

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)

Fachbereich Maschinenbau / Verfahrenstechnik

Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik

## **Untersuchung zur Bewertung von Sensoren für die Überwachung der Partikelemission von Dieselmotoren**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 22493 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Gennadi Zikoridse

Dipl.-Ing. (FH) Robin Lindner

Prof. Dr.-Ing. Günter Hauser

Dipl.-Ing.(FH) Andreas Kuhnert

Prof. Dr.-Ing. Victor Gheorghiu

Dipl.-Ing. Jurijs Tjunikovs

Dipl.-Ing. Steffen Neubert

November 2006



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>22493</b>	Referat	<b>24/0</b>	Fördersumme	<b>322.500,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Untersuchungen zur Bewertung von Sensoren für die Überwachung der Partikelemission von Dieselmotoren</b>				
<b>Stichworte</b>	Energie, Motor, Emission				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>18 Monate</b>	<b>01.11.2004</b>	<b>30.04.2006</b>	<b>2</b>		
Zwischenberichte	31.09.2005				
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH) Friedrich-List-Platz 1 01069 Dresden			Tel 0351/462-2781	
				Fax 0351/462-3476	
				Projektleitung Herr Prof. Zikoridse	
<b>Bearbeiter</b>	Herr R. Lindner				
<b>Kooperationspartner</b>	Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel Institut für Materialfluss, Logistik und Expertensysteme GmbH (CLE), Salzgitter Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW-Hamburg) NOVA-MMB Messtechnik GmbH, Schwarzenberg				

**Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Neben dem Nutzfahrzeugbereich findet der Dieselmotor verstärkt in Personenkraftwagen und Kleintransportern als wirtschaftlich überlegenes Antriebsaggregat Anwendung. Da aber ein moderner Dieselmotor (Euro IV) im Vergleich zum Ottomotor immer noch bis zu 15-mal mehr krebserregende Emissionen ausstößt, wird an der Reduzierung dieser Emissionen intensiv gearbeitet. Eine effektive Maßnahme zur Reduzierung der Rußpartikel stellt der Einsatz von Partikelfiltersystemen dar.

Um die Funktionsfähigkeit eines solchen Partikelfiltersystems kontinuierlich zu überwachen, ist es notwendig, eine Vorrichtung (PM-Sensor) hinter den Partikelfilter zu schalten, die in der Lage ist die Funktionsstörung am Filter und die damit verbundene Erhöhung der Partikelemission zu erkennen und anzuzeigen (On-Board-Diagnosesystem OBD, On-Board-Messsystem OBM).

Das Gesamtziel des Verbundprojektes ist die Überprüfung und Bewertung von zwei Sensor-Prinzipien auf ihre Eignung zur Überwachung der Partikel-Emissionen auf der Basis eines Partikelmassensensors (PMS).

**Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Zwei ausgewählte Sensorprinzipien (Rußladungssensor, Durchschlagsspannungssensor) wurden in zwei technischen Ausführungen dargestellt. Es erfolgte der Aufbau mehrerer Funktionsmuster durch die Sensorentwickler. Diese Funktionsmuster wurden entsprechend eines vereinbarten Untersuchungsprogramms unter einheitlichen und vergleichbaren Bedingungen auf dem Motorenprüfstand mit Vergleichsmesstechnik getestet und eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Für die Sensoren erfolgte im Anschluss ein Redesign mit Prüfung beim Sensorentwickler sowie ein erweiterter Funktionstest durchgeführt.

Bisher gab es von den beiden möglichen Verfahren zur On-Board-Partikelmessung nur Labormuster, die für hohe Partikelkonzentrationen getestet wurden. Die ausgewählten Verfahren sollten für die Anwendung bei niedrigeren Partikelkonzentrationen unter Berücksichtigung der Abgaseigenschaften (Temperatur, Geschwindigkeit, Feuchtigkeit, Druck, Abgaszusammensetzung) für den Fahrzeugeinsatz untersucht werden. Die Signalempfindlichkeit und Reproduzierbarkeit wurden mit Hilfe von ESC -Zyklen mit verschiedenen Konfigurationen der Abgasanlage durchgeführt.

Die erarbeiteten Ergebnisse sollen vorrangig zur Darstellung der Möglichkeiten einer Überwachung der zukünftig eingesetzten Partikelfiltersysteme durch die Messung der Rußkonzentration dienen. Diese Sensoren ermöglichen eine Eindämmung der umweltschädlichen Auswirkung bei Ausfall des Systems.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Im Ergebnis der durchgeführten Untersuchung wurde für beide Sensoren eine beachtliche technische Weiterentwicklung der Messverfahren erzielt. Es erfolgte die Applikation im Abgasstrang eines Dieselmotors und die Einbindung der Messsignale in die vorhandene Prüfstandsperipherie.

Es wurden mehrere Messkampagnen mit unterschiedlichen Aufgabenstellungen durchgeführt, wie z.B.: die Überprüfung der Korrelation des Messsignals zu etablierten Messverfahren (gravimetrische Partikelmessung, Opazität und Bosch-Schwärzung), die Beurteilung des Ansprechverhaltens bei Veränderung der Rußkonzentration und die Überprüfung von Quereinflussfaktoren (Temperatur, Abgasvolumenstrom, gasförmige Emissionen).

Für den Rußladungssensor konnte eine hohe Korrelation zu den etablierten Messverfahren im stationären Versuch beobachtet werden. Bei der Korrelation zur Gravimetrie wurde ein Bestimmtheitsmaß von  $r^2 = 0,97$  ermittelt. Für den Durchschlagsspannungssensor konnte eine Korrelation mit  $r^2 = 0,62$  ermittelt werden.

Ebenfalls unterscheiden sich die Sensoren erheblich in ihrer Empfindlichkeit auf die Variation der Rußkonzentration. Hierbei konnte festgestellt werden, dass bei schlagartiger Veränderung der Rußkonzentration das Signal des Rußladungssensors deutlich dem gemessenen Verlauf der Opazität folgt. Beim Durchschlagsspannungssensor wurde die Änderung nur als Signal-Peak festgestellt, mit hoher Korrelation zur Abgastemperatur.

Prinzipbedingt sind beide Signale von den Parametern Abgasmassenstrom und Abgastemperatur abhängig. Die Versuche zeigten einen deutlichen Zusammenhang der Signale gegenüber der Abgasgeschwindigkeit für den Rußladungssensor und einen starken Einfluss der Temperatur auf das Sensorsignal des Durchschlagsspannungssensors. Es wurde versucht, diese Einflüsse als Kompensations- bzw. Kalibrierkennlinien in stationären Betriebspunkten zu berücksichtigen.

Untersuchungen im ESC-Test haben die prinzipielle Eignung des Rußladungsverfahrens für die Überwachung der Partikelfilterfunktion gezeigt, wenn dies auch im Moment nur qualitativ möglich ist. Mit dem Durchschlagsspannungsprinzip konnten beim derzeitigen Entwicklungsstand keine oder nur bedingte Aussagen über die Rußkonzentration getroffen werden, da die Signalveränderungen stellenweise innerhalb der Wiederholgenauigkeit lagen.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Hauser G., Kuhnert A.: „Rußsensor für On-Board Diagnose und als Präzisionsmessgerät“; 2. FAD-Konferenz 10. - 11.11.2004; Dresden

Hauser G.: Vortrag vor dem Abgaszentrum der Automobilindustrie (ADA) am 10.03.05, Wolfenbüttel

Hauser G.: Vortrag bei der International Conference on Condition Monitoring am 20.07.05, Cambridge

Hauser G.: Postersession an der ETH Zürich von 15. bis 17.08.05

Hauser G., Kuhnert A.: Ausstellung und Präsentation des Rußladungssensors bei dem DPF-Retrofit Workshop am 21. - 22.06.2006 Dresden

Hauser G., Kuhnert A.: Vortrag und Veröffentlichung „Smoke Particulate Sensors for OBD and high Precision Measuring“ bei der SAE 2006 Commercial Vehicle Engineering Congress & Exhibition, October 31-November 2, 2006, Rosemont, IL, USA.

Gheorghiu V.: „Ruß- und Partikelsensor für Onboard-Überwachung von Partikelfiltern und Kontrolle der Emissionen von Dieselmotoren“; VDI AUTOREG 07. - 08.03.2006, Düsseldorf

Gheorghiu, V., Uberschär, D., Zikoridse, G.: „Soot Sensor for Diesel Emission onboard control Systems“; Fisita 22. - 27.10.2006 Yokohama (Japan)

## **Fazit**

Innerhalb des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Verbundprojektes „PM-Sensor“ wurden zwei Sensorprinzipien auf ihre Funktion als Partikelsensor überprüft.

Ein Verfahren nach dem Ladungs- und dem Durchschlagsspannungsprinzip wurden am Motorenprüfstand untersucht und bewertet. Dabei musste beachtet werden, dass sich die Sensoren auf einem unterschiedlichen, technischem Entwicklungsstand befinden.

Etablierte Beurteilungsverfahren wie die gravimetrische Partikelmessung, die Messung der Rauchtrübung und der Schwärzung wurden zum Vergleich der Sensorsignale herangezogen.

Beide Sensoren sind noch nicht in der Lage das gemessene Signal im dynamischen Betrieb als Rußkonzentration auszugeben, da sich in diesen Motorbetriebszuständen Abgastemperatur, Massenstrom u.a. Parameter gleichzeitig ändern.

Bis zum Einsatz als Partikelsensor im praktischen Fahrbetrieb bedarf es bei beiden Sensoren einer Weiterentwicklung des Verfahrens. Allerdings erscheint das Prinzip des Rußladungssensors beim derzeitigen Entwicklungsstand aussichtsreicher.

Da das Sensorsignal am Vollmotor durch eine Vielzahl von Abgasparametern beeinflusst wird, sollte eine Weiterentwicklung des Durchschlagsspannungssensors vorerst unter Laborbedingungen erfolgen.

# I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis .....	3
II.	Verzeichnis von Bildern und Tafeln .....	5
III.	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen .....	7
IV.	Verzeichnis der Formelzeichen.....	9
	Zusammenfassung .....	10
	Einleitung .....	12
	Hauptteil.....	16
0	Lastenheft .....	16
1	Projektdurchführung.....	17
2	Rußladungssensor – Stand der Technik (Ausgangssituation, Aufbau, Prinzip).....	19
2.1	Funktionsprinzip .....	19
2.2	Zusammenfassung des Ausgangszustandes zu Beginn des Vorhabens.....	23
2.3	Durchgeführte Arbeiten im Bewilligungszeitraum – Verbesserung des Messverfahrens .....	23
2.4	Neukonstruktion des Sensors für die On-Board Anwendungen in Dieselfahrzeugen .....	24
2.5	Herstellung von Heizelementen kleinerer Leistung.....	24
2.6	Bypassbetrieb des Sensors für niedrige Rußkonzentrationen.....	25
2.7	Vollstrom- Betrieb des Sensors.....	28
2.7.1	Vollstrombetrieb am Motorenprüfstand.....	29
2.7.2	Messungen auf dem Rollenprüfstand .....	31
3	Durchschlagsspannungssensor – Stand der Technik (Ausgangssituation, Aufbau, Prinzip).....	34
3.1	Funktionsprinzip .....	34
3.2	Entwicklungsphase A: Sensor mit Zündkerzenkern und fremdgefertigtem Keramiktopf.....	37
3.2.1	Version 1: Sensor mit fremdgefertigten Heizelementen .....	37
3.2.2	Version 2: Sensor mit selbstgefertigtem Heizelement aus Platindraht.....	38
3.3	Entwicklungsphase B: Sensor ohne Zündkerzenkern aus selbstgefertigten Keramiktteilen .....	40
3.3.1	Versionen 3 und 4: Sensor mit getrenntem Anschluss für die Hochspannung und spitzförmiger bzw. flacher Masselektrode .....	40
3.3.2	Version 5: Sensor mit integriertem Anschluss für die Hochspannung und spitzförmiger bzw. flacher Masselektrode.....	41
3.4	Darstellung des Sensorverhaltens beim Einsatz im Abgasstrang .....	43
3.4.1	Sensor in der Version 2 (mit flacher Masselektrode).....	43
3.4.2	Sensor in der Version 5 (mit spitzförmiger Masselektrode).....	45
4	Untersuchung zur Darstellung der Anwendbarkeit der Sensorprinzipien am Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik .....	47
4.1	Versuchsmotor, Prüfstand und Messtechnik .....	47
4.1.1	Verwendeter Motor .....	47
4.1.2	Prüfstandstechnik .....	47
4.1.3	Bypass-System zur Realisierung unterschiedlicher Rußkonzentrationen.....	50
4.1.4	Darstellung des gesamten Versuchsaufbaus .....	51
4.2	Ergebnisse der Prüfstandsuntersuchungen an der HTW - Dresden .....	52

4.2.1	Inbetriebnahme .....	52
4.2.2	Temperaturabhängigkeit der Sensorsignale .....	54
4.3	Signalbewertung mittels Korrelationsanalyse .....	56
4.3.1	Ergebnisse des Rußladungssensors .....	56
4.3.2	Ergebnisse des Durchschlagsspannungssensors .....	58
4.4	Untersuchung der Sensoren im ESC-Test bei verschiedenen Konfigurationen der Abgasanlage.....	61
4.4.1	Die ESC –Testprozedur (European Stationary Cycle) .....	61
4.4.2	Einfluss gasförmiger Schadstoffe auf das Sensorsignal .....	61
4.4.3	Weitere Untersuchungen im ESC-Test bei Variation der Abgasanlage und Betrachtungen zur Wiederholgenauigkeit .....	64
5	Bewertung der Sensorprinzipien.....	68
6	Zusammenfassung des Entwicklungsstandes.....	70
Fazit	.....	72
Anhang	.....	76
Einsatzmöglichkeiten für Partikelsensoren.....		76
On-Board-Diagnose-Systeme für Straßenfahrzeuge mit Dieselmotor.....		76
Überwachung von Partikelfiltern in Baumaschinen und Dieselaggregaten .....		77
Messgerät zur Ergänzung der AU .....		77

## II. Verzeichnis von Bildern und Tafeln

Abb.: 0-1 Mögliche Strategien für EURO IV und EURO V für schwere Nutzfahrzeuge /13/.....	12
Abb.: 0-2 Prinzipschema eines Filtermediums /13/.....	13
Abb.: 0-3 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips .....	14
Abb.: 2-1 Funktionsprinzip des Rußladungssensors.....	19
Abb.: 2-2 Erste konstruktive Ausführung des Rußladungssensors.....	20
Abb.: 2-3 Kalibrierkennlinie Rauchtrübung und Gravimetrische Partikelemission .....	21
Abb.: 2-4 Genauigkeit der Kalibrierung .....	21
Abb.: 2-5 Streuung des Rußladungssensor-Signals .....	22
Abb.: 2-6 Dynamisches Verhalten des ersten funktionsfähigen Rußladungssensors .....	22
Abb.: 2-7 Verhalten des Messsignals des Rußladungssensors.....	23
Abb.: 2-8 Neukonstruktion des Ladungssensor mit Rohrflanschen .....	24
Abb.: 2-9 Keramik Heizkörper .....	24
Abb.: 2-10 gewendelte Heizung .....	25
Abb.: 2-11 Bypass- Ladungssensor .....	25
Abb.: 2-12 Kalibrierung des Bypass- Sensors.....	26
Abb.: 2-13 NEFZ- Fahrzyklus, VW 1.9 I TDI, Messung am Verdünnungstunnel .....	27
Abb.: 2-14 Empfindlichkeit und Zeitverhalten bei niedrigen Volumenströmen.....	27
Abb.: 2-15 Elektronikeinheit für den 12-V-Betrieb .....	28
Abb.: 2-16 Einfacher Abgas-Bypass.....	29
Abb.: 2-17 Dynamisches Verhalten des Ladungssensors.....	30
Abb.: 2-18 Volllastsprünge und Temperatureinfluss .....	30
Abb.: 2-19 Position des Vollstromsensors in der Abgasanlage des VW Polo.....	31
Abb.: 2-20 Einbaulage des Sensors am Fahrzeug.....	32
Abb.: 2-21 Anfangsbereich des ECE- Fahrzyklus .....	32
Abb.: 2-22 Auslauf des ECE- Fahrzyklus .....	33
Abb.: 3-1 Paschen-Kurven für den statischen Durchschlag in Gasen, .....	34
Abb.: 3-2 Messergebnisse mit dem unbeheizten SDSS .....	36
Abb.: 3-3 Beheizter SDSS in einer vorläufigen Version .....	36
Abb.: 3-4 SDSS in Version 1 .....	37
Abb.: 3-5 SDSS in Version 2 .....	39
Abb.: 3-6 SDSS in Version 3 .....	40
Abb.: 3-7 SDSS in Version 5 .....	41
Abb.: 3-8 Gebläseprüfstand zur Untersuchung von Quereinflussparameter: .....	42
Abb.: 3-9 Temperatur-Kennlinien des SDSS in der Version 5 .....	42
Abb.: 3-10 SDSS in der Version 2. Temperatur-Kennlinien in Luft (Gebläseprüfstand) .....	43
Abb.: 3-11 SDSS in der Version 2. Last- und Drehzahl-Sprünge (ohne DPF).....	44
Abb.: 3-12 SDSS in der Version 2. Variation der Öffnung der Bypassklappe (mit DPF) .....	44
Abb.: 3-13 ESC Zyklus mit funktionsfähigem DPF .....	45
Abb.: 3-14 ESC Zyklus mit beschädigtem DPF.....	46
Abb.: 3-15 Integralwert in Bezug auf Opazität (links) und FSN (rechts) .....	46

Abb.: 4-1 Funktionsprinzip der gravimetrischen Partikelmessung mit Teilstromverdünnung .....	48
Abb.: 4-2 Funktionsprinzip der Trübungsmessung (Quelle: AVL).....	49
Abb.: 4-3 Funktionsprinzip der Schwärzungsmessung .....	49
Abb.: 4-4 Bypass-System .....	50
Abb.: 4-5 Prinzipschema eines Partikelfilters /6/ .....	50
Abb.: 4-6 Schematische Darstellung des Prüfstandsaufbaues .....	51
Abb.: 4-7 Foto des Versuchsaufbaus an Motorenprüfstand der HTW Dresden.....	51
Abb.: 4-8 Einbausituation der Partikelsensoren .....	52
Abb.: 4-9 4-Punkte-Test mit dem Rußladungssensor .....	53
Abb.: 4-10 4-Punkte-Test mit dem Durchschlagsspannungssensor .....	54
Abb.: 4-11 Temperaturkennlinie des RLS bei fortschreitendem Entwicklungsstand .....	55
Abb.: 4-12 Temperaturkennlinie des SDSS bei fortschreitendem Entwicklungsstand.....	55
Abb.: 4-13 Betriebspunkt 11 der Korrelationsanalyse mit dem RLS .....	57
Abb.: 4-14 Regressionsgeraden: Rußkonzentration (gravimetrisch) und RLS-Signal.....	57
Abb.: 4-15 Betriebspunkt 2 der Korrelationsanalyse mit dem SDSS .....	59
Abb.: 4-16 Regressionsgeraden: Rußkonzentration (gravimetrisch) und SDSS-Signal .....	59
Abb.: 4-17 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Korrelationsanalyse .....	60
Abb.: 4-18 ESC -Test.....	61
Abb.: 4-19 Versuchsaufbau mit Partikelfilter und Oxidationskatalysator.....	62
Abb.: 4-20 Einfluss gasförmiger Schadstoffe auf das RLS-Signal .....	63
Abb.: 4-21 Einfluss gasförmiger Schadstoffe auf das SDSS-Signal .....	63
Abb.: 4-22 Zerstörter Partikelfilter vor und nach dem Prüfstandsbetrieb .....	64
Abb.: 4-23 Opazität im ESC -Test bei drei unterschiedlichen Konfigurationen.....	65
Abb.: 4-24 Sensorsignal des RLS im ESC -Test bei drei unterschiedlichen Konfigurationen .....	66
Abb.: 4-25 Sensorsignal des SDSS im ESC -Test bei drei unterschiedlichen Konfigurationen.....	67
Abb.: 4-26 Abweichung des Sensorsignals bei Wiederholung der Testprozedur .....	67
Tab.: 4-1 Stationäre Betriebspunktes bei der Inbetriebnahme (4-Punkte-Test).....	52
Tab.: 4-2 Auswahl der untersuchten Betriebspunkt .....	56
Tab.: 4-3 Ergebnisse Korrelationsanalyse des Rußladungssensors [ $r^2$ ].....	58
Tab.: 4-4 Ergebnisse Korrelationsanalyse des Durchschlagsspannungssensor .....	60
Tab.: 4-5 Abweichungen der Signalmittelwerte bei Versuchen mit und ohne Katalysator.....	62
Tab.: 4-6 Konfiguration der Abgasanlage.....	64
Tab.: 4-7 Signalmittelwerte bei verschiedenen Rußkonzentrationen im ESC -Test .....	66
Tab.: 5-1 Bewertungsmatrix der Sensoren.....	68



### III. Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
ADA	Abgaszentrum der deutschen Automobilindustrie
CATS NT	Computer Aided Test System unter Windows NT
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
C <sub>R</sub>	Rußkonzentration
C <sub>RM</sub>	Rußkonzentration des Modells
DeNO <sub>x</sub>	Entstickungssystem
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
ESC	European Stationary Cycle
EURO III, IV, V	Emissionsgrenzwerte (Stufen) für Kraftfahrzeuge in Europa
HC	Kohlenwasserstoffe
HTW	Hochschule für Technik und Wirtschaft (FH)
H <sub>2</sub> O	Wasser
Kat	Katalysator / Oxidationskatalysator
ISF	Unlösliche Partikelfraktion
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
OBD	On-Board-Diagnose
OBM	On-Board-Messsystem
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
PM	Partikelmasse (particulate matter)

PS, PMS	Partikelsensor, Partikelmassensensor
RLS	Rußladungssensor
SIOF	Anorganisch lösliche Partikelfraktion
SOF	Organisch lösliche Partikelfraktion
SZ	Schwärzungszahl nach Bosch
SDSS	Spark Discharge Soot Sensor (Durchschlagsspannungssensor)
THC	Gesamtkohlenwasserstoffe
$U_H$	Hochspannung
$U_M$	Spannungsabfall
VL	Volllast
$V_M$	Messverstärker

## IV. Verzeichnis der Formelzeichen

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
$\alpha, \beta, k$	Modellparameter	-
n	Motordrehzahl	1/min
p	Druck	mbar
$p_{\text{Abg}}$	Abgasgegendruck	mbar
$\Delta p, p_{\text{diff}}$	Druckdifferenz	mbar
PM	Partikelemission	mg/m <sup>3</sup>
T	Temperatur	°C
$s_{\phi}$	Standardabweichung	-
$R_M$	Elektrischer Widerstand	Ohm
$U_H$	Hochspannung	V
$I_s$	Ladestrom	mA, A

# Zusammenfassung

Im Rahmen einer Prüfstandserprobung wurden zwei technische Sensorausführungen mit unterschiedlichen Messprinzipien, auf ihre Eignung zur Messung der Partikelemission von Verbrennungsmotoren, untersucht. Dabei waren folgende Aspekte Gegenstand der Untersuchungen:

- Entwicklung und Herstellung von Sensoren zur Messung der Partikelemission im Vollstrom sowie die Möglichkeit der Applikation im Abgasstrang eines Verbrennungsmotors
- Inbetriebnahme der Sensoren am Motorenprüfstand zur generellen Überprüfung der Funktionsfähigkeit
- Untersuchung der Sensorsignale hinsichtlich ihrer Korrelation zu etablierten Messverfahren
- Bewertung der beiden Systeme und Abschätzung der Praxistauglichkeit als Überwachungsorgan der Partikelemission beim Einsatz eines Partikelfilters

Bezüglich der oben genannten Aspekte wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Die beiden Messprinzipien wurden in zwei getrennten technischen Ausführungen, dem *Rußladungssensor* (FH Braunschweig/Wolfenbüttel) und dem *Durchschlagsspannungssensor* (HAW-Hamburg) aufgebaut. Die Applikation der Sensoren im Abgasstrang unter Prüfstandsbedingungen erfolgten unter den Gesichtspunkten eines späteren Fahrzeugeinsatzes, z.B.: Betrieb bei 12 V Bordnetzspannung, kompakte Bauweise des Sensors und Messung im Vollstrom. Die für die Auswertung des Signals notwendigen Funktionseinheiten wurden bei dieser Betrachtung nicht herangezogen

Da die erprobten Messverfahren die Rußkonzentration im Abgas eines Dieselmotors ermitteln sollen, war eine der wichtigsten Aufgaben die Signalbewertung mittels einer Korrelationsanalyse. Dabei wurden die Messsignale der Sensoren mit verschiedenen etablierten Messverfahren zur Bestimmung der Ruß- und Partikelemission verglichen. Als Referenzverfahren standen die Messung der Schwärzungszahl nach Bosch, die Messung des Absorptionskoeffizienten sowie die gravimetrische Partikelmessung zur Verfügung.

Da diese Bewertung hauptsächlich unter stationären Prüfstandsbedingungen durchgeführt wurde, sind die dargestellten Ergebnisse vorerst auch nur für diesen Zustand gültig. Das Verhalten bei dynamischen Motorbetriebszuständen ist durch eine Vielzahl von sich ständig ändernden Einflussparametern bekleidet und konnte im Rahmen dieses Vorhabens nicht ausreichend untersucht werden.

Für den Rußladungssensor konnte eine hohe Korrelation zu den etablierten Messverfahren im stationären Versuch beobachtet werden. Im Vergleich zur gravimetrischen Partikelmessung wurde ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0,984$  mit einem Bestimmtheitsmaß von  $r^2 = 0,97$  ermittelt. Für den Durchschlagsspannungssensor konnte nur eine Korrelation von  $r = 0,781$  mit  $r^2 = 0,54$  ermittelt werden.

Ebenfalls unterscheiden sich die Sensoren erheblich in ihrer Empfindlichkeit auf die Variation der Rußkonzentration. Hierbei konnte festgestellt werden, dass bei schlagartiger Veränderung der Rußkonzentration das Signal des Rußladungssensors deutlich dem gemessenen Verlauf der Opazität folgt.

Beim Durchschlagsspannungssensor wurde die Änderung nur als Signal-Peak festgestellt, mit hoher Korrelation zur Abgastemperatur.

Prinzipbedingt sind beide Signale von den Parametern Abgasmassenstrom und Abgastemperatur abhängig. Die Versuche zeigten einen deutlichen Zusammenhang der Signale gegenüber der Abgasgeschwindigkeit für den Rußladungssensor und einen starken Einfluss der Temperatur auf das Sensorsignal des Durchschlagsspannungssensors.

Die Einflussfaktoren auf den Rußladungssensor lassen sich aber stark eingrenzen und können in stationären Betriebspunkten für die Korrektur des Sensorsignals herangezogen werden, so dass eine Kalibrierung möglich ist. Haupteinflussfaktor ist hierbei die Volumenstromänderung und die damit verbundene Veränderung der Partikelgeschwindigkeit im Abgas. Die qualitative Beurteilung der Veränderung der Rußkonzentration (beispielsweise an einem zerstörten Filter) ist mit diesem Sensor generell möglich.

Bei dem Durchschlagsspannungssensor wird das Signal von verschiedenen Faktoren unterschiedlich stark beeinflusst. Neben den Quereinflussparametern aus dem Abgas, kommen hier auch noch Einflüsse durch Veränderung der Materialeigenschaften zum tragen. Das Verfahren erscheint weniger sensitiv zu sein als das Rußladungsverfahren, wodurch sich beim derzeitigen Entwicklungsstand qualitative Veränderungen in der Rußkonzentration nicht eindeutig feststellen lassen.

Die Ergebnisse zeigen, dass es bis zum Einsatz im praktischen Fahrbetrieb einer Weiterentwicklung der Verfahren bei beiden Sensoren bedarf. Das Verfahren nach dem der Rußladungssensor arbeitet, erscheint aber beim derzeitigen Entwicklungsstand aussichtsreich. Allerdings müssen vor allem Fragen zum physikalischen Hintergrund des Prinzips umfassend geklärt werden.

Das hier durchgeführte Verbundprojekt wurde unter dem Aktenzeichen AZ.: 22493 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert.

# Einleitung

Aus der Sicht des Wirkungsgrades von Verbrennungskraftmaschinen ist der Dieselmotor bis heute die effektivste Antriebsquelle für Kraftfahrzeuge. Hinsichtlich der Leistungssteigerung und der Absenkung der Schadstoffemission konnten in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte erzielt werden.

Der Dieselmotor, der vor allem im Nutzfahrzeugsbereich eingesetzt wird, hat sich im europäischen Wirtschaftsraum schon seit langem auch im PKW Sektor und im Bereich der Kleintransporter auf Grund seiner Wirtschaftlichkeit etabliert. Betrachtet man den gesamten Fahrzeugbestand Deutschlands, so lag dieser Ende 2004 bei ca. 60 Mio. Fahrzeugen, wobei der Anteil an Neuzulassungen von Dieselfahrzeugen bei 40 % lag, mit steigender Tendenz. Der Rußausstoß der Diesel-Pkw beträgt ca. 9000 Tonnen jährlich. Im Sachverständigenrat der Bundesregierung wurden die Rußpartikel als „das derzeit wichtigste Problem der Luftverschmutzung“ eingestuft. /1//2/

In einem von Prof. Wichmann, GSF Neuherberg, angefertigten Gutachten zur gesundheitlichen Auswirkung durch Partikelbelastung in Deutschland wird von 10.000 bis 19.000 Todesfällen jährlich gesprochen, die den Abgasen aus Dieselfahrzeugen zuzuordnen sind. Er geht davon aus, dass durch den Einsatz von Partikelfiltern diese Todesfälle zum überwiegenden Teil verhindert werden können. /4/

Zwar sind diese Aussagen sehr umstritten, doch wurden ähnliche Erkenntnisse in entsprechenden Studien auch in anderen Ländern (Bsp. Schweiz, USA) dargestellt. Unumstritten ist weltweit das gesundheitsgefährdende Potenzial von Dieselpartikeln insbesondere der lungengängigen Feinstpartikel.

Als Reaktion auf dieses umwelt- und gesundheitsschädigende Gefährdungspotenzial werden bestehende Abgasgrenzwerte ständig weiter verschärft. Um diese zukünftigen Grenzwerte zu erreichen, ist es notwendig, innermotorische Maßnahmen mit einer effizienten Abgasnachbehandlung gezielt zu kombinieren. Abbildung 1-1 zeigt die Entwicklung der Abgasgrenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge und mögliche Strategien zur Erreichung dieser Ziele. /3/, /6/-/8/

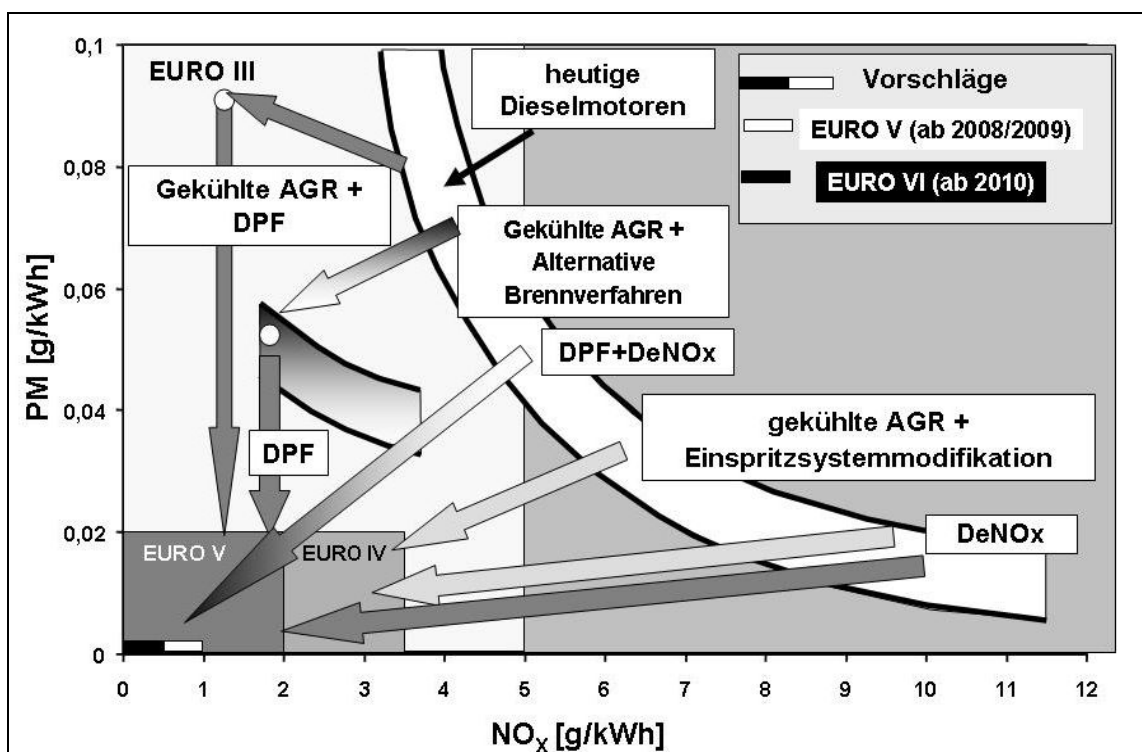


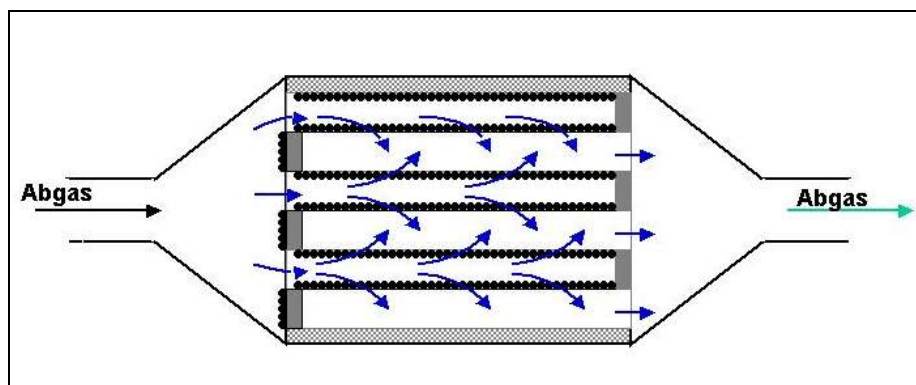
Abb.: 0-1 Mögliche Strategien für EURO IV und EURO V für schwere Nutzfahrzeuge /13/

Wie Abbildung 1-1 zeigt, gibt es verschiedene technische Möglichkeiten um die zukünftigen Emissionsgrenzwerte zu erfüllen. Das im Abgas enthaltene Kohlenmonoxid und die unverbrannten Kohlenwasserstoffe werden mittels Oxidationskatalysator zu Kohlendioxid und Wasser oxidiert. Die Oxidationskatalysatoren konvertieren auch einen Teil der an Rußpartikeln angelagerten Kohlenwasserstoffe und tragen somit zu einer geringfügigen Verminderung der Partikelemissionen bei. Die derzeit einzig zuverlässige Methode zur Beseitigung der Partikel besteht in der Filterung mittels geeigneter Filtermedien und in der anschließenden Regeneration. Für die Entfernung der Stickoxide existieren sogenannte DeNO<sub>x</sub>-Katalysatoren. Zu nennen sind hier insbesondere die SCR-Technologie und die NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysatoren. /8/-/12/

Partikelfilter stellen zur Zeit die wirkungsvollste nachmotorische Technologie zur Minderung der Partikelemission von Dieselmotoren dar. Die Partikel bestehen aus einem Kern elementaren Kohlenstoffs (C). An diesem lagern sich chemische Abgaskomponenten wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe (PAH), Sulfate, Wasser und Metalloxide aus Motorverschleiß und Öladditiven an. Nahezu unabhängig von ihrer Größenverteilung werden bis zu 99% der Rußpartikel und mehr als 90% der Gesamtpartikel durch moderne Partikelfilter zurückgehalten und durch Einstellung der erforderlichen thermischen Bedingungen oxidiert. Da die thermische Regeneration im normalen Fahrbetrieb nicht sichergestellt ist, müssen zusätzliche Maßnahmen zur Einleitung der Regeneration getroffen werden. Dies kann einerseits durch die Erhöhung der Abgastemperatur (innermotorische Maßnahmen oder Heizung des Abgases) erfolgen. Andererseits kann durch Zugabe von Kraftstoffadditiven oder durch katalytische Beschichtung des Partikelfilters die Regenerationstemperatur gesenkt werden. Es wird unterschieden zwischen kontinuierlich und periodisch arbeitenden Regenerationsverfahren. /9//10/

Ein Partikelfiltersystem muss neben guten filterspezifischen Eigenschaften, wie z. B. hohem Abscheidegrad bei geringem Abgasgedruck, minimalen Wartungskosten, einfacher Konstruktion und hoher Lebensdauer auch gute Regenerationseigenschaften ohne nennenswerten Kraftstoffmehrverbrauch aufweisen.

Das Funktionsprinzip eines Partikelfilters ist in Bild 1-2 am Beispiel eines Keramik-Monolithen mit wechselseitig verschlossenen Kanälen dargestellt.



