



Technische  
Universität  
Braunschweig



Dipl.-Ing. (FH) Ronny Meißner

# Oxidations- und Permeabilitätsverhalten von Dieselruß in monolithischen Partikelfiltern

Berichte aus dem ivb | Band 39 | Braunschweig 2022

# Oxidations- und Permeabilitätsverhalten von Dieselruß in monolithischen Partikelfiltern

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. (FH) Ronny Meißner  
geboren in (Geburtsort): Merseburg

eingereicht am: 19.08.2021

mündliche Prüfung am: 22.02.2022

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts  
Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt



Berichte aus dem ivb

Band 39

**Ronny Meißner**

**Oxidations- und Permeabilitätsverhalten von  
Dieselruß in monolithischen Partikelfiltern**

Shaker Verlag  
Düren 2022

**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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8742-0

ISSN 2364-3862

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

## Eidesstattliche Versicherung

Angaben zur Person:

Vorname Name: Ronny Meißner  
Straße Hausnummer: Starenweg 22  
PLZ Ort: 73779 Deizisau

Ich versichere hiermit an Eides statt durch meine Unterschrift, die Regeln der geltenden Promotionsordnung zu kennen und eingehalten zu haben und mit einer Prüfung nach den Bestimmungen der Promotionsordnung einverstanden zu sein. Ich gebe zur Erstellung der Dissertation mit dem Thema

„Oxidations- und Permeabilitätsverhalten von Dieselruß in monolithischen Partikelfiltern“

folgende Erklärungen ab:

- Ich habe die Dissertation selbständig verfasst, keine Textabschnitte von Dritten ohne Kennzeichnung übernommen und alle von mir benutzten Hilfsmittel und Quellen angegeben.
- Dritte haben weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Vermittlungstätigkeiten oder für die inhaltliche Ausarbeitung der vorgelegten Dissertation erhalten (d.h. die wissenschaftliche Arbeit darf weder in Teilen noch in Gänze von Dritten gegen Entgelt oder sonstige Gegenleistungen erworben oder vermittelt worden sein).
- Die vorliegende Dissertation habe ich noch nicht veröffentlicht oder als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht. Die gleiche oder eine in wesentlichen Teilen ähnliche Abhandlung habe ich noch nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht.
- Die Inhalte der digitalen und der gedruckten Dissertation sind identisch.
- Die „Grundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ an der Technischen Universität Braunschweig sowie die Richtlinien der Fakultät für Maschinenbau „Berücksichtigung der Beiträge von Studierenden sowie von technischen und wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zu Dissertationen“ kenne ich und habe ich beachtet.

Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorgenannten Angaben nach bestem Wissen und Gewissen gemacht habe, die Angaben der Wahrheit entsprechen und ich nichts verschwiegen habe.

Die Strafbarkeit einer falschen eidesstattlichen Versicherung ist mir bekannt, namentlich die Strafandrohung gem. § 156 StGB von bis zu drei Jahren Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bei vorsätzlicher Begehung der Tat bzw. gemäß § 163 Abs. 1 StGB von bis zu einem Jahr Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bei fahrlässiger Begehung.

Deizisau, den 14.05.2021

## Kurzfassung & Abstract

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es die Auswirkungen der Veränderungen in der Rußschicht in einem monolithischen Partikelfilter auch bei auftretender Rußoxidation zu beschreiben, um die gegenruckbasierte Rußbelastungserkennung durch ein steuergerätaugliches, chemophysikalisches Modell im Fahrzeug zu verbessern. Hierzu wurden grundlegende Untersuchungen und Analysen zum Rußporositäts- und Rußoxidationsverhalten im Labor, Einzylinder- und Vollmotorprüfstand durchgeführt.

Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Rußporosität im normalen verbrennungsmotorischen Betrieb sich am besten durch eine rußbelastungsabhängige, empirische Kompaktionsfunktion beschreiben lässt. Des Weiteren konnte aufgezeigt werden, dass sich die Rußpermeabilitätsänderung bei auftretender Rußoxidation mit einem auf dem Shrinking-Core-Ansatz basierten, erweiterten Modell beschreiben lässt. Die Änderungen der Durchmesser von Rußprimärpartikeln und Rußaggregaten aufgrund zunehmender Gasifizierung in der Rußschicht lassen sich hier über unterschiedliche fraktale Dimensionen abbilden. Zudem konnte in dieser Arbeit experimentell und simulativ gestützt gezeigt werden, dass im Partikelfilter entgegen der Strömungsrichtung katalytisch gebildetes Stickstoffdioxid in die Rußschicht zurückdiffundiert und Rußoxidation auftritt. Mittels der gewonnenen Erkenntnisse konnte erfolgreich ein gegenruckbasiertes Rußbelastungsmodell aufgebaut werden, welches eine deutlich verbesserte Belastungserkennung im Fahrbetrieb ermöglicht. Hierdurch ist eine wesentlich bessere und robustere Partikelfiltersteuerung möglich, die die Gefahr von unkontrollierten Rußregenerationen bei Überladung und vorzeitiger katalytischer Desaktivierung bei zu häufigen Regenerationen minimiert.

The scope of the present work is to describe the effects of soot layer changes in a monolithic particle filter when soot oxidation occurs in order to improve the back pressure based soot load detection by using an engine control unit-compatible, chemophysical model. For this purpose, fundamental investigations and analyzes of the soot porosity and soot oxidation behavior were carried out in laboratory, single-cylinder and engine test bench.

It could be shown that the soot porosity in normal combustion engine operation can be described best by a soot load-dependent, empirical compaction function. Furthermore, it could be shown that the change in soot permeability when soot oxidation occurs can be described with an extended model based on the shrinking core approach. The changes in the diameter of soot primary particles and soot aggregates due to increasing gasification of the soot layer can be described by using different fractal dimensions. In addition, it was possible to show in this thesis, supported by experiments and simulations, that on the particle filter surface catalytically produced nitrogen dioxide diffuses against the direction of flow back into the soot layer and additional soot oxidation occurs. With the help of the knowledge gained, a back pressure based soot loading model was successfully derived, which enables significantly improved loading detection during regular driving mode. This enables much better and more robust particle filter control, which minimizes the risk of uncontrolled soot regenerations in the event of overloading and premature catalytic deactivation if regenerations are too frequent.

