



Bergische Universität Wuppertal – Fk 7
Fachgebiet Sicherheitstechnik/Umweltschutz
Eberhard Schmidt (Hrsg.)
Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit



Marcel Zillgitt

Staubabscheidung mit elektrostatisch beeinflusstem Wassersprühnebel

**SHAKER
VERLAG**

Staubabscheidung mit elektrostatisch beeinflusstem Wassersprühnebel

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
Doktor der Ingenieurwissenschaften, Dr.-Ing.

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Marcel Zillgitt
aus Essen

Wuppertal 2020

Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit

Marcel Zillgitt

**Staubabscheidung mit elektrostatisch
beeinflusstem Wassersprühnebel**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7829-9

ISSN 1861-1001

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

„Why, when spraying liquids in a wide variety of industrial applications, may it be advantageous to charge the spray drops?“

Adrian G. Bailey

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Sicherheitstechnik/Umweltschutz an der Bergischen Universität Wuppertal. Mein größter Dank gebührt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt für die Bereitstellung des Themas, den gewährten Freiraum für die durchgeführte Forschungsarbeit und nicht zuletzt für seine hilfreichen Ratschläge auf Basis eines unglaublichen Sachverstandes.

Neben ihm danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittler für die Begutachtung und Erstellung des Zweitgutachtens meiner Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske und Herrn PD Dr.-Ing. habil. Ulrich Klenk danke ich für die Komplettierung der Prüfungskommission.

Für die stets angenehme Arbeitsatmosphäre sowie die spannenden und lustigen Geschichten im Seminarraum und einen menschlichen Umgang, wie man sich ihn nur wünschen kann, danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachgebiets. Insbesondere danke ich Frau Heike Klope-Affeld für die Übernahme sämtlicher bürokratischer und häufig frustrierender Vorgänge, besonders aber für herzliche Gespräche auch neben der Arbeit. Herrn Joachim Derpmann danke ich für seine kompetente Unterstützung bei der Planung und dem Bau sämtlicher Versuchsanlagen und Düsenprototypen, vor allem aber für unsere Diskussionen während sowie vor und nach der Arbeit.

Für die unzähligen wissenschaftlichen Versuchsreihen und die unermüdliche Arbeit bei der Auswertung danke ich allen Studierenden, deren Abschlussarbeiten ich mitbetreuen durfte. Insbesondere aber danke ich den Herren Lukas Hildebrandt und Erik Schnitzler für ihren bemerkenswerten Einsatz bei den vollzogenen wissenschaftlichen Arbeiten und für ihr Mitwirken in der Gemeinschaft des Fachgebiets.

Für die Durchsicht meines Manuskripts sowie die wertvollen und konstruktiven Anmerkungen danke ich meinem Vater Werner Zillgitt und den geschätzten Arbeitskollegen Dr.-Ing. Matthias Kaul, David Horst und Dr.-Ing. Qian Zhang.

Gesonderter Dank gehört meiner Familie und meinen Angehörigen, die mich wie selbstverständlich immer unterstützten und mir Rückhalt gaben.

...Harren wir der Dinge, die da kommen...

Zusammenfassung

Luftgetragener Staub, wie er bei dem Umschlag und Transport von Schüttgütern in die Umgebung freigesetzt wird, stellt neben einem Materialverlust auch eine gesundheitliche Gefahr für den Menschen dar. Zur Minderung dieser diffusen Staubemissionen eignen sich Sprühdüssensysteme, die in der Regel mit erheblichen Wassermengen Staubpartikeln an Wassertropfen binden. Physikalisch bedingt nimmt die Effizienz der Abscheidung mit abnehmender Partikelgröße zunächst ab, sodass speziell im Bereich der Partikelfractionen PM_{10} und $PM_{2,5}$ Handlungsbedarf zur Einhaltung nationaler Grenzwerte für diese Fractionen besteht.

Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit einem Sprühdüssensystem, welches durch elektrostatische Aufladung von Wassertropfen eine höhere Feinstaubbindung erreicht. Hierbei wird eine höhere Kollisionswahrscheinlichkeit durch die elektrostatische Anziehung zwischen Partikeln und Tropfen erzielt. Zum Verständnis der Auflademechanismen von Tropfen wird zunächst der Ablösevorgang von Einzeltropfen in einem elektrischen Feld untersucht. Durch Beobachtung dieses Vorgangs und der Ermittlung von erreichten Ladungszuständen werden Erkenntnisse zur technischen Auslegung einer Zweistoffdüse mit integrierter elektrostatischer Aufladeinheit gewonnen. Anschließend wird ein methodisches Vorgehen entwickelt, um Tropfenkollektive hinsichtlich der Tropfengrößenverteilung und Tropfenladung zu charakterisieren, sodass sich diese Erkenntnisse zur Abschätzung des erreichbaren Abscheidegrades nutzen lassen.

Um die Auswirkung der Tropfenladung bei der Abscheidung von Partikeln geringer Größe ($< 10 \mu m$) mittels Wassersprühnebel zu analysieren, wird ein Windkanal-Teststand genutzt. Hierbei werden realitätsnahe Bedingungen luftgetragener Stäube durch Variation der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Partikelkonzentration eines im Eingangsquerschnitt erzeugten Aerosols nachgestellt. Mithilfe einer theoretischen Betrachtung der Abscheideeffekte von Partikeln bedingt durch Trägheit, turbulente Vermischung und elektrostatische Anziehung im Windkanal erfolgt eine Abschätzung des Fraktionsabscheidegrads. Dieser wird anschließend mit den Ergebnissen aus der Bilanzierung der Partikelkonzentrationen verglichen. Letztendlich wird der Einfluss des elektrostatischen Effekts bei der nassen Partikelabscheidung beurteilt.