**Abb.: 0-2 Prinzipschema eines Filtermediums /13/**

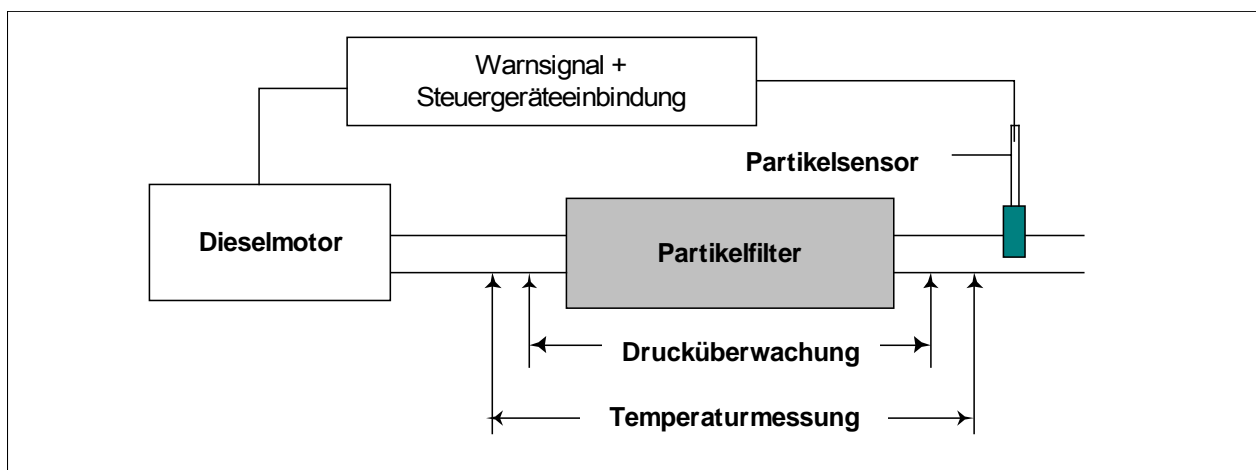
Das einströmende Rohabgas wird gezwungen, durch die porösen Wände des Eingangskanals hindurch in einen benachbarten Kanal (Ausgangskanal) zu strömen, der in den Abgasstrang mündet. Die Partikel selbst lagern sich an der Oberfläche der Kanäle und innerhalb der porösen Wände ab.

Mit Hilfe der beschriebenen Abgasnachbehandlungssysteme können die Emissionswerte drastisch abgesenkt werden. Die Erfassung dieser niedrigen Emissionen stellt eine echte technische Herausforderung dar, im Speziellen die Erfassung der Partikelkonzentrationen ab EURO 5. Die etablierte Messtechnik, wie Opazimeter und Smokemeter sind für diese Aufgaben nicht mehr uneingeschränkt geeignet. Wenn zum Beispiel ein effizientes Partikelfiltersystem im Einsatz ist, sind die Schwärzungszahlen praktisch immer null und die Opazität wird sehr stark von anderen Emissionen beeinflusst, so dass die niedrigsten Emissionen praktisch nicht erfassbar sind.

Um z.B. die Funktionsfähigkeit eines Partikelfiltersystems kontinuierlich zu überwachen, wäre es notwendig, eine Vorrichtung (PM-Sensor) hinter den Partikelfilter zu schalten, die in der Lage ist, die Funktionsstörung am Filter und die damit verbundene Erhöhung der Partikelemission zu erkennen und anzuzeigen (On-Board-Diagnosesystem OBD, On-Board-Messsystem OBM).

Vor allem im Bereich von arbeitsschutzrelevanten Anwendungen, wie beispielsweise im Untertagebereich oder Tunnelbau wird der Überwachung der Partikelfilter besondere Aufmerksamkeit geschenkt, da es hier beim Ausfall eines Filtersystems zu einer erhöhten Exposition durch Rußpartikel kommt.

In Bild 1-3 ist die Lage und prinzipielle Funktion eines Partikelsensors dargestellt.



**Abb.: 0-3 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips**

In einer vom FAD – Förderkreis Abgasnachbehandlungstechnologien für Dieselmotoren e.V. – als Vorarbeit erarbeiteten Literaturstudie wurden die Anforderungen an ein On-Board-fähiges Partikel-Überwachungssystem und die Aufgabe aussichtsreicher Partikelmessverfahren herausgearbeitet /5/.

Das Gesamtziel des Verbundprojektes war es, eine fahrzeugtaugliche Vorrichtung zur Überwachung der Partikel-Emissionen auf der Basis eines Partikelmassensensors (PMS) zu entwickeln und eine Abschätzung der Funktionsfähigkeit und Praxistauglichkeit mit Hilfe von Motorenprüfstandsuntersuchungen durchzuführen.

Es wurden zwei ausgewählte Sensorprinzipien in unterschiedlichen, technischen Ausführungen untersucht, der Sensor der HAW-Hamburg (Durchschlagsspannungsprinzip) und der Sensor der FH Wolfenbüttel (Rußladungsprinzip). Die entwickelten Funktionsmuster wurden an eigenen Prüfständen und Laboratorien untersucht und für vergleichende Untersuchungen bereitgestellt. Die Untersuchungen erfolgten nach einem



entsprechend vereinbarten Programm, unter einheitlichen und vergleichbaren Bedingungen auf dem Motorenprüfstand mit Vergleichsmesstechnik. Für die Sensoren wurden im Anschluss ein Redesign mit Prüfung beim Sensorentwickler sowie ein erweiterter Funktionstest durchgeführt.

Die erarbeiteten Ergebnisse sollen vorrangig dazu dienen, Möglichkeiten der Filterüberwachung durch die Messung der unmittelbaren Partikelemission aufzuzeigen, um so die umweltschädliche Wirkung bei Ausfall des Abgasnachbehandlungssystems einzudämmen. Möglicherweise sind die Ergebnisse auch für Ottomotoren mit Direkteinspritzung anwendbar. Darüber hinaus sind mit der untersuchten Vorrichtung neue und innovative Produkte für die Zulieferindustrie zu erwarten.

# Hauptteil

## 0 Lastenheft

Ziel dieses Projektes war es, fahrzeugtaugliche Vorrichtungen zur Überwachung der Partikel-Emissionen auf der Basis eines Partikelmassensensors (PMS) zu untersuchen und zu bewerten. Dabei wurden zwei Sensorprinzipien überprüft und mit den hier aufgestellten Anforderungen verglichen. Da bei einem späteren Einsatz unterschieden werden muss, ob der Sensor nur qualitativ eine Überschreitung des Grenzwertes anzeigen soll oder ob er in der Lage sein muss ein quantitatives Signal zu liefern, werden hier hauptsächlich allgemein gültige Anforderungen definiert. Dies betrifft folgende Schwerpunkte:

- Anforderungen an die Sensoren (thermische und mechanische Belastbarkeit, Integrationsfähigkeit der Systeme, Messbereich, Genauigkeit, Abtastrate, Energieverbrauch, Kosten, etc.)
- Zusammenstellung der Randbedingungen im Abgassystem (Abgastemperaturen, Partikelkonzentration, Volumenstrom etc.)

Die Anforderungen an den Sensor können folgendermaßen zusammengestellt werden:

- der Sensoren muss für den Einbau in einer Abgasanlage von Fahrzeugmotoren geeignet sein. Dies bedingt den Aufbau als kompakter Messfühler und Betrieb am 12-V-Bordnetz eines Kraftfahrzeuges
- der Sensor bzw. Messverstärker/Filter muss ein analoges/digitales Signal bereit stellen, welches in Abhängigkeit zur Rußkonzentration [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] kalibriert werden kann
- vorzugsweise ist ein Signal von 0-5 V, 0-10 V bzw. 4-20 mA zu wählen
- der Messbereich sollte im Bereich von 0 - 50  $\text{mg}/\text{m}^3$  (100  $\text{mg}/\text{m}^3$  bei Rußstoß) liegen, wobei diese Grenzen vorerst nur als Abschätzung gelten
- die Messwertauflösung sollte 0,05  $\text{mg}/\text{m}^3$  betragen
- der prozentuale Fehler bei der Messung der Rußkonzentration ergibt sich aus dem absoluten Nullpunkt und dem relativem Fehler der Messung
- die Abtastrate richtet sich nach der Art der Überwachungsstrategie, d.h. kontinuierlich bzw. diskontinuierlich (im Projekt wurde mit eine Abtastrate von 1 Sekunde gearbeitet)
- eine Langzeitstabilität im pulsierenden Abgasstrom ist gefordert
- chemische Verträglichkeit gegenüber Diesellabgasen und Kondensation
- eine hervorragende mechanische Stabilität, vor allem hinsichtlich einer hohen Temperaturwechselbeanspruchung und bei Lastwechseln bis zu einer Temperatur von ca. 700 °C
- das Messverfahren soll keine Querempfindlichkeiten zu anderen Abgaskomponenten aufweisen, anderenfalls muss der Einfluss durch Kompensation des Sensorsignals berücksichtigt werden
- die Sensoren müssen die Vorschriften für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) erfüllen
- ein niedriger Energieverbrauch, im Speziellen die zur Sensorregeneration benötigte Heizleistung muss begrenzt werden
- geringe Investitionskosten
- die Korrosions- und Vibrationsbeständigkeit richtet sich nach dem für Kfz-Schalldämpfer üblichen Prüfungsnormen

- Temperaturbeständigkeit: Einbau im Vollstrom: 700°C  
Einbau im Teilstrom: 250°C
- Abgasvolumenstrom: 0 -1000 m³/h

Die Lebensdauer und Wartungsintervalle richten sich nach den für Partikelfilter üblichen Vorgaben:

- Lebensdauer und Funktionalität: Schwere Nutzfahrzeuge > 500 000 km  
PKW und leichte Nutzfahrzeuge > 300 000 km  
Off- und Non-Road-Anwendungen > 10 000 Bh
- Wartungsintervalle: Schwere Nutzfahrzeuge > 200 000 km  
PKW und leichte Nutzfahrzeuge > 100 000 km  
Off- und Non-Road-Anwendungen: > 2 000 Bh

Die dargestellten Anforderungen zeigen deutlich, welche umfangreichen Entwicklungsarbeiten notwendig sind, um einen solchen Sensor bis zur Marktreife zu entwickeln. Die im Folgenden dargestellten Untersuchungsergebnisse sollen vor allem den Zusammenhang der Rußkonzentration zum Messsignal darstellen und bewerten. Dabei soll herausgefunden werden, ob eines der beiden Sensorprinzipien für einen späteren Einsatz im realen Fahrbetrieb geeignet erscheint.

## 1 Projektdurchführung

Die in diesem Entwicklungsprojekt durchgeführten Arbeiten unterteilen sich grob in die Bereiche Sensorentwicklung und Sensorerprobung. Wobei im Bereich der Sensorentwicklung vor allem die Weiterentwicklung der Messverfahren des jeweiligen Sensorherstellers und die Erprobung in eigenen Laboratorien und Prüfständen durchgeführt wurde. Die Erprobung der Sensoren mit Überprüfung auf deren praxisrelevante Anwendung wurde hauptsächlich an der HTW – Dresden im Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik durchgeführt.

Im Einzelnen erfolgte zu Beginn des Projektes die Entwicklung und Herstellung der Sensoren für den Prüfstandsbetrieb, die Vorbereitungen für eine Applikation am Motorenprüfstand (mechanische Installation, Einbindung in die Prüfstandsperipherie und Signalaufbereitung) sowie die Ausarbeitung von Versuchsprogrammen.

Die ersten Versuche am Motorenprüfstand umfassten hauptsächlich die Inbetriebnahme der Sensoren. Dabei wurden Probleme der Signalübertragung und Beeinflussung durch EMV sowie erste prinzipielle Funktionsprüfungen durchgeführt und Temperaturgrenzen herausgefunden.

Im Anschluss an diese Versuche konnten die Sensorhersteller aufgetretene Probleme beseitigen und gegebenenfalls verbesserte Sensorvarianten zur Verfügung stellen.

In der nächsten Messkampagne wurden Versuche zur Beurteilung der Signalqualität hinsichtlich aktueller Vergleichsmesstechnik durchgeführt. Dabei wurde das Sensorsignal in Bezug auf Quereinflussfaktoren untersucht und bewertet. Weiterhin erfolgte die Erarbeitung einer Korrelationsanalyse zur Beurteilung der Signalgüte sowie für eine spätere Kalibrierung des Signalwertes.

Neben diesen Untersuchungen erfolgte eine ständige Weiterentwicklung der Messverfahren durch die Sensorentwickler.

Die abschließende Bewertung der Sensoren umfasste den Sensorbetrieb während eines geschlossenen Testzyklus (ESC -Test) in unterschiedlichen Konfigurationen des Abgasstranges (ohne und mit zerstörtem Partikelfilter, sowie unterschiedlichen Filtrationsleistungen).

Als Projektabschluss wurde eine Bewertung beider Sensoren in Abhängigkeit von ihrem Entwicklungsstand vorgenommen.

In den folgenden Abschnitten werden die technischen Entwicklungsschritte der jeweiligen Sensoren im Einzelnen beschrieben. Dabei werden die Prinzipien und der Aufbau sowie die im Projekt erreichten Entwicklungsfortschritte dargestellt. Im Anschluss erfolgt die Darstellung der vergleichenden Untersuchung und Bewertung der Sensorprinzipien an der HTW Dresden.

## 2 Rußladungssensor – Stand der Technik (Ausgangssituation, Aufbau, Prinzip)

Im Rahmen eines vorhergehenden Forschungsvorhabens AKONDIES (Abgaskonzept für einen Euro IV-PKW-DI-Dieselmotor, BMBF), in der Zeit von 1999 bis 2002, wurden grundlegende Erkenntnisse zur Funktion eines Rußladungssensors erforscht, die in einer Dissertation, in Kooperation mit der TU Clausthal, manifestiert sind. Für diese Einrichtung zur Messung der Rußkonzentration im Abgas wurde am 30.09.1999 das Patent erteilt /14/. Der technische Stand des Sensors ist im folgenden Kapitel ausführlich beschrieben.

### 2.1 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip besteht darin, dass zwei Elektrodenflächen vom Abgas durchströmt werden, von denen die eine an einer Hochspannung  $U_H$  von ca. 1500 V liegt, während die andere Elektrode über einen hochohmigen Widerstand an Masse liegt. Rußpartikel, als elektrisch leitende Teilchen, werden durch Coulomb'sche Kräfte an die Hochspannungselektrode gelenkt und nehmen dort elektrische Ladung auf. Da sich gleichpolige Ladungen abstoßen, wandern die Partikel zur gegenüber liegenden Elektrode, die geerdet ist, und geben dort ihre Ladungen ab. Dadurch entstehen Ladeströme  $I_S$ , die an dem Widerstand  $R_M$  Spannungsabfälle  $U_M$  hervorrufen, die in einem Messverstärker  $V_M$  um den Faktor 40 verstärkt werden. (s. Abb.: 2-1) Der Effektivwert der verstärkten Spannung ist ein Maß für die Größe der Rußemission.

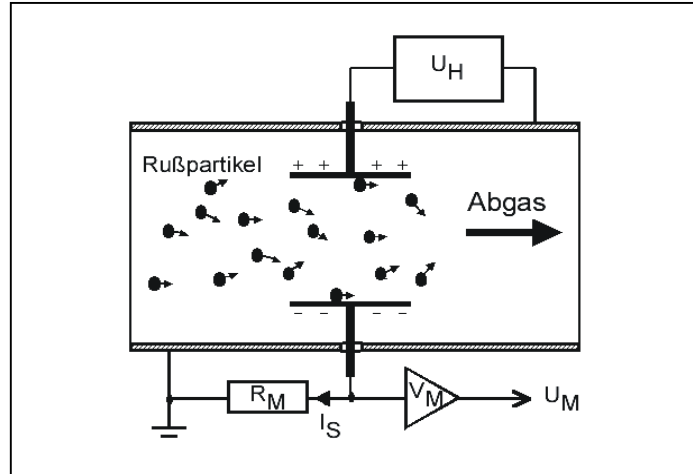


Abb.: 2-1 Funktionsprinzip des Rußladungssensors

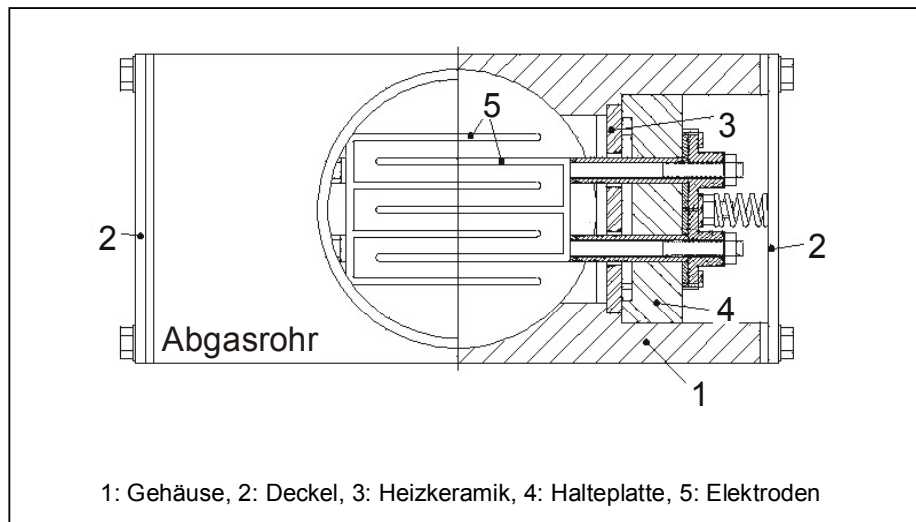
Das Messsignal wird vor der Weiterverarbeitung in einem Messrechner in seinem Frequenzgang durch ein Tiefpassfilter auf 10 Hz begrenzt. Dadurch wird vermieden, dass Abgaspulsationen und Vibrationen das Messergebnis beeinflussen können.

Das Messsignal der Rußkonzentration ist abhängig von der Hochspannung, der Elektrodenfläche, der Elektrodenlänge und der Abgasgeschwindigkeit.

Querempfindlichkeiten gegenüber dampfförmigen Stoffen im Abgas wurden bis zu einer Rußkonzentration von  $2 \text{ mg/m}^3$  nicht festgestellt. Dieses setzt voraus, dass der Sensor nur bei Temperaturen von über  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  betrieben werden kann, damit auch die Kohlenwasserstoffe nicht kondensieren.

Diese Bedingung wird mit ausreichender Sicherheit erfüllt, da, zur Vermeidung von Rußbelag auf den Isolatoren der Elektroden, die Elektrodenhalter auf ca. 200 °C aufgeheizt werden müssen.

Der für die umfangreichen Untersuchungen am Dieselmotor hergestellte Rußladungssensor ist in seiner konstruktiven Ausführung in Abb.: 2-2 dargestellt.



**Abb.: 2-2 Erste konstruktive Ausführung des Rußladungssensors**

Durch die Konstruktion sind die mechanischen Parameter, die das Messergebnis beeinflussen, festgelegt. Ebenso kann die Hochspannung auf einem konstanten Wert von 1500 V gehalten werden, so dass die Abgasgeschwindigkeit kontinuierlich gemessen werden muss. Durch Messung der Abgastemperatur und des Luft- und Kraftstoffmassenstroms kann die momentane Abgasgeschwindigkeit mit einer Genauigkeit von 1,4 % ermittelt werden.

Der Zusammenhang zwischen Partikelaufladung und Gasgeschwindigkeit ist ein nicht linearer, komplexer Vorgang, der in einem mathematischen Modell beschrieben werden konnte (Dissertation an der TU Clausthal).

Das Modell wird durch folgende Gleichung dargestellt:

$$C_{RM} = \left[ \frac{I_s}{\alpha \cdot (1 - e^{-k/v})} \right]^{(1/\beta)}$$

Die Modellparameter  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $k$  müssen mit Hilfe von Messungen am Dieselmotor empirisch ermittelt werden.

Da die Parameter miteinander gekoppelt sind, können sie nicht getrennt aus den Messdaten bestimmt werden. Deshalb wird eine Vergleichsmessung der Rußkonzentration  $c_R$  mit einem bekannten Verfahren (Opazimeter) und der aus dem Modell gewonnenen Rußkonzentration  $c_{RM}$  durchgeführt. Die Bestimmung der Konstanten erfolgt derart, dass der Quotient

$$\Phi_{(\alpha, \beta, \kappa)} = \frac{C_{RM}}{C_R} \approx 1 \text{ ist.}$$

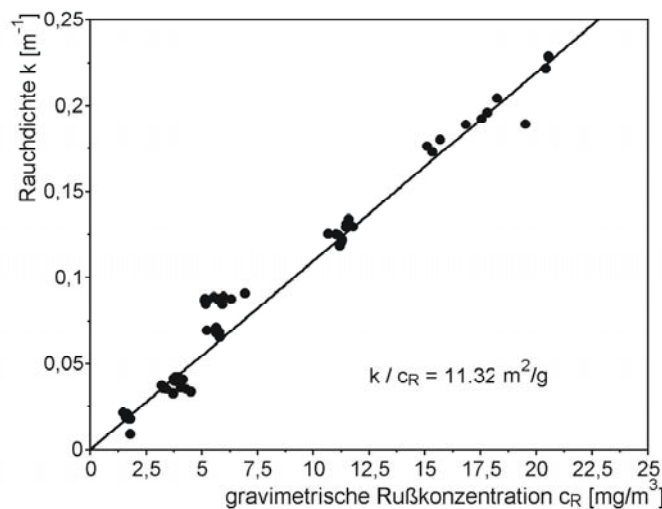
Der Quotient streut dann bei entsprechender Wahl der Parameter um den Mittelwert Eins aufgrund der unvermeidbaren Streuung der Messwerte mit der Standardabweichung  $s_\phi$ .

$$s_\phi = \sqrt{\frac{\sum (\phi_i - \bar{\phi})^2}{n}} \quad \text{mit } n = \text{Anzahl der Messungen}$$

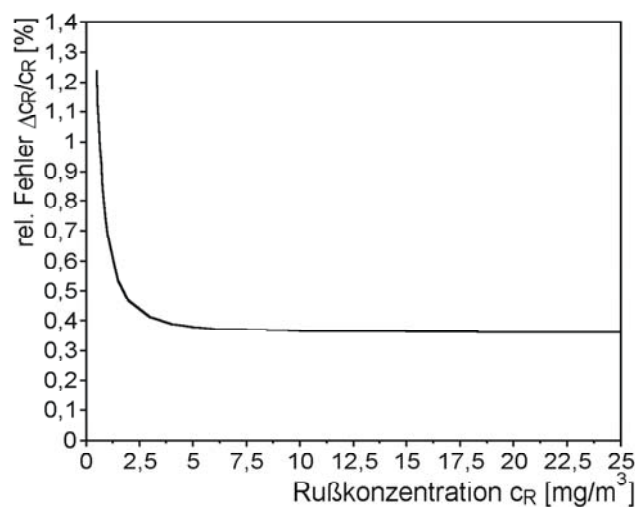
Die Parameter  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\kappa$  lassen sich zunächst mit einem Gradientenverfahren mit groben Schritten dahingehend annähern, dass  $s_\phi$  minimal wird.

Mit den auf diese Weise gefundenen Näherungslösungen  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\kappa_0$  können dann nach der Methode der kleinsten Quadrate die optimalen Parameter  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\kappa$  berechnet werden.

Um eine Korrelation zu der Partikelmasse herstellen zu können, wurde das Opazimeter mit dem Versuchsmotor und Serienabgasanlage gravimetrisch kalibriert, indem Rußkonzentrationen im relevanten Bereich von 1 bis 21  $\text{mg/m}^3$  untersucht wurden. (Abb.: 2-3, Abb.: 2-4)



**Abb.: 2-3 Kalibrierkennlinie Rauchtrübung und Gravimetrische Partikelemission**



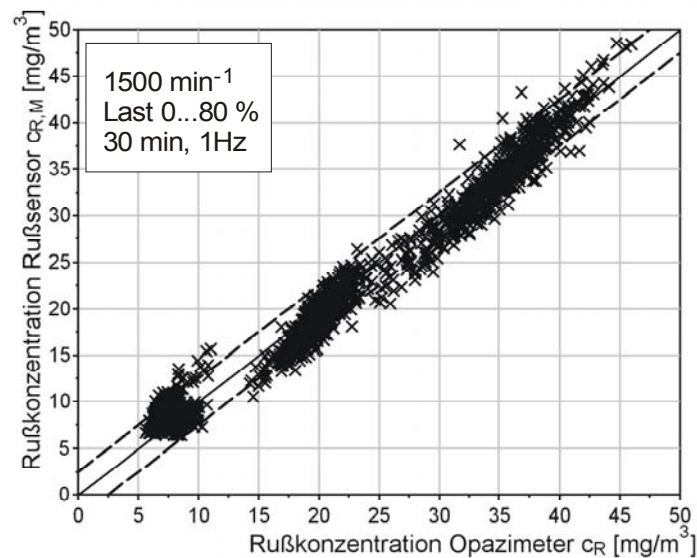
**Abb.: 2-4 Genauigkeit der Kalibrierung**

Die Steigung der Ausgleichsgeraden liefert den Zusammenhang zwischen Trübung und Partikelmasse (Abb.: 2-3). Der relative Fehler der gravimetrischen Methode ist dargestellt und wurde unter

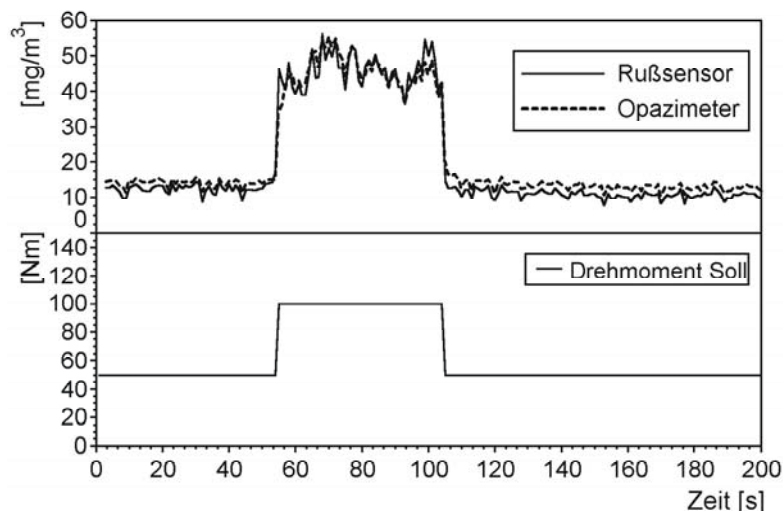
Berücksichtigung der Genauigkeit der Wägung, der Messung des Probenvolumens und der Bestimmung der Parameter Druck und Temperatur für die Umrechnung auf den Bezugszustand mit Hilfe des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes berechnet (Abb.: 2-4).

Nach dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass mit dem Opazimeter die Rußkonzentration  $c_R$  mit einer Genauigkeit von  $\pm 1 \text{ mg/m}^3$  erfasst werden kann. Allerdings muss der Einfluss einer erhöhten  $\text{NO}_2$ -Emission, durch den Einsatz eines Oxidationskatalysators, bei Verwendung eines Partikelfilters beachtet werden.

Die Ergebnis der Vergleichsmessung mit einem gravimetrisch kalibrierten Opazimeter und dem Rußladungssensor sind in Abb.: 2-5 dargestellt. Das dynamische Verhalten der Rußmessung wird durch einen Lastsprung zeigt A



**Abb.: 2-5 Streuung des Rußladungssensor-Signals**



**Abb.: 2-6 Dynamisches Verhalten des ersten funktionsfähigen Rußladungssensors**

Die Genauigkeit der Rußbestimmung ist von der Qualität der Messung der Abgasgeschwindigkeit abhängig und beträgt bei einer Messgröße von  $2 \text{ mg/m}^3$  zwischen 3 und 7 % im gesamten Bereich des Motorkennfeldes. Das Eigenrauschen des Sensors beträgt dabei, einschließlich der Signalverarbeitung,  $0,0023 \text{ mg/m}^3$ .



## 2.2 Zusammenfassung des Ausgangszustandes zu Beginn des Vorhabens

Messprinzip:

- Auswertung des Stroms, den die Rußpartikel beim Berühren der Messelektrode während ihrer Entladung erzeugen.
- Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Rußkonzentration und Messsignal.
- Elektrodenheizung benötigt 200 Watt Leistung.
- Die Keramikisolatoren werden oberhalb von 250 °C leitend und beeinflussen das Messsignal.
- Der Einbau des Sensors erfordert die Auftrennung des Abgasrohres und Anbringung von Montageflanschen.

## 2.3 Durchgeführte Arbeiten im Bewilligungszeitraum – Verbesserung des Messverfahrens

Ein entscheidender Fortschritt in der Erzeugung des Messsignals wurde durch die Anwendung eines Ladungsverstärkers mit DC-Kopplung erreicht. Es wird nicht mehr der Ladestrom der Partikel gemessen sondern deren Ladung, die sie an der Hochspannungselektrode aufgenommen und an der Messelektrode abgeben. Dadurch wurde erreicht, dass der Zusammenhang zwischen Rußkonzentration und Messsignal linear verläuft. Die nichtlineare Gasgeschwindigkeitsabhängigkeit ist nach wie vor vorhanden, wie die nachfolgende Abb.: 2-7 zeigt.

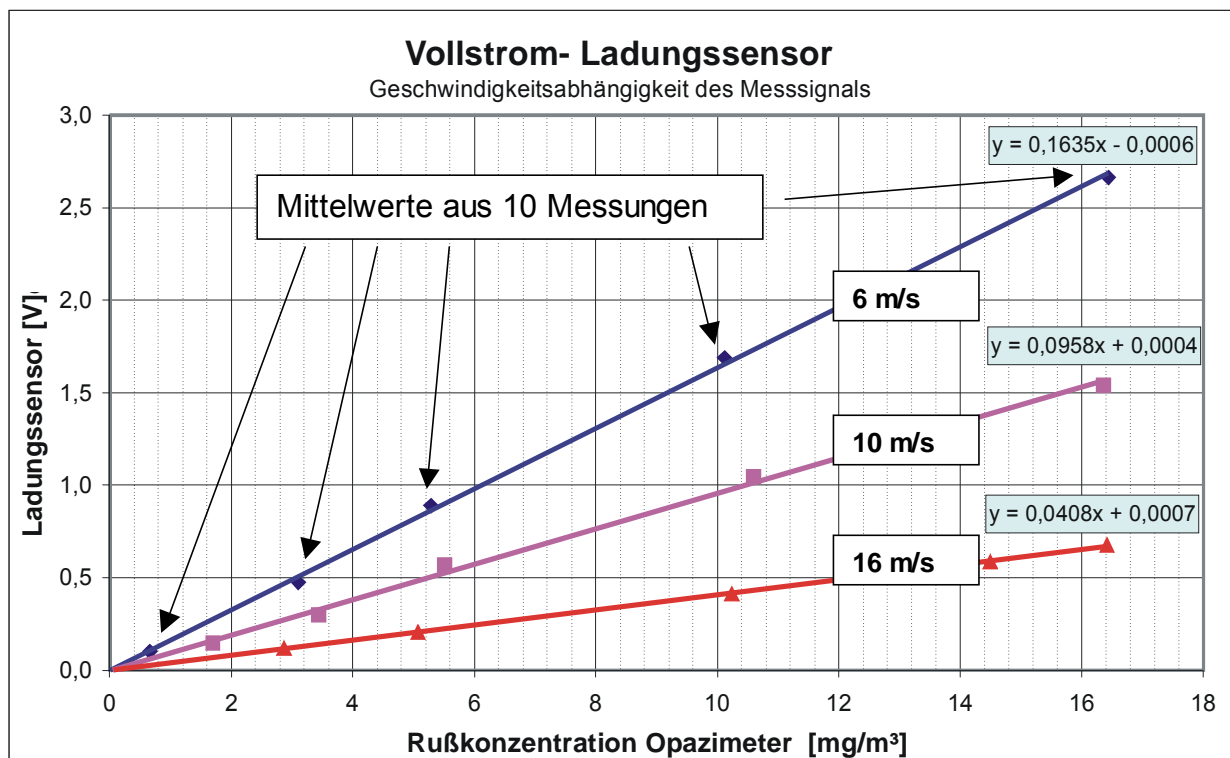


Abb.: 2-7 Verhalten des Messsignals des Rußladungssensors

Die Änderung des Messverfahrens ergab auch eine höhere Ausbeute des Rohsignals, so dass die Voraufladung der Rußpartikel durch Corona nicht mehr angewendet wird. Zumal in Fachdiskussionen angemerkt wurde, dass durch die Coronaaufladung möglicherweise auch andere Gasmoleküle ionisiert werden könnten, die dann Querempfindlichkeiten gegenüber der Rußmessung erzeugen würden.

## 2.4 Neukonstruktion des Sensors für die On-Board Anwendungen in Dieselfahrzeugen

Unter Wahrung der erforderlichen Abstände gegen Funkenüberschlag wurde ein Sensor konstruiert, der seitlich an das Abgasrohr montiert werden kann. Mit dieser Anordnung wurden Prüfstandsuntersuchungen in Wolfenbüttel, in Dresden und beim ADA in Weissach durchgeführt als auch Messungen mit einem VW-Polo auf dem Rollenprüfstand in Salzgitter. (Abb.: 2-8)



Abb.: 2-8 Neukonstruktion des Ladungssensor mit Rohrflanschen

## 2.5 Herstellung von Hezelementen kleinerer Leistung

Die Optimierung der Elektrodenheizung erfolgte in mehreren Entwicklungsschritten. Zunächst wurde die Heizungswicklung auf Keramikkörpern aufgebracht, durch die die Elektroden zu den Kondensatorplatten geführt wurden. (Abb.: 2-9)

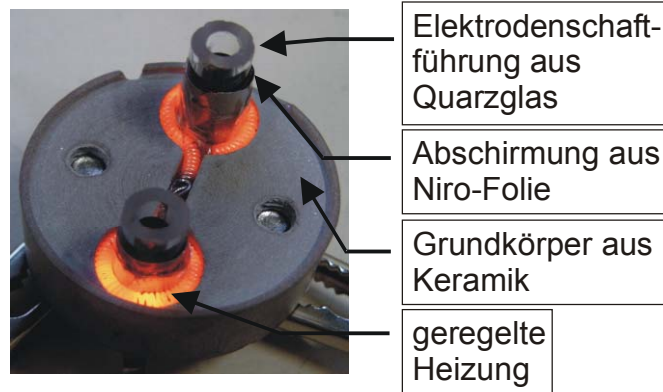


Abb.: 2-9 Keramik Heizkörper

Bei Messungen am Motorprüfstand mit unterschiedlichen Abgastemperaturen konnten festgestellt werden, dass sich mit steigender Abgastemperatur auch die Temperatur der Heizung erhöht, wodurch die Keramik leitend wird und das Messsignal beeinflusst. Bei kaltem Abgas (ca. 150 °C) wird die Heizung durch den Abgasstrom gekühlt, so dass die Elektroden verrußen.

Die Oberfläche der Heizung auf den Keramikkörpern und damit die Wärmeableitung in die Sensorhalterungen ist sehr groß, daher musste mit höherer Heizleistung gefahren werden.

Die Konsequenz aus diesen Untersuchungen ergab die Notwendigkeit, die Heizung auf eine konstante Temperatur zu regeln und die Form der Heizung als Wendel auszuführen (Abb.: 2-10).



**Abb.: 2-10 gewendelte Heizung**

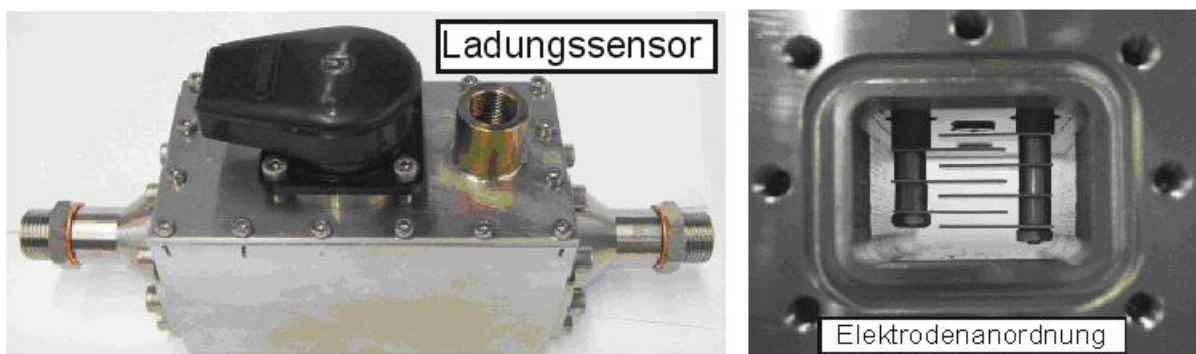
Zur Temperaturmessung und Regelung wird der Heizwiderstand verwendet, indem ein Widerstandsmaterial gewählt wurde, das einen hohen, wenn auch nicht linearen, Temperaturkoeffizient besitzt und gleichzeitig korrosionsfest ist. Nickel ist preiswert und für diese Aufgabe geeignet. Die Temperaturmessung erfolgt mit Hilfe einer Brückenschaltung, deren Ausgangsspannung einer Temperaturanzeige zugeführt und gleichzeitig einem Leistungstransistor, der den erforderlichen Strom liefert, um die vorgewählte Temperatur von ca. 600 °C auf  $\pm 10$  K konstant zu halten. Durch die Wärmestrahlung wird sicher verhindert, dass sich Ruß an den Elektrodenschäften ablagert.

Die Heizleistung verändert sich mit der Abgastemperatur und beträgt als Mittelwert ca. 20 Watt.

Obwohl Quarzglas bei hohen Temperaturen einen höheren Isolationswiderstand besitzt als der Keramikkörper, wurden Quereinflüsse von der Heizung auf das Messsignal bei Temperaturen oberhalb von 350 °C wirksam. Abhilfe konnte durch eine geerdete Abschirmfolie aus Niroblech geschaffen werden, die gegen die Heizungswendel durch Glimmer elektrisch isoliert wurde. Diese Einrichtung ermöglichte es, Abgastemperaturen bis 450 °C ohne Rückwirkung auf das Messsignal zu fahren.

