

# Regeneration von Partikelfiltern bei Benzin- und Dieselkraftfahrzeugen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 145

**bast**

# Regeneration von Partikelfiltern bei Benzin- und Dieselkraftfahrzeugen

von

Fabian Langwald  
TÜV Rheinland Kraftfahrt GmbH  
Köln

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Fahrzeugtechnik Heft F 145**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 84.0533**  
Regeneration von Partikelfiltern bei Benzin- und Dieselmotorkraftfahrzeugen

**Fachbetreuung**  
Sigrid Limbeck

**Referat**  
Emissionen im Kraftfahrzeugbereich

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9307  
ISBN 978-3-95606-698-6

Bergisch Gladbach, Juli 2022

## Kurzfassung – Abstract

### Regeneration von Partikelfiltern bei Benzin- und Dieselmotorkraftfahrzeugen

Zur Einhaltung der Partikelemissionsgrenzwerte für Kraftfahrzeuge im Rahmen der Typprüfung nach Europäischer Verordnung (EG) 715/2007 werden von den Fahrzeugherstellern Partikelfilter (Dieselpartikelfilter (DPF)/Ottopartikelfilter (engl. Gasoline Particulate Filter = GPF)) ins Abgassystem der Fahrzeuge verbaut. Spätestens bei Erreichen einer kritischen Rußmasse im Filter muss eine Regeneration eingeleitet werden. Die Regeneration erfolgt durch Abbrennen des im Filter eingelagerten Rußes. Der Kohlenstoffanteil der Partikel oxidiert hierbei mit Sauerstoff oberhalb von ca. 600 °C zu Kohlendioxid. Die Regenerationsstrategie der Fahrzeuge variiert. Grundsätzlich wird zwischen periodischer (aktiver) und kontinuierlicher (passiver) Regeneration unterschieden. Bei Dieselmotorkraftfahrzeugen wird fast ausschließlich die periodische Regeneration eingesetzt, bei Fahrzeugen mit Benzinmotor die kontinuierliche Regeneration.

Ziel des Forschungsprojektes ist es, die Fahrzeugemissionen während einer Partikelfilterregeneration zu messen und hinsichtlich ihrer Veränderung gegenüber eines Fahrbetriebs ohne Regeneration zu bewerten. Dazu werden von drei Diesel- und zwei Benzinfahrzeugen die Partikelfilter beladen und im Anschluss daran eine Regeneration durchgeführt, bei der sowohl die festen als auch die gasförmigen Abgasemissionen gemessen werden. Die festen Bestandteile des Abgases werden im Nachgang auf ihre chemischen Elemente untersucht.

Bei den drei Dieselmotorkraftfahrzeugen erfolgt die Beladung des DPF bis ca. 80 % bei einer Straßenfahrt. Im Anschluss wird das Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand installiert und die Messtechnik angeschlossen. Die Messung der Emissionen während der DPF-Regeneration erfolgt in einem konstanten Motorbetriebspunkt bei einer simulierten Fahrt mit 80 km/h in der Ebene.

Die Auswertung der festen Bestandteile des Abgases zeigt, dass die gemittelten Partikelanzahlwerte während und nach einer DPF-Regeneration von ca.  $1E+07$  #/s um drei Zehnerpotenzen auf  $1E+10$  #/s steigen. Bei der Analyse der Gaskomponenten fällt auf, dass insbesondere unmittelbar vor der Regeneration die Gaskomponenten CO, THC,  $NO_x$ , NO,

$NO_2$ ,  $NH_3$  und  $CH_4$ , einen deutlichen Peak aufweisen, welcher dann mit Beginn der Regeneration wieder absinkt. Der Beginn kurz vor der Regeneration ist der Zeitpunkt, in dem das Motorsteuergerät die Abgastemperatur anhebt. In diesem Umschaltzeitpunkt der Motorparameter werden kurzzeitig die deutlich erhöhten Emissionen der genannten Gaskomponenten gemessen. Die Gaskomponenten, welche bei allen Diesel-Prüffahrzeugen während der Regeneration einen signifikanten Anstieg aufwiesen, sind CO, NO und  $NO_x$ . Der NO- bzw.  $NO_x$ -Wert erhöht sich während der Regeneration im Mittel um Faktor 67- bzw. 95 zum gewählten Referenzwert. Der  $NO_2$ -Wert erhöht sich im Mittel um den Faktor 2,5, der THC-Wert um den Faktor 5 und der  $SO_2$ -Wert ist um Faktor 4 erhöht. Im Vergleich zum Referenzwert sind die Messwerte von  $NH_3$  und  $CH_4$  während der Regeneration grundsätzlich höher und die  $N_2O$ -Konzentration niedriger.

Die Beladung des GPF bei den beiden Prüffahrzeugen mit Benzinmotor wird durch wiederholte Kaltstarts bei -15 °C durchgeführt. Die passive Regeneration erfolgt auf dem Rollenprüfstand durch wechselnden Last- und Schubbetrieb. Im Lastbetrieb werden zunächst die erforderlichen Abgastemperaturen von über 600 °C erzeugt, um daran anschließend im Schubbetrieb den erforderlichen Sauerstoffüberschuss sicherzustellen und eine passive Regeneration kontrolliert herbeizuführen.

Die Auswertung der Änderung der Emissionen, welche durch die passive Regeneration an den GPF hervorgerufen werden, wird durch die Anforderung eines dynamischen Messablaufes, welcher in Zyklen bei konstanter Geschwindigkeit mit unterschiedlicher Lastaufbringung erfolgt, erschwert. Bei der Partikelanzahl ist kein eindeutiger Trend erkennbar. Während bei einem Prüffahrzeug kein signifikanter Unterschied zwischen Regeneration und leerem GPF gemessen wurde, sind die PN-Emissionen bei dem zweiten Prüffahrzeug während der Regeneration erhöht. Die Analysen der Verläufe der Abgaskomponenten zeigen, dass alle erhöhten Emissionen außer  $NH_3$ , HCHO und zum Teil NO während der Aufbringung der Last und nicht während des Schubbetriebes und somit der passiven Regeneration anstiegen. Die Änderungen der Mittelwerte aus der Regeneration sind im Vergleich zum leeren Filter deutlich geringer als die beim DPF der Dieselmotorkraftfahrzeuge.

Die chemische Analyse der festen Bestandteile ergab bei beiden Fahrzeugtypen keine Auffälligkeiten.

ten. Der überwiegende Teil der festen Abgasbestandteile ist Kohlenstoff.

Die Messungen der Dieselkraftfahrzeuge zeigten eindeutige und reproduzierbare Ergebnisse. Hier konnten durch die aktive Regeneration, die Phasen; Beladung, Regeneration und Filterkuchenaufbau in einem konstanten Motorbetriebspunkt abgegrenzt und die Veränderungen der Emissionen untersucht werden. Die Analyse der Messungen der Fahrzeuge mit Benzinmotoren zeigten kein eindeutiges Ergebnis. Dies ist zum einen auf die passive Regeneration zurückzuführen, welche keinen konstanten Motorbetriebspunkt ermöglicht. Dadurch überlagern dynamische Einflüsse das Ergebnis. Zum andern ist, bedingt durch die Verbrennung und Abgasnachbehandlung, die Rußmasse in einem GPF deutlich geringer als in einem DPF. Dadurch wird während der Regeneration weniger Ruß verbrannt und die Veränderung der Schadstoffe fällt geringer aus.

#### **Regeneration of particulate filters in gasoline and diesel vehicles**

In order to comply with the particle emission limits for motor vehicles as part of the type approval test in accordance with European Regulation (EC) 715/2007, the vehicle manufacturers install particle filters (Diesel Particulate Filters (DPF)/Gasoline Particulate Filters (GPF)) in the vehicle's exhaust system. Regeneration must be initiated at the latest when a critical soot mass is reached in the filter. The regeneration takes place by burning off the soot stored in the filter. The carbon content of the particles is oxidised with oxygen above approx. 600°C to form carbon dioxide. The regeneration strategy of the vehicles varies. A basic distinction is made between periodic (active) and continuous (passive) regeneration. Periodic regeneration is used almost exclusively for diesel vehicles and continuous regeneration for vehicles with gasoline engines.

The aim of the research project is to measure the vehicle emissions during particle filter regeneration and to evaluate them with regard to their change compared to driving without regeneration. For this purpose, the particle filters of three diesel and two gasoline vehicles are loaded and a regeneration is then carried out, during which both the solid and the gaseous exhaust emissions are measured. The solid components of the exhaust gas are subsequently examined for their former elements.

In the three diesel vehicles, the DPF is loaded up to approx. 80% while driving on the road. The vehicle is then installed on the roller dynamometer and the measurement equipment is connected. The measurement of the emissions during the DPF regeneration takes place in a constant engine operating point with a simulated journey with 80 km/h on the flat road.

The evaluation of the solid components of the exhaust gas shows that the averaged particle number values during and after a DPF regeneration of approx.  $1E+07$  #/s increase by three orders of magnitude to  $1E+10$  #/s. When analyzing the gas components, it is noticeable that especially immediately before regeneration, the gas components CO, THC, NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> and CH<sub>4</sub> show a clear peak, which then drops again when the regeneration begins. The beginning shortly before the regeneration is the point in time at which the engine control unit increases the exhaust gas temperature. At this switch-over point of the engine parameters, the significantly increased emissions of the gas components mentioned are measured temporarily. The gas components that showed a significant increase in all diesel test vehicles during regeneration are CO, NO and NO<sub>x</sub>. The NO and NO<sub>x</sub> value increases during the regeneration on average by a factor of 67 and 95 to the selected reference value. The NO<sub>2</sub> value increases on average by a factor of 2.5, the THC value by a factor of 5 and the SO<sub>2</sub> value is increased by a factor of 4 compared to the reference value. The measured values of NH<sub>3</sub> and CH<sub>4</sub> during regeneration are generally higher and the N<sub>2</sub>O concentration is lower.

The loading of the GPF in the two test vehicles with gasoline engines is carried out by repeated cold starts at -15°C. The passive regeneration takes place on the roller dynamometer by alternating engine load and overrun operation. In load operation, the required exhaust gas temperatures of over 600°C are generated in order to then ensure the required excess oxygen in overrun operation and bring about a passive regeneration in a controlled manner.

The evaluation of the change in emissions, which are caused by the passive regeneration of the GPF, is made more difficult by the requirement of a dynamic measurement process, which takes place in cycles at constant speed with different load application. No clear trend can be seen in the number of particles. While no significant difference

---

was measured between regeneration and empty GPF in one test vehicle, the PN emissions were increased in the second test vehicle during regeneration. The analyses of the exhaust gas component curves show that all increased emissions except for  $\text{NH}_3$ , HCHO and partly NO increased during the application of the load and not during the overrun and thus the passive regeneration. The changes in the mean values from the regeneration are significantly smaller than those for the DPF in diesel vehicles compared to the empty filter.

The chemical analysis of the solid components did not reveal any abnormalities in either vehicle type. The predominant part of the solid exhaust gas components is carbon.

The measurements of the diesel vehicles showed clear and reproducible results. Here, through active regeneration, the phases of loading, regeneration and filter cake build-up are delimited in a constant engine operating point and the changes in emissions are examined. The analysis of the measurements of the vehicles with gasoline engines showed no clear result. On the one hand, this is due to the passive regeneration, which does not allow a constant engine operating point. This means that dynamic influences are superimposed on the result. On the other hand, due to the combustion and exhaust gas after-treatment, the soot mass in a GPF is significantly lower than in a DPF. This means that less soot is burned during regeneration and the change in pollutants is less.

## Summary

### Regeneration of particulate filters in gasoline and diesel vehicles

## 1 Current situation and target of the project

In order to comply with the particle emission limit values for motor vehicles as part of the type approval test in accordance with European Regulation (EC) 715/2007, the vehicle manufacturers install particle filters (Diesel Particulate Filters (DPF)/Gasoline Particulate Filters (GPF)) in the vehicle's exhaust system. These closed ceramic particle filters consist of a honeycomb body made of silicon carbide or cordierite, which has a large number of parallel, mostly square channels. Adjacent channels are closed on the opposite sides by ceramic plugs so that the exhaust gas has to flow through the porous ceramic walls. When flowing through the walls, the soot particles are initially transported by diffusion to the pore walls, to which they adhere. As the filter becomes increasingly loaded with soot, a layer of soot forms on the surfaces of the duct walls, which results in a very efficient surface filtering for the following operating phase. Due to the increasing soot load in the filter, the exhaust back pressure increases steadily. Regeneration of the filter must be initiated at the latest when a critical soot mass is reached. The regeneration takes place by burning off the collected soot in the filter. The carbon content of the particles can be oxidised to CO<sub>2</sub> with oxygen above approx. 600°C.

The regeneration strategy of the vehicles varies. A basic distinction is made between periodic, active and continuous, passive regeneration. Periodic regeneration is used almost exclusively for diesel vehicles, and continuous regeneration for vehicles with gasoline engines. Depending on the loading of the filter and other system parameters, both types of regeneration can occur in some vehicles. Forced regeneration of the particulate filter may also be necessary in extreme driving conditions. This is initiated externally.

At over 600°C, the exhaust gas temperature of gasoline engines is generally higher than that of diesel engines, at around 400°C for the operating

points outside of regeneration. In order to initiate active regeneration in diesel vehicles, engine measures are taken to set the necessary temperature level of 600°C for the soot to burn off. To increase the exhaust gas temperature, the early and late post-injection as well as the late shift of the main injection should be mentioned. The exhaust gas recirculation is switched off during the regeneration phase in order to achieve a higher exhaust gas temperature. A passive regeneration of gasoline vehicles takes place when a sufficiently high exhaust gas temperature and excess oxygen are established due to the engine operating point; e.g. in a roll phase while driving on the motorway.

The aim of the research project is to measure and analyse the vehicle emissions of a particulate filter regeneration during a typical road travel engine operating point or cycle. Due to the regeneration strategies, this must be done separately for gasoline and diesel vehicles.

## 2 Test execution

Three diesel and two gasoline vehicles are measured. In the case of diesel vehicles, the DPF is loaded up to approx. 80% soot when driving on the road. The vehicle is then installed on the roller dynamometer and the measurement equipment is connected. This is followed by the final loading of the DPF up to regeneration at a constant engine operating point with a simulated journey at 80 km/h on the flat road. In order to be able to evaluate the measured values of the regeneration, these must be compared with a respective reference value. The measured values of this final loading phase will later be used as a reference. The subsequent DPF regeneration on the roller dynamometer and the subsequent build-up of the soot layer are the phases that are compared with the reference emissions.

The loading of the GPF in the test vehicles with gasoline engines is carried out by repeated cold starts at -15°C. The passive regeneration then takes place on the roller dynamometer by alternating engine load and overrun operation. In load operation, the required exhaust gas temperatures of over 600°C are first generated in order to then ensure the required excess oxygen in overrun operation and bring about a passive regeneration in a controlled manner.

An element analysis of the solid particles emitted during the regeneration was subsequently carried out for the five vehicles.