Abstract

Airborne dust, as released during the handling and transport of bulk materials, represents a loss of material but also a health hazard for people. To reduce these diffuse dust emissions, spray nozzle systems are used. The separation of particles is achieved by binding them to droplets, which requires a considerable amount of water. For physical reasons, the efficiency of separation decreases with smaller particle sizes. Because of that a solution must be found to comply with existing national limit values for the particulate matter 10 and 2.5.

This dissertation deals with a spray nozzle system which achieves a higher fine dust binding by electrostatic charging of water droplets. The electrostatic attraction leads to a higher collision probability between dust particles and droplets. In order to understand the charging mechanisms of droplets, the detachment of individual droplets in an electric field is investigated first. Here, the amount of charge carriers on a droplet is determined. Further, a two-fluid nozzle with integrated electrostatic charging unit is selected. A methodical procedure is developed to characterize droplets with regard to their size distribution and the amount of charge carriers. In order to analyse the electrostatic effect on the separation of small particles ($< 10\ \mu\text{m}$), a wind tunnel set-up is used. Here, realistic environmental conditions respective to airborne dust are adjusted. Therefore, the gas flow velocity as well as the particle concentration is varied. By means of a theoretical consideration, the fractional separation efficiency is estimated. Accordingly, the separation effects of the particles caused by inertia, turbulent mixing and electrostatic attraction are taken into account. These results are compared with the fractional separation efficiency balancing the particle concentrations before and after spraying. Finally, an assessment of the electrostatic effect of wet particle separation is given.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangslage und Problemstellung.....	1
1.2	Zielsetzung.....	2
1.3	Methodik.....	3
2	Theoretische Grundlagen.....	5
2.1	Begrifflichkeiten zur Partikelcharakterisierung.....	5
2.1.1	Einführung.....	5
2.1.2	Partikelgröße.....	5
2.1.3	Partikelgrößenverteilungen.....	8
2.1.4	Staubfraktionen im rechtlichen Kontext.....	12
2.2	Partikelmesstechnik.....	16
2.2.1	Einführung.....	16
2.2.2	Laserbeugungsverfahren zur Messung des Tropfenkollektivs.....	19
2.2.3	Optisches Zählverfahren zur Messung der Staubkonzentration.....	21
2.3	Grundlagen zur elektrostatischen Aufladung von Partikeln und Tropfen.....	23
2.3.1	Einführung.....	23
2.3.2	Partikel- und Tropfenaufladung.....	26
2.3.3	Ladungsbegrenzung.....	30
2.4	Grundlagen zur Zerstäubung von Flüssigkeiten.....	37
2.4.1	Einführung.....	37
2.4.2	Abtropfen an Kapillarrohren.....	39
2.4.3	Tropfenerzeugung mittels Zweistoffdüsen.....	40
2.4.4	Erzeugung eines elektrostatisch geladenen Wassersprühnebels.....	42
2.5	Partikelabscheidung aus Gasen.....	45
2.5.1	Partikelbewegung im Gas und wirkende Kräfte.....	45
2.5.2	Abscheidegrad.....	47
2.5.3	Partikel-Tropfen-Kollision.....	49

3	Experimentelle Arbeiten zur Charakterisierung von Tropfen / Tropfenkollektiven	53
3.1	Einführung	53
3.2	Erzeugung monodisperser Tropfen	55
3.2.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	55
3.2.2	Untersuchungen zur elektrostatischen Beeinflussung einzelner Tropfen	60
3.2.3	Analyse und Diskussion der Ergebnisse	67
3.3	Erzeugung polydisperser Tropfen	71
3.3.1	Einführung	71
3.3.2	Methoden zur Charakterisierung polydisperser Tropfenkollektive	76
3.3.3	Untersuchungen zum Zerstäubungsverhalten von Zweistoffdüsen	79
3.3.4	Entwicklung einer Zweistoffdüse zur elektrostatischen Beeinflussung von Wassertropfen	89
3.3.5	Untersuchungen zur Zerstäubung mit elektrostatischer Beeinflussung	91
3.3.6	Analyse und Diskussion der Ergebnisse zur elektrostatischen Aufladung des Tropfenkollektivs	98
3.4	Kapitelzusammenfassung	103
4	Partikel-Tropfen-Abscheidung in einem Windkanal	106
4.1	Einführung	106
4.2	Versuchsanlage	106
4.3	Versuchsmaterial	110
4.4	Versuchsdurchführung	111
4.5	Theoretische Betrachtung der Partikelabscheidung mittels Wassersprühnebel in einem Windkanal	113

4.6	Experimentelle Ergebnisse zur Partikelabscheidung mittels Wassersprühnebel in einem Windkanal.....	132
4.6.1	Vorbemerkung.....	132
4.6.2	Einfluss des Volumenstroms	133
4.6.3	Einfluss der Staubkonzentration.....	138
4.6.4	Einfluss des eingesetzten Wasservolumens	139
4.7	Diskussion der Ergebnisse	141
4.8	Kapitelzusammenfassung	146
5	Schlussfolgerung und Ausblick.....	149

