

HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co KG  
58706 Menden

# **Entwicklung eines nachrüstbaren Dieselmotors mit autarker Regeneration**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter AZ 22121 – 21/0 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von

Dipl. – Ing. Klaus Schrewe

April 2007

Weitere Exemplare dieses Berichtes können angefordert werden bei:

HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co KG  
- Marketing -  
Dieselweg 12  
D-58706 Menden

HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co KG  
58706 Menden

# **Entwicklung eines nachrüstbaren Dieselmotors mit autarker Regeneration**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter AZ 22121 – 21/0 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von

Dipl. – Ing. Klaus Schrewe

April 2007

**Projektkennblatt**

der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>22161</b>	Referat	<b>21/0</b>	Fördersumme	<b>375.000 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Entwicklung eines nachrüstbaren Dieselfurfilters mit autarker Regeneration</b>				
<b>Stichworte</b>	Produkt; Filter; Fahrzeug; Verkehr				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>24 Monate</b>	<b>01.04.04</b>	<b>30.09.06</b>	<b>keine</b>		
Zwischenberichte	6-monatiger Kurzbericht				
<b>Bewilligungsempfänger</b>	HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co. KG			Tel	02373 / 987 - 368
	Dieselweg 12			Fax	02373 / 987 -259
	D – 58706 Menden			Projektleitung	Klaus Schrewe
				Bearbeiter	Klaus Schrewe
<b>Kooperationspartner</b>	EMC-Test-NRW, 44227 Dortmund, Emil-Figge-Str. 76 FEV Motorentchnik GmbH, 52078 Aachen, Neuenhofstr. 181 FH Südwestfalen, 58644 Iserlohn, Frauenstuhlweg 31 TÜV-Nord, 45307 Essen, Adlerstr. 7 UBF, 73630 Remshalden, Lehenstr. 42				

**Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Die Partikelemission ist in den vergangenen Jahren durch die Verbesserung der Verbrennung im Motor bereits deutlich reduziert worden. Weitere Verbesserungen durch motorseitige Änderungen werden in der UBA-Untersuchung bzgl. der Partikelemission mit Werten zwischen 30 und 50 % prognostiziert. Damit stößt man bei motorseitigen Veränderungen auf Grenzen, die eine Einhaltung der ab 2005 für die Typprüfung gültigen EURO 4-Grenzwerte nur knapp erlaubt. Der Übergang zu einer Abgasnachbehandlung – d.h. Partikelfilter – erlaubt drastische Minderungen von weit über 90 % und damit ein deutliches Unterschreiten der Partikelgrenzwerte EURO 4 für PKW und EURO V für Nutzfahrzeugmotoren. Um die oben beschriebene Umweltproblematik zu lösen, soll ein robustes, nachrüstbares Russfiltersystem entwickelt und erprobt werden, das es erlaubt, die Partikelemission um >95% zu reduzieren

**Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Im Rahmen dieses Projektes soll ein nachrüstbares Partikelfiltersystem entsprechend der nachfolgenden Arbeitsschritte entwickelt werden.

1. Die Regeneration mittels elektrischer Strahlungsheizkörper soll bezüglich Anordnung, Anzahl und Geometrie der Heizkörper, Adaption der Heizelemente an verschiedene Filtergeometrien am Motorprüfstand untersucht und in Dauerhaltbarkeitsuntersuchungen überprüft werden. Die die zu entwickelnden Anschlusstechniken für schwierige Umgebungsbedingungen und die erforderliche Sensorik werden im realen Fahrbetrieb erprobt. Zur theoretischen Absicherung werden Simulationsrechnungen durchgeführt.
2. Verschiedene Arten der Additiv-Dosierung sind zu untersuchen.
3. Es wird im Rahmen dieses Projektes eine Regenerationssteuerung vollständig neu entwickelt.
4. Ein Filterdiagnose ist in diese Regenerationssteuerung zu integrieren.
5. Die gesamte entwickelte Logik ist in ein Kombi-Steuergerät zu implementieren.
6. Als Maßnahmen zur Verbreitung fand eine Vorstellung der Versuchsträger während der Projektlaufzeit statt und die Vorstellung von Teilergebnissen bei Fachvorträgen ist vorgesehen.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

An einem Konzeptfahrzeug wurde ein Dieselpartikelfiltersystem vorgestellt, das aus einem Filter aus Sintermetall, einer Dosiereinrichtung für ein Kraftstoffadditiv zur Senkung der Russzündtemperatur sowie einer elektrischen Heizung zur Filterregeneration über Strahlungswärme besteht.

Im Rahmen dieses von der DBU geförderten Projektes wurde das System so weit entwickelt, dass eine Verwendung in Fahrzeugen bis etwa 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht möglich ist.

Dazu wurde über Simulationsrechnungen das Beladungsverhalten des Filters mit Asche und Ruß ermittelt, um rechnerisch das Langzeitfunktionsverhalten sicherstellen zu können. Zur thermomechanischen Absicherung der Dauerhaltbarkeit wurden Untersuchungen auf einem Hot-Shake-Prüfstand über 1000 Regenerationszyklen, entsprechend einer Fahrstrecke von etwa 500.000 km, mit positivem Ergebnis durchgeführt. An dem kleinsten Modul der für den oben genannten Anwendungsbereich erforderlichen Baureihe von 1,8 m<sup>2</sup> bis 5,4 m<sup>2</sup> Filterfläche wurden die grundlegenden Einflüsse von Anordnung der Strahlungsheizelemente untereinander und zum Filter ermittelt, um für die Ausweitung des Anwendungsbereiches der thermoelektrischen Regeneration auf die größeren Filter eine gutes theoretisches Grundverständnis sicherzustellen. Anhand dieser Grundlagen wurde die Strahlungsheizung an die größeren Filtermodule appliziert und mit gutem Erfolg am Motorprüfstand untersucht.

Auf der Basis der genannten Prüfstandsuntersuchungen wurde ein Kombisteuergerät ausgelegt, welches allen Anforderungen für die Verwendung im Fahrzeugbereich entsprechen kann. Die Entwicklung der entsprechenden Software zur Additivdosierung, Regenerationssteuerung und Filterdiagnose wurde durch umfangreiche Fahrversuche mit PKW, Lieferfahrzeugen sowie einem leichten LKW realisiert. Nach einer Absicherung des Betriebsverhaltens unter normalen Betriebsbedingungen, wurde das System so weit verbessert, dass auch unter für die Regeneration von Partikelfiltern ungünstigen Bedingungen, z. B. im innerstädtischen Lieferverkehr, die Funktion sichergestellt werden kann.

Die in diesem Projekt aufgezeigte Entwicklung eines nachrüstbaren Dieselmotors mit autarker Regeneration hat die gute technische Machbarkeit derartiger Systeme für Fahrzeuge bis ca. 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht aufgezeigt. Eine Anwendung des Systems in größeren Stückzahlen bedarf jedoch noch einer weiteren funktionalen Absicherung wie auch konstruktiver Änderungen für ein fertigungsoptimiertes Design.

Generell ist eine Weiterentwicklung der Technologie auch für jeden anderen Dieselmotor möglich.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Als Maßnahmen zur Verbreitung fand eine Vorstellung der Versuchsträger während der Projektlaufzeit statt und die Präsentation von Teilergebnissen bei Fachvorträgen, zum Beispiel im Rahmen von Veranstaltungen des HdT, Essen, CTi, Frankfurt, oder des FAD, Dresden, ist vorgesehen.

## ***Fazit***

Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Dieselmotorsystem mit autarker Regeneration hat bei den durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass es technisch möglich ist, Fahrzeuge vom PKW bis hin zu leichten LKW mit einem Dieselpartikelfilter nachzurüsten. Eine Umsetzung des Systems für die Anwendung in größeren Stückzahlen ist aufgrund der sehr guten Ergebnisse aus diesem Projekt bei entsprechenden, günstigen umweltpolitischen und finanziellen Randbedingungen gut möglich. Eine Weiterentwicklung der Technologie für andere Anwendungsbereiche, wie zum Beispiel Off-High-Way-Anwendungen oder Arbeitsmaschinen mit Dieselmotor, ist basierend auf den vorliegenden Ergebnissen jederzeit denkbar.



# 1. Inhalt

1. Inhaltsverzeichnis	1
2. Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen	2
3. Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen	3
4. Zusammenfassung	4
5. Einleitung	6
6. Entwicklung eines nachrüstbaren Dieselfussfilters	8
6.1. Simulationsrechnungen	9
6.2. Neue Filterkonstruktionen	15
6.2.1. Konstruktion 2,75 m <sup>2</sup> - Filter	15
6.2.2. Konstruktion 3,8 m <sup>2</sup> - Filter	16
6.2.3. Konstruktion 5,4 m <sup>2</sup> - Filter	17
6.3. Versuche am Motorprüfstand der FH Iserlohn	19
6.3.1. Prüfstanduntersuchungen 1,8 m <sup>2</sup> - Filter	21
6.3.1.1. Motorprüfstand	21
6.3.1.2. Hot-Shake-Prüfstand	23
6.3.2. Motorprüfstanduntersuchungen 2,75 m <sup>2</sup> - Filter	25
6.3.3. Motorprüfstanduntersuchungen 3,8 m <sup>2</sup> - Filter	26
6.3.4. Prüfstanduntersuchungen 5,4 m <sup>2</sup> - Filter	28
6.4. Einfluss der Kraftstoffadditivierung	31
6.4.1. Untersuchung verschiedener Dosierstrategien im Fahrversuch	31
6.4.2. Untersuchung des Regenerationsverhaltens verschiedener Kraftstoffadditive	32
6.5. Entwicklung eines Kombisteuergerätes	36
6.5.1. Kraftstoffadditivierung	38
6.5.2. Beladungserkennung	38
6.5.3. Regenerationsstrategie	39
6.5.4. Notlauf und Filterdiagnose	40
6.6. Absicherung der Ergebnisse im Fahrversuch	42
6.6.1. PKW – Fahrversuche mit 1,8 m <sup>2</sup> - Filter	42
6.6.2. Fahrversuche mit leichten Nutzfahrzeugen	43
6.6.3. LKW – Fahrversuche mit 5,4 m <sup>2</sup> - Filter	46
7. Fazit	48
8. Literaturverzeichnis	49

## 2. Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1: HJS Jetfilter®, 1,8 m <sup>2</sup>	8
Abbildung 2: Geometrie von Kanalfiltern	9
Abbildung 3: Geometrie des Jetfilters	9
Abbildung 4: Einfluss der Ascheeinlagerung auf die Restfilterfläche	10
Abbildung 5: CFD – Netz mit Hexaeder - und Tetraeder - Zellen mit Prismen	11
Abbildung 6: Simulierte Strömungsverteilung im 1,8m <sup>2</sup> SMF mit axialen Konen	12
Abbildung 7: Druckverlust der CFD-Modelle mit unterschiedlicher Russbelastung	13
Abbildung 8: Simulierte Russmassenverteilung im SMF	13
Abbildung 9: SMF®-AR-Filter mit 2,75 m <sup>2</sup> Filterfläche	16
Abbildung 10: SMF®-AR-Filter mit 3,8 m <sup>2</sup> Filterfläche (Jetfilter ø 190 mm)	17
Abbildung 11: SMF®-AR-Filter mit 5,4 m <sup>2</sup> Filterfläche (Satelliten-Filter)	18
Abbildung 12: PKW – Motor am Prüfstand der FH Südwestfalen	19
Abbildung 13: IVECO – Motor am Prüfstand der FH Südwestfalen	20
Abbildung 14: Ablauf einer Regeneration	21
Abbildung 15: Regenerationsgrad mit verschiedenen Hezelementanordnungen	22
Abbildung 16: Relative Regenerationsdauer mit verschiedenen Hezelementanordnungen	22
Abbildung 17: Regenerationserfolg in Abhängigkeit von der HE - Position	23
Abbildung 18: Aufbau der Filtersysteme auf dem Hot – Shake – Prüfstand	24
Abbildung 19: Versuchsablauf Hot – Shake – Tests	24
Abbildung 20: Regenerationsverhalten 2,75 m <sup>2</sup> - Filter mit Fe/C-Verhältnis 24 ‰	25
Abbildung 21: Exothermen 2,75 m <sup>2</sup> - Filter bei verschiedenen Additivkonzentrationen	26
Abbildung 22: Regenerationsgrad 3,8 m <sup>2</sup> -Filter bei verschiedenen Additivkonzentrationen	26
Abbildung 23: Regenerationsdauer 3,8 m <sup>2</sup> -Filter bei verschiedenen Additivkonzentrationen	27
Abbildung 24: Exothermen 3,8 m <sup>2</sup> -Filter bei verschiedenen Additivkonzentrationen	27
Abbildung 25: Durchzünden 3,8 m <sup>2</sup> -Filter bei verschiedenen Additivkonzentrationen	28
Abbildung 26: Strömungsverteilung 5,4 m <sup>2</sup> - Filter nach erster Regeneration	28
Abbildung 27: Strömungsverteilung 5,4 m <sup>2</sup> - Filter nach Strömungsoptimierung	29
Abbildung 28: Regenerationsverhalten 5,4 m <sup>2</sup> - Filter mit 17 ‰ Fe/C - Verhältnis	30
Abbildung 29: Regenerationsverhalten 5,4 m <sup>2</sup> - Filter mit 22 ‰ Fe/C - Verhältnis	30
Abbildung 30: Additivgehalt im Kraftstoff bei kontinuierlicher Dosierung	31
Abbildung 31: Additivgehalt im Kraftstoff bei diskontinuierlicher Dosierung	32
Abbildung 32: Additivvergleich Eisen-Additive	34
Abbildung 33: Regenerationsverhalten Cer/Platin- zu Ferrocen-Additiv	35
Abbildung 34: Exothermieverhalten Cer/Platin- zu Ferrocen-Additiv	35
Abbildung 35: Regenerationsablauf SMF-AR-System	40
Abbildung 36: Einbausituationen SMF – AR im VW Golf IV (links)	42
Abbildung 37: Einbausituationen SMF – AR im Audi A4 (rechts)	42
Abbildung 38: Betriebsverhalten VW Golf mit SMF-AR im Stadtdauerlauf	43
Abbildung 39: Betriebsverhalten Sprinter 313 mit SMF-AR im Stadtdauerlauf	44
Abbildung 40: DPD für leichte Nutzfahrzeuge im verschärften Stadtdauerlauf	45
Abbildung 41: Betriebsverhalten Sprinter 313 mit SMF-AR im verschärften Stadtdauerlauf	45
Abbildung 42: MAN 7,5 – Tonner mit SMF – AR - System	46
Abbildung 43: Betriebsverhalten MAN 7,5 t mit SMF-AR über 30.000 km Sauerlandzyklus	46



### 3. Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Cordierite	Keramisches Filtermaterial
CRT <sup>®</sup>	Patentiertes Verfahren zur kontinuierlichen, passiven Regeneration von Partikelfiltern (Continuously Regenerating Trap)
DPD ( <b>D</b> rive- <b>P</b> attern- <b>D</b> etection)	Statistische Auswertungsmethode, die das Fahrverhalten kontinuierlich bewertet, um den bestmögliche Zeitpunkt für die Regeneration des Partikelfilter zu bestimmen.
Jetfilter <sup>®</sup>	Name für die HJS-Ausführung eines Partikelfilters aus Sintermetall
SCRT <sup>®</sup>	Patentiertes kombiniertes System zur Minderung aller limitierten Schadstoffe (Selective Catalytic Reduction Trap)
SMF <sup>®</sup>	Geschützte Bezeichnung für HJS-Sintermetallfilter
SMF <sup>®</sup> -AR-System	HJS-Bezeichnung für das im Rahmen dieses Projektes entwickelte nachrüstbare Dieselpartikelfiltersystem mit Autarker Regeneration
VERT	Eignungs- und Qualitätstest für Dieselpartikelfilter in der Schweiz

## 4. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein nachrüstbarer Dieselmotorsfilter mit autarker Regeneration entwickelt. Dabei wurde basierend auf einem Konzeptfahrzeug mit einem 1,8 m<sup>2</sup> - Filter ein Regenerationsverfahren für Partikelfilter bis zu einer Größe von 5,4 m<sup>2</sup> Filterfläche am Motorprüfstand untersucht und kombiniert mit der Entwicklung eines speziellen Steuergerätes für diese Anwendung im Feldversuch erprobt.

Zu Beginn der Entwicklung wurde die grundlegende Absicherung des Filters und des Regenerationsverfahrens durchgeführt. Das Ruß- und Aschebeladungsverhalten wurde mittels Simulationsrechnungen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Filterkonstruktion des Jetfilters aus Sintermetall von HJS im Vergleich zu den Kanalfiltern aus keramischen Werkstoffen wesentliche Vorteile hinsichtlich der freien Restfilterfläche bei Aschebeladung des Filters aufweist. Dies ist insbesondere bei der Verwendung eines Kraftstoffadditivs zur Regenerationsunterstützung aufgrund der damit verbundenen zusätzlichen Ascheeinlagerung im Filter wichtig. Weitere Simulationen wurden durchgeführt, um die Russverteilung im Filter zu verifizieren. Nach empirischen Voruntersuchungen konnten keine kritischen Russnester nachgewiesen werden. Die CFD – Berechnungen bestätigten, dass über den gesamten Beladungsvorgang ein relativ gleichmäßiger Rußschichtaufbau auf der gesamten Filterfläche erfolgt. Parallel zu diesen theoretischen Betrachtungen wurde mittels Versuchen am Motorprüfstand die Auslegung der Rohrheizkörper sowie deren optimale Position zueinander und zum Filter ermittelt. Bei diesen Versuchen wurde exemplarisch am 1,8 m<sup>2</sup> - Filter über die Optimierung der Position der Heizelemente das bestmögliche Regenerationsergebnis in alle Motorbetriebspunkten sichergestellt. Wichtig war dabei insbesondere, dass auch unter ungünstigsten Bedingungen, im Motorleerlauf, eine möglichst hohe Russumsatzrate während der Regeneration des Filters erzielt werden konnte.

Basierend auf dieser Filterkonfiguration wurde das Projekt mehrgleisig fortgeführt. Über die ersten Fahrversuche mit dem 1,8 m<sup>2</sup> - Filter wurden die erforderlichen Grundlagen für die Auslegung des in der Entwicklung befindlichen, neuen Kombi-Steuergerätes erarbeitet. Parallel wurde mit den Kenntnissen aus den oben beschriebenen Prüfstandergebnissen die thermoelektrische Regeneration an weitere Filtergrößen appliziert und am Motorprüfstand untersucht. Nach erfolgreichen Versuchen mit einem 2,75 m<sup>2</sup> großen Filter am Motorenprüfstand wurde dieser anschließend im Fahrversuch mit leichten Nutzfahrzeugen getestet. Die Analyse der Fahrzyklen von Lieferfahrzeugen ergab, dass diese Anwendung wegen kurzer Motorlaufzeiten und teilweise sehr niedrigen Abgastemperaturen sehr hohe Anforderungen an die Beladungserkennung und Regenerationsstrategie des Nachrüstfilterkonzepts stellt. Die Weiterentwicklung bezüglich dieser Anforderungen wurde durch eine Intensivierung der Untersuchungen in diesem Fahrzeug- und Nutzungssegment realisiert. Des Weiteren wurde nach der Entwicklung der Heizelemente für einen 5,4 m<sup>2</sup> - Filter und der Erprobung des Systems am Motorprüfstand dieser Filter in Feldversuch in einem 7,5-t-LKW mit gutem Erfolg getestet.

Aufgrund der hohen Anforderungen an das nachrüstbare Dieselmotorsfiltersystem im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge für den Lieferverkehr wurden umfangreiche Fahrversuche zur Ermittlung einer geeigneten Regenerationsstrategie durchgeführt. Die daraus entwickelte Software setzt sich zusammen aus einer Beladungserken-

nung über quasi-stationäre Betriebspunkte mit zwei Kennfeldern sowie eine Regenerationssteuerung über ein weiteres Kennfeld und eine Fahrmustererkennung (**Drive-Pattern-Detection**). Die Absicherung des Gesamtsystems erfolgt über ein weiteres Kennfeld über das bei zu hoher Filterbelastung der Fahrer des Fahrzeuges aufgefordert wird, eine so genannte Notregeneration durchzuführen und über ein weiteres Kennfeld zur Überwachung der Partikelfilterfunktion.

Zur Absicherung dieser Ergebnisse wurde mit vier verschiedenen leichten Nutzfahrzeugen mit Leistungen zwischen 60 kW und 115 kW in den abschließenden Fahrversuchen unter schwierigen Randbedingungen in einem simulierten Lieferverkehr die Funktion des entwickelten Systems nachgewiesen werden.

Die erzielten Ergebnisse bieten gute Möglichkeiten für die Umsetzung des Systems zur Anwendung in größeren Stückzahlen. Die Ausweitung der Anwendungsbereiche auf Off-High-Way-Anwendungen oder Arbeitsmaschinen mit Dieselmotor ist, basierend auf den vorliegenden Resultaten, über eine Weiterentwicklung des Systems jederzeit möglich.

## 5. Einleitung

Jährlich sterben in der Bundesrepublik zwischen 10.000 und 19.000 Menschen durch KFZ-Abgase aus Dieselfahrzeugen, und die Lebenserwartung der Menschen könnte durch den Einsatz von Partikelfiltern um ein bis drei Monate verlängert werden. Dies geht aus einer kürzlich veröffentlichten Studie [UBA03] des UBA hervor. Die Studie stützt sich dabei auf ein Gutachten, das das UBA bei dem Institut für Epidemiologie der GSF [Wic03] in Auftrag gegeben hatte. Gegenstand dieser Untersuchung war, abzuschätzen, welche negativen gesundheitlichen Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung durch den Einsatz von Partikelfiltern in Dieselfahrzeugen vermieden werden können. Aufgrund von Untersuchungen, die weltweit durchgeführt wurden, weist dieses Gutachten im Rahmen der Statistik die oben genannten Werte aus.

„Feinstäube“ – zu denen die Diesel-Partikel zählen - werden durch die Weltgesundheitsorganisation, die EU-Kommission, National Research Council und die Umweltbehörde EPA (USA) übereinstimmend als vorrangige umwelthygienische Schwerpunktthemen in Europa und USA bezeichnet. In den USA und Japan wird bereits an Umsetzungskonzepten gearbeitet. Auch das UBA fordert eine weitere deutliche Senkung der Abgasgrenzwerte bei Fahrzeugen mit Dieselmotoren [UBA].

Die Antragstellerin entwickelt und fertigt seit 1985 Katalysatoren für Ottomotoren, befasst sich etwa seit 1995 mit der Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren und hat für ihre Arbeiten auf dem Gebiet der Abgasnachbehandlung bereits mehrere Auszeichnungen erhalten.

Im Jahr 1995 wurde die Applikation des CRT<sup>®</sup> Systems (Continuously Regenerating Trap) zur Diesellabgasreinigung in Linienbussen begonnen. Ergänzend dazu wurde mit dem Patentinhaber des CRT<sup>®</sup> Systems gemeinsam ein SCRT<sup>®</sup>-System (Selective Catalytic Reduction Trap, ein kombiniertes System zur Minderung aller limitierten Schadstoffe) entwickelt und patentiert, welches 1998 mit dem BDI-Preis ausgezeichnet wurde. Die Aktivitäten im Bereich der Diesellabgasnachbehandlung wurden im selben Jahr mit der Markteinführung eines Dieselpartikelfilters aus Sintermetall (SMF<sup>®</sup>) für Stapler ausgeweitet.