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen mehrerer grundlegender Forschungsprojekte auf dem Gebiet Partikelfilter bei der Daimler AG. Die Idee zu dieser Arbeit entwickelte sich bereits während meiner Diplomarbeit durch die intensive Zusammenarbeit mit den Kollegen und Kolleginnen der Entwicklung sowie Forschung und Vorentwicklung bei der Daimler AG, insbesondere durch den Austausch mit Herrn Günter Wenninger und Dr. Bernd Krutzsch, welcher leider viel zu früh von uns gegangen ist.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, der es mir ermöglicht hat, diese Arbeit doch noch zu finalisieren, obwohl sich in dem gesamten Zeitraum, in dem diese Arbeit entstand, verschiedene Schwierigkeiten ergaben. Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt bedanken, der den entscheidenden Hinweis zu einem wesentlichen, fehlenden Puzzlestückchen gab. Auch möchte ich mich für die Unterstützung des Teams „Partikelfiltersysteme“ bedanken, insbesondere Jo Hildner und Dr. Marcus Frey. Zudem danke ich Dr. Nicholas Fekete sowie Richard Mandel, der mir das Handwerkzeug gab die entstandenen Aufgaben erfolgreich zu lösen. Für eine großartige Zusammenarbeit bedanke ich mich bei Wolfgang Trepte, der als Messtechnikguru dafür gesorgt hat, dass alle Messungen von Labor und Prüfstand bis hin zum Fahrzeug eine exzellente Qualität aufweisen konnten. Weiter gilt mein Dank allen Kollegen von den Prüfständen & Werkstatt bei der Forschung in Untertürkheim, mit denen ich zusammenarbeiten durfte.

Last but not least möchte ich mich bei meiner Frau Cornelia und meinen Kindern bedanken, die mir die Arbeit nicht immer leichtgemacht, mich aber immer in allen Lebenslagen unterstützt und so dafür gesorgt haben, dass die Arbeit spät, aber am Ende auch fertig geworden ist.

Deizisau, 14.05.2021  
Ronny Meißner



## Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Versicherung.....	I
Kurzfassung & Abstract .....	II
Vorwort.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen .....	X
Abkürzungen .....	X
Chemische Spezies .....	X
Griechische Formelzeichen.....	XI
Lateinische Formelzeichen .....	XII
1    Einleitung .....	1
2    Motivation und Aufgabenstellung.....	3
2.1    Aufbau der Arbeit .....	4
3    Stand der Technik.....	5
3.1    Funktionsprinzip Dieselmotor .....	5
3.2    Stickoxide .....	7
3.3    Partikelförmige Emissionen.....	9
3.3.1    Entstehung von Dieselruß.....	9
3.3.2    Dieselrußmorphologie .....	12
3.3.3    Oxidation von Dieselruß.....	13
3.4    Dieseloxidationskatalysator.....	18
3.5    Dieselpartikelfilter.....	20
3.5.1    Aufbau Dieselpartikelfilter .....	20
3.5.2    Abscheidemechanismen .....	21
3.5.3    Druckverlust im monolithischen Partikelfilter .....	22
3.5.4    Rußschichtpermeabilität .....	23
3.5.5    Rußschichtmorphologie.....	27
4    Experimentelle und numerische Methoden.....	30
4.1    Verwendete Laborproben und Berufung .....	30
4.2    Modellgasanlagen .....	33
4.3    Gasanalytik .....	38
4.4    Auswertung Rußumsatz und Rußpermeabilität .....	42
4.5    Simulationsprogramm Axitrap.....	46
4.5.1    Grundaufbau des Simulationsmodells.....	46
4.5.2    Druckverlustberechnung.....	47
4.5.3    Reaktionsmechanismen .....	48
4.5.4    Diffusion im Simulationsmodell.....	50
4.6    Aufbau Motorprüfstand.....	52
4.6.1    Verwendete Messtechnik.....	53
4.6.2    Verwendeter Vollmotor.....	54
4.6.3    Messaufbau .....	55
4.6.4    Berechnungen .....	56
4.7    Ex-Situ Rußanalyse .....	57
5    Physikalische und chemische Rußcharakterisierung.....	60
5.1    Physikalische Rußeigenschaften .....	60
5.1.1    Rußporosität.....	60
5.1.2    Bestimmung der relevanten Partikeldurchmesser in der Rußschicht.....	66
5.2    Charakterisierung der Rußoxidation mit O <sub>2</sub> .....	68
5.3    Rußpermeabilität während Rußoxidation mit O <sub>2</sub> beim unbeschichteten DPF .....	71

6	NO <sub>2</sub> -Rückdiffusion in Dieselpartikelfiltern mit katalytisch wirksamer Beschichtung ...	76
6.1	Charakterisierung der Rußoxidation mit NO <sub>2</sub> .....	76
6.2	Rußoxidation mit katalytisch gebildetem NO <sub>2</sub> .....	79
6.3	Simulation der Rußoxidation mit katalytisch gebildetem NO <sub>2</sub> .....	82
7	Chemophysikalisches Steuergeräte-Modell .....	87
7.1	Rußoxidationsmodell.....	87
7.2	Permeabilitätsmodell.....	91
7.3	Ergebnisse.....	95
7.3.1	Rußbelastung ohne Rußoxidation.....	95
7.3.2	Rußbelastung mit Rußoxidation .....	97
7.3.3	Applikation des chemophysikalischen Steuergeräte-Modells (CPM) im Fahrzeug.....	99
8	Zusammenfassung .....	101
9	Anhang.....	102
9.1	Versuche DPF mit B1-Beschichtung .....	102
9.1.1	Versuchstemperatur 300 °C .....	102
9.1.2	Versuchstemperatur 350 °C .....	105
9.1.3	Versuchstemperatur 375 °C .....	107
9.1.4	Versuchstemperatur 400 °C .....	108
9.1.5	Versuchstemperatur 450 °C .....	111
9.2	Fahrzeugversuche auf dem Rollenprüfstand .....	113
10	Literatur.....	115

