



**OTTO-VON-GUERICKE-
UNIVERSITÄT MAGDEBURG**

IMKO

Institut für Maschinenmesstechnik und Kolbenmaschinen

Teilvorhaben

Motoruntersuchungen mit Abgasnachbehandlungssystemen


zum Forschungsprojekt
„Abgasnachbehandlung bei RME-Betrieb“


als Teil des Gemeinschaftsprojektes:
„Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu Rapsmethylester“

gefördert durch:

- Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP)
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
- Volkswagen AG Wolfsburg
- Biodieselhersteller: Oelmühle Leer Connemann GmbH & Co. u.a.

Abschlußbericht


Prof. Dr.-Ing. H. Tschöke
Geschäftsführender Leiter


Dr.-Ing. Lothar Schulze


Dipl.-Ing. Gunter Braüngarten

Magdeburg, 28. Februar 2002

Kurzfassung

Das Projekt „Motoruntersuchungen mit Abgasnachbehandlungssystemen“ ist Teil des Gemeinschaftsprojektes „Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu Rapsmethylester“.

Für die zukünftige Entwicklung von Dieselmotoren stellt die Emissionsreduzierung durch innermotorische und außermotorische Maßnahmen einen Schwerpunkt dar

In diesem Projekt wurde zur Verminderung der Partikelemission im stationären Teillastbetrieb mit einem 4-Zylinder-Reihenmotor 1,9 l TDI mit Pumpe-Düse-Einspritzung (PDE) ein diskontinuierlich arbeitendes, additivunterstütztes Abgasnachbehandlungssystem mit einem SiC-Partikelfilter untersucht. Die Arbeiten hatten die Ermittlung der grundsätzlichen Eignung eines in Entwicklung befindlichen Abgasnachbehandlungssystems bei Einsatz von Biodiesel (RME) sowie bei wechselweisem DK- und RME-Betrieb zum Ziel.

Es wurden Partikelfilterbeladungs- und Regenerationsversuche bei additiviertem RME- und DK-Betrieb durchgeführt, wobei die Wirkung des Systems anhand der über dem Filter ermittelten Druckdifferenz, der Gewichtsveränderung des Filters, der Abgastemperatur vor dem Filter und der limitierten Schadstoffe bewertet wurde. Die Untersuchungen haben ergeben, dass das diskontinuierlich arbeitende additivunterstützte Abgasnachbehandlungssystem für die Verwendung von additiviertem RME-Kraftstoff und den wechselweisen DK- und RME-Betrieb grundsätzlich geeignet ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Partikelemission bei RME-Betrieb geringer als bei DK-Betrieb war und dass diese Partikelemissionen unterschiedliche Wirkungen erzielen.

Für unterbrechungsfreie Beladungen mit gleichen Rußmassen wurde bei RME gegenüber DK die 3- bis 4,5-fache Beladezeit gemessen. Bei gleicher Schwärzungszahl vor dem Filter wäre die auf dem Filter angesammelte Rußmasse bei RME in der gleichen Beladezeit geringer als bei DK. Bei gleich großer RME- und DK-Rußmasse war die über dem Filter gemessene Druckdifferenz bei RME größer als bei DK.

Im Gegensatz zu unterbrechungsfreien Beladungen stieg die Druckdifferenz bei RME nicht mehr stetig an, wenn der Beladungsvorgang ein- oder mehrmals für mehrere Stunden unterbrochen war. Nach dem Neustart war die Druckdifferenz dabei stets niedriger als vor dem Abstellen des Motors. Im Extremfall erfolgte trotz weiterer Rußansammlung keine weitere Erhöhung der Druckdifferenz. Die durch den Motorstillstand bedingte Verringerung der Druckdifferenz war bei DK deutlich geringer.

Für beide Kraftstoffarten wurden keine signifikanten Unterschiede der limitierten Schadstoffe festgestellt. Während der Beladung konnte ein geringer CRT-Effekt bemerkt werden, der bei DK auf Grund der größeren NO₂-Absenkung stärker war.

Die diskontinuierliche additivunterstützte Filterregeneration wurde durch die Abgastemperaturerhöhung mittels motorischer Maßnahmen, die für RME optimiert waren und bei DK ohne Änderung übernommen wurden, bewirkt. Sie verlief für beide Kraftstoffe nahezu gleich, war aber bei RME eher vollständiger. Nach der Regeneration konnten bei RME geringere Druckdifferenzen als bei DK festgestellt werden. Die Gewichtszunahme über der Filterlaufzeit war bei RME kleiner. Die Regeneration war bei beiden Kraftstoffen jeweils bei Volllast am wirksamsten. Die Gewichtszunahme des Filters betrug während der Laufzeit von 189 Stunden 11,8 g.

Der Balance Point wurde bei additiviertem RME bei geringfügig niedrigerer Abgastemperatur und geringerem Drehmoment gegenüber additiviertem DK festgestellt.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzfassung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abkürzungen und Formelzeichen.....	4
1 Einleitung	5
2 Aufgabenstellung	5
3 Projektablauf	6
4 Abgasnachbehandlung bei Diesel-PKW	7
5 Versuchsaufbau	9
5.1 Versuchsmotor.....	9
5.2 Abgasnachbehandlungsanlage.....	10
5.3 Prüfstand.....	11
5.4 Messtechnik.....	12
6 Kraftstoff	14
7 Versuchsdurchführung	15
8 Ergebnisse	17
8.1 Beladung des Partikelfilters bei additiviertem RME-Kraftstoff.....	17
8.1.1 Abgastemperatur, Druckdifferenz, Rußmasse.....	17
8.1.1.1 Beladung mit Unterbrechungen.....	17
8.1.1.2 Unterbrechungsfreie Beladung.....	20
8.1.1.3 Schadstoffkonzentration	22
8.2 Beladung des Partikelfilters bei additiviertem DK.....	25
8.2.1 Abgastemperatur, Druckdifferenz, Rußmasse.....	25
8.2.1.1 Beladung mit Unterbrechungen.....	25
8.2.1.2 Unterbrechungsfreie Beladung.....	26
8.2.1.3 Schadstoffkonzentration	28
8.3 Vergleich der Beladung des Partikelfilters bei additiviertem RME und DK	31
8.3.1 Druckdifferenz, Rußmasse, Schwärzungszahl	31
8.3.2 Schadstoffkonzentration	37
8.4 Regeneration des Partikelfilters.....	39
8.4.1 Regeneration bei additiviertem RME.....	39
8.4.2 Regeneration bei additiviertem DK.....	41
8.4.3 Vergleich der Regeneration bei RME und DK	43
8.5 Balance Point-Bestimmung	49
8.6 Gewichtsveränderung des Partikelfilters.....	52
9 Zusammenfassung und Ausblick	54
10 Literatur	56

Abkürzungen und Formelzeichen

ATL	Abgasturbolader
BP	Balance Point
CLD	Chemolumineszenzdetektor
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DK	Dieselmotortreibstoff (additiviert)
DK1... 9	Versuch 1... 9 mit additiviertem DK
DKoA	Versuch mit Dieselmotortreibstoff ohne Additivzugabe
dp	Druckdifferenz über Partikelfilter
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
Fe	Eisen
FID	Flammen-Ionisationsdetektor
FSN	Schwärzungszahl
FSN*	Mittelwert der während der Beladung stündlich gemessenen Schwärzungszahlen
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser bzw. Wasserdampf
HC	Kohlenwasserstoff
°KW	Grad Kurbelwinkel
Lambda	Luftverhältnis
LLK	Ladeluftkühler
M _d	Motordrehmoment
n	Motordrehzahl
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide
O ₂	Sauerstoff
OK	Oxidationskatalysator (motornah)
OK(PF)	Oxidationskatalysator unmittelbar vor dem Partikelfilter
p _{Abg.}	Abgasgegendruck nach ATL
PDE	Pumpe-Düse-Einspritzung
PF	Partikelfilter
RME	Rapsmethylester (additiviert)
RME0... 7	Versuch 0... 7 mit additiviertem Rapsmethylester
RME0w	Wiederholung des Versuchs 0 mit additiviertem Rapsmethylester
RMEoA	Versuch mit Rapsmethylester ohne Additivzugabe
RME0NA	Versuch 0 mit Rapsmethylester, Regeneration nach Abbruch der Beladung
T _{v_...}	Abgastemperatur vor...
T _{n_...}	Abgastemperatur nach...

1 Einleitung

Die Reduzierung der Abgasemissionen – insbesondere der Emissionen von Stickoxiden und Partikeln – stellt für die zukünftige Entwicklung der Dieselmotoren einen Schwerpunkt dar. Neben den primären innermotorischen Maßnahmen sind hierbei die außermotorischen Verfahren zur Abgasnachbehandlung sowie die Qualität des Kraftstoffes zunehmend von Bedeutung.

Der Einsatz von Biodiesel (RME) als ein erneuerbarer und praktisch schwefelfreier Kraftstoff ist ebenfalls ein Weg zur Verminderung der Umweltbelastung durch CO₂- und Rußemission. Die Partikelemission der Motoren ist mit RME geringer als bei Einsatz von Dieselkraftstoff. Der sehr geringe Schwefelanteil im RME bietet gute Voraussetzungen zur wirksamen Abgasnachbehandlung der Stickoxide.

Die bekannten Abgasnachbehandlungssysteme wurden bisher für die Verwendung von Dieselkraftstoff entwickelt. Derzeit sind die Auswirkungen von RME als Kraftstoff ebenso wie die Auswirkungen des wechselweisen DK- und RME- Betriebes auf die Funktion der Abgasnachbehandlungssysteme nicht bekannt.

2 Aufgabenstellung

Die in diesem Projekt durchzuführenden Arbeiten haben deshalb die Ermittlung der grundsätzlichen Eignung eines in Entwicklung befindlichen Abgasnachbehandlungssystems bei Einsatz von Biodiesel (RME) sowie bei wechselweisem DK- und RME-Betrieb zum Ziel.

Die Untersuchungen sind an einem modernen serienmäßigen PKW-Vollmotor mit einem für Dieselkraftstoff optimierten Abgasnachbehandlungssystem und einer Kombination von verschiedenen Regenerationsmaßnahmen durchzuführen.

Beladung und Regenerationsverhalten des Partikelfilters stellen den Schwerpunkt der Prüfstandsuntersuchungen dar.

Die limitierten Emissionen sind vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem zu erfassen.

Motor und Abgasnachbehandlungssystem werden von der Volkswagen AG bereitgestellt. Der Prüfpunkt für die stationäre Belastung des Motors ist mit der Abteilung Motorenentwicklung der Volkswagen AG abzustimmen.

Für das zeitgleich bearbeitete Teilvorhaben „Bestimmung nicht limitierter Emissionen und differenzierte Partikelanalyse“ ist die Probenahme durch das Institut für Technologie und Biosystemtechnik der FAL mit diesem zu koordinieren.

3 Projektablauf

In dem Projekt war das Arbeitsprogramm ursprünglich in zwei Stufen für eine Bearbeitungsdauer über 12 Monate vom 01.01.2001 bis 31.12.2001 geplant:

Stufe 1

Aufbau der Prüfstandeinrichtung und Ermittlung des Ist-Standes bei Abgasnachbehandlungsverfahren mit DK und RME.

Stufe 2

Optimierung dieser Verfahren für den Betrieb mit RME, evtl. Ermittlung der Betriebsgrenzen.

Für die experimentellen Untersuchungen waren sowohl der Motor als auch der Motorenprüfstand des vorangegangenen Teilvorhabens „Erkennung des Kraftstoffes RME im Dieselmotor aus motorischen Größen“ zu nutzen. Der Prüfstand war durch dieses Teilvorhaben bis Anfang September 2001 belegt. Die von der Volkswagen AG gelieferte Abgasnachbehandlungsanlage stand ab 12. September für die Untersuchungen zur Verfügung.

Unter Berücksichtigung der gemäß Bewilligungsbescheid für das Teilvorhaben noch verfügbaren Bearbeitungszeit wurde die Aufgabenstellung für die Untersuchung des bereitgestellten Abgasnachbehandlungssystems mit der Volkswagen AG in der vorliegenden Form konzentriert.

Um die Arbeiten in dem für einen erfolgreichen Abschluss des Vorhabens erforderlichen Umfang durchführen zu können, wurde am 11. Dezember 2001 der Antrag zur kostenneutralen Verlängerung der Bearbeitungsdauer bis 28. Februar 2002 an die UFOP gestellt.

Die **Abb. 1** zeigt den zeitlichen Ablauf der Arbeitsschritte.

Abb. 1: Arbeitsprogramm

Jahr	2001				2002	
Monat	9	10	11	12	1	2
Stufe 1						
* Bereitstellung von Motor und Abgasnachbehandlungssystem	07.09. 12.09.					
* Anpassung der Aufgabenstellung	26.09.					
* Aufbau der Prüfstandseinrichtungen	■					
Stufe 2						
* Experimentelle Voruntersuchungen (Prüfpunktauswahl, Abgasgegen- druckprüfung bei Vollast)		■				
* Experimentelle Untersuchungen zum Verhalten des Abgasnach- behandlungssystems mit additivierten Kraftstoffen:			■			
* RME			■			
* DK				■		
* RME						■
Dokumentation						■

4 Abgasnachbehandlung bei Diesel-PKW

Partikelfilter sind nach heutigem Kenntnisstand die einzige verfügbare Maßnahme, um die Partikelemission direktinspritzender PKW-Dieselmotoren um mehr als 90 % und damit auf das Niveau von Ottomotoren zu senken. Dies gilt auch für die Kleinstpartikel unterhalb einer Größe von 100 nm [1].

Die wesentliche Herausforderung in der Partikelfiltertechnologie besteht nicht in der Partikelfiltration sondern in der Regeneration des Filters durch die Verbrennung der angesammelten Partikelmasse im gesamten Motorkennfeld. Die Oxidation von Ruß (graphitischer Kohlenstoff, auch mit angelagerten Kohlenwasserstoffverbindungen) erfolgt mit molekularem Sauerstoff oberhalb von 600 °C. Diese Temperaturen treten im Regelfall beim PKW-Fahrzyklus nicht auf. Deshalb sind zusätzliche Maßnahmen zur Regenerierung des Partikelfilters notwendig:

- Absenkung der Rußoxidationstemperatur (Oxidationsbeschleunigung) einerseits und
- Anhebung der Abgastemperatur andererseits [2].

Die Oxidation kann beschleunigt werden mit Hilfe von:

- NO₂ aus dem Dieselabgas, das an einem Oxidationskatalysator aus NO erzeugt wird,
- katalytischer Beschichtung des Partikelfilters und
- Additivzugabe zum Kraftstoff, wobei die Verbrennungsprodukte des Additivs im Filter katalytisch wirksam werden. Dem positiven Effekt der Senkung der Rußabbrandtemperaturen steht der Nachteil der Aschebildung im Partikelfilter gegenüber. Es wird unterschieden zwischen einer vormotorischen Zugabe des Additivs in den Motorkraftstoff und einer nachmotorischen Zugabe zum Dosierkraftstoff für einen katalytischen Brenner. Bei Zugabe in den Motorkraftstoff ist der Filter nach deutlich kürzerer Zeit als bei Zugabe zum Dosierkraftstoff vollständig regeneriert [2].

Die Anhebung der Abgastemperatur kann erzeugt werden durch:

- motorische Maßnahmen (Motorbetrieb mit sehr „später“ Verbrennung) oder
- direkte Beheizung des Abgases mit elektrischer Heizung oder durch Einsetzen von Brennersystemen.

Es ist unumgänglich, die Druckdifferenz über dem Partikelfilter zu überwachen. Bei Überschreitung eines kritischen Wertes muss die Filterregenerierung durch gezielte Abgastemperaturerwärmung eingeleitet werden.

Um ein Verstopfen des Filters durch Öl- und Additivaschen zu vermeiden, ist nach einer entsprechenden Fahrstrecke von zum Beispiel 80.000 km eine Reinigung unerlässlich [1].

Ein in [2] beschriebenes Verfahren zur Bewertung von Partikelfiltersystemen ist die Bestimmung des sog. „Balance Point“. Bei einem derartigen Versuch werden der Abgasgedruck oder die Druckdifferenz über dem Partikelfilter sowie die Abgastemperatur vor und nach dem Partikelfilter kontinuierlich gemessen, wobei zur Variation der Abgastemperatur bei konstanter Motordrehzahl das Motordrehmoment stufenweise erhöht wird. Ein zeitlich konstanter Druckdifferenzwert weist darauf hin, dass sich der Partikelfilter hinsichtlich der Rußbeladung und der parallel verlaufenden Rußoxidation im Gleichgewicht befindet. Ein steigendes Druckniveau weist auf eine Rußansammlung hin. Ein fallender Wert ist ein Indikator für die Verringerung der im Partikelfilter bereits angesammelte Rußmasse.

Die Regenerationsmaßnahmen können sowohl in kontinuierlich und diskontinuierlich arbeitende Systeme als auch in aktive und passive Systeme unterteilt werden. Hierbei sind unter aktiven Systemen diejenigen zu verstehen, die eine zusätzliche Wärmezufuhr zur Regeneration benötigen, während die passiven Systeme in der Regel katalytische Effekte nutzen. Aus heutiger Sicht sind nur Kombinationen wie zum Beispiel der Einsatz von Kraftstoffadditiven in Verbindung mit motorischen Maßnahmen zur Gewährleistung einer Partikelfilterregeneration zielführend.

Bei einem kontinuierlich regenerierenden Filtersystem verhindert eine ständige Rußoxidation das Ansteigen der Druckdifferenz über dem Partikelfilter. Das bekannteste Regenerationsverfahren ist das von Johnson Matthey patentierte CRT-System (Continuously Regeneration Trap). Es basiert auf dem Effekt, dass der Kohlenstoffanteil der Partikelmasse mit Stickstoffdioxid bereits bei Temperaturen um 220 °C reagiert. Um die kontinuierliche Regenerierung sicherzustellen, ist ein NO₂/C-Massenverhältnis von 12:1 erforderlich. Die zur kontinuierlichen Oxidation erforderliche NO₂-Menge wird über einen dem Partikelfilter vorgeschalteten Katalysator aus NO konvertiert. Grundgedanke der Technik ist es, dass ein Oxidationskatalysator ständig so viel NO₂ erzeugt, dass der gleichzeitig anfallende Ruß ebenfalls ständig oxidiert wird und es möglichst nicht zu einer unerwünschten Rußansammlung im Partikelfilter kommt. Im gesamten Motorkennfeld ist trotz Anpassungsmaßnahmen (Anpassung der Einspritzparameter, der Abgasrückführrate und des Ladedrucks) eine wirksame kontinuierliche Regeneration mittels NO₂ nicht darstellbar. Um auch bei ungünstigen Betriebsbedingungen, bei denen der CRT-Effekt nicht mehr nutzbar ist, eine diskontinuierliche Regeneration zu gewährleisten, verfügt das System über aktive Regenerationshilfen wie motorische Maßnahmen und eine elektrische Heizung [1].

Die zu Grunde liegenden Reaktionsgleichungen zeigt die **Abb. 2**.

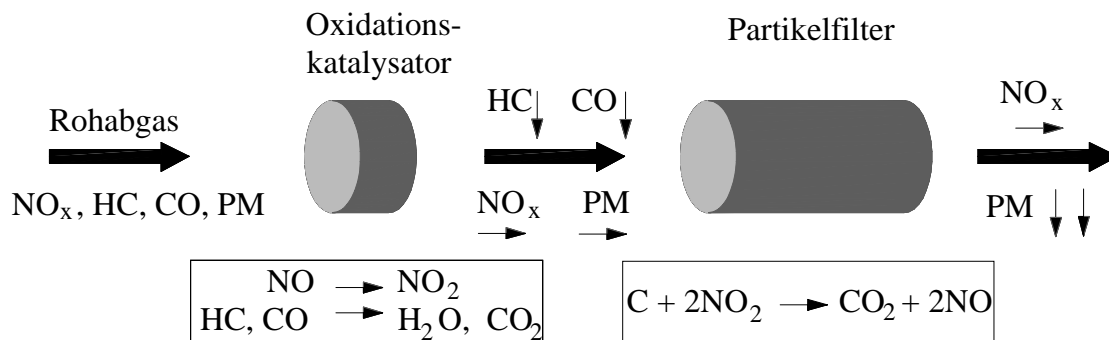


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau und Funktionsprinzip eines CRT-Partikelfiltersystems [2]

Bei einem diskontinuierlich arbeitenden System wird der Partikelfilter erst bei Erreichen einer gewissen Partikelbeladung regeneriert. Betrachtet man einen stationären Betriebspunkt, so steigt die Druckdifferenz über dem Filter während der Beladungsphase kontinuierlich an. Nach Beginn der Nacheinspritzung steigt die Abgastemperatur vor dem Partikelfilter innerhalb weniger Minuten auf ca. 500 °C an. Die einsetzende Rußoxidation wird durch das starke Absinken der Druckdifferenz über dem Partikelfilter sowie durch Temperaturanstieg am Filteraustritt signalisiert. Nach wenigen Minuten ist die Regeneration abgeschlossen, und die Nacheinspritzung wird abgeschaltet.

Die Abgasnachbehandlungsanlage für ein solches kraftstoffadditivunterstütztes, diskontinuierliches Regenerationskonzept mit elektrischer Heizung zeigt die **Abb. 3**.

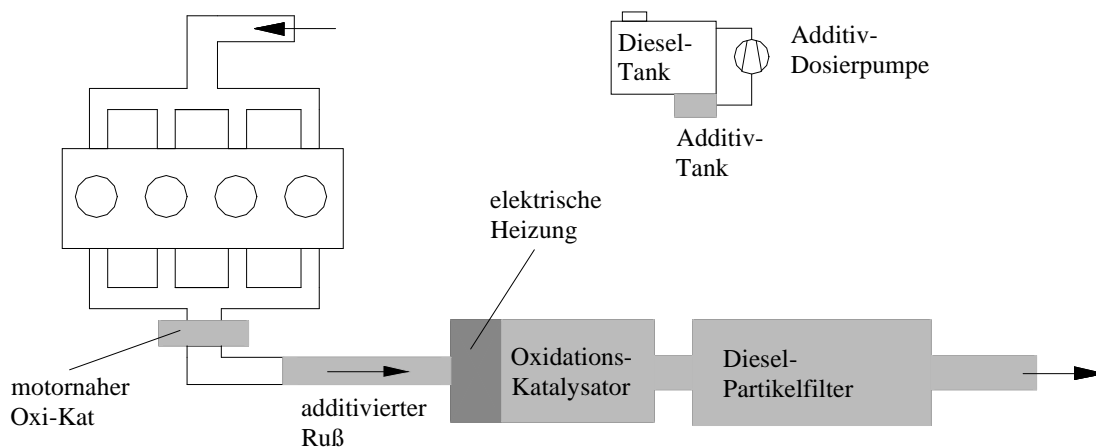


Abb. 3: Additivunterstütztes, diskontinuierliches Filtersystem [1]

Der dem Partikelfilter vorgeschaltete Oxidationskatalysator dient bei diesem Konzept zur Bildung von Exothermie durch Konvertierung der im Abgas mittels Nacheinspritzung angereicherten Kohlenwasserstoffe. Um der zunehmenden Kaltstart-CO-Problematik bei Dieselfahrzeugen Rechnung zu tragen, ist ein kleiner motornaher Oxidationskatalysator vorgesehen [1].

Um die Regeneration auch in dem Kennfeldbereich niedriger Drehzahlen und geringer Lasten zu gewährleisten, in dem die motorischen Maßnahmen für das erforderliche Temperaturniveau zur diskontinuierlichen Regeneration nicht ausreichen, ist zusätzlich die elektrische Beheizung des Abgases vorgesehen.

5 Versuchsaufbau

5.1 Versuchsmotor

Als Versuchsmotor diente ein Dieselmotor der Volkswagen AG, Motor-Nr.: 038A/01157,

4- Zylinder-Reihenmotor, 1,9 l TDI mit Pumpe-Düse-Einspritzung (PDE)

Hersteller	:	Volkswagen AG
Nennleistung	:	85 kW bei 4000 min ⁻¹
Max. Drehmoment	:	285 Nm bei 1900 min ⁻¹
Hub/Bohrung	:	95,5 mm/ 79,5 mm
Verdichtungsverhältnis	:	18 : 1
Motormanagement	:	Bosch EDC 15

5.2 Abgasnachbehandlungsanlage

Die Volkswagen AG hat für die Untersuchungen:

- den motornah einzubauenden Oxidationskatalysator (Nr.: D-045B) und
- den Partikelfilter (Nr.: 01002076) mit installierten Differenzdruckmessstellen und den im gemeinsamen Gehäuse stromab vorgeschalteten Oxidationskatalysator (Nr.: RAC 10307) bereitgestellt.

Die maßliche Anordnung erfolgte in den von der Volkswagen AG vorgegebenen Grenzen mit dem Ziel, die Abgasanlage den realen Einbauverhältnissen im PKW vergleichbar zu gestalten.

Die zur Verfügung gestellte Anlage stellt ein diskontinuierlich arbeitendes System mit Kraftstoffadditivunterstützung dar, d. h. die Regeneration des beladenen Filters erfolgt diskontinuierlich. Sie wird durch motorische Maßnahmen, die die Abgastemperatur mittels „später“ Nacheinspritzung sowie veränderter Abgasrückführrate und reduzierter Verbrennungsluftmasse drehmomentneutral erhöhen, bewirkt. Der dem Motorkraftstoff zugemischte Additivanteil von 0,357 ml/Liter Kraftstoff wirkt als Oxidationsbeschleuniger und erzeugt eine Absenkung der Rußoxidationstemperatur. Als Additiv wurde „satacen 2“ (Wirkstoff Fe) verwendet.

Die vollständige Abgasnachbehandlungsanlage und die ebenfalls mit der Volkswagen AG abgestimmte Anzahl und Anordnung von Temperatur- und Druckmessstellen sowie der Lambda- und der Gasentnahmesonden sind in der **Abb. 4** dargestellt.

