

Stefanie Walter

Hochfrequenzgestützte  
Zustandsdiagnose für  
die Überwachung von  
Benzinpartikelfiltern

# **Hochfrequenzgestützte Zustandsdiagnose für die Überwachung von Benzinpartikelfiltern**

**Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften**

**der Universität Bayreuth**

**zur Erlangung der Würde einer**

**Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)**

**genehmigte Dissertation**

**von**

**Stefanie Walter, M. Sc.**

**aus**

**Weiden in der Oberpfalz**

**Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos**

**Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. John Jelonnek**

**Tag der mündlichen Prüfung: 04. Oktober 2023**

**Lehrstuhl für Funktionsmaterialien**

**Universität Bayreuth**

**2023**



Bayreuther Beiträge zur Sensorik und Messtechnik

Band 40

**Stefanie Walter**

**Hochfrequenzgestützte Zustandsdiagnose für die  
Überwachung von Benzinpartikelfiltern**

Shaker Verlag  
Düren 2024

**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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9427-5

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

Das Verfahren der Benzindirekteinspritzung verringert den Kraftstoffverbrauch von Ottomotoren stark. Dies geht allerdings mit einer erhöhten Partikelanzahlemission einher, vor allem im Partikelgrößenbereich um einige zehn Nanometer. Daher sind heutzutage nahezu alle neuen Benzinfahrzeuge mit Partikelfiltern (Gasoline Particulate Filter, GPF) ausgestattet. Jedoch ist die Filtrationseffizienz dieser GPF im unbeladenen Zustand deutlich geringer als im Dieselfahrzeug, wo Dieselpartikelfilter (DPF) schon lange Serienstandard sind. Eine geringe Ruß- oder Aschebeladung ist hingegen vorteilhaft, da der entstandene Rußkuchen die Filtrationseffizienz erhöht. Ein zu starkes Beladen des GPF mit Ruß muss zwar prinzipiell verhindert werden, im Gegensatz zum DPF werden aber ständig so hohe Temperaturen im Abgasnachbehandlungssystem erreicht, dass der Ruß (zumindest teilweise) ohne weitere Maßnahmen abbrennen kann. Um ein Überladen sicher zu vermeiden, sind bei Erreichen einer zu hohen Rußbeladung dennoch aktive Maßnahmen zur GPF-Regeneration notwendig.

Der Beladungszustand ist also eine dringend benötigte Größe für die Motorsteuerung. Er wird bei DPF derzeit mit Hilfe eines Differenzdrucksensors gewonnen. Dieses Verfahren lässt für GPF jedoch keine hohen Genauigkeiten erwarten, da die Beladungsmengen geringer und daher die Differenzdrücke kleiner sind. In Vorgängerarbeiten (Bände 9, 18, 20, 21, 23, 25 und 28 dieser Reihe) wurde bereits nachgewiesen, dass mikrowellenbasierte Verfahren zur Beladungserkennung und Zustandsdiagnose für alle im Automobil relevanten Abgasnachbehandlungssysteme anwendbar sind. Die Frage, ob und wie die in GPF gespeicherte Rußmasse direkt mit Hilfe eines mikrowellenbasierten Verfahrens detektiert werden kann, und ob Ruß von Asche unterschieden werden kann, ist der Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit.

Es werden zwei verschiedene Sensorkonzepte zur Beladungserkennung und Diagnose von GPF untersucht. Dies beinhaltet auch einen Vergleich des bereits bei DPF etablierten Differenzdrucksensors ( $\Delta p$ -Sensor) und des mikrowellenbasierten Verfahrens. Da Benzinruß andere Eigenschaften als Dieseldieselruß aufweist, die sich auf die Sensorsignale auswirken, sind auch Einflussanalysen sowie Beladungs- und Regenerationsversuche am Motorprüfstand nötig. Zusätzlich werden Konzepte zur schnellen und dennoch realistischen synthetischen Beladung mit Ruß und Asche erarbeitet. Parallel werden das Filterverhalten

sowie die Sensorsignale des  $\Delta p$ - und mikrowellenbasierten Verfahrens simuliert, wobei letzteres sich gerade bei Teilregenerationen als viel genauer als der  $\Delta p$ -Sensor erweist. Zuletzt wird nachgewiesen, dass Ruß- und Aschebelastungen voneinander unterschieden werden können.

