

# **Bayreuther Beiträge zur Sensorik und Messtechnik**

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer, Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos

Markus Feulner

## Methoden der Rußdetektion im Diesellabgas

Band 28



UNIVERSITÄT  
BAYREUTH

# Methoden der Rußdetektion im Dieselaabgas

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
der Universität Bayreuth  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Markus Feulner  
aus  
Würzburg

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos  
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Achim Dittler  
Tag der mündlichen Prüfung: 22.07.2019

Lehrstuhl für Funktionsmaterialien  
Universität Bayreuth  
2019



Bayreuther Beiträge zur Sensorik und Messtechnik

Band 28

**Markus Feulner**

**Methoden der Rußdetektion im Dieselabgas**

Shaker Verlag  
Düren 2019

**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.: Bayreuth, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6926-6

ISSN 1862-9466

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)

## Vorwort der Herausgeber

Dieselpartikelfilter (DPF) sind im Zuge immer strengerer Abgasgrenzwerte mittlerweile unverzichtbarer Bestandteil eines effizienten Abgasnachbehandlungssystems für Dieselmotoren geworden. DPF filtern Dieselruß und Asche und reduzieren sowohl die emittierte Partikelanzahl als auch die Partikelmasse. Da sich mit zunehmender Filterbeladung der Abgasgegendruck erhöht, müssen DPF regeneriert werden, d.h. der akkumulierte Ruß muss oxidiert werden. Weil aber Regenerationsereignisse zusätzlich Kraftstoff verbrauchen, will man deren Anzahl so gering wie möglich halten. Daher ist die Kenntnis der aktuellen Ruß- und auch der Aschebeladung des DPF wichtig. Derzeit werden beide Größen aber nur indirekt, d.h. über Abgasgegendrucke und Beladungsmodelle ermittelt. Dadurch entsteht ein Genauigkeitsdefizit, und auch die Unterscheidung von Ruß und Asche ist mit Differenzdrucksensoren nur eingeschränkt möglich.

Die Frage, ob und wie die in Dieselpartikelfiltern gespeicherte Rußmasse direkt mit Hilfe eines mikrowellenbasierten Beladungssensors detektiert werden kann, und ob die Rußkonzentration im Dieselabgas stromaufwärts eines DPF mit Hilfe eines konduktometrischen Partikelsensors bestimmt werden kann um damit die Beladung integrierend zu bestimmen, ist der Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit.

In Vorgängerarbeiten (Bände 9, 18, 20, 21, 23 und 25 dieser Reihe) wurde bereits nachgewiesen, dass das mikrowellenbasierte Verfahren für alle im Automobil relevanten Abgasnachbehandlungssysteme angewendet werden kann. Zudem wurden Methoden zur verfeinerten Auswertung gefunden.

Diese Arbeit fokussiert sich auf Anwendungen im Realabgas und untersucht typische Störeinflüsse, wie z.B. den von an Ruß angelagerter Feuchte. Zudem wird der Einfluss der Betriebstemperatur des DPF und der Abgasfeuchte evaluiert. Weiterhin wird untersucht, ob alle typischerweise verwendeten DPF-Substratmaterialien eingesetzt werden können.

Bayreuth im Juli 2019

Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer



## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Rußpartikeldetektion im Abgasstrang von Verbrennungskraftmaschinen, insbesondere von Dieselmotoren. Dies umfasst zum einen die Bestimmung der Rußbeladung eines Dieselpartikelfilters im Betrieb, zum anderen die Messung der Partikel-Rohemission des Motors in Form der Partikelkonzentration.

