da durch die e-funktion nach Gleichung 7-58 sich eine Veränderung von hohen Feuchtgehalten nicht mehr so stark auf eine Emissionsänderung auswirkt.

7.8.1.5 Ableitung allgemein gültiger Aussagen zur optimalen Auslegung eines Wasserspraysystems

Eine dimensionslose Darstellung der Abnahme des Emissionsfaktors mit verändernden Bedüsungsparametern soll es ermöglichen allgemeine Aussagen zur optimalen Auslegung eines Wasserspraysystems zu erhalten. Dazu wird der Wasservolumenstrom des versprühten Wassers in den Wassermassenstrom umgerechnet. Durch beziehen des aufgebrachten Wassermassenstromes auf den Massenstrom des Schüttgutes am Förderband wird das Massenverhältnis von aufgebrachten Wasser zu umgeschlagenen Schüttgut erhalten [kg Wasser/kg Schüttgut]. Durch beziehen der Düsenhöhe auf die Förderbandbreite wird ein Höhen- zu Breiten-Verhältnis h/B [m/m] erhalten. Wird nun der Emssionsfaktor [g PM10/t trockenes Schüttgut] der durch den Schüttgutumschlag durch das Förderband verursacht wird gegen das Massenverhältnis von aufgebrachten Wasser zu trockenem Schüttgut je Höhen- zu Breiten-Verhältnis aufgetragen so ist zu erkennen, dass ab einen Höhen- zu Breiten-Verhältnis von 1,33 eine exponentielle Abnahme des Emissionsfaktors festzustellen ist (siehe Abbildung 7-95). Eine weitere Erhöhung des h/B Verhältnisses führt zu keiner nennenswerten Verbesserung der Abnahme des Emissionsfaktors, bringt aber die Gefahr des Verlagerns und Verblasens des Sprühbildes des Düsensprays durch Windeinflüsse mit sich. Deshalb sollte das h/B Verhältnis so klein wie möglich gehalten werden. Bei Unterschreitung von h/B=1,33 tritt diese exponentielle Abnahme nicht auf. Bei einem Wasserspraysystem sollten zur optimalen Staubunterdrückung die Düsen mindestens in einer Höhe von 1,33-mal der Breite des Förderbandes positioniert werden. Da die Qualität des Schüttgutes mit zunehmender Feuchte leiden kann bzw. der Energiebedarf für eine eventuelle thermische Verarbeitung steigt ist das Optimierungsziel maximale Staubunterdrückung mit minimalem Wasseraufwand zu erreichen. Ab einem Massenverhältnis von Wasser zu Schüttgut von $5*10^{-3}$ kg/kg beginnt die Abnahme des Emsissionsfaktores abzuflachen. Eine weitere Steigerung des Massenverhältnisses Wasser/Schüttgut führt somit zu keiner weiteren nennenswerten Reduktion des Emissionsfaktores mehr. Daher kann von einer optimalen Auslegung eines Düsensprühsystems gesprochen werden wenn die Düsen mindestens in einer Höhe von 1,33 mal der Breite des Förderbandes positioniert sind und 5L/h Wasser pro t Schüttgut welche pro Stunde umgeschlagen wird aufgebracht wird. Dies wurde auch in [97] und [98] veröffentlicht.

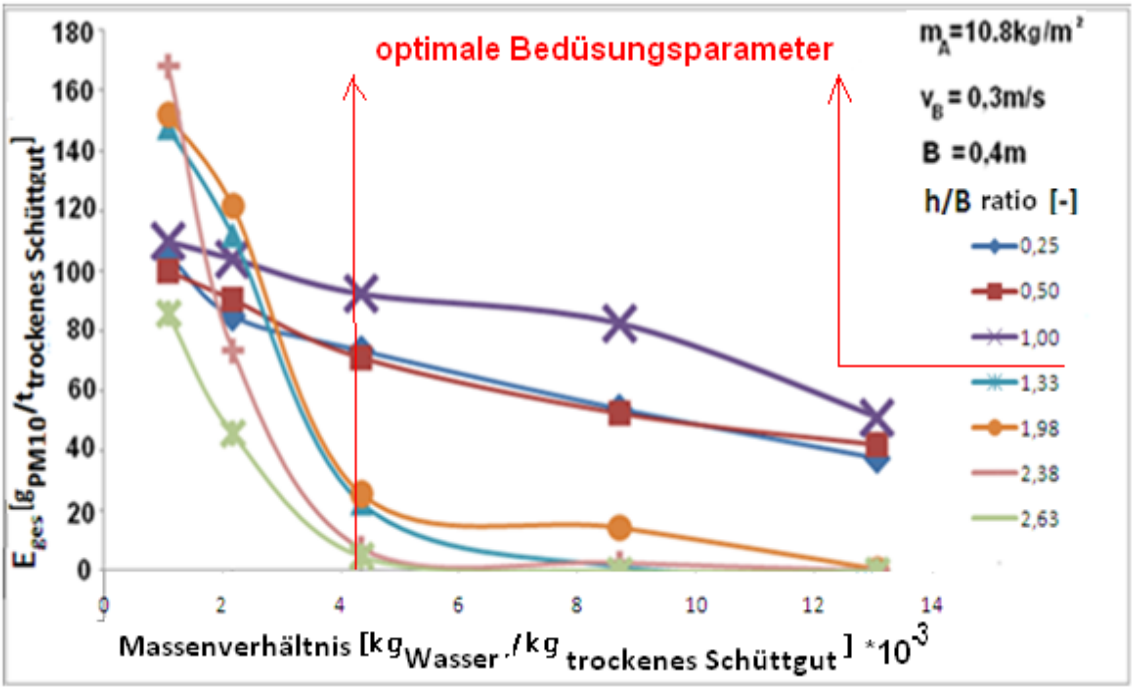


Abbildung 7-95: PM10-Emission E pro Masse Schüttgut in allgemeiner dimensionsloser Darstellung

Wird die ermittelte Gesamtemission (gesamter Emissionsfaktor des Förderbandes nach Befeuchtung E_{ges} auf den Emissionsfaktor des trockenen Schüttgutes am Förderband bezogen, so lässt sich die primäre Staubabscheideeffektivität ermitteln siehe Gl. 7-59.

$$\eta_1 = 1 - \frac{E_{ges}}{E_0} \qquad (7\text{-}59)$$

Durch dimensionslose Darstellung der primären Staubabscheideeffektivität kann man erkennen, dass sich durch Schüttgutbefeuchtung durchaus eine Staubabscheideeffektivität von 95-100% verwirklichen lässt (sehe Abbildung 7-96), sofern eine optimierte Auslegung des Wasserspraysystemes erfolgt.

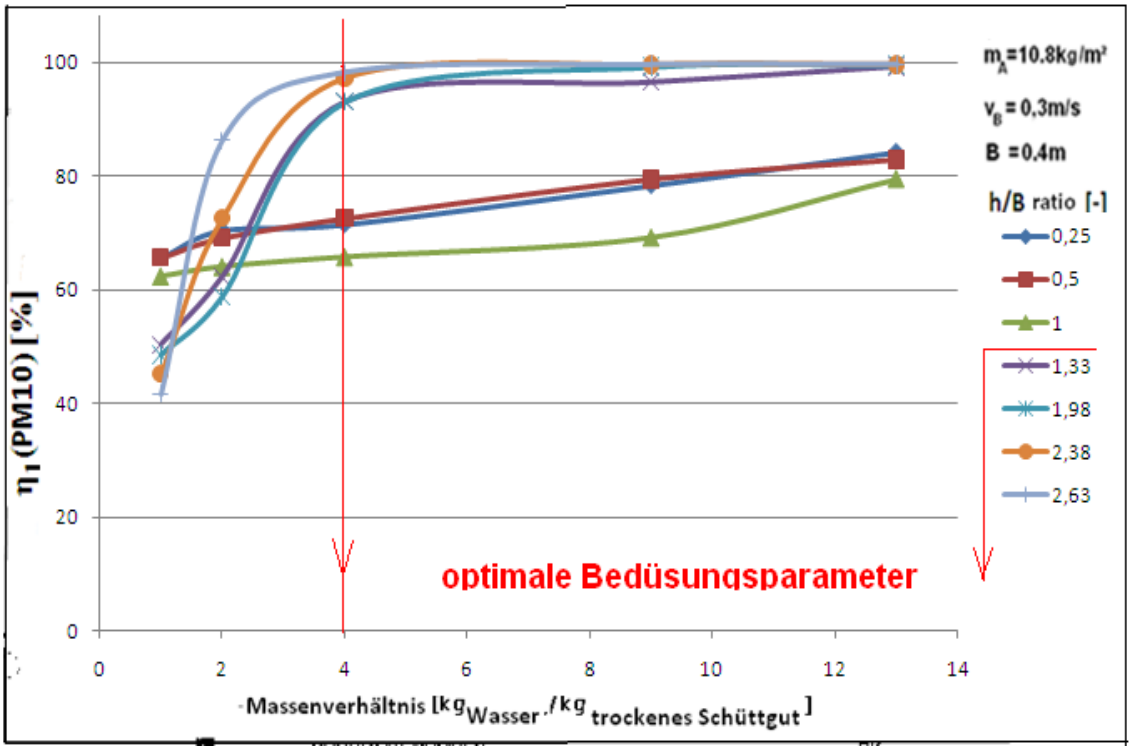


Abbildung 7-96: $\eta_{1\ PM10}$ in allgemeiner dimensionsloser Darstellung

Durch Messung des Befeuchtungsfeldes der Sprühdüse sowie der Emissionsfaktoren bei verschiedenen Gutfeuchten an einer Schüttgutfallapparatur und durch Formulierung eines Befeuchtungsmodelles konnte ein Optimierungsverfahren zur Auslegung von Sprühdüsen für eine Förderbandübergabestelle entwickelt werden. Damit können Optimalwerte für die Bedüsungsparameter, bei möglichst wenig entstehender Staubmenge und geringstem Wasserverbrauch gefunden werden. Das anhand dieser Förderbandübergabestelle skizzierte Optimierungsverfahren könnte auch in analoger Weise zur Abschätzung der zu erwartenden Emission, sowie zur Ermittlung von optimalen Bedüsungsparametern anderer schüttgutbefeuchtender, staubunterdrückender Wassersprаysysteme dienen.

Durch die Vermessung und mathematische Beschreibung von Sprühbildern bei verschiedenen Bedüsungsparametern wurde es möglich die Sprühbilder durch Veränderung der Bedüsungsparameter so zu optimieren, dass eine optimale Befeuchtung von Schüttgütern bzw. maximales η_1 bei minimalem Wasserverbrauch ermöglicht werden kann. Im Weiteren soll nun untersucht werden, ob dieses Optimierungsverfahren auch auf die Staubabscheidung aus der Luft η_2 anwendbar ist. D.h. ob die Sprühbilder durch veränderung der Bedüsungsparameter so zu optimieren sind, dass es zu maximaler Staubabscheidung aus der Luft η_2 bei minimalem Wasserverbrauch kommt. Dadurch kann auch erruiert werden, ob die optimalen Bedüsungsparameter für η_1 auch optimale Bedüsungsparameter für η_2 darstellen.

8 Ermittlung der sekundären Staubabscheideeffektivität anhand des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages einer Sprühdüse

Für η_1 und η_2 spielt die Verteilung von Sprühwasser unter einer Zweistoffdüse eine entscheidende Rolle deshalb wurde im 1. Schritt die Verteilung von Sprühwasser unter einer Sprühdüse untersucht siehe Kapitel 7. Für die primäre Verminderung der Staubentstehung (η_1) spielt die Wirkung dieser gemessenen Verteilung von Sprühwasser unter einer Zweistoffdüse auf eine Gut-Schüttung eine Rolle. Daher wurde in Kapitel 7.6 die Be- und Durchfeuchtung einer Schüttung unterhalb der Zweistoffdüse untersucht. Für die Staubabscheidung aus der Luft η_2 (sekundäre Staubabscheideeffektivität) spielt die Wirksamkeit dieser gemessenen Verteilung von Sprühwasser einer Zweistoffdüse auf staubbeladene strömende Luft eine Rolle, und soll daher nun im 2. Schritt untersucht werden.

8.1 Aufgabenstellung

Sowohl für η_1 als auch für η_2 ist die Verteilung von Sprühwasser unter der Zweistoffdüse bei verschiedenen Bedüsungsparametern im gesamten Betriebsbereich entscheidend. Um eine Optimierung des Wasserverbrauchs und minimalen Einsatz der benötigten energieintensiven Druckluft zu erreichen, wurden bereits Arbeiten durchgeführt siehe Kapitel 7 um zu überprüfen ob die gefundenen Optima sich auch auf die sekundäre Staubabscheidung optimal niederschlagen soll im Weiteren das Staubabscheidebild der Zweistoffresonanzdüse VSR 1005 über den gesamten Betriebsbereich ermittelt werden und überprüft werden ob das Optimum der Auslegungsparameter des Wasserspraysystemes die für die primäre Staubabscheidung gefunden wurden auch bei der sekundären Staubabscheidung zu einem optimalen Ergebnis führen. Daher soll hier das Staubabscheidebild der Zweistoff-Vollkegeldüse 1005 der Firma VSR Industrietechnik GmbH gemessen und mit dem Sprühbild (Sprühwasserverteilung) dieser Düse über den gesamten Betriebsbereich aufgenommen werden. Daher wurde die Abscheidung von Teststaub, aus beladener, strömender Luft mittels Zweistoffdüse untersucht.

Daher wurde eine mit dem Teststaub Pural NF beladene Luftströmung, mit Hilfe der Zweistoff-Vollkegeldüse 1005 entstaubt, und das Sprühwasser mit dem abgeschiedenen Staub aufgefangen werden, wobei die Sprühwasser- und Staubmassenverteilung pro Klassenbreite, der PM10 Gesamtabscheidegrad, sowie die Korngrößenverteilung des abgeschiedenen Staubes unter dem erfassten Sprühbild über das Messfeld erhalten werden.

8.2 Aufbau der Versuchsapparatur

Der Versuchsaufbau zum erfassen der Staubabscheidefelder bzw. der Verteilung des abgeschiedenen Staubes unter dem Sprühbild der Zweistoffdüse VSR 1005 wurde in analoger weise wie in 7.5.2.1 zur Ermittlung des Flüssigkeitsmassenstromes unterhalb der Düse beschrieben, gewählt.

8.3 Experimentelle Betrachtungen [99]

Abscheidung von Pural NF Prüfstaub aus strömender, staubbeladener Luft mit verschiedenen Düsenparametern

Ermittelt werden:

- Sprühbild der Kegeldüse
- Staubabscheidebild
- Korngrößenverteilung; $x_{10,3}$,$x_{50,3}$,$x_{90,3}$ über die besprühte Fläche
- PCS-Roh - und Reingasmessung
- PM10 Gesamtabscheidegrad aus der PCS Messung
- TSP-Abscheidegrad aus Staubkonzentrationen berechnet

8.3.1 Vermessung des Staubabscheidefeldes in Abhängigkeit der Auslegungsparameter von Wassersprаysystemen

8.3.1.1 Sprühbild der Kegeldüse

Das Sprühbild der Zweistoff-Vollkegeldüse wird wie im vorhergehenden Kapitel für einen Düsenabstand h = 0,35m ermittelt und wird in den folgenden Abbildungen für die durchgeführten Versuche dem gleichzeitig erfassten Staubabscheidebild gegenübergestellt.

8.3.1.2 Erfassung des Staubabscheidebildes

Im zweiten Schritt soll nun das Staubabscheidebild der Zweistoff-Vollkegeldüse ermittelt werden. Das Vorgehen gestaltet sich analog zu der Ermittlung des Sprühbildes der Zweistoffdüse ohne Vorschub (v_b= 0 m/s). Es wird jedoch nicht nur zur Ermittlung der Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x), das Sprühwasser in den Gläsen aufgefangen, welche das Messraster bilden, sondern auch Staub, aus beladener, die Anlage durchströmender Luft durch das Sprühwasser in den Gläsern abgeschieden. Analog zur Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) wird die Staub - Abscheidegeschwindigkeit v_S(x) berechnet. Der Pural NF-Teststaub (Datenblatt siehe Anhang) wird hierzu mit dem Staubgenerator (siehe verwendete Geräte zum Aufbau der Versuchsapparatur zur Untersuchung der sekundären Staubemission Kapitel 5.1) dispergiert und dem in die Anlage gesaugten Luftstrom beigemischt. Das Dispergieren des Staubes erfolgt durch eine Zweistoffresonanzdüse (VSR 1005) mittels Druckluft mit einem Druck von p_{disp} = 2 bar. Jede Entstaubungsmessung dauerte 15 min. Während dieser Messzeit wird gleichzeitig eine PCS-

Reihenmessung (siehe Kapitel 5.1 Particle Counter Sizer), bestehend aus 20 Einzelmessungen, mit einer Dauer von jeweils 20 Sekunden durchgeführt. So kann anschließend das Partikel-Größenspektrum analysiert werden. Die Masse des abgeschiedenen Staubes pro Messfeld m_{Sij} wird – wie bei der Ermittlung der Befeuchungsgeschwindigkeit – ebenfalls durch Differenzwiegung der Messgläser bestimmt (Gleichungen 8-1 und 8-2). Nach der Staubabscheidemessung werden die Messgläser mit der Analysenwaage (verwendete Geräte Kapitel 7.5.2.1) gewogen, im Trockenschrank über Nacht auf Gewichtskonstanz getrocknet, und erneut gewogen. So ergibt sich aus den beiden Wiegungen und der Tara jeden Glases m_{tij} die Masse des aufgefangenen Wassers m_{ij} (siehe Auswertung zur experimentellen Ermittlung des Flüssigkeitsmassenstroms Kapitel 7.5.2.3), sowie die Masse des abgeschiedenen Staubes pro Messfeld m_{Sij} für die Staubabscheidemessung zu Gleichung 8-2.

8.3.1.3 Auswertung

Die Staub - Abscheidegeschwindigkeit erhalten wir also aus Gleichung 8-1.

$$v_S(x) = \frac{m_{Sij}}{A_g * \rho_S * t_s} \qquad (8\text{-}1)$$

mit

$$m_{Sij} = m_{ijSt} - m_{ijt} \qquad (8\text{-}2)$$

$v_S(x)$ …. Staub - Abscheidegeschwindigkeit	[m/s]	
m_{Sij} …… Masse des abgeschiedenen Staub im Glas ij	[g]	
i ……. Zeile im Messraster	[-]	(1-8)
j ……. Spalte im Messrater	[-]	(A-H)
ρ_S …….. Dichte von Pural NF	[kg/m^3]	ρ_S = 3900kg/m^3
A_g …….. Querschnittfläche eines Messglases	[m^2]	A_g =0,0080424m^2
m_{ijSt} ….. Masse des Glases ij nach der Trocknung	[g]	
m_{ijt} …… Tara des Glases ij	[g]	
t_s …….. Sprühzeit	[s]	

Für jede Messung wird unter Kontrolle der Strömungsgeschwindigkeit mittels Heizdrahtanemometer, mit dem Frequenzumrichter der Volumenstrom durch den Seitenkanalverdichter und die Anlage angepasst, sodass sich eine konstante Strömungsgeschwindigkeit der Luft v_L von 4,5 m/s im Saugrohr einstellt. Diese Geschwindigkeit wird nach Gleichung 8-1 aus der Spannung von 2,32 V am Multimeter berechnet. Alle Versuche werden bei dieser Geschwindigkeit durchgeführt, um für die, nach dem Versuchsraum folgende Streulicht – Partikelmessung, eine isokinetische Absaugung zu garantieren.

8.3.1.4 Sprühbild und Staubabscheidebild der Zweistoff-Vollkegeldüse

Analog zur statischen Aufzeichnung des Sprühbildes (Kapitel 7.2) erhalten wir also erneut das Sprühbild v(x) der Zweistoff – Vollkegeldüse (Abbildung 8-1). Zusätzlich wird aber gleichzeitig das Staubabscheidebild $v_S(x)$ erfasst und ebenfalls darstellbar (Abbildung 8-2). Das Sprühbild und das Staubabscheidebild werden für die Düsenparameter $_w$ =5L/h, 10L/h, 20L/h, 40L/h, 60L/h mit p_L = 3bar und h = 0,35 m ermittelt. Es zeigt sich bereits bei der ersten Staubabscheidemessung ein Zusammenhang zwischen der aufgefangenen Sprühwassermasse m_W und der damit abgeschiedenen Staubmasse m_S. Es besteht also auch ein Zusammenhang zwischen Sprühbild v(x), und Staubabscheidebild $v_S(x)$. Dieser – wie in Abbildung 8-3 zu sehen – lineare Zusammenhang, war bei allen Staubabscheidemessungen zu finden, dies zeigen auch die Abbildungen 8-9 und 8-10.

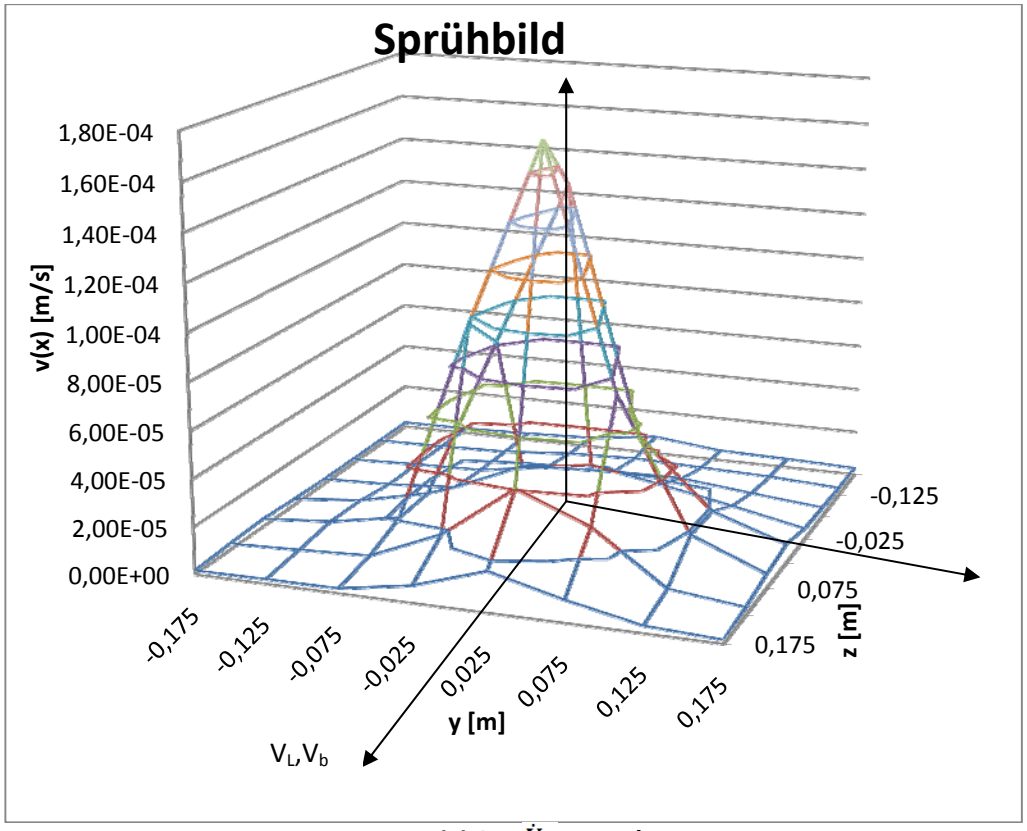


Abbildung 8-1: Sprühbild v(x) für $\dot{V}_w$ = 10L/h, p_L = 3bar, h = 0,35m

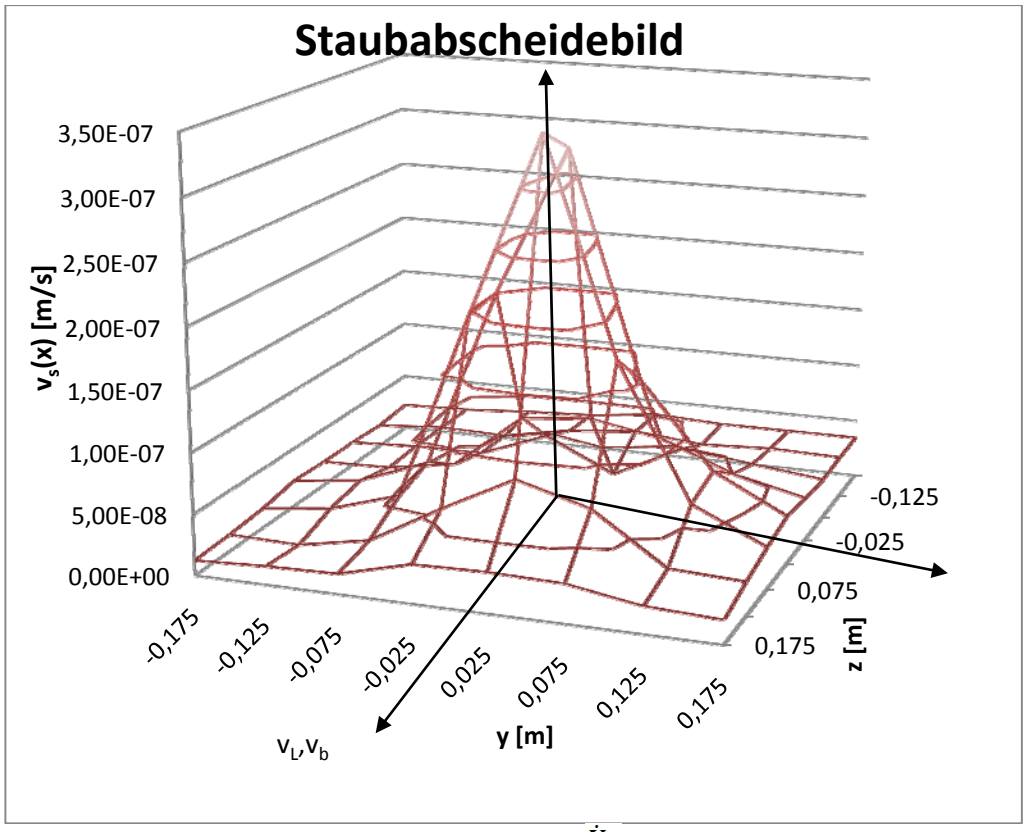


Abbildung 8-2: Staubabscheidebild $v_S(x)$ fü $\dot{V}_w$= 10L/h, p_L = 3bar, h = 0,35m

8.3.1.5 Zusammenhang zwischen Sprühbild und Staubabscheidebild

Der Zusammenhang zwischen Sprüh – und Staubabscheidebild soll in Abbildung 8-3 veranschaulicht werden, in welcher der Quotient aus der abgeschiedenen Staubmasse m_s und versprühter Wassermasse m_W in Abhängigkeit von der örtlichen Lage unter der Düse dargestellt ist. Dies wurde für alle Düsenparameter $_w$ = 5L/h, 10L/h, 20L/h, 40L/h, 60L/h mit p_L = 3bar und h = 0,35 m durchgeführt; aus Platzgründen wird aber nur ein Diagramm für den Düsenparameter V_w = 10L/h gezeigt (Abbildung 8-3). Lediglich ein kleiner Randfehler, bedingt durch die sehr kleinen Staubmassen (m_S <= 0,05g) ist zu sehen, ansonsten zeigt sich ein gleichmäßiger Anteil von abgeschiedenem Staub im aufgefangenem Sprühwasser von ungefähr 1 %. Dies ist auch aus den Werten in den obigen beiden Abbildungen 8-1 und 8-2 zu entnehmen.

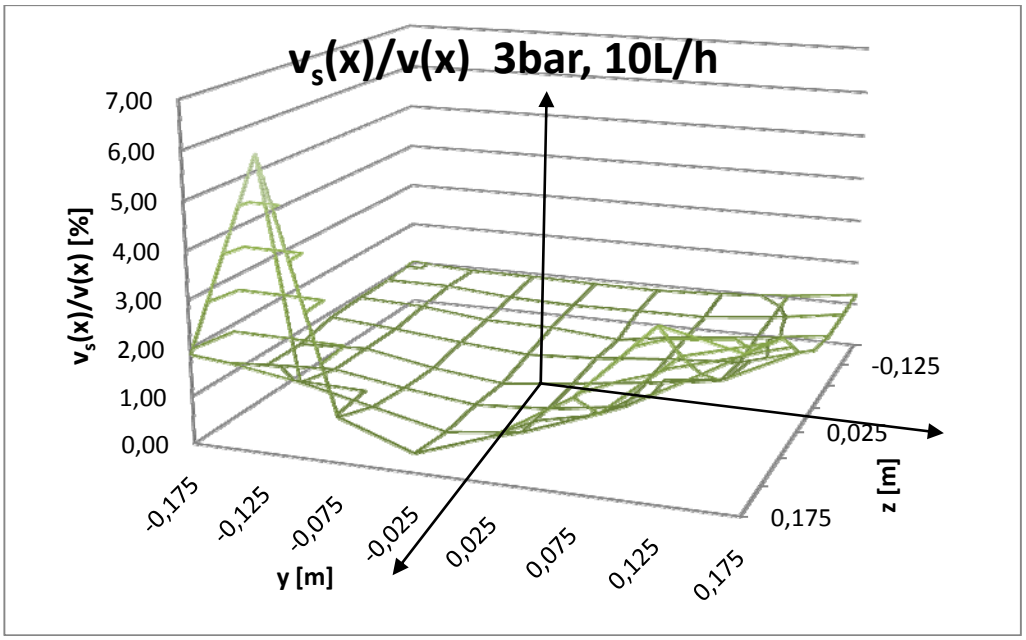


Abbildung 8-3: Zusammenhang Staubabscheidebild $v_S(x)$ - Sprühbild v(x), $\dot{V}_w$= 10L/h, p_L = 3bar, h = 0,35m

Auch in allen anderen Messungen $\dot{V}_w$= 5L/h, 10L/h, 20L/h, 40L/h, 60L/h zeigte sich das gleiche Bild, wie in Abbildung 29 für $\dot{V}_w$= 10/h. Es gibt also keinen Ort unter der Zweistoff-Vollkegeldüse an dem die Abscheidung von Staub besser oder schlechter abläuft.

Anschließend werden nun die Ergebnisse der Staubabscheideversuche für die Düsenparameter $\dot{V}_w$= 5L/h, 10L/h, 20L/h, 40L/h, 60L/h mit p_L = 3bar und h = 0,35 m präsentiert.