Bayreuth im November 2023

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

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung der hochfrequenzgestützten Zustandsdiagnose zur Überwachung der Ruß- und Aschebeladung von Benzinpartikelfiltern (GPF). Die Verschärfung der gesetzlichen Abgasgrenzwerte in den letzten Jahren hat dazu geführt, dass inzwischen nahezu alle neu produzierten Benzinfahrzeuge mit Partikelfiltern ausgestattet werden. Für einen optimalen Betrieb des Filters ist die Kenntnis über die im Filter eingelagerte Ruß- und Aschemenge von entscheidender Bedeutung. So resultiert eine zu hohe Beladung aufgrund des erhöhten Abgasgedrucks in einem erhöhten Kraftstoffverbrauch. Andererseits führt aber auch ein zu häufiger aktiver Abbrand der Rußpartikel zu einem Mehrverbrauch. Darüber hinaus ist das Vorliegen einer – wenn auch geringen – Beladung wünschenswert, da dies mit einer Erhöhung der Filtrationseffizienz und damit einer Verringerung der Partikelemissionen einhergeht.

Während zur Überwachung von Dieselpartikelfiltern (DPF) nach dem Stand der Technik Differenzdrucksensoren genutzt werden, weisen diese beim Einsatz in Benzinfahrzeugen aufgrund der veränderten Betriebsbedingungen eine geringere Genauigkeit auf. Eine alternative Methode zur Filterüberwachung bietet die hochfrequenzgestützte Zustandsdiagnose (HF-Sensor). Bei dieser werden über Koppellemente (Antennen) elektromagnetische Wellen im Filtercanning angeregt. Deren Ausbreitungsverhalten kann vom HF-Sensor detektiert werden und korreliert mit den effektiven dielektrischen Eigenschaften des Partikelfilters, die neben den Eigenschaften des Filtersubstrats auch von den im Filter eingelagerten Ruß- und Aschepartikeln beeinflusst werden. Somit kann bei Kenntnis der Partikeleigenschaften auf die Beladung des Filters geschlossen werden.

In Vorarbeiten wurde die hochfrequenzgestützte Zustandsdiagnose bereits erfolgreich zur Überwachung von DPF eingesetzt. Erste Untersuchungen an GPF zeigten jedoch, dass das Signal des HF-Sensors durch den Motorbetrieb beeinflusst wird. Um eine korrekte Überwachung des Partikelfilters auch unter realen Fahrbedingungen dauerhaft zu gewährleisten, wurden in dieser Arbeit die auf die hochfrequenzgestützte Zustandsdiagnose wirkenden Quereinflüsse analysiert und nach Methoden zu deren Kompensation gesucht.

Dazu wurden Partikelfilter, die unter vielfältigen Bedingungen mit Ruß- und Aschepartikeln beladen wurden, unter Beaufschlagung mit synthetischem Abgas hinsichtlich



ihrer hochfrequenten Eigenschaften untersucht. Um dabei nicht nur das Sensorsignal während der Überwachung der Partikelfilter analysieren zu können, sondern auch einen direkten Einblick in die dielektrischen Eigenschaften der erzeugten Rußpartikel zu erhalten, wurden Rußproben mit der Hohlraumstörungsmethode analysiert. Da mit dieser Methode jedoch nur die effektiven Materialeigenschaften von Probenschüttungen bestimmt werden können, wurden in dieser Arbeit Mischungsregeln, die eine Berücksichtigung des Luft- und Filtersubstratanteils erlauben, sowohl simulationsbasiert als auch experimentell erarbeitet.

