

Minderung von Feinstaubkonzentrationen mit Sprühdüsen

Habilitationsschrift

zur Erlangung der Lehrbefähigung im Fach

Sicherheitstechnik / Umweltschutz

im

Fachbereich D - Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau, Sicherheitstechnik

der

Bergischen Universität Wuppertal

- Abteilung Sicherheitstechnik -

vorgelegt von

Dr.-Ing. Ulrich Klenk

aus Leonberg

Wuppertal 2014

Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit

Ulrich Klenk

**Minderung von Feinstaubkonzentrationen
mit Sprühdüsen**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., Habil.-Schr., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3670-1

ISSN 1861-1001

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Seit Abschluss meines Studiums im Jahr 2004 in der Abteilung Sicherheitstechnik an der Bergischen Universität Wuppertal forsche und lehre ich im Fachgebiet Sicherheitstechnik/Umweltschutz an derselben Universität. Während dieser Zeit konnte ich viele Projekte in den Bereichen Ausbreitungsberechnung und Ausbreitungsdarstellung, der Lokalisierung von Schadstoffquellen, der Partikel- und Gasmestechnik und der Minderung der Konzentrationen luftgetragener Schadstoffe eigenverantwortlich durchführen. Erkenntnisse aus diesen Projekten flossen direkt in die Lehre ein, aber auch in Arbeitsgruppen, die sich mit Richtlinien zu diesen Themen beschäftigen. Die im Bereich der Lokalisierung von Schadstoffquellen durchgeführten Projekte führten im Dezember 2008 zu meiner Promotion. Doch das große Interesse an diesen vielfältigen Themen erstarb nicht, so dass nun die Ergebnisse aus dem Schwerpunkt Immissionsschutz mit Fragen zur Staubreduzierung mit Hilfe wasserführender Bedüsungssysteme nicht nur für Fachpublikationen und Tagungsbeiträge genutzt, sondern in dieser Habilitationsschrift um weitere Aspekte ergänzt und zusammengefasst werden.

In der gesamten Zeit wurde ich von Herrn Professor Eberhard Schmidt begleitet und beraten. Ihm gilt mein Respekt und mein Dank. Denn über die Vielzahl von Tätigkeiten kam das Menschliche, dass das von ihm gegründete Fachgebiet Sicherheitstechnik/Umweltschutz auszeichnet, nie zu kurz. So ist es auch nur konsequent, dass er als Gutachter dieser Habilitation fungiert.

Herrn Professor Janoske, an dessen Lehrstuhl unter anderem eine Vielzahl grundlegender Schriften zu Mehrphasenströmungen entstanden und der immer für Diskussionen zu diesem Thema bereit war, danke ich ebenso für die Übernahme der Tätigkeit als Gutachter.

Auch gilt mein Dank Herrn Professor Bauer, der unter anderem das weite Feld der Anwendung immissionsmindernder Maßnahmen im Bereich des Bergbaus aus universitärer und industrieller Sicht abdeckt und ebenfalls als Gutachter fungiert.

Weiterhin danke ich meinen ehemaligen und derzeitigen Kollegen im Fachgebiet. Das von uns und für uns geschaffene Arbeitsklima mit einem nicht nur kollegialen sondern freundschaftlichen Mit- und Füreinander ist keine Selbstverständlichkeit sondern eine Besonderheit, die unbedingt bewahrt und weitergegeben werden muss.

Ein großer Teil der von mir im Fachgebiet Sicherheitstechnik/Umweltschutz durchgeführten Forschungsprojekte - so auch der Düsenprüfstand - wurden von der RWE Power AG finanziert. Ungewöhnlich für industrielle Forschungen dieses Ausmaßes ist, dass ich alle Ergebnisse für Publikationen und Vorträge nutzen konnte. Hierfür gilt den Verantwortlichen mein großer Dank.