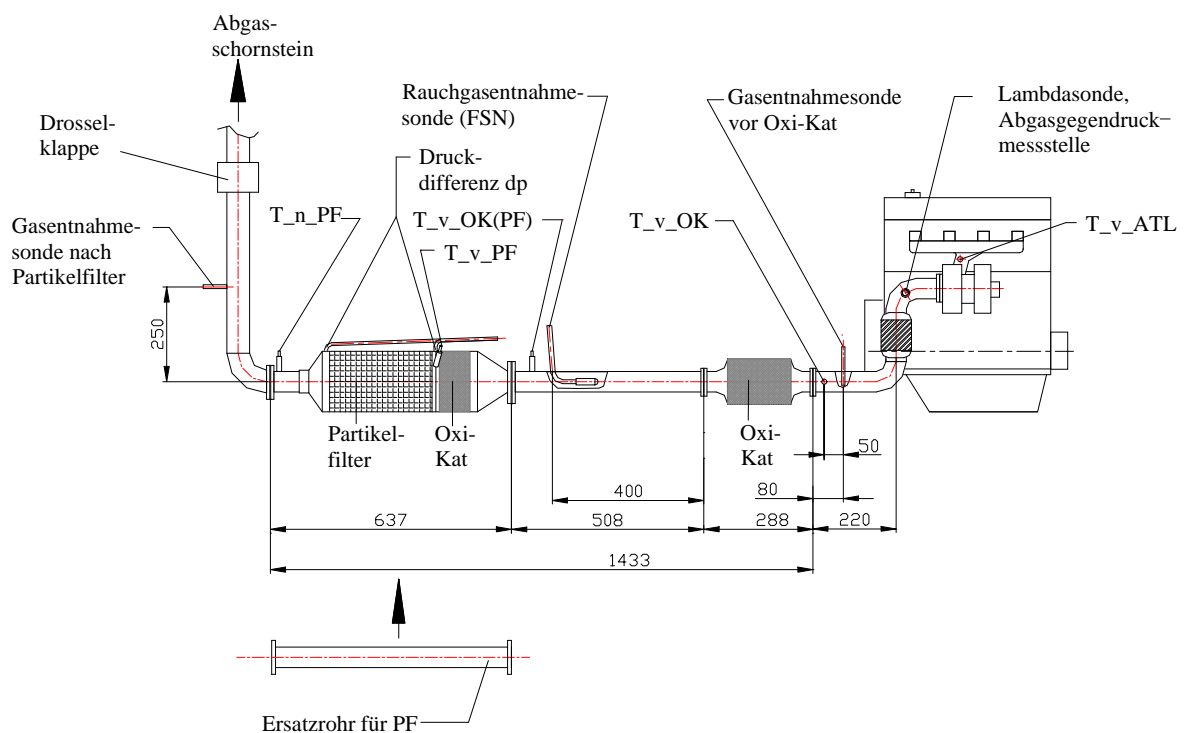


Abb. 4: Abgasnachbehandlungsanlage mit Messstellenanordnung

5.3 Prüfstand

Der prinzipielle Aufbau des Motorprüfstandes geht aus der **Abb. 5** hervor.

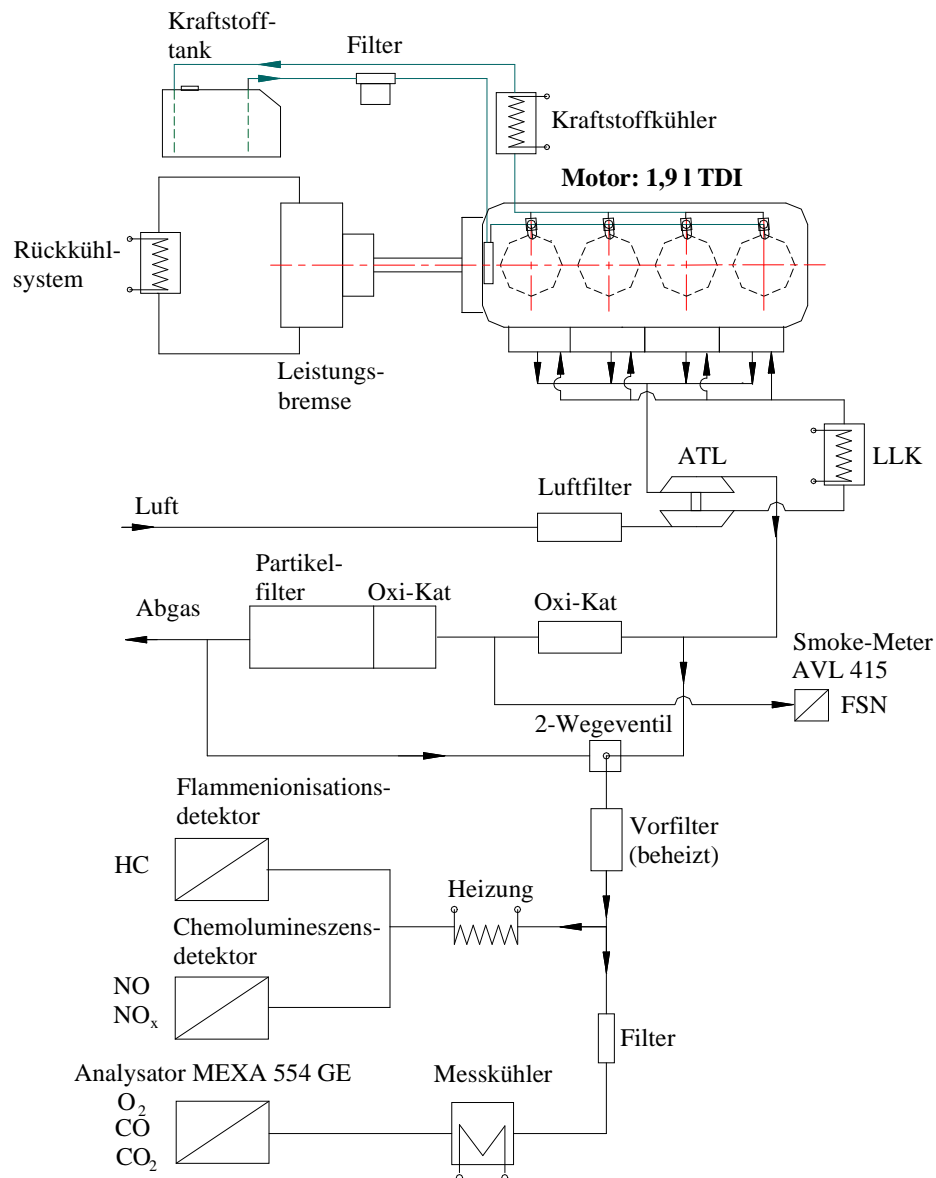


Abb. 5: Prüfstandsaufbau mit Motorabgas-Analysenanlage

- Die Belastung des Motors erfolgte über eine Wirbelstrom-Leistungsbremse W 130 der Firma Schenck.
- Für die verschiedenen Kraftstoffe wurde jeweils ein separater Tank verwendet, aus dem die motoreigene Pumpe den Kraftstoff zur Pumpe-Düse-Einheit förderte. Der Rücklaufkraftstoff wurde mittels Umlaufkühler „ProfiCool UKT 550-1“ der Firma National Lab gekühlt. Eine Kraftstoffverbrauchsmessung erfolgte vereinbarungsgemäß nicht.
- Die Ladeluft des Motors wurde mittels Luft-Luftkühler gekühlt und mit dem Temperatur-Differenzregler TDR 2002 geregelt ($T_{LL} = 34 - 38 \text{ °C}$ bei $n = 1790 \text{ 1/min}$, $M_d = 39 \text{ Nm}$).
- Die Kühlwärme des Motors wurde über einen Wasser-Wasser-Wärmeübertrager an das Rückkühl-system übertragen.

5.4 Messtechnik

- Die Temperatur im Abgasnachbehandlungssystem wurde mit Thermoelementen gemessen. Für die Erfassung der Temperaturen in Abhängigkeit von der Zeit kamen eine Erfassungskarte und das Messsystem DIA/DAGO zum Einsatz.
- Die Druckdifferenz über dem Partikelfilter wurde mit dem von der Volkswagen AG bereitgestellten Differenzdrucksensor 6PP5306-VW-75 (Messbereich: 0 – 75 kPa) gemessen und mit dem Messsystem DIA/DAGO aufgezeichnet.
- Drehmoment und Drehzahl wurden ebenfalls mit dem Messsystem DIA/DAGO erfasst.

Für die Filterbeladung über mehrere Stunden wurden die einzelnen Messgrößen bei Normalbetrieb anfangs im Minutenabstand und für die Regeneration im Sekundenabstand erfasst und registriert. Zur genaueren Erfassung der Messwerte wurde von Versuch RME3 an die Abtastrate während der Filterbeladung auf 1Hz und während der Regeneration auf 60 Hz erhöht. Die Messwerte wurden gemittelt und im Minutenabstand bzw. Sekundenabstand registriert.

- Die motorinternen Betriebsdaten wurden aus dem serienmäßigen Steuergerät mit dem VAG- Testgerät ausgelesen. Bei den Untersuchungen mit dem Applikationssteuergerät, das für die Realisierung der „späten Nacheinspritzung“ zwecks Abgastemperaturerhöhung für die Regenerierung des Abgasnachbehandlungssystems benutzt wurde, erfolgte die Datenerfassung mit dem ETAS-Programm INCA V2.1 (Aufzeichnung mittels „Datenrecorder“).
- Das Luftverhältnis Lambda wurde mit einer Lambdasonde LSU und dem Lambda-Meter LA3 der ETAS GmbH & Co. KG, die von der Volkswagen AG bereitgestellt worden waren, gemessen und manuell erfasst. Der Einbauort der Sonde befand sich stromab hinter dem Abgasturbolader und somit vor der Abgasnachbehandlungsanlage.
- Für das Wiegen des Partikelfilters (Gewicht des Filters ca. 8 kg) kam eine elektronische Waage H 205 mit einer 12 kg-Messzelle und einer Anzeigeteilung von 0,2 g zur Anwendung.

Abgas-Analysenanlage:

Zur Bestimmung der gasförmigen Abgaskomponenten Stickoxide (NO_x , NO , NO_2), Kohlenwasserstoffe (CH), Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO) sowie Sauerstoff (O_2) stand eine Motorenabgas-Analysenanlage zur Verfügung.

Während der Beladung des Partikelfilters wurden die Schadstoffmessungen im Stundentakt vorgenommen. Das Abgas wurde als Rohabgas vor dem motornahen Oxi-Kat sowie nach der Abgasnachbehandlungsanlage entnommen. Während der Filterregeneration erfolgten die Messungen im Abstand von 1 bis 5 Minuten, wobei das Rohabgas wegen der längeren Ansprechzeit der Anlage nicht analysiert wurde.

Die Anlage ist schematisch in Abb. 5 dargestellt. Sie bestand aus:

- Chemolumineszenz-Detektor (CLD) vom Typ EL 7000 ht der Fa. EcoPhysics für die Stickoxide,
- Flammen-Ionisations-Detektor (FID) vom Typ VE 7 AP2P der Fa. J.U.M. für die Gesamtkohlenwasserstoffe und
- NDIR- und elektrochemische Sensoren in einem Automotive Emission Analyzer MEXA-554GE des Herstellers Horiba zur Erfassung von CO_2 , CO und O_2 .

Das Abgas wurde der Abgasleitung wahlweise vor bzw. nach dem Abgasnachbehandlungssystem über Gasentnahmesonden (Abb. 5) entnommen. Es wurde mittels eines beheizten elektromagnetischen Umschaltventils über ein beheiztes Filter und eine beheizte Leitung dem CLD und dem FID im Analysenschrank zugeführt. Ein Teil des Abgases wurde über einen weiteren Filter und einen Gaskühler dem MEXA-554GE kalt zugeführt.

Smoke-Meter:

Die Erfassung der Schwärzungszahl FSN erfolgte mit dem Smoke-Meter AVL 415. Das Abgas wurde hierfür mit einer Rauchgasentnahmesonde der Abgasleitung nach dem motornahen Oxi-Kat entnommen und zur Vermeidung von Kondensatansammlung über eine kontinuierlich ansteigende Leitung dem Messgerät zugeführt. Auf eine Messstelle nach dem Partikelfilter wurde in Abstimmung mit der Volkswagen AG verzichtet, da die Ergebnisse bei DK bekannt sind und bei RME von der FAL eine gesonderte Messung der Partikelmassen in der Belade- und der Regenerationsphase vor und nach dem Partikelfilter vorgenommen wurde, deren Auswertung durch die Universität Göttingen erfolgt.

Die Anzahl der Messstellen und deren Anordnung im Abgasnachbehandlungssystem wurden mit der Volkswagen AG abgestimmt und in Abb. 4 dargestellt.

6 Kraftstoff

Für die experimentellen Untersuchungen wurden die in der nachfolgenden Tabelle enthaltenen Kraftstoffe eingesetzt:

Kraftstoff (ohne Additivzusatz)		DK	RME	Winter-RME
Dichte bei 15 °C	kg/m ³	830	883	883
Viskosität bei 40 °C	mm ² /s	2,642	4,50	4,50
Cetanzahl		55	53	>55
Schwefelgehalt	mg/kg	290	<10	<10
Flammpunkt	°C	61	>170	>150
Aschegehalt	%	0,001	<0,01	<0,01
Wassergehalt	mg/kg	54	144	176

Die Kraftstoffe RME und Winter-RME wurden von der Oelmühle Leer Connemann GmbH & Co bereitgestellt. Der am 22.11.01 gelieferte Kraftstoff „Winter-RME“ kam ab Versuch „RME2“ zum Einsatz.

Dem Kraftstoff wurde das von der Volkswagen AG bereitgestellte Additiv „satacen 2“ der Charge 01011 zugemischt. Das Mischungsverhältnis wurde von der Volkswagen AG mit 0,357 ml Additiv je Liter Kraftstoff vorgegeben. Der Eisenanteil betrug 10 ppm.

Die Additivdosierung erfolgte mit einer 5 ml-Injektionsspritze jeweils für eine Kraftstoffmenge von 50 l, die mit einem 10 l-Messeimer in einen Kraftstoffbehälter gefüllt wurde. Um eine gleichmäßige Vermischung im Behälter zu gewährleisten, wurde die additivierte Kraftstoffmenge intensiv verrührt. Die erzeugten Mischungsverhältnisse bewegten sich in den Grenzen von 0,354 bis 0,364 ml Additiv je Liter Kraftstoff.

In den folgenden Abbildungen wurde zur Kennzeichnung der additivierten Kraftstoffe stets die Bezeichnung „RME“ bzw. „DK“ verwendet. Die nachgestellten Zahlen stehen für die laufende Nummer des Versuches mit dem jeweiligen Kraftstoff.

Die nicht additivierten Kraftstoffe, die lediglich zur Bestimmung des Balance Point zum Einsatz kamen, wurden mit „RMEoA“ bzw. „DKoA“ bezeichnet. („oA“ bedeutet: „ohne Additiv“).

7 Versuchsdurchführung

Versuchsablauf

Um einer möglichen Schädigung des bei RME-Kraftstoff zu untersuchenden Abgasnachbehandlungssystems durch den Schwefelanteil im Dieselmotorkraftstoff vorzubeugen, wurden die wesentlichen Untersuchungen – Beladung und Regeneration des Partikelfilters – bei additiviertem RME an den Anfang gestellt. Als nächstes wurde die Balance Point-Bestimmung bei additiviertem RME und RME ohne Additivzusatz vorgenommen. Anschließend erfolgten vergleichende Beladungs- und Regenerationsversuche mit additiviertem Dieselmotorkraftstoff. Für die Balance Point-Bestimmungen kam danach kurzzeitig DK ohne Additivzusatz zum Einsatz, bevor wiederum additivierter DK und abschließend additivierter RME-Kraftstoff verwendet wurden.

Prüfpunkt

Vor Beginn der Versuche mit dem Abgasnachbehandlungssystem wurde in Abstimmung mit der Volkswagen AG der Abgasgedruck nach dem Abgasturbolader des Motors bei Vollast ($n = 4000 \text{ 1/min}$, $M_d = 203 \text{ Nm}$) ohne Partikelfilter auf $p_{\text{Abg.}} = 25 - 26 \text{ kPa}$ eingestellt. Für diesen Versuch wurde der Partikelfilter durch ein gleich langes Abgasrohr ersetzt.

Die Volkswagen AG fährt auf einem dynamischen Prüfstand zur Filterbeladung den sogenannten „AMA-Zyklus“ mit den folgenden 6 Stützpunkten:

Stützpunkt Nr.	Motordrehzahl [1/min]	Belastungsmoment [Nm]
1	1790	39
2	1830	28
3	2140	20
4	1950	34
5	1870	40
6	1420	35

Für die stationären Beladeversuche im IMKO wurde gemeinsam der 1. Stützpunkt ausgewählt. Als Kriterien für die Auswahl zählten:

- beste Drehzahl- und Drehmomentstabilität des Motors auf dem Prüfstand,
- minimale Abgastemperaturen vor dem Partikelfilter.

Applikationssteuergerät

Für die Versuche wurde von der Volkswagen AG ein Applikationssteuergerät bereitgestellt, das die Betriebsarten „Beladung“ und „Regeneration“ ermöglichte.

Wichtige Messlabel

Damit beim Umschalten von der Filterbeladung zur Regeneration die Motorbelastung sich nicht ändert, die Regeneration also drehmomentneutral abläuft, wurden die motorspezifischen Parameter für die Regeneration bei dem Kraftstoff RME (additiviert) angepasst. Bei der Beladung und der Regeneration bei RME (additiviert) wurde der Motor mit den in der folgenden Tabelle enthaltenen Motorparametern betrieben:

Funktion	Dimension	Beladung RME	Regeneration RME
Förderbeginn Sollwert Haupteinspritzung	grd. KW	-2,90	-3,09
Förderdauer Sollwert Haupteinspritzung	grd. KW	6,53	5,70
Förderbeginn Sollwert Nacheinspritzung	grd. KW	-78,00 ^{*)}	29,51
Förderdauer Sollwert Nacheinspritzung	grd. KW	-36,00 ^{*)}	16,13
Nacheinspritzmenge	mg/Hub	0	12,00
korrigierte Hauptmenge	mg/Hub	10,36	8,28
Gesamtmenge Haupt- und Nacheinspritzung	mg/Hub	10,36	20,28
Tastverhältnis EGR-Ventil	%	40,77	80,00
Tastverhältnis Ladedrucksteller	%	60,68	5,00
Tastverhältnis Drosselklappe	%	0	81,30

^{*)} d. h. keine Nacheinspritzung

Während der Nacheinspritzung in der Regenerationsphase wurde im Vergleich zur Beladephase die Nacheinspritzmenge von 12 mg/Hub zusätzlich zu der verringerten Haupteinspritzmenge eingespritzt. (-78,00 und -36,00 in der Beladephase bedeuten keine Nacheinspritzung). Die Gesamtmenge von Haupt- und Nacheinspritzung betrug somit im Vergleich zur Beladephase nahezu den doppelten Wert. Außerdem wurden die Abgasrückführrate sowie der Ladedruck verändert und damit die zur Verbrennung verfügbare Luftmasse verringert.

Steuergeräteproblem

Schon bei den ersten Filterbeladungen traten häufig Motoraussetzer auf, die von dem Applikationssteuergerät ausgelöst wurden. Die Störungen führten sowohl zum völligen Motorstillstand als auch zu einer vorübergehenden plötzlichen Drehzahlabenkung bis auf etwa 800 1/min mit nachfolgender Drehzahlerhöhung bis auf den zuvor eingestellten Sollwert. Da die im Steuergerät vorhandenen Fehler nicht kurzfristig ermittelt und beseitigt werden konnten, wurde nach Rücksprache mit der Volkswagen AG vereinbart, dass alle weiteren Filterbeladungen mit einem vorhandenen Seriensteuergerät vorgenommen werden. Das Seriensteuergerät kam für die Filterbeladungen vom Versuch RME1 an zum Einsatz. Das Applikationssteuergerät musste jedoch für alle Regenerationen weiterhin verwendet werden. Deshalb wurde zum Ende jedes Beladungsvorganges das Steuergerät gewechselt und der Motor mit dem Beladeprogramm wieder in den Beharrungszustand gefahren, bevor die Regeneration eingeleitet werden konnte.

Reinheit der Kraftstoffvarianten

Beim Wechsel des additivierten RME-Kraftstoffes zum Beispiel auf nicht additivierten Kraftstoff (RMEoA, DKoA) oder auf additivierten DK kam für jede Kraftstoffvariante ein separater Tank zum Einsatz. Um sicherzustellen, dass durch die noch im Kraftstoffsystem vorhandene Flüssigkeit für den folgenden Versuch keine Kraftstoffvermischung erfolgt, wurde der Rücklaufkraftstoff des Motors nach dem Kraftstoffwechsel für eine Rücklaufmenge von 6 dm³ in einen gesonderten Behälter geleitet. Erst danach wurde die Rücklaufleitung an den Tank angeschlossen und die Kraftstoffanlage gemäß Abb. 5 genutzt.

Ermittlung der Rußmasse des Partikelfilters

Nach dem Einbau des Partikelfilters, der ersten Beladung über ca. 1,5 Stunden und anschließender Regeneration erfolgte die erste Gewichtsermittlung des Partikelfilters. Hierzu wurde der Filter nach einer Abkühlung auf $T_{v_PF} = 65 \text{ °C}$ ausgebaut und bei $T_{v_PF} = 48 \text{ °C}$ gewogen. Diese Temperaturen wurden bei allen Gewichtsermittlungen eingehalten. Der Partikelfilter wurde sowohl nach Filterbeladungen als auch nach Filterregenerationen gewogen. Die Masseänderungen wurden registriert und als Funktion der Filterlaufzeit und in Abhängigkeit von den verschiedenen Versuchen dargestellt.

Von der Volkswagen AG war die maximale Partikelfilterbeladung mit 15 g Ruß vorgegeben. Die Untersuchungen begannen mit dem Ziel, die Beladezeiten für die maximale Rußmenge zu ermitteln.

Weiterführende Untersuchungen in der Volkswagen AG

Vereinbarungsgemäß wurden der Volkswagen AG für die Ermittlung der Abbrandtemperaturen von Ruß, der sich bei Verwendung von additiviertem RME und DK an den Wandungen des Partikelfiltergehäuses vor dem Oxi-Kat angesetzt hatte, Rußproben übergeben.

Nach Abschluss der Untersuchungen wurde der im Beladungsversuch RME7 innerhalb von 24,25 Stunden mit 15,8 g Ruß beladene Partikelfilter allseitig verschlossen und für weiterführende Auswertungen an die Volkswagen AG übergeben.

Probenahmen durch die FAL

Die vereinbarten Probenahmen durch das Institut für Technologie und Biosystemtechnik der FAL wurden an folgenden Tagen bei jeweils additiviertem Kraftstoff durchgeführt:

Tag der Probenahme	Versuchs-Nr.	Kraftstoff
29.11.01	Beladung und Regeneration :RME1	RME
18.12.01	Regeneration :DK3 Beladung: DK4	DK
09.01.02	Regeneration und Beladung: DK5	DK
07.02.02	Beladen und Regeneration: RME6	Winter-RME

8 Ergebnisse

8.1 Beladung des Partikelfilters bei additiviertem RME-Kraftstoff

8.1.1 Abgastemperatur, Druckdifferenz, Rußmasse

8.1.1.1 Beladung mit Unterbrechungen

Es ist bekannt, dass die Partikelemission bei RME-Kraftstoff gegenüber Dieseldieselkraftstoff deutlich geringer ist. Deshalb war gegenüber Dieseldieselkraftstoff mit erheblich längeren Beladezeiten zu rechnen. Um die Beladezeit für die maximal zulässige Beladung mit einer Rußmasse von 15 g zu ermitteln, wurden mehrere Beladungsversuche gefahren. Für die Beladungsversuche wurde der Motor stets bei einer Drehzahl von $n = 1790 \text{ 1/min}$ und einem Drehmoment von $M_d = 39 \text{ Nm}$ betrieben:

In den folgenden Diagrammen sind der jeweilige Kraftstoff mit der zugehörigen Versuchs-Nr. und darunter die Filterbetriebszeit vor dem Beginn des entsprechenden Versuches angegeben.

In den **Abb. 6** und **Abb. 7** ist ein Beladungsversuch über 33,1 Stunden mit mehreren Unterbrechungen und unterschiedlich langen Motorstillstandszeiten dargestellt.

Abb. 6 zeigt die Motorbelastung während der Beladung und Abb. 7 den Verlauf von Temperatur und Druckdifferenz sowie die auf dem Filter angesammelte Rußmasse.