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Verteilungssumme der Tropfengrößenverteilung einer Zweistoffdüse (7 bar Luftüberdruck; 1 bar Wasserüberdruck).	9
Abbildung 2.2: Verteilungsdichte der Tropfengrößenverteilung einer Zweistoffdüse (7 bar Luftüberdruck; 1 bar Wasserüberdruck).	10
Abbildung 2.3: Prozentualer Abscheidegrad in Abhängigkeit des aerodynamischen Durchmessers zur Bestimmung der Staubfraktionen E-Staub, A-Staub, PM ₁₀ und PM _{2,5} [Iso796].	15
Abbildung 2.4: Interaktionen zwischen Lichtwelle und Partikel [SePa06].	16
Abbildung 2.5: Relative Streulichtintensität in Abhängigkeit der Partikelgröße nach [Vdi311, Gebh93].	18
Abbildung 2.6: Schematische Darstellung des Laserbeugungsverfahrens zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung [Iso109, Matt14, Stie09].	19
Abbildung 2.7: Abhängigkeit des Beugungswinkels von der Partikelgröße [Matt14].	20
Abbildung 2.8: Schematischer Aufbau eines optischen Partikelzählers [GaGH12, Grim08].	21
Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Partikel-Tropfen-Lage [ShLG83].	23
Abbildung 2.10: Krümmung des elektrischen Feldes durch Ladungsaufnahme einer Partikel [Bail88].	26
Abbildung 2.11: Relative Partikelladung in Abhängigkeit der Zeit und der Aufladungszeitkonstante.	30
Abbildung 2.12: Größenabhängige Begrenzungen der betragsmäßigen Ladung von Feststoffpartikeln durch Ion (+) / Elektron Emission, Dispergierung und Boltzmann-Ladungsverteilung.	31
Abbildung 2.13: Elektrische Doppelschicht an der Phasengrenze Tropfen/Luft [Cros87, Loeb58].	34
Abbildung 2.14: Größenabhängige Begrenzungen der betragsmäßigen Ladung von Tropfen durch Proton / Elektron Emission, Rayleigh-Limit, maximale Feldaufladung und natürliche Ladung.	35

Abbildung 2.15: Qualitativer, zeitlicher Verlauf der Partikelladung, der Tropfengröße und des Ladungs-Massenverhältnisses [AbLa67].	36
Abbildung 2.16: Marshall-Palmer-Verteilung der Tropfendurchmesser bei verschiedenen Niederschlagsintensitäten [Vdi306].	37
Abbildung 2.17: Zerfallsarten nach Troesch [Tro54] aufgetragen in Abhängigkeit der dimensionslosen Ohnesorge- und Tropfen-Reynolds-Zahl.	38
Abbildung 2.18: Schematische Darstellung einer Zweistoffdüse („plain jet“) innerer Mischung.	41
Abbildung 2.19: Mechanismen zur Erzeugung eines elektrostatisch geladenen Sprühnebels durch Kontaktaufladung (E1), Influenzaufladung (E2) und Koronaaufladung (E3) [Schm93, Sedw78].	43
Abbildung 2.20: Partikelbewegung im strömenden Gas.	45
Abbildung 2.21: Strömungswiderstandskoeffizient für kugelförmige Partikeln in Abhängigkeit der Partikel-Reynolds-Zahl nach Schmidt [Schm93].	47
Abbildung 2.22: Schematische Darstellung und Nomenklatur der Abscheidung von gasgetragenen Partikeln.	48
Abbildung 2.23: Schematische Darstellung der Partikel-Tropfen-Kollision [Klen15, Schm93].	50
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Eingangs- und Ergebnisgrößen zur Charakterisierung von Tropfen und Tropfenkollektiven.	54
Abbildung 3.2: Versuchsaufbau zur Ermittlung der spezifischen Tropfenladung.	55
Abbildung 3.3: Schematische Darstellung eines Faraday-Bechers nach Lowell et al. [Keit13, LoRo80].	56
Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Ermittlung der spezifischen Tropfenladung.	57
Abbildung 3.5: Darstellung der beiden Elektrodenformen I und II mit dem jeweiligen Halter aus PTFE.	58

Abbildung 3.6: Momentaufnahmen zum Ablösungsverhalten einzelner Tropfen aus der Kapillare bei Erhöhung der elektrischen Feldstärke unter Verwendung von Elektrodenform I.	60
Abbildung 3.7: Verhältnis des Tropfendurchmessers x_T zu x_0 in Abhängigkeit der angelegten Spannung bei Verwendung von Elektrode I.	61
Abbildung 3.8: Spezifische Ladung von einzelnen Tropfen unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit in Abhängigkeit der angelegten Spannung bei Verwendung von Elektrode I.	64
Abbildung 3.9: Spezifische Tropfenladung in Abhängigkeit der angelegten Spannung bei unterschiedlichem Elektrodenmaterial (Chrom-Nickel-Stahl V2A, Kupfer Cu) und unterschiedlicher Polarität bei Verwendung von Elektrode II.	65
Abbildung 3.10: Vergleich des Betrags der spezifischen Tropfenladung bei Verwendung von Elektrode I und Elektrode II in Abhängigkeit des Betrags der angelegten Spannung.	67
Abbildung 3.11: Oberflächenladungsdichte und Mehrfaches der natürlichen Oberflächenladungsdichte in Abhängigkeit der angelegten Spannung.	68
Abbildung 3.12: Tropfenladung als Anteil des erreichbaren Rayleigh-Limits in Abhängigkeit der angelegten Spannung für Elektrode I und II.	69
Abbildung 3.13: Startvorgang eines Prototyps einer elektrostatischen Zweistoffdüse innerer Mischung ($t = 0,1 \dots 1,2$ s) bis zur Ausbildung eines stabilen Sprühnebels; Innendurchmesser der Düse: 20 mm.	71
Abbildung 3.14: In-situ Messung einer Tropfengrößenverteilung einer Zweistoffdüse mittels HELOS/KR der Fa. Sympatec.	73
Abbildung 3.15: Schematische Draufsicht des Versuchsaufbaus zur Ermittlung von Tropfenladung und Tropfengrößenverteilung.	74
Abbildung 3.16: Verteilungssummen in Abhängigkeit der Tropfengröße bei drei verschiedenen Entfernungen (10 cm, 30 cm und 50 cm).	76
Abbildung 3.17: Stromstärke I in Abhängigkeit der Zeit t.	78

