

E.A.S.T.Solutions GbR
Geschäftsführer: Heiko Presuhn
Hauptstraße 19
38388 Twieflingen

Forschungsprojekt:

**Entwicklung eines Rußmessgerätes für Kfz- Werkstätten und
AU- Prüfung**

1. Phase: Durchführung von grundlegenden Untersuchungen

Abschlussbericht, 1. Phase

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt Az.: 25911

Projektpartner:

Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel

PTB, Braunschweig (assoziativ)

TÜV-Nord, Essen, (assoziativ)

E.A.S.T.Produktions GmbH, Twieflingen

Verfasser:

Prof. Dr.- Ing. Günther Hauser

Dipl.- Ing. (TU) Gerald Hauser

Twieflingen, 13. Oktober 2009

<small>10/97</small> Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt		 <small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt</small>			
Az	25911	Referat	24/0	Fördersumme	124.000,00 €
Antragstitel		Entwicklung eines Rußmessgerätes für Kfz-Werkstätten und AU- Prüfung			
		1. Phase: Durchführung von grundlegenden Untersuchungen			
Stichworte		Energie, Motor, Emission			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
12 Monate	01.03.2008	28.02.2009	1 1.Phase		
Zwischenberichte	31.07.2008 31.12.2008				
Bewilligungsempfänger	E.A.S.T.Solutions GbR 38388 Twieflingen Hauptstraße 19		Tel 05352-9097037 Fax 05352-58228		
			Projektleitung Herr Heiko Presuhn		
			Bearbeiter Herr Prof. Dr. Hauser		
Kooperationspartner		Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel			
		PTB Braunschweig (assoziativ) TÜV-Nord Essen (assoziativ) E.A.S.T.Produktions GmbH Twieflingen			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Die maßgebliche Emission von Dieselmotoren besteht aus NOx und Rußpartikeln. Bei Erniedrigung der NOx- Emission durch innermotorische Maßnahmen entsteht vermehrt Ruß und umgekehrt. Die Rußemission kann mit sehr effizienter Wirkung durch geregelte Partikelfilter nahezu beseitigt werden, wenn sichergestellt ist, dass deren Wirkung langfristig erhalten bleibt. Da solche Filter im Laufe der Betriebszeit verschleißend oder beschädigt werden können, ist im Rahmen der periodischen Abgasuntersuchung eine Überprüfung der Filter auf ihre Funktion erforderlich. Messgeräte, die empfindlich genug für diese Aufgabe wären, sind sehr kostspielig, wartungsintensiv und nicht werkstatttauglich. Zielsetzung dieser 1. Phase des Projektes ist die Entwicklung eines Messgerätes nach einem neuen, sehr robusten Messverfahren, das die geforderte Empfindlichkeit aufweist, mobil einsetzbar ist und Anschaffungskosten von ca. 10.000,- Euro hat. ein solches Messgerät ist, nach Recherchen (Stand 2007) von der PTB und dem TÜV-Nord, weltweit nicht verfügbar.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Ausgehend von den Erkenntnissen, die im Rahmen einer kooperativen Promotion gewonnen wurden und den Erfahrungen während des Forschungsprojektes DBU, AZ 22493, mit dem Einsatz des Ladungssensors für OBD und OBM wird ein Konzept eines Werkstattmessgerätes zusammengestellt, das obigen Zielvorstellungen entspricht. Dabei wurden neue Probleme festgestellt, die mit der niedrigen Gasgeschwindigkeit im Sensor in Zusammenhang stehen und bei den hohen Gasgeschwindigkeiten im Abgasvollstrom nicht aufgetreten waren. Es wurden Untersuchungen der Elektrodenform des Sensors unter Einfluss der Gasströmung durchgeführt. Dazu wurde die erforderliche Messtechnik entwickelt, die den Volumenstrom, die Temperatur und den Absolutdruck im Sensorbereich registriert, um das Messsignal auf einen Normzustand zu beziehen zu können. Es musste auch das Problem eines geheizten Entnahmeschlauchs gelöst werden, um Kondensatbildung im Sensor zu vermeiden. Zusätzliche Sicherheitseinrichtungen wurden entwickelt, die eine Zerstörung der Eingangschaltung der Messelektronik durch Funkenüberschlag von der Hochspannungselektrode verhindern sowie eine elektronische Dauerkurzschlussicherung für die Hochspannung. Nach erfolgreicher Klärung der Probleme, wurden die einzelnen Komponenten des Werkstattmessgerätes in ein transportables Gehäuse eingebaut und Vergleichsmessungen beim TÜV-Nord durchgeführt, um die Korrelation zum Opazimeter bei unterschiedlichen Motortypen nachzuweisen. Der Meilenstein der 1.Phase des Projektes war an diese Korrelation gebunden.</p>					
<small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ http://www.dbu.de</small>					

Ergebnisse und Diskussion

Die zu Beginn des Vorhabens aufgetretenen Probleme konnten gelöst werden, indem eine neuartige Struktur der Messelektrode entwickelt wurde, die eine höhere Empfindlichkeit und schnellere Ansprechzeit ergab, so dass die Anforderungen der AU bezüglich dem Zeitverhalten des Sensors erfüllt werden konnten. Der Ausfall der Elektrodenheizung durch Oxidation der Heizwendeloberfläche konnte beseitigt werden, indem diese in einem Glasrohr luftdicht eingeschlossen wurde, damit kein frischer Luftsauerstoff eintreten kann. Der Einfluss der temperaturabhängigen elektrischen Leitfähigkeit der Quarzglas- Elektrodenhalter auf das Messsignal wurde konstruktiv gelöst, so dass zwischen der Position der Heizwendel und den Elektrodenköpfen ein Temperaturgefälle von ca. 200 °C entsteht. Die Einführung einer Nullpunkspülung löste das Problem der thermischen Nullpunktstabilität der Messelektronik und der Sensoren für Temperatur und Differenzdruck zur Umrechnung auf den Normzustand. Die Untersuchungen von verschiedenen Dieselfahrzeugen beim TÜV-Nord zeigten neue, aber bereits gelöste Probleme in Bezug auf Verschmutzung des Entnahmeschlauchs und des Sensors. Durch eine vorgesehene Rückspülung der Einrichtung kann bei Bedarf nach ca. 30 s der Ausgangszustand sicher wiederhergestellt werden. Die ersten Reihenuntersuchungen von Fahrzeugen erfolgten mit der 1. Ausführung des Versuchsmusters. Es wurden das BOSCH- als auch das AVL Opazimeter als Vergleichsgerät verwendet. Die Auswertung der Messungen ergaben eine Gesamtkorrelation von $R^2 = 90\%$ im Vergleich zu den Messungen mit den Opazimetern. Wenn nur das Opazimeter von AVL Typ 439 für die Vergleiche eingesetzt wird, erhöht sich die Korrelation auf 95 %, einschließlich der Reproduzierbarkeit.

Das 2. Ausführung des Mustergerätes erfüllt die geplanten Ziele bezüglich Gewicht, Baugröße, Handhabbarkeit, Robustheit, Empfindlichkeit und Anschaffungspreis. Das entscheidende Ergebnis für eine Weiterführung des Vorhabens (Phase II des Antrags) besteht darin, dass eine hohe Korrelation, unabhängig von den verschiedenen Fahrzeugmotoren, erreicht wurde. Zu Beginn des Vorhabens bestanden Bedenken, dass die Messergebnisse von dem Verbrennungsverfahren des jeweiligen Motors abhängig sind, begründet durch das Verfahren der Partikelladung. Bei Untersuchungen des gesamten Kennfeldes von Motoren und Betrieb des Sensors innerhalb der Abgasanlage (OBD-Betrieb) ist dies auch der Fall. Da bei der AU nur ein einziger Arbeitspunkt angefahren wird (Vollgasstoß bei Leerlast) und die wichtigsten Einflussgrößen auf das Sensorsignal gemessen werden, wurde keine Einwirkung der Oberflächenform der Rußpartikel erkannt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Einbau von 2 Ladungssensoren einschließlich OBD-Auswertung in schweren Radladern im Schacht Konrad, 6.02.2008

Inbetriebnahme eines Ladungssensors für Vollstrommessungen im Europäischen Forschungszentrum von TYOTA in Brüssel, 2.-4.04.2008

Präsentation des Ladungssensors auf dem Hochschulgemeinschaftsstand während der Hannover Messe, 21.-25.04.2008

Präsentation und Vorführung des Ladungssensors auf der „12. ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles“, Zürich, 23- 25.06.2009

Hauser G.: „Smoke particle sensors for OBD and high sensitive measurements“, internationale CTI-Tagung, 8.-10.12.2008

Präsentation des Ladungssensors im Abgaszentrum der Automobilindustrie (ADA) in Stuttgart, 2.04.2009

Hauser G.: „OBD Measurements in Vehicles and Non-Road Applications“ Haus der Technik, 28.04.2009, erschienen im EXPERT- Verlag, „Onboard- Diagnose III“, ISBN 978-3-8169-2926-0

Hauser G.: „Wie kann der Übergang von alter zu neuer Messtechnik erfolgen“, PTB Braunschweig, Partikelseminar, 19.05.2009

Präsentation und Vorführung des Werkstattmessgerätes auf der „13. ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles“, Zürich, 22.-24.06.2009

Präsentation und Vorführung des Werkstattmessgerätes auf dem FAD-Workshop „Überprüfung von Partikelfiltern bei Großmotoren und Binnenschifffahrt“, Dresden, 1.-2. 07.2009

Präsentation des Werkstattmessgerätes bei der Volkswagen AG, Abt. EASZ/2 Prüfmethode, Herr Dr. Carli, 20.08.2009

Fazit

Das F & E- Projekt, 1. Phase, konnte mit Erfolg abgeschlossen werden. Es steht jetzt ein Entwicklungsmuster für Erprobungszwecke zur Verfügung. Es laufen bereits Verhandlungen mit der Fa. Saxon-Junkalor, Dessau, die für den Bereich der AU das Verfahren einsetzen wollen. Anfang 2010 wird von dem Bundesumweltamt eine Messkampagne initiiert, die eine unabhängige wissenschaftliche Einrichtung durchführen wird, bei der Partikelmessgeräte verschiedener Hersteller auf ihre Eignung für die Abgasuntersuchung (AU) geprüft werden sollen.

I. Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	4
II	Verzeichnis der Bilder und Tabellen	5
III	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	6
IV	Verzeichnis der Begriffe und Definitionen (Anhang A)	7
	Zusammenfassung	8
	Einleitung	9
1.	Ausgangssituation	9
1.1	Rußladungssensor, Stand der Technik	9
	Hauptteil	11
1.1	Optimierung des Messsystems	11
1.1.1	Entwicklung neuer Sensorelektroden	11
1.1.2	Entwicklung der Elektrodenschaftheizung	12
1.1.3	Blendenmessung des Volumenstroms	13
1.1.4	Verbesserung des Zeitverhaltens	15
1.1.5	Modellierung der Funktion des Ladungssensors	16
1.2.	Motorkennfelduntersuchungen in der FH	19
1.2.1	Motorkennfeld Charakterisierung	19
2.	Auslegung des Rußmessgerätes für Werkstätten.....	21
2.1	Funktion des Messgerätes und Signalverarbeitung	22
2.2	Messprozedur der periodischen Abgasuntersuchung (AU)	28
2.3	Simulation und Berechnung der Eingangsschaltung	29
2.4	Diskrete Auslegung der Eingangsschaltung	39
2.5	Ausführung der 1. Version des Messgerätes für Werkstätten.....	40
2.6	Ausführung der 2. Version des Messgerätes für Werkstätten.....	42
2.7	Untersuchungen beim TÜV-Nord	47
2.8	Auswertung der Messungen beim TÜV-Nord	50
3.	Fazit	51
	Literaturverzeichnis	54
4.	Anhang A Temperaturgeführter Massenstromsensor	55

II. Verzeichnis der Bilder und Tabellen

Abb.:	1-1	Prinzip des Rußladungssensors	9
Abb.:	1-2	Vergleichsmessungen Rußladungssensor / AVL-Pass	10
Abb.:	1-3	Alternativer Sensoraufbau	11
Abb.:	1-4	Sensorkopf mit neuer Elektrodenform	11
Abb.:	1-5	Aufbau der Elektrodenschäfte	12
Abb.:	1-6	Heizungswendel	13
Abb.:	1-7	Kalibrierung des Volumenstroms	14
Abb.:	1-8	Zusammenhang zwischen Sensorsignal und Differenzdruck	14
Abb.:	1-9	Zeitverhalten der Messelektrode	15
Abb.:	1-10	Strömungsuntersuchungen im Sensor	15
Abb.:	1-11	Partikelmasse abhängiges Signal mit begrenzter Elektrodenlänge	18
Abb.:	1-12	Partikelform Charakterisierung	20
Abb.:	2-1	Sensor Eintrittsdüse	22
Abb.:	2-2	Bauteile des Sensors	22
Abb.:	2-3	Funktionseinheiten des Messgerätes für Werkstätten	23
Abb.:	2-4	Kalibrierung der Messelektronik	24
Abb.:	2-5	Vorrichtung zur Einstellung der Rußkonzentration	24
Abb.:	2-6	Ladungssignal im Vergleich zum Opazimeter	25
Abb.:	2-7	Korrelation: Ladungskapazität / Opazimeter	25
Abb.:	2-8	Hochspannungsabhängigkeit	27
Abb.:	2-9	normierte Geschwindigkeitsabhängigkeit	28
Abb.:	2-10	Zeitprofil der periodischen Abgasuntersuchung	29
Abb.:	2-11	Ersatzschaltplan der Eingangsschaltung	30
Abb.:	2-12	Ersatzschaltplan des mathematischen Modells der Sensorschaltung	31
Abb.:	2-13	Versuchsmesswerte	37
Abb.:	2-14	Zeitverhalten der Eingangsschaltung	38
Abb.:	2-15	Frequenz- und Phasengang der Eingangsschaltung	39
Abb.:	2-16	1. Ausführung des Rußmessgerätes	40
Abb.:	2-17	Funktion der Schlauchheizung	41
Abb.:	2-18	Sensoreinheit	42
Abb.:	2-19	Gaslaufplan	44
Abb.:	2-20	Steuerlogik der Ventile	45
Abb.:	2-21	2. Ausführung des Rußmessgerätes	45
Abb.:	2-22	Bedienungsoberfläche	46
Abb.:	2-23	Technische Daten	47
Abb.:	2-24	Messanordnung beim TÜV-Nord	48
Abb.:	2-25	Vergleich der Trübungsmessung	49
Abb.:	2-26	Zeitsynchrone Korrekturberechnung	49
Abb.:	2-27	Tabelle der untersuchten Fahrzeuge	50
Abb.:	2-28	Fahrzeugauswertung	50
Abb.:	A- 1	Prinzip des temperaturgeführten Massenstromsensors	56
Abb.:	A- 2	Funktionsmuster des temperaturgeführten Massenstromsensors	56
Abb.:	A- 3	Rohsignale des temperaturgeführten Massenstromsensors	57
Abb.:	A-4	Korrigierte Signale des temperaturgeführten Massenstromsensors	58

III. Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Abkürzung	Bedeutung
\vec{E}	Elektrisches Feld
\dot{N}	Zahl der Partikel pro Sekunde
AU	periodische Abgasuntersuchung
C_1	Kondensator zur Ansprechverzögerung
C_2	Gegenkopplungskondensator
C_M	Kapazität der Messelektrode
C_p	Partikelladung
D_1	Schutzdiode
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
f_{Druck}	Korrekturfaktor für Umgebungsdruck
f_{Hoch}	Korrekturfaktor für Hochspannung
f_{Temp}	Korrekturfaktor für Temperatur
f_{Vol}	Korrekturfaktor für Gasgeschwindigkeit im Sensor
I_{1C}	Strom durch C_1 (Ansprechverzögerung)
I_L	Strom durch den Vorwiderstand der Schutzschaltung
I_M	Partikelstrom auf der Messelektrode
I_{P1mg}	Partikelstrom bei 1 mg/m ³ Rußkonzentration
I_{R1}	Strom durch Lastwiderstand R_1 am Sensor
k	Opazität, Trübung in [1/m]
L_{nA}	Ladungsstrom der Rußpartikel
L_{OPA}	Ladungsopazität, Opazität, gemessen mit Ladungssensor
$L_{OPAkorr}$	Berechnetes Messergebnis der Ladungsopazität [1/m]
nA	Nano- Ampere
p	Aktueller Gasdruck in [mbar]
p_{Abs}	Absolutdruck, Umgebungsdruck in [mbar]
Q_p	Partikelkapazität
R_1	Lastwiderstand zum Sensor
R_2	Gegenkopplungswiderstand
R_L	Vorwiderstand der Schutzschaltung

R_S	Lastwiderstand des Ladungsverstärkers
T	Temperatur in [°C]
U_0	Nullpunktdrift der Messelektronik [V]
U_a	Ausgangsspannung des Messverstärkers [V]
U_E	Eingangsspannung an Ladungsverstärker
U_H	Simulierte Hochspannung
U_{Hoch}	Gemessene Hochspannung [V]
U_M	Spannungsänderung der Messelektrode
U_{roh}	Rohsignal des Sensors am Ausgang des Ladungsverstärkers [V]
U_s	Ausgangssignal des Ladungsverstärkers
v	gemessener Volumenstrom [l/min]
V	Verstärkung des Sensorsignals durch die Eingangsschaltung
v_U	Verstärkungsfaktor des Operationsverstärkers

IV Verzeichnis der Begriffe und Definitionen (Anhang)

Abkürzung	Bedeutung
T_H	Temperatur des Hitzdrahts
P_H	Leistung am Hitzdraht
\dot{m}	Massenstrom
\dot{Q}	Wärmestrom
T_T	Temperatur des Mediums
ΔT	Temperaturdifferenz
λ	Wärmeübergangskoeffizient
R_T	Widerstand des Temperatursensors

Zusammenfassung

Es wurden grundlegende Untersuchungen zur Erstellung eines Messgerätes für Werkstätten durchgeführt. Diese beziehen sich auf die Optimierung des Sensors unter Berücksichtigung der niedrigen Gasgeschwindigkeit, der Elektrodenschaftheizung und deren Rückwirkungen auf das Sensorsignal, der Haltbarkeit der Heizung durch Schutz vor Oxidation und der Entwicklung eines geheizten Entnahmeschlauches. Die Optimierung des Sensors resultierte in der Herstellung einer neuartigen Messelektrode so dass das für Opazimeter vorgeschriebene Zeitverhalten erreicht wurde. Die Einflüsse der Elektrodenschaftheizung bestanden in der temperaturabhängigen Leitfähigkeit des Quarzglas. Die Leitfähigkeit von Quarzglas beginnt oberhalb 500 °C. Deshalb wurde zwischen Heizwendel und dem Sitz der Elektrodenköpfe ein Abstand von 12 mm vorgesehen um aufgrund der schlechten Wärmeleitung eine Abkühlung um 200 °C zu erreichen. Die Langzeitbeständigkeit der Heizwendel wird durch luftdichtes Verkleben mit einem Keramikkleber gleicher Wärmeausdehnung erreicht. Durch Oxidation der Heizwendel wird der Sauerstoff verbraucht, da aber kein frischer Luftsauerstoff eindringen kann, findet keine weitere Oxidation statt. Es wurde herausgefunden, dass die Lebensdauer der Heizwendel von dem Abplatzen der Oxidschicht, und damit verbundenen Schwächung des Querschnitts, und deren ständigen Neubildung abhängig ist. Der Heizschlauch besteht in der 1. Ausführung aus Wellrohr, das in 2 Widerstandsheizungssegmente aufgeteilt wird, die getrennt auf eine konstante Temperatur geregelt werden. Bei der hohen Empfindlichkeit des Ladungsverfahrens wurde festgestellt, dass sich in dem Wellschlauch bei höheren Konzentrationen Rußpartikel einlagern, die sich bei niedrigen Konzentrationen wieder lösen und zu einer Verschleifung des Messsignals führen. Deshalb wird in der 2. Ausführung ein Kupferrohr mit einer geregelten elektrischen Widerstandsheizung versehen, und im Boden des Messgerätes untergebracht. Der Entnahmeschlauch mit 5 m Länge ist nicht geheizt und besteht aus elektrisch leitendem PTFE Material. Bei längeren Messzeiten oder hoher Rußkonzentration ist eine Rückspülung mit Druckluft vorgesehen, um Ablagerungen zu beseitigen. Um die Bedingungen für die AU zu erfüllen, wurden zusätzliche Messeinrichtungen im Sensorbereich integriert: Messung des Absolutdrucks, des Differenzdrucks zur Bestimmung der Gasgeschwindigkeit, Messung der Temperatur und eine Nullpunktspülung, indem Raumluft durch den Sensor gesaugt wird und dabei die momentanen Nullpunkte jeder Verstärkerstufe einschließlich der Differenzdruckmessung festgehalten werden. Aus den einzelnen Komponenten wurde ein eigenständiges Messgerät zusammengestellt und beim TÜV-Nord erprobt, um die Korrelation in Relation zu dem für die AU zugelassenen Opazimeter festzustellen. Bei Verwendung des Opazimeters von AVL, Typ 439, konnte eine Korrelation von 95 % erreicht werden. Wesentlich bei diesen Untersuchungen war die Feststellung, dass diese Korrelation unabhängig von den überprüften Motortypen der Fahrzeuge ist. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Technologie für die AU einsetzbar ist, eine Messgenauigkeit bei z.B. 100 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] von 10 % aufweist und unabhängig von der Partikelgröße ist, ein Alleinstellungsmerkmal, das z. B. bei Streulichtverfahren nicht gegeben ist.

Dieses als Funktionsmuster vorliegende Messgerät sollte zu einem serientauglichen Gerät unter der Einbeziehung der Kriterien für Eichfähigkeit und EMV-Verträglichkeit weiterentwickelt werden. Z. Z. laufen Kooperationsverhandlungen mit der Fa. Saxon Junkalor, Dessau, die ihre Produktpalette mit dieser Partikelmesstechnik erweitern möchte.

Dieses Vorhaben wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen AZ. 25911 gefördert.

Einleitung

1. Ausgangssituation

Die zukünftigen Abgasgrenzwerte EURO V als auch bereits mit Partikelfiltern ausgestattete EURO IV- Fahrzeuge erfordern neue Messgerätekonzepte, die die geringen Partikelemissionen erfassen können, einfach in der Handhabung und für Werkstätten bezahlbar sind. An der FH Wolfenbüttel wurde ein solches Gerätekonzept entwickelt, das diese Anforderungen erfüllt. Es ist ein großer Bedarf zu erwarten, da die bisher eingesetzten Trübungsmessgeräte diese messtechnischen Anforderungen nicht mehr erfüllen können.

Aufgrund der guten ökonomischen Bilanz werden Dieselmotor getriebene Fahrzeuge in allen Bereichen mit zunehmender Tendenz eingesetzt. Der Pkw- Anteil an Dieselfahrzeugen allein liegt bei 45 %. Die problematischen Emissionen sind NOx und Rußpartikel, die durch Maßnahmen der Abgasnachbehandlung, insbesondere bezüglich der Partikelemission, nahezu beseitigt werden können, vorausgesetzt, dass diese Einrichtungen ihre Funktionen nachhaltig behalten.

Da ein Verschleiß während des jahrelangen Betriebes nicht auszuschließen ist, sind periodische Überprüfungen erforderlich, für die dieses Rußpartikel Messgerät geeignet sein wird. Würden diese Prüfungen mangels geeigneter Geräte nicht durchgeführt werden können, ist zu erwarten, dass die vorgesehenen, umweltschonenden Grenzwerte, langfristig betrachtet, nicht eingehalten werden. Die in Deutschland zugelassenen ca. 60 Mio. Fahrzeuge würden bei einem defekten Partikelfilter einen erheblichen Immissionseintrag an Nanopartikeln erzeugen und die Umweltplaketten für die Einfahrerlaubnis in gefährdete innerstädtische Zonen würde ihren Sinn verlieren.

Das Partikelmessverfahren wurde in den Jahren 1999 bis 2002 im Rahmen einer kooperativen Promotion eingehend untersucht und in den letzten Jahren, mit Förderung durch die DBU, Aktenzeichen AZ 22493, weiterentwickelt.

1.1 Rußladungssensor, Stand der Technik

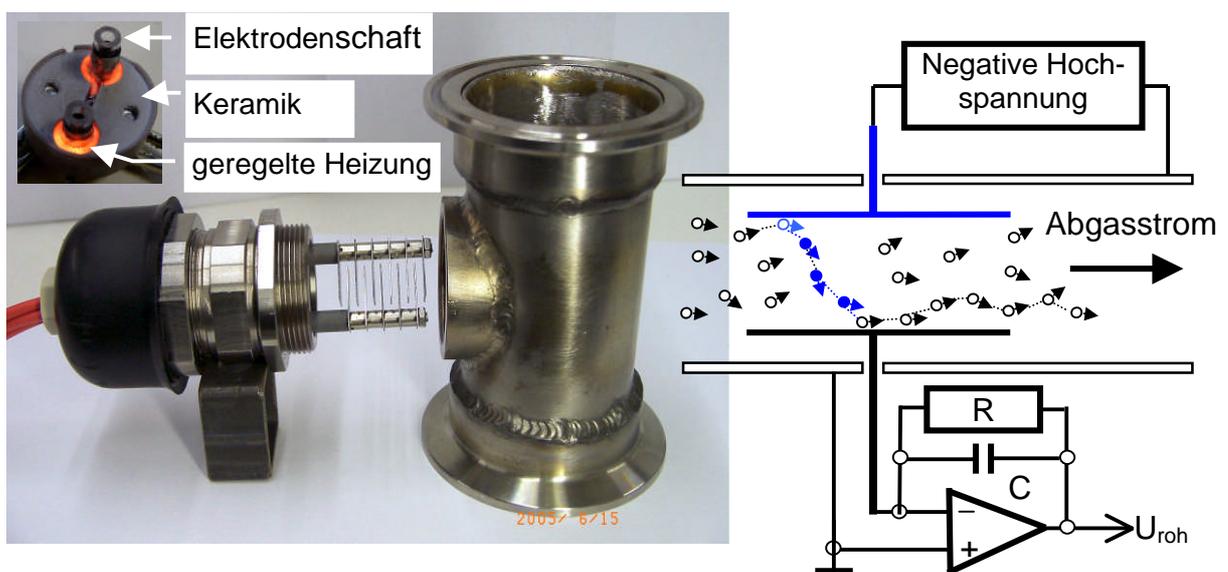


Abb.: 1-1 Prinzip des Rußladungssensors

Der Vollständigkeit halber wird die Funktionsweise des Partikelmessverfahrens erläutert. Der Messkondensator besteht aus der Hochspannungselektrode und der Messelektrode, die über den Ladungsverstärker auf einem virtuellen Nullpunkt liegt. Wenn Partikel durch den Messkondensator gelangen, entstehen 2 Messeffekte:

- a) Partikel werden von der Hochspannungselektrode durch Coulomb'sche Kräfte angezogen. Partikel, die die Hochspannungselektrode berühren, erhalten eine gleichnamige Ladung und werden abgestoßen. Diese werden an der Messelektrode entladen und erzeugen dabei eine Ausgangsspannung U_{roh} .
- b) Bei höherer Fluggeschwindigkeit reicht die Verweilzeit der Partikel nicht aus, damit diese nach berühren der Hochspannungselektrode ihre Ladung direkt zur Messelektrode transportieren. Der Ladungsvorgang der Rußpartikel, bei Berührung der Hochspannungselektrode, erzeugt hier das Messsignal.