Im Jahr 2002 wurde nach intensiver Entwicklungsarbeit ein Dieselpartikelfilter für PKW, der so genannte Jetfilter<sup>®</sup>, vorgestellt und das entsprechende Know How und die Schutzrechte in Lizenz an die Robert Bosch GmbH gegeben. Für die Entwicklung des Jetfilter<sup>®</sup> wurde die HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co KG mit der Verleihung des UMWELTPREISES 2003 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geehrt.

Diese Entwicklung beinhaltet die Vorstellung eines Basis-Konzepts für den rusparkelfreien Betrieb eines Diesel-PKW. Dieser PKW wurde gemeinsam mit dem UBA im Jahr 2003 der Fachöffentlichkeit vorgestellt. Bei dem vorgestellten System handelt es sich jedoch lediglich um das Konzept eines später ggf. einmal zu realisierenden Systems. Das im vorgestellten Fahrzeug eingebaute Abgasreinigungssystem war noch unausgereift und sollte lediglich eine grobe Vorstellung davon vermitteln, in welche Richtung die Technologie voraussichtlich fortschreiten wird.

Nach einem Klimamodell von M. Jacobsen [Jac01] erwärmt Ruß die Atmosphäre 360.000 bis 840.000 effektiver als die gleiche Masse CO<sub>2</sub>. Das bedeutet in der Wirkung, dass Dieselfahrzeuge nach EURO 3 Standard die Atmosphäre während der nächsten 100 Jahre stärker aufheizen als Benzinfahrzeuge. Oder umgekehrt: Damit ein Dieselfahrzeug einen Vorteil gegenüber einem Benzinfahrzeug hat, muss die

Partikelemission unter 0,0015 g/km gesenkt werden, d.h. deutlich unter dem EURO 4 Grenzwert (0,025 g/km) liegen. Hinzu kommt, dass der Dieselmotoren bei extremen Einspritzdrücken immer feiner zerstäubt wird. Dadurch wird die Oberfläche der Kraftstofftröpfchen größer, die Verbrennung wird verbessert, was sich in einem geringeren Verbrauch auswirkt. Diesem erwünschten Effekt steht aber entgegen, dass auch die emittierten Russpartikel kleiner werden und sich der Anteil an lungengängigen Partikeln (unter 2,5 µm) verstärkt. Mit einem Partikelfilter können diese Partikel aber dem Abgas entzogen werden.

Die Partikelemission ist in den vergangenen Jahren durch die Verbesserung der Verbrennung der Kraftstoffe im Motor bereits deutlich reduziert worden. Die weiteren Verbesserungen durch motorseitige Änderungen werden in der UBA-Untersuchung bezüglich der Partikelemission mit Werten zwischen 30 und 50 % prognostiziert. Damit stößt man bei der Beschränkung auf motorseitige Veränderungen auf Grenzen, die eine Einhaltung der ab 2005 für die Typprüfung gültigen EURO 4-Grenzwerte nur knapp erlaubt.

Erst der Übergang zu einer Abgasnachbehandlung mit Partikelfilter erlaubt drastische Minderungen von weit über 90 % und damit ein deutliches Unterschreiten der Partikelgrenzwerte EURO 4 für PKW und EURO V für Nutzfahrzeugmotoren.

Damit die vom UBA geforderten Reduzierung der Partikelemission möglich wird, soll ein Partikelfiltersystem entwickelt werden, das >95% der beim Verbrennungsprozess entstehenden Partikel zurückhält, und das nicht nur bei Neufahrzeugen, sondern auch auf die Gebrauchtfahrzeugflotte angewendet werden kann. Eine entscheidende Rolle bei der Durchführbarkeit spielt dabei die Akzeptanz des Nutzers. Es muss von technischer Seite sichergestellt werden, dass eine problemlose Umrüstung bei einer Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeuge, ein problemloser Betrieb unter allen erdenklichen Betriebszuständen und ein Kaufpreis im Bereich einer möglichen Nachrüstförderung (z. B. gut 1000 €, wie bei der G-Kat-Nachrüstung ab 1997 eines 2-l-Benziners über 3 Jahre) mit entsprechender Wirtschaftlichkeit über den Lebensdauerzyklus möglich ist. Ein System, das diese Anforderungen erfüllt, existiert nicht. Ziel des Vorhabens ist daher die Entwicklung eines selbst regenerierenden Filter-Systems (Sintermetallfilter mit autarker Regeneration, kurz SMF<sup>®</sup>-AR), die Fertigung von Erprobungsmustern sowie eine praxisgerechte, ausgedehnte Erprobung in Fahrversuchen mit unterschiedlichen Fahrzeugen (unterschiedliche bauliche und adaptive Anforderungen) unter breit gestreuten Einsatzbedingungen (z.B. Kurzstrecke, Stop-and-Go, Vollgasfahrt, unterschiedliche Nutzermentalität).

Die Situation bezüglich der steuerlichen Förderung von nachrüstbaren Partikelfiltersystemen für PKW im Jahre 2005 lässt die Marktrelevanz eines Partikelfilters >95% Wirkungsgrad zunehmend geringer erscheinen, da mittlerweile eine voraussichtliche Fördersumme von etwa 300 € angesetzt wird. Die im Vergleich dazu hohen Kosten, die solche Systeme, die immer auf eine aktive Regeneration angewiesen sein werden, verursachen werden nicht soweit unterstützt werden, dass eine große Anzahl von Nachrüstungen im PKW – Bereich zu erwarten ist. Daher wurde in Abstimmung mit der DBU der Schwerpunkt des Projektes hin zu Nachrustsystemen für leichte Nutzfahrzeuge und Industriemotoren in diversen Anwendungen verschoben. Dies führte zu einer Neuausrichtung der Arbeitspakete Fahrversuch, Additivdosierung und Regenerationssteuerung, die sich jedoch kostenneutral darstellt.

Auf Basis der im Konzeptfahrzeug für das Umweltbundesamt dargestellten Technologie wurde im Rahmen dieses durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten Projektes ein universelles, autarkes, nachrüstbares Partikelfiltersystem aus Sintermetall entwickelt.



## 6.1. Simulationsrechnungen

Die Simulationsrechnungen in diesem Projekt wurden von zwei Entwicklungspartnern durchgeführt. Die Berechnungen zum Aschebelastungsverhalten im Vergleich keramischer Kanalfilter zum Jetfilter aus Sintermetall wurden von UBF aus Remshalden durchgeführt. Für die Realisierung der 3D – Strömungssimulation zur Ermittlung des Russbelastungsverhaltens des HJS Sintermetallfilters war die FEV Motorenteknik GmbH Co. KG zuständig.

Im Rahmen der Berechnungen zum Geometrievergleich und zum Aschebelastungsverhalten zwischen den klassischen Kanal- oder Wabenfilterns aus Keramik und dem modular aufgebauten Jetfilter aus Sintermetall war es zu Beginn erforderlich, die für die Aschebelastungsmodelle relevanten Abmessungen beider Filterkonstruktionen zu erfassen. Abbildung 1 beschreibt einen Kanal eines keramischen (SiC oder Cordierite) Filters.

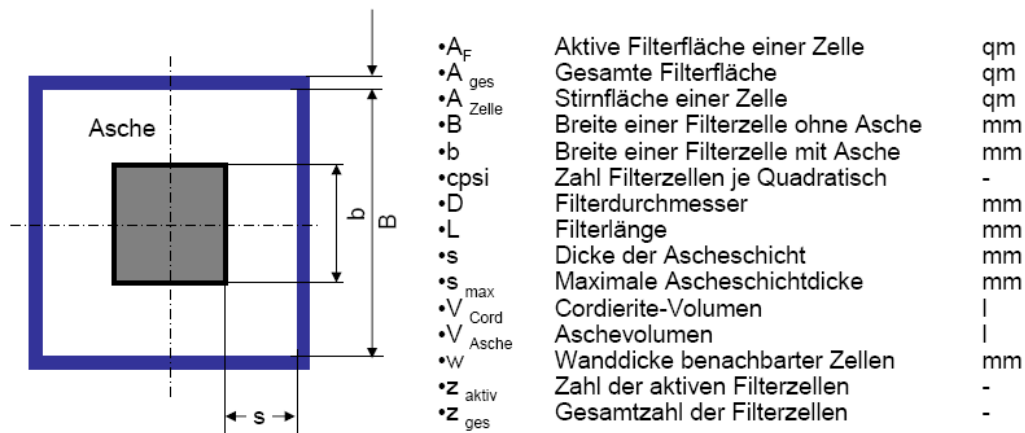


Abbildung 2: Geometrie von Kanalfiltern

Die wichtigsten Abmessungen einer Tasche des Jetfilters sind in Abbildung 2 dargestellt. Beim Jetfilter ändert sich die Geometrie auch über der Länge, wie Abbildung 3 zeigt, weshalb die Aschebelastungsvorgänge in Filterlängsrichtung in Abhängigkeit einer  $L_w(x)$  berechnet werden müssen.

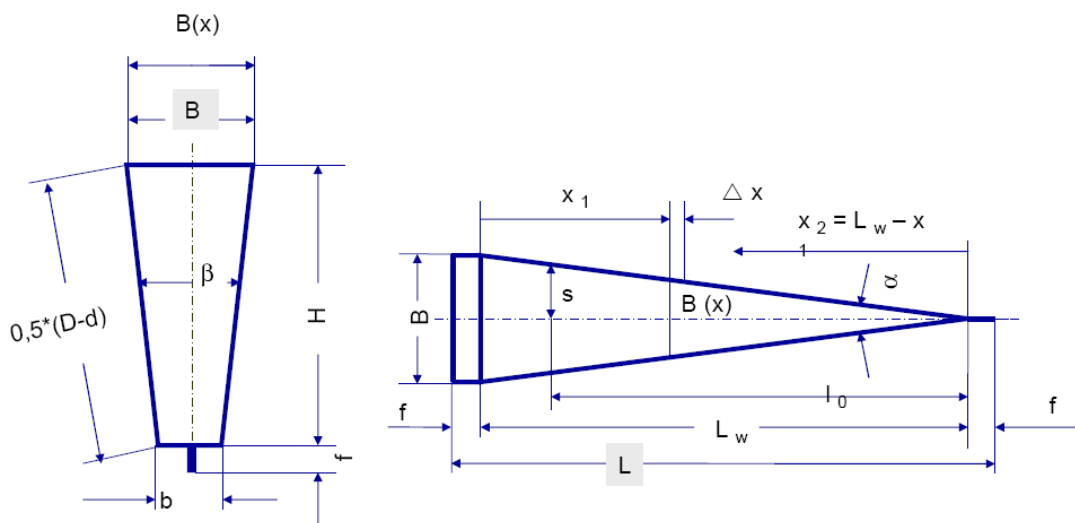
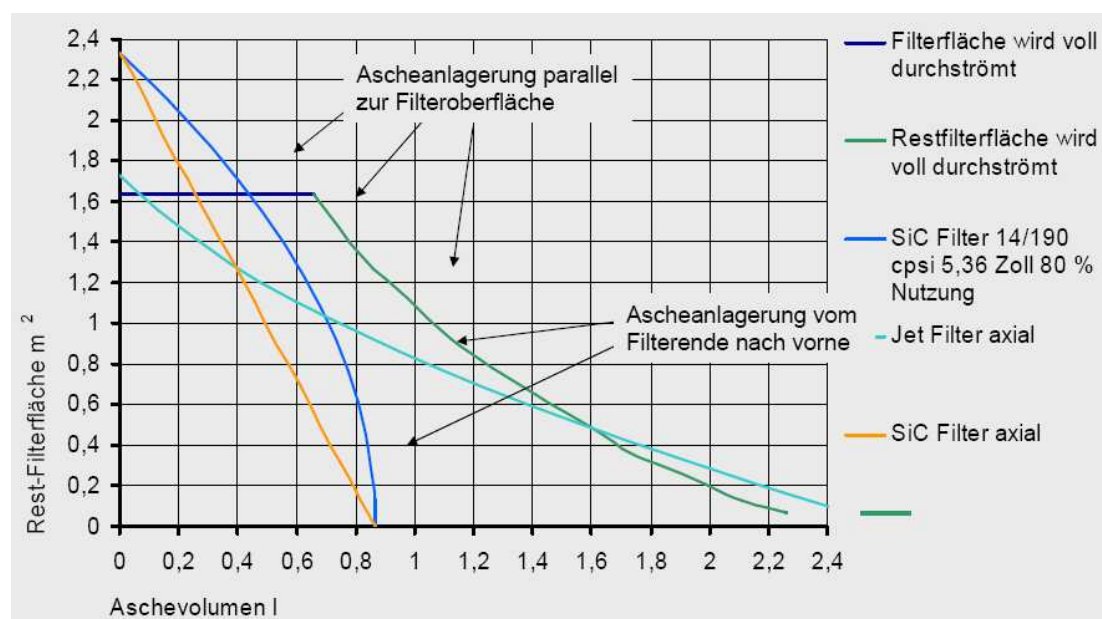


Abbildung 3: Geometrie des Jetfilters

Im Gegensatz zu den vielfach untersuchten Kanalfiltern [Deu05] liegen für das Ascheeinlagerungsverhalten des Jetfilters bisher noch keine theoretisch abgesicherten Untersuchungen vor. Das Ascheeinlagerungsverhalten ist bisher nur integral in Schnellveraschungsläufen am Motorenprüfstand untersucht worden. In der Literatur werden, abhängig vom eingesetzten Regenerationsverfahren im Wesentlichen zwei verschiedenen Asche- bzw. Rußanlagerungsmechanismen beschrieben. Der Hauptteil der eingelagerten Aschen befindet sich bei Kanalfiltern, die mit kontinuierlicher Regeneration betrieben werden, über die gesamte Länge entlang des keramischen Kanalwänden, weshalb man dann von einer wandparallelen Ascheeinlagerung spricht. Bei diskontinuierlich thermisch regenerierten Filtern befinden sich die Ascheablagerung hauptsächlich im hinteren Bereich wieder. Dabei wird die Asche im Kanal nicht wandparallel sondern vom Filterende nach vorne eingelagert. Dieses Verhalten wird auch bei den Filtersystemen aus PKW festgestellt, die mit einer Kombination von kontinuierlicher und thermischer Regeneration über das Motormanagement arbeiten.

Für Regenerationsverfahren, die ein Kraftstoffadditiv verwenden, ist es hilfreich, wenn der Filter trotz hoher Ascheeinlagerung noch eine große Restfilterfläche zur Verfügung stellt. Da die freie Filterfläche den Gegendruck im Betrieb bestimmt und somit den Kraftstoffverbrauch des Motors beeinflusst, kann so eine hohe Laufleistung bis zur Aschereinigung des Filters erreicht werden. Abbildung 4 zeigt den Einfluss der beiden Ascheeinlagerungsmechanismen vergleichend für den Jetfilter mit 1,8 m<sup>2</sup> Fläche und einem keramischen Kanalfilter gleichen Volumens.



**Abbildung 4: Einfluss der Ascheeinlagerung auf die Restfilterfläche**

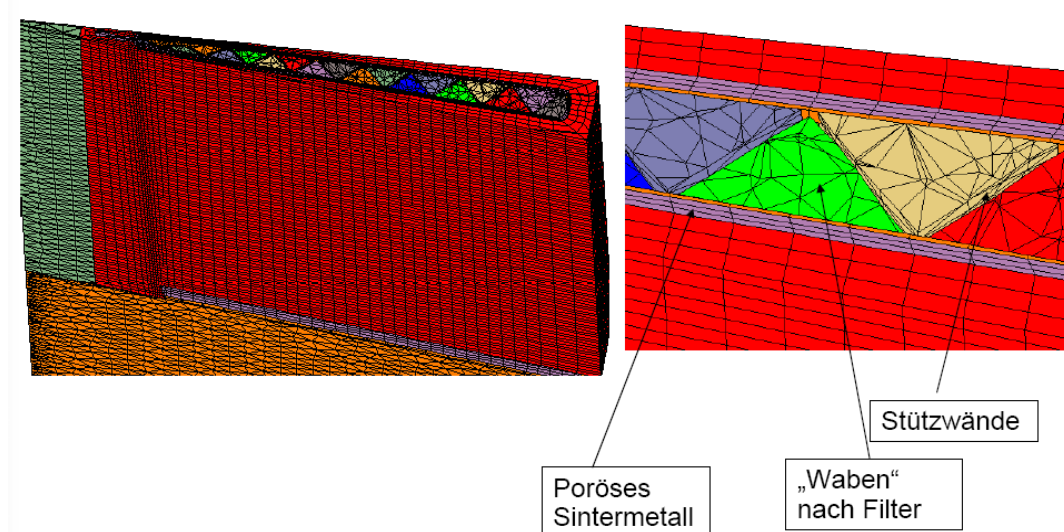
Aufgrund der Tatsache, dass die keramischen Filtersubstrate bezogen auf das Volumen eine größere Filterfläche haben, können diese anfänglich eine größere Restfilterfläche anbieten. Wegen seines Aufbaus und seines großen Aschespeichervolumens kann der SMF insbesondere bei diskontinuierlichen Regenerationsverfahren jedoch schon ab einem Aschevolumen von 0,4 l eine größere freie Filterfläche bereitstellen. Dadurch ist der SMF für Systeme mit diskontinuierlicher Regeneration, insbesondere, wenn diese in der Nachrüstung wegen der fehlenden Motorunterstützung bei der Regeneration mit hohen Additivkonzentrationen betrieben werden müssen, besonders geeignet.



Bei der FEV Motorenteknik GmbH & Co. KG wurden 3-D-CFD-Simulationen durchgeführt, mit dem Ziel, das Beladungsverhalten des Jetfilters zu simulieren. Die gängigen, vielfach in der Literatur beschriebenen CFD-Modelle befassen sich ausschließlich mit keramischen Filtermodulen, die sich wegen ihrer Kanalstruktur strömungstechnisch deutlich anders verhalten, als der Jetfilter. Aufgrund seiner Taschegeometrie, die über den zentralen Freiraum im Inneren des Filters einen Druckausgleich zwischen den einzelnen Filtersegmenten (Taschen) erlaubt, können die bekannten Modell für den Jetfilter aus Sintermetall nicht angewendet werden.

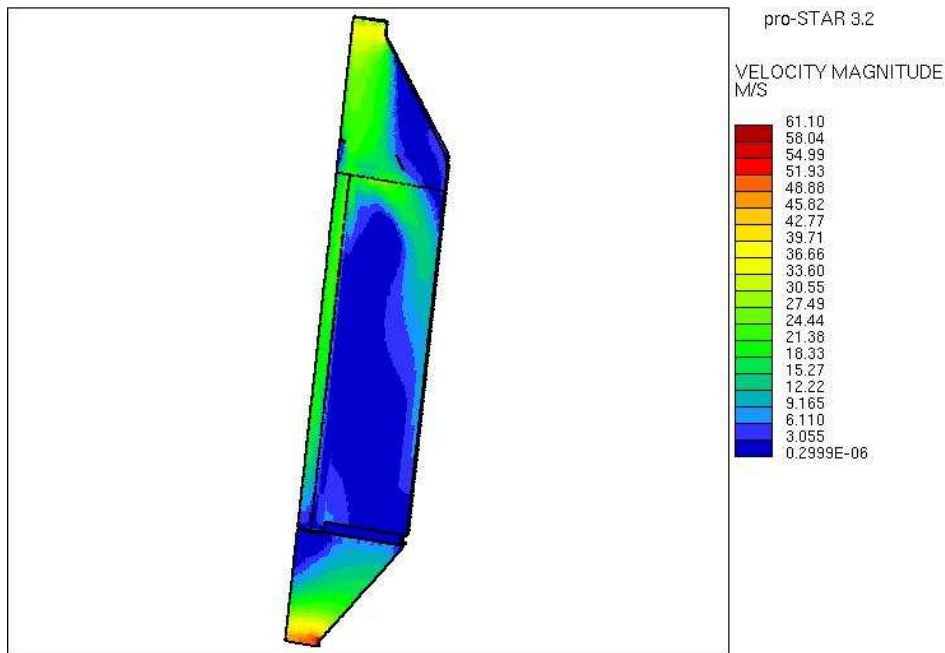
Die Struktur des Filters ist aufgrund der Kombination von Filtertaschen aus porösem Sintermetall mit einem von der Sauberseite eingeschobenen wellblechartigen sog. Spacer aus 0,2 mm starkem Vollmaterial (siehe Detail A, Abbildung 1) relativ komplex zu modellieren. Die Funktion des Spacers ist es, sowohl ein Kollabieren der Filtertasche aufgrund des Strömungswiderstandes durch den Rußschichtaufbau auf dem Filtermaterial zu verhindern, als auch, eine möglichst gute Gleichverteilung der Strömung und damit der Russbeladung, auf der gesamten Filtertasche sicherzustellen. Die CFD - Netzgenerierung erfordert hierzu eine relativ feine Auflösung (siehe Abbildung 5), weshalb mit nur einer statt 60 Filtertaschen gerechnet wurde, um mit handhabbaren CPU – Zeiten arbeiten zu können. Über Symetriebetrachtungen können die Ergebnisse wieder auf den gesamten Filter hochgerechnet werden.

Mit diesem Modell wird die Strömungsverteilung für den Ausschnitt eines Taschensegmentes des gesamten, unbeladenen Filters berechnet, was Abbildung 6 zeigt. Zu erkennen ist die Ablösung der Strömung im oberen Bereich des Eingangskonus mit der anschließenden Beschleunigung der Abgasströmung um die Stützkralle (siehe Abbildung 1, Detail C). Mit weiterem Eindringen der Strömung in den Filter wird die Strömungsgeschwindigkeit auf der Tasche geringer, da das Abgas durch



**Abbildung 5: CFD – Netz mit Hexaeder - und Tetraeder - Zellen mit Prismen**

das Filtermaterial tritt. Im Austrittskonus sind deutlich das Totwassergebiet hinter der Dichtscheibe, sowie die zu Konusausgang steigenden Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund der Durchmesserreduzierung zu erkennen.



**Abbildung 6: Simulierte Strömungsverteilung im 1,8m<sup>2</sup> SMF mit axialen Konen**

Dieses Modell wurde mit Daten vom Motorprüfstand abgeglichen, um eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten zu erzielen. Basierend darauf wurde ein Modell für die Russbelastung implementiert. Dazu wird mit einer aus Motorprüfstandversuchen abgeleiteten Russbelastung des Abgasmassenstromes gerechnet, woraus jedoch für die einzelne Zelle kein Rußschichtaufbau, sondern eine Änderung des Strömungswiderstandes errechnet wird. Dabei wird in jeder Gitterzelle des Filters der Druckverlust abhängig von der lokalen imaginären Russbelastung und der Filtrationsgeschwindigkeit bestimmt. Die Simulationsrechnung wurde über eine Anpassung der Porositätskoeffizienten an die Messwerte vom Motorprüfstand für Russbelastungen von 0 g, 33 g und 50 g kalibriert. Bei der CFD – Untersuchung mit transienter Russbelastung wurde die Verteilung bei den genannten Belastungspunkten gespeichert. Anschließend erfolgte eine dementsprechende Massenstromvariation. So zeigt die endgültige Version (grüne Kurven) auch für die Fälle mit Russbelastung eine gute Übereinstimmung mit der Realität, wie Abbildung 6 zeigt.

Mit diesem Modell wurden abschließend Simulationen durchgeführt, bei denen das CFD – Modell so lange rechnete, bis zuvor definierte Russbelastungen (33 g und 50 g) im Filter erreicht wurden. Bei Erreichen der jeweiligen Belastungen wurde eine Auswertung hinsichtlich der Gleichverteilung des Russes durchgeführt. Dabei wurde der abgeschiedene Ruß in den einzelnen Zellen des CFD – Gitters über eine Klassierung in 0,01 mg/m<sup>2</sup> aufgeteilt, um die unterschiedliche Größe der einzelnen Zellen zu berücksichtigen (siehe Abbildung 8).