Abbildung 3.18: Schematische Darstellung der Eingangs- und Ergebnisgrößen zur Charakterisierung des Zerstäubungsverhaltens von Zweistoffdüsen.....	79
Abbildung 3.19: Foto und technische Zeichnung (Schnittdarstellung) der in dieser Arbeit verwendeten industriellen Zweistoffdüse (Angaben in mm).	80
Abbildung 3.20: Druck-Durchfluss-Diagramm für den Volumenstrom an Wasser in Abhängigkeit von Wasser- und Luftvordruck für die Zweistoffdüse nach Abbildung 3.19.....	81
Abbildung 3.21: Druck-Durchfluss-Diagramm für den Volumenstrom an Luft in Abhängigkeit von Wasser- und Luftvordruck für die Zweistoffdüse nach Abbildung 3.19.....	82
Abbildung 3.22: Sauterdurchmesser der Tropfengrößenverteilung in Abhängigkeit des Massenstromverhältnisses.....	84
Abbildung 3.23: Tropfenanzahlkonzentration (berechnet mithilfe des Moments $M_{3,0}$) in Abhängigkeit des Massenstromverhältnisses.	85
Abbildung 3.24: Tropfenanzahlkonzentration (berechnet mithilfe des Sauterdurchmessers) in Abhängigkeit des Massenstromverhältnisses zur Darstellung des empirischen Zusammenhangs.	86
Abbildung 3.25: Messgeraden bei der Ermittlung des räumlichen Sprühbildes (links: Draufsicht, rechts: Querschnitt des Sprühkegels).	87
Abbildung 3.26: Sauterdurchmesser in Abhängigkeit des Abstandes a_z für unterschiedliche Entfernungen zur Messebene (a_x).	88
Abbildung 3.27: Foto (Halbschnitt) und technische Zeichnung (Schnittdarstellung) der verwendeten elektrostatischen Zweistoffdüse (Angaben in mm).	90
Abbildung 3.28: Spezifische Ladung in Abhängigkeit der angelegten Spannung an der Elektrode der Zweistoffdüse.	91
Abbildung 3.29: Sauterdurchmesser der Tropfengrößenverteilung in Abhängigkeit des Betrags der angelegten Spannung.	92

Abbildung 3.30: Sauterdurchmesser und RSF in Abhängigkeit des Volumenstroms an Wasser.....	93
Abbildung 3.31: Änderung der Tropfenanzahlkonzentration in Abhängigkeit des Volumenstroms von Wasser im Bereich 2...60 L·h ⁻¹	94
Abbildung 3.32: Sauterdurchmesser in Abhängigkeit des Abstandes a_z für unterschiedliche Entfernungen zur Messebene (a_x) bei Einsatz einer elektrostatischen Zweistoffdüse.....	95
Abbildung 3.33: Spezifische Tropfenladung und Stromstärke in Abhängigkeit des Volumenstroms an Wasser für eine konstante Spannung von + 1,2 kV.....	96
Abbildung 3.34: Spezifische Ladung in Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit für verschiedene Volumenströme von Wasser im Bereich 6...9 L·h ⁻¹ ; U = + 1,2 kV.....	97
Abbildung 3.35: Anteil des erreichten Rayleigh-Limits in Abhängigkeit des Volumenstroms von Wasser.....	98
Abbildung 3.36: Betrag der spezifischen Ladung in Abhängigkeit der Tropfenverweilzeit.....	100
Abbildung 3.37: Anzahl an Elementarladungen in Abhängigkeit der Tropfenverweilzeit.....	101
Abbildung 3.38: Mittlere Tropfenladung in Abhängigkeit des Sauterdurchmessers der Tropfengrößenverteilung.....	102
Abbildung 4.1: Schematische Darstellung und Foto des Staubdispergierers [Topa16].....	106
Abbildung 4.2: Foto, schematische Darstellung des Windkanals und Innenmaße der Module.....	107
Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der Anordnung der vier elektrostatischen Zweistoffdüsen im Bedüsungsquerschnitt.	108
Abbildung 4.4: Aufnahme des Probenmaterials Ulmer Weiß XMF mit einem ESEM und massenbezogene Verteilungssumme.	110
Abbildung 4.5: Staubmassenkonzentrationen an PM ₁₀ , PM _{2,5} und PM ₁ in Abhängigkeit der Versuchszeit über einen Messzyklus.	112