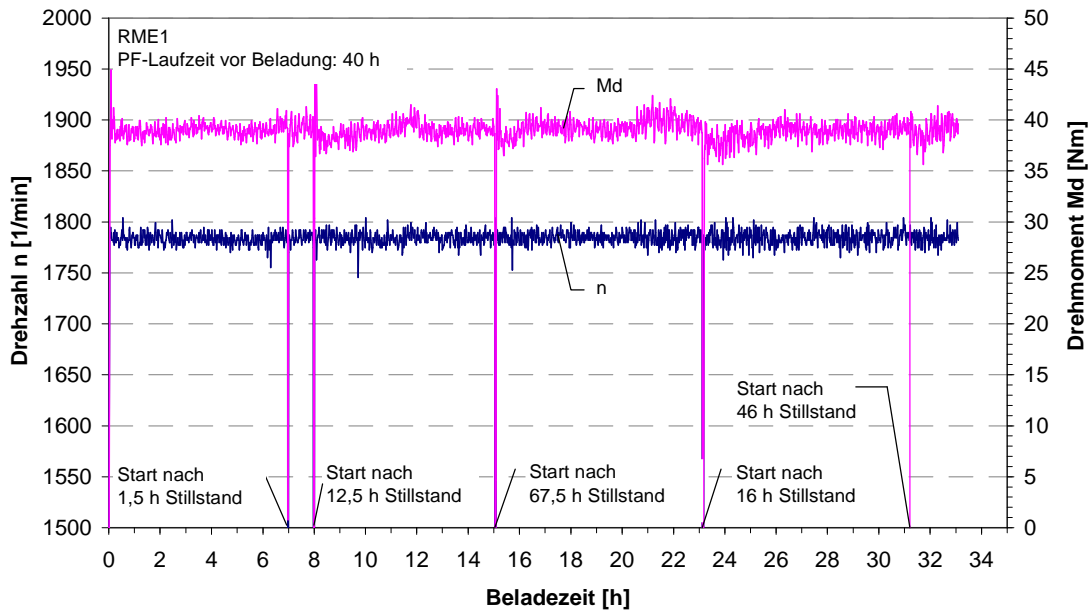


Abb. 6: Drehzahl und Drehmoment bei RME (additiviert) für mehrfach unterbrochene Beladung

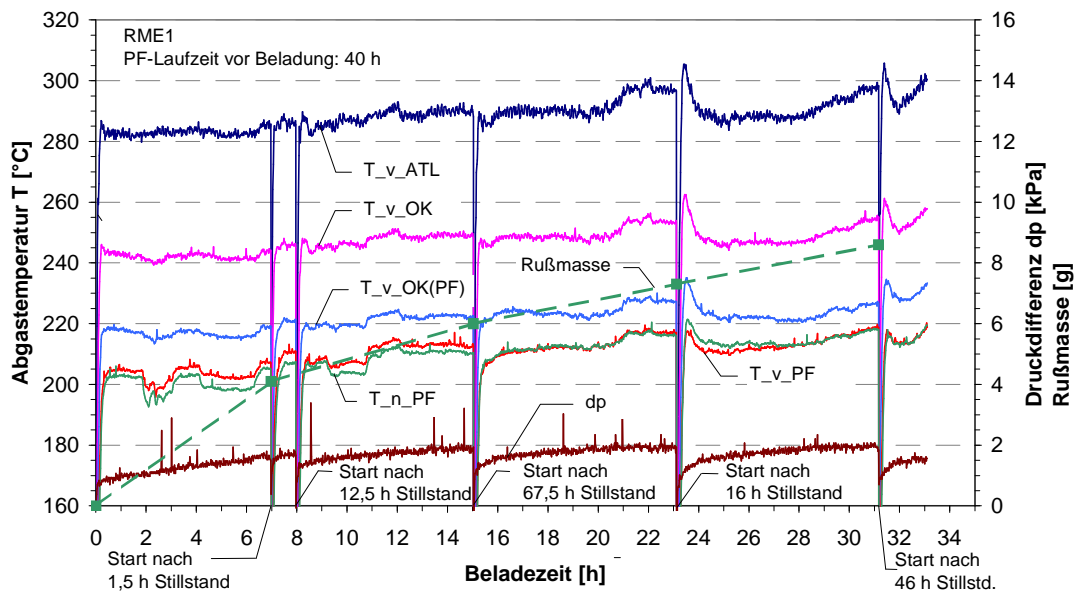


Abb. 7: Abgastemperatur, Druckdifferenz über PF und Rußmasse bei RME (additiviert) für mehrfach unterbrochene Beladung

Die Abgastemperaturen stiegen während der Beladezeit von der 1. bis zur 31. Stunde um 14°C an. Die vor dem Partikelfilter gemessene Temperatur erhöhte sich von 205°C auf 219°C. Die Temperatur nach dem Filter stieg von 203°C auf 218°C und näherte sich der vor dem Filter gemessenen Temperatur an. Sie lag insbesondere in der ersten Hälfte der 4. Beladepériode sogar um maximal 4 °C über der vor dem Partikelfilter gemessenen Abgastemperatur und ist ein Hinweis auf einen exothermen, im Partikelfilter ablaufenden Oxidationsvorgang.

Die Druckdifferenz dp über dem Partikelfilter war bei Wiederaufnahme der Beladung nach unterschiedlich langem Stillstand des Motors geringer als vor dem Abstellen des Motors. Sie erreichte im Maximum gerade den Wert von 2 kPa und überschritt nach 31,17 Stunden Beladezeit kaum den bereits nach 8 Stunden erreichten Wert. Eine kurze Stillstandszeit (hier 1,5 Stunden) hat eine geringe Senkung der Druckdifferenz bewirkt. Die Auswirkungen der in diesem Versuch ebenfalls vorhandenen Stillstandszeiten zwischen 12,5 und 67,5 Stunden waren jeweils nahezu gleich und deutlich stärker.

Der Partikelfilter wurde bei jedem Motorstillstand gewogen, zuletzt in diesem Versuch nach einer Beladezeit von 31,17 Stunden.

Obwohl die Druckdifferenz vor jedem Motorstillstand etwa gleich war, konnte eine Massezunahme des Filters mit fortschreitender Beladezeit festgestellt werden. Die Ursache für diese Erscheinung – Massezunahme ohne Erhöhung der Druckdifferenz vom Ende der 2. bis zum Ende der 4. Beladungsperiode – konnte in diesem Teilprojekt nicht untersucht werden.

Trotz der während der Beladung nahezu gleich bleibenden Schwärzungszahlen, die von der ersten 7-stündigen bis zur vierten Beladungsperiode in den Grenzen von $FSN = 0,39$ bis $FSN = 0,41$ lagen, wurde mit fortschreitender Beladezeit eine geringer werdende Rußmassenzunahme festgestellt. Auch hierfür konnte die Ursache in diesem Teilprojekt nicht endgültig geklärt werden. Offensichtlich trägt die teilweise Rußoxidation, die durch die Temperaturen $T_{n_PF} > T_{v_PF}$ gekennzeichnet ist, zu der geringeren Rußansammlung im Filter bei.

8.1.1.2 Unterbrechungsfreie Beladung

Bei unterbrechungsfreier Beladung über 24,25 Stunden stellte sich in Abhängigkeit von der Beladezeit ein signifikant anderer Verlauf der Druckdifferenz ein.

In **Abb. 8** sind der Drehzahl- und Drehmomentverlauf des unterbrechungsfreien Beladungsvorgangs für den Versuch RME3 und in **Abb. 9** der Verlauf von Temperatur und Druckdifferenz sowie die im Partikelfilter angesammelte Rußmasse dargestellt.

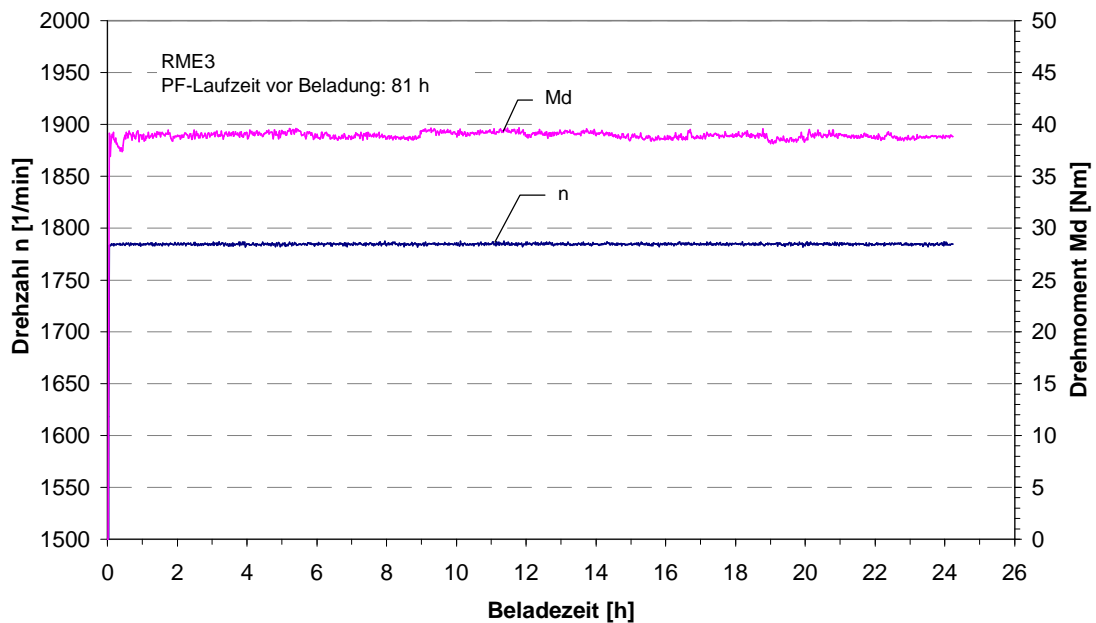


Abb. 8: Drehzahl und Drehmoment bei RME (additiviert) für unterbrechungsfreie Beladung

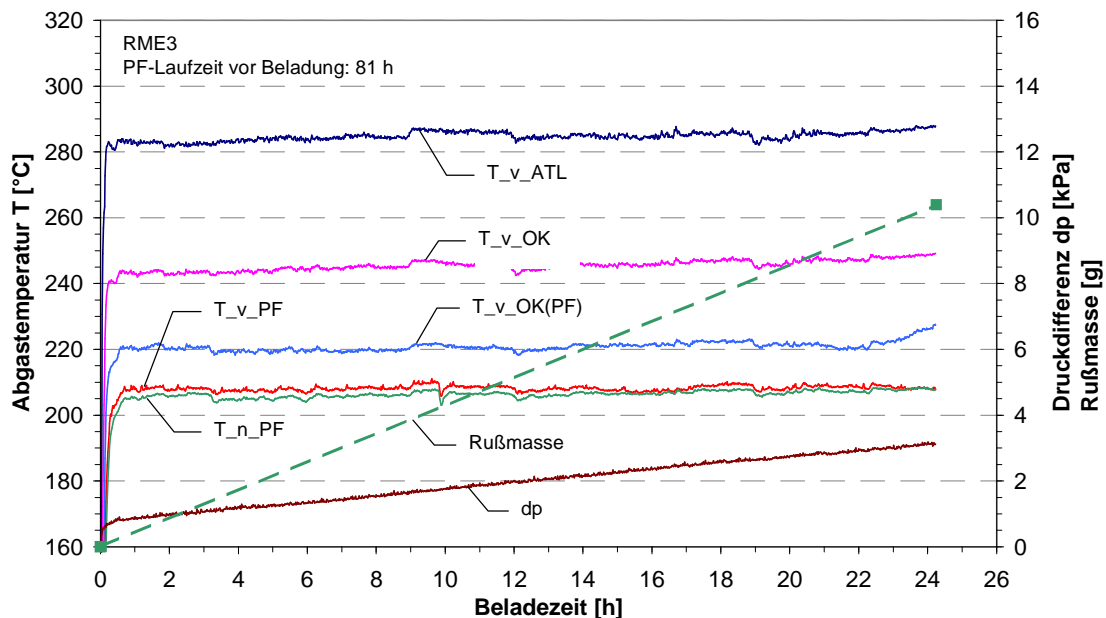


Abb. 9: Abgasstemperatur, Druckdifferenz über PF und Rußmasse bei RME (additiviert) für unterbrechungsfreie Beladung

Die Beladung wurde nach einer Filtergesamtlaufzeit von 81 Stunden begonnen. Während der Beladezeit erfolgte ein kontinuierlicher Anstieg der Druckdifferenz. Der Endwert nach 24,25 Stunden lag geringfügig über 3 kPa. Die Rußmassenbeladung des Filters wurde mit 10,4 g ermittelt. Der Verlauf der Abgastemperaturen erfolgte mit einem leichten Anstieg über der Beladezeit.

Zum Abschluss der Untersuchungen wurde der Versuch nach einer Filtergesamtlaufzeit von 189 Stunden wiederholt. Der Anstieg der Druckdifferenz in dem Versuch RME7 war steiler und weniger stetig. Dabei verliefen die Abgastemperaturen vergleichbar mit einem leichten Anstieg bei fortschreitender Beladedauer. Der Endwert der Druckdifferenz wurde mit $dp = 4.6$ kPa gemessen.

Zur Erklärung der unterschiedlichen Verläufe der Druckdifferenz sind in der folgenden **Abb. 10** Druckdifferenz dp und Schwärzungszahl FSN der Versuche RME3 und RME7 gegenübergestellt.

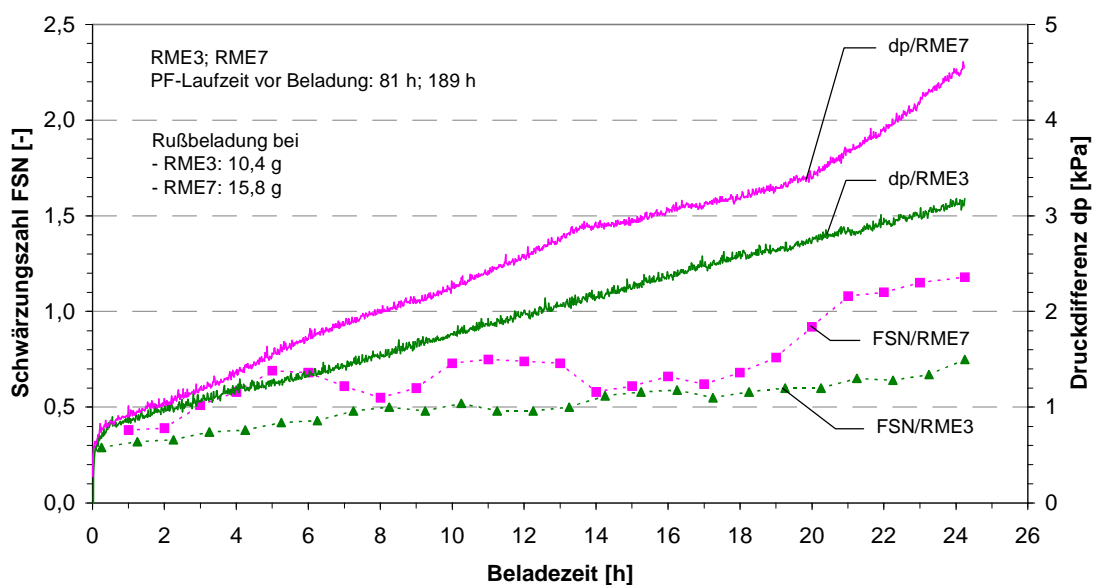


Abb. 10: Druckdifferenz und Schwärzungszahl bei RME (additiviert) für zwei unterbrechungsfreie Beladungen

Auffallend ist die im Abschlussversuch RME7 im Vergleich zum Versuch RME3 stark schwankende und auf das ca. 1,5-fache erhöhte mittlere Schwärzungszahl, d. h. die emittierte Partikelmasse ist bei Versuch RME7 trotz gleicher Motorbelastung ($n = 1790$ 1/min, $M_d = 39$ Nm) größer. Es ist erkennbar, dass mit abnehmender Schwärzungszahl der Anstieg des Differenzdruckverlaufs flacher und mit zunehmender Schwärzungszahl steiler wurde.

Die auf dem Partikelfilter angesammelte Rußmasse betrug 15,8 g und somit gegenüber dem Versuch RME3 etwa das 1,5-fache.

8.1.1.3 Schadstoffkonzentration

NO-, NO₂-, NO_x-Konzentration

Die während der mehrfach unterbrochenen Beladung im Versuch RME1 gemessenen NO-, NO₂- und NO_x- Konzentrationen sind in der **Abb. 11** dargestellt:

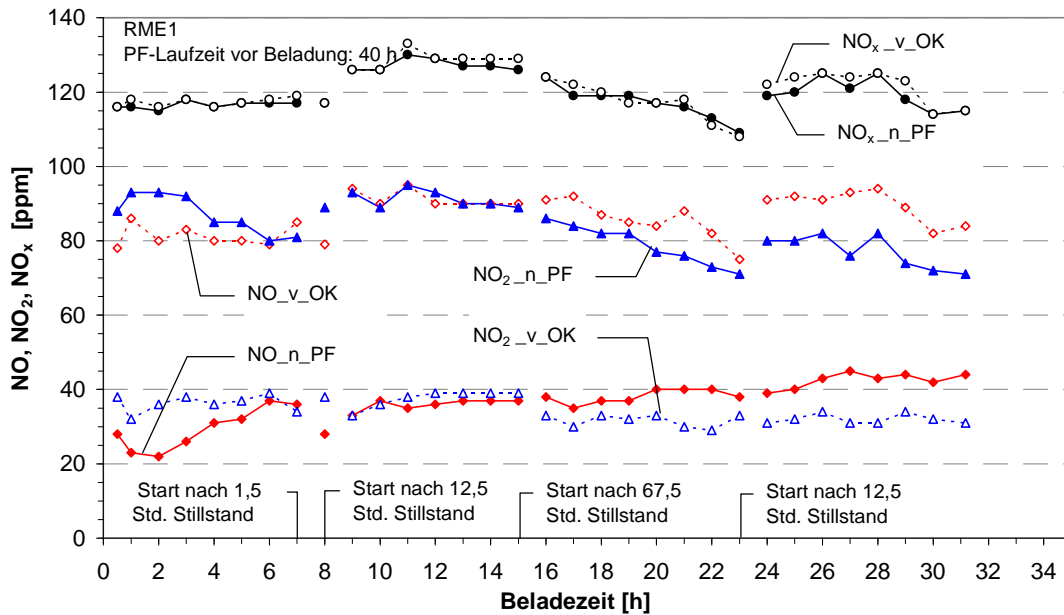


Abb. 11: NO-, NO₂- und NO_x- Konzentration bei RME (additiviert) vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem für unterbrochene Beladung

Zum Vergleich sind in der folgenden **Abb. 12** die NO-, NO₂- und NO_x- Konzentrationen aus dem unterbrechungsfreien Beladungsversuch RME3 enthalten.

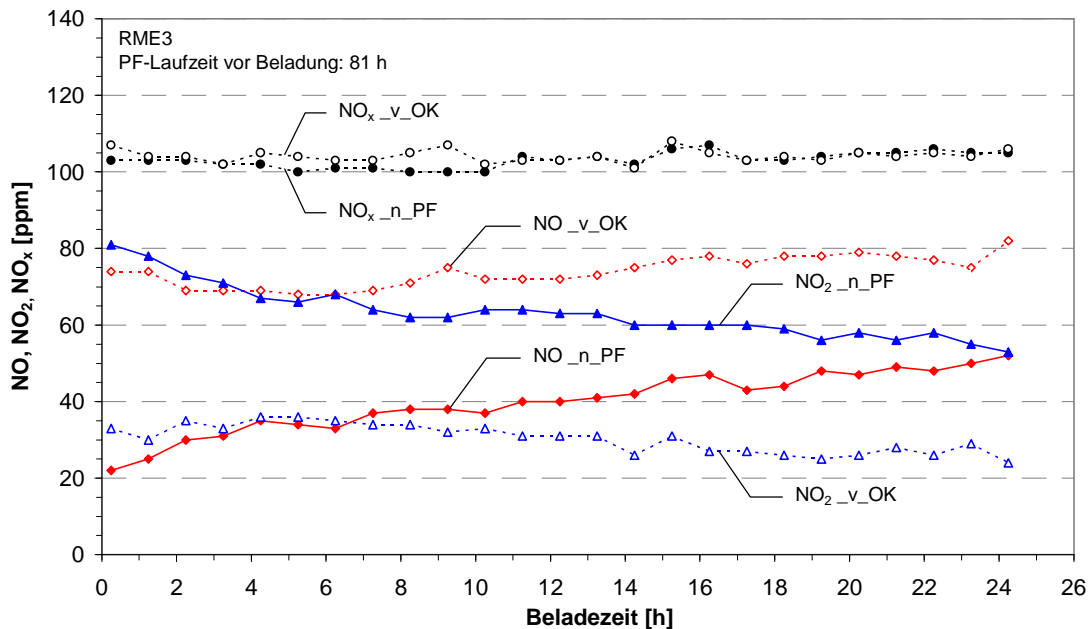


Abb. 12: NO-, NO₂- und NO_x- Konzentration bei RME (additiviert) vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem für unterbrechungsfreie Beladung

In Abb. 12 zeigt sich deutlich, dass die NO_x -Konzentrationen im Rohabgas und nach dem Abgasnachbehandlungssystem während der unterbrechungsfreien Beladezeit unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit konstant und gleich waren. Auch die NO - und NO_2 -Konzentrationen waren im Rohabgas (vor dem motornahen Oxi-Kat gemessen) relativ konstant. Der zu Anfang der Beladezeit gegenüber dem Rohabgas deutlich erhöhte Messwert der NO_2 -Konzentration nach dem Partikelfilter spricht dafür, dass der dem Partikelfilter vorgeschaltete Katalysator die gegenüber dem Rohabgas erhöhte NO_2 -Menge aus dem NO konvertiert hat. Im entsprechenden Maße wurde die NO -Konzentration nach dem Partikelfilter verringert.

Die Verringerung der NO_2 -Konzentration nach dem Partikelfilter über der Beladezeit lässt den

Schluss zu, dass eine zunehmende Menge des anfallenden Rußes durch das Stickstoffdioxid oxidiert wurde, wodurch gleichermaßen die NO -Konzentration anstieg, d. h., dass offenbar ein geringer CRT-Effekt vorhanden war.

Die in Abb. 11 aufgezeichneten Konzentrationen zeigen einen tendenziell ähnlichen Verlauf.

Luftverhältnis, Sauerstoffkonzentration, Schwärzungszahl

In der **Abb. 13** ist der Verlauf des Luftverhältnisses, der Sauerstoffkonzentration und der Schwärzungszahl in der unterbrechungsfreien Beladezeit des Versuchs RME3 dargestellt.

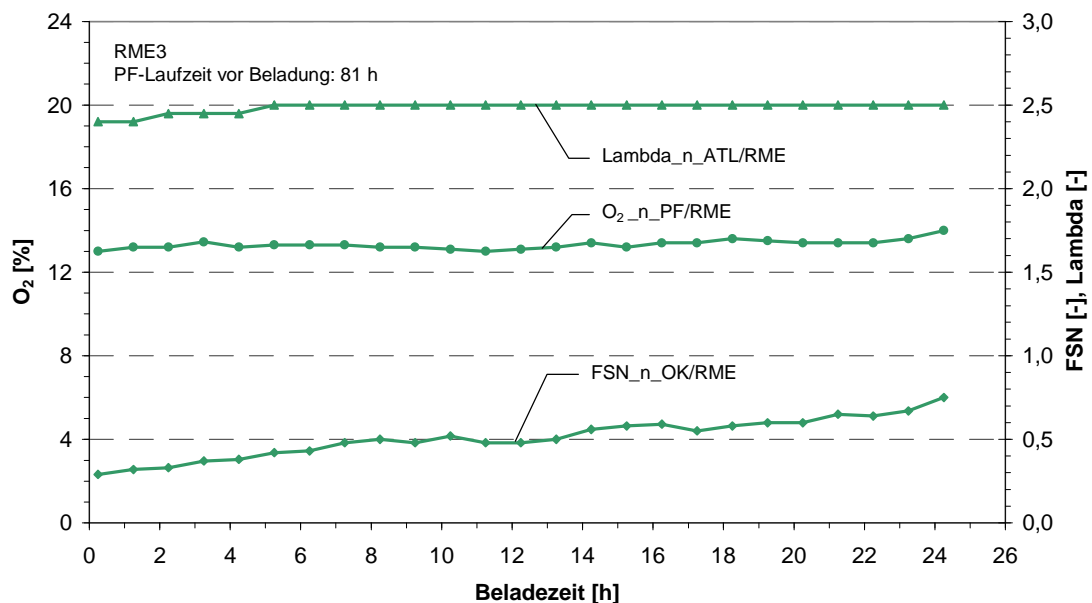


Abb. 13: Luftverhältnis, Sauerstoffkonzentration und Schwärzungszahl bei RME (additiviert) für unterbrechungsfreie Beladung

Das, im Rohabgas nach dem Abgasturbolader gemessene Luftverhältnis blieb während der Beladezeit bei einem Wert von 2,5 nahezu konstant.

Die nach dem Abgasnachbehandlungssystem erfasste Sauerstoffkonzentration wurde mit 13 bis 14 % bei einem leichten Anstieg über der Beladezeit registriert. Die vor dem motornahen Oxi-Kat ermittelten Werte wiesen hierzu keinen messbaren Unterschied auf, weshalb auf deren Darstellung verzichtet wurde.

Diese Werte wurden auch bei unterbrochener Beladung festgestellt und für diese deshalb nicht gesondert dargestellt.

Wie bei allen unterbrechungsfreien Beladeversuchen mit additiviertem RME stieg die Schwärzungszahl FSN während der Beladung kontinuierlich an (s. a. Abb. 10).

Kohlenwasserstoff-, Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidkonzentration

Die folgende **Abb. 14** zeigt den Verlauf der HC-, CO- und CO₂-Konzentration für den unterbrechungsfreien Beladeversuch RME3:

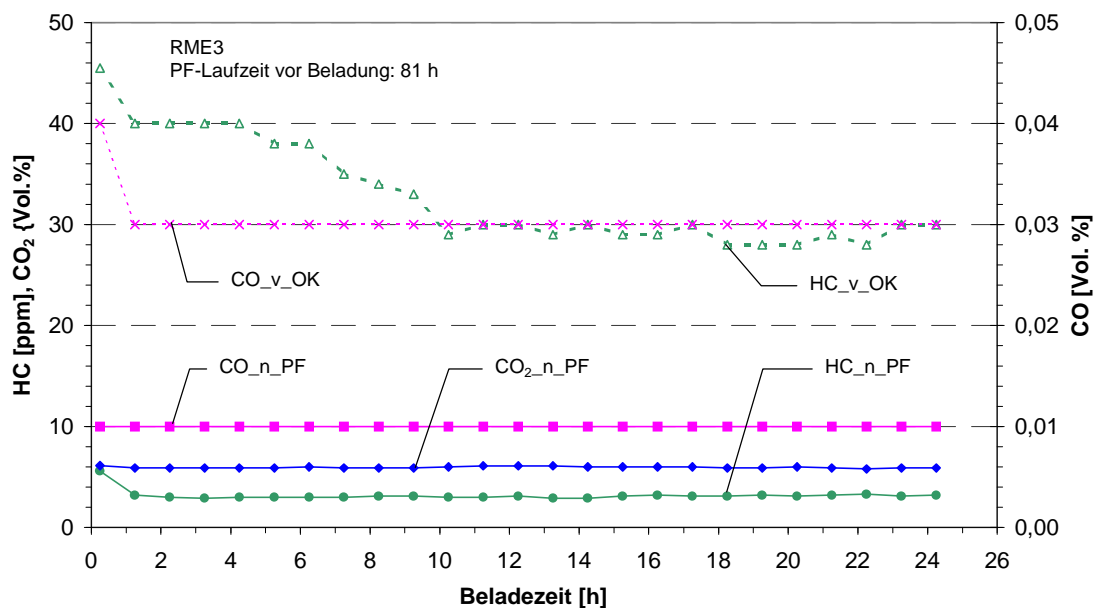


Abb. 14: Kohlenwasserstoff-, Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidkonzentration bei RME (additiviert) für unterbrechungsfreie Beladung

Die im Rohabgas vor dem motornahen Oxi-Kat gemessene HC-Konzentration von ca. 40 bis 30 ppm betrug nach der Abgasnachbehandlung und erreichter Reaktionstemperatur des Oxi-Kat nur noch 3 ppm. Dieser Wert blieb während der gesamten Beladung konstant und lag auch bei allen Beladeversuchen in der gleichen Größenordnung.