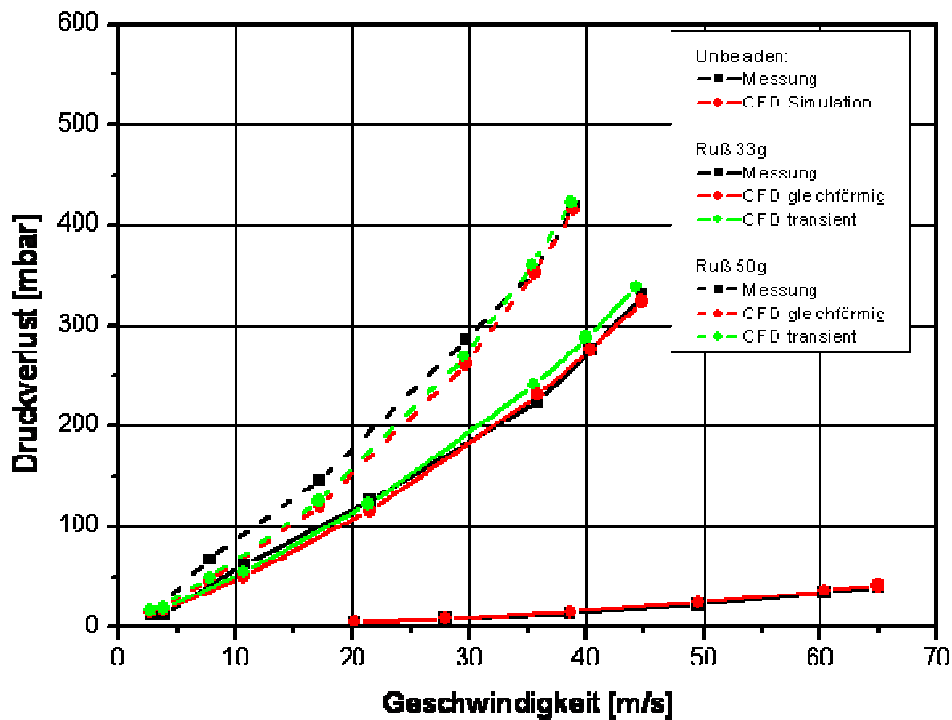


Abbildung 7: Druckverlust der CFD-Modelle mit unterschiedlicher Rußbeladung

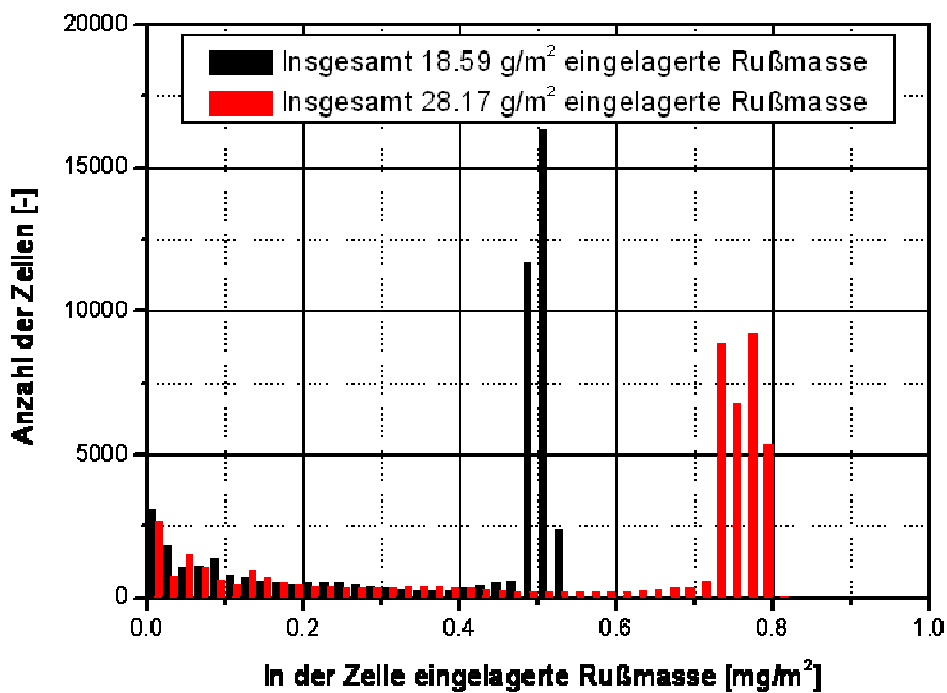


Abbildung 8: Simulierte Rußmassenverteilung im SMF

Sowohl für die Beladung von ca. 33 g, entspricht  $18,59 \text{ g/m}^2$ , und von etwa 50 g, entsprechend  $28,17 \text{ g/m}^2$ , wurde eine sehr gleichmäßige Rußverteilung ermittelt. Dies ist daran zu erkennen, dass eine Vielzahl von Zellen eine nahezu gleiche Rußbeladung aufweisen. Die nennenswerte Anzahl von Zellen mit sehr geringer Rußbeladung resultiert aus Bereichen der Taschenfaltung und Verschweißung sowie dem Saumband, die nicht vom Abgas durchströmt werden, an denen sich aber dennoch geringste Mengen Ruß ablageren können.

Zusammenfassend konnte das Funktionsverhalten des Sintermetallfilters mit der 3-D-Simulation gut bestimmt werden. Das Gegendruckverhalten entspricht den Messwerten der am Motorprüfstand durchgeführten Versuche und die gleichmäßige Russverteilung deckt sich mit den Erfahrungen zum Regenerationsverhalten aus Fahr- und Prüfstandsversuch mit verschiedenen Fahrzeugen und Motoren.

## 6.2. Neue Filterkonstruktionen

Die Konzeptstudie wurde mit einem Partikelfilter aus Sintermetall ausgerüstet, der an den in PKW vorhandenen Bauraum angepasst ist. Dieser Filter hat einen Durchmesser von 150 mm und eine Länge von 250 mm. Daraus ergibt sich beim HJS Jetfilter eine Filterfläche von 1,8 m<sup>2</sup>. Bezüglich seiner funktionalen Eckdaten verhält sich dieses Filtermodul etwa wie ein gleich großes Filtersubstrat aus Keramik, wie es zum Zeitpunkt des Projektbeginns bereits von einigen PKW-Herstellern serienmäßig oder als Option angeboten wurde. Dieser Filter kann aufgrund seines Abgasgegendruckverhaltens in Kombination mit der thermoelektrischen Regeneration bei PKW etwa bis zu einer Motorleistung von 110 kW eingesetzt werden.

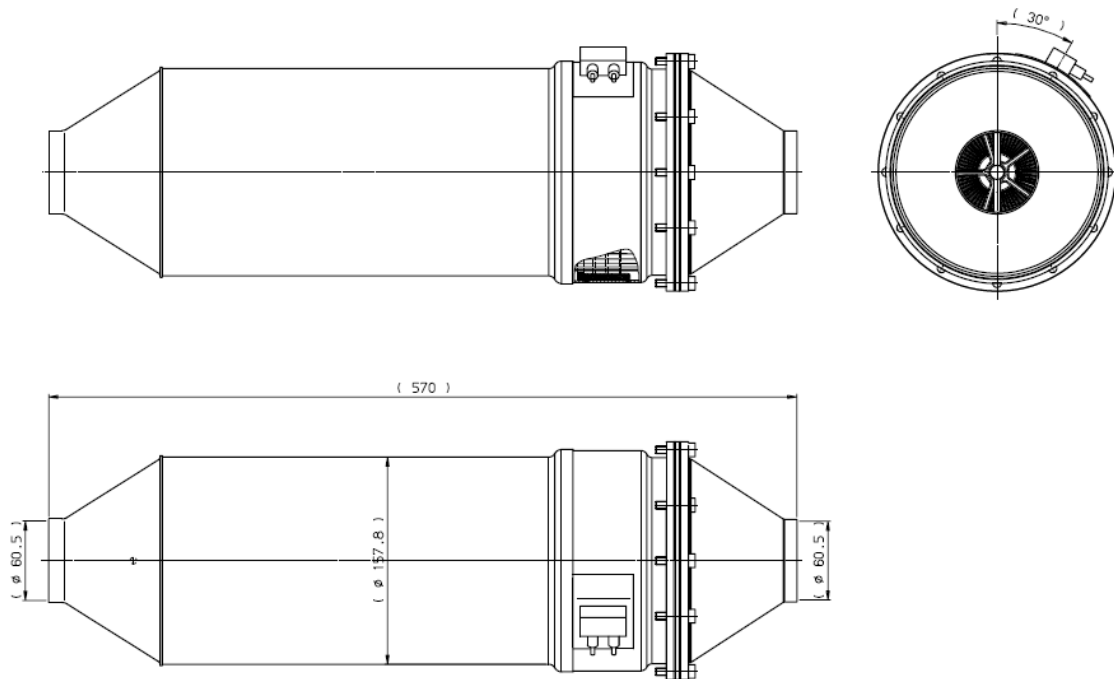
Bei Nutzfahrzeugen und insbesondere auch bei Baumaschinen ist der maximal zulässige Abgasgegendruck niedriger, als bei PKW üblich. Ein Grund dafür sind die deutlich höheren Lebensdauernanforderungen an den Motor, die z. B. auch eine geringere thermische Belastung des Abgasturboladers erlauben. Um den Anwendungsbereich des SMF<sup>®</sup>-AR-Systems auszuweiten, sei es auf andere Anwendungsbereiche oder aber auch auf größere Motorleistungen, ist es daher erforderlich, die thermoelektrische Regeneration so weiter zu entwickeln, dass sie auch an größeren Filter appliziert werden kann.

### 6.2.1. Konstruktion 2,75 m<sup>2</sup> - Filter

Als erster Schritt zur Vergrößerung der Filterfläche bietet sich eine Verlängerung der Filtertaschen des Jetfilters an. Wird der Filter auf die maximale Länge von 385 mm vergrößert ergibt sich daraus eine Filterfläche von 2,75 m<sup>2</sup>. Abbildung 9 zeigt diesen Jetfilter.

Diese Art der Vergrößerung der Filterfläche hat den Vorteil, dass die wesentlichen Komponenten des 1,8 m<sup>2</sup> - Filters übernommen werden können. Da der Durchmesser des Filters mit 150 mm gleich bleibt, können die Eingangs- und Ausgangskonen und auch das Heizelement inklusive Einbauteilen für das Filtergehäuse vom Filter mit 1,8 m<sup>2</sup> übernommen werden. Wie beim kleineren Filter umschließen zwei Segmente zu je drei Heizelementen den Umfang am hinteren Ende des Filters. Die einzelnen Rohrheizkörper haben eine Länge von 220 mm, wodurch sich bei zwei Segmenten eine Umschlingung von gut 85 % ergibt. Da auch die Anzahl der Filtertaschen gleich ist kann auch der Flansch, in dem die Filtertaschen hinten eingeschweißt sind, wie auch die so genannte Kralle am Filtereingang übernommen werden. Die Funktion der Kralle ist die seitliche Fixierung der Filtertaschen bei vollem Freiheitsgrad bezüglich einer individuellen Längenausdehnung jeder einzelnen Tasche. Dieses Bauteil ist ein wesentlicher Bestandteil für die thermomechanische Dauerhaltbarkeit des Filters.

Ein Jetfilter mit 2,75 m<sup>2</sup> Filterflächen kann bei leichten Nutzfahrzeugen bis etwa 120 kW Motorleistung und für Off-Road-Anwendungen bis ca. 50 kW eingesetzt werden.



**Abbildung 9: SMF®-AR-Filter mit 2,75 m<sup>2</sup> Filterfläche**

### 6.2.2. Konstruktion 3,8 m<sup>2</sup> - Filter

Eine weitere Vergrößerung der Filterfläche ist aufgrund der Begrenzung der maximalen Länge der Filtertaschen mit der Anordnung von 60 Filtertaschen auf dem Umfang nicht mehr möglich. Um eine größere Filterfläche mit den bestehenden Filtertaschen realisieren zu können müssen davon mehr auf dem Umfang angeordnet werden, wenn ein kreisrunder Querschnitt des Filtermoduls beibehalten werden soll. Aus Vergleichen mit den im Markt verfügbaren keramischen Filtersubstraten bietet sich für den SMF als nächst größere Durchmesserstufe ein Durchmesser von 190 mm an. Dieser kann erreicht werden, wenn jede siebte Filtertasche nicht wie üblich mit dem Rücken zum Umfang des Filters sondern zum Mittelpunkt des Filters verbaut wird, wie die Schnittdarstellung in Abbildung 10 zeigt. Daraus ergibt sich eine Anordnung mit 84 Filtertaschen auf dem Umfang.

Würden bei dieser Konstruktion Filtertaschen mit 250 mm Länge verwendet, so ergäbe sich eine Filterfläche von 2,5 m<sup>2</sup>. Da diese unterhalb der mit 60 Filtertaschen bereits realisierten Filterflächen von 2,75 m<sup>2</sup> liegt, ist es sinnvoll diese Filterkonstruktion lediglich mit einer Taschenlänge von 385 mm um zu setzen, woraus sich ein Filterfläche von 3,8 m<sup>2</sup> ergibt.

Grundlagenuntersuchungen am 1,8-m<sup>2</sup>-Filter haben gezeigt, dass die Heizelemente bei richtiger Auslegung den Filterumfang nicht in nahezu vollem Umfang umschließen müssen (siehe Kap. 6.3.1.1), um die Funktion der thermoelektrischen Regeneration sicherzustellen. Bei diesen Versuchen konnte auch mit einer Umschlingung von 66 %, d. h., mit einer Abdeckung des Filterumfangs durch die Heizelemente von 240°, die Funktion der elektrothermischen Regeneration sichergestellt werden. Daher wurde für die Auslegung des SMF®-AR-Systems mit 3,8 m<sup>2</sup> Filterfläche die Rohrheizkörper der Filter mit Durchmesser 150 mm eingesetzt und deren Funktionsverhalten nachfolgend am Motorprüfstand untersucht.

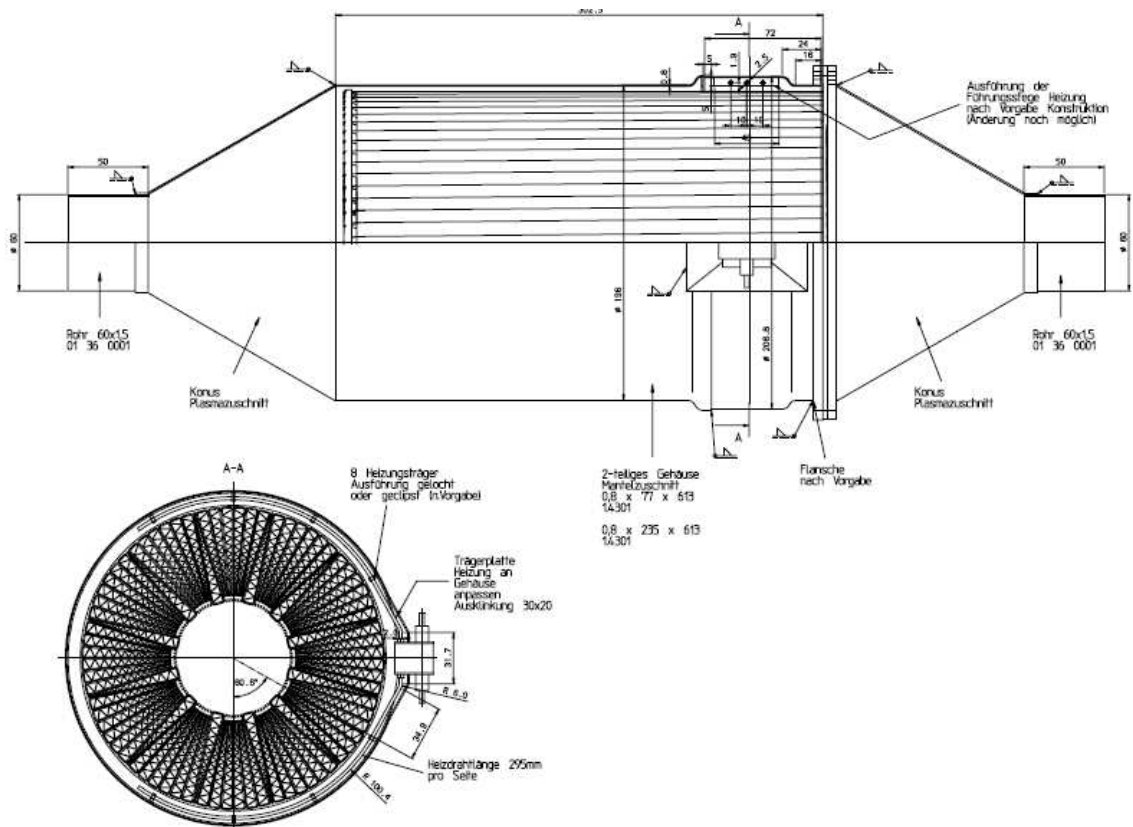
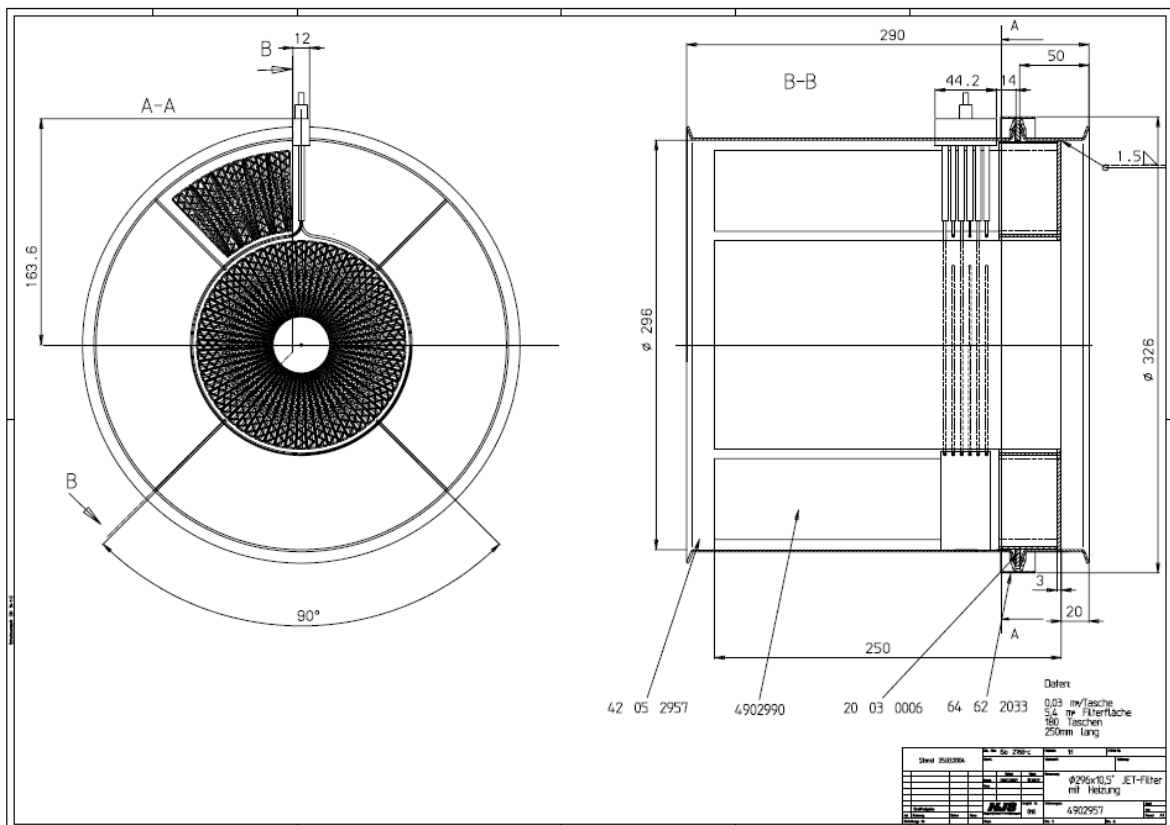


Abbildung 10: SMF®-AR-Filter mit 3,8 m<sup>2</sup> Filterfläche (Jetfilter ø 190 mm)

### 6.2.3. Konstruktion 5,4 m<sup>2</sup> - Filter

In Abbildung 10 ist bereits zu erkennen, dass bei einer Durchmesserergrößerung auf die in 6.2.2 beschriebene Weise sich im Mittelpunkt des Filtermoduls ein größer werdender Freiraum ergibt. Für die nächst größere Filtervariante sollte daher dieser Freiraum zur Einbringung von Filtertaschen genutzt werden. Aufgrund der kreisförmigen Form bietet es sich hier an, diesen Raum mit einem kompletten Filtermodul mit 150 mm Durchmesser auszufüllen. Um die, diesen Jetfilter umschließenden, Taschen besser fixieren zu können hat man hierzu keinen kompletten Ring aus Filtertaschen platziert, sondern einzelne Module zu je 15 Filtertaschen gewählt. Da diese vergleichbar Satelliten auf einer Umlaufbahn angeordnet sind haben diese Filterkonstruktionen auch die Bezeichnung Satellitenfilter erhalten. Bei dieser Konstruktion ergibt sich bei einem Filterdurchmesser von 296 mm mit einer Taschenlänge von 250 mm eine Filtergröße von 5,4 m<sup>2</sup>.

Eine Analyse der für eine Applikation diese Filtergröße in Frage kommenden Fahrzeuge oder Maschinen hat ergeben, dass bei den meisten dieser Anwendung ein 24-V-Bordnetz vorliegt. Daher galt es, für dieses Filterdesign die Rohrheizkörper im Gegensatz zu den bisher beschriebenen 12-V-Varianten hier auf eine Nennspannung von 24 Volt auszulegen. Dies kann bei unverändertem Rohrheizkörperquerschnitt durch eine einfache Verdopplung der Länge des Rohrheizkörpers realisiert werden. Daraus ergibt sich für den einzelnen Rohrheizkörper eine Länge von 440 mm, womit das innere Jetfiltermodul zu knapp 90 % umschlossen werden kann (siehe Abbildung 11).



**Abbildung 11: SMF®-AR-Filter mit 5,4 m<sup>2</sup> Filterfläche (Satelliten-Filter)**

Die einzelnen Rohrheizkörper haben bei den kleineren Filtern einen Abstand von 10 mm zueinander. Bei den Satellitenfiltern entfällt das reflektierende Filtergehäuse im Rücken der Heizelemente und die nicht auf den inneren Jetfilter gerichtete abgestrahlte Wärmestrahlung wird zur Zündung des Rußes auf den Filtersatelliten genutzt. Daraus ergibt sich eine geringere Wärmestromdichte im Vergleich zu den Filtern bis  $\varnothing$  190 mm. Um diesen Verlust beim Satellitenfilter zu kompensieren wird der Abstand der Rohrheizkörper auf 6 mm reduziert. Durch die Anordnung von jetzt sechs Heizelementen nebeneinander kann zusätzlich die Breite des den Filter umspannenden Heizringbandes von 20 mm bei den kleineren Filtern auf 30 mm bei der größten Filtervariante erhöht werden.



## 6.3 Versuche am Motorprüfstand der FH Iserlohn

Die Motorenversuche wurden in Kooperation mit der Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn am dortigen Motorenprüfstand durchgeführt. Der Motorprüfstand ist ausgerüstet mit einer Wirbelstrombremse, einer vollautomatischen Prüfstandsteuerung sowie der üblichen Abgasanalytik ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $HC$ ,  $NO/NO_x$ ) ausgerüstet.