Das Hauptaugenmerk in dieser Arbeit liegt auf der hochfrequenzbasierten direkten Beladungserkennung von Dieselpartikelfiltern. Mit dieser Methode kann der Rußgehalt des Filters direkt über die Reflexions- bzw. Transmissionscharakteristik des Filters abgeleitet werden. Dabei wirkt das Filtergehäuse als Wellenleiter bzw. Hohlraumresonator, in welchem elektromagnetische Wellen im GHz-Bereich ausbreitungsfähig sind. Bei einer Änderung der dielektrischen Materialeigenschaften im Resonator, wie bei einer Anlagerung von Dieselruß in der Filterkeramik, verändert sich das charakteristische Spektrum des Reflexions- bzw. Transmissionsparameters ( $|S_{11}|$  bzw.  $|S_{21}|$ ) über der Frequenz, was die Bestimmung der Filterbeladung ermöglicht. Es wurden umfangreiche Messreihen am Motorprüfstand und an einer Synthesegasanlage im Labor durchgeführt, mit denen die wesentlichen Einflussparameter definiert und beschrieben werden konnten. Am Motorprüfstand wurden herkömmliche Partikelfilter, wie sie auch in Serienfahrzeugen zum Einsatz kommen, in einem speziellen, für die hochfrequenzbasierte Messung geeigneten Wechselcanning getestet. Für die Labormessungen wurde ein am Motorprüfstand beladener Filterkörper in kleinere Segmente gesägt und anschließend in ein beheizbares Filtergehäuse eingebaut.

Die prinzipielle Eignung dieser Messmethode zur Anwendung *operando* im Abgasstrang war bereits bekannt und konnte in dieser Arbeit bestätigt werden. Dabei konnte die Eignung für Filter mit Größen zwischen 0,2 l und 20 l nachgewiesen werden. Als Filtermaterial zeigten sich Cordierit und Aluminiumtitanat geeignet, während Siliziumkarbid aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit des Materials nicht für eine Anwendung in Frage kommt. Aus den aufgenommenen  $|S_{ij}|$ -Spektren stellte sich in dieser Arbeit der Mittelwert des Transmissionsparameters  $\overline{|S_{21}|}$  als besser geeignet für die Filterbeladungserkennung heraus als die Resonanzfrequenzen  $f_{\text{res}}$  des Systems. Diese verschieben sich zwar in linearer Abhängigkeit zur

Filterbeladung und wären so prinzipiell auch für eine Auswertung geeignet. Jedoch ist eine Bestimmung der Resonanzfrequenzen auf Grund der starken durch den Ruß hervorgerufenen Dämpfung nur bei relativ geringen spezifischen Filterbeladungen möglich, während der Mittelwert des  $IS_{21}$ -Parameters auch bei extrem hohen spezifischen Rußmassenbeladungen von 11 g/l noch ohne Probleme zur Beladungserkennung herangezogen werden kann. Den wichtigsten Störeinfluss auf das Messsystem stellt die Abgastemperatur dar. Hier ist auch eine Wechselwirkung mit der Rußbeladung zu beobachten: Mit größerer Beladung nimmt der Temperatureinfluss zu. Eine Berücksichtigung der Temperatur ist für eine Anwendung zwingend erforderlich. Es konnten dafür in dieser Arbeit Korrekturfunktionen definiert werden. Der Einfluss des Feuchtegehaltes ist im Vergleich zum Temperatureffekt als eher weniger relevant anzusehen. Eine Detektion der im Filter gespeicherten Asche scheint möglich, allerdings wird der Effekt durch den Rußeinfluss überlagert. Eine Möglichkeit der Aschedetektion und Systemkalibration im Betrieb könnte sich hier am Ende eines Regenerationsvorganges bieten, wenn ein komplett rußfreier Filter vorliegt. Für eine Anwendung ist auch zu berücksichtigen, dass sich sowohl die Größe des Messeffekts als auch der Temperatureinfluss bei verschiedenen Motoren deutlich unterscheiden. Dies macht eine Kalibration des Messsystems auf die spezifische Anwendung nötig. Noch drastischer als bei unterschiedlichen Verbrennungsmotoren unterscheidet sich das Messsignal bei einer Filterbeladung am propanbefeuerten Rußgenerator. Eine Übertragung von Laborergebnissen mit synthetischem Ruß auf den realen Betrieb am Dieselmotor ist folglich nur bedingt möglich.