Das Messsignal ist abhängig von der Hochspannung bzw. der elektrischen Feldstärke, der Messkondensatorfläche der Gasgeschwindigkeit und dem Verhältnis von Partikeloberfläche zur Partikelmasse.

Mit dem ersten Funktionsmuster konnte im September 2006, im DEKRA Forschungszentrum in Klettwitz, an Vergleichsmessungen mit 7 konkurrierenden Messverfahren teilgenommen werden. Exemplarisch ist ein Messergebnis dargestellt, bei dem als Referenzgerät das AVL-Pass eingesetzt war. Es ist eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse erkennbar, wobei bemerkt werden soll, dass beide unterschiedlichen Messverfahren an der Empfindlichkeitsgrenze arbeiteten.

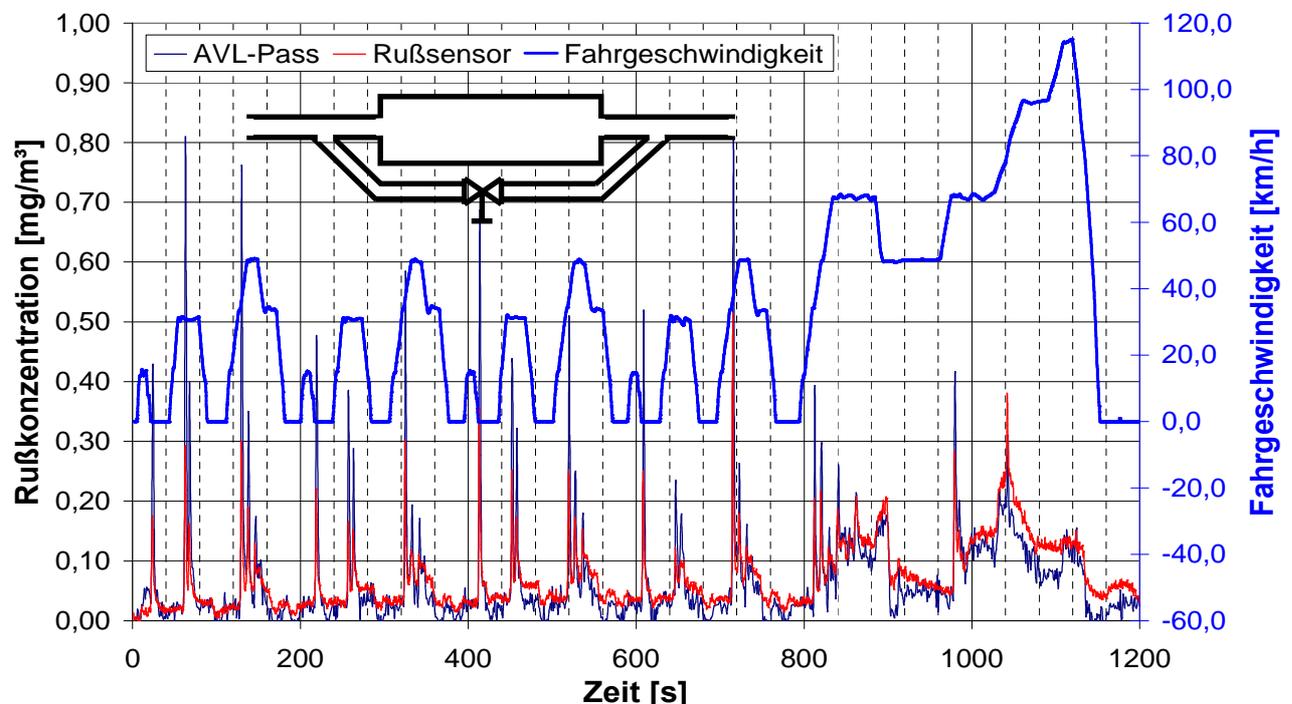


Abb.: 1-2 Vergleichsmessungen Rußladungssensor / AVL-Pass

Ausgehend von diesem positiven Ergebnis wurde dieses F&E- Projekt beantragt, mit dem Ziel, dieses Sensorprinzip zu optimieren und ein Werkstattmessgerät zu entwickeln.

Hauptteil

1.1 Optimierung des Messsystems

Diese Gruppe von Arbeitspaketen beinhaltet die konstruktive Gestaltungen der Elektroden mit dem Ziel der Austauschbarkeit und Robustheit. Diese Arbeiten sind zwangsläufig verbunden mit der Untersuchung der Gasströmung durch den Sensor, da hierbei eine Optimierung der Signalausbeute erfolgt. Diese Untersuchungen sind für jede Elektrodenvariante durchzuführen.

1.1.1 Entwicklung neuer Sensorelektroden

Ausgehend von dem bestehenden Sensoraufbau wurde eine robustere Variante hergestellt, die gleiche Empfindlichkeit aufwies.

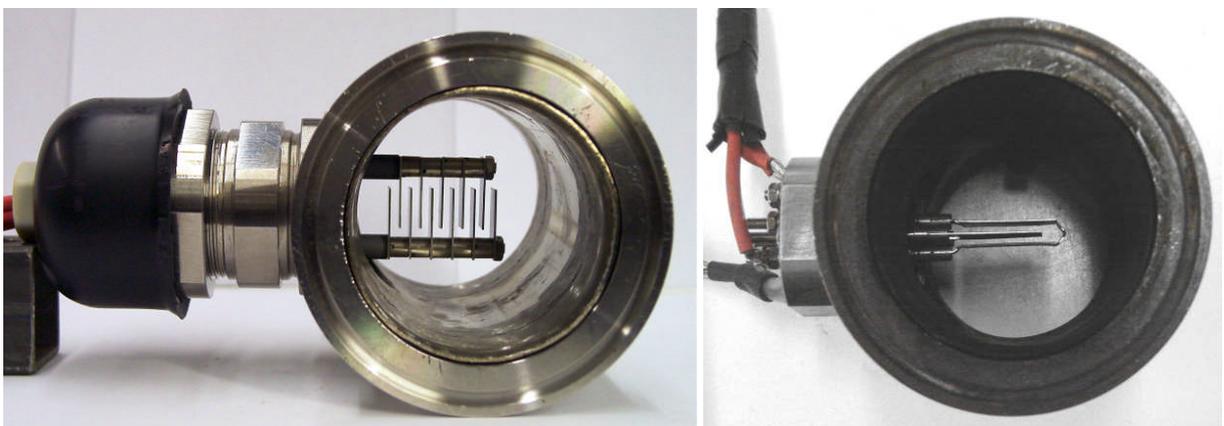


Abb.: 1-3 alternativer Sensoraufbau

Diese Messempfindlichkeit wurde durch eine neuartige Messelektrode erreicht. In vorherigen Arbeiten wurde nachgewiesen, dass das Messsignal entscheidend von der elektrischen Feldstärke im Messkondensator abhängig ist, die durch die Formgebung der Elektroden beeinflusst werden kann.



Abb.: 1-4 Sensorkopf mit neuer Elektrodenform

Der Sensor wurde im Abgasvollstrom eines Dieselmotors betrieben, um bei starker Rußemission die Ablagerungen zu erkennen, die für eine Messsignalqualität wesentlich sind. Folgende Beobachtungen können erkannt werden:

- a) Die Elektrodenschäfte für die Zuführung der Hochspannung und Ableitung des Messsignals bleiben aufgrund der Thermophoresewirkung der Elektrodenschaftheizung rußfrei.
- b) An der Messelektrode sind Rußablagerungen erkennbar. Diese Ablagerungen haben im Vollstrombetrieb keinen Einfluss gezeigt und ändern sich geringfügig mit der jeweils angebotenen Rußkonzentration.

1.1.2 Entwicklung der Elektrodenschaftheizung

Die Untersuchungen der Elektrodenheizung haben unerwartete Probleme erkennen lassen.

Die bisherige Anordnung der Heizspirale im Keramikkörper des Sensors hat zu undefinierbaren Wärmeableitungen geführt, so dass die Heizung nicht ausreichend strahlte und Rußablagerungen auftraten. Deshalb wurde eine neue Konstruktion des Sensors durchgeführt.

Dadurch konnte erreicht werden, dass bei kleinerer Heizleistung eine ausreichende, ruß-abweisende Wärmestrahlung erzeugt wurde.

Probleme ergaben sich mit der Rückwirkung der Elektrodenschaftheizung auf das Messsignal. Die Heizung wird elektronisch geregelt und passt sich automatisch der jeweiligen Abgastemperatur an. Unterschiedliche Temperaturen erzeugten folgenden Effekt:

Bei höheren Temperaturen wird das Quarzglas elektrisch leitend und überträgt die Versorgungsspannung von der anliegenden Heizwendel in die Messelektrodenköpfe.

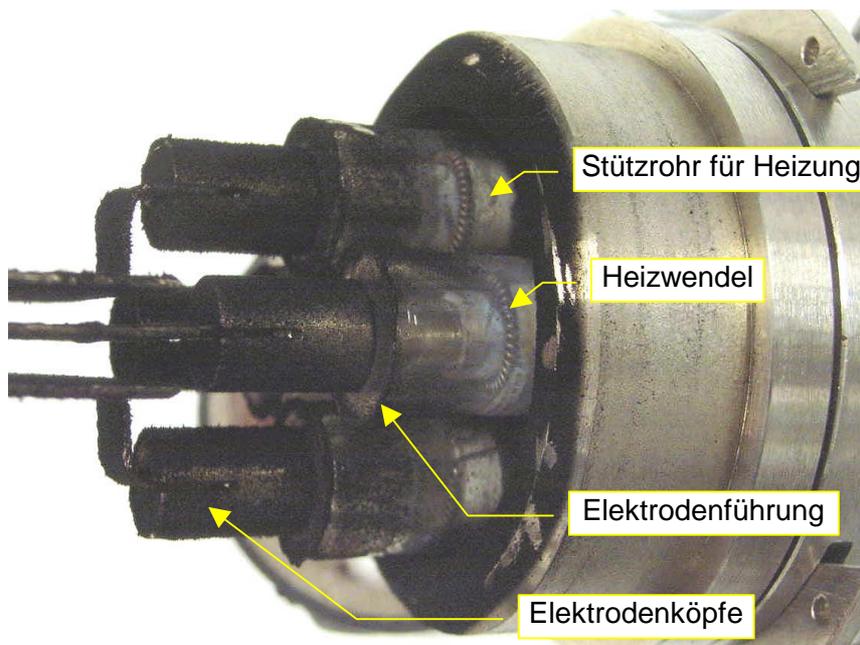


Abb.: 1-5 Aufbau der Elektrodenschäfte

Zur Reduzierung der elektrischen Leitung des Glases wurde der Abstand zwischen Heizwendel und Elektrode vergrößert.

Das Foto zeigt die derart ausgeführten Elektrodenthalter aus Quarzglasröhrchen nach längerem Betrieb.

Beim Betrieb zeigte sich ein weiteres Problem durch das Eindringen von Wasserdampf des Abgases in den Sensor, das an den kühleren Stellen kondensierte und auf der Verdrahtungsseite zu Kurzschlüssen und Korrosion führte. Abhilfe

konnte durch Einsetzen von Ringen aus Speckstein unter den Elektrodenköpfen und Quarzglasröhren erreicht werden. Speckstein ist ein hochisolierendes, weiches Material, dass sich an Oberflächenkonturen anpasst und dichtet.

Um eine schnelle Montage für Reinigungszwecke zu ermöglichen, wurde der Sensor als Einsteckeinheit ausgeführt, die über Zugfedern an der Messkammer befestigt wird.

Langzeituntersuchungen der Heizung über mehrere Wochen haben durch „Verbrennen“ der Heizwendeln zu Ausfällen geführt.

Es wurden Heizwendeln aus verschiedenen Werkstoffen wie z. B. Nickel, Nickelin und Konstantan angefertigt und unter gleichen Bedingungen beobachtet. Nickel besaß eine Standzeit von ca. 8 Std., während die anderen Werkstoffe bereits nach 30 Minuten durch abplatzende Oxidschichten ausfielen.

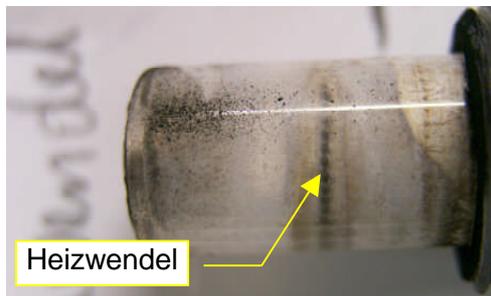


Abb.: 1-6 Heizungswendel

Langzeituntersuchungen. Die Innenfläche des Glasrohres ist durch Verdampfungen getrübt, die Heizwendel liefert jedoch ausreichende Wärmestrahlung zu Reinhaltung der äußeren Oberfläche.

Es wurde eine Lösung dieses Problems gefunden, indem die Heizwendel in dem koaxialen Elektrodenhalter luftdicht eingeschlossen wird. Spezielle Keramikkleber, mit gleichem Wärmeausdehnungskoeffizient wie Quarzglas, konnten diese Anforderung erfüllen. Die in der Glasröhre eingeschlossene Luft oxidiert mit ihrem O_2 - Anteil die Heizwendel. Da von außen keine frische Luft nachgeliefert werden kann, wird der Sauerstoff verbraucht, so dass keine neuen Oxidationsvorgänge entstehen können. Das Foto zeigt einen Elektrodenhalter, eingeklebt in eine Zündkerze, für

1.1.3 Blendenmessung des Volumenstroms

Diese Lösung dieser Aufgabe beinhaltet 5 ineinander greifende Arbeitspakete. Für eine Blendenmessung ist eine Pumpe erforderlich, die ausreichend Differenzdruck aufbauen kann. Je nach Einbauposition dieses Sensors herrschen unterschiedliche Temperaturen, die bei der Kalibrierung des Volumenstroms gemessen und berücksichtigt werden müssen. Mit den Messergebnissen der Volumenstroms wird das Rohsignal des Rußsensors korrigiert, um ein Volumenstrom unabgängiges Ergebnis zu erreichen.

Dies ist insbesondere bei der Anwendung des Messgerätes in Werkstätten erforderlich, da die Abgasuntersuchung mit Vollgasstößen durchgeführt werden und dabei, abgängig von der jeweiligen Charakteristik des Motors und der Abgasanlage, Druckstöße auftreten, deren Größenordnung nur durch Reihenuntersuchungen beim TÜV ermittelt werden können.

Diese Untersuchungen sollen durch ein fortführendes Forschungsprojekt begleitet werden, da auch das zeitliche Verhalten der Druckmesstechnik und die on-line-Berechnung des Messergebnisses an die Erfordernisse angepasst werden müssen.

Die Technologie der Messung der Geschwindigkeit beeinflusst entscheidend die Auswahl der Pumpe und damit die Baugröße, das Gewicht und die Kosten des Gerätes.

Unter diesem Gesichtspunkt soll in einem weiteren F&E-Vorhaben die Blendenmessung durch eine druckunempfindliche Hitzdrahtmessung ersetzt werden, da dann die Drosselverluste vernachlässigbar sind und die hohen Kosten für den Differenzdrucksensor entfallen. Es können dann auch 2 Magnetventile eingespart werden, die bei dem Rückspülbetrieb mit Druckluft zur Reinigung des Entnahmeschlauches und des Sensors jetzt erforderlich sind, um den empfindlichen Drucksensor vor Zerstörung zu schützen.

Jetzt wird der Massenstrom durch eine Blendenmessung ermittelt und in Volumenstrom mit Hilfe einem Ovalrad Volumenstrommesser kalibriert. Dabei werden die Einflüsse von Umgebungsdruck und Temperatur an der Messposition der Blende berücksichtigt. An

der Einbauposition der Blende, herrscht eine Temperatur von 90 [°C], bei der diese Kalibrierung durchgeführt wurde.

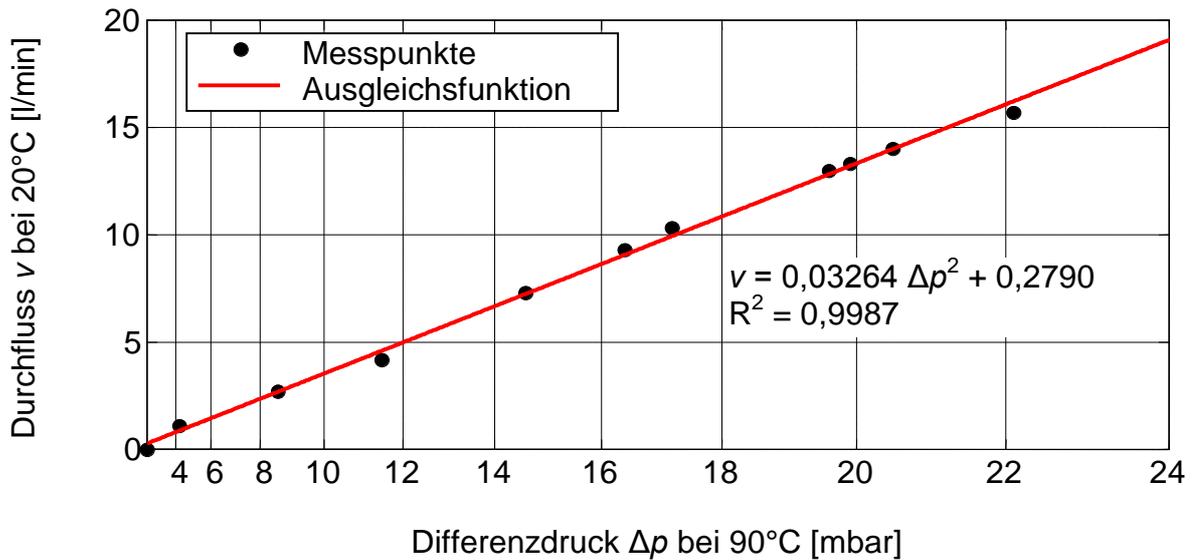


Abb.: 1-7 Kalibrierung des Volumenstroms

Die Gleichung der Ausgleichsfunktion wird in den Steuerrechner eingegeben. Anschließend erfolgt die Kalibrierung des Sensors in Relation zum Volumenstrom. Hierfür wird der Versuchsdieselmotor mit dem Referenz- Opazimeter auf eine konstante Rußemission eingestellt und der Volumenstrom durch Drehzahlregelung der Pumpe geändert. Nachfolgendes Diagramm zeigt exemplarisch diesen Zusammenhang.

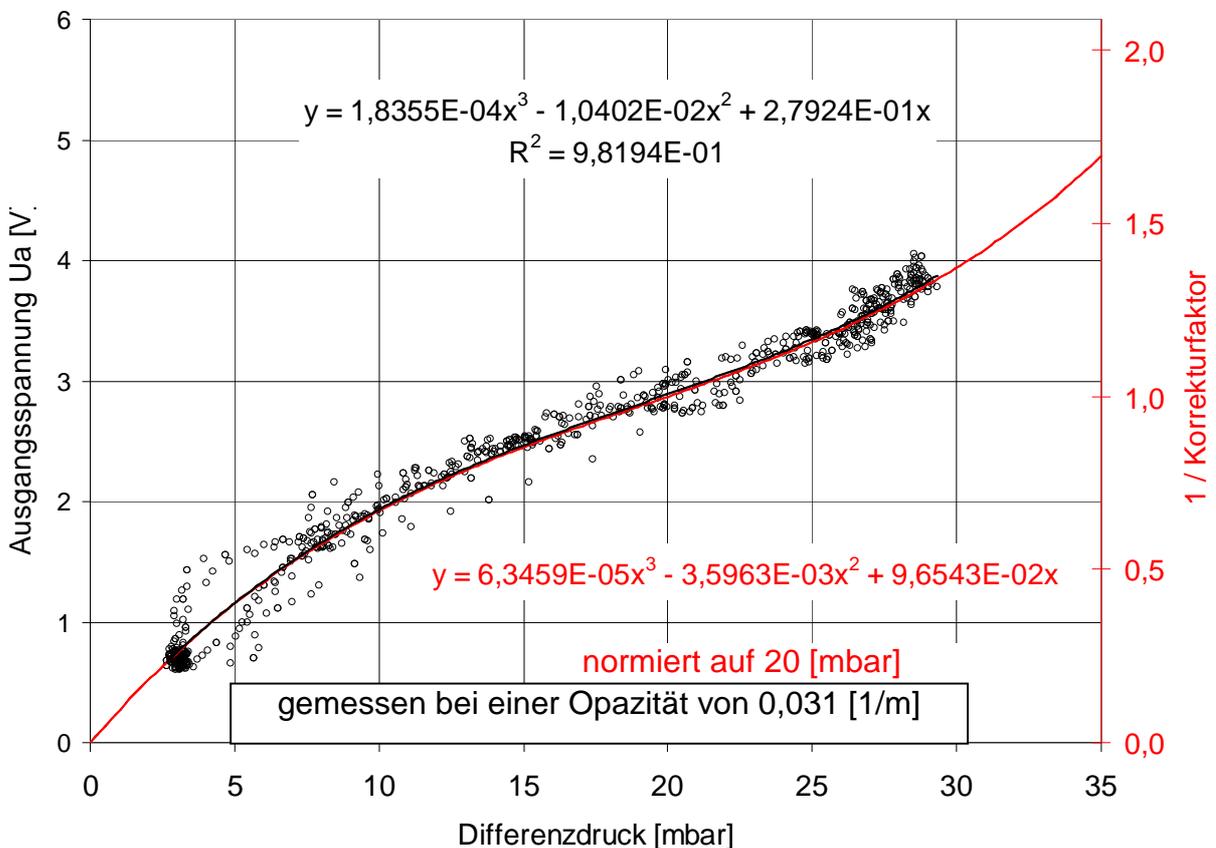


Abb.: 1-8 Zusammenhang zwischen Sensorsignal und Differenzdruck

1.1.4 Verbesserung des Zeitverhaltens

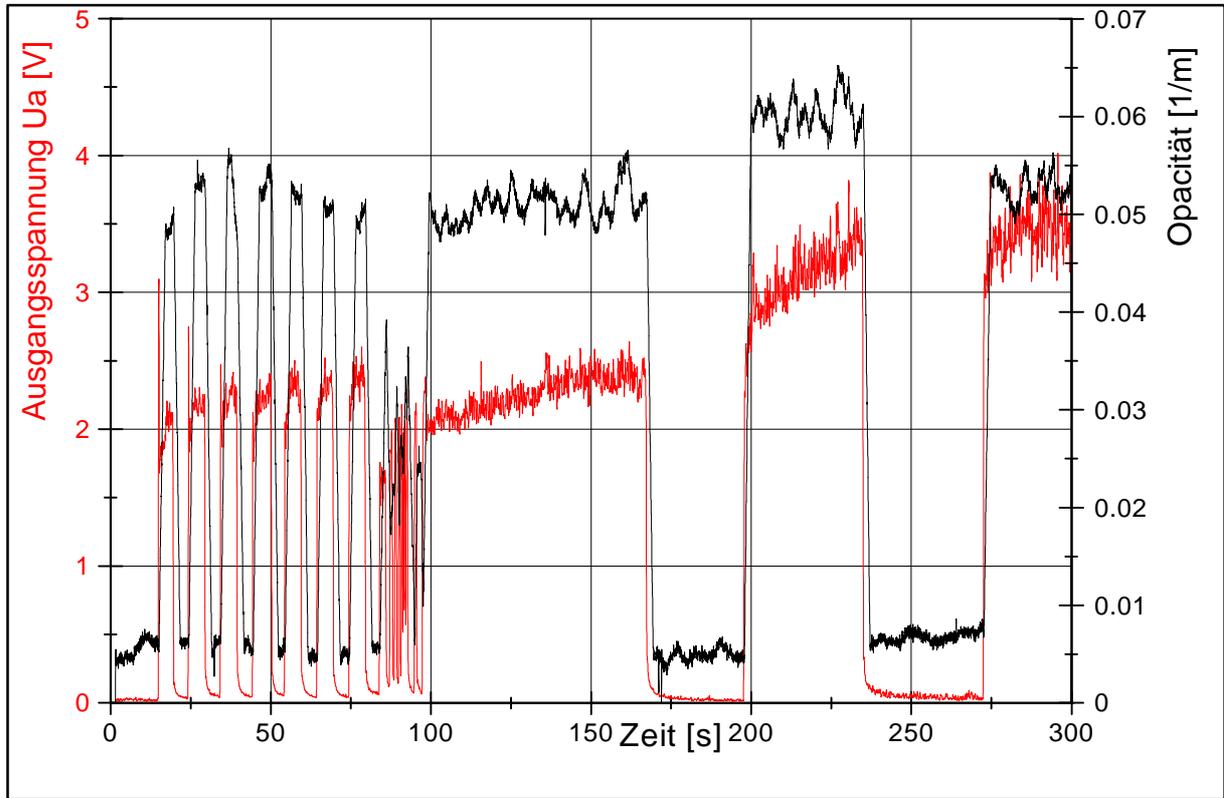


Abb.: 1-9 Zeitverhalten der Messelektrode

Die Analyse dieses Verhaltens ergab, dass sich Rußpartikel auf der Oberfläche der Messelektrode ablagern, und zwar so lange, bis ein Gleichgewicht zwischen anlagernden und wegfliegenden Partikeln aufgebaut ist. Bei Erniedrigung der Rußkonzentration wird dieselbe lange Abfallzeit auf den kleineren Messwert beobachtet.

Im Abgasvollstrom, in dem Gasgeschwindigkeiten von 6 bis 70 [m/s] vorherrschen, konnte dieses langsame Zeitverhalten nicht beobachtet werden.