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Übersicht Grenzwerte Euronormen für Diesel-Pkw nach [Dieselnet-2010].....	2
Abbildung 3-1 Abgasemissionen in Abhängigkeit vom Luftverhältnis [Pischinger-2000].....	6
Abbildung 3-2 Thermodynamisches NO/NO <sub>2</sub> -Gleichgewicht in Abhängigkeit von Temperatur und Sauerstoffkonzentration .....	7
Abbildung 3-3 Rußbildungshypothese .....	10
Abbildung 3-4 Reaktionsmechanismen zur Rußbildung (rechts HACA-Mechanismus).....	11
Abbildung 3-5 Schematische Partikelgrößenverteilung von Dieselabgas nach [Kittelson-1998] .....	12
Abbildung 3-6 Reaktionsmechanismus nach Marsh et al. [Li-2001].....	14
Abbildung 3-7 Erweiterung des Reaktionsmechanismus von Marsh et al. [Li-2001] .....	14
Abbildung 3-8 Reaktionsmechanismus nach Setiabudi et al. [Setiabudi-2004].....	15
Abbildung 3-9 Reaktionsmechanismus nach Moulijn et al. [Moulijn-1995] .....	16
Abbildung 3-10 Inhibierungsmechanismen der Boudouardreaktion nach Ergun und Gadsby et al. [Moulijn-1995] .....	17
Abbildung 3-11 Teilschritte einer katalysierten Gas-Feststoff-Reaktion nach [Harder-1990] [Heck-2002] .....	19
Abbildung 3-12 Schematische Darstellung eines monolithischen Dieselpartikelfilters .....	21
Abbildung 3-13 Rußpackungsdichte in Abhängigkeit von Rußbelastung und Filtrationsgeschwindigkeit [Koltsakis-2006].....	28
Abbildung 4-1 Darstellung Laborprobe .....	31
Abbildung 4-2 Schematischer Aufbau des Einzylinderprüfstandes.....	32
Abbildung 4-3 Rußschicht Höhenverlauf berufter Laborproben .....	33
Abbildung 4-4 Schematischer Aufbau der Druckmesszelle SCX05DN nach [Sensortechnics-2008] .....	36
Abbildung 4-5 Vereinfachte schematische Darstellung der verwendeten Modellgasanlagen .....	38
Abbildung 4-6 Prinzipieller Aufbau des UV/Vis-Analysators [Leutritz-2006] .....	40
Abbildung 4-7 Prinzip eines NDIR-Absorptionsmessgerätes nach [Hoffmann-2002] .....	41
Abbildung 4-8 Prinzip magneto-mechanischer Sauerstoffsensoren nach [Hoffmann-2002] .....	42
Abbildung 4-9 Dynamische Viskosität von N <sub>2</sub> und O <sub>2</sub> nach Werten von [Lechner-1992].....	43
Abbildung 4-10 Verlauf absoluter und spezifischer Rußumsatzrate sowie Rußbelastungsverlauf; T = 823 K, RG = 30.000 h <sup>-1</sup> , O <sub>2</sub> = 10 Vol.%, H <sub>2</sub> O = 5 Vol.%, N <sub>2</sub> = 85 Vol.%. .....	45
Abbildung 4-11 Schematischer Aufbau im Simulationsprogramm Axitrap nach [Haralampous-2007].....	47
Abbildung 4-12 Druckabhängigkeit molekularer Diffusionskoeffizient von NO <sub>2</sub> in Luft nach Gleichung von Fuller .....	51
Abbildung 4-13 Schematischer Aufbau eines Heißfilmanemometers [ABB-2002].....	53
Abbildung 4-14 Messaufbau Vollmotorenprüfstand mit Sonderabgasanlage .....	56
Abbildung 4-15 Thermoelementbestückung DPF .....	56
Abbildung 4-16 Längs geteilter Unitbrick mit Sollbruchstellen.....	58
Abbildung 4-17 Rußschicht Höhenbestimmung an einem Kanal mithilfe des digitalen Mikroskops bei 100-facher Vergrößerung.....	59
Abbildung 5-1 Beladungsverhalten beschichteter und unbeschichteter DPF ( $\vartheta = 240\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $v_F = 0.030\text{--}0.032\text{ m/s}$ ) .....	62
Abbildung 5-2 Rußporosität in Abhängigkeit von der Peclet-Zahl (Parameter für Peclet-Zahl: $d_{\text{Agglomerat}} = 85\text{ nm}$ , $d_{\text{Primärpartikel}} = 25\text{ nm}$ ), [Premchand-2006].....	63
Abbildung 5-3 Rußporosität in Abhängigkeit des Oxidationsgrades.....	63
Abbildung 5-4 Rußporosität in Abhängigkeit des Rußgedrucks und Kompaktionsfunktion nach Koltsakis [Koltsakis-2006].....	64