Im zweiten Teil der Arbeit wird die Messung der Partikelkonzentration im Rohabgas des Motors vor einem DPF untersucht. Dafür wird ein selbst hergestellter resistiver Rußsensor verwendet. Dieses Sensorprinzip macht sich die elektrische Leitfähigkeit zu Nutze. Bei einer Ablagerung von Rußpartikeln auf der Sensoroberfläche wird ein elektrischer Strom messbar, der mit zunehmender Rußmenge auf dem Sensor immer größer wird. Die Steigung korreliert dabei sehr gut mit der Rußkonzentration des Abgases. Mittels Vergleichsmessungen mit dem SMPS konnte eine Sensorkennlinie ermittelt werden. Schließlich wurde der so charakterisierte Sensor benutzt, um über eine Integration der damit ermittelten Rußmasse im Abgas auf die Filterbeladung zu schließen, was dem Prinzip eines integrierenden Sensors folgt. Im umgekehrten Fall

---

konnte durch Differenzieren der mittels des hochfrequenzbasierten Messverfahrens bestimmten Filterbeladung die aktuelle Partikelemission des Motors abgeleitet werden.



## Summary

Subject of this study is the soot particle detection in the exhaust pipe of internal combustion engines, especially diesel engines. On the one hand, this study deals with the in-operando soot load determination of diesel particulate filters, on the other hand it is also about measuring the actual soot concentration of the raw exhaust.

Thereby, the main focus of this study is on the characterization of the microwave-based soot load determination of DPFs. This technique uses the reflection- and transmission-characteristics of electromagnetic waves in a ceramic filter element to directly determine the soot load of the filter. Thereby, the filter canning acts as a cavity resonator, in which electromagnetic waves in the GHz range can propagate. Accumulating soot inside the filter leads to a change of the dielectric properties inside the resonator, which then leads to a change of the characteristic spectra of the reflection- and transmission parameter, e.g.  $|S_{11}|$  and  $|S_{21}|$ . This effect can be used to determine the soot load of the filter. In comprehensive experimental studies at an engine test bench, as well as at a laboratory exhaust gas test bench, the most significant influencing parameters on this technique could be identified and described. For the engine tests, a commercial diesel particulate filter was used in a special housing, which enables both the microwave-based measurements and an easy change of the filter element. For the laboratory tests, a small filter core was manufactured out of an at the engine test bench soot-loaded filter element. It was then placed inside a special housing for the microwave measurements, which can even be heated.

It could be proven in this study that the microwave-based technique is suitable to be applied in-operando in the exhaust pipe. Thereby, the suitability could be demonstrated for different sizes (0,2 l – 20 l) and filter materials (cordierite and aluminum titanate). However, silicon carbide filters cannot be monitored with this technique due to their good electrical conductivity. Derived out of the  $|S_{ij}|$ -spectra, the value of the transmission parameter, averaged over a certain frequency range,  $\overline{|S_{21}|}$ , could be identified as a good measure for the soot load. In contrast to that, the resonance frequencies,  $f_{res}$ , which also show a good correlation to the soot load, turned out to be less suitable, as they can only be measured at low soot loads. At higher soot contents, due to the high damping of the soot, the resonance peaks can no longer be detected. In contrast to that, the averaged  $|S_{21}|$ -value can even be determined at an extremely

high soot load of 11 g/l. The exhaust gas temperature was found to be the most relevant noise factor, which needs to be addressed in a real-world application. An interaction between the temperature and the soot load is present: with increasing soot load, also the temperature effect increases. The impact of humidity is less important, compared to the temperature effect. A detection of ash materials inside the filter seems to be basically possible, hence the effect is superimposed by the soot effect. One possible approach of ash detection and system calibration concerning a change of the ash content could be, to determine the ash load of the filter at the end of a regeneration event, when the filter is completely free of soot. A further important aspect for an application is, that the sensitivity as well as the temperature effect differ strongly between different engine types. This fact makes it necessary, to calibrate the system for each application. The difference is even more pronounced, if the filter is loaded with synthetic soot of a propane-fuelled soot generator, like the miniCAST. Therefore, a transfer of the results, gained with synthetic soot at the miniCAST to real diesel engines is limited.

