

AutoUni – Schriftenreihe

AutoUni 

Daniel Nowak

Ruß- und Aschedeposition in Ottopartikelfiltern

AutoUni – Schriftenreihe

Band 115

Reihe herausgegeben von/Edited by
Volkswagen Aktiengesellschaft
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen, fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

Reihe herausgegeben von/Edited by

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

Daniel Nowak

Ruß- und Aschedeposition in Ottopartikelfiltern

 Springer

Daniel Nowak
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig, 2017

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe
ISBN 978-3-658-21257-5 ISBN 978-3-658-21258-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-21258-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist Teil von Springer Nature
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts und dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit bedanken. Seine permanente Unterstützung sowie Gesprächs- und Hilfsbereitschaft haben sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ein weiterer großer Dank gilt Herrn Univ. Prof. Dr. techn. Dipl.-Ing. Bernhard Geringer für die Übernahme der Zweitkorrektur. Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Horst möchte ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danken.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Dr.-Ing. Jörg Theobald für die Unterstützung danken. Sein Interesse am Thema ermöglichte es mir diese Arbeit während meiner Doktorandenzeit anzufertigen. Auch Herrn Dipl.-Ing. Lars Hentschel gebührt ein großer Dank. Aufgrund der beispiellosen Unterstützung von Herrn Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Munk möchte ich ihm einen ganz besonderen Dank aussprechen. Seine motivierende Art hat mir sehr geholfen. Auch möchte ich Herrn Dipl.-Ing. (FH) Michael Thiele für das Interesse am Thema danken. Er sorgte dafür, dass ich mich während meiner Doktorandenzeit fast ausschließlich auf meine Promotion konzentrieren konnte.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Jan Twickler für seine Unterstützung danken. Einen außerordentlichen Dank möchte ich weiterhin an Herrn Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Usarek richten. Der Aufbau der Partikelmesstechnik ist mit seiner Hilfe realisiert worden und hat uns zudem amüsante Stunden am Motorprüfstand beschert.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Daniel Hast einen besonderen Dank aussprechen. Seine strukturierte und stets gewissenhafte Arbeitsweise am Motorprüfstand hat mir jederzeit sehr geholfen. Die hohe Qualität der Messergebnisse ist seiner vorbildlichen Arbeitsweise geschuldet.

Zuletzt möchte ich meinen Eltern, Ulrike und Ulrich Nowak und meinem verstorbenen Großvater Herrmann Bücheler danken. Ihre jahrelange Unterstützung hat mir den Zugang zu einer exzellenten Ausbildung ermöglicht. Die von Ihnen vermittelten Werte haben mich nachhaltig geprägt und sind der Grund für das Gelingen dieser Arbeit.

Daniel Nowak

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Abkürzungen	XV
Formelzeichen und Symbole	XVII
Definitionsgleichungen	XXV
Kurzfassung.....	XXVII
Abstract	XXIX
1 Motivation und Zielsetzung	1
2 Grundlagen zum Partikelfilter.....	3
2.1 Substratspezifikationen.....	3
2.2 Differenzdruck von Partikelfiltern.....	4
2.3 Filtrationseffizienz von Partikelfiltern.....	7
2.4 Ursprung ottomotorischer Asche	11
2.5 Aschedeposition – Stand der Technik.....	13
3 Prüfstand und Messsysteme	17
3.1 Prüfstand und Messsysteme.....	17
3.2 Partikelmesstechnik	19
3.3 Sonderpartikelmesstechnik und Verdünnereinheit	23
3.4 Differenzdruckmessungen am Motorprüfstand	26
3.5 Messstellenaufbau und Testsystematik.....	26
3.6 Kaltgas- und Filtrationsprüfstand	32
4 Strömungssimulation	35
4.1 Strömungssimulation – Stand der Technik.....	35
4.2 Aufbau des Simulationsmodells	38
4.3 Simulationsergebnisse bei Geometrievariation.....	40
5 Schnellveraschung	47
5.1 Schnellveraschungsverfahren – Stand der Technik	47
5.2 Prüfstands Aufbau und Versuchsdurchführung.....	51
5.3 Veraschungsleistung des Verfahrens	54