Abbildung 4.6: Mischzustände von Feststoffpartikeln und Tropfen vor und nach der Kollision im Windkanal.....	113
Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der Entfernung zwischen der Zweistoffdüse und dem Messpunkt im Windkanal.....	115
Abbildung 4.8: Abscheidegrad, Tropfen-Reynolds-Zahl und relative Tropfengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit.	117
Abbildung 4.9: Spezifisches Reinigungsvolumen in Abhängigkeit der Tropfengröße für unterschiedliche Partikelgrößen x_P	118
Abbildung 4.10: Fraktionsabscheidegrad (Trägheit) in Abhängigkeit der Tropfengröße für unterschiedliche Partikelgrößen x_P	119
Abbildung 4.11: Gesamter Fraktionsabscheidegrad in Abhängigkeit der Partikelgröße unter Berücksichtigung von Trägheit im Relaxationszeitbereich.....	120
Abbildung 4.12: Fraktionsabscheidegrad (turbulente Vermischung) in Abhängigkeit der Tropfengröße für unterschiedliche Partikelgrößen x_P	122
Abbildung 4.13: Gesamter Fraktionsabscheidegrad in Abhängigkeit der Partikelgröße unter Berücksichtigung von turbulenter Vermischung über Relaxations- und Verweilzeitbereich.	123
Abbildung 4.14: Betrag der Tropfen- und Partikelladung in Abhängigkeit der Größe.....	125
Abbildung 4.15: Fraktionsabscheidegrad (Elektrostatik) in Abhängigkeit der Tropfengröße für unterschiedliche Partikelgrößen x_P	126
Abbildung 4.16: Gesamter Fraktionsabscheidegrad in Abhängigkeit der Partikelgröße unter Berücksichtigung von Elektrostatik über Relaxations- und Verweilzeitbereich.....	126
Abbildung 4.17: Verschaltung der Abscheideeffekte im Abscheider; Betrachtung des Feingutanteils.....	127
Abbildung 4.18: Gesamter Fraktionsabscheidegrad in Abhängigkeit der Partikelgröße für die Abscheideeffekte Trägheit, turbulente Vermischung und Elektrostatik sowie unter Berücksichtigung aller Effekte ohne (o.E.) und mit Elektrostatik (m.E.).....	128

Abbildung 4.19: Tropfengröße in Abhängigkeit der Zeit und des zurückgelegten Weges zwischen Zweistoffdüse und Messpunkt.	130
Abbildung 4.20: Gesamtabscheidegrade in Abhängigkeit des Volumenstroms von Luft bei Einsatz von Zweistoffdüsen mit und ohne elektrostatische Beeinflussung des Tropfenkollektivs.	134
Abbildung 4.21: Differenz des Gesamtabscheidegrads zwischen Abscheidung mit und ohne Elektrostatik für PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 in Abhängigkeit des Volumenstroms.	135
Abbildung 4.22: Fraktionsdurchlassgrad für die Stufen S1 und S3 der Drosselklappe jeweils mit (m.E.) und ohne Einsatz (o.E.) von Elektrostatik.	136
Abbildung 4.23: Differenz des Fraktionsabscheidegrads für die Stufen S1...S3 der Drosselklappe.....	137
Abbildung 4.24: Gesamtabscheidegrad in Abhängigkeit der massenbezogenen Rohgaskonzentration mit und ohne Einsatz von Elektrostatik.....	138
Abbildung 4.25: Differenz des Abscheidegrads zwischen Abscheidung mit und ohne Elektrostatik für PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 in Abhängigkeit der massenbezogenen Rohgaskonzentration.	139
Abbildung 4.26: Differenz des Abscheidegrads zwischen Abscheidung mit und ohne Elektrostatik für PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 in Abhängigkeit des insgesamt eingesetzten Volumenstroms an Wasser.....	140
Abbildung 4.27: Massenbezogene Verteilungsdichte in Abhängigkeit der Partikelgröße für die Abschnitte 2 und 3 des Messzyklus.	141
Abbildung 4.28: Massenbezogene Verteilungsdichte von Roh- und Reingas (mit und ohne Elektrostatik).	142
Abbildung 4.29: Anzahlbezogene Verteilungssumme in Abhängigkeit der Partikelgröße für die Abschnitte A4 (Staub), A2 (Wasser), A3 (Wasser und Elektrostatik), A5 (Staub und Wasser) und A7 (Staub und Wasser und Elektrostatik).	143
Abbildung 4.30: Theoretische und praktische Fraktionsabscheidegrade bei Stufe S2 der Drosselklappenstufe.	144

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Definitionen und Grenzwerte bekannter Staubfraktionen im Arbeitsschutz und Umweltschutz.....	13
Tabelle 3.1: Ergebnisse der Tropfenladung in Abhängigkeit des wirkenden Auflademechanismus und des Elektrodenpotentials.....	59
Tabelle 3.2: Parameter a_0 und Bestimmtheitsmaß R^2 zur Berechnung der Approximationen zu Abbildung 3.7.....	62
Tabelle 3.3: Erwartungswert, Streuungsparameter und Bestimmtheitsmaß der Approximation für die in Abbildung 3.16 dargestellten Kurvenverläufe.	77
Tabelle 3.4: Gegenüberstellung von Funktionsweise, Problemstellung, Lösungsansatz und Umsetzung der Tropfenaufladung mittels Kontakt- und Influenzaufladung.	89
Tabelle 4.1: Unterteilung des Messzyklus in zeitliche Abschnitte, Parameteränderung, Abkürzung und Versuchszeit.	111
Tabelle 4.2: Parameter für die theoretische Betrachtung der Partikelabscheidung im Windkanal (Bedüsungsquerschnitt, Modul 3; Lufttemperatur 20 °C).	114
Tabelle 4.3: Drosselklappenstufen sowie zugehöriger Luftvolumenstrom, dosierter Staubmassenstrom und theoretische Staubmassenkonzentration im Windkanal.	133
Tabelle 4.4: Mittelwerte zum massenbezogenen Abscheidegrad, anzahlbezogenen Abscheidegrad, Abscheidegrad PM_{10} , Abscheidegrad $PM_{2,5}$ und Abscheidegrad PM_1 bei Änderung des Volumenstroms, der Rohgaskonzentration und des Wasservolumens.	147

