Abgasnachbehandlung mit Partikelfiltersystemen in Nutzfahrzeugen

Habilitationsschrift zur Erlangung der Lehrbefähigung im Fach

Umweltschutz

im Fachbereich D – Abteilung Sicherheitstechnik

an der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt im November 2013 von

Dr.-Ing. Achim Dittler

aus Pforzheim

1. Gutachter:	Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt
2. Gutachter:	Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske
3. Gutachter:	Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch (KIT)

Tag des Kolloquiums: 24. Juli 2014

Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit

Achim Dittler

**Abgasnachbehandlung mit Partikelfiltersystemen
in Nutzfahrzeugen**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3010-5

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Angestellter der Daimler AG in Stuttgart. Sie behandelt wesentliche ingenieurwissenschaftliche Aspekte der Anwendung von Partikelfiltersystemen zur Abgasnachbehandlung von dieselmotorischen Abgasen aus Nutzfahrzeugen. Die Arbeit soll dem/der Interessierten die vielfältigen Herausforderungen bei der Anwendung von Partikelfiltern zur Abgasnachbehandlung kompakt erläutern und Lösungswege entsprechender Entwicklungs Herausforderungen aufzeigen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Gärtner, der diese Arbeit anregte und mich über viele Jahre hin in vorbildlichster Weise motivierte und unterstützte. Ohne seine beständige Ermunterung wäre diese Arbeit, die ich nebenberuflich angefertigt habe, wohl niemals fertiggestellt worden.

Weiterhin gilt mein herzlichster Dank Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt, der die Arbeit zu jedem Zeitpunkt förderte und durch die Übernahme des 1. Gutachtens wesentlich unterstützte. Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske danke ich für die Übernahme des 2. Gutachtens und das beständige Interesse, welches er der Arbeit entgegenbrachte. Herrn Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch danke ich für die freundliche Übernahme des 3. Gutachtens. Er begleitete viele der Entwicklungsschritte der Arbeit im Rahmen seiner ehemaligen Tätigkeit bei der Daimler AG.

Ohne die tatkräftige Unterstützung durch eine große Anzahl an Personen, die mit hohem persönlichen Einsatz von Ideen, Zeit, Kraft und Anregungen an der Durchführung von Versuchen und Berechnungen mitgewirkt haben, wäre diese Arbeit in ihrer vorliegenden Form nicht möglich gewesen. Jedem Einzelnen danke ich herzlich.

Herrn Dr.-Ing. Jörg Meyer, Herrn Dr.-Ing. Heinz F. Umhauer, Herrn Dipl.-Ing. Günter Wenninger und Herrn Dr.-Ing. Hans-Otto Herrmann danke ich für die vielen Anregungen zur Gestaltung der Arbeit und ihr anhaltendes, begleitendes Interesse.

Der Emitec Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH, Lohmar, Eberspächer Exhaust Technology GmbH & Co. KG, Esslingen, und der HJS Emission Technology GmbH & Co. KG, Menden, danke ich für die freundliche Erlaubnis der Verwendung von Grafiken und Abbildungen. Der Daimler AG danke ich für die Publikationsgenehmigung.

Dir, liebe Nicole, danke ich für die große Geduld, die Du über mehr als zwei Jahre des nebenberuflichen Schreibens mit mir hattest. Danke für Deine großartige Unterstützung und Dein anhaltendes Verständnis.

Stuttgart, im September 2014,

Achim Dittler

Erbitte Gottes Segen für deine Arbeit,
aber verlange nicht auch noch, dass er sie tue!

