

# **Einsatz elektrischer Abscheider zur Minderung von Feinstaub-Emissionen in Innenstädten**

## **Dissertation zur Erlangung eines Doktorgrades**

im  
**Fachbereich D – Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau,  
Sicherheitstechnik**  
der  
**Bergischen Universität Wuppertal**

**- Abteilung Sicherheitstechnik -**

vorgelegt von  
**Diplom-Ingenieur Matthias Kaul**  
aus Wuppertal

Wuppertal 2015



Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit

**Matthias Kaul**

**Einsatz elektrischer Abscheider zur Minderung  
von Feinstaub-Emissionen in Innenstädten**

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., Diss., 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 978-3-8440-3775-3

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)

„Alles eilt zur Elektrizität, ausgenommen Flammen und brennende Körper und die leichteste Luft... Gleichwohl lockt sie den Rauch eines gelöschten Lichtes an... Die Körper werden zur Elektrizität und geraden Wegs zum Zentrum der Elektrizität getragen.“

Sir William Gilbert

(englischer Hofphysiker in seinem Werk „De Magnete“ um 1600)



## Danksagung

Mein größter Dank gebührt meinem geschätzten Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt. Der gewährte Freiraum beim wissenschaftlichen Arbeiten gepaart mit seinem unerschöpflichen Wissen in allen Bereichen der Verfahrenstechnik und auch darüber hinaus haben die vertrauensvolle Umgebung geschaffen, die diese Arbeit möglich gemacht hat.

Ich danke ihm und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Joachim M. Marzinkowski für die Erstellung der Gutachten sowie Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Anke Kahl und PD Dr.-Ing. habil. Achim Dittler für die Mitarbeit in der Prüfungskommission.

Für die unwahrscheinlich gute Arbeitsatmosphäre und den respektvollen, freundschaftlichen Umgang miteinander danke ich jedem einzelnen Mitglied unseres Teams! Allen voran Frau Heike Kloke-Affeld, die mir in zahllosen verwaltungstechnischen, aber auch privaten Scharmützeln den Rücken gestärkt hat.

„Meinen“ Studenten Lars Lyhme, Tom Noquer und André Bestian danke ich für die gewissenhaft durchgeführten Messungen und Recherchen und für ihre sehr guten Abschlussarbeiten.

Für die Durchsicht des Manuskripts danke ich sehr meinen Kollegen Sylvia Bach, Matthias Parey, Kai Vaupel und Bert Schröer.

Ich danke meinen Eltern Dieter und Gisela Kaul für die grenzenlose Unterstützung! Ihr Vertrauen in mein Tun hat mir alles ermöglicht.

Für die Geduld, den Rückhalt und die Liebe danke ich meiner Frau Ance! Danke für alles was Du bist!

Ich gedenke all derer, die uns in den letzten Jahren teilweise fürchterlich plötzlich für immer verlassen mussten.

Wuppertal, im Juni 2015

Matthias Kaul



## Zusammenfassung

Die Minderung luftgetragener partikelförmiger Immissionen gilt als eine der großen technischen Herausforderungen der heutigen Zeit. Da die durch mikro- und nanoskalige Partikeln hervorgerufenen gesundheitlichen Auswirkungen unbestritten sind, werden den von Grenzwertüberschreitungen betroffenen Kommunen durch die Europäische Union Minderungsmaßnahmen auferlegt.

In der vorliegenden Arbeit wird erstmals die im industriellen Bereich seit mehr als hundert Jahren eingesetzte Technik der elektrostatischen Staubabscheidung mit dem Ziel der Minderung von Feinstaub-Emissionen in Innenstädten erprobt. Zu diesem Zweck wurden als zwei Hauptemittenten partikulärer Emissionen Straßenkehrmaschinen und private Hausfeuerungen ausgemacht und für exemplarische Untersuchungen herangezogen.

Bei der Anwendung von Elektroabscheidern an Straßenkehrmaschinen stellen sich hohe Fluidgeschwindigkeiten der Kehrmaschinenabluft von bis zu 30 m/s als besonders problematisch dar. An einer Versuchsanlage konnten die Auswirkungen hoher Aerosolgeschwindigkeiten experimentell nachvollzogen und durch Anwendung von modifizierten Modellen auch theoretisch belegt werden. Ein Kompromiss zwischen der konstruktiven Verzögerung des zu reinigenden Fluides und der Nutzung mehrerer Abscheider ermöglichte für die massebezogenen Fraktionen  $PM_{10}$  und  $PM_{2,5}$  in der Abluft der Kehrmaschine einen Abscheidegrad von bis zu 40 %.