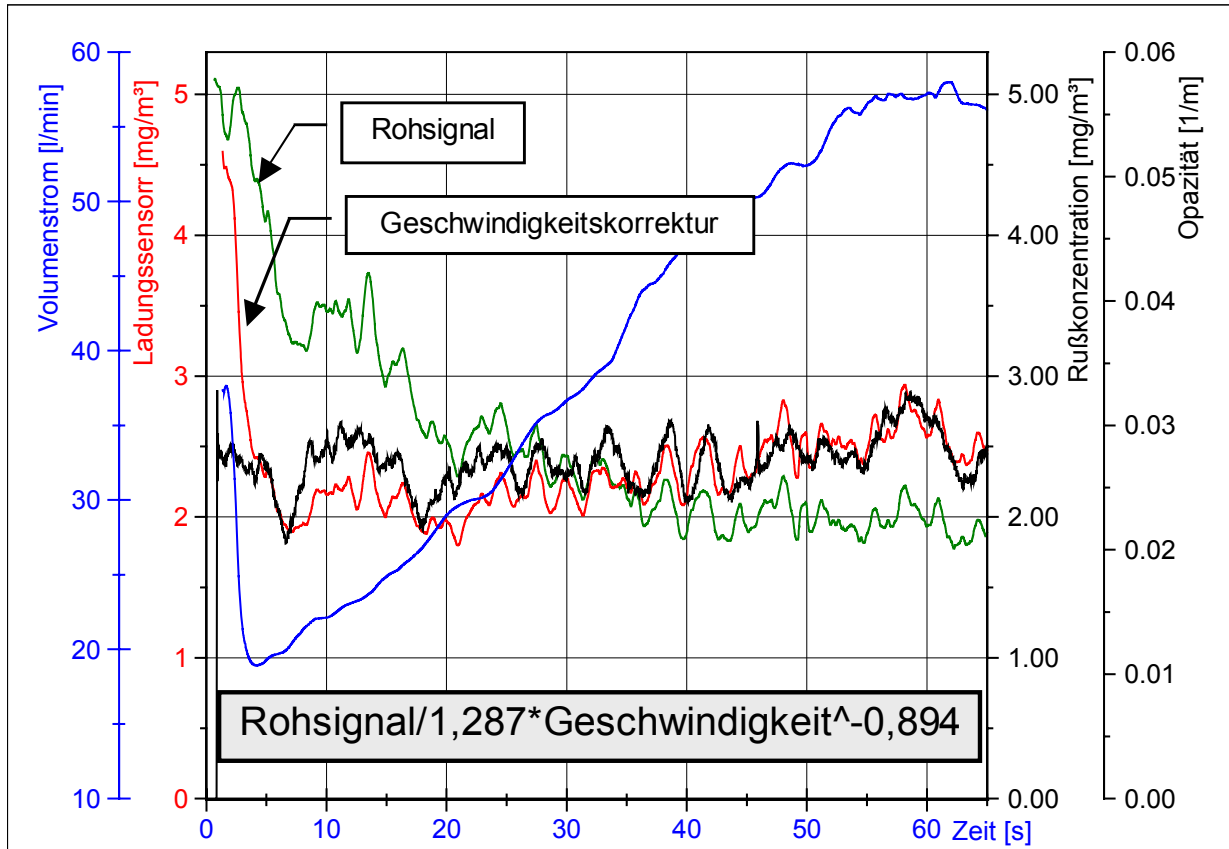
## 2.6 Bypassbetrieb des Sensors für niedrige Rußkonzentrationen

Wie aus dem Diagramm in Abb.: 2-7 ersichtlich, erhöht sich das Messsignal mit Verringerung der Gasgeschwindigkeit. Aus diesem Grund wurde eine Anordnung zusammengestellt, bestehend aus Heizschlauch zur Konditionierung des Bypass-Abgasstromes, Membranpumpe, Rußfilter und Hitzdrahtanemometer zur Massenstrommessung sowie einer Temperaturmessstelle. Der in seinen Abmessungen modifizierte Rußladungssensor ist nachstehend abgebildet. (Abb.: 2-11)



**Abb.: 2-11 Bypass- Ladungssensor**

Die Pumpe erzeugt einen nahezu konstanten Volumenstrom von 50 [l/min], der sich jedoch während der Bypassmessung in Abhängigkeit des Abgasdruckes geringfügig verändern kann. Durch Untersuchungen mit verschiedenen Volumenströmen konnte die Gleichung ermittelt werden, um aus dem Messsignal die Rußkonzentration zu berechnen. Nachfolgendes Diagramm zeigt das Ergebnis dieser Arbeiten (Abb.: 2-12).



**Abb.: 2-12 Kalibrierung des Bypass- Sensors**

An dem Verlauf des Rohsignals ist zu erkennen, dass bei einer Volumenstromabsenkung um den Faktor 2,8 ein hohes Sensorsignal entsteht, das unter Anwendung der Korrekturgleichung, der kalibrierten Rußkonzentration folgt.

Eine solche Messapparatur könnte zu einem eigenständigen Werkstattmessgerät oder für die gesetzliche Abgasuntersuchung bei Fahrzeugen mit Partikelfilter weiter entwickelt werden.

Mit dieser Messeinrichtung wurden parallele Messungen mit einem AVL Micro Soot Sensor durchgeführt, der ausschließlich nur Kohlenstoffpartikel registriert (Abb.: 2-13)

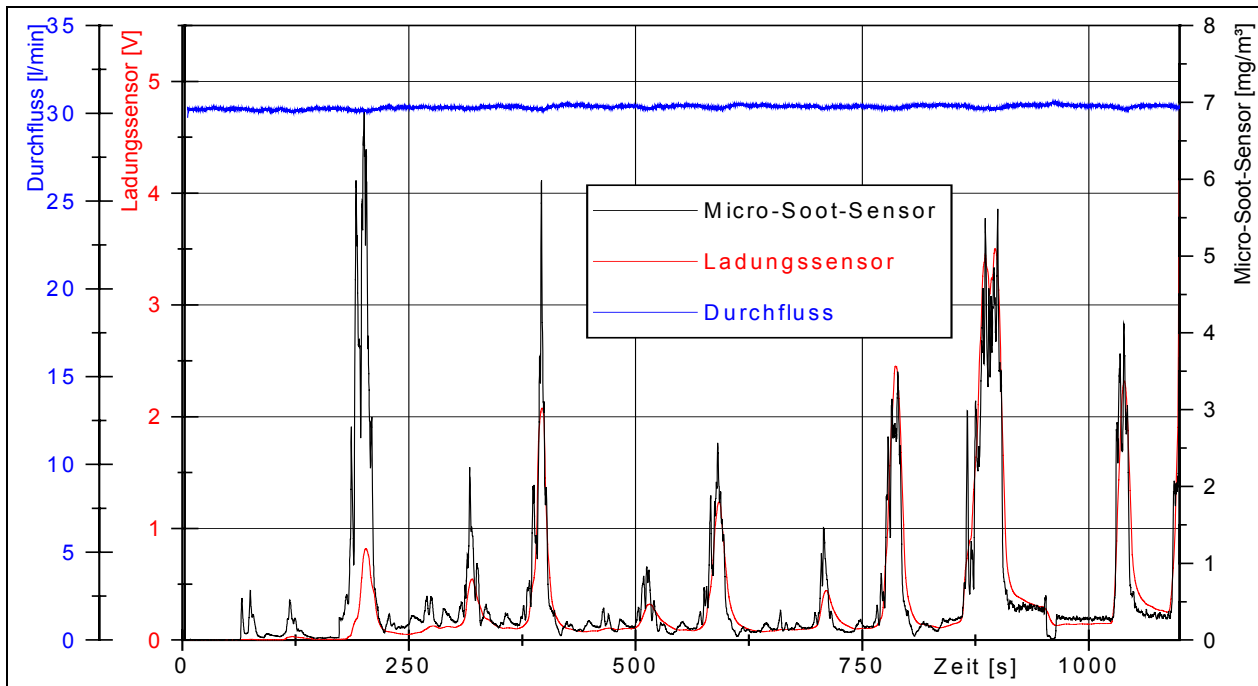


Abb.: 2-13 NEFZ- Fahrzyklus, VW 1.9 I TDI, Messung am Verdünnungstunnel

Mit Hilfe eines Rußgenerators wurden das Zeitverhalten und die Empfindlichkeit des Verfahrens untersucht (Abb.: 2-14).

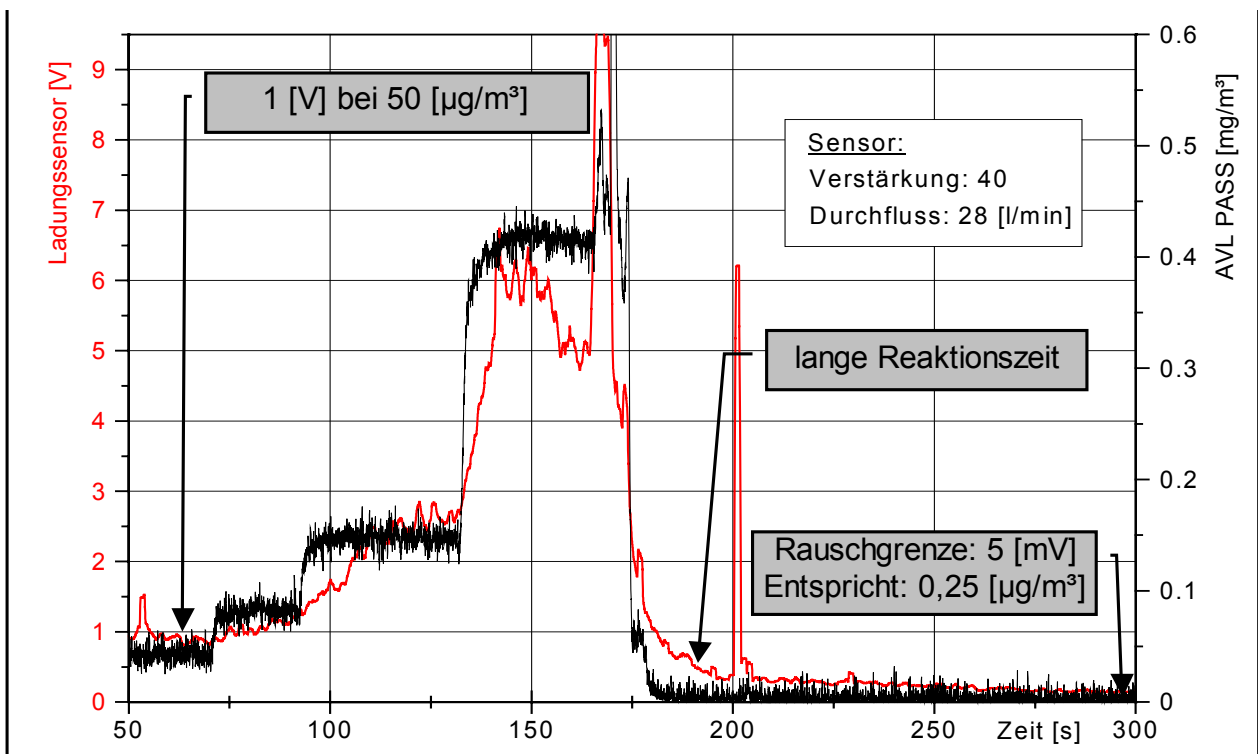


Abb.: 2-14 Empfindlichkeit und Zeitverhalten bei niedrigen Volumenströmen

Es ist eine hohe Empfindlichkeit des Systems erkennbar, allerdings ist die Einstellzeit von mehreren Sekunden zu groß für dynamische Messungen. Lösungsansätze für dieses Problem sind vorhanden.

Dieses Zeitverhalten tritt nur bei niedrigen Volumenströmen von 30 l/min auf. Bei der Messung im Vollstrom sind die Volumenströme wesentlich größer und zusätzlich mit der Abgaspulsation überlagert. Die Zeitkonstante beträgt im Vollstrom ca. 100 ms.

## 2.7 Vollstrom- Betrieb des Sensors

Für den mobilen Einsatz des Vollstrom- Sensors wurde eine kompakte Elektronikeinheit erstellt und für den 12-Volt Akkubetrieb im Fahrzeug ausgelegt. Die einzelnen Module beinhalten den Ladungsverstärker mit einer elektronischen Sicherheitsschaltung gegen Funkenüberschläge im Messkondensator bis 10000 V, einen in Stufen von 1 bis Faktor 40 einstellbaren Messverstärker, ein in Stufen von 2, 6 und 16 Hz einstellbares steilflankiges Tiefpassfilter, die Hochspannungseinheiten für 3 kV und 10 kV, wobei die 10 kV-Einheit nur für die Corona-Untersuchungen benötigt wurde. (Abb.: 2-15)

Weiterhin sind 2 Regler für die Elektrodenheizungen, einschließlich Temperatur- und Heizstrommessung, eingebaut, wovon nur ein Regler benötigt wird, der zweite Regler beheizte die Coronasonde, die aus beschriebenen Gründen nicht mehr verwendet wird, jedoch das Messsignal um zusätzlich 250 % vergrößert hatte.

Die 12-Volt Stromversorgung mit eingebautem Verpolungsschutz ist derart ausgelegt, dass Spannungsschwankungen zwischen 10 und 16 V ohne Rückwirkung auf die Messung auftreten können.

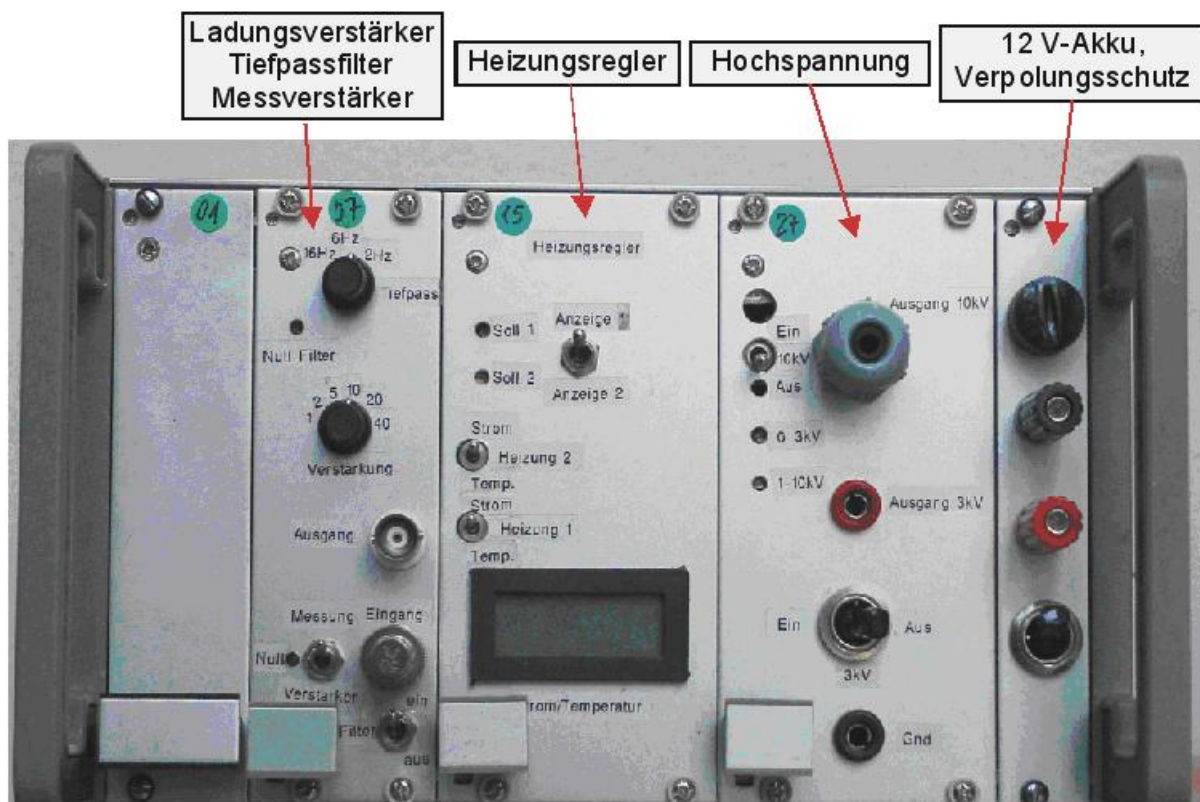


Abb.: 2-15 Elektronikeinheit für den 12-V-Betrieb

Mit dieser mobilen Einheit wurden Vergleichsmessungen beim Projektpartner in Dresden durchgeführt als auch beim ADA in Weissach. Ebenfalls erfolgte der Einbau in einen Diesel-Pkw VW Polo und wurde auf Straßenfahrten und auf dem Rollenprüfstand in Salzgitter betrieben.



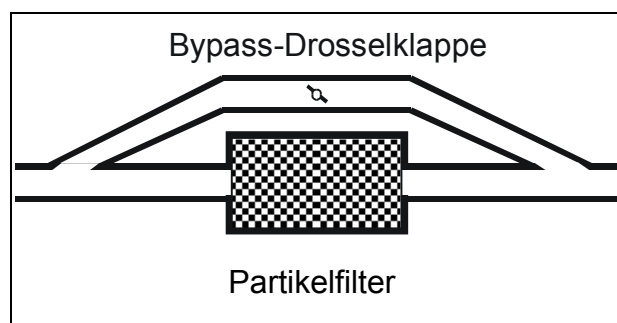
Während der verschiedenen Messungen traten Fehler auf, die eine Rückwirkung der Heizung auf das Messsignal bei hohen Temperaturen zeigten und Nullpunktdriften in der analogen Signalverarbeitung aufwiesen. Im Bereich der Signalverarbeitung konnten diese Driften vollkommen und die Temperatureinwirkung im Bereich des Sensors bis zu Temperaturen von 450 °C beseitigt werden.

### 2.7.1 Vollstrombetrieb am Motorenprüfstand

Es wurden Messungen am Standort Wolfenbüttel und Untersuchungen in Dresden als auch in Weissach beim ADA durchgeführt. Ziel der Arbeiten in Wolfenbüttel war die Ermittlung eines mathematischen Zusammenhangs zwischen dem Sensorsignal und der Abgasgeschwindigkeit.

Um bei einer nahezu konstanten Abgasgeschwindigkeit die Rußkonzentration in einem großen Bereich variieren zu können, wurde ein Partikelfilter mit einer Umgehungsstrecke (Bypass) eingesetzt (Abb.: 2-16).

In dem Kennfeldbereich des Versuchsmotors, in dem ausreichend Rußemission vorhanden war, wurden verschiedene Abgasgeschwindigkeiten gefahren. Dabei musste sichergestellt werden, dass die Temperatur keine Querempfindlichkeit auf den Ladevorgang der Partikel besitzt, mit Ausnahme der Änderung der Gasgeschwindigkeit im Sensor, die durch die Messung der Temperatur im Sensor korrigiert wird.



**Abb.: 2-16 Einfacher Abgas-Bypass**

Das typische gasgeschwindigkeitsabhängige Verhalten des Messsignals und das dynamische Verhalten sind in Abb.: 2-17 dargestellt. Der zeitliche Versatz zwischen dem Sensor- und dem Opazimetersignal ist durch die Laufzeit des Gasstroms bis zum Opazimeter begründet, während der Ladungssensor im Vollstrom arbeitet.

Im Abgaszentrum der Automobilindustrie (ADA) wurde der Sensor unter extremen Bedingungen gefahren. Ein Beispiel einer Versuchsfahrt ist nachstehend wiedergegeben. In dem Diagramm in Abb.: 2-18 werden die noch zu lösenden Aufgaben für die Anwendung des Sensors im Vollstrom in Fahrzeugen deutlich.

- a) Bei sprunghaftem Anstieg des Abgasmassenstroms erfolgt, ohne Einbindung der Gleichung für eine Volumenstromkorrektur, eine entsprechende Absenkung des Messsignals.
- b) Hohe Abgastemperaturen reduzieren den Isolationswiderstand des Keramikmaterials, so dass von der Betriebsspannung der Heizung und der Hochspannungselektrode Überlagerungen mit dem Sensorsignal auftreten.

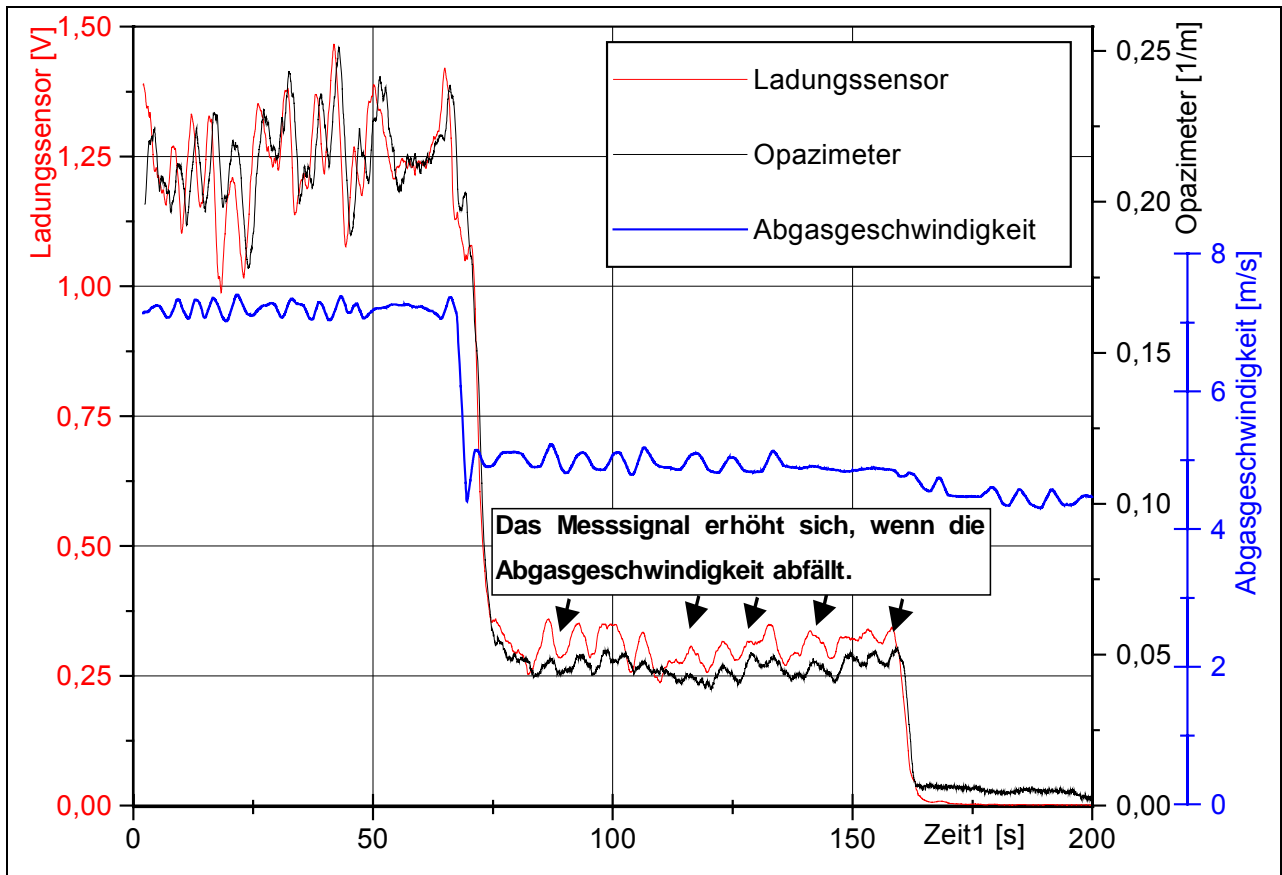


Abb.: 2-17 Dynamisches Verhalten des Ladungssensors

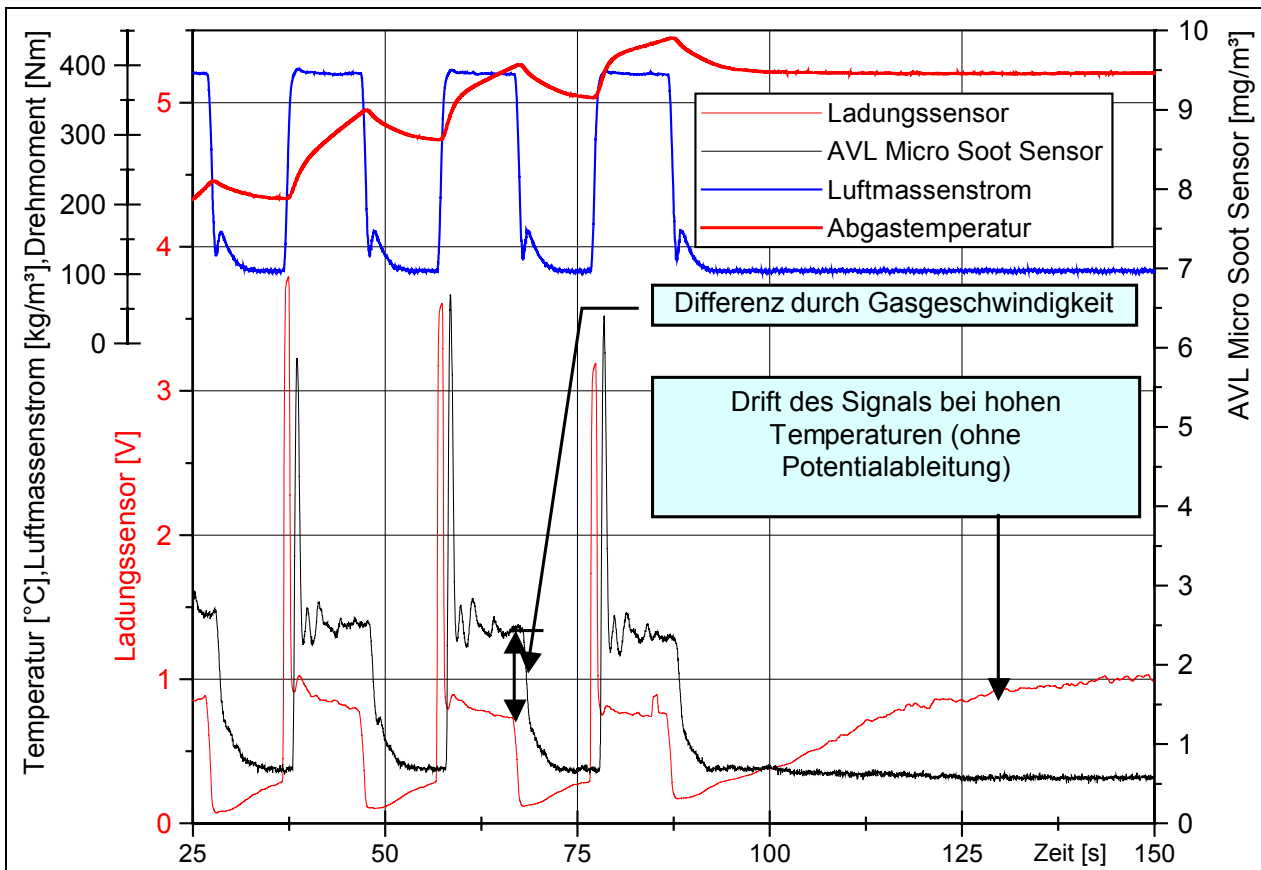


Abb.: 2-18 Volllastsprünge und Temperatureinfluss



Der Temperatureinfluss konnte inzwischen durch die Implementierung von Abschirmblechen um die Elektrodenschäfte, die als Potenzialableitung wirken, weitgehend beseitigt werden, so dass bis ca. 450 °C keine Querempfindlichkeiten auftreten.

Es ist im Rahmen dieses Vorhabens nicht gelungen, die Gleichung der Geschwindigkeitsabhängigkeit aus den Messungen sicher abzuleiten. Der Grund besteht darin, dass der verwendete Versuchsmotor bei höheren Drehzahlen, die eine höhere Abgasgeschwindigkeit zu Folge haben, eine zu niedrige Rußemission besitzt, so dass mit Variation der Bypass- Drossel keine Rußkonzentrationsänderungen im Messbereich des Vergleichsmessgerätes bei konstantem Volumenstrom eingestellt werden konnten. Hierfür müssten Untersuchungen mit einem EURO II – Dieselmotor ergänzt werden, um höhere Gasgeschwindigkeiten als 6, 10 und 16 m/s untersuchen zu können. Für eine ausreichende Zahl von Stützstellen für die Ermittlung der Gleichung müssten Geschwindigkeiten bis 60 m/s mit entsprechender Rußkonzentration von ca. 50 mg/m<sup>3</sup> gefahren werden. Die Abstützung der Gleichung auf nur 3 Punkte ist für eine eindeutige Bestimmung unzureichend.

### 2.7.2 Messungen auf dem Rollenprüfstand

In dem zur Verfügung stehenden VW- Polo, EURO IV, Motor 1,9 l TDI, wurde ein Rußsensor aus Platzgründen vor dem Schalldämpfer installiert. Der Katalysator wurde entfernt, um bei den geringen Rußemissionen keine Querempfindlichkeit von NO<sub>2</sub> im Opazimeter zu erhalten. (Abb.: 2-19, Abb.: 2-20)

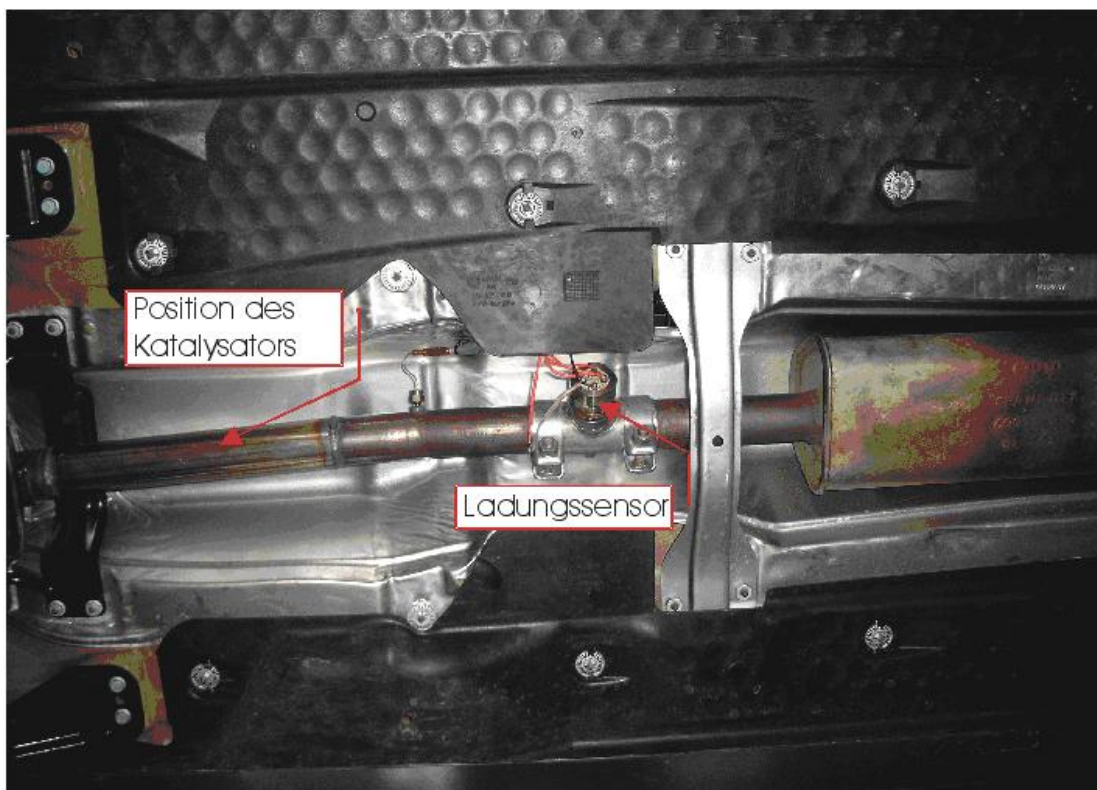
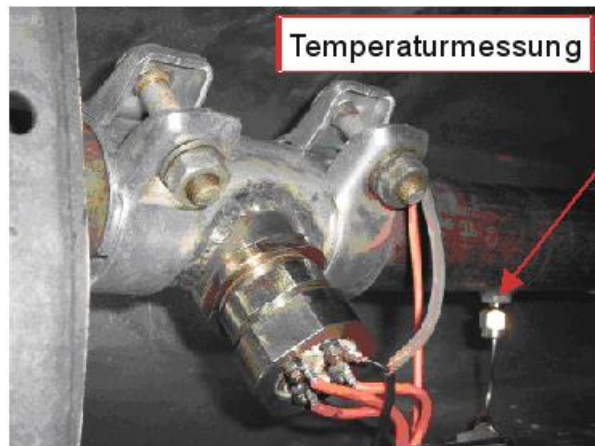


Abb.: 2-19 Position des Vollstromsensors in der Abgasanlage des VW Polo

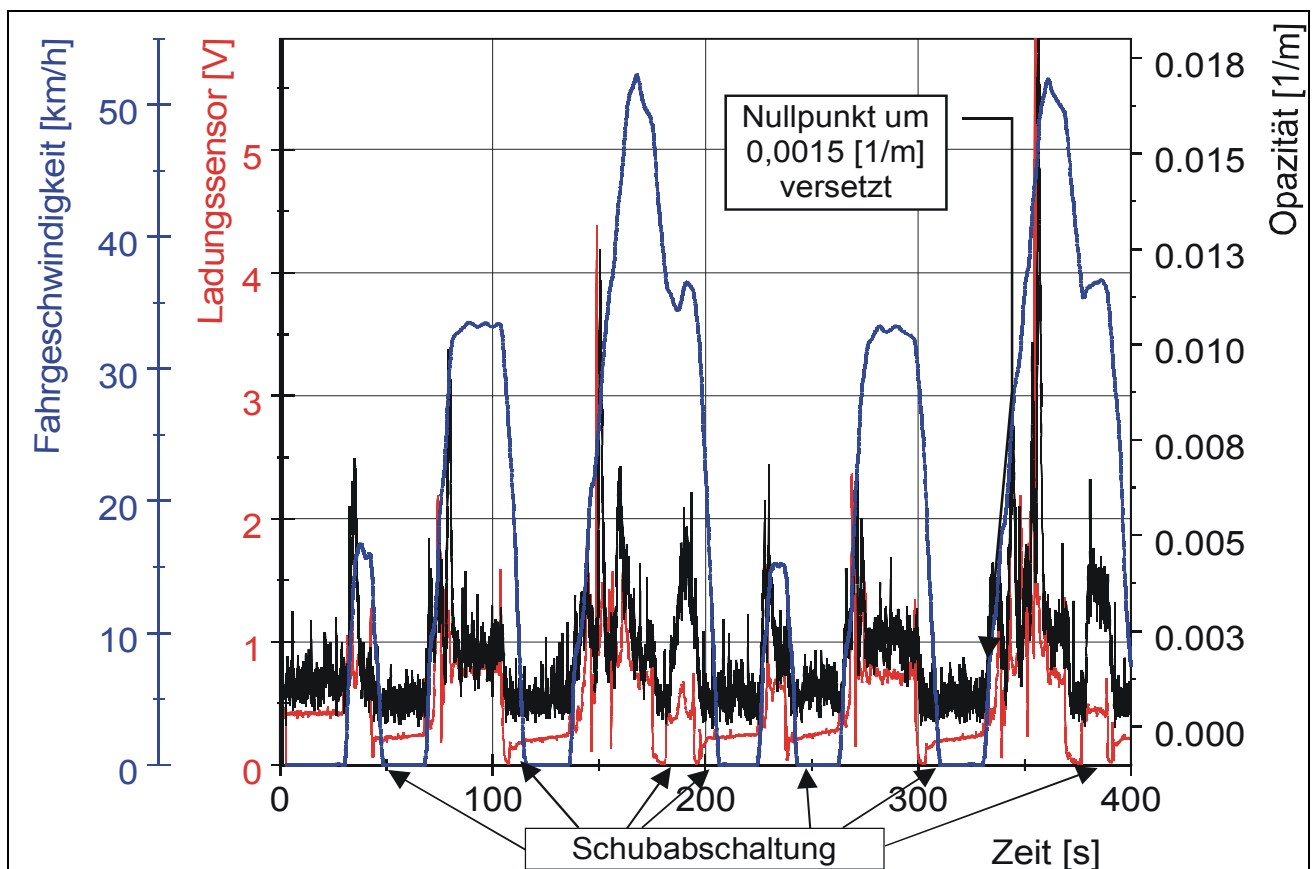


**Abb.: 2-20 Einbaulage des Sensors am Fahrzeug**

Durch die motornahen Anordnung des Sensors traten bei Vollast- Autobahnfahrt Temperaturen von 550 °C auf. Aufgrund der Verringerung des Isolationswiderstandes der Keramik entstanden bei diesen Temperaturen Nullpunktdriften des Messsignals, die aber verschwanden, sobald das Abgas unter 450 °C abkühlte.

Die gesamte gefahrene Strecke auf dem Rollenprüfstand und auf der Straße mit eingebautem Sensor betrug bis zum Abschluss des Vorhabens 1100 km.

Beispielhaft wird die Rußmessung in einem NEFZ- Zyklus in Abb.: 2-21 dargestellt. Der Signalverlauf des Rußsensors zeigt deutlich die Wirkung der Schubabschaltung bei jedem Gangwechsel.



**Abb.: 2-21 Anfangsbereich des ECE- Fahrzyklus**

Am Ende des Fahrzyklus erfolgt der Auslauf aus 120 km/h und zeigt diesen Effekt noch ausgeprägter. Eine Reaktion des Opazimeters ist nicht erkennbar (Abb.: 2-22).

