

Russ- und Partikelsensor für Onboard-Überwachung von Partikelfiltern und Kontrolle der Emissionen von Dieselmotoren

Vorstellung des aktuellen Entwicklungsstands

Prof. Dr.-Ing. **V. Gheorghiu**

Hochschule für Angewandte Wissenschaften (**HAW**), Hamburg

Kurzfassung

Zur Überwachung (OBD) von Partikelfiltern zum Erreichen von EURO 5 und 6 sollen Sensoren eingesetzt werden, welche die aus dem Partikelfilter austretende Russkonzentration erfassen können. Ein solcher Sensor nach dem Durchschlagsspannungsprinzip wird hier vorgestellt und sein bisheriger Einsatz am Motorprüfstand analysiert und bewertet.

Abstract

Soot sensors can help for better monitoring (OBD) of the Diesel particulate filters to fulfill the EURO 5 and 6. Such a sensor which works after the spark discharge principle is here presented and measurement results on dyno are analyzed and evaluated.

1. Einführung

Durch intensive Weiterentwicklung des Dieselmotors konnten in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte hinsichtlich der Leistungssteigerung und Absenkung der Schadstoffemissionen erzielt werden. Da aber ein moderner Dieselmotor (Euro 4) im Vergleich zum klassischen Ottomotor immer noch um ein Vielfaches mehr an krebserregenden Emissionen – insbesondere Russpartikel – ausstößt, wird an der Reduzierung dieser Emissionen intensiv gearbeitet.

Die zukünftigen Grenzwerte werden durch eine gezielte Kombination der innermotorischen Maßnahmen mit einer effizienten Abgasnachbehandlung erreicht. Die Erfassung der drastisch abgesenkten Emissionswerte und insbesondere der Partikelkonzentrationen ab EURO 5 und 6 stellt eine echte technische Herausforderung dar. Die etablierte Messtechnik, wie Opazimeter und Smokemeter sind für diese Aufgaben nicht mehr uneingeschränkt geeignet. Wenn zum Beispiel ein effizientes Partikelfiltersystem im Einsatz ist, sind die Schwärzungs-

zahlen praktisch immer null und die Opazität wird sehr stark von anderen Emissionen beeinflusst (z.B. von NO_2), so dass diese niedrigen Partikelkonzentrationen damit praktisch nicht erfassbar sind.

Um die Funktionsfähigkeit eines Partikelfiltersystems kontinuierlich zu überwachen, ist es notwendig eine Vorrichtung hinter dem Partikelfilter zu schalten, die in der Lage ist die Funktionsstörung am Filter und die damit verbundene Erhöhung der Partikelemission zu erkennen und anzuzeigen (On-Board-Diagnosesystem OBD, On-Board-Messsystem OBM). Dieser Umstand einerseits und das Fehlen geeigneter Lösungen zur Überwachung der umweltschädlichen Partikelemission andererseits haben zu einer entsprechenden Projektidee geführt.

In einer vom **FAD** (Förderkreis Abgasnachbehandlungstechnologien für Dieselmotoren e.V.) als Vorarbeit erarbeiteten Literaturstudie [1] wurden die Anforderungen an ein onboardfähiges Partikelüberwachungssystem und die Aufgabe aussichtsreicher Partikelmessverfahren herausgearbeitet. Das Verbundprojekt „*Untersuchung zur Bewertung von Vorrichtungen für die Überwachung der Partikelemission von Dieselmotoren (PM-Sensor)*“ wurde vom FAD initiiert und von der **DBU** (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) gefördert mit dem Gesamtziel, eine fahrzeugtaugliche Vorrichtung und ein Verfahren zur Überwachung der Partikelemissionen auf der Basis eines Partikelmassensensors (PM-Sensor) zu entwickeln.

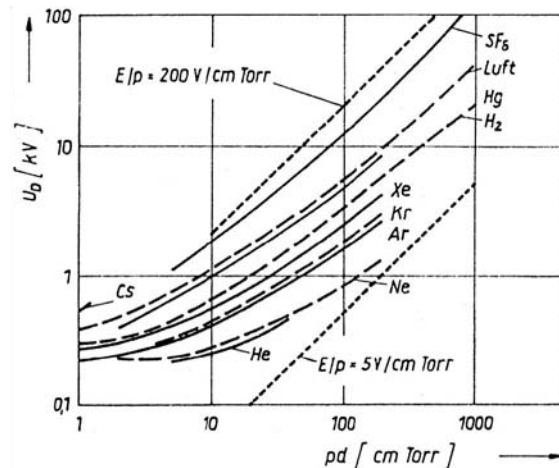
In diesem Projekt wurden zwei ausgewählte Sensorprinzipien in zwei technischen Ausführungen untersucht. Dafür wurden von den jeweiligen Sensorentwicklern Funktionsmuster bereitgestellt, die unter einheitlichen und vergleichbaren Bedingungen auf dem Motorenprüfstand mit Vergleichsmesstechnik getestet wurden. Die erarbeiteten Ergebnisse sollen vorrangig dazu dienen die zukünftig eingesetzten Partikelfiltersysteme zu überwachen, um so die umweltschädliche Wirkung bei Ausfall des Abgasnachbehandlungssystems einzudämmen.

In dem jetzigen Beitrag wird nur einer der zwei Sensoren – und zwar der so genannte **Durchschlagsspannungssensor** (Spark Discharge Sensor **SDS**) – und sein aktueller Entwicklungsstand vorgestellt.