Die auf dieser Grundlage ermittelten dielektrischen Rußeigenschaften zeigen eine starke Abhängigkeit von der Motorlast und dem genutzten Steuergerätekennefeld während der Rußbildung. Der verwendete Kraftstoff hat dagegen einen geringeren Einfluss. Diese Erkenntnisse decken sich mit den an rußbeladenen Filterbohrkernen durchgeführten Messungen an einem Laborprüfstand, an dem die Partikelfilter unter verschiedenen Abgasbedingungen bei Temperaturen von bis zu 600 °C bei gleichzeitiger Überwachung durch den HF-Sensor untersucht werden konnten. Dabei wurde festgestellt, dass die Empfindlichkeit des HF-Sensors zwar unabhängig von der Rußbelastung des Partikelfilters ist, deren Wert sich aber je nach Rußprobe um mehr als einen Faktor drei unterscheidet. Allerdings konnte auch eine Möglichkeit aufgezeigt werden, diesen Einfluss zu korrigieren. Bei der Betrachtung der Querempfindlichkeit des HF-Sensors gegenüber der Abgasfeuchte zeigte sich, dass Rußproben mit höherem Feuchteeinfluss auch eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Rußbelastung aufweisen. Da dieser Zusammenhang jedoch nur innerhalb eines Kennefeldes besteht, muss für eine industrielle Anwendung des HF-Sensors die exakte Abhängigkeit für unterschiedliche Steuergerätekennefelder und damit für jeden Motortyp neu bestimmt werden.

Um einen tieferen Einblick in die im Filter während der Rußbelastung und Rußregeneration ablaufenden Prozesse zu geben, wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches das Beladungsverhalten eines Partikelfilters beschreiben und die resultierenden Signale eines HF-Sensors sowie eines Differenzdrucksensors berechnen kann. Dieses Simulationsmodell wurde anhand von Motorprüfstandsmessungen validiert. Durch die Möglichkeit, das Regenerationsverhalten des Filters und die daraus resultierende Verteilung des Rußes im Filter gezielt zu manipulieren, konnte der Einfluss der bei Benzinparkelfiltern häufig auftretenden partiellen Regenerationen auf die Zustandsdiagnose bewertet werden. Während die Genauigkeit der Differenzdrucksensorik durch dieses Regenerationsverhalten erheblich beeinträchtigt wird und daher die Rußbelastung in der simulierten Messung um bis zu 35 % unterschätzt wird, ermöglicht die hochfrequenzgestützte Zustandsdiagnose eine deutlich genauere Detektion der Rußbelastung mit einem Fehler von maximal 7,5 %.

Abschließend wurde auch der Einfluss der über die Fahrzeuglebensdauer zunehmenden Aschebelastung des Filters analysiert. Diese beeinflusst die Empfindlichkeit des HF-Sensors gegenüber der Rußbelastung nicht. Allerdings führt die Asche zu einer Verschiebung des Sensorsignals. Durch die bei geringen Rußbelastungen durchführbare Analyse von Resonanzmoden kann jedoch eine vorhandene Aschebelastung von einer Rußbelastung unterschieden werden und somit die Verschiebung des Sensorsignals erkannt und korrigiert werden.



## Summary

The present work deals with the application of the radio-frequency-based state diagnostics for monitoring the soot and ash loading of gasoline particulate filters (GPF). Due to the more stringent legal limits for exhaust gas emissions in recent years, almost all newly produced gasoline vehicles are now equipped with particulate filters. Knowledge of the amount of soot and ash stored within the filter is essential for an optimal operation of the filter. For example, an excessive soot loading results in increased fuel consumption due to the increased exhaust backpressure. On the other hand, too frequent active removal of soot particles also leads to increased fuel consumption. Furthermore, the presence of a low loading is desirable as it is associated with an increase in filtration efficiency and thus with a reduction in particulate emissions.