### 3 Measurement results – diesel vehicles

To evaluate the emissions, the measured values from the regeneration were compared with the measured values from a loading phase as a reference and a percentage deviation was determined. A positive deviation means that the value in the regeneration is higher than in the final loading, with a negative deviation value the measured value is correspondingly lower. The changes in the number of particles and the gas components in the individual phases are summarised in Table 3-1 and are explained below.

The mean particle number values of the individual phases increase during and after a regeneration of approx.  $1\text{E}+07$  #/s by three orders of magnitude to  $1\text{E}+10$  #/s. When analyzing the gas components, in addition to the relatively constant values from the individual phases, it is noticeable that especially immediately before regeneration, the gas components CO, THC,  $\text{NO}_x$ , NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  and  $\text{CH}_4$  show a clear peak, which then drops again when the regeneration begins. The beginning shortly before regeneration is the point in time at which the engine control unit increases the exhaust gas temperature. At this switch-over point of the engine parameters, the significantly increased emissions of the gas components mentioned are measured temporarily. These peaks are recorded in the measurement values of the regeneration of test vehicles B and C and are included in its mean value formation. In test vehicle A, these peaks occurred before the initiation of the regeneration and even during the acceleration phases and are therefore not included in the averaging. The gas components that showed a significant increase in all test vehicles during regeneration are CO, NO and  $\text{NO}_x$ . The NO and  $\text{NO}_x$  value increases during the regeneration on average by a factor of 67 and 95 to the reference value of the final loading phase. The  $\text{NO}_2$  value increases slightly on average by a factor of 2.5, the THC value by a factor of 5 and the  $\text{SO}_2$  value is increased by a factor of 4. The measured values of  $\text{NH}_3$  and  $\text{CH}_4$  are generally higher during regeneration than in the loading phase and the  $\text{N}_2\text{O}$

is lower. This is not reflected in the table as the peak was not recorded for test vehicle A and the reference value for  $\text{NH}_3$  for test vehicle C is very high. The results of the diesel vehicle measurements are based on three measurements per vehicle.

The increase in  $\text{SO}_2$  during regeneration could also be observed in the element analysis through the detection of sulfur. The same applies to nitrogen, which could only be detected in the element analysis during the regeneration phase. This correlates with the high gaseous NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  emissions, which were measured with the analyses on the roller dynamometer. The EDX method cannot determine the molecular structure in which the elements were present in the analysis. Due to the comparatively small particles, an unknown proportion of the filter material is permanently included in the spectral analysis. This was taken into account by recording the spectrum of the filter material and then only analyzing the deviation from it. This means that only a reliable qualitative statement can be made about the elements of the particles present in the filter leaf; an exact quantitative evaluation is not possible with this method.

When the filter is loaded after regeneration, the changes in emissions compared to the final loading phase are generally lower than during the regeneration phase. It is noticeable that the  $\text{CO}_2$  value in particular is lower in all test vehicles compared to the final loading phase. One possible explanation for this is the lower back pressure in the exhaust system after regeneration. This means that less fuel can be injected in order to maintain the engine operating point. The lower fuel consumption reduces  $\text{CO}_2$  emissions accordingly.

Signs and Symbols				
Characteristic positiv		Ø Deviation in %	Characteristic negativ	Ø Deviation in %
++++ (5+)		> 10,000%	----- (5-)	< -10,000%
++++ (4+)		1,000% to 10,000%	---- (4-)	-1,000% to -10,000%
+++ (3+)		100% to 1,000%	--- (3-)	-100% to -1,000%
++ (2+)		10% to 100%	-- (2-)	-10% to -100%
+ (1+)		1% to 10%	- (1-)	-1% to -10%
0		0% to 1%	0	-0% to -1%
Measurand	Unit	Reference final soot loading (Ø) „phase 2“	Deviation – regeneration (Ø) „phase 3“	Deviation – forming of soot layer (Ø) „phase 4“
<b>Test vehicle A</b>				
PN	#/s	1.63E+07	++++ (5+)	++++ (5+)
CO <sub>2</sub>	g/s	2.24	++ (2+)	- (1-)
CO	mg/s	0.0149	+++ (3+)	--- (3-)
THC	mg/s	0.0488	+++ (3+)	+++ (3+)
NO <sub>x</sub>	mg/s	0.0326	++++ (5+)	+++ (3+)
NO	ppm	1.13	++++ (4+)	+++ (3+)
NO <sub>2</sub>	ppm	2.34	++ (2+)	-- (2-)
NH <sub>3</sub>	ppm	-1.42	-- (2-)	-- (2-)
CH <sub>4</sub>	ppm	2.48	--- (3-)	-- (2-)
N <sub>2</sub> O	ppm	6.04	-- (2-)	- (1-)
SO <sub>2</sub>	ppm	1.08	+++ (3+)	++ (2+)
<b>Test vehicle B</b>				
PN	#/s	3.83E+07	++++ (5+)	++++ (5+)
CO <sub>2</sub>	g/s	2.55	++ (2+)	- (1-)
CO	mg/s	0.1440	++++ (4+)	-- (2-)
THC	mg/s	0.4550	++ (2+)	-- (2-)
NO <sub>x</sub>	mg/s	0.0246	++++ (5+)	+++ (3+)
NO	ppm	0.73	++++ (5+)	+++ (3+)
NO <sub>2</sub>	ppm	1.27	+++ (3+)	- (1-)
NH <sub>3</sub>	ppm	-1.05	++++ (4+)	++ (2+)
CH <sub>4</sub>	ppm	2.58	+++ (3+)	-- (2-)
N <sub>2</sub> O	ppm	6.04	-- (2-)	-- (2-)
SO <sub>2</sub>	ppm	1.78	+++ (3+)	-- (2-)
<b>Test vehicle C</b>				
PN	#/s	1.40E+07	++++ (5+)	++++ (5+)
CO <sub>2</sub>	g/s	2.26	++ (2+)	- (1-)
CO	mg/s	0.0161	++++ (5+)	+++ (3+)
THC	mg/s	0.0446	+++ (3+)	+++ (3+)
NO <sub>x</sub>	mg/s	0.0537	++++ (4+)	+++ (3+)
NO	ppm	2.02	++++ (4+)	+++ (3+)
NO <sub>2</sub>	ppm	2.65	++ (2+)	++ (2+)
NH <sub>3</sub>	ppm	20.98	-- (2-)	--- (3-)
CH <sub>4</sub>	ppm	1.56	+++ (3+)	0
N <sub>2</sub> O	ppm	3.82	-- (2-)	-- (2-)
SO <sub>2</sub>	ppm	1.97	+++ (3+)	++ (2+)

Tab. 3-1: Change of concentrations and masses of the gas components during the phases – Diesel

## 4 Measurement results – gasoline vehicles

In contrast to the assessment of the emissions of the diesel vehicles, the measured values from the regeneration of both gasoline vehicles were compared with the measured values of the respective empty GPF as a reference and a percentage deviation was determined (see Table 4-1).

The following evaluation of the regeneration-related emissions is made more difficult by the requirement of a dynamic measurement sequence, which is necessary to initiate and carry out the passive regeneration. In terms of the number of particles, there is no clear trend in the phases. While there was no significant difference between the regeneration and the empty GPF in test vehicle D, the PN emissions in test vehicle E were increased during the regeneration. The analysis of the progression of

Signs and Symbols					
Characteristic positiv		Ø Deviation in %	Characteristic negativ		Ø Deviation in %
+++++ (5+)		> 10,000%	----- (5-)		< -10,000%
++++ (4+)		1,000% to 10,000%	---- (4-)		-1,000% to -10,000%
+++ (3+)		100% to 1,000%	--- (3-)		-100% to -1,000%
++ (2+)		10% to 100%	-- (2-)		-10% to -100%
+ (1+)		1% to 10%	- (1-)		-1% to -10%
0		0% to 1%	0		-0% to -1%
Measurand	Unit	Deviation – regeneration (Ø) „phase 3“		Reference „empty GPF“ (Ø) „phase 4“	
Test vehicle D					
PN	#/s	+ (1+)		1.03E+08	
CO <sub>2</sub>	g/s	+ (1+)		3.28	
CO	mg/s	++ (2+)		0.423	
THC	mg/s	++ (2+)		0.245	
NO <sub>x</sub>	mg/s	++ (2+)		7.83E-02	
NO	ppm	++ (2+)		8.83	
NO <sub>2</sub>	ppm	- (1-)		3.04	
NH <sub>3</sub>	ppm	+++ (3+)		4.96	
CH <sub>4</sub>	ppm	++++ (4+)		0.08	
N <sub>2</sub> O	ppm	+++ (3+)		0.36	
SO <sub>2</sub>	ppm	- (1-)		2.41	
HCHO	ppm	+++ (3+)		6.46	
Test vehicle E					
PN	#/s	++++ (4+)		3.04E+08	
CO <sub>2</sub>	g/s	++ (2+)		4.57	
CO	mg/s	+++ (3+)		9.69	
THC	mg/s	++ (2+)		0.317	
NO <sub>x</sub>	mg/s	-- (2-)		0.888	
NO	ppm	-- (2-)		17.89	
NO <sub>2</sub>	ppm	++ (2+)		2.44	
NH <sub>3</sub>	ppm	++++ (4+)		0.54	
CH <sub>4</sub>	ppm	++++ (4+)		-0.39	
N <sub>2</sub> O	ppm	++++ (4+)		0.00	
SO <sub>2</sub>	ppm	++ (2+)		1.72	
HCHO	ppm	0		5.52	

Tab. 4-1: Change of concentrations and masses of the gas components during the phases – Gasoline

the gas components over the cycles shows that all increased emissions except for  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCHO}$  and some  $\text{NO}$  increased during the application of the load and not during the overrun mode and thus the passive regeneration. The changes in the mean values from the regeneration to the empty GPF are significantly smaller than the changes in the measurements with the DPF. The strong relative increase in  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  is due to the very low reference values. What is noticeable in test vehicle E is the sharp increase in  $\text{CO}$  emissions and the number of particles. The results for vehicles D and E are partly not based on multiple measurements due to the complex loading process.

nitrous oxide and formaldehyde are emitted during the regeneration process. The filters of gasoline engines usually do not have a high soot loading when driving, as they often regenerate passively. The additional emissions that arise during regeneration are relatively low in relation to an acceleration phase of a vehicle. The analysis of the solids for vehicles of both engine types did not reveal any evidence of elements that were not already known and therefore expected.

## 5 Conclusion

In summary, the analysis of the diesel measurements showed clear and reproducible results. Active regeneration enabled the phases of loading, regeneration and filter cake build-up to be delimited at a constant engine operating point and changes in emissions to be examined. A comparative evaluation was made between the phases of final loading as reference and regeneration. As previously explained quantitatively, this assessment showed an increase for most emissions. The analysis of the gasoline measurements had a less clear result. On the one hand, this is due to the passive regeneration, which required regeneration over several cycles. As a result, dynamic influences sometimes superimpose the result. On the other hand, due to the combustion technology, the soot mass in a gasoline engine is significantly lower in a GPF than in a DPF. As a result, less soot is burned and the change in pollutants is less. In general, however, there is also an increase in most emissions, although a small one.

The measurements carried out in this project were intended to examine the regeneration in a driving mode typical for road travel and provide clues for the changed emission behaviour of the vehicles during the regeneration. A significant increase in some emissions can be seen in diesel vehicles. The study shows which emissions during a regeneration could lead to a possible exceeding of the limit values for a limit value envisaged in the future, if this were set the same for all driving conditions and would be reduced in the case of the EURO emission stage 7 legislation. It also shows that the emissions currently not yet legally limited for cars as methane, ammonia,

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Ausgangssituation</b> .....	13	5.3.5	Stickstoffmonoxid – NO .....	30
1.1	Partikelfilter im System Abgasanlage ..	13	5.3.6	Stickstoffdioxid – NO <sub>2</sub> .....	30
1.2	Zielsetzung des Projektes .....	13	5.3.7	Ammoniak – NH <sub>3</sub> .....	30
1.3	Vorgehensweise .....	14	5.3.8	Methan – CH <sub>4</sub> .....	31
<b>2</b>	<b>Technischer Hintergrund – Partikelfilter</b> .....	14	5.3.9	Distickstoffmonoxid (Lachgas) – N <sub>2</sub> O .....	31
<b>3</b>	<b>Aufbau der Messreihe</b> .....	16	5.3.10	Schwefeldioxid – SO <sub>2</sub> .....	32
3.1	Prüffahrzeuge Dieselmotor und DPF ..	16	5.3.11	Zusammenfassung – Gaskomponenten .....	32
3.2	Prüffahrzeuge Ottomotor und GPF ...	18	5.4	Elementanalyse .....	34
3.3	Messtechnik .....	19	5.4.1	Referenzfilter .....	35
3.3.1	BOSCH [ESI]tronic .....	19	5.4.2	Filter Nr. 2: Endbeladungsphase ...	36
3.3.2	Horiba Rollenprüfstand .....	19	5.4.3	Filter Nr. 3: Regeneration .....	37
3.3.3	Horiba Rollenprüfstand-Standard- analysatoren .....	19	5.4.4	Filter Nr. 4: Aufbau der Rußschicht im DPF .....	38
3.3.4	FTIR-Analysator .....	20	5.4.5	Analyse der Massenprozent- Änderungen gegenüber dem Referenzfilter .....	38
3.3.5	AVL PN-Counter .....	20	<b>6</b>	<b>Messablauf – Fahrzeuge mit Ottomotor</b> .....	40
3.3.6	Cambustion DMS500 .....	20	6.1	Beladung des Ottopartikelfilters .....	40
3.3.7	Rasterelektronenmikroskop .....	20	6.2	Messzyklus – Fahrzeuge mit Ottomotor .....	41
<b>4</b>	<b>Messablauf Dieselfahrzeuge</b> .....	21	<b>7</b>	<b>Messergebnisse – Fahrzeuge mit Ottomotor</b> .....	44
4.1	Messzyklus Dieselfahrzeuge .....	21	7.1	Partikelanzahlmessung .....	44
<b>5</b>	<b>Messergebnisse Dieselfahrzeuge</b> ...	23	7.2	Partikelgrößenverteilung .....	44
5.1	Partikelanzahlmessung .....	23	7.2.1	Nucleation mode + Accumulation mode .....	44
5.2	Partikelgrößenverteilung .....	24	7.2.2	Accumulation mode .....	45
5.2.1	Vergleich DMS500/AVL-PN-Counter ...	24	7.2.3	Nucleation mode .....	46
5.2.2	Nucleation mode + Accumulation mode .....	25	7.3	Analyse der Gaskomponenten .....	46
5.2.3	Accumulation mode .....	26	7.3.1	Kohlenstoffdioxid – CO <sub>2</sub> .....	46
5.2.4	Nucleation Mode .....	27	7.3.2	Kohlenstoffmonoxid – CO .....	47
5.3	Analyse der Gaskomponenten .....	27	7.3.3	Kohlenwasserstoff – THC .....	47
5.3.1	Kohlenstoffdioxid – CO <sub>2</sub> .....	28	7.3.4	Stickstoffoxide – NO <sub>x</sub> .....	48
5.3.2	Kohlenstoffmonoxid – CO .....	28			
5.3.3	Kohlenwasserstoff – THC .....	29			
5.3.4	Stickstoffoxide – NO <sub>x</sub> .....	29			

7.3.5	Stickstoffmonoxid – NO	48
7.3.6	Stickstoffdioxid – NO <sub>2</sub>	48
7.3.7	Ammoniak – NH <sub>3</sub>	49
7.3.8	Methan – CH <sub>4</sub>	49
7.3.9	Distickstoffmonoxid (Lachgas) – N <sub>2</sub> O	50
7.3.10	Schwefeldioxid – SO <sub>2</sub>	50
7.3.11	Formaldehyd – HCHO	50
7.3.12	Zusammenfassung Gas- komponenten	50
7.4	Elementanalyse	52
7.4.1	Filter Nr. 3: Regeneration	52
7.4.2	Filter Nr. 4: leerer GPF	53
7.4.3	Analyse der Massenprozent- Änderungen gegenüber dem Referenzfilter	53
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>54</b>
	<b>Literatur</b>	<b>57</b>
	<b>Bilder</b>	<b>57</b>
	<b>Tabellen</b>	<b>63</b>

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

# 1 Ausgangssituation

In der Europäischen Verordnung (EG) 715/2007 sind die Grenzwerte der Fahrzeugemissionen aufgeführt, welche im Rahmen der Typgenehmigungsprüfung im WLTP Zyklus von Fahrzeugen mit Selbstzündungsmotoren (Dieselmotoren) und Fahrzeugen mit Fremdzündungsmotoren (Ottomotoren) eingehalten werden müssen. Darin eingeschlossen sind auch Grenzwerte für die Partikelmasse (PM) und die Partikelanzahl (PN).