Die CO-Konzentration des Rohabgases wurde mit 0,03 Vol. % gemessen und durch Oxidation zu CO₂ auf konstant 0,01 Vol. %, gemessen nach dem Partikelfilter, verringert.

Die geringe Erhöhung der CO₂-Konzentration war messtechnisch nicht nachweisbar. Mit einem Wert von ca. 6 Vol. % wurde sie vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem gleich groß gemessen. Deshalb sind in Abb. 14 nur die Messwerte für CO₂_n_PF eingetragen.

8.2 Beladung des Partikelfilters bei additiviertem DK

8.2.1 Abgastemperatur, Druckdifferenz, Rußmasse

8.2.1.1 Beladung mit Unterbrechungen

Die in den folgenden **Abb. 15** und **Abb. 16** gezeigten Ergebnisse des Versuchs DK8 wurden aufgenommen, nachdem zuvor in unterbrechungsfreien Beladevorgängen festgestellt wurde, dass die maximal zugelassene Rußbeladung mit 15 g bei additiviertem DK schon nach einer ca. 7-stündigen Beladezeit erreicht wurde (s. a. Versuch DK3).

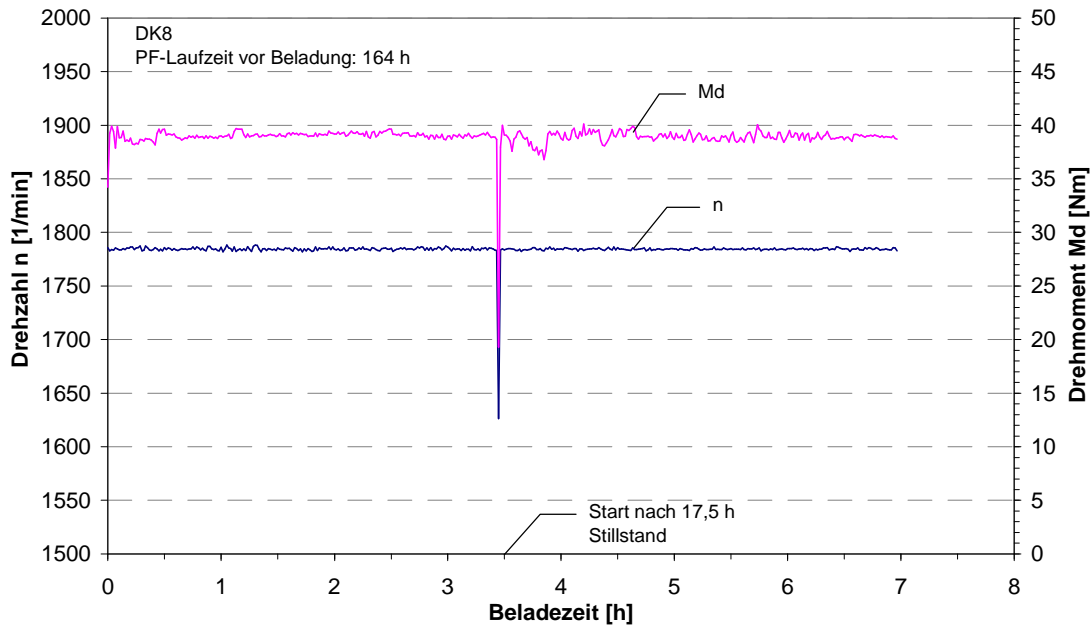


Abb. 15: Drehzahl und Drehmoment bei DK (additiviert) für unterbrochene Beladung

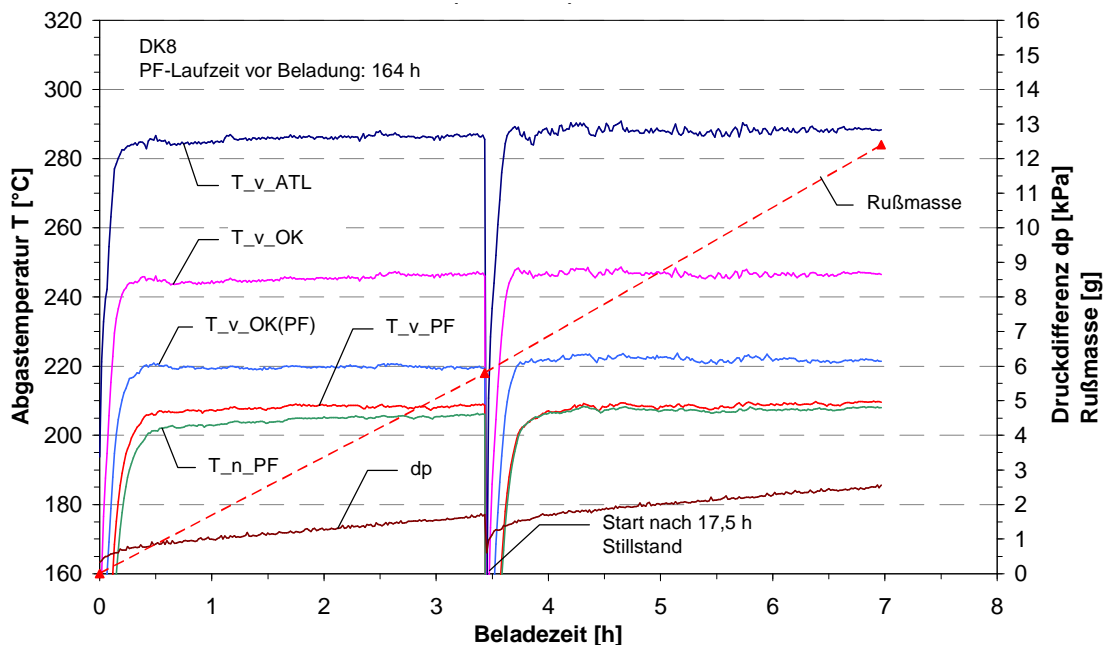


Abb. 16: Abgastemperatur, Druckdifferenz über PF und Rußmasse bei DK (additiviert) für unterbrochene Beladung

Die Abgastemperaturen stiegen mit zunehmender Beladedauer geringfügig an. Die Temperatur vor dem Partikelfilter lag zum Ende der Beladung bei 209 °C, die Temperatur nach dem Partikelfilter bei 208 °C. Bei der Beladung nach dem 17,5-stündigen Motorstillstand waren beide Temperaturen zeitweilig gleich, was auf einen im Partikelfilter ablaufenden Oxidationsvorgang schließen lässt.

Der Druckdifferenz dp über dem Partikelfilter war nach der Wiederaufnahme der Beladung und betriebswarmer Abgasanlage nur um ca. 0,2 kPa geringer als vor dem Abstellen des Motors. Der Anstieg der im wesentlichen linearen Verlaufskurve in der 2. Beladepériode ist mit dem der 1. Beladepériode identisch.

Die nach 3,5 und 7 Stunden Beladepériode durch Wiegen des Filters ermittelte Rußmasseablagerung zeigt einen nahezu linearen bzw. geringfügig progressiven Verlauf, obwohl die Schwärzungszahl, wie in Abb. 27 noch gezeigt wird, mit fortschreitender Beladepériode geringer wurde.

8.2.1.2 Unterbrechungsfreie Beladung

Da Drehzahl und Drehmoment des Prüfpunktes während der Filterbeladung, wie in Abb. 8 gezeigt, mit nur geringen Schwankungen konstant gehalten wurden, wird nachfolgend auf deren Darstellung verzichtet.

Die **Abb. 17** beinhaltet den Verlauf von Temperatur und Druckdifferenz sowie die Rußmasse, die sich nach 7-stündiger unterbrechungsfreier Beladepériode auf dem Partikelfilter angesammelt hatte.

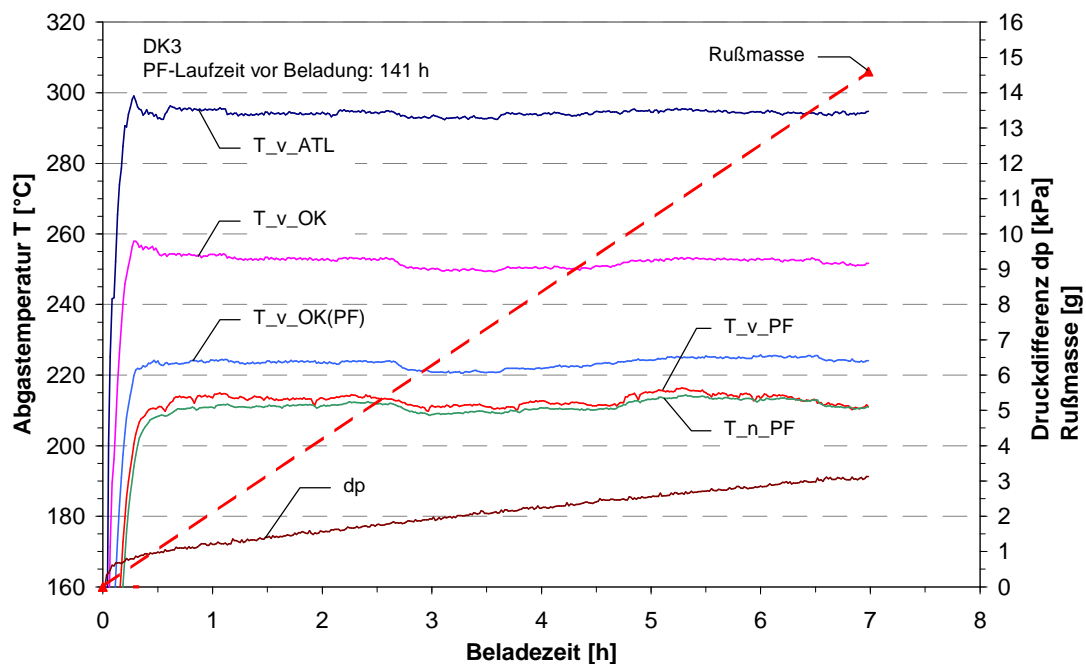


Abb. 17: Abgastemperatur, Druckdifferenz über PF und Rußmasse bei DK (additiviert) für unterbrechungsfreie Beladung

Dieser Versuch stellte die zweite mit additiviertem DK über 7 Stunden durchgeführte Beladung dar. Bei kontinuierlichem Anstieg der Druckdifferenz wurde nach dem Beladungsvorgang eine Rußmasse von 14,6 g ermittelt. Im zuvor erfolgten Versuch DK2 wurden während der gleichen Beladezeit bei geringfügig kleineren Schwärzungszahlen 13,6 g Ruß gemessen.

Nach einer Filtergesamtlaufzeit von 171,5 Stunden wurde der Versuch wiederholt. Der Versuch DK9 war zugleich der letzte Prüflauf mit additiviertem DK, bevor nochmals mit additiviertem RME gefahren wurde.

Die Gegenüberstellung des Verlaufes der Schwärzungszahl FSN und der Druckdifferenz dp beider Versuche ist in der **Abb.18** zu sehen.

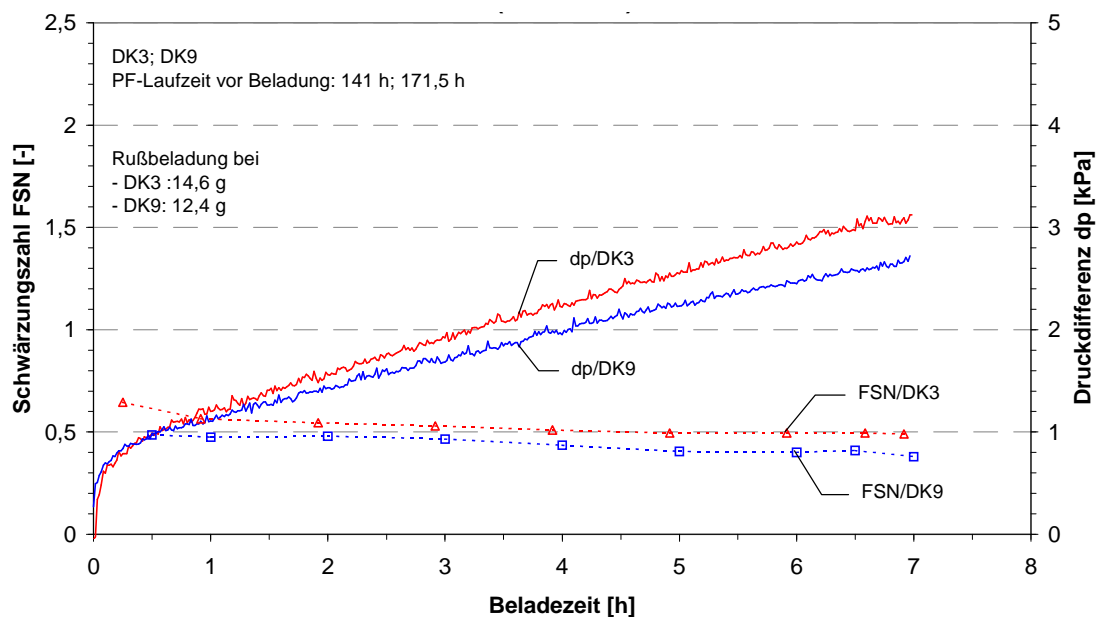


Abb. 18: Druckdifferenz und Schwärzungszahl bei DK (additiviert) für zwei unterbrechungsfreie Beladungen

Im Wiederholungsversuch DK9 erfolgte die kontinuierliche Erhöhung der Druckdifferenz mit einem kleineren Anstieg. Gleichzeitig war die im Filter angesammelte Rußmenge geringer. Es wurden nur 12,4 g Ruß herausgefiltert.

Die Erklärung für die bei gleicher Beladezeit gemessenen niedrigeren Werte findet man beim Vergleich der Schwärzungszahlen beider Versuchsläufe. Die Schwärzungszahlen des letzten Versuches DK9 lagen unter denen des Versuchs DK3.

Die Ursache für die bei gleichem Prüfpunkt gemessenen unterschiedlichen Schwärzungszahlen des Motors wurde in diesem Projekt nicht untersucht.

8.2.1.3 Schadstoffkonzentration

NO-, NO₂-, NO_x-Konzentration

In der **Abb. 19** sind die Stickstoffmonoxid-, die Stickstoffdioxid- und die Stickoxidkonzentrationen im Rohabgas und nach dem Abgasnachbehandlungssystem während der unterbrechungsfreien Beladung bei additiviertem DK dargestellt.

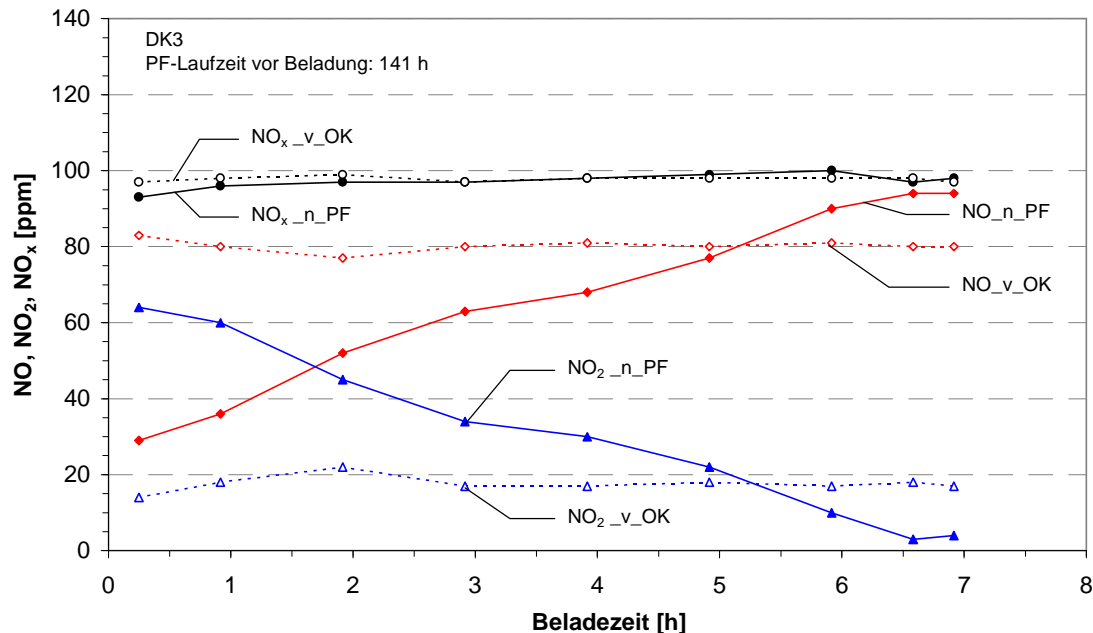


Abb. 19: NO-, NO₂- und NO_x-Konzentration bei DK (additiviert) vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem für unterbrechungsfreie Beladung

Die NO_x-Konzentrationen im Rohabgas und nach dem Partikelfilter sind gleich und über der Beladezeit nahezu konstant. Auch die NO- und die NO₂-Konzentrationen sind im Rohabgas in Abhängigkeit von der Beladezeit annähernd konstant.

Der gegenüber dem Rohabgas deutlich erhöhte Messwert der NO₂-Konzentration nach dem Partikelfilter zu Anfang der Beladezeit zeigt, dass der dem Partikelfilter vorgeschaltete Katalysator das Stickstoffdioxid NO₂ aus dem NO konvertiert hat. Im entsprechenden Maße wurde die NO-Konzentration nach dem Partikelfilter verringert.

Die Verringerung der NO₂-Konzentration nach dem Partikelfilter über der Beladezeit, die zum Beladungsende gegen Null ging, lässt den Schluss zu, dass eine zunehmende Menge des anfallenden Rußes durch das Stickstoffdioxid oxidiert wurde, wodurch gleichermaßen die NO-Konzentration anstieg. D. h., dass offenbar ein CRT-Effekt vorhanden war.

Luftverhältnis, Sauerstoffkonzentration, Schwärzungszahl

In der **Abb. 20** sind die Verläufe des Luftverhältnisses, der Sauerstoffkonzentration und der Schwärzungszahl dargestellt.

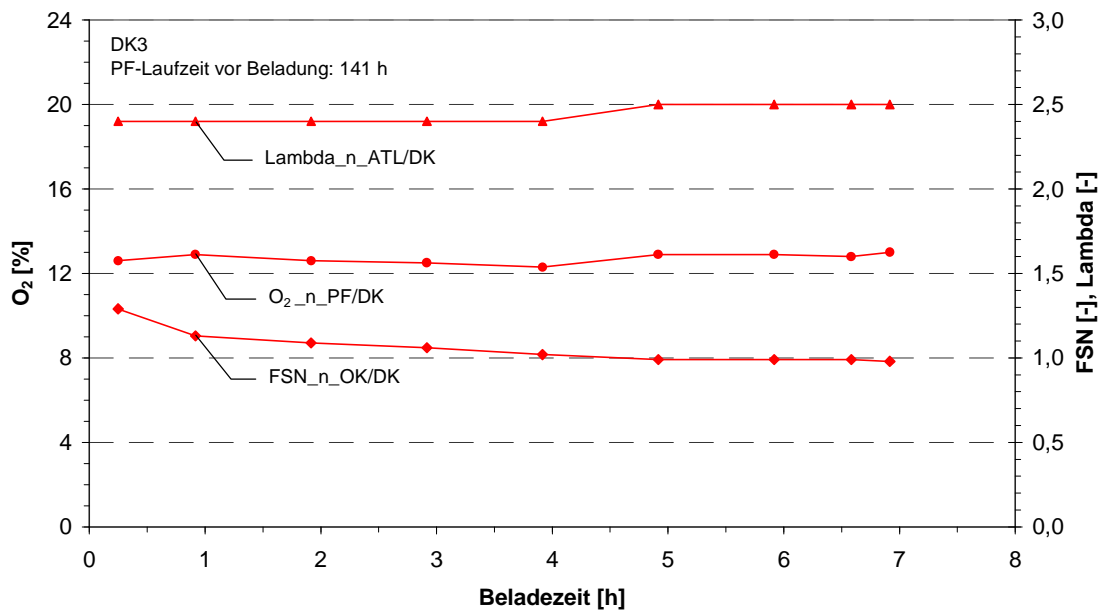


Abb. 20: Luftverhältnis, Sauerstoffkonzentration und Schwärzungszahl bei DK (additiviert) für unterbrechungsfreie Beladung

Das im Rohabgas nach dem Abgasturbolader gemessene Luftverhältnis Lambda blieb während der Beladung bei Werten von 2,4 und 2,5 konstant.

Die stromab nach dem Abgasnachbehandlungssystem erfasste Sauerstoffkonzentration bewegte sich im Bereich von 12,6 bis 13 %. Die vor dem motornahen Oxi-Kat ermittelten Werte wiesen hierzu keinen messbaren Unterschied auf, weshalb auf deren Darstellung verzichtet wurde.

Wie bei allen unterbrechungsfreien Beladeversuchen mit DK verringerte sich die Schwärzungszahl FSN während der Beladung (s. a. Abb. 18).

Kohlenwasserstoff-, Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidkonzentration

Die folgende **Abb. 21** zeigt den Verlauf der HC-, CO- und CO₂-Konzentration für den unterbrechungsfreien Beladeversuch DK3.

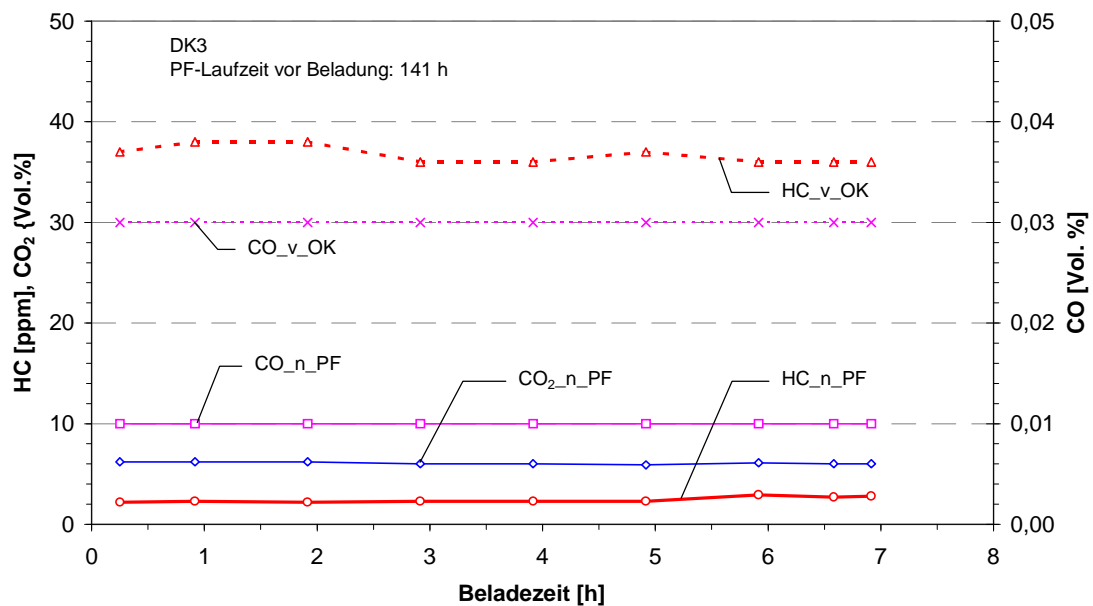


Abb. 21: Kohlenwasserstoff-, Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidkonzentration bei DK (additiviert) für unterbrechungsfreie Beladung

Die im Rohabgas vor dem motornahen Oxi-Kat gemessene HC-Konzentration verlief nahezu konstant und betrug zum Beladungsende 36 ppm. Nach dem Abgasnachbehandlungssystem wurde die Konzentration mit einem Wert von 2,2 bis 2,9 ppm ermittelt.

Die CO-Konzentration des Rohabgases wurde mit 0,03 Vol. % gemessen und durch Oxidation zu CO₂ auf konstant 0,01 Vol % nach dem Partikelfilter verringert.

Die Erhöhung der CO₂-Konzentration war so gering, dass sie messtechnisch nicht nachgewiesen werden konnte. In der Abb. 21 sind daher lediglich die nach dem Partikelfilter erfassten Werte eingetragen.

8.3 Vergleich der Beladung des Partikelfilters bei additiviertem RME und DK

8.3.1 Druckdifferenz, Rußmasse, Schwärzungszahl

In der **Abb. 22** sind die unterbrechungsfreien Beladungsvorgänge RME3 und DK3 gegenübergestellt.