Abbildung 5-5 Rußporosität in Abhängigkeit von der Rußbelastung [Koltzakis-2006] .....	65
Abbildung 5-6 Rußschichthöhenverlauf des verwendeten Partikelfiltersubstrates in Abhängigkeit von der spezifischen Rußbelastung .....	66
Abbildung 5-7 TEM-Aufnahme des verwendeten Hatz-Dieselußes .....	67
Abbildung 5-8 Gegendruck der Rußschicht in Abhängigkeit von der Rußbelastung ( $\vartheta = 250$ $^{\circ}\text{C}$ , $\text{RG} = 30.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	68
Abbildung 5-9 Rußpermeabilität in Abhängigkeit von der mittleren freien Weglänge bei verschiedenen Rußbelastungen ( $\text{RG} = 30.000 \text{ h}^{-1}$ , $\vartheta = 250, 350, 450, 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $d_{\text{Agglomerat}} = 80 -$ $101 \text{ nm}$ , $d_{\text{Primärpartikel}} = 32 \text{ nm}$ , $\varepsilon$ nach Formel 131) .....	68
Abbildung 5-10 CO- und CO <sub>2</sub> -Verlauf während der Rußoxidation bei 550°C ( $\text{O}_2 = 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O} = 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 27.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	69
Abbildung 5-11 Relativer Verlauf der spez. Rußumsatzraten (CO + CO <sub>2</sub> ) bei verschiedenen Temperaturen (Anfangsrußbelastung 6,2 bis 6,9 g/m <sup>2</sup> , $\text{O}_2 = 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O} = 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 27.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	69
Abbildung 5-12 CO <sub>2</sub> /CO-Verhältnis während der Rußoxidation mit O <sub>2</sub> bei verschiedenen Temperaturen ( $\text{O}_2 = 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O} = 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 27.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	71
Abbildung 5-13 Arrheniusplot für Rußoxidation mit O <sub>2</sub> ( $\text{O}_2 = 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O} = 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 27.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	71
Abbildung 5-14 Dimensionsloser Verlauf eines Partikeldurchmessers bei verschiedenen fraktalen Dimensionen .....	73
Abbildung 5-15 Rußpermeabilität während Rußoxidation bei verschiedenen Rußbelastungen ( $\vartheta = 600^{\circ}\text{C}$ , $\text{O}_2 = 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O} = 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 27.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	73
Abbildung 5-16 Rußpermeabilität während Rußoxidation ( $\vartheta = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\text{O}_2 = 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O}$ $= 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 27.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	74
Abbildung 5-17 Rußpermeabilität während Rußoxidation ( $\vartheta = 525 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\text{O}_2 = 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O}$ $= 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 27.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	74
Abbildung 5-18 Rußpermeabilität während Rußoxidation ( $\vartheta = 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\text{O}_2 = 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O}$ $= 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 27.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	75
Abbildung 5-19 Rußpermeabilität während Rußoxidation ( $\vartheta = 575 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\text{O}_2 = 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O}$ $= 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 27.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	75
Abbildung 6-1 Rußoxidationsverlauf mit NO <sub>2</sub> bei 350 °C ( $\text{RG} = 30.000 \text{ h}^{-1}$ , $\text{NO}_2 = 9970$ ppm, Rest N <sub>2</sub> ) .....	77
Abbildung 6-2 Relativer Verlauf der spez. Rußumsatzraten (CO + CO <sub>2</sub> ) bei verschiedenen Temperaturen (Anfangsrußbelastung 5,4 bis 6,1 g/m <sup>2</sup> , $\text{NO}_2 = 9970 \text{ ppm}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 30.000$ $\text{h}^{-1}$ ) .....	77
Abbildung 6-3 Arrheniusplot für Rußoxidation mit NO <sub>2</sub> ( $\text{RG} = 30.000 \text{ h}^{-1}$ , $\text{NO}_2 = 9970 \text{ ppm}$ , Rest N <sub>2</sub> ) .....	77
Abbildung 6-4 Versuch und Simulation der passiven Regeneration eines unbeschichteten Laborfilters bei 350 °C (Anfangsrußbelastung 5,64 g/m <sup>2</sup> , $\text{NO}_2 = 375 \text{ ppm}$ , $\text{NO} = 375 \text{ ppm}$ , $\text{O}_2$ $= 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O} = 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 30.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	79
Abbildung 6-5 Rußoxidationsverlauf mit katalytisch gebildetem NO <sub>2</sub> bei 350 °C (Anfangsrußbelastung 6,16 g/m <sup>2</sup> , $\text{NO} = 550 \text{ ppm}$ , $\text{O}_2 = 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O} = 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 37.500 \text{ h}^{-1}$ ) .....	80
Abbildung 6-6 Absolute Rußumsatzrate bei 80% Restrußbelastung über spez. Anfangsrußbelastung ( $\vartheta = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\text{NO} = 1.000 \text{ ppm}$ , $\text{O}_2 = 10 \text{ Vol.-%}$ , $\text{H}_2\text{O} = 5 \text{ Vol.-%}$ , Rest N <sub>2</sub> , $\text{RG} = 30.000 \text{ h}^{-1}$ ) .....	81
Abbildung 6-7 Vergleich NO <sub>2</sub> -Konzentration nach Probe simuliert und Experiment .....	83
Abbildung 6-8 Vergleich absolute Rußumsatzraten von Simulation und Experiment bei 80% Restrußbelastung .....	84

Abbildung 6-9 NO <sub>2</sub> -Konzentrationsprofil in der Rußschicht und Filterwand bei Versuchsbeginn ( $\vartheta = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ , NO = 1.000 ppm, O <sub>2</sub> = 10 Vol.%, H <sub>2</sub> O = 5 Vol.%, Rest N <sub>2</sub> , RG = 30.000 h <sup>-1</sup> ).....	85
Abbildung 6-10 Simulierter axialer Rußschichthöhenverlauf bei verschiedenen Rußumsätzen ( $\vartheta = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ , NO = 1.000 ppm, O <sub>2</sub> = 10 Vol.%, H <sub>2</sub> O = 5 Vol.%, Rest N <sub>2</sub> , RG = 30.000 h <sup>-1</sup> )..	86
Abbildung 6-11 Axiale Rußschichthöhenverläufe bei verschiedenen Rußumsätzen ( $\vartheta = 325\text{-}$ 450 °C, NO = 1.000 ppm, O <sub>2</sub> = 10 Vol.%, H <sub>2</sub> O = 5 Vol.%, Rest N <sub>2</sub> , RG = 30.000 h <sup>-1</sup> ) .....	86
Abbildung 7-1 Simuliertes NO-Konversionskennfeld über Nennvolumenstrom und Temperatur.....	88
Abbildung 7-2 Spez. Rußumsatzrate über DPF-Temperatur.....	89
Abbildung 7-3 Mittlere absolute Rußumsatzraten bei verschiedenen Versuchstemperaturen und Beschichtungen (B1, B2).....	91
Abbildung 7-4 Gegendruckverhalten des leeren DPFs über den Abgasmassenstrom .....	92
Abbildung 7-5 Gegendruckkennfeld in mbar des leeren DPFs über Abgasmassenstrom und Abgastemperatur .....	93
Abbildung 7-6 DPF-Beladung bei ca. 240 °C .....	96
Abbildung 7-7 Zeitliches Rußbeladungsverhalten bei 450°C.....	97
Abbildung 7-8 Spezifische Rußmasse mittels Modell berechnet über spez. Rußmasse laut Gravimetrie mit Fehlerbereichen verschiedener Beladungsversuche .....	98
Abbildung 7-9 Highway-Zyklus mit 6 % Straßensteigung .....	99
Abbildung 7-10 Fahrzeugdauerlauf.....	100
Abbildung 9-1 DPF-Beladung bei 300 °C .....	102
Abbildung 9-2 DPF-Beladung bei 300 °C .....	103
Abbildung 9-3 DPF-Beladung bei 300 °C .....	103
Abbildung 9-4 DPF-Beladung bei 300 bis 400 °C.....	104
Abbildung 9-5 DPF-Beladung bei 350 °C .....	105
Abbildung 9-6 DPF-Beladung bei 350 °C .....	105
Abbildung 9-7 DPF-Beladung bei 350 °C .....	106
Abbildung 9-8 DPF-Beladung bei 350 °C .....	106
Abbildung 9-9 DPF-Beladung bei 375 °C .....	107
Abbildung 9-10 DPF-Beladung bei 400 °C.....	108
Abbildung 9-11 DPF-Beladung bei 400 °C.....	108
Abbildung 9-12 DPF-Beladung bei 400 °C.....	109
Abbildung 9-13 DPF-Beladung bei 400 °C.....	109
Abbildung 9-14 DPF-Beladung bei 400 °C.....	110
Abbildung 9-15 DPF-Beladung bei 400 °C.....	110
Abbildung 9-16 DPF-Beladung bei 450 °C.....	111
Abbildung 9-17 DPF-Beladung bei 450 °C.....	111
Abbildung 9-18 DPF-Beladung bei 450 °C.....	112
Abbildung 9-19 DPF-Beladung bei 450 °C.....	112
Abbildung 9-20 City70-Zyklus mit 0 % Straßensteigung.....	113
Abbildung 9-21 Highway-Zyklus mit 0 % Straßensteigung .....	113
Abbildung 9-22 Highway-Zyklus mit 4 % Straßensteigung .....	114