2. Arbeitsprinzip des Durchschlagsspannungssensors (SDS)

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

Bild 1: Paschen-Kurven für den statischen Durchschlag in Gasen, wobei d den Elektrodenabstand, p den Gasdruck, E die elektrische Feldstärke und U_D die zwischen den Elektroden angelegte Hochspannung bedeuten.



Experimentell wurde nachgewiesen, dass die Kohlenstoff- bzw. Russpartikel, die sich zwischen den Elektroden befinden und/oder auf der Kathode ablagern, das Freisetzen von Elektronen durch das anliegende elektrische Feld erleichtern. Hierdurch sinkt die für einen elektrischen Durchschlag notwendige Spannung um bis zu 70%. Außerdem wurde noch ein Einfluss auf die Stabilität der Spannung gefunden, bei der ein elektrischer Durchschlag erfolgt. Beispielweise lag bei einer Atmosphäre ohne Russpartikel (reine Luft) die Streuung für die Durchschlagsspannung bei $\pm 22\%$. Unter dem Einfluss vom Russ verringerte sich dieser Bereich auf $\pm 4\%$, und dies auch im Falle von sehr geringen Russkonzentrationen.

Das Prinzip des Messverfahrens [2] vom SDS beruht auf der Ermittlung des minimalen Niveaus der elektrischen Durchschlagsspannung im Abgas, bei dem es zum Funkenüberschlag zwischen zwei Elektroden kommt. Für die Funkenerzeugung im Abgasstrom ist ein bestimmtes Energieniveau erforderlich, welches über die Auswertung einer Funkenerkennung ermittelt wird. Zu diesem Zweck lädt das Sensorsteuergerät eine Zündspule mit einer bestimmten Energie auf. Danach wird die Zündspule über eine Funkenstrecke im Abgasstrom entladen. Ob die zur Verfügung stehende Energie zur Erzeugung einer Funkenentladung ausreicht hat, wird mithilfe der Funkenerkennung festgestellt. Diese Information wird an das Steuergerät weitergegeben und dort verarbeitet. War die Energie groß genug, dann kann die Energie zum Aufladen der Spule im nächsten Messzyklus verringert werden, andernfalls wird sie erhöht. Diese Prozedur wird ständig mit einer Frequenz von bis zu 200Hz wiederholt. Auf diese Weise pendelt der Messwert, trotz statistischer Schwankungen bei der Funkenbildung, um das tatsächlich erforderliche Energieniveau.

Um zur Abhängigkeit zwischen minimaler Durchschlagsspannung und Russkonzentration zu gelangen, muss man die Einflüsse der anderen Parameter (d.h. die Quereinflüsse) abziehen.

Dazu sind neben dem Minimalniveau der Durchschlagsspannung auch alle Parameter während der Messung erfassen, welche beachtliche Quereinflüsse aufweisen. Glücklicherweise werden alle diese Parameter sowieso für die Motorsteuerung benötigt, so dass für deren Erfassung keine zusätzlichen Sensoren im Abgasstrang einzubinden sind.

3. Konstruktion des Durchschlagspannungssensors

Der SDS sieht im Prinzip wie eine Kombination aus einer Zünd- und einer Glühkerze aus [3]. Die Beheizung des in das Abgasrohr eingetauchten Keramikisolators wird benötigt, um Russablagerungen und somit unkontrollierte Entladungen zwischen Mittelelektrode und Abgasrohr (Masse) zu verhindern.

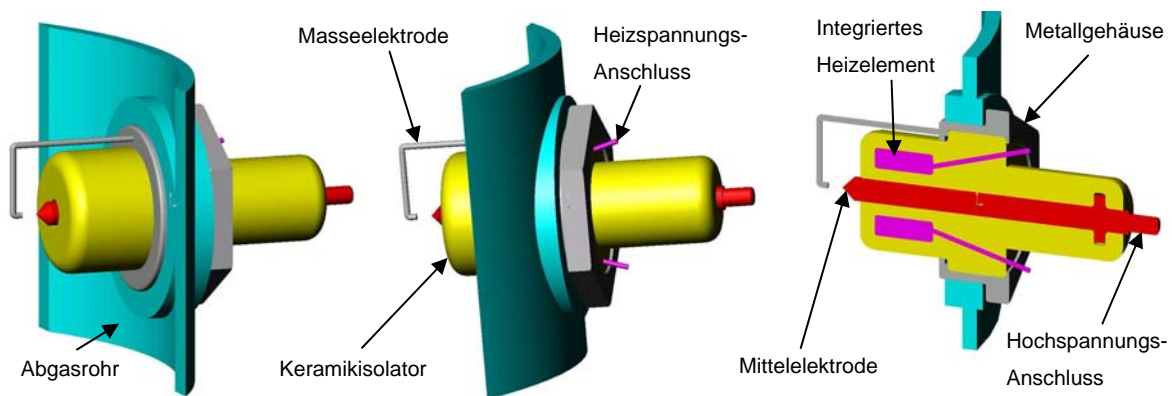


Bild 2: Prinzipkonstruktion des SDS mit integriertem Heizelement.