Karl Heinrich Waggenerl (1897-1973), östr. Schriftsteller

Meinen Eltern

Heinz & Gisela
Dittler

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
2. Partikelemissionen und Emissionsgesetzgebung	7
2.1. Einordnung der Partikelemission aus Nutzfahrzeugen.....	7
2.2. Emissionsgesetzgebung für Nutzfahrzeuge in Europa.....	9
3. Ausführungsformen und Funktionsweise von Partikelfiltern	11
3.1. Auswahl des Partikelabscheiders.....	11
3.2. Historische Herausforderungen der Entwicklung von Partikelfiltern in Nutzfahrzeuganwendungen.....	15
3.3. Oberflächenfilter.....	19
3.3.1. Wabenförmige Filter	19
3.3.2. Plattenfilter	21
3.4. Tiefenfilter und Nebenstrom-Tiefbett-Filter.....	23
3.5. Basisbetriebsgrößen von Partikelfiltern.....	24
3.5.1. Einleitung	24
3.5.2. Partikelabscheidung.....	25
3.5.3. Gegendruck.....	26
3.6. Rußentfernung aus Partikelfiltern.....	28
3.6.1. Einleitung	28
3.6.2. Kontinuierliche Rußentfernung.....	29
3.6.3. Diskontinuierliche Rußentfernung durch Einleitung einer aktiven Regeneration.....	33
3.6.3.1. Diskontinuierliche Rußentfernung durch Oxidation mit NO ₂	34
3.6.3.2. Rußentfernung durch Oxidation mit Sauerstoff.....	34
3.6.3.3. Regenerationsverhalten von Oberflächenfiltern bei Anhebung der Abgastemperatur.....	36
3.6.3.4. Additivunterstützte Regeneration	41
3.6.4. Zusammenfassung.....	43
3.7. Systeme zur Rußentfernung durch Oxidation mit Sauerstoff.....	44
3.7.1. Elektrothermische Regeneration.....	44
3.7.2. Brennersysteme	45
3.8. Alternative Abscheide- und Regenerationsverfahren.....	47
4. Diskontinuierliche Rußentfernung aus Partikelfiltern mittels katalytischer Brenner.....	48
4.1. Einleitung.....	48
4.2. Konzeptstudie „Nachmotorische Kraftstoffdosierung“.....	51
4.3. Entwicklungsschritte des Dosiersystems.....	53
4.4. Verfahrenstechnische Aspekte der nachmotorischen Dosierung von Dieselkraftstoff.....	57
4.4.1. Dosier- und Dispergiercharakteristik des Dosiersystems.....	58
4.4.2. Positionierung des Dosiersystems am Motor.....	63
4.5. Grundlagenuntersuchungen zur nachmotorischen Dosierung von Dieselkraftstoff an einem Modellkanal.....	65
4.5.1. Problemstellung	65

4.5.2. Beschreibung der Strömungssituation am Einbauort des Dispergierventils.....	66
4.5.3. Experimentelle Untersuchungen.....	67
4.5.3.1. Versuchsaufbau.....	67
4.5.3.2. Versuchsmatrix und Versuchsdurchführung.....	68
4.5.3.3. Diskussion der Ergebnisse.....	70
4.5.4. Simulation von Kraftstoffablagerungen im Abgasstrang.....	74
4.5.5. Beschreibung der Wandfilmverdunstung.....	76
4.5.5.1. Modellierung des Wandfilms.....	76
4.5.5.2. Ergebnis der Verdunstungsberechnung.....	78
4.5.6. Zusammenfassung.....	79
4.6. Aktive Partikelfilterregeneration bei schwierigen Fahrzyklen.....	80
4.6.1. Problemstellung.....	80
4.6.2. Das Vorkatalysatorprinzip.....	82
4.6.3. Auslegung des Vorkatalysators – Ein Zielkonflikt zwischen Gegendruck und Umsatz.....	83
4.6.4. Untersuchungen zur thermischen Alterung des Vorkatalysators.....	86
4.6.5. Einfluss des Vorkatalysators auf den Hauptkatalysator.....	87
4.6.6. Zusammenfassung.....	88
4.7. Thermische Absicherung des Fahrzeugs.....	89
4.7.1. Problemstellung.....	89
4.7.2. Konstruktive Maßnahmen zur Abgastemperaturvergleichmäßigung.....	92
4.7.3. Messung der Abgastemperaturverteilung im Fahrzeug.....	95
4.7.3.1. Einleitung.....	95
4.7.3.2. Beschreibung des Versuchsaufbaus.....	95
4.7.3.3. Messung der Abgastemperaturverteilung am Fahrzeug bei Standregeneration.....	96
4.7.3.4. Zusammenfassung.....	99
4.7.4. Verifizierung des Berechnungsmodells.....	100
4.7.5. Oberflächentemperatur des Abgasnachbehandlungssystems.....	104
4.7.6. Zusammenfassung.....	106
5. Ascheablagerungen in Partikelfiltern.....	107
5.1. Aschequellen.....	107
5.1.1. Definition.....	107
5.1.2. Kraftstoff.....	109
5.1.3. Schmieröl.....	110
5.1.3.1. Bestimmung des Aschemasseneintrags in Partikelfilter.....	110
5.1.3.2. Schmierölverbrauch.....	111
5.1.3.3. Sulfataschegehalt des Frischöls.....	111
5.1.3.4. Aschefindungsraten.....	112
5.2. Eigenschaften der Asche.....	114
5.2.1. Elementare Zusammensetzung der Aschen.....	115
5.2.2. Partikelgröße von Ölaschen.....	116
5.2.3. Aschedichte.....	117
5.3. Grundlagenuntersuchungen zur Entstehung der Depositionsmuster von Ölaschen in Partikelfiltern.....	118
5.3.1. Beschreibung und Analyse von Aschedepositionsmustern.....	118
5.3.2. Auswirkung der Aschedeposition in Partikelfiltern auf das Betriebsverhalten.....	126