## Verzeichnis verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen

### Abkürzungen

AMA	Abgasmessanlage
CEM	Controlled Evaporator Mixer - Verdampfungseinheit
CLD	Chemilumineszenzdetektor
CPM	Chemophysikalisches Steuergerätemodell
cps	cells per square inch
DOC	Dieseloxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
DRIFTS	diffus reflektierende Infrarotfouriertransformationsspektroskopie
FID	Flammenionisationsdetektor
LFC	Liquid-Flow-Controller
MFC	Mass-Flow-Controller
Nfz	Nutzfahrzeug
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Particulate Matter/Partikelmasse
RDE	Real Driving Emissions
SCR	selektive katalytische Reduktion
SFG	sauerstofffunktionelle Gruppen
TEM	Transmissionselektronenspektroskopie
WHO	World Health Organization

### Chemische Spezies

$2\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$	Cordierit
C	Kohlenstoff
C(O)	lokaler, chemisorbierter, atomarer Sauerstoff
C(O) <sub>i</sub> (O)	sauerstofffunktionelle Gruppe
C(O) <sub>m</sub>	mobiler, chemisorbierter, atomarer Sauerstoff
C(O <sub>2</sub> )	freier, chemisorbierter, molekularer Sauerstoff
C(O <sub>2</sub> ) <sub>m</sub>	mobiler, chemisorbierter, molekularer Sauerstoff
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Propen
CeO <sub>2</sub>	Cerioxid
C <sub>r</sub>	freie Kohlenstoffstelle
C <sub>i</sub> (O)	sauerstofffunktionelle Gruppe
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
H	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoffe
HCN	Blausäure
hν	elektromagnetische Strahlung
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Lanthanoxid
M	Quenchemolekül z.B. Wasser oder Kohlenstoffdioxid
N	Stickstoff
N <sub>2</sub> O	Distickstoffoxid
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Natriumcarbonat
NaOH	Natriumhydroxid
NiCr	Nickelchromlegierung
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>2</sub> <sup>*</sup>	angeregtes Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickoxide Summe NO+NO <sub>2</sub>
O	Sauerstoff
O <sub>2</sub>	Sauerstoff

O <sub>3</sub>	Ozon
SiC	Siliziumcarbid
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid

### Griechische Formelzeichen

$\alpha$	Reaktionsordnung	1
$\alpha_{S0}$	Rußfeststoffanteil unkomprimiert	1
$\beta$	Reaktionsordnung	1
$\beta_F$	Forchheimerkoeffizient	1
$\beta_S$	Exponent Kompressionsfestanteilsfunktion	1
$\gamma$	Reaktionsordnung	1
$\delta$	Reaktionsordnung	1
$\delta_\varepsilon$	Exponent Kompaktionsfunktion	1
$\delta_S$	Exponent Kompressionspermeabilitätsfunktion	1
$\delta_{\text{Partikel}}$	Formfaktor Partikel	1
$\Delta p$	Differenzdruck	Pa
$\Delta p_{\text{Auslasskanal}}$	Gegendruck Auslasskanal	Pa
$\Delta p_{\text{DPF,gesamt}}$	Gesamtgegendruck Probe	Pa
$\Delta p_{\text{DPF,leer}}$	Leergegendruck Probe	Pa
$\Delta p_{\text{Einlasskanal}}$	Gegendruck Einlasskanal	Pa
$\Delta p_{\text{Einlasskanal,ber}}$	Gegendruck berußter Einlasskanal	Pa
$\Delta p_{\text{EK,ber,zus}}$	zusätzlicher Rußgegendruck Einlasskanal durch Querschnittsverkleinerung	Pa
$\Delta p_{\text{Expansion,Auslass}}$	Gegendruck Expansion am Auslass	Pa
$\Delta p_{\text{Filterwand}}$	Gegendruck Filterwand	Pa
$\Delta p_{\text{Kanalreibung}}$	Gegendruck Kanalreibung	Pa
$\Delta p_{\text{Kontraktion,Einlass}}$	Gegendruck Kontraktion am Einlass	Pa
$\Delta p_{\text{Ruß}}$	Gegendruck Rußschicht	Pa
$\varepsilon$	Porosität	1
$\varepsilon_P$	Konstante für fraktalen Größenzusammenhang	1
$\varepsilon_{\text{Ruß}}$	Rußporosität	1
$\varepsilon_S$	Solidität komprimiert	1
$\varepsilon'_S$	aktuelle Solidität	1
$\varepsilon_{S0}$	Solidität unkomprimiert	1
$\varepsilon_t$	Rußporosität zum Zeitpunkt t	1
$\zeta_{K,E}$	Widerstandsbeiwert Expansion und Kontraktion	1
$\eta$	dynamische Viskosität	kg/(m·s)
$\eta_{\text{Gas}}$	dynamische Viskosität Gas	kg/(m·s)
$\eta_{\text{H}_2\text{O}(g)}$	dynamische Viskosität Wassergas	kg/(m·s)
$\eta_{\text{N}_2}$	dynamische Viskosität Stickstoff	kg/(m·s)
$\eta_{\text{O}_2}$	dynamische Viskosität Sauerstoff	kg/(m·s)
$\vartheta$	Temperatur	°C
$\theta$	Exponent für Wassereinfluss	1
$\lambda$	Luftzahl	1
$\lambda_{\text{Gas}}$	mittlere freie Weglänge	m
$\lambda_{\text{N}}$	Oberflächenkonzentration aktiver Stellen	1/m <sup>2</sup>
$\mu$	Exponent für Wassereinfluss	1
$\nu$	kinematische Viskosität	m <sup>2</sup> /s
$\nu_{\text{Gas}}$	kinematische Gasviskosität	m <sup>2</sup> /s
$\pi$	Zahl Pi	1
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{0,\text{Gas}}$	Normgasdichte	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{Gas}}$	Gasdichte	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{Kohlenstoff}}$	Feststoffdichte amorpher Kohlenstoff	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_P$	Dichte Partikel	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{Ruß}}$	Rußpackungsdichte	kg/m <sup>3</sup>