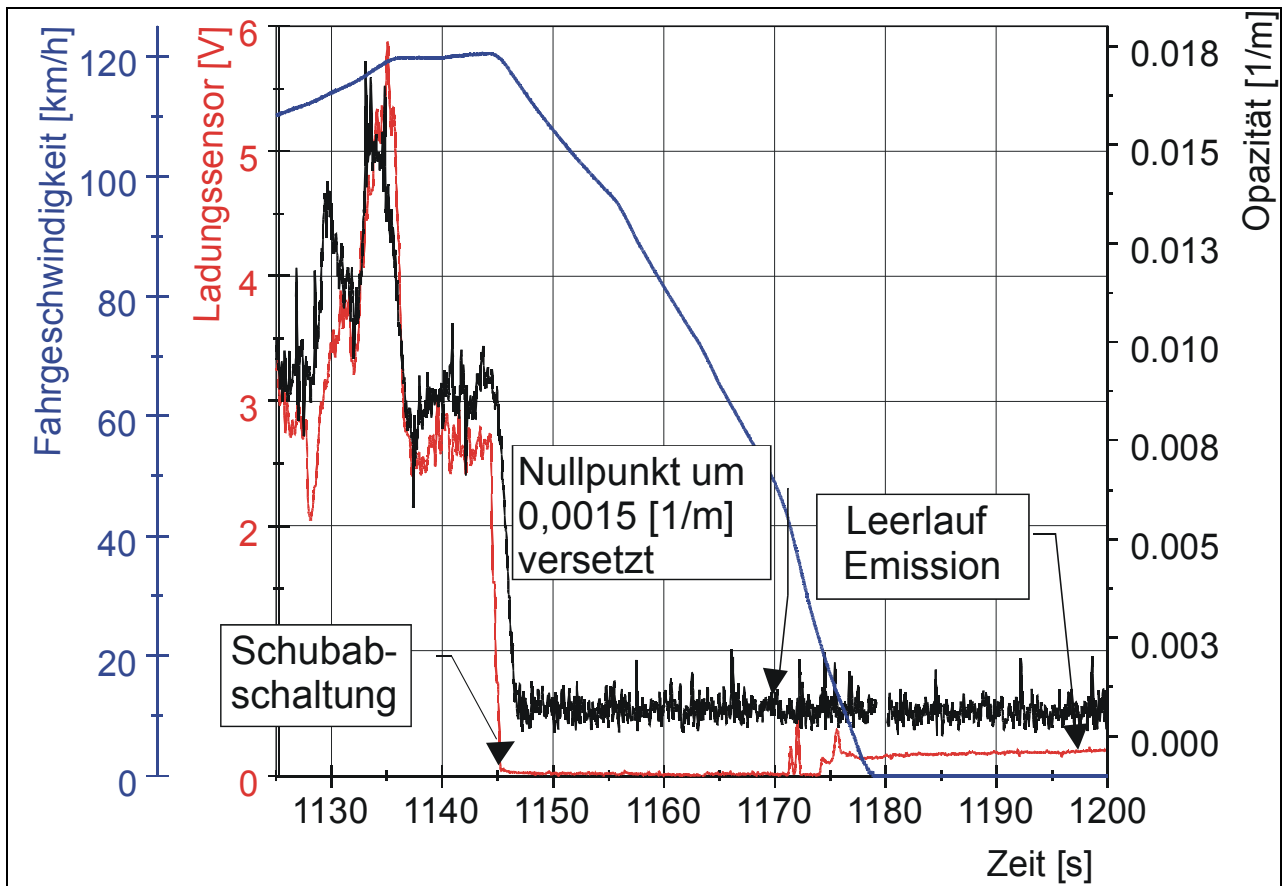


Abb.: 2-22 Auslauf des ECE- Fahrzyklus

### 3 Durchschlagsspannungssensor – Stand der Technik (Ausgangssituation, Aufbau, Prinzip)

Der Partikelsensor nach dem Durchschlagsspannungsprinzip wurde im Jahr 1998 von Prof. V. Gheorghiu (HAW-Hamburg) als Patent angemeldet, welches im Jahr 2000 erteilt wurde. /15/ Mehrere Versionen des Sensors und seines Steuergerätes wurden inzwischen entwickelt und getestet. Eine Version davon wurde bei der Hannover-Messe 2000 vorgestellt. Der technische Stand des Sensors ist im folgenden Kapitel ausführlich beschrieben.

#### 3.1 Funktionsprinzip

Im Prinzip ist dieser Rußsensor wie die Zusammenlegung einer Zünd- und einer Glühkerze aufgebaut. Die Mittelelektrode und die Masselektrode sind in bezug auf Strömungsrichtung positionierbar und der Keramikisolator der Mittelelektrode ist beheizbar.

Die minimale Höhe der Durchschlagsspannung in Gasen hängt insbesondere vom Elektrodenabstand und vom Zustand (Temperatur, Druck, Geschwindigkeit, Feuchtigkeitsgehalt und Rußpartikelkonzentration) des Gases ab. Im Falle einer ruhigen, partikelfreien Gasumgebung und eines (zwischen den Elektroden) homogenen elektrischen Feldes sehen diese Abhängigkeiten (als Paschen-Kurven bekannt) wie in Abb.: 3-1 aus.

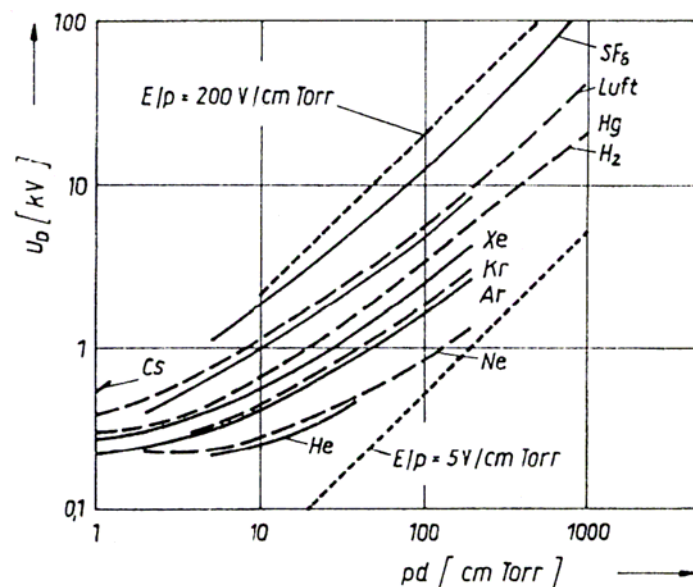


Abb.: 3-1 Paschen-Kurven für den statischen Durchschlag in Gasen,

wobei  $d$  den Elektrodenabstand,  $p$  den Gasdruck,  $E$  die elektrische Feldstärke und  $U_D$  die zwischen den Elektroden angelegte Hochspannung bedeuten.

Experimentell wurde nachgewiesen, dass die Kohlenstoff- bzw. Rußpartikel, die sich zwischen den Elektroden befinden und/oder auf der Kathode ablagern, das Freisetzen von Elektronen durch das anliegende elektrische Feld erleichtern. Hierdurch sinkt die für einen elektrischen Durchschlag notwendige Spannung um bis zu 70%. Außerdem wurde noch ein Einfluss auf die Stabilität der Spannung gefunden, bei

der ein elektrischer Durchschlag erfolgt. Beispielsweise lag bei einer Atmosphäre ohne Rußpartikel (reine Luft) die Streuung für die Durchschlagsspannung bei  $\pm 22\%$ . Unter dem Einfluss vom Ruß verringerte sich dieser Bereich auf  $\pm 4\%$ , und dies auch im Falle von sehr geringen Rußkonzentrationen.

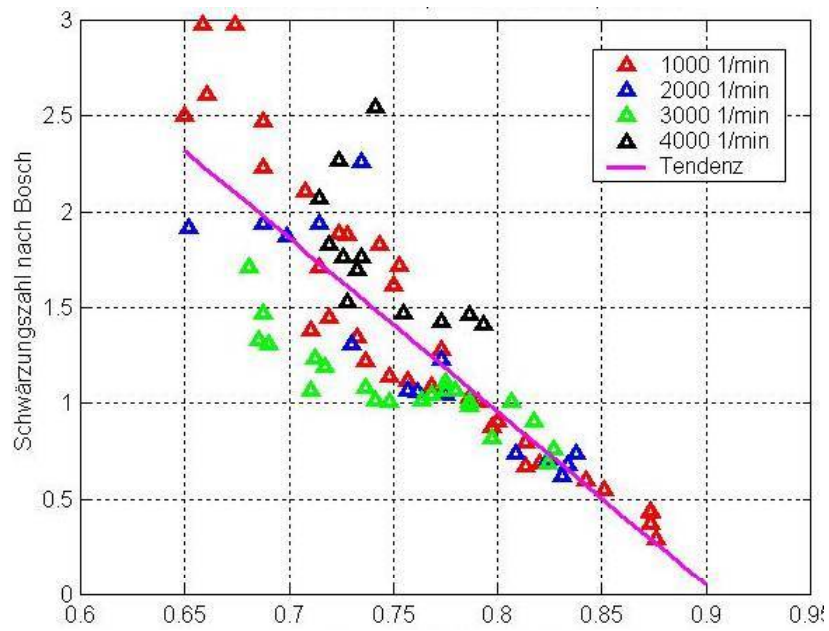
Das Prinzip des Messverfahrens /15/ vom SDSS beruht auf der Ermittlung des minimalen Niveaus der elektrischen Durchschlagsspannung im Abgas, bei dem es zum Funkenüberschlag zwischen zwei Elektroden kommt. Für die Funkenerzeugung im Abgasstrom ist ein bestimmtes Energieniveau erforderlich, welches über die Auswertung einer Funkenerkennung ermittelt wird. Zu diesem Zweck lädt das Sensorsteuergerät eine Zündspule mit einer bestimmten Energie auf. Danach wird die Zündspule über eine Funkenstrecke im Abgasstrom entladen. Ob die zur Verfügung stehende Energie zur Erzeugung einer Funkenentladung ausreicht hat, wird mithilfe der Funkenerkennung festgestellt. Diese Information wird an das Steuergerät weitergegeben und dort verarbeitet. War die Energie groß genug, dann kann die Energie zum Aufladen der Spule im nächsten Messzyklus verringert werden, andernfalls wird sie erhöht. Diese Prozedur wird ständig mit einer Frequenz von bis zu 200 Hz wiederholt. Auf diese Weise pendelt der Messwert, trotz statistischer Schwankungen bei der Funkenbildung, um das tatsächlich erforderliche Energieniveau.

Um zur Abhängigkeit zwischen minimaler Durchschlagsspannung und Rußkonzentration zu gelangen, muss man die Einflüsse der anderen Parameter (d.h. die Quereinflüsse) abziehen. Dazu sind neben dem Minimalniveau der Durchschlagsspannung auch alle Parameter während der Messung zu erfassen, welche beachtliche Quereinflüsse aufweisen. Da all diese Parameter sowieso für die Motorsteuerung benötigt werden und für deren Erfassung keine zusätzlichen Sensoren im Abgasstrang einzubinden sind, kann beim tatsächlichen Fahrzeugeinsatz darauf zurückgegriffen werden.

Seit 1998 bis zum Projektbeginn wurde der Sensor, sein Steuergerät und die Software in mehreren Varianten entwickelt und getestet. Der Sensor selbst wurde in dieser Zeit meist ohne Beheizung hergestellt. Aus diesem Grund konnte der Sensor wegen Verrußung des Keramikisolators nur im Falle von geringeren Rußkonzentrationen (d.h. Schwärzungszahlen nach Bosch kleiner eins) eingesetzt werden (Abb.: 3-2). /16/ /17/

Die noch während dieser Entwicklungsphase realisierten Konstruktionsvarianten des beheizten Sensors /16/, /17/ hatten nur eine sehr begrenzte Lebensdauer und konnten daher nicht ausführlich getestet werden. Die größten Schwierigkeiten in dieser Hinsicht wurden von den eingesetzten Isolierkeramiken und dem Keramikklebern zur Herstellung des Keramiktopfes bzw. der Keramikhülse (Abb.: 3-3) sowie von den eingesetzten Heizelementen verursacht. Aus diesem Grund konnten z.B. Mess- und Querempfindlichkeiten nicht ausreichend untersucht und eingeschätzt werden.

Für den Einsatz des Messverfahrens wurde der Messalgorithmus, in dem Programm Simulink (Toolbox von Matlab) entwickelt und anschließend auf eine echtzeitfähige Hardware der Firma dSPACE GmbH zuerst auf ein ds1005-System und später, in der zweiten Projekthälfte, auf ein MicroAutoBox-System implementiert. Somit wurde für die Entwicklung des Mess-Algorithmus ein sehr flexibles System geschaffen, das in sehr kurzer Zeit an jede neue Sensorvariante angepasst werden konnte.



Messgröße (von der minimalen Hochspannung abhängig)

Abb.: 3-2 Messergebnisse mit dem unbeheizten SDSS

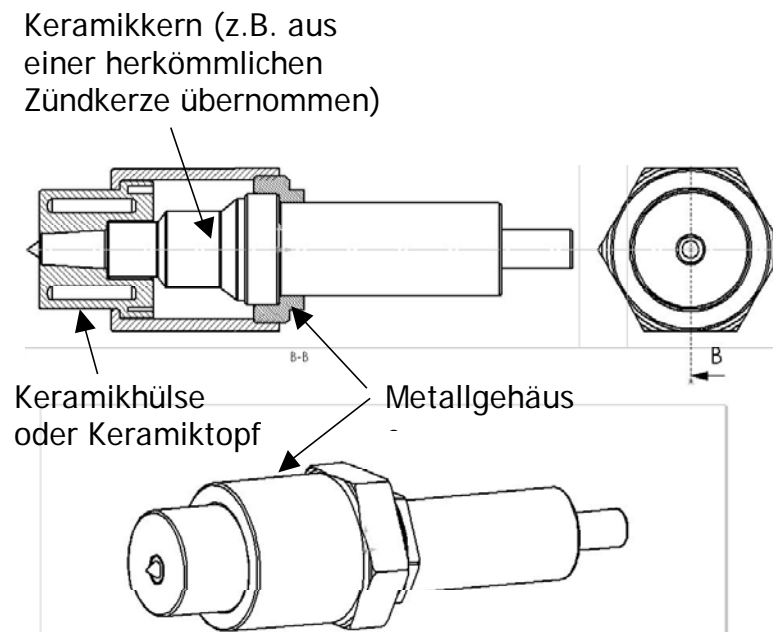


Abb.: 3-3 Beheizter SDSS in einer vorläufigen Version

## 3.2 Entwicklungsphase A: Sensor mit Zündkerzenkern und fremdgefertigtem Keramiktopf

### 3.2.1 Version 1: Sensor mit fremdgefertigten Heizelementen

Der Durchschlagspannungs-Rußsensor (Spark Discharge Soot Sensor=SDSS) wurde zuerst in der Version 1 (Abb.: 3-4) entwickelt und hergestellt, wobei für die Heizung zwei fremdgefertigte Heizelemente von jeweils 20 W eingesetzt wurden. Die durchgeführten Motorversuche haben gezeigt, dass diese Heizleistung für die vorliegenden Sensorabmessungen zu gering ist, um die Verrußung des Keramiktopfes um die Zentralelektrode zu verhindern.

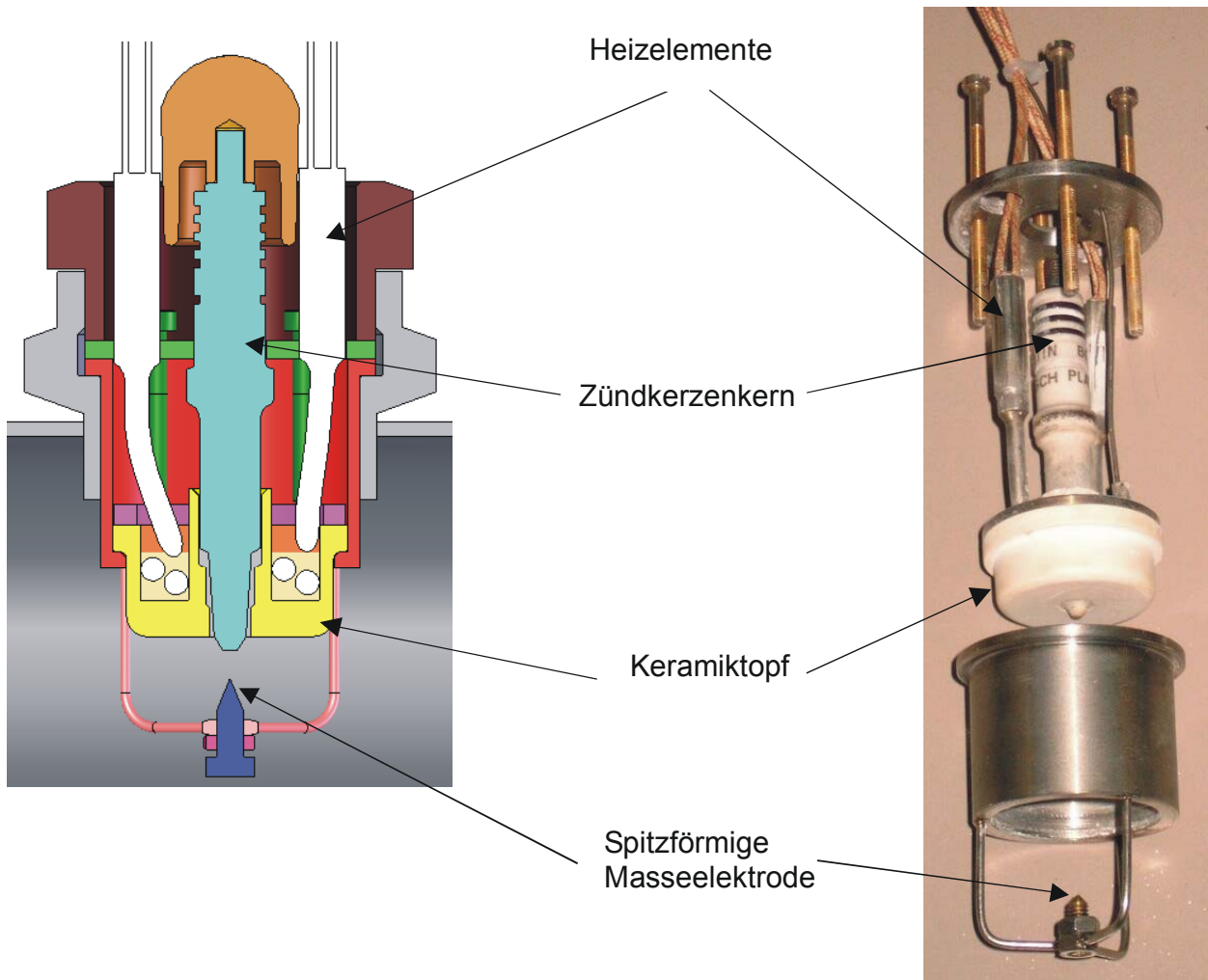


Abb.: 3-4 SDSS in Version 1

Die eingesetzten spiralförmigen Heizelemente besitzen die Vorteile, dass sie unempfindlich gegen mechanische und elektrische Belastungen sind und sehr gute (kalte) elektrische Anschlüsse besitzen. Da aber im Projektzeitraum die Weiteroptimierung der fremdgefertigten Heizelemente zeitlich nicht möglich war, musste auf selbstgefertigte Heizelemente zurückgegriffen werden /17/.



### 3.2.2 Version 2: Sensor mit selbstgefertigtem Heizelement aus Platindraht

Aus den vielen Möglichkeiten wurde für die Herstellung der Heizelemente Platindraht gewählt. Diese Auswahl ist durch die eindeutige Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Temperatur für Platin begründet. Nach einigen Versuchen wurde das Heizelement entsprechend der notwendigen Heizleistung und Lebensdauer ausgelegt.

Über die Messung des Heizstromes sowie der Heizspannung konnte man die Temperatur des Platindrahtes überwachen und regeln, wodurch Ausfälle des Heizelementes vermieden werden konnten. Um diese Messung zu ermöglichen, wurde eine ergänzende elektronische Endstufe in Auftrag gegeben, die diese beiden Messwerte und die Spannung eines Thermoelements zur Temperaturerfassung des Keramiktopfes mithilfe eines Mikroprozessors über CAN-Bus dem dSPACE-System liefern. Somit wurde eine sehr effektive galvanische Trennung zwischen dem Sensor und dem dSPACE-System realisiert.

Die Masseelektrode wurde in dieser Version diskförmig (weiterhin als flache Masseelektrode benannt) hergestellt, was eine erhöhte Sensibilität des Sensors (durch Einbeziehung eines größeren Abgasvolumens in das Messverfahren) ermöglichte (Abb.: 3-5) /17/,/18/.

Als große Schwierigkeit hat sich die Herstellung der Anschlüsse zum Platinheizdraht erwiesen. Das Schweißen von Platin- auf Kupferdraht gelang nicht immer und die Schweißstellen waren im Erfolgsfall sehr brüchig. Die Varianten mit mechanischen Verbindungen mittels Schraube und Mutter hatten sich mit der Zeit wegen den hohen Temperaturschwankungen gelockert und waren nach mehreren Arbeitsstunden stark oxidiert. Als Endlösung wurde die Verflechtung der Platindrahtenden mit mehreren Lizen eingesetzt, so dass der elektrische Widerstand und somit die Temperatur der Platindrahtenden wegen des stark erhöhten Querschnittes abnahmen. Damit konnten für diese elektrischen Anschlüsse übliche Kabelschuhe eingesetzt werden.

Die Abdichtung des Sensors gegen Abgase war ein weiteres Problem der Sensorversionen 1 und 2. Diese Dichtung sollte an zwei Stellen und zwar einerseits zwischen dem Zündkerzenkern und dem Keramiktopf und andererseits zwischen Keramiktopf und Metallhülse realisiert werden (Abb.: 3-5).

Zwischen Zündkerzenkern und Keramiktopf wurde ein Keramikkleber eingesetzt. Dabei wurden mehrere Keramikkleber ausgesucht, bestellt und getestet. Wegen der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten des Zündkerzenkernes und des Keramiktopfes entstanden immer wieder Risse, wodurch auch die elektrische Isolierung zwischen den Heiz- und Hochspannungskreisen nicht mehr ausreichte.

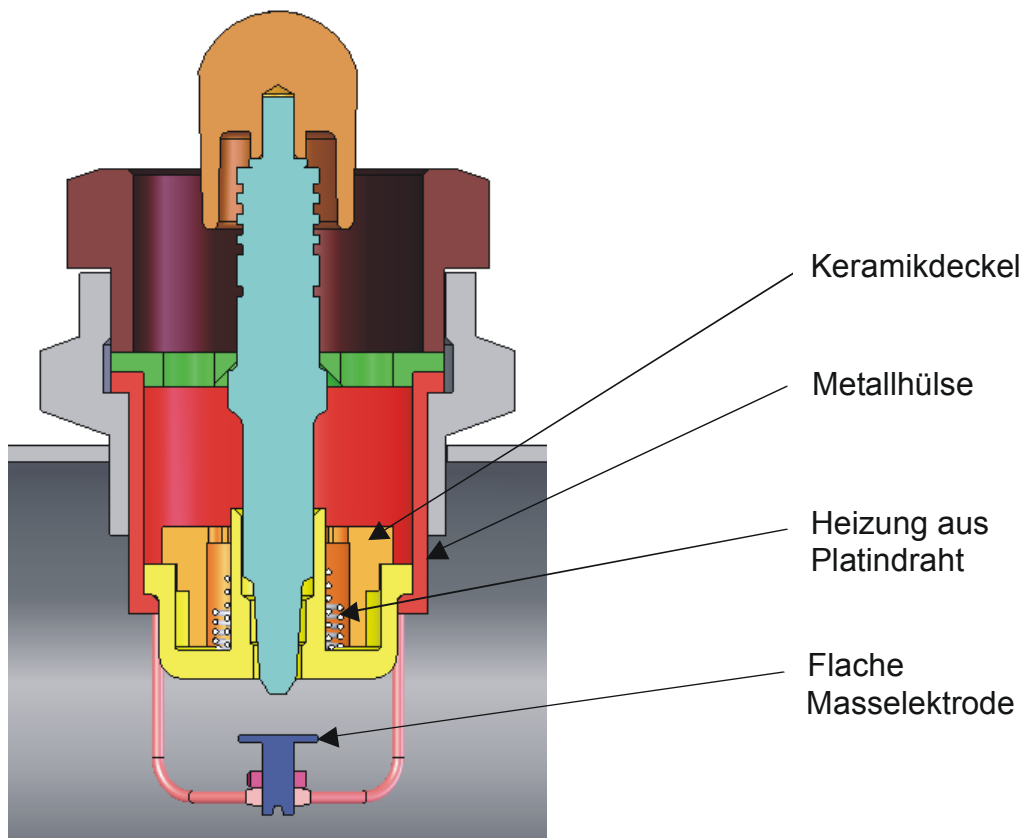
Zwischen Keramiktopf und Metallhülse wurde auch der Keramikkleber eingesetzt, wobei diese Abdichtung wegen der starken Ausdehnung der Metallhülse nicht funktionierte. Daher wurde ein passender Keramikdeckel gefertigt (s. auch Abb.: 3-4 in Lilafarbe dargestellt) und mit dem Keramiktopf zusammengeklebt.

Trotz dieser Maßnahmen konnte keine ausreichende Abdichtung gegen Abgase realisiert werden. Demzufolge waren weitere Anstrengungen notwendig, um gleichzeitig die Abmessungen zu reduzieren und die Dichtungsprobleme des Sensors zu beseitigen. Somit entstand die Version 3 des SDSS.

Der SDSS in der Version 2 wurde im Hause und auf dem Prüfstand des Forschungsinstituts Fahrzeugtechnik der HTW Dresden getestet. Für den Einsatz des Sensors in der Abgasanlage wurde ein Rohrabschnitt gefertigt, welcher mit Schellen in das Abgassystem an gewünschter Stelle befestigt werden konnte. Da schon vorher während der im Hause durchgeführten Prüfstandsversuche beobachtet wurde,



dass der Sensor bei Abgastemperaturen oberhalb von 350 bis 400°C nicht richtig funktioniert, wurde er geschützt um 180° verdreht von unten in das Abgasrohr eingesetzt /17/, /18/.



**Abb.: 3-5 SDSS in Version 2**

Nach mehreren vorläufigen Tests wurde die Kommunikation zwischen dem dSPACE-System und dem FIF-Prüfstand-Datenerfassungssystem hergestellt und verbessert, so dass eine simultane Datenerfassung mit einer Abtastrate von 1 Sekunde auf beiden Systemen ermöglicht wurde.

### 3.3 Entwicklungsphase B: Sensor ohne Zündkerzenkern aus selbstgefertigten Keramikteilen

#### 3.3.1 Versionen 3 und 4: Sensor mit getrenntem Anschluss für die Hochspannung und spitzförmiger bzw. flacher Masseelektrode

In den Versionen 3 bis 5 des Sensors wurde auf den Zündkerzenkern verzichtet und der Keramiktopf wurde den Abmessungen der Platindrahtheizspirale entsprechend angepasst. Dabei wurde insbesondere darauf geachtet, die Wärmeverluste am Abgasrohr gering zu halten und die Abdichtung gegen Abgase zu verbessern.

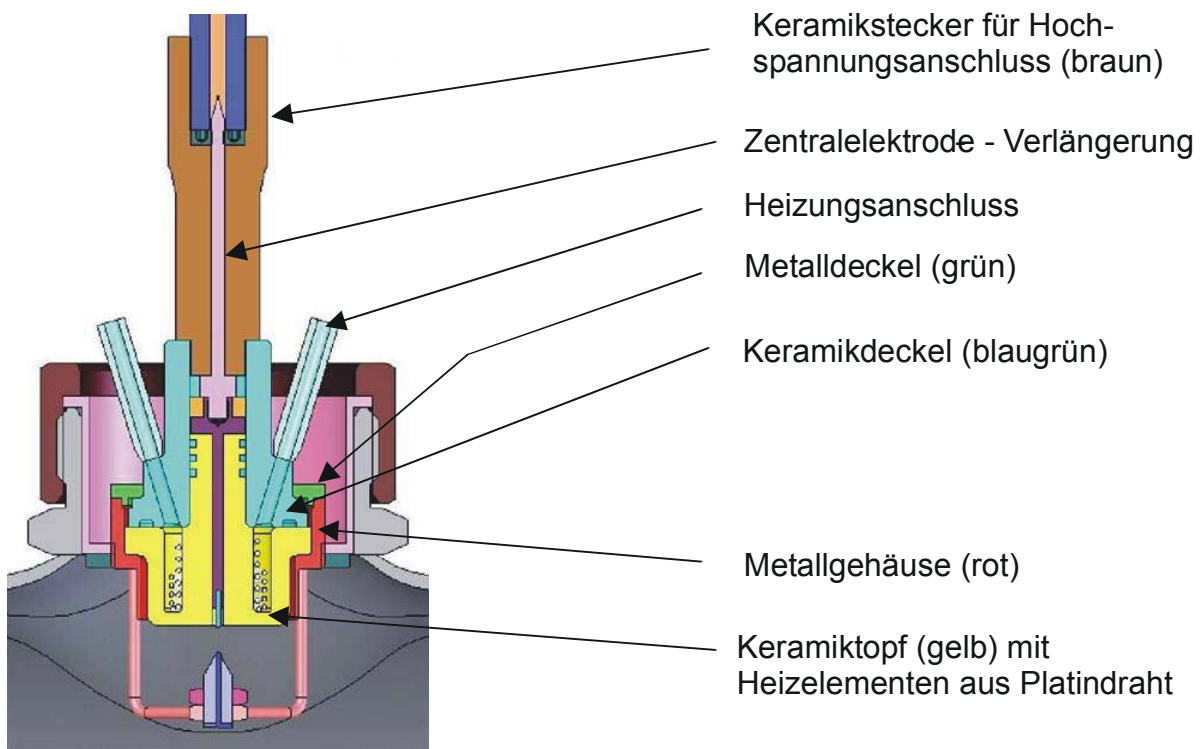


Abb.: 3-6 SDSS in Version 3

Der Keramikdeckel und der Keramiktopf wurden nach dem Einsatz der Heizspirale aus Platin zusammen verklebt. Das Metallgehäuse und der Metalldeckel wurden anschließend zusammengeschweißt.

Die Zentralelektroden-Verlängerung und die Zentralelektrode wurden zusammen verschraubt, wobei auch der Keramikstecker für den Hochspannungsanschluss am Sensor befestigt werden konnte. Während der Prüfstandsversuche wurde in dieser Verbindungsstelle beobachtet, dass bei hohen Sensor- und Abgastemperaturen immer wieder Entladungen zwischen Hochspannungs- und Heizkreis auftraten, was zur Verfälschung der Messsignale führen kann.

Die einfache Anbindung des Hochspannungskabels (einfach gesteckt, s. Abb.: 3-6) verursachte große elektromagnetische Störungen rund um den Sensor, die selbst die Funkerkennung des Sensorsteuergerätes stellenweise unmöglich machte. Aus diesem Grund wurde in der Version 4 der

Keramikstecker als Verlängerung neu gestaltet, wobei das Hochspannungskabel über einen üblichen Zündkerzenstecker an diesen angeschlossen wurde.

### 3.3.2 Version 5: Sensor mit integriertem Anschluss für die Hochspannung und spitzförmiger bzw. flacher Masseelektrode

Um die vorher erwähnten Entladungen in der Verbindungsstelle zwischen Hochspannungs- und Heizkreis zu eliminieren, wurden der Keramikdeckel (blaugrün in Abb.: 3-6) und die Keramikverlängerung (braun in Abb.: 3-6) zusammen aus einem einzelnen Keramikstück gefertigt (s. Abb.: 3-7). Das gleiche gilt auch für die Zentralelektrode /19/.

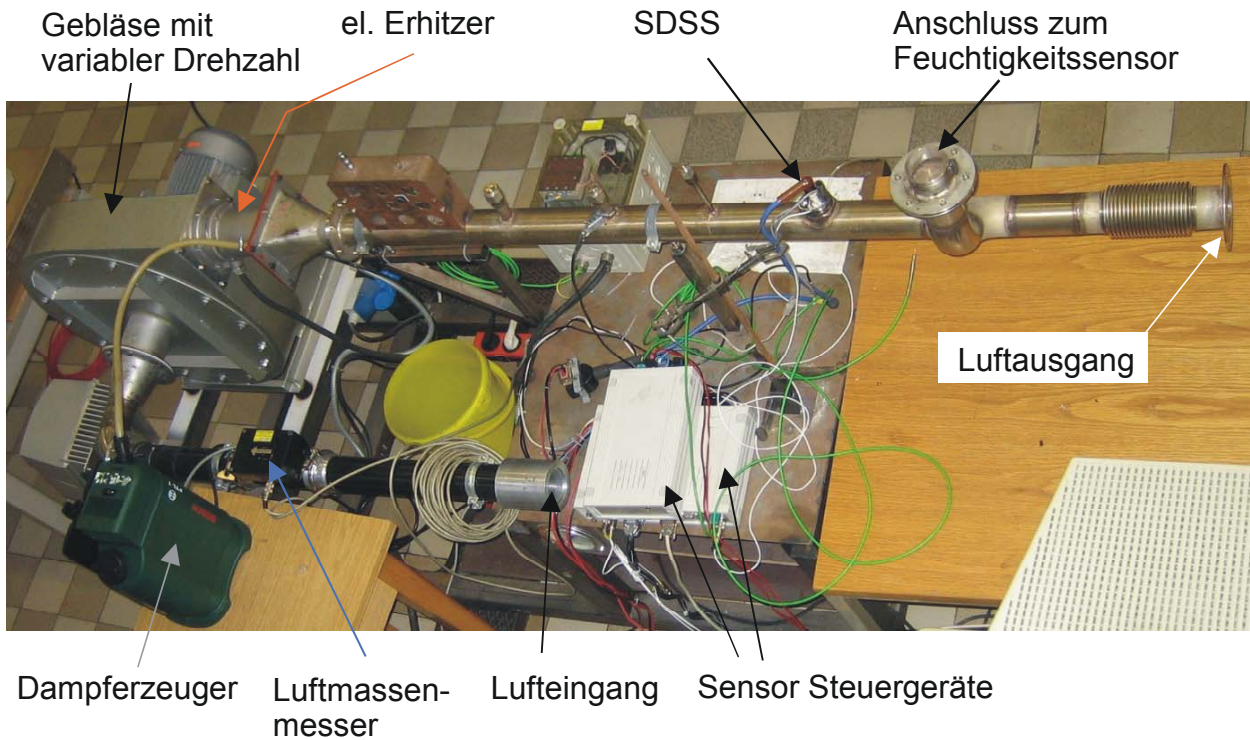


**Abb.: 3-7 SDSS in Version 5**

Dieser Sensor wurde ebenfalls im Hause als auch am Motorenprüfstand der HTW Dresden untersucht. In dieser konstruktiven Variante konnten alle bisher bekannten Probleme behoben werden.

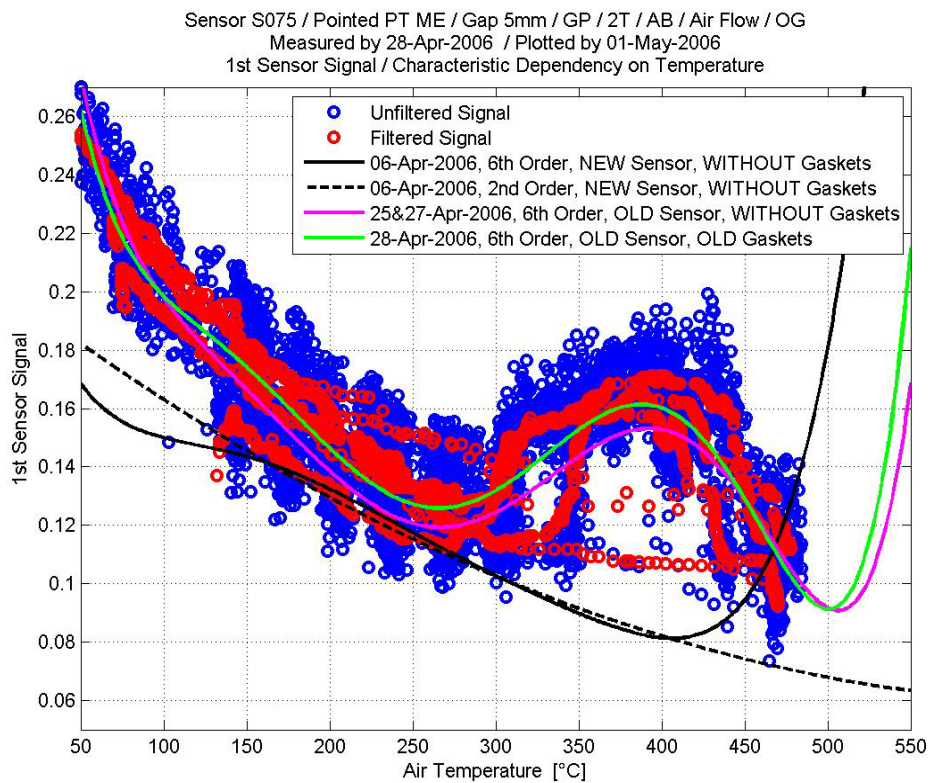
Jedoch wurde während der abschließenden Prüfstandversuche am Motor und am Gebläseprüfstand (s. Abb.: 3-8) herausgefunden, dass sich die Kennlinie der Abgastemperatur (als Quereinflussparameter) mit der Zeit ändert (s. Abb.: 3-9, Bereich 250°C–450°C), was zu einer drastischen Veränderung der Kennlinie und somit zur Verfälschung des Sensorsignals führt. Als Ursachen dafür könnten,

- a) Alterungsprozess der eingesetzten Isolierkeramik und
  - b) Störungen in der Funktion der Steuergeräteelektronik (z.B. Funkenerkennung)
- in Frage kommen.



**Abb.: 3-8 Gebläseprüfstand zur Untersuchung von Quereinflussparameter:**

**Temperatur, Feuchtigkeit, Massenstrom und Strömungsgeschwindigkeit des strömenden Gases, die strömende Luft kann auf maximal 650°C erwärmt werden.**



**Abb.: 3-9 Temperatur-Kennlinien des SDSS in der Version 5**

### 3.4 Darstellung des Sensorverhaltens beim Einsatz im Abgasstrang

#### 3.4.1 Sensor in der Version 2 (mit flacher Masselektrode)

Aus allen Messergebnissen, die mit diesem Sensor durchgeführt wurden, werden in diesem Abschnitt nur stationäre Last- und Drehzahl-Stufen ohne Partikelfilter (Abb.: 3-11) sowie einfache Variationen der Rußkonzentration (Abb.: 3-12) dargestellt /17/,/18/.