Die Anforderungen an die Keramik des Isolators liegen sehr hoch, da diese Keramik bei relativ hohen Temperaturen (um ca. 500-600°C) insbesondere a) ausreichende Durchschlagfestigkeit, um den Hochspannungskreis (3 bis 8 kV) vom Heizungskreis (Batteriespannung) trennen zu können, und b) gute chemische Beständigkeit in den heißen Motorabgasen aufweisen sollte.

Für die Herstellung von SDS-Prototypen wurde das Integrieren des Heizelementes in den Keramikisolator als zu aufwändig eingestuft. Demzufolge wurden mehrere Konstruktionsvarianten für den Keramikisolator und das Heizelement ausgewählt und getestet, wobei der Isolator aus mindestens zwei verklebten Keramikteilen hergestellt wurde.

In die Konstruktionsvariante **1 / 05** (s. Bild 3) hatten die fremd gefertigten Heizelemente eine zu geringer Heizleistungsdichte, so dass die notwendige Betriebstemperatur des Keramikiso-

lators nicht erreicht werden konnte. Dadurch wurde das Abbrennen der auf dem Keramikisolator abgelagerten Russrückstände nicht gesichert.

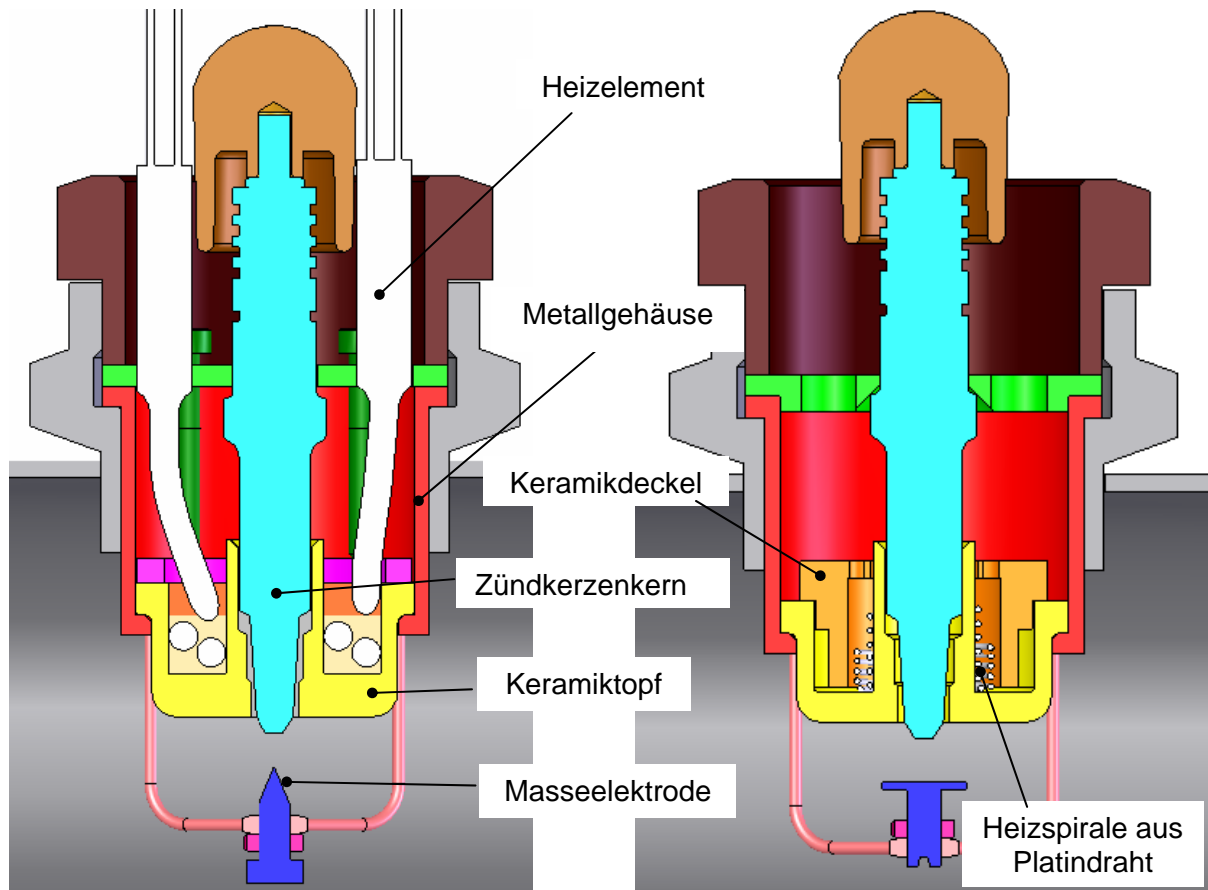


Bild 3: Schnitt des SDS in den Varianten **1 / 05** (links) und **2 / 05**.

Aus diesem Grund wurden Heizungen basierend auf Platindraht hergestellt, wobei die eindeutige Abhängigkeit des elektrischen Drahtwiderstandes von der Temperatur zu ihrer Bestimmung verwendet wurde. Diese Konstruktion wird weiterhin als Variante **2 / 05** (s. Bild 3) benannt und unterscheidet sich von der vorigen Variante durch den Einsatz einer flachen Masselektrode zur Erhöhung der Sensorempfindlichkeit.

Zwei solche Prototypen wurden sehr intensiv getestet und einige Messergebnisse sowie deren Auswertung und Analyse werden unten vorgestellt.