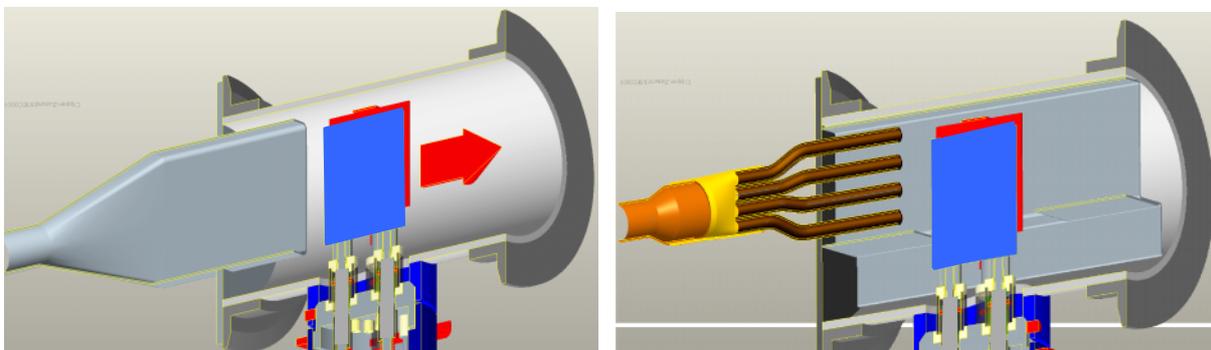


Abb.: 1-10 Strömungsuntersuchungen im Sensor

Um die Ablagerung von Rußpartikeln zu beeinflussen wurden die Anströmung des Sensors sowie die Elektrodenform variiert und so das Zeitverhalten des Sensors optimiert. Die Anforderungen des Zeitverhaltens konnten dadurch für die AU ausreichend erfüllt werden, da hier nur eine Signalstabilität von wenigen Minuten ausreicht.

Bei der Anwendung des Messgerätes an Rollen- und Motorprüfständen ist eine wesentlich längere Signalstabilität über Stunden gefordert, die das Gerät z. Z. noch nicht erfüllt. Bei längerem Betrieb sind immer noch Ablagerungen auf den Elektroden vorhanden, die das Messsignal beeinflussen. Bei einem weiterführenden F&E- Vorhaben ist vorgesehen, diese Ablagerungen durch z. B. Ultraschalleinspeisung in den Sensorraum zu vermeiden. Durch die örtliche Schnelle der Gasbewegung könnte eine Ablagerung verhindert werden. Da die Rußpartikel durch elektrostatische Kräfte bewegt werden können, besteht die Vorstellung, der DC-Hochspannung eine hochfrequente Wechselspannung zu überlagern, um die Rußpartikel in Schwingungen zu versetzen, deren Kraftwirkung größer ist als die Adhäsionskräfte, die zu der Ablagerung führen. Erste Versuche mit 2000 V Wechselspannung bei 20 kHz haben bereits gute Ergebnisse erzielt.

1.1.5 Modellierung der Funktion des Ladungssensors

Um eine zielführendere Optimierung des Sensors vornehmen zu können, die von vielen Parametern abhängt, einschließlich der Art der Bewegung der Partikel im inhomogenen elektrischen Feld des Messkondensators, wurde ein mathematisches Modell des Ladungssensors erstellt, das die mehrschichtigen Zusammenhänge, bezogen auf die Partikelmassenbestimmung, simuliert.

Dieses Arbeitspaket wurde aus sachlichen Erwägungen zusätzlich in das Arbeitsprogramm eingefügt und bearbeitet.

Das Ergebnis zeigt die Einsatzmöglichkeiten des Sensors. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass das in erster Näherung verwendete mathematische Modell verbessert werden muss. So wurde, z.B. das Messsignal nicht beeinflusst, wenn die Messelektrode isoliert war. Auch konnte die Geschwindigkeitsabhängigkeit noch nicht abschließend erklärt werden. Im Rahmen eines weiterführenden Forschungsvorhabens sollen neue Ansätze zur Klärung dieser Beobachtungen beitragen.

Aufgrund dieser Versuchsergebnisse wurde daher ein verändertes mathematisches Modell entwickelt. Ausgehend von dem direkten Ladungstransport von der Hochspannungselektrode zur Messelektrode durch geladener Partikel, ist das Modell dahingehend erweitert worden, dass nur die Aufladung der Partikel an der Hochspannungselektrode als Messeffekt maßgeblich ist. Nach diesem Modell werden die Partikel im elektrischen Feld zur Hochspannungselektrode hin abgelenkt. Erreichen diese die Elektrode, werden die Partikel aufgeladen. Dieser Ladevorgang wird, aufgrund einer Kapazitätsänderung, an der Messelektrode registriert.

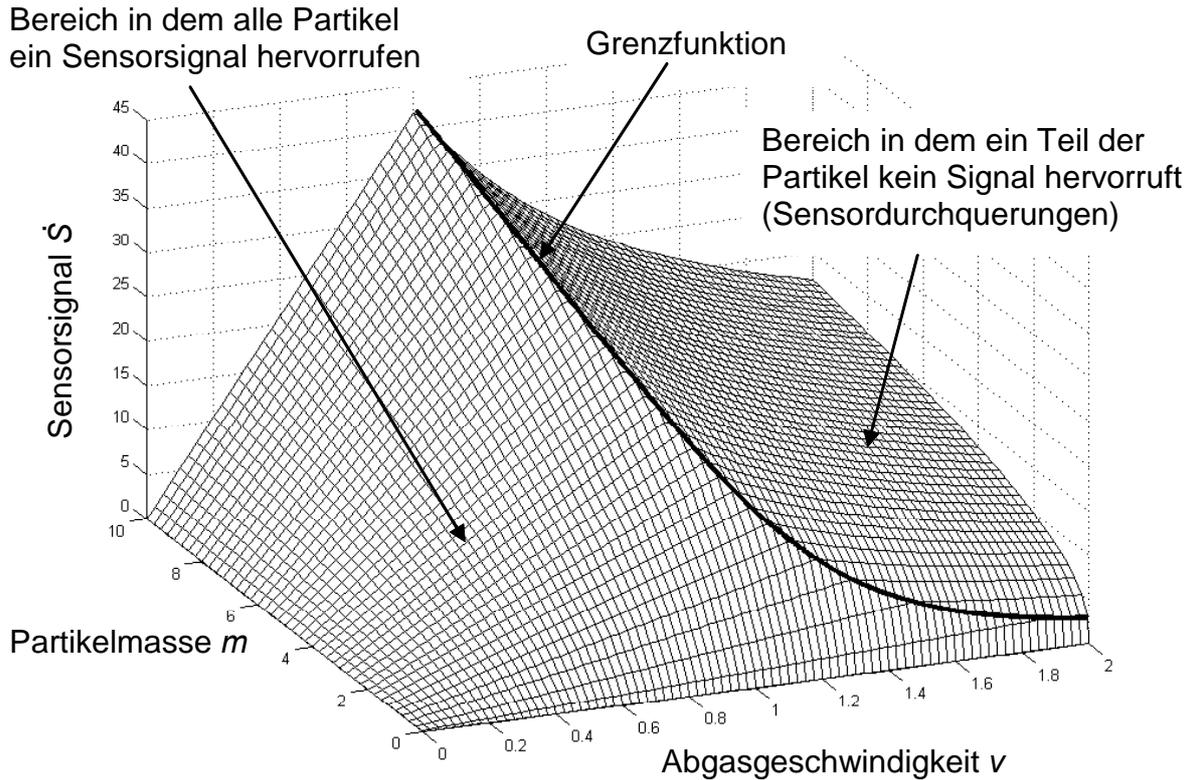
Das mathematische Modell zeigt neben der Geschwindigkeitsabhängigkeit eine potentielle Abhängigkeit von der Partikelgröße und Form.

Weitere Arbeiten müssen noch durchgeführt werden, um das qualitative Modell zu konkretisieren und anhand von Versuchen die erforderlichen Proportionalitätsfaktoren zu bestimmen.

Das Modell deckt sich jedoch in dieser Form bereits sehr gut mit den bisherigen messtechnischen Erfahrungen und beschreibt auch abschließend die beobachtete Abhängigkeit von der Abgasgeschwindigkeit mit guter Genauigkeit.

Nach diesem Modell bewegen sich die Rußpartikel, aufgrund ihrer näherungsweise neutralen Ladung, auf die Hochspannungselektrode zu. Durch diese Bewegung wird die Kapazität des Sensors vergrößert. Da die angelegte Spannung konstant ist, fließt aufgrund der sich vergrößernden Kapazität ein Ladungsstrom, der von der Messelektrode registriert wird.

Die in nachfolgendem Diagramm dargestellten mathematischen Zusammenhänge zeigen zwei definierte Betriebsbereiche des Sensors bezüglich des Verhaltens der Partikelmasse zu der Abgasgeschwindigkeit, die durch die „Grenzfunktion“ separiert werden.



Funktionsgleichung des Sensorsignals $\dot{S}(r)$ Gleichung der Grenzfunktion

$$\dot{S}(m) = \frac{k_1 k_2}{k_3^{4/3}} \cdot \frac{(12\pi)^{4/3}}{2} \cdot \frac{C(m)}{v} \cdot m^{1/3}$$

$$m_G(L, v) = \left(\frac{k_2}{k_3^{2/3}} \cdot \frac{1}{2 \cdot (12\pi)^{2/3}} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{L^2}{v^2} \right)^3$$

$$\cdot \min \left\{ L^2, v^2 \cdot \frac{2}{k_2} \cdot D \cdot \left(k_3 \cdot \frac{1}{12\pi} \right)^{2/3} \cdot m^{1/3} \right\}$$

$$\dot{S}(m_G) = \dot{S}(m_G(L, v))$$

Für die Berechnung eingesetzte Werte:

Proportionalitätsfaktoren	$k_1=k_2=k_3=1$
Partikelanzahl	$C=1$
Plattenlänge	$L=0,5$

Abb.: 1-11 Partikelmasse abhängiges Signal mit begrenzter Elektrodenlänge

Bei sehr niedriger Abgasgeschwindigkeit (linker Betriebszustand) erreichen alle Rußpartikel die Hochspannungselektrode. In diesem Betriebszustand würde nach dem neuen Modell das Sensorsignal linear mit der Abgasgeschwindigkeit ansteigen, was durch Versuche bestätigt wurde.

Im rechten Betriebszustand des Sensors ist jedoch die Geschwindigkeit des Abgases zu hoch, d.h. nur ein Teil der Partikel erreicht die Hochspannungselektrode. In diesem Be-

triebszustand verringert sich das Sensorsignal mit zunehmender Geschwindigkeit, da mehr und mehr Partikel die Hochspannungselektrode nicht erreichen und somit kein Messsignal verursachen. Dieser Zusammenhang wurde bei den bisherigen Messungen immer wieder beobachtet.

Als Schlussfolgerung dieser Modellierung muss der linke Betriebszustand in der Nähe der Grenzfunktion bezüglich der Abgasgeschwindigkeit hergestellt werden.

Dieser Betriebszustand ist jedoch zusätzlich Abhängig von der Partikelmasse. Je kleiner die Partikel sind, umso später wird dieser Betriebszustand erreicht.

Exemplarisch ist diese Abhängigkeit für kugelförmige Partikel (d.h. Partikel der Fraktalität $f=3$) in Abb.: 1- 11 dargestellt. Im realen Motorbetrieb besitzen die Partikel jedoch eine von der Kugelform abweichende Gestalt, so dass der Betriebszustand in der Nähe der Grenzfunktion durch Versuche ermittelt werden muss. Das Modell hat aber erstmalig nachgewiesen, dass diese beiden Betriebszustände des Sensors existent sind.

1.2 Motorkennfelduntersuchungen in der FH

Diese Arbeitspakete brachten neue Erkenntnisse bezüglich des Oberflächenverhaltens der Rußpartikel im Vergleich zu anderen Messverfahren.

Bisher wurden alle Untersuchungen, bei denen eine Rußquelle erforderlich war, in der FH mit dem Dieselmotorprüfstand durchgeführt. Dabei wurde beobachtet, dass bei bestimmten Lasteinstellungen des Motors, von der Opazität gelegentlich abweichende Messergebnisse vom Ladungssensor geliefert wurden. Die Ursache hierfür liegt in den unterschiedlichen Messverfahren. Der Rußladungssensor erzeugt das Messsignal durch elektrische Ladungsvorgänge. Ladungsvorgänge im Allgemeinen finden an Oberflächen statt, d. h. die Form des Partikels hat einen Einfluss auf das Messergebnis.

Es besteht grundsätzlich die Forderung, dass verschiedene Messverfahren mit einander korrelieren müssen, wenn ein Gleichwertigkeitstest erfolgreich sein soll. Bei der periodischen Abgasuntersuchung (AU) ist z. B. nur das Opazimeter zugelassen, so dass, innerhalb des Messbereiches des Opazimeters, das Werkstattmessgerät auf Basis der Rußladung gleiche Ergebnisse liefern muss. Um diese Bedingung bei Messungen im gesamten Motorkennfeld zu ermöglichen, müssen Einflüsse der Partikelform eliminiert werden. Deshalb wurde eine Software entwickelt, die Motor spezifische Kennfeldparameter in das Messergebnis einbezieht.

Dieses Arbeitspaket war mangels Kenntnis des Problems in der Planung des Vorhabens nicht vorgesehen aber unabdingbar erforderlich, um eine Gleichwertigkeitsprüfung zu ermöglichen.

1.2.1 Motorkennfeld Charakterisierung

Bei der Charakterisierung eines Motorkennfeldes werden Parameter ausgewählt, die auf die Partikelform Einfluss haben. Solche sind z. B. Motordrehzahl, Kraftstoffverbrauch, Drehmoment, Abgastemperatur, Lambdawert, Ansaugmassenstrom, usw.

Für die Charakterisierung müssen nur 4, den Betriebszustand des Motors kennzeichnende, Parameter gewählt werden. Nachfolgendes Beispiel zeigt den Einsatz dieser Software als Screen-shot.

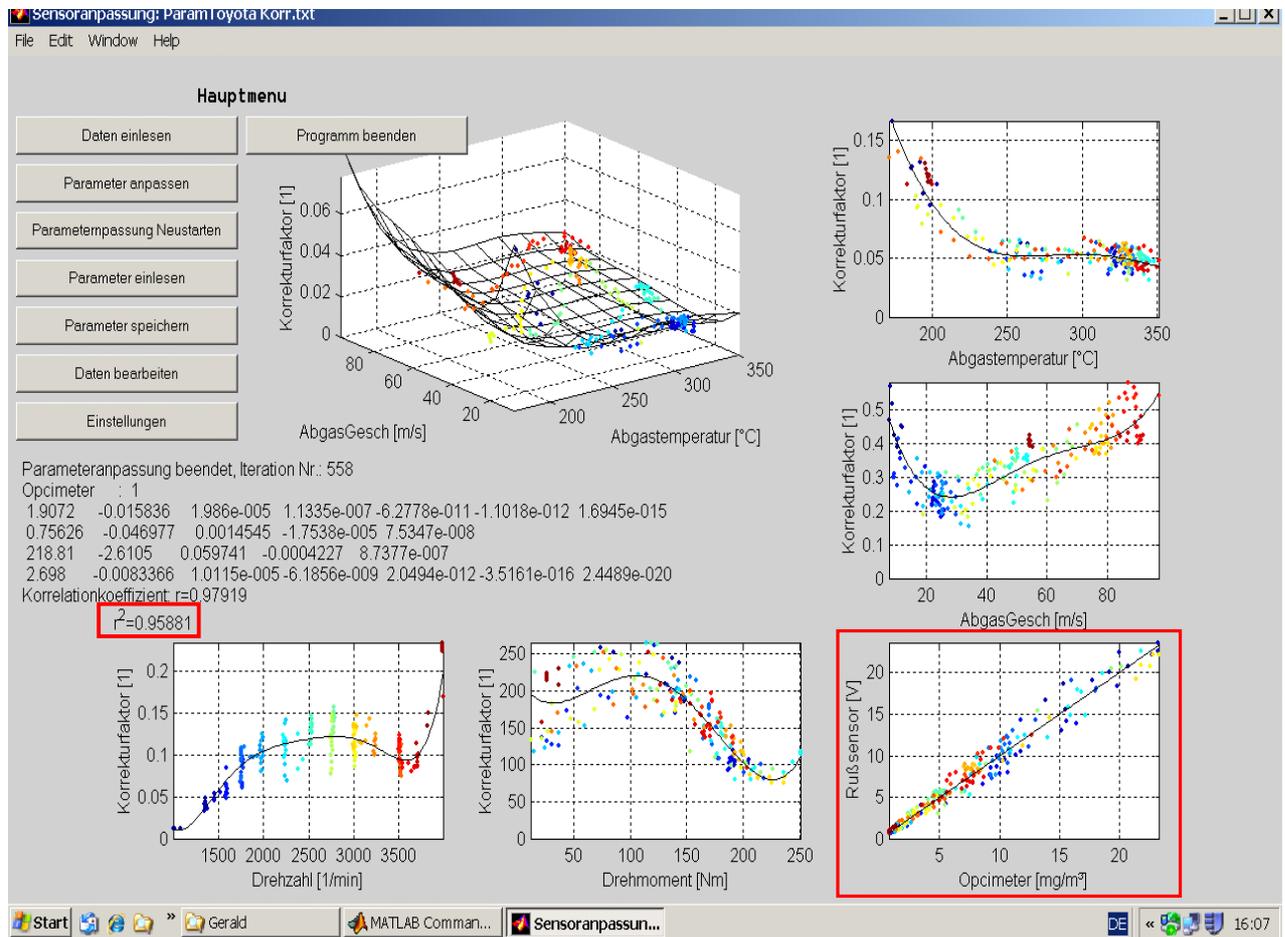


Abb.: 1-12 Partikelform Charakterisierung

Als Motorparameter wurden hier ausgewählt: Drehmoment, Drehzahl, Abgasgeschwindigkeit, und Abgastemperatur. Diese Werte werden on-line gemessen und als Datensätze gespeichert. Diese 4 gewählten Parameter werden mit Polynomfunktionen 6. Grades verbunden, deren Koeffizienten durch Iteration nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate berechnet werden, wobei die Anzeige des Opacimeters mit der Anzeige des Rußsensors korreliert wird (eingerahmtes Diagramm). Nach mehreren Rechendurchläufen kann, wie in diesem Beispiel, ein Bestimmtheitsgrad von $R^2 = 0,959$ und höher erreicht werden. Diese hohe Korrelation bezieht sich auf den gesamten Messbereich des Opacimeters, hier: 1 bis 20 [mg/m³]. Die Parametergleichungen werden in die Messsoftware des Rußladungsmessgerätes eingebunden.

Das Messgerät beim Einsatz in Werkstätten wird vorwiegend für die Überprüfung von Partikelfiltern eingesetzt, wobei nur ein Arbeitspunkt des Fahrzeugmotors benutzt wird: Vollgasstöße bis zur Abregeldrehzahl, so dass diese Software, die das gesamte Kennfeld einschließt, für die AU nicht erforderlich ist.

Da das Messgerät auch für den Einsatz an Fahrzeug-Rollenprüfständen eingesetzt werden soll, wobei Kennfelddaten anfallen, muss für diese Anwendung die Software weiter

entwickelt und in den gesamten Messablauf integriert werden. Gegenwärtig werden die 6 bis 7-stelligen Zahlenreihen manuell in die Mess- Software eingetragen, was zeitaufwendig ist und leicht zu Fehlern führt aber gezeigt hat, dass diese Technologie einwandfrei arbeitet.

Die später diskutierten AU- Messungen beim TÜV-Nord haben ergeben, dass das Messergebnis im Vergleich zum Opazimeter unabhängig von der Bauart und Größe eines Fahrzeugmotors ist, bzw. der Einfluss der Partikelform nicht erkennbar ist.

2. Auslegung des Rußmessgerätes für Werkstätten

Die Auslegung des Messgerätes beinhaltet die Umsetzung von 6 geplanten Arbeitspaketen, die, ineinandergreifend, das Ziel erreichen. Es wird das Konzept der Gasführung erstellt, das die Pumpe, unter Berücksichtigung deren zulässigen Gastemperatur, sowie die Ventile für Rückspülung und Nullpunkspülung einschließt. Da die Pumpe nur max. 40°C Ansaugtemperatur bei der erforderlichen Förderleistung erträgt, wird eine Kühlung des Messgases vorgesehen. Diese Bauteile bestimmen maßgeblich die Größe des Gehäuses. Eine besondere Herausforderung stellte die Entwicklung eines beheizten Entnahmeschlauches dar, der Innentemperaturen von 160 °C aufweist und außen nicht wärmer als 40 °C werden darf. Der Heizungsregler einschließlich der Temperaturmessung wird entwickelt. Zusätzliche Sicherheitseinrichtungen bei einem eventuellen Versagen der Heizungsregelung müssen integriert werden.

Um einen wartungsfreien Betrieb des Gerätes zu sichern, werden Schutzeinrichtungen für den Hochspannungsgenerator und die Eingangsschaltung des Sensors entwickelt.

Um die gesamte elektrische Messkette kalibrieren zu können, wird für den Eingang des Ladungsverstärkers ein Verfahren entwickelt, das die Wirkung der Rußpartikel repräsentiert.

Nach Zusammenstellung sämtlicher Funktionseinheiten werden die Software für die Steuerung des Gerätes, die Auswertung des Messsignals und die Bildschirmausgabe programmiert.

Als Entwicklungsumgebung für die Software wird von National Instruments Diadem eingesetzt, die eine große Flexibilität und schnell zu programmieren ist. Bei einem anschließendem F&E-Vorhaben soll eine Entwicklungsumgebung verwendet werden, die es ermöglicht, erstellte Programme zu kompilieren, um einen fremden Zugang zu verhindern.

Der erste Ansatz eines mobilen Rußmessgerätes für Werkstätten bestand in der Zusammenführung der einzelnen Komponenten in einem robusten Gehäuse. Um eine gute Zugänglichkeit zu dem Sensor zwecks Reinigung zu ermöglichen, wurde eine neue Konstruktion hergestellt, die aus folgenden Einzelteilen besteht.



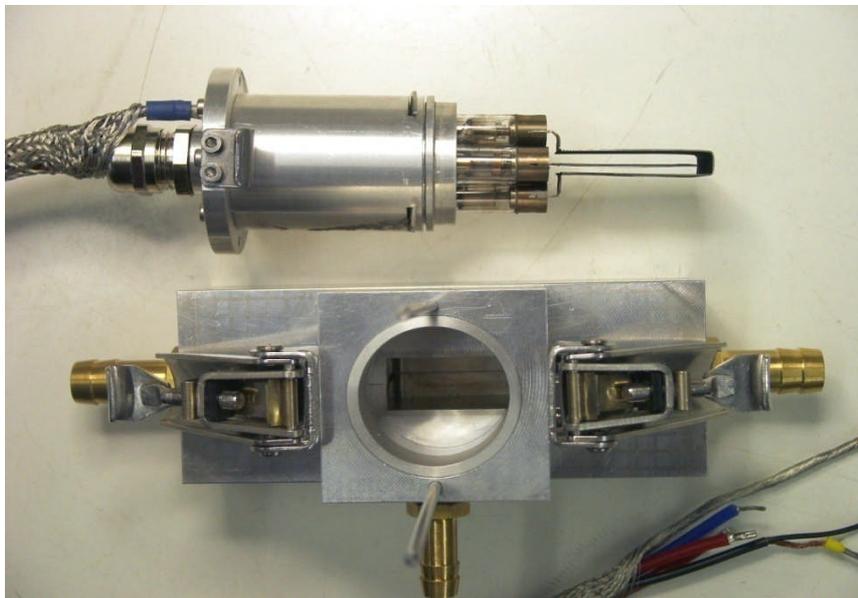


Abb.: 2-2 Bauteile des Sensors

2.1 Funktion des Messgerätes und Signalverarbeitung

Die vielfältigen Einsatzbereiche des Rußsensors können auch in einem eigenständigen Messgerät verwirklicht werden, das im Bypassbetrieb über einen Entnahmeschlauch einen Teilstrom des Motorabgases der Analyse zuführt.

Nachfolgend die wesentlichen Bauelemente des Werkstattmessgerätes.

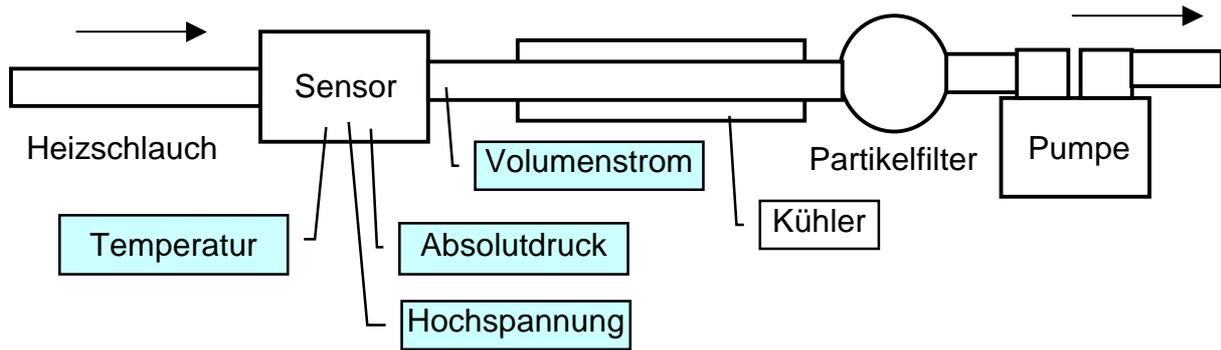


Abb.: 2-3 Funktionseinheiten des Messgerätes für Werkstätten

Die Parameter der markierten Felder werden zur Korrektur des Messsignals und zur Umrechnung auf Normzustand verwendet. Diese Korrekturen sind insbesondere für die periodischen Abgasuntersuchung (AU) erforderlich, da bei den Vollgasstößen ein schneller und starker Druck- und Temperatureinfluss entsteht.

Weiterhin ist es erforderlich, die Angabe des Messwertes in „Trübung“ zu liefern, um einen Vergleich mit dem gesetzlich vorgeschriebenen Opazimeter zu ermöglichen. Wegen der verfahrenstechnischen Unterschiede wird das Messergebnis des Rußladungssensors mit „Ladungsoazität L_{OPA} “ bezeichnet.

Eine weitere Anforderung in Relation zu dem Opazimeter besteht in dem zeitlichen Verhalten des Messsignals.

Um diese Anpassungen durchführen zu können, besteht das Werkstattmessgerät aus der Hardware mit einer USB- Schnittstelle zu einem Rechner, der die Steuerung des Gerätes durchführt, die erforderlichen Korrekturen des Messsignals berechnet und die Umrechnung in Ladungsoazität vornimmt.

Die Messsignalverarbeitung erfolgt in nachfolgenden Schritten.

Die Messelektrode ist mit dem Ladungsverstärker verbunden, der in seiner Funktion als Stromwandler wirkt und die Messelektrode immer auf 0 [V] hält, so dass die Messelektrode auf einem virtuellen Nullpunkt in Relation zur Hochspannung liegt. Der Eingang des Ladungsverstärkers ist gegen Funkenüberschläge geschützt, die gleichzeitig EMV- Einflüsse filtert.