Dieser Versuch dient der Überprüfung der prinzipiellen Funktionsweise des Sensors, und es können folgende Aussagen getroffen werden.

Im Bereich unter 350 °C Abgastemperatur verändert sich der Signalwert bei Änderung des Lastpunktes. Dies zeigt, dass der Sensor in Abhängigkeit von Abgasparametern (vorzugsweise die Rußkonzentration) reagiert. Da sich bei diesen Versuchen neben der Rußkonzentration ebenfalls der Abgasmassenstrom und die Temperatur ändert, ist es das Ziel weiterer Untersuchungen einzelne Einflussfaktoren herauszustellen.

Bei sehr hohen Rußkonzentrationen wird festgestellt, dass der Sensor verrußt und das Hauptmesssignal unplausible Werte liefert. Daher wurde ein zweites Sensorsignal einbezogen, die den verrußten Zustand schnell erkennt (Abb.: 3-10 in beiden Bildern).

Die Abgastemperaturbegrenzung wurde hier als das größte Problem des Sensors in dieser konstruktiven Variante erkannt. Mithilfe von späteren Versuchen am Gebläseprüfstand (s. Abb.: 3-8) wurde dieses Fehlverhalten des Sensors nachgewiesen (Abb.: 3-10 rechts) jedoch die Ursachen nicht weiter untersucht, da die neuen Sensorvarianten schon in der Bearbeitung und in weiteren Tests waren. Das „unruhige“ Verhalten des Sensors stellt sich bei Luft schon bei ca. 350 °C aber sein totaler Ausfall erst nach 450 °C ein (s. den Bereich markiert mit der Ellipse in Abb.: 3-10).

Als Ursache dafür, wird der Einsatz der flachen Elektrode vermutet. Daher wurde in den weiteren Versionen ausschließlich eine spitzförmige Masselektrode eingesetzt. Allerdings wurde dabei aber gleichzeitig die Empfindlichkeit des Sensors verringert.

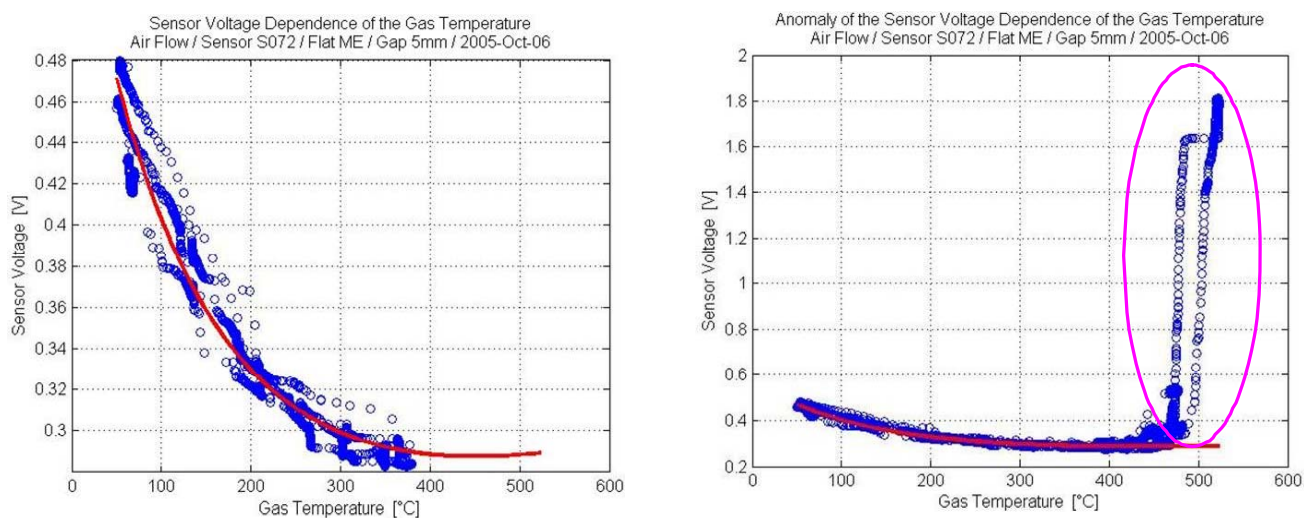


Abb.: 3-10 SDSS in der Version 2. Temperatur-Kennlinien in Luft (Gebläseprüfstand)



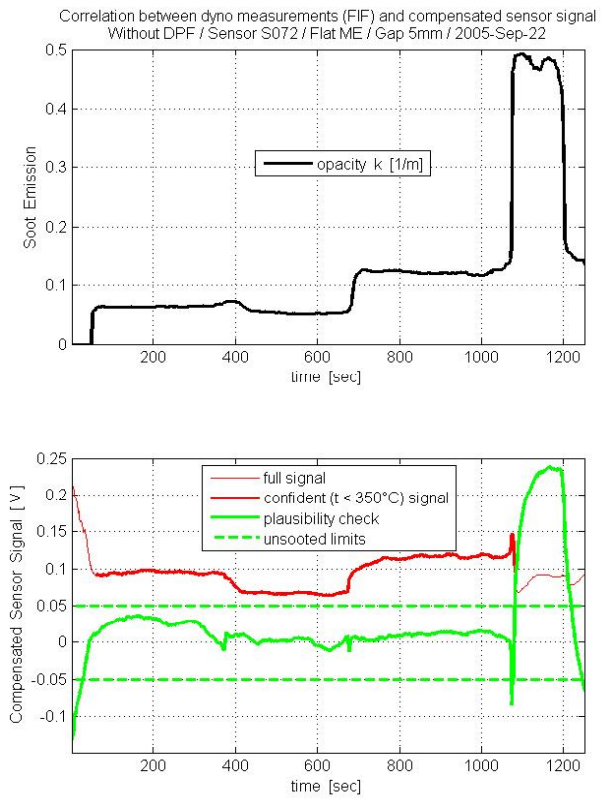
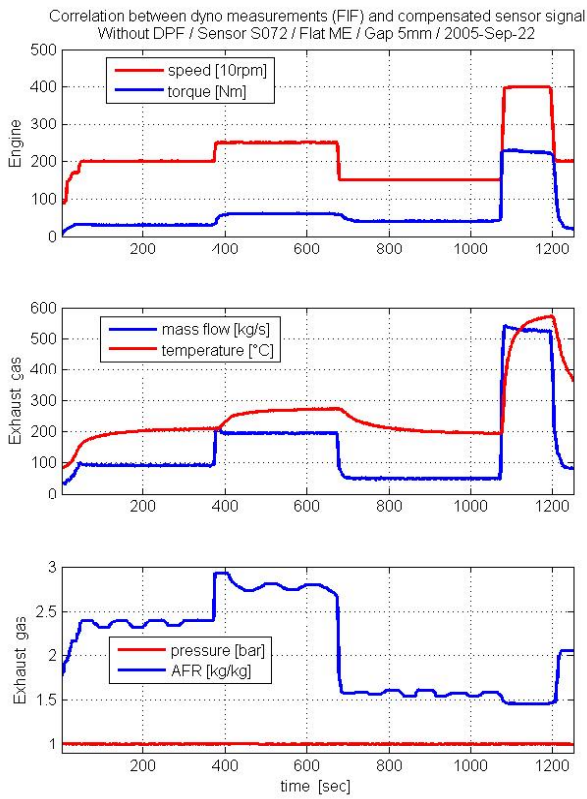


Abb.: 3-11 SDSS in der Version 2. Last- und Drehzahl-Sprünge (ohne DPF)

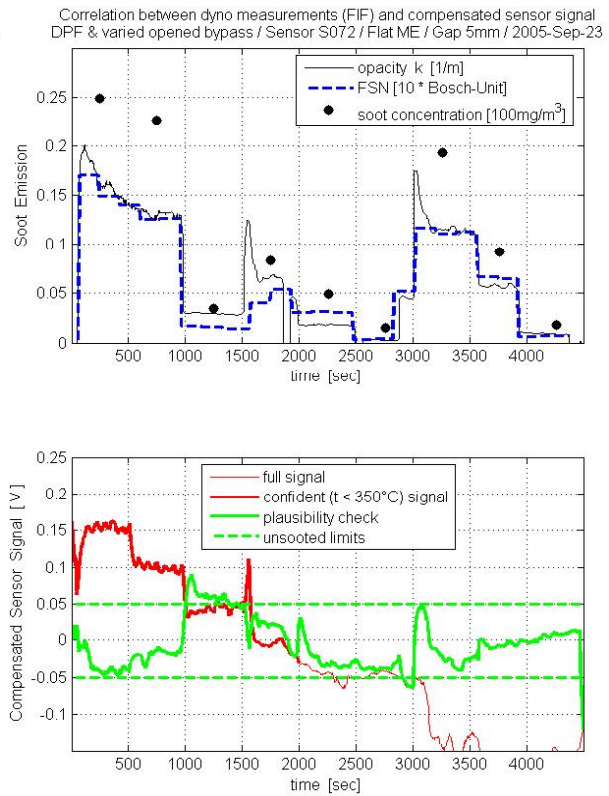
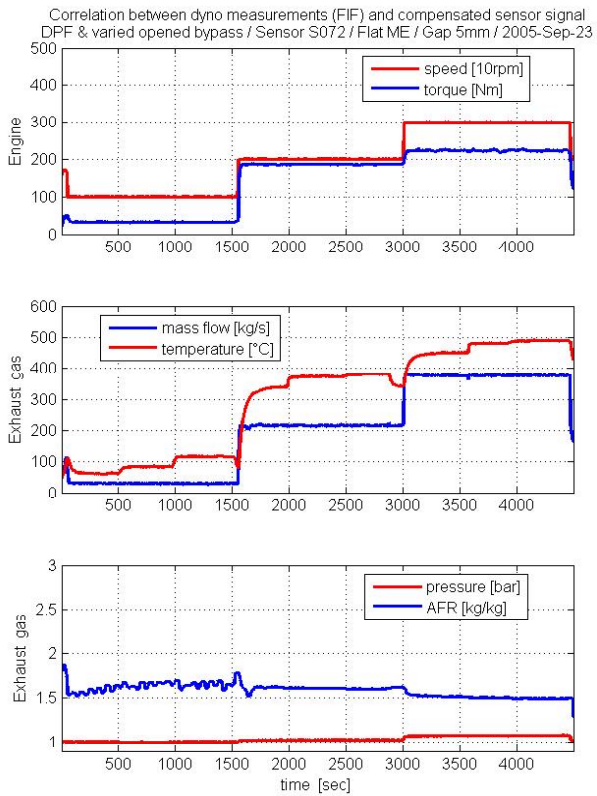


Abb.: 3-12 SDSS in der Version 2. Variation der Öffnung der Bypassklappe (mit DPF)

### 3.4.2 Sensor in der Version 5 (mit spitzförmiger Masselektrode)

Aus allen Messergebnissen, die mit diesem Sensor durchgeführt wurden, werden in diesem Abschnitt nur ESC-Zyklen mit einem funktionsfähigen (Abb.: 3-13) und einem absichtlich mechanisch beschädigten Partikelfilter dargestellt (Abb.: 3-14) /19/.

Aus deren Analyse können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Das zweite Messsignal des Sensors (grün) wurde nicht nur zur Erkennung des verrußten Zustandes sondern auch ständig neben dem Hauptsignal eingesetzt.

Beide Messsignale geben qualitativ die Änderungen der Rußkonzentration (mit Einfluss der Abgastemperatur) wieder, wobei quantitative Aussagen über ihre Höhe nicht getroffen werden können. Als Ursache dafür, wurden die sich ändernden Temperatur-Kennlinien (s. Abb.: 3-9) erkannt.

Eine mögliche Auswertung der Sensorsignale ergibt sich, wenn man die Verläufe der Sensorsignale und der Rußkonzentration über den ESC -Zyklus integriert (Abb.: 3-15). Die integrierten Sensorsignale deuten auf die Erhöhung der Rußkonzentration hin, und dies unabhängig davon, welche Temperatur-Kennlinie (aus allen verfügbaren) eingesetzt wurde.

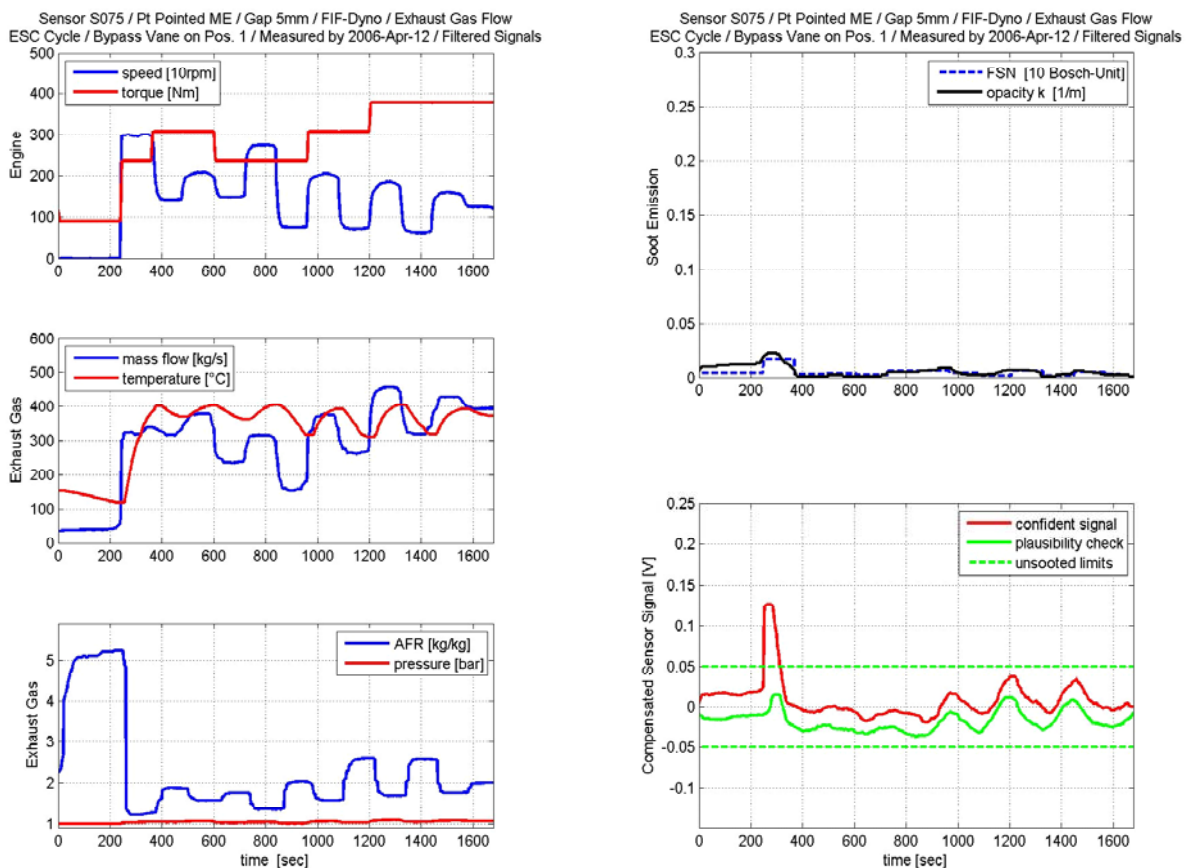


Abb.: 3-13 ESC Zyklus mit funktionsfähigem DPF

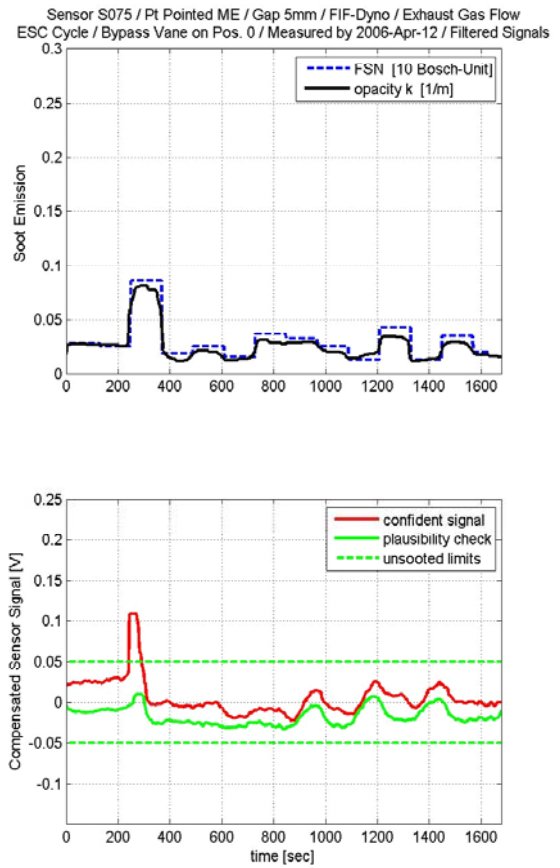
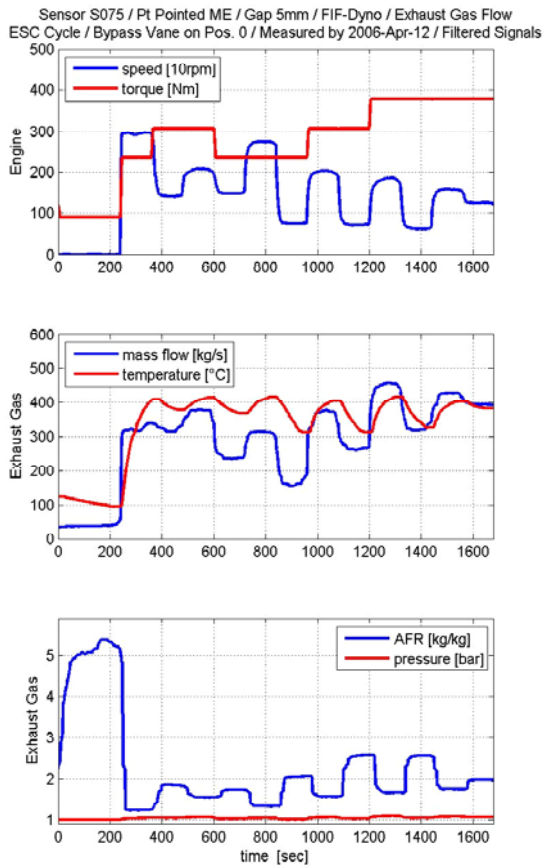


Abb.: 3-14 ESC Zyklus mit beschädigtem DPF

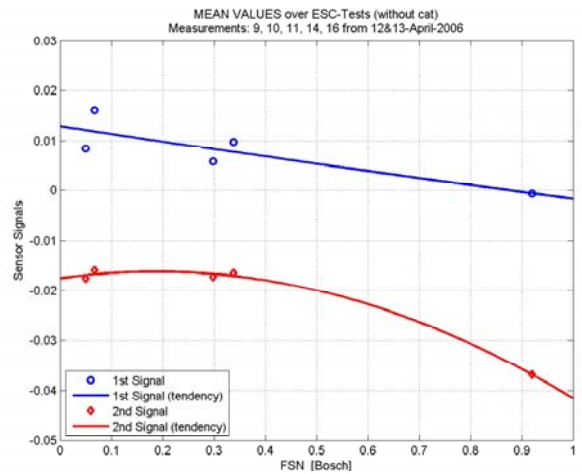
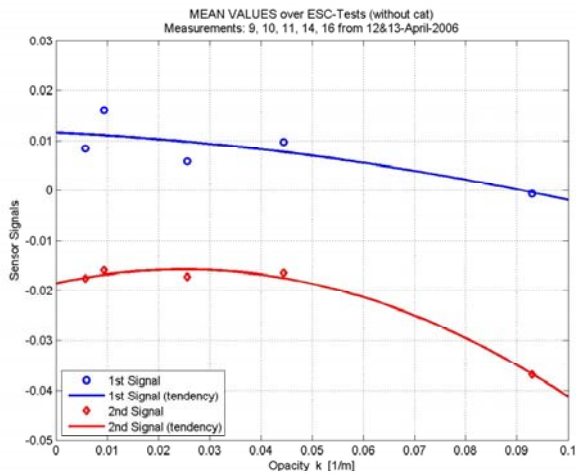


Abb.: 3-15 Integralwert in Bezug auf Opazität (links) und FSN (rechts)



## 4 Untersuchung zur Darstellung der Anwendbarkeit der Sensorprinzipien am Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik

Hauptziele dieser Untersuchung war die Darstellung der grundlegenden Funktionsfähigkeit der zwei Partikelsensoren und die Bewertung dieser Prinzipien. Dabei spielte die Anwendbarkeit im praktischen Motorbetrieb eine wesentliche Rolle.

Damit die Messverfahren für den Einsatz bei Fahrzeugen mit Minimalemissionen später eingesetzt werden können, ist ein wesentlicher Gesichtspunkt die Überprüfung der Korrelation der Sensorsignale zur aktuellen Partikelmesstechnik.

Da die Sensorsignale neben der Rußkonzentration ebenfalls von anderen Abgasparametern wie Abgastemperatur, Abgasmassenstrom u.a. beeinflusst werden, erfolgen hauptsächlich Untersuchungen bei konstanten Betriebspunkten.

Die Weiterentwicklung der Sensoren in Bezug auf die Minimierung der Quereinflussfaktoren bzw. die Kompensation der Sensorsignale sowie weitere Untersuchungen im dynamischen Motorbetrieb wären Bestandteil eines möglichen Folgeprojektes.

### 4.1 Versuchsmotor, Prüfstand und Messtechnik

Die durchgeführten Untersuchungen am Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik der HTW Dresden wurden an einem PKW-Motorprüfstand durchgeführt. Bei dem eingesetzten Versuchsträger handelte es sich um einen serienmäßigen Dieselmotor. Alle während der Versuche aufgenommenen Daten wurden über das Automatisierungs- und Datenerfassungssystem kontinuierlich aufgezeichnet und zur Weiterverarbeitung bereitgestellt.

#### 4.1.1 *Verwendeter Motor*

Für die Untersuchungen wurde folgender Dieselmotor eingesetzt:

Motortyp:	DW12 TED4 Common Rail (PSA)
Hubvolumen [l]:	2,2
Nennleistung [kW]:	98
Maximales Drehmoment [Nm] :	315

Für die Versuche wurden DIN Diesel mit einem Schwefelgehalt von weniger als 5 ppm verwendet.

#### 4.1.2 *Prüfstandstechnik*

Für die Untersuchungen steht folgender Motorenprüfstand zur Verfügung:

Belastungseinheit:	Gleichstrom-Maschine
Leistung [kW] :	134
Drehmoment [Nm] :	350
Drehzahlbereich [U/min] :	9000

Automatisierung :	CATS <sup>NT</sup> von Siemens
Kraftstoffmesseinrichtung :	AVL 733 S
Dynamische Kraftstoffmessung:	PLU 116 H-60
Luftmassenstrommessanlage :	SensyflowP
Abgasmessanlage :	ABB, Eco Physics
Partikelmessanlage :	NOVA Microtrol 3
Schwärzungszahl nach Bosch:	Smokemeter AVL 415 S
Opazität:	Opazimeter AVL 439

Im Folgenden sind die als Vergleichsmesstechnik eingesetzten Messgeräte in Ihrer Funktion kurz beschrieben. Dabei wird auf die Messung der gravimetrischen Partikelemission, die Trübungsmessung sowie auf die Messung der Schwärzungszahl näher eingegangen.

### Gravimetrische Partikelmessung (Teilstromverdünnungstunnel)

Zur Ermittlung der Rußkonzentration im Abgas wird die Methode der Teilstromverdünnung angewandt. Dabei wird ein bestimmtes Abgasvolumen mit Hilfe einer Sonde entnommen und dem Verdünnungstunnel zugeführt. Alle Abgasbestandteile die sich nach anschließender Verdünnung des Abgases mit Luft und einer damit verbundenen Abkühlung des Abgases unter  $52\text{ °C}$  auf einem speziellen Messfilter abscheiden lassen, zählen als Partikel. Über die auf dem Filterblättchen abgelagerte Partikelmasse wird die Rußkonzentration unter Berücksichtigung der Verdünnungsparameter berechnet. In Abb.: 4-1 ist das Funktionsprinzip schematisch dargestellt.

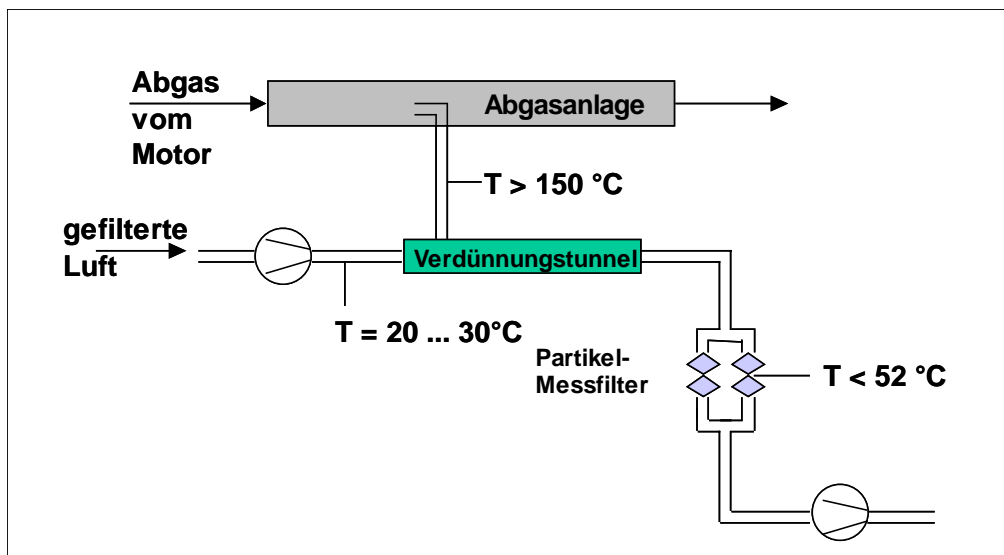


Abb.: 4-1 Funktionsprinzip der gravimetrischen Partikelmessung mit Teilstromverdünnung

### Trübungsmessung (Opazimeter)

Die Trübungsmessung mit dem Opazimeter stellt eine Möglichkeit der kontinuierlichen Überwachung des Rauchgases dar. Dabei wird die Lichtschwächung zwischen einer Lichtquelle und einem Empfänger gemessen. Die Trübung des Messgases wird mit dem Absorptionskoeffizienten über das

Lambert – Beersche – Gesetz berechnet. Dabei wird die Intensität der elektromagnetischen Strahlung in einem Medium, hier ein mit Partikeln beladenes Abgas, geschwächt. Das Prinzip ist in Abb.: 4-2 gezeigt.

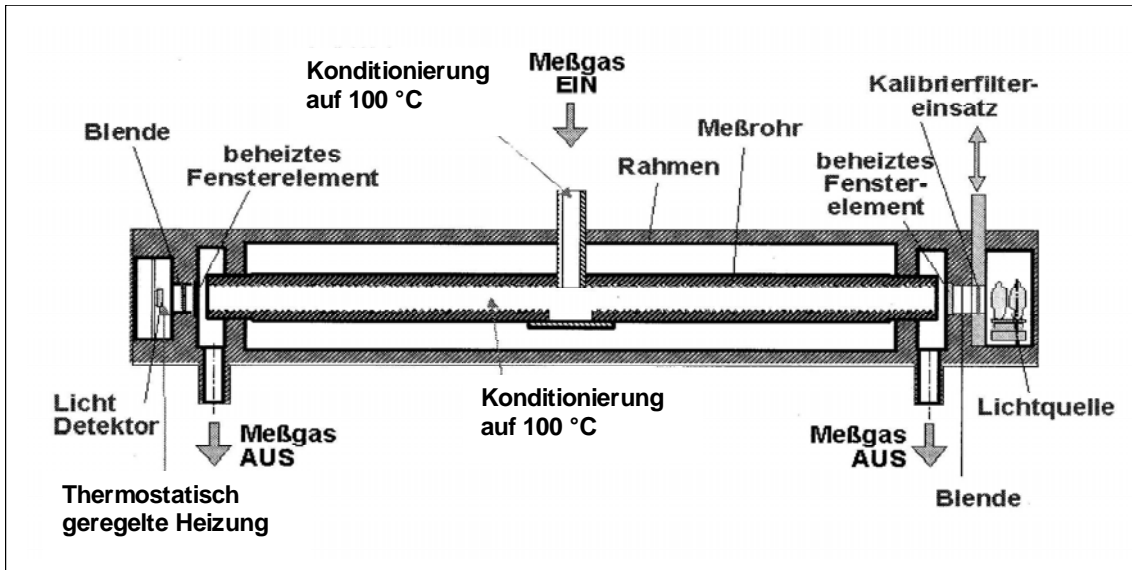


Abb.: 4-2 Funktionsprinzip der Trübungsmessung (Quelle: AVL)

### Schwärzungsmessung nach Bosch (Lichtreflexionsverfahren)

Bei der Messung der Schwärzungszahl wird das Lichtreflexionsverfahren angewandt, um eine Aussage über die Rußemission im Abgas zu bekommen. Dabei wird ein bestimmtes Volumen dem Abgas entnommen und über einen speziellen Filter gesaugt. Die Messgröße ist dabei die Filterschwärzung die aus der Lichtreflexion vor und nach der Filterbeladung ermittelt wird, ihr Wert kann zwischen 0 und 10 liegen. Es besteht eine Korrelation der Schwärzungszahl gegenüber der Rußkonzentration (MIRA - Korrelation), allerdings ist die Güte dieses Zusammenhanges stark von der Zusammensetzung der Rußpartikel abhängig. Das Prinzip der Schwärzungsmessung zeigt Abb.: 4-3.

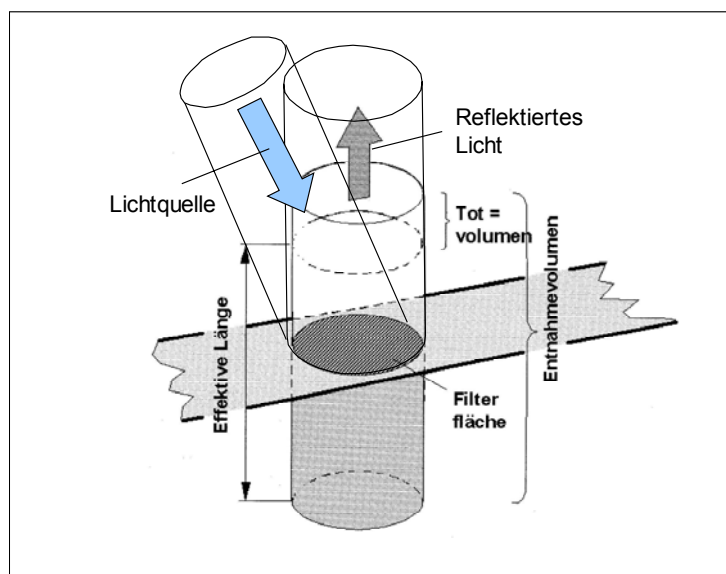


Abb.: 4-3 Funktionsprinzip der Schwärzungsmessung

### 4.1.3 Bypass-System zur Realisierung unterschiedlicher Rußkonzentrationen

Damit die Sensoren bei unterschiedlichen Rußkonzentrationen, aber konstantem Motorbetriebspunkt untersucht werden können, wurde ein Bypass-System zur Aufteilung des Abgasmassenstromes entwickelt. Damit ist es möglich bei quasi stationären Versuchsbedingungen die Partikelemission zu ändern, um so eine Korrelation der Messverfahren zu Rußkonzentration zu ermitteln. Ändert man die Stellung der Drosselklappe, so verändern sich gleichzeitig die Massenströme in den einzelnen Teilstrecken und es ergibt sich ein definierter Partikelmassenstrom. Abb.: 4-4 zeigt den Aufbau des Systems und dessen Funktionsweise.

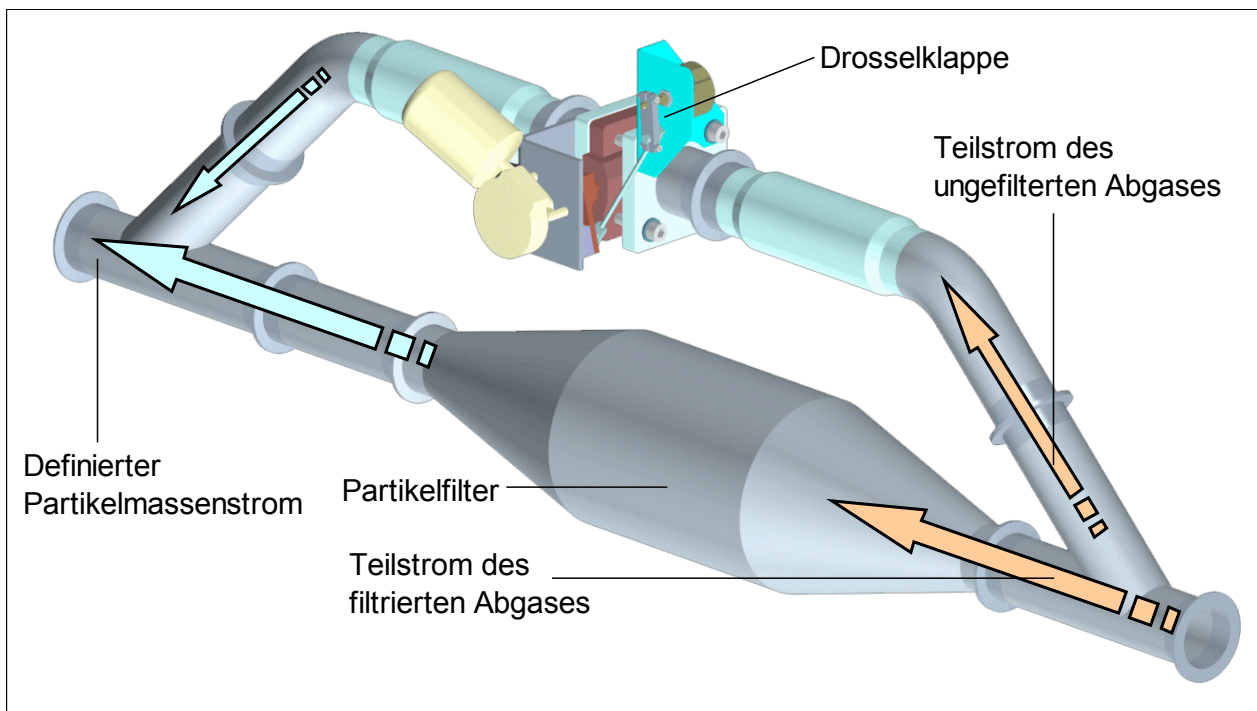


Abb.: 4-4 Bypass-System

Das Prinzip eines Partikelfilters ist in Abb.: 4-5 dargestellt. Bei den im Projekt eingesetzten Partikelfiltern handelt es sich um Wabenfilter mit wechselseitig verschlossenen Kanälen. Es werden dabei Filter im Serienzustand eingesetzt, die aus Cordierith bzw. Siliziumcarbid bestehen.

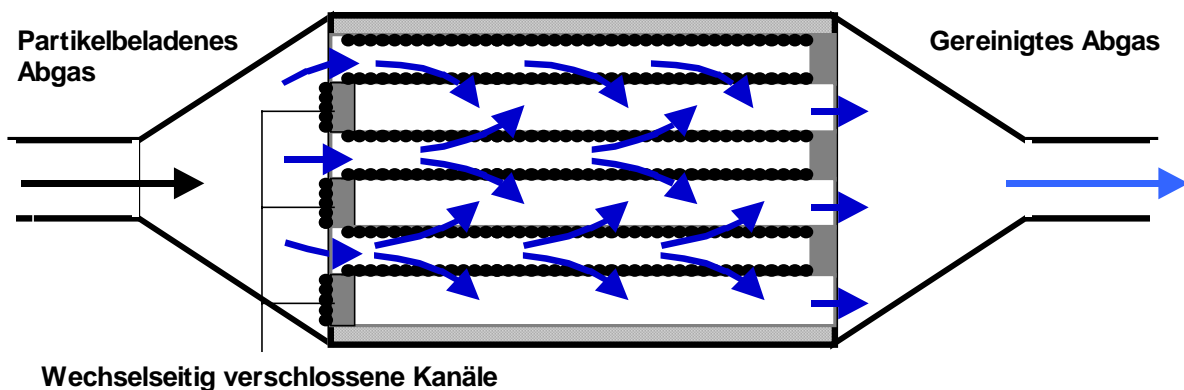


Abb.: 4-5 Prinzipschema eines Partikelfilters /6/

#### 4.1.4 Darstellung des gesamten Versuchsaufbaus

Die Anordnung der verwendeten Prüfstandskomponenten ist in Abb.: 4-6 dargestellt. Dabei erfolgt der Einbau des Sensors in ausreichendem Abstand zum Bypass-System. Als Vorgabe für den Einbauort wird dabei der 8-fache Rohrdurchmesser als Einlaufstrecke angenommen. Dahinter folgt die Anordnung von Entnahmesonden für die Partikel- und Abgasmesstechnik. Zur genauen Ermittlung der Abgasgeschwindigkeit wird unmittelbar nach dem Sensor die Temperatur und der Druck im Abgas gemessen. Für spezielle Versuche wurde der Versuchsaufbau noch um einen, vor den Partikelfilter geschalteten, Oxidationskatalysator erweitert.

In Abb.: 4-7 ist ein Foto des gesamten Abgasstranges mit dem eingebauten Bypass-System dargestellt.