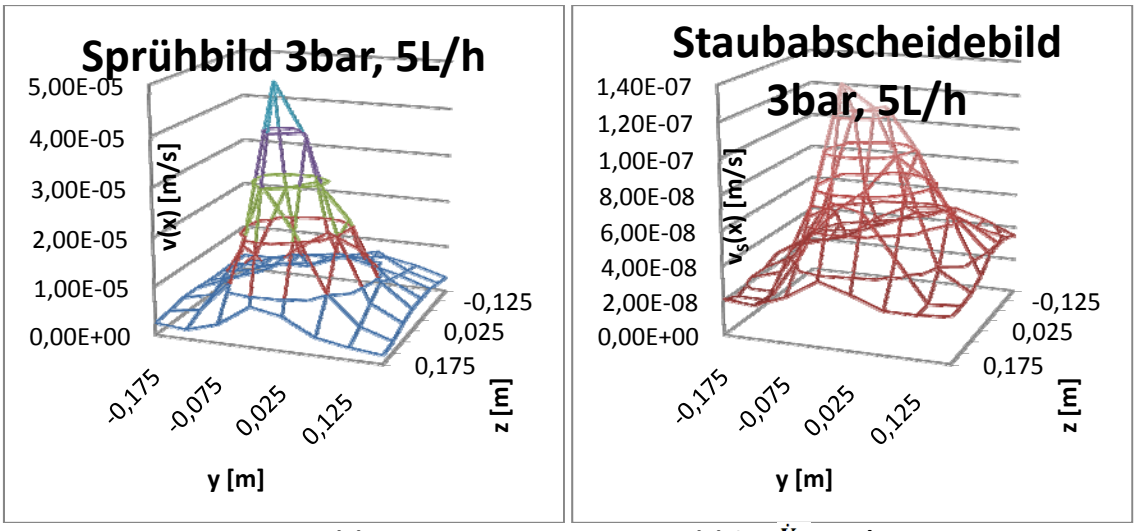


Abbildung 8-4: Sprühbild v(x) und Staubabscheidebild $v_S(x)$ für $\dot{V}_w$= 5L/h, p_L = 3bar, h = 0,35m

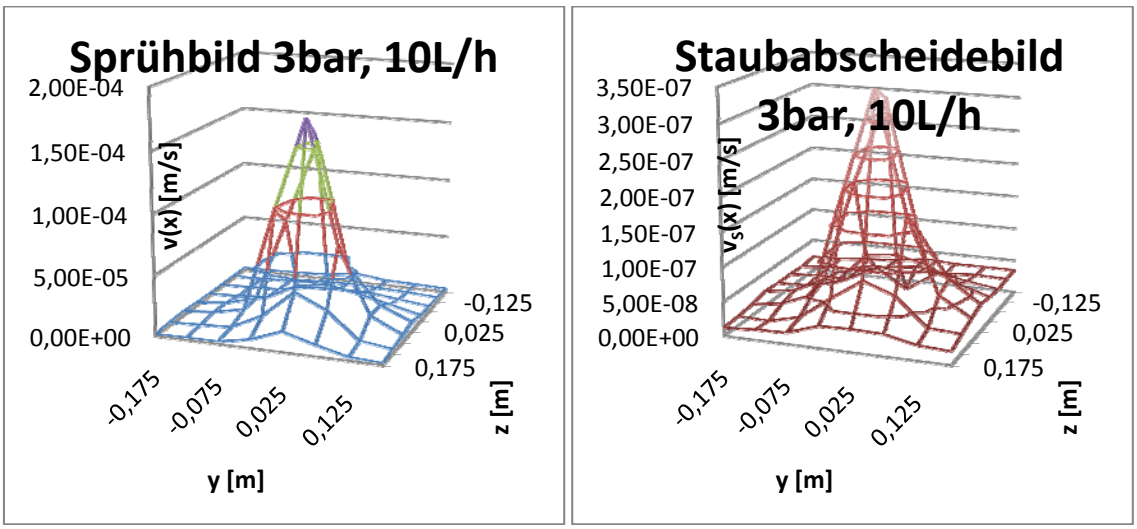


Abbildung 8-5: Sprühbild v(x) und Staubabscheidebild $v_S(x)$ für $\dot{V}_w$= 10L/h, p_L = 3bar, h = 0,35m

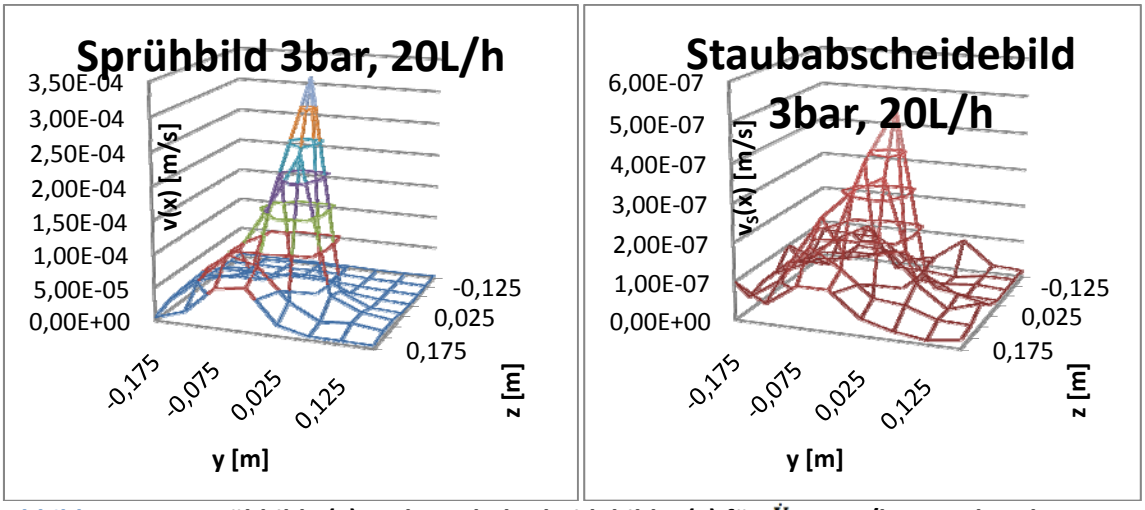


Abbildung 8-6: Sprühbild v(x) und Staubabscheidebild $v_S(x)$ für $\dot{V}_w$= 20L/h, p_L = 3bar, h = 0,35m

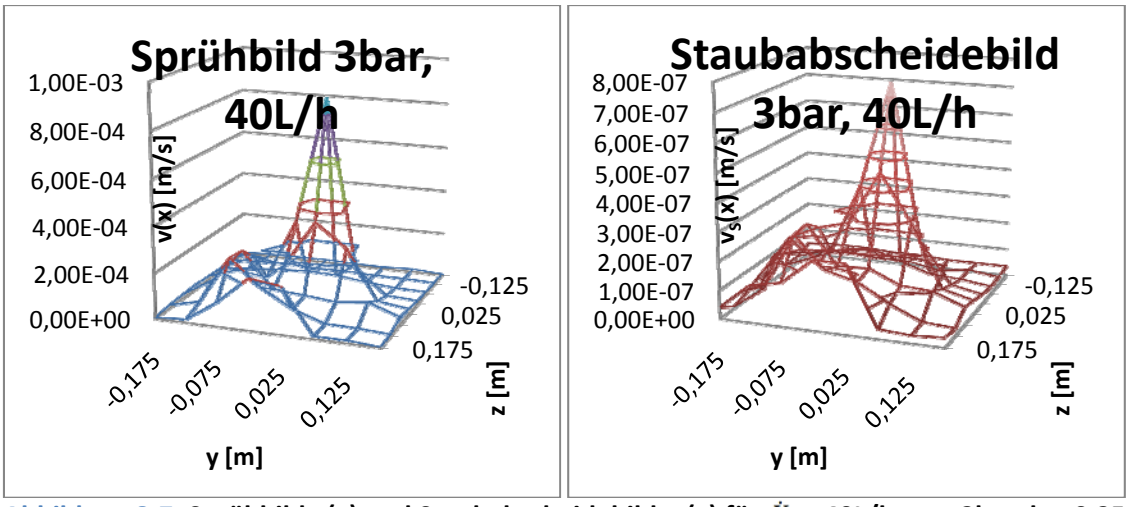


Abbildung 8-7: Sprühbild v(x) und Staubabscheidebild $v_S(x)$ für $\dot{V}_w$= 40L/h, p_L = 3bar, h = 0,35m

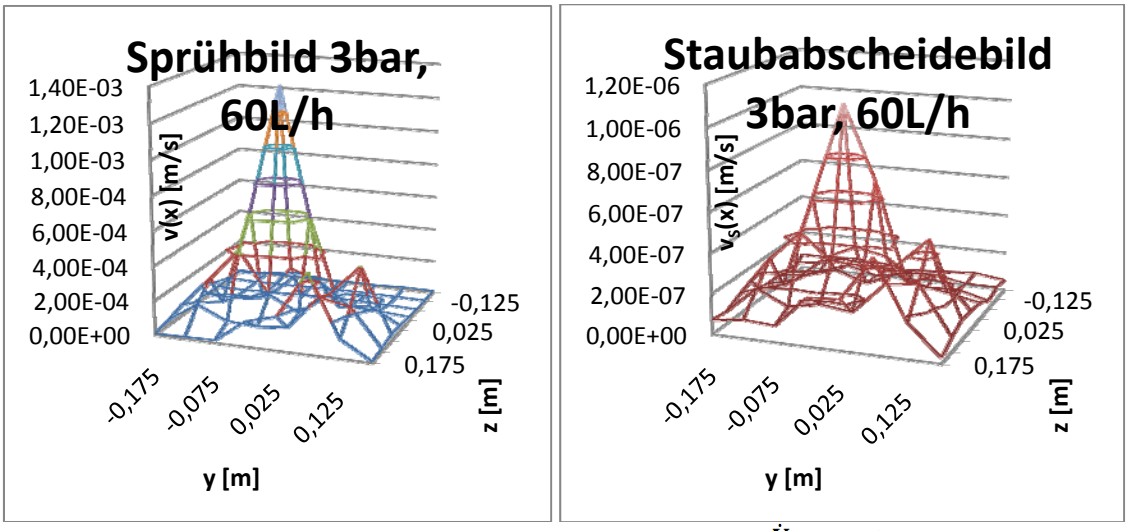


Abbildung 8-8: Sprühbild v(x) und Staubabscheidebild $v_S(x)$ für $\dot{V}_w$= 60L/h, p_L = 3bar, h = 0,35m

Der Zusammenhang zwischen Sprühbild und Staubabscheidebild wird nun in Abhängigkeit vom Wasservolumenstrom $_w$ für alle durchgeführten Messungen aufgetragen. Einmal für den Mittelwert aus allen 64 Messfeldern (Abbildung 8-9) und einmal nur für ein Messfeld pro Versuch, nämlich jenes mit der größten gemessenen Staub- und Wassermasse im Zentrum des Messfeldes, mittig unter der Düse (Abbildung 8-10). In beiden Darstellungen ist ein linearer Zusammenhang zu erkennen. So ergibt sich mit den Gleichungen (8-3) und (8-4) für die Mittelwerte (Abbildung 8-9) k = 9,7*10^{-4} und d = 5,26*10^{-8} und für die Messfelder mit der maximalen Staub - Abscheidegeschwindigkeit (Abbildung 8-10) k = 6,2*10^{-4} und d = 2,12*10^{-7}.

$$k*v(x)+d = v_s(x) \quad (8\text{-}3)$$

$$k = v_s(x)/v(x) \quad (8\text{-}4)$$

k	Steigung der Geraden	[-]
d	Abstand an der y-Achse ($v_S(x)$)	[m/s]
v(x)	Befeuchtungsgeschwindigkeit	[m/s]
$v_S(x)$	Staub - Abscheidegeschwindigkeit	[m/s]

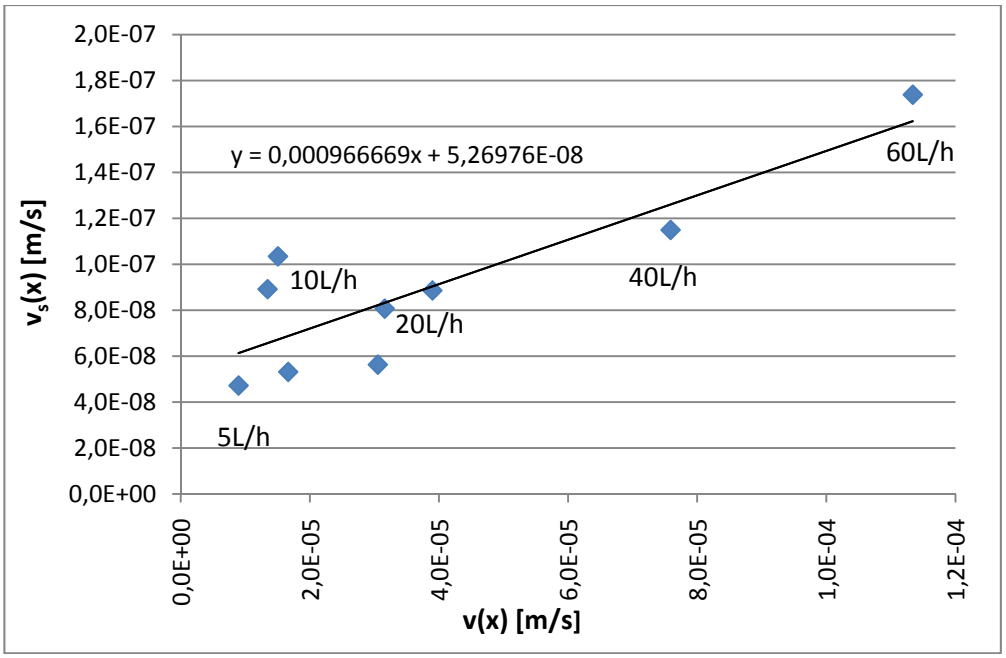


Abbildung 8-9: Zusammenhang Staubabscheidebild $v_S(x)$ - Sprühbild v(x), alle Messpunkte für $\dot{V}_w$ = 5L/h, 10L/h, 20L/h, 40L/h, 60L/h mit p_L = 3bar und h = 0,35 m

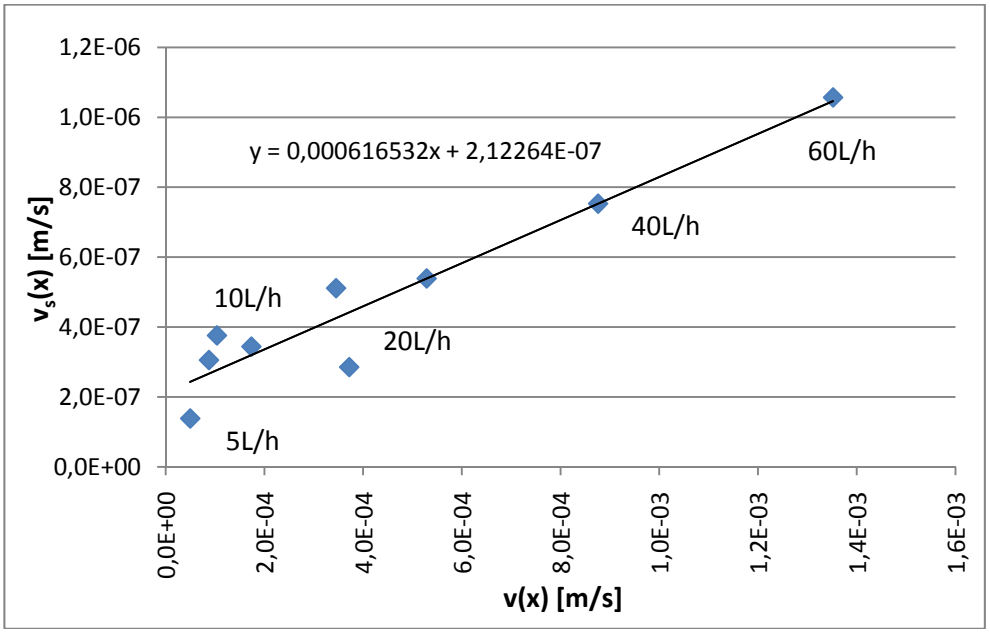


Abbildung 8-10: Zusammenhang Staubabscheidebild $v_S(x)$ - Sprühbild v(x), Maxima unter der Düse für $\dot{V}_w$ = 5L/h, 10L/h, 20L/h, 40L/h, 60L/h mit p_L = 3bar und h = 0,35 m

Für zukünftige Messungen reicht es also offensichtlich, die abgeschiedene Staubmasse in nur einem kleinen Bereich unter der Düse zu betrachten, da von diesem auf das ganze Staubabscheidefeld geschlossen werden kann.

8.3.1.6 Korngrößenverteilung des abgeschiedenen Staubes

Nun soll die Korngrößenverteilung des abgeschiedenen Pural-NF Teststaubes über den Messraster unter der Zweistoff-Vollkegeldüse – also in Abhängigkeit von ihrer örtlichen Lage im Messfeld – dargestellt werden, um eine eventuell vorliegende Klassierung, durch die Abscheidung mittels Düsensprüh zu ermitteln.

Für $\dot{V}_w$ = 20L/h, p_L = 3bar, h = 0,35m wurde mittels Laserbeugungsanalysator (Malvern – Mastersizer siehe Anhang 14.1) für jedes der 64 Messfelder die Partikelgrößenverteilung des abgeschiedenen Pural-NF Teststaubes ermittelt, und anschließend die Werte für $x_{10,3}$, $x_{50,3}$ und $x_{90,3}$ in je einem Diagramm dargestellt.

Um eine gute Auflösung bei der Staubverteilungsmessung zu erhalten, wurde ein relativ kleiner Wasservolumenstrom von 20L/h gewählt. Bei diesem Volumenstrom, ist wie sich in den vorrangegangenen Sprühversuchen zeigte, die Wasserverteilung gleichmäßig und entspricht besonders gut, der erwarteten und berechneten Glockenformsiehe Kapitel 7.3; auch der Düsensprüh ist in diesem Betriebspunkt besonders stabil, und neigt nicht wie an den Betriebsgrenzen der Zweistoffdüse (Kapitel 5.1.3.1) zum Pulsieren. Durch die lange Messzeit von 15min, war eine gut zu analysierende Staubmenge zu erwarten. Messungen mit einer längeren Messzeit waren mit dem gewählten Wasservolumenstrom und den vorhandenen 125ml Messgläsern nicht zu erzielen, da diese nach ca. 17 Minuten mit Sprühwasser und abgeschiedenem Staub vollgefüllt waren.

Während des Spühversuchs bei dem Staub mit dem Düsensprüh abgeschieden wird, wurde abermals eine PCS (particle counter sizer) Reihenmessung durchgeführt, und aus den Roh- und Reingasmessungen der PM10 Gesamtabscheidegrad berechnet.

Nach Ende des Sprühens wurden die Messgläser ausgewogen und anschließend im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, abgekühlt und abermals gewogen.

So erhält man die Verteilung von Wasser und Staub über dem Messraster (siehe dazu Kapitel 7.5.2.1). Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung über das gesamte Messfeld wurde am Auswertecomputer des Malvern Mastersizers eine SOP (Standard Operating Procetur) (siehe Anhang 14.4) erstellt, um die Messung standardisiert durchführen zu können. Dazu werden die benötigten Stoffwerte des Pural NF Teststaubes eingegeben, der Brechungsindex von Pural NF beträgt ε = 1,760 und die Dichte ρ = 3900 kg/m^3. Der Laser wird vor der eigentlichen Messung mit Hilfe von Teststaub kalibriert und das optische Messvolumen ausgerichtet. Auch der gewählten Messzelle fällt eine große Bedeutung zu. Um die kleinen Probemengen überhaut analysieren zu können, eignet sich das Dispergiermodul Hydro 2000S (A) am besten. In diesem wird der zu vermessende Staub, in Wasser dispergiert und durch das optische Messvolumen gepumpt. Um ein Gefühl für den Umgang mit dem Laserbeugungsanalysator zu bekommen, und um die SOP zu programmieren, wurden einige Vorversuche mit Pral-NF Teststaub durchgeführt. Dabei wurde auch eine Probe von 20g Pural-NF mit dem Sirocco Dispergiermodul in Luft dispergiert und das Partikelspektrum mit dem Laser-Beugungsanalysator vermessen. Diese Partikelgrößenverteilung des verwendeten Teststaubes PURAL NF dient als Referenzprobe und ist in Anhang 14.6 zu sehen.

Je eine Korngrößenverteilungsmessung, des mit dem Sprüh in das Messglas abgeschiedenen Staubes, wird pro Messfeld durchgeführt (Anhang 14.8). Dies geschieht nach einander für alle 64

Messfelder. Zwischen den einzelnen Messungen wird das System gespült, um zu verhindern, dass Staub einer Probe in die nächste Messung verschleppt wird, und so das Ergebnis verfälscht. Ein Auszug aus den durchgeführten Messungen mit dem Malvern - Mastersizer ist als Screenshot der Auswertesoftware in Abbildung 8-11 dargestellt.

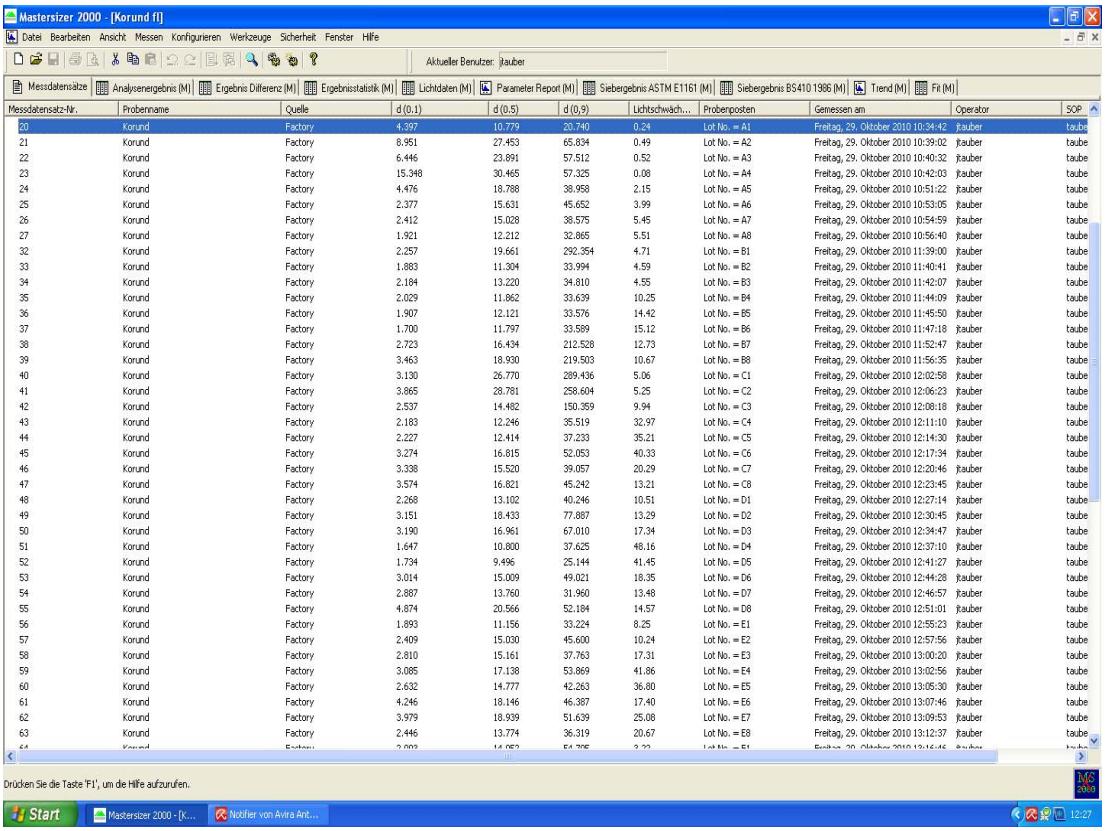


Abbildung 8-11: Screenshot der MALVERN Mastersizer Auswertesoftware für die Messungen 20-64

$d(0,1) = x_{10,3}$; $d(0,5) = x_{50,3}$; $d(0,9) = x_{90,3}$ spezifische massenbezogene Partikeldurchmesser – massenäquivalente Kugeldurchmesser. $x_{90,3}$ entspricht also einem Äquivalentsdurchmesser einer Kugel mit Dichte $\rho = 1$,wobei 90% der gemessenen Partikel leichter als diese Kugel sind. Siehe dazu Anhang 14.6, 14.7und 14.8.

Trägt man nun die gemessenen spezifischen Partikeldurchmesser $x_{10,3}$; $x_{50,3}$ und $x_{90,3}$ für jedes Messfeld über dem Messraster auf, erhält man für jeden der drei Kennwerte ein Diagramm (Abbildungen 8-11 bis – 8-13). Die Schwankungen sind auf Ungenauigkeiten bei den Probenahmen zurückzuführen, die Mittelwerte für $x_{10,3}$, $x_{50,3}$ und $x_{90,3}$ über dem gesamten Messraster stimmen aber gut mit den Messwerten der Referenzprobe überein (siehe Anhang 14.7 und 14.8).

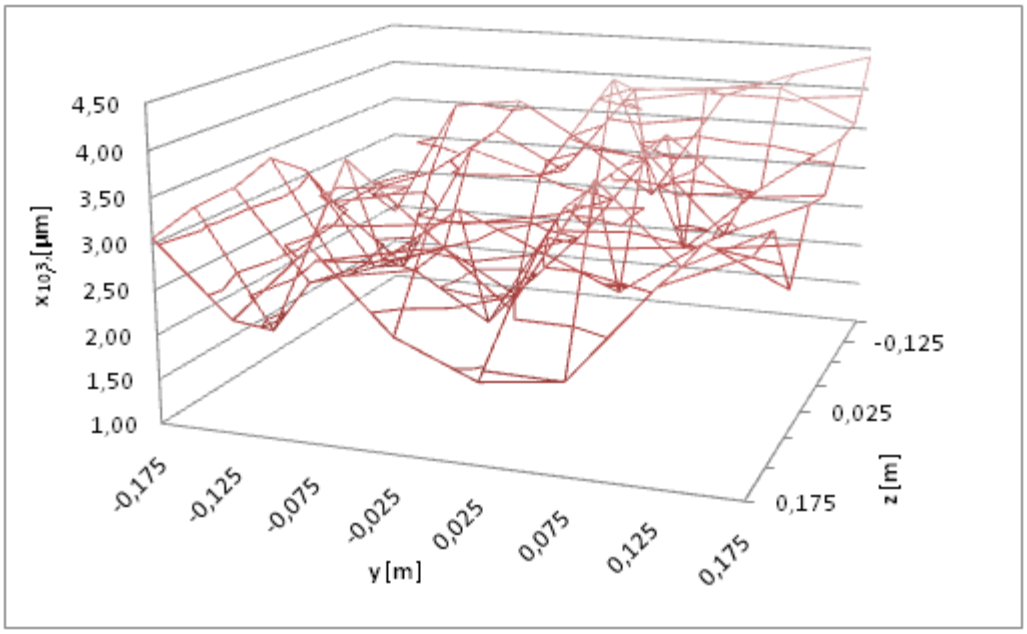


Abbildung 8-11: $x_{10,3}$ [µm] für $\dot{V}_w$ = 20L/h Mittelwert = 2,966 µm

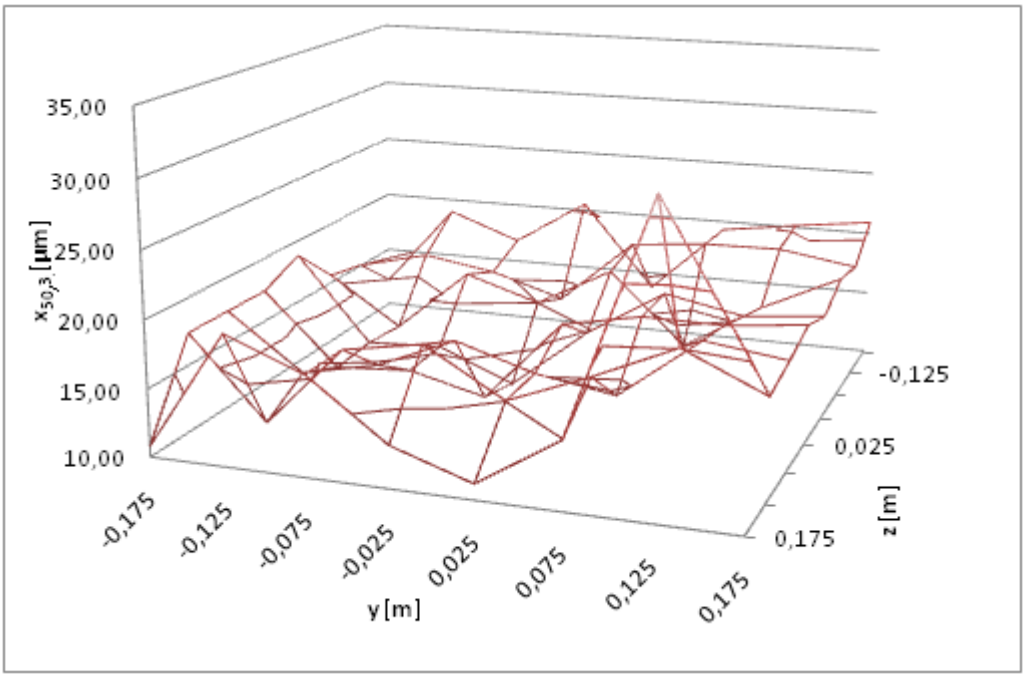


Abbildung 8-12: $x_{50,3}$ [µm] für $\dot{V}_w$ = 20L/h Mittelwert = 16,487 µm

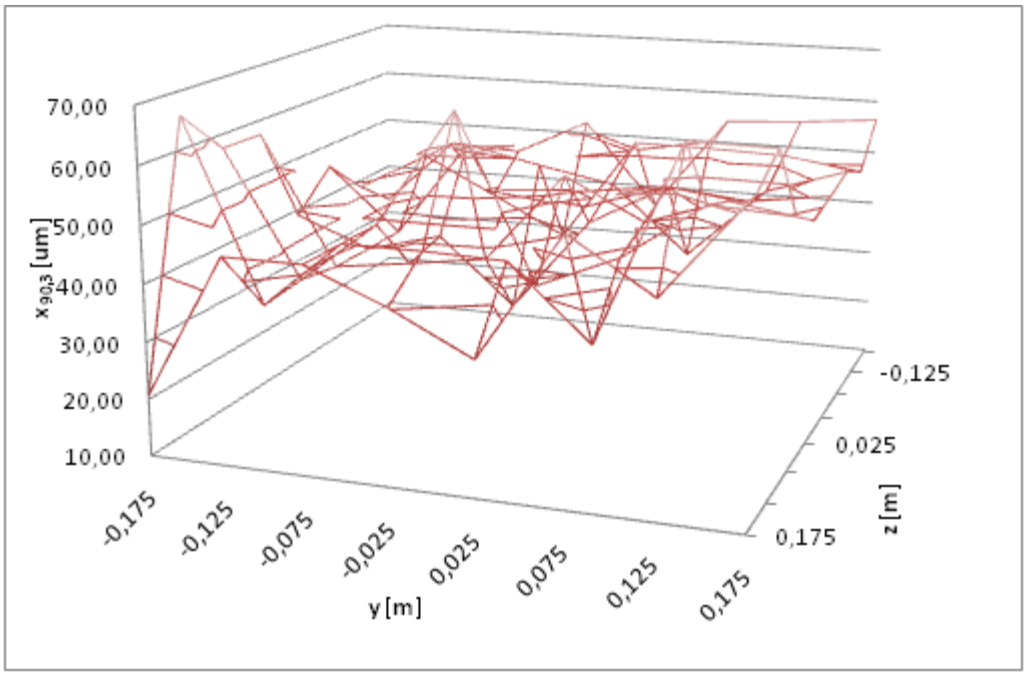


Abbildung 8-13: $x_{90,3}$ [µm] für $\dot{V}_w$ 20L/h Mittelwert = 45,981 µm

Bis auf wenige Ausreißer, welche auf die teilweise sehr kleinen Mengen des abgeschiedenen Pural-NF Staubes ($m_{ProbeA2}$=0,02g) zurückzuführen sind – diese treten am Rand des Sprühbildes auf – ergibt sich eine gleichmäßige Verteilung der Partikelgröße über dem Messraster. Das bedeutet, die Werte für $x_{10,3}$, $x_{50,3}$, und $x_{90,3}$ des abgeschiedenen Pural-NF sind nahezu konstant über den gesamten Messraster. Für die ausgezeichnete Auflösung der Laserbeugungsmessung spricht, dass selbst bei sehr kleinen Staubmengen von unter 0,05g genau die gleichen Werte gemessen werden, wie bei der Referenzmessung mit 20 g Pural-NF (Anhang 14.7).

Die Partikelgrößenverteilung ist also unabhängig von der abgeschiedenen Staubmenge (Abbildung 8-1), dem dabei verbrauchten Sprühwasser (Abbildung 8-2), und der örtlichen Lage des gemessenen Feldes im Raster (Abbildungen 8-11 bis 8-14). Es findet also keine Klassierung durch die Abscheidung mittels Zweistoff-Düsensprüh statt. Diese findet wie in der CFD Simulation gefunden wurde erst hinter dem Düsenspray durch Strömungseffekte statt.

8.4 Modell zur Beschreibung des Staubabscheidefeldes von Sprühdüsen

Durch die experimentelle Erfassung der Staubabscheidefelder konnte gezeigt werden, dass diese deckungsgleich mit den Befeuchtungsglocken der Sprühdüser VSR 1005 sind wie in Abbildung 8-1 und 8-2 zu sehen ist. Es ist auch ein linearer Zusammenhang zwischen der Staubabscheidegeschwindigkeit und der Befeuchtungsgeschwindigkeit (Abbildung 8-9 und 8-10) erfasst worden. Durch Messung der Befeuchtungsfelder von Sprühdüsen können also über den ermittelten Zusammenhang (Abbildung 8-9 und 8-10) Staubabscheidefelder berechnet werden. Der Lineare Zusammenhang ist auch von den Strömungsbedingungen und der Positionierung der Düse abhängig wie in Kapitel 5 dargelegt wurde. Für zentrale Positionierung $4A_0$ und Strömungsverhältnisse welche sich nach CFD Simulation und experimentellen Ergebnissen gefunden, optimal auf die Staubabscheidung auswirken, gilt der in Formel 8-3 dargestellte

Zusammenhang. Das Modell zur Beschreibung von Staubabscheidefeldern lautet also ausgehend vom Modell zur Beschreibung von Befeuchtungsfeldern (Formel 7-5) folgender Maßen (Formel 8-6):

Linearer Zusammenhang zwischen $v_s(x)$ und v(x) nach Abbildung 8-10

Für TSP und einer Höhe: $v_s(x)$= 0,000616532*v(x) + 2,12264E-07 (8-5)

Einsetzen in Gleichung (7-5) ergibt (für TSP):

$$v_s(x) = 0{,}0006165 * a * e^{-b * x^2} + 2{,}12264E - 07 \quad (8\text{-}5a)$$

Im Folgenden wurden die linearen Zusammenhänge zwischen $v_s(X)$ und V bei verschienen Düsenhöhen untersucht. k ist die Steigung des Zusammenhanges Gleichung 8-3. für die Düsenhöhe 0,35m. ki bezeichnet die Steigung des linearen Zusammenhanges nach Gleichung 8-3 für alle anderen Düsenhöhen. So kann ein Verhältnisfaktor Ak gebildet werden. In Abbildung 8-13a ist dieser Zusammenhang dargestellt.

$$A_K = ki / k \quad (8\text{-}5b)$$

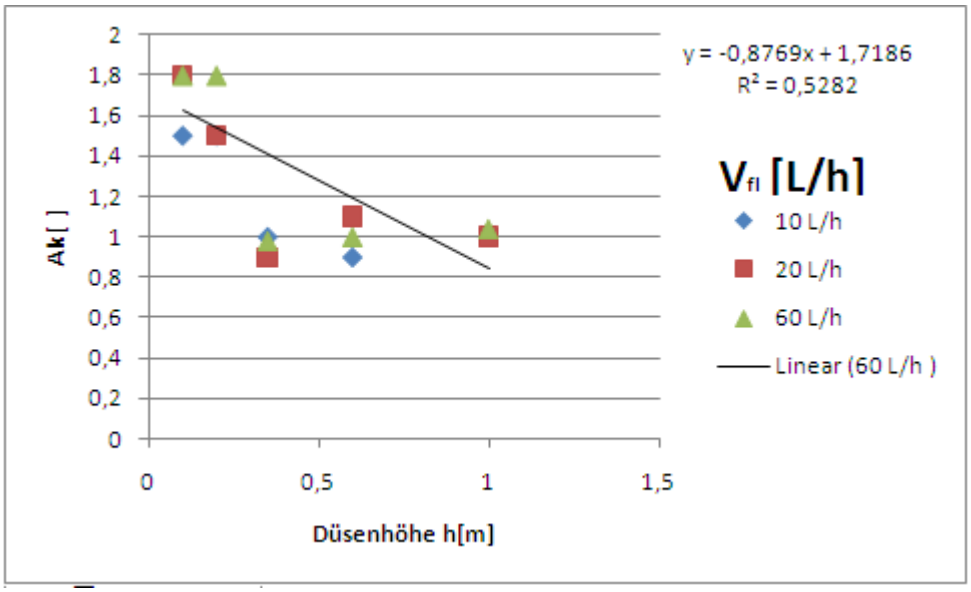


Abbildung 8-13a: Zusammenhang von k und Düsenhöhe h

Für d nach gleichung 8-3 konnte keine signifikante Abhängigkeit mit Düsenhöhe h gefunden werden.