Das Rohsignal U_{roh} des Sensors besteht aus einer Spannung, die der Ausgang des Ladungsverstärkers liefert. Danach folgt ein Tiefpassfilter, das auf 20 [Hz] fest eingestellt ist. Der anschließende Messverstärker wird über Reed-Relais auf die Faktoren: 1, 10, 100 und 1000 geschaltet.

Das Ladungssignal des Sensors wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$L_{nA} = \frac{U_{roh} - U_0}{R_2 \cdot V} \cdot 10^9 \text{ [nA]} \quad U_0 = \text{Nullpunktdrift der gesamten Messelektronik}$$

V= Verstärkungsfaktor, R_2 Gegenkopplungswiderstand

Während der Kalibrierungsprozedur vor einer Messung werden alle Verstärkungsstufen über die Reed- Relais angesteuert und die momentanen Nullpunkte U_0 gemessen und in der Software abgelegt.

Durch Einspeisen eines Stroms in [nA] an der Messelektrode wird die gesamte Messelektronik kalibriert. Hierbei wird über einen $10\text{ M}\Omega$ Widerstand eine Spannung aus einem Präzisionsspannungsgeber im mV-Bereich angelegt. Das Diagramm zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen dem simulierten Sensorsignal L_{nA} [nA] und der Ausgangsspannung U_a der Messelektronik.

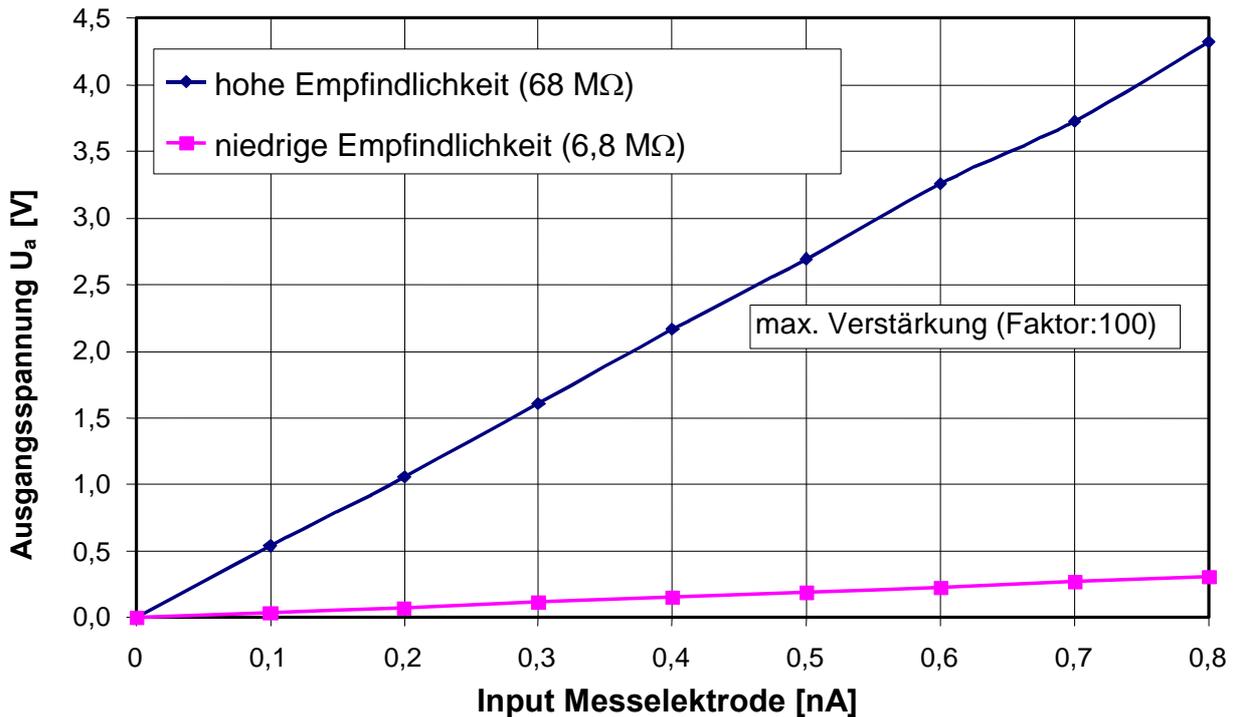


Abb.: 2-4 Kalibrierung der Messelektronik

Es muss nun der Zusammenhang zwischen der Rußkonzentration bzw. der Opazität und dem Ladungssignal L_{nA} der Rußpartikel hergestellt werden, die in Ladungsoazität L_{OPA} kalibriert wird. Die Ladungsoazität L_{OPA} [1/m] wird durch Vergleich der Anzeige des als Referenzmessgerät verwendeten Opazimeters (AVL 439) ermittelt. Ein Dieselmotor wird hierbei als Konstante Rußquelle verwendet. Mit Hilfe der Drossel kann bei konstantem Abgasstrom bei jedem Kennfeldpunkt des Motors die Rußemission stufenlos bis in den Bereich von $10\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ Rußkonzentration eingestellt werden.

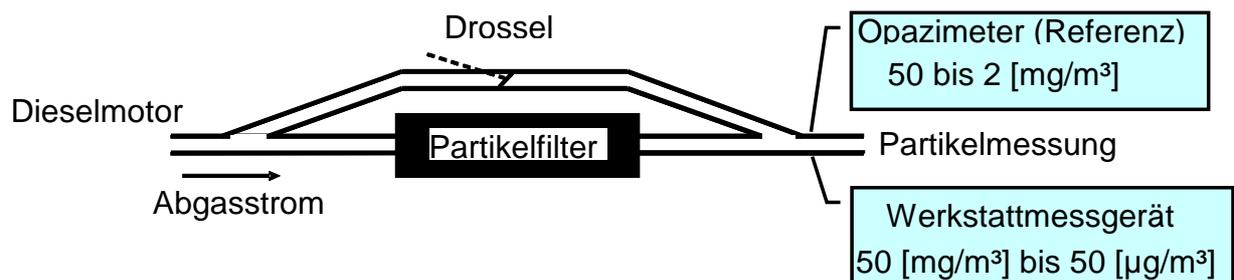


Abb.: 2-5 Vorrichtung zur Einstellung der Rußkonzentration

Es wird das Ladungssignal L_{nA} mit der Opazität [1/m] des Vergleichgerätes untersucht.

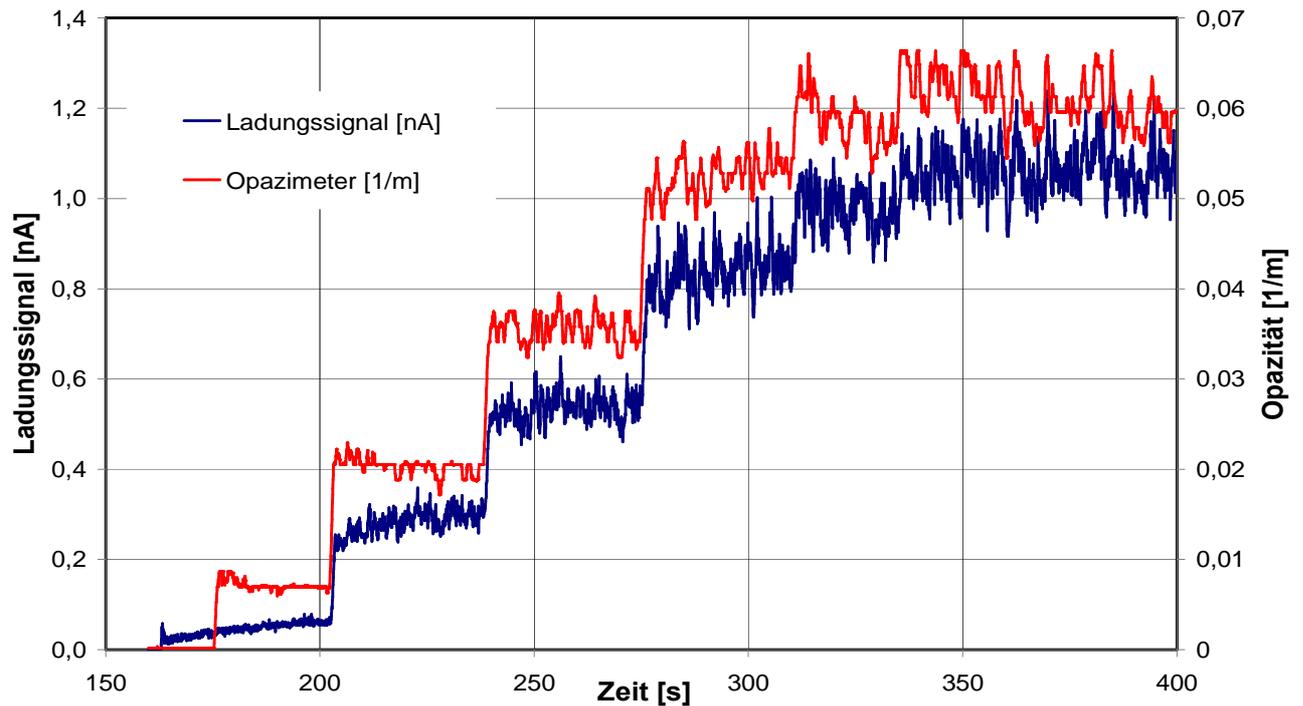


Abb.: 2-6 Ladungssignal im Vergleich zum Opazimeter

Wird die Opazität des Vergleichsgerätes über dem Ladungssignal L_{nA} dargestellt, kann die Korrelation und Übertragungsfunktion bestimmt werden.

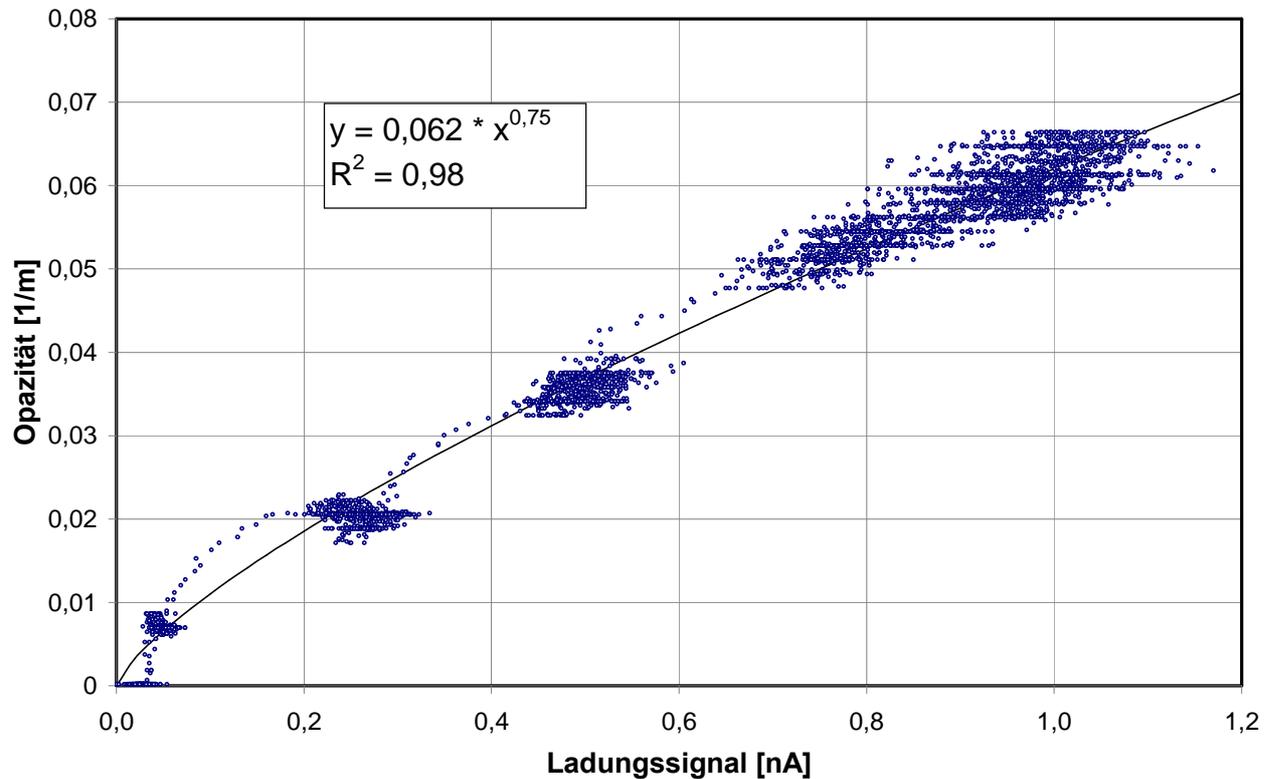


Abb.: 2-7 Korrelation: Ladungsopazität / Opazimeter

In dem Diagramm sind 5 Beharrungsbereiche erkennbar, durch die eine Ausgleichsfunktion gelegt wurde, deren Gleichung mit einer Korrelation von 98 % den Zusammenhang zwischen Ladungssignal [nA] und Opazität [1/m] beschreibt.

Es ist zu erwähnen, dass während dieser Untersuchung der Volumenstrom durch den Sensor, die Gastemperatur, der Druck und die Hochspannung konstant waren.

Die Gleichung:

$$\text{Ladungsopazität } L_{OPA} = 0,062 \cdot L_{nA}^{0,75} \quad [1/m]$$

ist die Grundlage für die Berechnung der Ladungsopazität L_{OPA} , wobei L_{nA} der Ladungsstrom der Rußpartikel in [nA] ist.

Da bei dieser Untersuchung die Parameter Druck, Volumenstrom, Hochspannung und Temperatur konstant waren aber während des realen Messbetriebes Änderungen auftreten, wird das Messergebnis auf einen Normzustand von 100 °C und 1013 mbar Absolutdruck bezogen. Folgende Korrekturgleichungen sind erforderlich.

Der Temperaturkorrekturfaktor f_{Temp} wird eingesetzt, um den Einfluss auf den Volumenstrom zu eliminieren und auf Normzustand bei 100 °C zu beziehen.

$$f_{Temp} = \frac{T[^\circ C] + 273}{373}$$

Die Gastemperatur im Sensor wird auf $T = 130$ °C konstant gehalten, um die Bildung von Kondensat zu verhindern.

Der Druckkorrekturfaktor f_{Druck} folgt der Gleichung:

$$f_{Druck} = \frac{1013[mbar]}{p[mbar]} \quad \text{Umrechnung auf den Normzustand von 1013 mbar.}$$

Die Hochspannung steht in einem direkten funktionalen Zusammenhang mit dem Messsignal, der mit Hilfe der Dieselmotor- Rußquelle ermittelt wurde. Um die Hochspannung als separaten Parameter messen zu können, wird das Messsignal mit den Korrekturen für Druck und Temperatur verrechnet und der Volumenstrom durch den Sensor konstant gehalten.

Um die Darstellung unterschiedlicher Abhängigkeiten in nachfolgendem Diagramm darzustellen, wurde die Hochspannungsabhängigkeit über der normierten Signalstärke aufgetragen. Als Signalstärke kann alternativ der Ladungsstrom L_{nA} [nA] der Partikel betrachtet werden oder die Ladungsopazität L_{OPA} [1/m]. Die Messpunkte folgen mit einer Korrelation von $R^2 = 0,99$ einer Potenzfunktion 3. Grades. Es ist ersichtlich, dass bei Erhöhung der Spannung von 1500 V auf 2000 V die Empfindlichkeit des Sensors um den Faktor 2,5 gesteigert werden kann.

Da der Einfluss der Hochspannung von großer Wirkung ist, wird diese im Werkstattmessgerät überwacht und zur Korrektur des Messsignals eingesetzt.

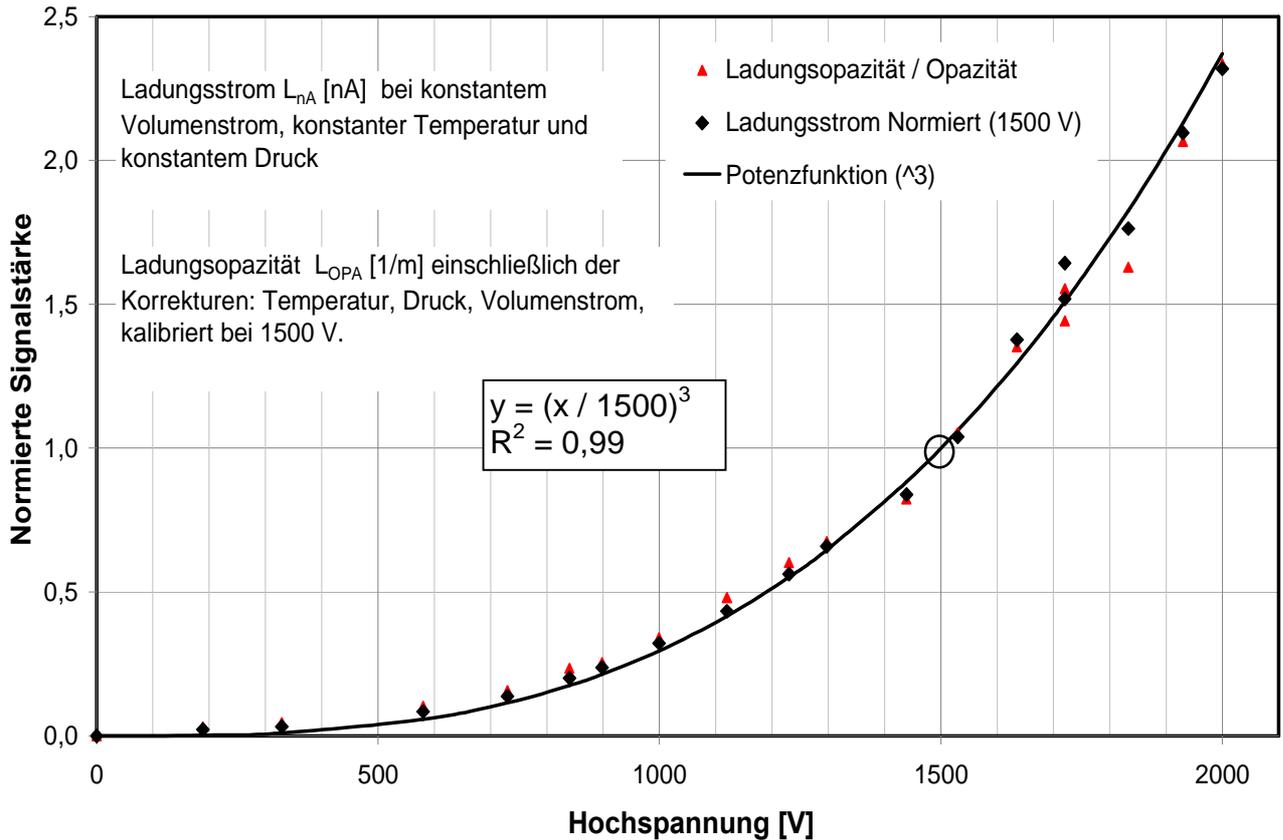


Abb.: 2-8 Hochspannungsabhängigkeit

Der Korrekturfaktor für die Hochspannung folgt der Gleichung:

$$f_{Hoch} = \frac{1}{\left(\frac{U_{Hoch}}{1500}\right)^3}$$

U_{Hoch} ist die gemessene Hochspannung [V]

Die Gasgeschwindigkeit durch den Sensor wird durch eine Volumenstrommessung repräsentiert. Als Messeinrichtung wird die Druckdifferenz vor und nach einer Messblende registriert und mit einem Ovalrad- Volumenmesser in [l/min] kalibriert. Dabei wurde auch berücksichtigt, dass das Messergebnis von der Gasdichte, also vom Absolutdruck Druck und der Temperatur im Bereich der Messblende, abhängig ist.

$$v = a \cdot \sqrt{\frac{373}{273 + T [^\circ\text{C}]} \cdot \frac{p_{\text{Absolut}} [\text{mbar}]}{1013 [\text{mbar}]} \cdot p_{\text{Differenz}} [\text{mbar}]} \quad [\text{l/min}]$$

Der Kalibrierfaktor a wurde mit dem Ovalrad-Volumenstrommesser mit $a = 5,104$ ermittelt.

Die Gasgeschwindigkeit bzw. der Volumenstrom [l/min] durch den Sensor ist ein funktionaler Parameter des Messergebnisses und wurde in einer Versuchsreihe für das Werkstattmessgerät ermittelt. Als Rußquelle dient der Dieselmotor, der auf einen konstanten Rußemissionswert eingestellt wird, die mit dem Vergleichsopazimeter kontrolliert wird.

Nachfolgendes Diagramm zeigt das Messergebnis und die Ausgleichsfunktion mit einer Korrelation von $R^2 = 0,965$ aus der der Geschwindigkeitskorrekturfaktor f_{Vol} abgeleitet wird.

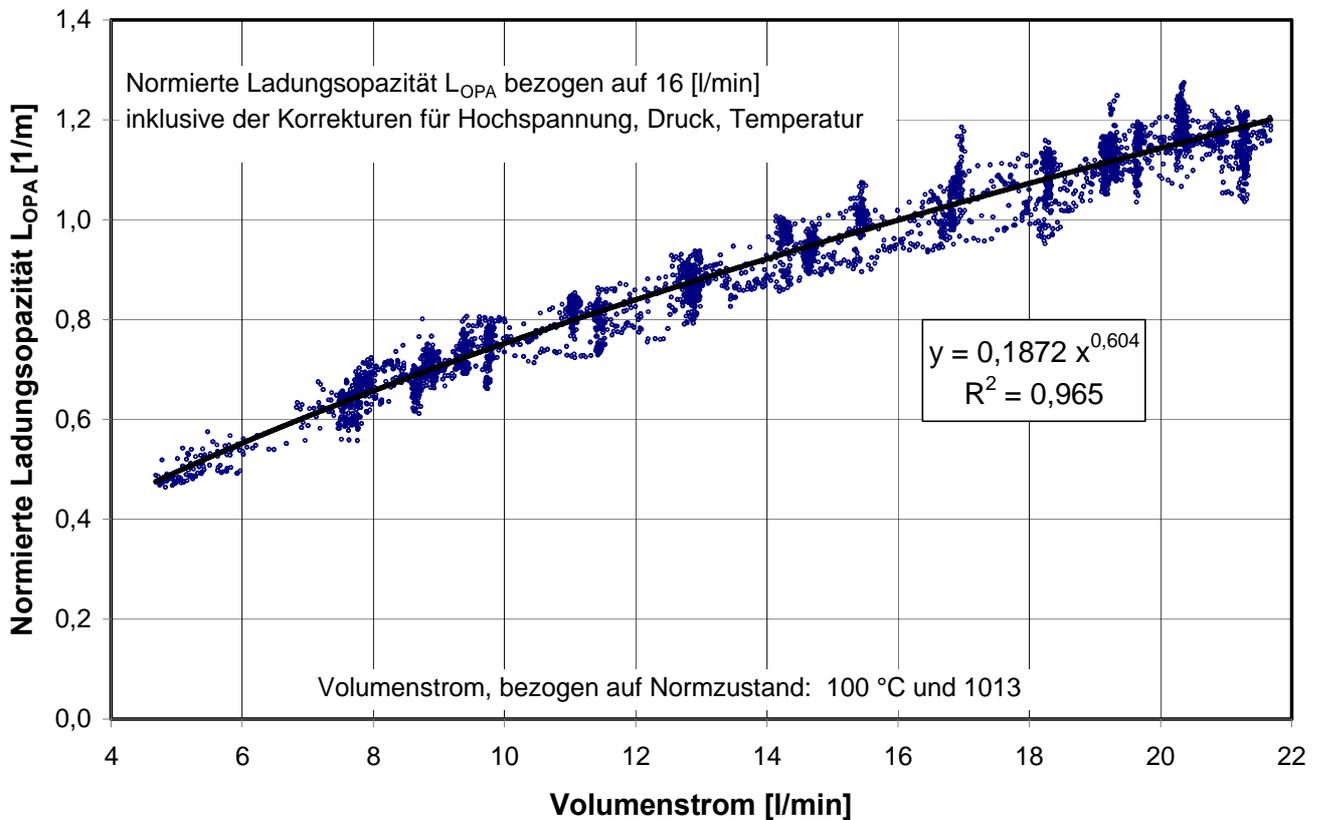


Abb.: 2-9 normierte Geschwindigkeitsabhängigkeit

Geschwindigkeitskorrekturfaktor: $f_{Vol} = \frac{1}{0,1872 \cdot v [l/min]^{0,604}}$ mit v [l/min], gemessener Volumenstrom unmittelbar nach dem Ladungssensor.

Unter Einbeziehung aller Korrekturfaktoren ergibt sich für die Ladungskapazität L_{OPA} [1/m] als Messergebnis:

$$L_{OPA \text{ korr}} = L_{OPA} \cdot f_{Temp} \cdot f_{Druck} \cdot f_{Vol} \cdot f_{Hoch} \quad [1/m]$$

Dieses Messergebnis wird bei dem Rußmessgerät als k-Wert numerisch ausgegeben und auch als zeitlicher Verlauf dargestellt. Wahlweise kann der zeitliche Verlauf auf eine Auflösung von 0,05 [s] und 1 [s] umgeschaltet werden.

2.2 Messprozedur der periodischen Abgasuntersuchung (AU)

Um das Rußmessgerät für diesen speziellen Einsatz zu konzipieren, wird die Motordrehzahl des Fahrzeuges gemessen, da die Bewertung der Messergebnisse auf die maximale Emission bei der Abregeldrehzahl des Motors ausgerichtet ist.

Das vorgeschrieben Zeit / Drehzahlverhalten ist nachfolgend dargestellt.