6	Betriebsverhalten von Ottopartikelfiltern bei Ruß- und Aschedeposition	55
6.1	Differenzdruckverhalten im Frischzustand.....	55
6.1.1	Substrate mit Washcoatbeschichtung auf der Filterwand.....	55
6.1.2	Substrate mit Washcoatbeschichtung in der Filterwand.....	65
6.2	Aschedepositionen in unbeschichteten Ottopartikelfiltern	67
6.2.1	Einfluss des Porengefüges auf die Permeabilität der Substratwand.....	67
6.2.2	Differenzdruckverhalten bei Ascheakkumulation.....	72
6.2.3	Filtrationsverhalten bei Ascheakkumulation.....	81
6.3	Rußpartikeldepositionen in Ottopartikelfiltern	91
7	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis.....	111
A	Anhang	115
A.1	Liste der Untersuchungshistorie der Ottopartikelfilter aus Kapitel 6.1	115

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Zellschema Partikelfilter	3
Abb. 2.2:	Druckverlustbeiwert in Abhängigkeit der Querschnittsverengung (6)	5
Abb. 2.3:	Diffusives Abscheideschema, angepasst (11)	8
Abb. 2.4:	Porengefüge mit Partikeldeposition, angepasst (11)	10
Abb. 3.1:	Aggregat, EA 211 1,41 TSI 90 kW (32)	17
Abb. 3.2:	Probenfluss AVL Particle Counter Advanced APC 489, angepasst (37).....	20
Abb. 3.3:	Evaporation Tube und Porous Tube Diluter, AVL Particle Counter Advanced APC 489, angepasst (37).....	21
Abb. 3.4:	Particle Number Counter, angepasst (37).....	21
Abb. 3.5:	Prinzipskizze Micro Soot Sensor, Dilution Control Unit, Druck- und Temperaturreduziereinheit, angepasst (38)	22
Abb. 3.6:	Schema resonante Zelle, angepasst (38)	23
Abb. 3.7:	Geräteaufbau TSI Engine Exhaust Particle Sizer, EEPS 3090, angepasst (42)	24
Abb. 3.8:	Geräteaufbau, Dekati Ejektorverdünner, angepasst (43).....	25
Abb. 3.9:	Messstellenplan Differenzdruckmessung.....	27
Abb. 3.10:	Messstrecke Differenzdruck.....	28
Abb. 3.11:	Messstellenplan Filtrationsmessung.....	29
Abb. 3.12:	Messstrecke Filtration	30
Abb. 3.13:	Messstellenplan Rußbelastungstest.....	31
Abb. 3.14:	Messaufbau Kaltgasprüfstand	32
Abb. 3.15:	Messstellenplan Filtrationsprüfstand.....	33
Abb. 4.1:	Zellschema Dieselpartikelfilter, angepasst (51)	36
Abb. 4.2:	Ergebnisdarstellung Dieselpartikelfilter, angepasst (51).....	37
Abb. 4.3:	3D CFD Modell OPF Kanäle	38
Abb. 4.4:	Totaler Differenzdruck, Wanddifferenzdruck und Kanaldifferenzdruck bei Variation der Substratlänge sowie der Wandstärke und der Zelligkeit.....	41
Abb. 4.5:	Axiale Kanalströmungsgeschwindigkeit in Kanalmitellachse bei Variation der Substratlänge sowie der Wandstärke und der Zelligkeit.....	42
Abb. 4.6:	Statischer Absolutdruck in Ein- und Auslasskanalachse bei Variation der Substratlänge sowie der Wandstärke und der Zelligkeit.....	43
Abb. 4.7:	Wanddurchströmungsgeschwindigkeit der Einlasskanalseite bei Variation der Substratlänge sowie der Wandstärke und der Zelligkeit	44
Abb. 4.8:	Prozentsatz Wanddruckverlust an totalem Druckverlust	45