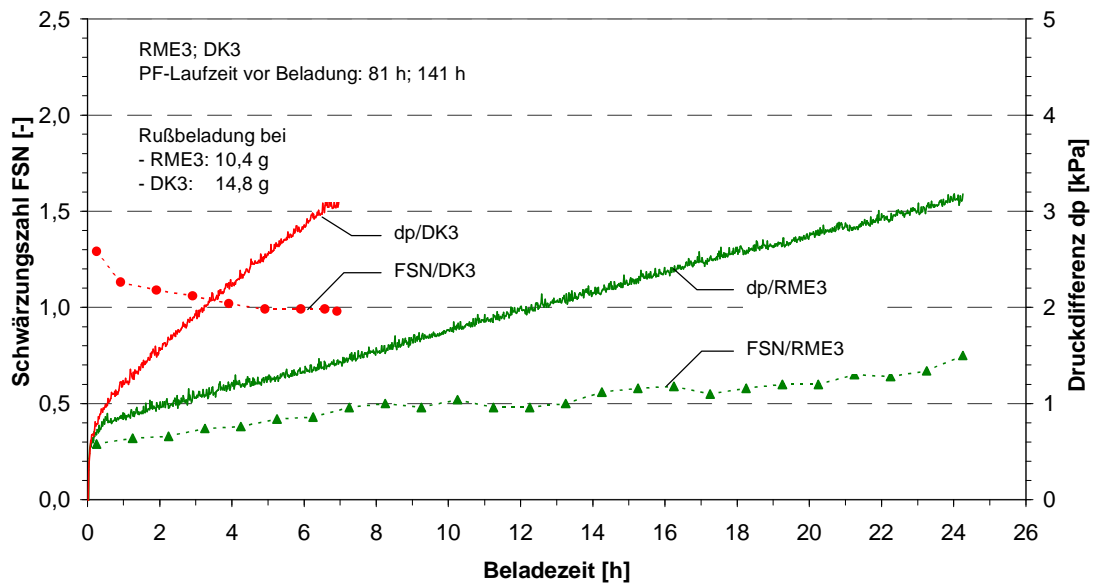


Abb. 22: Druckdifferenz und Schwärzungszahl bei RME (additiviert) und DK (additiviert)

In diesem Diagramm sind die charakteristischen Unterschiede sichtbar:

- Bei Motorbetrieb mit additiviertem RME-Kraftstoff erfolgte der kontinuierliche Anstieg der Druckdifferenz über dem Partikelfilter während der Beladung mit deutlich geringerem Anstieg als bei additiviertem DK. In 24,25 Stunden war die Druckdifferenz dp auf ca. 3,1 kPa angewachsen, wobei 10,4 g Ruß im Filter angesammelt wurden. Bei DK hingegen wurden in nur 7-stündiger Beladung 14,8 g Ruß angesammelt, wobei die Druckdifferenz etwa den gleichen Endwert erreichte.
- Die Schwärzungszahl FSN war bei RME gegenüber DK sichtbar geringer und stieg während der Beladung an. Die höheren Schwärzungszahlen bei DK wurden während der Beladung geringer, blieben jedoch über dem bei RME gemessenen Niveau.

Die Darstellung aller Beladevorgänge mit den additivierten Kraftstoffen RME und DK hinsichtlich der jeweils im Filter angesammelten Rußmasse zeigt die nächste **Abb. 23**. In diesem Diagramm sind sowohl alle unterbrechungsfreien Beladevorgänge erfasst, bei denen der Partikelfilter vor Beginn der Beladung und nach Beladungsende zur Bestimmung der angesammelten Rußmasse gewogen wurde, als auch Versuche mit unterbrochener Beladung. Die unterbrochenen Beladevorgänge sind gekennzeichnet mit RME1, RME0w, DK8. Bei jeder Unterbrechung wurde die Rußmasse gravimetrisch ermittelt. Sie ist als Messpunkt im Diagramm dargestellt.

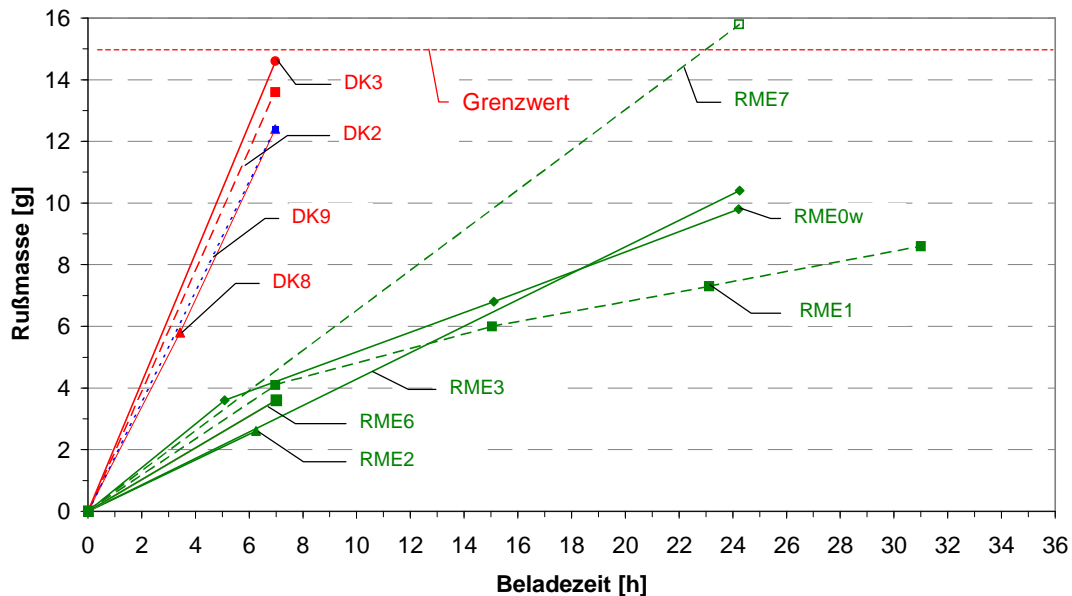


Abb.23: Rußmasse auf dem Partikelfilter in Abhängigkeit von der Laufzeit für unterschiedliche Beladevorgänge bei RME (additiviert) und DK (additiviert)

Die nach jeweils 7 bzw. 3,5 Stunden bei DK abgeschlossenen Beladevorgänge haben gegenüber RME eine geringere Streuung und eine deutlich höhere Rußmasse bei gleicher Beladezeit ergeben.

Dabei ist davon auszugehen, dass die Abgastemperaturen vor dem Partikelfilter bei RME und bei DK keine nennenswerten Unterschiede aufgewiesen haben. Sie lagen bei den unterbrochenen Beladeversuchen bei 205 bis 219 °C (vgl. RME1) und bewegten sich bei unterbrechungsfreier Beladung im allgemeinen zwischen 208 und 212 °C.

Die Größe der bei RME aufgetretenen Rußmasseansammlung ist sowohl abhängig von der Größe der Schwärzungszahl als auch davon, ob die Beladung ohne oder mit Unterbrechungen erfolgte. Bei DK war der Einfluss von Unterbrechungen offensichtlich geringer, wie am Beispiel des Versuchs DK8 (Abb. 16) gezeigt wurde.

Die folgende **Abb. 24** zeigt die Verläufe der Druckdifferenz für die in der Abb. 23 dargestellten Beladungsvorgänge.

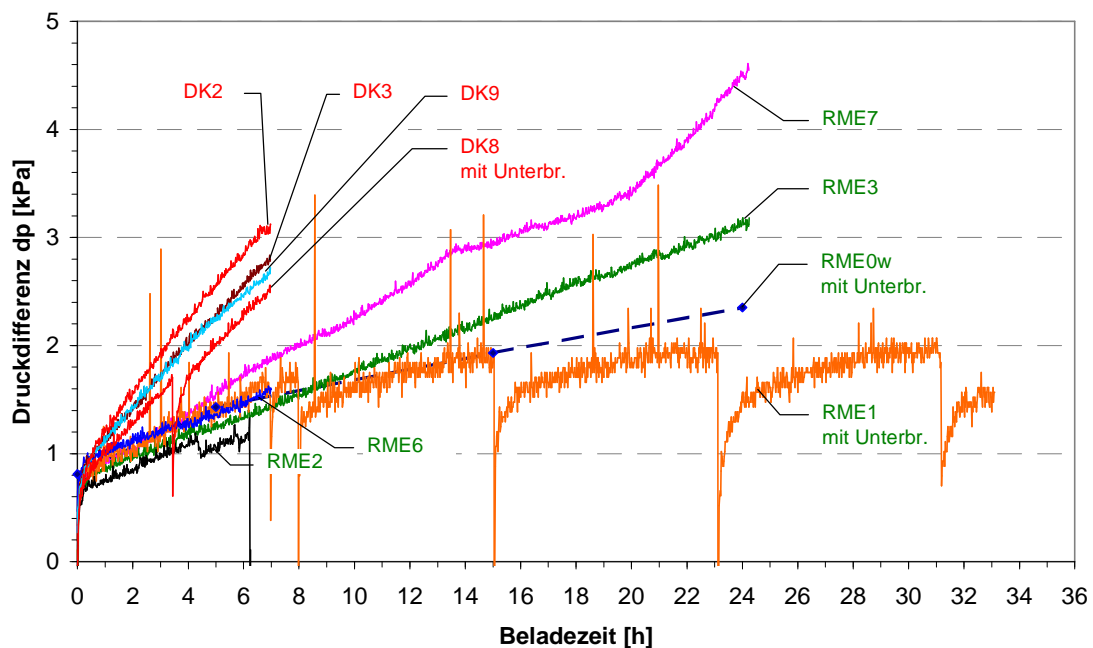


Abb. 24: Druckdifferenz über PF für unterschiedliche Beladungsvorgänge bei RME (additiviert) und DK (additiviert) in Abhängigkeit von der Beladezeit

Bei DK fällt der gegenüber RME steilere Anstieg der Druckdifferenz bei zunehmender Beladezeit auf.

Die Unterbrechung des Beladevorgangs bei Versuch DK8 hat nur eine geringe Absenkung der Druckdifferenz bewirkt. Einschränkend ist zu bemerken, dass mehrfache Unterbrechungen von Beladevorgängen bei DK nicht untersucht wurden.

Auffallend ist weiterhin, dass die Druckdifferenz bei dem mehrfach unterbrochenen Versuch RME1 nicht über 2 kPa anstieg, obwohl dieser Versuch die längste Beladezeit aufwies. Nach der 8. Stunde erfolgten bei diesem Versuch drei Beladeperioden mit dazwischen liegenden Motorstillstandszeiten von jeweils >12,5 Stunden. Es wurden Druckdifferenzverläufe festgestellt, die sich nur sehr wenig voneinander unterscheiden. Dabei ist zu bemerken, dass trotzdem eine Massezunahme des Partikelfilters von Beladeperiode zu Beladeperiode festgestellt wurde (s. a. Abb. 7).

Dieses Ergebnis zeigt u. a., dass bei Einsatz von RME-Kraftstoff und den im PKW-Fahrbetrieb im allgemeinen täglich zu erwartenden Stillstandszeiten die Überwachung der Druckdifferenz über dem Partikelfilter als alleinige Größe zur Einleitung der diskontinuierlichen Regeneration und Begrenzung der Beladezeiten nicht ausreicht, da der Rußmasse des Partikelfilters ebenfalls Grenzen gesetzt sind.

Wird die zum jeweiligen Beladungsende aufgetretene Druckdifferenz des Partikelfilters über der im Filter angesammelten Rußmasse aufgetragen, erhält man die folgende **Abb. 25**.

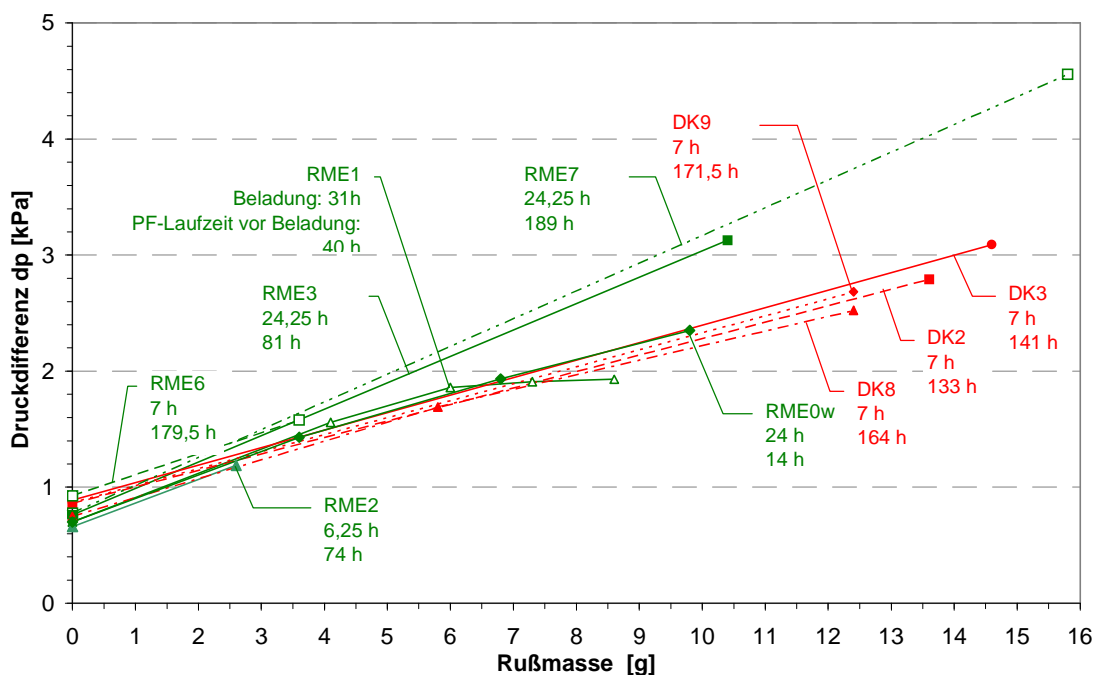


Abb. 25: Druckdifferenz über PF für unterschiedliche Beladungsvorgänge bei RME (additiviert) und DK (additiviert) in Abhängigkeit von der angesammelten Rußmasse

Unabhängig von den aufgetretenen Schwärzungszahlen (s. Abb. 27) zeigt diese Abbildung, dass bei den miteinander vergleichbaren unterbrechungsfreien Beladevorgängen bei gleicher Rußmasse mit RME eine höhere Druckdifferenz über dem Filter entsteht als bei DK.

Bildet man für die unterbrechungsfreien Beladungen bei RME und DK jeweils den Mittelwert der Gradienten Rußmasse/Druckdifferenzhöhung, erhält man die in **Abb. 26** dargestellten Werte.

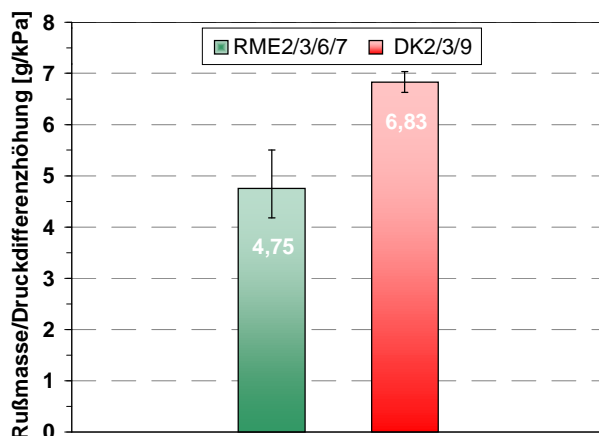


Abb. 26: Gegenüberstellung der Gradienten Rußmasse/Druckdifferenzerhöhung bei RME (additiviert) und DK (additiviert) für unterbrechungsfreie Beladungen

Die Abb. 26 zeigt, dass bei RME nur 4,75 g Ruß die Druckdifferenz um 1 kPa erhöhen, während bei DK 6,83 g Ruß für die gleiche Erhöhung erforderlich sind. Die Ursache für die unterschiedlichen Gradienten wurde in diesem Teilprojekt nicht untersucht. Offensichtlich ist aber die unterschiedliche Beschaffenheit der emittierten Partikel bei RME und DK ausschlaggebend.

Obwohl bei RME im Vergleich zu DK nur die 0,7-fache Rußmenge die gleiche Druckdifferenz über dem Partikelfilter erzeugt, ist der Anstieg der Druckdifferenz mit RME während der Beladungszeit flacher als bei DK (s. a. Abb. 24). Die Erklärung hierfür zeigt die folgende **Abb. 27**:

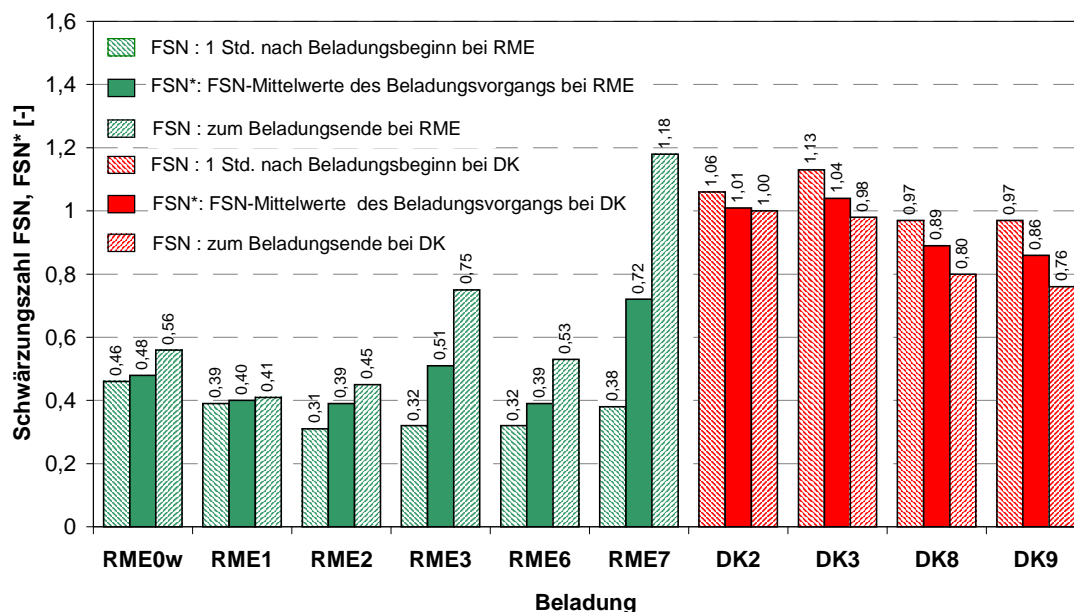


Abb. 27: Schwärzungszahl während der Beladungen bei RME (additiviert) und DK (additiviert)

In dieser Abbildung sind für die verschiedenen Beladungsvorgänge mit beiden Kraftstoffen sowohl die über der Beladungszeit gemittelten Schwärzungszahlen FSN* als auch die zu Beginn und am Ende der Beladung gemessenen FSN-Werte enthalten. Die mittlere Schwärzungszahl ist hierbei als Mittelwert der stündlich während der Beladung 3-fach erfassten FSN-Werte definiert.

Man erkennt sehr deutlich:

- Bei RME war die gemittelte Schwärzungszahl FSN* eindeutig geringer als bei DK. Die Mittelwerte der einzelnen Beladungsvorgänge wurden bei RME mit FSN* = 0,39 bis 0,72 und bei DK mit FSN* = 0,86 bis 1,04 festgestellt.
- Bei RME stieg die Schwärzungszahl während der Beladung stets an. Bei DK wurde eine Verringerung der Schwärzungszahl über der Beladungszeit festgestellt.

Der Vergleich der bei RME und bei DK gemittelten Schwärzungszahlen FSN* zeigt, dass auch bei dem hier verwendeten 1,9 l TDI-Motor – wie schon bei Motoren mit größerem Hubvolumen/Zylinder bekannt [3] – die Rußemission bei RME-Kraftstoff gegenüber Dieselmotor deutlich niedriger war.

Die in Abhängigkeit von der mittleren Schwärzungszahl FSN* während der jeweiligen unterbrechungsfreien Beladung stündlich auf dem Partikelfilter angesammelten Rußmasse zeigt die **Abb. 28**.

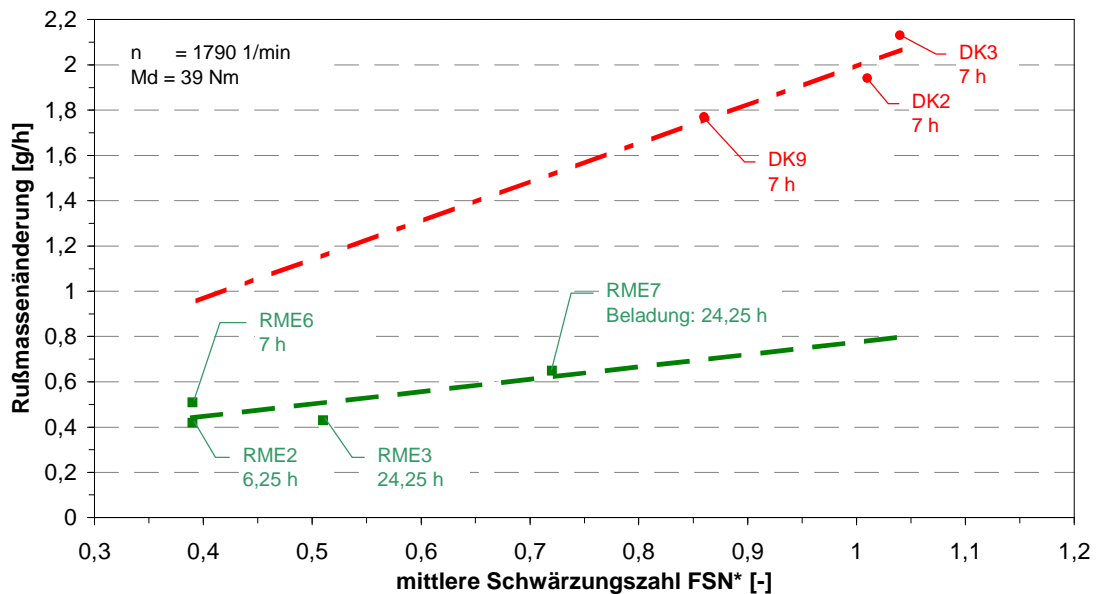


Abb. 28: Stündliche Rußmassezunahme bei RME (additiviert) und DK (additiviert) für unterbrechungsfreie Beladungen in Abhängigkeit von der mittleren Schwärzungszahl

Die eingetragenen Messpunkte lassen in Abhängigkeit von der mittleren Schwärzungszahl FSN* die großen Unterschiede der auf dem Filter pro Stunde angesammelten Rußmasse für die Kraftstoffe RME und DK erkennen. Während die Rußmassezunahme für die Beladung bei Verwendung von RME maximal 0,65 g/h bei FSN* = 0,72 betrug, lag der Wert für DK im Minimum bei 1,77 g/h und FSN* = 0,86.

Die Verlängerung der gewählten linearen Trendlinien für RME zu höheren Schwärzungszahlen und für DK zu geringeren Schwärzungszahlen macht deutlich, dass auch bei gleich hohen Schwärzungszahlen die stündliche Rußmassezunahme auf dem Filter für beide Kraftstoffe erheblich differieren würde: Bei RME wäre die stündlich angesammelte Rußmasse geringer als bei DK. D. h., dass neben der gemittelten Schwärzungszahl FSN* die Eigenschaften der emittierten Partikel für die angesammelte Masse auf dem Partikelfilter von ausschlaggebender Bedeutung sind.

8.3.2 Schadstoffkonzentration

NO-, NO₂-, NO_x-Konzentration nach dem Partikelfilter

In der **Abb. 29** sind die nach dem Partikelfilter gemessenen NO-, NO₂- und NO_x-Konzentrationen dargestellt.

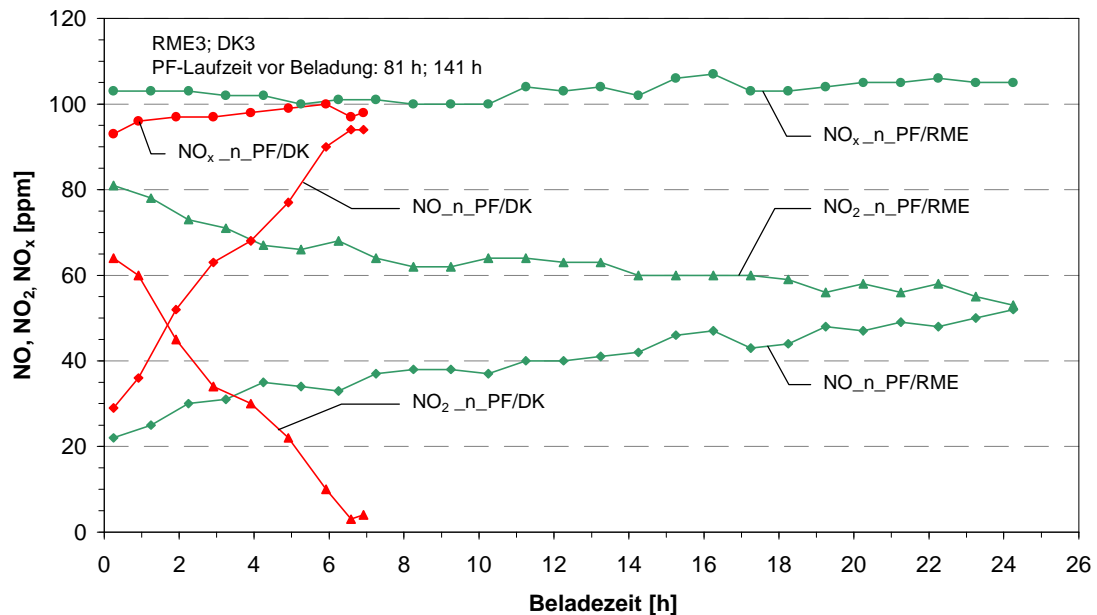


Abb. 29: NO-, NO₂- und NO_x-Konzentration nach dem Partikelfilter bei RME (additiviert) und DK (additiviert) für unterbrechungsfreie Beladung

Für beide Kraftstoffe waren die NO_x-Konzentrationen vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem fast gleich und annähernd konstant.

Die Verringerung der NO₂-Konzentration durch Rußoxidation verlief über der Beladezeit sehr unterschiedlich. Bei DK war der Filter zum Ende des Versuchs mit 14,6 g beladen und die NO₂-Konzentration bis auf nahezu Null verringert. Bei RME und 10,4 g Belademasse betrug die NO₂-Konzentration noch 53 ppm. Bei beiden Kraftstoffen war mit der Verringerung der NO₂-Konzentration durch Rußoxidation ein geringer CRT-Effekt in unterschiedlicher Stärke vorhanden. Die angefallene Rußmasse war jedoch bei beiden Kraftstoffen größer als die oxidierte Rußmasse, so dass die Druckdifferenzen über dem Filter weiter stiegen und die diskontinuierlichen Regenerationen des Filters nach unterschiedlichen Beladezeiten erforderlich wurden.