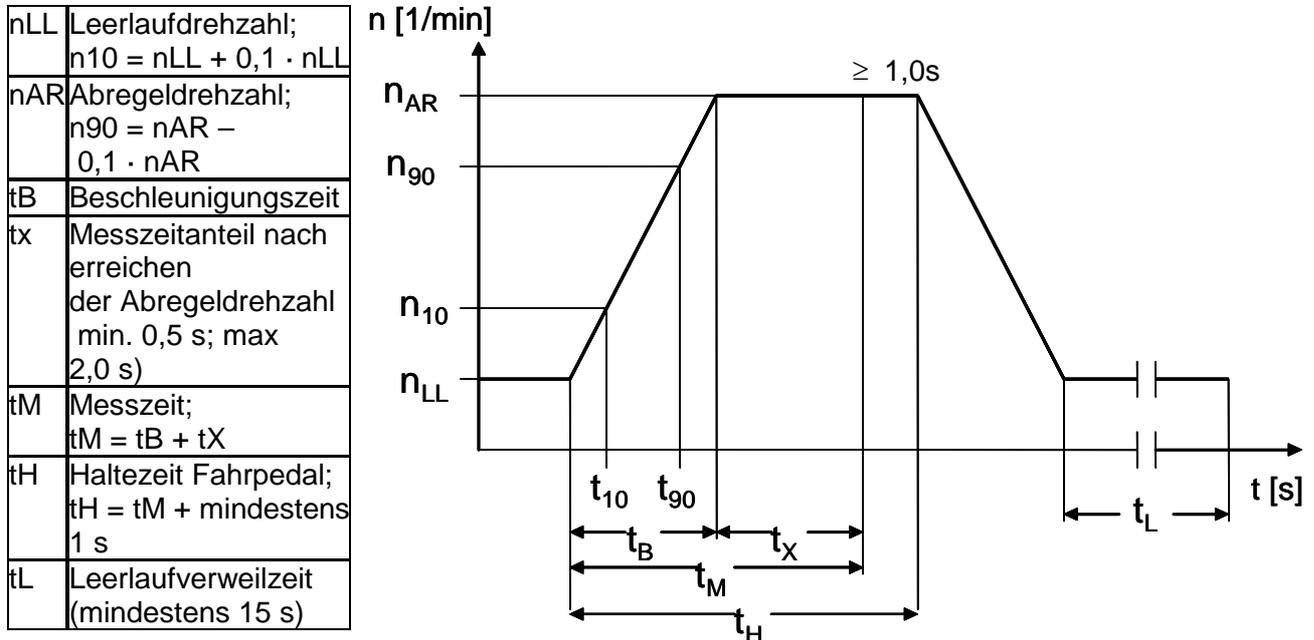


Abb.: 2-10 Zeitprofil der periodischen Abgasuntersuchung [1]

Das erforderliche Zeitverhalten des Sensorsignals ist mit Modus A, (Reaktionszeit: 0,05 [s]) und Modus B (Besselfilter 2. Ordnung $1 \pm 0,1$ [s]) festgelegt. Bei der praktizierten AU wird fast ausschließlich Modus B angewendet.

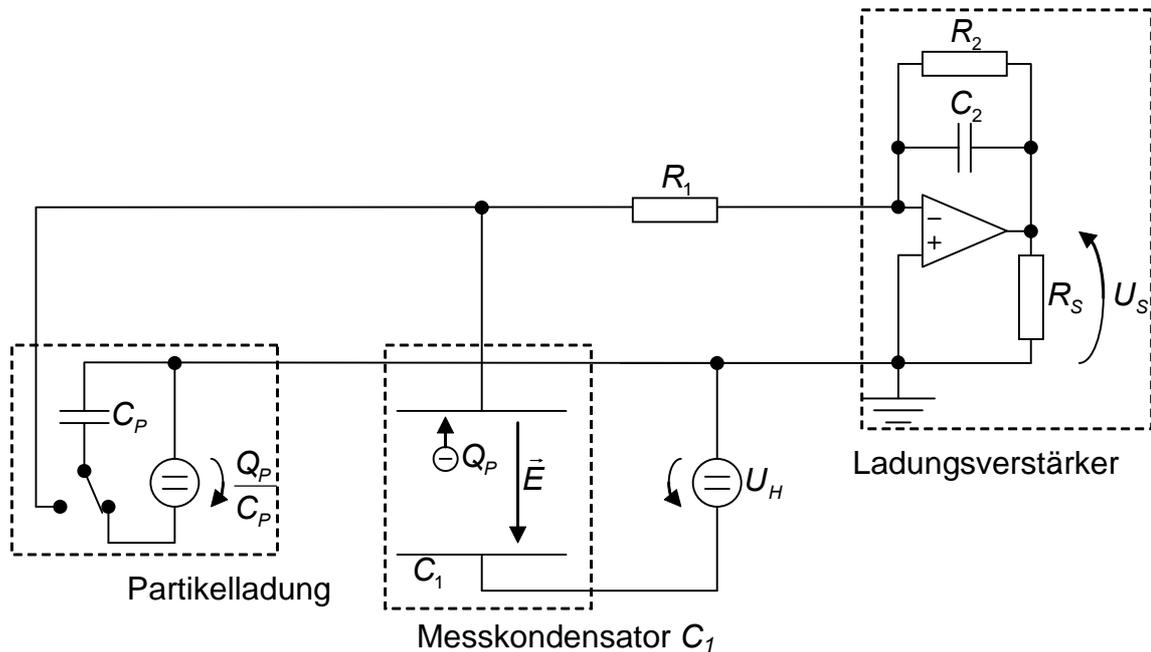
Diese zeitkritischen Anforderungen an den Ablauf der Messung und dem Zeitverhalten des Sensors erfordern eine grundsätzliche Untersuchung der elektronischen Eingangsschaltung des Sensors, da die Widerstände und Kapazitäten des Ladungsverstärkers und der Hochspannungsschutzschaltung von entscheidendem Einfluss sind.

2.3 Simulation und Berechnung der Eingangsschaltung

Dieses Arbeitspaket war in der Antragstellung nicht vorgesehen, da die Bedeutung der Wechselwirkung der elektrischen Bauteile der Eingangsschaltung noch nicht erkannt wurde. Bei der Berechnung und Simulation der Eingangsschaltung wurde gefunden, dass nicht nur die Umwandlung eines durch Ladungsänderung hervorgerufenen Stroms in eine Spannung erfolgt, sondern dass durch die verschiedenen Kapazitäten in deren Zusammenwirkung ein hervorragender Schutz gegen EMV-Einstrahlungen erzeugt werden kann, als auch eine definierte Tiefpassfilterung des Messsignals, so dass das konkrete Tiefpassfilter im Messverstärker eingespart werden kann.

Die Aufladung des Partikels an der Hochspannungselektrode erzeugt eine Feldänderung, welche vom Ladungsverstärker ausgeglichen wird. Der Ausgleich dieser Ladungsveränderung erfolgt durch aufbringen einer Gegenladung.

Den prinzipiellen Aufbau der Eingangsschaltung zeigt Bild 2-11.



Kondensatoren	
C_1	5,3 pF
C_2	22 nF
Q_P	Partikelladung
C_P	Partikelkapazität

Widerstände	
R_1	100 k Ω
R_2	47 M Ω
R_S	∞

Spannungen	
U_H	1500 V
U_S	Verstärktes Sensorsignal

Abb. 2-11 Ersatzschaltplan der Eingangsschaltung

Für das mathematische Modell der Eingangsschaltung wird ein vereinfachter Ersatzschaltplan zu Grunde gelegt (siehe Abb. 2-13). Die Kapazität des Messkondensators C_1 kann aus den Geometriedaten des Sensors berechnet werden. Der bisher verwendete Sensor hat eine Plattenlänge $L=3$ cm, eine Breite $B=3$ cm und einen Plattenabstand $D=3$ mm. Zu beachten ist, dass die Messplatte von beiden Seiten von der Hochspannungselektrode umgeben ist, so dass sich die Kondensatorfläche verdoppelt. Die Kapazität ergibt sich somit zu:

$$C_M = \epsilon_0 \cdot \frac{2 \cdot B \cdot L}{D}; \quad \text{mit } \epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \quad (1.1)$$

$$C_M = 5,3 \text{ pF}$$

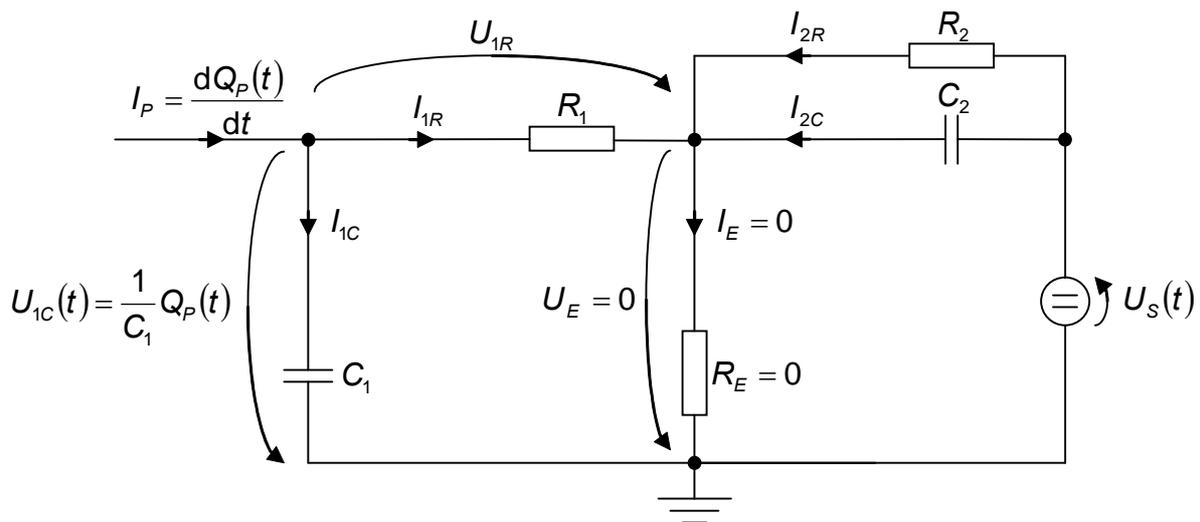
Aus der physikalischen Sichtweise betrachtet, gibt ein auf die Hochspannungselektrode auftreffendes Partikel mit der Kapazität C_P seine Ladung Q_P an diese ab. Die Kapazitätsänderung des Messkondensators C_M durch die Partikelkapazität C_P kann dabei vernachlässigt werden. Bei der Abgabe der Ladung entsteht ein Stromfluss I_1 dessen Integral der Partikelladung Q_P entspricht. Die Ladungsabgabe eines Partikels kann demnach als kurz-

zeitiger Stromfluss verstanden werden, d.h. der Stromfluss eines Partikels kann mit Hilfe eines Dirakimpulses $\delta(t)$ beschrieben werden:

$$Q_P = \int_{-\infty}^{\infty} I_M \cdot \delta(t) dt; \text{ mit } \delta(t) = \begin{cases} \int \delta(t) dt = 1 & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Die Spannungsänderung durch die Ladungsübertragung kann separat als additive Spannung verstanden werden. Bei näherer Betrachtung kann daher der Ersatzschaltplan vereinfacht werden. Da die Spannungsänderung durch den Ladungstransport separat betrachtet werden kann, heben sich die Spannung des Messkondensators und die der Hochspannungsquelle im normalen Sensorbetrieb auf und können vernachlässigt werden. Da die Gegenspannung durch einen Verstärker erzeugt wird, braucht der Lastwiderstand des Ausgangs R_S nicht beachtet werden ($R_S = \infty$), da dieser Parallel einer als ideal zu betrachtenden Spannungsquelle geschaltet ist. Der Eingangswiderstand R_E des Operationsverstärkers wird als unendlich angenommen, so dass der Stromfluss I_E zum Eingang des Verstärkers vernachlässigt werden kann.

Das vereinfachte Schaltbild hat nun folgende Form (Bild 2-12):



Kondensatoren	
C_1	5,3 pF
C_2	22 nF
Q_P	Partikelladung

Widerstände	
R_1	100 kΩ
R_2	47 MΩ
R_E	0 Ω

Spannungen	
U_{1C}	Messelektroden Spannung
U_E	Verstärker Eingangsspannung
U_S	Verstärktes Sensorsignal

Abb. 2-12 Ersatzschaltplan des mathematischen Modells der Sensorschaltung

Mit Hilfe der Maschen- und Knotenpunktgleichungen kann folgendes Gleichungssystem aufgestellt werden:

$$\begin{aligned}
 a) \quad & I_{1R}(t) \cdot R_1 - \frac{1}{C_1} \cdot \int I_{1C}(t) dt = 0 \\
 b) \quad & -\frac{1}{C_2} \cdot \int I_{2C}(t) dt = -U_S(t) \\
 c) \quad & -I_{2R}(t) \cdot R_2 + \frac{1}{C_2} \cdot \int I_{2C}(t) dt = 0 \\
 d) \quad & I_P(t) - I_{1R}(t) - I_{1C}(t) = 0 \\
 e) \quad & I_{1R}(t) + I_{2R}(t) + I_{2C}(t) = 0
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

Um das Gleichungssystem handhabbarer zu machen, wird das Gleichungssystem 1.3 Laplace transformiert. Dabei ist $s = a + b \cdot j$ die komplexe Frequenz mit $j = \sqrt{-1}$.

$$\begin{aligned}
 a) \quad & \mathcal{L}\left\{I_{1R}(t) \cdot R_1 - \frac{1}{C_1} \cdot \int I_{1C}(t) dt = 0\right\} \leftrightarrow I_{1R}(s) \cdot R_1 - \frac{1}{s \cdot C_1} \cdot I_{1C}(s) \\
 b) \quad & \mathcal{L}\left\{-\frac{1}{C_2} \cdot \int I_{2C}(t) dt = -U_S(t)\right\} \leftrightarrow -\frac{1}{s \cdot C_2} \cdot I_{2C}(s) = -U_S(s) \\
 c) \quad & \mathcal{L}\left\{-I_{2R}(t) \cdot R_2 + \frac{1}{C_2} \cdot \int I_{2C}(t) dt = 0\right\} \leftrightarrow -I_{2R}(s) \cdot R_2 + \frac{1}{s \cdot C_2} \cdot I_{2C}(s) = 0 \\
 d) \quad & \mathcal{L}\{I_P(t) - I_{1R}(t) - I_{1C}(t) = 0\} \leftrightarrow I_P(s) - I_{1R}(s) - I_{1C}(s) = 0 \\
 e) \quad & \mathcal{L}\{I_{1R}(t) + I_{2R}(t) + I_{2C}(t) = 0\} \leftrightarrow I_{1R}(s) + I_{2R}(s) + I_{2C}(s) = 0
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

Dieses so transformierte Gleichungssystem kann nun in eine übersichtliche Matrixschreibweise dargestellt und in die sogenannte Dreiecksform überführt werden:

$$\begin{pmatrix} R_1 & -\frac{1}{s \cdot C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{s \cdot C_2} & 0 \\ 0 & 0 & -R_2 & \frac{1}{s \cdot C_2} & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{1R}(s) \\ I_{C1}(s) \\ I_{2R}(s) \\ I_{2C}(s) \\ I_P(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -U_S(s) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

(1.5)

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{s \cdot C_1} & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -R_2 & \frac{1}{s \cdot C_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{s \cdot C_2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_P(s) \\ I_{C1}(s) \\ I_{1R}(s) \\ I_{2R}(s) \\ I_{2C}(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -U_S(s) \end{pmatrix}$$

Die Matrix kann nun mit Hilfe der Gaußelimination gelöst werden:

$$-\frac{1}{s \cdot C_2} \cdot I_{2C}(s) = -U_S(s) \Leftrightarrow I_{2C}(s) = U_S(s) \cdot s \cdot C_2$$

$$\frac{1}{s \cdot C_2} \cdot I_{2C}(s) - R_2 \cdot I_{2R}(s) \Leftrightarrow I_{2R}(s) = \frac{1}{s \cdot R_2 C_2} \cdot I_{2C}(s) \Rightarrow I_{2R}(s) = \frac{U_S(s)}{R_2}$$

$$I_{2C}(s) + I_{2R}(s) + I_{1R}(s) \Leftrightarrow I_{1R}(s) = -I_{2C}(s) - I_{2R}(s) \Rightarrow I_{1R}(s) = -U_S(s) \cdot \left(\frac{1 + s \cdot R_2 C_2}{R_2} \right) \quad (1.6)$$

$$-\frac{1}{s \cdot C_1} \cdot I_{1C}(s) + R_1 \cdot I_{1R}(s) \Leftrightarrow I_{1C}(s) = I_{1R}(s) \cdot s \cdot C_1 R_1 \Rightarrow I_{1C}(s) = -U_S(s) \cdot \left(\frac{1 + s \cdot R_2 C_2}{R_2} \right) \cdot s \cdot R_1 C_1$$

$$I_P(s) - I_{1C}(s) - I_{1R}(s) \Leftrightarrow I_P(s) = I_{1C}(s) + I_{1R}(s) \Rightarrow I_P(s) = -U_S(s) \cdot \left(\frac{1 + s \cdot R_2 C_2}{R_2} \right) \cdot (1 + s \cdot R_1 C_1)$$

Die Übertragungsfunktion $G(s) = U_S(s)/I_P(s)$ des Verstärkers, welche durch Umformen aus der Lösung der Matrix, siehe Gleichung 1.6, bestimmt werden kann, lautet:

$$G(s) = \frac{U_s(s)}{I_p(s)} = -R_2 \cdot \frac{1}{(1 + s \cdot R_1 C_1) \cdot (1 + s \cdot R_2 C_2)}$$

$$= -\frac{R_2}{R_1 C_1 R_2 C_2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1 C_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{R_2 C_2} + s\right)}$$
(1.7)

Aus der Verstärkergleichung ist erkennbar, dass es sich hier um ein sogenanntes PT₂-Glied handelt, d.h. ein Tiefpass 2. Ordnung vorliegt. Die beiden Nennernullstellen sind aus der Gleichung direkt ablesbar:

$$\alpha_1 = -\frac{1}{R_1 C_1}; \quad \alpha_2 = -\frac{1}{R_2 C_2}$$
(1.8)

Der Zähler wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$Z(s) = -\frac{R_2}{R_1 C_1 R_2 C_2}$$
(1.9)

Mittels der Partialbruchzerlegung der Nennernullstellen und der Zählergleichung wird die Gleichung für die Rücktransformation in den Zeitbereich vorbereitet.

$$G(s) = \frac{U_s(s)}{I_p(s)} = \frac{Z(s)}{(s - \alpha_1)(s - \alpha_2)} = r_0 + \frac{r_1}{(s - \alpha_1)} + \frac{r_2}{(s - \alpha_2)}$$

$r_0 = \lim_{s \rightarrow \infty} G(s) = 0$ da Nennerordnung > Zählerordnung

$$Z(s) = r_1(s - \alpha_2) + r_2(s - \alpha_1)$$

mit $s = \alpha_1$:

$$Z(\alpha_1) = r_1(\alpha_1 - \alpha_2) \Leftrightarrow r_1 = \frac{Z(\alpha_1)}{(\alpha_1 - \alpha_2)}$$

mit $s = \alpha_2$

$$Z(\alpha_2) = r_2(\alpha_2 - \alpha_1) \Leftrightarrow r_2 = \frac{Z(\alpha_2)}{(\alpha_2 - \alpha_1)}$$
(1.10)

Durch Einsetzen der Werte aus Gleichung 1.8 und 1.9 kann die Gleichung 1.10 gelöst werden. Zunächst werden die Konstanten r_1 bis r_3 bestimmt:

mit $\alpha_1 = -\frac{1}{R_1 C_1}$

a) $Z\left(-\frac{1}{R_1 C_1}\right) = -\frac{R_2}{R_1 C_1 R_2 C_2} = r_1 \left(-\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2}\right) = r_1 \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{R_1 C_1 R_2 C_2}$

$$\Leftrightarrow r_1 = -\frac{R_2}{R_1 C_1 - R_2 C_2}$$
(1.11)

mit $\alpha_2 = -\frac{1}{R_2 C_2}$

$$\begin{aligned} \text{b) } Z\left(-\frac{1}{R_2 C_2}\right) &= -\frac{R_2}{R_1 C_1 R_2 C_2} = r_2 \left(-\frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 C_1}\right) = r_2 \frac{R_2 C_2 - R_1 C_1}{R_1 C_1 R_2 C_2} \\ \Leftrightarrow r_2 &= -\frac{R_2}{R_2 C_2 - R_1 C_1} \end{aligned}$$

Die Verstärkergleichung lautet:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{U_S(s)}{I_P(s)} = Z(s) \cdot \left(\frac{r_1}{(s - \alpha_1)} + \frac{r_2}{(s - \alpha_2)} \right) \\ &= -\frac{R_2}{R_1 C_1 - R_2 C_2} \cdot \left(\frac{1}{s + \frac{1}{R_1 C_1}} - \frac{1}{s + \frac{1}{R_2 C_2}} \right) \end{aligned} \quad (1.12)$$

Durch Einsetzen der Laplace transformierten Gleichung für den Partikelstrom $L\{I_P(t)\} \Leftrightarrow I_P(s)$ kann die Antwort des Verstärkers berechnet werden. Die Impulsantwort des Verstärkers ergibt sich, wenn die Ladung Q_P impulsartig als Dirakimpuls eingebracht wird (siehe Gleichung 1.2). Der Ladungsstrom ist in diesem Fall:

$$L\{I_{P,Impuls}(t) = Q_P \cdot \delta(t)\} \Leftrightarrow I_{P,Impuls}(s) = Q_P \quad (1.13)$$

Durch einsetzen in die Verstärkergleichung aus Gleichung 1.17 ergibt sich die Ausgangsspannung zu:

$$U_{S,Impuls}(s) = G(s) \cdot I_{P,Impuls}(s) = -Q_P \cdot \frac{R_2}{R_1 C_1 - R_2 C_2} \cdot \left(\frac{1}{s + \frac{1}{R_1 C_1}} - \frac{1}{s + \frac{1}{R_2 C_2}} \right) \quad (1.14)$$

Die Rücktransformation in den Zeitbereich liefert:

$$L^{-1}\{U_{S,Impuls}(s) = G(s) \cdot I_{P,Impuls}(s)\} = U_{S,Impuls}(t) = -Q_P \cdot \frac{R_2}{R_1 C_1 - R_2 C_2} \cdot \left(e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} \right) \quad (1.15)$$

Die Sprungantwort des Verstärkers wird ähnlich berechnet. Dazu wird von einem plötzlich aufgeschalteten kontinuierlichen Partikelstrom $I_P(t)$ ausgegangen mit $\dot{N} = dn(t)/dt$ Partikel pro Sekunde:

$$\begin{aligned} I_{P,Sprung}(t) &= \frac{dn(t)}{dt} Q_P \cdot \sigma(t); \text{ mit } \sigma(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \\ L\{I_{P,Sprung}(t)\} &\Leftrightarrow I_{P,Sprung}(s) = \dot{N} Q_P \cdot \frac{1}{s}; \text{ mit } \dot{N} = \frac{dn(t)}{dt} \end{aligned} \quad (1.16)$$

Durch einsetzen von $I_P(s)$ aus Gleichung 1.21 in die Verstärkergleichung aus Gleichung 1.17 ergibt sich die Verstärkerantwort:

$$U_{S,Sprung}(s) = G(s) \cdot I_{P,Sprung}(s) = -\dot{N}Q_P \cdot \frac{R_2}{R_1C_1 - R_2C_2} \cdot \left(\frac{1}{s \left(s + \frac{1}{R_1C_1} \right)} - \frac{1}{s \left(s + \frac{1}{R_2C_2} \right)} \right) \quad (1.17)$$

Die Rücktransformation in den Zeitbereich liefert:

$$\begin{aligned} L^{-1}\{U_{S,Sprung}(s) = G(s) \cdot I_{P,Sprung}(s)\} \\ \Leftrightarrow U_{S,Sprung}(t) = -\dot{N}Q_P \cdot \frac{R_2}{R_1C_1 - R_2C_2} \left(R_1C_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{R_1C_1}} \right) - R_2C_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2C_2}} \right) \right) \end{aligned} \quad (1.18)$$

Das sich für $t = \infty$ einstellende Signal, bezogen auf den Partikelstrom $I_P = \dot{N}Q_P$, ergibt die Verstärkung $V = U_S(\infty)/\dot{N}Q_P$:

$$\begin{aligned} V &= \frac{U_{S,Sprung}(\infty)}{\dot{N}Q_P} \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{-R_2}{R_1C_1 - R_2C_2} \left(R_1C_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{R_1C_1}} \right) - R_2C_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2C_2}} \right) \right) \\ &= -\frac{R_2}{R_1C_1 - R_2C_2} (R_1C_1 - R_2C_2) = -R_2 \end{aligned} \quad (1.19)$$

Die Verstärkung erscheint sehr groß, allerdings ist zu bedenken, dass ein Stromfluss in eine Spannung umgesetzt wird und daher der enorme Verstärkungsfaktor möglich ist.

Da der Sensor die Rußkonzentration in mg/m^3 angeben soll, muss bestimmt werden, wie hoch der Partikelstrom I_P bei $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ Ruß ist. Um einen Anhaltspunkt zu bekommen werden Messergebnisse vom 10.3.2008 herangezogen (Abb. 2-13: Versuchsmesswerte). Die Abgasgeschwindigkeit ist unbekannt, wird aber als konstant vorausgesetzt. Der Sensor wird überkritisch betrieben, d.h. es werden Partikel durch den Sensor geblasen, ohne dass diese Signale geben.

Opazimeteranzeige: $C_m = 3 \text{ [mg/m}^3\text{]}$					
Widerstand	Kondensator	Sensor Ausgang	Faktor Messverstärker	Sensor Rohsignal	Partikelstrom
R_2	C_2	U_A	U_A/U_{Roh}	U_{Roh}	$I_P = \dot{N}Q_P$
[MΩ]	[pF]	[V]	[V]	[V]	[A]
1000	3300	9,6	2	4,8	$4,8 \cdot 10^{-9}$
1000	1000	9	2	4,5	$4,5 \cdot 10^{-9}$
1000	100	9	2	4,5	$4,5 \cdot 10^{-9}$
47	3300	8,5	40	0,212	$4,51 \cdot 10^{-9}$
47	10000	6,3	20	0,315	$6,70 \cdot 10^{-9}$
47	22000	7	40	0,175	$3,72 \cdot 10^{-9}$
Mittelwert:					$4,79 \cdot 10^{-9} \text{ [A]}$

Abb.: 2-13 Versuchsmesswerte

Aus obiger Tabelle kann abgelesen werden, wie groß der Partikelstrom bei 1 mg/m^3 Ruß in etwa ist:

$$I_{P1mg} \cong 1,6 \cdot 10^{-9} \left[\frac{\text{A}}{\text{mg/m}^3} \right] \quad (1.20)$$

Zu diesem Wert ist zu ergänzen zu sagen, dass die Abgasgeschwindigkeit nicht berücksichtigt wurde und die Messergebnisse stark schwankten, so dass dieses lediglich ein Richtwert ist. Die starken Schwankungen können vom inneren Widerstand der Kondensatoren bedingt sein. Es sind also Kondensatoren mit möglichst kleinem ESR-Wert (Reihenwiderstand), geringen dielektrischen Verlusten, sowie einem großen Isolationswiderstand als Rückkopplungskondensator C_2 zu empfehlen.

Der Frequenz- und Phasengang des Verstärkers kann durch einsetzen der komplexen Frequenz $s = 2\pi f \cdot j$ in die Verstärkergleichung berechnet werden. Dabei ist $j = \sqrt{-1}$. Als Verstärkergleichung wird die Gleichung 1.7 verwendet.