Mit Hilfe des ermittelten Datenfeldes A_k, d und k kann nun das Staubabscheidefeld ermittelt werden:

Allgemein gilt:

$$v_s(x) = \mathrm{A_k} * (\mathrm{k} * a * e^{-b * x^2} + d) \quad (8\text{-}6)$$

Da die Staubabscheidegeschwindigkeit und die glockenförmigen Staubabscheidefelder mit der Befeuchtungsgeschwindigkeit und den glockenförmigen Befeuchtungsfeldern linear zusammenhängen kann aus durch alleinige Erfassung des Sprühbildes einer Spprühdüse die zu erwartende sekundäre Staubabscheideeffektivität in Anlehnung an die Ableitung für die Berechnung der primären Staubabscheideeffektivität (Kapitel 7.5) erfolgen. Dazu werden die in Gleichung (8-6) ermittelten Staubabscheidegeschwindigkeiten in Luftströmungsrichtung aufsummiert.

8.4.1 Diskretisierte Summation zur Berechnung zur Berechnung der sekundären Staubabscheideeffektivität

Ein ortsaufgelöstes Staubabscheidegeschwindigkeitsfeld kann aus den radial gemessenen Befeuchtungsgeschwindigkeiten durch Gleichung 8-6 berechnet werden (Abbildung 8-1 und 8-2). Dieses ortsaufgelöste Staubabscheidegeschwindiglkeitsfeld läßt sich als Funktion des Befeuchtungsradius x darstellen (Abbildung 8-14).

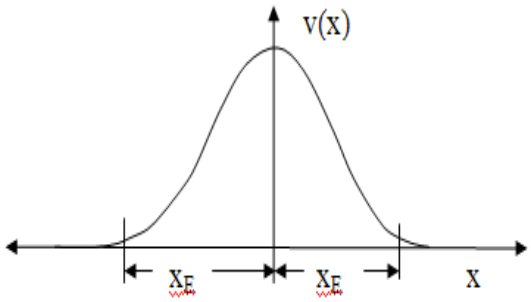


Abbildung 8-14: Staubabscheidegeschwindigkeit als Funktion des Befeuchtungsradius.

x_E Grenzwert = beidseitig wo $v(x_E)=0{,}01*v_{max}$ [m]

Komponentenzerlegung des Befeuchtungsradius x (Abbildung 8-15).

$$x^2 = y^2 + z^2 \quad (8\text{-}7)$$

Einsetzten von Gleichung 8-7 in Gleichung 8-6:

$$v_{s,y}(z) = A_k * (\mathrm{k} * a * e^{-b*(y^2+z^2)} + d) \quad (8\text{-}8)$$

$v_{s,y}(z)$ Staubabscheidegeschwindigkeit in Luftströmungsrichtung z an der Stelle y [m/s]

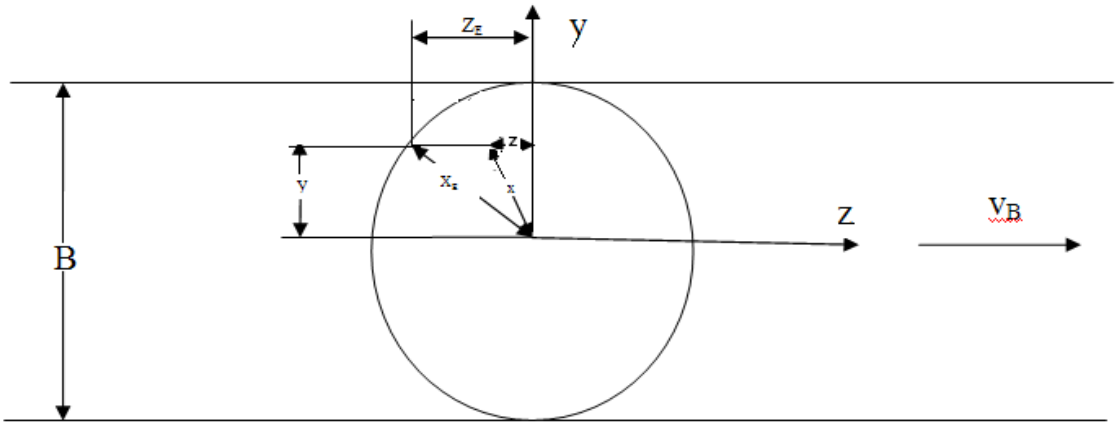


Abbildung 8-15: Staubabscheidegeschwindigkeitsfeld in Abhängigkeit des in Komponenten y und z zerlegten Befeuchtungsradiuses x.

$$z_E = \sqrt{x_E^{\ 2} - y^2} \tag{8-9}$$

Z Befeuchtungsdistanz in Förderbandlaufrichtung [m]

z_E limit in Luftströmungsrichtung bei welchen der Grenzwert x_E erreicht ist [m]

y Befeuchtungsdistanz quer zur Luftströmung [m]

$$\Delta y = \frac{x_E}{20} = \frac{x_E}{N_y} \tag{8-10}$$

Δy Klassenweite in y Richtung [m]

N_y Gesamtanzahl an Klassen in y Richtung [ ]

$$\overline{y} = N_j * \Delta y + \Delta y / 2 \tag{8-11}$$

$\overline{y}$ Klassendurchschnittskoordinate in y Richtung zwischen den Grenzen $-x_E$ und $+x_E$ [m]

N_j=0,1,2..N_y-1: Laufvariable

$$v_L = \frac{\Delta z}{\Delta t} \tag{8-12}$$

V_L Luftströmungsgeschwindigkeit [m/s]

Δz Klassenweite in Förderbandlaufrichtung z [m]

Δt Zeitintervall in dem die Distanz Δz zurrückgelegt wird [s]

$$\Delta z = \frac{z_E}{20} = \frac{z_E}{N_z} \tag{8-13}$$

$$\bar{z} = \Delta z * N_i + \Delta z / 2 \quad (8\text{-}14)$$

$\bar{z}$ Klassendurchschnittskoordinate in z Richtung[m]

N_z Gesamtanzahl an Klassen in z Richtung [ ]

N_i=0,1,2...N_z-1: Laufvariable

Dar $\bar{y}$, $\bar{z}$ Koordinaten als Durchschnittskoordinaten definiert sind kann ein $v_{\bar{y}}(\bar{z})$ unter Verwendung von Gleichung 8-8 für jede Klasse formuliert werden

$$v_{\overline{s,y}}(\bar{z}) = A_k * (k * a * e^{-b*(\bar{y}^2 + \bar{z}^2)} + d) \quad (8\text{-}15)$$

$v_{\bar{y}}(\bar{z})$ Staubabscheidegeschwindigkeit in Luftströmungsrichtung z an der Stelle $\bar{y}$ [m/s] Δ

$$\overline{V_{\overline{S,y}}} = v_{\overline{s,y}}(\bar{z}) * \Delta y * \Delta t \quad (8\text{-}16)$$

Δ$\overline{V_{\overline{s,y}}}$ Staubvolumen in Luftströmungsrichtung z je Klassenweite Δy [m^3/m]

Umrechnung der Gleichung 8-15 und Einsetzten in Gleichung 8-16 ergibt:

$$\Delta\overline{V_{\overline{s,y}}} = v_{\overline{s,y}}(\bar{z}) * \Delta y * \frac{\Delta z}{v_L} \quad (8\text{-}17)$$

Beidseitiges aufsummieren in Luftströmungsrichtung z ergibt:

$$\overline{V_{S,\bar{y}}} = \frac{2 * \Delta y}{v_L} * \sum v_{S,\bar{y}}(\bar{z}) * \Delta z \quad (8\text{-}18)$$

$\overline{V_{\overline{S,y}}}$ Staubvolumen per Luftströmungslängeneinheit in Luftströmungsrichtung z bis zum Grenzwert z_E je Klassenweite Δy an der Stelle $\bar{y}$ [m^3/m]

$$\overline{V_{\overline{S,y}}} = \frac{2 * \Delta y}{v_L} * \sum_{N_i=0}^{N_i=N_z-1} v_{\overline{S,y}}(\Delta z * N_i + \Delta z / 2) * \Delta z \quad (8\text{-}19)$$

$$T = \frac{2 * z_E}{v_L} \quad (8\text{-}20)$$

T Zeit in der die Kontrollfläche Δz*Δy mit v_B von $-z_E$ zu $+z_E$ verschoben wird [s]

$$\overline{M_{\overline{S,y}}} = \overline{V_{\overline{S,y}}} * \rho \qquad (8\text{-}21)$$

ρ Dichte des Staubes[kg/m^3]

$\overline{M}_{\overline{S,y}}$ Masse an Staub per Luftströmungslängeneinheit an der Stelle $\overline{y}$ [kg/m]

Berechnung eines Staubmassenstromes je Klassenweite Δy unter Verwendung der Gleichungen (8-19),(8-20),(8-21) ergibt:

$$\overline{\dot{M}_{\overline{S,y}}} = \frac{\overline{M}_{\overline{S,y}}}{T} = \frac{2*\Delta y}{v_L} * \rho * \sum_{0}^{N_z-1} v_{\overline{S,y}} (\Delta z * N_i + \Delta z/2) * \Delta z * \frac{v_L}{2 * z_E} \qquad (8\text{-}22)$$

$\overline{\dot{M}_{\overline{S,y}}}$ Staubmassenstrom je Klassenweite Δy in Luftströmungsrichtung z aufsummiert zwischen -z_E bis +z_E an der Stelle $\overline{y}$ [kg/ms]

Da sich die Luftgeschwindigkeit v_L herauskürzt kann folgender Ausdruck formuliert werden:

$$\overline{\dot{M}_{\overline{S,y}}} = \frac{\Delta y}{z_E} * \rho * \sum_{0}^{Nz-1} v_{S,\overline{y}} (\Delta z * N_i + \Delta z/2) * \Delta z \qquad (8\text{-}23)$$

Durch berechnen von $\overline{\dot{M}}_{S;\overline{y}}$ bei verschiedenen $\overline{y}$ Positionen zwischen

- $(\overline{y} = N_y * \Delta y + \Delta y/2)$ und $(\overline{y} = N_y * \Delta y + \Delta y/2)$ in Δy Schritten durch Gleichung 8-23 kann $\overline{\dot{M}}_{s,\overline{y}}(\overline{y})$ quer zur Luftströmungsrichtung aufgetragen werden (Abbildung 8-16) [kg/ms]

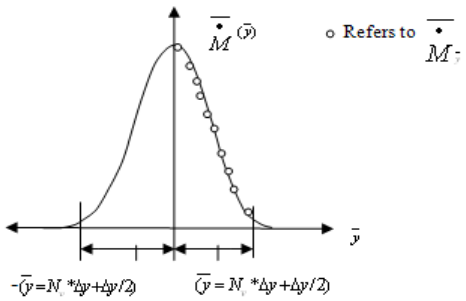


Abbildung 8-16: Staubmassenstrom je Klasse Δy quer zur Richtung der Luftströmung

Im nächsten Schritt ist die sekundäre Staubabscheideeffektivitätl welche der Düsenspray erzeugt zu berechnen (Gleichung 8-24 bis 8-25). Dazu ist der Luftmassenstrom an der Stelle $\overline{y}$ der Klassenweite Δy genauso zu definieren wie der Staubmassenstrom $\overline{\dot{M}}_{s,\overline{y}}(\overline{y})$ an der Stelle $\overline{y}$ der

Klassenweite Δy [kg/ms] welche als Staubmassenstrom welche durch eine $z_E * \Delta y$ Kontrollfläche durchtritt definiert ist.

Dar die Staubabscheideglocke bis y_E betrachtet werden soll und y_E ind siesem Fall gleich z_E ist, kann man folgende Formel zur Berechnung der Staubmassenstromdichte formulieren.

$$\overline{\dot{m}}_{\overline{S,y}} = \frac{\dot{m}_S * 2 * \Delta y}{z_E^{\,2}} \qquad (8\text{-}24)$$

$\dot{m}_S$ Staubmassenstrom der Luftströmung[kg/s]

$\overline{\dot{m}}_{\overline{s,y}}$ Staubmassenstromdichte in z Richtung zwischen $-z_E$ und $+z_E$ an der Stelle $\bar{y}$ [kg/ms]

$$\eta_{2,\bar{y}} = \frac{\overline{\dot{M}}_{S,\bar{y}}}{\dot{m}_{\overline{S,y}}} \qquad (8\text{-}25)$$

$\eta_{2,\bar{y}}$ sekundäre Staubabscheideeffektivität an der Stelle $\bar{y}$ der Klassenweite Δy [kg Staub abgeschieden/kg Staub in Luft]

Um die Gesamte sekundäre Staubabscheideeffektivität unter der Düse berechnen zu können ist nun noch quer zur Luftströmungsrichtung (y-Richtung) aufzusummieren.

$$\eta_{2,TSP} = \sum_{0}^{Ny-1} \eta_{2,\bar{y}} \qquad (8\text{-}26)$$

Es wurde bewisen (siehe Kapitel8.3.1.6), dass die Abscheidung in einem gewissen Partikelgrößenbereich unabhängig von der Partikelgrößenverteilung ist (Abgeschiedener Staub zeigte dieselbe Partikelgrössenverteilung wie der aufgegebene Teststaub Pural NF siehe Anhang 14.7 und 14.8). Dahere kann mittels Partikelgrößenverteilung $\eta_{2,TSP}$ direkt in $\eta_{2,PM10}$ umgerechnet werden. Der nach Gleichung 8-28 bzw. nach Ableitung (Kapitel 8.4) aus den Befeuchtungsfeldern berechnete $\eta_{2,TSP}$ kann daher durch Multiplikation mit dem Faktor 0,456 in $\eta_{2,PM10}$ umgerechnet werden siehe Formel (8-26a).

$$\eta_{2,PM10} = 0{,}456 * \eta_{2,TSP} \qquad (8\text{-}26a)$$

Im Folgenden sollen die berechneten Werte für η_2 experimentell überprüft werden.

8.4.2 Experimentelle Ermittlung des Flüssigkeitsmassenstromprofils über die Förderbandbreite aus der flächenmässigen Befeuchtung

8.4.2.1 Vergleich der Partikel-Größenspektren zwischen aufgegebenem und abgeschiedenem Pural-NF Teststaub

Die mit dem Malvern – Mastersizer ermittelten Partikel – Größenspektren für den aufgegebenen, sowie für den, in den 64 Messgläsern abgeschiedenen Pural-NF Teststaub, befinden sich im Anhang. Bei einer Gegenüberstellung der beiden Partikel-Größenverteilungen (Anhang 14.7 und 14.8) zeigt sich kein Klassiereffekt durch die Abscheidung des Staubes aus strömender beladener Luft mittels Düsensprüh.

8.4.2.1.1 Abscheidegrad aus der PCS-Roh - und Reingasmessung:

Aus den Daten, die der particle counter sizer (siehe verwendete Geräte Kapitel 4.3.1.2) für jede Staubabscheidemessung liefert, wird der Abscheidegrad berechnet. Die PCS-Roh – und Reingasmessung ist exemplarisch für eine Staubabscheidemessung in Abbildung 8-20 dargestellt. Die Anzahlverteilungen der Roh- und Reingasmessungen für die Düsenparameter $\dot{V}_w$ = 3,6L/h; 5L/h; 10L/h; 20L/h; 40L/h; 60L/h mit p_L = 3bar und h = 0,35 m sind in Abbildung 8-21 zu sehen.

$$T(\bar{x}) = 1 - \frac{\Delta N_{Reingas}(\bar{x})}{\Delta N_{Rohgas}(\bar{x})} \qquad (8\text{-}27)$$

$T(\bar{x})$	Fraktionsabscheidegrad der Partikelgröße x	[-]
$\Delta N_{Rohgas}(\bar{x})$	Partikelanzahl die sich bei der Rohgasmessung in der Klasse x befindet	[-]
$\Delta N_{Reingas}(\bar{x})$	Partikelanzahl die sich bei der Reingasmessung in der Klasse x befindet	[-]

Weiters kann nun der PM(x) Gesamtabscheidegrad mittels Gleichung 8-28 berechnet werden. Hierbei handelt es sich um die Abscheideleistung der Zweistoffdüse. Er ist definiert, als das Verhältnis der gesamten zurückgehaltenen Partikelanzahl unterhalb einer bestimmten Partikelgröße ≤ x_O des Teststaubes, zu der gesamten zugeführten Partikelanzahl unterhalb einer bestimmten Partikelgröße ≤ x_O des Teststaubes. Hierfür werden die berechneten Fraktionsabscheidegrade bis zu einer bestimmten Größe aufsummiert. Der Gesamtabscheidegrad PM10 ist dabei die Summe der Fraktionsabscheidegrade von 0,6µm bis 10µm.

$$PM(x_O)\ Gesamtabscheidegrad = 1 - \frac{\sum_0^x \Delta N_{Reingas}(x_O)}{\sum_0^x \Delta N_{Rohgas}(x_O)} \qquad (8\text{-}28)$$

$PM(x_O)$	Gesamtabscheidegrad unterhalb einer Partikelgröße ≤ x_O	[-]

Für alle durchgeführten Messungen ergibt sich ein mittlerer PM10 Gesamtabscheidegrad von 9%.

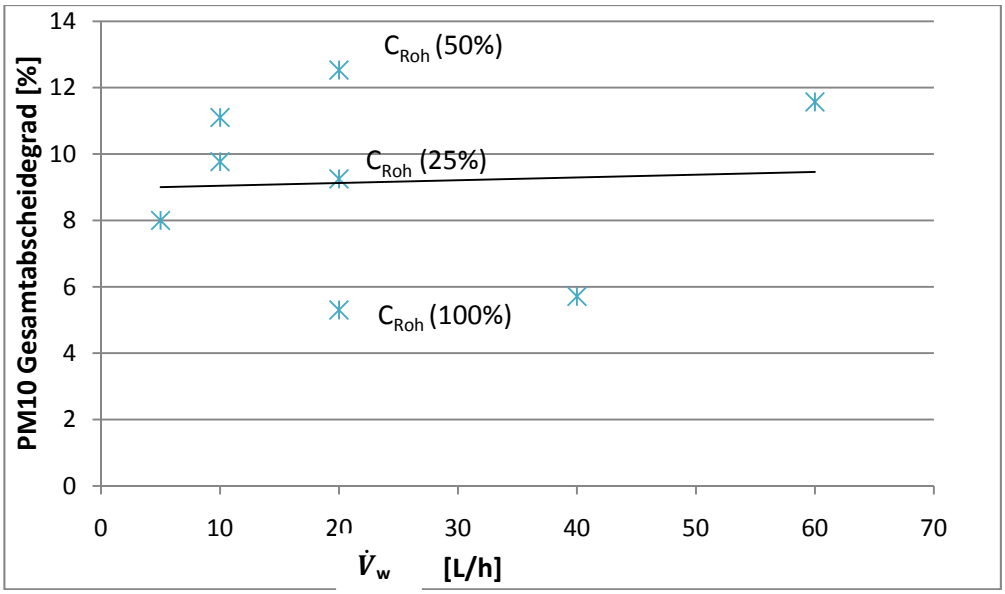


Abbildung 8-17: PM10 Gesamtabscheidegrad für $\dot{V}_w$ = 5L/h, 10L/h, 20L/h, 40L/h, 60L/h mit p_L = 3bar und h = 0,35 m

8.4.2.1.2 $\eta_{2,TSP}$ für sekundärer TSP - Abscheidegrad aus der Staubkonzentration und abgeschiedenen Staubmenge

Neben dem Gesamtabscheidegrad aus der PCS Roh- und Reingasmessung kann außerdem der Gesamtabscheidegrad $\eta_{2,TSP}$ (TSP - total suspended dust) aus der im Rohgas gemessenen Staubkonzentration und der aufsummierten abgeschiedenen Staubmenge Σm_S berechnet werden. Allgemein gilt:

$$\eta_2 = \frac{\Sigma m_S}{c_{Roh} * V_L} \qquad (8\text{-}29)$$

Σm_S	summierte abgeschiedene Staubmenge pro Sekunde	[kg/s]	
C_{Roh}	Staubkonzentration im Rohgas (200mg/m^3)	[kg/m^3]	C_{Roh} = 0,0002 kg/m^3
$\dot{V}_L$	Luftvolumenstrom durch die Anlage	[m^3/s]	$\dot{V}_L$ = 0,17 m^3/s

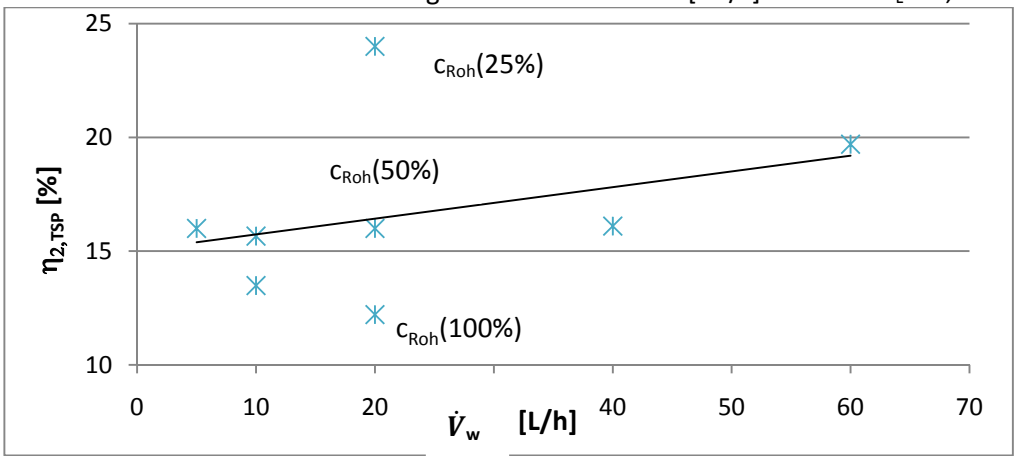


Abbildung 8-18: sekundärer TSP-Abscheidegrad $\eta_{2,TSP}$ für $\dot{V}_w$ = 5L/h, 10L/h, 20L/h, 40L/h, 60L/hmit p_L = 3bar und h = 0,35 m

Der nach Gleichung 8-28 bzw. nach Ableitung (Kapitel8.4) aus den Befeuchtungsfeldern berechnete $\eta_{2,TSP}$ ist deckungsgleich mit $\eta_{2,TSP}$ welcher nach Gleichung 8-29 experimentell ermittelt werden konnte. Dies ist in Abbildung 8-18 dargestellt.

8.4.2.1.3 Vergleich der Abscheidegrade

Der PM10 Gesamtabscheidegrad aus den PCS Messungen soll nun dem TSP - Abscheidegrad η_2 welcher aus der aufgegebenen Staubmenge als Staubkonzentration im Rohgas und der abgeschiedenen Staubmenge Σm_S berechnet wurde, in Abbildung 8-19 gegenübergestellt werden.

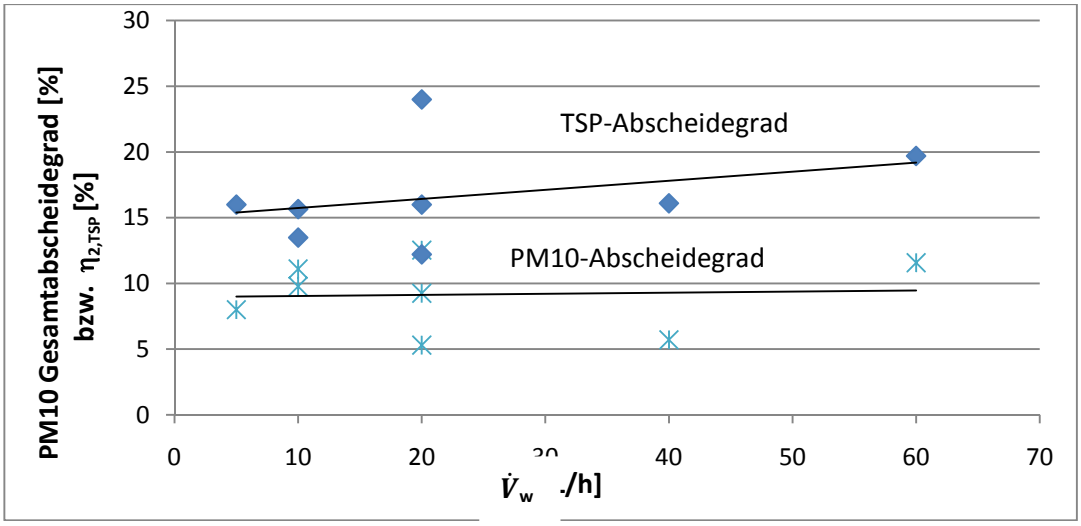


Abbildung 8-19: Vergleich zwischen PM10- und TSP-Abscheidegrad

Wie Abbildung 8-19 zeigt, beträgt der PM10-Gesamtabscheidegrad in etwa 10% und der TSP – Abscheidegrad etwa 16%. Sie passen sehr gut zusammen, weil beide Verläufe über den gesamten Messbereich parallel sind und sich ihr absoluter Unterschied aus der Korngrößenverteilung des aufgegebenen Pural-NF Teststaubes ergibt.

Es wurde bewisen, dass die Abscheidung in einem gewissen Partikelgrößenbereich unabhängig von der Partikelgrößenverteilung ist (Abgeschiedener Staub zeigte dieselbe Partikelgrössenverteilung wie der aufgegebene Teststaub Pural NF siehe Anhang 14.7 und 14.8). Dahere kann mittels Partikelgrößenverteilung $\eta_{2,TSP}$ direkt in $\eta_{2,PM10}$ umgerechnet werden. Der nach Gleichung 8-28 bzw. nach Ableitung (Kapitel 8.4) aus den Befeuchtungsfeldern berechnete $\eta_{2,TSP}$ kann daher durch Multiplikation mit dem Faktor 0,456 in $\eta_{2,PM10}$ umgerechnet werden.

Wie aus Abbildung 8-19 ersichtlich wäre dann $\eta_{2,PM10}$ welcehe aus den Befeuchtungsfeldern ermittelt wurde mit $\eta_{2,PM10}$ (PM10 Gesamtabscheidegrad siehe Gleichung 8-28) welche aus den PCS Messungen ermittelt wurde annähernd deckungsgleich

8.4.2.2 PCS-Roh - und Reingasmessung

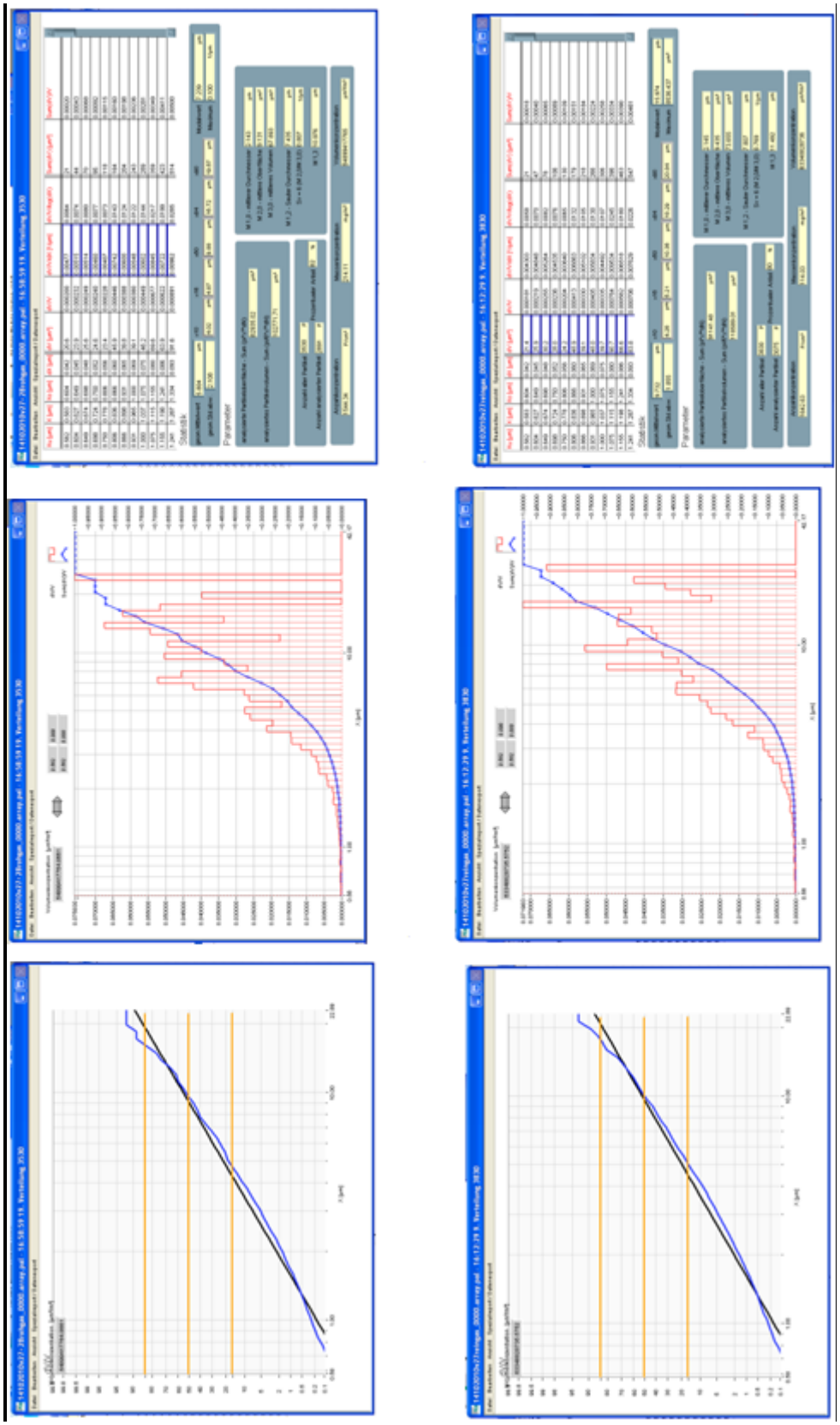


Abbildung 8-20: Roh- und Reingasmessung mit dem PCS

8.4.2.3 PCS-Roh - und Reingasmessung

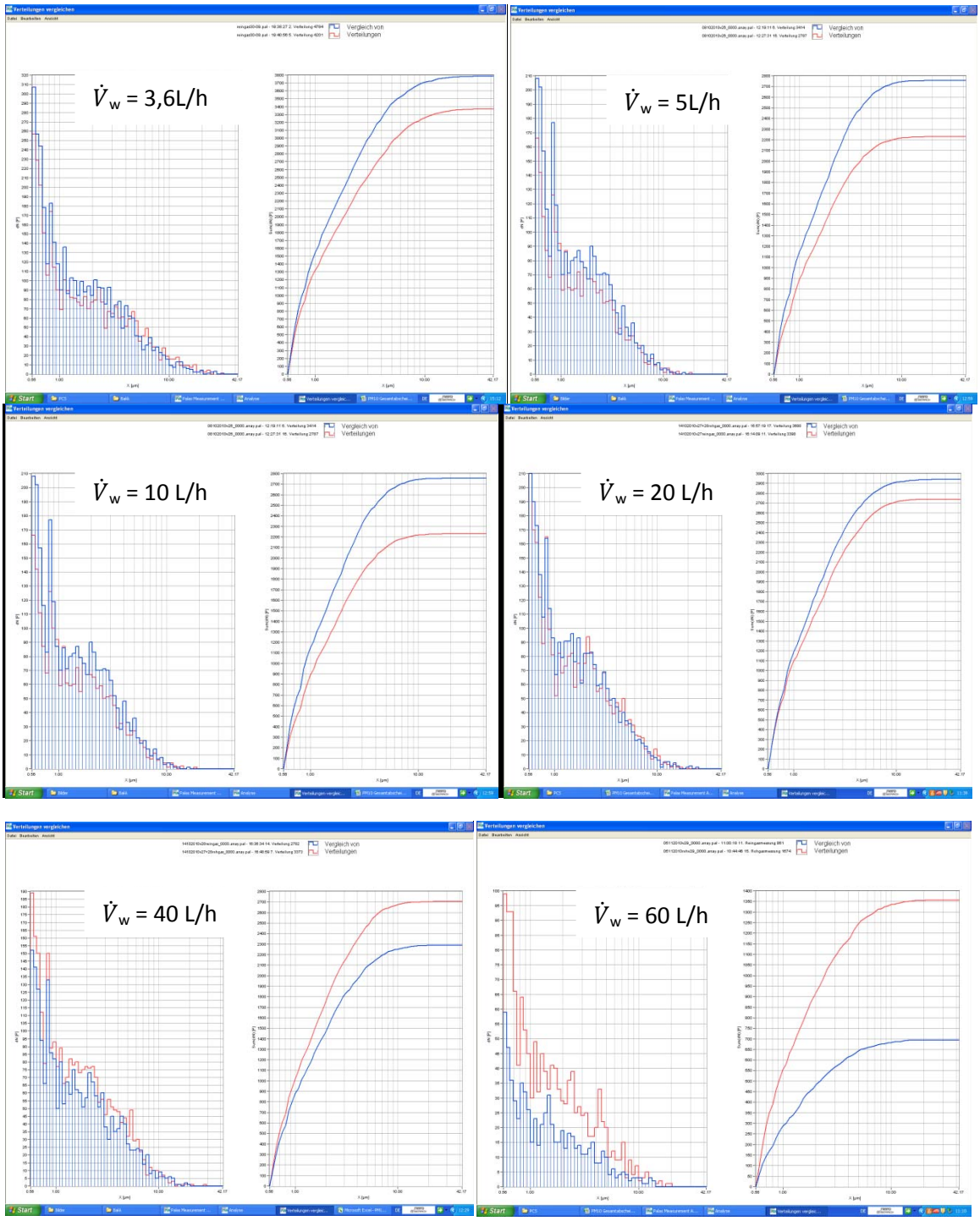


Abbildung 8-21: Abscheidegrade aus den PCS-Messungen für $\dot{V}_w$ = 3,6L/h; 5L/h; 10L/h; 20L/h; 40L/h; 60L/h mit p_L = 3bar und h = 0,35 m

8.5 Definition des Optimierungszieles

Im Folgenden kann nun aus den Befeuchtungsfeldern welche für verschiedene Bedüsungsparameter (h, V_{fl}) aufgenommen wurden die sekundäre Staubabscheideeffektivität für PM10 $\eta_{2,PM10}$ berechnet werden sihe Abbildung 8-22. Wie auch in experimentellen Untersuchungen bei verschiedenen Strömungsbedingungen gefunden werden konnte (siehe Kapitel 5.2 zeigt die aus den Befeuchtungsfeldern der Zweistoffresonanzdüse ermittelte sekundäre Staubabscheideeffektivität folgenden Verlauf mit den Besprühungsparametern:

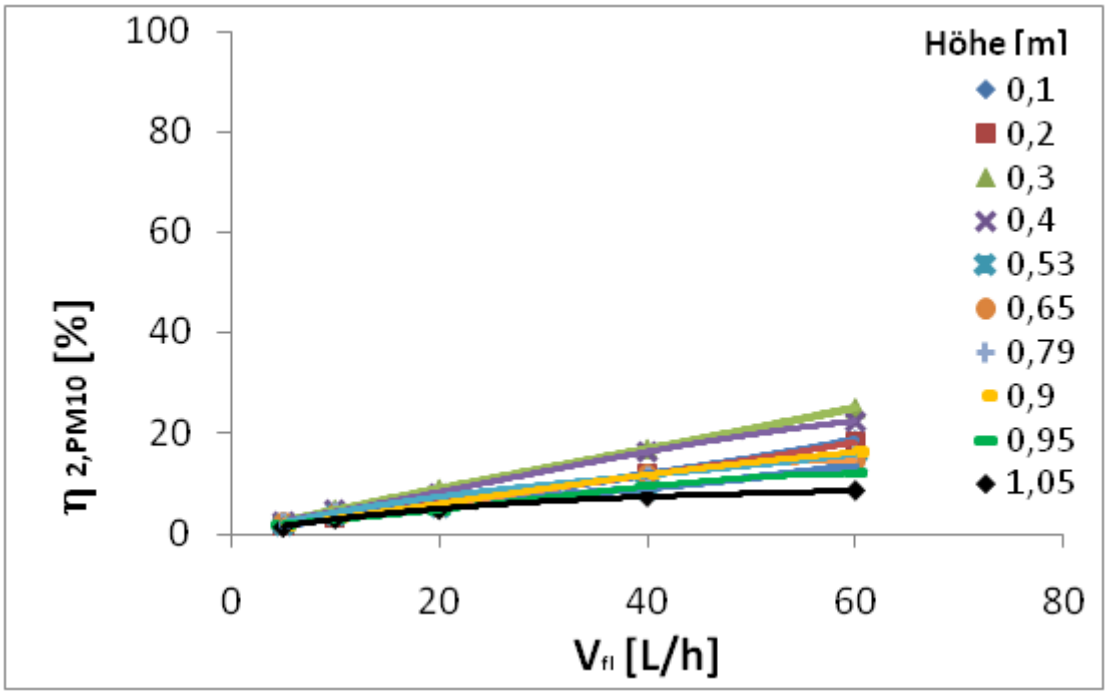


Abbildung 8-22: Darstellung des Verlaufes der primären Staubabscheideeffektivität in Abhängigkeit der Bedüsungsparameter (h, Vfl)

Es ist hier einfach zu erkennen, dass umso mehr Wasservolumenstrom zur Staubunterdrückung angewendet wird umso grössere Staubabscheideeffektivitäten auftreten die in Kapitel 5.2 beobachtete Abflachung tritt erst ab etwa 80L/h in Erscheinung was ausserhalb des Betriebsbereiches der Düse. Die Anwendung eines möglichst hohen Wasservolumenstromes sowie die Anwendung der Düsenhöhe zwischen 0,3m und 0,4m machen das Erreichen einer möglichst hohen Staubabscheidung möglich. Da jedoch durch Vergleich der primären und sekundären Staubabscheideeffektivitäten (siehe Kapitel 6) bewiesen wurde, dass die sekundäre Staubabscheideeffektivität 4-mal wirksamer als die primäre Staubabscheideeffektivität ist, macht ein Optimieren nach den Gesichtspunkten der primären Staubabscheidung Sinn. Jedoch kann, nachdem festgestellt wurde, dass eine Düsenhöhe von 0,3-0,4m für die sekundäre Staubabscheidung optimal ist und ein h/B Verhältnis von 1,33 für die primäre Staubabscheideeffektivität ein Optimum darstellt ermittelt werden, dass bei einer Düse dieser Charakteristik bei einem Förderband der Breite 0,55m eine optimale Staubunterdrückung sowohl zur sekundären als auch primären Staubunterdrückung erreicht werden kann. Die Wahl des Wasservolumenstromes sollte einzig und allein über das Optimum der primären

Staubabscheideeffektivität festgelegt werden, da im Betriebsbereich der Düse für die sekundäre Staubabscheideeffektivität ein möglichs maximaler Wasservolunmenstrom positive Auswirkungen zeigt.

