

# **Zur Feinstaubabscheidung aus Holzfeuerungsanlagen mit precoatierten Oberflächenfiltern**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
an der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. Sascha Schiller  
aus Hemmendorf bei Hameln

Tag des Kolloquiums: 08.02.2016  
1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid  
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt



Schriftenreihe Lehrstuhl für Partikelverfahrenstechnik

Band 2

**Sascha Schiller**

**Zur Feinstaubabscheidung aus Holzfeuerungs-  
anlagen mit precoatierten Oberflächenfiltern**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**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.: Paderborn, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4342-6

ISSN 2198-1302

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)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2010 bis 2016 während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Partikelverfahrenstechnik der Universität Paderborn.

Bei meinem Mentor und Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid bedanke ich mich herzlichst für die Anregung zu dieser Arbeit und die Betreuung während meiner Promotionszeit. Sein Vertrauen in mich sowie den mir zur Verfügung gestellten Freiraum in der Forschung haben wesentlich dazu beigetragen, dass ich meine Ideen zur Entfaltung bringen konnte und dabei auch über den Tellerrand hinaus in andere Themengebiete Einblick nehmen durfte. Die vielen anregenden und fruchtbaren Diskussionen mit dir, lieber Hajo, haben mich immer für den nächsten Schritt motiviert.

Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt gilt mein besonderer Dank, da er freundlicherweise das Korreferat zu dieser Arbeit übernommen hat. Die Zusammenarbeit mit ihnen und ihrem Institut war immer sehr produktiv und hat mir viel Freude bereitet.

Den vielen Mitarbeitern, Kollegen und Freunden, welche durch ihr Zutun ihren Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben, möchte ich meinen großen Dank für die genommene Zeit und die interessanten Diskussionen aussprechen. Besonders möchte ich hier Philipp Grimm, Steffen Jesinghausen, Steffen Franke, Michael Dörmann, Alexander Hülshorst, Norbert Temborius, Norbert Krause, Friedrich Prill und David Rasche hervorheben. Mit euch habe ich viele engagierte Menschen kennengelernt, die mich bei der Arbeit tatkräftig unterstützt haben. Meinem guten Freund Tim Strässer möchte ich an dieser Stelle besonders für die Korrektur des Manuskripts danken.

Meinen Eltern gilt ein großes Dankeschön nicht nur für die finanzielle Unterstützung während des Studiums, sondern insbesondere für ihr Vertrauen und den Ansporn. Ohne euch wäre ich jetzt nicht da, wo ich bin!

Auch dem Rest meiner Familie – insbesondere meinen lieben Schwestern, meinen wissbegierigen Großvätern und meinen großartigen Schwiegereltern – spreche ich hiermit meinen Dank aus. Durch euer Interesse und die ständige Frage nach dem *WARUM* habe ich nicht nur gelernt, meine Ideen kritisch zu reflektieren, sondern auch den Blick weiter schweifen zu lassen. Meiner Frau Daniela gebührt besonderer Dank für den Rückhalt und die Ermutigung in jeder Situation sowie für das offene Ohr und das kritische Lesen des Manuskripts. Ich bin froh, dass ich dich habe und ich mich immer auf deine Unterstützung verlassen kann!

Beim deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie bei den Projektpartnern PEK GmbH und Hellmich GmbH und Co. KG bedanke ich mich herzlich für die finanzielle Förderung und die gute Zusammenarbeit während der verschiedenen Projekte, deren Ergebnisse Einzug in diese Arbeit gefunden haben.

## Zusammenfassung

Die Abscheidungen von feinsten Stäuben, welche aus Biomassefeuerungsanlagen emittiert werden, stellt seit der Novellierung der ersten Bundesimmissionschutzverordnung in 2010 für viele Feuerungsanlagenbetreiber eine Herausforderung dar, da viele der betriebenen Kessel die vorgeschriebenen Grenzwerte nicht einhalten.

In dieser Arbeit soll ein völlig neuer Ansatz zur dauerhaft stabilen Abscheidung von Feinstäuben aus Holzfeuerungsanlagen präsentiert werden, welcher durch die Verwendung eines precoatierten Schlauchfilters Abscheidegrade von mehr als 99 % erreicht. Da hierbei die Gefahr einer Verstopfung des Filtermediums durch das Precoatmaterial oder den Feinstaub besteht, wird die Auswahl der richtigen Filtermedium-Precoat-Kombination in dieser Arbeit näher beleuchtet. Die Einführung einer Kennzahl – der *Precoateffizienz* – erlaubt es, Filtrationsprozesse, bei denen Precoatmaterialien genutzt werden, hinsichtlich ihres Precoatverbrauchs zu bewerten. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, die betrachteten Prozesse anhand aussagekräftiger Parameter zu optimieren und dabei Ressourcen zu sparen. Das durch die Anlagenfahrweise entstehende inhomogene Druckverlustverhalten eines Filters ist Gegenstand theoretischer Untersuchungen. Mit dem hierfür entwickelten Modell können charakteristische Filterzustände beschrieben werden.