Da der Schwerpunkt der hier beschriebenen Untersuchungen im Wesentlichen die Entwicklung eines autarken Regenerationsverfahrens für einen Partikelfilter aus Sintermetall ist, wird vorrangig das Abbrandverhalten des Rußes untersucht. Das Abscheideverhalten des Filters erfüllt die VERT – Anforderungen (Partikelanzahlabscheidegrad PZAG > 97 % (während der Regeneration > 90 %), Partikelmassenabscheidegrad > 93 %)[CP05], weshalb diesem im Rahmen dieses Projektes keine besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird.

Für die Prüfstandversuche wurden zwei verschiedene Motoren eingesetzt. Die grundlegenden Untersuchungen mit dem 1,8-m<sup>2</sup>-Filter wurden an einem gängigen Euro-3-PKW-Dieselmotor mit 1,9 l Hubraum und 85 kW Leistung durchgeführt. Der Motor ist mit einem Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie einer geregelten Abgasrückführung zur Reduzierung der  $NO_x$ -Emissionen und Pumpe-Düse-Einspritzung ausgerüstet.

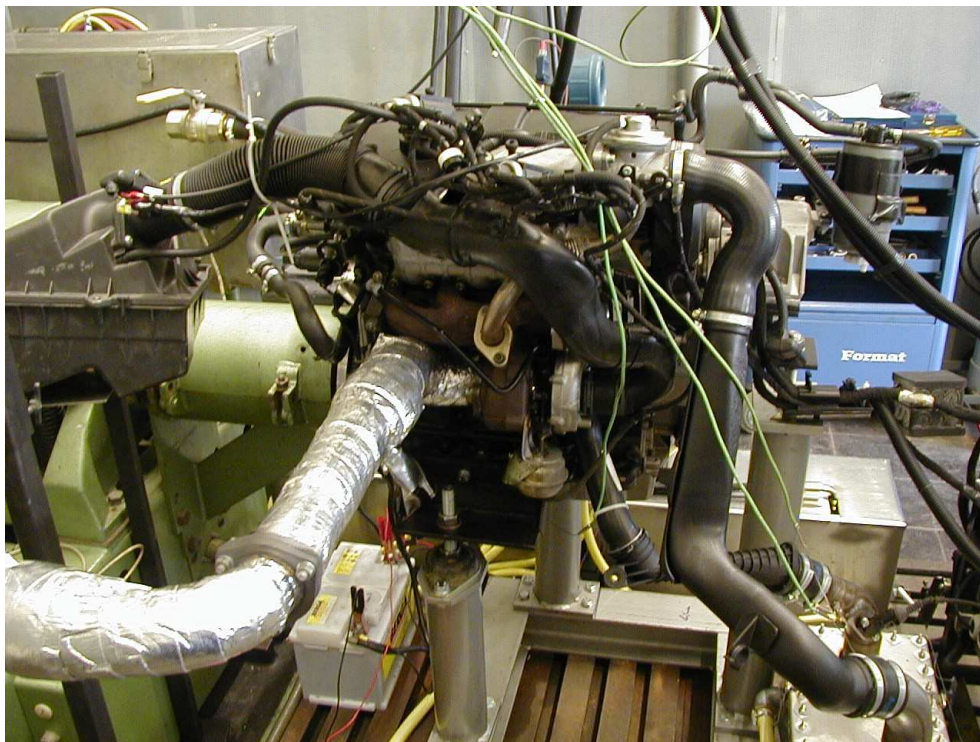


Abbildung 12: PKW – Motor am Prüfstand der FH Südwestfalen

Aufgrund der Änderung der Situation zur steuerlichen Förderung von Nachrüst-Partikelfiltern ist mit der DBU eine geänderte Ausrichtung des Projektes hin zur Entwicklung einer Lösung für leichte Nutzfahrzeuge und Industriemotoren vereinbart worden. Daher wurden auch die Versuche am Motorenprüfstand auf einen Motor für leichte Nutzfahrzeuge umgestellt.

Bei dem eingesetzten Motor handelt es sich um einen aktuellen Motor für leichte Nutzfahrzeuge vom Typ IVECO F1A. Dieser Motor wird in den Fahrzeugen der Hersteller IVECO, FIAT, Peugeot und Citroen eingesetzt.

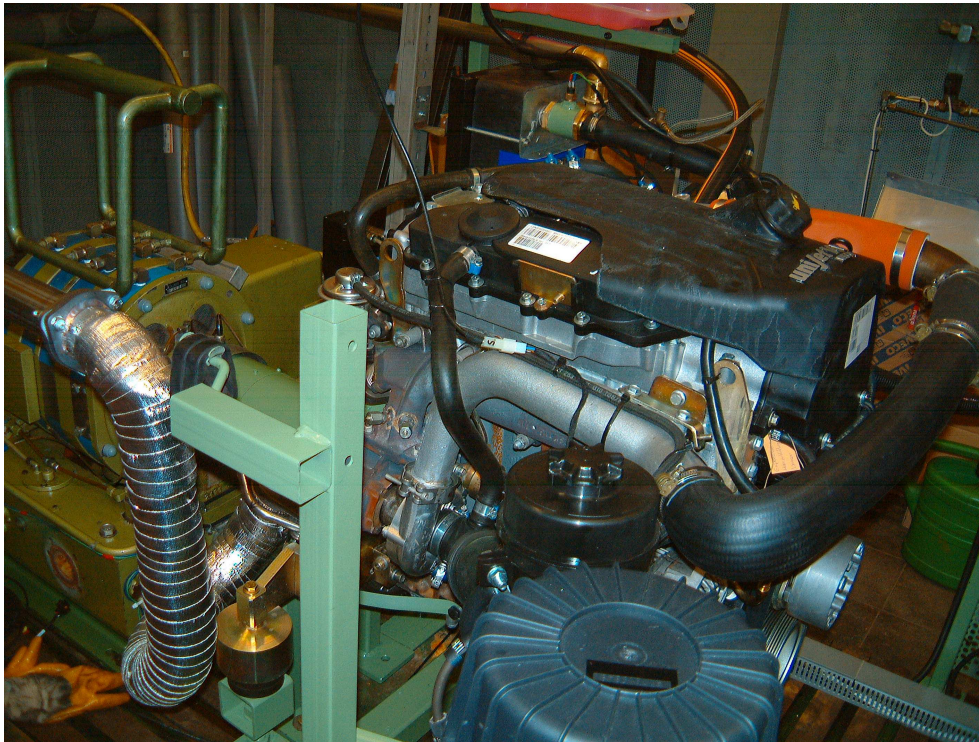


Abbildung 13: IVECO – Motor am Prüfstand der FH Südwestfalen

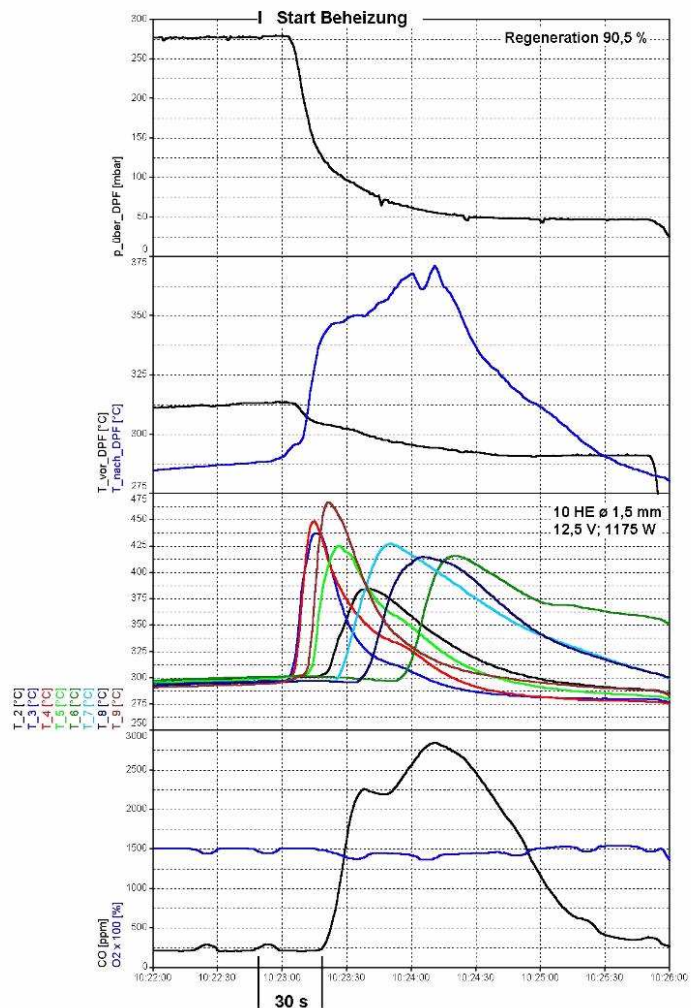
Dieser für die weiteren Versuche eingesetzte Motor hat eine Einstufung nach Euro-4 (70/220EWG), einen Hubraum von 2,3 l und 81 kW Leistung. Er verfügt über einen Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie, eine geregelte AGR und Common-Rail-Einspritzung.

Die Untersuchungen des Regenerationsverhaltens der verschiedenen Varianten des SMF-AR-Systems wurden in der Regel nach demselben Muster durchgeführt. In einem motorspezifischen Beladungsprogramm werden die Filter ohne vorgeschalteten DOC unter Verwendung eines additivierten Dieseldiesels in verschiedenen Stationärbetriebspunkten bis zur Zielbeladung beruht. Bei der Auswahl der Betriebspunkte ist darauf zu achten, dass die Abgastemperatur vor Filter deutlich unter 400 °C bleibt, um einen Abbrand des Rußes während der Beladung zu verhindern. Nach dem Erreichen der Zielbeladung wird, meistens in einem der Betriebspunkte aus dem Beladungsprogramm, eine elektrisch eingeleitete Regeneration durchgeführt. Danach wird der Filter in einem Vollastbetriebspunkt bei mittlerer Drehzahl und Abgastemperaturen um 600 °C vollständig regeneriert und der nächste Beladungsvorgang beginnt.

Jeder elektrothermische Regenerationsvorgang wird gemäß den nachfolgenden Kriterien bewertet. Der Regenerationserfolg wird durch Vergleich der Masse des Filters vor und nach der Regeneration ermittelt. Dabei wird der Filter vor jeder Wägung in immer demselben Prüfstandsprogramm konditioniert um Messungenauigkeiten, zum Beispiel durch unterschiedlichen Wassergehalt des Rußes auszuschließen. Der Regenerationsvorgang wird, wie in Abbildung 14 dargestellt, ausgewertet.



Das obere Diagramm zeigt den Verlauf des Differenzdrucks während der Regeneration. Die Zeit vom Start der Beheizung bis zum Erreichen einer Differenzdruckreduzierung um 10 % wird als Zünddauer bestimmt. Über die an verschiedenen Stellen im Filter gemessenen Temperaturen im dritten Diagramm kann der Ablauf der Regeneration im Filter bewertet werden. Die Regenerationsdauer wird über die Messung des CO-Peak im unteren Diagramm ermittelt. Zur näheren Beschreibung der Randbedingungen während der Regeneration wird die Messung der Abgastemperatur vor Filter aus dem zweiten sowie der Sauerstoffgehalt des Abgases aus dem unteren Diagramm in Kombination mit dem ebenfalls aufgezeichneten Luftmassenstrom herangezogen.



**Abbildung 14: Ablauf einer Regeneration**

So kann die Regeneration anhand der für eine Verbrennung wichtigen Randbedingungen Umgebungstemperatur und  $O_2$ -Angebot bewertet werden. Das Druckniveau während der Regeneration wird in reaktionskinetischer Hinsicht nicht näher betrachtet.

### 6.3.1 Prüfstanduntersuchungen 1,8 m<sup>2</sup> - Filter

Nach anfänglichen Versuchen am Motorprüfstand wurden die Untersuchungen im Rahmen des DBU-geförderten Projektes intensiviert, um eine theoretisch besser abgesichertes Gesamtverständnis der thermoelektrischen Regeneration zu erlangen. Um eine fundierte Aussage zur Dauerbetriebssicherheit des Systems machen zu können wurde das System in seiner Grundkonfiguration mit dem 1,8m<sup>2</sup> - Filter auf einem Hot - Shake - Tester überprüft.

#### 6.3.1.1 Motorprüfstand

Zu Beginn des Projektes wurden am Prüfstand mit dem PKW-Motor grundlegenden Untersuchungen durchgeführt, um ein besseres Verständnis zum Funktionsverhalten der thermoelektrischen Regeneration zu erlangen.

Aus den ersten Voruntersuchungen war zu vermuten, dass die Wärmestromdichte und die prozentuale Umschlingung des Filters mit den Heizelementen einen deutlichen Einfluss auf das Regenerationsergebnis haben würden. Daher wurden Versuche mit Prototypenheizelementen (Länge 150 mm) durchgeführt, von denen drei Heizelemente den Filter am gesamten Umfang umschließen können. In Längsrichtung des Filters wurden solchen ringförmigen Heizelementgruppen einmal mit 5 mm und einmal mit 10 mm Abstand zueinander angeordnet.

Die Ergebnisse zeigen das übliche Verhalten eines mit zunehmendem Luftmassenstrom (LL → 2500/40 → 4000/40) besser werdenden Regenerationsgrades. Weiterhin zeigt sich bei einer Umschlingung von 67 % eine geringe Verschlechterung des Regenerationsgrades. Wird der Abstand der Heizelemente untereinander von 10 mm auf 5 mm reduziert (Änderung der Breite des Heizelementrings von 20 mm auf 10 mm) führt diese insbesondere im Leerlauf zu einer deutlichen Verschlechterung der Ergebnisse.

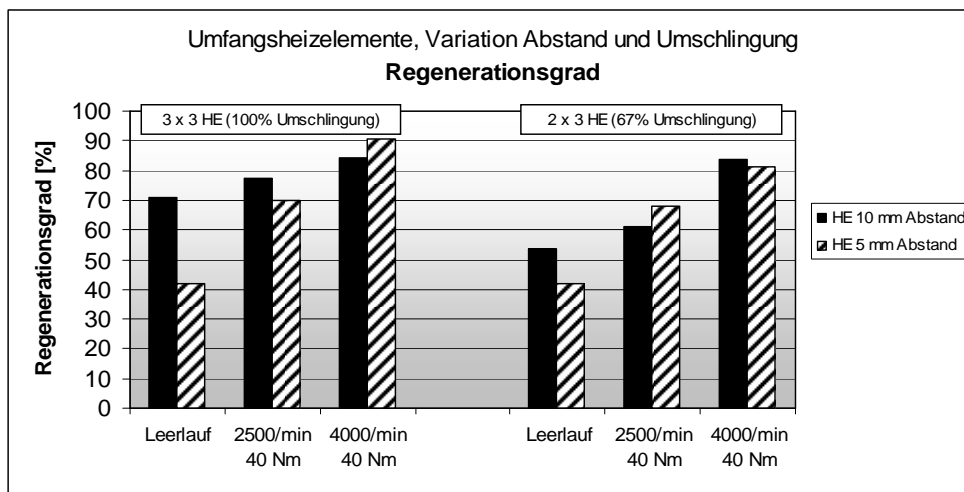


Abbildung 15: Regenerationsgrad mit verschiedenen Heizelementanordnungen

Im Leerlauf liegen wegen des geringen O<sub>2</sub>-Angebots und der niedrigen Temperaturen die ungünstigsten Bedingungen für die Regeneration vor. Daher wirkt sich hier die Reduzierung der bestrahlten Fläche um die Hälfte trotz verdoppelter Wärmestromdichte sehr negativ auf den Regenerationsgrad aus. Bezüglich der relativen Regenerationsdauer können keine gravierenden Unterschiede festgestellt werden,

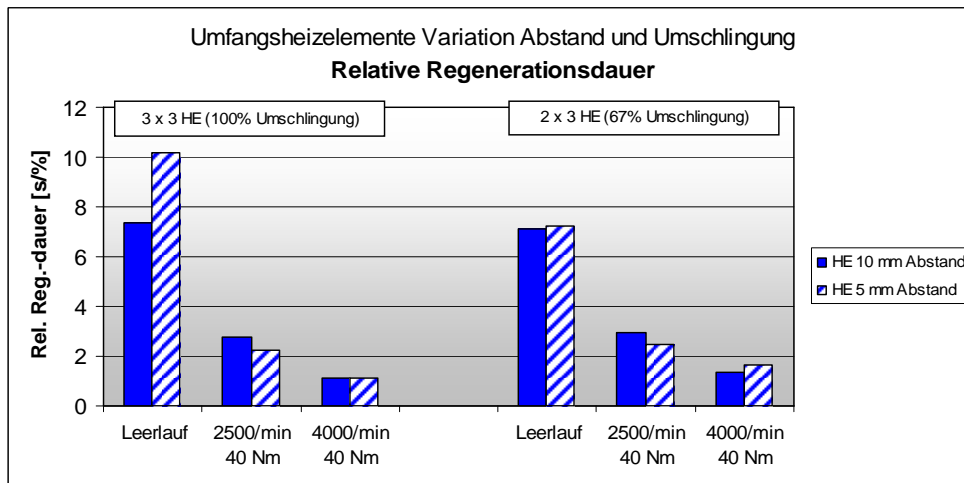


Abbildung 16: Relative Regenerationsdauer mit verschiedenen Heizelementanordnungen

da die Unterschiede im Leerlauf mit 5 mm Heizelementabstand als singuläres Ergebnis keine hinreichende Aussagekraft haben. Dieser Effekt wurde nicht weiter untersucht, da die Variante mit dem geringen Heizelementabstand aufgrund der deutlich schlechteren Resultate beim Regenerationsgrad für die praktische Anwendung nur von untergeordneter Bedeutung ist.

Weitere Grundlegende Untersuchungen wurden zur Positionierung der Heizelemente (100% Umschlingung, Abstand der HE untereinander 10 mm) in Längsrichtung

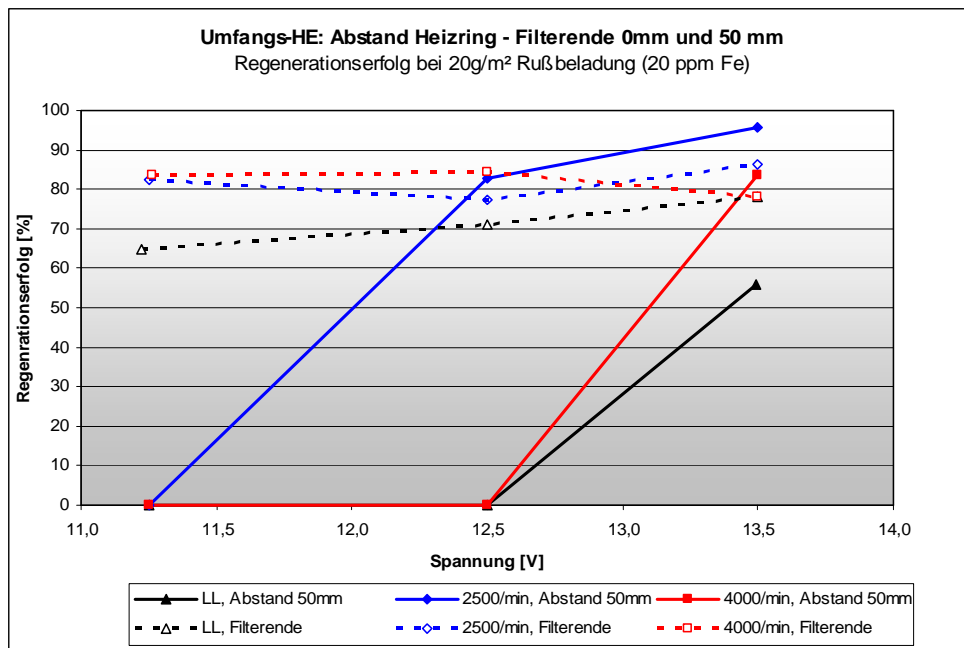


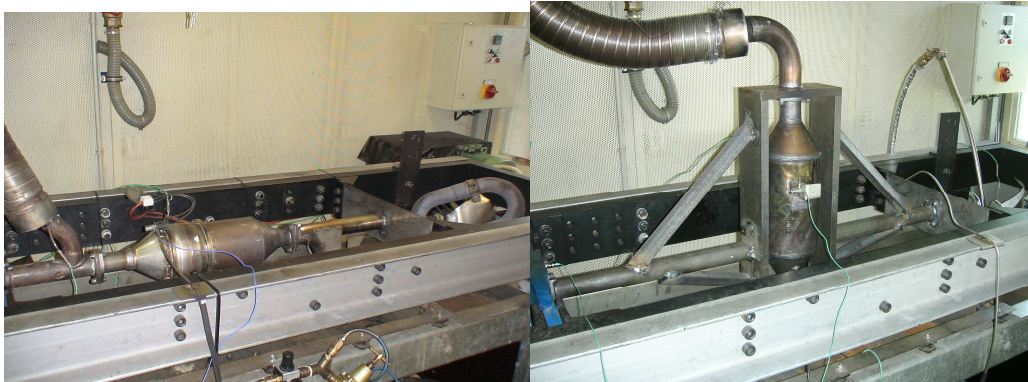
Abbildung 17: Regenerationserfolg in Abhängigkeit von der HE - Position

auf dem Filter durchgeführt. Dazu wurden ein „Heizflansch“ direkt am Ende des Filters und in der zweiten Versuchsreihe mit einem Abstand von 50 mm vom Filterende untersucht. Die Ergebnisse zeigen mit geringer werdender Wärmestromdichte, hier realisiert durch eine niedrigere Oberflächentemperatur der Heizelemente, einen deutlichen Abfall des Regenerationsgrades bei Entfernung vom Ende des Filters. Die Erklärung dafür ist in der Filterkonstruktion zu suchen. Da der Rücken der Filtertaschen sich vom Ende, wo alle Taschen sich berühren und im Flansch eingeschweißt sind, zum Gaseintritt in den Filter dreiecksförmig verjüngt, wird die bestrahlte Mantelfläche für die Umfangsheizelemente immer geringer. Dadurch kann die Rußschicht mit geringer werdender Wärmestromdichte nicht mehr unter allen Betriebsbedingungen gezündet werden. Aufgrund dieser deutlichen Ergebnisse bei nur 50 mm Entfernung vom Filterende wurde diese Versuchsreihe beendet und mit der Untersuchungen mit größeren Filtervarianten begonnen. Die Filtergröße 1,8 m<sup>2</sup> wird weiter im Fahrversuch für die PKW - Applikationen eingesetzt.