In der Variante **3 / 05** wurde auf den Zündkerzenkern verzichtet (s. Bild 4) und der Keramiktopf wurde den Abmessungen der Platindrahtheizspirale entsprechend angepasst. Dabei

wurde insbesondere darauf geachtet, die Wärmeverluste an dem Abgasrohr zu mindern, was eine Reduzierung der notwendigen Heizleistung bedeutet.

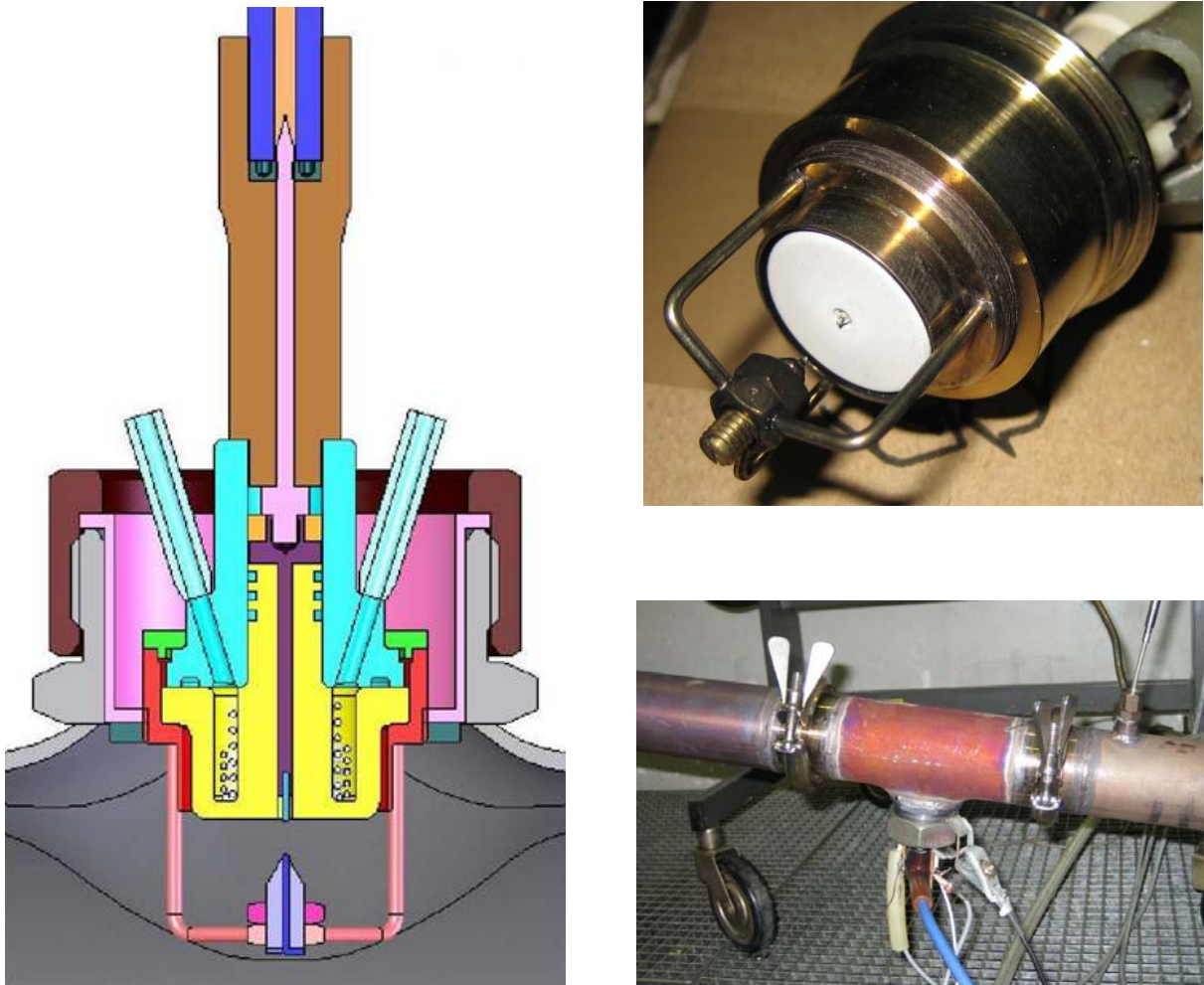


Bild 4: Schnitt (links), Ansicht (rechts oben) und Einsatz im Abgasstrang des SDS in der Variante **3 / 05**. Der Keramikisolator wurde aus zwei Teilen (Topf und Deckel) zusammengesetzt. Das Heizelement wurde wie in Variante 2 / 05 aus Platindraht hergestellt.

4. Anbindung des SDS am Abgasstrang des Motors

Für einen flexiblen Einsatz des Sensors wurde ein Rohrabschnitt gefertigt, der mit Schellen in das Abgassystem an der gewünschten Stelle befestigt wurde (s. Bild 4 rechts unten). Der Sensor wurde im Vollstrom eingesetzt (s. Bild 5).

Um den Sensor vor zu hoher thermischer Belastung durch Abstrahlung vom Abgasrohr zu schützen, wurde er von unten eingesetzt.