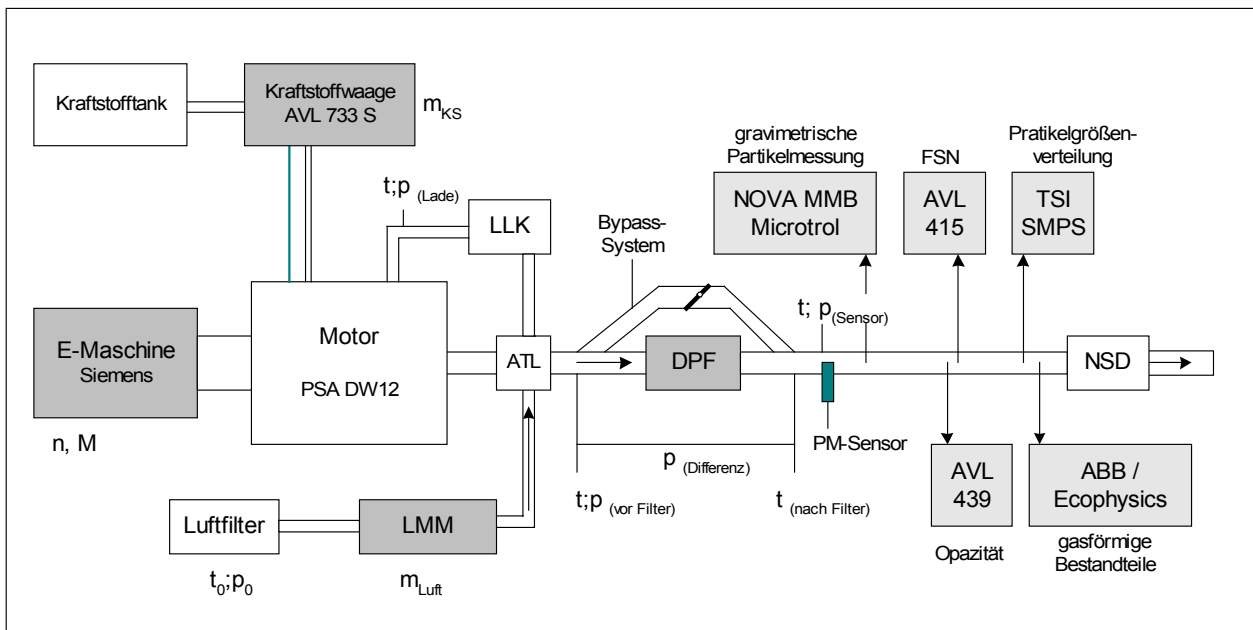


Abb.: 4-6 Schematische Darstellung des Prüfstandsaufbaues

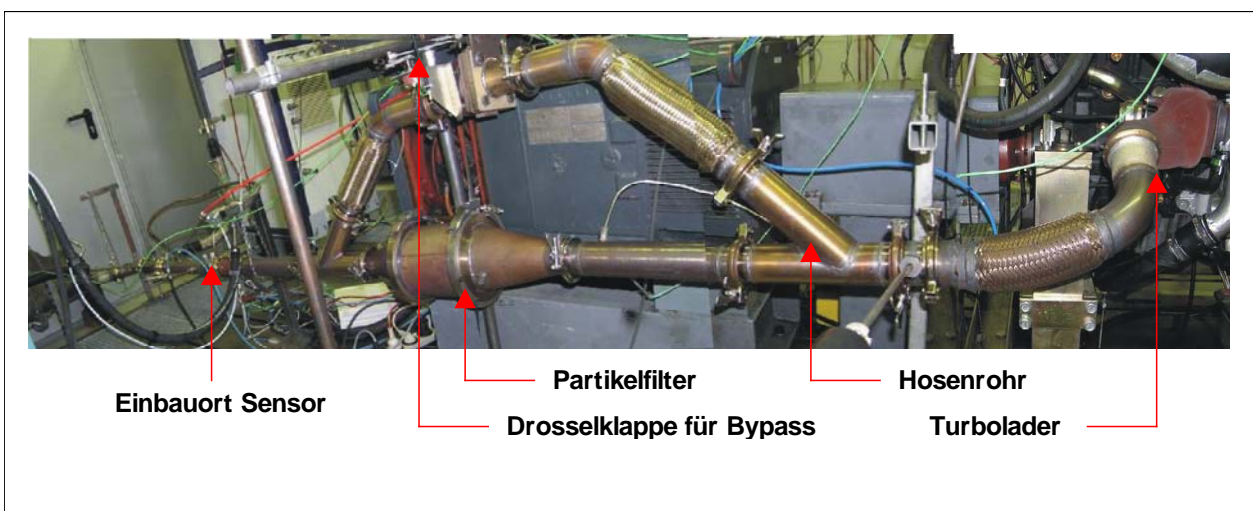
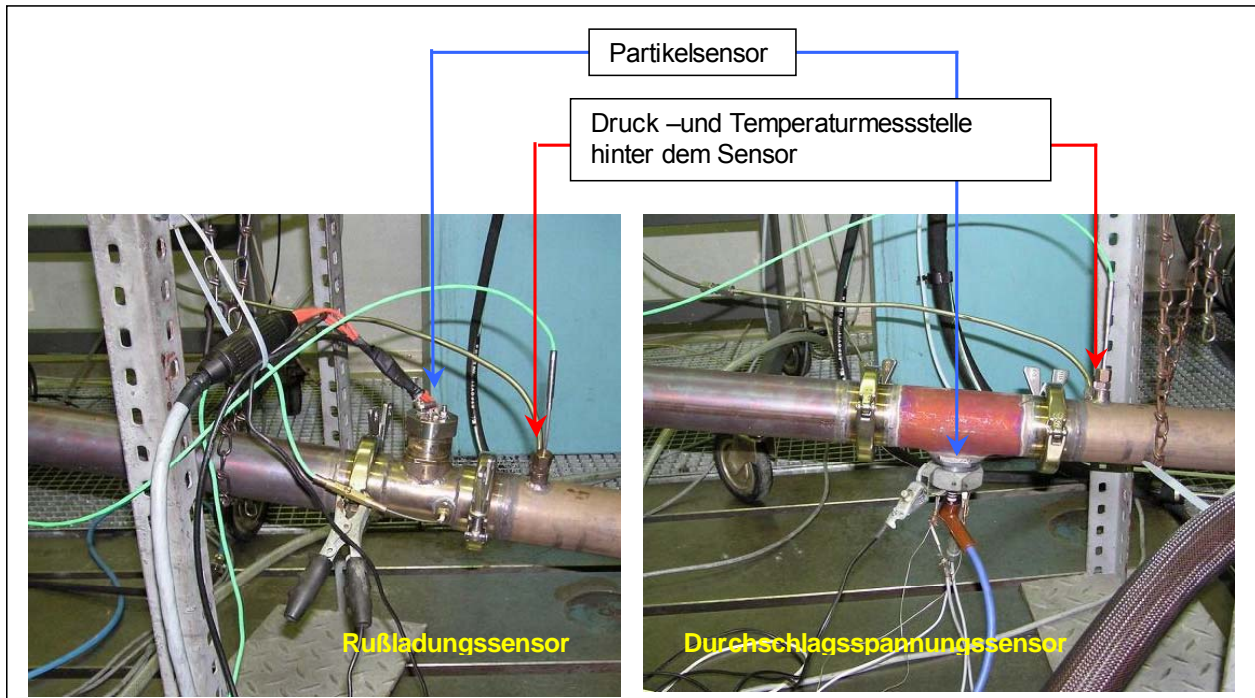


Abb.: 4-7 Foto des Versuchsaufbaus an Motorenprüfstand der HTW Dresden



## 4.2 Ergebnisse der Prüfstandsuntersuchungen an der HTW - Dresden

Zur Durchführung der Untersuchungen wurden die Sensoren in der unter Punkt 4.1.4. beschriebene Position in den Abgasstrang eingebaut. Abb.: 4-8 zeigt die Einbausituation beider Sensoren.



**Abb.: 4-8 Einbausituation der Partikelsensoren**

Die Ergebnisdarstellung unterteilt sich in drei Abschnitte. Zuerst erfolgt die Darstellung der prinzipiellen Funktionsweise und Untersuchungen zu möglichen Quereinflussparametern auf das Sensorsignal. Danach werden die Ergebnisse der Korrelationsanalyse vorgestellt. Im letzten Abschnitt wird die Funktionsfähigkeit des Sensors während eines kompletten Testzyklus (ESC-Test) bei unterschiedlichen Abgasstrangkongfigurationen beschrieben.

### 4.2.1 Inbetriebnahme

Bei der Inbetriebnahme der Sensoren wurden verschiedene, konstante Motorbetriebspunkte im gesamten Kennfeldbereich durchfahren. Betriebspunktabhängige Veränderungen der Abgasparameter wurden durch die Sensoren erkannt. In Tab.: 4-1 ist eine Testprozedur mit vier konstanten Betriebspunkten dargestellt, die eine Teil- und Vollastbeschleunigung beinhaltet. Bei diesen Versuchen wurden mögliche Quereinflussfaktoren nicht berücksichtigt.

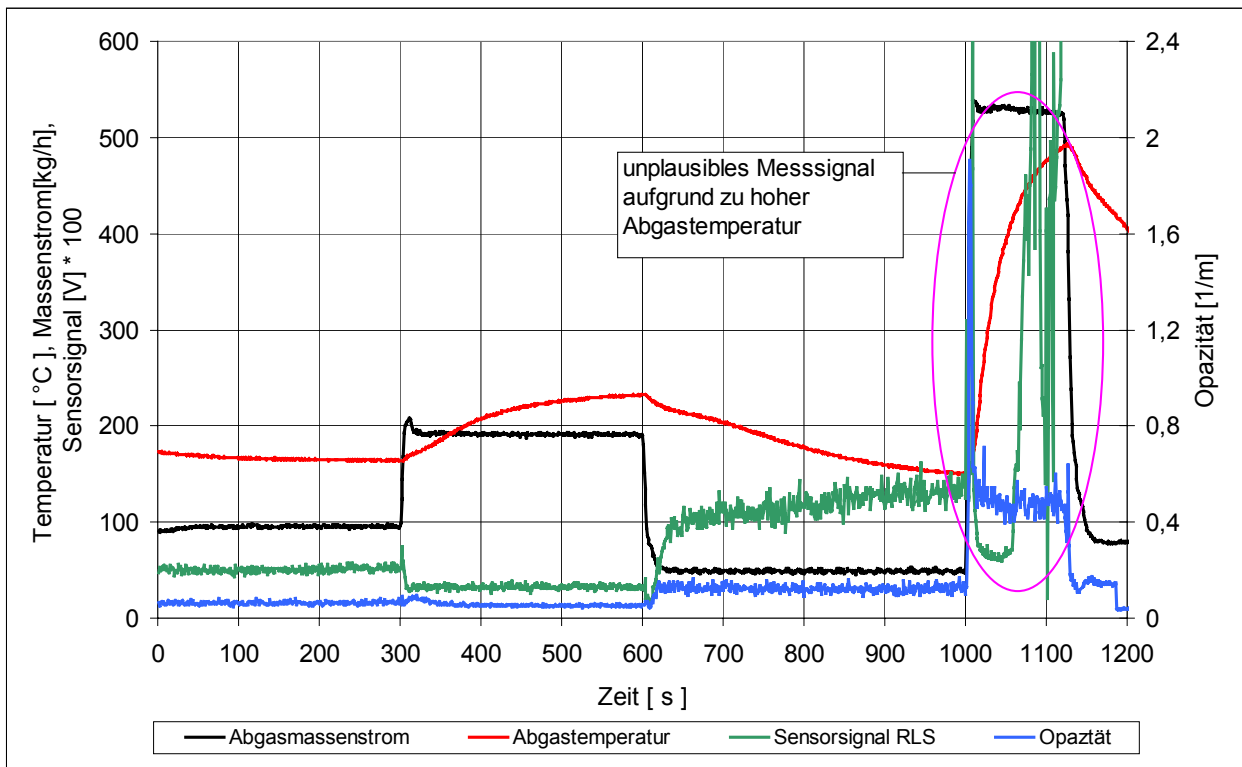
**Tab.: 4-1 Stationäre Betriebspunktes bei der Inbetriebnahme (4-Punkte-Test)**

Punkt / Zeit (min)	Drehzahl ( $\text{min}^{-1}$ )	Moment (Nm)	Massenstrom (kg/h)	Gasgeschwindigkeit (m/s)	Abgastemp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Rußkonzentration ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
1 / 5 min	2000	30	95	13	160	12
2 / 5 min	2500	60	190	30	250	10
3 / 7 min	1500	40	48	6,5	155	26
4 / 2 min	4000	VL	520	110	410	45

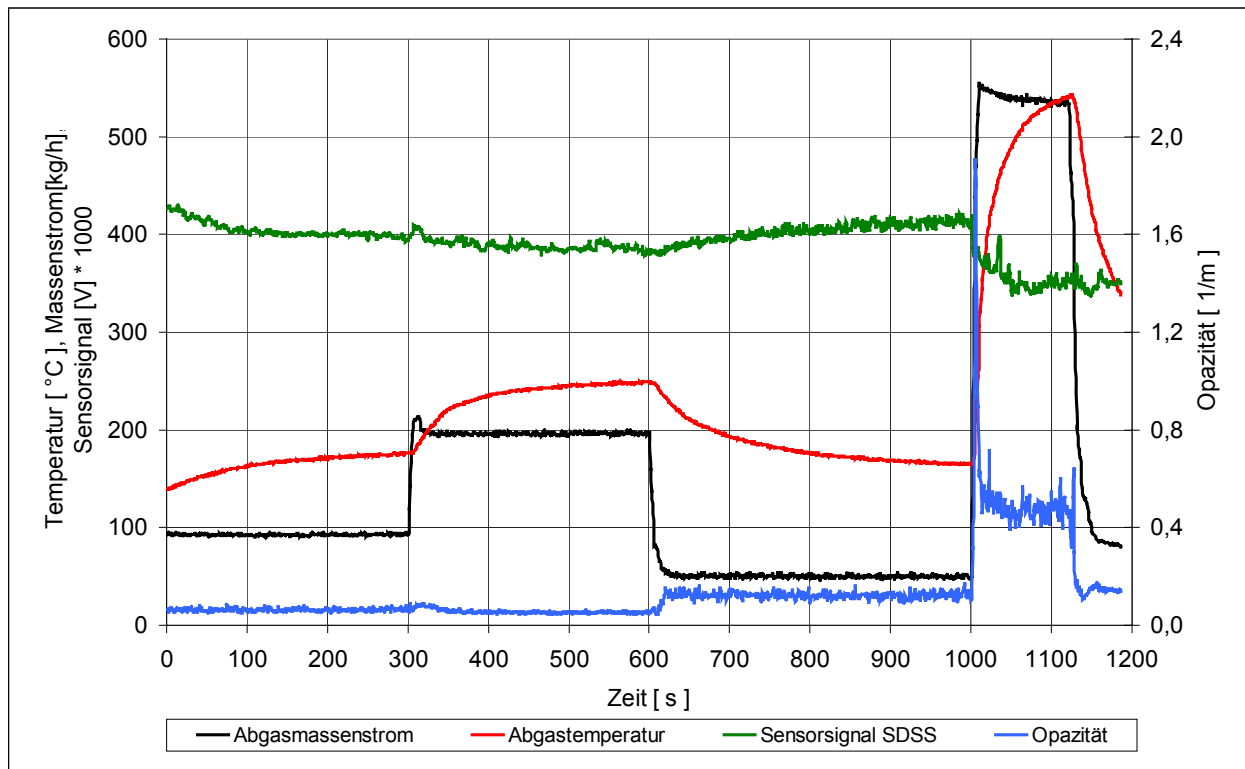
Die folgenden Abbildungen zeigen den 4-Punkte-Test bei Einsatz der Sensoren. Bei dem Rußladungssensor (RLS) ist bei den einzelnen Lastsprüngen eine hohe Empfindlichkeit zu verzeichnen. Bei schlagartiger Veränderung des Motorbetriebspunktes kommt es ebenfalls sofort zur Reaktion des Sensorsignals. Aussagen über die Korrelation zur Rußkonzentration konnten bei diesem Versuch noch nicht gemacht werden. Weiterhin fällt auf, dass es beim Anfahren des 4. Betriebspunktes (siehe Markierung) zum Aussetzen des Messsignals kommt (Abb.: 4-9). Als Ursache für das unplausible Messsignal wurde die Bildung einer Rußbrücke durch eine zerstörte Isolierung herausgefunden.

Das Sensorsignal des Durchschlagsspannungssensors verhält sich träger, nur im letzten Lastpunkt kommt es zu einer signifikanten Signalveränderung. Deutlich tritt der, schon unter Punkt 3.3.2 beschriebene, Temperatureinfluss auf das Messsignal hervor (Abb.: 4-10). Dieser Einfluss wird im Folgenden noch näher beschrieben.

Da es auch bei diesem Sensor während der durchgeführten Untersuchungen zur Bildung von Rußbrücken und temperaturbedingten Ausfällen des Sensorsignals kam, wurde die Abgastemperatur vorerst auf ca. 350°C begrenzt. Die Anhebung der Betriebstemperatur stellte ein wesentliches Entwicklungsziel im Projekt dar.



**Abb.: 4-9 4-Punkte-Test mit dem Rußladungssensor**



**Abb.: 4-10 4-Punkte-Test mit dem Durchschlagspannungssensor**

#### 4.2.2 Temperaturabhängigkeit der Sensorsignale

Um den Einfluss der Temperatur auf das Sensorsignal zu untersuchen, wurden Versuche durchgeführt, bei denen die Rußkonzentration mit Hilfe eines Partikelfilters praktisch den Wert „null“ erreichte. Dies gibt die Möglichkeit, das Sensorsignal ohne den Einfluss von Rußpartikeln zu untersuchen und Zusammenhänge zu anderen Abgasparametern darzustellen.

In Abb.: 4-11 sind die Temperaturkennlinien des Rußladungssensors zu Beginn des Projektes sowie im weiteren Entwicklungsstadium dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass es ab ca. 250 °C zu einem starken Anstieg der Temperaturabhängigkeit des Sensorsignals kommt (blaue Kurve). Grund hierfür war der temperaturabhängige elektrische Widerstand der eingesetzten Keramik, der in Verbindung mit der Hochspannung zu dieser Signaldrift führte. Mit fortschreitender Entwicklung konnte durch eine zusätzliche Abschirmung dieser Temperatureinfluss fast vollständig unterbunden werden (rote Kurve).

Im Falle des Durchschlagspannungssensors ergibt sich, wie auch schon im Abschnitt 3.3.2 angesprochen, eine Temperaturabhängigkeit des Sensorsignals (Abb.: 4-12). Als mögliche Ursache für die Veränderung der Kennlinie und deren Verlauf werden ebenfalls temperaturabhängige Keramikeigenschaften vermutet. Da sich die Temperaturkennlinien für unterschiedliche Sensorversionen unterscheiden, wurde sie als Kompensationskennlinie in der Auswertung berücksichtigt bzw. die Signale relativ zueinander verglichen.



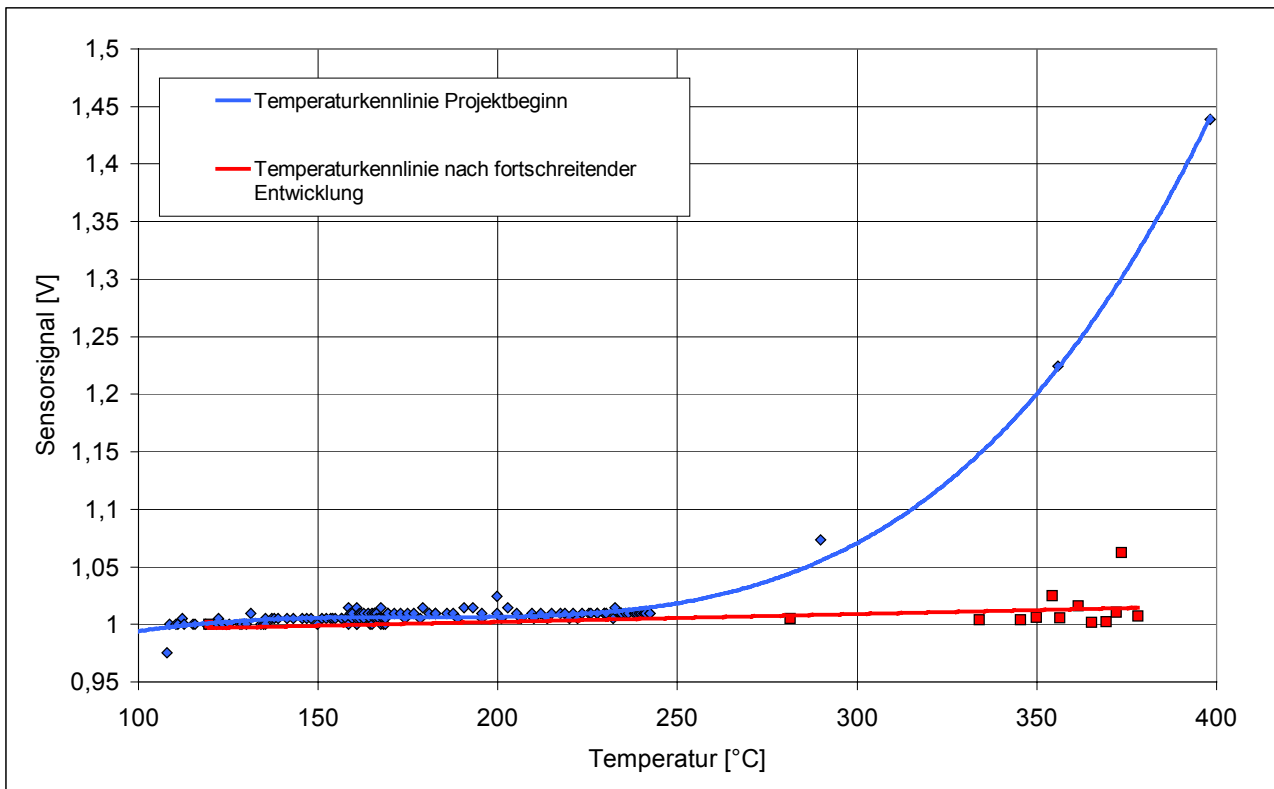


Abb.: 4-11 Temperaturkennlinie des RLS bei fortschreitendem Entwicklungsstand

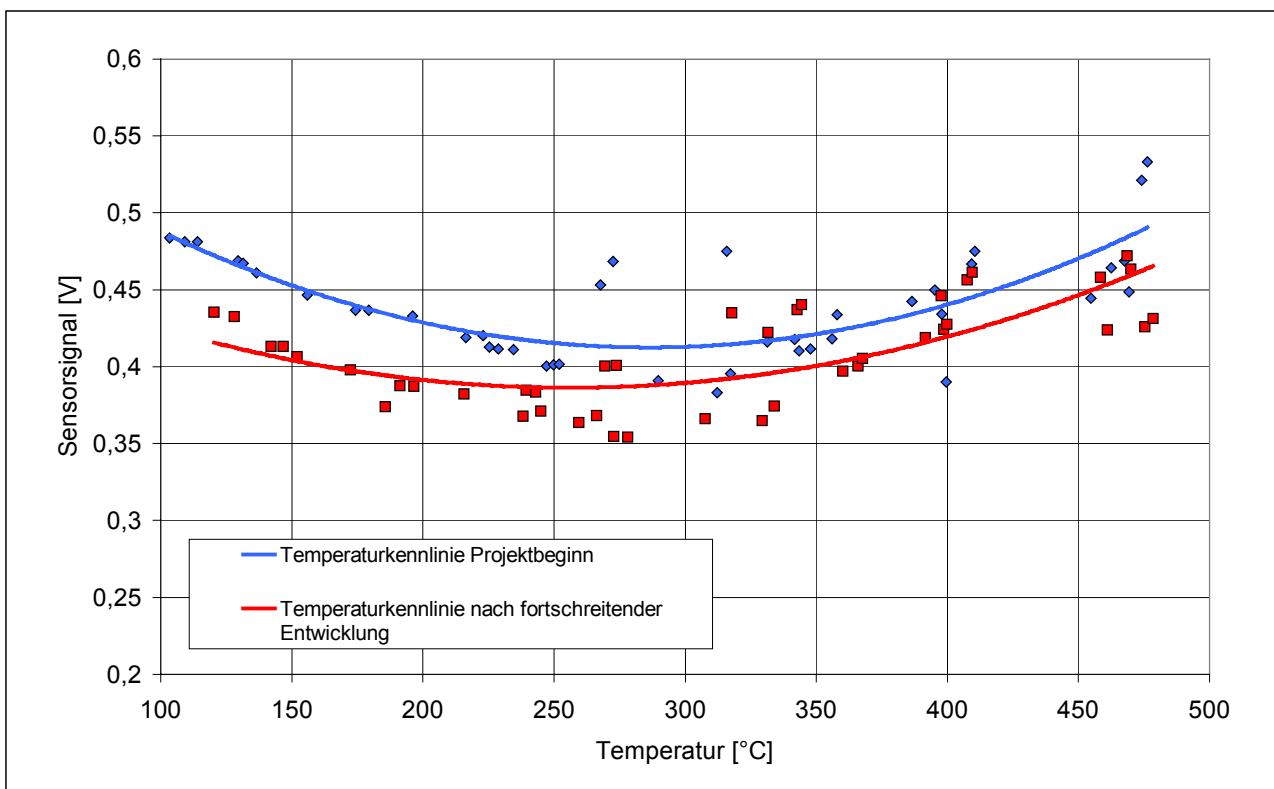


Abb.: 4-12 Temperaturkennlinie des SDSS bei fortschreitendem Entwicklungsstand

### 4.3 Signalbewertung mittels Korrelationsanalyse

Eines der wesentlichsten Kriterien für den Einsatz eines Partikelsensors ist die Überprüfung des Sensorsignals auf Korrelation zur Rußkonzentration im Abgas. Da der Signalwert der Sensoren der Rußkonzentration im Abgas entsprechen soll, wurden die Prinzipien mit den aktuellen Beurteilungsverfahren (Gravimetrie, Opazität und Schwärzungsmessung) verglichen. Zur Aufstellung eines Zusammenhanges zwischen Sensorsignal und Vergleichsmessgröße wurden im Motorenkennfeld konstante Lastpunkte mit bestimmten Abgasgeschwindigkeiten ausgewählt und dabei die Rußkonzentration über das Bypasssystem verändert. Vorteil dabei waren die nahezu gleichen Abgasbedingungen, aber veränderten Rußkonzentrationen, wodurch sich Quereinflussfaktoren praktisch ausschließen lassen. Ebenfalls konnte bei diesen Versuchen der Einfluss unterschiedlicher Abgasmassenströme bzw. Abgasgeschwindigkeiten auf das Sensorsignal herausgestellt werden.

Die folgende Tabelle zeigt eine Auswahl der untersuchten stationären Betriebspunkte (Tab.: 4-2).

**Tab.: 4-2 Auswahl der untersuchten Betriebspunkt**

Punkt	Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	Drehmoment [Nm]	Abgasgeschwindigkeit [m/s]
1	1000	50	6
2	1000	128	10
3	1000	145	12
4	1200	100	16
5	1500	102	20
6	1700	100	25
7	1900	100	30
8	2150	110	40
9	2000	186	40
10	2550	117	50
11	2800	100	60
12	3000	165	60
13	3100	100	70

#### 4.3.1 Ergebnisse des Rußladungssensors

Am Beispiel des Betriebspunktes 11 soll die Korrelationsanalyse für den Rußladungssensor erklärt werden. Abb.: 4-13 zeigt den Verlauf einzelner Abgasparameter (Abgastemperatur, Abgasmassenstrom, Absorption, Schwärzung) sowie den Verlauf des Sensorsignals. Man erkennt, wie sich beim stufenweisen Verstellen der Drosselklappe des Bypass – Systems die Rußkonzentration im Abgas ändert. Betrachtet man das Signal des Rußladungssensors, so ist eine deutliche Reaktion bei allen Drosselklappenstellungen zu verzeichnen, d.h. die sich ändernde Rußkonzentration wird von dem Sensor registriert und als Signalwertänderung angezeigt. Für die Korrelationsanalyse werden alle Betriebspunkte vermessen und mit den Vergleichsmesswerten linear korreliert (Korrelation nach Bravais und Pearson).

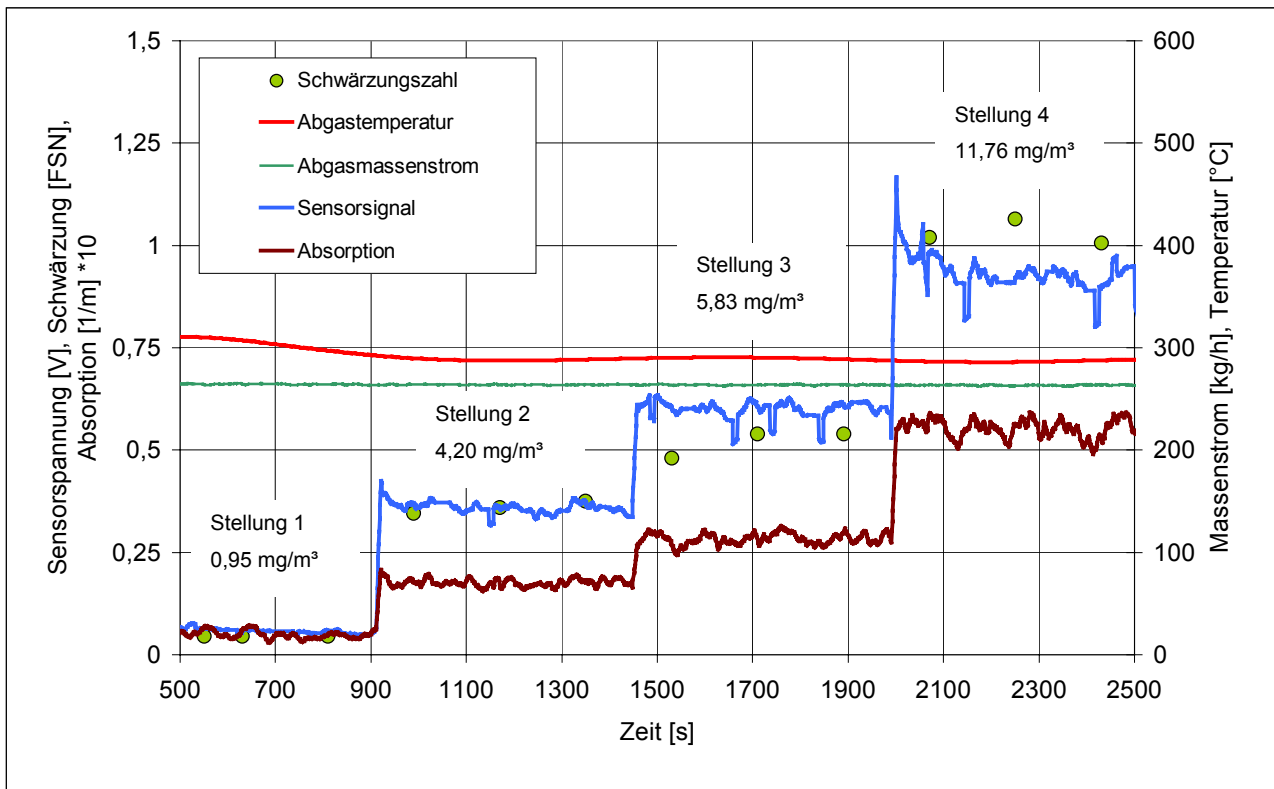


Abb.: 4-13 Betriebspunkt 11 der Korrelationsanalyse mit dem RLS

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen dem Sensorsignal und der Rußkonzentration. Allerdings unterscheiden sich die Anstiege der einzelnen Kurven in Abhängigkeit von der Abgasgeschwindigkeit. Hier besteht ein nichtlinearer Zusammenhang, der mit den unterschiedlichen Auftreffgeschwindigkeiten der Partikel am Sensor zu begründen ist. (Abb.: 4-14)

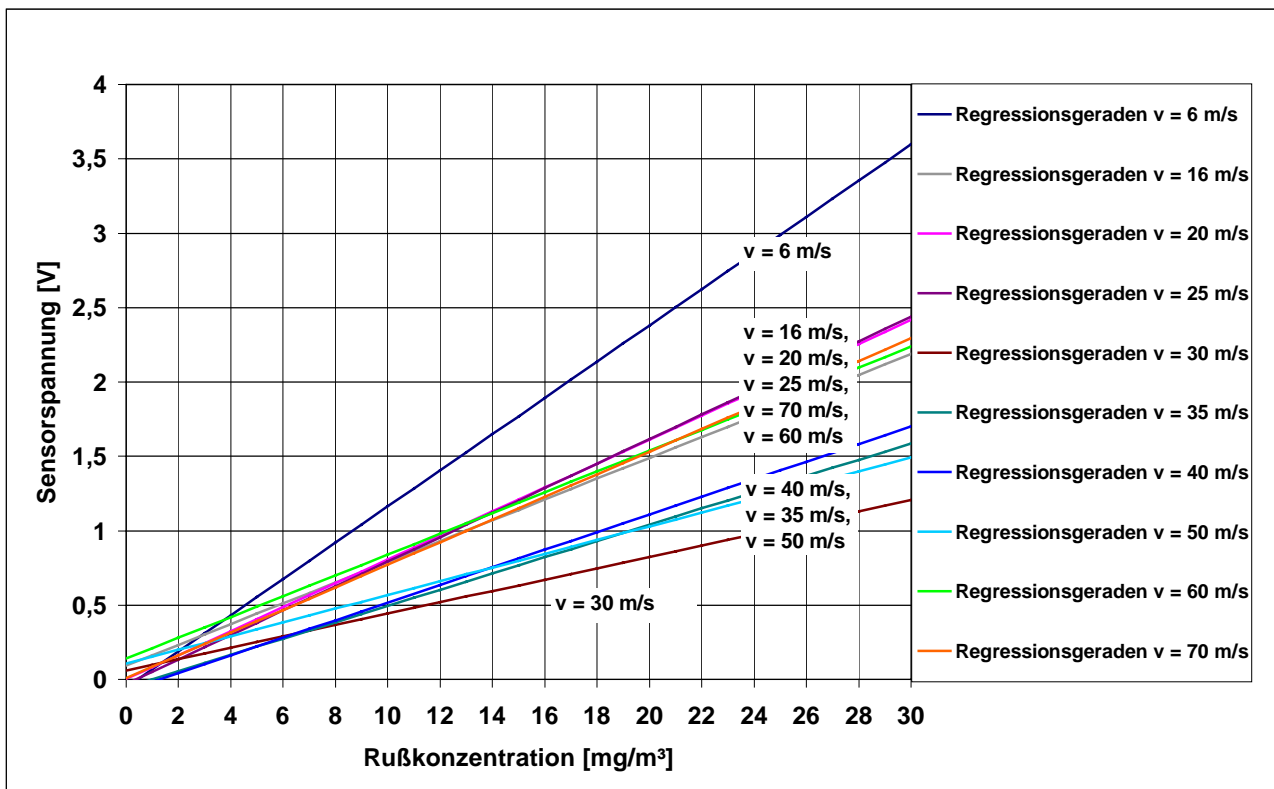


Abb.: 4-14 Regressionsgeraden: Rußkonzentration (gravimetrisch) und RLS-Signal

Die Qualität des linearen Zusammenhanges, des Korrelationskoeffizienten  $r$ , zwischen Rußkonzentration und Sensorsignal wird durch das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  der einzelnen Funktionen beschrieben.

Die Ergebnisse für den Rußladungssensor sind in Tab.: 4-3 dargestellt. Betrachtet man die Mittelwerte aus allen Messungen erreicht der Sensor die höchsten Werte im Vergleich zur gravimetrisch ermittelten Rußkonzentration  $r^2 = 0,97$ . Für die Korrelation zur Schwärzung wird  $r^2 = 0,95$  und gegenüber der Opazitätsmessung  $r^2 = 0,93$  erreicht. Die Zusammenstellung dieser Korrelationsmatrix zeigt einen sehr guten linearen Zusammenhang sowie einen sehr geringen Einfluss von störenden Querempfindlichkeiten durch andere Komponenten im stationären Motorbetrieb.

**Tab.: 4-3 Ergebnisse Korrelationsanalyse des Rußladungssensors [ $r^2$ ]**

<b>Abgasgeschw. [m/s]</b>	<b>Korrelation SZ und Sensorsignal</b>	<b>Korrelation Opazität u. Sensorsignal</b>	<b>Korrelation PM und Sensorsignal</b>
6	0,948	0,908	0,971
16	0,947	0,958	0,971
20	0,977	0,984	0,999
25	0,917	0,938	0,989
30	0,839	0,834	0,923
40	0,994	0,989	0,996
50	0,967	0,857	0,981
60	0,965	0,934	0,965
70	0,986	0,977	0,953
<b>Mittelwert</b>	<b>0,949</b>	<b>0,931</b>	<b>0,972</b>

#### 4.3.2 Ergebnisse des Durchschlagsspannungssensors

Wie schon im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, wurde auch mit dem Durchschlagsspannungssensor eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Den Verlauf einzelner Abgasparameter (Abgastemperatur, Abgasmassenstrom, Absorption u. Schwärzung) sowie den Verlauf des Sensorsignals zeigt am Beispiel des zweiten Betriebspunktes Abb.: 4-15. Man erkennt auch hier, wie sich beim stufenweisen Verstellen der Drosselklappe die Rußkonzentration ändert. Betrachtet man das Signal des Durchschlagsspannungssensors, so verändert sich der Signalwert nicht sprunghaft sondern kontinuierlich gegenüber der sich ändernden Rußkonzentration. Aufgrund von Sensorproblemen konnten hier nur 7 Betriebspunkte untersucht werden.

Die Regressionsgeraden sind in Abb.: 4-16 dargestellt und zeigen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten unterschiedliche Anstiege. Es scheint, dass sich der Anstieg der Regressionsgeraden in Abhängigkeit des Abgasmassenstromes vorzeichenbehaftet verändert. Hier besteht noch weiterer Klärungsbedarf, da noch weitere Quereinflussfaktoren eine Rolle spielen könnten.