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

A-Staub	alveolengängiger Staub
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BSE	backscattered electrons
Cu	Kupfer
E-Feld	Elektrisches Feld
E-Statik	Elektrostatik
E-Staub	einatembarer Staub
exp	Exponentialfunktion
GGs	Gates, Gaudin, Schuhmann
kV	Kilovolt
NaCl	Natriumchlorid
OPZ	Optischer Partikelzähler
PM ₁	Particulate Matter 1
PM _{2,5}	Particulate Matter 2,5
PM ₁₀	Particulate Matter 10
PTFE	Polytetrafluorethylen
RSF	relative span factor
RRSB	Rosin, Rammler, Sperling, Bennet
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
V2A	Chrom-Nickel-Stahl

Konstanten

Symbol	Bezeichnung	Wert
e	Elementarladung	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$
ε_0	relative Permittivität des Vakuums	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
π	Kreiszahl	3,1416
g	Erdbeschleunigung	$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
k_B	Boltzmann-Konstante	$1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A_P	m^2	Projektionsquerschnitt des Tropfens
A_W	m^2	Wirkungsquerschnitt des Tropfens
a	m	Abstand zwischen Partikel und Tropfen
a_e	m	doppelter Abstand Staupunktstromlinie zu Grenzpartikelbahn
a_G	m	Abstand zur Gegenelektrode
a_L	m	Abstand Düsenaustritt und Drahtgewebe
a_{Mie}	-	Mie-Parameter
a_x	m	Abstand Düsenaustritt und Messebene (Laser), x - Achse
a_z	m	Abstand Düsenaustritt und Messebene (Laser), z - Achse
b	$\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	elektrische Mobilität der Gasionen
b_E	m	Breite der Elektrode
C	-	Cunningham-Korrekturfaktor
$\bar{c}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	mittlere Ionengeschwindigkeit
$c(\text{PM}_x)$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Staubmassenkonzentration der Partikelfraktion PM_x
$C_{0,P}$	m^{-3}	Partikelanzahlkonzentration
$C_{0,T}$	m^{-3}	Tropfenanzahlkonzentration
C_E	F	Kapazität des Elektrometers
C_F	F	Kapazität des Faraday-Bechers
C_{OPT}	-	optische Konzentration
C_{rein}	m^{-3}	Partikelanzahlkonzentration im Reingas

C_{Roh}	m^{-3}	Partikelanzahlkonzentration im Rohgas
C_W	-	Strömungswiderstandskoeffizienten
$D(x)$	-	Durchlassgrad
$D_{W/L}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Diffusionskoeffizient von Wasser in Luft
d_D	m	Durchmesser der Düsenaustrittsöffnung
d_K	m	Innendurchmesser des Kapillarrohres
EA	$\text{m}^2 \cdot \text{J}^{-1}$	Energieausnutzung
E_0	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	elektrische Feldstärke
E_I	-	Funktion zur Berechnung von E-Staub
erf	-	Gauß'sche Fehlerfunktion
f	m	Brennweite
F_A	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Auftriebskraft
F_B	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Bildkraft
F_C	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Coulombkraft
F_{Ce}	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Coulombkraft bei externem, elektrischen Feld
F_D	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Dielektrophoretische Kraft
F_{De}	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Dielektrophoretische Kraft bei externem, elektrischen Feld
$\vec{F}_G$	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	vektorielle Gewichtskraft
F_R	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Raumladungskraft
F_S	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Strömungskraft
$\vec{F}_T$	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	vektorielle Trägheitskraft
F_W	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Widerstandskraft
$\vec{F}_W$	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	vektorielle Widerstandskraft
f_{hey}	-	Heywoodfaktor
f_{max}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	maximale Sättigungsmenge von Wasser in Luft
$\vec{g}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	vektorielle Erdbeschleunigung
h	-	Haftwahrscheinlichkeit
h_E	m	Höhe der Elektrode
h_F	m	Abstand zwischen Kapillarrohr und Faraday-Becher
I	A	Stromstärke
$\bar{I}$	A	zeitlicher Mittelwert der Stromstärke