8.5.1 Zwischenzusammenfassung

Die Aufgabe bestand darin, im ersten Schritt die Verteilung von Sprühwasser unter einer Zweistoffdüse zu untersuchen, da diese eine entscheidende Rolle für die staubmindernden Effekte η_1 und η_2 spielt. Daher wurde das, bei der Verwendung der Zweistoff-Vollkegeldüse 1005 VSR auftretende Sprühbild für den gesamten Betriebsbereich ermittelt. Dabei treten je nach verwendeten Düsenparametern Wasserdurchfluss $\dot{V}_w$, Druck der Versorgungsluft p_L und Düsenabstand h zum Messraster, verschiedene Sprühbilder auf. Diese Sprühbilder wurden mit Vorschub v_b des Messrasters und ohne Vorschub ermittelt, das statisch ermittelte Sprühbild (η_2) wurde dabei aufsummiert und mit jenem, mit Vorschub ermittelten, verglichen. Dies ist notwendig um etwa die Befeuchtung von Schüttgut, wie zum Beispiel auf einem bewegten Förderband darzustellen (η_1). Das Sprühbild wird dabei als Feld der Befeuchtungsgeschwindigkeit oder als Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite angegeben.

Als nächstes wurde die Befeuchtung einer Gut - Schüttung mittels Zweistoff - Düsensprüh untersucht werden. Hier zeigte sich die Wirkung des Befeuchtungsfeldes $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ auf die Staubabscheideeffektivität η_1 (Staubminderung durch Befeuchten der Schüttung). In der, mit der Zweistoff-Vollkegeldüse besprühten Schüttung aus Quarzsand, wurden Feuchtemessungen durchgeführt, aus denen die Schüttgut - Befeuchtung und Durchfeuchtung in Abhängigkeit vom Wassermassenstrom, sowie der zeitabhängige Feuchtetransport durch die Schüttung ermittelt wurden. Das aufgebrachte Sprühbild spiegelt sich in der Feuchteverteilung wieder, was erneut auf die Wichtigkeit des Sprühbildes hinweist. Der Feuchtetransport (Diffusion) in der Schüttung läuft hierbei aber so schnell ab, dass er mit einer Probenahmezeit von ca. 2 Minuten nicht direkt nachzuweisen war, sondern nur aus einer Verbreiterung des Feuchtebildes in der Schüttung gegenüber dem aufgebrachten Sprühbild hervorgeht.

Wie in der Problemstellung erörtert, sollte der Zusammenhang zwischen Staubabscheidebild und Sprühbild untersucht werden. Hierzu sollte eine mit dem Teststaub Pural - NF beladene Luftströmung, mit Hilfe derselben Düse entstaubt, und das Sprühwasser mit dem abgeschiedenen Staub aufgefangen werden. Wobei die Sprühwasser- und Staubmassenverteilung pro Klassenbreite, der PM10 Gesamtabscheidegrad, sowie die Korngrößenverteilung des abgeschiedenen Staubes unter dem erfassten Sprühbild über das Messfeld ermittelt wurden (Staubabscheidung aus der Luft η_2). Dabei kam es zu interessanten Ergebnissen. Nicht nur dass, für den gesamten Betriebsbereich der Zweistoff-Vollkegeldüse das Sprühbild und das Staubabscheidebild geometrisch ähnlich sind, und abhängig vom Wasservolumenstrom die Staubabscheidungsgeschwindigkeit $v_S(x)$ und die Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) einen linearen Zusammenhang zeigen, wodurch mit einer Geradengleichung auch andere Betriebspunkte vorausberechnet werden können. Es zeigte sich auch bei der Betrachtung der Partikelgrößenverteilung bezüglich des Orts im Messraster, kein Klassiereffekt durch die Abscheidung aus der Luft mittels Düsensprüh. Die Korngrößenverteilungen wurden mittels den Werten für $x_{3,10}$, $x_{3,50}$ und $x_{3,90}$ in je einem Diagramm dargestellt. Aus den durchgeführten PCS Roh – und Reingasmessungen geht weiters hervor, dass das gesamte Größenspektrum des verwendeten Pural-NF Teststaubes

gleichermaßen vom Düsensprüh aus der strömenden Luft abgeschieden wird (η_2). Der PM10 Gesamtabscheidegrad wurde ebenfalls mit Hilfe der PCS-Messdaten berechnet und ist, wie der berechnete TSP-Abscheidegrad, über den gesamten Betriebsbereich der Zweistoffdüse und für verschiedene Staubkonzentrationen im Rohgas konstant.

Aus der Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) bzw. dem Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenbreite $\overline{\dot{M}\bar{y}}$ einer Sprühdüse kann auf die Staubabscheidung aus der Luft η_2 und die Befeuchtungswirkung auf Gut-Schüttungen (Staubabscheidung durch Befeuchtung η_1) geschlossen werden.

Durch diese Arbeit konnte bewiesen werden, dass das Sprühbild (v(x), $\overline{\dot{M}\bar{y}}$) bestimmend für die beiden Staubabscheideeffekte η_1 und η_2 ist. Dieses Sprühbild der Zweistoffdüse spiegelt sich einerseits für η_1 in der Feuchteverteilung in der Gut-Schüttung und andererseits für η_2 im Staubabscheidebild $v_S(x)$wieder.

In allen durchgeführten Messungen zeigte sich also, wie in der Problemstellung beschrieben, die zu untersuchende Abhängigkeit der staubmindernden Effekte η_1 und η_2, von den Düsenparametern Wasserdurchfluss $\dot{V}_w$, Druck der Versorgungsluft p_L und Düsenabstand h; und somit auch die Abhängigkeit vom Sprühbild des Zweistoff-Düsensprühs.

9 Das Optimierungsverfahren im Vergleich zu Ergebnissen aus theoretischen und experimentellen Betrachtungen

Durch experimentelle Betrachtungen der sekundären Staubabscheideeffektivität konnte festgestellt werden, dass sich die Düsenposition $4A_0$ als am wirkungsvollsten herausstellt. Die CFD Simulation zeigte die Tropfenausbreitung unterhalb der Düse. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die VSR 1005 Zweistoffresonanzdüse einen Expansionsbereich des Sprühbildes sowie einen Einsaugbereich hat, wo die Tropfen aber auch eventuell Staubpartikel in das Düsenzentrum eingesaugt werden. Um eine entsprechende Staubabscheidung zu gewährleisten muss die Düse zumindest in einer Düsenhöhe positioniert sein (> 30cm) damit sich dieser Einsaugbereich entfalten kann. Auch muss der Luftvolumenstrom der staubbeladenen Luft in einem gewissen Verhältnis zum Düsenluftvolumenstrom sein, damit eine optimale Staubabscheidung stattfinden kann. Die simulierten Trends der Staubabscheidung bei verschiedenen Strömungsbedingungen welche sich aus der CFD Simulation ergaben konnten experimentell bestätigt werden. So zeichnet sich ein S-förmiger Verlauf der Sprühbildform nach experimenteller Erfassung und mathematischer Beschreibung der Sprühbilder ab. Dies steht im Einklang mit der Form der Tropfenausbreitung des simulierten Düsensprays. Die Strömungsbedingungen welche als experimentell optimal ermittelt wurden konnten auch durch Simulation sowie Trofenabscheidegradberechnungen mittels Barth/Schuch/Löffler Modell bestätigt werden.

Durch die erarbeiteten Optimierungsverfahren für die primäre und sekundäre Staubabscheidung konnte gezeigt werden welche Bedüsungsparameter zu maximaler Staubreduktion bei minimalem Wasserverbrauch führen. Für die primäre Staubabscheideeffektivität konnte festgestellt werden, dass ein Feuchteanteil von 5g Wasser/kg Schüttgut sowie ein h/B > 1,33 als optimal angesehen werden kann. Diese Ergebnisse lassen sich auch mit den experimentell ermittelten Trends in Verbindung bringen. Durch experimentelle Untersuchung der Schüttgutdurchfeuchtung konnte festgestellt werden, dass es bei in mittel 5g Wasser/kg Schüttgut zu einer vollständigen Durchfeuchtung der Schüttung (4cm Schichtdicke) kommt. Also das Sprühbild der Düse in der Schüttung widergespiegelt wird. Durch feststellen eines h/B > 1,33 kann durch Vergleich mit der minimalen Düsenhöhe von 30 cm damit sich ein Einsaugbereich ausbilden kann (Ergebnis der Simulation) festgestellt werden, dass sich eine gesteigerte Düsenhöhe positiv auf die Staubabscheidung auswirkt.

10 Zusammenfassung

Es besteht Forschungsbedarf, die Abscheidetechniken zur Unterdrückung diffuser Feinstaubemissionen zu optimieren. Der Forschungsbedarf besteht aufgrund der Tatsache, dass für geführte Staubquellen die Abscheidemaßnahmen (filternde Abscheider oder Wäscher) laufend verbessert wurden. Bei der Abscheidung diffuser Staubemissionen ist dies nicht der Fall, wodurch sich der Anteil diffuser Staubmissionen am gesamten emittierten Feinstaub erhöht hat. Die Hauptquellen diffuser Staubemissionen sind offene Flächen (z.B. Baustellen, bergmännische Abbauflächen oder landwirtschaftliche Anbaugebiete), befestigte und unbefestigte Straßen und Parkplätze, Schüttguthalden, sowie Geräte des Schüttgutumschlages, des -transportes und der –verarbeitung. Die Schüttgutmanipulation wurde in diesem Zusammenhang als einer der Hauptverursacher diffuser Staubemissionen erkannt. Zur Unterdrückung dieser diffusen Feinstaubemissionen werden Wassersprаysysteme neben der Anwendung auf unbefestigte Straßen, auf Verladestationen, auf offene Abbauflächen und Halden auch häufig auf Förderbandübergaben angewendet.
Ein Wassersprаysystem kann eine primäre Staubabscheideeffektivität und eine sekundäre Staubabscheideffektivität entfalten. Bei der primären Staubabscheidung kommt es zur Verhinderung der Staubentstehung durch Schüttgutbefeuchtung. Bei der sekundären Staubabscheideeffektivität kommt es zur Abscheidung des entstandenen Staubes aus der Luft.

Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität eines Wassersprаysystems

Die primäre Staubabscheideeffektivität wurde experimentell untersucht, indem der Emissionsfaktor von verschiedenen Schüttgütern (Wandschotter, Bruchkalk, Streusplittt) in Abhängigkeit der durch besprühen hergestellten Gutfeuchte ermittelt wurde. In diesem Zusammenhang wurde auch die Wirksamkeit von Sprühwasseradditiven durch Ermittlung des Emissionsfaktors in Abhängigkeit des Restmelasse- und Feuchtegehaltes im Schüttgut untersucht. Dabei ergaben die Schüttgutfallversuche mit Proben unterschiedlicher Gutfeuchte und unterschiedlichem Restmelassegehalt, dass unabhängig vom verwendeten Restmelasse/Wasser-Verhältnis des versprühten Gemisches bzw. Zugabe von reinem Wasser bereits bei einer geringen Menge von ca. 0,02 kg Flüssigkeit pro kg trockenem Schüttgut eine vollständige Emissionsreduktion erreicht wird und hier nahezu kein Unterschied zum reinen Wasser vorliegt. Bei Versuchen mit Proben, die befeuchtet und getrocknet wurden, konnte festgestellt werden, dass, je höher der Anteil an Restmelasse im versprühten Gemisch ist, desto höher ist die Emissionsminderung und desto weniger Flüssigkeit pro kg trockenem Schüttgut wird benötigt um eine effektive Emissionsminderung zu erreichen. So konnte bei den Versuchen mit Proben, die befeuchtet und getrocknet wurden, eine nachhaltige, deutliche Emissionsreduktion des trockenen Schüttgutes bei allen drei untersuchten Schüttgütern (Wandschotter, Bruchkalk, Streusplittt) von ca. 85 % festgestellt werden. Diese Reduktion wurde erzielt bei der Zugabe von 0,05 kg Restmelasse-Wasser-Gemisch pro kg trockenem Schüttgut (40% Restmelasse im Restmelasse-Wasser-Gemisch). Durch diese Untersuchungen konnte der Restmelasse als bioverträgliches, gefrierpunkterniedrigendes universell einsetzbares Additiv welches preisgünstig ist und einen Heizwert hat, eine Langzeitwirksamkeit der primären

Staubabscheideeffektivität nachgewiesen werden. Dadurch wurde erstmals die Langzeitwirksamkeit von Restmelasse als staubunterdrückendes Sprühwasseradditiv bewiesen.

Untersuchung der sekundären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems

Die Abscheidung diffuser Staubemissionen durch Düsensprays aus der Luft weist geringe Staubabscheideeffektivitäten auf. Um zu verstehen welche Einflüsse bei der Abscheidung diffuser Staubemissionen durch Düsensprays bestehen, wurden experimentelle und theoretische Betrachtungen der sekundären Staubabscheidung durchgeführt. Durch Aufbau einer Staubabscheidekammer konnte die sekundäre Staubabscheideeffektivität einer Sprühdüse in partikelbeladener Luft bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen, Positionen und Betriebsbedingungen der Düse (Wasservolumenstrom, Düsenhöhe, Düsenanzahl, Düsenabstand) mittels Streulichtpartikelzähler (PCS) gemesssen werden. Es wurde ein Diagramm erstellt, durch das man abschätzen kann, welchen Wasservolumenstrom man je Luftvolumenstrom (Windgeschwindigkeit) zur ausreichenden Abscheidung von PM1 bis PM10 benötigt. Es wurde die Staubabscheidung von einer und zwei Düsen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass zwei Düsen nebeneinander umso wirksamer sind, je kleiner der Abstand zwischen ihnen wird. Jedoch ist der Staubabscheidegrad einer Düse beim selben Gesamtwasservolumenstrom besser als von zwei Düsen direkt nebeneinander (Koaleszenz der Tropfen). Desweiteren konnte festgestellt werden, dass Düsen in zentraler vertikaler Positionierung die höchste sekundäre Staubabscheideeffektivität bewirken. Dieser Aufbau des Wasserspraysystems (zentrale vertikale Positionierung der Sprühdüsen sowie Düsenkonstruktionsgeometrie der Zweistoffresonanzdüse VSR 1005) in der Staubabscheidekammer wurde in CFD nachgebildet und die Tropfen- und Partikelbewegungen sowie die Strömungsbedingungen während der Staubabscheidung aus der Luft berechnet und mittels PIV und PDA Messungen überprüft. Durch die Simulation der Druck und Geschwindigkeitsverhältnisse sowie der Tropfenbewegungen im Sprühkegel des Düsensprays konnte festgestellt werden, dass die kleinen Tropfenkollektive im Sprühkegelinneren und die großen Tropfenkollektive am Sprühkegelmantel strömen. Die Staubabscheidung findet jedoch im Sprühkegelinneren statt. Denn es wurde festgestellt, dass der Sprühkegel direkt nach dem Düsenaustritt einen Expansionsbereich (Aufweitung des Sprühkegels) sowie aufgrund der auftretenden Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Sprühkegelzentrum (schnellere Tröpfchen) und Sprühkegelmantel (langsamere Tröpfchen) sich Druckunterschiede aufbauen die durch ausbilden eines Einsaugbereiches abgebaut werden. Nach anfänglicher Erweiterung des Sprühkegels tritt nach ca. 30 cm vom Düsenaustritt eine Einengung des Sprühkegels auf (Einsaugbereich), hier werden die Tropfen aber auch Staubpartikel in das Düsenzentrum eingesaugt. Um eine entsprechende Staubabscheidung zu gewährleisten, muss die Düse zumindest in einer Düsenhöhe (> 30cm) positoniert sein, damit sich dieser Einsaugbereich entfalten kann. Durch PDA Messungen der Tropfengeschwindigkeitsverteilung im Sprühkegelzentrum und am Rand konnte bei 3 bar Düsenluftdruck und 10 L/h Wasservolumenstrom in 30 cm Entfernung vom Düsenaustritt tatsächlich das Ausgleichen der Tropfengeschwindigkeiten zwischen Sprühkegelzentrum und Sprühkegelrand festgestellt werden. Anhand der Simulationsergebnisse wurde in Übereinstimmung mit experimentellen Untersuchungen festgestellt, dass bei dieser diffusen Staubabscheidung bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten höhere Abscheidegrade zu erwarten sind, und dass der notwendige Luftvolumenstrom der Düse auf die Anströmgeschwindigkeit der staubbeladenen

Luft abzustimmen ist. Die Wahl eines geringen Versorgungswasservolumenstromes ist durch die feineren Tröpfchenkollektive die entstehen in diesem Zusammenhang von Vorteil. Die Wahl eines kleinen Versorgungswasservolumenstroms, lässt also bei kleiner Anströmgeschwindigkeit eine vergleichsweise hohe Staubabscheideeffektivität erwarten, da auch die Ausbildung größerer Tröpfchen, welche die kleineren an der Sprühkegelmantelfläche stömungsmechanisch abschirmen, unterbleibt. Dieser Zusammenhang bedingt aber auch den Einsatz mehrerer Sprühdüsen nebeneinander. In jedem Fall ist die Düsenluftströmung auf die Anströmverhältnisse anzupassen, damit die vertikale Komponente der Düse stark genug ist, um eine Abscheidung der Partikel herbeiführen zu können. Durch Adaption des Barth/Schuch/Löffler-Modells für diese Kreuzströmung, die sich zwischen Tropfenflugbahnen und Partikelflugbahnen ergibt, konnte der zu erwartende Abscheidegrad am Einzeltropfen berechnet werden. Die optimale Tropfengröße liegt bei den betrachteten Bedingungen (Querströmung, Tropfenanfangsgeschwindigkeit) und je Partikelgröße (5 oder 10 µm) bei etwa 4 µm. Bei der betrachteten Querströmung sinkt unter den getroffenen Annahmen ab einer Tropfengröße von 4 µm die luftreinigende Wirkung mit zunehmendem Tropfendurchmesser. Es stellte sich einmal mehr in Übereinstimmung mit den Experimenten heraus, dass eine Querstromanordnung von Düse und Strömungsrichtung der partikelbeladenen Luft unter den gewählten Bedingungen optimal für die Abscheidung ist. Ein Erhöhen der Strömungsgeschwindigkeit der partikelbeladenen Luft senkt bei dieser Anordnung den Abscheidegrad. Es stellte sich heraus, dass die Austrittsgeschwindigkeit der Wassertropfen aus der Düse unabhängig vom Wasservolumensrom ist und somit höhere Abscheidegrade bei höheren Wasservolumenströmen auf die erhöhte Tropfenanzahl zurückzuführen ist. Die zuvor experimentell festgestellten Trends konnten also durch CFD Simulation und Tropfenabscheidegradberechnungen bestätigt werden und dadurch konnte für die Unterdrückung diffuser Staubemissionen aus der Luft ein bestimmtes Verhältnis (1:10) der Geschwindigkeit der anströmenden partikelbeladenen Luft sowie der Geschwindigkeit der Tropfen des Düsensprays als optimal eingegrenzt werden. Desweiteren konnte über experimentelle und theoretische Betrachtungen (CFD, Löffler-Modell) gezeigt werden, dass eine Abstimmung der Tropfengrösse auf die abzuscheidende Partikelgrösse den Abscheidegrad verbessert. Außerdem konnten als Bedüsungsparameter der Wasservolumenstrom und die Düsenhöhe als hauptbeeinflussende Faktoren neben Düsenanzahl und Düsenposition bei der Staubabscheidung ausgemacht werden. Durch die durchgeführten Betrachtungen wurde der Einfluss der Verteilung der Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeiten sowie der Einfluss der Tropfenanzahl im Sprühkegel auf die sekundäre Staubabscheidung analysiert und festgestellt, dass die Ermittlung und Gegenüberstellung des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages und des ortsaufgelösten Staubeintrages im horizontalen Schnitt durch den Sprühkegel eine Beschreibung der sekundären Staubabscheidung zulassen könnte. Bevor die experimentelle Erfassung des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages und ortsaufgelösten Staubeintrages erfolgte um diesen Sachverhalt zu prüfen wurde zunächst untersucht, ob die primäre zur sekundären Stuababscheideeffektivität in Relation gesetzt werden kann, was anhand der Anwendung eines Wassersprаysystems auf eine Förderbandübergabe durchgeführt wurde.

Vergleich der Staubabscheideeffektivitäten

Durch Berechnung der verdunstenden Wassermenge bei der Staubabscheidung aus der Luft konnte ein effektiver Wasservolumenstrom welcher tatsächlich der staubunterdrückenden Wirkung des Wassersprays zuzuordnen ist ermittelt werden. Dadurch können die primäre Staubabscheideeffektivität sowie die sekundäre Staubabscheideeffektivität bei demselben effektiven Wasservolumenstrom verglichen werden. Es konnte festgestellt werden, dass die gesamte Staubabscheideeffektivität eines auf eine Förderbandübergabe angewendeten Wasserspraysystems aus der primären und sekundären Staubabscheideeffektivität wie zwei Separatoren, welche in Serie wirksam sind berechnet werden kann. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei ähnlichen Betriebsbedingungen während der Staubabscheidung (Luftwechselzahl, Temperatur, Luftdruck, Düsenposition, Wasservolumenstrom) die primäre Staubabscheideeffektivität (~70 %) als 4 mal wirksamer als die sekundäre Staubabscheideeffektivität (16 %) angesehen werden kann. Durch Adaption des Modelles von zwei Separatoren welche in Serie geschaltet sind, konnte erstmals für ein Wasserspraysystem einer Förderbandübergabe der Anteil der primären und sekundären Staubabscheideeffektivität an der Gesamtstaubabscheideeffektivität abgeschätzt werden.
Es besteht Bedarf für eine Optimierung der Auslegungsparameter (Wasservolumenstrom, Düsenhöhe, Düsenanzahl, Düsenabstand) von Wasserspraysystemen, damit maximale primäre als auch sekundäre Staubabscheideeffektivität bei minimalem Wasserverbrauch und minimal notwendiger Gutfeuchte erreicht werden kann.

Optmierungsverfahren der primären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems am Beispiel einer Förderbandübergabe

Aufbauend auf dem Ergebnis, dass bei der Staubunterdrückung bei Schüttgutmanipulation mit Wassersprays der Effekt der Schüttgutbefeuchtung stärker ist als das nachfolgende Niedernebeln des entstandenen Staubes, wurde eine neue Auslegungs- und Berechnungsmethode im ersten Schritt für primäre Staubminderungsmaßnahmen entwickelt. Um ein Optimierungsverfahren für die Auslegungsparameter eines Wasserspraysystems hinsichtlich des Erreichens einer maximalen primären Staubabscheideeffektivität bei minimalen notwendigen Gutfeuchten erarbeiten zu können, war es im ersten Schritt notwendig, den örtlich aufgelösten Befeuchtungseintrag an einer horizontalen Oberfläche unterhalb der Düsen (Vollkegeldüse VSR 1005) bei verschiedenen Bedüsungsparametern (Wasservolumenstrom und Düsenhöhe) mittels Messkompartimenten zu erfassen. Die ortsaufgelöste Befeuchtungsverteilung lässt sich durch einen glockenförmigen Verlauf der Befeuchtungsgeschwindigkeit v(x) mit dem Befeuchtungsradius x radialsymmetrisch mathematisch über ein aufgestelltes Befeuchtungsmodell beschreiben. Die Gestalt des glockenförmigen Verlaufs ist durch die beiden Befeuchtungskonstanten a und b beschreibbar. Der Trend, den die Befeuchtungskonstanten a und b über die Bedüsungsparameter (Düsenhöhe h und Düsenwasservolumenstrom V_{fl}) zeigen, ist nicht linear. Der sigmuidale Verlauf der Befeuchtungskonstanten spiegelt die über CFD Simulation festgestellte Gestalt des Sprühkegels (Erweiterung des Kegels am Düsenaustritt und spätere Einengung) wider. Eine Steigerung der Düsenhöhe oder des Wasservolumenstromes kann zu unterschiedlicher Veränderung des Sprühbildes, also sowohl zu einer Verbreiterung und Erhöhung des radialen Feuchteeintrages in

unterschiedlichem Maße führen. Dies ist im Trend, den die Befeuchtungskonstanten über die Bedüsungsparameter zeigen, mathematisch beschreibbar. Das Befeuchtungsmodell, das zur Beschreibung des ortsaufgelösten Feuchteeintrages einer Vollkegeldüse (VSR 1005) entwickelt wurde, soll auf universelle Anwendbarkeit geprüft werden indem es auf den gemessenen Befeuchtungseintrag einer Flachstrahldüse (VSR 5510F) angewendet wird. Hier konnte gezeigt werden, dass die Glockenfunktion des Befeuchtungsmodells anwendbar ist, um auch den ortsaufgelösten Befeuchtungseintrag einer Flachstrahldüse zu beschreiben. Obwohl das Befeuchtungsmodell hierzu mit einer Geradengleichung gekoppelt werden musste, um den Flachstrahlanteil der Feuchteverteilung unter der Düse besser beschreiben zu können, liefert das Glockenmodell jenen Trend, den die Befeuchtungskonstanten über die Bedüsungsparameter zeigen. Und somit ist die Veränderung der Feuchteverteilung unter der Düse mit Veränderung der Bedüsungsparameter erstmals mathematisch beschreibbar.

Davon ausgehend stellt sich die Frage, wie die durch das Befechtungsmodell beschriebenen Befeuchtungsfelder unterhalb von Düsen überlagert werden können (also welche Düsenanzahl und welcher Düsenabstand bzw. welche Bedüsungsparameter (Wasservolumenstrom und Düsenhöhe) notwendig sind), damit eine gleichmäßige Befeuchtung über die Förderbandbreite erzielt wird. Es gilt im Weiteren eine analytische Berechnungsmethode zu entwickeln, um eine gleichmäßige Befeuchtung eines Schüttgutes auf einem Förderband zu erreichen. Dabei wurden über einer Schüttung mit Rechtecksprofiel über die Förderbandbreite sowie für eine Schüttung mit Dreiecksprofil über die Förderbandbreite eine bis zehn Düsen über einem modellhaften Förderband angeordnet, und anschließend die Düsenparameter sowie der Abstand zwischen den Düsen optimiert. Wie in Übereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen berechnet wurde, soll der Abstand zwischen den Düsen möglichst gering sein und die Düsenanzahl möglichst groß sein. Dies wird über den experimentell und über CFD festgestellten Zusammenhang der notwendigen vertikalen Komponente des Sprühs und der heranströmenden Luft eingeschränkt. Es wurde durch das vorgestellte Rechenverfahren eine analytische Berechnungsmethode entwickelt, mit der Befeuchtungsaufgaben auf Förderbändern mit beliebig vorgegebenen Schüttgutprofilen gelöst werden können. Dadurch können die Kosten für den Betrieb einer solchen Feinstaubunterdrückung minimiert werden. Das entwickelte analytische Berechnungsverfahren kann neben der gleichmäßigen Befeuchtung von Schüttgütern auf Förderbändern auch für andere Aufgaben, bei denen eine homogene Verteilung des aufgesprühten Mediums erzielt werden soll, angewendet werden, z.B. für Lackierereien, bei Aufbringung von Klebstoffen oder für gleichmäßige Bewässerung. Nachdem der ortsaufgelöste Befeuchtungseintrag (Befeuchtungsfeld) unterhalb von Sprühdüsen experimentell gemessen und mathematisch für verschiedene Bedüsungsparameter beschrieben werden konnte und die mathematische Beschreibung der Befeuchtungsfelder in einem analytischen Berechnungsverfahren so überlagert werden konnten, dass gleichmäßige Befeuchtung über eine Gutschüttung ermöglicht wird, soll im zweiten Schritt die Durchfeuchtungswirkung der aufgebrachten Feuchteverteilung des Düsensprays an Gutschüttungen untersucht werden. Hierzu wurde die Feuchteverteilung in einer besprühten Gutschüttung untersucht und mathematisch mittels Befeuchtungsmodell beschrieben. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich der ortsaufgelöste Befeuchtungseintrag an der Schüttgutoberfläche ab einen Schwellenwert von 5 g Wasser/ kg trockenes Schüttgut (für Quarzsand (Grubensand 0/7)) durch das Schüttgut fortpflanzt und sich dabei die Gestalt der glockenförmigen Feuchteverteilung nicht verändert. Es wurde erstmals nachgewiesen, dass sich

der ortsaufgelöste Befeuchtungseintrag an einer Schüttgutoberfläche durch eine Gutschüttung aus Quarzsand nicht verändert und damit aus der ortsaufgelösten Befeuchtungsverteilung, welche an der Schüttgutoberfläche aufgebracht wird, auf die Feuchteverteilung im Schüttgut geschlossen werden kann. Aus diesem Grund kann für weitere Berechnungen der oberflächliche Befeuchtungseintrag einer Sprühdüse in Abhängigkeit der Bedüsungsparameter herangezogen werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der mathematischen Beschreibbarkeit der Befeuchtungsfelder von Sprühdüsen und der nachgewiesenen Durchfeuchtung von Gutschüttungen kann eine neue Auslegungs- und Berechnungsmethode für primäre Staubminderungsmaßnahmen entwickelt werden. Durch diese Auslegungsmethode kann das Schüttgut bei minimalem Wasserverbrauch so befeuchtet werden, dass dabei maximale Staubabscheidung erzielt werden kann. Die Methode beruht darauf, dass der örtlich aufgelöste Befeuchtungseintrag einer Fläche unterhalb der Düse durch eine mathematische Glockenkurve beschrieben werden kann, welche für verschiedene Bedüsungsparameterwerte (z.B. für Wasservolumenstrom und Düsenposition) experimentell erfasst wird. Die Konstanten, die die Form der Glockenkurve für bestimmte Bedüsungsparameter fixieren, werden in ein numerisches Datenfeld überführt, sodass das gesamte Betriebsspektrum der Befeuchtungsdüse erfasst ist. Die von der Schüttgutfeuchte abhängigen materialspezifischen Emissionsfaktoren konnten als Emissionsfunktion wie bei der Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität mit Hilfe einer Schüttgutfallapparatur ermittelt werden. Bei Verwendung des numerischen Datenfeldes und der Emissionsfunktion wurde in einer Optimierungsrechnung, beispielsweise für eine Förderbandbedüsung die optimale Auslegung des Bedüsungssystems (Optimalwerte für Wasservolumenstrom und Düsenposition) durchgeführt.