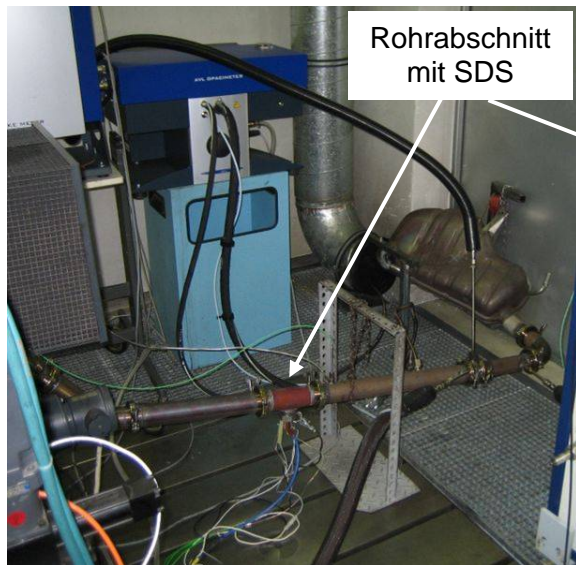


Bild 5: Rohrabschnitt mit SDS montiert im Abgasstrang.

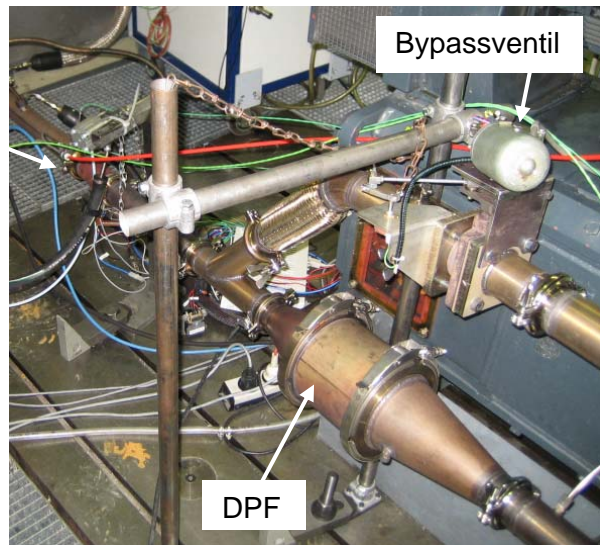


Bild 6: DPF eingesetzt im Bypass.

Um die Russkonzentration in einem (fast) gleich bleibenden Betriebspunkt des Motors zu verändern, wurde der Diesel-Partikel-Filter (**DPF**) im Bypass eingesetzt (s. Bild 6). Das Bypassventil kontrolliert damit die Anteile des gefilterten und des ungefilterten Abgasmassenstroms, so dass die Russkonzentration in einem bestimmten Motorbetriebspunkt variiert werden konnte. Bei solchen Messungen ändern sich bei der Betätigung des Bypassventils gleichzeitig auch der Gegendruck hinter der Turbine und die Temperatur der Abgase vor dem Sensor (s. Bild 9 oben links).

Die Zusammenführung der einzelnen Bypassstränge erfolgte asymmetrisch im gleichen Durchmesser und in einem Abstand von ca. 8 x Rohrdurchmesser vor dem Sensor (s. Bild 6). Im Allgemeinen werden Einlaufstrecken im technischen Bereich zwischen 5 bis 10 x Rohrdurchmesser angegeben. Ob sich die Russpartikel im Abgasrohr vor dem Sensor homogen in allen Betriebspunkten verteilt haben, sollte in einer gesonderten Versuchsreihe bei unterschiedlichen Abgasgeschwindigkeiten und Bypassventilöffnungen genauer untersucht werden. Die Entnahmesonden der Vergleichsmessgeräte (Smokemeter, Opazimeter, Gravimetrie und Partikelmessung) wurden entsprechend den Herstellerangaben in der Rohrachse des Abgasrohres platziert. Bei der bisherigen Einbausituation wurde der Sensor in der Variante 2 / 05 mit einem Versatz von ca. 15 mm zur Rohrachse eingebaut. Falls diese Einbaulage einen Einfluss auf das Messergebnis hat, muss der Russensensor ebenfalls in die Rohrachse verschoben werden. Um geringe Differenzen in der Russkonzentration innerhalb des Rohrquerschnittes auszugleichen, wurden unter anderem Lastsprünge mit sehr unterschiedlichen Russkonzentrationen untersucht und gegenübergestellt (s. Bild 8).

5. Vorstellung der Messergebnisse für den SDS in der Variante 2 / 05

Die unten vorgestellten Messungen wurden auf dem Prüfstand der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden, Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik (FIF) durchgeführt.

In folgenden werden drei Messreihen vorgestellt. Für jede Messreihe werden je vier Bilder in einer Tabelle angeordnet und zwar:

- a) Motorbetriebsparameter / links oben in der Tabelle
- b) Russemission (oben) und kompensiertes Sensorsignal (unten) / rechts oben in Tabelle
- c) gemessenes und Referenz-Signal des Sensors (oben) und Überlagerung der Russemission und des kompensierten Sensorsignals (unten) / links unten in der Tabelle
- d) Russemission (oben) und Plausibilitätsüberprüfung des gemessenen Signals (unten) / rechts unten in der Tabelle.

Von dem gemessenen Sensorsignal (measured signal) wurde das Referenzsignal (reference signal) des Sensors subtrahiert und das kompensierte Signal (compensated sensor signal) gebildet, das anschließend mit der Opazität, der Schwärzungszahl (FSN) und ev. den gravimetrischen Messungen verglichen wurde. Das Referenzsignal wird über die Kennlinien der Quereinflussparameter berechnet.