Partikeln aus Hausfeuerungen zeichnen sich durch eine hohe Variabilität hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und ihres Feuchtegehalts aus. Zudem lösen sich die am Ofenrohr abgeschiedenen und mittlerweile agglomerierten rußhaltigen Partikeln leicht ab, weshalb sie wieder in den Abgasstrom eintreten können. Experimente mit den einzelnen Hauptkomponenten partikulärer Rauchgasbestandteile Ruß, Salz und Di-Ethylhexyl-Sebacat (DEHS) als Ersatz für teerhaltige Verbindungen gaben Aufschluss über das unterschiedliche Verhalten bei der elektrostatischen Abscheidung. Weiterhin konnte durch die Konstruktion und Erprobung einer automatischen Schornsteinreinigungsvorrichtung ein wichtiger Beitrag für die Entstaubung von Rauchgasen aus privaten Feuerungen geleistet werden.



## Abstract

Reducing airborne particulate immissions is considered to be one of the great technical challenges of the present time. Because the health effects caused by micro- and nanoscale particles are indisputable, the European Union imposed mitigation measures on the municipalities affected by exceedances.

Electrostatic precipitators (ESP) are state of the art and has been used to clean process gas for more than hundred years. In the present work ESP-technology has been examined for reducing the emissions of particulate matter in city centres for the first time. For this purpose road sweepers and private furnaces have been identified as two main sources of particulate emissions and were therefor chosen for exemplary research.

Installing electrostatic precipitators on sweepers, high fluid velocities of the sweeper's exhaust by up to 30 m/s arise as particular problem. The impact of rising aerosol velocity was experimentally reproduced at a test facility and also theoretically supported by application of modified models. By a compromise between the constructive delay of the fluid and the usage of more than one separator, in the exhaust air of the sweeper an precipitation efficiency of up to 40 % for the fractions of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2,5</sub> has been achieved.

Particles from home furnaces are characterized by a high degree of variability in terms of their chemical composition and its moisture content. Furthermore the precipitated and meanwhile agglomerated soot-containing particles detach very easily from the stovepipe, so they can reentrain in the clean gas flow. Experiments with the main components of particulate components of flue gas (soot, salt, and tar) provided information about the different behaviour in matters of electrostatic precipitation. An important contribution to the dedusting of flue gases from private furnaces could be achieved through the design and field testing of an automatic chimney cleaning device.