Durch Messung des Befeuchtungsfeldes der Sprühdüse sowie der Emissionsfaktoren bei verschiedenem Gutfeuchten an einer Schüttgutfallapparatur und durch Formulierung eines Befeuchtungsmodells konnte ein Optimierungsverfahren zur Auslegung von Sprühdüsen für eine Förderbandübergabestelle entwickelt werden. Damit können Optimalwerte für die Bedüsungsparameter bei möglichst wenig entstehender Staubmenge und geringstem Wasserverbrauch gefunden werden. Von einer optimalen Auslegung eines Düsensprühsystems (für das angenommene Beispielförderband und für Grubensand 0/7 bei einer Schüttgutflächenmasse 10,8 kg/m²) kann gesprochen werden, wenn die Düsen mindestens in einer Höhe von 1,33 mal der Breite des Förderbandes positioniert sind und 5 L/h Wasser pro t Schüttgut welche pro Stunde umgeschlagen wird, aufgebracht wird. Dieses neue Optimierungsverfahren für die Ermittlung optimaler Bedüsungsparameter bringt die Bedüsungsparameter sowie die Auslegungsparameter des Förderbandes (Bandbreite, Bandgeschwindigkeit und Schüttgutflächenmasse am Förderband) sowie das schüttgutspezifische Staubungsverhalten bei unterschiedlichen Gutfeuchten in Zusammenhang. Wie durch die zuvor durchgeführten theoretischen Betrachtungen aufgeklärt wurden, hängt die sekundäre Staubabscheidung im entscheidenden Maße von der Anzahl der Tropfen ab. Da beim Einsaugbereich wo die Partikel in den Spray gelangen die Geschwindigkeitsverhältnisse zwischen den Tropfen ausgeglichen sind, müsste die sekundäre Staubabscheidung vom ortsaufgelösten Befeuchtungseintrag abhängen.

Das anhand dieser Förderbandübergabestelle skizzierte Optimierungsverfahren könnte auch in analoger Weise zur Abschätzung der zu erwartenden Emission, sowie zur Ermittlung von

optimalen Bedüsungsparametern anderer schüttgutbefeuchtender, staubunterdrückender Wassersprаysysteme dienen.

Ermittlung der sekundären Staubabscheideeffektivität anhand des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages einer Sprühdüse

Um eine Beschreibung der sekundären Staubabscheideeffektivität zu erarbeiten, soll das für die Optimierung der Auslegungsparameter eines Wassersprаysystems für die primäre Staubabscheidung entwickelte Verfahren auf die sekundäre Staubabscheidung angewendet werden, indem der ortsaufgelöste Befeuchtungseintrag unterhalb der Düse den ortsaufgelösten Staubeintrag unterhalb einer Düse in Zusammenhang gebracht wird. Dazu wurde der ortsaufgelöste Befeuchtungseintrag unterhalb der Düse in querströmender Luft aufgenommen. Bei den für die Staubabscheidung als optimal identifizierten Geschwindigkeitsverhältnissen bei 3 bar Düsenluftdruck und einer Luftwechselzahl von 25/h konnte festgestellt werden, dass sich die Befeuchtungskonstanten a und b kaum verändern, also die glockenförmige Verteilung der Feuchte unterhalb der Düse fast gleich bleibt. Die Ausbildung des Sprühkegels und damit des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages ist wie auch durch CFD bewiesen relativ unempfindlich gegenüber queranströmender Luft. Im nächsten Schritt wird die Düse einer partikelbeladenen Luftströmung ausgesetzt. Wird nun der ortsaufgelöste Befeuchtungseintrag unter der Düse während der stattfindenden Staubabscheidung gemessen, so kann in den Messkompartimenten nicht nur der ortsaufgelöste Befeuchtungseintrag erfasst werden, sondern auch der ortsaufgelöste Staubeintrag. Durch Erfassen und mathematische Beschreibung des ortsaufgelösten Staubeintrages unter Sprühdüsen bei verschiedenen Bedüsungsparametern kann die sekundäre Staubabscheideeffektivität berechnet werden. Es konnte durch Gegenüberstellung des gemessenen ortsaufgelösten Staubeintrages und des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages festgestellt werden, dass beide in ihrer Form deckungsgleich sind. Das heißt, dass der ortsaufgelöste Staubeintrag mit einem fixen Faktor an den ortsaufgelösten Befeuchtungseintrag gekoppelt ist. Durch die experimentell ermittelten Zusammenhänge kann man aus dem ortsaufgelösten Befeuchtungseintrag die zu erwartende sekundäre Staubabscheideeffektivität berechnen. Die glöckenförmige ortsaufgelöste Verteilung des Befeuchtungseintrages zeigt an, dass im Zentrum der Düse die größte Wassermenge niedergeht. Mit CFD Simulation konnte gezeigt werden, dass im Zentrum die kleineren Tropfen in höherer Anzahl zu Boden strömen und die Geschwindigkeitsunterschiede nach außen gering sind, da diese sich über den Einsaugbereich ausgleichen. Durch Berechnungen aus dem Barth/Schuch/Löffler-Modell konnte gezeigt werden, dass die Partielabscheidung neben der Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Partikel vor allem von der Tropfenanzahl und der Tropfengröße abhängt. Genau in den Bereichen im Zentrum unterhalb der Düse, wo die höchste Tropfenanzahl und die kleinsten Tropfengrößen strömen, wird die größte Staubabscheidung detektiert.

Die sekundäre Staubabscheideeffektivität wurde also auf drei Arten bei verschiedenen Bedüsungsparametern bestimmt: durch PCS-Messungen, durch Aufsummieren des gemessenen ortsaufgelösten Staubeintrages sowie durch Umrechnung des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages in den ortsaufgelösten Staubeintrag und anschließende Aufsummierung. Alle drei Bestimmungswege der sekundären Staubabscheideeffektivität führen zu übereinstimmenden Ergebnissen.

Da die Staubabscheidung direkt aus den Befeuchtungsfeldern berechnet werden kann, konnte das Optimierungsverfahren, welches zum Identifizieren optimaler Bedüsungsparameter zum

Erreichen maximaler primärer Staubabscheideffektivität erarbeitet wurde, auch auf die sekundäre Staubabscheideeffektivität angewendet werden. Als Ergebnis wurde erhalten, dass die sekundäre Staubabscheideeffektivität mit zunehmender Wassermenge fast linear ansteigt und eine Düsenhöhe von 30-40 cm die höchste Steigung der sekundären Staubabscheideeffektivität mit zunehmender Wassermenge zeigt. Dies bestätigt die Ergebnisse der CFD Simulation, wonach sich der Einsaugbereich erst ab 30 cm Abstand vom Düsenaustritt ausbilden kann.
Durch die erarbeiteten Optimierungsverfahren für die primäre und sekundäre Staubabscheidung konnte gezeigt werden, welche Bedüsungsparameter zu maximaler Staubreduktion bei minimalem Wasserverbrauch führen. Für die primäre Staubabscheideeffektivität konnte festgestellt werden, dass ein Feuchteanteil von 5 g Wasser/kg Schüttgut sowie ein h/B > 1,33 als optimal angesehen werden kann. Für die sekundäre Staubabscheidung muss der notwendige Wasservolumenstrom, der für das Erreichen einer optimalen Gutfeuchte erforderlich ist übernommen werden. Jedoch sollte eine Düsenhöhe von 40 cm nicht überschritten werden wonach bei einem h/B von 1,33 ein Förderbandstreifen von ca 30 cm optimal befeuchtet werden kann. Somit sind Düsen in einem Abstand von 30 cm voneinander zu positionieren.

Durch die vorliegende Arbeit konnte erstmals ein Optimierungsverfahren zur Auslegung von Wassersprаysystemen zum Erreichen maximaler primärer sowie sekundärer Staubabscheideeffektivität bei minimalem Wasserverbrauch erarbeitet werden. Des weiteren konnte ein Berechnungsweg zur Abschätzung der zu erwartenden PM10 Emissionen einer diffusen Staubquelle (Förderbandübergabe) vor und nach Anwendung eines Wassersprаysystems bei verschiedenen Bedüsungsparametern gezeigt werden und daraus die Berechnung der primären und sekundären Staubabscheideeffektivitäten eines Wassersprаysystems erfolgen.

Dadurch wurden allgemein anwendbare Verbesserungsoptionen sowie Optimierungsschemata zur Abscheidung diffuser Staubemissionen geliefert.

11 Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit hat den Zweck, eine Optimierung- und eine Berechnungsmethode der Wirksamkeit von Wasserspraysystemen zur Abscheidung diffuser Feinstaubemissionen zu entwickeln.

Die Staubabscheideeffektivität von geführten Quellen wurde in der Vergangenheit laufend verbessert; dies ist für Staubabscheidetechniken (z.B: Anwendung von Wasserspraysystemen) für diffuse Staubemissionen nicht der Fall, wodurch der Anteil diffuser PM10 Emissionen mittlerweile erheblich ist. Vor allem die Schüttgutmanipulation ist einer der Haupverursacher diffuser Staubemissionen industrieller nicht brennstoffbezogener Emissionen. Zur Abscheidung diffuser Staubemissionen bei Schüttgutmanipulation werden häufig Wasserspraysysteme eingesetzt, welche einen erheblichen Optimierungsbedarf punkto Abscheideleistung haben.
Ein Wasserspraysystem kann eine primäre Staubabscheideeffektivität und eine sekundäre Staubabscheideffektivität entfalten. Bei der primären Staubabscheidung kommt es zur Verhinderung der Staubentstehung durch Schüttgutbefeuchtung. Bei der sekundären Staubabscheideeffektivität kommt es zur Abscheidung des entstandenen Staubes aus der Luft.

Untersuchung der primären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems

Probleme bei primären Staubminderungsmaßnahmen durch Befeuchten des Schüttgutes sind vor allem, eine gleichmäßige Befeuchtung zu erzeugen bzw. dass nach Auftrocknen des Schüttgutes die staubunterdrückende Wirkung verschwunden ist.

Die primäre Staubabscheideeffektivität wurde in Abhängigkeit der Gutfeuchte über Schüttgutabwurftests ermittelt. Es konnte in diesem Zusammenhang für Restmelasse als preisgünstiges, bioverträgliches, gefrierpunkterniedrigendes, universell einsetzbares Sprühwasseradditiv, erstmals die Langzeitwirksamkeit der Staubunterdrückung bzw. das Erreichen einer primären Staubabscheideeffektivität von 85% bei 0,05 kg Restmelasse-Wasser-Gemisch/kg trockenem Schüttgut (40% Restmelasse im Restmelasse-Wasser-Gemisch) auch im aufgetrockneten Zustand des Schüttgutes nachgewiesen werden. Dadurch ist diese primäre Staubabscheidemaßnahme in Ihrer Anwendbarkeit bei der Schüttgutmanipulation erheblich verbessert worden.

Untersuchung der sekundären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems

Bei der sekundären Staubabscheideeffektivität ist das Problem, dass das Niedernebeln des Staubes aus der Luft nur geringe Abscheideeffektivitäten aufweist. Um zu klären, wie ein Wasserspray mit einer diffusen Staubemission in Wechselwirkung tritt, sodass es zu einer Staubabscheidung kommt, wurden die Einflussfaktoren auf die Staubabscheidung aus der Luft durch experimentelle und theoretische Betrachtungen untersucht. Die sekundäre Staubabscheideeffektivität eines Zweiphasensprühs wurde bei verschiedenen Betriebsbedingungen (Luftvolumenstrom, Staubkonzentration, Wasservolumenstrom, Düsenhöhe, Düsenposition, Düsenanzahl) in einer Staubabscheidekammer untersucht, und so die Beeinflussbarkeit der sekundären Staubabscheideeffektivität durch Veränderung der Betriebsbedingungen erfasst. Dadurch konnten eine Kreuzstromanordnung sowie geringe Luftvolumenströme als optimal für die Staubabscheidung identifiziert werden. Desweiteren

wurde nachgewiesen, dass zwei Düsen nebeneinander ihre staubunterdrückende Wirkung umso besser entfalten umso geringer der Abstand zwischen ihnen wird, dass jedoch eine Düse mit demselben Wasservolumenstrom wie zwei Düsen zusammen eine stärkere Staubabscheidung bewirkt. Aufbauend auf diese Ergebnisse wurde eine CFD Simulation der Partikel und Tropfenflugbahnen bei der Staubabscheidung des als optimal identifizierten Versuchsaufbaus durchgeführt. Die durchgeführten CFD Simulationen und PDA Messungen zeigen, dass sich die Tropfengrößenverteilung über den horizontalen Schnitt des Sprühkegels (Strömung der partikelbeladenen Luft) verändert. Die Tröpfchengeschwindigkeits- und Tröpfchengrößenunterschiede zwischen Sprühkegelzentrum (höhere Geschwindigkeiten, kleine Tröpfchengrößen) und Sprühkegelrand (niedrigere Geschwindigkeiten, große Tröpfchengrößen) gleichen sich durch Ausbildung eines Einsaugbereiches mit zunehmendem Abstand vom Düsenaustritt aus. Es konnte über die CFD Simulation und PDA Messungen ein Einsaugbereich der Düse ab ca. 30 cm Düsenhöhe ermittelt werden. Dadurch gelangen die Staubpartikel ins Zentrum des Sprays, wo die vertikale Strömungskomponente des Sprays auf sie einwirkt und sie abgeschieden werden (geringere Umströmung des Sprühkegels). In anderen Düsenhöhen findet durch geringe Einsaugwirkung Umströmung des Sprühkegels statt. Dadurch konnte festgestellt werden, dass die vertikale Komponente des Düsensprays welche stark genug sein muss, um eine Umlenkung der Staubpartikel zum Boden hin zu bewirken, sich dann positiv auf die Staubabscheidung auswirkt, wenn ein Einsaugbereich die partikelbeladene Luftströmung in den vertikalen Strömungsbereich des Düsensprays bringt (deshalb erzielt eine Düse mit dem selben Wasservolumenstrom wie zwei Düsen nebeneinander wegen stärkerer vertikaler Komponente, höhere sekundäre Staubabscheideeffektivität). Der Düsendruck (der sich aus Luftdruck und Wasservolumenstrom bzw. Wasservordruck zusammensetzt) ist also auf die Geschwindigkeit der quergerichteten partikelbeladenen Luftströmung abzustimmen. Die Berechnung des Abscheidegrades am Einzeltropfen bei Queranströmung wurde mittels Barth/Schuch/Löffler-Modell vorgenommen und es wurde dabei ermittelt, dass die Partikel- und Tropfengrößen bei dieser Anordnung und diesen Geschwindigkeitsverhältnissen etwa gleich groß sein sollten. Im Zuge dessen stellte sich heraus, dass die Austrittsgeschwindigkeit der Wassertropfen aus der Düse unabhängig vom Wasservolumenstrom ist und somit höhere Abscheidegrade bei höheren Wasservolumenströmen auf die erhöhte Tropfenanzahl zurückzuführensind. Durch die durchgeführten Betrachtungen wurde der Einfluss der Verteilung der Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeiten sowie der Einfluss der Tropfenanzahl im Sprühkegel auf die sekundäre Staubabscheidung analysiert und festgestellt, dass die Ermittlung und Gegenüberstellung des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages und des ortsaufgelösten Staubeintrages im horizontalen Schnitt durch den Sprühkegel eine Beschreibung der sekundären Staubabscheidung zulassen könnte. Bevor die experimentelle Erfassung des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages und ortsaufgelösten Staubeintrages erfolgte um diesen Sachverhalt zu prüfen wurde zunächst untersucht, ob die primäre zur sekundären Stuababscheideeffektivität in Relation gesetzt werden kann, was anhand der Anwendung eines Wasserspraysystems auf eine Förderbandübergabe durchgeführt wurde.

Vergleich der Staubabscheideeffektivitäten

Durch Adaption des Modelles von zwei Separatoren, welche in Serie geschaltet sind, konnte für ein Wasserspraysystem einer Förderbandübergabe der Anteil der primären und sekundären Staubabscheideeffektivität an der Gesamtstaubabscheideeffektivität abgeschätzt werden.

Dadurch können primäre und sekundäre Staubabscheideeffektivitäten in Relation gesetzt werden und festgestellt werden, dass bei gleichen Besprühungsparametern die primäre Staubabscheideeffektivität in etwa viermal höher ist als die sekundäre Staubabscheideeffektivität.
Im nächsten Schritt soll eine Optimierung der primären und sekundären Staubabscheidemaßnahmen aus den zuvor erarbeitetn Grundlagen erfolgen.

Optmierungsverfahren der primären Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems am Beispiel einer Förderbandübergabe

Für die primäre Staubabscheideeffektivität konnte anhand einer Förderbandübergabe ein Auslegungsverfahren für Wasserspraysysteme erarbeitet werden, welches auf andere Anwendungsfälle (Straßenbefeuchtung, Befeuchtung von Abbauflächen oder Halden) übertragbar ist. Es wurde eine neue Auslegungs- und Berechnungsmethode für primäre Staubminderungsmaßnahmen entwickelt. Durch diese Auslegungsmethode kann das Schüttgut bei minimalem Wasserverbrauch optimal befeuchtet und dabei gleichzeitig maximale primäre Staubabscheidung erzielt werden. Die Methode beruht darauf, dass der örtlich aufgelöste Befeuchtungseintrag einer Fläche unterhalb der Düse durch eine mathematische Glockenkurve beschrieben werden kann, welche für verschiedene Bedüsungsparameterwerte (z.B: für Wasservolumenstrom und Düsenposition) experimentell erfasst wird. Die Konstanten, die die Form der Glockenkurve für bestimmte Bedüsungsparameter fixieren, werden in ein numerisches Datenfeld überführt, sodass das gesamte Betriebsspektrum der Düse erfasst ist. Durch Messungen der Durchfeuchtung von Gutschüttungen wurde festgestellt, dass sich der örtlich aufgelöste Befeuchtungseintrag durch die Gutschüttung fortpflanzt und es zu keiner signifikanten Veränderung der Befeuchtungskonstanten beim durchfeuchten der Gutschüttung kommt. Weiters werden die von der Schüttgutfeuchte abhängigen materialspezifischen Emissionsfaktoren als Emissionsfunktion mit Hilfe einer Schüttgutfallapparatur ermittelt. Bei Verwendung des numerischen Datenfeldes und der Emissionsfunktion für die primäre Staubabscheideeffektivität wurde in einer Optimierungsrechnung, beispielsweise für eine Förderbandbedüsung, die optimale Auslegung des Bedüsungssystems (Optimalwerte für Wasservolumenstrom und Düsenposition) durchgeführt. Das anhand dieser Förderbandübergabestelle skizzierte Optimierungsverfahren könnte auch in analoger Weise zur Abschätzung der zu erwartenden Emission sowie zur Ermittlung von optimalen Bedüsungsparametern anderer schüttgutbefeuchtender, staubunterdrückender Wasserspraysysteme dienen.

Ermittlung der sekundären Staubabscheideeffektivität anhand des ortsaufgelösten Befeuchtungseintrages einer Sprühdüse

Für die sekundäre Staubabscheideeffektivität konnten anhand der Abscheidung eines Teststaubes bei gerichteter Queranströmung eines Düsensprays optimale Betriebsparameter des Wasserspraysystemes ermittelt werden. Um Betriebsparameter zum erreichen maximaler sekundärer Staubabscheideeffektivität eines Wasserspraysystems bei der Staubabscheidung diffuser Staubemissionen zu ermitteln, ist neben dem örtlich aufgelösten Befeuchtungseintrag auch der örtlich aufgelöste Staubeintrag unterhalb des Düsensprays erfasst worden. Dadurch konnte bei verschiedenen Betriebsbedingungen nachgewiesen werden, dass ein Zusammenhang zwischen ortsaufgelösten Befeuchtungseintrag und ortsaufgelösten Staubeintrag bei

verschiedenen Bedüsnungsparametern besteht. Daraus können Optimalwerte für die Düsenanzahl, dem Düsenabstand sowie dem Wasservolumenstrom und die Düsenhöhe in Anlehnung an das Optimierungsverfahren, das für die primäre Staubabscheidung erarbeitet wurde, ermittelt werden.

12 Formelzeichen:

A	Grundfläche des Auffangbehälters [m^2]
A´	Schnittfläche der Halbsphäre normal zur Strömungsrichtung [m^2]
A_A	Flüssigkeits- Auffangquerschnittsfläche [m^2]
A_B	Bezugsfläche [m^2]
A_F	Fläche des Messfeldes [m^2]
A_g	Querschnittsfläche des Messglases [m^2]
A_K	Verhältnisfaktor [m^2]
A_M	mittlere Querschnittsfläche [m^2]
A_{Nozzle}	Düsenöffnungsquerschnittsfläche [m^2]
A_{Tr}	Tropfenprojektionsfläche [m^2]
$A_{segment}$	Fläche je Segment und Höhenschicht [m^2]
a	Befeuchtungskonstante [m/s]
a´	Vertrauensbereich [ ]
a_{Tr}	Tropfenbeschleunigung [m/s^2]
B	Förderbandbreite [m]
B´	Breite des Formkastens [m]
B_o	Öffnungsbreite des Messkompartimentes [m]
B_u	Bodenbreite des MEsskompartimentes [m]
b	Befeuchtungskonstante [$1/m^2$]
c	erwartete Staubkonzentration [mg/m^3]
c_1	erwartete Staubkonzentration bei erhöhter Geschwindigkeit [mg/m^3]
c_{pw}	spezifische isobare Wärmekapazität des Wassers [J/kgK]
c_p	spezifische isobare Wärmekapazität von Wasserdampf [J/kgK]
c_{pL}	spezifische isobare Wärmekapazität der trockenen Luft [J/kgK]
c_{Roh}	Staubkonzentration im Rohgas [mg/m^3]
c_w	Reibungsbeiwert des Fluides [ ]
d	Flachstrahlbefeuchtungskonstante [m/s]

d' Durchmesser der Messgläser [m^2]

d_{Gr} Durchmesser der Grenzpartikelbahn [m^2]

d_g Durchmesser der durch Grenzstromlinie begrenzten Strömungsröhre [m^2]

$d_{m\ Sonde}$ Sondendurchmesser [m^2]

d_s Sprühzeit [s]

d_{Tr} Durchmesser des Tropfens [m^2]

$d_{s'}$ Partikeldurchmesser an der Grenzpartikelbahn [m]

d_w wirksamer Sondendurchmesser [m^2]

E PM10 –Emission pro Masse Schüttgut [$g_{PM10}/t_{trockenes\ Schüttgut}$]

E_0 Emission E ohne Befeuchtung [$g_{PM10}/t_{trockenes\ Schüttgut}$]

E_{kin} initiale und kinetische Energie [J]

$E_{y'}$ PM10-Emission pro Masse Schüttgut bei Schüttgutfeuchtegehalt $G_{y'}$[$g_{PM10}/t_{trockenes\ Schüttgut}$]

F Abweichung von G_y zu $G_{optimum}$ über die Förderbandbreite [$g_{Wasser}/kg_{trockenes\ Schüttgut}$]

F_T Trägheitskraft [N]

F_w Widerstandskraft [N]

F_y Abweichung von G_y zu $G_{optimum}$ an der Stelle y der Klassenweite Δy über die Förderbandbreite [$g_{Wasser}/kg_{trockenes\ Schüttgut}$]

f_V Normierungsfaktor [ ]

f_3 Düsenbefeuchtungsprofil von 3 Düsen [kg/ms]

f_4 Düsenbefeuchtungsprofil von 4 Düsen [kg/ms]

G Schüttgutfeuchtgehalt [$g_{Wasser}/kg_{trockenes\ Schüttgut}$]

$G'_{ý}$ Schüttgutfeuchtgehalt am Förderbandstreifen y´ [$g_{Wasser}/kg_{trockenes\ Schüttgut}$]

$g_{Rechteck}$ Rechteckförmiges Schüttgutfeuchtungfeuchteprofil über die Förderbandbreite bei Profilvorgabe [kg/ms]

$g_{Dreieck}$ Dreieckförmiges Schüttgutfeuchtungfeuchteprofil über die Förderbandbreite bei Profilvorgabe [kg/ms]

g Erdbeschleunigung [m/s^2]

h Düsenabstand zur Grundfläche [m]

h´ Haftanteil [ ]

H Wasserstand im Messkompartiment [m]

H_K Messkompartimentshöhe [m]

Δh_v spezifische Verdampfungsenthalpie [J/K]

I Intensität des abgeschwächten Lichtstahles [W/m^2]

I_0 Intensität des primären Lichtstahles [W/m^2]

i Zeile im Messraster [ ]

j Spalte im Messraster [ ]

k Steigung des linearen Zusammenhanges von $v_s(x)/v(x)$ [ ]

k´ thermische Leitfähigkeit [W/mK]

L charakteristische Länge [m]

L´ Länge des Formkastens [m]

L_0 Öffnungslänge des Messkompartiments [m]

L_u Bodenlänge des Messkompartimentes [m]

M_{gesamt} gesamte umgeschlagene Masse [kg od t]

$M_{total\ Nozzle}$ Aus der Düse austretender Massenstrom [kg/s]

$\overline{M}_{\bar{y}}$ Masse an Wasser per Förderbandlängeneinheit an der Stelle $\bar{y}$ [kg/m]

$\overline{M}_{s,\bar{y}}$ Masse an Staub per Förderbandlängeneinheit an der Stelle $\bar{y}$ [kg/m]

$\overline{\dot{M}}_{\bar{y}}$ Flüssigkeitsmassenstrom je Klassenweite Δy in Förderbandlaufrichtung z aufsummiert zwischen $-z_E$ bis $+z_E$ an der Stelle $\bar{y}$ [kg/ms]

$\overline{\dot{M}}_{s,\bar{y}}$ Staubmassenstrom je Klassenweite Δy in Förderbandlaufrichtung z aufsummiert zwischen $-z_E$ bis $+z_E$ an der Stelle $\bar{y}$ [kg/ms]

m Emission der Staubquelle [kg/s]

m´ Schüttgutmassenstrom [kg/s]

m´´ Staubmassenstrom [kg/s]

m“ Abstand zwischen den Düsen in [m]

$m``$ spezifisches Abreinigungsvolumen [m³/kg]

m_A flächenbezogene Beladungsmasse des Schüttgutes [kg/m^2]

m_{ij} Wassermasse im Glas [kg]

$m_{p\ feucht}$ Masse des feuchten Schüttgutes [kg]

$m_{p\ trocken}$ Masse des trockenen Schüttgutes [kg]

m_{Tr} Tropfenmasse [kg]

m_{tL} Massenstrom an trockener Luft der durch die Apparatur strömt [kg/s]

m_w Menge Wasser die mit dem Düsensprüh pro kg trockener Rohgasluft eingebracht wird [ ]

N_B Anzahl der Klassen über die Förderbandbreite [ ]

N_i Laufvariable [ ]

Ny Anzahl der Δy Elemente der Glockengrundfläche am Förderband [ ]

N_Z Anzahl der Δz Elemente der Glockengrundfläche am Förderband [ ]

n Anzahl der Düsen [ ]

n´ Anzahl der Iterationen [ ]

PM(x) Gesamtabscheidegrad [ ]

p Druck [Pa]

p_A Luftdruck am Ausgang [Pa]

p_{dyn} dynamischer Druck [Pa]

p_E Luftdruck am Eingang [Pa]

p_{sw} Sättigungsdruck [Pa]

Q(PM10) emittierte Masse an PM10 [mg]

Q´ verdunstete Wassermenge pro Sekunde [kg/s]

Q_3 massenbezogene Partikelgrößenverteilungssumme [ ]

q verdunstende Wassermenge pro kg trockener Luft [kg/ kg]

q_s Menge an Wasser die zum sättigen der staubbeladenen Luft notwendig ist [kg /kg]

Re Reynoldszahl [ ]

R_L Gaskonstante von trockener Luft [J/kg K]

R_w Gaskonstante von Wasserdampf [J/kg K]

S statistische Sicherheit [ ]

s Standardabweichung [ ]

s´ Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

s_{max} maximale Standardabweichung der Stichprobe [ ]

s_{rel} wegstrecke entlang derer Relativgeschwindigkeit auftritt [m]

T Temperatur [K]

T(x) Fraktionsabscheidegrad [ ]

T_A Lufttemperatur am Ausgang [K]

T_E Lufttemperatur am Eingang [K]

T_w Wassertemperatur des Sprühwassers [K]

t Zeit (s)

U abgegriffene Spannung am Anemomenter [V]

u Geschwindigkeit in der Hauptströmung [m/s]

u´ mittlere Geschwindigkeit in der Sonde [m/s]

u_{oo} Luftquerströmungsgeschwindigkeit [m/s]

u_1 Partikelgeschwindigkeit [m/s]

u_{Nozzle} Düsenaustrittsgeschwindigkeit [m/s]

V(x) Flüssigkeitsvolumen gesammelt im Auffangbehälter nach der Zeit t [m^3]

$\dot{V}_{fl}$ Versorgungswasservolumenstrom der Düse [m^3/s]

$V_{segment}$ Volumen je Segment und Höhenschicht [m^3]

$\Delta\overline{V_{\bar{y}}}$ Wasservolumen in Förderbandlaufrichtung z je Klassenweite Δy [m^3/m]

$\Delta V'_{\dot{y}}$ auf die Teilfläche Δy*Δz auftreffendes Flüssigkeitsvolumen pro Länge z [m^2]

$\Delta\overline{V_{\overline{s,y}}}$ Staubvolumen in Förderbandlaufrichtung z je Klassenweite Δy [m^3/m]

v(x) Befeuchtungsgeschwindigkeit [m/s]

v_B Förderbandgeschwindigkeit [m/s]

v_b Verschubgeschwindigkeit [m/s]

$v_{ij}(x)$ mittlere Befeuchtungsgeschwindigkeit [m/s]

v_L Düsenluftströmungsgeschwindigkeit [m/s]

v_R Verschubgeschwindigkeit des Messrasters [m/s]

$v_s(x)$ Staubabscheidegeschwindigkeit [m/s]

$v_{ý}(z')$ Befeuchtungsgeschwindigkeit am Förderbandstreifen y´ [m/s]

X Wasserbeladung der Luft [kg/kg]

X_A Wasserbeladung der Luft am Ausgang [kg/kg]

X_E Wasserbeladung der Luft am Eingang [kg/kg]

x Befeuchtungsradius [m]

$x_{A,s}$ Wasserbeladung der Luft bis zum erreichen eines bestimmten Sättigungszustandes [kg/kg]

$x_{10,3}$ 10% der volumenbezogenen Partikelgrößenverteilungssumme sind kleiner als die Korngröße $x_{10,3}$ = d(0.1)

$x_{50,3}$ Medianwert der volumenbezogenen Partikelgrößenverteilungssumme $x_{50,3}$ = d(0.5)

$x_{90,3}$ 90% der volumenbezogenen Partikelgrößenverteilungssumme sind kleiner als die Korngröße $x_{90,3}$ = d(0.9)

y Achse in Richtung Förderbandbreite (m)

y´ y- Koordinate jeweils auf den Mittelpunkt eines Δy Elementes bezogen

y+ Kontrollvariable [ ]

y_b Förderbandbreite [m]

Δy Differentielle Breite am Förderband (m)

z Achse in Richtung Förderbandlänge (m)

z´ z- Koordinate jeweils auf den Mittelpunkt eines Δz Elementes bezogen

Δz Differentielle Länge am Förderband (m)

α Regressionsfaktor [kg/ms]

α' Strömungswinkel zwischen Partikel- und Tropfenbahn [°]

β Regressionsfaktor [1/m]

δ Strömungswinkel/ Düsenwinkel [°]

ε kinetische dissipationsrate [ ]

ε spezifischer Extinktionskoeffizient [m^2/kg]

η_{tot} Gesamtstaubabscheideeffektivität [%]

η_1 primäre Staubabscheideeffektivität [%]

η_2 sekundäre Staubabscheideeffektivität [%]

φ Auftreffgrad [ ]

φ skalare Quantität der Strömung [ ]

φ_E relative Luftfeuchtigkeit am Eingang [ ]

ν Geschwindigkeit des strömenden Fluides

ν kinematische Zähigkeit [m^2/s]

ν_E^* spezifisches Volumen der feuchten Luft am Eingang [m^3/kg]

ν_1 erhöhte Windgeschwindigkeit [m/s]

ψ Trägheitsparameter [ ]

ρ Dichte des Fluides [kg/m^3]

ρ_s Dichte des Schüttgutes [kg/m^3]

τ Schubspannung [N/m^2]

ω_{rel} Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Partikel [m/s]

13 Literaturverzeichnis

[1] Califomia Air Resources Board: "*Emission Inventory 1997*" Department of the California Environmental Protection Agency, Section 7-1 bis 7-14, USA, 1997

[2] VDI 3790, BI. 1+2: „*Entwurf Umweltmeteorologie, Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen*", VDI- Verlag, Düsseldorf, 1997

[3] U.S. Environmental Protection Agency: "Background." EPA Homepage: http://www.epa.gov/airtrends/aqtrnd95/backgrnd.html, Stand vom 04 April 2010

[4] O. Svabik: *„Jahresberichte des ZAMG (Zentralanstalt für Meterologie und Geodynamik), 1987-1996",* ZAMG, Wien, 1999

[5] U.S. Environmental Protection Agency: *"Introduction to AP-42"*, Volume I, Fifth Edition, Office of Air Quality Planning and Standards, USA, 1995

[6] U.S. Environmental Protection Agency: "*Background Documentation for AP-42, Section 11.2.4, Heavy Construction Operations*", Office of Air Quality Planning and Standards, EPA Contract No. 68-DO-0123, Work Assignment No 44, EPA, USA, 1993

[7] U.S. Environmental Protection Agency: "*Background Documentaion for AP-42, Section 11.2.5, Paved Roads, Office of Air Quality Planning and Standards*", Office of Air Quality Planning and Standards, EPA Contract No. 68-DO-0123, Work Assignment No 44, EPA, USA, 1997

[8] W.Winkler: „*Verfahrenschemie und Umweltschutz*", VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft, Berlin, 1986

[9] O. Strubelt: „*Gifte in unserer Umwelt*", DVA, Stuttgart, 1989

[10] K. Waters: "*Dust Generation in Material Handling Operations*", Pow. tech. Proceedings, Intern. Conference in Powder Technology, Publ. by specialist. Exhib. LId., Croydon, London, 1979

[11] EU Council Directive: "*Guideline 1999/30/EG*" EU Council Hompage: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/ LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1999L0030:20080611:DE:PDF Stand vom 04 April 2010.