Mein größter Dank gilt meiner Familie und lässt sich nicht in Worte fassen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zum Stand des Wissens	3
3	Sprühdüsen und Tropfenerzeugung	5
3.1	Tropfenerzeugung	5
3.1.1	Grundlagen zur Tropfenerzeugung	5
3.1.2	Strahlbildende Einstoff-Druckdüsen	5
3.1.3	Lamellenbildende Einstoff-Druckdüsen	6
3.1.4	Pralldüsen	8
3.2	Auswahl der Sprühdüsen	8
3.3	Tensidische Additive	10
4	Staubabscheidung an Tropfen	13
4.1	Grundlagen zur Staubabscheidung mit Wassertropfen	13
4.2	Geschwindigkeit und Relativgeschwindigkeit	14
4.3	Verweildauer und Relaxationszeit	20
4.4	Auftreffgrad und Abscheidegrad	24
4.5	Gereinigtes Volumen	27
4.6	Trenngrad	28
4.7	Spezifisches Reinigungsvolumen für PM10, PM2.5 und PM1	30
4.8	Spezifischer Trenngrad für PM10, PM2.5 und PM1	33
4.9	Spezifischer Trenngrad und spezifisches Reinigungsvolumen	34
4.10	Elektrostatik und Abscheidegrad	35
5	Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeiten an einem Sprühkegel	39
5.1	Relativgeschwindigkeit zwischen Luftströmung und Tropfenkollektiv	39
5.2	Konvergenz eines Sprühkegels	41
5.3	Berechnung der relativen Geschwindigkeit	42
6	Düsenprüfstand	45
6.1	Grundlagen der Untersuchungen am Düsenprüfstand	45
6.2	Aufbau des Düsenprüfstands	46
6.3	Bestimmung der Staubkonzentrationen	47
6.3.1	Messtechnik und Teilstromentnahme	47
6.3.2	Systematische Fehler bei der Ausgabe der Messergebnisse als Massenkonzentrationen	50

6.4	Stauberzeugung	51
6.5	Düsenauswahl und Ermittlung der notwendigen Anzahl von Düsen	53
6.6	Durchführung der Messungen	54
6.7	Ergebnisse der PM10- und PM2.5-Massenkonzentrationsmessungen	56
6.7.1	Darstellung der Messergebnisse	56
6.7.2	Minderung der PM10- und PM2.5-Massenkonzentrationen mit Normaldruckdüsen	57
6.7.3	Minderung der PM10- und PM2.5-Massenkonzentrationen mit tensidischen Additiven	61
6.7.4	Minderung der PM10- und PM2.5-Massenkonzentrationen mit Hochdruckdüsen	65
7	Ermittlung der Tropfengrößenverteilungen und Tropfengeschwindigkeiten	67
7.1	Messtechnik zur Bestimmung der Tropfengrößenverteilungen und -geschwindigkeiten .	67
7.2	Aufbau des Versuchsstandes	68
7.3	Ergebnisse der Messungen von Tropfengrößen und -geschwindigkeiten	70
7.3.1	Darstellung der Tropfengrößen und -geschwindigkeiten der untersuchten Sprühdüsen	70
7.3.2	Normaldruckdüsen	70
7.3.3	Additive	76
7.3.4	Hochdruckdüsen	80
8	Zusammenhang zwischen Trenngrad und Tropfengrößen	83
8.1	Grundlagen	83
8.2	Trenngrad als Funktion der Tropfengrößen	84
9	Dauerbetrieb und sicherheitstechnische Aspekte	89
9.1	Wasserqualität	89
9.2	Winterbetrieb und Vereisungsgefahr	92
9.3	Legionella pneumophila	93
10	Zusammenfassung	97
11	Ausblick	99
	Abkürzungsverzeichnis	101
	Formelzeichen	103
	Index	107
	Literaturverzeichnis	111