Neben der Charakterisierung eines kompakten Laborschlauchfilters wird zudem auch ein Scale-up auf eine realistische Pilotanlage vorgenommen.

## Abstract

The precipitation of ultrafine dust emitted by biomass combustion processes challenges plant operators and filter manufacturers since the First Federal Emission Law (1. BImSchV) was amended in 2010, because many of the heaters in the field do not fulfil the given limits.

In this work a new concept is presented, which deposits the ultrafine dust emitted by biomass combustion processes in a long-term stable process. By using precoat materials in combination with a baghouse filter, total collection efficiencies of over 99 % are reached. To prevent clogging of the used filter media from the very sticky and small ultrafine dust and the precoat particles, the selection of the best suited combination of filter media and precoat material is examined more closely in this work. The introduction of a ratio – the *precoat efficiency* – permits the evaluation of precoat-using filtration processes depending on their precoat consumption. Thus, the possibility is given, to optimise filtration processes and to save resources by using significant parameters. To describe the inhomogeneous pressure drop behaviour resulting from the plant operation mode, theoretical investigations have been done. By means of a model developed in this work, it is possible, to describe characteristic conditions of a filtration process.

In addition to the characterisation of a laboratory plant a scale-up onto a real application is done.

## Vorträge und Publikationen

### Veröffentlichungen und Konferenz-Proceedings

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Höchst effiziente Feinstaubabscheidung aus Kleinfeuerungsanlagen und dauerhafte Einhaltung von extrem niedrigen Emissionswerten mit einem Schlauchfilter.** VDI-Berichte 2165: Emissionsminderung 2012, 2012.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Development of a Baghouse Filter for Domestic Wood-Fired Heaters.** Proceeding: World Filtration Congress 11, 2012.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Multiple-Use of Precoat Materials for the Fine Dust Filtration of a Baghouse Filter for Wood-Fired Heaters.** Proceeding: Filtech 2013, 2013.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Hocheffiziente Feinstaubabscheidung aus Kleinfeuerungsanlagen mit einem Schlauchfilter.** Chemie Ingenieur Technik: 85 (2013), Nr. 8, S. 1324-1328.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Ultrafine Dust Filtration Using Precoat Materials Considering the Influence of Filter Media.** Chemical Engineering and Technology: 37 (2014), Nr. 6, S. 1009-1020.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Evaluation of the Efficiency of Filtration Processes Using Precoat Materials.** Proceeding: Filtech 2015, 2015.

Prill, F.; Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Combined Separation of Ultrafine Dust Particles and Gaseous Pollutants Emitted by Biomass Combustions.** Proceeding: Filtech 2015, 2015.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Highly Efficient Filtration of Ultrafine Dust in Baghouse Filters Using Precoat Materials.** Powder Technology: 279, 2015, S. 96-105.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Evaluation of the Efficiency of Filtration Processes Using Precoat Materials.** Chemical Engineering and Technology: DOI: 10.1002/ceat.201500385.

### Vorträge und Poster

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Development of a Fine Particle Filter for Domestic Wood-Fired Heaters.** European Aerosol Conference (EAC): Manchester, 2011.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Development of a Fine Particle Filter for Domestic Wood-Fired Heaters.** European Congress of Chemical Engineering: Berlin, 2011.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Feinstaubabscheidung aus Kleinfeuerungsanlagen zur Einhaltung von extrem niedrigen Emissionswerten mit einem Schlauchfilter.** VDI Fachtagung: "Emissionsminderung 2012", Nürnberg, 2012.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Feinstaubabscheidung aus Kleinf Feuerungsanlagen zur Einhaltung von extrem niedrigen Emissionswerten mit einem Schlauchfilter**. Abscheiderfachgespräch 2012: Leipzig, 2012.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Feinstaubabscheidung aus Kleinf Feuerungsanlagen zur Einhaltung von extrem niedrigen Emissionswerten mit einem Schlauchfilter**. Jahrestreffen des Fachausschusses "Gasreinigung": Frankfurt a. M., 2012.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Filtration of Ultrafine Particles Emitted by Biomass Combustion – Multiple-Use of Precoat Materials in Baghouse Filters**. Workshop der GAeF für Aerosol Emissions from Fossil Fuel and Biomass Combustion: Prag, 2013.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Multiple-Use of Precoat Materials – Ultrafine Dust Filtration of Baghouse Filters**. International Congress on Particle Technology (PARTEC): Nürnberg, 2013.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Wiederverwendung von Precoatmaterialien für die Feinstaubfiltration aus Holzfeuerungsanlagen**. Jahrestreffen des Fachausschusses "Gasreinigung": Cottbus, 2013.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Feinstaubfiltration aus Holzfeuerungsanlagen mit einem Schlauchfilter unter Zuhilfenahme von Precoatmaterialien**. Jahrestreffen des Fachausschusses "Gasreinigung": Karlsruhe, 2014.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Filtration of Ultrafine Dust Emitted by Biomass Combustion – Multiple-Use of Precoat Materials in Baghouse Filtration**. Aerosol Technology 2014: Karlsruhe, 2014.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Feinstaubfiltration aus Holzfeuerungsanlagen mit einem Schlauchfilter unter Zuhilfenahme von Precoatmaterialien**. Abscheiderfachgespräch 2014: Leipzig, 2014.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Filtration of Ultrafine Dust Emitted by Biomass Combustion with a Baghouse Filter Using Precoat Materials**. American Association for Aerosol Research, 33rd annual conference: Orlando, 2014.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Modellierung und Simulation des Druckverlustverlaufs in Schlauchfiltern bei inhomogenen Filtrationsbedingungen**. Jahrestreffen des Fachausschusses "Gasreinigung": Bremen, 2015.

Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Bewertung von Filtrationsprozessen anhand der Precoat-Effizienz**. Jahrestreffen des Fachausschusses "Gasreinigung": Bremen, 2015.

Prill, F.; Schiller, S.; Schmid, H.-J.: **Combined Separation of Fine Dust Particles and Gaseous Components Emitted by Biomass Combustions**. Jahrestreffen des Fachausschusses "Gasreinigung": Bremen, 2015.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1	Staubabscheiden mit Abreinigungsfiltern .....	5
2.1.1	Funktionsweise .....	5
2.1.2	Filtermaterialien und Filterhilfsmittel.....	9
2.1.3	Beschreibung und Modellierung der Filtercharakteristik.....	14
2.2	Feinstaubabscheidung aus Biomassefeuerungsanlagen .....	19
2.2.1	Elektrostatische Abscheider .....	19
2.2.2	Zyklone .....	21
2.2.3	Nassabscheider .....	22
2.2.4	Filternde Abscheider .....	23
<b>3</b>	<b>Aufbau und Methodik .....</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>Anlagen zur Feinstaubfiltration aus Holzfeuerungsanlagen .....</b>	<b>29</b>
4.1	Filterrendenversuchsstand zur Charakterisierung von Filtermedien ..	29
4.1.1	Anlagenaufbau .....	29
4.1.2	Messverfahren .....	31
4.2	Laboranlage .....	34
4.2.1	Anlagenaufbau .....	34
4.2.2	Messverfahren .....	40
4.3	Pilotanlage .....	40
4.3.1	Anlagenaufbau .....	42
4.3.2	Messverfahren .....	46
<b>5</b>	<b>Untersuchungen zur Feinstaubabscheidung mit Oberflächenfiltern..</b>	<b>47</b>
5.1	Eigenschaften von Aerosolen aus Holzfeuerungsanlagen .....	47
5.2	Precoatmaterialien und deren Charakteristika .....	51
5.3	Untersuchung der Eignung von Filtermedien zur Feinstaubabscheidung .....	56
5.3.1	Vorgehensweise .....	59
5.3.2	Druckverlust in Abhängigkeit von der Flächenmasse .....	59
5.3.3	Abscheidegrad .....	63
5.3.4	Bewertung .....	69
5.4	Feinstaubfiltration unter Hinzunahme von Precoatmaterialien .....	70
5.4.1	Vorgehensweise an der Laboranlage .....	72
5.4.2	Vorversuche an der Laboranlage.....	75
5.4.3	Charakterisierung des Laborschlauchfilters .....	79

---

5.4.4	Vorgehensweise an der Pilotanlage.....	87
5.4.5	Vorversuche an der Pilotanlage .....	89
5.4.6	Bewertung.....	91
5.5	Mehrfache Wiederverwendung der Precoatmaterialien .....	92
5.5.1	Untersuchungen mit der Laboranlage .....	93
5.5.2	Untersuchungen mit der Pilotanlage .....	98
5.5.3	Mischung mit ungebrauchtem Precoatmaterial .....	105
5.5.4	Veränderung der Precoatcharakteristika.....	108
5.5.5	Einsparpotential .....	119
5.5.6	Bewertung.....	122
5.6	Einführung der <i>Precoateffizienz PE</i> zur Bewertung von Filtrationsprozessen .....	123
5.6.1	Berechnung der <i>Precoateffizienz</i> .....	123
5.6.2	Anwendung auf experimentelle Untersuchungen.....	125
5.6.3	Bewertung.....	128
<b>6</b>	<b>Modellierung des Druckverlustverlaufs bei inhomogenen Filtrationsbedingungen.....</b>	<b>129</b>
6.1	Abgrenzung und Zielsetzung .....	129
6.2	Mehrsegment-Modell auf Basis der Darcy-Gleichung.....	132
6.2.1	Randbedingungen, Aufbau und Bestimmung unabhängiger Parameter .....	132
6.2.2	Modellierung des Druckverlustverlaufs .....	137
6.3	Simulation und Validierung mit experimentellen Ergebnissen.....	144
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>151</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>155</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>162</b>