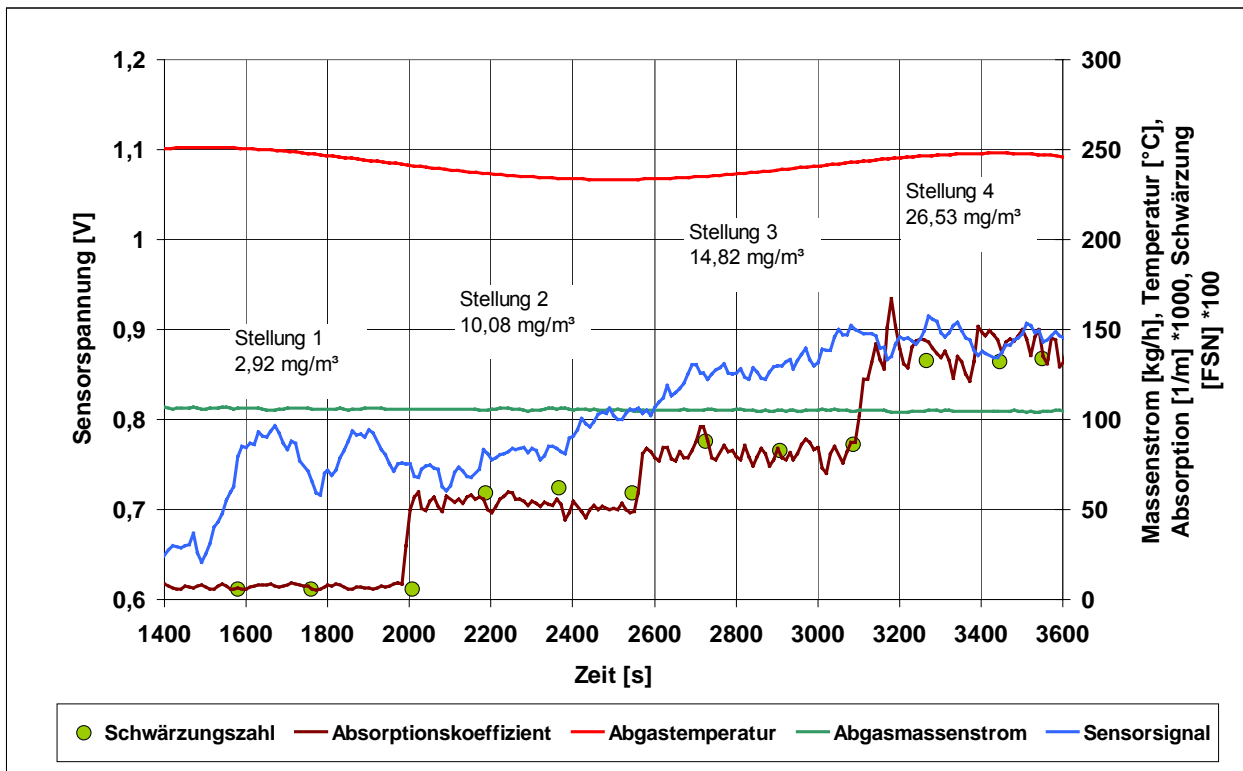


Abb.: 4-15 Betriebspunkt 2 der Korrelationsanalyse mit dem SDSS

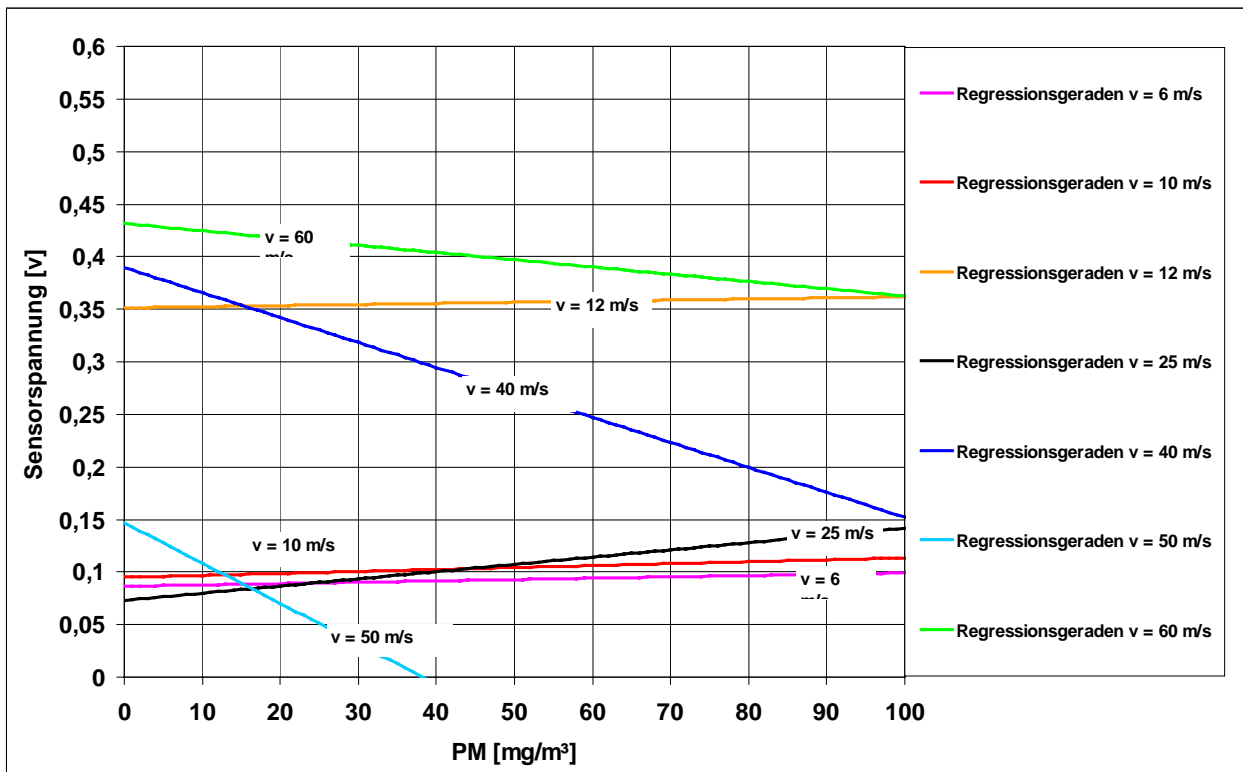


Abb.: 4-16 Regressionsgeraden: Rußkonzentration (gravimetrisch) und SDSS-Signal

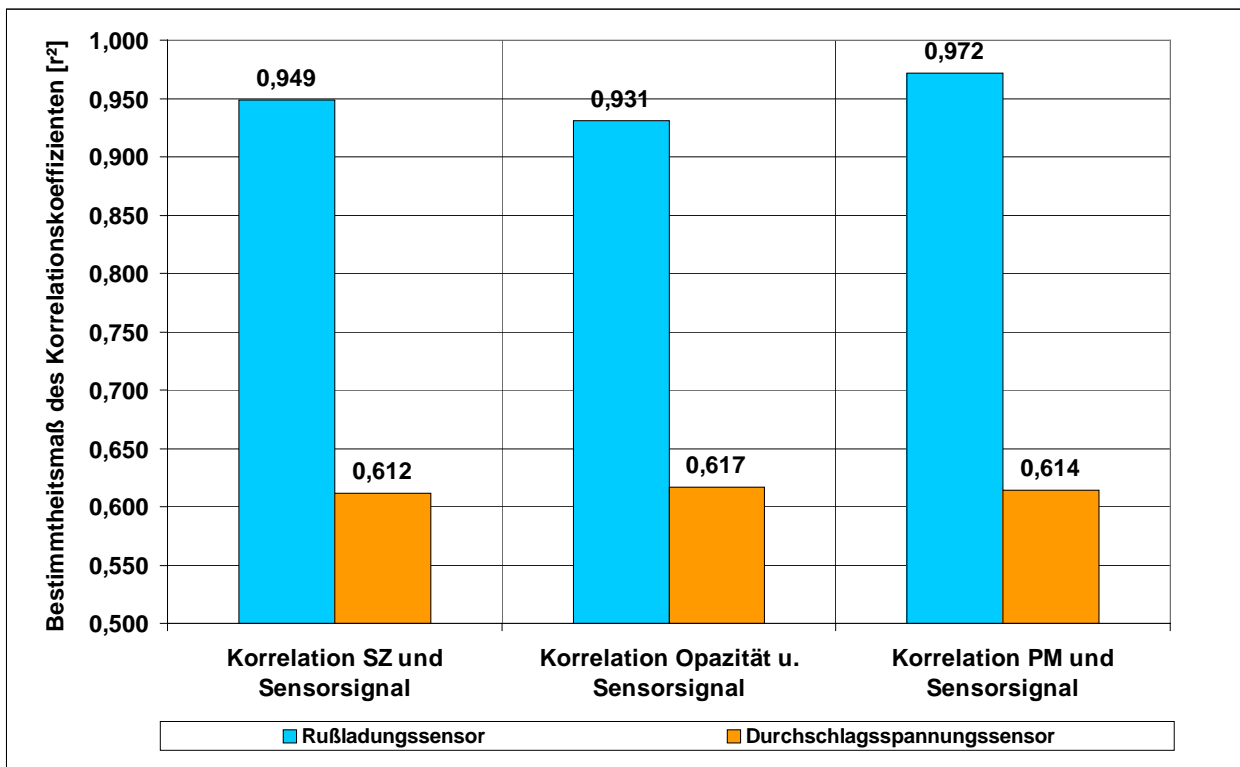
Die Korrelationsergebnisse für den Durchschlagsspannungssensor sind in Tab.: 4-4 dargestellt. Betrachtet man die Mittelwerte aus allen Messungen, erreicht der Sensor Werte im Bereich von  $r^2 = 0,6$ . Die Werte im Vergleich zur Opazitätsmessung liegen bei  $r^2 = 0,62$  und im Vergleich zur gravimetrisch ermittelten

Rußkonzentration sowie Schwärzung bei  $r^2 = 0,61$ . Die Zusammenstellung dieser Korrelationsmatrix zeigt, dass die Koeffizienten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten stark voneinander abweichen. Grund hierfür sind Quereinflüsse durch andere Abgasparameter, wie Temperatur und Massenstrom bzw. Veränderungen durch thermische Materialeigenschaften am Sensor. Hier wird auch der noch notwendige Entwicklungsbedarf für dieses Sensorprinzip deutlich.

**Tab.: 4-4 Ergebnisse Korrelationsanalyse des Durchschlagsspannungssensor**

Abgasgeschw. [m/s]	Korrelation SZ und Sensorsignal	Korrelation Opazität u. Sensorsignal	Korrelation PM und Sensorsignal
6	0,363	0,475	0,640
10	0,186	0,113	0,130
12	0,413	0,263	0,274
25	0,848	0,835	0,872
40	0,977	0,954	0,981
50	0,512	0,690	0,469
60	0,985	0,987	0,929
<b>Mittelwert</b>	<b>0,612</b>	<b>0,617</b>	<b>0,614</b>

In Abb.: 4-17 sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse und die Mittelwerte aus allen Messungen noch einmal gegenübergestellt.



**Abb.: 4-17 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Korrelationsanalyse**

## 4.4 Untersuchung der Sensoren im ESC-Test bei verschiedenen Konfigurationen der Abgasanlage

### 4.4.1 Die ESC –Testprozedur (European Stationary Cycle)

Für verschiedene Untersuchungen wurden ESC -Tests mit unterschiedlichen Konfigurationen der Abgasanlage durchgeführt. Der ESC -Test besteht aus einem Leerlaufpunkt (4 min) und 12 Motorbetriebspunkten, die jeweils 2 Minuten gefahren werden. Diese Testprozedur wird in der Praxis zur Beurteilung der Abgasemissionen von Dieselmotoren für LKW und Busse angewendet. In Abb.: 4-18 sind die 13 Stufen mit dem Verlauf der Drehzahl, des Momentes, der Abgastemperatur und der Opazität dargestellt.

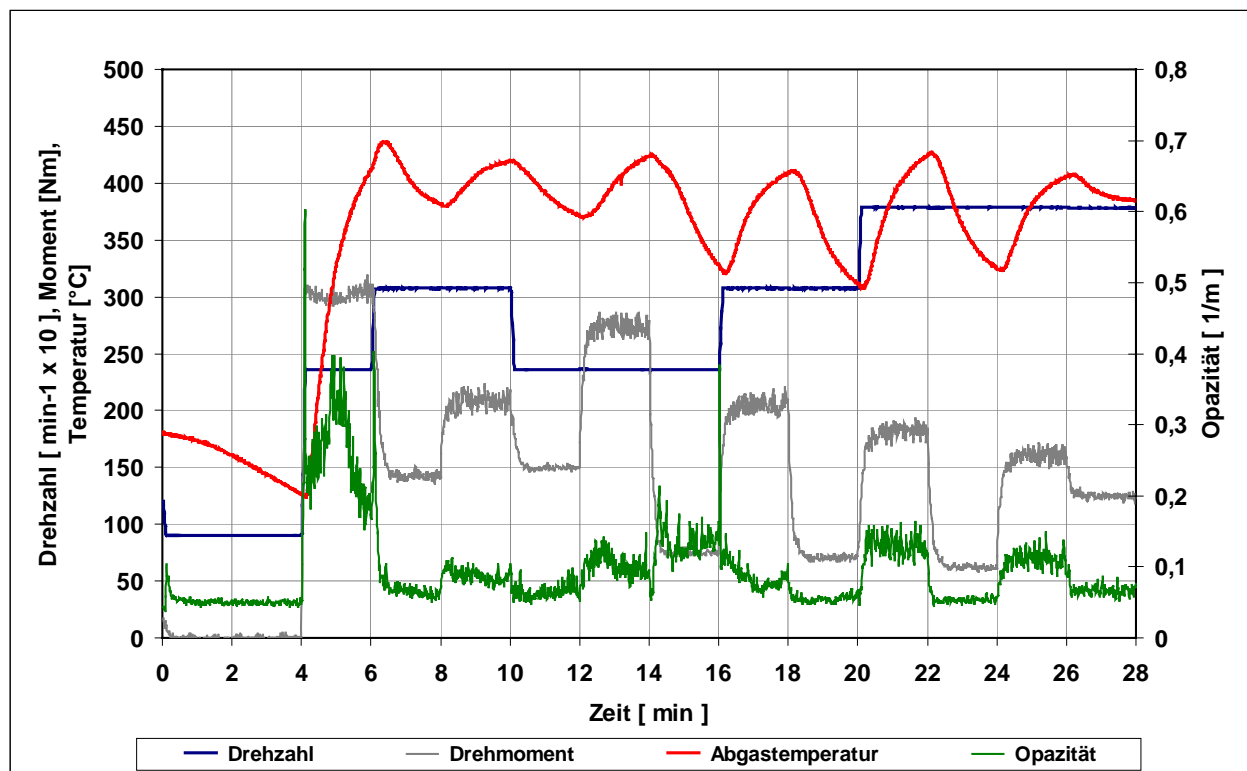
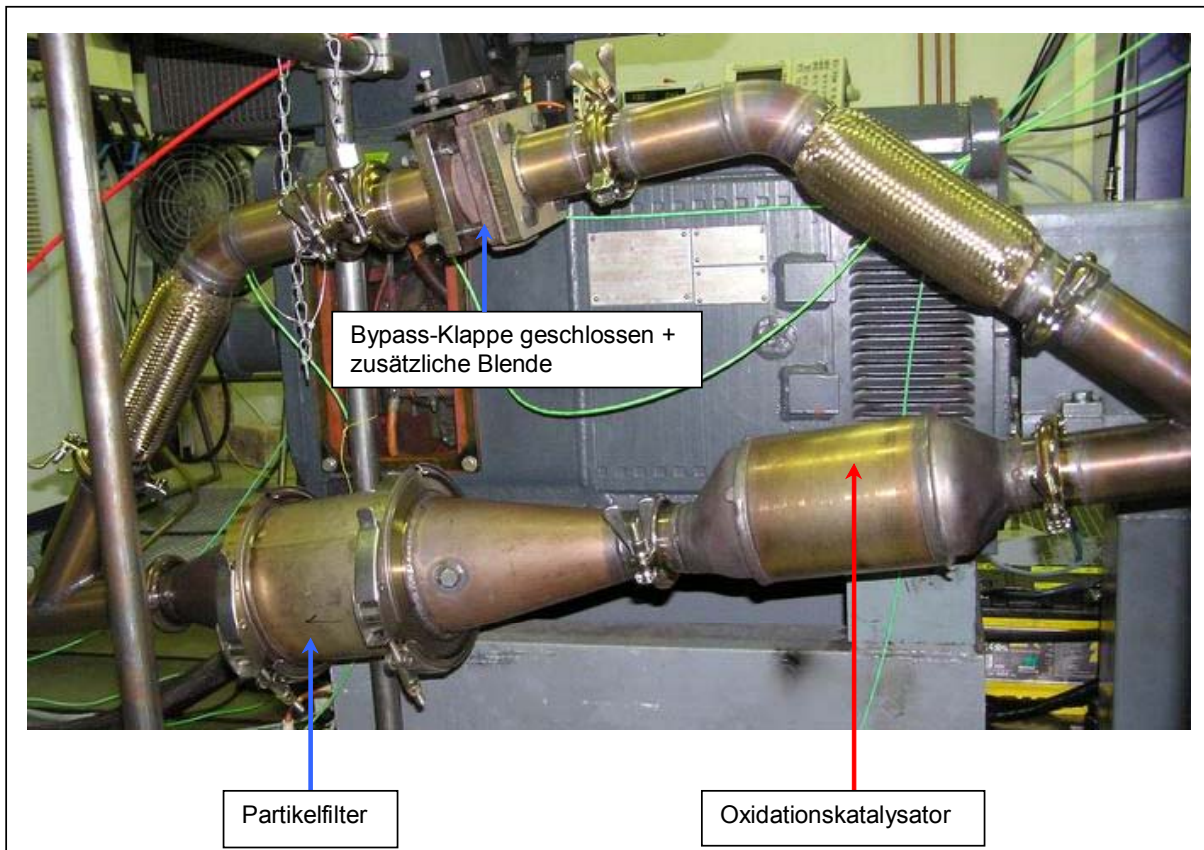


Abb.: 4-18 ESC -Test

### 4.4.2 Einfluss gasförmiger Schadstoffe auf das Sensorsignal

Für die Überprüfung der Selektivität der Sensoren auf die Rußpartikel muss ausgeschlossen werden, dass das Sensorsignal nicht auf andere Abgaskomponenten reagiert. Um den Einfluss von gasförmigen Schadstoffen, vornehmlich Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) zu untersuchen, wurden Versuche mit und ohne Oxidationskatalysator sowie Partikelfilter durchgeführt. Dadurch konnte ohne Einfluss von Rußpartikeln die Reaktion des Sensorsignals bei Veränderung der Schadstoffkonzentration beobachtet werden. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abb.: 4-19 gezeigt.



**Abb.: 4-19 Versuchsaufbau mit Partikelfilter und Oxidationskatalysator**

Der gefahrte ESC – Test weist eine große Differenz bei den gasförmigen Schadstoffen zwischen den Versuchen mit und ohne Katalysator auf. Die maximalen Unterschiede in der CO-Emission lagen bei ca. 900 ppm und für die HC-Emission im Bereich von ca. 80 ppm, d.h. die Unterschiede waren signifikant.

Die Abb.: 4-20 und Abb.: 4-21 zeigen die Signalverläufe während der Prozedur mit und ohne Oxidationskatalysator sowie die dabei vorherrschenden CO- und HC- Emissionen.

Die Sensorsignale des Rußladungssensors, abgesehen von Messwertausreißern, unterscheiden sich äußerst gering. Die Abweichung der Signalmittelwerte liegt bei ca. 0,2 %, somit kann ein Einfluss der gemessenen, gasförmigen Schadstoffe für diesen Sensor ausgeschlossen werden (Abb.: 4-20) .

Bei Betrachtung der Signalverläufe des Durchschlagsspannungssensors lassen sich größere Differenzen feststellen. Hier liegt die Abweichung der Signalmittelwerte bei ca. 7,4 %. Damit kann ein Einfluss durch die gemessenen, gasförmigen Schadstoffe nicht ausgeschlossen werden. Die Schwankungen innerhalb einer Messreihe zeigen wieder den Temperatureinfluss auf das Messsignal, sind aber für einen relativen Vergleich unkritisch (Abb.: 4-21). In Tab.: 4-5 sind die Mittelwerte der Messsignale und deren Abweichung dargestellt.

**Tab.: 4-5 Abweichungen der Signalmittelwerte bei Versuchen mit und ohne Katalysator**

Versuch	Mittelwert <sub>Signal</sub>	Standardabweichung <sub>Signal</sub>	Differenz der Signalmittelwerte / %
RLS ohne Katalysator	1,009 V	0,0532 V	0,002 V / 0,2 %
RLS mit Katalysator	1,007 V	0,0105 V	
SDSS ohne Katalysator	0,162 V	0,0289 V	0,012 V / 7,4 %
SDSS mit Katalysator	0,150 V	0,0299 V	



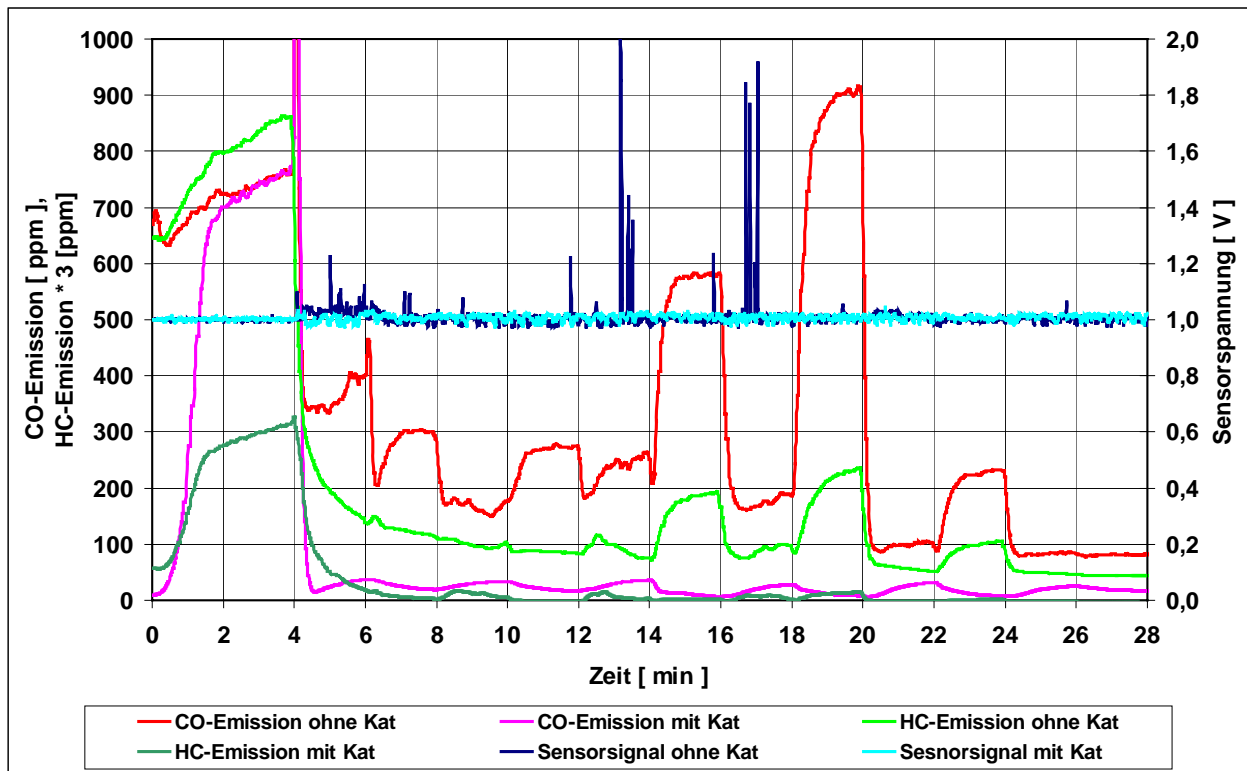


Abb.: 4-20 Einfluss gasförmiger Schadstoffe auf das RLS-Signal

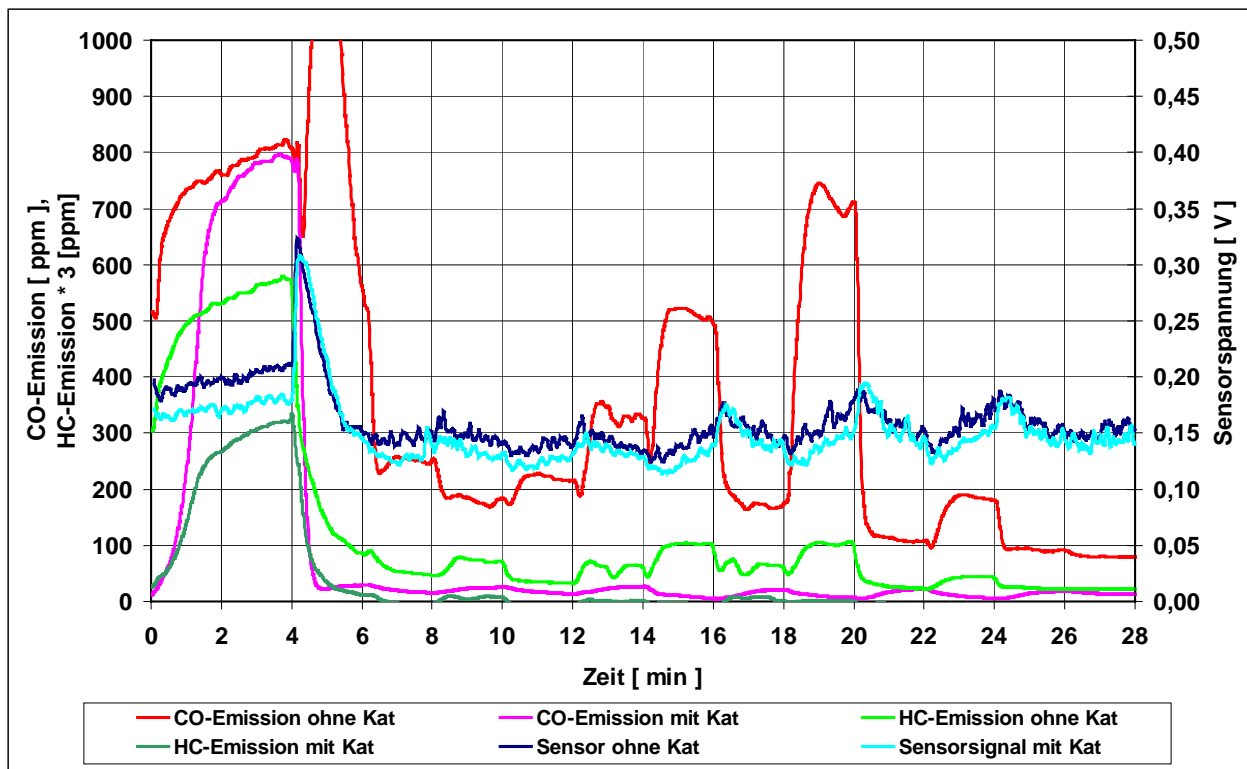


Abb.: 4-21 Einfluss gasförmiger Schadstoffe auf das SDSS-Signal

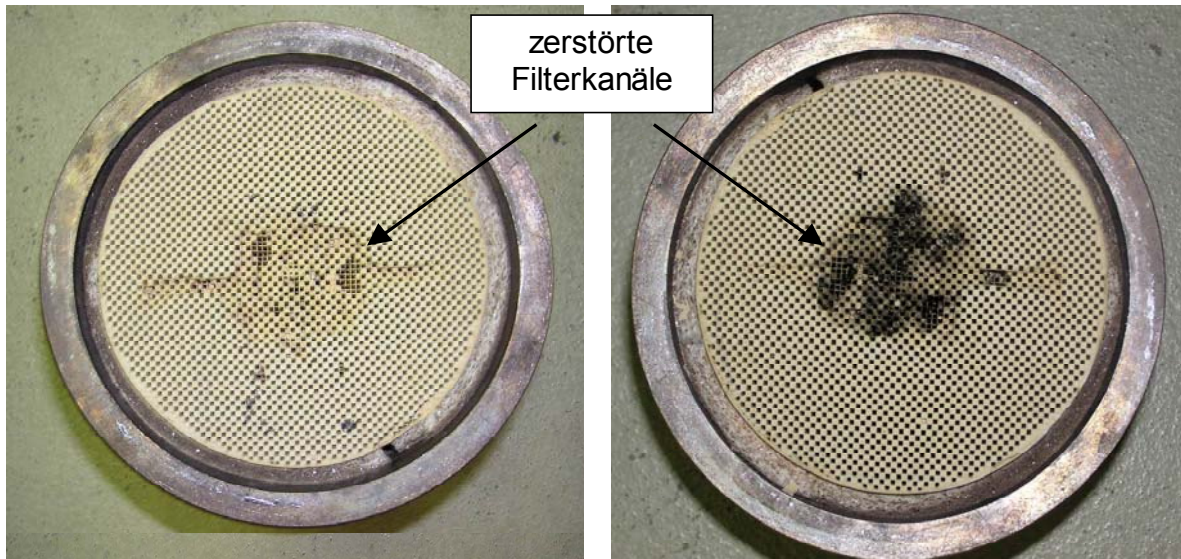
#### 4.4.3 Weitere Untersuchungen im ESC-Test bei Variation der Abgasanlage und Betrachtungen zur Wiederholgenauigkeit

Für weitere Untersuchungen wurden mit Hilfe des Bypass-Systems verschiedene Filtrationsleistungen an der Abgasanlage eingestellt, um den Einfluss auf das Sensorsignal bei unterschiedlichen Rußkonzentrationen während einer kompletten Testprozedur zu beurteilen.

Die folgende Tabelle zeigt die einzelnen Konfigurationen der Abgasanlage. Bei Variante 4 wird ein defekter Partikelfilter eingesetzt, wie er auch in der Praxis auftreten könnte (Abb.: 4-22). Ziel des Partikelsensors sollte es sein, die durch die Zerstörung verringerte Filtrationsleistung durch Veränderung des Signals zu erkennen.

**Tab.: 4-6 Konfiguration der Abgasanlage**

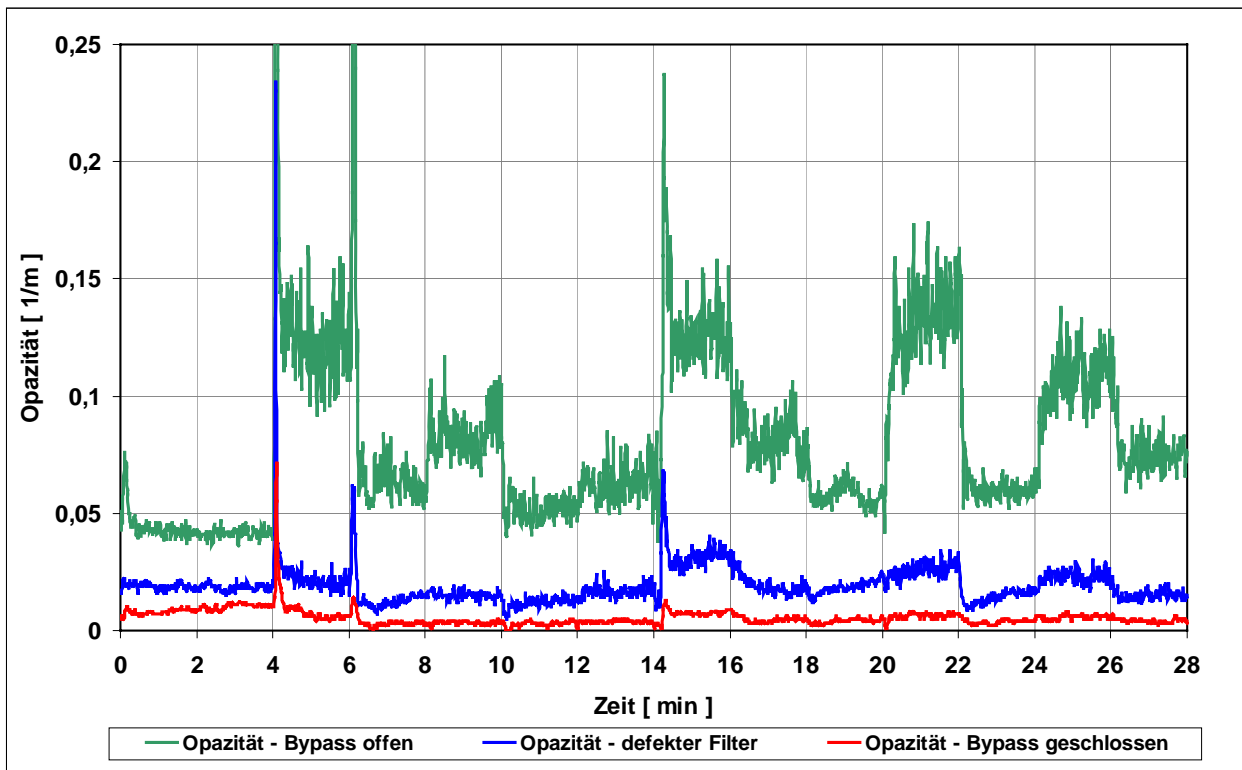
Aufbau	Konfiguration	Rußkonzentration	Abscheideleistung
1	Bypass-System komplett geöffnet	16,8 mg/m <sup>3</sup>	0 %
2	Bypass-System leicht geöffnet	8,6 mg/m <sup>3</sup>	ca. 48 %
3	Bypass-System komplett geschlossen	1,9 mg/m <sup>3</sup>	ca. 88 %
4	Abgasanlage mit defektem Partikelfilter	5,6 mg/m <sup>3</sup>	ca. 66 %



**Abb.: 4-22 Zerstörter Partikelfilter vor und nach dem Prüfstandsbetrieb**

Da im Kapitel 4.3 (Korrelationsanalyse) ausführlich die Zusammenhänge Sensorsignal und Vergleichsmessgrößen untersucht und dargestellt wurden, wird für die folgenden Betrachtung nur die Rauchtrübung als qualitatives Merkmal der Rußkonzentration herangezogen, da es sich zur kontinuierlichen Messung eignet.

In Abb.: 4-23 sind die Verläufe der Opazität für die drei Konfigurationen „Bypass offen“, „Bypass geschlossen“ und bei Einsatz eines „defekten Filters“ dargestellt. Es sind deutlich die Unterschiede im Abscheidegrad zu erkennen, bei offenem Bypasssystem wird praktisch die Rohemission gemessen. Die Emissionen mit defektem Filter und geschlossenem Drosselklappe ordnen sich darunter ein.



**Abb.: 4-23 Opazität im ESC -Test bei drei unterschiedlichen Konfigurationen**

Die Ergebnisse für den Rußladungssensor zeigen qualitativ gleiche Unterschiede in der absoluten Signalthöhe. Die Verläufe im Einzelnen unterscheiden sich von denen der Opazität, da es noch nicht möglich war eine kontinuierliche Korrektur der Abgasgeschwindigkeit mit in das Signal einzurechnen. Beim geöffneten Bypass wurden die höchsten Signale gemessen, etwas niedriger lag das Signal bei dem defekten Filter und beim geschlossenen System waren die Signalwerte am niedrigsten (Abb.: 4-24). Die Mittelwerte der Signale sind in Tab.: 4-7 zusammengestellt und zeigen für den Rußladungssensor eine gute Korrelation zur Rußkonzentration. Diese signifikanten Unterschiede im Signalwert lassen die Aussage zu, dass verschiedene Rußkonzentrationen im Abgas mit dem Rußladungssensor detektiert werden können. Allerdings ist eine genaue Angabe der Konzentration aufgrund des Gasgeschwindigkeitseinflusses noch nicht möglich.

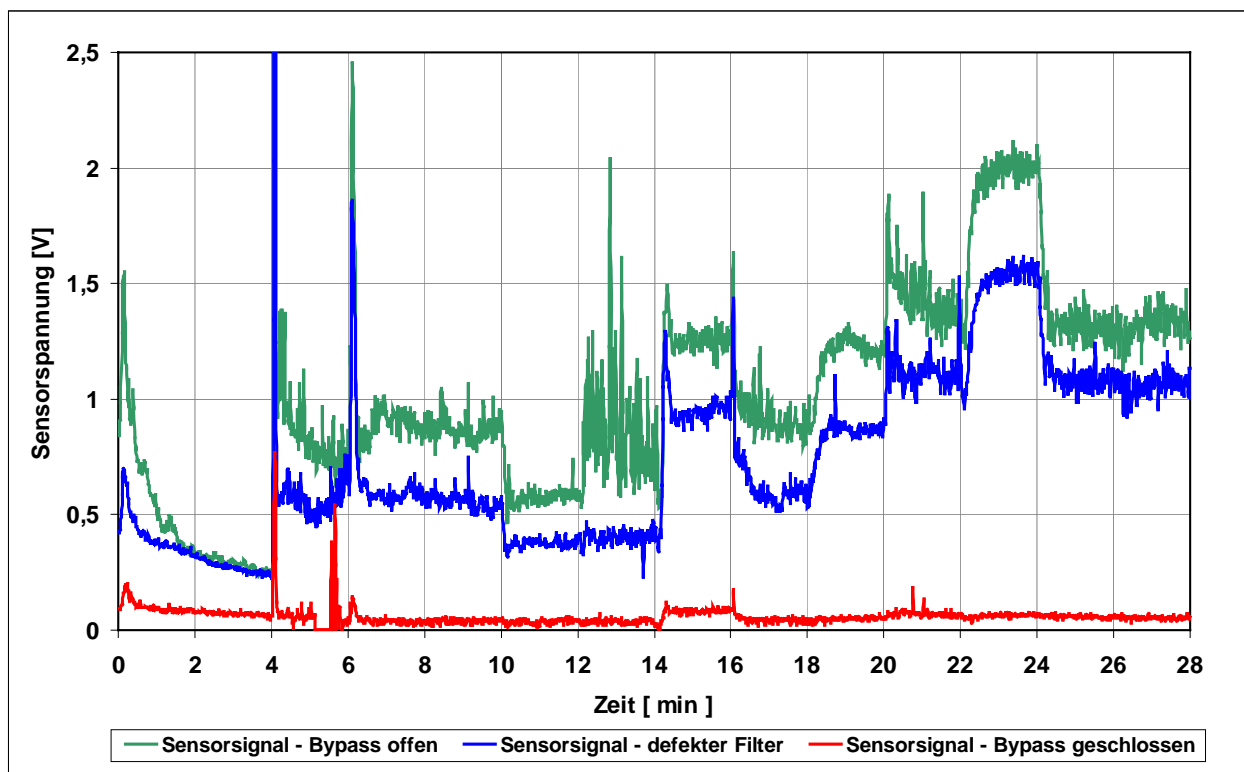
Bei den Signalverläufen mit dem Durchschlagsspannungssensor lassen sich objektiv keine so signifikanten Unterschiede feststellen (Abb.: 4-25). Betrachtet man die Mittelwerte der Messung (Tab.: 4-7), so besteht trotzdem eine logische, umgekehrt proportionale Reihenfolge zu den Werten der Rußkonzentration. Allerdings liegen die Signaländerungen unterhalb 10 % des absoluten Signalwertes und stellen die Aussagekraft des Signals in Frage.