[12] Tageszeitung der Standard:"*Feinstaubüberschreitung: EU verwarnt Österreich*." Homepage der Tageszeitung derStandard: <http://derstandard.at/1256745287594/Feinstaub-Ueberschreitung-EU-verwarnt-Oesterreich> Stand vom 04 April 2010.

[13] EU Council Directive: "*Guideline 2008/30/EG*" EU Council Hompage: <http://www.umweltrechtsreport.de/news/22143.pdf> Stand vom 04. April 2010

[14] European Environment Agency: "About – EPRTR." , EEA-Homepoage: http://prtr.ec.europa.eu.jpg About.aspx, Stand vom 04 April 2010

[15] R. Ewers: „*Bestimmungsmöglichkeiten von Emissionsfaktoren diffuser Quellen*", Studienarbeit Univ. Fachbereich Chemietechnik PCV, Dortmund, 1998

[16] D. Lundgren: "*A Measurement Technique to Quantitate Fugitive Dust Emission From Handling of Granular Products*", J Aerosol 17, 632-634, USA, 1986

[17] JC. Chow, et al.: "*A Laboratory Resuspension Chamber to Measure Fugitive Dust Size Distribution and Chemical Compositions*", Atmospheric Environment 28, 3463-3481, USA, 1994

[18] T. Visser: "*A Wind-Tunnel Study of the Dust Emissions from the Continuos Dumping of Coal*", Atmospheric Environment 26A, 1453-1460, USA, 1992

[19] J. Schünemann: „*Den Staub in den Griff bekommen*", Schüttgut 3(3), 323-325, Deutschland, 1997

[20] A. Bürkholz: „*Ein Verfahren zur Messung der Staubungsfähigkeit von pulverfärmigen Produkten*" , Staub-Reinhaltung der Luft 49, 433-438, BRD, 1989

[21] D. Eickelpasch, R . Jünemann: „*Methode zur Bestimmung diffuser Staubemissionen insbesondere beim Schüttgutumschlag*", Schüttgut 3, 313-319, Deutschland, 1997

[22] R. Holzhauer: „*Beitrag zur Beurteilung und Weiterentwicklung von Emissionsminderungsmaßnahmen beim Umschlag staubender Schüttgüter*" , Diss. Univ. Dortmund, 1991

[23] Land Salzburg: „Luftreinhaltung", Homepage des Landes Salzburg: http://www.salzburg.gv.at/themen/nuw/umwelt/luftreinhaltung/luft_begriffe_schadstoffe.htm, Stand vom 17.März.2011

[24] P. Davids, G. Güthner: „*Die Bedeutung diffuser Quellen für die Luftreinhaltung*", VDI-Berichte Nr.339, VDI- Verlag, Düsseldorf, 1979

[25] K. Svojse: „*Quantifizierung diffuser Staubemissionen in Österreich*", Diplomarbeit TU Wien Wien, 1998

[26] VDI 3790 Blatt 3: „*Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen*", Kommission Reinhaltung der Luft VDI und DIN-Normenausschuss KRdL, VDI- Verlag, Düsseldorf, 2008

[27] T. Wayne, et al.: "*Air Pollution Engineering Manual*" Chapter 4 Fugitive Dust Emissions John WileySons, New York, 2000

[28] K. Pazdernik:"*Emissionstrends 1990-2007. Überblick über die österreichischen Verursacher von Luftschadstoffen (Datenstand 2009)*" Umweltbundesamt GmbH. Wien, 2009

[29] V. Mondy, R. Jakhete, A. Mulloy: "*Dust Control Handbook for Minerals Processing Martin Marietta Corporation*", Martin Marietta Laboratories Contract No. J0235005, Bureau of Mines U.S. Department of the Interior, USA, 1987

[30] P. Grundnig: „*Verminderung der Staubemissionen mit Hilfe von Wasserbedüsung*", Diplomarbeit TU- Wien Betreuer/in(nen): W. Höflinger, Wien, 2005.

[31] W. Winiwarter, C. Trenker, W. Höflinger „Österreichische Emissionsinventur für Staub" Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Wien, 2001

[32] European Environment Agency: "Releases from Diffuse Sources – Approach.", EEA-Homepage: http://prtr.ec.europa.eu.jpg-DiffuseSourcesApproach.aspx , Stand vom 04 April 2010

[33] H. Krampe: „*Transport,Lagerung, Umschlag*", VEB Fachbuch Verlag, Leipzig, 1990

[34] Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft-TA Luft: „*Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum BImSchG*" , 4. April 1986 GMBl. I S. 202, Berlin, 1986

[35] Luftreinhaltung 88: „*Materialien zum 4. Immissionsschutzbericht der Bundesregierung*" , Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1988

[36] P. Stahura: "*Conveyor Skirting vs Fugitive Material*", Martin Engineering Co., USA, 1991

[37] M. Lemann, F. Widmer: „*Einfluss von Kondensationsvorgängen in mit Wasserdampf gesättigten Staub-Luftgemischen auf die Staubabscheidung in einem Venturiwäscher*" Dissertation ETH Zürich, Zürich, 1977

[38] P. Wypych, D. Cook, P. Cooper: "*Controlling dust emissions and explosion hazards in powder handling plants*" , Chemical Engineering and Processing 44, 323–326, Tolouse, 2005

[39] F. Kissell: "*Handbook for Dust Control in Mining*". NIOSH. CDC Workplace Safety and Health. Information Circular 9465, USA, 2003.

[40] U. Klenk, E. Schmidt: "*Use of water sprays for reduction of airborne dust pollution*", 10th World Filtration Congress, 14-18 April 2008, Leipzig, 2008

[41] W. Höflinger, J. Faschingleitner, G. Mauschitz, Z. Liu, G. Zhang: "*Bulk solids moistening with spray nozzles for fugitive dust supression*"; Proceedings 6th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids (CHOPS), p6, Brisbane, 2009

[42] J. Faschingleitner: "*Model verification of water spray suppression of fugitive dust emission using different bulk solids and droplet sizes*". Diplomarbeit, Betreuer/in(nen): W. Höflinger, G. Mauschitz, TU-Wien, 2008.

[43] R. Hamilton, G. Knight: "*Laboratory experiments on dust suppression with broken coal*", U.K.: National Coal Board, Mining Research Establishment Report No. 2083, London, 1957

[44] L. Goldbeck, A. Marti: "*Dust control at conveyor transfer points: containment, suppression, and collection*". Bulk Solids Handling 16(3):367-372., USA, 1996

[45] A. Bazzanella, H. Becker, F. Kemper: „Staubbekampfung in abbaubetrieben mit schneidender Kohlengewinning". Gluckauf 122(11):728-735., BRD, 1986

[46] F. Hamelmann and E. Schmidt: **"***Methods of Estimating the Dustiness of Industrial Powders – A Review*", KONA No.21, Wuppertal, 2003

[47] C. Trenker, W. Höflinger: „ *Influence of the moisture content of falling bulk materials on PM10 or PM 2,5 values of the limited Fugitive Dust",* Proceeding of International Congress for Particle Technology, Nürnberg, 2001

[48] T. Tomb, J. Emmerling, R. Kellner: "*Collection of airborne coal dust by water spray in a horizontal duct*", AIHA J 33(11):715-721., USA, 1972

[49] J. Bigu, M. Grenier: "*Reduction of airborne radioactive dust by means of a charged water spray*", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 50(7): 336-45, Canada, 1989

[50] N. Jayaraman, R. Jankowski: "*Atomization of water sprays for quartz dust control*". Appl Ind Hyg 3:327-331, Canada, 1988

[51] J. McCoy J, et al.:"*Evaluation of charged water sprays for dust control*". Waltham, MA: Foster-Miller, Inc. U.S. Bureau of Mines contract No. H0212012. NTIS No. PB83-210476., USA, 1983

[52] J. Gospodarek: "*Fluid dynamical analysis of encased dust systems with implemented two-phase nozzle sprays for the purpose of fugitive dust suppression*"; Diplomarbeit TU-Wien Betreuer/in(nen): R. Stank, W. Höflinger, M. Harasek, J. Faschingleitner, C. Jordan; Wien, 2010

[53] S. Page, J. Volkwein: "*Foams for dust control*". Eng Min J 187(10):50-52, 54., USA, 1986

[54] J. Kost, G. Shirey, C. Ford: "*In-mine tests for wetting agent effectiveness"*. Bituminous Coal Research, Inc. U.S. Bureau of Mines contract No. J0295041. NTIS No. PB82-183344/ XAB., USA, 1980

[55] J. Meets, A. Neethling: "*Some experiences in the use of wetting agents to suppress dust at Sigma colliery*". J Mine Vent Soc S Afr Oct:126-133., Südafrika, 1987

[56] Q. Hu, H. Polat, S. Chander: "*Effect of surfactants in dust control by water sprays"*, Proceedings of the Symposium on Emerging Process Technologies for a Cleaner Environment. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., pp. 269-276., UK, 1992

[57] J. Tien, J. Kim: „*Respirable dust control using surfactants*", Appl Occ Env Hyg 12(12):957-963., USA, 1997

[58] J. Wolfslehner: "*Untersuchung der Emissionsminderung bei Schüttgutmanipulation durch Schüttgutdurchfeuchtung mittels Restmelasse*"; Diplomarbeit TU-Wien, Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner; Wien, 2011.

[59] Bezirksregierung Arnsberg Abteilung Bergbau und Energie NRW: „*Zulassungsbescheid für Contradust Spray*", Homepage der Bezirksregierung Arnsberg: http://www.cst-gmbh.org/Download/Zulassung_BA.pdf, Stand vom 28.03.2011

[60] TETRA Chemicals Homepage: „*TETRA- Sicherheitsdatenblatt*" http://www.tetrachemicals.com/getfile.asp?isdownload=0&file_content_ID=3896 Stand vom 28.03.2011

[61] I. Lehner: „*Einzelfuttermittel bzw. organisches Düngemittel*", Produktionsblatt, AGRANA Zucker GmbH, Tulln, 01, 01.10.2008

[62] M. Heyde: „*Merkmal und Fließverhalten von Schüttgutmassen*", Maschinenmarkt 89, BRD, 1983

[63] H. Rumpf: „*Mechanische Verfahrenstechnik*", Carl Hansen Verlag, München – Wien, 1975

[64] DIN ISO 3435: „*Klassifizierung und Symbolisierung von Schüttgütern nach internationaler Norm*", BRD, 1979

[65] B.Tollens, F. Mayer: „*Ueber die Bestimmung der Molekulargrösse der Raffinose und des Formaldehydes mittelst Raoult's Gefriermethode*", Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft, Volume 21, Issue 1, pages 1566–1572, Deutschland, 1888

[66] A. Ehrenhuber: „*Flussdiagramm: Produktion von Restmelasse – Melasseentzuckerung*", AGRANA Tulln, Version 01, 10.07.2006

[67] G. Mauschitz: „*Partikelmesstechnik*" Vorlesung. TU Wien, Wien, 2008.

[68] W. Höflinger: „*Teilchengrößenanalyse und Zerkleinern*" Übungsskript - Laborübung. TU-Wien, Wien, 2009.

[69] A. Purgar: „*Komponenten und Auswertemöglichkeiten eines Prüfstandes zur Untersuchung von Staubabscheidung mittels Zweiphasensprüh*". Bachelorarbeit TU-Wien Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner; Wien, 2009.

[70] J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger: "*Fugitive dust suppression using water spraying systems with low water consumption in enclosed systems*"; Vortrag: FILTECH; 13.10.2009 - 15.10.2009; in: Procedings FILTECH 2009, S. 349 - 356., Wiesbaden, 2009

[71] J. Faschingleitner, W. Höflinger: "*Evaluation of primary and secondary fugitive dust suppression methods using enclosed water spraying systems at bulk solids handling*"; Advanced Powder Technology, 22, S. 236 - 244., Japan, 2011

[72] J. Faschingleitner, W. Höflinger, G. Mauschitz: "*Clarification of Significant Mechanisms for Dust Suppression with Water Sprays in Enclosed Bulk Solid Systems*"; Vortrag: World Congress on Particle Technology (WCPT6 2010), 26.04.2010 - 29.04.2010; in: "*WCPT6 2010 - Abstracts and Proceedings*", (2010), ISBN: 978-3-00-030570-2; 4 S., Nürnberg, 2010

[73] J. Ferziger, M. Peric: "*Computational Methods for Fluid Dynamics*" Springer-Verlag, Heidelberg, 1999

[74] M. Casey, T. Wintergerste: "*Best Practice Guidelines*", ERCOFTAC 2000, UK, 2000

[75] S. Martens: „*FLUENT*" Präsentation an der TU Graz der Fluent Deutschland GmbH, Homepage des Institutes für hydraulische Strömungsmaschinen: http://www.cfd.tugraz.at/pdf/FLUENT_TUGraz_Seminar_021106.pdf, Stand vom 04.April 2010

[76] Ansys Germany GmbH: "*FLUENT 6.3 User´s Guide*". Homepage der Ansys Germany GmbH: http://my.fit.edu/intresources/manuals/fluent6.3/help/pdf/ug/pdf.htm, Stand vom 04. April 2010

[77] B. Bird, et al.: „*Transport Phenomena*", John Wiley & Sons. New York, 1960

[78] J. Faschingleitner, W. Höflinger. "*Schüttgutbefeuchtung durch Sprühdüsen zur Unterdrückung diffuser Staubemissionen*". Poster: Processnet Jahrestreffen des Fachausschusses Agglomerations- und Schüttguttechnik. Fulda, 22.02.2010 - 23.02.2010.

[79] Umweltbundesamt GmbH: "*Staub – Allgemein*.", Homepage des Umweltbundesamtes: http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/luft/luftschadstoffe/staub/, Stand vom 04 April 2010

[80] K. Leibrecht: „*Berechnung des Feinstaubabscheidegrades von Zweistoffdüsen bei unterschiedlichen Strömungssituationen*", Bachelorarbeit TU-Wien, Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner, Wien, 2009

[81] F. Löffler: „*Staubabscheiden*", Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York, 1988

[82] F. Löffler: „*Partikelabscheidung an Tropfen und Fasern*", Chem.-Ing.-Tech., 55 ,Nr. 3, S. 171-178, BRD, 1983

[83] L.Friedel, A. Rabadi: „*Ausbreitung und Ausregnen im Fall von Zweiphasen-Freistrahlen aus Gas und Flüssigkeit in ruhender Luft*", Dissertation TU Hamburg-Harburg, Hamburg, 2007

[84] B. Lohrengel: „*Abgasreinigung/Immissionsschutz*" Vorlesungsskriptum FH Heilbronn, Homepage der FH Heilbronn: http://www.vu.hs-heilbronn.de/Lohrengel, Stand vom 01.10.2010

[85] J. Wolfslehner: „*Unterdrückung diffuser Staubemissionen mittels Zweiphasensprüh*", Bachelorarbeit TU Wien, Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner, Wien, 2009

[86] H. Baehr, S. Kabelac: „*Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*", Volume 13. Springer Verlag, Berlin, 2006

[87] A. Katterfeld, D. Timothy: „*Vorhersage der Staubemission von Gutübergabestellen*"; Schüttgut Vol.17 Nr.1, Deutschland, 2011

[88] P. Cooper, P. Arnold: "*Air entrainment and dust generation from a falling stream of bulk material"* KONA, 13, 125 – 134., Japan, 1995

[89] F. Hamelmann, E. Schmidt: „*Messverfahren zur Bestimmung des Staubungsvermögens von dispersen Pulvern*", Chem. Ing. Tech., 74 (12), 1665 – 1676., Wuppertal, 2002

[90] G. Hofer: „*Schüttgutbefeuchtung mittels Zweistoffdüsen*", Bachelorarbeit TU-Wien, Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner, Wien, 2011

[91] J. Faschingleitner, W. Höflinger: "*Bulk solids moistening with spray nozzles for fugitive dust suppression"*, Proc. on 6th European Meeting on Chemical Industry and Environment (EMChIE2010), Mechelen, 2010.

[92] C. Trenker, G. Mauschitz, W. Höflinger: „*Ein Verfahren zur Messung der Staubungsfähigkeit von Schüttgütern*" Int. Kolloquim Stäube, Rauche und Nebel am Arbeitsplatz, Toulouse, 2001

[93] C. Trenker, G. Mauschitz, W. Höflinger: "*Characterization of Fugitive Dust Emissions using a Dust Generation Function*"; Poster 6th World Congress of Chemical Engineering 23.09.2001-27.09.2001, Melbourne, 2001

[94] C. Trenker, G. Mauschitz, W. Höflinger: „*Untersuchung der Staubungsfähigkeit von unterschiedlichen Schüttgütern*", Diplomarbeit TU-Wien, Wien, 2002

[95] G.Kanitschar: „*Optimierung von Düsenparametern zur Befeuchtung von Schüttgut auf Förderbändern*", Bachelorarbeit TU-Wien, Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner, Wien, 2010

[96] P. Pessenda-Garcia Mauschitz, W. Höflinger: „*Experimentelle Untersuchungen zur Optimierung der Schüttgutbefeuchtung als Staubminderungsmaßnahme*", Diplomarbeit TUWien, Wien, 2001

[97] J. Faschingleitner, W. Höflinger: "*Schüttgutbefeuchtung durch Sprühdüsen zur Unterdrückung diffuser Staubemissionen*"; Chemie Ingenieur Technik, 83, 5; S. 714 - 719., Deutschland, 2011

[98] J. Faschingleitner, W. Höflinger:"*Fugitive dust suppression by optimized bulk solids moistening*"; Vortrag: FILTECH 2011; 22.03.2011 - 24.03.2011; in: "*Proceedings Vol. II FILTECH 2011*", (2011), 978-3-941655-037-9; S. 193 - 200., Wiesbaden, 2011

[99] J. Tauber: „*Ermittlung von Befeuchtungs- und Staubabscheidefeldern zur Unterdrückung diffuser Staubemissionen*", Bachelorarbeit TU-Wien, Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner, Wien, 2011

.

14 Anhang

Anhang 1: Datenblatt des Mastersizer 2000 [12]
Anhang 2: Datenblatt Dispergiermodule Hydro 2000S (A) [12]
Anhang 3: Datenblatt Trockendispergiereinheit Scirocco [12]
Anhang 4: SOP-Konzept der automatischen Steuerung der Partikelgrößenbestimmung [12]
Anhang 5: Datenblatt des frequenzgeregelten Seitenkanalverdichters
Anhang 6: Pural NF Bestellschein
Anhang 7: Partikelgrößenverteilung des verwendeten Pural NF
Anhang 8: Partikelgrößenverteilung des abgeschiedenen Teststaubes PURAL NF
Anhang 9: Datenblatt der Vollkegel-Zweistoffdüse 1005 VSR [17]
Anhang 10: Lebenslauf des Verfassers Dipl. Ing. Jörg Faschingleitner
Anhang 11: Publikationsliste des Verfassers Dipl. Ing. Jörg Faschingleitner

14.1 Datenblatt des Mastersizer 2000

Mastersizer 2000

Der Mastersizer 2000 wurde entwickelt, um die wachsende Anforderung der Industrie nach globaler Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Partikelanalyse, nach Rückverfolgbarkeit, Einhaltung der gesetzlichen Auflagen und Effizienz im Labor zu erfüllen. Mit der Einführung des Mastersizer 2000 hat Malvern die Partikelgrößenanalyse soweit vorangetrieben, dass sie zur einfachen Routineaufgabe geworden ist.

- **Genauigkeit und Reproduzierbarkeit**
  Genauigkeit: ± 1 % beim Dv50 unter Verwendung der Malvern Quality Audit Standards. Reproduzierbarkeit zwischen verschiedenen Geräten: Besser als 1 % RSD beim Dv50 unter Verwendung der Malvern Quality Audit Standards
- **Optimale Reproduzierbarkeit**
  Softwaregesteuerte SOPs verhindern bedienerabhängige Unterschiede in den Messergebnissen und ermöglichen den globalen Methodenaustausch. Alle Messparameter werden automatisch in die Ergebnisdateien eingebettet und können zur Einsicht und Überprüfung jederzeit selbst per E-Mail versendet werden. Messungen lassen sich unter Anwendung ein und derselben SOP reproduzieren.
- **Breiter Messbereich**
  Messung von Materialien im Größenbereich 0,02 µm bis 2000 µm.

- **Vielzahl von Probentypen**
  Für die Messung von Emulsionen, Suspensionen und Trockenpulvern..

- **Einfache Benutzung**
  Im Hinblick auf die einfache Benutzung vollautomatisiert. Benutzerabhängige Messergebnisse werden verhindert. Minimale Schulungsanforderungen für neue Benutzer, dabei extreme Flexibilität und Einsatzmöglichkeiten durch geschultes Personal.
- **Flexibilität**
  Breites Sortiment von Dispergiereinheiten. Schneller Wechsel zwischen Dispergiereinheiten durch automatische Konfiguration. "Plug and Play"-Kassettensystem gestattet den gleichzeitigen Anschluss zweier Dispergiereinheiten.

- **Einhaltung der gesetzlichen Auflagen**
  Umfassende QSpec Validierungsdokumentation steht zur Verfügung, einschließlich Konformität mit 21CFR part 11.

- **Benutzerfreundliche Software**
  Softwaregesteuerte Standard Operating Procedures (SOPs) verhindern benutzerabhängige Ergebnisse.
  Ein SOP-Assistent unterstützt Benutzer bei der Erstellung optimaler Messmethoden.
  Online-Hilfe und Tipps zu jedem Schritt einer Messung sind per Mausklick abrufbar.
  Am Bildschirm angezeigte Anweisungen leiten den Benutzer durch den Messvorgang.
  Standard SOPs werden für routinemäßige Probenanalysen mitgeliefert.
  Custom Report Designer gestattet die Konfiguration der Bildschirmanordnung und des Ausdrucks entsprechend den individuellen Benutzeranforderungen.
  Custom Calculator gestattet die Spezifizierung der für die jeweilige Anwendung wichtigen Parameter.

Mastersizer 2000 - Datenblatt

Der Mastersizer 2000 ist ein modulares Instrument, das für die Messung der Partikelgrößenverteilung nasser und trockener Proben konzipiert wurde. Dazu gehören eine Vielzahl von Probendispergiereinheiten, darunter auch ein Autosampler. Im vollautomatisierten Betrieb liefert der Mastersizer 2000 Ergebnisse, die auf standardisierten Verfahren basieren. Damit werden bedienerabhängige Abweichungen der Messergebnisse vermieden

Spezifikation

Größenbereich:	0,02 bis 2000 µm, je nach Materialeigenschaften
Messprinzip:	Mie-Streuung
Detektionssysteme	Rote Lichtquelle: Vorwärtsstreuung, Seitstreuung und Rückstreuung; Blaue Lichtquelle: Weitwinkel-Vorwärts- und Rückstreuung
Lichtquellen:	Rote Lichtquelle: Helium-Neon-Laser. Blaue Lichtquelle: Festkörperlichtquelle.
Optical alignment system:	Automatisches Schnelljustierungssystem mit optischem Dunkelfeld-Retikel und Multielement-Justierungs-Detektor.
Wechsel der Probendispergiereinheit:	Probendispergiereinheiten werden beim Einsetzen der Messzellenkassetten in die optische Einheit automatisch erkannt, konfiguriert und aktiviert.
Stromversorgung:	110/240 V, 50/60 Hz, 60 VA
Abmessungen:	Länge: 1293 mm; Tiefe: 255 mm; Höhe: 375 mm
Gewicht:	31 kg.

Hydro S Probendispergiereinheit

Viele Labors haben Proben, die zur Partikelgrößenbestimmung nicht in Wasser sondern in anderen oft organischen Dispergiermitteln gemessen werden müssen, wobei der Lösungsmittelverbrauch so weit wie möglich minimiert werden soll.
Häufig ist auch nur wenig Probenmaterial vorhanden. Dies macht eine Dispergiereinheit für Proben von geringer Volumenmenge sinnvoll, um den Probenverbrauch auf ein Minimum zu beschränken und dabei gleichzeitig die Vorteile einer vollautomatischen Probendispergierung und -messung zu nutzen.

- **Dispergierungsart**
  Nass, Fassungsvermögen 50 - 120 ml.

- **Dispergier-Mechanismus**
  Stufenlos regelbare gekoppelte Pumpen-Rührer-Einheit.
  Stufenlos regelbare Ultraschallsonde.
- **Steuerung**
  Alle Funktionen werden mit der Systemsoftware gesteuert.
  Vollautomatische Bedienung über SOPs, manuelle Bedienung über am Bildschirm angezeigte Dialogfelder.
  Mit Autosampler kompatibel.

- **Typische Anwendungen**
  Pharmazeutische Produkte, Chemikalien, Lebensmittel, Emulsionen.
- **Lösungsmittelkompatibilität**
  Das Zirkulationssystem besteht aus folgenden Materialien: Viton ® Fluorelastomer (Dichtungen), Glas, 316 Edelstahl und PTFE/Peek ®.

Datenblatt

Spezifikation

Die Hydro S ist für die Situationen vorgesehen, in denen nur wenig Probenmaterial vorhanden ist und eine Dispergiereinheit für Proben kleineren Volumens sinnvoll ist, um den Probenverbrauch auf ein Minimum zu beschränken und dabei gleichzeitig die Vorteile einer vollautomatischen Probendispergierung und -messung zu nutzen.

Dispergierungsart:	Nass
Fassungsvermögen:	50 - 120 ml.
Dispersion Mechanisms:	Continuously variable combined pump/stirrer. Continuously variable ultrasonics.
Betriebsmodi:	Automatisch über SOPs. Manuell über am Bildschirm angezeigte Dialogfelder.
Gewicht:	11 kg
Abmessungen:	Breite: 352 mm; Höhe: 332 mm; Tiefe: 355 mm
Stromversorgung:	100 - 120 V/200/240 V Wechselstrom 50/60 Hz, 240 VA
Maximale Partikelgröße:	Bis 600 µm, je nach Partikelform und -dichte .

Scirocco Trockendispergiereinheit

Viele Pulvermaterialien werden trocken verwendet, sowohl vom Endanwender als auch in weiteren Fertigungsprozessen. Einige Materialien, z. B. Zemente, Lebensmittel und Stärken verändern sich bei der Hydration. Die Partikelgrößenverteilung solcher Materialien sollte im Idealfall im trockenen Zustand gemessen werden.
Die Scirocco gewährleistet mit ihrer präzisen Steuerung der Zuführrate und des Dispergierungsdrucks (bis auf 0,02 bar/0,002 mpa genau) für den Benutzer eine unübertroffen hohe Reproduzierbarkeit. Aufgrund der abgedichteten Messzelle mit ausgeglichener Luftströmung und den optionalen Mikrovolumen-Zuführrinnen ist das Gerät für die Messung neuer Wirkstoffe in der pharmazeutischen Industrie besonders geeignet.

- **Dispergierungsart**
  Trocken

- **Dispergier-Mechanismus**
  Der Partikelfluss wird unter Verwendung einer Vibrationsrinne mit variabler Zuführrate geregelt.
  Die Dispersion wird durch Beschleunigung der Partikel in einem Druckluftstrom sowie durch Partikel- und Wandkollision erzielt.
  Regelung des Dispergierluftdrucks auf 0,02 bar genau über einen Bereich von 0 - 4 bar.

- **Steuerung**
  Automatisch über SOPs; manuell über am Bildschirm angezeigte Computer-Dialogfelder.

- **Typische Anwendungen**
  Pharmazeutische Produkte, Zement, Metallpulver, Mineralstoffe, Pulverlacke, Chemikalien, trockene Inhaltsstoffe.

- **Alternativen:**
  Eine keramische Venturieinrichtung für die Messung von abrasiven Stoffen und Zement ist erhältlich.

Datenblatt

Spezifikation

Die Scirocco gewährleistet mit ihrer präzisen Steuerung der Zuführrate und des Dispergierdrucks (bis auf 0,02 bar/0,002 Mpa genau) für den Benutzer eine unübertroffen hohe Reproduzierbarkeit.

Dispergierungsart:	Trocken, mit steuerbarer Luftströmung, steuerbarer Zuführrate und austauschbaren Zuführrinnen, die vom System automatisch erkannt werden.
Typische Anwendungen:	Trockene Pulver, pharmazeutische Wirkstoffe, Füllstoffe, Zement, Mehl, Pulverlacke
Dispergiermechanismen:	Der Partikelfluss wird unter Verwendung einer Vibrationsrinne mit variabler Zuführrate geregelt. Die Dispersion wird durch Beschleunigung der Partikel in einem Druckluftstrom, sowie Partikel- und Wandkollision erzielt. Regelung des Dispergierluftdrucks auf 0,02 bar genau über einen Bereich von 0 - 4 bar.
Betriebsmodi:	Automatisch über SOPs. Manuell über am Bildschirm angezeigte Computer-Dialogfelder. .
Gewicht:	11.7 kg.
Abmessungen:	Breite: 352 mm; Höhe: 332 mm; Tiefe: 355 mm
Maximale Partikelgröße:	Bis 2000 µm, je nach Partikelform und -dichte

SOP-Konzept der automatischen Steuerung der Partikelgrößenbestimmung

Die Mastersizer 2000 Software bietet eine benutzerfreundliche Umgebung zur präzisen Steuerung der wichtigsten Gerätefunktionen des Partikelgrößenanalysegeräts und dessen Probendispergiereinheiten.

Mit der Einführung des Mastersizer 2000 hat Malvern Instruments sein Konzept integrierter Makros, die als SOPs(Standard Operating Procedures) bezeichnet werden, konsequent umgesetzt. Die SOPs steuern und standardisieren die gesamte Messung, einschließlich der Erstellung standardisierter Berichte.

Die SOPs können in Minutenschnelle erstellt werden. Dabei wird der Benutzer von einem Assistenten (Wizard) unterstützt, der ihn durch die Optionen führt, von deren Auswahl eine erfolgreiche Messung abhängt. Jeder Schritt der Messung kann eingestellt werden: von der Dauer der Messung, über Beschriftungsprotokolle bis hin zur Einrichtung der Probendispergiereinheiten. Wenn verschiedene Einstellungen zur Auswahl stehen, ist ein Hinweis Button mit Tipps verfügbar, der den Benutzer bei der richtigen Auswahl der für seine Proben geeigneten Parameter unterstützt.

SOP-gesteuerte Parameter:

Auswahl der Dispergiereinheit
Die am besten geeignete Probendispergiereinheit wird ausgewählt.

Material
Auswahl der optischen Eigenschaften des Materials aus einer in der Software gespeicherten Datenbank der Brechungsindices

Berechnung
Je nach Bedarf Auswahl der Umrechnung auf Anzahl, Oberfläche oder Länge.

Ergebnisemulation
Der Benutzer hat die Möglichkeit, eine für die jeweilige Methode passende Datei des Ergebnisemulationsfaktors zu spezifizieren. Diese wendet vorherbestimmte Offsets auf das Ergebnis des Mastersizer 2000 an, um die Ergebnisse zu emulieren, die von einem anderen Instrument oder einem anderen Verfahren der Größenbestimmung zu erwarten sind. Die Ergebnisemulationsfaktor-Dateien werden von einem unabhängigen Dienstprogramm erstellt, das im Softwaremenü Tools verfügbar ist. Es vergleicht die Ergebnisse, die mit einem anderen Verfahren erzielt wurden, mit denen des Mastersizer 2000 und berechnet die für eine Emulation notwendigen Offsets.
So kann es zum Beispiel sein, dass ein Benutzer vorher Siebmessungen zur Steuerung eines Prozesses verwendet hat und die Siebe jetzt durch den Mastersizer ersetzen möchte. Wenn die Partikel nicht sphärisch sind, können die Ergebnisse des Mastersizer durchaus von den Siebergebnissen abweichen. Der Benutzer möchte jedoch eine der Siebung entsprechende Messung für Vergleichszwecke erhalten. Die Ergebnisemulation erfüllt diese Anforderung.

Modell
Verschiedene Modelle sind verfügbar, um die Ergebnisse in häufig auftretenden klar erkennbaren Messsituationen zu optimieren. Die meisten Messungen werden mit einem Universalmodell durchgeführt, jedoch sind auch Modelle für monomodale Verteilungen und mehrmodale Verteilungen verfügbar. Bei der Auswahl werden die Benutzer durch Piktogramme unterstützt, die den Typ der durch die Modelle zu optimierenden Partikelgrößenverteilungen darstelle

Beschriftungen

Das Ergebnisprotokoll kann je nach Anforderung des Labors konfiguriert werden. Verfügbare Optionen sind die automatische Erstellung unveränderbarer Beschriftungen, wie z. B. Angabe des Probenursprungs und der Herstellchargen, um den Bedienern die mehrmalige Eingabe zu ersparen. Außerdem steht eine Funktion für automatisches Inkrementieren zur Verfügung, die die Probenreferenznummer bei jeder Folgemessung einer Probe um eins erhöht. Dies spart Zeit und ist gleichzeitig eine Garantie, dass keine Ergebnisse gelöscht wurden oder verborgen sind, da derartige Vorgänge in einer Unterbrechung der Ziffernfolge zu erkennen wären.

Bedieneranweisungen

Anweisungen für Bediener können in zwei Phasen der Messung angezeigt werden - vor der Messung Hinweise bezüglich der Probenahme oder Probendispergierung und nach der Messung bezüglich notwendiger Maßnahmen zur Probenentsorgung oder anderen Maßnahmen.