$\rho_{Ru\beta,OF,t}$	Rußpackungsdichte des oberflächenfiltrierten Rußes zum Zeitpunkt t	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{Ru\beta,Unitricks}$	Rußpackungsdichte	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	Rußpackungsdichte Simulationsmodell	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Zelldichte	cpsi
$\tau$	Gewundenheit/Tortuosität	1
$\varphi$	Exponent für Wassereinfluss	1
$\xi$	Reaktionsordnung	1
$\xi_{Probenahme}$	Korrekturwert für Beladungszeitberechnung	1
$\xi_R$	Oxidationsgrad	1
$\psi_{Ox,t}$	Oxidationsgrad zum Zeitpunkt t	1

### Lateinische Formelzeichen

$(K \cdot p)_{Ru\beta,OF,t}$	Permeabilitätsprodukt oberflächenfiltrierter Ruß zum Zeitpunkt t	kg/m
$(K \cdot p)_{Ru\beta,t}$	Permeabilitätsprodukt Ruß zum Zeitpunkt t	kg/m
$(K \cdot p)_{Ru\beta,TF,t}$	Permeabilitätsprodukt tiefenfiltrierter Ruß zum Zeitpunkt t	kg/m
$a_{H_2O}$	Faktor für Wassereinfluss	1
A	Konstante 1 für Porositätsfunktion nach Konstandopoulos	1
$A_{DPF}$	effektive Filtrationsfläche DPF	m <sup>2</sup>
$A_{Filter}$	Filterfläche	m <sup>2</sup>
b	Trapezoidale Kanalbreite im Rußkuchen	m
$b_{H_2O}$	Faktor für Wassereinfluss	1
$b_k$	Konstante 1 für Klinkenbergkorrektur	m <sup>2</sup>
B	Konstante 2 für Porositätsfunktion nach Konstandopoulos	1
$C_{H_2O}$	Faktor für Wassereinfluss	1
$C_{Ru\beta,t}$	Rußkonzentration zum Zeitpunkt t	g/m <sup>3</sup>
C	Konstante 3 für Porositätsfunktion nach Konstandopoulos	1
$C_1$	Faktor für Tiefenfiltrationskorrektur	m/kg
$C_2$	Faktor für Tiefenfiltrationskorrektur	m <sup>4</sup> /kg <sup>2</sup>
$C_4$	Faktor für Gleitströmungskorrektur nach Pulkrabek	m s/(kg mol T) <sup>0.5</sup>
$C_m$	Impulsanpassungskoeffizient	1
$d_0$	Primärpartikeldurchmesser	m
$d_{ae}$	aerodynamischer Partikeldurchmesser	m
$d_{aggregat}$	Partikelaggregatdurchmesser	m
$d_c$	charakteristischer Durchmesser	m
$d_{KB}$	Kanalbreite	m
$d_{Partikel}$	Partikeldurchmesser	m
$d_{Partikel,0}$	Ursprungspartikeldurchmesser	m
$d_{primär,t}$	Primärpartikeldurchmesser zum Zeitpunkt t	m
$d_x$	charakteristischer Partikeldurchmesser	m
D	Monolithdurchmesser	m
$D_{AB,mol}$	Molekularer Diffusionskoeffizient	cm <sup>2</sup> /s
$D_d$	globale fraktale Dichtedimension	1
$D_{eff,j}$	Effektiver Diffusionskoeffizient der jeweiligen Spezies j	m <sup>2</sup> /s
$D_f$	fraktale Dimension	1
$D_{GP}$	Globaler Perimeter basierte fraktale Dichtedimension	1
$D_j$	Diffusionskoeffizient der jeweiligen Spezies	m <sup>2</sup> /s
$D_{knud,j}$	Knudsendiffusionskoeffizient der jeweiligen Spezies j	m <sup>2</sup> /s
$D_{mol,j}$	Molekularer Diffusionskoeffizient der jeweiligen Spezies j	m <sup>2</sup> /s
$D_p$	Partikeldiffusionskoeffizient	m <sup>2</sup> /s
$\bar{D}_p$	oberflächenbezogener Partikeldurchmesser	m
$D_s$	strukturelle fraktale Dimension	1
$D_t$	texturelle fraktale Dimension	1
e	Euler-Zahl	1
$E_a$	Aktivierungsenergie	J/mol
f( $\epsilon$ )	geometrische Porositätsfunktion	1
f( $\epsilon$ ) <sub>Kuw,t</sub>	Kuwabarafaktor zum Zeitpunkt t	1