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kohlepartikeln an Wassertropfen auf einem Objektträger (Foto: F. Schröter)	1
3.1	Verschiedene Ausführungen von Turbulenzdüsen: a) Borda-Düse, b) Dralldüse, c) Knie- düse, d) Vollkegeldüse	6
3.2	Schnitt durch a) eine Vollkegeldüse und b) eine Hohlkegeldüse	6
3.3	Verschiedene Ausführungen von lamellenbildenden Düsen: a) Fächerdüse, b) Zungendüse oder Pralldüse, c) Ringspaltdüse	7
3.4	Schnitt durch eine Flachstrahldüse	7
3.5	Pralldüse mit Stift	8
3.6	Anordnung der Tensid-Moleküle im Randbereich eines Wassertropfens	10
4.1	Partikelbahnen und Grenzpartikelbahnen bei der Umströmung eines kugelförmigen Was- sertropfens	13
4.2	Bewegung eines Tropfens in einer Luftströmung	15
4.3	Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit von der Reynoldszahl	16
4.4	Tropfen aus einer Düse bei einer Anströmung von links mit 4 m s^{-1}	17
4.5	Von Tropfen unterschiedlicher Größe zurückgelegte Wege bei einer seitlichen Anströ- mung von 4 m s^{-1}	19
4.6	Betrag der relativen Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit bei einer seitlichen Anströmung von 4 m s^{-1}	20
4.7	Zurückgelegte Strecken, Tropfengeschwindigkeiten, und relative Geschwindigkeit für Trop- fen mit einem Durchmesser von $10 \text{ }\mu\text{m}$	22
4.8	Zurückgelegte Strecken, Tropfengeschwindigkeiten, und relative Geschwindigkeit für Trop- fen mit einem Durchmesser von $100 \text{ }\mu\text{m}$	23
4.9	Zurückgelegte Strecken, Tropfengeschwindigkeiten, und relative Geschwindigkeit für Trop- fen mit einem Durchmesser von $500 \text{ }\mu\text{m}$	23
4.10	Zurückgelegte Strecken, Tropfengeschwindigkeiten, und relative Geschwindigkeit für Trop- fen mit einem Durchmesser von $1000 \text{ }\mu\text{m}$	24
4.11	Parameter a und b in Abhängigkeit von der Tropfen-Reynoldszahl Re	26
4.12	Abscheidegrad φ in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers D	27
4.13	spezifisches Reinigungsvolumen $RV(x_{ae})$ in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers D .	28
4.14	Trenngrade $T(x_{ae})$ für einige Partikelgrößen bezogen auf die Tropfendurchmesser D . .	29
4.15	Grafische Darstellung der Massenanteile für PM10 und PM2.5	32
4.16	Spezifisches Reinigungsvolumen $RV(PMx)$ für PM10, PM2.5 und PM1 bezogen auf den Tropfendurchmesser D	33