Berichtsauswahl

Mehrere von Malvern entworfene Standardberichte stehen zur Auswahl. Kundenspezifische Berichte können mit dem unabhängigen Dienstprogramm Report Designer, das im Softwaremenü Tools verfügbar ist, erstellt werden.

Export

Es können Exportvorlagen erstellt werden. Diese ermöglichen dem Benutzer die Auflistung von Messparametern, die in andere Softwarepakete exportiert werden sollen.

Einstellungen der Dispergiereinheiten

Nassdispergiereinheiten: Pumpenleistung, Rührergeschwindigkeit, Ultraschallintensität und -dauer, automatische oder manuelle Tankfüllung.
Scirocco Trockendispergiereinheit: Probenzuführrate und Druck der Dispergierluft.

Messung

Hintergrund- und Probenmesszeiten, Aktivierung der Lichtabschwächung und automatischen Verdünnung. Einrichtung der Sauberkeits- und Messalarmgrenzen. Kalkulationen zur Qualität der Messung für die jeweiligen Ergebnisse.

Messzyklen

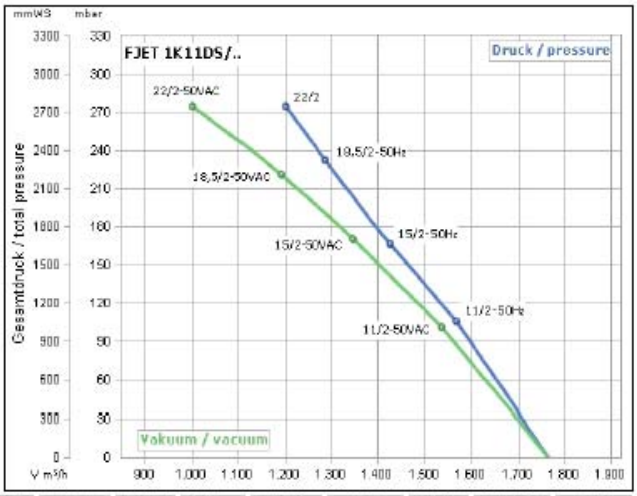
Anzahl der durchzuführenden Wiederholungsmessungen. Diese werden als "Aliquot" (jedes Aliquot ist eine frische Probe) und Messungen pro Aliquot bezeichnet.

14.5 Datenblatt des Seitenkanalverdichters

Seitenkanalverdichter/side channel blower

FJET 1K11DS/...

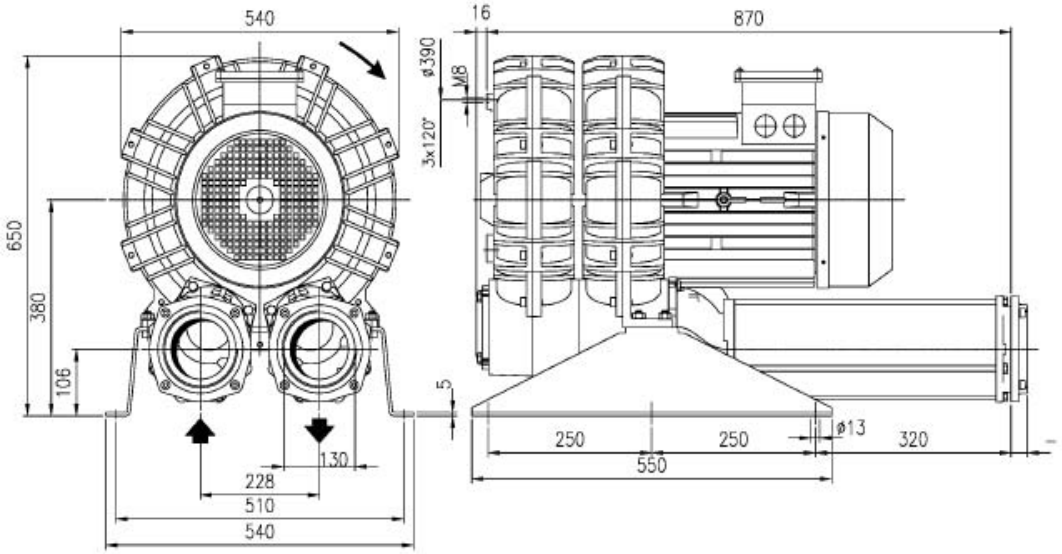
Creative Blower Austria



Technische Details / *features*

- **Laufrad und Gehäuse in Aluminium**
- **Geräuscharmer wartungsfreier Betrieb**
- **Zweistufiges Hochleistungs-Laufrad**
- **Motor IP55 ISO F**
- *casing and impeller made of alu*
- *low noise and maintenance-free*
- *douple stage high speed impeller*
- *motor IP55 ISO F*

Type-Sysnr. / type-Sysnr.	Volumenstrom / flow rate max [V m³/h]	Gesamtdruck / total pressure [mbar]	Spannung / voltage [Volt]	Frequenz / frequency [Hz]	Stromaufnahme / current [A]	Drehzahl / revolutions per minute [rpm]	Motorleistung / motor rating [kW]	Gewicht / weight [~kg]	Schalldruckpegel / noise level [dbA]	Motor / motore size
FJET 1K11DS/11/2-003435	1765	105	230/400	50Hz	0	2950	11	135	86	
FJET 1K11DS/15/2-004174	1765	165	230/400	50Hz	0	2950	15	146	87	
FJET 1K11DS/18,5/2-003436	1765	225	230/400	50Hz	0	2950	18,5	176	87	
FJET 1K11DS/22/2-003437	1765	275	230/400	50Hz	0	2950	22	186	88	
FJET 1K11DS/11/2-VAC-009779	1765	100	230/400	50Hz	0	2950	11	135	86	
FJET 1K11DS/15/2-VAC-009780	1765	160	230/400	50Hz	0	2950	15	146	87	
FJET 1K11DS/18,5/2-VAC-009781	1765	220	230/400	50Hz	0	2950	18,5	176	87	
FJET 1K11DS/22/2-VAC-009782	1765	275	230/400	50Hz	0	2950	22	186	88	



CreativeBlower Austria GmbH A-8380 Jennersdorf Tel. (+43) 3329-48822 0 Fax (+43) 3329-46922 e-mail:verkauf@cblower.at www.cblower.at
Alle Angaben ohne Gewähr. Technische Daten und Änderungen vorbehalten. Tol. ±5% Schalldaten ± 3 dB(A) bezogen auf Freifeldmessung
All data without guarantee! Technical data and subject to change. Tol. ± 5% sound data ± 3 dB(A) refer to measurement free field

14.6 PURAL NF Bestellschein

Gerd Mauschitz 30.07.2009

Von: "Peter Gaeng" <p.gaeng@filteq.de>
An: "Gaeng Peter Dr." <p.gaeng@filteq.de>
Gesendet: Freitag, 19. Jänner 2007 16:09
Betreff: Test dust Pural NF

Dear user of the VDI 3926 and ASTM D6830-02 filter testing method
and PURAL NF as test dust

we have aquired a considerable amount of the new Lot 686 of Pural NF
in order to distribut it also in smaller quantities than the manufacturer wants to deliver

We can deliver using the following packaging (please note the new prices):
30 kg Pural NF Lot 686 in plastic container - 16,50 EURO/kg
20 kg or less Pural NF Lot 686 in metal hobbock - 18 EURO/kg + 8 EURO for container
for bigger amounts please ask

The new lot is No. 686 and shows the following particle size distribution,
measured using a Malvern Mastersizer S in water with 2 min ultrasonic treatment:

	d10	d50	d90
lot 686	**1,2**	**4,6**	**15,5**

We also have in stock some residual amount of former test dust
Micro Calcilin (limestone) in 25 kg metal hobbocks as for 80 EURO per hobbock

Best regards
Peter Gaeng

Fil T Eq
Filtration Testing Equipment & Services GmbH
Dr. Peter Gaeng
General Manager
Amthausstr. 14
D-76227 Karlsruhe
Tel.: +49-721-4065-44
Fax: +49-721-4065-45

FILTER TESTING*DATA ACQUISITION*GAS CLEANING*POWDER HANDLING and DISPERSING

14.7 Partikelgrößenverteilung des verwendeten Teststaubes PURAL NF

MASTERSIZER 2000

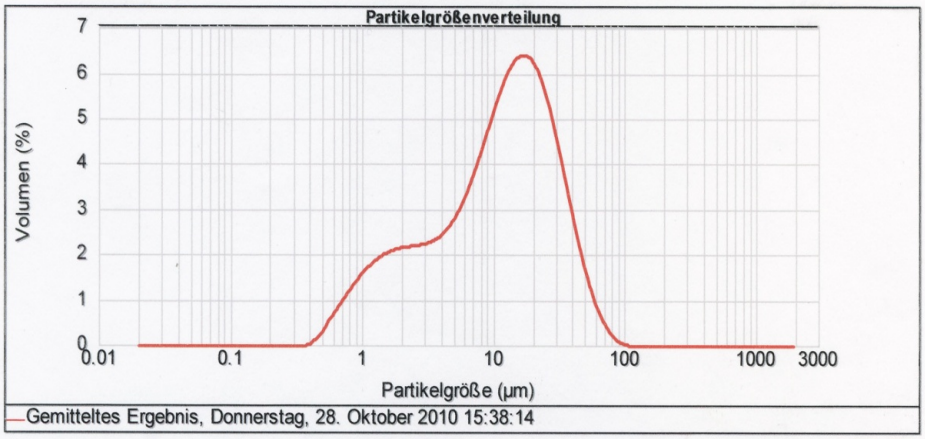
Analyse Report

Probenname:	Gemitteltes Ergebnis	**SOP Name:**	tauberKorund	**Gemessen:**	Donnerstag, 28.
Probenherkunft:	Factory	**Operator:**	jtauberUser	**Berechnet:**	Donnerstag, 28.
Probenreferenz:	13			**Datenursprung:**	Gemittelt

Probenmaterial:	Alumina	**Dispergiermodul:**	Hydro 2000S (A)	**Abschattung:**	18.66 %
Partikel RI:	1.780 **Absorption:** 0.1	**Analysemodell:**	Universal		
Dispergierfluid:	Wasser	**Meßbereich:**	0.020 to 2000.000 um	**Fit(gewichtet):**	0.902 %
Fluid RI:	1.330	**Emulation:**	Aus		

Konzentration:	0.0106 %Vol	**Vol. Mittelwert D[4,3]:**	15.100 um	**Spezifische Oberfläche:**	1.35 m²/g
Breite :	2.757	**Gleichförmigkeit:**	0.874	**D[3,2]:**	4.456 um
Verteilungsart:	Volumen				

d(0.1): 1.557 um **d(0.5):** 11.592 um **d(0.9):** 33.519 um



Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	1.62	11.482	5.29	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.75	13.183	5.61	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.84	15.136	5.77	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.91	17.378	5.74	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.95	19.953	5.50	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.97	22.909	5.06	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	1.99	26.303	4.47	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	2.03	30.200	3.76	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	2.10	34.674	3.01	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	2.22	39.811	2.28	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.12	4.365	2.40	45.709	1.62	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.34	5.012	2.66	52.481	1.07	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.59	5.754	3.00	60.256	0.65	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.82	6.607	3.41	69.183	0.35	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	1.05	7.586	3.88	79.433	0.13	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	1.27	8.710	4.38	91.201	0.03	954.993	0.00	10000.000	
0.091	0.00	0.955	1.46	10.000	4.87	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925			

Kommentar: *Mittelwert der 4-Messungen aus Korund fl*

Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel.: +44 (0) 1684-892456; Fax: +44 (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Version 5.12G
S/N: MAL1034369

Dateiname: Korund fl
Messdatensatz-Nr.: 18
28 Okt 2010 15:54:39

14.8 Partikelgrößenverteilung des abgeschiedenen Teststaubes PURAL NF

MALVERN INSTRUMENTS

MASTERSIZER 2000

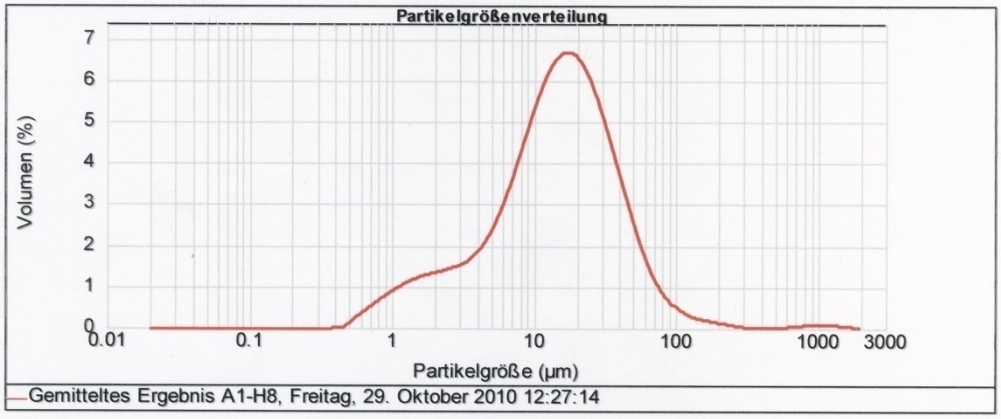
Analyse Report

Probenname:	Gemitteltes Ergebnis A1-H8	**SOP Name:**	tauberKorund	**Gemessen:**	Freitag, 29. Oktober
Probenherkunft:	Factory	**Operator:**	jtauber	**Berechnet:**	Freitag, 29. Oktober
Probenreferenz:	D1			**Datenursprung:**	Gemittelt

Probenmaterial:	Alumina	**Dispergiermodul:**	Hydro 2000S (A)	**Abschattung:**	18.44 %
Partikel RI:	1.780 **Absorption:** 0.1	**Analysemodell:**	Universal		
Dispergierfluid:	Wasser	**Meßbereich:**	0.020 to 2000.000 um	**Fit(gewichtet):**	0.879 %
Fluid RI:	1.330	**Emulation:**	Aus		

Konzentration:	0.0156 %Vol	**Vol. Mittelwert D[4,3]:**	26.943 um	**Spezifische Oberfläche:**	0.943 m²/g
Breite :	2.867	**Gleichförmigkeit:**	1.34	**D[3,2]:**	6.363 um
Verteilungsart:	Volumen				

d(0.1): 2.546 um **d(0.5):** 14.775 um **d(0.9):** 44.908 um



Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.95	11.482	5.50	120.226	0.26	1258.925	0.07
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.04	13.183	5.84	138.038	0.20	1445.440	0.05
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.12	15.136	6.02	158.489	0.17	1659.587	0.03
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.18	17.378	6.01	181.970	0.13	1905.461	0.01
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.23	19.953	5.81	208.930	0.10	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.27	22.909	5.44	239.883	0.06	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	1.33	26.303	4.94	275.423	0.03	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	1.41	30.200	4.34	316.228	0.02	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	1.53	34.674	3.70	363.078	0.01	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	1.72	39.811	3.05	416.869	0.01	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.01	4.365	1.99	45.709	2.42	478.630	0.02	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.16	5.012	2.35	52.481	1.84	549.541	0.03	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.31	5.754	2.79	60.256	1.34	630.957	0.05	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.45	6.607	3.31	69.183	0.97	724.436	0.07	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.59	7.586	3.89	79.433	0.69	831.764	0.08	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.72	8.710	4.47	91.201	0.49	954.993	0.08	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.84	10.000	5.03	104.713	0.35	1096.478	0.08		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925			

Kommentar: *Mittelwert der 16-Messungen aus Korund fl*

Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel.: +44 (0) 1684-892456; Fax: +44 (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Version 5.12G
S/N: MAL1034369

Dateiname: Korund fl
Messdatensatz-Nr.: 96
29 Okt 2010 14:38:12

14.9 Datenblatt der Vollkegel-Zweistoffdüse 1005 VSR

VSR

Anhang 9: Datenblatt der Vollkegel-Zweistoffdüse 1005 VSR

DUSTEX® Wasserdispersions- und Wasserbedüsungs-Systeme zur Niedernebelung von Industriestaub

DUSTEX® ...zur Niedernebelung von Industriestaub

Anlage ohne DUSTEX®

Anlage mit DUSTEX® im Einsatz

Staub, unübersehbar...

Ganze Produktionsanlagen müssen oft stillgelegt oder komplett gekapselt und einer Luftabsaugung unterworfen werden. Die Arbeiter werden sonst zu sehr gefährdet, die Umwelt oder die Nachbarn zu sehr belästigt. Der Trend verstärkt sich. Die Kriterien für zumutbaren Staub werden schärfer. Das Recht auf saubere Luft entwickelt sich.

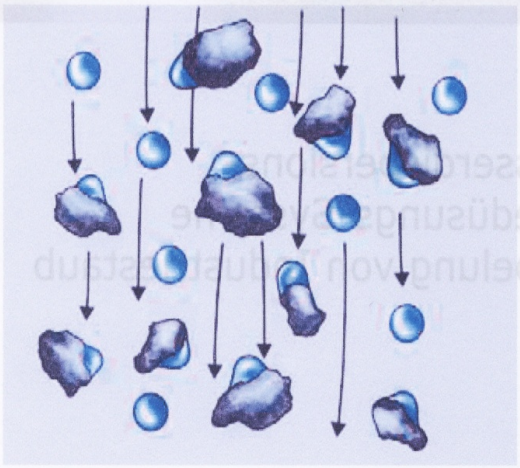
Durch das DUSTEX® System gibt es jetzt eine preisgünstige und wirkungsvolle Waffe gegen staubhaltige Luft.

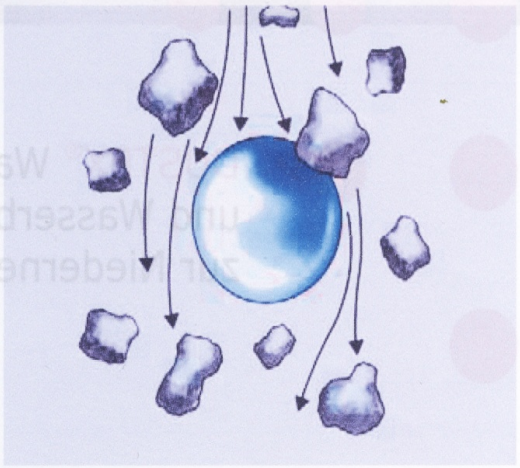
Man weiß seit langem, dass staubhaltige Luft durch die Benebelung mit feinsten Wassertropfen gereinigt werden kann. Dabei brauchen nicht einmal Benetzungsmittel verwendet zu werden.

Übliche Wasserdüsen, auch für feinste Tropfengrößen, haben aber ein ungleichmäßiges Tropfenspektrum, und sie erreichen vor allem nicht die notwendige Feinheit. Sie nässen und verschlammen mehr als sie nützen. Die Umgebung wird nasser als der feine Staub.

Selbst Hochdruckdüsen mit Drücken über 50 bar oder gar 300 bar helfen kaum. Sie erfordern zudem noch einen hohen Anlagenaufwand. Sie verschleißen und verstopfen schnell.

Große Wassertropfen haben eine größere Fluggeschwindigkeit und Oberflächenspannung. Sie können daher kaum mit den feinen Staubpartikeln zusammentreffen und mit diesen reagieren.





Der unterschiedliche Einfluss großer und feiner Wassertropfen auf das Staubbindeverhalten: Kleine Tropfen lagern sich an die Staubpartikel an, bilden Konglomerate und sinken ab, große Tropfen verdrängen lediglich die Staubpartikel.

DUSTEX® Dispersions- und Wasserbedüsungssysteme

DUSTEX® Wasserdispersionssysteme

Diese Systeme arbeiten mit Zweistoffdüsen bei geringen Drücken mit den Medien Wasser und Druckluft.

Wasser wird durch Luftdruck in einem Ultraschallfeld in mikrofeine Tropfen (10 bis 50 µm) vernebelt. Dadurch wird aus der versprühten Wassermenge eine maximale Tropfenanzahl und Tropfenoberfläche gewonnen.

Sie sind besonders geeignet, wenn:

- sehr niedrige Emissionswerte einzuhalten sind
- der Wasserverbrauch gering bleiben soll
- der Feuchtezusatz die Promillegrenze nicht überschreiten soll
- das Produkt später thermisch behandelt wird.

DUSTEX® Wasserbedüsungssysteme

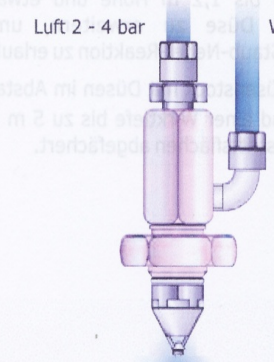
Diese Systeme arbeiten mit Einstoffdüsen, nur mit dem Medium Wasser.

Sie erzeugen bei Drücken von 4 bis 10 bar feine bis mikrofeine Tropfen.

Sie sind besonders geeignet wenn:

- niedrige Emissionswerte zu realisieren sind
- ein geringfügig höherer Wasserverbrauch nicht störend ist
- ein höherer Feuchteeintrag in das Produkt nicht störend oder sogar wünschenswert ist
- Anlagen nicht oder kaum gekapselt werden können
- das Produkt noch mehrfach umgeschlagen wird.

DUSTEX® Dispersionsdüse



DUSTEX® Wasserdüse

Winterbetrieb

Nebeltropfen unter 20 µm können nicht gefrieren. Das gilt ebenso für das DUSTEX®- Verfahren, das also auch bei Minustemperaturen wirksam ist. Zum Schutz vor Frostschäden im Stillstand muss das System lediglich beim Abschalten automatisch entwässert werden.

Während des Betriebes sind der Steuerschrank und die Wasserleitungen zu beheizen bzw. zu isolieren.

Dafür können wir geeignete Isolier- und Heizkomponenten anbieten.

DUSTEX® Einsatzbedingungen

Materialien und Einsatzgebiete:

Folgende Materialien kommen besonders häufig für eine DUSTEX®- Behandlung in Frage:

Kohle, Kohlenstaub, Erz, Gießereialtsand, Schotter, Sand, Kalk- und Bruchstein, Flugasche, chemische Produkte, Tonerde, Dünger, Agrarprodukte, Hausmüll.

Dies sind die Einsatzgebiete:

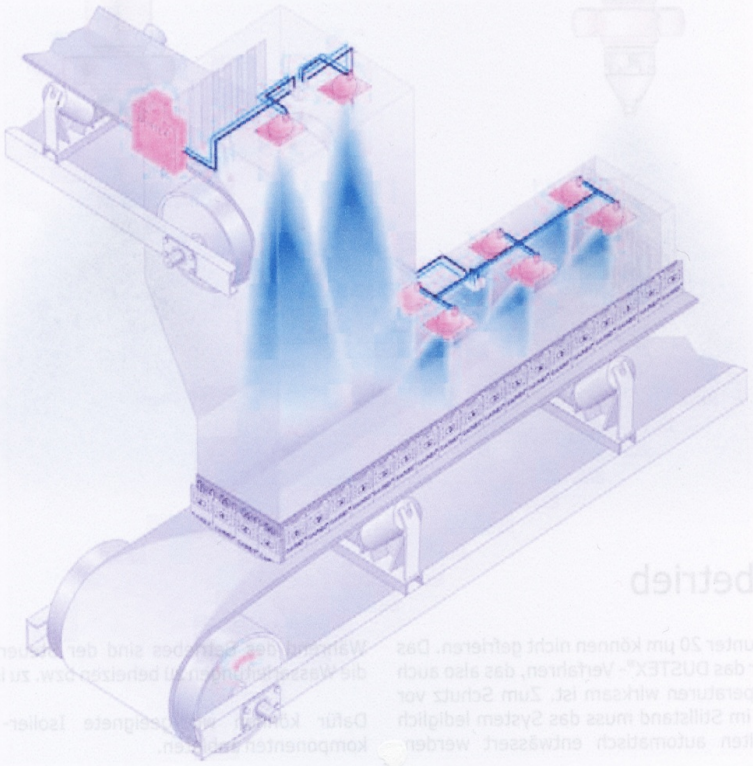
- Anlagen zur Materialbehandlung
  Brecher, Siebe, Mischer, Pelletisierer, Klassierer und Förderbandübergaben
- Anlagen zur Materialaufgabe
  Auffüllen von Lagerhalden und Kippbunkern, Schiffsbeladung mit Teleskopschurren, Fahrzeugbeladung aus Silos
- Silos, Lagerhallen, Materialdepots, Werkstätten
  bei denen zur Sicherheit, zur Inspektion oder für andere Arbeiten Staub beseitigt werden muss
- Brandgefahr, Staubexplosions-Schutzzonen
  Beseitigung der kritischen Bedingungen zur Brand- und Explosionsentstehung und Brandweiterleitung
- Chemische und biologische Verfahren
  Versprühen von Aerosolen oder Wasser mit Additiven zur Gasreinigung oder zur Beseitigung von Gerüchen.

Auslegung:

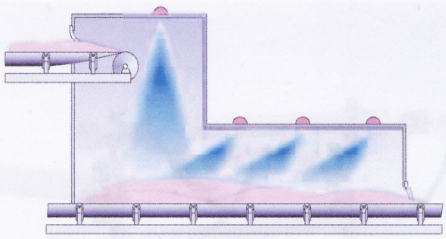
Für den gewünschten Luft-Rreinhaltungseffekt ist einerseits eine ausreichende Wasservernebelungsrate mit den optimalen Tropfengrößen sowie die Aufteilung auf die entsprechende Zahl an Düsen notwendig.

Andererseits kann ein guter Effekt nur auftreten, wenn der keulenförmig aus den Düsen austretende Nebelstrom raumfüllend ausgerichtet werden und sich möglichst störungsfrei über eine genügende Zeit mit dem Staub vermischen und auf ihn einwirken kann. Das wird durch folgende Maßnahmen erreicht:

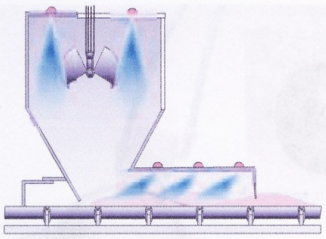
- In den strömungsgünstigen Nebelköpfe aus Edelstahl lässt sich der Sprühwinkel der DUSTEX®-Düsen durch Verdrehen der Winkeladapter um 60° verstellen, ohne die Einbaulage der Nebelköpfe zu verändern
- Durch Kapselung und andere Maßnahmen wie Leitbleche und Schürzen muss die Luftströmung auf unter 0,5 m/sec reduziert und umgelenkt werden
- Die Kapselung ist möglichst auf einem Reaktionsraum von 0,4 bis 1,2 m Höhe und etwa 1 m³ Volumen pro Düse zu erweitern, um eine ausreichende Staub-Nebel-Reaktion zu erlauben
- Durch einen Düsenstock mit Düsen im Abstand von etwa 0,5 m und einer Wirktiefe bis zu 5 m werden große Staubaustrittsflächen abgefächert.



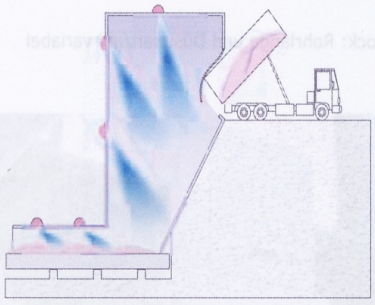
DUSTEX® Einsatzbeispiele



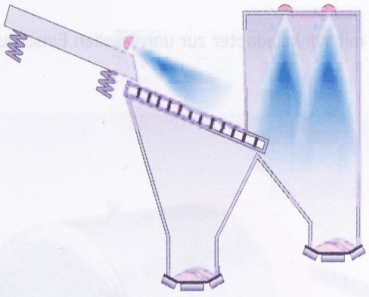
Förderbandübergaben / conveyor belt transfers



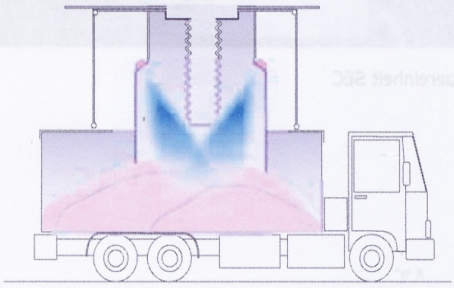
Greiferbetrieb / grab operation



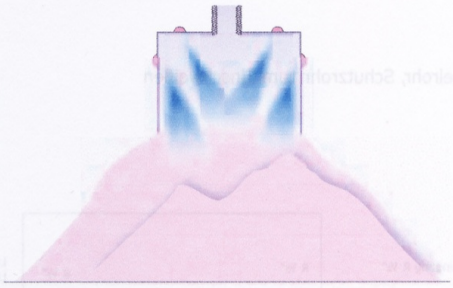
LKW-Kippbunker / tip-truck bunkers



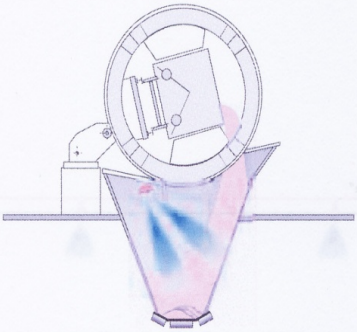
Siebe / screens, sieves



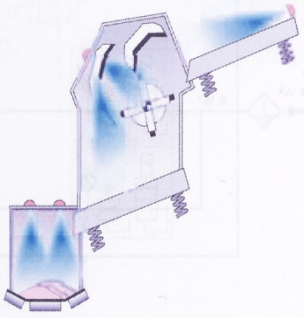
LKW-Beladung / truck loading



Schiffsbeladung / ship loading, stockpiling

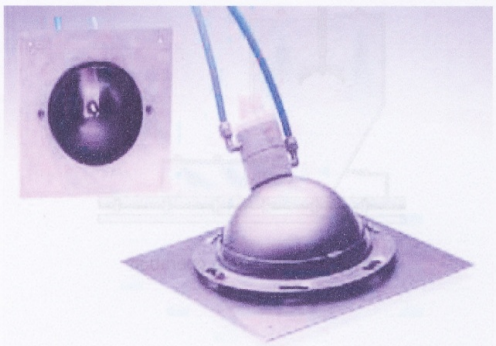


Waggonkippanlagen / railway pit bins

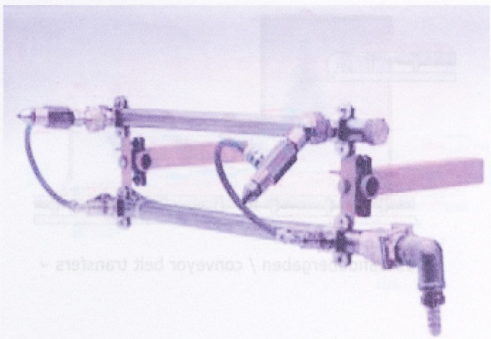


Brecher / crusher

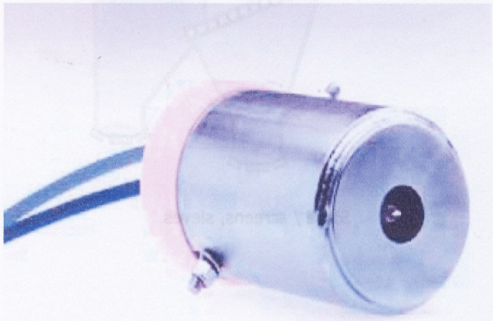
DUSTEX® Komponenten



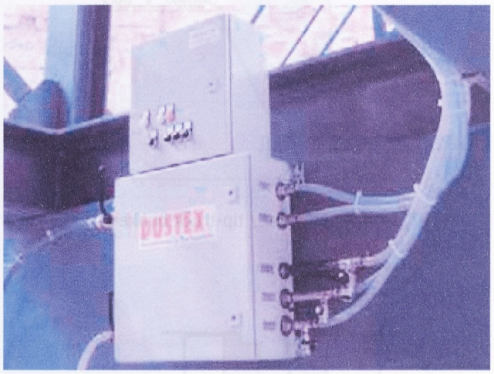
Nebelkopf mit Winkeladapter zur universellen Einstellung



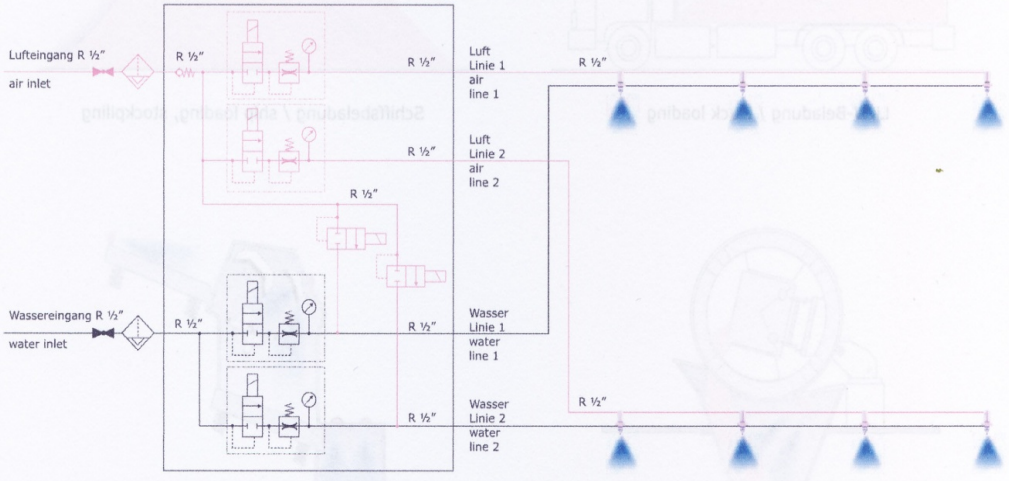
Düsenstock: Rohrlänge und Düsenanzahl variabel



Nebelrohr, Schutzrohr zum Einschweißen



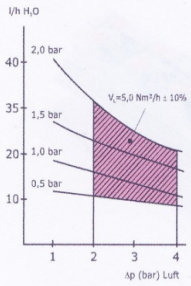
Steuereinheit SEC



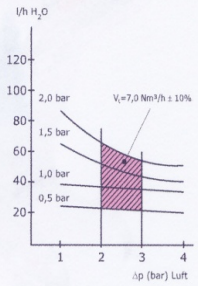
Schema für DUSTEX® Dispersionssysteme mit 2 separat steuer- und regelbaren Bedüsungslinien.
Bei DUSTEX® Wasserbedüsungssystemen entfallen die Luftlinien.

