

# 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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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 Gasmesstechnik 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

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zum Stand des Wissens</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Sprühdüsen und Tropfenerzeugung</b>	<b>5</b>
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
<b>4</b>	<b>Staubabscheidung an Tropfen</b>	<b>13</b>
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
<b>5</b>	<b>Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeiten an einem Sprühkegel</b>	<b>39</b>
5.1	Relativgeschwindigkeit zwischen Luftströmung und Tropfenkollektiv . . . . .	39
5.2	Konvergenz eines Sprühkegels . . . . .	41
5.3	Berechnung der relativen Geschwindigkeit . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Düsenprüfstand</b>	<b>45</b>
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
<b>7</b>	<b>Ermittlung der Tropfengrößenverteilungen und Tropfengeschwindigkeiten</b>	<b>67</b>
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
<b>8</b>	<b>Zusammenhang zwischen Trenngrad und Tropfengrößen</b>	<b>83</b>
8.1	Grundlagen . . . . .	83
8.2	Trenngrad als Funktion der Tropfengrößen . . . . .	84
<b>9</b>	<b>Dauerbetrieb und sicherheitstechnische Aspekte</b>	<b>89</b>
9.1	Wasserqualität . . . . .	89
9.2	Winterbetrieb und Vereisungsgefahr . . . . .	92
9.3	Legionella pneumophila . . . . .	93
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>97</b>
<b>11</b>	<b>Ausblick</b>	<b>99</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>101</b>
	<b>Formelzeichen</b>	<b>103</b>
	<b>Index</b>	<b>107</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>111</b>



# 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 $4 \text{ m s}^{-1}$ . . . . .	17
4.5	Von Tropfen unterschiedlicher Größe zurückgelegte Wege bei einer seitlichen Anströ- mung von $4 \text{ m s}^{-1}$ . . . . .	19
4.6	Betrag der relativen Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit bei einer seitlichen Anströmung von $4 \text{ m s}^{-1}$ . . . . .	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 $\varphi$ 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 $4 \text{ m s}^{-1}$	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 $62^\circ$ , $90^\circ$ sowie $0^\circ$ . . .	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 $90^\circ$ .	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