Mithilfe von vielen vorläufigen Tests wurde herausgefunden, dass der SDS in der Variante 2 / 05 nur bei Abgastemperaturen unter 350°C korrekt arbeitet, was auch durch die Bilder 10 bis 13 belegt wird. Aus diesem Grund wurden die oben erwähnten Sensorsignale im Bereich von Abgastemperaturen unter 350°C als verlässlich (confident) eingestuft und ihre Verläufe mit großer Linienstärke dargestellt.

Bei hohen Russkonzentrationen neigt der SDS für eine gewisse Zeit zur Verrußung, wobei das Messsignal dadurch verfälscht wird. Um diesen Zustand zu erkennen wurde ein zweites Sensorsignal (plausibility check) einbezogen, das im Falle der Verrußung vorbestimmte Grenzen (unsooted limits, gestrichelt in den Bildern dargestellt) überschreitet.

In der ersten Messreihe (Bild 7) wurde stationär ein Teil des Motorkennfeldes ohne DPF gefahren. Damit konnten auch sehr hohe Russkonzentrationen erzielt und das Verhalten des Sensors unter solchen Bedingungen untersucht werden. In der zweiten Messreihe (Bild 8) wurden Last- und Drehzahl-Sprungversuche ebenfalls ohne DPF gefahren, um die Antwortzeit des Sensors zu untersuchen. In der dritten Messreihe (Bild 9) wurde das Bypassventil in drei stationären Motorbetriebspunkten jeweils in drei Öffnungsstellungen gebracht. In dieser Messreihe wurde auch die Gravimetrie als Referenz eingesetzt.