The second part of this study is about measuring the actual soot concentration in the raw exhaust of a diesel engine upstream of the DPF. For this, a resistive soot sensor, which was built up in our own lab was used. Due to the good electrical conductivity of soot, an electric current can be measured between two electrodes on the sensor surface, if soot particles deposit on top of the sensor. Thereby, the slope of the current correlates with the amount of soot in the exhaust gas. By using a SMPS as a reference device, a sensor calibration curve could be determined. Finally, the so characterized sensor was used to even estimate the soot load of the filter downstream of the sensor, by integrating the measured soot mass concentration. This follows the basic principle of integrating sensors. The other way round, the actual soot concentration of the exhaust could be determined by differentiating the microwave-based measured soot load of the filter.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	i
Summary.....	v
Inhaltsverzeichnis.....	vii
1. Einleitung und Motivation .....	1
2. Grundlagen .....	5
2.1 Rußpartikel aus Verbrennungsmotoren .....	5
2.1.1 Partikelentstehung .....	5
2.1.2 Partikeleigenschaften.....	6
2.1.3 Maßnahmen zur Partikelminderung .....	8
2.2 Dieselpartikelfilter.....	10
2.2.1 Funktionsprinzip, Aufbau und Materialien .....	10
2.2.2 Filterregeneration.....	14
2.2.3 Ascheproblematik .....	17
2.2.4 Beladungserkennung.....	19
2.3 Hochfrequenztechnik zur Beladungserkennung .....	21
2.3.1 Grundlagen der Hochfrequenztechnik.....	21
2.3.2 Stand der mikrowellengestützten Beladungserkennung zu Beginn der Arbeit .....	25
2.4 Resistiver Rußsensor.....	27
3. Fragestellungen .....	33
4. Versuchstechnik.....	35
4.1 Netzwerkanalysator und Stiftkoppler .....	35
4.2 Verwendete Dieselpartikelfilter .....	41
4.3 Versuchsmotoren und Motorprüfstand .....	41
4.4 Partikelmesstechnik .....	45
4.4.1 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS).....	45
4.4.2 Pegasor Partikelsensor .....	47
4.5 Synthesegasanlage und Gasanalytik .....	48
4.5.1 Anlagenaufbau.....	48
4.5.2 Gasanalyse.....	49

4.6 Rußgenerator .....	50
4.7 Pulverdispergierer .....	52
4.8 Resistiver Rußsensor .....	53
5. Beladungserkennung mittels Mikrowellentechnik .....	57
5.1 Abhängigkeiten gemessen am Motorprüfstand .....	57
5.1.1 Einfluss von Abgastemperatur und Abgasmassenfluss an Motor 1 .....	57
5.1.2 Übertragbarkeit auf zweiten Motor .....	65
5.1.3 Einfluss von Feuchte.....	72
5.2 Abhängigkeiten gemessen am Laborprüfstand .....	80
5.2.1 Temperatur- und Feuchteeinfluss auf die Beladungserkennung an realem Dieselruß .....	80
5.2.2 Beladungserkennung mit synthetischem Ruß an der Laboranlage.....	91
5.2.3 Einfluss von Ascheeinlagerungen .....	100
5.3 Verschiedene Filtergrößen, -materialien und Kraftstoffe.....	110
6. Messungen der Rußemissionen mittels resistivem Rußsensor.....	117
6.1 Charakterisierung der Rußerzeugung am Motor .....	118
6.2 Charakterisierung des Sensorverhaltens.....	123
7. Vergleich der Methoden zur Beladungserkennung und Rußmessung .....	129
8. Zusammenfassung und Ausblick .....	141
Anhang: Berechnung der temperaturabhängigen Empfindlichkeit des hochfrequenzbasierten Messsystems bei Motor 1 und Motor 2 .....	145
Abkürzungen und Symbole .....	147
Literaturverzeichnis .....	151
Tabellen- und Abbildungsverzeichnis .....	161
Studentische Arbeiten	
Verzeichnis der eigenen Publikationen	
Danksagung	