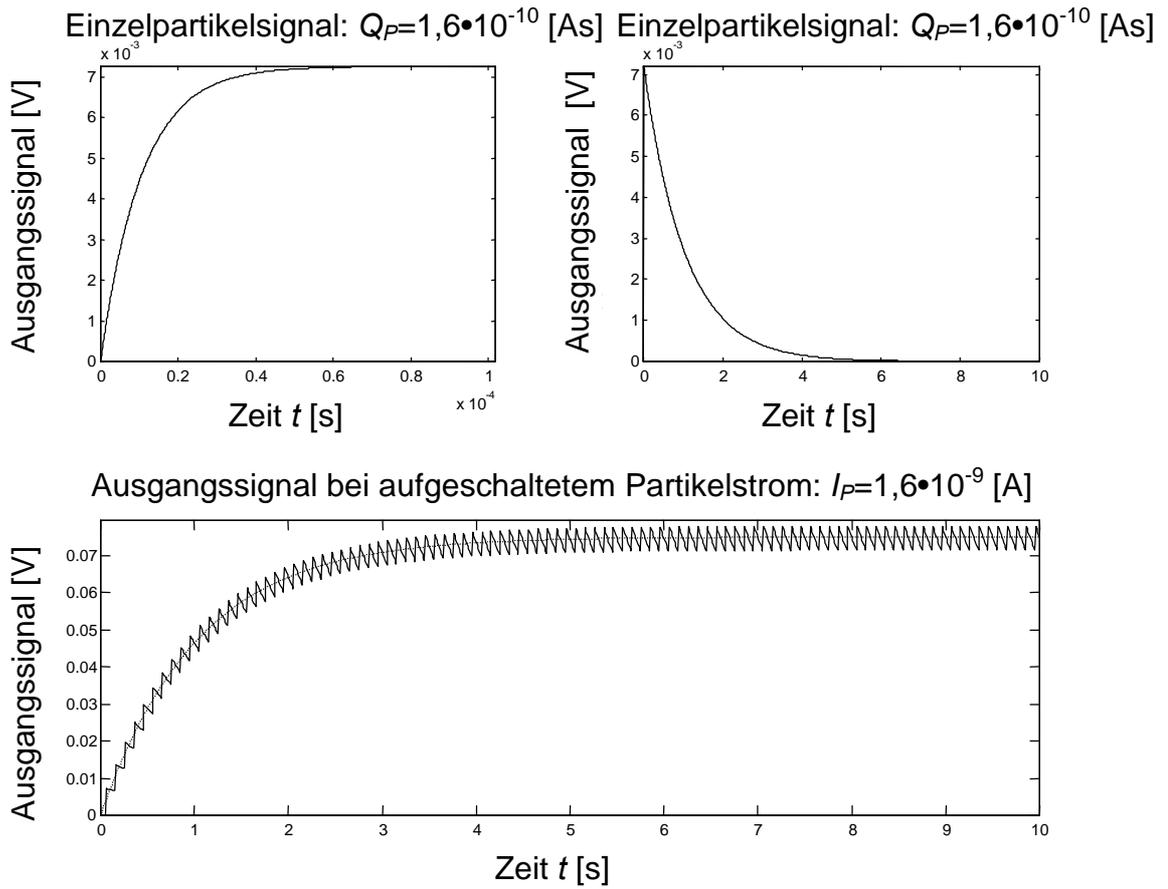
Als Frequenzgang wird der Amplitudenverlauf über die Frequenz bezeichnet:

$$A(f) = \left| \frac{U_s(2\pi f \cdot j)}{I_p(2\pi f \cdot j)} \right| = |G(2\pi f \cdot j)| \quad (1.21)$$

Der Phasengang bezeichnet den Winkel zwischen der Schwingung des Eingangssignals $Q(t)$ und dem Ausgangssignal $U_s(t)$:

$$\omega(f) = \text{Winkel}(G(2\pi f \cdot j)) = \arctan \left(\frac{\text{Imaginärteil}(G(2\pi f \cdot j))}{\text{Realteil}(G(2\pi f \cdot j))} \right) \quad (1.22)$$

In nachfolgenden Diagrammen sind das Zeitverhalten auf einen Sprung sowie der Frequenz- und Phasengang dargestellt.



Kondensatoren	
C_1	100 pF
C_2	22 nF

Widerstände	
R_1	100 k Ω
R_2	47 M Ω

Simulationsparameter	
Rußkonzentration C_m	1 mg/m ³
Partikelladung Q_P/C_m	$1,6 \cdot 10^{-9}$ A m ³ /mg
Partikelanzahl pro Sekunde	$\dot{N} = 10$ 1/s

Abb.: 2-14 Zeitverhalten der Eingangsschaltung

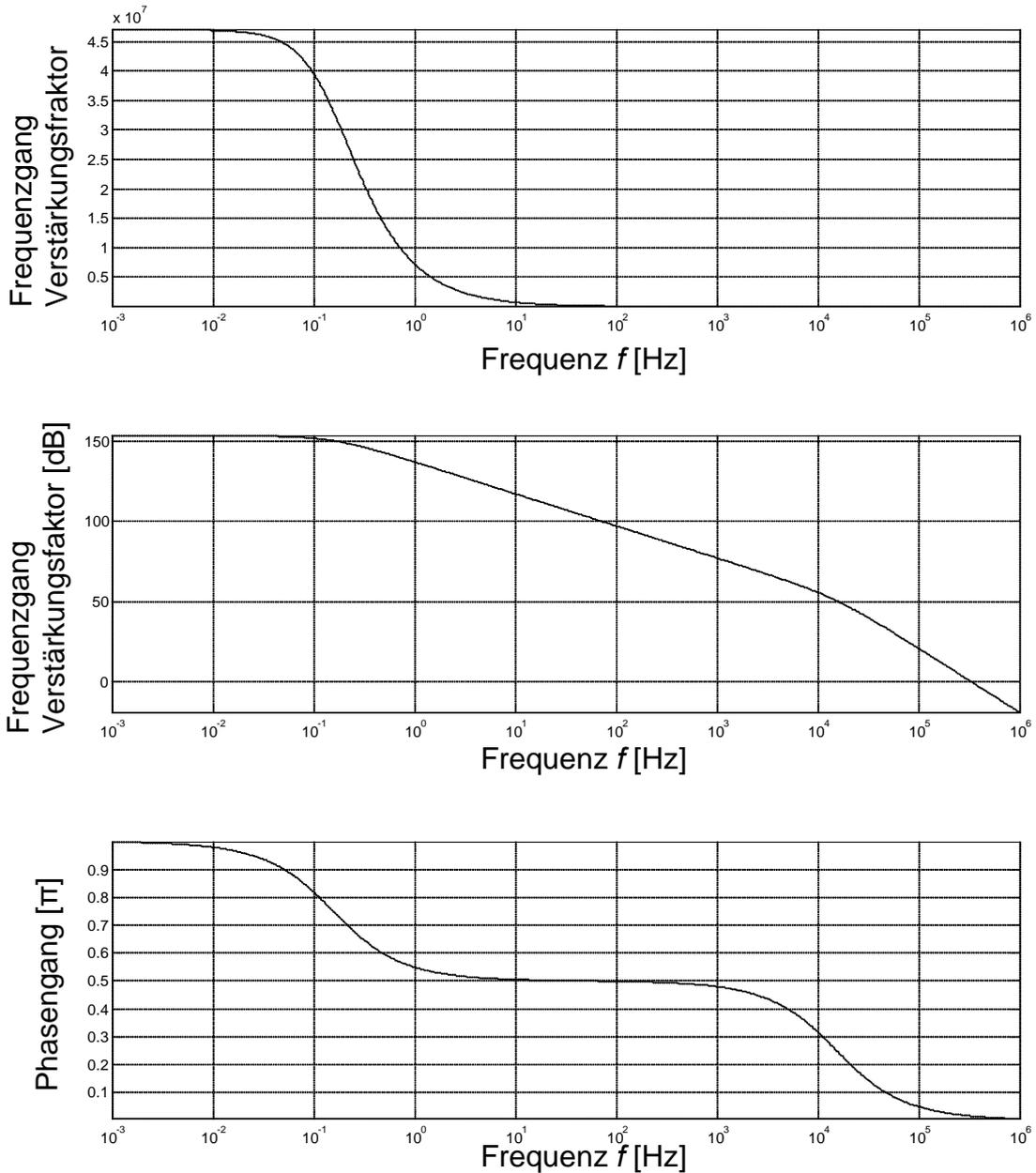


Abb.: 2-15 Frequenz- und Phasengang der Eingangsschaltung

2.4 Diskrete Auslegung der Eingangsschaltung

Die Simulation und Berechnung der Eingangsschaltung hat folgende neue Erkenntnisse ergeben:

- Es wurde nachgewiesen, dass die physikalische Grundeinheit des Sensorsignals, hervorgerufen durch das Verhalten der Rußpartikel im Sensor, ein Strom in der Größenordnung von nA ist. Als Konsequenz kann eine Kalibrierung der gesamten Messelektronik durch Einspeisen eines Stroms in die Messelektrode durchgeführt werden.

- b) Das Zeitverhalten der Messung wird von den Zeitgliedern C_2 und R_2 der Gegenkopplung und dem Zeitglied, bestehend aus R_L und C_M , der Kapazität des Messkondensators, bestimmt. Wenn diese Zeitglieder gleich groß ausgelegt werden, ergibt sich ein Tiefpassfilter 2. Ordnung. Da C_M mit 5,8 pF sehr klein ist, wird parallel zum Messkondensator eine größere Kapazität von 47 nF geschaltet. Dies ergibt den Vorteil, dass EMV- Störungen bereits am Eingang der Schaltung kurz geschlossen werden. Ein weiterer Vorteil ergibt sich für die Siebung der Hochspannung, die dann nicht mehr erforderlich ist.

Mit nachstehenden Werten ist die elektronische Schaltung bestückt.

R_2	C_2	R_L	C_M	Zeitkonstante
68 M Ω	68 pF	100 k Ω	47 nF	0,0046 s

Eckfrequenz des Tiefpassfilters der Eingangsschaltung: $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot R} = 34 \text{ [Hz]}$

In Kombination mit dem nachgeschalteten Tiefpassfilter 4. Ordnung ergibt sich eine Frequenzbegrenzung des Messsignals auf 20 [Hz], entsprechend „Modus A“ des Opazimeters.

2.5 Ausführung der 1. Version Rußmessgerätes

Das erste ausgeführte Werkstattmessgerät bestand in der Zusammenstellung der



Abb.: 2-16 1. Ausführung des Rußmessgerätes

einzelnen Komponenten in einem Norm-Gehäuse mit einer USB- Schnittstelle für den Steuerrechner. Der Entnahmeschlauch ist bei dieser Ausführung als Heizschlauch ausgeführt, der das Abgas auf einer Länge von 1,5 [m] von Raumtemperatur auf 130 [°C] bei einem Entnahmestrom von 20 [l/min] aufheizt. Um dieses Ziel zu erreichen, musste der Welschlauch aus NIRO in 2 Segmente aufgeteilt werden, die über Temperaturregler separat geregelt wurden.

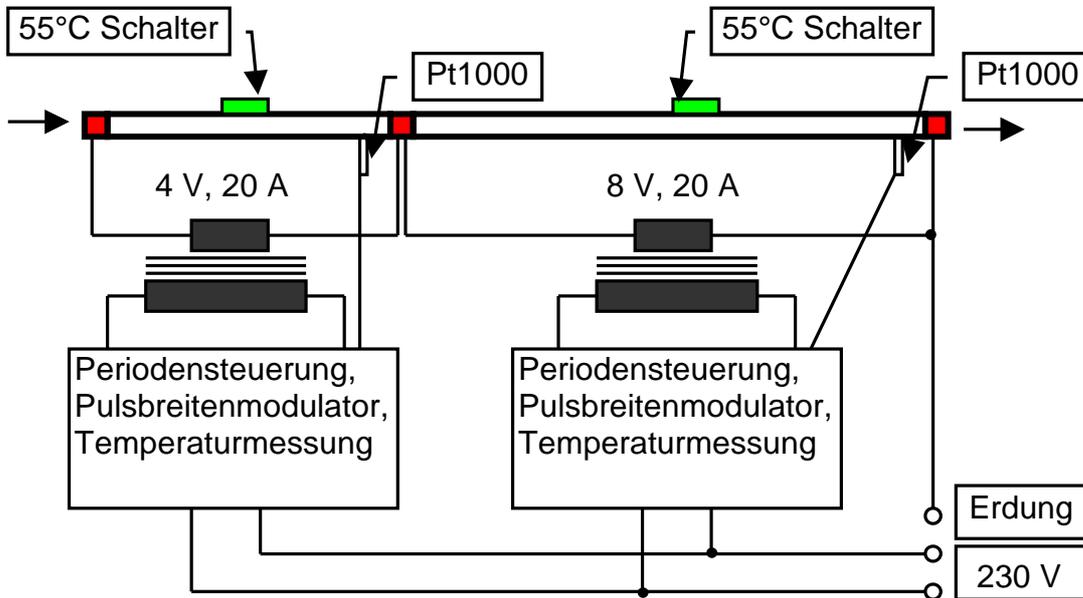


Abb.: 2-17 Funktion der Schlauchheizung

Die Entwicklung der Regelelektronik der Schlauchheizung bereitete besondere Probleme, weil induktive Lasten geschaltet wurden. Es konnte deshalb keine Phasenanschnittsteuerung eingesetzt werden, sondern es wurde eine Steuerung von ganzzahligen Wechselstromperioden aufgebaut, deren Anzahl über eine Pulsbreitenmodulation erzeugt wurde. Die Pulsbreite war von dem Ausgangssignal der Temperaturmessung abhängig, die mit einer Brückenschaltung mit integriertem PT1000 Widerstandstemperatursensor erzeugt wurde.

Bei einem Ausfall der Regelelektronik könnte sich der Schlauch auf Temperaturen über 200 [°C] aufheizen, mit der Folge, dass die Wärmeisolation schmilzt. Um Bedienungspersonal nicht zu gefährden, wurden für jeden Heizkreis Thermoschalter mit einer Schaltschwelle von 55 [°C] unter der Schlauchummantelung eingebaut, die beim Ansprechen die Stromkreise über Lastrelais vom 230-V- Netz trennen.

Mit diesem Aufbau des Messgerätes wurden erste Erfahrungen gesammelt, indem die Messprozedur der AU am Motorprüfstand und an verschiedenen Fahrzeugen durchgeführt wurde. Es hat sich ergeben, dass die starke Rußemission von EURO III- Fahrzeugen zu einer Verschmutzung des Entnahmeschlauchs, der Sensorkammer und auch des Sensors führte. Dabei wurde auch eine starke Nullpunktdrift festgestellt. Bei einer nachfolgenden Messung von Fahrzeugen mit EURO IV Zertifizierung haben sich lösende Verschmutzungen zu Störungen der Messungen geführt. Der Sensor musste ausgebaut, gereinigt und die Kammer und der Schlauch mit Druckluft gespült werden.

Die Konsequenz aus diesen Beobachtungen führten zu einem neuen Konzept des Messgerätes, bei dem eine Rückspülung der Sensorkammer und des

Entnahmeschlauches vorgesehen ist, als auch eine „Nullpunktspülung“, bei der gefilterte Raumluft durch den Sensor geführt wird und die elektrischen Nullpunktwerte bei den einzelnen Verstärkerstufen im Rechner gespeichert werden. Durch diese Maßnahme werden auch sämtliche Temperaturdriften der Messelektronik kompensiert, da auch die momentanen Werte der Differenzdruckmessung festgehalten werden.

Weiterhin wurde der Heizschlauch in das Gerät integriert, so dass am Geräteanschluss ein temperaturbeständiger, elektrisch leitender PTFE-Schlauch ohne Heizung von 5 [m] Länge angeschlossen wird. Durch die Rückspülung wird dieser nach Bedarf gereinigt.

2.6 Ausführung der 2. Version des Rußmessgerätes

Der konstruktive Aufbau des Gerätes beinhaltet im Bodenbereich ein 1,5 [m] langes, gewickeltes Kupferrohr, das über eine Temperatur geregelte Heizung den Entnahmegasstrom von Raumtemperatur auf mindestens 130 [°C] aufheizt.

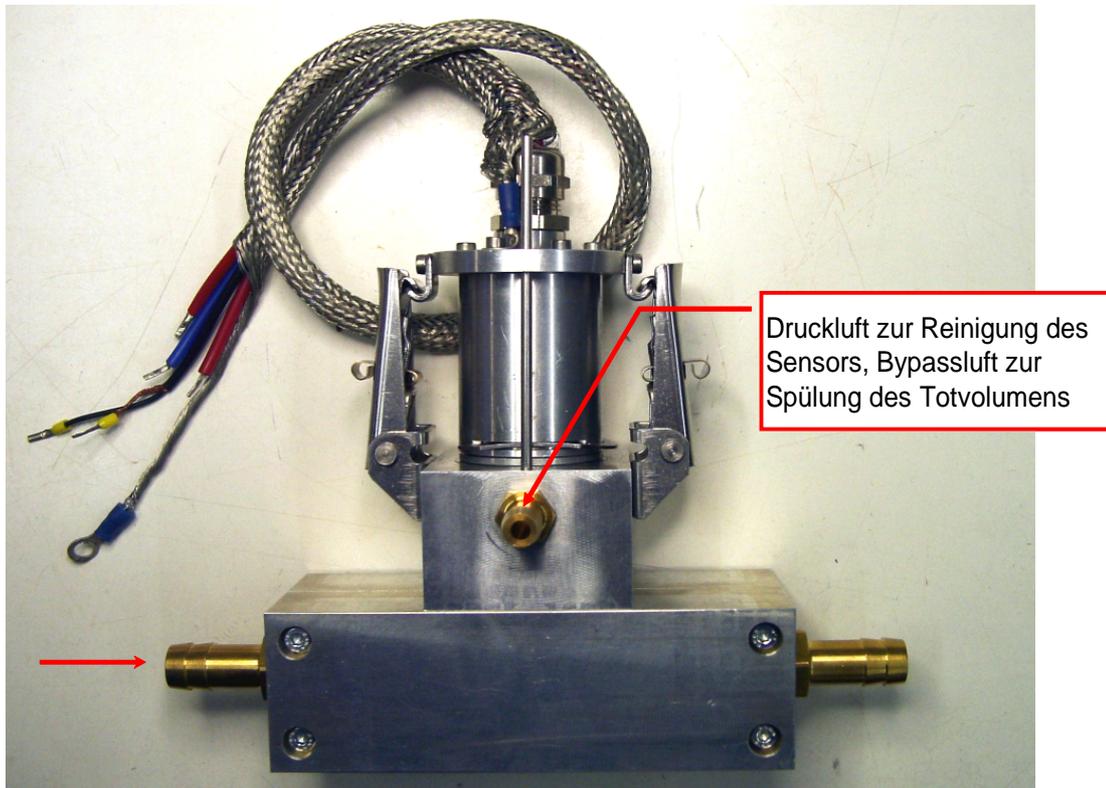


Abb.: 2-18 Sensoreinheit

Der oben abgebildete Sensor besitzt im Bereich der Elektrodenzuführungen einen Ringraum mit mehreren Düsen, durch die ein geringer Bypass- Luftstrom von ca. 1 [l/min] fließt, der den Totraum, in dem sich die geheizten Elektrodenschäfte befinden, spült. Im Rückspülbetrieb wird auf Druckluft von 1 [bar] umgeschaltet.

Diese Sensorkammer ist mit einer separaten Heizung ausgestattet, die auf 130 [°C] eingestellt ist. Da der Entnahmegasstrom in der Kupferspirale und der Sensor auf Temperatur gehalten werden, ist es möglich, das Werkstattmessgerät im „Standby- Modus“ zu betrei-

ben, so dass die Pumpe, als einziges Verschleißteil, nur während der Messung eingeschaltet wird. In dieser Betriebsart beträgt die Leistungsaufnahme des Gerätes nur 250 Watt, während in der Aufwärmphase von 15 [min] 1000 Watt benötigt werden.

Nachfolgend ist der Gaslaufplan des Gerätes dargestellt, der die 3 Betriebsarten, Messbetrieb, Stand-by, Nullpunktbestimmung und Rückspülung beinhaltet.

Während der Rückspülung mit 1 [bar] Druckluft muss sichergestellt sein, dass vor Beginn die Ventile 2 und 6 betätigt werden, um den empfindlichen Differenzdrucksensor der Volumenstrommessung vor Zerstörung zu schützen. In einem weiterführendem Forschungsvorhaben ist geplant, die Massenstrommessung durch ein Hitzdrahtsystem zu ersetzen, da dieses unempfindlich gegen Drücke ist, so dass diese beiden Ventile entfallen können.

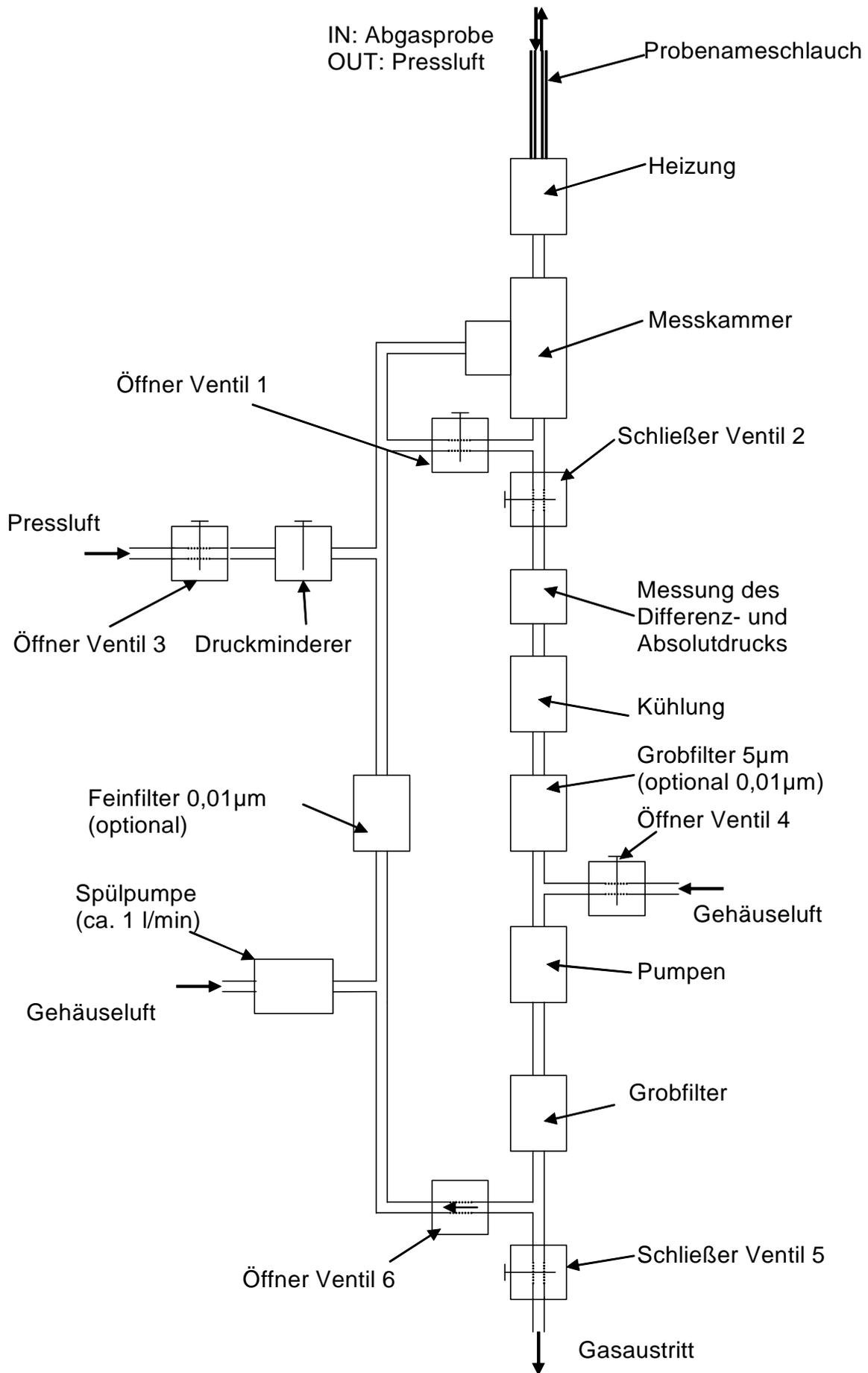


Abb.: 2-19 Gaslaufplan

Die Steuerung der Ventil- Logik bereite einige Probleme, da sicher gestellt sein musste, dass beim Einschalten des externen Steuerrechners und bei allen Umschaltungen niemals Druckluft unkontrolliert in den Bereich des empfindlichen Differenzdrucksensors gelangen kann. Deshalb werden die Magnetventile durch analoge Schaltungen mit zeitlichen Verzögerungen und gegenseitigen Verriegelungen eigensicher betrieben.