Für Fahrzeuge mit Fremdzündungsmotor mit Benzindirekteinspritzung und für Fahrzeuge mit Selbstzündungsmotor gilt in der aktuellen Abgasstufe EURO 6d ein Grenzwert der Partikelemissionen von 4,5 mg/km (PM) und  $6,0 \times 10^{11}$  #/km (PN). Um diese Werte einzuhalten, wird von den Fahrzeugherstellern ein Partikelfilter (Dieselpartikelfilter (DPF)/Ottopartikelfilter (engl. Gasoline Particulate Filter, GPF) im Abgassystem verbaut.

## 1.1 Partikelfilter im System Abgasanlage

Geschlossene keramische Partikelfilter bestehen aus einem Wabenkörper aus Siliziumcarbit oder Cordierit, der eine große Anzahl von parallelen, meist quadratischen Kanälen aufweist. Benachbarte Kanäle sind an den jeweils gegenüberliegenden Seiten durch Keramikstopfen verschlossen, sodass das Abgas durch die porösen Keramikwände hindurchströmen muss. Beim Durchströmen der Wände werden die Rußpartikel zunächst durch Diffusion zu den Porenwänden (im Innern der Keramikwände) transportiert, wo sie haften bleiben (Tiefenfiltration). Bei zunehmender Beladung des Filters mit Ruß bildet sich auch auf den Oberflächen der Kanalwände (auf der den Eintrittskanälen zugewandten Seite) eine Rußschicht, welche zunächst eine sehr effiziente Oberflächenfiltration für die folgende Betriebsphase bewirkt. Keramische Filter erreichen einen Rückhaltegrad von > 95 % für Partikel des relevanten Größenspektrums von 23 nm bis 1 µm. Bei geschlossenen Partikelfiltern durchströmt das gesamte Abgas die Porenwände. Durch die anwachsende Rußbeladung des Filters steigt der Abgasgedruck stetig an. Spätestens bei Erreichen einer kritischen Rußmasse muss eine Regenerierung des Filters eingeleitet werden. Die Regenerierung erfolgt durch Abbrennen des gesammelten Rußes im Filter. Der Kohlenstoffanteil der Partikel kann mit

Sauerstoff oberhalb von ca. 600 °C zu CO<sub>2</sub> oxidiert werden. (REIF, 2014)

Die Regenerationsstrategie der Fahrzeuge variiert. Grundsätzlich wird zwischen periodischer (aktiver) und kontinuierlicher (passiver) Regeneration unterschieden. Bei Diesel-Fahrzeugen wird fast ausschließlich die periodische Regeneration eingesetzt, bei Fahrzeugen mit Ottomotor die kontinuierliche Regeneration. Je nach Beladung des Filters und weiteren Systemparametern können bei einigen Fahrzeugen beide Varianten der Regeneration auftreten. Bei extremen Fahrbedingungen kann auch eine Zwangsregeneration des Partikelfilters notwendig werden, die über einen OBD-Diagnosetester eingeleitet wird.

Um eine aktive Regeneration einzuleiten, werden motorische Maßnahmen ergriffen, um das notwendige Temperaturniveau zum Rußabbrand einzustellen. Zur Erhöhung der Abgastemperatur sind die frühe und späte Nacheinspritzung sowie die Spätverschiebung der Haupteinspritzung zu nennen. Die Abgasrückführung wird während der Regenerationsphase abgeschaltet, um eine höhere Abgastemperatur zu erreichen. Eine passive Regeneration erfolgt, wenn sich aufgrund des Motorbetriebspunktes eine ausreichend hohe Abgastemperatur und Sauerstoffüberschuss einstellt – z. B. bei in einer Rollphase während einer Autobahnfahrt.

## 1.2 Zielsetzung des Projektes

Der Einfluss der periodischen Regeneration wird während der Typgenehmigung rechnerisch berücksichtigt. Dazu wird über einen Regenerationsfaktor (Ki-Faktor), der über die Messung der derzeit limitierten Abgaskomponenten vor-, während- und nach einer Regeneration bestimmt wird, das Emissionsergebnis korrigiert. Der Ki-Faktor wird mit Ausnahme der Partikelanzahl auf alle limitierten Schadstoffe angewendet. In der VO (EU) 2017/1151 – Anhang XXI – Unteranhang 6 – Anlage 1, welche die Verfahren für die Emissionsprüfung für alle „...mit Systemen mit periodischer Regenerierung ausgestatteten Fahrzeuge“ beschreibt, steht in Punkt 1.3.: „Die Vorschriften dieser Anlage gelten nur für Messungen der Partikelemission und nicht für Messungen der Zahl emittierter Partikel“. (VO (EU) 2017/1151)

Ziel des Forschungsprojektes ist es, die Fahrzeugemissionen während einer Partikelfilterregeneration

zu messen und hinsichtlich ihrer Veränderung gegenüber eines Fahrbetriebs ohne Regeneration zu bewerten. Eine Messung der Schadstoffemissionen, welche gezielt während einer Partikelfilterregeneration aufgezeichnet werden, ist bisher nur bedingt Teil der Typgenehmigung. Insbesondere die tiefere Analyse der nicht limitierten Schadstoffe, der Partikelanzahl, der Partikelgrößenverteilung und der Analyse der Elemente der Feststoffe der während der Regeneration ausgestoßenen Partikel sind bislang nicht tiefer untersucht und berücksichtigt worden. Die Erkenntnisse dieses Forschungsprojekts können einen wichtigen Beitrag zur Ausarbeitung zukünftiger Abgasvorschriften leisten.

### 1.3 Vorgehensweise

Der Regenerationsvorgang wird bei drei Diesel- und zwei Benzinfahrzeugen tiefergehend untersucht. Dabei werden die Fahrzeuge zuerst mit Ruß beladen und danach erfolgt die Einleitung der Regeneration.

Bei den Dieselfahrzeugen erfolgt die Beladung des DPF bis ca. 80 % Rußbeladung bei einer Straßenfahrt. Im Anschluss wird das Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand installiert und die Messtechnik angeschlossen. Nun folgt die Endbeladung der fehlenden 20 % bis zur Regeneration in einem konstanten Motorbetriebspunkt. Um die Messwerte der Regeneration bewerten zu können, müssen diese mit Referenzwerten verglichen werden. Die Messwerte der Endbeladungsphase liefern diese Referenzwerte. Die anschließende Regeneration auf dem Rollenprüfstand sowie der folgende Aufbau der Rußschicht sind die Phasen, welche mit den Referenzemissionen verglichen werden. Eine detaillierte Übersicht, wie die vier Phasen: Beladung, Endbeladung, Regeneration und Aufbau der Rußschicht bei den Diesel-Prüffahrzeugen umgesetzt wurde, folgt in Kapitel 4.

Die Beladung des GPF bei den Prüffahrzeugen mit Ottomotor wird durch wiederholte Kaltstarts bei  $-15\text{ °C}$  durchgeführt. Die passive Regeneration erfolgt auf dem Rollenprüfstand durch wechselnden Last- und Schubbetrieb. Im Lastbetrieb werden zunächst die erforderlichen Abgastemperaturen von über  $600\text{ °C}$  erzeugt, um daran anschließend im Schubbetrieb den erforderlichen Sauerstoffüberschuss sicherzustellen und eine passive Regeneration kontrolliert herbeizuführen. Eine detaillierte

Übersicht, wie die Phasen bei den Otto-Prüffahrzeugen umgesetzt wurden, folgt in Kapitel 6.

## 2 Technischer Hintergrund – Partikelfilter

Partikelfilter haben die Aufgabe, in der Verbrennung entstandene Partikel aus dem Abgas herauszufiltern und damit sowohl die Partikelanzahl als auch die Partikelmasse zu reduzieren. Der im Filter zurückgehaltene Ruß muss kontinuierlich oder intermittierend abgebrannt werden, um einen zu hohen Druckanstieg über den Filter und eine Verblockung zu unterbinden. Im Partikelfilter werden überwiegend Ruß- und Aschepartikel aufgefangen. Rußpartikel bestehen vorwiegend aus Kohlenstoff. Die Filter können jedoch auch durch andere Moleküle wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Schwefelverbindungen, Metalloxide und Wasser verunreinigt sein. Es wird daher auch von kohlenstoffhaltigen Verbindungen gesprochen. Ruß entsteht, wenn nicht ausreichend Sauerstoff zur vollständigen Verbrennung des kohlenstoffhaltigen Kraftstoffes zur Verfügung steht oder der Kraftstoff bei der Einspritzung in den Brennraum nicht fein genug zerstäubt ist. Nach dem Austritt aus dem Brennraum setzen sich die Feststoffpartikel im Partikelfilter fest. Flüchtige Stoffe verdampfen sehr schnell und belasten den Partikelfilter nicht (Volkswagen AG, 2017). Die Asche umfasst anorganische Elemente und Verbindungen, wie z. B. metallischen Abrieb oder einzelne Verbrennungsrückstände. Der Ursprung der anorganischen Elemente kann in den Additiven des Kraftstoffs oder Öls sowie der elementaren Zusammensetzung der Betriebsstoffe selbst liegen. (DAGEFÖRDE, 2015)

Der Partikelfilter ist bei Pkws entweder im Motorraum oder am Unterboden des Fahrzeugs verbaut. Aufgrund der höheren Abgastemperaturen im Motorraum wird die motornahe Variante angestrebt. Um diese Variante realisieren zu können, muss im Motorraum ausreichend Bauraum vorhanden sein, damit der Partikelfilter integriert werden kann. Die Mehrzahl der im automobilen Bereich eingesetzten Filter sind Wandstromfilter. Wandstrompartikelfilter sind üblicherweise extrudierte Monolithen, die in Form einer Bienenwabenstruktur aufgebaut sind. Die Kanäle weisen oft eine quadratische Querschnittsfläche auf. Da sich Ruß und Asche nur auf der Einlassseite absetzen, kann es jedoch von Vor-

teil sein, wenn Einlass- und Auslasskanäle nicht die gleiche durchströmte Fläche haben. Das gesamte Abgas strömt durch die einlassseitig nicht verschlossenen Kanäle in den Partikelfilter ein, durch die poröse Wand und durch die auslassseitig nicht verschlossenen Kanäle aus. Damit wird der gesamte Abgasstrom durch das Filtermedium geleitet. Bei nur schwach beladenen Filtern werden die Partikel im Filtermedium abgeschieden. Durch den steigenden Druckverlust werden Partikel zunehmend auf der Wandoberfläche als Rußkuchen abgeschieden. Dabei steigt der Filtrierungswirkungsgrad an. Der Ruß lagert sich gleichmäßig als Rußschicht auf den Wänden und der Asche an. Nach einer Regeneration besitzt die überbleibende Asche eine relativ schwache Bindung zur Wand und kann dadurch bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten ans Ende des Filters getragen werden. Dadurch setzt sich die Asche zum großen Teil am verstopften Ende des Kanals ab und ist nur in sehr geringem Maß als Schicht auf den Kanalwänden vorhanden. (MERKER & TEICHMANN, 2019)

Wie zuvor beschrieben müssen Partikelfilter kontinuierlich oder periodisch regeneriert werden. Dabei wird die periodisch eingeleitete Regeneration als aktive Maßnahme zur Filterentladung bezeichnet, während eine kontinuierliche Regeneration als passiv bezeichnet wird. Die stark exotherme Reaktion bei einem Rußabbrand läuft bei Temperaturen oberhalb von 550 – 600 °C sehr schnell ab. Beim Dieselmotor werden diese Abgastemperaturen nur über zusätzliche motorische Maßnahmen regelmäßig und zuverlässig erreicht. Deshalb erfolgt eine DPF-Regeneration fast immer aktiv. Bei der aktiven Regeneration wird die Abgastemperatur stark angehoben. In Pkw-Anwendungen wird dies in der Regel über eine oder mehrere Nacheinspritzungen von Kraftstoff in den Brennraum erreicht. Der Kraftstoff einer zweiten oder dritten späten Nacheinspritzung verbrennt nicht mehr im Brennraum. Er reagiert dann im Oxidationskatalysator. Dabei sind zusätzlich innermotorische Maßnahmen notwendig, um das Temperaturniveau so weit anzuheben, dass eine vollständige Umsetzung des Kraftstoffs auf dem Oxidationskatalysator stattfindet. Dies kann z. B. durch variable Auslassventilsteuerung erfolgen. Eine weitere Möglichkeit, die Aktivierungsenergie der Regeneration zu reduzieren, basiert auf der Zuführung eines katalytischen Additivs zum Kraftstoff. Die Kraftstoffadditive basieren beispielsweise auf Cer, Kupfer oder Platin. Die maximale Temperatur, die sich beim Abbrand einstellt, steigt dabei un-

ter konstanten Randbedingungen mit steigender Rußbelastung an. Um eine Beschädigung des Filters durch Überhitzung während der Regeneration zu vermeiden, darf daher eine kritische Rußmasse auf dem Filter nicht überschritten werden. Die Überwachung der Rußmasse erfolgt üblicherweise durch eine Gegendruckfassung des Filters und oder eine Berechnung der Rußmasse auf Basis von Modellen der Partikelabscheidung und des Rußabbrands. (MERKER & TEICHMANN, 2019)

Die zur Regeneration erforderlichen Abgastemperaturen werden bei Ottomotoren üblicherweise während des Fahrbetriebes erreicht. Neben der hohen Temperatur ist zur Regeneration auch Sauerstoffüberschuss notwendig, damit der kohlenstoffhaltige Ruß zu CO<sub>2</sub> oxidiert. Diese Betriebsbedingungen treten im Schubbetrieb des Motors auf. Der GPF wird in der Regel passiv und kontinuierlich regeneriert, da die erforderlichen Betriebsbedingungen im realen Fahrprofil regelmäßig erreicht werden. Ein Eingriff des Motorsteuergerätes für eine aktive Regenerierung ist nur bei einer sehr hohen Rußbelastung vorgesehen. Die Abgastemperatur von Ottomotoren ist mit über 600 °C höher als bei Dieselmotoren mit ca. 400 °C (außerhalb einer aktiven DPF-Regeneration). Das höhere Abgasniveau beim Ottomotor erfordert einen besonders temperaturbeständigen Werkstoff für den Filter. Aus dem Grund wird die Trägerstruktur zumeist auf mineralischer Basis, aus dem besonders hitzebeständigen Cordierit, hergestellt. Bei Dieselmotoren hingegen verwendet man in der Regel keramische Filter aus Siliziumcarbit (SiC). Hier führt die Temperaturänderung zu mechanischen Spannungen zwischen dem inneren und dem äußeren Teil des Materials. Aufgrund thermischer Belastungen durch Temperaturdifferenzen muss die DPF-Beschichtung thermoschockbeständiger sein.