I'	A	Fluktuationsanteil der Stromstärke
i	-	Partikelgrößenintervalle
J_1	-	Besselfunktion
j	-	Anzahl Kreisringe
L_F	m	Euler'sches integrales Längenmaß
$M_{k,r}$	m^k	k-te Moment der q_r -Verteilung
m	kg	Partikelmasse
m_T	kg	Tropfenmasse
$\dot{m}_A$	$kg \cdot s^{-1}$	Massenstrom des Aufgabegutes
$\dot{m}_F$	$kg \cdot s^{-1}$	Massenstrom des Feingutes
$\dot{m}_{Fl}$	$kg \cdot s^{-1}$	Massenstrom der Flüssigkeit
$\dot{m}_G$	$kg \cdot s^{-1}$	Massenstrom des Grobgutes
$\dot{m}_{Gas}$	$kg \cdot s^{-1}$	Massenstrom des Gases
$\bar{N}_E$	-	mittlere Anzahl an Elementarladungen
N_{ges}	-	gesamte Partikelanzahl
N_P	-	Partikelanzahl
N_T	-	Tropfenanzahl
$\dot{N}_T$	-	Tropfenanzahl pro Zeit
$\bar{N}_T$	-	mittlere Anzahl an Tropfen
n	-	Brechungsindex
$n_{0,l}$	$A \cdot s \cdot m^{-3}$	Ionenkonzentration
O	m^2	Oberfläche
Oh	-	Ohnesorge-Zahl
P_Z	$J \cdot s^{-1}$	Zerstäubungsleistung
p	-	Parameter zur Beschreibung des Dielektrizitätsverhaltens
$p_{PM_{10}}$	-	Wahrscheinlichkeitsfunktion zur Ermittlung von PM_{10}
$p_{PM_{2,5}}$	-	Wahrscheinlichkeitsfunktion zur Ermittlung von $PM_{2,5}$
p_{amb}	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$	Umgebungsluftdruck
Δp_L	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$	Vordruck Luft (Überdruck)
Δp_{Gas}	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$	Vordruck Gas (Überdruck)
Δp_W	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$	Vordruck Wasser (Überdruck)

Q_A	-	Verteilungssumme des Aufgabegutes
$Q_{\text{Boltzmann}}$	$A \cdot s$	Ladung nach Boltzmann-Ladungsverteilung
Q_{Co}	$A \cdot s$	Ladung im Grenzbereich zwischen Q_{Feld} und Q_{Diff}
Q_{Diff}	$A \cdot s$	Ladung bei Diffusionsaufladung
$Q_{\text{Disp,max}}$	$A \cdot s$	maximale Ladung beim Dispergieren
Q_{emp}	$A \cdot s$	Ladung bei Erreichen des Durchbruch-Limits
Q_F	-	Verteilungssumme des Feingutes
Q_{Feld}	$A \cdot s$	Ladung bei Feldauffüllung
Q_G	-	Verteilungssumme des Grobgutes
Q_{ges}	$A \cdot s$	gesamte Ladung des Tropfenkollektivs
Q_P	$A \cdot s$	Ladung der Partikel
Q_r	-	Verteilungssumme der Mengenart r
Q_{Ray}	$A \cdot s$	Ladung bei Erreichen des Rayleigh-Limits
Q_S	$A \cdot s$	Sättigungsladung
Q_T	$A \cdot s$	Ladung des Tropfens
$\bar{Q}_T$	$A \cdot s$	mittlere Ladung des Tropfens
$Q_{T,\text{nat}}$	$A \cdot s$	natürliche Tropfenladung
q	$A \cdot s \cdot \text{kg}^{-1}$	spezifische Ladung
q_A	m^{-1}	Verteilungsdichte des Aufgabegutes
q_F	m^{-1}	Verteilungsdichte des Feingutes
q_G	m^{-1}	Verteilungsdichte des Grobgutes
q_r	m^{-1}	Verteilungsdichte
$\bar{q}_{\text{Ray}}$	$A \cdot s \cdot \text{kg}^{-1}$	mittlere spezifische Tropfenladung am Rayleigh-Limit
$\bar{q}_T$	$A \cdot s \cdot \text{kg}^{-1}$	mittlere spezifische Tropfenladung
q_T	$A \cdot s \cdot \text{kg}^{-1}$	spezifische Ladung des Tropfenkollektivs
R	Ω	elektrischer Widerstand
r, y	-	Mengenart
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
r_D	m	Radius zum Detektormittelpunkt
r_E	m	Innenradius der Elektrode
Re_K	-	Reynolds-Zahl des Strömungskanal

Re_P	-	Partikel-Reynolds-Zahl
Re_T	-	Tropfen-Reynolds-Zahl
RH	-	relative Luftfeuchtigkeit
RV	-	spezifisches Reinigungsvolumen eines Tropfens
RV_T	-	RV unter Berücksichtigung von Trägheit
s	m	zurückgelegter Weg
S_V	m^{-1}	spezifische Oberfläche
T	K	Temperatur
$T(x)$	-	Fraktionsabscheidegrad
$T_{E,ges}$	-	gesamter Fraktionsabscheidegrad (Elektrostatik)
T_{ges}	-	Gesamtabscheidegrad
T_T	-	Fraktionsabscheidegrad unter Berücksichtigung von Trägheit
$T_{T,ges}$	-	gesamter Fraktionsabscheidegrad (Trägheit)
$T_{theoretisch}^{o.E.}$	-	theoretischer Fraktionsabscheidegrad ohne E-Statik
$T_{theoretisch}^{m.E.}$	-	theoretischer Fraktionsabscheidegrad mit E-Statik
T_{Tu}	-	Fraktionsabscheidegrad unter Berücksichtigung von turbulenter Strömung
$T_{Tu,ges}$	-	gesamter Fraktionsabscheidegrad (Turbulenz)
t	s	Zeit
tanh	-	Tangens hyperbolicus
t_E	s	Tropfenverweilzeit
t_M	s	Zeit bis zum Erreichen der Messstelle
U	V	Spannung / Potentialdifferenz
V	m^3	Volumen
V_E	m^3	Volumenelement innerhalb der Elektrode
V_R	m^3	vom Tropfen gereinigtes Gasvolumen
$V_{R,Tu}$	m^3	V_R bei turbulenter Strömung
V_T	m^3	Volumen des Tropfens
$\dot{V}_{Gas}$	$m^3 \cdot s^{-1}$	Volumenstrom des Gases
$\dot{V}_L$	$m^3 \cdot s^{-1}$	Volumenstrom der Luft
$\dot{V}_{rein}$	$m^3 \cdot s^{-1}$	Volumenstrom des Reingases
$\dot{V}_{roh}$	$m^3 \cdot s^{-1}$	Volumenstrom des Rohgases