Abb. 5.1:	Versuchsaufbau Schnellveraschung Sappok et al. (57).....	50
Abb. 5.2:	Versuchsaufbau Schnellveraschung Jorgensen, angepasst (58).....	51
Abb. 5.3:	Versuchsaufbau Schnellveraschung	52
Abb. 6.1:	Differenzdruck, Filtrationseffizienz OPF 1 frisch.....	56
Abb. 6.2:	Differenzdruck, Filtrationseffizienz OPF 1 frisch u. gealtert.....	57
Abb. 6.3:	Differenzdruck bei Rußeinlagerung OPF 1 gealtert.....	58
Abb. 6.4:	Washcoattopographie OPF frisch REM standard	59
Abb. 6.5:	Washcoattopographie OPF frisch REM analyse.....	59
Abb. 6.6:	Washcoattopographie OPF 1 gealtert REM standard.....	59
Abb. 6.7:	Washcoattopographie OPF 1 gealtert REM analyse.....	59
Abb. 6.8:	Differenzdruck, Filtrationseffizienz OPF 2, OPF 3 frisch u. gealtert	60
Abb. 6.9:	Washcoattopographie OPF 2 gealtert REM standard.....	61
Abb. 6.10:	Washcoattopographie OPF 2 gealtert REM analyse.....	61
Abb. 6.11:	Washcoattopographie OPF 3 gealtert REM standard.....	61
Abb. 6.12:	Washcoattopographie OPF 3 gealtert REM analyse.....	61
Abb. 6.13:	Differenzdruck bei Rußeinlagerung OPF 2, OPF 3 gealtert.....	62
Abb. 6.14:	Differenzdruck, Filtrationseffizienz OPF 4 frisch u. gealtert.....	63
Abb. 6.15:	Differenzdruck bei Rußeinlagerung OPF 4 gealtert.....	63
Abb. 6.16:	Washcoattopographie OPF frisch, identisch zu OPF 4	64
Abb. 6.17:	Washcoattopographie OPF 4 gealtert.....	64
Abb. 6.18:	Differenzdruck, Filtrationseffizienz OPF 5 frisch u. gealtert.....	65
Abb. 6.19:	Washcoattopographie OPF 5 frisch.....	66
Abb. 6.20:	Washcoattopographie OPF 5 gealtert.....	66
Abb. 6.21:	Differenzdruck bei Rußeinlagerung OPF 5 gealtert.....	66
Abb. 6.22:	Differenzdruckübersicht verschiedener OPF's.....	68
Abb. 6.23:	Vergleich Permeabilitätsvariation zu Differenzdruckmessung OPF Ø 5,20 [“] , 1 4,00 [“] , 300/8.....	69
Abb. 6.24:	Vergleich Permeabilitätsvariation zu Differenzdruckmessung OPF Ø 5,662 [“] , 1 6,00 [“] , 200/8.....	69
Abb. 6.25:	Verteilungsfunktion beider Porengefüge.....	71
Abb. 6.26:	Differenzdruck OPF Ø 4,662", 1 6,00", 300/8.....	72
Abb. 6.27:	Differenzdruck OPF Ø 4,662", 1 4,50", 300/8.....	73
Abb. 6.28:	Differenzdruck OPF Ø 5,20", 1 4,00", 300/8.....	73
Abb. 6.29:	Differenzdruck OPF Ø 5,662", 1 6,00", 300/8.....	74
Abb. 6.30:	Differenzdruck OPF Ø 5,662", 1 6,00", 200/8.....	74