DUSTEX® Dispersionsdüsen, Medienverbrauch

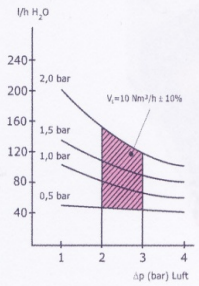
Dispersionsdüse 1005
für kleine Anlagen mit geringem Materialdurchsatz



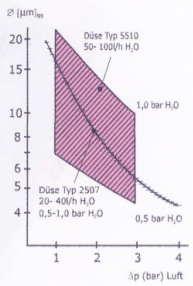
Dispersionsdüse 2507
für Normaleinsatz in gekapselten Anlagen



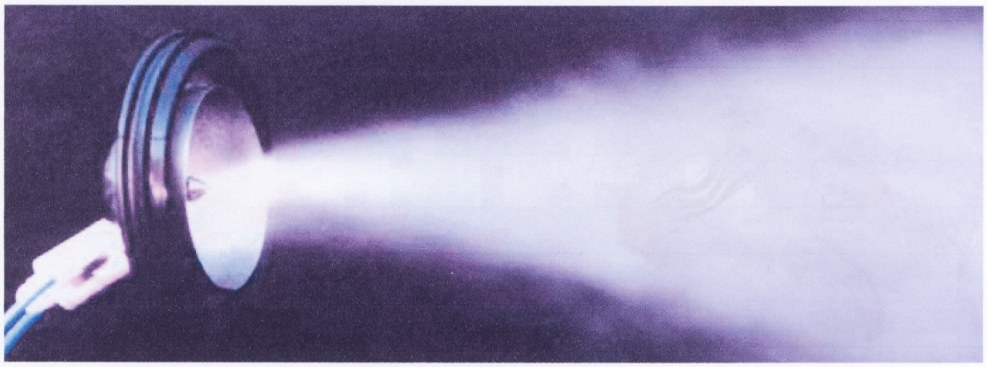
Dispersionsdüse 5510
für Großanlagen sowie ungekapselte Anlagen



Tropfenspektrum



Luftverbrauch (Nm³/h) und vernebelte Wassermenge (l/h) als Funktion des Luftdruckes bei verschiedenen Wasserdrücken (bar) im Schaltschrank, mit 3 m Schlauch 8 x 1 mm gemessen.



DUSTEX®-Dispersionsdüsen sind in 3 Größen, mit druckabhängigen Wasserdurchsätzen von 5 - 120 l/h erhältlich. Der Wasserdruck wird auf 0,5 - 2 bar geregelt. Der übliche Durchsatzwert der Dispersionsdüse 2507 liegt bei 25 l/h (Einstellwerte: 0,5 bar Wasserdruck / 2 bar Luftdruck). Der Druckluftdurchsatz je Düse beträgt 5 - 12 Nm³/h bei 2 - 4 bar.

Für DUSTEX® Wasserbedüsungssysteme stehen Einstoffdüsen mit beliebig hohen Wasserdurchsatzmengen zur Verfügung.

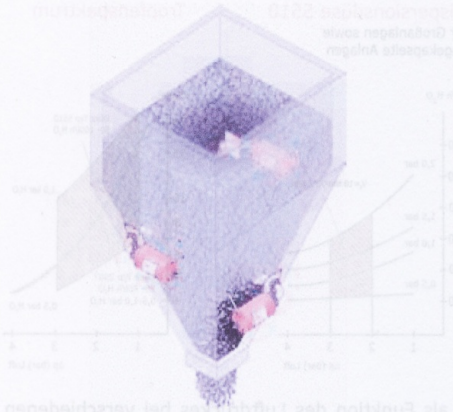
Die Vorteile auf einen Blick

- Verblüffend hohe Wirksamkeit, oft auch bei nahezu „unlösbaren" Problemfällen
- Geringer Verbrauch an Wasser und Druckluft
- Wasserzusatz von häufig nur 1 Liter pro 1 t Material
- Geringer Installationsaufwand
- Robuste, universelle und leicht zu wartende Systemkomponenten
- Frostschutzeinrichtung gegen Störungen im Tieftemperatureinsatz
- Selbstreinigung der Düsen durch Ultraschalleffekt

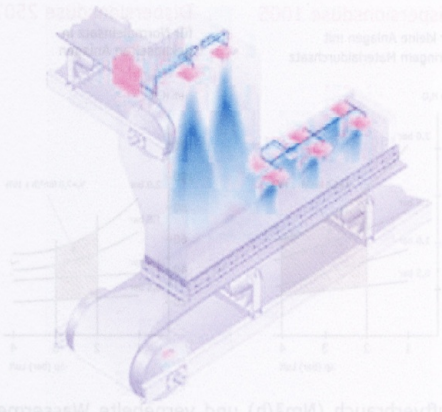
Entscheiden Sie sich für mehr Sauberkeit und Umweltschutz!
Fordern Sie die Spezialisten von VSR Industrietechnik GmbH an!

Die Anlagen werden bei spezieller Vereinbarung innerhalb von 4 Wochen nach Lieferung oder Montage franko zum Rechnungspreis zurückgenommen, falls die Wirkung nicht zufriedenstellend ist.

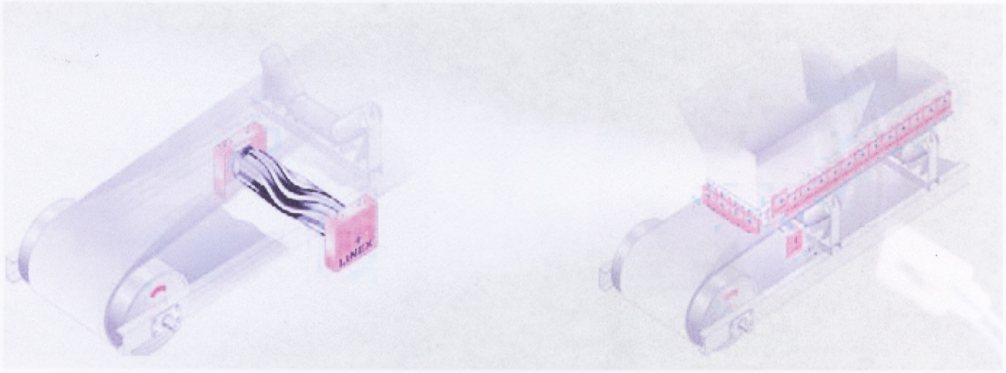
Produktprogramm



VSR BLASTER® Luftkanonen und Luftinjektoren

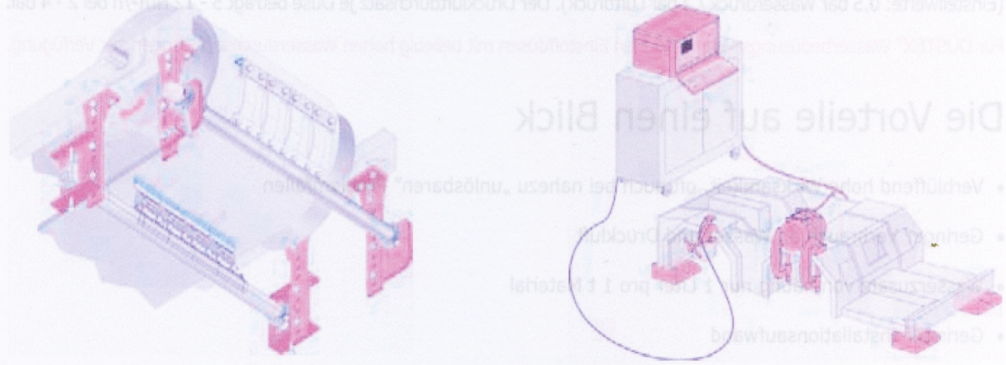


DUSTEX® Staubniedernebelungssysteme



LINEX® Förderbandzentrierrollen

CAREX® Schurrenabdichtung



VIBREX® Förderbandabstreifer

VIBMATIC 6000® Vibrationsentspannungssystem zur Reduzierung von Eigenspannungen

VSR

VSR Industrietechnik GmbH
Am Alten Schacht 6
D- 47198 Duisburg
Tel. +49 (0) 20 66 / 99 66-30
Fax +49 (0) 20 66 / 99 66-62

Internet: www.vsr-industrietechnik.de E-mail: info@vsr-industrietechnik.de

© VSR Industrietechnik GmbH 2/2007
Technische Änderungen vorbehalten

14.10 Lebenslauf des Verfassers

Lebenslauf

PERSÖNLICHE INFORMATIONEN

Anrede	**Herr**
Vorname	**Jörg**
Nachname	**Faschingleitner**
Geburtsdatum	**020283**
Nationalität	**Österreich**
Telefon (privat)	**43 732 372911**
Telefon (geschäftlich)	**43 664 1127176**
Mobil	**43 664 1127176**
E-Mail	**e0325698@student.tuwien.ac.at**

ANSCHRIFT

Anschrift 1

Adressart	**Privat**
Straße/Hausnummer	**Vogelfängerweg /50**
Postleitzahl, Ort	**4030 Linz**
Land	**Österreich**

SCHULAUSBILDUNG

Schultyp	**Höhere technische Bundeslehranstalt für chemische Betriebstechnik**
Schulabschluss	**Matura**
Notenschnitt	**1,0**
Abschlussdatum	**07 / 2002**

PRÄSENZDIENST

Einheit	**schwere Jägerkompanie als Granatwerfer Gruppenkommandant**
Dauer	**2002/2003**

STUDIUM/STUDIENABSCHNITTE

Studium 1

Hochschule	**Vienna University of Technology/ University of Washington Seattle/Jinan Jianzhu University PR China**
Beginn	**10 / 2003**
(Voraussichtl.) Ende	**06 / 2011**
Abschluss	**PhD**
Fach	**Maschinenbau/Verfahrenstechnik, Technische Chemie**

STIPENDIEN

Stipendium 1

Stipendiumgeber	**Sonstiges: TASSEP**
Beginn	**09 / 2006**
Ende	**07 / 2007**

MITGLIEDSCHAFTEN

Seit 2008	**INITS (Innovation into Business) Universitäres Gründungsservice**
Seit 2008	**TUtheTOP: Das High Potential Program der TU Wien**
Seit 2008	**VDI (Verband Deutscher Ingenieure)**
Seit 2009	**SAVT (Studenten und Absolventen der TU Wien) Vorstandsmitglied (Rechnungsprüfer)**

AUSZEICHNUNGEN

INITS award 2008 (Gesamtwert 13.500 €) für Innovative Ideen (für meine Diplomarbeit in China)

Ehrendiplom der staatlichen Bergbauuniversität St. Petersburg sowie Auszeichnung als bester "Graduate Student" (Stipendium und Studienberechtigung in Russland)

SPRACHKENNTNISSE

Deutsch	**Muttersprache**
Englisch	**Fließend**

BERUFSERFAHRUNG

Berufserfahrung 1

Unternehmen	**Asota**
Stadt	**Linz**
Land	**Österreich**
Art Ihrer Berufserfahrung	**Werkstudent**
Position	**Qualitätssicherung**
Aufgaben	**Rohmaterialqualitätskontrolle bei Anlieferung** **Qualitätskontrolle in der Produktion**
Beginn	**07 / 1999**
Ende	**08 / 1999**

Berufserfahrung 2

Unternehmen	**Voest Alpine**
Stadt	**Linz**
Land	**Österreich**
Art Ihrer Berufserfahrung	**Werkstudent**
Position	**Arbeiter**
Aufgaben	**Stopfen des Hochofens nach Anstich, Schlackenabfüllung in Güterwagen (3monate 2003)** **Kaltwalzwerk einspannen der Bleche in Walzwerk (1Monat 2001)**
Beginn	**07 / 2001**
Ende	**10 / 2003**

Berufserfahrung 3

Unternehmen	**DSM Fine Cemicals**
Stadt	**Linz**
Land	**Österreich**
Art Ihrer Berufserfahrung	**Werkstudent**
Position	**Qualitätssicherung**
Aufgaben	**Qualitätssicherung in der pharmazeutischen Produktion nach GMP**
Beginn	**07 / 2004**
Ende	**09 / 2004**

Berufserfahrung 4

Unternehmen	**Borealis**
Stadt	**Linz**
Land	**Österreich**
Art Ihrer Berufserfahrung	**Werkstudent**
Position	**Forschung und Entwicklung/Anlagenbau**
Aufgaben	**Untersuchung der Prozesstechnischen verbesserung der Färbungsmöglichkeiten von Autoamaturebrettern**
Beginn	**07 / 2007**
Ende	**09 / 2007**

Berufserfahrung 5

Unternehmen	**Agrolinz Melamin**
Stadt	**Linz**
Land	**Österreich**
Art Ihrer Berufserfahrung	**Werkstudent**
Position	**Qualitätskontrolle**
Aufgaben	**Qualitätskontrolle der Produktion von Melaminverharzten Verbundelemeten**
Beginn	**07 / 2006**
Ende	**08 / 2006**

Berufserfahrung 6

Unternehmen	**Neuber**
Stadt	**Traun**
Land	**Österreich**
Art Ihrer Berufserfahrung	**Werkstudent**
Position	**Arfbeiter in Chemikalienabfüllung**
Aufgaben	**Abfüllen von Angelieferten Chemikalien in Tanks oder Güterwaggons**
Beginn	**07 / 1998**
Ende	**09 / 1998**

Berufserfahrung 7

Unternehmen	**TU Wien**
Stadt	**Wien**
Land	**Österreich**
Art Ihrer Berufserfahrung	**Projektassistent**
Position	**Projektassistent**
Aufgaben	**Abhalten von Tutorien und Seminaren sowie erstellen von Gutachten für die Industrie**
Beginn	**06/2008**
Ende	**06/2011**

14.11 Publikationsliste des Verfassers

Zeitschriftenartikel:

1. J. Faschingleitner, W. Höflinger:
"*Evaluation of primary and secondary fugitive dust suppression methods using enclosed water spraying systems at bulk solids handling*"; Advanced Powder Technology, **22** (2011), S. 236 - 244.

2. J. Faschingleitner, W. Höflinger:
"*Schüttgutbefeuchtung durch Sprühdüsen zur Unterdrückung diffuser Staubemissionen*"; Chemie Ingenieur Technik, **83** (2011), 5; S. 714 - 719.

Vorträge und Posterpräsentationen (mit Tagungsband-Eintrag):

1. J. Faschingleitner, W. Höflinger:
"*Bulk solids moistening with spray nozzles for fugitive dust supression*";
Vortrag: 6th European Meeting on Chemical Industry and Environment (EMChIE 2010), Mechelen, Belgien; 17.05.2010 - 19.05.2010; in: "*EMChIE 2010 Conference Proceedings (Vol.2)*", (2010), ISBN: 9789081548601; S. 677 - 688.

2. J. Faschingleitner, W. Höflinger:
"*Fugitive dust suppression by optimized bulk solids moistening*";
Vortrag: FILTECH 2011, Wiesbaden, Deutschland; 22.03.2011 - 24.03.2011; in: "*Proceedings Vol. II FILTECH 2011*", (2011), 978-3-941655-037-9; S. 193 - 200.

3. J. Faschingleitner, W. Höflinger, M. Harasek, C. Jordan, J. Gospodarek, A. Purgar, J. Wolfslehner, K. Leibrecht:
"*Berechnungsmethoden zum Abscheiden von Staubwolken*";
Vortrag: 6.Minisymposium Verfahrenstechnik, IFA Tulln; 24.06.2010 - 25.06.2010; in: "*6.Minisymposium Verfahrenstechnik Tagungsband*", (2010), ISBN: 978-3-900962-88-3; S. 11 - 21.

4. J. Faschingleitner, W. Höflinger, G. Mauschitz:
"*Clarification of Significant Mechanisms for Dust Suppression with Water Sprays in Enclosed Bulk Solid Systems*";
Vortrag: World Congress on Particle Technology (WCPT6 2010), Nürnberg, Deutschland; 26.04.2010 - 29.04.2010; in: "*WCPT6 2010 - Abstracts and Proceedings*", (2010), ISBN: 978-3-00-030570-2; 4 S.

5. J. Faschingleitner, W. Höflinger, G. Mauschitz, Z. Liu, G. Zhang:
"*Unterdrückung diffuser Feinstaubemissionen mittels Düsensprays*";
Vortrag: 5.Minisymposium Verfahrenstechnik, Wien; 24.06.2009 - 25.06.2009; in: "*5.Minisymposium Verfahrenstechnik - Tagungsband*", (2009), ISBN: 978-3-9502731-0-6; S. 201 - 205.

6. J. Faschingleitner, W. Höflinger, G. Mauschitz, Z. Liu, G. Zhang:
"*Unterdrückung diffuser Feinstaubemissionen mittels Düsensprays*";
Poster: 5.Minisymposium Verfahrenstechnik, Wien; 24.06.2009 - 25.06.2009; in: "*5.Minisymposium Verfahrenstechnik - Tagungsband*", (2009), ISBN: 978-3-9502731-0-6; S. 201 - 205.

7. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Fugitive dust suppression using water spraying systems with low water consumption in enclosed systems*";

Vortrag: FILTECH 2009, Wiesbaden Deutschland; 13.10.2009 - 15.10.2009; in: "*Procedings*", (2009), S. 349 - 356.

8. W. Höflinger, J. Faschingleitner, G. Mauschitz, Z. Liu, G. Zhang:
"*Influence of Water Evaporation on Dust Minimisation Efficiency using Enclosed Water Spraying Systems*";
Vortrag: 6th International conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, Brisbane, Australien; 03.08.2009 - 07.08.2009; in: "*Proceedings CHOPS*", (2009), 6 S.

9. J. Faschingleitner, W. Höflinger:"Fugitive dust suppression at bulk solids handling in the minimg industry using water spraying systems" Vortrag: International conference "Probleme der Ausnutzung von Bodenschätzen" Russia, St. Petersburg; 22.04.2011 - 24.04.2011; in: "*Proceedings* Probleme der Ausnutzung von Bodenschätzen ", (2011), 2 S.

10.

Vorträge und Posterpräsentationen (ohne Tagungsband-Eintrag):

1. J. Faschingleitner, W. Höflinger:
"*Ermittlung der Feinstaub-Emissionsfaktoren von Förderbandübergabestellen bei verschiedenen Betriebs- und Bedüsungsparametern bei Wasserbesprühung*";
Vortrag: ProcessNet - Jahrestreffen der Fachausschüsse Gasreinigung und Hochtemperaturtechnik, Frankfurt am Main, Deutschland; 17.02.2011 - 18.02.2011.

2. J. Faschingleitner, W. Höflinger:
"*Schüttgutbefeuchtung durch Sprühdüsen zur Unterdrückung diffuser Staubemissionen*";
Poster: Jahrestreffen der ProcessNet- Fachausschüsse "Agglomerations- und Schüttguttechnik", "Zerkleinern und Klassieren" und "Mischvorgänge", Fulda, Deutschland; 22.02.2010 - 23.02.2010.

3. J. Faschingleitner, W. Höflinger:
"*Staubunterdrückung bei Schüttgütern durch Sprühdüsen - Berechnungsmodelle für die Schüttgutbenetzung*";
Poster: Jahrestreffen der ProcessNet-Fachausschüsse Energieverfahrenstechnik und Gasreinigung, Dortmund; 17.03.2010 - 18.03.2010.

4. J. Faschingleitner, W. Höflinger:
"*Verdampfungseinflüsse bei der Unterdrückung diffuser Feinstaubemissionen mittels eingehausten wassersparenden Düsensprays*";
Vortrag: Processnet Jahrestreffen des Fachausschusses "Gasreinigung", Frankfurt; 30.03.2009 - 31.03.2009.

5. J. Faschingleitner, W. Höflinger:
"*Verwendung von materialspezifischen Emissionsfaktoren von einer Schüttgutfallapparatur zur Optimierung der Staubunterdrückung bei der Förderbandbedüsung*";
Vortrag: ProcessNet -Jahrestreffen der Fachausschüsse Agglomerations- und Schüttguttechnik sowie Trocknungstechnik, Hamburg, Deutschland; 14.03.2011 - 15.03.2011.

6. J. Faschingleitner, W. Höflinger, M. Harasek, C. Jordan, J. Gospodarek, A. Purgar, J. Wolfslehner, K. Leibrecht:
"*Berechnungsmethoden zum Abscheiden von Staubwolken*";
Poster: 6.Minisymposium Verfahrenstechnik, IFA Tulln; 24.06.2010 - 25.06.2010.

7. J. Faschingleitner, W. Höflinger, G. Mauschitz, Z. Liu, G. Zhang:
"*Unterdrückung diffuser Feinstaubemissionen bei Schüttgutmanipulation mittels eingehausten wassersparenden Düsensprays unter Verdunstungsberücksichtigung*";
Poster: Processnet Jahrestreffen des Fachausschusses "Agglomerations- und Schüttguttechnik", Bad Dürkheim, Deutschland; 11.03.2009 - 13.03.2009.

Diplom- und Master-Arbeiten (eigene und betreute):

1. J. Faschingleitner:
"*Model verification of water spray suppression of fugitive dust emission using different bulk solids and droplet sizes*";
Betreuer/in(nen): W. Höflinger, G. Mauschitz; Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2008.

2. J. Gospodarek:
"*Fluid dynamical analysis of encased dust systems with implemented two-phase nozzle sprays for the purpose of fugitive dust suppression*";
Betreuer/in(nen): R. Stank, W. Höflinger, M. Harasek, J. Faschingleitner, C. Jordan; Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2010; Abschlussprüfung: 21.04.2010.

3. J. Wolfslehner:
"*Untersuchung der Emissionsminderung bei Schüttgutmanipulation durch Schüttgutdurchfeuchtung mittels Restmelasse*";
Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner; Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2011.

Bachelorarbeiten (eigene und betreute):

1. K. Leibrecht:
"*Berechnung des Feinstaubabscheidegrades von Zweistoffdüsen bei unterschiedlichen Strömungssituationen*";
Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner; Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2009.

2. A. Purgar:
"*Komponenten und Auswertemöglichkeiten eines Prüfstandes zur Untersuchung von Staubabscheidung mittels Zweiphasensprüh*";
Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner, G. Mauschitz; Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2009.

3. J. Wolfslehner:
"*Unterdrückung diffuser Staubemissionen mittels Zweiphasensprühs*";
Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner, G. Mauschitz; Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2009.

4. J. Tauber: *„Ermittlung von Befeuchtungs- und Staubabscheidefeldern zur Unterdrückung diffuser Staubemissionen*", Bachelorarbeit TU-Wien, Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner, Wien, 2011

5. G.Kanitschar: *„Optimierung von Düsenparametern zur Befeuchtung von Schüttgut auf Förderbändern*", Bachelorarbeit TU-Wien, Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner, Wien, 2010

6. G. Hofer: *„Schüttgutbefeuchtung mittels Zweistoffdüsen*", Bachelorarbeit TU-Wien, Betreuer/in(nen): W. Höflinger, J. Faschingleitner, Wien, 2011

Wissenschaftliche Berichte:

1. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung einer Chromoxidgrün Pulverprobe*";
Bericht für TGM - Technisches Gewerbe Museum; Berichts-Nr. 2009/11-001, 2009; 23 S.

2. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung einer Flugkoks-Pulverprobe*";
Bericht für Prüflabor für Feuerungsanlagen; Berichts-Nr. 2009/12-001, 2009; 7 S.

3. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung einer mikroverkapselten lamda-Cyhalothrin Formulierung*";
Bericht für Microencapsulation; Berichts-Nr. 2011/01-001, 2011; 8 S.

4. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung einer Olivin-Pulverprobe*";
Bericht für ZET - Projekt Unique; Berichts-Nr. 2009/12-002, 2009; 21 S.

5. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung eines berollten (ULF) DB-Sandes*";
Bericht für Wiener Linien; Berichts-Nr. 2008/07-004, 2008; 6 S.

6. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung heller Füllstoffe*";
Bericht für Semperit; Berichts-Nr. 2009/04-002, 2009; 53 S.

7. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung heller Füllstoffe*";
Bericht für Semperit; Berichts-Nr. 2009/05-001, 2009; 10 S.

8. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung heller Füllstoffe*";
Bericht für Semperit; Berichts-Nr. 2009/01-001, 2009; 18 S.

9. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung partikulärer Verunreinigungen einer Brunnenwasserprobe*";
Bericht für Krems Chemie; Berichts-Nr. 2011/03-001, 2011; 7 S.

10. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung von Branntkalk-(CaO)-pulver*";
Bericht für Envirgy,Environment Energy Engineering and Construction GmbH; Berichts-Nr. 2008/10-002, 2008; 9 S.

11. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung von Branntkalk-(CaO)-pulver*";
Bericht für Envirgy,Environment Energy Engineering and Construction GmbH; Berichts-Nr. 2008/10-001, 2008; 8 S.

12. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung von FCC-Katalysator Pulverproben*";
Bericht für Wirbelschicht- und Raffinerietechnik AG; Berichts-Nr. 2010/02-001, 2010; 23 S.

13. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung von FCC-Katalysator Pulverproben*";

Bericht für AG Wirbelschicht- und Raffinerietechnik; Berichts-Nr. 2010/08-001, 2010; 17 S.

14. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung von Flugkoks Pulverproben*";
Bericht für Prüflabor für Feuerungsanlagen; Berichts-Nr. 2010/07-001, 2010; 14 S.

15. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung von Katalysatorproben auf unterschiedlichen Trägermaterialien*";
Bericht für Projekt CLC; Berichts-Nr. 2011/05-002, 2011; 15 S.

16. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Korngrößenverteilung von OXYFUEL Pulverproben*";
Bericht für Projekt Oxyfuel; Berichts-Nr. 2010/07-002, 2010; 27 S.

17. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Bestimmung der Tropfengrößenverteilung von Haar- und Deosprays*";
Bericht für Dalli; Berichts-Nr. 2009/04-001, 2009; 23 S.

18. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Size analysis of Particles at Chemical Looping*";
Bericht für Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften; Berichts-Nr. 2009/08-001, 2009; 48 S.

19. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Partikelgrößenanalyse von Ascheproben*";
Bericht für Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften; Berichts-Nr. 2011/05-003, 2009; 28 S.

20. J. Faschingleitner, G. Mauschitz, W. Höflinger:
"*Partikelgrößenanalyse von FCC Bettmaterial*";
Bericht für Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften; Berichts-Nr. 2009/05-004, 2011; 18 S.

15 Appendix

The following Visual Basic program was written to prepare the data exported from Fluent to be imported into MATLAB:

```
Sub Formatierung()



Dim Dateifilter As String

Dim Dateiname   As Variant

Dim Dateiname2  As Variant

Dim dateitext   As String

Dim i          As Long

Dim x          As Long

Dim FileSize    As Integer

Dim Pfad

Dim Arr()



Dateifilter = "Excel-Arbeitsmappen (*.txt),*.txt"

Dateiname = Application.GetOpenFilename(Dateifilter)


      If Dateiname <> False Then

     MsgBox (Dateiname)

  End If


Workbooks.OpenText Filename:= _
```

```
        Dateiname _
        , Origin:=xlMSDOS, StartRow:=1, DataType:=xlFixedWidth, FieldInfo:= _
        Array(Array(0, 1), Array(2, 1), Array(16, 1), Array(27, 1), Array(40, 1), Array(53, 1), _
        Array(66, 1), Array(79, 1), Array(92, 1), Array(104, 1), Array(118, 1), Array(130, 1)), _
        TrailingMinusNumbers:=True

Columns("A:A").Select
    Selection.ClearContents

Columns("L:L").Select
    Selection.ClearContents

Range("B1:K2").Select
    Selection.ClearContents

Range("B3:K3").Select
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select

Selection.Cut

Range("A1").Select
    ActiveSheet.Paste



Dateiname2 = InputBox("Bitte gewünschten Dateiname eingeben")

Pfad = Application.GetSaveAsFilename(InitialFileName:=Dateiname2, _
    fileFilter:="Textdateien (*.txt), *.txt")
```

```
Open Pfad For Output As #1
   i = 1
   Do While Cells(i, 1).Value <> "" '+1
      ReDim Arr(i)
      For x = 1 To 10
         Arr(i) = Arr(i) & Cells(i, x) & ";" '+1
      Next x
      'mittels Left das letzte ";" abschneiden
      Print #1, Left(Arr(i), Len(Arr(i)) - 1)
      i = i + 1
   Loop
   Close #1

End Sub

'Application.Dialogs(xlDialogSaveAs).Show "C:\" & Dateiname2



'ChDir "C:\Dokumente und Einstellungen\User\Desktop\matlab_fluent\Inj_MAT"



   'ActiveWorkbook.SaveAs Filename:= _
      'Dateiname _
     ' , FileFormat:=xlText, CreateBackup:=False
```

The following MATLAB program was written to generate text-files of the five droplet size fraction to be used in FLUENT:

```
Input_Datei    = input ('Name der Datei, die eingelesen werden soll: \n', 's');
Input          = [Input_Datei '.txt'];
Injection      = input ('Partikelgroesse: \n', 's');
Name_Inj       = ['injection-' Injection];



pfad1          = 'C:\Dokumente und Einstellungen\User\Desktop\matlab\Inj_MAT';    %ANPASSEN!
pfad2          = 'C:\Dokumente und Einstellungen\User\Desktop\matlab\Inj_FLU';

cd (pfad1);

Tabelle = dlmread( Input,';');

      x        = Tabelle(:,1);
      y        = Tabelle(:,2);
      z        = Tabelle(:,3);
      U        = Tabelle(:,4);
      V        = Tabelle(:,5);
      W        = Tabelle(:,6);
      diameter  = Tabelle(:,7);
      T        = Tabelle(:,8);
      massflow  = Tabelle(:,9);
      time      = Tabelle(:,10);

% Koordinatenanpassung
```

```
n_zeilen = size(x,1);

% Y,Z-Werte, für alle Düsen gleich

%Initialisierung
x_neu = zeros(n_zeilen,1);
y_neu = zeros(n_zeilen,1);
z_neu = zeros(n_zeilen,1);



for i = 1 : n_zeilen

   y_neu(i,1) = y(i,1) - 0.47355;
   z_neu(i,1) = z(i,1) - 1.415;

end



% Beachtung der 5 Düsenpositionen
% Verschiebung der X-Koordinaten

x_versch = [0.1, 0.024528, 0, -0.024528, -0.1];

for position = 1 : 5

      for j = 1 : n_zeilen
```

```
        x_neu(j,1) = x(j,1) + x_versch(position);


      end



  cd (pfad2);


                                        %Name_Inj       = input ('Name für manipulierte Datei (inj-
X-dX-sX):  \n', 's');
  Dateiname      = [ 'Inj_' int2str(Injection) 'Pos_' int2str(position) '.txt'];
                                        % (inj-X-dX-sX) für: X durchm.der Partikeln, dX Position der
Düse (1-5), sX


  fid = fopen (Dateiname,'w');


     fprintf (fid,'(interior_konus 10)\n');
     fprintf (fid,'(      X      Y      Z      U      V      W   diameter      T   mass-
flow      name)\n');



        for k = 1 : n_zeilen
          fprintf (fid,'((% 4.4e  % 4.4e  % 4.4e  % 4.4e  % 4.4e  % 4.4e  % 4.4e  % 4.4e  % 4.4e  %
4.4e) %s)\n', x_neu(k,1), y_neu(k,1), z_neu(k,1), U(k,1), V(k,1), W(k,1), diameter(k,1), T(k,1),
massflow(k,1), time(k,1), Name_Inj);
        end



  fclose(fid);


end
```

The following MATLAB program was written to generate text-files of the gas flow to be used in FLUENT:

```
Input_Datei    = input ('Name der Datei, die eingelesen werden soll: \n', 's');
Input          = [Input_Datei '.txt'];


pfad1          = uigetdir ( 'C:\Dokumente und Einstellungen\');    %ANPASSEN!


cd (pfad1);

Tabelle = dlmread( Input,';');

      x        = Tabelle(:,1);
      y        = Tabelle(:,2);
      z        = Tabelle(:,3);
      U        = Tabelle(:,4);
      V        = Tabelle(:,5);
      W        = Tabelle(:,6);
      k        = Tabelle(:,7);
      e        = Tabelle(:,8);


% Koordinatenanpassung

n_zeilen = size(x,1);
```

```
% Y,Z-Werte, für alle Düsen gleich

%Initialisierung
% Verschiebungsvektor für x: [0.1, 0.024528, 0, -0.024528, -0.1]

y_neu = zeros(n_zeilen,1);
z_neu = zeros(n_zeilen,1);



for i = 1 : n_zeilen

   y_neu(i,1) = y(i,1) - 0.48205;
   z_neu(i,1) = z(i,1) - 1.415;

end



Dateiname      = [ 'd3_gasprofil.txt'];



   fid = fopen (Dateiname,'w');

      fprintf (fid,'((interior_konus point 14256)\n (x \n');



         for k = 1 : n_zeilen
```

```
    fprintf (fid,'((% 4.4e  \n', x(k,1));
  end

fprintf (fid,')\n (y \n');

  for k = 1 : n_zeilen
    fprintf (fid,'((% 4.4e  \n', y_neu(k,1));
  end

 fprintf (fid,')\n (z \n');

  for k = 1 : n_zeilen
    fprintf (fid,'((% 4.4e  \n', z_neu(k,1));
  end

 fprintf (fid,')\n (U \n');

 for k = 1 : n_zeilen
    fprintf (fid,'((% 4.4e  \n', U(k,1));
  end

  fprintf (fid,')\n (V \n');

  for k = 1 : n_zeilen
    fprintf (fid,'((% 4.4e  \n', V(k,1));
  end

   fprintf (fid,')\n (W \n');
```

```
        for k = 1 : n_zeilen
           fprintf (fid,'((% 4.4e  \n', W(k,1));
        end

         fprintf (fid,')\n (k \n');

        for k = 1 : n_zeilen
           fprintf (fid,'((% 4.4e  \n', k(k,1));
        end

         fprintf (fid,')\n (e \n');

        for k = 1 : n_zeilen
           fprintf (fid,'((% 4.4e  \n', e(k,1));
        end


   fclose(fid);

end
```