$f_{k,p1}$	Korrekturfaktor 1 für Tiefenfiltration	kg/m
$f_{k,p2}$	Korrekturfaktor 2 für Tiefenfiltration	1/m
$f_{\text{Korr,Inh}}$	Korrekturfaktor für Inhibierung	1
$f_{\text{Korr,Ox}}$	Korrekturfaktor für Beschichtungseinfluss	1
$f_{\text{Ox,t}}$	struktureller Korrekturfaktor zum Zeitpunkt t	1
$f_{\text{Ox,t-1}}$	letzter berechneter struktureller Korrekturfaktor	1
$f_p$	Korrekturwert Ergungleichung	1
$f_x$	Verhältnis Einlasskanalbreite in der Rußschicht zu Kanalbreite	1
F	Hydrodynamischer Faktor 28.454 nach Konstandopoulos	1
G	Inhibierungsterm	1
$h_{\text{Ruß}}$	Rußschichthöhe	m
k	Permeabilität	m <sup>2</sup>
K'	Aktuelles Gleichgewicht	1
$\bar{k}$	aktuelle berechnete Permeabilität	m <sup>2</sup>
$k_0$	Frequenzfaktor	1/(Pa·s)
$k_a$	Oberflächengaspermeabilität	m <sup>2</sup>
$k_B$	Boltzmannkonstante	J/K
$k_{\text{CO}}$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	1/(Pa·s)
$k_{\text{CO}_2}$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	1/(Pa·s)
$k_{\text{CO,NO}_2}$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	1/(Pa·s)
$k_{\text{CO}_2,\text{NO}_2}$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	1/(Pa·s)
$k_{\text{O}_2,\text{CO}_2,\text{NO}_2}$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	1/(Pa·s)
$k_{\text{O}_2,\text{CO}_2,\text{NO}_2}$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	1/(Pa·s)
$K_{\text{Filterwand}}$	Permeabilität Filterwand	m <sup>2</sup>
$K_{\text{Kontinuum}}$	Permeabilität bei Kontinuumsströmung	m <sup>2</sup>
$K_{m,t}$	gravimetrie-basierte Rußoxidationsrate zum Zeitpunkt t	g/s
$Kn$	Knudsen-Zahl	1
$K_{\text{Ox}}$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	1/(Pa·s)
$k_p$	Rußpermeabilität	m <sup>2</sup>
$K_p$	Gleichgewichtskonstante	1
$k_{p,0}$	komprimierte Rußpermeabilität	m <sup>2</sup>
$k_{p,s}$	unkomprimierte Rußpermeabilität	m <sup>2</sup>
$k_{\text{Ruß}}$	Rußpermeabilität	m <sup>2</sup>
$K_{\text{Wand}}$	Permeabilität Filterwand	m <sup>2</sup>
$k_{\text{Wand,0}}$	Permeabilität Filterwand bei Kontinuumsströmung	m <sup>2</sup>
K	Faktor für Partikelgrößenverteilung & Partikelform	1
l	Länge	m
$l_{\text{DPF,eff}}$	effektive Filterlänge	m
$m_0$	Ursprungsmasse	kg
$m'_a$	spezifische Rußmassenkompressibilität	g/m <sup>2</sup>
$\dot{m}_{\text{Abg}}$	Abgasmassenstrom	kg/s
$\dot{m}_{\text{Diesel}}$	Dieselmassenstrom	kg/s
$m_{\text{DPF,tEnde}}$	Masse DPF Versuchsende	g
$m_{\text{DPF,t}_0}$	Masse DPF Versuchsbeginn	g
$m_{\text{Filter,bel}}$	Masse Filter beladen	kg
$m_{\text{Filter,leer}}$	Masse Filter leer	kg
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$	Wassermassenstrom	g/h
$\dot{m}_{\text{Inh}}$	Inhibierungsmassenstrom	kg/s
$m_k$	Konstante für Klinkenbergkorrektur	Pa·m <sup>2</sup>
$m_L$	zugeführte Luftmasse	kg
$m_{L,\text{St}}$	stöchiometrisch benötigte Luftmasse	kg
$\dot{m}_{\text{Luft}}$	Luftmassenstrom	kg/s
$m_{\text{Ox}}$	oxidierte Rußmasse	kg
$m_{\text{Ox,t}}$	oxidierte Rußmasse zum Zeitpunkt t	kg
$m_{\text{Ox,t-1}}$	letzte berechnete oxidierte Rußmasse	kg
$m_R$	gesamte oxidierte Rußmasse	kg
$m_{R,t}$	nicht oxidierte Rußmasse zum Zeitpunkt t	kg

$\dot{m}_{\text{RU}}$	Rußumsatzmassenstrom	kg/s
$\dot{m}_{\text{RU,Sim,eff}}$	Simulierter effektiver Rußumsatzmassenstrom	kg/s
$\dot{m}_{\text{RU,t}}$	Rußumsatzmassenstrom zum Zeitpunkt t	kg/s
$m_{\text{Ruß}}$	Rußmasse	kg
$m'_{\text{Ruß}}$	Spez. Rußbelastung	g/m <sup>2</sup>
$\dot{m}'_{\text{Ruß,DPF}}$	mittlere Rußbelastungsrate	g/s
$m'_{\text{Ruß,DPF}}$	spezifische Rußbelastung DPF	g/m <sup>2</sup>
$m_{\text{Ruß,OF,t-1}}$	letzte berechnete oberflächenfiltrierte Rußmasse	kg
$m'_{\text{Ruß,soll}}$	Sollrußbelastung	g/l
$\dot{m}_{\text{Ruß,t}}$	Rußmassenstrom zum Zeitpunkt t	g/s
$m_{\text{Ruß,t}}$	Rußmasse zum Zeitpunkt t	kg
$m_{\text{Ruß,t-1}}$	letzte berechnete Rußmasse	kg
$m_{\text{Ruß,TF,max,t}}$	maximale tiefenfiltrierte Rußmasse zum Zeitpunkt t	kg
$m_{\text{Ruß,TF,max,t0}}$	maximale tiefenfiltrierte Rußmasse	kg
$m_{\text{Ruß,TF,t-1}}$	letzte berechnete tiefenfiltrierte Rußmasse	kg
$m'_{\text{Rußeintrag}}$	spezifischer Rußmasseneintrag	g/m <sup>2</sup>
M	Molmasse	g/mol
$M_{\text{C}}$	Molmasse Kohlenstoff 12 g/mol	g/mol
$M_{\text{g}}$	Molmasse Gas	g/mol
$\eta_{\text{EK,eff}}$	effektive Einlasskanalanzahl	1
$n_{\text{O}_2}$	Reaktionsordnung Sauerstoff	1
$n_{\xi}$	struktureller Exponent	1
p	Gasdruck	Pa
$N_{\text{PP}}$	Anzahl Primärpartikel	1
$N_{\text{t}}$	Anzahl aktiver Stellen	1
$\bar{p}$	Mittleres Druckniveau in Filter und Rußschicht	Pa
$p_0$	Normdruck 101.325 Pa	Pa
$p_a$	Kompressibilitätsdruck	Pa
$p_{\text{DPF}}$	Mittlerer Druck im DPF	Pa
$p_m$	mittlerer Systemdruck	Pa
$p_i$	Absolutdruck Rußschichtoberfläche	Pa
$p_{\text{nachDPF}}$	Druckniveau nach DPF	Pa
$p_{\text{NO}_2}$	Partialdruck NO <sub>2</sub>	Pa
$p_{\text{O}_2}$	Partialdruck Sauerstoff	Pa
$p_{\text{Ruß}}$	Druck in der Rußschicht	Pa
$p_s$	kompressiver Druck	Pa
$p_{\text{Umgebung}}$	Umgebungsdruck	Pa
$p_{\text{vorDPF}}$	Druckniveau vor DPF	Pa
$Pe$	Peclet-Zahl	1
$PM_{\text{oxid}}$	Oxidationsgrad	1
$\mathcal{R}$	universelle Gaskonstante	J/(mol·K)
R	Spez. Umsatzrate NO	1/s
$R_{\text{CO}}$	Spez. Umsatzrate Ruß mit O <sub>2</sub> zu CO	1/s
$R_{\text{CO}_2}$	Spez. Umsatzrate Ruß mit O <sub>2</sub> zu CO <sub>2</sub>	1/s
$R_{\text{CO}_2,\text{NO}_2}$	Spez. Umsatzrate Ruß mit NO <sub>2</sub> zu CO <sub>2</sub>	1/s
$R_{\text{CO},\text{NO}_2}$	Spez. Umsatzrate Ruß mit NO <sub>2</sub> zu CO	1/s
$R_{\text{NO}_2,\text{Sim}}$	Spez. Umsatzrate Ruß mit NO <sub>2</sub>	1/s
$R_{\text{NO}_2,\text{Sim,Korr}}$	Korrigierte spez. Umsatzrate Ruß mit NO <sub>2</sub>	1/s
$R_{\text{O}_2,\text{CO},\text{NO}_2}$	Spez. Umsatzrate Ruß mit NO <sub>2</sub> zu CO	1/s
$R_{\text{O}_2,\text{CO}_2,\text{NO}_2}$	Spez. Umsatzrate Ruß mit NO <sub>2</sub> zu CO <sub>2</sub>	1/s
$R_{\text{Ox}}$	Spez. Oxidationsrate	1/s
$R_{\text{Sim,Ox}}$	Strukturell korrigierte spez. Umsatzrate Ruß	1/s
$Re_{\text{p}}$	Reynolds-Zahl Partikel	1
RG	Raumgeschwindigkeit	1/h
$R_{\text{r,t}}$	spezifische Rußumsatzrate	1/s
RZ	Rußkonzentration nach Rußzahl	mg/m <sup>3</sup>