Betriebsart	Ventil 1+2	Ventil 3 (Pressluft)	Ventil 4	Ventil 5+6	Pumpe
Messung	-	zwangsweise unbetätigt	-	-	ein
Stand-by	-	zwangsweise unbetätigt	-	-	aus
Nullpunkt	betätigt	zwangsweise unbetätigt	betätigt	betätigt	ein
Rückspülung Ein	zwangsweise betätigt	0,5s Verzögert betätigt	-	zwangsweise unbetätigt	zwangsweise aus
Rückspülung Aus	0,5s zwangsweise betätigt	zwangsweise unbetätigt	-	0,5s zwangsweise unbetätigt	0,5s zwangsweise aus

Abb.: 2-20 Steuerlogik der Ventile

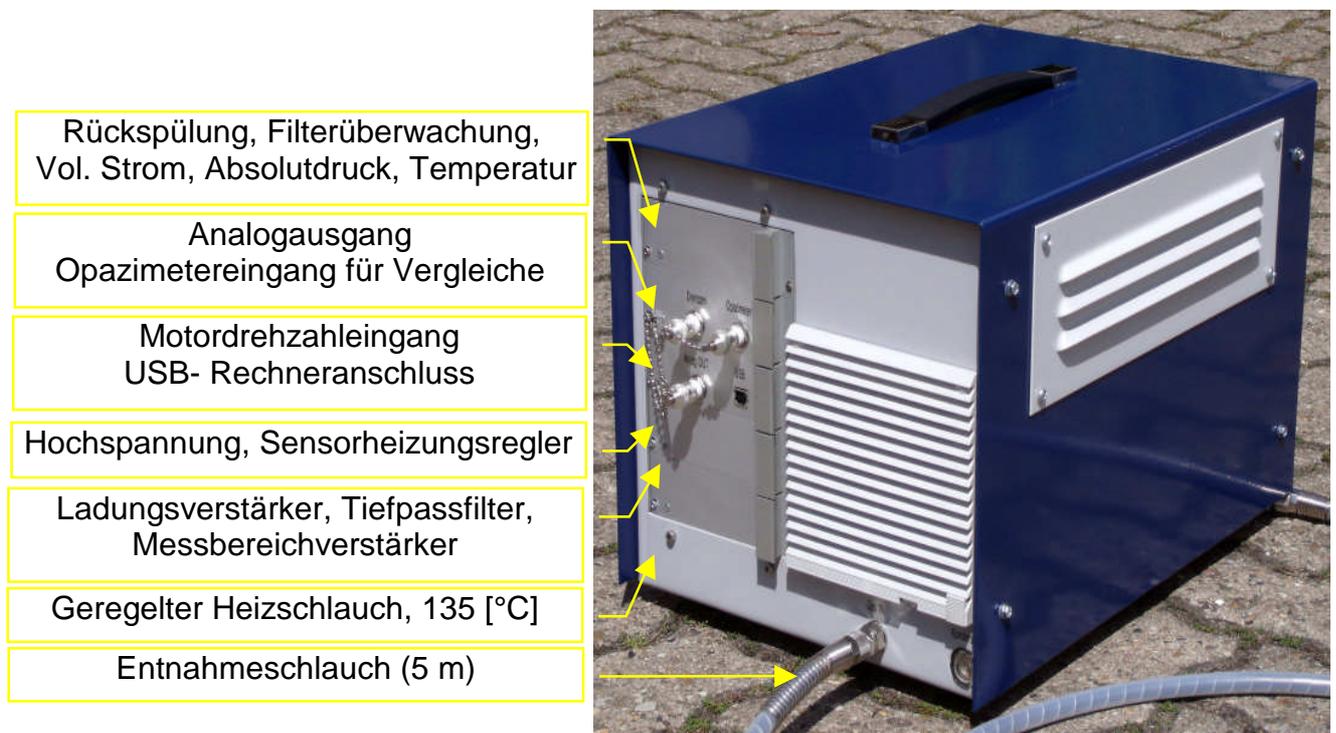


Abb.: 2-21 2. Ausführung des Rußmessgerätes

Für die Bedienung des Gerätes wird ein handelsüblicher Laptop verwendet, der mit der speziellen Software ausgerüstet ist. Ein Screen-shot der Bedieneroberfläche ist nachfolgend gezeigt.

Folgende betriebsspezifische Messwerte werden on-line erfasst und dargestellt:

Volumenstrom, Absolutdruck, Sensortemperatur, Ladungssignal roh, Differenzdruck, Nullpunkte der einzelnen Verstärkerstufen, Hochspannung, Drehzahl, Opazität (Fremdgerät).

Diese Daten dienen zur Berechnung, Korrektur und Normierung der Messergebnisse, die numerisch und als kalibrierte Kurvendarstellung ausgegeben werden. Folgende Angaben stehen zur Verfügung: Ladungsoazität [1/m], wahlweise [mg/m³], Opazität des Fremdgerätes zum Vergleich.

Das analoge Ausgangssignal, wahlweise 5 bzw. 10 [V], mit einer Auflösung von 10 Bit, geglättet mit einem Besselfilter 2. Ordnung, kalibriert entsprechend der Wahl des Anzeigebereichs.

Weiterhin sind Softwareschalter für die einzelnen Betriebsmodi vorhanden, Stand-by, Messbetrieb, Nullpunkt, Rückspülung, Umschaltung von Modus „A“ und „B“ als auch die Umschaltung der Verstärkung, einhergehend mit der Skalierung der Kurvendarstellung.

Die beiden Anzeigen (links) signalisieren die Messbetriebsbereitschaft, wenn diese „grün“ leuchten. Wenn eine der beiden Anzeigen die Farbe wechselt, sind die Betriebstemperaturen noch nicht erreicht, oder die Hochspannung liegt außerhalb des Korrekturbereiches.

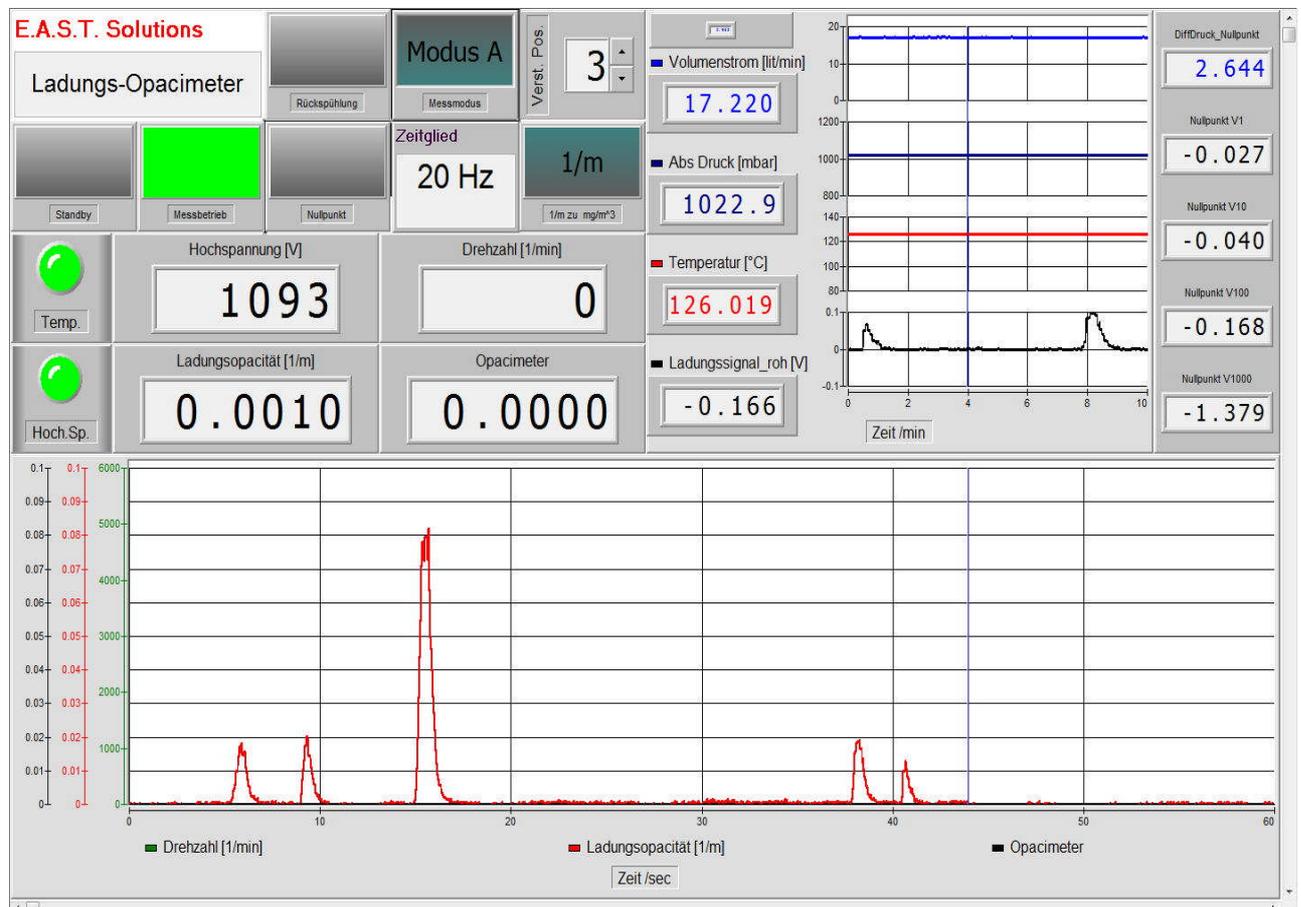


Abb.: 2-22 Bedienungsoberfläche

Die Bildschirmdarstellung kann an die Belange der Anwendung frei angepasst werden. Z. Z. werden alle Werte dargestellt, um bei einem Versuchsbetrieb eventuelle Probleme sofort erkennen zu können.

Technische Daten entsprechend dem jetzigen Stand der Technik

Funktion	Technische Daten
Messbereich analog	(200) / 100 / 10 / 1 / 0,2 [mg/m ³] für 5 V Ausgangsspannung (2) / 1 / 0,1 / 0,01 / 0,002 [1/m]
Detektionsgrenze	10 [µg] bzw. 0,0001 [1/m]
Ausgänge	Bildschirmanzeige, USB, Drucker, analog: 0 bis 5 [V]
Bedienung	Laptop über USB-Schnittstelle, Option: Funkübertragung
Betriebspannung	230 [V], 250 W (während der Aufheizzeit: 1000 W)
Aufheizzeit	15 min.
Umgebungsbedingung	10 bis 40 [°C]
Sicherheitseinrichtungen	Hochspannung, -1500 V dauerkurzschlussfest, Schutzschaltung des Verstärkereingangs gegen Funkenüberschlag, Messung des Isolationswiderstands der Hochspannungselektrode, Temperaturüberwachung, Filterüberwachung, Volumenstromüberwachung, Betriebsanzeige
Zusätzliche Messung	Motordrehzahl, Einspeisung von Referenzgeräten (0 - 10 [V])
Messdynamik des Sensors	1 : 5000
Messgenauigkeit	10 % bezogen auf Messbereich,
Reproduzierbarkeit	95 %
Nullpunktdrift	Automatische Nullpunktkorrekturen bei Nullpunktpülung
Anstiegszeit	0,5 [s] (Gaslaufzeit durch Entnahmeschlauch)
Anstiegszeit	Sensor: 0,01 [s] / mit Tiefpass: 0,02 [s]
Keine Querempfindlichkeit	CO, CO ₂ , H ₂ O, HC, NO _x , NO ₂
Bestimmtheitsgrad	Partikelmasse: 0,97%, Rußzahl FSN: 95%, Opazität: 93%
Gehäuseabmessung	L x B x H: 440 x 300 x 290 [mm]
Verbindung zum Sensor	PTFE-Schlauch, 5 [m]
Gewicht	20 [kg]
Korrelation zum Opazimeter	95 % bezogen auf die Abgasuntersuchung (AU)

Abb.: 2-23 Technische Daten

2.7 Untersuchungen beim TÜV-Nord

Die letzten Arbeitspakete beinhalten Messungen beim TÜV-Nord und die Auswertung der Messungen, die insbesondere den Einfluss der verschiedenen Motorarten und Einspritzverfahren auf das Messergebnis untersuchen und bewerten.

Von diesem Ergebnis wurde eine weitere Förderung des Projektes abhängig gemacht, da zu Beginn nicht sichergestellt werden konnte, dass der Einfluss der Partikelform, von der dieses Rußladungsverfahren abhängig ist, zu keinen Ergebnisabweichungen in Relation zum Opazimeter führen.

Wir bekamen die Gelegenheit beim TÜV-Nord in Goslar unterschiedliche Dieselfahrzeuge zu untersuchen. Da das Rußmessgerät über einen analogen Eingang für Fremdgeräte verfügt, konnten parallel mit dem Vergleichsopazimeter beide Signale auf dem Steuerrechner dargestellt werden.



Abb.: 2-24 Messanordnung beim TÜV-Nord

Bei der Vermessung kommunaler Fahrzeuge ergaben sich Probleme mit der Schlauchlänge des Vergleichsgerätes, die nur 1,5 m betrug. Die 2. Version des Entwicklungsmusters besitzt dagegen einen Ansaugschlauch aus leitendem PTFE-Material von 5 m Länge und kann problemlos solche Anforderungen erfüllen. Bei einem älteren Fahrzeug, wurde aufgrund von nicht klaren Messergebnissen festgestellt, dass beim Beschleunigen des Motors starker blauer Rauch aus dem Endrohr entwich. Dieser Ölnebel führte offensichtlich bei beiden Messgeräten zu unterschiedlichen Ergebnissen. Als Abhilfemaßnahme bezüglich des Rußmessgerätes mußte die Heizung des Entnahmegases und des Sensors auf ca. 160 °C aufgeheizt werden, um den Ölnebel zu verdampfen. Diese Maßnahme wurde vorerst nicht umgesetzt, da solche Fahrzeuge ohnedies keine Zulassung bekämen und der geräteseitige Aufwand erheblich wäre.

Das auf dem Foto gezeigte Fahrzeug besitzt einen nachgerüsteten Partikelfilter und wurde mehrmals täglich untersucht, um die Reproduzierbarkeit der Messungen festzustellen. Die ersten Messungen erfolgten mit der 1. Ausführung des Versuchsgerätes, weil die 2. Ausführung zu dem Zeitpunkt noch nicht fertig gestellt war

Als Beispiel wird nachfolgend die Messung eines Fahrzeuges gezeigt. Es muss angemerkt werden, dass die Gaslaufzeiten aufgrund unterschiedlicher Länge die Entnahmeschläuche der beiden Messgeräte korrigiert wurde, so dass die Opazitätsverläufe übereinander liegen, um die Kurvenform der Messergebnisse leichter vergleichen zu können.

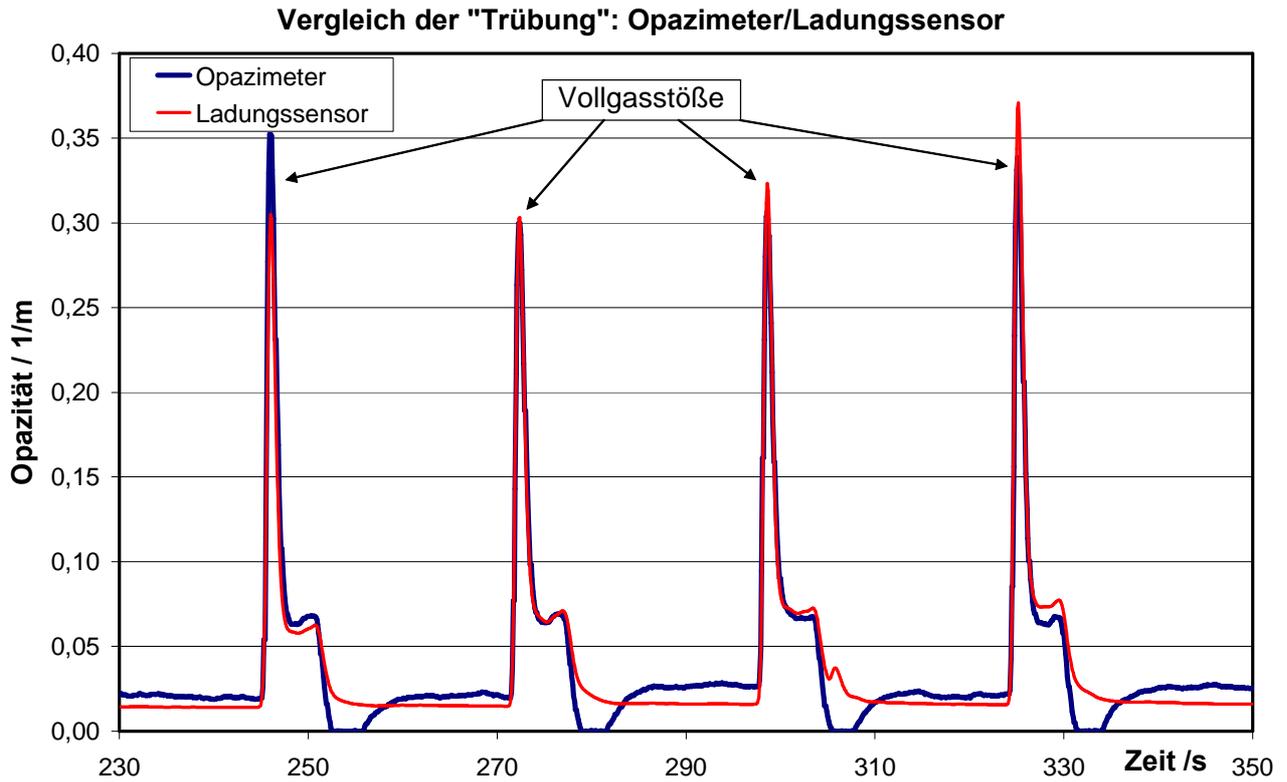


Abb.: 2-25 Vergleich der Trübungsmessung

Es werden mindestens 4 Vollgasstöße durchgeführt, von denen die letzten 3 als Mittelwert für die k-Wert Angabe verwendet werden. Um dieses Messergebnis zu erreichen, werden die beschriebenen Korrekturen im Messrechner durchgeführt, deren Wirkung in nachfolgendem Diagramm erkennbar ist. In dem Diagramm wird ersichtlich, dass die Hochspannung von dem Abgasstoß nicht beeinflusst wird. Der Temperatureinfluss beträgt ca. 2 %, der Absolutdruck schwankt um ca. 4 % während der Volumenstrom einen Einfluss von 30 % ergibt. Um diese Korrekturen on-line durchführen zu können, haben die Sensoren eine Ansprechzeit von 10 ms.

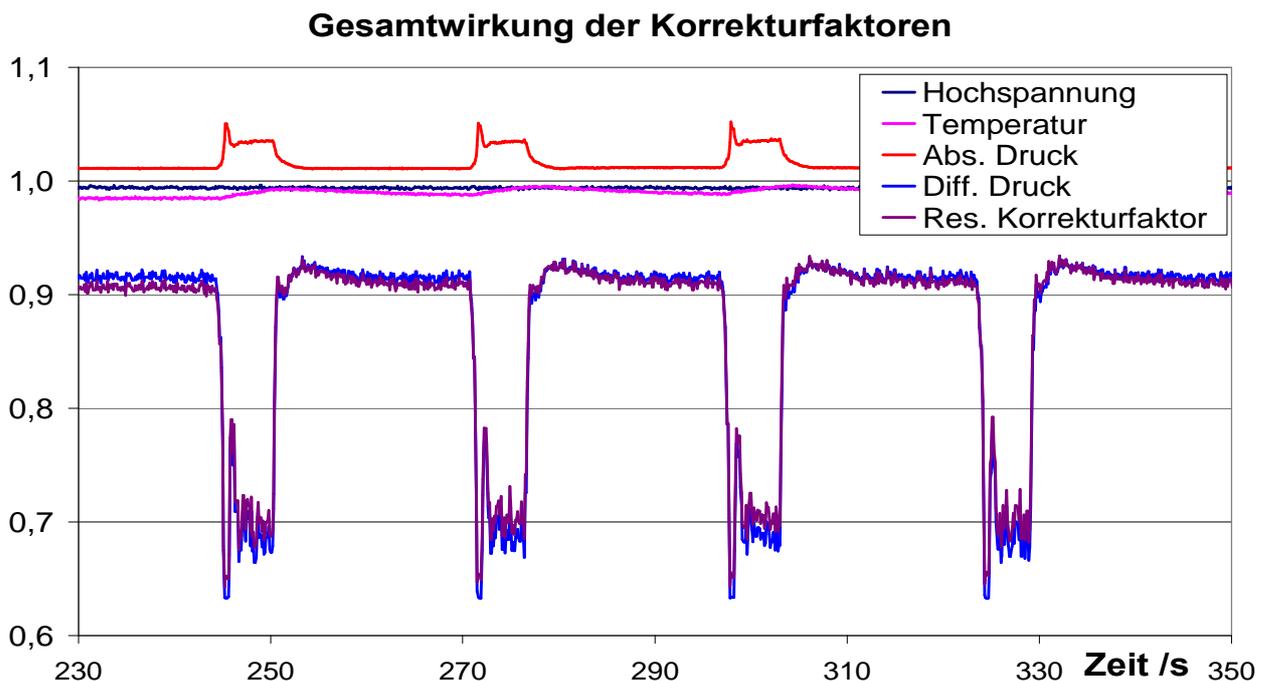


Abb.: 2-26 Zeitsynchrone Korrekturberechnung

2.8 Auswertung der Messungen beim TÜV-Nord

Im Monat Januar 2009 wurden mit der 1. Ausführung des Rußmessgerätes beim TÜV-Nord parallele Messungen durchgeführt. Es wurden fremde Fahrzeuge und eigene gemessen. Die Untersuchung der eigenen Fahrzeuge wurde mehrmals wiederholt, um die Streuung der Messergebnisse festzuhalten aber auch die Reproduzierbarkeit des Fahrzeugverhaltens zu erkennen.

Nr.	Fabrikat	Fahrzeug Typ	Fahrzeugtyp Nr.
1	Volkswagen, Polo	9 N	653
2	Volkswagen, Polo	9 N	653
3	Volkswagen, Polo	9 N	653
4	Peugeot	207	99
5	AUDI	8 E	805
6	SEAT	1 M	476
7	Daimler Chrysler	906 NA 35	BDE
8	Mercedes Benz	906 313 CDI	000
9	Daimler Chrysler	210 K	425
10	SEAT	1 M	476
11	Volkswagen , Polo	9 N	653
12	Volkswagen	2 E K E 2	AJM
13	Daimler Chrysler	901/ 2/ 3/ 4/ 313 CDI	000
14	Volkswagen, Polo	9 N	653
15	Volkswagen, Polo	9 N	653

Abb.: 2-27 Tabelle der untersuchten Fahrzeuge

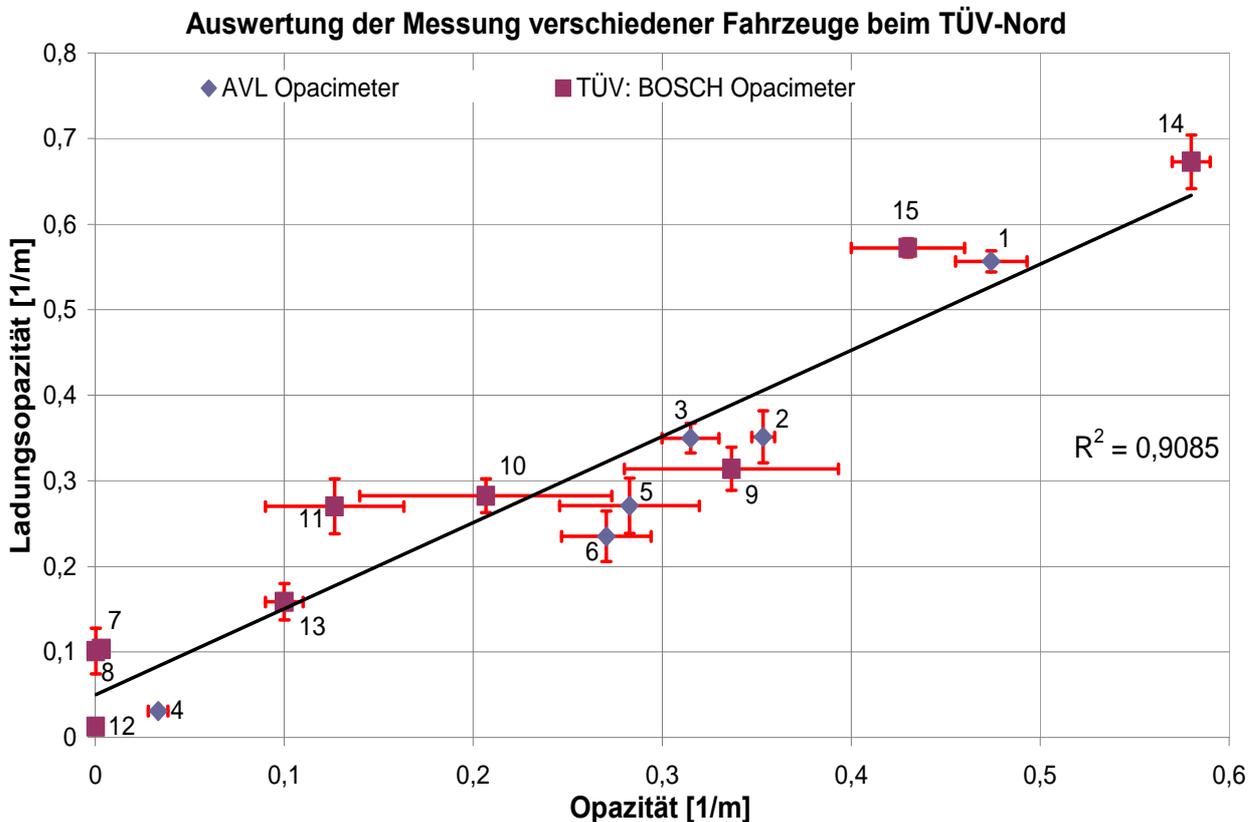


Abb.: 2-28 Fahrzeugauswertung

Die quadratischen Punkte kennzeichnen Fahrzeugmessungen, die mit dem Opazimeter von BOSCH beim TÜV durchgeführt wurden, die runden Punkte sind Messungen mit dem Vergleichsopazimeter AVL, Typ 439. Dargestellt sind diese Werte auf der X-Achse des Diagramms.

Auf der Y-Achse sind die gleichzeitig mitgemessenen Ladungskapazitäten des Rußladungsmessgerätes skaliert.

Die Toleranzbalken in X- und Y-Richtung wurden aus den 3 einzelnen Vollgasstößen desselben Fahrzeuges ermittelt. Das Messergebnis wird nach Vorschrift als Mittelwert der letzten drei Vollgasstöße berechnet.

Bei Betrachtung der Toleranzbalken sind folgende Trends zu erkennen.

- a) Die Toleranzbalken in X-Richtung weisen für das BOSCH- Opazimeter des TÜV (quadratische Punkte) größere Toleranzwerte auf als diejenigen des AVL- Opazimeters (runde Punkte). Es sei angemerkt, dass die Toleranzen der beiden Geräte innerhalb der Spezifikationen liegen.
- b) Die Toleranzbalken in Y-Richtung beziehen sich auf das Rußmessgerät und zeigen in Relation zu den Opazimetern niedrigere Werte.

Die Korrelation des Rußmessgerätes mit den Opazimetern konnte mit $R^2 = 0,9$ bestimmt werden.

Um eine bessere statistische Aussage zu erhalten, müsste eine wesentlich größere Anzahl von Fahrzeugen untersucht werden, ein Erfordernis, das in einem weiterführenden Projekt einen besonderen Schwerpunkt erhalten wird.

Während diesen Messungen wurden die beschriebenen funktionalen Probleme festgestellt, die zu der Entwicklung der 2. Ausführung des Rußmessgerätes führten. Mit dem 2. Gerät sind noch keine Reihenuntersuchungen mit Fahrzeugen durchgeführt worden, so dass die in wesentlichen Punkten verbesserte Qualität des Gerätes noch nicht dokumentiert werden kann. Dieses soll in einem Folgeprojekt nachgeholt werden, um zu erkennen, ob die getroffenen Maßnahmen zur Verbesserung die angestrebten Ergebnisse erreicht haben oder an welchen Details noch Nacharbeiten erforderlich sind.

Die Ergebnisse mit dem 1. Entwicklungsmuster des Rußmessgerätes haben mit der erreichten Korrelation von 90 % bereits nachgewiesen, dass die in der Antragstellung des Vorhabens geäußerten Bedenken, dass unterschiedliche Fahrzeugmotoren stark abweichende Ergebnisse in Relation zum Opazimeter ergeben würden, bei den Untersuchungen nicht erkannt werden konnten.