Aus diesem Grund wurde die Wiederholgenauigkeit der Sensoren betrachtet. Es wurden jeweils zwei ESC - Zyklen in unmittelbarer Folge durchfahren und die Signale miteinander verglichen.

Abb.: 4-26 zeigt das Ergebnis der Untersuchung. Für den Durchschlagsspannungssensor wurde eine Abweichung zwischen den beiden Wiederholungen von ca. 4 % festgestellt, für den Rußladungssensor lag dieser Wert bei ca. 0,5 %. Bei dieser Betrachtung wurden die ersten 4 Minuten des ESC-Tests nicht eingerechnet, da hier für beide Sensoren ein gewisses Einlaufverhalten registriert wurde (rote Markierung). Beurteilt man nun aus dieser Sicht die Ergebnisse des SDSS, so liegen die Werte für „Bypass offen“ und „defekter Partikelfilter“ innerhalb der 4 % Abweichung. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass die Beurteilung der Rußemission beim derzeitigen Entwicklungsstand mit dem Durchschlagsspannungssensor noch nicht eindeutig möglich ist.

**Tab.: 4-7 Signalmittelwerte bei verschiedenen Rußkonzentrationen im ESC -Test**

Konfiguration Abgasanlage	Signal <sub>Mittelwert</sub> RLS	Signal <sub>Mittelwert</sub> SDSS	Rußkonzentration <sub>Mittelwert</sub>
Bypass-System geöffnet	1,033 V	0,156 V	16,8 mg/m <sup>3</sup>
defekter Partikelfilter	0,746 V	0,159 V	5,6 mg/m <sup>3</sup>
Bypass-System geschlossen	0,058 V	0,172 V	1,9 mg/m <sup>3</sup>



**Abb.: 4-24 Sensorsignal des RLS im ESC -Test bei drei unterschiedlichen Konfigurationen**

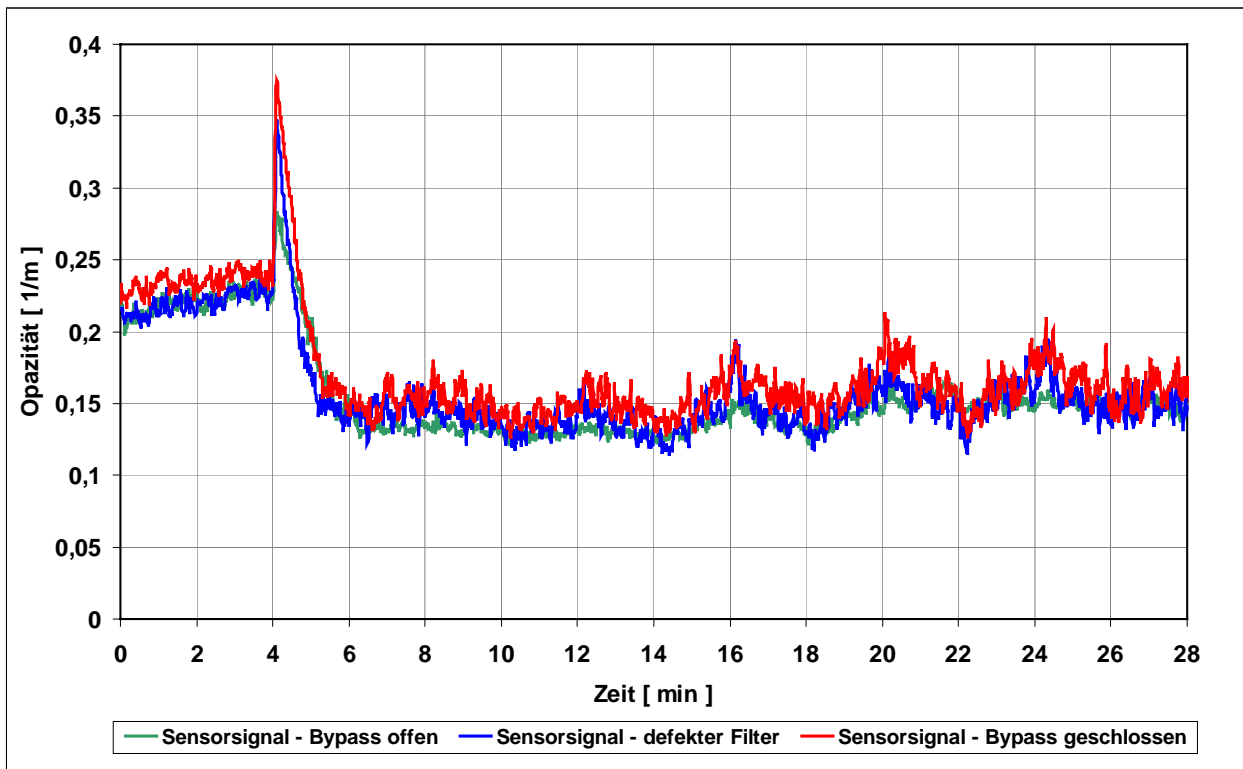


Abb.: 4-25 Sensorsignal des SDSS im ESC -Test bei drei unterschiedlichen Konfigurationen

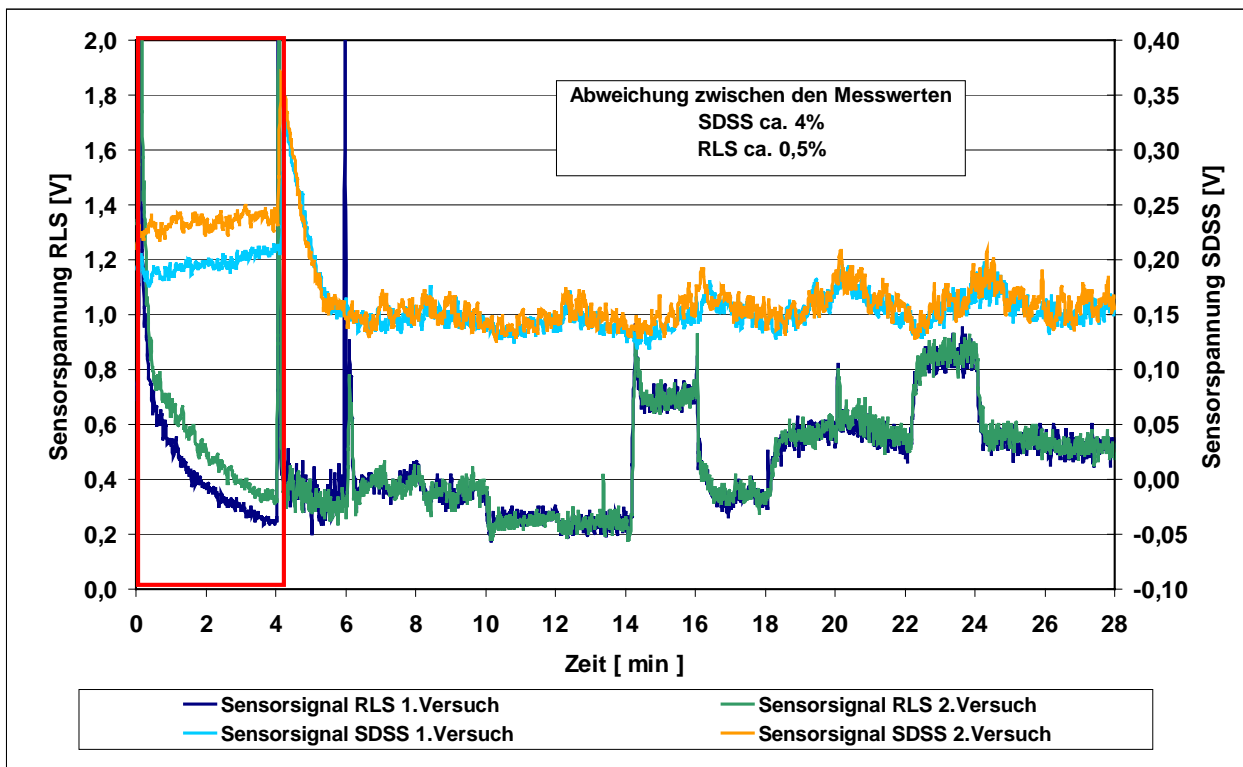


Abb.: 4-26 Abweichung des Sensorsignals bei Wiederholung der Testprozedur

## 5 Bewertung der Sensorprinzipien

Die vorhergehenden Versuche hatten das Ziel, beide Sensoren unter den Bedingungen am Motorenprüfstand zu untersuchen und die Qualität der Signale für ihren praktischen Einsatz zu beurteilen. Im Folgenden werden die Ergebnisse in einer Bewertungsmatrix kompakt zusammengefasst (Tab.: 5-1).

**Tab.: 5-1 Bewertungsmatrix der Sensoren**

Bewertungsgröße	Durchschlagsspannungssensor	Rußladungssensor
Korrelation zur Rußkonzentration (PM)	0,61	0,97
Opazität	0,62	0,93
Schwärzung	0,61	0,95
Querempfindlichkeit		
Emissionseinfluss (CO, HC)	stark	keine
Temperatureinfluss	stark	gering
Massenstromeinfluss	stark	gering
„statistische Abweichung“ des Messsignals	4 %	0,5 %
Betriebsgrenzen (Temp.)	500 °C	450 °C
Ansprechverhalten	Signalausschläge bei Lastwechsel (stark temperaturabhängig)	Gut (vergleichbar mit Opazimeter)
„Verrußung“ des Sensors (Signalausfall)	Ja	Ja
Signalverwertung in Bezug auf die Rußkonzentration	Noch nicht ausreichend, da Signal bei verschiedenen Rußkonzentrationen innerhalb der Wiederholgenauigkeit liegt	Für stationäre Betriebspunkte besteht funktionaler Zusammenhang, im dynamischen Betrieb vorerst nur qualitative Angaben möglich
Technische Realisierbarkeit für die Praxis	+ Kompakte Applikation im Abgasstrang + 12 V Spannungsversorgung realisiert - vorerst sollten weitere Versuche unter Laborbedingungen zur genaueren Untersuchung von Einflussfaktoren durchgeführt werden	+ Kompakte Applikation im Abgasstrang + 12 V Spannungsversorgung realisiert + nach Überarbeitung der empfindlichen Mechanik erscheint ein Einsatz im Fahrbetrieb realisierbar

Beide Sensoren wurden für den Prüfstandsbetrieb aufgebaut, mit einer Auswerteeinheit versehen und für den 12-Volt Bordnetzbetrieb zu Verfügung gestellt.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass beide Sensoren noch nicht in der Lage sind das gemessene Signal in einer Folge von sich verändernden Motorbetriebspunkten als Rußkonzentration (quantitativ) auszugeben.

Grund dafür sind Quereinflüsse, wie Abgastemperatur, Massenstrom und Abgasemissionen, die sich gleichzeitig ändern.

Allerdings lassen sich diese Einflussfaktoren für den Rußladungssensor stark eingrenzen und können in stationären Betriebspunkten für die Korrektur des Sensorsignals herangezogen werden, so dass eine Kalibrierung möglich ist. Haupteinflussfaktor ist hierbei die Volumenstromänderung und die damit verbundene Veränderung der Partikelgeschwindigkeit im Abgas. Die quantitative Beurteilung der Rußkonzentration durch das Sensorsignal konnte für den stationären Motorbetrieb ausreichend nachgewiesen werden, was durch die hohe Korrelation ( $r^2 > 0,9$ ) zu den Vergleichsmessverfahren unterstrichen wird. Beim dynamischen Verhalten ist bislang nur eine qualitative Aussage über die Partikelemission möglich.

Bei dem Durchschlagsspannungssensor wird das Signal von verschiedenen Faktoren unterschiedlich stark beeinflusst. Neben den Quereinflussparametern aus dem Abgas, kommen hier auch noch Einflüsse durch Veränderung der Materialeigenschaften zum tragen. Das Verfahren erscheint weniger sensitiv zu sein als das Rußladungsverfahren, wodurch sich beim derzeitigen Entwicklungsstand qualitative Veränderungen in der Rußkonzentration nicht eindeutig feststellen lassen.

Die in dem Projekt durchgeführten Versuche haben die prinzipielle Eignung von Sensoren zur Überwachung der Partikelemission von Dieselmotoren gezeigt. Beide untersuchte Sensoren grenzen sich in Ihrem Aufbau und ihrer Funktion deutlich voneinander ab.

Eine Beurteilung der Rußkonzentration als Maß für die Filterfunktionalität ist nach Abschluss dieses Projektes vorerst nur durch den Rußladungssensor möglich, wenngleich dies vorerst quantitativ nur für konstante Betriebszustände gilt und im quasi dynamischen Betrieb eine qualitative Aussage zulässt.

Mit Hilfe des Durchschlagsspannungssensors kann die Rußkonzentration nicht eindeutig gemessen werden, da das Sensorsignal durch eine Vielzahl von Abgasparametern beeinflusst wird. Hier wird vorgeschlagen das Messprinzip vor allem unter Laborbedingungen zu untersuchen, um die Einflussparameter gezielt untersuchen zu können.

## 6 Zusammenfassung des Entwicklungsstandes

Im Folgenden werden die erreichten Entwicklungsziele beider Sensoren kurz zusammengefasst und dem Stand der Entwicklung bei Projektbeginn gegenübergestellt.

### Rußladungssensor

#### a) Stand der Entwicklung zu Beginn des Vorhabens

1. Messprinzip: Auswertung des Stroms, den die Rußpartikel beim Berühren der Messelektrode während ihrer Entladung erzeugen
2. Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Rußkonzentration und Messsignal
3. Elektrodenheizung benötigt 200 Watt Leistung
4. Die Keramikisolatoren werden oberhalb von 250 °C leitend und beeinflussen das Messsignal
5. Sensoraufbau bisher nur für Laborversuche geeignet

#### b) Stand der Entwicklung am Ende des Vorhabens

zu 1.

- Messung der Ladung, die die Partikel beim Berühren der Hochspannungselektrode aufgenommen haben
- Herstellung eines Ladungsverstärkers mit DC-Kopplung
- Erzeugung des Messsignals durch arithmetische Mittelwertbildung
- Herstellung einer Schutzschaltung gegen Funkenüberschläge an den Kondensatorplatten bis 5 kV

Zu 2.

- Linearer Zusammenhang zwischen Rußkonzentration [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] und dem Ausgangssignal bei konstanter Gasgeschwindigkeit im Sensor (Korrelation zu PM,  $r^2 = 0,97$ )
- Erhöhung der Messempfindlichkeit im Vollstrom auf  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Empfindlichkeit im Bypass- Betrieb:  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bei einem Eigenrauschen von  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Zu 3.

- Herstellung einer Elektrodenheizung mit einem Leistungsbedarf von nur 25 Watt
- Entwicklung einer Heizungsregelung einschließlich Temperatur- und Strommessung von 250 bis  $650 \text{ °C} \pm 10 \text{ °K}$

Zu 4.

- Erhöhung der Betriebsfestigkeit auf 450 °C
- Ableitung von Kriechströmen durch Abschirmbleche um die Elektroden
- Kombination von Keramik, Glimmer und Quarzglas- Elektrodenhalterungen

Zu 5.

- Neukonstruktion des Sensors für seitliche Montage am Abgasrohr
- Herstellung einer kompakten Elektronikeinheit zum Betrieb am 12-Volt Bordnetz (Betriebsspannung: 10 bis 15 V)
- Einbau des Vollstromsensors in einen VW-Polo, Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand und im Straßenverkehr (Gesamtfahrleistung: 1200 km)



## Durchschlagsspannungssensor

### a) Stand der Entwicklung zu Beginn des Vorhabens

1. Zusammenhang zwischen Rußkonzentration und Messsignal noch nicht eindeutig geklärt
2. noch kein beheizter funktionsfähiger Sensor vorhanden (noch keine passende Keramik)
3. Grenze der Betriebsfestigkeit bei 350°C
4. Abdichtung gegen Abgase und Beständigkeit der Heizungsanschlüsse nicht ausreichend
5. Sensoraufbau bisher nur für Laborversuche geeignet

### b) Stand der Entwicklung am Ende des Vorhabens

zu 1.

- Der funktionelle Zusammenhang zwischen Sensorsignal und Rußkonzentration konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden, da die Anzahl der Einflussgrößen auf das Messsignal zu groß ist
- Die Sensorkennlinie ändert sich über der Zeit, insbesondere durch den Einfluss der Abgastemperatur
- Vorerst erscheint die Auswertung des Sensorsignals nur als Integralwert über der Zeit sinnvoll

Zu 2.

- Mehrere Versionen des SDSS-Sensors wurden hergestellt, dabei wurden geeignete Keramiken eingesetzt und die Beheizung des Sensors realisiert
- Herstellung einer Elektrodenheizung mit einem Leistungsbedarf von 50 Watt

Zu 3.

- Erhöhung der Betriebsfestigkeit auf 500 °C

Zu 4.

- Durch speziell angefertigte Keramikelemente konnte eine ausreichende Abdichtung gegen Abgase erreicht werden
- Beständigkeit der Heizungsanschlüsse wurde durch den Einsatz von Kabelschuhen anstelle der Schweißverbindung zwischen Platin und Kupfer verwendet

Zu 5.

- Der Sensor wurde in mehreren Varianten für die Montage im Abgasrohr aufgebaut
- Für das Messverfahren wurde der Messalgorithmus entwickelt und auf eine echtzeitfähige Hardware implementiert (Signalauswertung und Heizungsregelung)
- Der Betrieb am 12-Volt Bordnetz wurde realisiert

## Fazit

Innerhalb des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Verbundprojektes „Untersuchung zur Bewertung von Sensoren für die Überwachung der Partikelemission von Dieselmotoren“ wurden zwei Sensorprinzipien auf ihre Funktion als Partikelsensor überprüft.

Zwei Verfahren nach dem Ladungs- und dem Durchschlagsspannungsprinzip wurden weiterentwickelt und für den Einsatz im Abgasstrang eines Verbrennungsmotors am Prüfstand bereitgestellt. Am Motorenprüfstand des Forschungsinstituts Fahrzeugtechnik erfolgte die Untersuchung und Bewertung der Sensoren.

Beide Sensoren wurden als raumsparende Konstruktion aufgebaut, die den seitlichen Einbau in das Abgasrohr zur Messung der Partikelemission im Vollstrom ermöglichte. Ebenfalls wurde der Betrieb der Sensoren am 12 V - Bordnetz realisiert.

Etablierte Beurteilungsverfahren, wie die gravimetrische Partikelmessung, die Messung der Rauchtrübung und der Schwärzung, wurden zum Vergleich der Sensorsignale herangezogen.

Für den Rußladungssensor konnte eine hohe Korrelation zu den etablierten Messverfahren im stationären Versuch beobachtet werden ( $r^2=0,97$ , gravimetrische Gesamtpartikel). Dieses Ergebnis zeigt ebenfalls die Möglichkeit der direkten Messung der Rußkonzentration im Abgas und unterstreicht die Anwendbarkeit des Messverfahrens für den praktischen Motorbetrieb. Für den Durchschlagsspannungssensor konnte nur eine Korrelation von  $r^2=0,62$  ermittelt werden, wodurch sich die Aussagekraft dieses Sensorsignals, nach derzeitigem Entwicklungsstand, stark begrenzt. Diese Ergebnisse gelten aber vorerst nur für den stationären Motorbetrieb.

Anhand von Untersuchungen im ESC -Test konnte die praktische Anwendbarkeit der Verfahren demonstriert werden. Dabei hat sich gezeigt, dass der Rußladungssensor qualitativ gleiche Ergebnisse liefert, wie die eingesetzte Vergleichsmesstechnik. Die beim Einsatz eines kaputten Partikelfilters veränderte Rußemission wurde durch den Sensor sicher registriert. Beim Durchschlagsspannungssensor konnte eine eindeutige Veränderung des Signals bei Veränderung der Rußkonzentration nicht oder nur bedingt registriert werden.

Bis zum Einsatz als Partikelsensor im praktischen Fahrbetrieb bedarf es bei beiden Sensoren einer Weiterentwicklung des Verfahrens. Allerdings erscheint das Prinzip des Rußladungssensors beim derzeitigen Entwicklungsstand aussichtsreicher.

Bezüglich des Rußladungssensors kann bei dem jetzigen Entwicklungsstand nur bei ausgewählten Betriebspunkten eines Fahrzeuges eine quantitative Aussage getroffen werden, obwohl das Messsignal kontinuierlich anliegt. Grund dafür ist, dass es während des Vorhabens nicht gelungen ist, die momentane Abgasgeschwindigkeit mit dem Messsignal zu verrechnen, um eine kontinuierliche Messung der Rußkonzentration zu erhalten. Unter Einhaltung der Randbedingung von ausgewählten Betriebspunkten, ist der Einsatz des Sensors für die Überwachung von Partikelfiltern möglich. Nach Überarbeitung der Konstruktion des Sensor und einer vielschichtigen Erprobungsphase, wäre eine kommerzielle Umsetzung zu erwarten.

Unter Beibehaltung des Ladungssensorprinzips wurde im Projektzeitraum eine weitere konstruktive Variante geschaffen, die, ausgerüstet mit einer Pumpe für den Bypass-Betrieb, eine hohe Messempfindlichkeit aufweist und als eigenständiges Messgerät in Werkstätten und auch bei den Überwachungsvereinen zur Überprüfung von Fahrzeugen mit Partikelfiltern geeignet wäre. Bei dieser Einrichtung ist es gelungen, die Abgasgeschwindigkeit in die Berechnung der Partikelkonzentration einzubeziehen, so dass diese

Messanordnung für Erprobungszwecke zur Verfügung steht. Bei der Entwicklung des Gerätes zu einem Produkt, hat die PTB Braunschweig großes Interesse angekündigt und möchte ein solches Vorhaben als assoziierter Partner begleiten.

In Bezug auf den Durchschlagsspannungssensor wurde während der gesamten Projektdauer herausgefunden, dass sich die Sensorkennlinien der Abgastemperatur mit der Zeit verändern, was die Genauigkeit des Messverfahrens stark mindert oder die Messergebnisse völlig verfälscht.

Als Ursachen dafür werden z.B. Veränderung der Keramikeigenschaften durch Alterungsprozesse oder fehlerhaft arbeitende Funkenerkennung bei bestimmten Abgastemperaturen vermutet. Diese Einflüsse und Quereinflüsse durch weitere Abgasparameter sollen in Zukunft näher untersucht werden, um begründet abschätzen zu können, welches Entwicklungspotenzial der Sensor noch hat.

Die während des Projektzeitraumes durchgeführte Recherche bezüglich der Überwachung von Partikelfiltersystemen hat gezeigt, dass vor allem im Bereich der „off- und non- road“ Maschinen großes Interesse an einer unmittelbaren Emissionsüberwachung besteht (Siehe Anlage Seite 63, Einsatzmöglichkeiten für Partikelsensoren). Da hier beim Ausfall des Partikelfiltersystems arbeitsschutztechnisch relevante Aspekte (die direkte Gefährdung von Menschen durch eine erhöhte Partikelexposition) die z.B. im Tunnel- und Untertagebau eine große Rolle spielen, ist eine einfache Überwachung des Druckverlustes als Indikator für die Filterfunktion nicht ausreichend. Auch im Bereich der On-Board- Diagnose (OBD 2) von PKW-Dieselmotoren wird eine direkte Überwachung der Partikelemission zukünftig eine große Rolle spielen, da bei den bevorstehenden Abgasgrenzwerten die Überwachung der Filterfunktion durch die Druckverlustmessung zu ungenau ist.

Diesbezüglich wurden im Projektzeitraum zahlreiche Gespräche mit Partnern der Industrie, Berufsgenossenschaften sowie Überwachungs- und Gesundheitsverbänden geführt, die den praktischen Einsatz von Partikelsensoren befürworten und weitere Entwicklungsprojekte unterstützen wollen.

## Literaturverzeichnis

- /1/ SRU; UMWELTGUTACHTEN 2002; Für eine neue Vorreiterrolle, Juli 2002 Stuttgart: Metzler-Poeschel, 2002 (Bundestags-Drucksache 14/8792)
- /2/ UBA Pressemitteilung des Umweltbundesamtes: Hintergrundpapier: Der Diesel der Zukunft – die Zukunft des Diesels, Berlin Juli 2003
- /3/ UBA Umweltbundesamt: Future Diesel: Abgasgesetzgebung Pkw, leichte Nfz und Lkw – Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen, Berlin Juli 2003
- /4/ Wichmann, H.; „Abschätzung positiver gesundheitlicher Auswirkungen durch den Einsatz von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen in Deutschland“; Gutachten im Auftrag des Bundesumweltamtes; 2003
- /5/ Treetz, J.: Literaturstudie – Vorrichtung zur Überwachung der Partikel- (Ruß-) Emission von Verbrennungsmaschinen, FAD e.V., März 2002
- /6/ Zikoridse, G. (Kummer, C.; Heidrich, E.; Lindner, R.; Naschke, W.; Rocher, L.) Lösungen zur simultanen Reduktion limitierter Schadstoffkomponenten, 3. FAD-Konferenz „Herausforderung - Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren“, Dresden, 9.-10. November 2005
- /7/ Moser, F. X. (Sams, T); Diesel- und Ottomotor : Wann wird es den „ emissionsfreien“ Verbrennungsmotor geben? 5. Dresdner Motorenkolloquium: „Zukünftige Brennverfahren für Dieselmotoren“, 5./6. Juni 2003
- /8/ Zikoridse, G. (Bach, E.; Sandig, R); Lösungsansätze zur simultanen Reduktion von NOx und PM. Haus der Technik, Tagung: Minimierung der Partikelemission von Verbrennungsmotoren, München, Juni 2004
- /9/ Zikoridse, G. (Sandig, R ; Kopte, J., Naschke, W); Comparison of different Regeneration strategies for diesel particle traps. 4. Int. Konferenz „Filtration in Transportation“, Stuttgart, Oktober 2004
- /10/ Zikoridse, G. (Sandig, R. ; Kopte, J.; Lindner, R.; Rocher, L.; Naschke, W); Filtre additivé vs filtre revêtu „Comparison of different regeneration strategies for diesel particle traps“, euroforum France; „Procédés de combustion“; Paris, November 2004
- /11/ Zikoridse, G (Sandig, R.; Hofmann, U); Regenerationsmethoden für Dieselpartikelfiltersysteme. Haus der Technik, Tagung: Minimierung der Partikelemission von Verbrennungsmotoren, Expertverlag, ISBN 3-8169-2430-1, 2004
- /12/ Zikoridse, G. (Bach, E.; Kummer, C.; Kopte, J.); Bewertungsmöglichkeiten von Abgasnachbehandlungssystemen für Dieselmotoren, 5. Dresdner Motorenkolloquium, „Zukünftige Brennverfahren für Dieselmotoren“, Dresden, Juni 2003
- /13/ Zikoridse, G. Chancen und Risiken für die mehrstufige Abgasnachbehandlung von Dieselmotoren, HDT-Seminar "Partikelminimierung", Karlsruhe 2006

- /14/ Hauser, G.; Patent DE 198 17 402 C1
- /15/ Gheorghiu, V. ; Patent DE 198 53 841 C 2
- /16/ Gheorghiu, V.; Development and Experimental Proof of Soot- and Particle Sensor, FuE-Präsentation,<http://www.haw-amburg.de/pers/Gheorghiu/Patente/RS/Praesentationen.pdf> 2004
- /17/ Gheorghiu, V.; Development and Experimental Proof of Soot- and Particle Sensor, FuE-Präsentation,<http://www.hawhamburg.de/pers/Gheorghiu/Patente/RS/Praesentationen2.pdf> 2005
- /18/ Gheorghiu, V.; AUTOREG-Konferenz 2006 ,  
[http://www.hawhamburg.de/pers/Gheorghiu/AUTOREG\\_2006/AUTOREG\\_2006\\_P9.pdf](http://www.hawhamburg.de/pers/Gheorghiu/AUTOREG_2006/AUTOREG_2006_P9.pdf)
- /19/ Gheorghiu, V.; FISITA Kongress 2006;  
[http://www.haw-hamburg.de/pers/Gheorghiu/FISITA\\_2006/F2006P241-Paper.pdf](http://www.haw-hamburg.de/pers/Gheorghiu/FISITA_2006/F2006P241-Paper.pdf)

# Anhang

## Einsatzmöglichkeiten für Partikelsensoren

Die Marktrecherchen, welche im Laufe dieses Projektes zum Einsatz von Partikelsensoren durchgeführt wurden, ergaben drei Hauptansatzpunkte für die Vermarktung.

Der Partikelsensor kann für On-Board-Diagnose-Systeme von Straßenfahrzeugen mit Dieselmotor und für die Überwachung der Funktion von Partikelfiltern von Baumaschinen und stationären Diesellaggregaten eingesetzt werden. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ergibt sich in Kfz-Werkstätten und bei Überwachungsvereinen wie TÜV und DEKRA.

### On-Board-Diagnose-Systeme für Straßenfahrzeuge mit Dieselmotor

Der bisherige Stand der Forschung ergibt, dass die Rußemission eines Dieselmotors allein mit innermotorischen Maßnahmen nicht genügend abgesenkt werden kann. Deshalb hat sich in der Automobilindustrie die Erkenntnis durchgesetzt, dass man auf Partikelfilter nicht verzichten kann, um die Anforderungen von EURO VI zu erreichen.

Der nunmehr staatlich geförderte Einsatz von Partikelfiltern sollte aber die Kontrolle der Wirksamkeit des Partikelfiltersystems beinhalten. Zur Zeit wird der Abgasdruck gemessen und daraus Schlussfolgerungen über Funktionalität des Partikelfilters gezogen. Da hier aber mehrere Bedingungen wirken, ist diese Methode nicht immer aussagekräftig. Die Wirksamkeit des Systems wird bei der jährlichen Abgassonderuntersuchung (AU) mittels Trübungsmessung kontrolliert. Diese Messmethode ist durch das hohe Abscheidevermögen der Partikelfilter aber nur noch bedingt einsetzbar, da kaum noch eine Trübung feststellbar ist. Die Nachweisgrenze kann bei den verfügbaren Geräten unterschritten werden. Nur massiv geschädigte Partikelfilter werden detektiert.

Ein Partikelfilter kann beim Regenerieren durch eine Überhitzung, oder mechanische Zerstörung an einigen Stellen durchbrechen und somit auch nur teilweise unwirksam werden.

Dies geschieht nicht unbedingt schleichend, sondern kann sehr plötzlich passieren. Das bedeutet, dass Fahrzeuge längere Zeit mit defektem Partikelfilter fahren, ohne das dies mit der Abgasdruckmessung bemerkt wird.

Der Rußsensor zur On-Board-Diagnose (OBD) muss folgende Anforderungen erfüllen.

- Robustheit gegen mechanische Schwingungen
- keine Anfälligkeit gegenüber Temperaturschwankungen
- Störsicherheit gegen elektrische und magnetische Felder
- geringer Energieverbrauch
- geringer Preis

An die Genauigkeit bestehen geringere Anforderungen, da nur ein Grenzwert überwacht wird. Die Auslegung muss voraussichtlich so erfolgen, dass eine gewisse Anzahl von Ereignissen, d.h.

Grenzwertüberschreitungen vorliegen müssen, bevor der Fahrzeugführer von der Fehlfunktion informiert wird.

Die Ereignisse werden in einem Datalogger gespeichert und können in der Werkstatt ausgelesen werden. Da in diesem Datalogger üblicherweise auch andere Werte wie Abgasdruck vor dem Partikelfilter und Temperaturen gespeichert werden, kann man das Verhalten des Partikelfilters aufgrund der Messwerte des Partikelsensors besser analysieren.

Es hat sich aber gezeigt, dass die Fahrzeugindustrie zur Zeit wenig Interesse an einem solchen Partikelsensor hat. Dies ist erst dann zu erwarten, wenn durch den Gesetzgeber entsprechende Vorschriften erlassen werden. Damit ist kurzfristig allerdings nicht zu rechnen.

## **Überwachung von Partikelfiltern in Baumaschinen und Dieselaggregaten**

Die Anforderungen an den Rußsensor sind hier ähnlich wie unter Punkt 2 beschrieben.

Hier zeigt sich die gegenwärtige Situation zum Einsatz solcher Systeme aber grundsätzlich anders.

Bei beweglichen Baumaschinen wie Radladern, Baggern usw. und Dieselaggregaten wie Kompressoren, Pumpen und Generatoren ist der Aspekt des Arbeitsschutzes zu beachten.

Dies wird in den „Technischen Regeln für Gefahrstoffe TRGS554 – Dieselmotorenemissionen“ geregelt. Diese Vorschrift gilt für ganz oder teilweise geschlossene Arbeitsbereiche wie Werkstätten, Fertigungshallen, Lagerhallen, Verkehrstunnel, Bauarbeiten unter Tage usw. in denen Dieselmotoren und -aggregate betrieben oder auch instandgesetzt werden.

Hierbei wird dem kanzerogen wirkenden Partikelanteil an den Dieselmotorenemissionen besondere Beachtung geschenkt.

Bei stationären Dieselaggregaten werden, wenn technisch möglich, die gesamten Abgase ins Freie geleitet, die Umweltbelastung wird dadurch aber auch nicht gemindert.

Bei beweglichen Baumaschinen mit Dieselmotoren werden Partikelfilter eingesetzt.

Diese können fest installierte Systeme mit automatisch eingeleiteter Regeneration, oder auch aufsteckbare Partikelfilter sein. Letztere werden dann in gesonderten Vorrichtungen regeneriert indem der abgelagerte Ruß verbrannt wird.

Durch die besonderen Anforderungen an den Arbeitsschutz, kommt einer Erkennung von defekten Partikelfiltern hier eine besondere Bedeutung zu. Denn die Emissionswerte werden erst nach 1500 Betriebsstunden bzw. jährlich überprüft.

Selbst bei stationären Anlagen sind Partikelfilter und dessen Überwachung sinnvoll, da die Abgasleitungen ins Freie sonst mit Ruß kontaminiert werden.

Aufgrund der geringeren Stückzahlen und der hohen Gesamtkosten von solchen Maschinen und der erforderlichen Partikelfiltersysteme ist hier ein höherer Preis erzielbar. Dieser sollte aber unter 10% des Preises für den Partikelfilter liegen.

## **Messgerät zur Ergänzung der AU**

Zur Zeit wird die Partikelemission durch eine Trübungsmessung bestimmt. Eine Fotodiode misst, wieviel Licht von einer Leuchtquelle am anderen Ende der Messkammer ankommt. Daraus wird dann der Trübungswert errechnet. Hierbei beeinflussen die Umgebungstemperatur, der Umgebungsdruck und die Messkammerlänge das Messergebnis. Diese Größen müssen während der Messung konstant gehalten

werden, um vergleichbare Messergebnisse zu erzielen. Außerdem muss die Messkammer auf 100 °C beheizt werden, damit das Messergebnis nicht durch Wasserdampf (Weißrauch) beeinflusst wird. Somit wird Schwarzrauch (Ruß, NO<sub>2</sub>, unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Schmierölrückstände) als Trübung gemessen. Da die Trübung durch die Messrohrlänge beeinflusst wird, hat der Gesetzgeber den Absorptionskoeffizienten  $k$  definiert. Dieser bezeichnet die Trübungsfähigkeit des Rauchgases pro Meter Messrohrlänge. Der gemittelte Höchstwert wurde für Euro IV auf 0,5 1/m festgelegt.

Durch Partikelfiltersysteme wird die Partikelmasse auf einen Wert von weniger als 10% der ursprünglichen Masse gesenkt. Dadurch ist die Nachweisgrenze von Trübungsmessern unterschritten.

Deshalb ist davon auszugehen, dass neue Messgeräte notwendig werden, um die Partikelemission zu bestimmen.

Hier ist es wichtig, dass der Sensor schnell am Abgasrohr des Fahrzeuges befestigt werden kann. Bei diesem Messgerät ist eine höhere Genauigkeit erforderlich, da ein Messwert ermittelt wird und nicht nur ein Schwellwert ausgewertet werden soll.

Es ist dann möglich, bei bestimmten Betriebszuständen exakte Messwerte und Diagramme zu ermitteln und über eine längere Zeit Aussagen zur Alterung des Partikelfilters zu machen.

Die Kosten eines solchen Messsystems sollten 5.000 € nicht überschreiten, da dies in allen Fachwerkstätten angeschafft werden muss, welche berechtigt sind die AU durchzuführen.