Luftverhältnis, Sauerstoffkonzentration

Für beide Kraftstoffe konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Das Luftverhältnis Lambda wurde während der Beladungen bei RME und DK mit 2,4 bis 2,5 und die Sauerstoffkonzentration mit ca. 13 Vol. % gemessen.

Kohlenwasserstoff-, Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidkonzentration

In der **Abb. 30** sind die Kohlenwasserstoffkonzentrationen für beide Kraftstoffe gegenübergestellt.

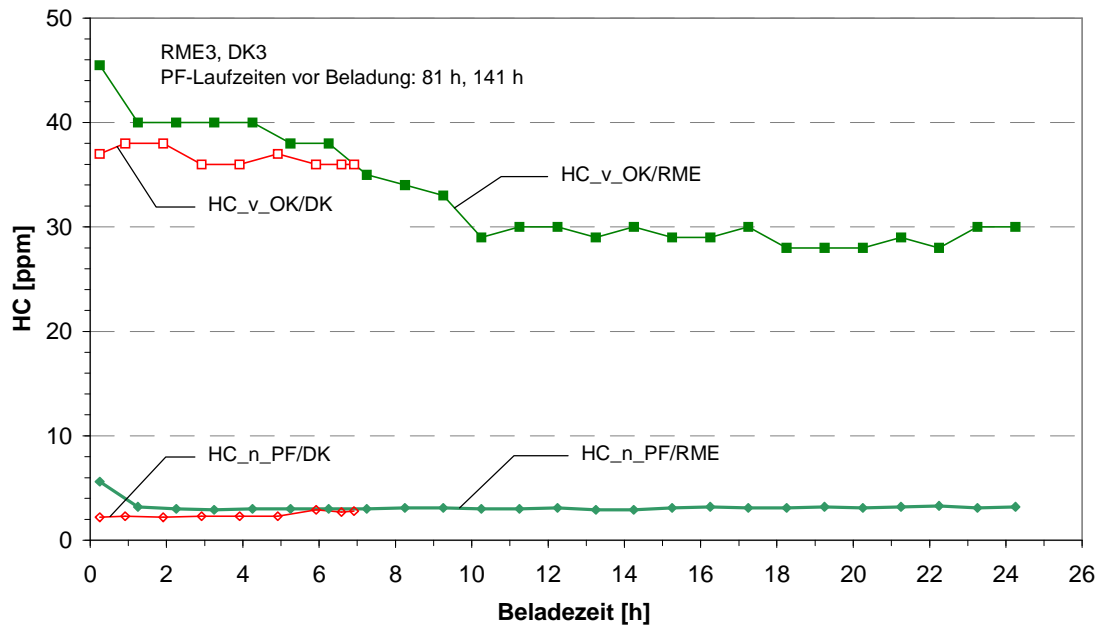


Abb. 30: HC-Konzentration vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem bei RME (additiviert) und DK (additiviert) für unterbrechungsfreie Beladung

Für beide Kraftstoffe wurden nahezu gleiche HC-Konzentrationen gemessen. Dies betrifft auch die CO₂-Konzentration vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem. Sie war über der Beladedauer nahezu konstant und wurde mit ca. 6 Vol. % erfasst. Die CO-Konzentration wurde für beide Kraftstoffe vor dem Oxi-Kat mit 0,03 Vol. % und nach dem Partikelfilter mit 0,01 Vol. % ermittelt.

8.4 Regeneration des Partikelfilters

8.4.1 Regeneration bei additiviertem RME

Die **Abb. 31** und **Abb. 32** zeigen die diskontinuierliche Regeneration des Filters im Anschluss an die mehrfach unterbrochene Beladung, Versuch RME1 und an die unterbrechungsfreie Beladung, Versuch RME3 im stationären Betriebspunkt ($n = 1790$ 1/min, $M_d = 39$ Nm).

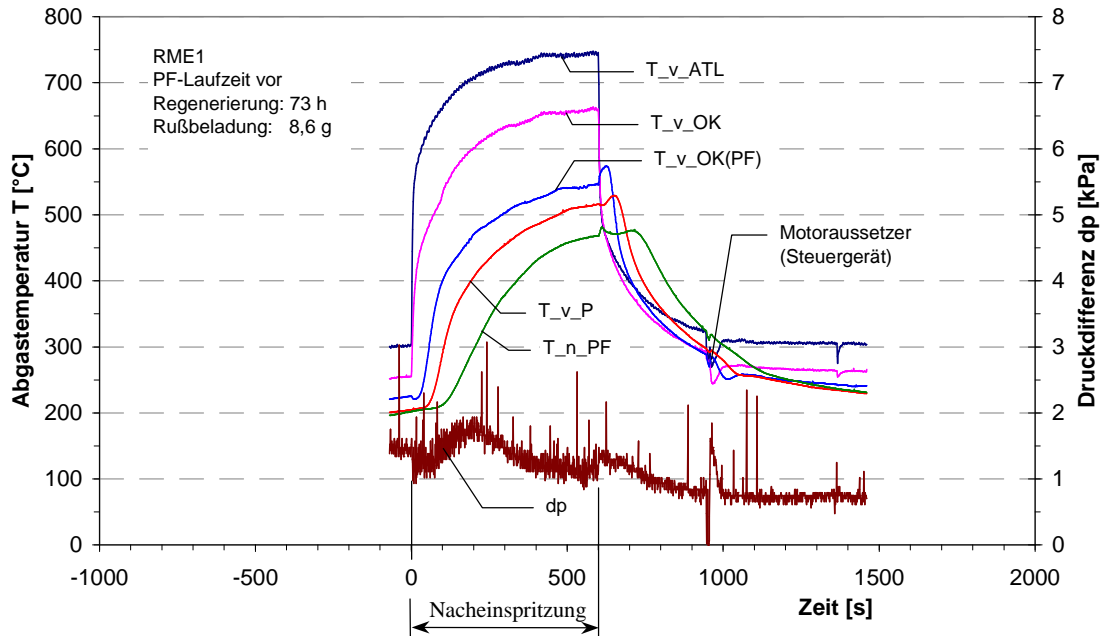


Abb. 31: Abgastemperatur und Druckdifferenz über PF während der Regeneration bei RME (additiviert) nach mehrfach unterbrochener Beladung

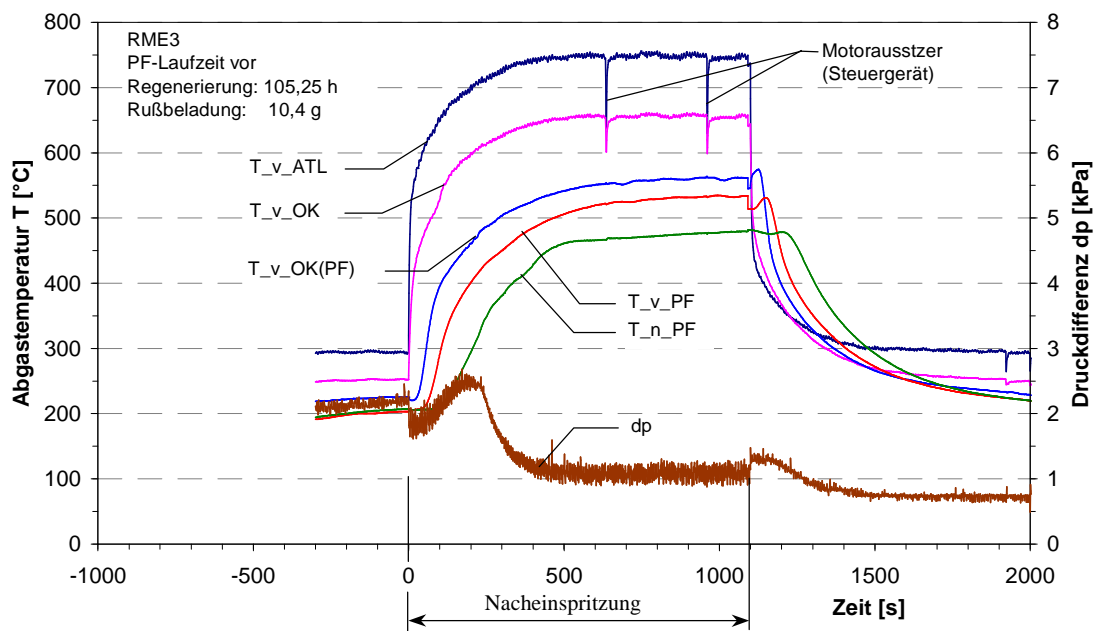


Abb. 32: Abgastemperatur und Druckdifferenz über PF während der Regeneration bei RME (additiviert) nach unterbrechungsfreier Beladung

Der Regenerationsvorgang wurde mit dem Einsetzen der Nacheinspritzung ausgelöst. Die Abgastemperaturen stiegen sofort an. Innerhalb von 470 s wurde die Temperatur vor dem Filter von 204 °C auf 500 °C erhöht. Gleichzeitig erhöhte sich mit dem größeren Volumenstrom auch die Druckdifferenz dp über dem Partikelfilter. Nach etwa 200 s verringerte sich die Druckdifferenz, was auf die beginnende Rußoxidation hinweist. Nach weiteren 300 s erreichte die Druckdifferenz während der Nacheinspritzung einen konstanten Wert, der sich erst nach dem Abschalten der Nacheinspritzung und allmählicher Abkühlung des Nachbehandlungssystems weiter verringerte. Nach insgesamt etwa 500 s war somit die Regeneration des Filters abgeschlossen, was daran erkennbar ist, dass keine weitere Verringerung der Druckdifferenz während der Nacheinspritzdauer auftrat.

Die Nacheinspritzdauer wurde auf Hinweis der Volkswagen AG nach dem Regenerationsversuch RME1 für alle weiteren Regenerationen trotzdem auf ca. 15 min erhöht.

Nach dem Abschalten der Nacheinspritzung, d. h. zu Beginn des Belademodus, erfolgte trotz starken Absinkens der Abgastemperatur vor dem ATL und vor dem motornahen Oxi-Kat die Erhöhung der Temperatur vor dem Oxi-Kat (PF) und vor dem Partikelfilter. Offenbar bewirkte der höhere Sauerstoffanteil im Abgas nach Beendigung der Nacheinspritzung in beiden Oxi-Kat den erneuten Ablauf exothermer Vorgänge (Oxidation von CO und HC). Gleichzeitig stieg die Druckdifferenz über dem Filter um 0,2 bis 0,3 kPa an. Dieser Anstieg wurde augenscheinlich durch den bei angestiegener Abgastemperatur erhöhten Abgasvolumenstrom bewirkt. Mit sinkender Abgastemperatur fiel die Druckdifferenz innerhalb von etwa 10 min bis auf den nach der Regeneration jeweils niedrigsten Wert. Dieser Wert ist zugleich ein Maß für die Vollständigkeit des jeweiligen Regenerationsvorgangs.

Da während der langen Nacheinspritzdauer der Ruß im Partikelfilter offenbar schon weitestgehend oxidiert wurde, konnte trotz des höheren Sauerstoffanteils im Abgas nach Beendigung der Nacheinspritzung nur andeutungsweise festgestellt werden, dass die Temperatur nach dem Partikelfilter T_{n_PF} durch plötzlich einsetzende Rußoxidation sprunghaft ansteigt. Der allmähliche Anstieg ist auf die Abgaserwärmung vor dem Partikelfilter zurückzuführen, die mit zeitlicher Verzögerung auch nach dem Filter bemerkbar ist.

Die Beladung des Filters wurde im Anschluss an die Regeneration über eine Zeitdauer von 15 bis 20 Minuten durchgeführt, bis die Abgastemperatur vor dem Partikelfilter T_{v_PF} nahezu bis auf den Beharrungswert abgekühlt war. Die Druckdifferenz über dem Partikelfilter wurde bei Abschluss aller mit Teillast ($n = 1790$ 1/min, $M_d = 39$ Nm) durchgeführten Regenerationsversuche auf Werte um 0,70 bis 0,75 kPa verringert (s. a. Abb.38).

Da für die Regenerationsversuche das Applikationssteuergerät zum Einsatz kam, traten mehrfach, wie z. B. in den Abb. 31 und Abb. 32 ersichtlich, steuergerätebedingte Motoraussetzer auf, worauf im Punkt 7 bereits hingewiesen wurde. Die Aussetzer, bei denen der Motor nach plötzlicher Drehzahlabenkung den zuvor gefahrenen Betriebspunkt selbständig wieder erreichte, sind an der kurzzeitigen Absenkung insbesondere der Abgastemperaturen T_{v_ATL} und T_{v_OK} erkennbar.

8.4.2 Regeneration bei additiviertem DK

Zum Vergleich der bei RME und DK ablaufenden Regenerationsvorgänge zeigen die folgenden **Abb. 33** und **Abb. 34** die diskontinuierlichen Regenerationen des Filters bei DK, die im Anschluss an die unterbrochene Beladung, Versuch DK8 und die unterbrechungsfreie Beladung, Versuch DK3 im stationären Betriebspunkt erfolgten.

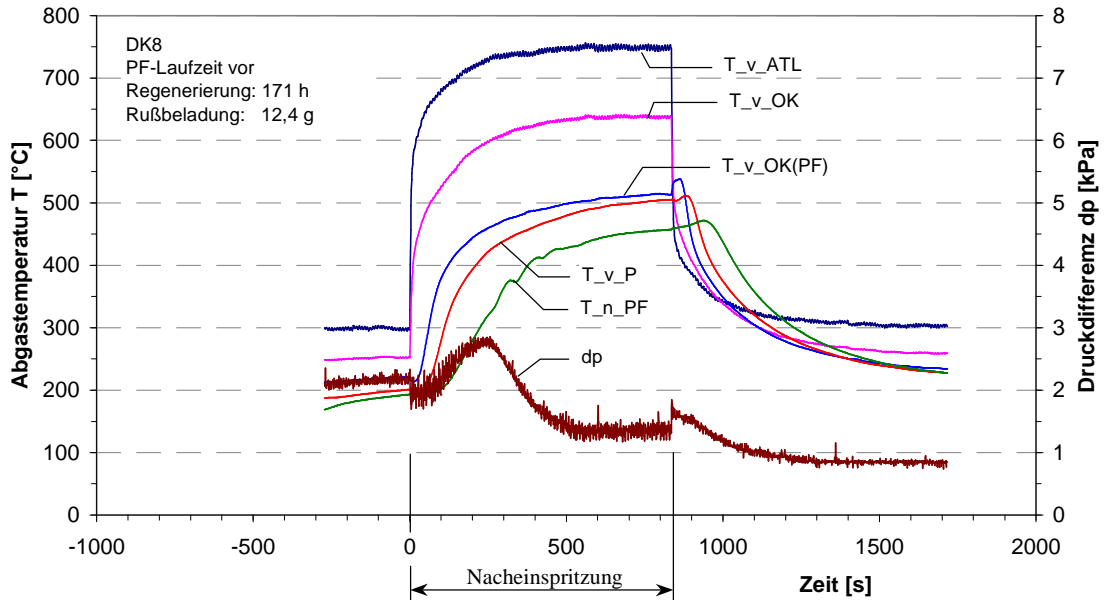


Abb. 33: Abgastemperatur und Druckdifferenz über PF während der Regeneration bei DK (additiviert) nach unterbrochener Beladung

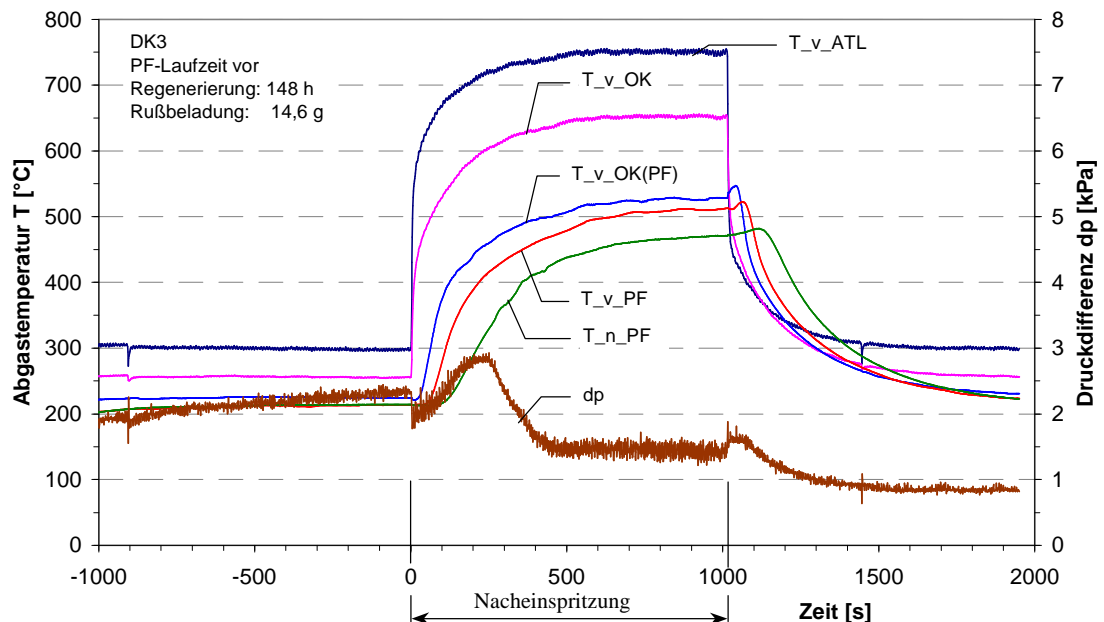


Abb. 34: Abgastemperatur und Druckdifferenz über PF während der Regeneration bei DK (additiviert) nach unterbrechungsfreier Beladung

Der Regenerationsvorgang bei Volllast ist in der nächsten **Abb. 35** dargestellt.

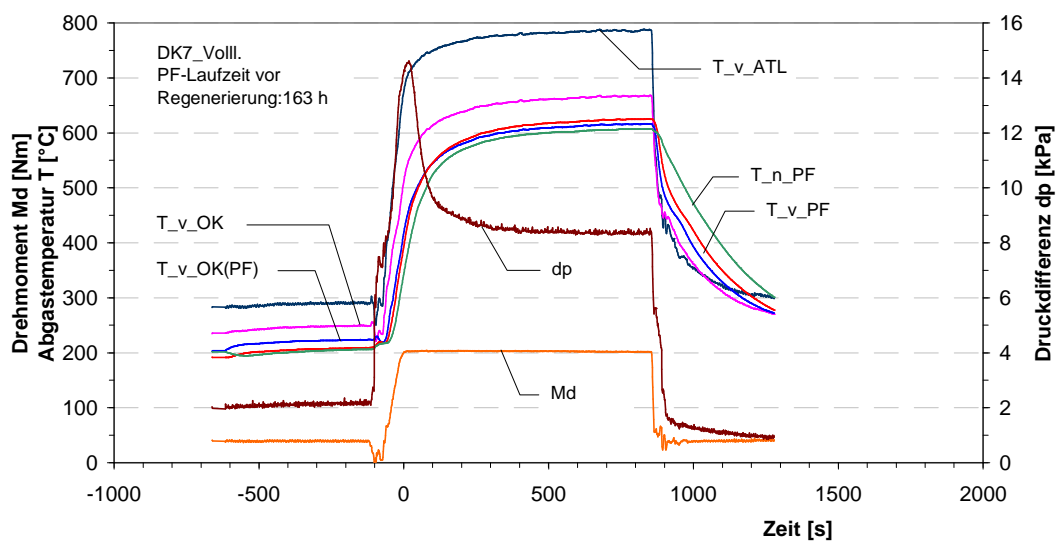


Abb. 35: Abgastemperatur und Druckdifferenz über PF bei DK während der Regenerierung mit Nennleistung

Diese Regeneration wurde nach der Balance Point-Bestimmung bei DK ohne Additivzusatz und anschließender 3-stündiger Beladung bei additiviertem DK mit Nennleistung durchgeführt, um nach der Verwendung von nicht additiviertem DK mit hoher Sicherheit den Partikelfilter vollständig zu regenerieren.

Bevor Drehzahl und Drehmoment des Motors bis zur Nennleistung ($n = 4000 \text{ 1/min}$, $M_d = 203 \text{ Nm}$) erhöht wurden, erfolgte die Filterbeladung wie bei allen anderen Versuchen mit dem vereinbarten Stützpunkt des AMA-Zyklus ($n = 1790 \text{ 1/min}$, $M_d = 39 \text{ Nm}$).

Man erkennt, dass die Druckdifferenz unmittelbar nach der Drehzahl- und Drehmomenterhöhung bei gleichzeitig schnellem Anstieg der Abgastemperatur ihr Maximum mit $dp = 14,6 \text{ kPa}$ erreicht hatte, danach steil abfiel und mit $8,4 \text{ kPa}$ einen bei Nennleistung konstant verlaufenden Wert aufwies. Die Temperatur vor dem Partikelfilter überschritt 600 °C . Nach dem Übergang von der Nennleistung in die Teillast fielen sofort alle Temperaturwerte rasch ab. Die Temperatur nach dem Filter zeigte auf Grund der Aufheizung der Filtermasse eine zeitlich verzögerte Absenkung.

8.4.3 Vergleich der Regeneration bei RME und DK

Druckdifferenz- und Temperaturverlauf

Die Regeneration bei DK verlief im Vergleich zur Regeneration bei RME grundsätzlich ähnlich. Wie bei RME verringerte sich etwa 200 s nach Beginn der Nacheinspritzung die Druckdifferenz dp über dem Partikelfilter als Anzeichen der beginnenden Rußoxidation, nachdem sie zuvor bei steigender Abgastemperatur ebenfalls angestiegen war. Nach 470 s (DK8) und 530 s (DK3) war die Rußoxidation beendet, d. h. die Druckdifferenz blieb in der restlichen Zeit der Nacheinspritzperiode im Mittel konstant.

Nach dem Abschalten der Nacheinspritzung, d. h. bei erneutem Beginn des Belademodus, erfolgte bei beiden Kraftstoffen trotz schnellen Absinkens der Abgastemperatur vor dem ATL und vor dem motornahen Oxi-Kat die Erhöhung der Temperatur vor dem Oxi-Kat(PF) und vor dem Partikelfilter. Offenbar bewirkte bei beiden Kraftstoffvarianten der höhere Sauerstoffanteil im Abgas nach Beendigung der Nacheinspritzung in den beiden Oxi-Kat den erneuten Ablauf exothermer Vorgänge. Auf Grund der Erhöhung des Volumenstroms, die sowohl durch die Temperaturerhöhung des Abgases als auch durch den höheren Luftdurchsatz in der Belade- gegenüber der Regenerationsphase (s. a. Abb. 37) bedingt ist, erfolgte gleichzeitig der Anstieg der Druckdifferenz über dem Filter. Mit sinkender Abgastemperatur verringerte sich die Druckdifferenz über dem Partikelfilter bei RME und DK annähernd gleich.

Da während der langen Nacheinspritzdauer der Ruß im Partikelfilter offenbar schon weitestgehend oxidiert wurde, konnte trotz des höheren Sauerstoffanteils im Abgas nach Beendigung der Nacheinspritzung nur bei RME andeutungsweise festgestellt werden, dass die Temperatur nach dem Partikelfilter durch plötzlich einsetzende Rußoxidation sprunghaft ansteigt. Der allmähliche kurzzeitige Anstieg nach Beendigung der Nacheinspritzung war bei beiden Kraftstoffen festzustellen. Er ist auf die Abgaserwärmung vor dem Partikelfilter zurückzuführen, die mit zeitlicher Verzögerung auch nach dem Filter bemerkbar war.

Bei nur kurzzeitiger Nacheinspritzdauer, wie in **Abb. 36** dargestellt, erkennt man, dass unmittelbar nach dem Abschalten der Nacheinspritzung die Temperatur nach dem Filter T_{n_PF} als Kennzeichen für die durch den plötzlich höheren Sauerstoffanteil im Abgas nochmals einsetzende Rußoxidation sprunghaft ansteigt.

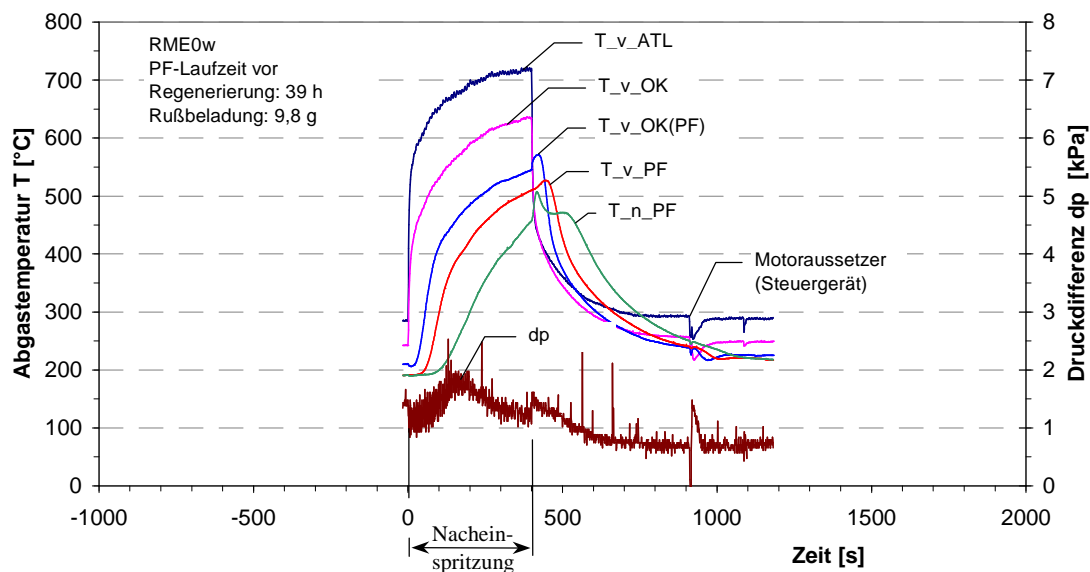


Abb. 36: Abgastemperatur und Druckdifferenz über PF während der Regeneration bei RME (additiviert) nach mehrfach unterbrochener Beladung

Innerhalb von nur 400 s Nacheinspritzdauer erreichte die Druckdifferenz noch keinen konstanten Wert. D. h., dass die während der Nacheinspritzung ablaufende Rußoxidation noch nicht abgeschlossen war und diese bei Erhöhung der Sauerstoffkonzentration im Abgas durch Umschalten auf den Belademodus fortgesetzt wurde.