While differential pressure sensors are the state of the art for monitoring diesel particulate filters (DPFs), they are less accurate when used in gasoline vehicles due to different operating conditions. An alternative method for filter monitoring is provided by the radio-frequency-based state diagnostics (RF sensor). With this sensor, electromagnetic waves are excited in the filter casing via coupling elements (antennas). Their propagation behaviour can be detected by the RF sensor and correlates with the effective dielectric properties of the particulate filter, which are influenced not only by the properties of the filter substrate but also by the soot and ash particles embedded in the filter. Therefore, if the particle properties are known, the loading of the filter can be determined.

In preliminary studies, the radio frequency-based state diagnosis has already been successfully used to monitor DPFs. However, initial investigations on GPF have shown that the signal from the RF sensor is influenced by the engine operation. In order to ensure a correct monitoring of the particulate filter even under real driving conditions, this work analyzed the cross-influences acting on the RF based state diagnosis and investigated methods to compensate for them.

For this purpose, particulate filters loaded with soot and ash particles under various conditions were investigated with regard to their radio-frequency properties when exposed to synthetic exhaust gas. In order to not only analyze the sensor signal during particulate filter monitoring, but also to gain a direct insight into the dielectric properties

of the generated soot particles, soot samples were analyzed using the microwave cavity perturbation method. However, since this method can only determine the effective material properties of bulk samples, mixing rules that allow consideration of the air and filter substrate fractions were elaborated both simulatively and experimentally in this work.

The dielectric soot properties obtained by this method show a strong dependence on the engine load and the applied electronic control unit (ECU) mapping during soot formation. In contrast, the used fuel has a smaller influence. These results are consistent with the measurements carried out on soot-loaded filter cores on a laboratory test rig, where the particulate filters could be examined under different exhaust gas conditions at temperatures of up to 600 °C with simultaneous monitoring by the RF sensor. It was found that the sensitivity of the RF sensor is independent of the soot loading of the particulate filter, but its value varies by more than a factor of three depending on the soot sample. Nevertheless, a possibility to correct this influence was identified. An examination of the cross-sensitivity of the RF sensor to the exhaust gas humidity showed that soot samples with a higher humidity influence also cause a higher sensitivity to soot loading. As this correlation only exists within one ECU mapping, for an industrial application of the RF sensor the exact dependency has to be re-determined for different mappings and thus for each engine type.

In order to gain a deeper insight into the processes that take place within the filter during soot loading and soot regeneration, a simulation model was built that can describe the loading behaviour of a particulate filter and calculate the resulting signals from an RF sensor and from a differential pressure sensor. This simulation model was validated using engine test bench measurements. With the possibility of deliberately manipulating the regeneration behaviour of the filter and the resulting soot distribution in the filter, it was possible to assess the influence of partial regeneration, which frequently occurs in gasoline particulate filters, on the condition diagnosis. While the accuracy of the differential pressure system is severely compromised by this regeneration behaviour, resulting in an underestimation of the soot loading of up to 35 % during the simulated measurement, the radio-frequency-based state diagnosis ensures a significantly more accurate detection of the soot loading with a maximum error of only 7.5 %.