3. Fazit

Die 1. Phase des Entwicklungsprojektes hat sich mit der Optimierung des Messsystems befasst, das für die Anwendung in Werkstätten geeignet ist und auch für die periodischen Abgasuntersuchung (AU) von Dieselfahrzeugen eingesetzt werden kann. Während dieser Arbeiten haben sich unerwartete Probleme ergeben, die bei der Planung der Arbeitspakete nicht berücksichtigt werden konnten, aber für die zielführende Bearbeitung des Projektes erforderlich waren. Das messtechnische Verhalten des Ladungssensors während der Op-

timierungsarbeiten ergab oft nicht nachvollziehbare Effekte und Beobachtungen, so dass beschlossen wurde, in einer zusätzlichen theoretischen Arbeit die Wirkungsweise der Rußpartikel im Sensor zu simulieren. In Wechselwirkung zwischen Theorie und messtechnischen Beobachtungen musste das Sensormodell immer wieder angepasst werden, bis eine gute Übereinstimmung mit den Untersuchungen vorhanden war. Es wurde z. B. erkannt, dass das Verhalten der Rußpartikel im Messkondensator durch einen Strom in [nA] dargestellt werden muss. Die Konsequenz aus dieser Erkenntnis ergab eine Methode zur Kalibrierung des gesamten Messsystems, indem an der Messelektrode Ströme dieser Größenordnung eingespeist werden. Diese Kalibrierung bezieht sich nur auf die elektronischen Komponenten des Gerätes, ohne den Sensor einzubeziehen. Ein Gespräch mit der PTB, als zuständige Eichbehörde, ergab die Forderung, dass bei einer Eichprozedur der Sensor eingeschlossen sein muss. Wie diese Prozedur umgesetzt werden kann, konnte uns nicht mitgeteilt werden, weil noch keine Erkenntnisse vorliegen.

Hier besteht intensiver Bedarf an Erforschung der Möglichkeiten unter der Vorgabe der PTB, dass elektrische Größen verwendet werden müssen, die auf physikalische Grundeinheiten rückführbar sind. Ohne eine von der PTB anerkannte Eichung kann das Rußmessgerät nicht für amtliche Messungen zugelassen werden, so dass die bisherigen Bemühungen und Entwicklungen mit dem Ziel, ein Rußmessgerät für Werkstätten und die periodische Abgasuntersuchung (AU) zu entwickeln, nicht erreichen können.

Da die elektronische Schaltung, inklusive der Hochspannungsabsicherung gegen Funkenüberschläge im Messkondensator, bezüglich des Zeitverhaltens der Signalverarbeitung nicht mehr überschaubar war, wurde ein weiteres Arbeitspaket eingefügt, das sich mit der Berechnung der Eingangsschaltung befasste, die empirisch aufgebaut und sich in dieser Form bewährt hatte. Die Berechnung ergab das überraschende Ergebnis, dass der Verzögerungskreis der Hochspannungsschutzschaltung, bestehend aus einem R_L - C_1 -Zeitglied, dass das Zeitverhalten des Sensorsignals nur durch den Widerstand R_L beeinflusst wird, so dass der Kondensator C_1 beliebig gewählt werden kann. Als weiteres Ergebnis wurde gefunden, dass die Eingangsschaltung bezüglich des zeitlichen Signalverhaltens aus 2 unabhängigen Zeitgliedern besteht. Wenn diese Zeitglieder gleich groß gewählt werden, entsteht ein Tiefpass 2. Ordnung, so dass das jetzt vorhandene separate Tiefpassfilter entfallen kann. Mit dieser Erkenntnis konnte die EMV-Empfindlichkeit des Sensors nahezu beseitigt werden.

Dieses Erkenntnis bezieht sich konkret nur auf die elektronische Eingangsschaltung des Ladungssensors. Für eine Zulassung zur Eichung ist es erforderlich, dass die gesamte Elektronik eine festgelegte EMV-Prüfung übersteht, Bedingungen, die bei den bisherigen Entwicklungsschritten der elektronischen Einheiten nicht berücksichtigt werden konnten. In einem weiterführendem F&E-Projekt wird dieses Thema ein Arbeitsschwerpunkt sein, da sonst das beschriebene Ziel nicht erreicht werden kann.

In der jetzigen Ausführung des Werkstattmessgerätes wird die Gasgeschwindigkeitsmessung auf der Basis einer Differenzdruckmessung an einer Messblende berechnet, unter Einbeziehung der Temperatur und des Absolutdrucks zur Korrektur. In einem zukünftigen Werkstattmessgerät sollte der Massenstrom [kg/s] mit einem temperaturgeführten Massenstromsensor gemessen werden, um die Korrekturen zu vermeiden und die Pumpe zu entlasten. Die Auslegung des temperaturgeführten Massenstromsensors ist in einem zusätzlichen Arbeitspaket bereits erfolgt, konnte aber aus Zeitgründen noch nicht umgesetzt werden. In einem weiterführenden Forschungsprojekt kann unmittelbar mit der Umsetzung auf der Basis dieser Studie begonnen werden. Die bereits diskutierten Vorteile sind: klei-

nerer Pumpenleistung, Wegfall der beiden Magnetventile zum Schutz des Differenzdrucksensors und damit verbundene Gewichtseinsparung und kleineres Gehäusevolumen.

Um das Funktionsmodell des Werkstattmessgerätes in einen serientauglichen Prototyp für die AU weiter zu entwickeln, sind noch umfangreiche Arbeiten erforderlich, die insbesondere die Eichfähigkeit unter den genannten Vorbedingungen beinhalten.

Hierzu wurden bereits Diskussionen mit der PTB, Braunschweig, geführt, die ein auf den Ladungssensor angepasstes Eichnormal anerkennen werden, wenn dieses auf physikalische Grundeinheiten zurückführbare Komponenten enthält. Das Eichgerät muss in ausreichender Anzahl den Eichbeamten zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der Abhängigkeit des Sensorsignals von der Gasgeschwindigkeit, ist eine separate Eichung des Volumenstroms erforderlich. An die Eichfähigkeit werden noch weitere Bedingungen gestellt.

1. Der Prozessrechner muss mit einer geeichten Software ausgestattet sein.
2. Der Prozessrechner muss in das Rußmessgerät integriert werden.
3. Das Gerät muss eine eigenständige Bildschirmanzeige des Messergebnis besitzen.
4. Für die Eichung ist ein spezieller Eichmodus vorzusehen, der nur von dem Eichbeamten bedient werden kann.
5. Der über USB angeschlossene Laptop darf nur Steuerungsfunktionen ausführen, aber auch die interne Signalanzeige für Dokumentationen verwenden.
6. Die Steuerungssoftware für die Durchführung der AU muss erstellt werden.
7. Die gesamte elektronische Signalverarbeitung muss in einem eigenen Gehäuse innerhalb des Messgerätes untergebracht und plombierbar sein.
8. Der Sensor muss plombierbar sein und einen Zugang für die Einspeisung des Eichnormals besitzen.
9. Das komplette Gerät muss die genormte EMV- Prüfung überstehen und dabei keine Fehlanzeige generieren.

Außer diesen Anforderungen ist die Sensoreinheit konstruktiv neu zu gestalten, um eine sicher beherrschbare Serienproduktion zu ermöglichen.

Die einzelnen Komponenten der Gasführung werden konstruktiv serientauglich gestaltet.

Das Gehäuse, insbesondere der Gehäuseboden, in dem sich die Aufheizung des Gases befindet, muss überarbeitet werden.

Das Fertigungskonzept des Prototyps soll die Herstellung einzelner Baugruppen beinhalten, die in der Endmontage zusammengeführt werden.

Während dieser Arbeiten ist, in enger Abstimmung mit der PTB, ein Eichnormal zu entwickeln und als Serienprodukt zu konzipieren, da in Deutschland ca. 5000 Eichstellen existieren.

Die Fa. Saxon- Junkalor entwickelt, produziert und vertreibt seit Jahren geeichte Messgeräte für die AU und verfügt über große Erfahrung bei der Umsetzung solcher Anforderungen. Deshalb soll dieses Unternehmen in einem weiterführenden Forschungsprojekt als Partner eingebunden werden bzw. Antragsteller werden.

Literaturverzeichnis

[1] VkB. Amtlicher Teil, Heft 8-2008 vom 7.04.2008, S 34/7355.2/2

„AU- Richtlinie für die Untersuchung der Abgase von Kraftfahrzeugen nach Nummer 4.8.2 der Anlage VIIIa StVZO und für die Durchführung von Abgasuntersuchungen an Kraftfahrzeugen nach § 47a StVZO“

Anhang A

Dieses Arbeitspaket war nicht eingeplant, wurde jedoch in dieses Vorhaben eingebracht, weil der Massenstromsensor in einem weiterführenden Forschungsvorhaben die jetzt im Werkstattmessgerät eingebaute Differenzdruckmessung zur Bestimmung des Massenstroms ersetzen soll. Die Vorteile wurden bereits in dem Hauptteil des Berichtes diskutiert. Um im Vorwege einer Antragstellung die Machbarkeit abzusichern, wurden mit Hilfe eines Funktionsmusters erste Messungen durchgeführt und ausgewertet. Dabei konnten die zu lösenden Probleme erkannt werden. Es werden nachfolgend Wege aufgezeigt, die eine Umsetzung des Verfahrens absichern.

Temperaturgeführter Massenstromsensor

Hitzdrahtanemometer sind heute Standard bei der Messung von Luftmassenströmen, aufgrund ihrer Genauigkeit und Robustheit. Das Funktionsprinzip beruht auf einem geheizten Draht, im folgenden Hitzdraht genannt, dessen Temperatur T_H , über eine Regelung konstant gehalten wird. Die hierzu benötigte Leistung P_H proportional zu dem durch den Massenstrom \dot{m} abgeführten Wärmestrom \dot{Q} :

$$\dot{m} \cdot \Delta T \cdot \lambda = P_H = \dot{Q}; \text{ mit } \Delta T = T_H - T_T \quad (1.1)$$

Wie bereits in Gleichung 1.1 zu sehen, ist für diesen Zusammenhang die Temperaturdifferenz ΔT zwischen der Temperatur T_T des Mediums und der des Hitzdrahtes T_H entscheidend. Erhöht sich die Temperatur T_T des zu messenden Mediums, wird die für die Messung benötigte Temperaturdifferenz ΔT kleiner und somit auch die Leistungsaufnahme P_H des Hitzdrahtes. Über eine Temperaturmessung wird dieser Effekt zwar korrigiert, jedoch sinkt mit steigender Temperatur die Empfindlichkeit.

Wenn der Hitzdraht auf eine sehr hohe Temperatur aufgeheizt wird, um in einen weiten Temperaturbereich messen zu können, wird bei niedriger Temperatur des Mediums das Messsignal durch Konvektion überlagert und unbrauchbar.

Das Prinzip des temperaturgeführten Massenstromsensors besteht darin, die für die Messung wichtige Temperaturdifferenz ΔT konstant zu halten, und somit die Empfindlichkeit des Messgerätes in einem breiten Temperaturbereich zu erhalten. Zu diesem Zweck wird die Temperatur T_H des Hitzdrahtes mit Hilfe der gemessenen Temperatur T_T und der gewünschten Temperaturdifferenz ΔT vorgegeben, d.h. der Temperatur des Mediums nachgeführt. Das Prinzip ist in nachfolgender Abbildung verdeutlicht. Deshalb ist der Temperaturbereich, in dem gemessen werden kann, begrenzt.

Die Umsetzung in die Praxis ist jedoch nicht unproblematisch. Um das Zeitverhalten des Sensors auch bei sich schnell ändernden Temperaturen zu erhalten, muss die Temperaturmessung ähnlich schnell erfolgen wie die Messung des Massenstroms. Hierzu müsste die Wärmekapazität im Verhältnis zur Oberfläche des Temperatursensors sehr viel kleiner sein als die des Hitzdrahtes, da dieser durch Wärmeaustausch mit dem zu messenden Medium die gleiche Temperatur erreichen muss. Da ein Wärmeaustausch mit der Umgebung grundsätzlich von der Temperaturdifferenz abhängt, verläuft die Annäherung an die Umgebungstemperatur exponentiell. Je höher jedoch der Massenstrom, desto kleiner ist das Zeitglied dieser exponentiellen Annäherung.

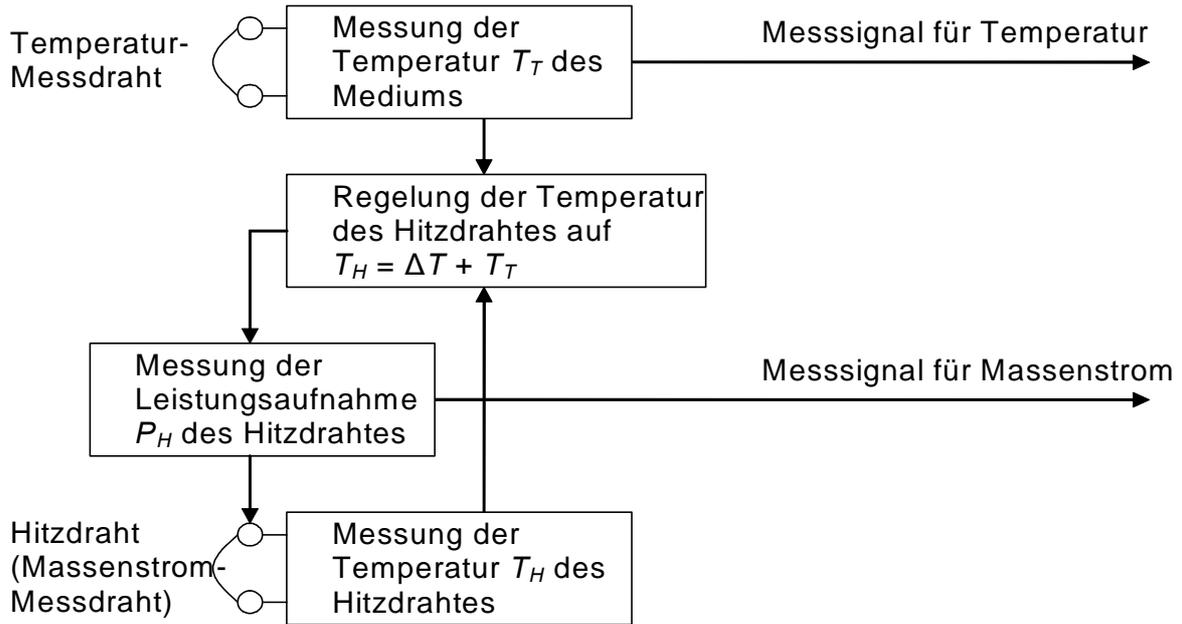


Abb.: A-1 Prinzip des temperaturgeführten Massenstromsensors

Bei der Massenstrommessung mittels Hitzdraht besteht dieses Problem nicht, da bereits kleine Temperaturänderungen durch den Regler sofort ausgeglichen werden und dieser immer auf der vorgegebenen Temperatur gehalten wird. Um das Zeitverhalten des Massenstromsensors bei sich ändernden Temperaturen und niedrigen Massenströmen nicht zu sehr zu reduzieren, wird der Temperatursensor derart ausgeführt, dass er zu mindestens die selbe Wärmekapazität besitzt wie der Hitzdraht. Der Temperatursensor und der Hitzdraht des Massenstromsensors werden aus dem gleichen Material gefertigt, bestehend aus dünnem Platindraht. Platin weist eine hohe Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit sowie ein lineares Widerstandsverhalten auf.

Ein erstes Funktionsmuster ist nachfolgend abgebildet.

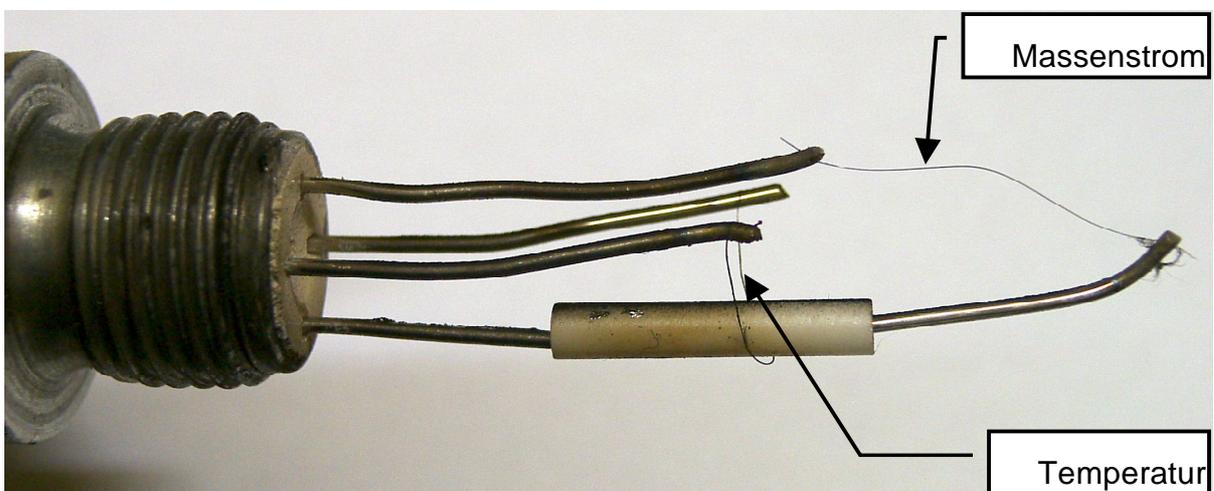
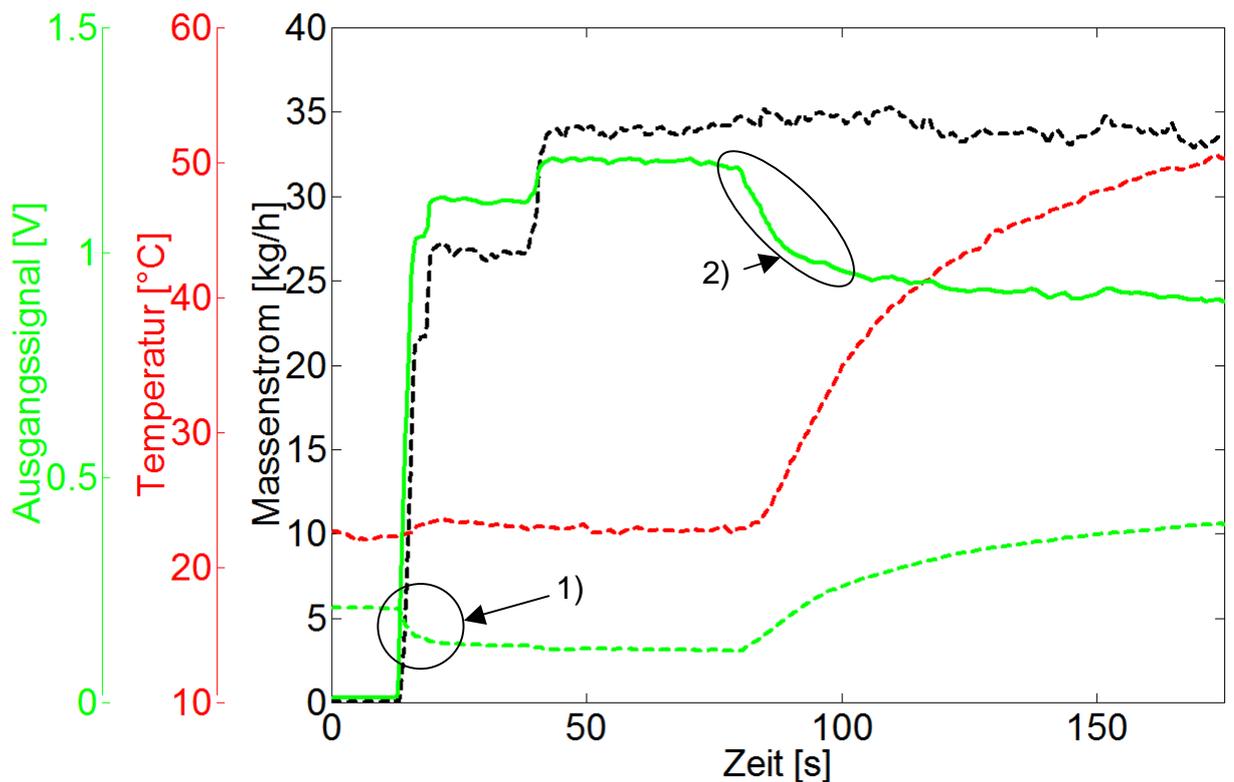


Abb.: A-2 Funktionsmuster des temperaturgeführten Massenstromsensors

Die Forderung nach kleiner Wärmekapazität begründet einen sehr kurzen Messdraht, der demzufolge einen niedrigen Widerstand aufweist, in dieser Ausführung $R_T=1 \Omega$. Um ein verwertbares Messsignal zu erhalten, ist ein erhöhter Stromfluss erforderlich, der zu einer unerwünschten Eigenerwärmung führt. Diese Erwärmung fällt umso geringer aus, je höher der Massenstrom ist.

Da die Temperaturmessung direkt auf die Messung des Massenstromes zurückwirkt, wird auch dieses Messergebnis verfälscht. Die Problematik ist in folgender Abbildung deutlich zu erkennen.



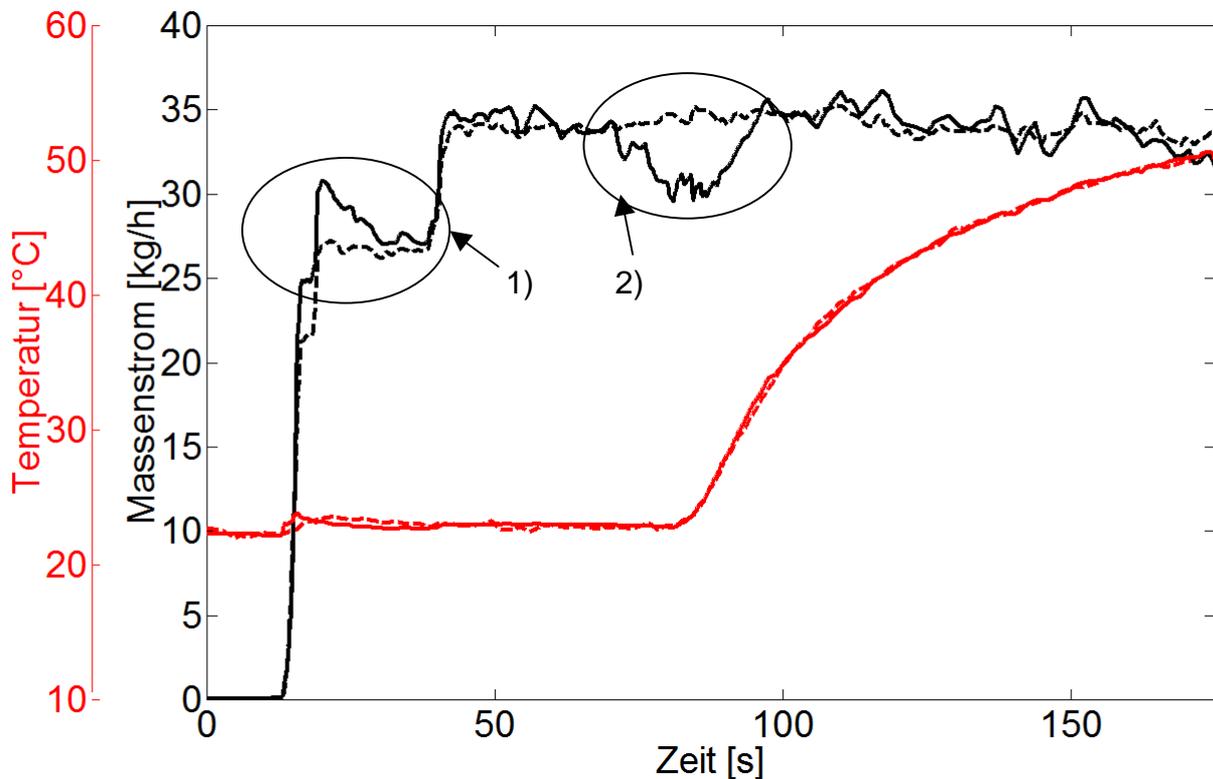
—	Nicht korrigierte Signale	- - -	Referenzmessungen
—	Massenstrom	- - -	Massenstrom
- - -	Temperatur	- - -	Temperatur
1)	Abkühlen des Temperatursensors durch den Massenstrom		
2)	Verringerung des Signals durch zu geringe Nachführung der Hitzdrahttemperatur bei steigender Temperatur		

Abb.: A-3 Rohsignale des temperaturgeführten Massenstromsensors

In dem mit 1) gekennzeichneten Bereich in der Abbildung ist ein Absinken des Temperatursignals nach Aufschalten eines Massenstroms zu erkennen. Der Draht des Temperatursensors hatte sich aufgrund des fehlenden Massenstroms aufgeheizt. Nach Aufschalten eines Massenstromes kühlt sich der Messdraht ab, sichtbar als abfallende Temperatur im Rohsignal.

Mit 2) ist ein Kurvenabschnitt des Massenstromsignals kenntlich gemacht, bei dem eine Verringerung des Rohsignals aufgrund eines Temperaturanstiegs zu sehen ist. Dies ist die Folge einer zu klein dimensionierten Temperaturnachführung der Hitzdrahttemperatur, wodurch die Temperaturdifferenz mit steigender Temperatur kleiner wird. Dadurch verringert sich die Leistungsaufnahme des Hitzdrahtes und folglich auch das korrelierende Massenstrom-Messsignal.

In dem Diagramm ist auch erkennbar, dass bei plötzlicher Temperaturänderung, oder beim ersten Aufschalten eines Massenstroms, die Korrektur des Massenstromsignals noch nicht zufriedenstellend ist.



Korrigierte Signale		Referenzmessungen	
—	Massenstrom	- - -	Massenstrom
—	Temperatur	- - -	Temperatur
1)	Die Temperaturmessung ist durch ein Fehlen eines Massenstroms aufgrund von Eigenerwärmung fehlerhaft. Nach aufschalten eines Massenstroms singt daher das Temperaturmesssignal und führt daher zu einer fehlerhaften Korrektur des Massenstromsignals.		
2)	Die Korrektur ist hier fehlerhaft aufgrund des relativ langsamen Temperaturfühlers.		

Abb.: A-4 Korrigierte Signale des temperaturgeführten Massenstromsensors

Die Korrektur des Temperatursignals war jedoch sehr erfolgreich, so dass hier gute Ansätze vorhanden sind, beide Messergebnisse deutlich zu verbessern.