### 6.3.1.2 Hot – Shake – Prüfstand

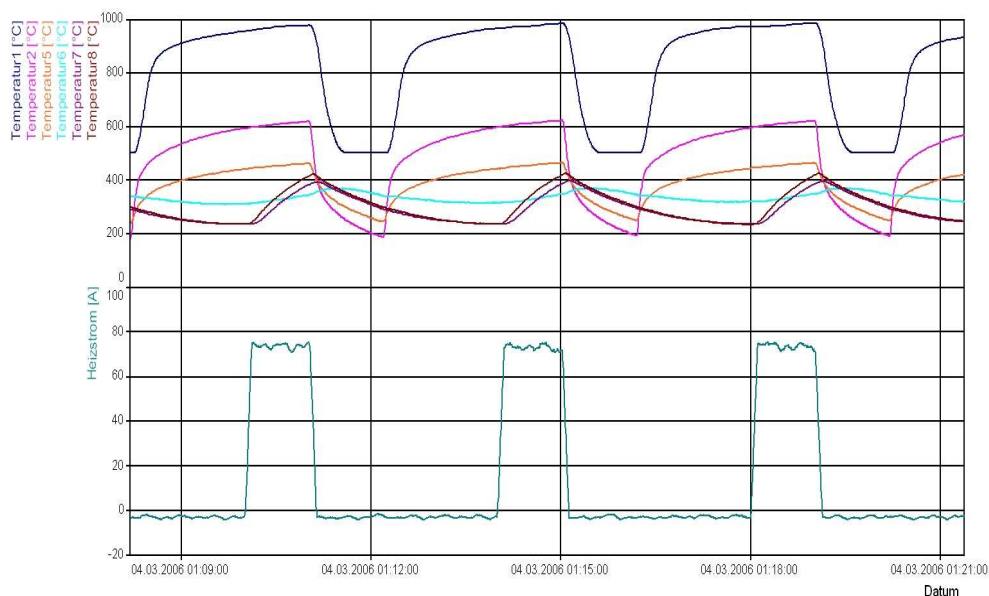
Zur Überprüfung der mechanischen Dauerhaltbarkeit des Systems wurden Versuche auf einem Hot – Shake – Prüfstand durchgeführt. Dabei wurden die kompletten Filter in der nachfolgend beschriebenen Prozedur über je 1000 Zyklen (etwa 66 h) auf dem HJS Hot – Shake – Prüfstand in je einem Versuch in horizontaler und vertikaler Richtung getestet.

Das SMF<sup>®</sup>-System mit 2 Heizsegmenten zu je 3 Heizelementen wurde während der gesamten Versuchsdauer mit einer Beschleunigung von 10 g bei einer Frequenz von ca. 170 Hz horizontal, bzw. ca. 150 Hz vertikal, beaufschlagt. Die unterschiedlichen Frequenzen resultieren bei diesem als Feder – Masse – Schwinger ausgeführten Hot – Shake – Prüfstand aus den verschiedenen Massen der Prüfstandsbaufbauten. Nach dem Brennerstart wurde das System mit simuliertem Motorabgas aus einem Brenner durchströmt und dabei aufgeheizt. Nach 2 Minuten wurden die Heizelemente für eine Minute zugeschaltet (U = 13,2±0,3 V). Bei Zykluslaufzeit 3 Minuten wurde die



**Abbildung 18: Aufbau der Filtersysteme auf dem Hot – Shake – Prüfstand**

Abkühlphase (Dauer 1 Minute) gestartet (d.h. Brenner aus, elektrische Heizelemente aus und Kühlung mit Druckluft durch den Brenner an). Die Brennerleistung wurde so gewählt, dass die Abgasaustrittstemperatur auf etwa 400°C gehalten wird. Auf das Ende der Abkühlphase folgt ein erneuter Brennerstart verbunden mit einem Abschalten der Kühlluft.



**Abbildung 19: Versuchsablauf Hot – Shake – Tests**

In beiden Versuchen wurde bis zum Erreichen der 1000 Zyklen über die gesamte Laufzeit keine Abweichung der Stromaufnahme der Heizelemente festgestellt. In der abschließenden Funktionsprüfung wurde die Oberflächentemperatur aller Heizdrähte überprüft. Da die Systeme diese Prüfprozedur erfolgreich abgeschlossen

haben, kann von einer genügenden Dauerhaltbarkeit der Systeme im Feld ausgegangen werden.

### 6.3.2 Motorprüfstanduntersuchungen 2,75 m<sup>2</sup> - Filter

Bei dem Filter mit 2,75 m<sup>2</sup> handelt es sich um eine verlängerte Variante des ursprünglichen 1,8 m<sup>2</sup> - SMF. Durchmesser und genereller Aufbau sind identisch, lediglich die Länge der Filtertaschen wurde von 250 mm auf 385 mm vergrößert. Daher wurde diese Filtervariante nicht in der Ausführlichkeit untersucht, wie die Ursprungsausführung. Hier wurde lediglich das Regenerationsverhalten anhand des Regenerationsgrades, der Zünd- und Regenerationsdauer bei verschiedenen Additivkonzentrationen untersucht.

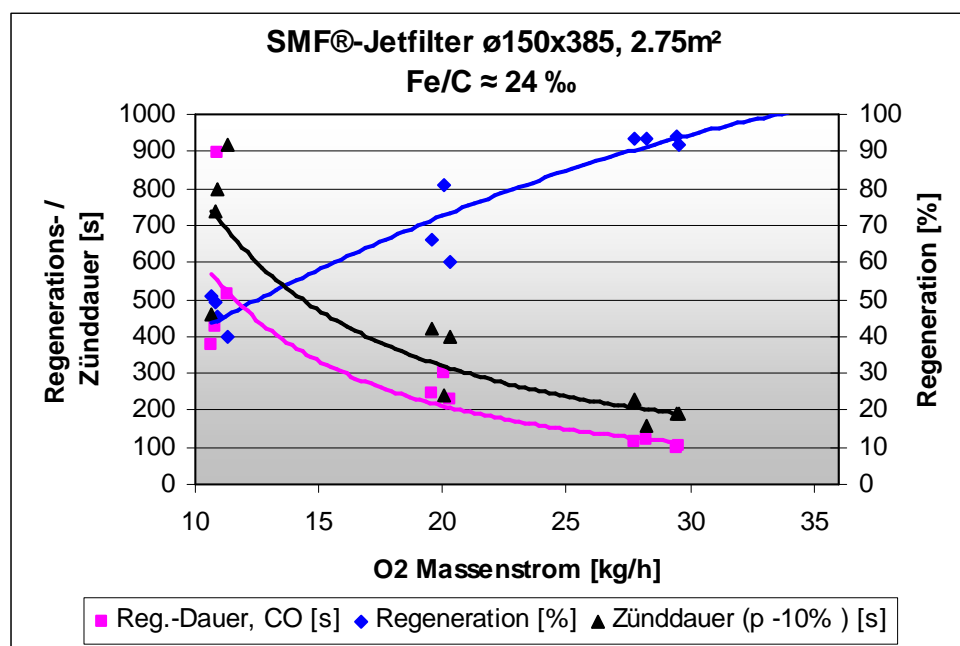


Abbildung 20: Regenerationsverhalten 2,75 m<sup>2</sup> - Filter mit Fe/C-Verhältnis 24 ‰

Die Ergebnisse aus den Regenerationsversuchen mit der üblichen Additivkonzentration von 20 ppm Eisen im Kraftstoff, die in diesem Fall einem Fe/C-Verhältnis von 24 ‰ auf dem Filter entsprechen, zeigt Abbildung 20. Wie bei allen Versuchen mit SMF mit thermoelektrischer Regeneration kann ein deutlicher Anstieg des Regenerationsgrades und eine ebenso klare Reduzierung der Regenerations- und Zünddauer mit steigendem Sauerstoffangebot im Abgas festgestellt werden.

Die Versuchsergebnisse mit anderen Additivkonzentrationen ergaben bei dieser integralen Auswertung keine deutlich anderen Aussagen. Bei etwas detaillierterer Betrachtung der Temperaturen im Filter können insbesondere bei den Motorbetriebspunkten mit niedrigerem Abgas-O<sub>2</sub>-Gehalt Unterschiede der Exothermen gemessen werden. Bei dieser Art der Auswertung wird die Temperatur während der Regeneration an verschiedenen Stellen im Filter gemessen. Das Diagramm zeigt die Werte der jeweils maximalen lokalen Änderung pro Zeit von der Temperatur vor Beginn bis zum jeweiligen Spitzenwert während der Regeneration an der entsprechend Messstelle im Filter. Hier zeigt sich, dass durch eine erhöhte Additivkonzentration in beschränktem Maße die Reaktivität des Rußes gesteigert werden kann, was sich



bei diesem Regenerationsverfahren insbesondere unter ungünstigen Randbedingungen zeigt.

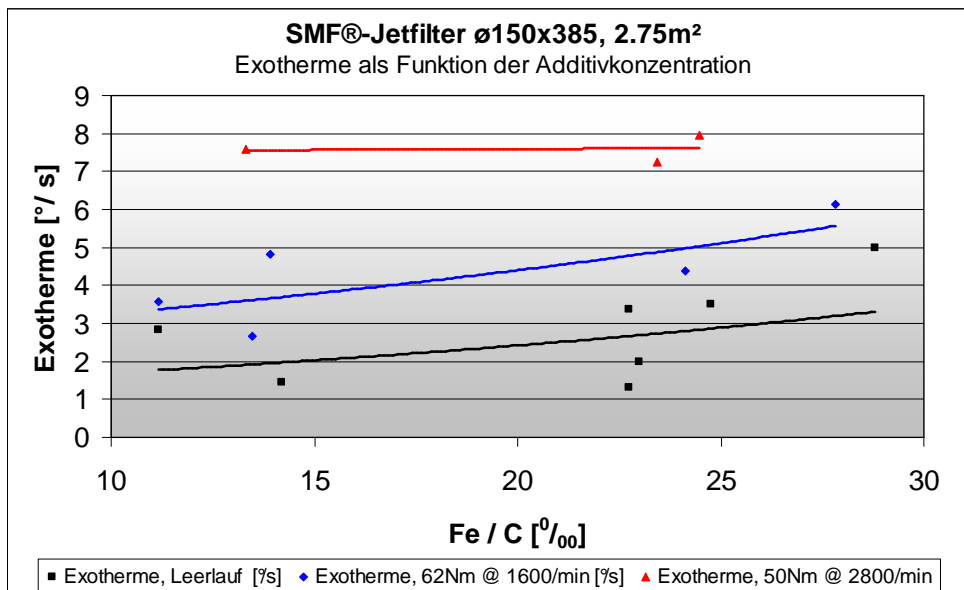


Abbildung 21: Exothermen 2,75 m<sup>2</sup> - Filter bei verschiedenen Additivkonzentrationen

Die weitere Erprobung dieser Filtervariante wird im Fahrversuch mit Lieferwagen durchgeführt.

### 6.3.3 Motorprüfstanduntersuchungen 3,8 m<sup>2</sup> - Filter

Da es sich bei der 3,8 m<sup>2</sup> - Ausführung um eine neue Filtervariante handelt werden ausführlichere Versuche durchgeführt, um das Regenerationsverhalten beurteilen zu können. Der 3,8 m<sup>2</sup> Filter hat einen Umfang von 597 mm im Gegensatz zu den 471 mm der 1,8 m<sup>2</sup> - und 2,75 m<sup>2</sup> - Varianten. Da für diese Filter dieselben Heizdrähte (Länge 2 x 205 mm) eingesetzt werden sollen, ändert sich die Umschlingung von 84 % auf 66 % bei dem größeren Filter. Daher wird insbesondere das Zünd- und Durchbrandverhalten des Rußes näher untersucht.

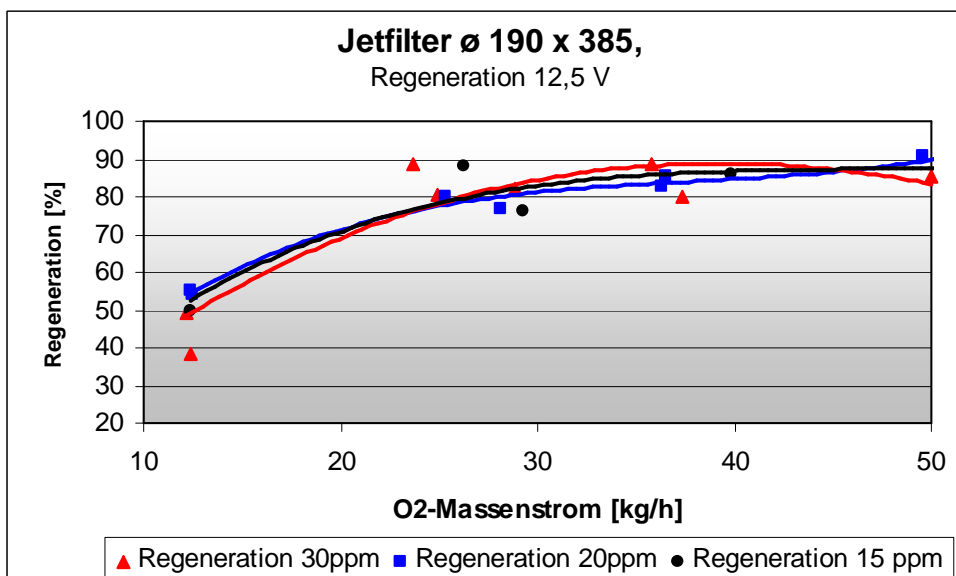


Abbildung 22: Regenerationsgrad 3,8 m<sup>2</sup>-Filter bei verschiedenen Additivkonzentrationen



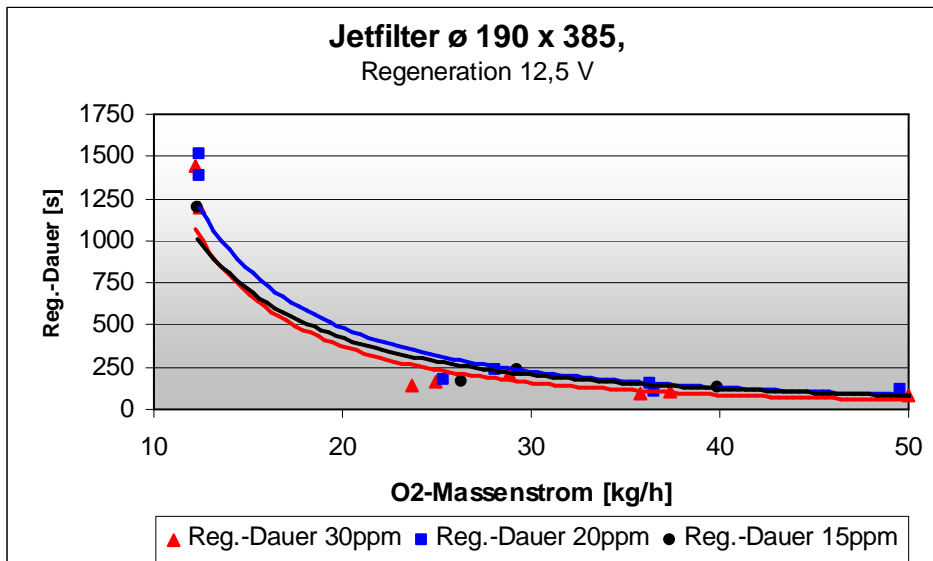


Abbildung 23: Regenerationsdauer 3,8 m<sup>2</sup>-Filter bei verschiedenen Additivkonzentrationen

Regenerationsgrad und -dauer zeigen das von den anderen Varianten bekannte Verhalten (Abb. 22), wobei bezüglich des Einflusses der verschiedenen Additivkonzentrationen bei integraler Betrachtung keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden können. Das Ergebnis zum Regenerationsgrad ist als gut zu bewerten, lediglich die lange Regenerationsdauer im Leerlaufbereich weist auf einen leicht verzögerten Russabbrand hin (Abb. 23). Die Betrachtung der Zünddauer zeigt nicht den zu erwartenden Zusammenhang, weshalb hier das Regenerationsverhalten

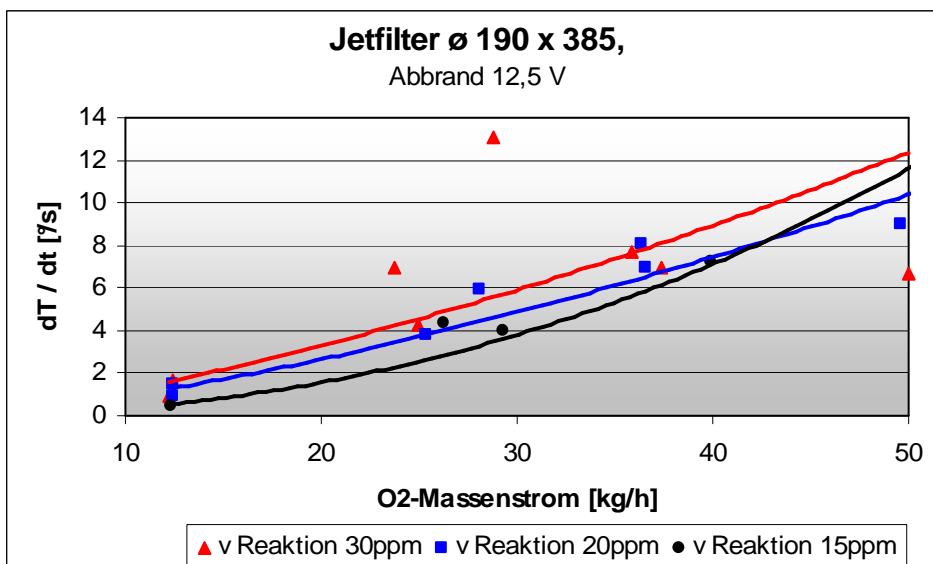


Abbildung 24: Exothermen 3,8 m<sup>2</sup>-Filter bei verschiedenen Additivkonzentrationen

Im Filter näher untersucht wird. Die Auswertung der Exothermen zeigt die erwartete Abhängigkeit von der Additivkonzentration, wenn auch die Unterschiede bei geringem O<sub>2</sub>-Angebot im Leerlauf geringer ausfallen als zu erwarten gewesen wäre. Eine hinreichend Erklärung für die lange Regenerationsdauer im Leerlauf ist damit noch nicht gegeben. Betrachtet man jedoch die Durchbrandzeiten, ermittelt als Zeitverzug zwischen der Zündung des Rußes an der ersten (direkt unter den Heizelementen) und der letzten von 12 Messstellen im Filter zeigt sich die gesuchte Einfluss der Additivdosierung.

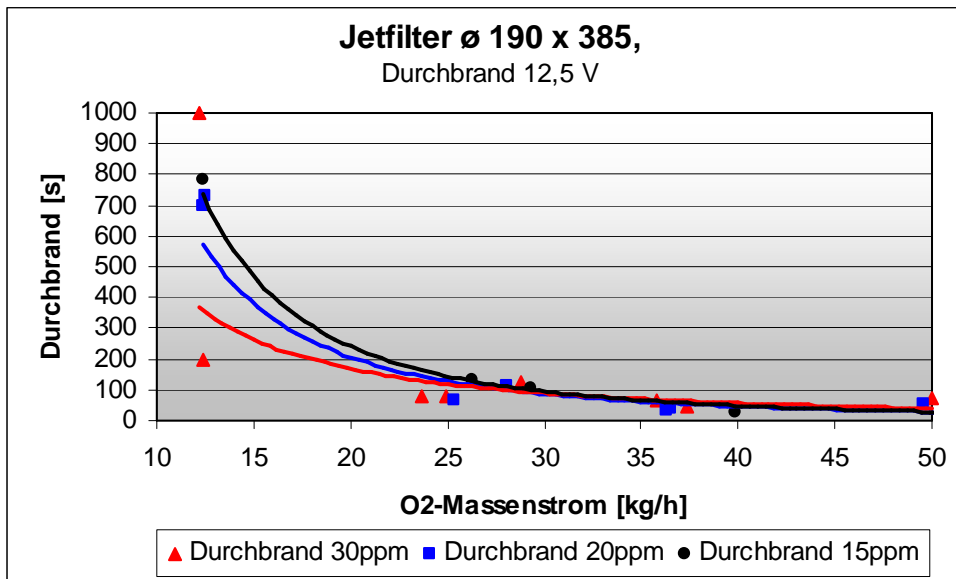


Abbildung 25: Durchzünden 3,8 m<sup>2</sup>-Filter bei verschiedenen Additivkonzentrationen

Die Untersuchungen des 3,8 m<sup>2</sup> - SMF am Motorenprüfstand haben ergeben, dass eine Regeneration des Filters, wie auch schon die Ergebnisse mit dem 1,8 m<sup>2</sup> - Filter gezeigt habe (siehe Kap. 6.3.1.1), mit einer Umschlingung von nur 2/3 des Filterumfangs noch möglich ist. Eine weitere Reduzierung der Umschlingung ist aufgrund der recht langen Regenerationsdauer nicht zu empfehlen.

Da dieser Filter gegen Ende des Projektes am Motorenprüfstand untersucht wurde liegen für diese Variante keine Ergebnisse aus dem Fahrversuch vor.

### 6.3.4 Prüfstanduntersuchungen 5,4 m<sup>2</sup> - Filter

Nach der ersten Regeneration dieser Filtervariante war das Ergebnis nicht zufriedenstellend. Der Regenerationsgrad war trotz günstiger Randbedingungen niedrig.

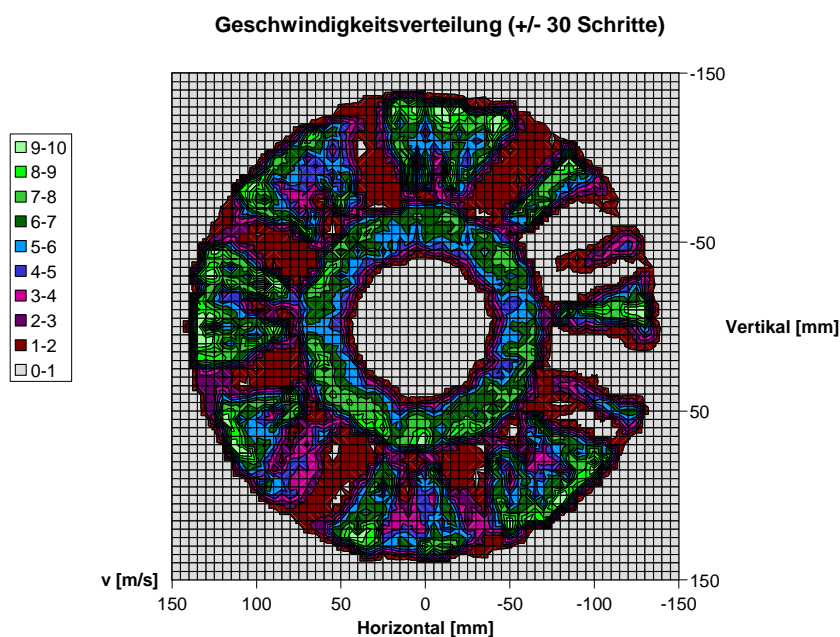
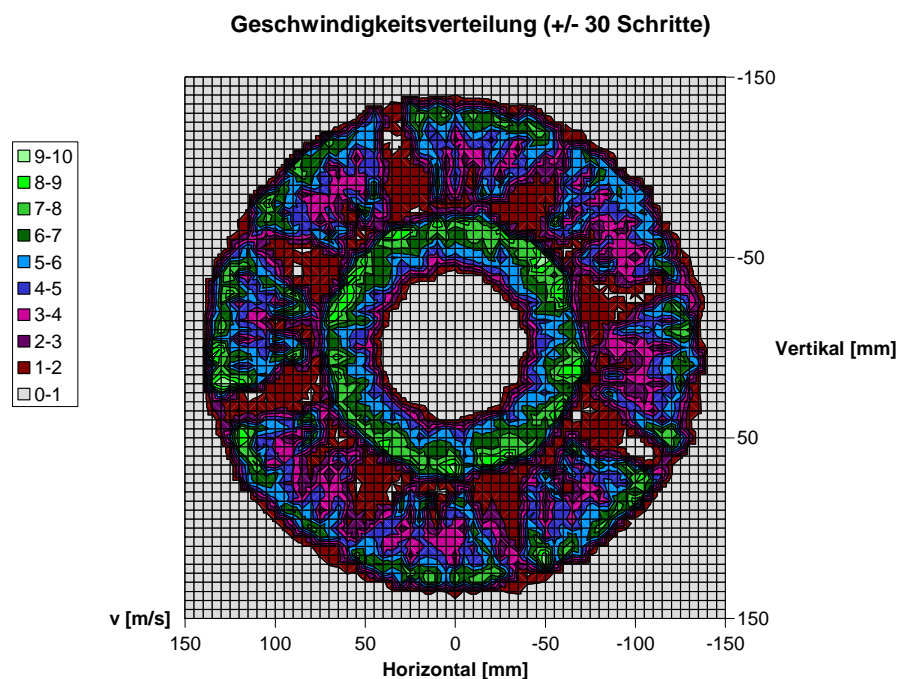


Abbildung 26: Strömungsverteilung 5,4 m<sup>2</sup> - Filter nach erster Regeneration

Eine Analyse des Regenerationsablaufes ergab, dass der Ruß auf dem inneren Jetfilter umgehend gezündet hatte und der Abbrand dort zügig vorangeschritten war. Die Zündung des Rußes auf den Satteliten war stark verzögert und die Exothermen waren sehr gering. Eine Analyse der Durchströmung des regenerierten Filters auf dem Strömungsprüfstand (siehe Abbildung 26) ergab, dass der Jetfilter vollständig frei gebrannt war, die Satelliten jedoch deutlich weniger und 2 von 8 Satteliten gar nicht durchströmt wurden. Über eine Analyse der Temperaturen im Filter während der Regeneration und eine Betrachtung des Kohlenstoffumsatzes über die Abgasanalyse ergab sich die Schlussfolgerung, dass nach dem frühen Abbrand des Rußes auf dem innen liegenden Jetfilter ein Großteil des Abgases, welches eigentlich als Sauerstofflieferant für die Russumsetzung in den Satteliten dienen sollte, ungenutzt aus dem Filter strömte. Über eine Optimierung der Anströmung des Filters (vorrangige Anströmung der Satteliten) konnte eine deutliche Verbesserung des Russabbrandverhaltens erreicht werden, wie auch die Strömungsverteilung nach einer Regeneration in Abbildung 27 zeigt.