Abb. 6.31:	Differenzdruck OPF Ø 4,662", 1 4,50", 300/8, Reynoldszahl	76
Abb. 6.32:	Spez. Aschesensibilität bezüglich des Differenzdrucks	77
Abb. 6.33:	Variation Permeabilität OPF Ø 5,662", 1 6,00", 300/8.....	78
Abb. 6.34:	Wandpermeabilitätsabnahme in Abhängigkeit der eingelagerten Aschemasse	80
Abb. 6.35:	Filtrationseffizienz OPF Ø 4,662", 1 6,00", 300/8.....	82
Abb. 6.36:	Filtrationseffizienz OPF Ø 4,662", 1 4,50", 300/8.....	82
Abb. 6.37:	Filtrationseffizienz OPF Ø 5,20", 1 4,00", 300/8.....	83
Abb. 6.38:	Filtrationseffizienz OPF Ø 5,662", 1 6,00", 300/8.....	83
Abb. 6.39:	Filtrationseffizienz OPF Ø 5,662", 1 6,00", 200/8.....	84
Abb. 6.40:	Spez. Aschesensibilität bezüglich der Filtrationseffizienz.....	85
Abb. 6.41:	Spez. Aschesensibilitätsgradient bezüglich der Filtrationseffizienz	86
Abb. 6.42:	Filtrationseffizienz in Abhängigkeit der Partikelgröße OPF Ø 4,662", 1 6,00", 300/8 ..	87
Abb. 6.43:	Filtrationseffizienz in Abhängigkeit der Partikelgröße OPF Ø 4,662", 1 4,50", 300/8 ..	87
Abb. 6.44:	Filtrationseffizienz in Abhängigkeit der Partikelgröße OPF Ø 5,20", 1 4,00", 300/8	88
Abb. 6.45:	Filtrationseffizienz in Abhängigkeit der Partikelgröße OPF Ø 5,662", 1 6,00", 300/8 ..	88
Abb. 6.46:	Filtrationseffizienz in Abhängigkeit der Partikelgröße OPF Ø 5,662", 1 6,00", 200/8 ..	89
Abb. 6.47:	Berechnungsergebnisse von OPF#1, OPF#2 und OPF#3 bei Variation der Wandpermeabilität	93
Abb. 6.48:	Differenzdruck- und Filtrationsverhalten in Abhängigkeit der Ruß- und Aschebelastung bei OPF#1	94
Abb. 6.49:	Differenzdruck- und Filtrationsverhalten in Abhängigkeit der Ruß- und Aschebelastung bei OPF#2	94
Abb. 6.50:	Differenzdruck- und Filtrationsverhalten in Abhängigkeit der Ruß- und Aschebelastung bei OPF#3	95
Abb. 6.51:	Differenzdruck- und Filtrationsverhalten in Abhängigkeit der Ruß- und Aschebelastung bei OPF#4	95
Abb. 6.52:	Differenzdruck- und Filtrationsverhalten in Abhängigkeit der Ruß- und Aschebelastung bei OPF#5	96
Abb. 6.53:	Differenzdruck- und Filtrationsverhalten in Abhängigkeit der Ruß- und Aschebelastung bei OPF#6	96
Abb. 6.54:	Differenzdruck- und Filtrationsverhalten in Abhängigkeit der Ruß- und Aschebelastung bei OPF#7	97
Abb. 6.55:	Einfluss der spezifischen Rußbelastung auf die Wandpermeabilität von OPF#2 bis OPF#7	99

Abb. 6.56:	Permeabilität der Rußablagerungen in OPF#2 bis OPF#7 in Abhängigkeit der spezifischen Rußbelastung.....	101
Abb. 6.57:	Einfluss der spezifischen Rußbelastung auf die Wandpermeabilität von OPF#2 bis OPF#7 bei unterschiedlicher Aschebelastung.....	103
Abb. 6.58:	Permeabilität der Rußablagerungen in OPF#2 bis OPF#7 in Abhängigkeit der spezifischen Rußbelastung bei unterschiedlichen Aschebelastungen	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Technische Daten EA 211 1,4 l TSI 90 kW (32)	18
Tabelle 6.1: Substratspezifikationen der Ottopartikelfilter	67
Tabelle 6.2: Weibullverteilungsparameter beider Porengefüge	70
Tabelle 6.3: Versuchsteile OPF#1 bis OPF#7	92
Tabelle 6.4: Regressionsparameter Simulation Differenzdruck in Abhängigkeit der Permeabilität der Substratwand	93
Tabelle 6.5: Regressionsparameter Wandpermeabilität in Abhängigkeit der spezifischen Rußbelastung	99
Tabelle A.1: Untersuchungshistorie der Ottopartikelfilter aus Kapitel 6.1	115

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
ACT	Asymmetric Cell Technology
APC	AVL Particle Counter
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
CFD	Computational Fluid Dynamics
CH ₄	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPSI	Cells per square Inch
CRT	Countinously Regenerating Trap
DPF	Diesel Particulate Filter
EEPS 3090	Engine Exhaust Particle Sizer 3090
EPA	Environmental Protection Agency
FE	Filtrationseffizienz, Filtration efficiency
Fzg.	Fahrzeug
Gew. - %	Gewichtsprozent
GPF	Gasoline Particulate Filter
MFC	Massenflussregler