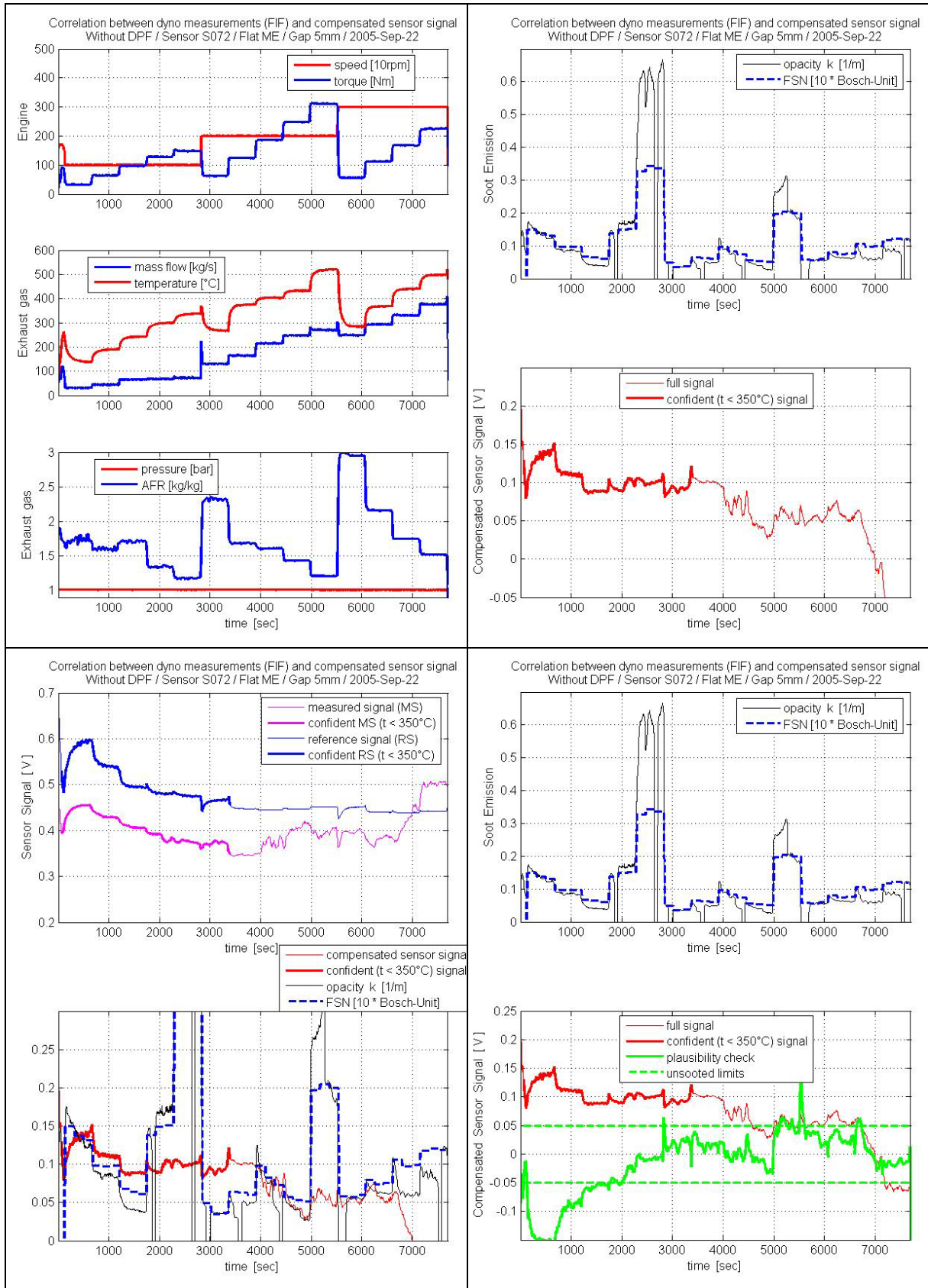


Bild 7: SDS in Variante 2 / 05. Motorkennfeld, stationär, ohne DPF

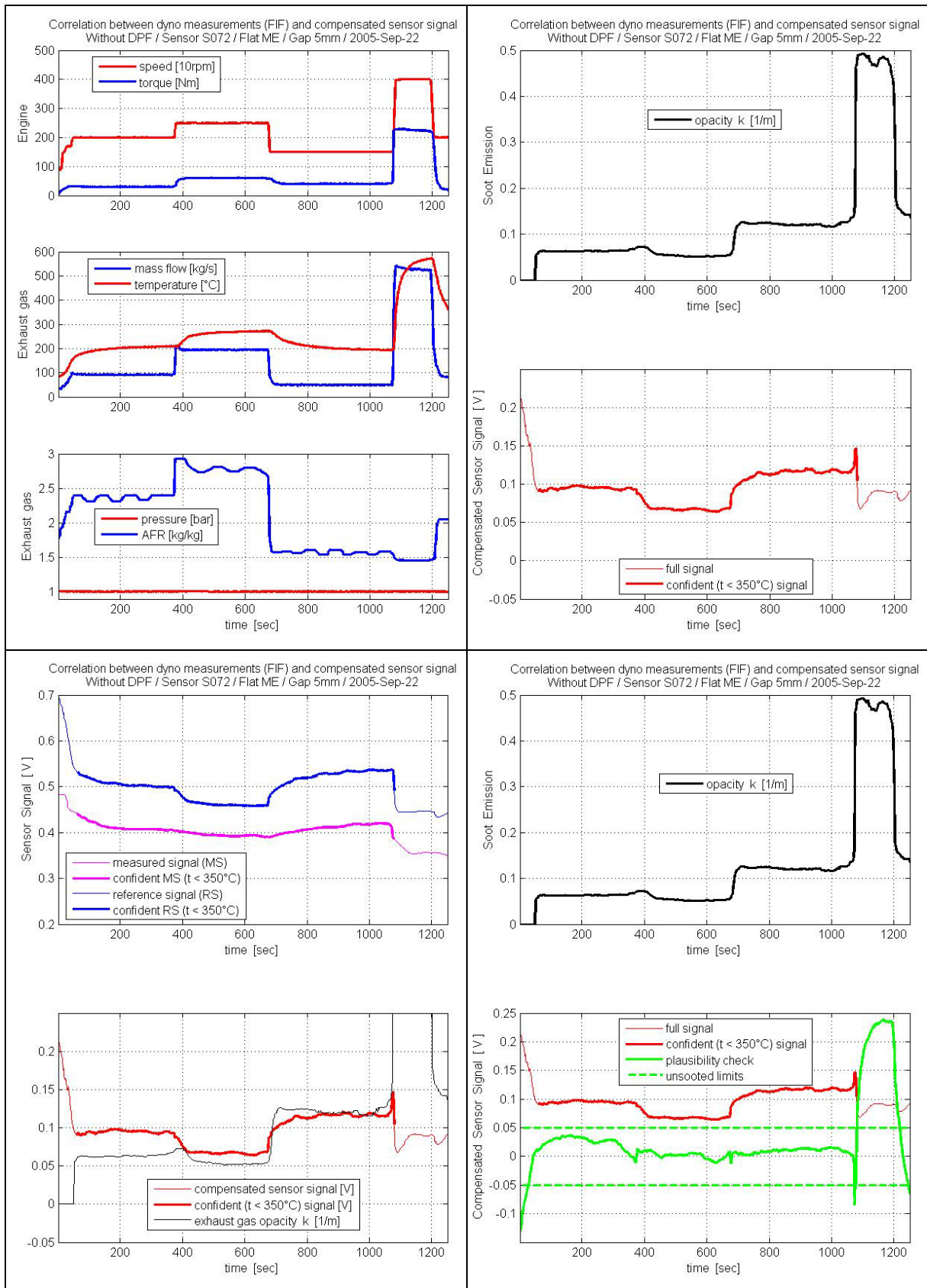


Bild 8: SDS in Variante 2 / 05. Last- und Drehzahlsprünge ohne DPF

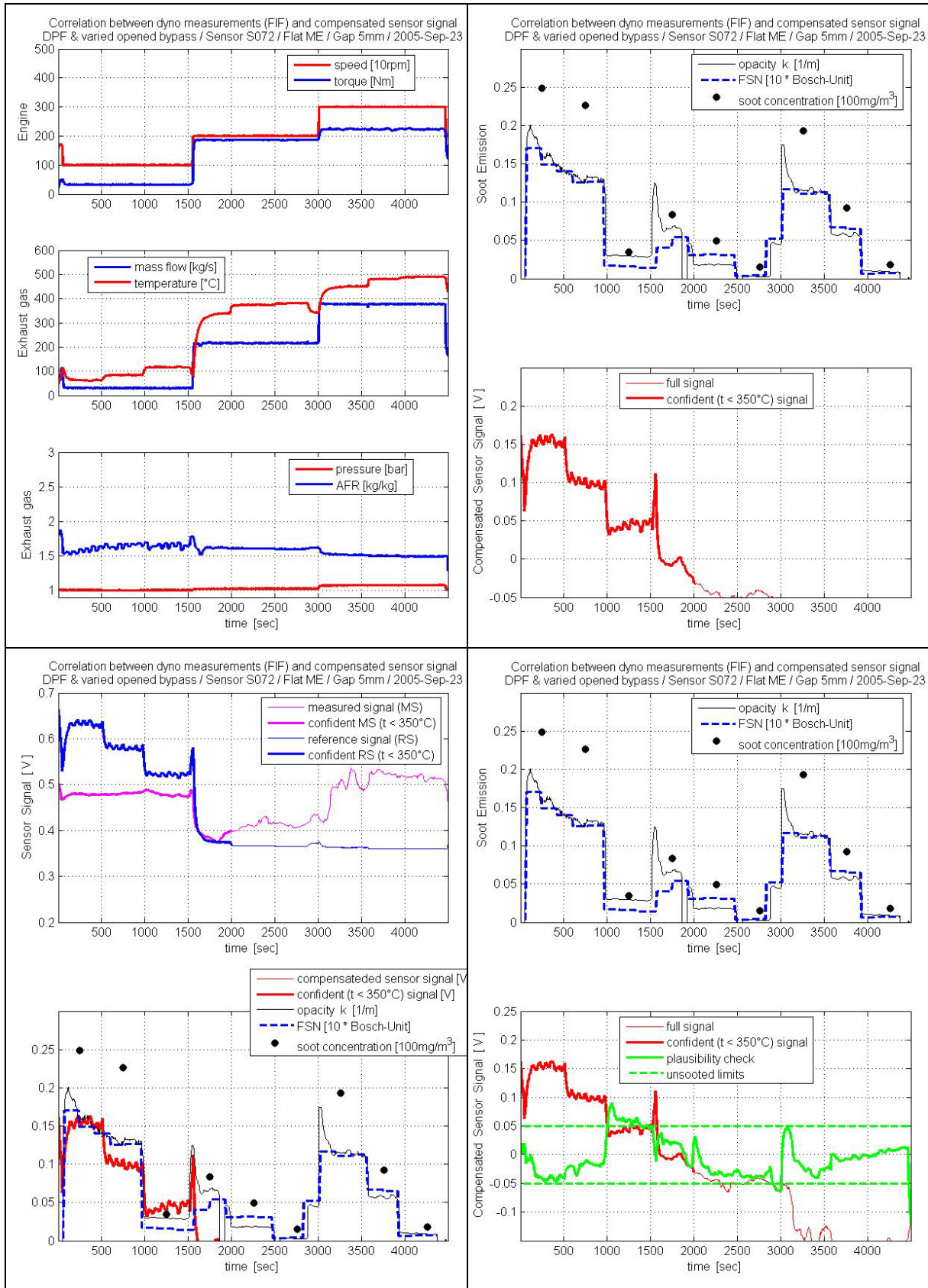


Bild 9: SDS in Variante 2 / 05. Betriebspunkte mit DPF, variable Öffnung des Bypassventils

6. Schlussfolgerungen und zukünftige Schritte

Aus der Analyse der Messergebnisse können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- a) Der SDS in der Variante 2 / 05 gibt bei Temperaturen unter 350°C mit relativ guter Genauigkeit die Russkonzentration wieder. Somit zeigt der Sensor Potenzial für den Einsatz zur Überwachung von DPF, wenn durch konstruktive Maßnahmen die Bedingung betreffend die Abgastemperatur eingehalten werden kann.
- b) Bei seiner Verrußung benötigt der Sensor einige Minuten bis das Abbrennen des abgelagerten Russfilms abgeschlossen ist. In dieser Zeit ist sein Hauptmesssignal unbrauchbar.
- c) In der Aufwärmphase des Motors ist das Sensorsignal nicht genau genug. Das liegt wahrscheinlich daran, dass in dieser Phase sich zu viele Parameter der Abgase gleichzeitig ändern, für welche derzeit überhaupt keine Kennlinien aufgestellt wurden.