4.17	Spezifischer Trenngrad $T(PM_x)$ für PM10, PM2.5 und PM1 bezogen auf den Tropfendurchmesser D	34
4.18	Spezifischer Trenngrad $T(PM_x)$ bezogen auf das spezifische Reinigungsvolumen $RV(PM_x)$	35
4.19	maximale und natürliche Oberflächenladungen der Tropfen und Partikeln	37
4.20	Zusätzlicher Auftreffgrad bei Berücksichtigung elektrostatischer Kräfte	38
5.1	Sprühkegel bei ruhender Luft (links) und bei einer Anströmgeschwindigkeit von 4 m s^{-1}	40
5.2	Einmischung von Rauch in ein Tropfenkollektiv	40
5.3	Einschnürung des Sprühkegels (Foto: IdF Heyrothsberge)	41
5.4	Geschwindigkeitsvektoren	42
5.5	Sprühbilder unterschiedlicher Düsen mit einem Sprühwinkel von 62° , 90° sowie 0° . . .	43
6.1	Aufnahme des Düsenprüfstands mit Kontrollstand auf der Saugseite	45
6.2	Skizze des Düsenprüfstands mit den wichtigsten Abmessungen (Quelle: DMT GmbH & Co. KG)	46
6.3	Die drei Fälle der Lichtstreuung: Beugung, Brechung und Reflexion	47
6.4	Funktions-skizze der eingesetzten Aerosolspektrometer (Quelle: GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG)	48
6.5	Absauggeschwindigkeiten bei der Probennahme aus staubhaltigen Luftströmungen . .	49
6.6	Feinstaubkonzentrationsmessgerät mit Kanalsonde zur isokinetischen Entnahme der Probenluft	49
6.7	Vergleich der Partikelgrößenkonventionen PM10 und PM2.5 nach DIN ISO 7708 und US-EPA	51
6.8	Partikelgrößenverteilung des Braunkohlenstaubes	52
6.9	Braunkohlenmassenstrom bezogen auf die Partikelgröße	52
6.10	PM $_x$ -Konzentrationen auf der Eingangsseite des Düsenprüfstandes (Rohgasseite) . . .	53
6.11	Überlappung der Sprühkegel im Düsenprüfstand in Richtung der Anströmung (oben) und als Aufsicht (unten) bei fünf Sprühdüsen mit einem Sprühwinkel von jeweils 90° .	54
6.12	Massenkonzentrationsverlauf während eines Versuchsdurchlaufs	55
6.13	Trenngrad für Vollkegeldüsen mit 5 bar Eingangsdruck	57
6.14	Trenngrad für Hohlkegeldüsen mit 5 bar Eingangsdruck	59
6.15	Trenngrad für Flachstrahldüsen mit 5 bar Eingangsdruck	60
6.16	Trenngrad bei der Verwendung unterschiedlicher Additive mit unterschiedlichen Konzentrationen bei 5 bar Eingangsdruck	62
6.17	Verschiebung der gemessenen PM $_x$ -Konzentrationen bei der Verwendung von Additiven	64
6.18	Wasserbrücken zwischen Kohlenstoffkugeln mit a) reinem Wasser und b) Wasser mit Additiven (Fotos: F. Schröter und G. Ciesinski, BU Wuppertal)	65
6.19	Trenngrad der drei Hochdruckdüsen bei 50 bar und 100 bar Eingangsdrücken	66
7.1	Funktionsschema eines Phasen-Doppler-Anemometers	68
7.2	Versuchsstand zur Untersuchung von Tropfengrößenverteilungen und Geschwindigkeiten (Foto: F. Wienecke, IdF Heyrothsberge)	69
7.3	Messebene und Messpunkte für die PDA	69
7.4	Tropfengrößen über die Messachse für Vollkegeldüsen	71
7.5	Sprühbild der Düse D13 mit reinem Wasser	71