**Abbildung 27: Strömungsverteilung 5,4 m<sup>2</sup> - Filter nach Strömungsoptimierung**

Im Anschluss an diese Untersuchungen wurde die für die Systemüberprüfung üblichen Messungen mit zwei verschiedenen Additivkonzentrationen durchgeführt.

Es wurden Versuche mit 17 ‰ und 22 ‰ Fe/C – Verhältnis durchgeführt. Aufgrund der bisher durchgeführten Messungen mit anderen Filtergrößen waren mit der Konzentration von 22 ‰ die besseren Ergebnisse zu erwarten. Die Summenergebnisse zeigen das gewohnte Bild mit annähernd 100 % Regenerationserfolg bei hohem Sauerstoffmassenstrom. Es ist jedoch festzustellen, dass der vorhandene Motor für diesen Filter eine etwas zu niedrige Leistung zu haben scheint.

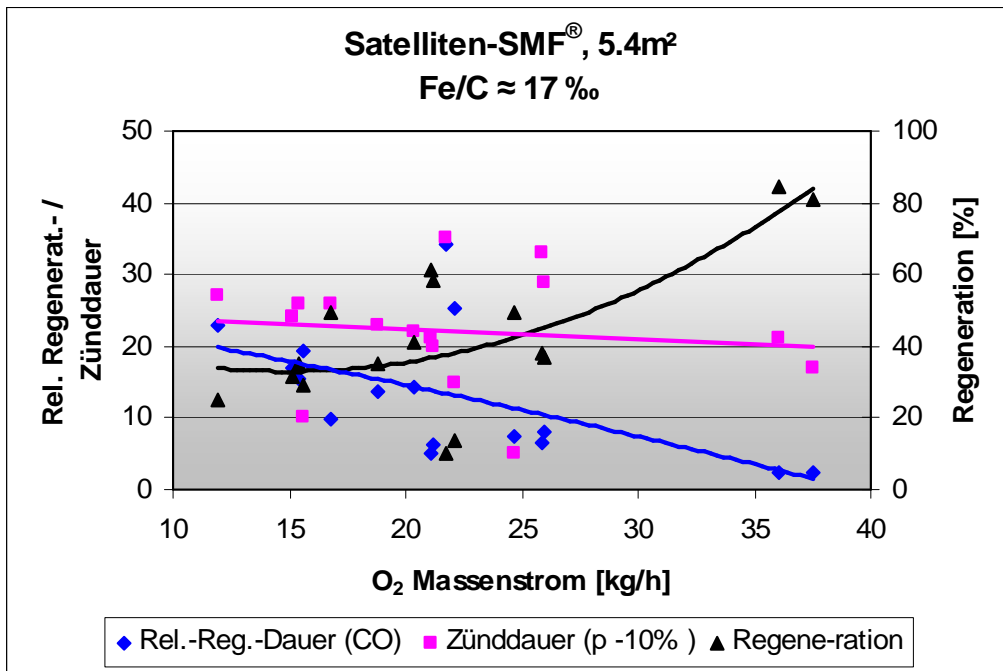


Abbildung 28: Regenerationsverhalten 5,4 m<sup>2</sup> - Filter mit 17 ‰ Fe/C - Verhältnis

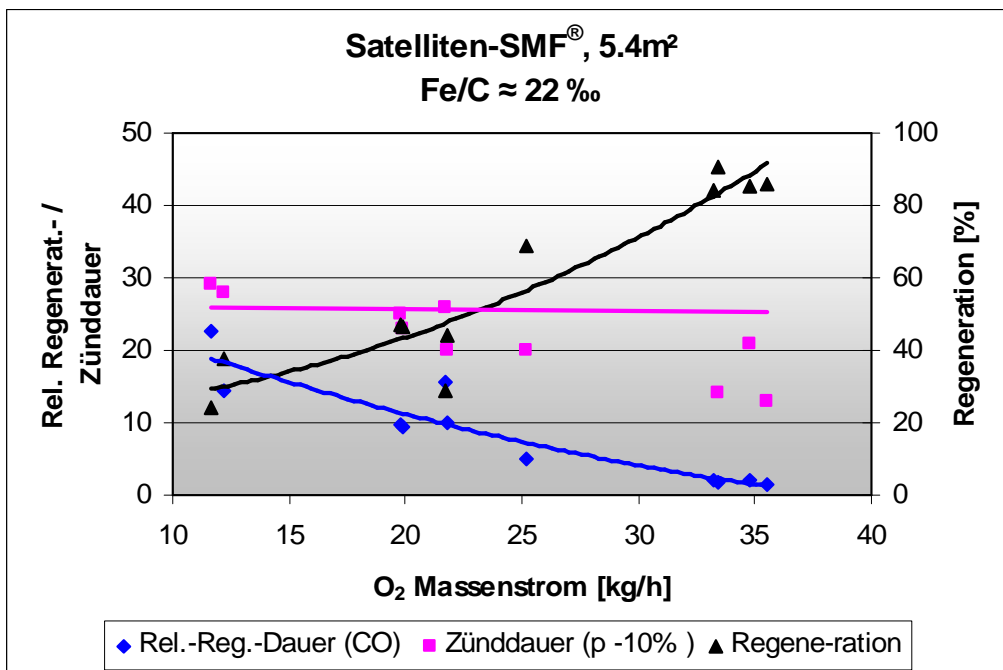


Abbildung 29: Regenerationsverhalten 5,4 m<sup>2</sup> - Filter mit 22 ‰ Fe/C - Verhältnis

## 6.4 Einfluss der Kraftstoffadditivierung

Für das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Retrofit-DPF-System mit thermoelektrischer Regeneration ist die Verwendung eines Dieseladditivs zur Reduzierung der Russzündtemperatur und zur Erhöhung der Abbrandgeschwindigkeit unbedingt erforderlich. Vorversuche am Motorprüfstand zur Erstellung des Konzeptfahrzeugs für das Umweltbundesamt haben gezeigt, dass ohne Verwendung eines Additivs, auch nicht bei Verwendung eines platinbeschichteten Filters, mittels der thermoelektrischen Regeneration ein nennenswerter Russabbrand eingeleitet werden kann. Der Einfluss der Kraftstoffadditivierung wurde hinsichtlich verschiedener Dosierstrategien im Fahrzeug und bezüglich der Wirksamkeit verschiedener Additive am Motorenprüfstand untersucht.

### 6.4.1 Untersuchung verschiedener Dosierstrategien im Fahrversuch

Je nach Art der Einbringung des Additivs in den Kraftstoff kann zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Dosiersystemen unterschieden werden.

Wird der Kraftstoffzusatz sobald der Motor läuft fortlaufend, was auch getaktet geschehen kann, dem Kraftstoff zugefügt handelt es sich um einen kontinuierlichen Dosiervorgang. Die Additivkonzentration ist dabei direkt nach einem Tankvorgang gering und steigt aufgrund der zu Kühlungszwecken umlaufenden Kraftstoffmenge immer weiter an. Um eine bestimmte mittlere Additivkonzentration im Kraftstoff einzustellen, ist es erforderlich, die zugefügte Additivmenge entsprechend dem Verhältnis von Kraftstoffvor- und Kraftstoffrücklauf zu bestimmen. Dieses Verhältnis ändert sich nicht nur von Fahrzeugtyp zu Fahrzeugtyp, sondern auch in Abhängigkeit vom Fahrprofil (hohe Last wenig, niedrige Last viel Kraftstoffrücklaufmenge). Abbildung 30 zeigt beispielhaft den Verlauf der Eisenkonzentration im Kraftstoff bei einer kontinuierlichen Dosierung.

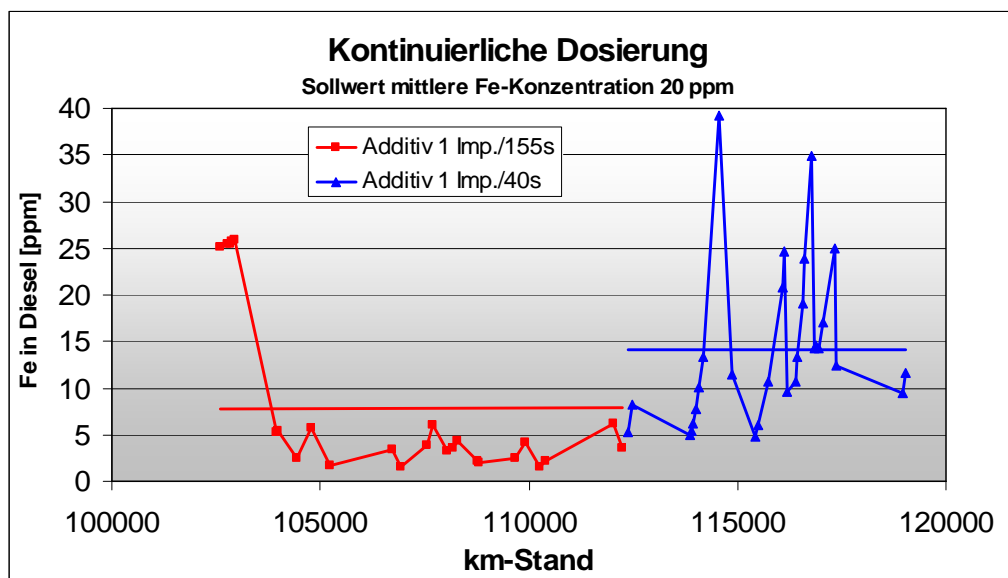
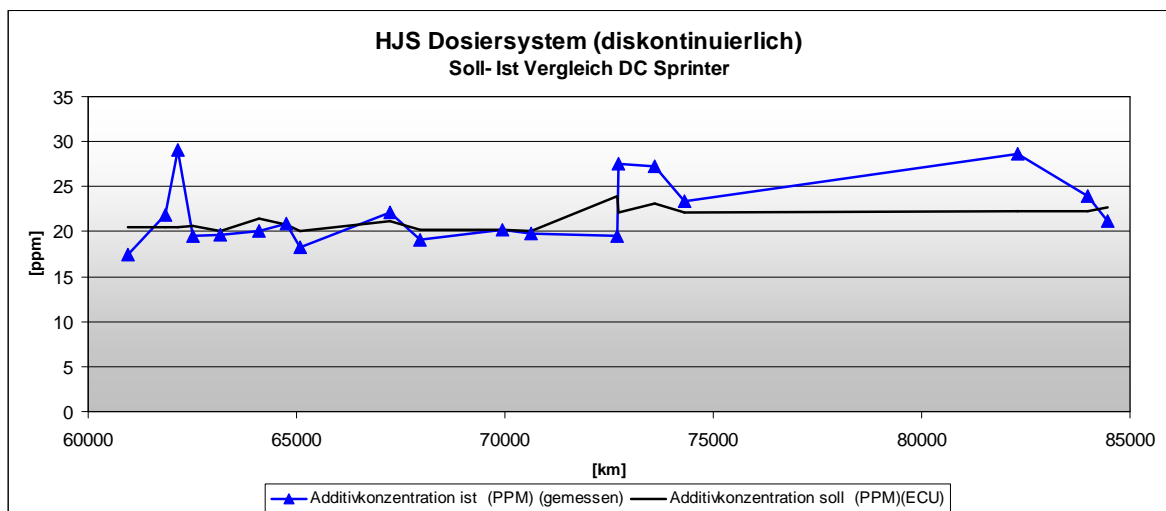


Abbildung 30: Additivgehalt im Kraftstoff bei kontinuierlicher Dosierung

Entsprechend der Vorgaben für das System wurde die Taktzeit auf 1/155s eingestellt, um eine mittlere Additivkonzentration von 20 ppm Fe zu erzielen. Nachdem auch über mehrere Tankvorgänge nur eine mittlere Additivkonzentration von etwa 5 ppm (7,5 ppm inkl. Anfangsmessungen vor dem ersten Tanken) gemessen werden konnte, wurde die Taktfrequenz auf 1/40s erhöht, um den mittleren Additivgehalt auf ca. 20 ppm zu erhöhen. Die nachfolgenden Kraftstoffanalysen ergaben einen gemittelten Additivgehalt von 14 ppm mit extremen Schwankungen der Einzelwerte.

Wegen der extremen Schwankungen des Additivgehaltes im Kraftstoff sowie der von Applikation und Fahrbedingungen abhängigen Einstellung der Taktfrequenz ist eine derartige Dosierstrategie in Kombination mit dem SMF-AR-System nicht zielführend, da eine immer erforderliche Mindestadditivkonzentration nur über eine extreme Überdosierung sichergestellt werden kann.

Bei einem System mit diskontinuierlicher Dosierung wird nach jedem Tankvorgang die zugetankte Kraftstoffmenge ermittelt und anschließend die dementsprechende Menge Additiv dem Kraftstoff zugegeben. Abbildung 31 zeigt die Additivkonzentrationen im Kraftstoff bei Verwendung einer diskontinuierlichen Dosierstrategie. Dort wurde etwa bei km-Stand 73.000 die Vorgabe für die Dosierrate auf 22 ppm erhöht, um ein besseres Regenerationsergebnis im verschärften Stadtdauerlauf zu erreichen. Die anfänglichen Überdosierungen sind auf starkes Schwappen des Kraftstoffs im Tank während des Stop-and-Go-Betriebs zurückzuführen und wurden ab km 83.000 durch eine angepasste Füllstandserkennung abgestellt.



**Abbildung 31: Additivgehalt im Kraftstoff bei diskontinuierlicher Dosierung**

Mit einer diskontinuierlichen Dosierung kann die für das SMF-AR-System erforderliche konstante Additivkonzentration unter allen Fahrbedingungen ohne extreme Überdosierungen sichergestellt werden, weshalb diese Strategie für den Fahrversuch eingesetzt wird. Allerdings ist auch hier über das Erstellen einer Kraftstofftankennlinie eine Applikation an jeden Fahrzeugtyp erforderlich.

#### **6.4.2 Untersuchung des Regenerationsverhaltens verschiedener Kraftstoffadditive**

Aus einem Entwicklungsprojekt zur Entwicklung eines Partikelfilters mit additivgestützter Regeneration über einen Dieselmotor [CG99] und den nachfolgenden

Untersuchungen im Hause HJS sind verschiedene Additive auf Cer- und Eisen-Basis mit einander verglichen worden. Die besten Ergebnisse konnten aufgrund der hohen Reaktivität mit Eisen- und Eisen/Platin-Additiven erzielt werden. Daher werden im Umfang dieses Projektes zwei verschiedene Eisenadditive (Ferrocen- und Nano-Eisen-basiert) und ein Platin/Cer-Additiv miteinander verglichen. Dabei dienen die Ergebnisse mit dem Ferrocen-basierten Kraftstoffzusatz als Basis, da hier sowohl aus dem Konzeptfahrzeug für das UBA, wie auch aus den Versuchen mit dem SMF-AR-System am PKW-Motor gute Erfahrungen vorliegen. Aufgrund der Zeitspanne, in der diese Versuche durchgeführt wurden, stand als Versuchsträger der Motor für leichte Nutzfahrzeuge zur Verfügung.

Untersucht wurden unterschiedliche Additivkonzentrationen im Kraftstoff, um deren Einflüsse auf das Regenerationsverhalten bei diesem Motor mit verschiedenen Kraftstoffadditiven für das SMF<sup>®</sup>-AR-System zu bestimmen. Aufgrund der komplexen Inbetriebnahme des Motors wurden die Versuche vorerst ohne AGR-Abschaltung während der Regeneration durchgeführt.

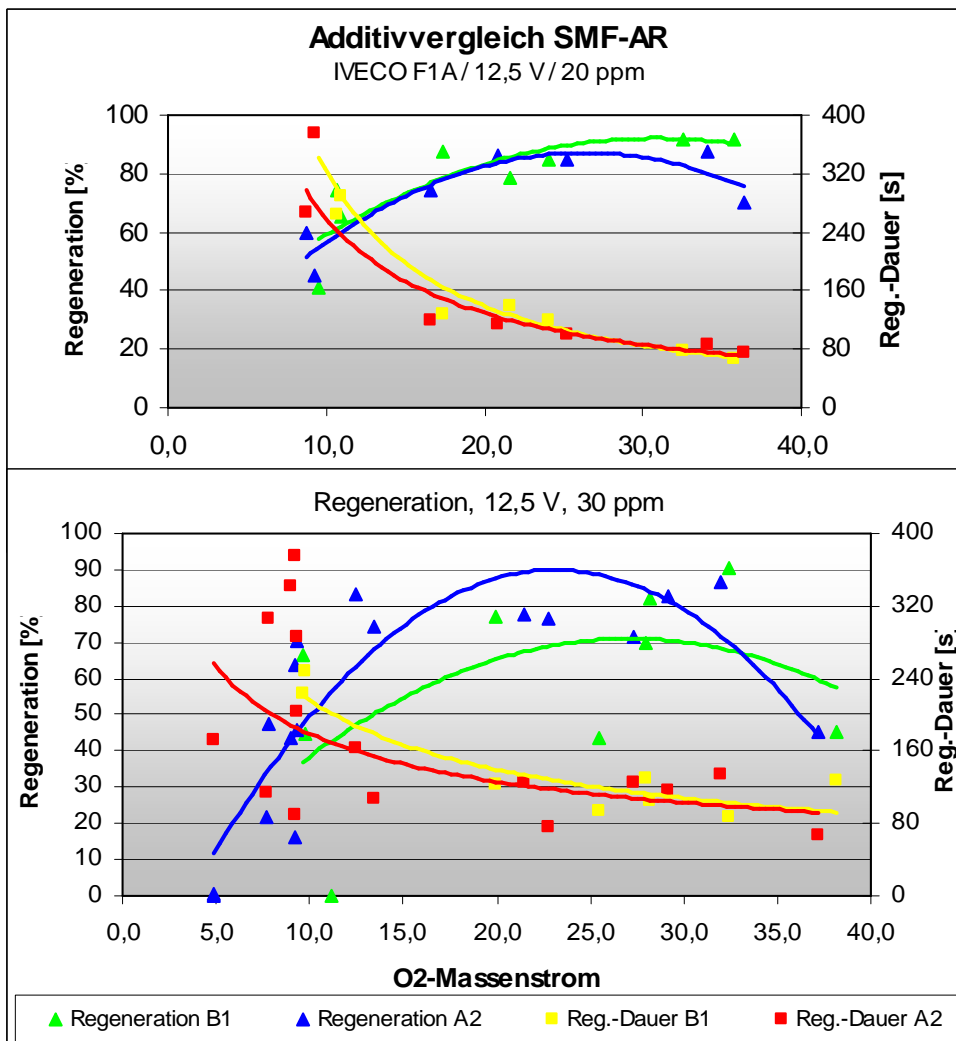
Die Ergebnisse zeigen immer die bekannte Abhängigkeit der Regenerationsergebnisse vom absoluten O<sub>2</sub>-Angebot im Abgas ( $O_2 \uparrow \Rightarrow \square_{\text{Regeneration}} \uparrow$  und  $\text{Dauer}_{\text{Regeneration}} \downarrow$ ). Eine Erhöhung des Regenerationserfolges auf 100 % wäre möglich, wenn über eine AGR-Abschaltung während der Regeneration der O<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas angehoben wird.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Additive erlauben eine Bewertung der Eignung für das SMF-AR-System.

Untersucht wurde zunächst das Nano-Eisen-Additiv (B1) im Vergleich zum derzeit standardmäßig verwendeten Additiv auf Ferrocen-Basis (A2). Bei beiden Additiven wurden bei gleichen Randbedingungen Konzentrationen von 20 ppm und 30 ppm im Kraftstoff untersucht.

Die Ergebnisse, siehe Abbildung 32, mit 20 ppm Konzentration sind für beide Additive gleich zu bewerten. Wenn auch Additiv A2 bei niedrigem O<sub>2</sub>-Massenstrom marginale Vorteile bei der Regenerationsdauer aufweist. Bei Ergebnisse mit 30 ppm Konzentration zeigen sich im besonderes wichtigen Bereich niedrigen O<sub>2</sub>-Massenstroms deutliche Vorteile für Additiv A2, sowohl hinsichtlich der Regenerationseffizienz, wie auch, vergleichbar den Versuchen bei 20 ppm, bezüglich der Regenerationsdauer.

Die Ergebnisse der einzelnen Additive erlauben eine Verwendung beider Produkte für das SMF<sup>®</sup>-AR-System, wenn auch das standardmäßig verwendete Additiv A2 geringe Vorteile aufweist.



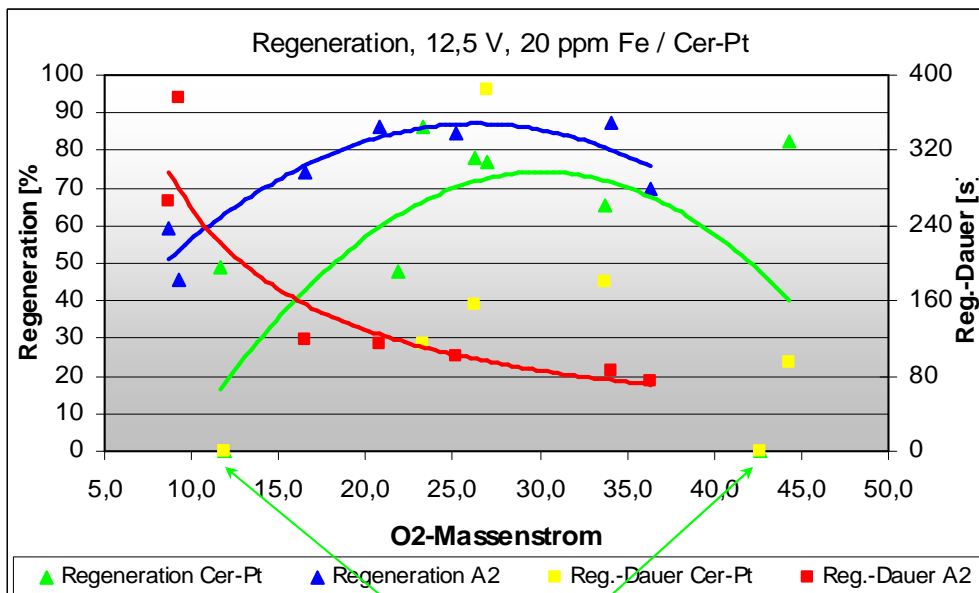
**Abbildung 32: Additivvergleich Eisen-Additive**

Das untersuchte Platin/Cer-Additiv verlangt eine „Aktivierung“ des Filters mit mehrfacher Überdosierung für die erste Kraftstofftankfüllung. Für die nachfolgende Laufzeit wird kontinuierlich mit einer konstanten, niedrigeren Dosierung gefahren.