$S_a$	freie aktive Oberfläche	$m^2$
$S_{a,0}$	ursprüngliche freie aktive Oberfläche	$m^2$
SCF	Stokes-Cunningham-Faktor	1
$SCF_t$	Stokes-Cunningham-Faktor zum Zeitpunkt t	1
Sh	Sherwood-Zahl	1
Stk	Stokes-Zahl	1
$t_{\text{Ende}}$	Zeit Versuchsende	s
$t_0$	Zeit Versuchsbeginn	s
T	Temperatur	K
$\bar{t}$	Messintervall	s
$T_0$	Normtemperatur 273,15 K	K
$t_{\text{bel}}$	Beladungszeit	s
$T_{\text{DPF}}$	Temperatur im DPF	K
$T_{\text{mittel}}$	mittlere Temperatur	K
$T_{\text{nachDPF}}$	Temperatur nach DPF	K
$T_{\text{vorDPF}}$	Temperatur vor DPF	K
$U_{\text{NO,DOC}}$	NO-Konversion am DOC	1
u	Partikelgeschwindigkeit	m/s
v	Geschwindigkeit	m/s
$\dot{V}$	Volumenstrom	$m^3/s$
$\dot{V}_{\text{Abg}}$	Abgasvolumenstrom	$m^3/s$
$\dot{V}_{\text{Br}}$	Betriebsvolumenstrom	l/min
$V_{\text{DPF}}$	Filtervolumen	$m^3$
$V_{\text{EK}}$	Volumen Einlasskanal	$m^3$
$v_F$	Filtrationsgeschwindigkeit	m/s
$V_{\text{Filter}}$	Filtervolumen	$m^3$
$V_{\text{Filter,effektiv}}$	effektives Filtervolumen	$m^3$
$\dot{V}_{\text{ges}}$	Gesamtvolumenstrom	l/min
$v_i$	Atomdiffusionsvolumen nach Fuller	$cm^2$
$V_{\text{mol}}$	molares Volumen bei Normbedingungen 22,4 l/mol	l/mol
$\dot{V}_{N_2}$	Volumenstrom Stickstoff	l/min
$\dot{V}_{\text{Nenn,Abg}}$	Nennvolumenstrom Abgas	$m^3/s$
$\dot{V}_{NO}$	Volumenstrom Stickstoffmonoxid	l/min
$\dot{V}_{NO_2}$	Volumenstrom Stickstoffdioxid	l/min
$\dot{V}_{O_2}$	Volumenstrom Sauerstoff	l/min
$\dot{V}_{\text{Probe}}$	Probennahmevolumenstrom	$m^3/s$
$V_{\text{Ruß}}$	Rußvolumen	$m^3$
$v_w$	Filtrationsgeschwindigkeit bezogen auf effektive Filteroberfläche	m/s
w	Wandstärke	m
x	Horizontale Dimension	1
$y_{CO}$	Molanteil Kohlenstoffmonoxid	1
$y_{CO_2}$	Molanteil Kohlenstoffdioxid	1
$y_{H_2O}$	Wassermolanteil	1
$y_{H_2O,soll}$	Wassermolanteil	1
$y_{\text{koriert}}$	Mit Wassergehalt korrigierter Messwert	1
$y_{\text{Messwert}}$	Rohmesswert ohne Wassergehaltkorrektur	1
$y_{N_2}$	Molanteil Stickstoff	1
$y_{NO, Gasflasche}$	Molanteil Stickstoffmonoxid in Gasflasche	1
$y_{NO, soll}$	Sollmolanteil Stickstoffmonoxid	1
$y_{NO_2, Gasflasche}$	Molanteil Stickstoffdioxid in Gasflasche	1
$y_{NO_2, sim}$	Molanteil $NO_2$ simuliert	1
$y_{NO_2, soll}$	Sollmolanteil Stickstoffdioxid	1
$y_{O_2}$	Luftsauerstoffmolanteil	1
$y_{O_2, soll}$	Sollmolanteil Sauerstoff	1