7.6	Tropfengeschwindigkeiten über die Messachse für Vollkegeldüsen	72
7.7	Tropfengrößen über die Messachse für Hohlkegeldüsen	73
7.8	Tropfengeschwindigkeiten über die Messachse für Hohlkegeldüsen	73
7.9	Tropfengrößen über die Messachse für Flachstrahl- und Fächerdüsen	74
7.10	Tropfengeschwindigkeiten über die Messachse für Flachstrahl- und Fächerdüsen	75
7.11	Tropfengrößenverteilung über die Messachse für die Vollkegeldüse D13 ohne und mit Additiven	76
7.12	Tropfengeschwindigkeiten über die Messachse für die Vollkegeldüse D13 ohne und mit Additiven	77
7.13	Tropfengrößen über die Messachse für die Hohlkegeldüse D53 ohne und mit Additiven	77
7.14	Tropfengeschwindigkeiten über die Messachse für Hohlkegeldüse D53 ohne und mit Additiven	78
7.15	Tropfengrößen über die Messachse für die Fächerdüse D60 ohne und mit Additiven	78
7.16	Tropfengeschwindigkeiten über die Messachse für die Fächerdüse D60 ohne und mit Additiven	79
7.17	Tropfengrößen über die Messachse für die Hochdruckdüsen	81
7.18	Tropfengeschwindigkeiten über die Messachse für die Hochdruckdüsen	81
8.1	Vergleich der aus den Tropfengrößen und aus den Konzentrationsänderungen berechneten Trenngrade $T(PM10)$ und $T(PM2.5)$ für einen Wassereingangsdruck von 5 bar	85
8.2	Vergleich der aus den Tropfengrößen und aus den Konzentrationsänderungen berechneten Trenngrade $T(PM10)$ und $T(PM2.5)$ für die Hochdruckdüsen	85
8.3	Vergleich der aus der mittleren Tropfengröße D_{32} und aus den Konzentrationsänderungen berechneten Trenngrade $T(PM10)$ und $T(PM2.5)$ für einen Wassereingangsdruck von 5 bar	86
8.4	Vergleich der aus der mittleren Tropfengrößen D_{20} und aus den Konzentrationsänderungen berechneten Trenngrade $T(PM10)$ und $T(PM2.5)$ für einen Wassereingangsdruck von 5 bar	87
9.1	Verstopfte Düse (links) und verockerte Düse (rechts)	90
9.2	Prinzip der Laserlichtbeugung	91
9.3	Massenverteilungssummen der Schwebstoffe im Bedüsungswasser	91
9.4	Bedüsungseinrichtungen im Winterbetrieb (Fotos: H.-P. Schöngen, RWE Power AG)	92
9.5	Legionella pneumophila in einem Lungenfibroblasten (Bild: Dr. Edwin P. Ewing Jr., CDC)	94

Tabellenverzeichnis

1.1	Unterteilung der untersuchten Düsen nach Düsenart und -charakteristik	2
2.1	Publikationen zur Abscheidung von Partikeln an Wassertropfen und zur Lösung derer Bewegungsgleichungen	4
3.1	Auswahl der Sprühdüsen	9
3.2	Ergebnisse der Bestimmung der Oberflächenspannungen	11
4.1	Kumulierte relative Massenanteile laut Konventionen für die thorakale Fraktion (PM10) und die einatembare Fraktion (PM2.5)	31
6.1	Gegenübestellung von Brechungsindex und Materialdichte des Kalibrier- und Teststaubes	50
6.2	Trenngrade und spezifische Reinigungsvolumen der Vollkegeldüsen	58
6.3	Trenngrade und spezifische Reinigungsvolumen der Hohlkegeldüsen	59
6.4	Trenngrade und spezifische Reinigungsvolumen der Flachstrahl- und Fächerdüsen . . .	61
6.5	Trenngrade und spezifische Reinigungsvolumen in Abhängigkeit von Additiven und deren Konzentrationen	63
6.6	Trenngrade und spezifische Reinigungsvolumen in Abhängigkeit vom Eingangsdruck der Hochdruckdüsen	66
7.1	Tropfengrößenverteilungen bezüglich der Tropfenanzahl	70
7.2	Definitionen der unterschiedlichen Mittelungen von Tropfendurchmessern	70
7.3	Tropfengrößenverteilungen, mittlere Tropfendurchmesser und Tropfengeschwindigkeiten der Vollkegeldüsen	72
7.4	Tropfengrößenverteilungen, mittlere Tropfendurchmesser und Tropfengeschwindigkeiten der Hohlkegeldüsen	74
7.5	Tropfengrößenverteilungen, mittlere Tropfendurchmesser und Tropfengeschwindigkeiten der Flachstrahl- und Fächerdüsen	75
7.6	Tropfengrößenverteilungen, mittlere Tropfendurchmesser und Tropfengeschwindigkeiten bei der Verwendung von Additiven	80
7.7	Tropfengrößenverteilungen, mittlere Tropfendurchmesser und Tropfengeschwindigkeiten der Hochdruckdüsen	82
8.1	Vom Düsentyp abhängige Korrekturfaktoren für das spezifische Reinigungsvolumen . .	84