Nach der Konditionierungsphase konnte bei den ersten beiden Regenerationsversuchen kein Russabbrand über die thermoelektrische Regeneration erzielt werden. Dieser Zustand ist für den normalen Fahrbetrieb nicht tragbar. Nach diesen Regenerationsversuchen wurden die Untersuchungen mit der zweiten Additiv-Charge fortgesetzt. Nach der oben genannten Einlaufphase ergeben sich Regenerations-erfolge, die deutlich unter denen der ebenfalls untersuchten Fe-Additive liegen.

Das Platin/Cer-Additiv kann wegen dieser Ergebnisse für die Verwendung mit dem SMF-AR-System nicht freigegeben werden. Durch intensivere Ergebnisanalysen bei diesem Additiv wurde eine deutlich niedrigere Exothermie als beim reinen Fe-Additiv festgestellt.





## Fehlregenerationen

Abbildung 33: Regenerationsverhalten Cer/Platin- zu Ferrocen-Additiv

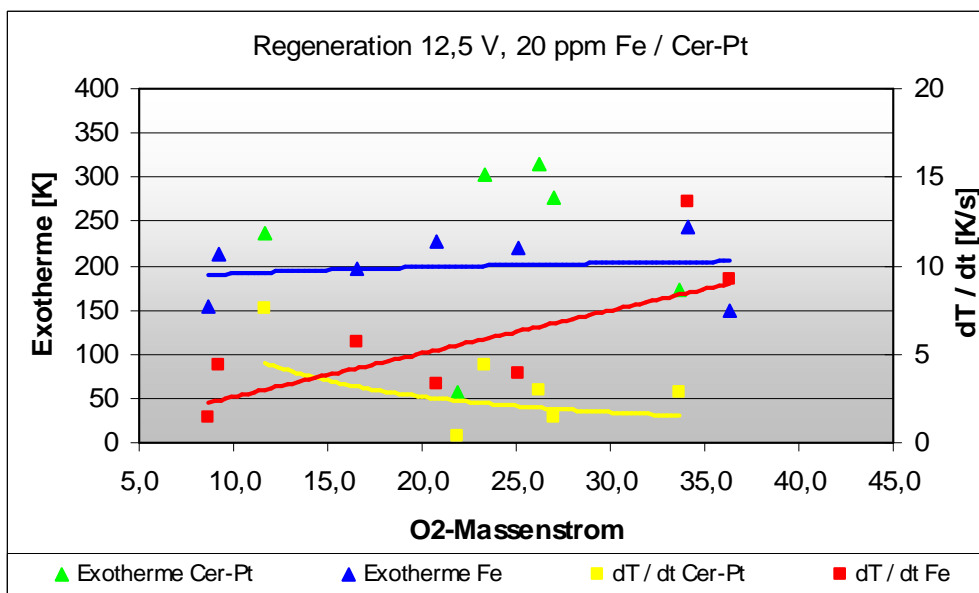


Abbildung 34: Exothermieverhalten Cer/Platin- zu Ferrocen-Additiv

Die erzielte Temperaturerhöhung ist auf vergleichbarem Niveau wie bei dem Eisenadditiv. Die Reaktionsgeschwindigkeit ( $dT/dt$ ) ist aber etwa um den Faktor 3 – 4 niedriger als bei Eisen, was wiederum für einen sehr langsamen Reaktionsablauf spricht, wodurch es zur Reduzierung des zu erwartenden Regenerationserfolges kommen kann.

Diese Messwerte sprechen dafür, dass der Regenerationsvorgang im Wesentlichen auf Basis der langsamen NO<sub>2</sub>-Reaktion abläuft und dieses Additiv daher für eine diskontinuierliche Regeneration nur bedingt geeignet ist.

## 6.5. Entwicklung eines Kombisteuergerätes

Bei der Entwicklung eines Kombinationssteuergerätes sind im Rahmen dieses Projektes die Funktionen Additivdosierung, Beladungserkennung, Regenerationssteuerung, Filterüberwachung und Filterdiagnose implementiert worden.

Die Vereinigung der einzelnen Funktionsgruppen in einem Steuergerät ist durch Fahr- und Motorenversuche sowie Laboruntersuchungen optimiert worden. Durch die Vereinigung dieser Funktionen ist es möglich geworden, übergreifende Zusammenhänge und regelungstechnische Aspekte zu realisieren und zu verbessern. Zur Absicherung der Funktionssicherheit bei Fahrzeugapplikationen sind bei dem Projektpartner EMC-Test-NRW Umwelttests sowie EMV-Untersuchungen durchgeführt worden.

Die Hardware der ECU ist in folgende fünf Einheiten unterteilt:

1. in ein Netzteil zur Versorgung der internen Schaltkreise und zur Versorgung aller Sensoren bei einer Versorgungsspannung von 10 Volt bis 30 Volt,
2. in einen Leistungsteil mit zwei voll diagnosefähigen, sich selbst schützenden Endstufen zur geregelten Versorgung der elektrischen Heizungen,
3. die Prozessoreinheit mit Speicher und Echtzeituhr,
4. die Ausgangseinheit zur Ansteuerung aller Aktoren (Dosierpumpe, Fehlerlampen, AGR...) und
5. die Eingangseinheit zur Erfassung aller analogen und gepulsten Signale (Temperatur, Drehzahl, ...). Die Besonderheit der Erfassungseinheit besteht darin, dass die analogen Schaltkreise durch einen speziellen Controller auf das jeweilige Anwendungsgebiet angepasst werden können.

Die Software der ECU ist ebenfalls in fünf Blöcke aufgeteilt, und zwar

1. das Betriebssystem,
2. die Basisfunktionen,
3. die Erfassungsfunktionen,
4. die Datenverarbeitung und
5. die Ausgabefunktionen.

Das Betriebssystem ist ein Echtzeitbetriebssystem. Das Betriebssystem verwaltet die Prozessorleistung und teilt den anderen Funktionen Prozessorleistung zu.

Die Basisfunktionen steuern die internen Abläufe der ECU und stellen grundlegende Funktionen zur Verfügung (Fehlerverarbeitung, Diagnose, interne Kommunikation der intelligenten Bauteile auf der ECU und Speicherung von Daten).

Die Erfassungsfunktionen sind für die Aufnahme aller Messwerte und deren Aufbereitung zuständig. Dabei werden die Messwerte auf Plausibilität geprüft.

Die Verarbeitungsfunktionen bestehen im Wesentlichen aus Additivierungsbewertung, Beladungsbewertung, Regenerationssteuerung, Filterüberwachung und Data-logging.

Die Ausgabefunktionen sind für die Heizungsregelung, AGR-Steuerung und Dosierung verantwortlich. Diese Funktionen überwachen auch die ordnungsgemäßen Funktionen der Aktoren.

Je nach Anwendungsgebiet sind bis zu 30 Funktionen aktiv.

Nach der Festlegung der Hardware sowie der Funktionen des Steuergerätes erfolgte die Umsetzung ein entsprechendes Platinen- und Stecker und Gehäuselayout. Mit den nach diesen Vorgaben erstellten Prototypen sind dann umfangreiche Umwelttests durchgeführt worden, um die Funktionssicherheit des Steuergerätes auch unter extremen Umgebungsbedingungen abzusichern. Als Anforderung muss die elektrische Funktionalität der ECU nach jedem der nachfolgend beschriebenen Tests gegeben sein.

- Temperaturschockprüfung in Anlehnung an DIN EN 60068-2-14 Na:  
Parameter: -40°C - +105°C; 100 Zyklen je 2 x 30 min  
Ergebnis: volle Funktion während und nach dem Test; Dichtigkeit 0 mbar
- Temperaturwechselprüfung in Anlehnung an DIN EN 60068-2-14 Nb:  
Parameter: -40°C - +105°C; 35 Zyklen je 8 h  
Ergebnis: volle Funktion nach dem Test; Dichtigkeit 110 mbar
- Falltest:  
Parameter: 3 Raumrichtungen je 1x aus 1,0 m Höhe auf Beton  
Ergebnis: volle Funktion nach dem Test; Dichtigkeit 0 mbar
- Schwingungsprüfung, rauschförmig, mit Temperaturüberlagerung in Anlehnung an DIN EN 60068-2-64:  
Parameter: 3 Raumrichtungen a 8 h; -40°C - +105°C; 5 Hz bis 200 Hz, je 1 Zyklus  
Ergebnis: volle Funktion nach dem Test; Dichtigkeit 0mbar
- Mechanischer Schocktest in Anlehnung an DIN EN 60068-2-27:  
Parameter: 6 Raumrichtungen a 1000 Impulse mit 50g  
Ergebnis: volle Funktion nach dem Test; Dichtigkeit 0mbar. Zwei Gap-Pads zur Wärmeableitung sind teilweise verrutscht. Ein einfache konstruktive Änderung am Gehäuseboden kann dies in Zukunft verhindern.
- Salzsprühnebelprüfung in Anlehnung an DIN EN 60068-2-11:  
Parameter: 6 Zyklen a 24h ; +35°C  
Ergebnis: volle Funktion nach dem Test, Dichtigkeit 140mbar

Im Rahmen der Prüfungen zur elektromagnetischen Verträglichkeit wurden folgende Tests durchgeführt:

- EMV - geprüft gemäß Richtlinie 95/54 EG.
- CISPR25 (Ed.2): Leitungsgeführte und gestrahlte Störaussendung und Störfestigkeit  
Parameter: Schärfegrad 3  
Ergebnis: bestanden

- ISO10605: Elektrostatische Entladung: ESD online, Packaging and Handling  
Parameter: +/-16kV Luftentladung; +/-8kV Kontaktentladung  
Ergebnis: bestanden
- ISO11452 Teil 2, 5: Straßenfahrzeuge – Elektrische Störungen durch schmalbandig gestrahlte elektromagnetischer Energie  
Ergebnis: bestanden
- ISO7637 T. 1, 2, 3: Straßenfahrzeuge – Elektrische Störungen durch Leitung und Kopplung  
Ergebnis: bestanden

### 6.5.1 Kraftstoffadditivierung

Dem Kraftstoffinhalt des Fahrzeugs wird automatisch ein Additiv beigemischt um die Reaktivität des Rußes zu verbessern. Durch eine Überwachung des Kraftstoffinhaltes mit einem geeigneten Verfahren, z.B. eines eigenen oder auch vorhandenen Füllstandsgebers, wird kontinuierlich der Kraftstoffinhalt ermittelt. Nach einer Betankung wird die Verdünnung des Additivs errechnet. Wenn die rechnerische Additivkonzentration unterhalb des Sollwertes liegt, wird während des Motorbetriebs eine Kolbendosierpumpe vom Steuergerät angesteuert und die korrekte Ausführung eines jeden Dosierimpulses überwacht.

Bei einer gestörten Füllstandserfassung wird die Dosierstrategie auf eine kontinuierliche Dosierung umgestellt.

Weitere Funktionen der Kraftstoffadditivierung sind die Anzeige der Additivreserve und die Erkennung von Fehlmessung der Tankerfassung durch Schwappen.

### 6.5.2 Beladungserkennung

Für die Filterbeladungserkennung stellt das Steuergerät eine Summe an Methoden bereit. Diese können je nach Applikation aktiviert und genutzt werden. Generell wird eine Methode so eingestellt, dass diese als Hauptregenerationsstrategie arbeitet. Zur Absicherung wird mindesten eine zweite Strategie aktiviert, die als Rückfallposition arbeitet, wenn die Hauptstrategie versagt. Ein Versagen kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Zum Beispiel können der Ausfall eines Sensors oder ungünstige Betriebszustände erkannt werden.

Für die Beladungserkennung stehen derzeit sechs verschiedene Strategien zur Verfügung:

1. Mittels eines Gegendruckkennfeldes über Drehzahl und Last (oder als Ersatz  $T_{Abgas}$ ) wird eine Beladungsgrenze überwacht. Wenn diese für eine bestimmte Zeit überschritten wird, ist eine elektrische Regeneration erforderlich.
2. Mittels Gegendruckkennfelder über Drehzahl und Last oder  $T_{Abgas}$  wird ein Beladungsbereich ermittelt. Ab der aus den Prüfstandversuchen abgeleiteten unteren Grenze ist es frühestens möglich den Ruß elektrisch zu regenerieren. Die obere Grenze definiert den Punkt für eine elektrische Regeneration, bei dem die

Russbelastung noch keine thermisch gefährdende Menge für den Filter darstellt. Um eine möglichst genaue Aussage über den Beladungszustand treffen zu können, wartet das Steuergerät auf quasistationäre Betriebszustände. Dabei werden vom Steuergerät die Abgastemperatur, der Filtergegendruck und die Drehzahl überwacht, wenn diese Parameter für einen bestimmten Zeitraum in relativ engen Grenzen stabil sind, werden diese Werte herangezogen um über die Kennfelder den Beladungsgrad, einen Filterschaden oder eine Filterüberladung festzustellen. Gleichzeitig wird anhand des jeweiligen Betriebszustand des Motors ermittelt, mit wie viel Erfolg für den aktuellen Beladungszustand eine elektrische Regeneration durchgeführt werden kann und ggf. eine Freigabe zur Regeneration erteilt.

3. Beladungsbewertung über Beladungskennfelder in Abhängigkeit von Abgasvolumenstrom (ggf. näherungsweise Bestimmung über Luftmassenmesser) und Gegendruck.
4. Dreimaliges Überschreiten eines definierten Gegendruckes, gemessen im Leerlauf bei abgeschalteter Abgasrückführung.
5. Regenerationsfreigabe nach einer definierten Fahrstrecke.
6. Das Überschreiten eines vorgegebenen Zeitintervalls mit oder ohne Berücksichtigung der Motorrussemission.

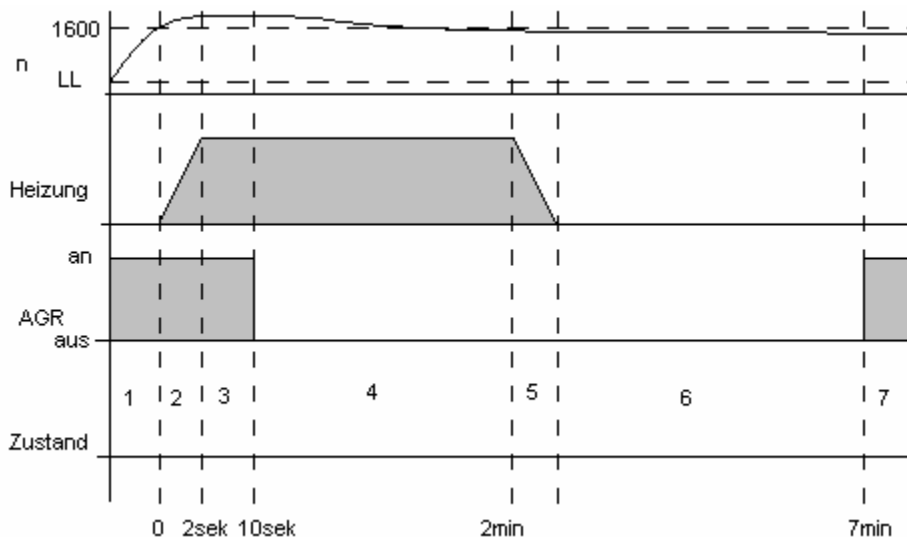
Jede der oben genannten Strategien kann unabhängig für die Freigabe einer elektrischen Regeneration sorgen.

### **6.5.3 Regenerationsstrategie**

Während der bei SMF-AR-System genutzten diskontinuierlichen Regeneration wird der auf dem Filter gesammelte Ruß unter Nutzung des im Abgas des Dieselmotors enthaltenen Restsauerstoffs verbrannt. Eine Regeneration kann durch das Ansteigen der Abgastemperatur über etwa 400°C oder durch die elektrische Strahlungsheizung in dem SMF-AR-Filter erfolgen. Die Strahlungsheizung besitzt zwei Heizkreise mit einer Leistungsaufnahme von zweimal 550 Watt bei 12 Volt für Jetfilter und zweimal 1200 Watt bei 24V für Satellitenfiltersysteme, das entspricht einer Stromaufnahme von 100 Ampere.

Eine elektrische Regeneration wird eingeleitet, wenn alle Startbedingungen und die Notwendigkeit einer Regeneration durch mindestens eine Beladungserkennungsfunktion (s. 6.5.2) gegeben sind. Die Regeneration läuft prinzipiell an dem in Bild 35 gezeigten Schema ab.

Startbedingungen dabei sind das einmalige Überschreiten einer Mindestdrehzahl, Mindestabgastemperatur, Mindestbetriebsspannung, Mindestlaufzeit seit der letzten Regeneration, Laufzeit seit Motorstart sowie eine Fahrmustererkennung (Drive-  
Pattern-Detection DPD). DPD ist eine statistische Auswertungsmethode, die das Fahrverhalten kontinuierlich bewertet. Damit ist es möglich, durch das frühere Fahrverhalten eine Aussage zu treffen, ob der Start einer Regeneration zum Erfolg führen kann oder eine Regeneration aufgrund eines Abschaltens des Motors unterbrochen würde.



**Abbildung 35: Regenerationsablauf SMF-AR-System**

Der Ablauf einer Regeneration durchläuft folgende Schritte und dauert insgesamt etwa 7 Minuten (siehe Bild 13):

1. Nach Regenerationsanforderung durch die Beladungserkennung waten auf die Erfüllung der Startbedingungen
2. Hochfahren der geregelten elektrischen Heizung auf den Sollwert (s. Phase 2 im Diagramm).
3. Wenn das Fahrzeug mit einer AGR ausgestattet ist, wird nach dem Erreichen der Oberflächentemperatur (ca. 900°C) der Heizung diese abgeschaltet um die Sauerstoffmenge im Abgas zu erhöhen.
4. In der nächsten Phase (4) wird der Ruß unterhalb der Heizung auf der Filteroberfläche gezündet und der Russabbrand auf der restlichen Filterfläche wird initiiert.
5. Danach wird die Heizung wieder heruntergefahren
6. Die AGR bleibt für noch 5 Minuten geschlossen um einen möglichst hohes Sauerstoffangebot im Abgas sicherzustellen und so einen bestmöglichen Russabbrand zu gewährleisten.
7. Wenn diese Schritte ohne Unterbrechung durchlaufen wurden, geht das Steuergerät wieder in den Task Beladungserkennung über.

#### 6.5.4 Notlauf und Filterdiagnose

Das Steuergerät verfügt über eine Summe an Mechanismen, um den Betrieb des Filters sicherzustellen bzw. zu überwachen.

1. Überwachung aller Sensoren und Aktoren auf elektrische Fehler und Plausibilität. Wenn durch einen gestörten Sensor die Funktion nicht mehr gegeben ist, wird für den weiteren Betrieb ein Ersatzwert benutzt und/oder für bestimmte Abläufe im Steuergerät eine alternative Strategie für die betroffene Funktion verwendet.
2. Um eine Aussage über die Filterbeladung oder eine Filterschädigung treffen zu können, wird der Filterbetriebszustand kontinuierlich durch geeignete Strategien überwacht. Bei einer bevorstehenden Überladung des Filters mit Ruß wird dem Fahrer rechtzeitig ein Signal gegeben um eine definierte Regenerationsfahrt

durchzuführen. Mit dieser Methode wird der Filter vor möglichen Schädigungen durch zu hohe thermische Belastungen geschützt.

3. Alle Fehler und Ereignisse werden in einem Fehler und Eventspeicher protokolliert.
4. Anzeige von relevanten Fehlern und Ereignissen über Fehlerlampen (MIL) oder über ein Anzeigemodul mit LCD-Display.

## 6.6. Absicherung der Ergebnisse im Fahrversuch

Zur Absicherung der Ergebnisse vom Motorenprüfstand und darüber hinaus im Wesentlichen zur Umsetzung der Strategien zur Beladungserkennung, Regenerationssteuerung sowie zur Entwicklung von Regenerationsstrategien wurden intensive Fahrversuche durchgeführt. Die ersten Themen wurden schwerpunktmäßig über Tests in PKW abgewickelt. Die leichten Nutzfahrzeuge stellen insbesondere aufgrund ihrer teilweise für die Regeneration von Partikelfiltern sehr ungünstigen Betriebsbedingungen im Lieferverkehr in der Stadt eine Herausforderung für die Regenerationsstrategie dar. Daher wurde diese im Fahrversuch mit Lieferfahrzeugen im städtischen Bereich entwickelt. Exemplarisch werden die Einsatzmöglichkeiten des 5,4 m<sup>2</sup> - Filters im Fahrversuch mit einem 7,5-t-LKW demonstriert.

### 6.6.1 PKW – Fahrversuche mit 1,8 m<sup>2</sup> Filtern

Zu Beginn der Fahrversuche wurde das System in einem Audi A4 verbaut (siehe Abbildung 37), um die erforderlichen Informationen für die Auslegung des im Rahmen dieses Projektes neu zu entwickelnden Kombi-Steuergerätes zu sammeln. Dazu wurde das Fahrzeug über ca. 39.100 km im gemischten Fahrbetrieb, wie in einem speziellen Stadtzyklus betrieben. Zur weiteren Optimierung des Steuergerätes und der Software sind diese Versuche bis zu einer Gesamtstrecke von 80.000 km fortgesetzt worden.

Basierend auf den ersten belastbaren Ergebnissen aus den Fahrversuchen mit dem Audi A4 wurde ein weiteres Versuchsfahrzeug aufgebaut, was im Wesentlichen für den Betrieb im Stadtverkehr vorgesehen war. Dieser VW Golf wurde nach der Systemapplikation (siehe Abbildung 36) etwa 6.000 Test – km bei HJS an den TÜV – Nord zur Durchführung eines reinen Stadtdauerlauf über 10.000 km übergeben.