Das Abgastemperaturniveau ist beim Ottomotor zwar höher als beim Dieselmotor, die Regenerationstemperaturen und die erforderliche Thermoschockbeständigkeit jedoch niedriger (NOWAK, 2018).

In den meisten Fällen wird der motornahe-GPF in den Drei-Wege-Katalysator integriert. Dabei erhält der Filterwerkstoff die katalytisch aktive Beschichtung mit Palladium und Rhodium und fungiert somit zusätzlich als Drei-Wege-Katalysator. Diese Bauweise ist dem Rußabbrand zuträglich, da der Drei-Wege-Katalysator eine O<sub>2</sub> Speicherkomponente beinhaltet.

Anforderung	DPF	GPF
Thermische Belastbarkeit	Hohe Temperaturtransienten => Thermoschockbeständigkeit	Hohes Abgastemperaturniveau => Temperaturbeständigkeit
Geringer Druckverlust im Filter	Gegendruck unter Berücksichtigung der Rußbelastung	Gegendruck ohne Berücksichtigung der Rußbelastung

Tab. 2-1: Anforderungen an DPF/GPF

Technologie	DPF	GPF
Material	SiC, TiAl hohe	Cordierit
Kanalstruktur	asymmetrisch 200 – 300 cpsi 12 – 15 Tausend Kanäle	symmetrisch 200 – 350 cpsi 6 – 12 Tausend Kanäle
Volumen	≈ 1,5-2 * Hubraum	≈ Hubraum
Spez. Gewicht	600 – 800 g/l	300 – 400 g/l

Tab. 2-2: Technische Daten zu DPF/GPF

Die Filtereffizienz von Partikelfiltern (DPF und GPF) steigt mit dem Aufbau einer Rußschicht an. Aufgrund der kontinuierlichen Regeneration eines GPF ist häufig kein Filterkuchen vorhanden, was die Filtereffizienz im Gegensatz zum DPF in diesen Betriebsphasen absenkt. Der Filterkuchen hat auch Auswirkung auf die Kanalgeometrie von Partikelfiltern. Ein DPF wird außer in der Phase unmittelbar nach einer aktiven Regeneration immer mit Filterkuchen betrieben. Dieser wird in der Kanalauslegung einkalkuliert. Um den Gegendruck des Filters mit Filterkuchen möglichst gering zu halten, werden die Eintrittskanäle größer ausgelegt als die Austrittskanäle. Der GPF wird aufgrund der kontinuierlichen Regeneration häufig ohne Filterkuchen betrieben. Deshalb steht hier der Gegendruck ohne Beladung und eine hohe mechanische Festigkeit im Vordergrund. Eintritts- und Austrittskanäle sind daher beim GPF gleich groß. (Faurecia Clean Mobility, Emmanuel Jean, 2017)

In Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2 sind die Unterschiede zwischen GPF und DPF zusammengefasst.

### 3 Aufbau der Messreihe

Der Aufbau der Messreihe beinhaltet zum einen die Prüffahrzeuge, welche vermessen werden, und zum anderen die eingesetzte Messtechnik, mit welcher diese Messwerte aufgezeichnet werden.

#### 3.1 Prüffahrzeuge Dieselmotor und DPF

Es wurden drei Prüffahrzeuge mit Dieselmotor und DPF untersucht. Eine Übersicht der Prüffahrzeuge mit den entsprechenden technischen Daten ist in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

Die Prüffahrzeuge mit Dieselmotor sind von der Anordnung der Komponenten im Abgasnachbehandlungssystem gleichermaßen aufgebaut (siehe Bild 3-1). Hinter dem Turbolader ist ein Oxidations-Katalysator (DOC) verbaut. Dieser mindert die Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC). Hinter dem DOC folgt die Harnstoff-Einspritzdüse für den Selective Catalytic Reduction -Katalysator (SCR-Katalysator). Dahinter befindet sich die erforderliche Mischstrecke, in welcher der Harnstoff zu Ammoniak (NH<sub>3</sub>) reagiert. Im Anschluss daran folgt der DPF, gefolgt von dem SCR-Katalysator. Der DPF und der SCR-Katalysator befinden sich in einem gemeinsamen Gehäuse. Die genannten Komponenten sind im

Motorraum verbaut. Am Unterboden des Fahrzeuges ist ein Ammoniakschlupfkatalysator (ASC) verbaut, um Ammoniak, welches nicht im SCR-Katalysator umgesetzt wurde, zu Stickstoff ( $N_2$ ) und Wasser ( $H_2O$ ) zu oxidieren. Bild 3-2 zeigt den Motorraum von Prüffahrzeug A und Prüffahrzeug C.

Alle Dieselprüffahrzeuge verfügen über eine externe Abgasrückführung. Bei Prüffahrzeug A weist der

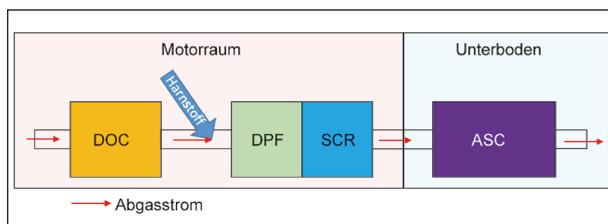


Bild 3-1: Anordnung der Abgasnachbehandlungskomponenten in den Dieselprüffahrzeugen

DPF eine SCR-Beschichtung auf und hat somit auch eine SCR-Katalysatorfunktion. Prüffahrzeug C verfügt über ein Kraftstoff-Additivsystem. Das Additiv wird in dem Kraftstofftank dem Diesel beige mischt. Das Kraftstoff-Additiv ermöglicht die Senkung der Verbrennungstemperatur der Partikel auf ca. 450 °C. Durch diese Maßnahme kann eine DPF-Regeneration, bei Erreichen eines Schwellenwertes der Rußbeladung, auch bei Fahrbedingungen mit einer geringen Abgastemperatur, wie z. B. einer Stadtfahrt, erfolgen.

Über den gesamten Zeitraum der Messungen wurde bei allen Prüffahrzeugen der Fehlerspeicher des Fahrzeuges mit einem OBD-Diagnosegerät überwacht. Es waren zu keinem Zeitpunkt Fehlermeldungen im Steuergerät der Prüffahrzeuge hinterlegt.

	Prüffahrzeug A	Prüffahrzeug B	Prüffahrzeug C
Hersteller	Mercedes	Ford	Peugeot
Modell	C 220 d (T-Modell)	S-MAX	3008
Erstzulassung	12/2019	12/2020	10/2020
Hubraum	1.950 ccm	1.995 ccm	1.499 ccm
Leistung	143 kW bei 3.800 $min^{-1}$	110 kW bei 3.500 $min^{-1}$	96 kW bei 3.750 $min^{-1}$
Drehmoment	400 Nm (1.600 – 2.800 $min^{-1}$ )	370 Nm (2.000 – 2.500 $min^{-1}$ )	300 Nm (1.750 $min^{-1}$ )
Motor	OM 654	2.0 EcoBlue	BlueHDI 130
Abgasnorm	Euro 6 d-Temp	Euro 6 d-Temp	Euro 6 d
Emissionsschlüssel	36DG	36DG	36AM
Kilometerstand	33.000 km	10.000 km	8.000 km

Tab. 3-1: Prüffahrzeuge Diesel

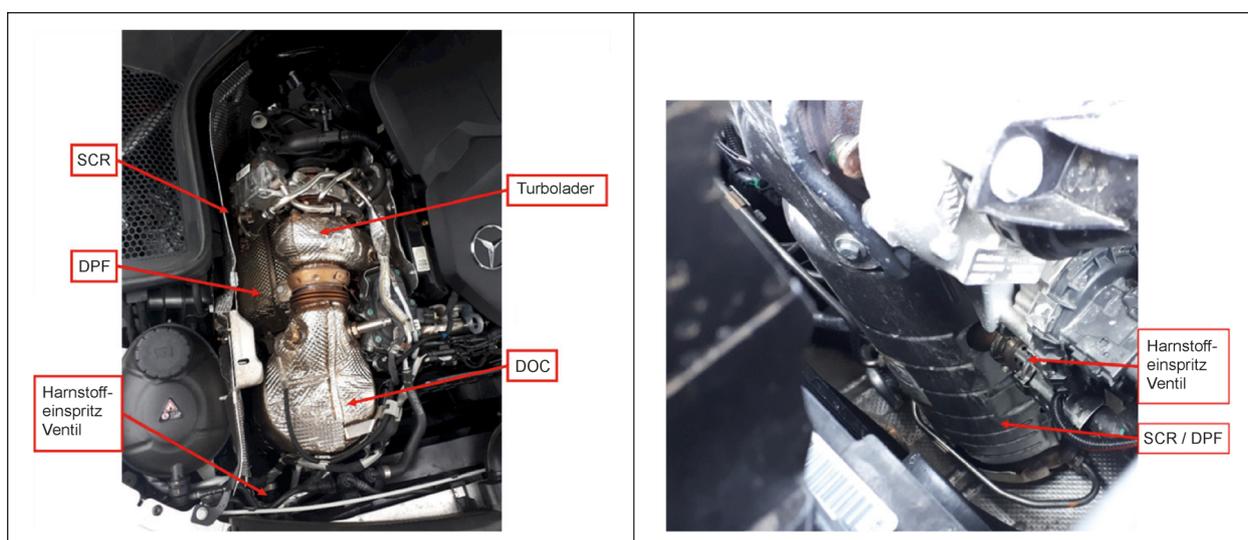


Bild 3-2: Motorraum mit Bezeichnung der Komponenten von Prüffahrzeug A (links) und Prüffahrzeug C (rechts)

### 3.2 Prüffahrzeuge Ottomotor und GPF

Es wurden zwei Prüffahrzeuge mit Ottomotor und GPF untersucht. Eine Übersicht der Prüffahrzeuge mit den entsprechenden technischen Daten ist in Tabelle 3-2 zusammengefasst.

Als Prüffahrzeug D wurde ein VW T-Roc gewählt. In diesem Fahrzeug ist ein Motor der Baureihe EA211evo mit einer Nennleistung von 110 kW verbaut. Der GPF ist motornah angeordnet und in den Drei-Wege Katalysator integriert. Das verwendete Substratmaterial des GPF ist Cordierit. Der Drei-Wege-Katalysator (3WC) ist mit einem Washcoat, der Palladium und Rhodium enthält, überzogen. Am Unterboden ist ein weiterer 3WC verbaut. Die Anordnung der Komponenten im Abgasnachbehandlungssystem von Prüffahrzeug D ist in Bild 3-3 dargestellt.

Als Prüffahrzeug E wurde ein Mercedes E200 mit 2 Litern Hubraum ausgewählt. Der 3-Wege-Katalysator ist motornah verbaut. Der GPF befindet sich am Unterboden und wird über Drucksensoren zur Ermittlung der Filterbeladung überwacht (siehe Bild 3-5). Die Anordnung der Komponenten im Abgas-

nachbehandlungssystem von Prüffahrzeug E ist in Bild 3-4 dargestellt.

Der Fehlerspeicher der Steuergeräte wurde während der Messungen regelmäßig ausgelesen. Es war zu keinem Zeitpunkt der Messkampagne ein Fehler im Fehlerspeicher des Steuergerätes hinterlegt.

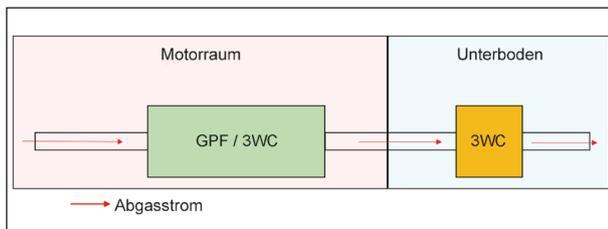


Bild 3-3: Anordnung der Abgasnachbehandlungskomponenten bei Prüffahrzeug D

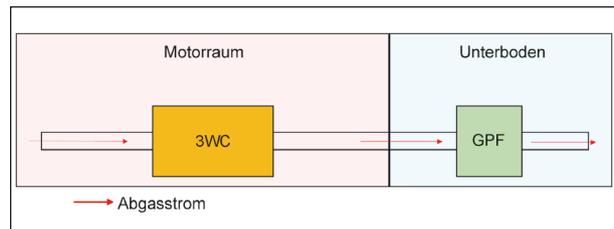


Bild 3-4: Anordnung der Abgasnachbehandlungskomponenten bei Prüffahrzeug E

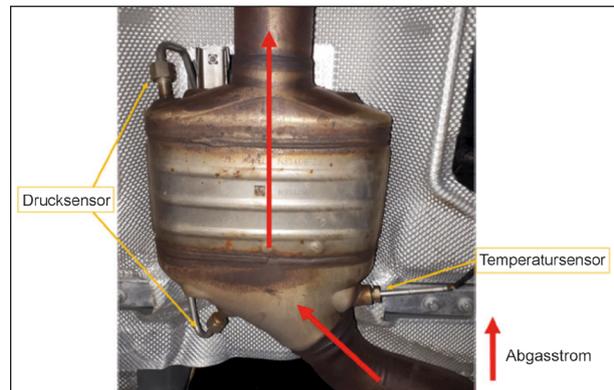


Bild 3-5: Unterboden GPF von Prüffahrzeug E

	Prüffahrzeug D	Prüffahrzeug E
Hersteller	Volkswagen (VW)	Mercedes-Benz
Modell	T-Roc	E 200
Erstzulassung	11/2020	01/2021
Hubraum	1.498 ccm	1.991 ccm
Leistung	110 kW bei 5.000 min <sup>-1</sup>	145 kW bei 6.100 min <sup>-1</sup>
Drehmoment	250 Nm (1.500 – 3.500 min <sup>-1</sup> )	320 Nm (1.650 – 4.000 min <sup>-1</sup> )
Motor	EA211evo DPCA	M264 DE 20 LA
Abgasnorm	Euro 6 d-Temp	Euro 6 d
Emissionsschlüssel	36DG	36AP
Kilometerstand	15.000 km	14.000 km

Tab. 3-2: Prüffahrzeuge Ottomotor

### 3.3 Messtechnik

Die Messungen erfolgen auf dem Rollenprüfstand. Eine Übersicht über die Anordnung der Messtechnik ist in Bild 3-6 skizziert. Die einzelnen Analysatoren werden folgend beschrieben.