Für die Zukunft sind folgende Schritte geplant:

1. Der SDS in der Variante 3 / 05 wird ausführlich getestet auch in der Hoffnung, dass die Temperaturbegrenzung gelockert werden kann.
2. Neue Materialien für die Isolationskeramik und die Elektroden werden eingesetzt und der Sensor erneut ausführlich getestet.
3. Die Quereinflussparameter werden weiterhin für alle Sensorvarianten genauer bestimmt.
4. Die Nullpunktstabilität der Sensoren wird untersucht und ev. verbessert.
5. Die Fortsetzung dieses Projektes und die Zusammenarbeit mit dem FIF werden angestrebt.
6. Partner aus der Industrie werden gesucht mit dem Ziel, diese Entwicklungen zu beschleunigen und die Fertigung von noch kompakteren (eventuell mit integrierter Beheizung) Prototypen voranzutreiben.

Literatur

- [1] Zikoridse, G.; Bach, E.; Kummer, C.; Kopte, J.: Bewertungsmöglichkeiten von Abgasnachbehandlungssystemen für Dieselmotoren, 5. Dresdner Motorenkolloquium, „Zukünftige Brennverfahren für Dieselmotoren“, Dresden, Juni 2003
- [2] Patent DE 198 53 841 C 2
- [3] Gheorghiu, V.: Development and Experimental Proof of Soot- and Particle Sensor, FuE-Präsentation, http://www.haw-hamburg.de/pers/Gheorghiu/Patente/RS/Praesentation_en_2.pdf, 2005