Abbildung 36: Einbausituationen SMF – AR im VW Golf IV (links)

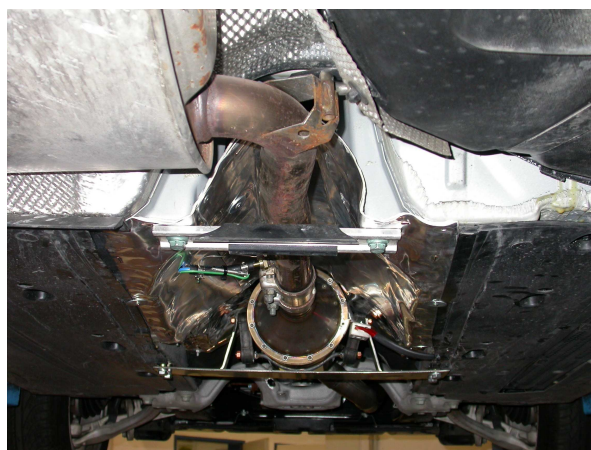
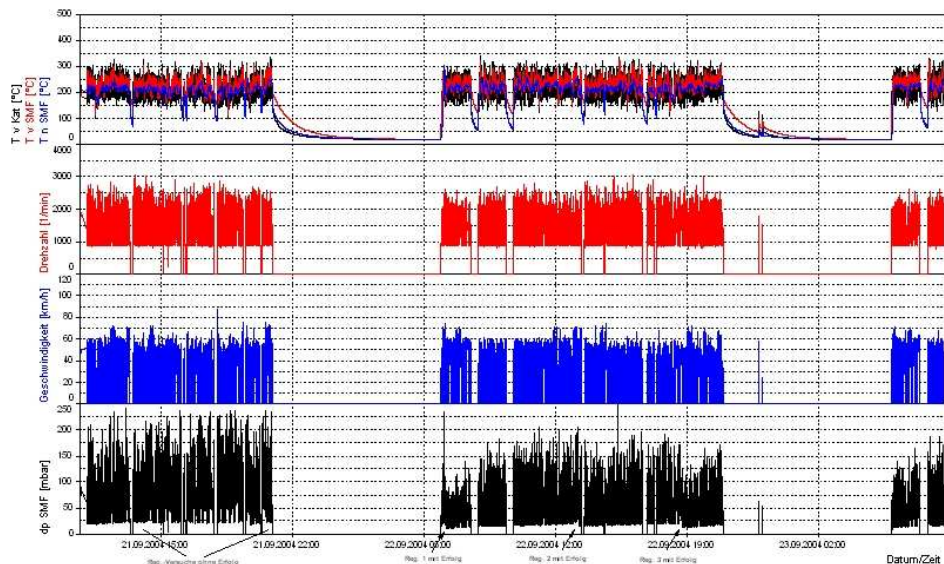


Abbildung 37: Einbausituationen SMF – AR im Audi A4 (rechts)

Einen Ausschnitt der Messdaten aus diesem Stadtdauerlauf zeigt Abbildung 38. Wichtig bei diesen Versuchen ist, dass die Abgastemperaturen immer unter 350 °C liegen, damit ausschließlich über die elektrische Heizung und nicht über die Abgastemperatur regeneriert wird.





**Abbildung 38: Betriebsverhalten VW Golf mit SMF-AR im Stadtdauerlauf**

Aufgrund der noch nicht optimierten Beladungserkennung und Regenerationsstrategie werden noch vermehrt nicht erfolgreiche Regenerationsversuche festgestellt, die jedoch über 10.000 km Stadtverkehr nicht zu kritischen Betriebszuständen für das Filtersystem oder den Motor geführt haben.

Da im Zuge anderer Entwicklungsprojekte im Hause HJS ein großer Pool an Testfahrern vorgehalten wurde, sind die weiteren Tests im Stadtdauerlauf mit diesem Fahrzeug bis zur geplanten Gesamtfahrstrecke von 105.000 km ausschließlich bei HJS durchgeführt worden.

### 6.6.2 Fahrversuche mit leichten Nutzfahrzeugen

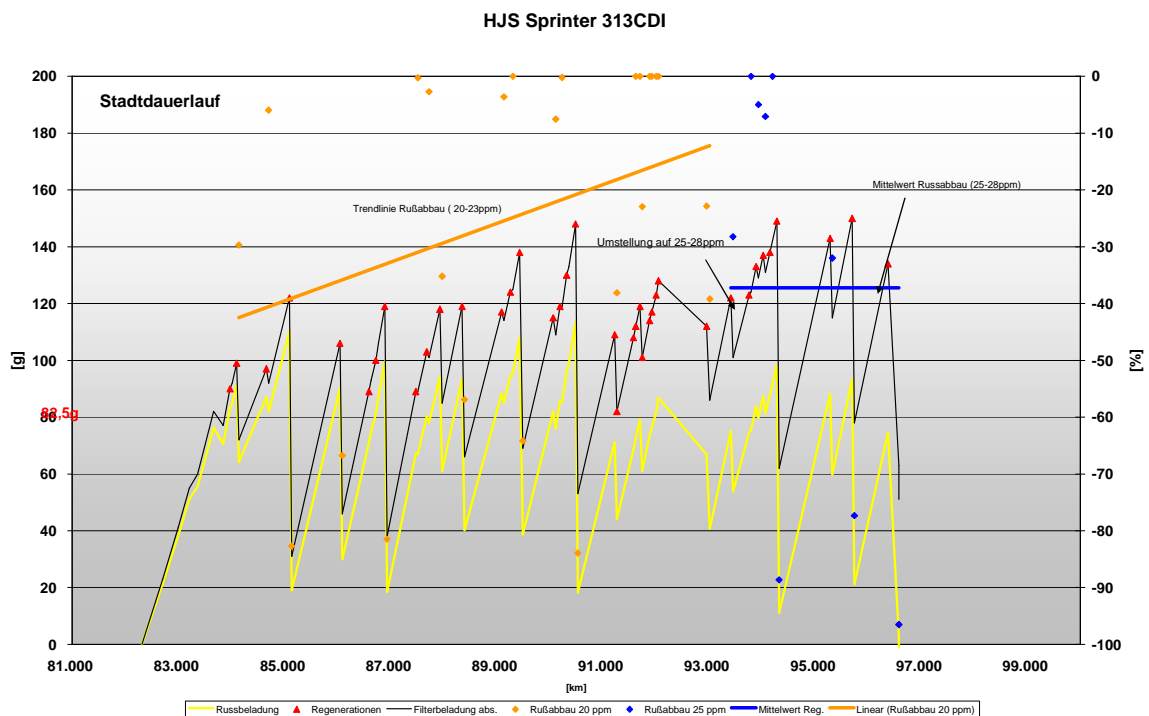
Da die ungünstigsten Bedingungen zur Regeneration von Dieselpartikelfiltern wegen des Stop-and-Go-Betriebs bei niedrigen Abgastemperaturen im innerstädtischen Lieferverkehr vorliegen, wurde der Schwerpunkt der Fahrversuche auf die Entwicklung von Beladungserkennungsmodellen und Regenerationsstrategien in diesen Anwendungen durchgeführt. Dazu wurden in Summe etwa 155.000 km vorrangig im Stadtverkehr mit leichten Nutzfahrzeugen zwischen 2,8 t und 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht absolviert.

Die wesentlichen Entwicklungen wurden mit einem 60 kW - Fahrzeug mit einem 1,8 m<sup>2</sup> - Filter und einem 95 kW Fahrzeug mit 2,75 m<sup>2</sup> - Filter durchgeführt. Zur Absicherung der erzielten Ergebnisse sind dann noch kürzere Versuchsfahrten über je ca. 15.000 km mit zwei weiteren Fahrzeugen mit 81 kW und 115 kW mit 2,75 m<sup>2</sup> Filter durchgeführt worden.

Die Entwicklung der Steuergerätelelogik wird über einen Fahrversuch im Stadtdauerlauf durchgeführt. Hierbei handelt es sich um einen Fahrzeugbetrieb mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 30 – 35 km/h bei einer zulässigen Spitzengeschwindigkeit von 70 km/h. Durch regelmäßiges Wiegen des Filters wird dabei der Beladungszustand, bzw. der Regenerationserfolg ermittelt. Über eine Berechnung der dosierten Additivmenge oder durch zwischenzeitliche Vollregenerationen des Filters kann die Beladung des Filters mit Additivasche ermittelt werden. Über empirische

risch ermittelte Korrekturfaktoren kann die Einlagerung von Ölaschen in den Filter berücksichtigt werden.

So werden nach dem Einbau des Systems in das Fahrzeug und Erstellung der Kraftstofftankkennlinie für das Additivdosiersystem zuerst die erforderlichen Kennfelder für die Russbelastung und die Regenerationssteuerung im Fahrbetrieb aufgenommen. Anschließend beginnt der Fahrbetrieb im Stadtdauerlauf, wie z. B. in Abbildung 39 bei km-Stand 82.000. Im weiteren Verlauf des Fahrversuchs zeigte sich bei diesem Fahrzeug ein noch nicht befriedigendes Regenerationsverhalten, was an der steigenden Russbelastung des Filters zu erkennen ist. Mit Umstellung der Additivkonzentration von nominal 20 ppm auf 25 ppm Eisen kann in diesem Fall eine stabile Beladung unterhalb der zulässigen thermischen Grenzbelastung des Filters erreicht werden.



**Abbildung 39: Betriebsverhalten Sprinter 313 mit SMF-AR im Stadtdauerlauf**

Das System muss nun jedoch nicht nur im kontinuierlichen Stadtbetrieb, sondern auch im Stop-and-go-Betrieb funktionieren. Dazu wurde im Rahmen dieses Projektes das so genannte DPD entwickelt. Diese Fahrmustererkennung dient dazu, die Regeneration nur dann zu starten, wenn die Motorrestlaufzeit ausreichend ist, um nach Anschalten der Heizung eine Abbrand des Rußes, der wegen des Restsauerstoffgehaltes im Abgas nur bei laufendem Motor möglich ist, zu gewährleisten. Bei DPD handelt es sich um eine statistische Methode die über eine Aufsummierung von Fahrzuständen bei denen eine Regeneration gut möglich gewesen wäre, den aktuellen Fahrzustand mit den „gelernten“ Werten vergleicht. So kann das System lernen, in einem Stop-and-go-Betrieb die Regeneration nur dann zu starten, wenn eine genügend lange Motorrestlaufzeit zu erwarten ist.

Abbildung 40 zeigt dieses Lernverhalten an dem für diese Entwicklung entworfenen „verschärften Stadtdauerlauf“. Dabei wird der übliche Stadtdauerlauf nach 10 Minuten Fahrzeit mit einer 5-minütigen Stillstandphase (Motor aus) unterbrochen. Es ist zu erkennen, dass das Steuergerät zu Beginn der Lernphase bei 72835 km direkt

vor der Stillstandszeit die Heizung anschaltet, wodurch keine Regeneration ausgelöst werden kann. Nach ca. 240 km in diesem Zyklus hat das Steuergerät genug Informationen gesammelt, um die Heizung etwa fünf Minuten vor Stoppen des Motors einzuschalten. So ist eine gute Regeneration anhand der Exothermen und dem deutlichen Gegendruckabbau zu erkennen.

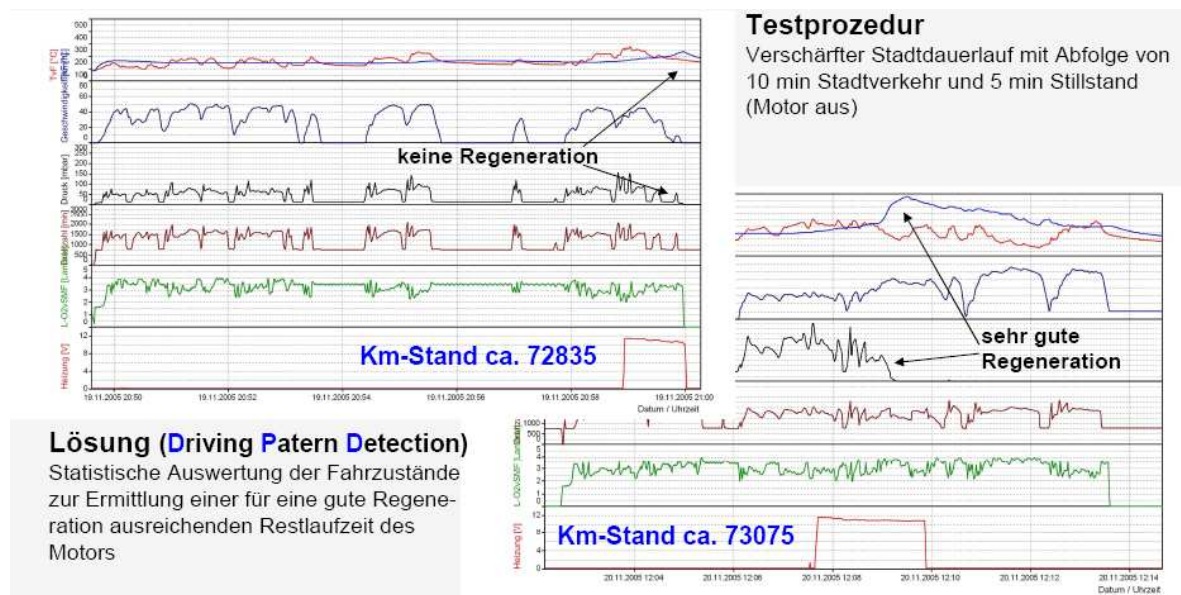


Abbildung 40: DPD für leichte Nutzfahrzeuge im verschärften Stadtdauerlauf

Wie in Abbildung 41 dargestellt, ist es mit dieser Methode möglich, die Russbelastung des Filters über lange Laufzeiten im „verschärften Stadtdauerlauf“ auf einem unkritischen Niveau, im Wesentlichen unterhalb der oberen Regenerationsschelle (82,5 g) zu halten.

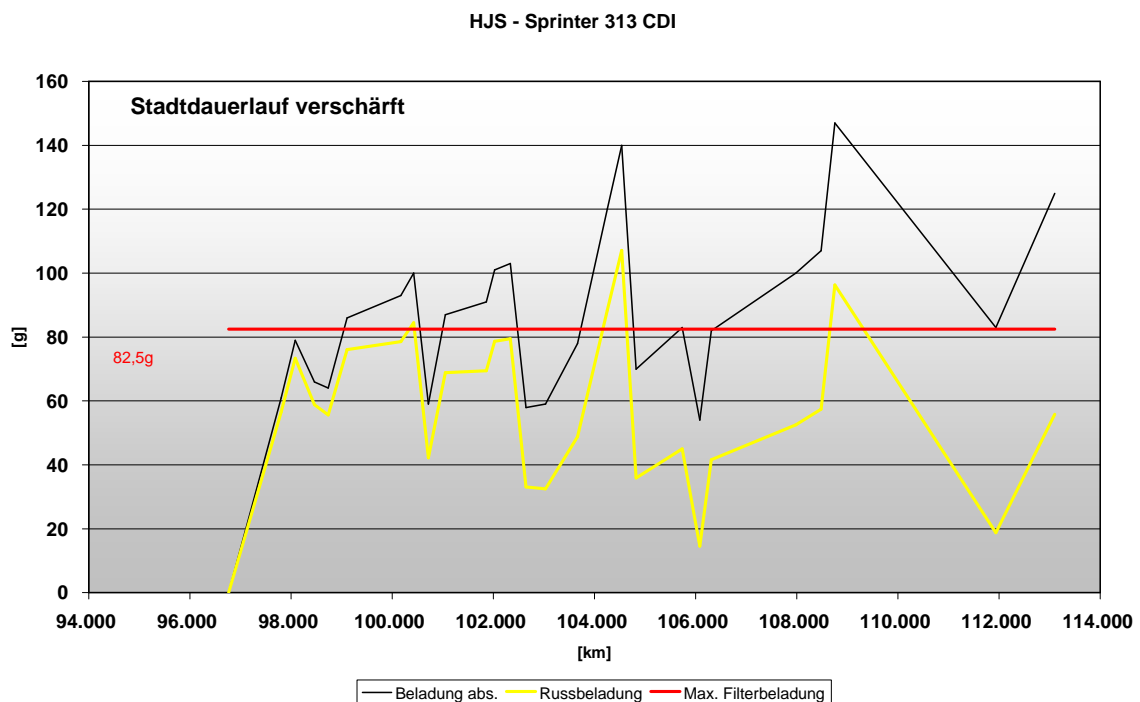


Abbildung 41: Betriebsverhalten Sprinter 313 mit SMF-AR im verschärften Stadtdauerlauf

Die Absicherung der Ergebnisse wurde über Versuchsfahrten mit je ca. 15.000 km mit zwei weiteren Fahrzeugen mit 81 kW und 115 kW mit 2,75 m<sup>2</sup> Filter durchgeführt. Dabei wurde nach dem Einbau des Versuchssystems in die Fahrzeuge die

Bedienung der Steuergeräte über Fahrten im Stadtdauerlauf durchgeführt. Nach erfolgreicher Kennfelderstellung wurde das Fahrzeug dann im verschärften Stadtdauerlauf erprobt. Beide Fahrzeuge haben diesen Test über etwa 15000 km ohne Probleme bestanden, was ein Indiz dafür ist, dass eine, auch für diesen schwierigen Anwendungsfall, ausreichende Funktionssicherheit vorhanden ist.

### 6.6.3 LKW – Fahrversuche mit dem 5,4 m<sup>2</sup> - Filter

Für diesen Stichversuch über 30.000 km wurde der 5,4 m<sup>2</sup> - Filter vom Motorenprüfstand in einen 7,5 – Tonner eingebaut um im so genannten Sauerlandzyklus,



Abbildung 42: MAN 7,5 – Tonner mit SMF – AR - System

einem Mischbetrieb aus innerstädtischem (ohne Tempo 30 – Zonen), Überland- und Autobahnbetrieb. Dabei wurde das Fahrprofil so gewählt, dass keine Abgastemperaturen über 380 °C auftraten, um ausschließlich über die elektrischen Heizelemente zu regenerieren und nicht mittels Additiv und eine Zündung des Rußes über erhöhte Abgastemperaturen zu initiieren

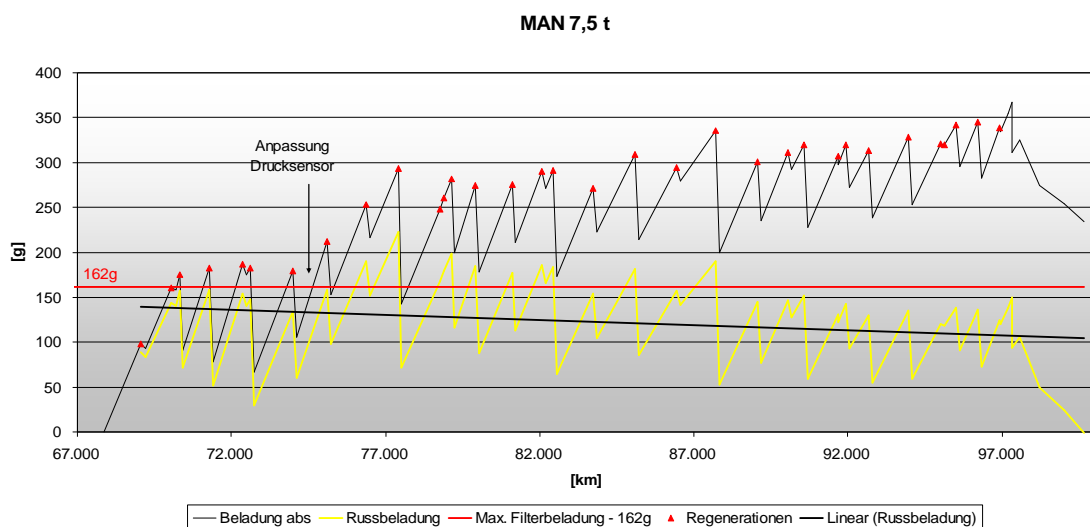


Abbildung 43: Betriebsverhalten MAN 7,5 t mit SMF-AR über 30.000 km Sauerlandzyklus

Über die geplante Versuchsstrecke von 30.000 km war das Betriebsverhalten des Systems über die gesamte Zeit unauffällig. Über die Versuchslaufzeit wurde im Mittel etwa alle 940 km eine Regeneration ausgelöst und nach einer Anpassung des Gegenruckwertes nach ca. 7500 km zur Regenerationsfreigabe sank die mittlere Russbelastung kontinuierlich, so dass über die Gesamtstrecke beim untersuchten Betriebsprofil ein gutes Funktionsverhalten des Systems festgestellt werden kann. Abschließend wurde das System demontiert und das Fahrzeug an den Vermieter zurückgegeben.

## 7. Fazit

Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Dieselmotorspartikelfiltersystem mit autarker Regeneration hat bei den durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass es technisch möglich ist, Fahrzeuge vom PKW bis hin zu leichten LKW mit einem Dieselmotorspartikelfilter mit einem Abscheidungsgrad  $> 95\%$  nachzurüsten.

Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass der Sintermetallfilter in der vorgestellten Ausführung gegenüber den Kanalfiltern aus keramischen Werkstoffen deutliche Vorteile hinsichtlich des Aschespeicherverhaltens aufweist, was bei der Verwendung von Kraftstoffzusätzen zur Regeneration des Partikelfilters von besonderer Bedeutung ist. Mittels CFD konnte für den Jetfilter aufgezeigt werden, dass die Russbelastung sich gleichmäßig auf nahezu der gesamten Filteroberfläche verteilt und so lokale Überhitzungen des Filters aufgrund von Russnestern im Betrieb ausgeschlossen werden können.

Mittels der umfangreichen Untersuchungen am Motorprüfstand konnte aufgezeigt werden, dass die Regeneration von Jetfiltern aus Sintermetall mittels der thermoelektrischen Regeneration bei Filtergrößen von  $1,8\text{ m}^2$  bis  $5,4\text{ m}^2$  gut funktioniert. Dabei wurden wesentliche reaktionskinetische Zusammenhänge ermittelt, die bei weiteren Anwendungen des Systems eine sicherere Applikation erlauben.

Basierend auf den grundlegenden Erkenntnissen vom Motorprüfstand wurde ein Steuergerät und eine Software entwickelt, die es ermöglichen, die Funktionsweise des Systems sehr gut an die Bedingungen im realen Fahrbetrieb zu applizieren. Dazu wurde begleitend zur Elektronikentwicklung über intensive Fahrversuche mit PKW, LDV und leichten LKW ständig eine Absicherung des jeweiligen Entwicklungsstandes sichergestellt sowie die Definition weitergehender Anforderungen an die Regenerationssteuerung und Beladungserkennung des Filtersystems erarbeitet.

In den abschließenden Fahrversuchen mit den jeweiligen Fahrzeugtypen konnte unter schwierigen Randbedingungen, wie zum Beispiel im Lieferverkehr mit leichten Nutzfahrzeugen, die sichere Funktion des entwickelten Systems nachgewiesen werden.

Eine Umsetzung des Systems für die Anwendung in größeren Stückzahlen ist aufgrund der sehr guten Ergebnisse aus diesem Projekt bei entsprechenden, günstigen umweltpolitischen und finanziellen Randbedingungen gut möglich. Eine Weiterentwicklung der Technologie für andere Anwendungsbereiche, wie zum Beispiel Off-High-Way-Anwendungen oder Arbeitsmaschinen mit Dieselmotor, ist basierend auf den vorliegenden Ergebnissen jederzeit möglich.

## 8. Literaturverzeichnis

- [Deu05] Deuschle T., Janoske U., Piesche M., Hitzler G., Weik W., Bargende M.: *Abschlussbericht: Langzeitstabilität von Partikelfiltern in Dieselmotoren* Proceedings - FVV Informationstagung Motoren 2005, Frankfurt a. M.
- [CP05] Czerwinski J., Pétermann J.-L.: *VERT Filter Test, Phase 1 with the Diesel Particle Filter HJS-SMF®-AR on the Liebherr D 914T engine.* Univ. of Applied Sciences, Biel-Bienne, CH, report B155, Apr. 2005
- [CG99] Claußen M., Gärtner, P.: *Partikelfilter mit additivgestützter Regeneration für dieselmotorische Anwendungen (Teilabschlussbericht zum DBU-Projekt Az. 06424).* CUTEC-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld, Dez. 1999
- [UBA03] Future Diesel; Abgasgesetzgebung Pkw. leichte Nfz und Lkw - Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen, Umweltbundesamt, Juli 2003
- [Wic03] Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. H.-Erich Wichmann, Abschätzung positiver gesundheitlicher Auswirkungen durch den Einsatz von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen in Deutschland, Neuherberg 07. Juni 2003
- [Jac01] Jacobsen, M.Z.: Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols, *Nature*, 409, 695ff, 2001
- [UBA] <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/dieselfahrzeuge.htm>