# Inhaltsverzeichnis

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Einführung.....   | 1  |
| 2     | Grundlagen .....  | 3  |
| 2.1   | Grundlagen der Partikeltechnologie.....                                 | 3  |
| 2.1.1 | Einführung.....   | 3  |
| 2.1.2 | Äquivalentdurchmesser.....  | 3  |
| 2.1.3 | Darstellung von Partikelgrößenverteilungen .....                        | 8  |
| 2.1.4 | Particulate Matter-Fraktionen.....                                      | 11 |
| 2.1.5 | Messtechnik .....   | 13 |
| 2.2   | Grundlagen der elektrostatischen Abscheidung .....                      | 15 |
| 2.2.1 | Allgemeines.....  | 15 |
| 2.2.2 | Erzeugung der Ladung.....   | 17 |
| 2.2.3 | Partikelaufladung .....   | 18 |
| 2.2.4 | Partikeltransport .....   | 22 |
| 2.2.5 | Partikelanlagerung .....  | 23 |
| 2.2.6 | Partikelentfernung .....  | 24 |
| 2.2.7 | Störeinflüsse .....   | 24 |
| 3     | Einsatz an Straßenkehrmaschinen .....                                   | 27 |
| 3.1   | Einführung.....   | 27 |
| 3.2   | Emissionsminderungseinrichtungen an Kehrmaschinen .....                 | 27 |
| 3.3   | Unterteilung von Straßenkehrmaschinen.....                              | 28 |
| 3.3.1 | Allgemeines.....  | 28 |
| 3.3.2 | Trocken saugende Kehrmaschinen.....                                     | 29 |
| 3.3.3 | Kehrmaschinen mit Elevatorförderung.....                                | 30 |
| 3.3.4 | Nass saugende Kehrmaschinen .....                                       | 31 |
| 3.4   | Feinstaubminderungspotential von Straßenkehrmaschinen.....              | 32 |
| 3.5   | Theoretische Betrachtung der anwendungsspezifischen Besonderheiten .... | 36 |
| 3.5.1 | Einfluss der Fluidgeschwindigkeit .....                                 | 36 |
| 3.5.2 | Einfluss der Kehrgutzusammensetzung.....                                | 37 |
| 3.5.3 | Charakterisierung der zu separierenden Stäube .....                     | 38 |
| 3.6   | Beschreibung des genutzten Elektroabscheiders.....                      | 41 |
| 3.7   | Vorversuche zum Einfluss der Fluidgeschwindigkeit .....                 | 42 |
| 3.7.1 | Versuchsanlage.....   | 42 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 3.7.2 | Versuchsmaterial.....   | 44  |
| 3.7.3 | Versuchsdurchführung.....   | 48  |
| 3.7.4 | Versuchsergebnisse.....   | 50  |
| 3.7.5 | Diskussion der Versuchsergebnisse.....  | 55  |
| 3.8   | Prototypentwicklung.....  | 65  |
| 3.8.1 | Einführung.....   | 65  |
| 3.8.2 | Versuchsanlage.....   | 65  |
| 3.8.3 | Versuchsdurchführung.....   | 68  |
| 3.8.4 | Versuchsergebnisse.....   | 69  |
| 3.8.5 | Ergebnisdiskussion.....   | 70  |
| 3.9   | Weiterentwicklung des Prototyps zur Serienreife.....  | 75  |
| 3.9.1 | Umsetzung der Versuchsergebnisse.....   | 75  |
| 3.9.2 | Emissionsmessungen bei Einsätzen in verschiedenen<br>Innenstadtszenarien.....                         | 76  |
| 3.10  | Kapitelzusammenfassung.....   | 80  |
| 4     | Einsatz an Hausbrandanlagen.....  | 82  |
| 4.1   | Beschreibung der Anwendung.....   | 82  |
| 4.2   | Charakterisierung der zu separierenden Stäube.....  | 82  |
| 4.2.1 | Einführung.....   | 82  |
| 4.2.2 | Ablauf der vollständigen Verbrennung.....   | 83  |
| 4.2.3 | Entstehung partikulärer Emissionen.....   | 85  |
| 4.2.4 | Beschreibung der einzelnen Rauchgaspartikeln.....   | 88  |
| 4.3   | Abscheideverhalten unterschiedlicher Rauchgaspartikeln.....   | 90  |
| 4.3.1 | Beschreibung der Versuchsanlage.....  | 90  |
| 4.3.2 | Beschreibung der genutzten Aerosole.....  | 91  |
| 4.3.3 | Messung der Abscheidegrade unterschiedlicher Rauchgaspartikeln.....                                   | 92  |
| 4.3.4 | Auswertung.....   | 96  |
| 4.4   | Einfluss der Luftfeuchte auf die Abscheidung von Rauchgaspartikeln.....                               | 98  |
| 4.4.1 | Beschreibung der Versuchsanlage.....  | 98  |
| 4.4.2 | Messung der Abscheidegrade unterschiedlicher Rauchgaspartikeln bei<br>verschiedenen Luftfeuchten..... | 101 |
| 4.4.3 | Auswertung.....   | 106 |
| 4.5   | Kontrollierte Ablösung abgeschiedener Rauchgaspartikeln.....  | 107 |
| 4.5.1 | Allgemeines.....  | 107 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.5.2 | Versuchsanlage.....                           | 107 |
| 4.5.3 | Methoden zur Überprüfung der Anhaftungen..... | 109 |
| 4.5.4 | Lösungsansätze zur Anhaftungsentfernung.....  | 110 |
| 4.5.5 | Prototypentwicklung.....                      | 114 |
| 4.6   | Kapitelzusammenfassung.....                   | 115 |
| 5     | Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....   | 116 |
| 6     | Abkürzungen und Formelzeichen.....            | 119 |
| 7     | Literatur.....                                | 123 |