$\dot{V}_W$	$m^3 \cdot s^{-1}$	Volumenstrom von Wasser
v	$m \cdot s^{-1}$	Gasgeschwindigkeit / Strömungsgeschwindigkeit
v'	$m \cdot s^{-1}$	Schwankungsgeschwindigkeit Strömung
$\bar{v}$	$m \cdot s^{-1}$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
$\vec{v}$	$m \cdot s^{-1}$	vektorielle Gasgeschwindigkeit
v_r	$m \cdot s^{-1}$	Ausflussgeschwindigkeit
v_{rel}	$m \cdot s^{-1}$	Betrag der relativen Partikelgeschwindigkeit
$\vec{v}_{rel,P}$	$m \cdot s^{-1}$	relative vektorielle Partikelgeschwindigkeit
$\vec{v}_{rel,T}$	$m \cdot s^{-1}$	relative vektorielle Tropfengeschwindigkeit
$W_{V,Z}$	$J \cdot m^{-3}$	volumenbezogene Zerkleinerungsarbeit
w	$m \cdot s^{-1}$	Partikelgeschwindigkeit
$\vec{w}$	$m \cdot s^{-1}$	vektorielle Partikelgeschwindigkeit
w'	$m \cdot s^{-1}$	Schwankungsgeschwindigkeit Tropfen
w_S	$m \cdot s^{-1}$	Sinkgeschwindigkeit
$\bar{x}$	m	Klassenmitte
Δx	m	Intervallbreite
$\bar{x}_{1,2}$	m	Sauterdurchmesser
$x_{50,r}$	m	Medianwert der angegebenen Mengenart r
x_{ae}	m	aerodynamischer Äquivalentdurchmesser
x_i	m	Intervallgrenze
x_{max}	m	größte Intervallgrenze
x_{min}	m	kleinste Intervallgrenze
$x_{mod,r}$	m	Modalwert der angegebenen Mengenart r
x_P	m	Partikelgröße
x_S	m	Sinkgeschwindigkeitsäquivalentdurchmesser
x_{St}	m	Stokesdurchmesser
x_{Streu}	m	Streulichtäquivalentdurchmesser
x_t	m	Trennkorngröße
x_T	m	Tropfengröße
$x_{x,r}$	m	x %-Perzentil einer Verteilung der Mengenart r

Griechische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
γ	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	Oberflächenspannung
ε_T	$\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	Permittivität des Tropfens
ε_P	$\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	Permittivität der Partikel
ε_L	-	relative Permittivität von Luft
ε_r	-	relative Permittivität
η_{FI}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	dynamische Viskosität des Fluids
η_L	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	dynamische Viskosität von Luft
θ	°	Streuwinkel
$t_{\text{P,T}}$	-	dimensionslose Relaxationszeit Partikel/Tropfen
κ	$\text{A} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	elektrische Leitfähigkeit
Λ	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	Intensität des Lichts nach Wechselwirkung mit der Partikel
Λ_0	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	Intensität des Lichts der einfallenden Lichtwelle
λ_{FI}	m	mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle
λ	m	Lichtwellenlänge
μ	-	Erwartungswert des logarithmierten Partikelmerkmals
ρ_{FI}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Fluidichte
ρ_L	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Dichte der Luft
ρ_P	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Dichte der Partikel
ρ_T	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Dichte der Flüssigkeit des Tropfens
ρ_W	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Dichte von Wasser
σ	$\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	Oberflächenladungsdichte
σ_{In}	-	Standardabweichung des logarithmierten Partikelmerkmals
τ_A	s	Aufladungszeitkonstante
τ_P	s	Relaxationszeit der Partikel
τ_T	s	Relaxationszeit des Tropfens
ν_L	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	kinematische Viskosität von Luft
ϕ	°	Polarisationswinkel
φ	-	Abscheidewahrscheinlichkeit / Abscheidegrad

φ_E	-	Abscheidegrad „Elektrostatik“
φ_T	-	Abscheidegrad „Trägheit“
φ_{Tu}	-	Abscheidegrad „Turbulenz“
χ	-	Massenstromverhältnis Gas zu Flüssigkeit
Ψ	-	Trägheitsparameter
ω	-	Auftreffgrad

Parameter

Parameter	Anwendung
a_0	Approximation des Durchmesserhältnisses x/x_0
a_1	Approximation der spezifischen Tropfenladung
a_2	Approximation der spezifischen Tropfenladung
a_3	Approximation der spezifischen Tropfenladung
a_4	Approximation des Sauterdurchmessers
a_5	Approximation der Tropfenanzahlkonzentration
a_6	Approximation des Sauterdurchmessers
a_7	Approximation des Sauterdurchmessers
a_8	Approximation der Tropfenanzahlkonzentration
a_9	Approximation des Gesamtabscheidegrads
c_1	Bestimmung der Tropfengröße bei elektrischem Feld
c_2	Düsengeometrie Berechnung Sauterdurchmesser
c_3	Düsengeometrie Berechnung Sauterdurchmesser
c_4	Düsengeometrie Berechnung Sauterdurchmesser
c_5	Düsengeometrie Berechnung Sauterdurchmesser
c_6	Bestimmung des Auftreffgrades
c_7	Bestimmung des Auftreffgrades