Das Partikelfiltergewicht war nach dieser Regeneration 1,6 g größer als vor der mit zweimaliger Unterbrechung über 24 Stunden durchgeführten Filterbeladung. Deshalb wurde anschließend mit Versuch RME0w2 nochmals regeneriert, wodurch das Filtergewicht um 0,8 g und die Druckdifferenz von 0,75 auf 0,74 kPa verringert wurden (s. a. Abb. 38 und 48).

Die auffälligen Unterschiede während der Nacheinspritzdauer der Abb. 31 bis 34 sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Kraftstoff (additiviert)	Regeneration nach Beladung		Erhöhung T _v _PF		Dauer für Erhöhung [s]	maximale T _v _OK(PF) [°C]	Dauer der Nach- einspritzung [s]
	mit Unterbrechung	ohne Unterbrechung	von [°C]	auf [°C]			
RME	RME1		204	500	467	546	600
		RME3	204	500	470	546	1096
DK	DK8		201	500	725	513	833
		DK3	213	500	650	528	1014

Es ist ersichtlich, dass bei RME gegenüber DK ein deutlich schnellerer Anstieg der Abgastemperatur vor dem Filter bis auf 500 °C (T_v_PF) erfolgte und dass die maximalen Temperatur vor dem im Partikelfiltergehäuse integrierten Oxi-Kat (T_v_OK (PF)) bei höheren Werten lagen. Wie aus den Abb. 32 und 34 hervorgeht, wurden vor dem ATL und vor dem motornahen Oxi-Kat bei RME und DK jedoch nahezu gleiche Werte gemessen. Daher ist die höhere Abgastemperatur T_v_OK (PF) bei RME nur durch stärkere exotherme Reaktionen im motornahen Oxi-Kat zu erklären.

Motorparameter

In der folgenden **Abb. 37** sind die motorspezifischen Parameter bei RME und bei DK für die Belade- und die Regenerationsvorgänge dargestellt. Man sieht, dass die für die Regeneration bei RME angepassten Motorparameter *Förderbeginn Sollwert Nacheinspritzung*, *Nacheinspritzmenge*, *Tastverhältnis EGR-Ventil*, *Tastverhältnis Ladedrucksteller* und *Tastverhältnis Drosselklappe* unverändert, d. h. ohne Anpassung, bei DK Anwendung fanden.

Die in den Spalten *Beladung/RME* und *Beladung/DK* für die Parameter *Förderbeginn* und *Förderdauer Sollwert Nacheinspritzung* vom Applikationssteuergerät ausgegebenen Daten (-78,00 und -36,00) bedeuten, dass im Belademodus keine Nacheinspritzung vorgesehen war.

Funktion	Labelname	Dimension	Beladung RME	Regeneration RME	Beladung DK	Regeneration DK
Förderbeginn Sollwert Haupteinspritzung	zmmFBHEsoll	grd. KW	-2,90	-3,09	-2,81	-3,06
Förderdauer Sollwert Haupteinspritzung	zmmFDHEsoll	grd. KW	6,53	5,70	6,20	5,61
Förderbeginn Sollwert Nacheinspritzung	zmmFBVEsoll	grd. KW	-78,00*)	29,51	-78,00*)	29,51
Förderdauer Sollwert Nacheinspritzung	zmmFDVEsoll	grd. KW	-36,00*)	16,13	-36,00*)	16,03
Nacheinspritzmenge	zmoM_EVE	mg/Hub	0	12,00	0	12,00
korrigierte Hauptmenge	zmoM_EHEK	mg/Hub	10,36	8,28	9,62	8,13
Gesamtmenge Haupt- und Nacheinspritzung	zmoM_EGES	mg/Hub	10,36	20,28	9,62	20,13
Tastverhältnis EGR-Ventil	ehmFAR1	%	40,77	80,00	38,64	80,00
Tastverhältnis Ladedrucksteller	ehmFLD_DK	%	60,68	5,00	60,67	5,00
Tastverhältnis Drosselklappe	ehmFAR2	%	0	81,30	0	81,30
Ladedruck-Istwert	ldmP_Liin	hPa	1174,63	1056,25	1168,22	1060,34
Luftmasse pro Hub	armMList	mg/Hub	363,98	305,08	345,03	305,52
Ist-Wert Luftmasse (HFM)	anmLMM	kg/h	78,15	65,49	74,07	65,62
Hauptmenge vor Temperaturkorrektur	mrmM_EPUMP	mg/Hub	10,36	11,28	9,62	11,13
Drehzahl	dzmNmit	l/min	1789	1788	1789	1790
Wassertemperatur	anmWTF	°C	89,9	92,5	89,6	91,3
Oeltemperatur	anmOTF	°C	91	93	90	92
Kraftstofftemperatur	anmKTF	°C	79,0	79,8	70,1	75,8

*) keine Nacheinspritzung

Abb. 37: Motorparameter für den Belade- und den Regenerationsvorgang bei RME (additiviert) und DK (additiviert)

Regenerationseffekt

Die Vollständigkeit der Filterregeneration kann anhand der nach der Regeneration erreichten Druckdifferenz dp beurteilt werden. In der folgenden **Abb. 38** sind deshalb die zum Abschluss des Regenerationsvorgangs im Belademodus gemessenen Druckdifferenzen und die dazugehörigen Filterlaufzeiten dargestellt.

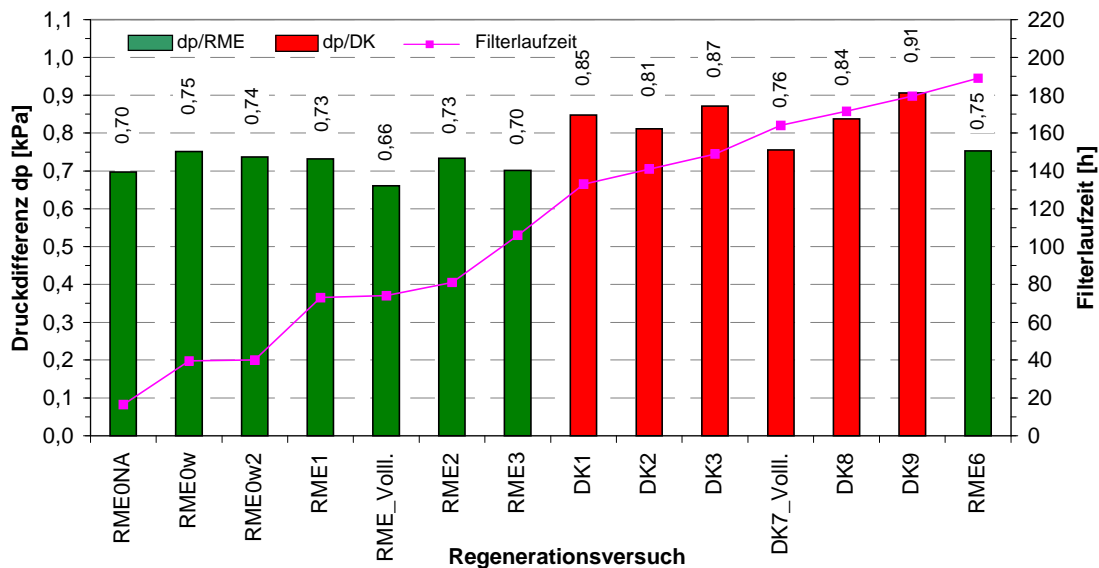


Abb. 38: Laufzeit und Druckdifferenz nach der Regeneration des Partikelfilters bei RME (additiviert) und DK (additiviert)

Aus dieser Abbildung ist folgendes erkennbar:

- Der Versuch RME_Voill. ergab von allen Regenerationen bei RME die niedrigste Druckdifferenz mit $dp = 0,66$ kPa. Der Regenerationsversuch DK7_Voill. zeigte bei allen DK-Versuchen den größten Effekt und ergab eine Druckdifferenz über dem Filter von $dp = 0,76$ kPa.
- Die Druckdifferenzen der mit Teillast durchgeführten Regenerationsversuche waren bei RME gegenüber DK gleichmäßiger und niedriger. An dieser Stelle sei nochmals auf die Abb. 32 und Abb. 34 hingewiesen, in denen die Regenerationsversuche RME3 und DK3 mit vergleichbaren Nacheinspritzzeiten von mehr als 1000 s dargestellt sind. Die für Versuch RME3 ausgewiesene Druckdifferenz lag mit $dp = 0,70$ kPa an der unteren Grenze des Bereichs, der bei RME im Teillastbetrieb mit $0,70 < dp < 0,75$ kPa gemessen wurde. Für den Versuch DK3 dagegen wurde mit $0,87$ kPa ein Wert näher an der oberen Grenze des mit $0,81 < dp < 0,91$ kPa ermittelten Bereichs gemessen.
- Für den Regenerationseffekt ist es unbedeutend, ob die Beladung des Filters wie z. B. für die Versuche RME0NA, RME0w, RME1 und DK8 ein- oder mehrfach unterbrochen wurde.
- Der nach der letzten Regeneration im Versuch RME6 mit $dp = 0,75$ kPa ausgewiesene Druckdifferenzwert zeigt, dass nach der erreichten Filterlaufzeit von 189 Stunden nur eine geringe Erhöhung der Druckdifferenz gegenüber dem Ausgangswert eingetreten ist. Dieser Wert liegt noch in dem bereits bei geringeren Filterlaufzeiten mit RME ermittelten Bereich und gibt damit noch keinen sicheren Aufschluss über die Größe des irreversiblen Differenzdruckanstieges, der durch die Ablagerungen der Additivvasche zu erwarten ist.
- Bei einer Regeneration mit Volllast kann sich nach der bisherigen Kenntnis eine noch geringere Druckdifferenz ergeben.

Schadstoffe

In **Abb. 39** sind die NO-, die NO₂-, die NO_x- und die HC-Konzentrationen nach dem Partikelfilter bei RME und in **Abb. 40** bei DK dargestellt.

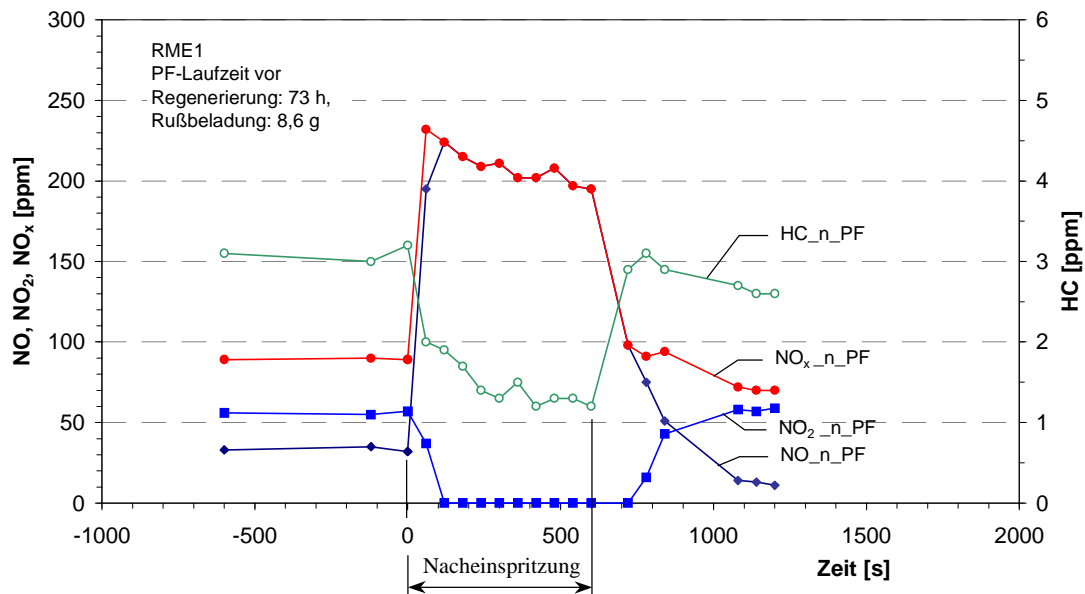


Abb. 39: NO-, NO₂-, NO_x- und HC-Konzentration nach PF bei RME (additiviert) während der Regenerierung

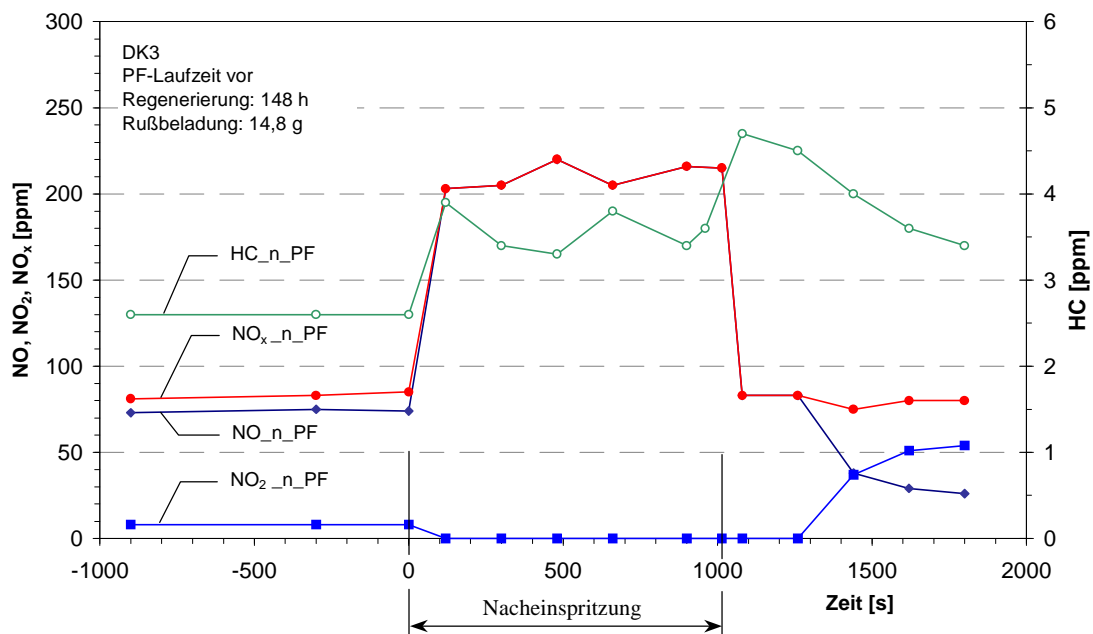


Abb. 40: NO-, NO₂-, NO_x- und HC-Konzentration nach PF bei DK (additiviert) während der Regenerierung

Für beide Kraftstoffe erhöhten sich während der Nacheinspritzdauer die NO_x-Konzentrationen auf nahezu gleiche Werte. Die NO₂-Konzentrationen sanken während der Rußoxidation auf den Werte Null. Deshalb stiegen die NO-Konzentrationen an und entsprachen jeweils dem NO_x-Niveau.

Die ohnehin geringen Kohlenwasserstoffkonzentrationen zeigten für RME und DK voneinander abweichende Verläufe. Während die Konzentration bei RME innerhalb der Nacheinspritzdauer geringer wurde, stieg sie bei DK geringfügig an. Ursache hierfür kann die gegenüber RME-Betrieb langsamere Aufheizung des Oxi-Kat sein, da die Nacheinspritzung für RME, nicht jedoch für DK optimiert war.

Die **Abb. 41** und **Abb. 42** zeigen Luftverhältnis, Sauerstoffkonzentration und Schwärzungszahl für RME und DK.

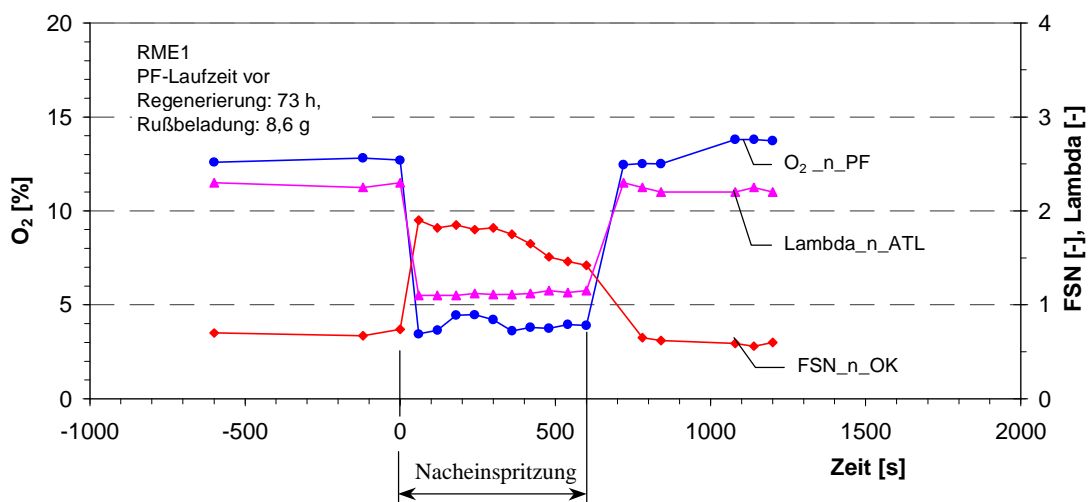


Abb. 41: Luftverhältnis, Sauerstoffkonzentration und Schwärzungszahl bei RME (additiviert) während der Regenerierung

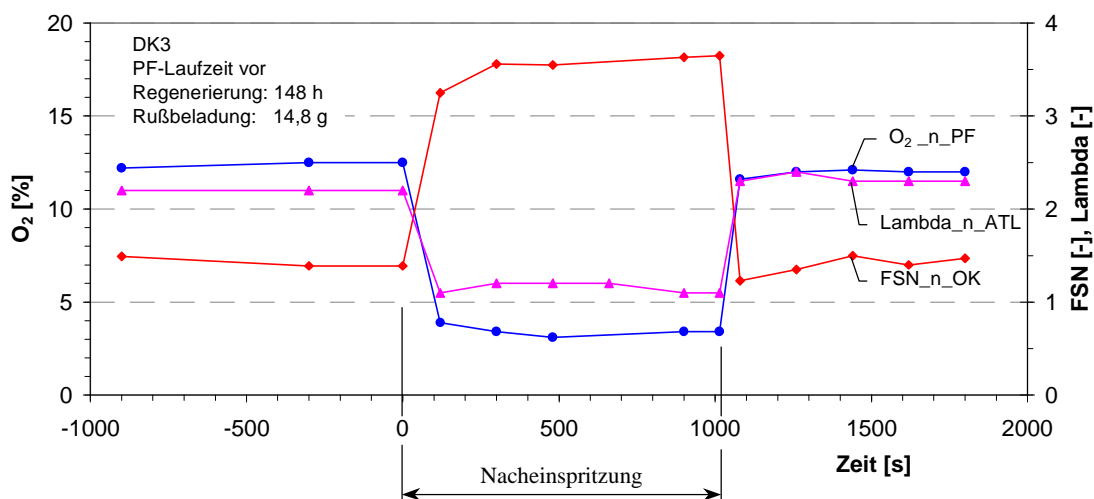


Abb. 42: Luftverhältnis, Sauerstoffkonzentration und Schwärzungszahl bei DK(additiviert) während der Regenerierung

Die nach dem Abgasnachbehandlungssystem gemessene Sauerstoffkonzentration sowie das nach dem Abgasturbolader gemessene Luftverhältnis Lambda zeigten für beide Kraftstoffe annähernd gleiche Werte. Beide Parameter waren während der Nacheinspritzung deutlich niedriger. Die Sauerstoffkonzentration sank von ca. 12 bis 13 % auf etwa 3,5 % und das Luftverhältnis von 2,2 auf 1,1. Die für RME-Betrieb mit FSN = 0,7 gegenüber DK-Betrieb um 50 % geringere Schwärzungszahl stieg in der Nacheinspritzphase auf FSN = 1,8 bis 1,4, während bei DK die Schwärzungszahl mit FSN = 3,6 gemessen wurde.

8.5 Balance Point-Bestimmung

Mit den in den nächsten 4 Abbildungen dargestellten Versuchen des im Punkt 4 beschriebenen Verfahrens der Balance Point-Bestimmung wird stets die Kombination aus Motor und Partikelfiltersystem bewertet, da durch die Variation des Drehmomentes auch die Abgaszusammensetzung und der Abgasvolumenstrom verändert werden.

Der Filter wurde vor jedem Versuch in dem vereinbarten Teillastpunkt ($n = 1790$ 1/min, $M_d = 39$ Nm) bei Verwendung des jeweiligen Kraftstoffs bis zu einer Druckdifferenz von $dp = 1,35$ bis $1,60$ kPa beladen. (Ein bereits beladener Filter erreicht nach [2] seinen BP stets bei niedrigeren Temperaturen als ein zu Beginn des Versuchs völlig entleerter Filter).

In den **Abb. 43 bis 46** sind die Ergebnisse der BP-Bestimmung nacheinander für RME (additiviert), DK (additiviert), RME ohne Additivzusatz und DK ohne Additivzusatz dargestellt.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse zusammengefasst:

Kraftstoff	Balance Point bei		
	n [1/min]	M_d [Nm]	T_{v_PF} [°C]
RME (additiviert)	1790	50...61	226...242
DK (additiviert)	1790	61...71	245...262
RMEoA	1790	61...71	240...255
DKoA	1790	≤ 71	≤ 260

Man sieht, dass der Balance Point mit additiviertem RME im Vergleich zu den drei weiteren Kraftstoffen bei einem geringeren Drehmoment und demzufolge bei einer niedrigeren Abgastemperatur vor dem Partikelfilter erreicht wurde.

Für additivierten DK, RMEoA und DKoA waren die Ergebnisse hinsichtlich der Höhe des Drehmoments, bei dem über der Zeit kein weiterer Anstieg der Druckdifferenz erkennbar war, annähernd gleich.

Die Temperatur vor dem Filter war sowohl bei additiviertem als auch bei nicht additiviertem RME gegenüber den entsprechenden Dieselkraftstoffen bei gleich hohen Drehmomenten um wenige Grade niedriger.

Vergleicht man bei den additivierten Kraftstoffen die Druckdifferenz bei $M_d = 90$ Nm bzw. bei den nicht additivierten Kraftstoffen bei 80 Nm, so fällt auf, dass bei den DK-Varianten gegenüber den RME-Kraftstoffen die eingetretene Rußoxidation zu einer schnelleren Verringerung der Druckdifferenz führte. Bedenkt man, dass – wie in Abb. 25 für unterbrechungsfreie Beladung dargestellt – eine gleich große Rußmasse bei DK gegenüber RME eine geringere Druckdifferenz bewirkt, kann man daraus folgern, dass bei DK die je Zeiteinheit oxidierte Rußmasse vergleichsweise größer war.

Die nach Überschreitung des Balance Point sichtbare Verringerung der Druckdifferenz verlief bei den Kraftstoffen ohne Additivzugabe im Vergleich zu den additivierten Kraftstoffen bei gleichem Drehmoment über der Zeit flacher.