5.3.2.1. Versuchsaufbau und Versuchsbedingungen	126
5.3.2.2. Charakterisierung der Depositionsmuster und ihres Einflusses auf den Druckverlust bei periodischem Rußabbrand	128
5.3.2.3. Charakterisierung der Depositionsmuster und ihres Einflusses auf den Druckverlust bei kontinuierlichem Rußabbrand	130
5.4. Ascheentstehung im Partikelfilter	132
5.4.1. Einleitung	132
5.4.2. Entstehung von Aschestrukturen in Partikelfiltern	132
5.4.2.1. Gleichmäßige, geschlossene Rußschicht	133
5.4.2.2. Inhomogene Rußverteilung im Filter	136
5.4.3. Schnellveraschungsmethoden	137
5.4.3.1. Additivierte Kraftstoffe	137
5.4.3.2. Öleindüsung in die Zuluft des Motors	140
5.4.3.3. Nachmotorische Ölverbrennung	140
5.4.3.4. Erhöhte Öladditivierung	141
5.4.4. Zusammenfassung	142
5.5. Aschetransport in Partikelfiltern	143
5.5.1. Einleitung	143
5.5.2. Grundlagen des Aschetransports in Partikelfiltern	145
5.5.2.1. Aschefreisetzung durch Rußentfernung	145
5.5.2.2. Resuspensionierung von Partikeln und Partikelschichten von Oberflächen	145
5.5.2.3. Aschetransport durch pneumatische Konvektion	149
5.5.3. Zusammenfassende Darstellung	151
5.6. Konsequenzen für die Auslegung von Partikelfiltersystemen in Nutzfahrzeuganwendungen	152
5.7. Ascheentfernung aus Partikelfiltern	154
5.7.1. Einleitung	154
5.7.2. Ascheentfernung durch Rückspülen mit Luft	155
5.7.3. Grundlegende Versuche zur Ascheentfernung durch Flüssig- keitsrückspülung	156
5.7.3.1. Löslichkeit von Aschekomponenten in wässrigen Lösungen	156
5.7.3.2. Verfahren und Versuchsaufbau	157
5.7.3.3. Reinigung mit alkalischer Komplexbildnerlösung	159
5.7.3.4. Reinigung mit saurer Komplexbildnerlösung	164
5.7.4. Charakterisierung des Reinigungserfolgs	165
5.7.5. Aschereinigung von Partikelfiltern aus Nutzfahrzeugen	167
5.7.6. Aschesinterung und Entfernung	169
5.7.7. Zusammenfassung	170
6. Partikelfilter in kombinierten Abgasnachbehandlungssystemen	171
6.1. Der Weg zum kombinierten Abgasnachbehandlungssystem	171
6.2. Komponenten in kombinierten Abgasnachbehandlungssystemen	172
6.3. Anordnung des Partikelfilters im Gesamtsystem	173
6.3.1. Einleitung	173
6.3.2. Partikelfilter nach SCR-Katalysator (DPF nach SCR)	173
6.3.3. Partikelfilter vor SCR-Katalysator (DPF vor SCR)	174
6.4. Kombiniertes Abgasnachbehandlungssystem in Stadtbussen	177

6.5. Kombiniertes Abgasnachbehandlungssystem zur Darstellung der Euro-VI-Grenzwerte.....	179
7. Fahrzeugintegration von Abgasnachbehandlungssystemen	181
7.1. Bauraumbedarf und Anordnung des Abgasnachbehandlungssystems.....	181
7.2. Aufgabe der Fahrzeugintegration.....	186
7.3. Anzeige- und Bedienkonzept.....	189
7.3.1. Anzeigekonzept.....	190
7.3.2. Regenerationsstrategie zur Sicherstellung maximaler Regenerationsfähigkeit	194
7.3.2.1. Ablauf eines Regenerationsvorgangs im Fahrbetrieb	194
7.3.2.2. Ablauf der diskontinuierlichen Filterregeneration in der Zonenlogik.....	195
7.3.2.3. Grenzen der aktiven Regenerationsfähigkeit des Systems im Fahrbetrieb	198
7.3.3. Bedienkonzept zur Einleitung der Standregeneration	200
7.3.4. Weiterentwicklung des Bedien- und Anzeigekonzepts	201
7.4. Regulatorische Aspekte der Fahrzeugintegration von Abgasnachbehandlungssystemen.....	203
7.4.1. Vorschriften, technische Richtlinien und Regelungen für die Konstruktion von Nutzfahrzeugen	203
7.4.1.1. Vorschriften zur Lage der Abgasmündung in Nutzfahrzeugen	203
7.4.1.2. Dauerhaltbarkeit von Emissionseinrichtungen	204
7.4.1.3. Technische Richtlinie für Straßenfahrzeuge	205
7.4.1.4. Seitlicher Unterschutz	206
7.4.2. Berufsgenossenschaftliche Vorschriften	207
7.4.2.1. Unfallverhütungsvorschrift BGV D29	207
7.4.2.2. Berufsgenossenschaftliche Richtlinie 181 - Rutschhemmung	208
8. Zusammenfassung und Ausblick	210
8.1. Zusammenfassung.....	210
8.2. Ausblick	214
9. Literatur	216