#### 3.3.1 BOSCH [ESI]tronic

Um den Zeitpunkt der Regeneration bestimmen zu können, wird ein OBD-Diagnosegerät (Esitronic von der Fa. Bosch) verwendet. Mit diesem Diagnosegerät können über die OBD-Schnittstelle Werte aus dem Motorsteuergerät ausgelesen und angezeigt werden. Zur Bestimmung, wann die aktive- und passive Regeneration einsetzt, wurden je nach Fahrzeug verschiedene Parameter herangezogen.

#### 3.3.2 Horiba Rollenprüfstand

In Lambsheim ist der Rollenprüfstand für Abgasmessungen des TÜV Rheinland verbaut. Der Her-

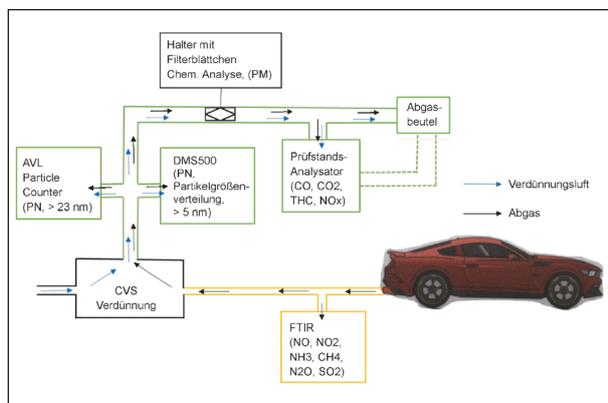


Bild 3-6: Skizze zur Anordnung der Messtechnik

steller des Prüfstandes ist die Firma Horiba. Das Abgaslabor inklusive Rollenprüfstand ist von der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert und wird u. a. für die WLTP-Messung zur Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen verwendet. Dementsprechend erfüllt die Anlage die Anforderungen nach VO (EU) 2017/1151 – Anhang XXI – Unteranhang 5 vollständig.

In Bild 3-7 sind die Prüffahrzeuge A und C auf dem Rollenprüfstand im Abgaslabor Lambsheim zu sehen.

#### 3.3.3 Horiba Rollenprüfstand-Standardanalysatoren

Die Analysatoren für die Verbindungen CO, CO<sub>2</sub>, THC und NO<sub>x</sub> werden hier als Standardanalysatoren bezeichnet, da diese Analysatoren bei den Messungen für die Typgenehmigung eingesetzt werden. Daher erfüllen auch diese die Anforderungen nach VO (EU) 2017/1151 – Anhang XXI – Unteranhang 5 vollständig.

Die Messung der Schadstoffverbindungen CO, CO<sub>2</sub>, THC und NO<sub>x</sub> erfolgt im verdünnten Abgas. Der Volumenstrom des verdünnten Abgases wird durch die CVS-Anlage (Constant Volume Sampling) konstant gehalten. Die Verdünnung ist somit je nach dem Volumenstrom des Abgases variabel. Um die Schadstoffmesswerte auf das Endrohr zu beziehen, wird die Verdünnung berücksichtigt und um die Anteile der jeweiligen Verbindung, welche aus der Umgebungsluft stammen, korrigiert. Dieser Schritt wird nach den Vorgaben der „VO (EU) 2017/1151 – Anhang XXI – Unteranhang 6b“ durchgeführt.

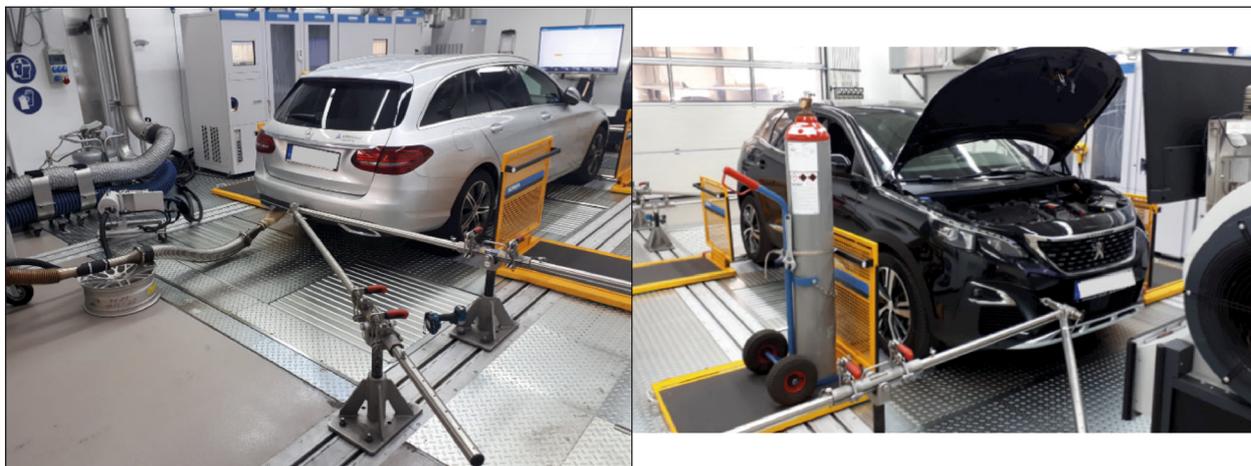


Bild 3-7: Prüffahrzeug A (rechts) und Prüffahrzeug C (links) auf dem Rollenprüfstand

Bei der Typgenehmigungsprüfung wird das verdünnte Abgas in Beuteln gesammelt und im Anschluss der Beutelinhalt analysiert. So wird je ein Wert pro Gaskomponente für den jeweiligen Zyklus ermittelt. Die Analysatoren zeichnen zusätzlich permanent mit einer Aufzeichnungsrate von 10 Hz während eines Zyklus die Werte der Gaskomponenten auf. Diese aufgezeichneten Werte werden als Modalwerte bezeichnet und dienen zum Vergleich und zur Absicherung der Beutelanalyse.

Bei den Messungen in diesem Projekt werden ausschließlich die aufgezeichneten Modalwerte analysiert. Eine Beutelmessung ist aufgrund eines abweichenden Zyklus zur Typgenehmigungsprüfung nicht zielführend.

### 3.3.4 FTIR-Analysator

FTIR (Fourier Transform Infrarot Spectroscopy) ist eine optische Messmethode, die eine Vielzahl an Abgaskomponenten zeitgleich misst. Die Messung basiert auf der Absorption von infrarotem Licht durch die einzelnen Gaskomponenten. Dieser Analysator kann u. a. die Verbindungen NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> und HCHO erfassen. Der FTIR-Analysator wird nicht für die Messungen im Rahmen der Typgenehmigungsprüfung eingesetzt, ist aber dennoch fest in die Prüfanlage integriert. Dieses Messgerät wird vor der Verdünnung angeschlossen und erfasst die Gaskomponenten somit im unverdünnten Abgas.

### 3.3.5 AVL PN-Counter

Der AVL-PN-Counter (Advanced) ist das Partikelzählgerät, welches bei den Messungen zur Typgenehmigungsprüfung eingesetzt wird. Es handelt sich um einen Kondensationspartikelzähler (CPC) mit vorgeschaltetem VPR (volatile particle remover) zur Entfernung der flüchtigen Partikel.

Das Gerät erfüllt die Anforderungen nach VO (EU) 2017/1151 – Anhang XXI – Unteranhang 5 – Punkt 4. Die Probenahme erfolgt im verdünnten Abgas. Der AVL PN-Counter weist zudem zwei weitere Verdünnungsstufen auf, um ein Kondensieren des Abgases zu verhindern.

Alle Verdünnungsstufen werden rechnerisch berücksichtigt, um auf die PN-Emissionen am Endrohr schließen zu können. Die Vorgaben zur Effizienz der Zählfunktion des Partikelzählers sind in Tabelle

Partikeldurchmesser in Bezug auf die elektrische Mobilität [nm]	Effizienz der Zählfunktion des Partikelzählers [%]
23 ± 1	50 ± 12
41 ± 1	> 90

Tab. 3-3: VO (EU) 2017/1151

3-3 (VO (EU) 2017/1151) aufgelistet. Partikel mit einem elektrischen Mobilitätsdurchmesser kleiner als 23 nm werden bei mit dem AVL PN-Counter aufgrund der gesetzlichen Anforderung nicht mitgezählt. Der Wert, bei dem 50 % Zähleffizienz anliegen, wird auch als Roll-Off oder d<sub>50</sub> bezeichnet. Partikelzählgeräte für die Typgenehmigung weisen somit einen Roll-Off von d<sub>50</sub> = 23 nm auf.

### 3.3.6 Cambustion DMS500

Das Partikelanalysegerät DMS500 von der Firma Cambustion ist für die Erfassung der Partikelgrößenverteilung installiert worden. Zudem weist das Gerät einen Roll-Off von d<sub>50</sub> = 10 nm auf und erfasst Partikel bis zu einer Größe von 5 nm. Das Gerät kann somit auch kleine Partikel im Nucleation Mode erfassen, welche mit dem AVL PN-Counter nicht erfasst werden.

Das DMS500 verwendet eine Hochspannungsentladung, um jedes Partikel proportional zu seiner Oberfläche aufzuladen. Geladene Partikel werden in eine Klassifizierungssektion mit einem starken radialen elektrischen Feld geleitet. Dieses Feld bewirkt, dass die Partikel durch eine Mantelströmung in Richtung der Elektrometer-Detektoren driften. Die Partikel werden in unterschiedlichen Abständen in der Säule detektiert, abhängig von ihrem aerodynamischen Widerstand/Ladungsverhältnis. Die Ausgaben von 22 Elektronenringen werden in Echtzeit mit 10 Hz verarbeitet, um Spektraldaten und andere Metriken zu liefern. Vor dem DMS500 ist ein Catalytic Stripper (CSA) vorgeschaltet, welcher die volatilen Partikel zu über 99 % aus dem Abgas entfernt. Somit werden nur Feststoffpartikel analysiert.

### 3.3.7 Rasterelektronenmikroskop

Zur Ermittlung der Partikelmasse im Typprüfverfahren wird ein Filterblättchen in eine Halterung in der CVS-Anlage eingespannt. Eine Filterhalterung für den Einbau mit Schnellverschluss ist in Bild 3-8 abgebildet. Ein Teil des verdünnten Abgases wird während der Messung durch das Filterblättchen

geleitet (siehe Bild 3-9). Durch eine gravimetrische Messung vor und nach dem Prüfzyklus kann ein Rückschluss auf die Partikelmasse in dem Filterblättchen erfolgen. Diese Filterblättchen werden auch in den Messungen dieses Projekts verwendet, um im Anschluss die Elemente der Partikel auf dem Filterblättchen mittels Energiedispersiver-Röntgenspektroskopie (EDX) unter einem Rasterelektronenmikroskop (REM) zu bestimmen. EDX ist eine Messmethode, bei der die Atome der Probe durch einen Elektronenstrahl einer bestimmten Energie angeregt werden. Die angeregten Atome senden dann eine Röntgenstrahlung einer für das jeweilige Element spezifischen Energie aus. Diese Strahlung gibt Aufschluss über die Elementzusammensetzung der Probe.



Bild 3-8: Filterblättchen und Filterhalter zur Montage in die CVS-Anlage

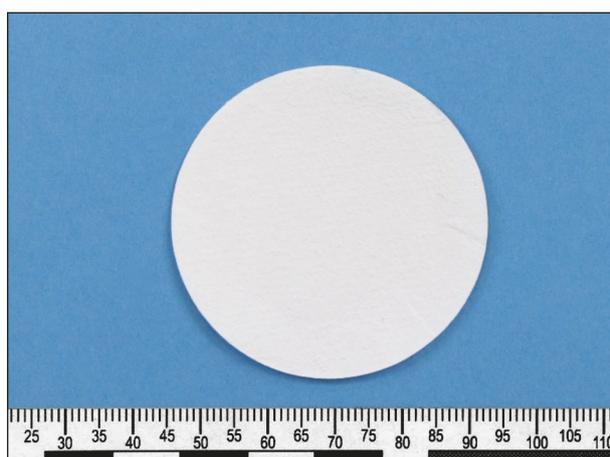


Bild 3-9: Leeres Filterblättchen

## 4 Messablauf Dieselfahrzeuge

### 4.1 Messzyklus Dieselfahrzeuge

Um die Emissionen während der DPF-Regeneration mit den Emissionen vor und nach der Regeneration vergleichen zu können, müssen die Randbedingungen möglichst konstant bleiben. Aus diesem Grund wurde für die Messung ein konstanter Fahrzustand in einem konstanten Motorbetriebspunkt (MBP) gewählt. Der gewählte Fahrzustand ist eine Fahrt in der Ebene bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h. Daraus resultieren für die Prüffahrzeuge die MBP in Tabelle 4-1. Die MBP weichen aufgrund der unterschiedlichen Fahrwiderstände und Getriebeübersetzung der Prüffahrzeuge voneinander ab.

An jedem Prüffahrzeug wurden insgesamt drei Messungen durchgeführt. Eine Messung wird dabei in vier Phasen unterteilt. Phase 1 beinhaltet zunächst die Beladung des Partikelfilters bis etwa 80 %. Diese Hauptbeladung wird ohne Messung von Emissionswerten auf der Straße durchgeführt. Im Anschluss wird das Prüffahrzeug auf dem Rollenprüfstand installiert und die benötigte Messtechnik eingerichtet. Es folgt die Endbeladung, Phase 2, welche den Zustand eines beladenen DPF vor dessen Regeneration beschreibt. Die Phase 2 wird im konstanten MBP gefahren. Die Konstantfahrt von Phase 2 reicht nicht aus, damit das Motorsteuergerät eine Regeneration einleitet. Deshalb müssen zwischen Phase 2 und Phase 3 einige Beschleunigungen durchgeführt werden, um die Trigger-Anforderungen einer Regeneration zu erfüllen. Sobald die Regeneration eingeleitet wird, beginnt Phase 3 und das Fahrzeug wird wieder im konstanten MBP gefahren. Nachdem die Regeneration abgeschlossen ist, wird weiterhin dieser MBP gehalten und es beginnt der Aufbau der Rußschicht, die Phase 4. Diese repräsentiert den Zustand eines frisch regenerierten DPF. Die Phase 4 endet bei einer Filterbeladung von etwa 2 %.