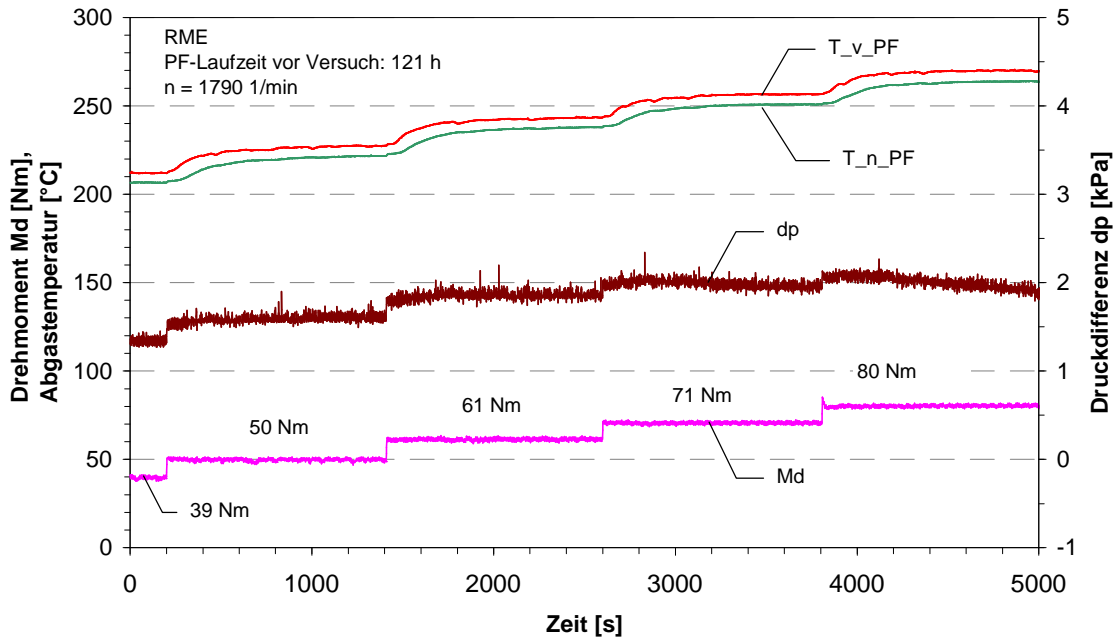


Abb. 43: Balance Point-Bestimmung durch Variation der Motorlast bei RME (additiviert)

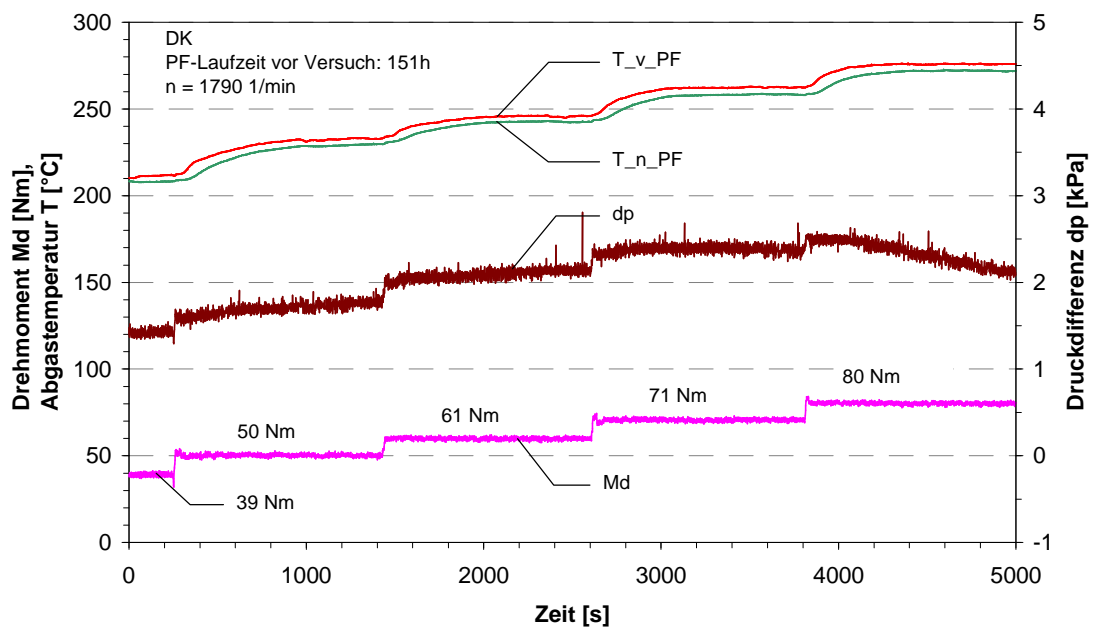


Abb. 44: Balance Point-Bestimmung durch Variation der Motorlast bei DK (additiviert)

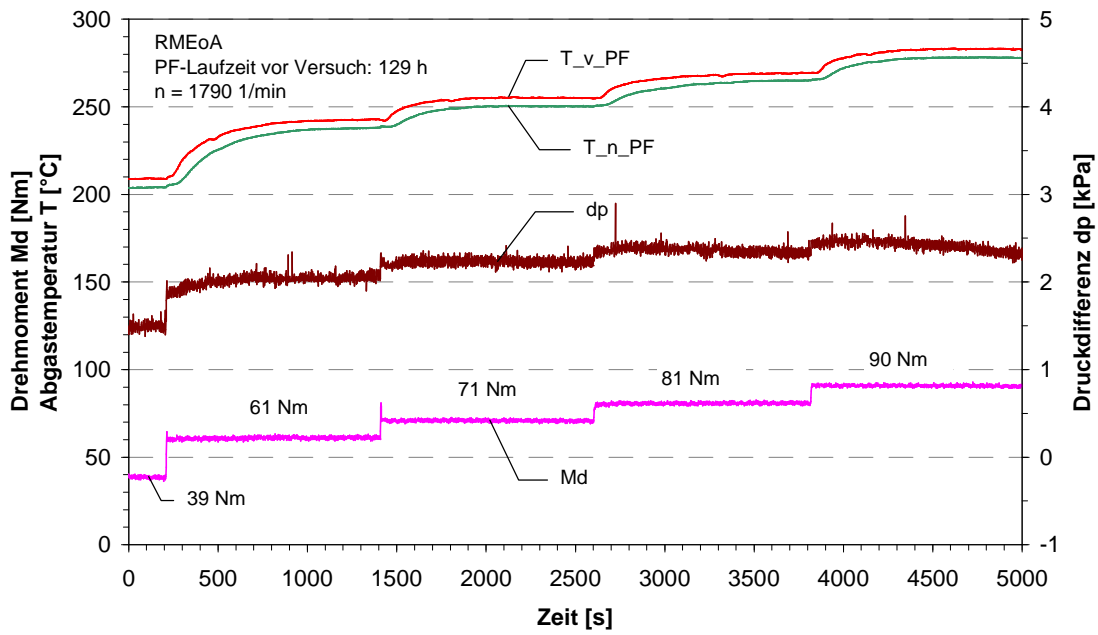


Abb. 45: Balance Point-Bestimmung durch Variation der Motorlast bei RME ohne Additivzusatz

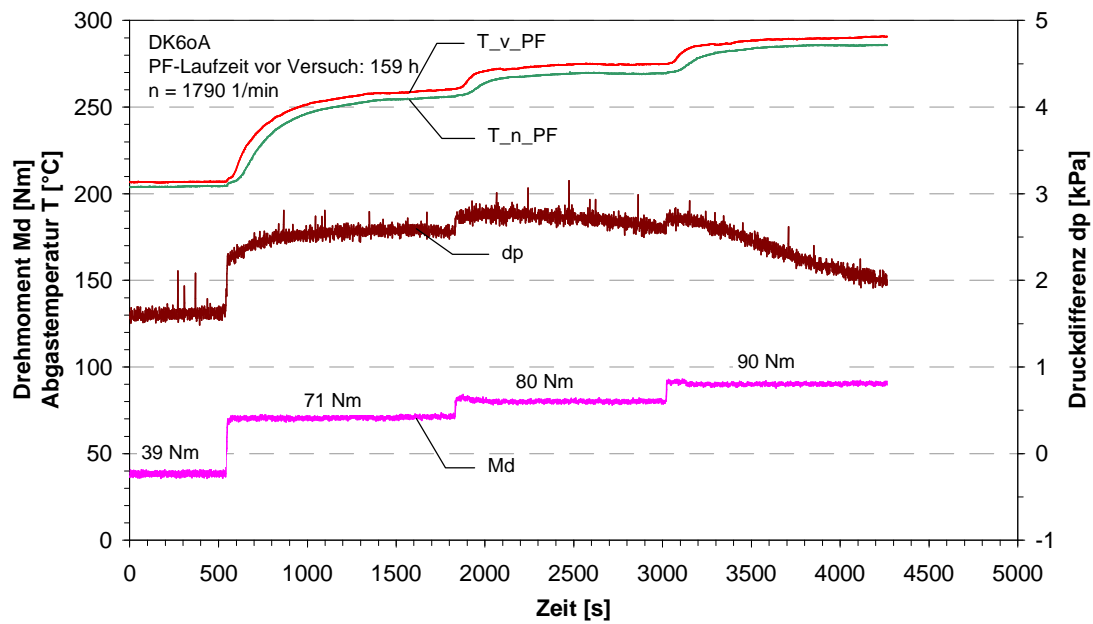


Abb. 46: Balance Point-Bestimmung durch Variation der Motorlast bei DK ohne Additivzusatz

8.6 Gewichtsveränderung des Partikelfilters

In **Abb. 47** sind alle Ergebnisse der Filtergewichtsbestimmung nach den Belade- und den Regenerationsversuchen sowie die dazu gehörenden Filterlaufzeiten und in **Abb. 48** die Gewichtserhöhung nach den Regenerationsversuchen mit RME und DK inkl. Filterlaufzeiten enthalten.

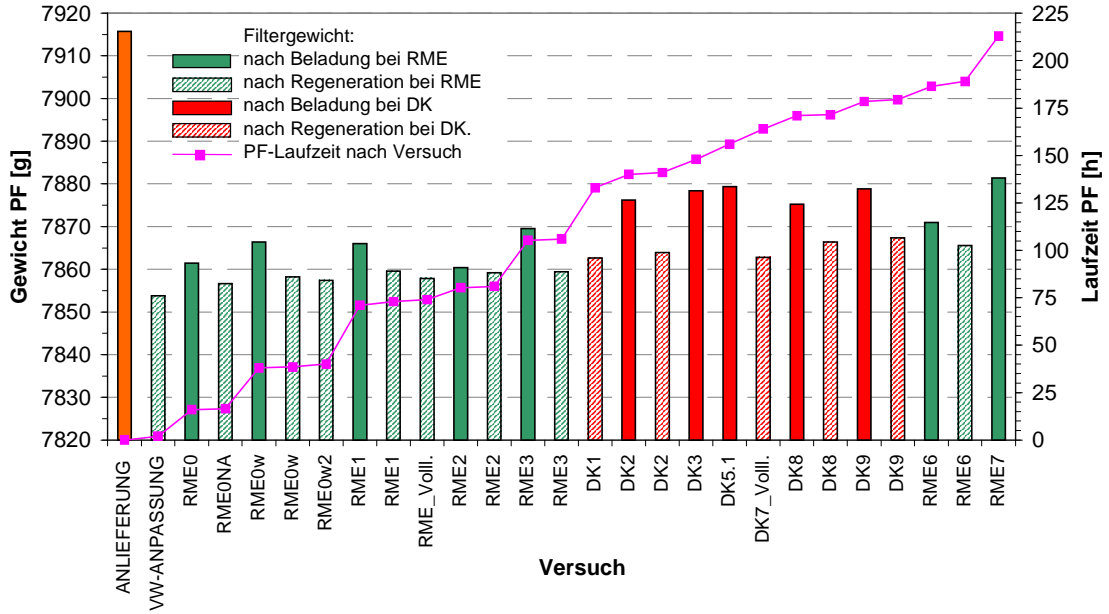


Abb. 47: Filtergewicht und Filterlaufzeit nach Belade- und Regenerationsversuchen bei RME (additiviert) und DK (additiviert)

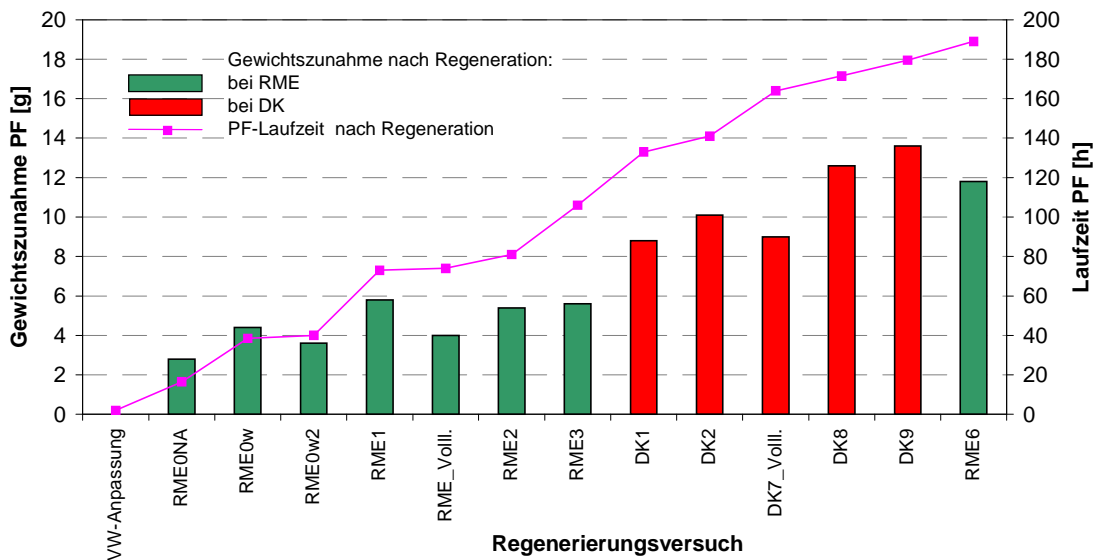


Abb. 48: Filterlaufzeit und Gewichtserhöhung nach Regenerationsversuchen bei RME (additiviert) und DK (additiviert)

Während der 213-stündigen Erprobung des Partikelfilters erfolgten 27 Gewichtsbestimmungen.

Man erkennt an den Werten nach erfolgter Regeneration, dass das Filtergewicht erwartungsgemäß mit fortschreitender Laufzeit angewachsen ist. Wie die Abb. 48 zeigt, betrug die Gewichtserhöhung bei RME-Kraftstoff innerhalb der ersten 106 Stunden 5,6 g. Die Gewichtserhöhung bei DK ist mit 4,8 g in der Filterlaufzeit von 46,5 Stunden deutlich höher. Sie betrug damit bei DK- im Vergleich zum RME-Betrieb annähernd den doppelten Wert.

Die zuletzt mit dem Versuch RME6 vorgenommene Regeneration verringerte gegenüber der zuvor bei DK durchgeführten Regeneration das Filtergewicht um 1,8 g und die Druckdifferenz um 0,16 kPa, so dass letztlich nach der Laufzeit von 189 Stunden die Gewichtserhöhung für alle durchgeführten Versuche mit 11,8 g ermittelt wurde. Vereinbarungsgemäß (s. a. Pkt. 7) wurde nach dem Beladeversuch RME7 keine Regeneration durchgeführt. Der Filter wurde der Volkswagen AG beladen zur Auswertung übergeben.

In Übereinstimmung mit den aus der Abb. 38 gewonnenen Erkenntnissen zeigen die Ergebnisse:

- Die bei Volllast (ohne Nacheinspritzung) durchgeführten Regenerationen waren sowohl bei RME als auch bei DK wirksamer als bei Teillastbetrieb (mit Nacheinspritzung). Durch die Volllastregenerationen wurden das Filtergewicht (Abb. 47) und die Druckdifferenz über dem Filter bei RME- und bei DK-Betrieb gegenüber der im Teillastbetrieb jeweils vorhergehenden Regeneration deutlich verringert (Abb. 38).
- Die bei RME-Kraftstoff während der Betriebsdauer von 106 Stunden nach der letzten Regeneration im Vergleich zum Ausgangsgewicht festgestellte geringe Erhöhung des Filtergewichts um 5,6 g hatte nur eine geringe Erhöhung der Druckdifferenz über dem Filter zur Folge. Bei DK-Betrieb war die nach den Filterregenerationen ermittelte Gewichtszunahme mit 4,8 g in nur 46,5 Stunden deutlich größer als bei RME-Betrieb, und dementsprechend stieg auch die Druckdifferenz über dem Filter an (Abb. 38).

Zum Überblick ist in der folgenden **Abb. 49** der Verbrauch der verschiedenen Kraftstoffe für die gesamte Filterlaufzeit von 213 Stunden dargestellt:

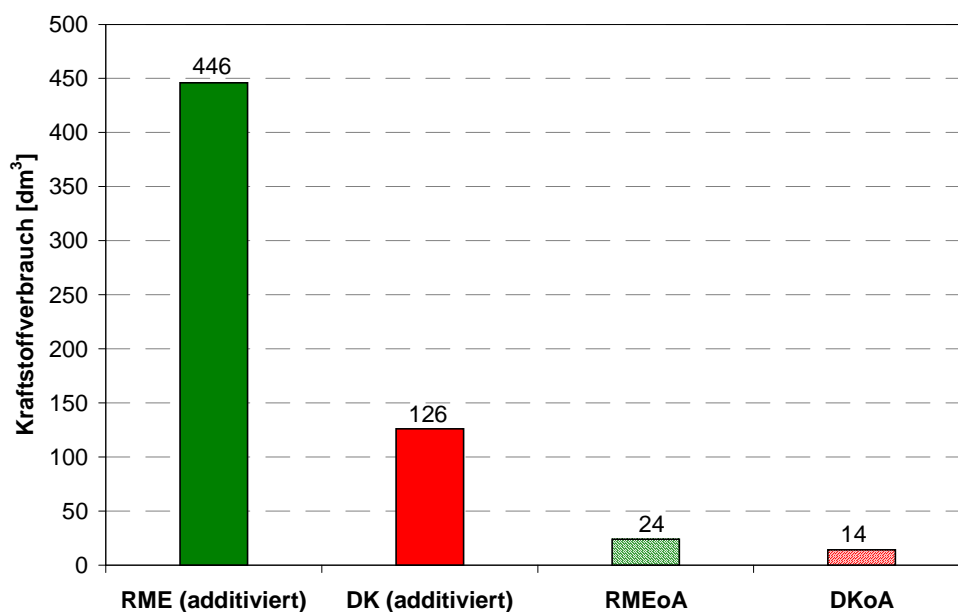


Abb. 49: Verbrauch der verschiedenen Kraftstoffe in der Filterlaufzeit von 213 Stunden

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde die Eignung eines von der Volkswagen AG bereitgestellten Abgasnachbehandlungssystems bei Biodiesel- (RME-) und wechselweisem DK- und RME-Einsatz an einem 4-Zylinder-Reihenmotors, 1,9 l TDI mit Pumpe-Düse-Einspritzung (PDE) untersucht.

Die Beladung und die diskontinuierliche, additivunterstützte Regeneration des SiC-Partikelfilters erfolgten im stationären Teillastbetrieb des Motors bei $n = 1790$ 1/min, $M_d = 39$ Nm, einem Punkt aus dem sog. AMA-Zyklus. Das Additiv „satacen 2“ (Eisenbasis) wurde dem jeweiligen Motorkraftstoff bereits im Tank zugemischt.

Die mit additiviertem RME begonnenen Untersuchungen zeigten folgende Ergebnisse:

Partikelfilterbeladung

- Die Beladung des Partikelfilters erfolgte bei RME gegenüber DK deutlich langsamer. Die Zeit für die Beladung mit der vorgegebenen maximalen Rußmenge von 15 g verlängerte sich bei unterbrechungsfreiem Beladevorgang annähernd auf den 3- bis 4,5-fachen Wert. Die zulässige Beladezeit verringerte sich bei Erhöhung der mittleren Schwärzungszahl des Beladevorgangs.
- Bei gleichen mittleren Schwärzungszahlen der Beladevorgänge wäre bei RME die auf dem Filter stündlich angesammelte Rußmasse geringer als bei DK.
- Durch die unterschiedliche Beschaffenheit von RME- und DK-Ruß bewirkte die auf dem Filter angesammelte RME-Rußmasse gegenüber einer gleich großen DK-Rußmasse eine höhere Druckdifferenz über dem Filter: 4,75 g RME-Ruß und 6,83 g DK-Ruß erzeugten jeweils als Durchschnittswert der unterbrechungsfreien Versuche eine Erhöhung der Druckdifferenz um 1 kPa.
- Mit zunehmender Beladezeit wurden bei RME ansteigende und bei DK abfallende Schwärzungszahlen gemessen.
- Bei unterbrechungsfreier Beladung stieg die Druckdifferenz bei RME und DK über der Beladezeit und in Abhängigkeit von der Schwärzungszahl kontinuierlich an. Der Anstieg bei RME war erheblich geringer als bei DK und zeigte auf Grund unterschiedlicher mittlerer Schwärzungszahl je Beladevorgang voneinander abweichende Verläufe.
- Wurde der Beladevorgang bei RME ein- oder mehrmals über mehr als 1,5 Stunden unterbrochen, stieg die Druckdifferenz, bezogen auf die gesamte Beladedauer, nicht mehr kontinuierlich an. Trotz zunehmender Rußansammlung auf dem Filter erhöhte sich die Druckdifferenz in jeder Beladeperiode im Extremfall nur bis auf $dp = 2$ kPa. Bei derart unterbrochener Beladung war die Druckdifferenz kein Maß für den Beladezustand des Filters.
- Bei DK erfolgte nach dem Neustart wiederum ein kontinuierlicher Anstieg der Druckdifferenz, die bei Beladungsende gegenüber unterbrechungsfreier Beladung nur um ca. 0,2 kPa niedriger war.
- Während der Beladevorgänge wurden die limitierten gasförmigen Schadstoffe im Rohabgas für beide Kraftstoffe mit annähernd gleicher Konzentration gemessen.
- Messungen nach dem Abgasnachbehandlungssystem zeigten, dass mit Ausnahme der NO- und NO₂-Konzentration sowohl die NO_x-, die HC-, die CO-, die CO₂- und die O₂-Konzentration sich während der Beladung bei beiden Kraftstoffen nur unwesentlich voneinander unterscheiden haben.
- Der CRT-Effekt war bei DK gegenüber RME stärker ausgeprägt, was am steileren Abfall der NO₂-Konzentration bis nahe Null und gleichzeitigem Anstieg der NO-Konzentration über der Beladezeit erkennbar ist.

Regeneration

- Die motorischen Parameter für die diskontinuierliche additivunterstützte Regeneration waren für RME optimiert und sind bei DK ohne Änderung übernommen worden.
- Die Regenerationsvorgänge verliefen bei beiden Kraftstoffen grundsätzlich ähnlich.
- Bei RME stellte sich im Ergebnis der Regeneration stets eine niedrigere Druckdifferenz über dem Filter als bei DK ein. Dieser Wert ist als Maß für die Vollständigkeit der Regeneration anzusehen.
- Durch die Gewichtsbestimmung des Filters vor und nach den Regenerationsvorgängen wurde bestätigt, dass die Regenerationsvorgänge bei RME vollständiger als bei DK waren. Die bei zunehmender Filterlaufzeit nach der Regeneration bleibende Gewichtserhöhung betrug bei RME nur etwa 50 % der bei DK ermittelten Erhöhung.
- Im Anschluss an die mit DK gefahrenen Untersuchungen zeigten die mit RME durchgeführten Versuche wiederum, dass die Regeneration bei RME effektiver als bei DK war: Druckdifferenz und Filtergewicht wurden im Vergleich zur vorhergehenden Regeneration, die bei DK erfolgt war, deutlich verringert.
- Sowohl bei RME als auch bei DK war die Regeneration bei Volllast wirksamer als die Regeneration bei Teillastbetrieb des Motors.
- Hinsichtlich der nach dem Partikelfilter gemessenen Schadstoffkonzentrationen konnten in der Regenerationsphase keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Kraftstoffarten festgestellt werden.

Balance Point-Bestimmung

Die Balance Point-Bestimmung wurde mit additiviertem RME, additiviertem DK, RME ohne Additivzugabe und DK ohne Additivzugabe durch die Variation der Motorlast bei konstanter Drehzahl vorgenommen:

- Das Gleichgewicht zwischen Rußansammlung auf dem Filter und Rußoxidation, bei konstantem Drehmoment erkennbar an dem konstanten Verlauf der Druckdifferenz über der Zeit, stellte sich bei additiviertem RME gegenüber additiviertem DK mit um 18 °C niedrigerer Temperatur vor dem Filter und 10 Nm geringerem Drehmoment ein.
- Die Ergebnisse für additivierten DK und DK und RME ohne Additivzugabe zeigten annähernd gleiche Werte.

Gewichtszunahme des Partikelfilters

Erwartungsgemäß erfolgte mit zunehmender Filterlaufzeit eine Gewichtserhöhung des Filters:

- Das Filtergewicht wurde während der Filterlaufzeit von 189 Stunden zwischen der ersten und der letzten Regeneration um 11,8 g erhöht.
- In der Gesamtlaufzeit des Filters über 213 Stunden wurden 610 Liter Kraftstoff durchgesetzt, wovon 446 l RME und 126 l DK insgesamt 203,5 ml Additiv zugemischt waren und 24 l RME sowie 14 l DK ohne Additivzusatz zum Einsatz kamen.
- Unter der Annahme, dass die Gewichtserhöhung des Filters von 11,8 g bei dem erfolgten wechselweisen RME/DK-Betrieb ausschließlich auf Ascherückstände des Additivs „satacen 2“ zurückzuführen ist, beträgt der Ascherückstand ca. 6,3 % der dem Kraftstoff zugemischten Additivmasse „satacen 2“. Die im Dieselmotorkraftstoff und im Motorenöl vorhandenen Additive können jedoch ebenfalls zur Aschebildung beitragen.

Ausblick

Die bei stationärem Teillastbetrieb des Motors durchgeführten Untersuchungen lieferten erste Ergebnisse hinsichtlich der Auswirkungen von RME sowie des wechselweisen RME- und DK-Betriebs auf die Funktion des Abgasnachbehandlungssystems:

Das diskontinuierlich arbeitende additivunterstützte Abgasnachbehandlungssystem mit SiC-Partikelfilter ist für die Verwendung von additiviertem RME-Kraftstoff und den wechselweisen DK- und RME-Betrieb grundsätzlich geeignet.

Zur Vertiefung der Erkenntnisse sollten z. B. noch folgende Untersuchungen durchgeführt werden:

- Es ist erforderlich, auf Grund der im PKW-Fahrbetrieb üblicherweise häufig auftretenden und oftmals auch länger andauernden Beladungsunterbrechungen die für die Einleitung der Regeneration in diesem Fall nicht zielführende Druckdifferenz durch weitere Maßnahmen zu ergänzen.
- Um Sicherheit für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erlangen, sind sowohl quantitativ weitere Messungen mit häufiger wechselndem RME- und DK-Betrieb als auch Messungen im Fahrzeug durchzuführen.
- Kraftstoffmischungen aus RME und DK sollten in die Versuche einbezogen werden.
- Des Weiteren ist die Wirkung des Additivs „satacen 2“ auf die Langzeitstabilität von RME zu klären.
- Auch folgende Fragen, die sich aus den vorliegenden Untersuchungen ergaben, bedürfen einer Klärung :
 - Ansammlung von Ruß bei mehrfach unterbrochener Beladung des Filters bei RME ohne messbare Differenzdruckerhöhung des Filters,
 - Schwankungen der Schwärzungszahl bei längerem Betrieb des Motors im stets gleichen Teillastpunkt bei additiviertem RME und wechselweisem DK- und RME-Betrieb,
 - Zunahme der Schwärzungszahl bei additiviertem RME während der Beladezeit im Gegensatz zur Verringerung bei additiviertem DK.

10 Literatur

[1] H.-O. Herrmann, O. Lang, I. Mikulic, V. Scholz:
Partikelfiltersystem für Diesel-PKW
MTZ 9/2001, S. 652 – 660

[2] H. Harndorf, J.K. Schaller, N.F. Benninger:
Regenerationshilfen für Diesel-PKW

[3] Autorenkollektiv:
Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben „Optimierung eines modernen Dieselmotors auf den Betrieb mit Biodiesel“, Az.: 206.2-3234/1-10(60)
Bundesanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig

[4] R. Dorenkamp, T. Düsterdiek:
Die saubere Zukunft der Dieselmotoren von Volkswagen
Sonderausgabe der MTZ, Mai 2001: 25 Jahre VW-Dieselmotoren