Finally, the influence of the increasing ash load of the filter over the lifetime of a vehicle was also analyzed. This does not affect the sensitivity of the RF sensor to the soot load. However, the ash causes a shift in the sensor signal. By analyzing resonance modes, which can be done at low soot loadings, the presence of ash can be distinguished from soot loading and thus the shift of the sensor signal can be detected and compensated.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort der Herausgeber</b>	<b>i</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Summary</b>	<b>vii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Partikel bei Verbrennungsmotoren	3
2.1.1 Rußpartikel	4
2.1.2 Aschepartikel	7
2.2 Abgaspartikelfilter	7
2.3 Hochfrequenzgestützte Messverfahren	10
2.4 Stand der Technik	14
2.4.1 Überwachung der Ruß- und Aschebelastung von Partikelfiltern	14
2.4.2 Hochfrequenzgestützte Diagnose von Abgasnachbehandlungssystemen	16
2.4.3 Materialcharakterisierung mittels hochfrequenzgestützter Methoden	18
<b>3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit</b>	<b>21</b>
<b>4 Experimentelle Methoden</b>	<b>23</b>
4.1 Untersuchte Benzinpartikelfilter	23
4.1.1 Filtersubstrate	23
4.1.2 Beladung der Partikelfilter mit Motorruß	25
4.1.3 Beladung der Partikelfilter mit synthetischem Ruß	29
4.1.4 Bestimmung der Rußbelastung	30
4.1.5 Aschebeladene Partikelfilter	31
4.2 Hochfrequenzmessaufbauten	33
4.2.1 Aufbau zur Vermessung von Wabenkörperfilter	33
4.2.2 Aufbau zur Vermessung von Probenschüttungen	35
4.2.3 Auswertung des Hochfrequenzsignals	37
4.3 Finite-Elemente-Modellierung	39

<b>5 Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften von Ruß mittels der Hohlraumstörungsmethode</b>	<b>41</b>
5.1 Vermessung rußbeladener Filterproben im Hochfrequenzresonator	41
5.2 Mischungsregeln zur Beschreibung effektiver dielektrischer Eigenschaften	44
5.2.1 Mischungsregeln bei rußbeladenen Filterproben	44
5.2.2 Mischungen von rußbeladenem Filtersubstrat und Luft	47
5.2.3 Mischungen von Filtersubstrat und Rußpartikeln	54
<b>6 Hochfrequenzgestützte Messungen an rußbeladenen Filterproben</b>	<b>57</b>
6.1 Vermessung von Probenschüttungen	57
6.1.1 Dielektrische Eigenschaften des Filtersubstrat	57
6.1.2 Dielektrische Eigenschaften des Rußes	60
6.1.3 Einfluss von Temperatur	62
6.2 Vermessung von Filterbohrkernen	64
6.2.1 Hochfrequenzsignal bei rußbeladenen Filtern	66
6.2.2 Einfluss der Temperatur	72
6.2.3 Einfluss der Abgasfeuchte	75
6.3 Methoden zur Korrektur des von der Rußart abhängigen Hochfrequenzsignals	79
<b>7 Modellierung eines Benzinpartikelfilters</b>	<b>83</b>
7.1 Theoretische Modellierung	83
7.1.1 Strömungsverhalten	85
7.1.2 Temperaturverteilung	88
7.1.3 Rußeinlagerung	89
7.1.4 Rußoxidation	93
7.1.5 Hochfrequenzsignal	95
7.2 Validierung des Simulationsmodells am Motorprüfstand	96
7.2.1 Vorhersage der Rußbelastung	98
7.2.2 Vorhersage des Differenzdrucksignals	100
7.2.3 Vorhersage des Hochfrequenzsignals	101
7.3 Simulationsbasierte Beurteilung von Quereinflüssen auf die Beladungsüberwachung	103
<b>8 Einfluss von Asche auf die hochfrequenzgestützte Zustanddiagnose</b>	<b>107</b>
8.1 Hochfrequente Eigenschaften von Asche	107
8.2 Hochfrequenzsignal bei aschebeladenen Filtern	110
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>115</b>
<b>Anhang</b>	<b>121</b>
A Modenbilder der betrachteten Resonanzen	121
B Oxidationsverhalten der am Motorprüfstand erzeugten Rußproben	122

---

C	Hochfrequenzsignale der Proben bei Grenz- und Referenzkraftstoff	128
D	Modellparameter	131
	<b>Abkürzungen und Symbole</b>	<b>135</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>141</b>
	<b>Verzeichnis eigener Publikationen</b>	<b>159</b>
	<b>Urheberrechtshinweise</b>	<b>163</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>165</b>