	Prüffahrzeug A	Prüffahrzeug B	Prüffahrzeug C
Gewählter Gang (Automatik)	7 (9-Gang Getriebe)	7 (8-Gang Getriebe)	8 (8-Gang Getriebe)
Motordrehzahl	$\approx 1.450 \text{ min}^{-1}$	$\approx 2.000 \text{ min}^{-1}$	$\approx 1.600 \text{ min}^{-1}$
Motordrehmoment	$\approx 60 \text{ Nm}$	$\approx 70 \text{ Nm}$	$\approx 60 \text{ Nm}$

Tab. 4-1: Konstanter Motorbetriebspunkt der Prüffahrzeuge

Der Ablauf einer Messung ist in Bild 4-1 zu sehen. Es wird im weiteren Verlauf dieses Berichtes immer auf die Messungen und Phasen Bezug genommen, um die Messwerte zuordnen zu können. Da der Zeitpunkt zur Einleitung der aktiven Regeneration in Phase 3 nicht exakt vorhergesagt werden kann, sieht jede Messung eine Aufzeichnung der Messwerte für 2 Stunden vor. Innerhalb dieses Zeitraumes wurden bei allen Messungen die Phasen 2 bis 4 durchlaufen.

Bei vorab durchgeführten Tests wurde ermittelt, welche Werte die über die OBD-Schnittstelle ausgelesenen Parameter erfüllen müssen, damit der Zeitpunkt zur Einleitung einer aktiven Regeneration abgeschätzt werden kann. In Tabelle 4-2 sind die Parameter für die Trigger-Anforderung des jeweiligen Prüffahrzeuges dargestellt. Bei allen Fahrzeugen wurde die DPF-Austrittstemperatur des Steuergerätes durch innermotorische Maßnahmen bei der Regeneration auf über 600 °C angehoben.

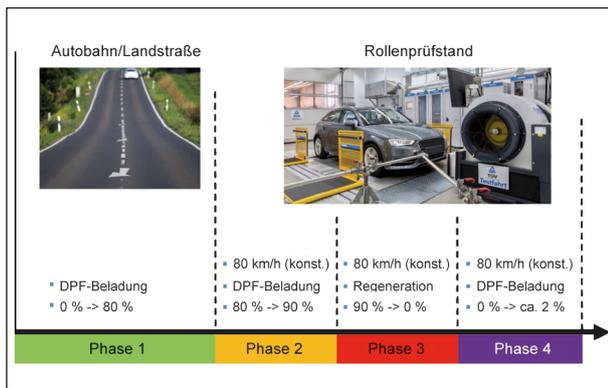


Bild 4-1: Die vier Phasen einer Messung

Sowohl die Fahrstrecke zwischen den Regenerationen als auch die Dauer der Regeneration unterscheidet sich bei den Prüffahrzeugen. Die Werte sind Tabelle 4-3 zu entnehmen. Dabei ist zu beachten, dass die Fahrstrecke zwischen den Regenerationen durch Fahrbedingungen wie Stadtverkehr/Autobahn oder der Fahrweise sportlich/passiv beeinflusst wird. Die angegebenen Tabellenwerte beziehen sich auf eine Strecke mit 90 % Autobahnannteil.

In Bild 4-2 bis Bild 4-4 werden die Verläufe von je einer Messung der Prüffahrzeuge A, B und C hinsichtlich Geschwindigkeit, DPF-Beladung und DPF-Temperatur gezeigt. Die Phase eins ist bedingt durch ausschließliche Straßenfahrt, bei der keine umfassende Messwerterfassung erfolgen kann, nicht aufgezeichnet. Die zugehörigen Phasen zwei, drei und vier sind in den Diagrammen markiert und lassen sich in allen Diagrammen nachvollziehen. Der eingegrenzte Bereich der Phasen ist der Bereich, aus welchem die Messwerte in der weiteren Auswertung für die jeweilige Phase herangezogen wurden.

In dem Bereich zwischen Phase 2 und Phase 3 wurde bei allen Messungen von der 80 km/h Konstantfahrt abgewichen, um durch Beschleunigungen die aktive Regeneration einzuleiten. Der Grund dafür liegt darin, dass die Trigger-Anforderungen für eine aktive Regeneration durch einen dynamischen Fahrzustand schneller erreicht werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei allen Prüffahrzeugen während der Regeneration die Abgastemperatur auf über 600 °C angehoben wird, um einen Rußabbrand zu ermöglichen.

Prüffahrzeug	Parameter	Wert zum Triggern der Regeneration
A	Rußbelastung DPF Gesamtmenge	≈ 90 %
B	DPF-Max. Rußmenge – open loop	≈ 100 %
C	Partikelfilter: Rußmasse	≈ 20,5 g
A-C	DPF-Austritts-Temperatursensor	Temperatur wird bei der aktiven Regeneration auf ca. 600 °C angehoben

Tab. 4-2: Trigger-Anforderungen zum Einleiten der aktiven Regeneration

	Prüffahrzeug A	Prüffahrzeug B	Prüffahrzeug C
Fahrstrecke zwischen den Regenerationen	≈ 850 km	≈ 600 km	≈ 350 km
Dauer der Regeneration	≈ 20 min	≈ 11 min	≈ 13 min

Tab. 4-3: Regenerationsintervalle der Prüffahrzeuge

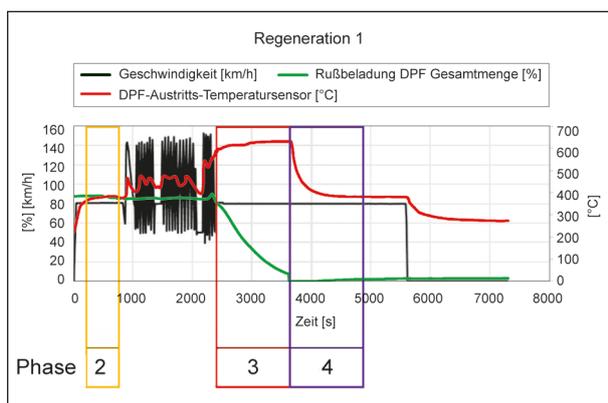


Bild 4-2: Prüffahrzeug A – Messung 1

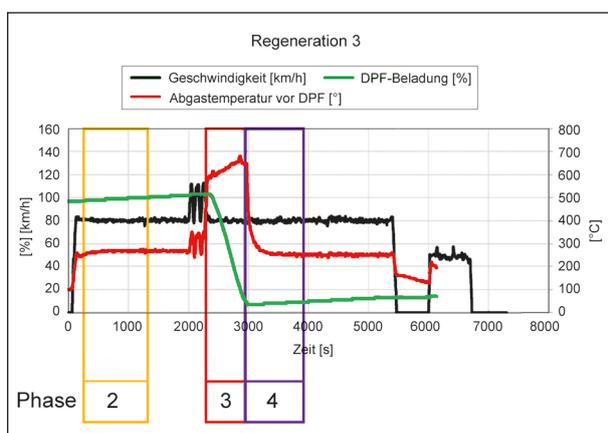


Bild 4-3: Prüffahrzeug B – Messung 3

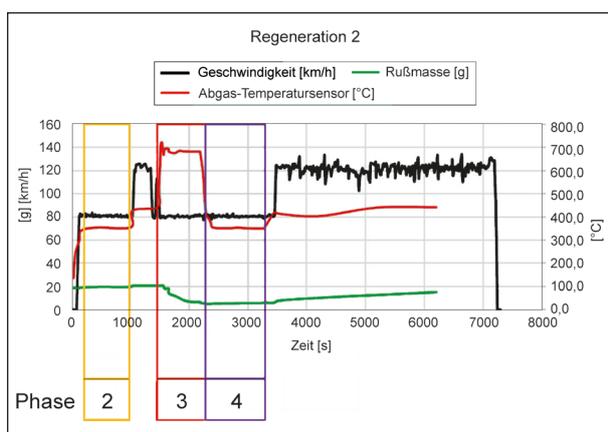


Bild 4-4: Prüffahrzeug C – Messung 2

## 5 Messergebnisse Dieselfahrzeuge

### 5.1 Partikelanzahlmessung

Die Partikelanzahl, welche mit dem AVL-PN-Counter im verdünnten Abgas aufgezeichnet wurde, wird in der Einheit #/s, Partikelanzahl/Sekunde, ausgewertet. Die Ermittlung dieser Werte erfolgt nach den Vorgaben zur Typgenehmigungsprüfung aus der VO (EU) 2017/1151. Die gemittelten Partikelanzahlwerte der einzelnen Phasen sind in Tabelle 5-1 aufgeführt. Dort ist zu erkennen, dass die Partikelanzahl während und nach einer Regeneration von ca.  $1E+07$  #/s um drei Zehnerpotenzen auf  $1E+10$  #/s ansteigt. Die Partikelanzahl (PN – Particle Number) wird, wie in Kapitel 1.2 beschrieben, während der Typgenehmigung nicht mit dem Ki-Faktor verrechnet.

In Bild 5-1 bis Bild 5-3 sind die PN-Verläufe von den einzelnen Prüffahrzeugen dargestellt. Darin ist bei allen Prüffahrzeugen ein deutlicher Anstieg der PN-Emissionen während der Regeneration zu beobachten. Die Prüffahrzeuge weisen charakteristische PN-Verläufe auf. Bei Prüffahrzeug A sind zwei signifikante Anstiege erkennbar. Der erste Anstieg bildet sich während der Regeneration aus und sinkt während dieser wieder ab. Sobald die Regeneration beendet ist, bildet sich ein zweiter Anstieg, welcher im Maximum ca.  $\frac{2}{3}$  der Höhe des ersten Anstieges erreicht und danach mit wachsender Filterbeladung abnimmt.

Prüffahrzeug B zeigt ein durchgehend erhöhtes PN-Niveau, welches gegen Ende der Regeneration sein Maximum erreicht. Die PN-Werte nehmen

Prüffahrzeug	PN (gemessen mit AVL-PN-Counter)		
	Absolut Wert [#s] – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug		
	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A	1,63E+07	2,99E+10	1,01E+10
B	3,83E+07	9,61E+10	2,27E+10
C	1,40E+07	1,11E+10	3,33E+09

Tab. 5-1: PN-Mittelwerte aus 3 Messungen pro Prüffahrzeug

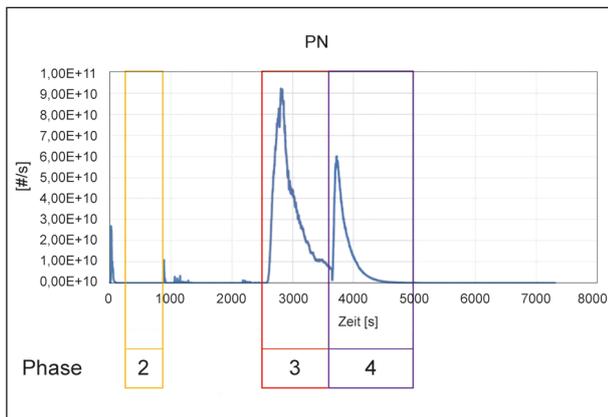


Bild 5-1: Prüffahrzeug A – Messung 1

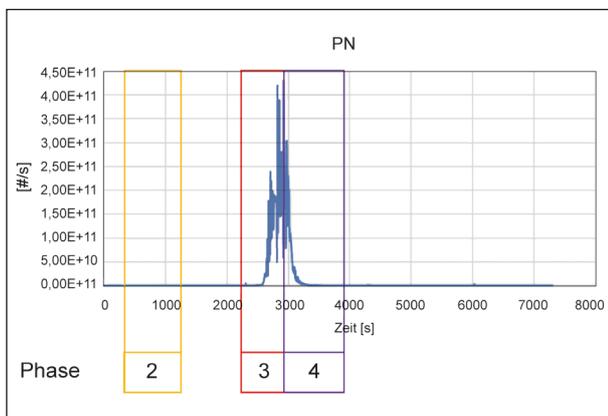


Bild 5-2: Prüffahrzeug B – Messung 3

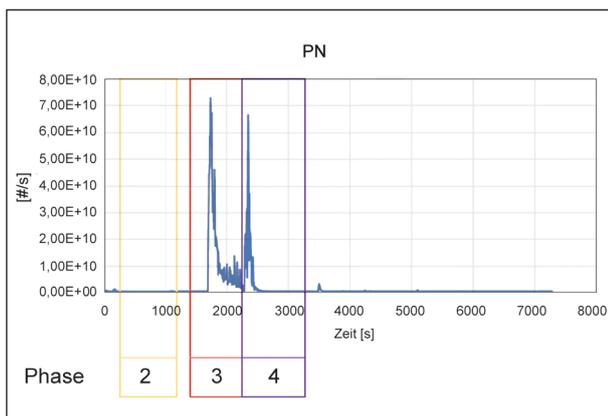


Bild 5-3: Prüffahrzeug C – Messung 2

nach der Regeneration mit zunehmender Filterbelastung wieder ab.

Die Charakteristik des PN-Verlaufes von Prüffahrzeug C ähnelt der des Prüffahrzeugs A. Es konnten zwei Peaks, jeweils während der Regeneration und im Anschluss beim Aufbau der Rußschicht, gemessen werden. Diese Peaks klingen bei Prüffahrzeug

C allerdings deutlich schneller wieder ab als bei Prüffahrzeug A.

Darüber hinaus ist bei allen Prüffahrzeugen auffällig, dass die PN-Emissionen während der Beschleunigungen zwischen Phase 2 und Phase 3 bis auf vereinzelte Peaks keinen signifikanten Anstieg zeigen. Hier wurde das Fahrzeug teilweise nahe an der Vollastlinie beschleunigt. Die PN-Diagramme zu allen Messungen sind im Anhang zu finden (siehe Bild 0-10 bis Bild 0-18).

## 5.2 Partikelgrößenverteilung

### 5.2.1 Vergleich DMS500/AVL-PN-Counter

Die Probenentnahme des DMS500 ist in die CVS-Anlage des Rollenprüfstandes integriert. Somit wird das verdünnte Abgas analysiert. Da die Verdünnungsluft gemäß den Vorgaben der VO (EU) 2017/1151 – Anhang XXI – Unteranhang 5 durch einen HEPA-Filter geleitet wird, entspricht die gemessene Partikelgrößenverteilung der aus dem Abgas des Prüffahrzeugs. Die Messwerte zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung des DMS500 werden als volumenbezogene Konzentration in der Einheit  $\text{cm}^{-3}$  angegeben.

Zum Abgleich des DMS500 mit dem AVL PN-Counter muss die untere Roll-Off Grenze berücksichtigt werden. Das AVL-Gerät wird für Messungen bei der Typgenehmigung verwendet. Dort ist eine untere Roll-Off-Grenze von  $d_{50} = 23 \text{ nm}$  vorgegeben. Somit werden alle Partikel kleiner als 23 nm nicht oder in geringerem Umfang als tatsächlich vorhanden berücksichtigt. Das DMS500 erfasst Partikel bis zu einer Größe von 5 nm.

Die emittierten Partikel werden unterschieden in Nucleation Mode und Accumulation Mode.

**Nucleation Mode – Nc-mode:** Überwiegend volatile Partikel zwischen 5 nm und 50 nm. Diese sind häufig Wasser, Öltröpfchen, unverbrannter Kraftstoff und Kondensationsprodukte aus der Verbrennung.

**Accumulation Mode – Ac-mode:** Überwiegend feste Partikel zwischen 30 nm und 200 nm. Diese entstehen aus einer unvollständigen Verbrennung (Ruß) und kondensierten Flüssigbestandteilen auf deren Oberfläche.

Für den Vergleich der Messwerte von dem AVL-PN-Counter und dem DMS500 wird deshalb bei letzterem nur der Accumulation Mode herangezogen.

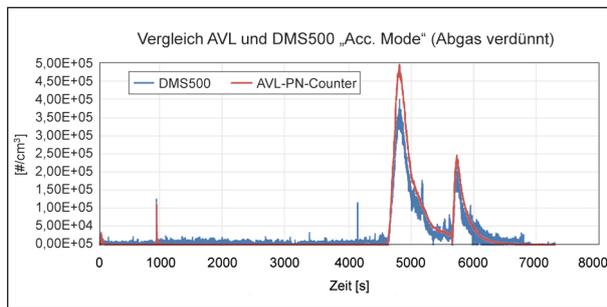


Bild 5-4 Vergleich der AVL-PN-Counter/DMS500 – Prüffahrzeug A – Messung 2

Das Diagramm zum Vergleich der Messgeräte bei einer Messung ist in Bild 5-4 dargestellt. Das Diagramm bezieht sich auf das verdünnte Abgas in der Einheit  $\text{cm}^{-3}$ . Es ist zu erkennen, dass die Werte gut korrelieren. Das DMS500 weist ein größeres Rauschen auf, während bei dem AVL-PN-Counter die Peaks geringfügig höher ausfallen. Das Rauschen des DMS500 kann außerhalb von Phase 3 und Phase 4 auf die sehr geringe PN-Emission zurückgeführt werden. Dadurch ist das Messsignal teilweise zu gering für ein stabiles Signal. Während der Regeneration und dem Aufbau der Rußschicht ist das Messsignal ausreichend stark.

Beide Messgeräte haben zur Entfernung der volatilen Partikel einen CSA bzw. VPR vorgeschaltet.

### 5.2.2 Nucleation mode + Accumulation mode

Das gesamte Größenspektrum der Partikel, der Accumulation Mode und der Nucleation Mode zusammen, lassen sich am besten über ein Konturdiagramm darstellen. Dort ist die Konzentration der Größenverteilung der Partikel farblich über der Zeit aufgetragen. In der Zeitachse sind die definierten Phasen der Messung markiert (siehe Bild 5-5 bis Bild 5-7).

Deutlich zu erkennen sind die charakteristischen Verläufe der Regeneration und des Aufbaus der Rußschicht der drei Prüffahrzeuge. Dieses Verhalten ist im Accumulation Mode bei allen Messungen sichtbar. Auffällig ist, dass während der gesamten Messungen zu keinem anderen Zeitpunkt solch hohe PN-Werte gemessen wurden, auch nicht während der zum Teil starken Beschleunigungen zwischen Phase 2 und Phase 3. Bei den Messungen von Prüffahrzeug A und Prüffahrzeug B sind extrem hohe Peaks im Nucleation Mode gemessen worden. Bei Prüffahrzeug A ist dieser Peak zu Beginn der Regeneration ausgeprägt. Gegen Ende der

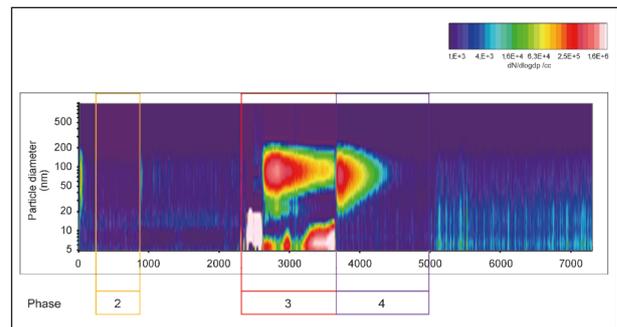


Bild 5-5: Prüffahrzeug A – Messung 1

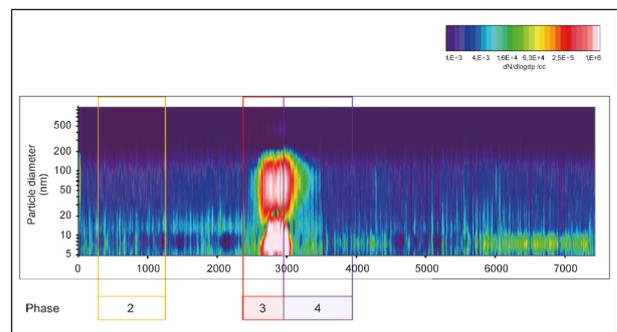


Bild 5-6: Prüffahrzeug B – Messung 3

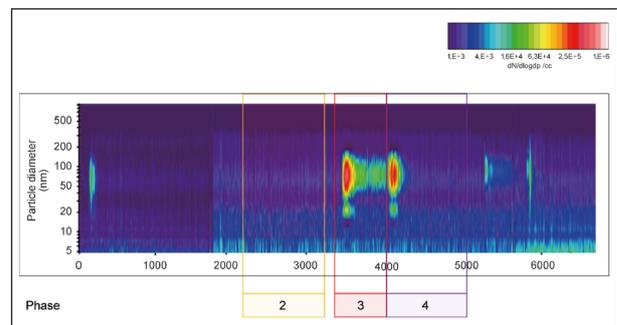


Bild 5-7: Prüffahrzeug C – Messung 3

Regeneration bildet sich ein zweiter Peak aus, während die Partikelanzahl des Accumulation Mode bereits absinkt. Prüffahrzeug B weist über den gleichen Zeitraum hohe PN-Emissionen im Nucleation Mode und Accumulation Mode auf. Bei Prüffahrzeug C hingegen wurden keine PN-Anstiege im Nucleation Mode gemessen. Der Ursprung der Nucleation Mode-Peaks kann nicht abschließend erklärt werden. Es ist naheliegend, dass diese Partikel durch Änderung der Motorparameter zur Anhebung der Abgastemperatur oder durch die starke Temperaturerhöhung (erster Peak) und eine hohe konstante Temperatur (zweiter Peak) entstehen. Die Charakteristik der Größenverteilung der Prüffahrzeuge ist bei den je drei durchgeführten Messungen reproduzierbar.

### 5.2.3 Accumulation mode

Die Analyse der Partikelgrößenverteilung soll eine mögliche Änderung der Größencharakteristik der emittierten Partikel während der Regeneration sichtbar machen. Dabei wird, wie oben beschrieben, zwischen Nucleation Mode und Accumulation Mode unterschieden. Zur Beschreibung der Größencharakteristik eignet sich der Geometric Mean Diameter (GMD) sowie die Geometric Standard Deviation of Diameter (GSD). Der GMD gibt Aufschluss über die durchschnittliche Größe der Partikel in Nanometern. Die GSD beschreibt die Standardabweichung und somit die Breite des Spektrums. Bei dieser Analyse ist zu berücksichtigen, dass das Messsignal nur in den Phasen 3 und 4 im belastbaren Messbereich war. In Phase 2 war das Messsignal aufgrund geringer PN-Emissionen überwiegend zu schwach, um eine zuverlässige Größenverteilungskurve zu bilden.

Die Charakteristik der Partikel im Accumulation Mode ist in Tabelle 5-2 aufgelistet. Der GMD aus Phase 2 und Phase 4 ist bei allen Prüffahrzeugen auf ähnlichem Niveau. Es ist kein eindeutiger Trend während der Regeneration in Phase 3 zu erkennen. Während der GMD bei Prüffahrzeug A in dieser Phase geringfügig ansteigt, sinkt dieser Wert im geringen Maße bei den anderen Prüffahrzeugen. Auffällig ist zudem, dass der GMD bei Prüffahrzeug B phasenübergreifend ca. 10 – 20 nm kleiner ist.

Die höheren Werte der Standardabweichung GSD in Phase 2 können auf das geringe Messsignal zurückgeführt werden. Je stärker das Messsignal ist, desto geringer ist die Standardabweichung.

Neben der Partikelanzahl ist bei den Fahrzeugen B und C auch die Partikelmasse in den einzelnen Phasen erfasst worden. Dazu wurden pro Messung insgesamt drei Filterblättchen (je Phase 1 Filterblättchen) beladen und im Anschluss gravimetrisch nach den Vorgaben der VO (EU) 2017/1151 die Masse der Partikel bestimmt. Bild 5-8 zeigt die Korrelation von Partikelanzahl und Partikelmasse von Prüffahrzeug B und Prüffahrzeug C. Für die Partikelanzahl wurde in dieser Auswertung auf die Messwerte des AVL-PN-Counters zurückgegriffen. Auf der Abszisse ist logarithmisch die Partikelanzahl aller erfassten Partikel der jeweiligen Phase aufgetragen. Auf der Ordinate ist die Masse der Partikel zugeordnet. Die höchsten Massen und Partikelanzahlen je Fahrzeug wurden in der Regeneration aufgezeichnet. Es kann eine lineare Ausgleichsgerade, mittlerer Quotient, für beide Fahrzeuge ermittelt werden. Diese hat eine Steigung von ca.  $5E+13$  #/mg. In Tabelle 5-3 ist der Quotient für die einzelnen Phasen zusammengefasst. Bei beiden Prüffahrzeu-

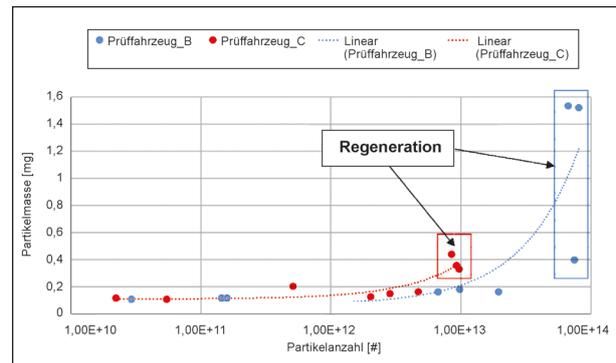


Bild 5-8: Korrelation zwischen Partikelmasse und Partikelanzahl – Prüffahrzeug B und C

Partikelcharakteristik – Accumulation Mode – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug						
Prüffahrzeug	Phase 2		Phase 3		Phase 4	
	GMD [nm]	GSD [-]	GMD [nm]	GSD [-]	GMD [nm]	GSD [-]
A	74,69	2,03	85,10	1,45	72,42	1,55
B	65,73	2,08	58,58	1,59	62,78	1,59
C	81,87	2,02	77,67	1,43	83,88	1,52

Tab. 5-2: Accumulation Mode – Prüffahrzeug A, B, C

Partikelmasse – Partikelanzahl							
	Einheit	Prüffahrzeug B			Prüffahrzeug C		
		Ø Phase 2	Ø Phase 3	Ø Phase 4	Ø Phase 2	Ø Phase 3	Ø Phase 4
Partikel pro Filter	#	1,11E+11	7,42E+13	1,20E+13	1,97E+11	9,16E+12	3,19E+12
Partikelmasse	mg	0,0256	1,0617	0,0796	0,0537	0,2861	0,0571
Quotient	#/mg	4,35E+12	6,99E+13	1,50E+14	3,67E+12	3,20E+13	5,60E+13

Tab. 5-3: Korrelation zwischen Partikelmasse und Partikelanzahl

gen liegt der Quotient in Phase 3 und Phase 4 höher als in Phase 2. Es wurden also in Phase 3 und 4 mehr Partikel pro Masseneinheit erfasst, was auf eine insgesamt kleinere Partikelgrößenverteilung in diesen Phasen hindeutet.

#### 5.2.4 Nucleation Mode

Die Charakteristik der Partikel im Nucleation Mode ist in Tabelle 5-4 aufgelistet.

Prüffahrzeug C weist keine Partikelveränderung im Nucleation Mode auf. Die folgenden Ausführungen beziehen sich daher auf Prüffahrzeug A und Prüffahrzeug B.

Während der Regeneration verringert sich der GMD der Partikel im Nucleation Mode. Das bedeutet, bei der Regeneration sind die Partikel des Nucleation Mode im Mittel kleiner als in der Beladungsphase. Ein Vergleich der GMD zwischen Phase 3 und 4 ist nicht eindeutig. Es ist allerdings am PN-Wert in den Konturdiagrammen zu erkennen, dass die Anzahl dieser sehr kleinen Partikel nur während der Regeneration stark ansteigt und nicht im Anschluss daran in Phase 4.

Die Standardabweichung GSD ist während der Regeneration geringer als in der Beladungsphase.

Dies ist zum Teil auf die geringere Messsignalstärke in Phase 2 zurückzuführen, da sich durch Rauscheffekte auch die Standardabweichung der Partikelgröße erhöht.

### 5.3 Analyse der Gaskomponenten

Neben den Partikeln sind die Gaskomponenten in Tabelle 5-5 gemessen und analysiert worden.

Die Gaskomponenten, welche mit dem Standardanalysator im verdünnten Abgas aufgezeichnet wurden, werden in der Einheit g/s ausgewertet. Die Ermittlung dieser Werte erfolgt nach den Vorgaben zur Typgenehmigungsprüfung aus der VO (EU) 2017/1151. Die Messwerte aus dem unverdünnten Abgas von dem FTIR werden als Volumenkonzentration in ppm ausgewertet. Es wurden bei sehr geringen Konzentrationen vereinzelt auch negative Messwerte aufgezeichnet. Dies ist auf einen Nullpunktdrift der Analysatoren zurückzuführen.

Die Verläufe der Gaskomponenten über die Messungen sind im Anhang Bild 0-28 bis Bild 0-111 zu entnehmen. Die Mittelwerte der Gaskomponenten in den Phasen sind im Anhang in Tabelle 0-12 bis Tabelle 0-41 aufgeführt.

Partikelcharakteristik – Nucleation Mode – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug						
Prüffahrzeug	Phase 2		Phase 3		Phase 4	
	GMD [nm]	GSD [-]	GMD [nm]	GSD [-]	GMD [nm]	GSD [-]
A	12,30	1,61	8,31	1,23	9,97	1,33
B	11,49	1,67	8,41	1,26	8,42	1,38
C	11,87	1,61	11,87	1,62	12,07	1,62

Tab. 5-4: Nucleation Mode – Prüffahrzeug A, B, C

Bezeichnung	Summenformel	Einheit	Analysator	Limitiert für Fahrzeuge nach VO (EG) 715/2007
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	g/s	Standardanalysator-Prüfstand	Ja
Kohlenstoffmonoxid	CO	g/s	Standardanalysator-Prüfstand	Ja
Kohlenwasserstoff (T = Total)	THC	g/s	Standardanalysator-Prüfstand	Ja
Stickstoffoxide	NO <sub>x</sub>	g/s	Standardanalysator-Prüfstand	Ja
Stickstoffmonoxid	NO	ppm	FTIR	Nein
Stickstoffdioxid	NO <sub>2</sub>	ppm	FTIR	Nein
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	ppm	FTIR	Nein
Methan	CH <sub>4</sub>	ppm	FTIR	Nein
Distickstoffmonoxid (Lachgas)	N <sub>2</sub> O	ppm	FTIR	Nein
Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub>	ppm	FTIR	Nein

Tab. 5-5: Analytierte Gaskomponenten

### 5.3.1 Kohlenstoffdioxid – CO<sub>2</sub>

Die Übersicht der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den einzelnen Phasen ist in Tabelle 5-6 zu sehen. Die Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist im Vergleich zu den anderen Gaskomponenten gering. Im Schnitt erhöht sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß während der Regeneration um 64 %. Diese Erhöhung ist zum einen auf die erhöhte Kraftstoffeinspritzung zur Temperaturanhebung und zum anderen auf die Verbrennung von Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O) zu CO<sub>2</sub> zurückzuführen. Nach der Regeneration (Phase 4) ist der CO<sub>2</sub> Ausstoß um 5 % geringer als vor der Regeneration mit beladenem Filter. Eine Erklärung hierfür ist der geringere Gegendruck in der Abgasanlage. Dadurch kann weniger Kraftstoff eingespritzt werden, um den MBP zu halten. Durch den geringeren Kraftstoffverbrauch sinken entsprechend die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Exemplarisch ist in Bild 5-9 der CO<sub>2</sub>-Verlauf einer Messung von Prüffahrzeug A aufgetragen. Darin ist das unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Niveau der Phasen zu erkennen. Während der Beschleunigungsphasen zwischen Phase 2 und Phase 3 sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen um ein Vielfaches erhöht.

Kohlenstoffdioxid – CO <sub>2</sub> (gemessen über Verdünntmodale)			
Prüffahrzeug	Absolut Wert [g/s] – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug		
	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A	2,24	4,09	2,11
B	2,55	3,94	2,41
C	2,26	3,52	2,15

Tab. 5-6: CO<sub>2</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

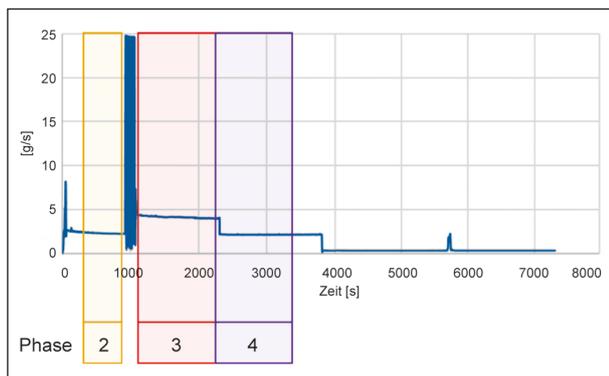


Bild 5-9: CO<sub>2</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug A – Messung 3

### 5.3.2 Kohlenstoffmonoxid – CO

Die CO-Emissionen während der Regeneration weisen Unterschiede bei den Prüffahrzeugen auf (siehe Tabelle 5-7). Dies ist zum Teil auf den Zeitpunkt der Erfassung der CO-Emissionen zurückzuführen. In Bild 5-10 ist der CO-Verlauf von Prüffahrzeug A aufgetragen. Dort ist ersichtlich, dass ein CO-Peak unmittelbar vor der Regeneration gemessen wurde. Dies kann eine Folge der Einleitung der Regeneration sein, welche aber erst im Anschluss beginnt. Der Peak ist daher nicht in der Mittelwertbildung von Phase 3 enthalten. Bei Prüffahrzeug C (Bild 5-11) ist ein ähnlicher CO-Peak vorhanden,

Kohlenstoffmonoxid – CO (gemessen über Verdünntmodale)			
Prüffahrzeug	Absolut Wert [mg/s] – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug		
	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A	1,49E-02	9,04E-02	-4,07E-02
B	1,44E-01	5,93	1,16E-01
C	1,61E-02	8,71	9,93E-02

Tab. 5-7: CO-Werte aus den einzelnen Phasen

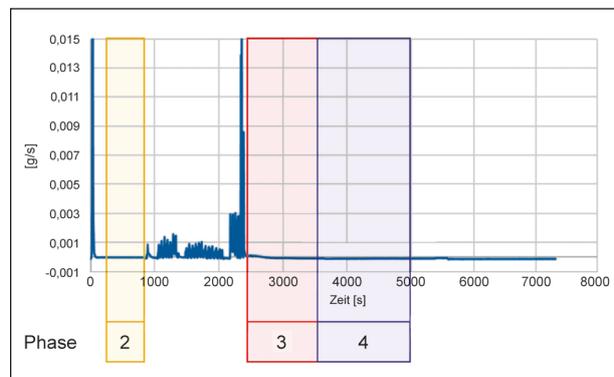


Bild 5-10: CO-Verlauf – Prüffahrzeug A – Messung 1

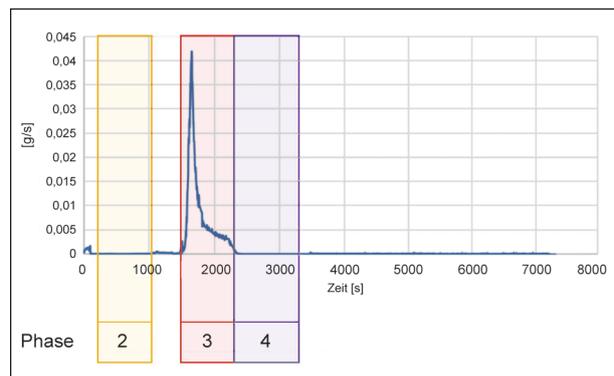


Bild 5-11: CO-Verlauf – Prüffahrzeug C – Messung 2

welcher allerdings erst während der Regeneration auftritt. Dadurch werden die erhöhten CO-Werte in der Phase 3 vollständig erfasst und der Mittelwert ist entsprechend höher. Bei allen Messungen ist ein erhöhter CO-Wert zu Beginn der Regeneration gemessen worden, bei Prüffahrzeug A ohne Einfluss auf den Mittelwert.

**5.3.3 Kohlenwasserstoff – THC**

Analog zu CO ist bei allen Messungen ein THC-Peak bei Einleitung der Regeneration gemessen worden. Dieser Peak fällt in allen Messungen nach kurzer Zeit wieder ab, sodass der Einfluss auf die Mittelwertbildung gering ist. Die THC-Emissionen sind während der Regeneration im Mittel etwa 5-fach höher als in der Endbeladungsphase.

**5.3.4 Stickstoffoxide – NO<sub>x</sub>**

Zur Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen ist in den Prüffahrzeugen ein Selective Catalytic Reduction (SCR)-Katalysator verbaut. Beim SCR-System wird NO<sub>x</sub> in einem geeigneten Katalysator, mit Ammoniak (NH<sub>3</sub>) als Reduktionsmittel, zu Stickstoff (N<sub>2</sub>) reduziert. Ammoniak entsteht ab einer Temperatur von ca. 200 °C durch Thermolyse- und Hydrolyse-

reaktionen aus dem Harnstoff der eingespritzten Harnstofflösung. Das entstandene Ammoniak muss im SCR-Katalysator an einer NH<sub>3</sub>-Speicherkomponente angelagert werden. Darunter wird ein Material verstanden, das NH<sub>3</sub> reversibel absorbieren kann. Die im Abgas vorhandenen Stickoxide (NO und NO<sub>2</sub>) treffen auf den im Katalysator zwischengespeicherten Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und werden in Stickstoff (N<sub>2</sub>) und Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) umgewandelt. Es gibt verschiedenen SCR-Reaktionen für diesen Umwandlungsprozess, welche von dem NO/NO<sub>2</sub> Verhältnis abhängig sind. Während der Regeneration steigt der NO-Wert im Vergleich zum NO<sub>2</sub>-Wert deutlich an (vgl. Kapitel 5.3.5 und Kapitel 5.3.6). Bei einem hohen NO/NO<sub>2</sub>-Verhältnis kann nur die langsame Standard-SCR-Reaktion ablaufen, welche den Reduktionswirkungsgrad des SCR-Katalysators absenkt. Darüber hinaus wird bei einigen Fahrzeugen zur Anhebung der Abgastemperatur während der Regeneration die Abgasrückführung abgeschaltet, was zu höheren NO<sub>x</sub>-Rohemissionen führt.

Die gemessenen NO<sub>x</sub>-Werte sind in Tabelle 5-9 und ein Verlauf von Prüffahrzeug B ist in Bild 5-13 dargestellt. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen sind während der Regeneration aus den oben genannten Gründen deutlich erhöht.

Kohlenwasserstoff – THC (gemessen über Verdünntmodale)			
Prüffahrzeug	Absolut Wert [mg/s] – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug		
	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A	4,88E-02	3,56E-01	3,36E-01
B	4,55E-01	8,39E-01	3,97E-01
C	4,46E-02	3,47E-01	1,95E-01

Tab. 5-8: THC-Werte aus den einzelnen Phasen

Stickstoffoxide – NO <sub>x</sub> (gemessen über Verdünntmodale)			
Prüffahrzeug	Absolut Wert [mg/s] – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug		
	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A	3,26E-02	3,28	2,40E-01
B	2,46E-02	3,88	1,72E-01
C	5,37E-02	1,56	1,47E-01

Tab. 5-9: NO<sub>x</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

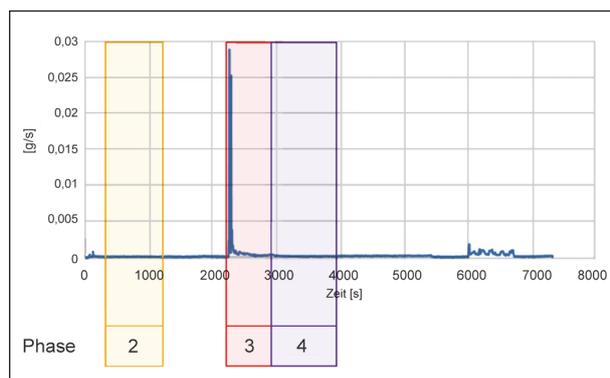


Bild 5-12: THC-Verlauf – Prüffahrzeug B – Messung 3

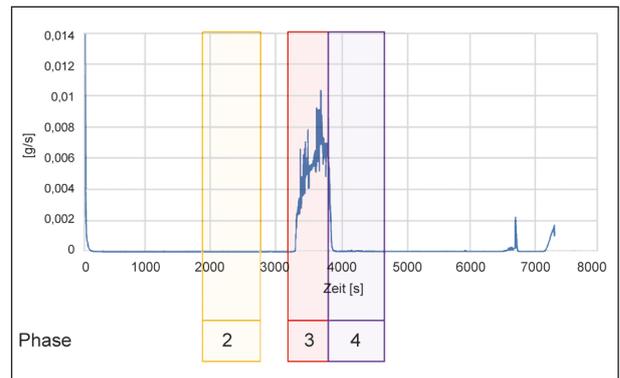


Bild 5-13: NO<sub>x</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug B – Messung 2

### 5.3.5 Stickstoffmonoxid – NO

Die Stickstoffmonoxid-Werte sind während der Beladungsphase sehr gering, im Mittel bei unter 2 ppm (vgl. Tabelle 5-10). In der Regenerationsphase steigt der NO-Wert bei Prüffahrzeug A und B im Mittel auf ca. 80 ppm an. Bei Prüffahrzeug C liegt der Mittelwert bei ca. 45 ppm. Während der Regeneration steigt die Volumenkonzentration von NO um das 20- bis 100-fache an.

Ein Vergleich der Werte von Prüffahrzeug B – Messung 2 von NO [ppm] in Bild 5-14 und NO<sub>x</sub> [g/s] in Bild 5-13 zeigt einen nahezu identischen Verlauf. Der NO Anteil des NO<sub>x</sub>-Wertes ist also dominierend.

### 5.3.6 Stickstoffdioxid – NO<sub>2</sub>

Die NO<sub>2</sub>-Emissionen steigen während der Regeneration im Mittel um etwa Faktor 2,5 an. Dies ist ein deutlich geringeres Verhältnis als bei den NO-Emissionen. Die Werte sind in Tabelle 5-11 aufgelistet.

### 5.3.7 Ammoniak – NH<sub>3</sub>

Der Verlauf der NH<sub>3</sub>-Emissionen von je einer Messung der Prüffahrzeuge ist in Bild 5-15 bis Bild 5-17 aufgetragen. Zu Beginn der Regeneration ist bei al-

Stickstoffmonoxid – NO (gemessen über FTIR)			
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug		
	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A	1,13	83,45	11,99
B	0,73	77,16	3,26
C	2,02	44,79	6,38

Tab. 5-10: NO-Werte aus den einzelnen Phasen

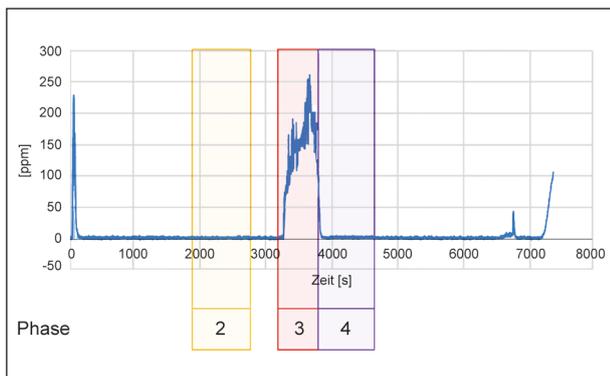


Bild 5-14: NO-Verlauf – Prüffahrzeug B – Messung 2

Stickstoffdioxid – NO <sub>2</sub> (gemessen über FTIR)			
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug		
	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A	2,34	4,50	1,83
B	1,27	4,81	1,16
C	2,65	5,05	2,95

Tab. 5-11: NO<sub>2</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

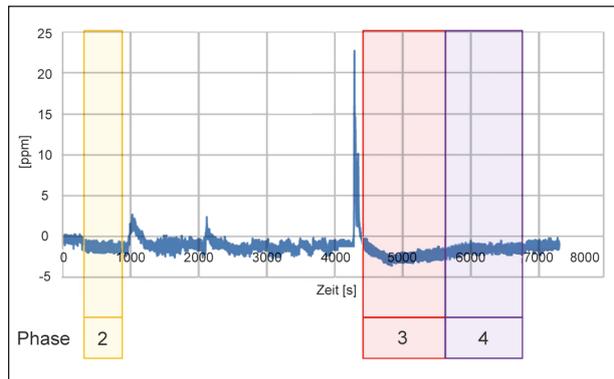


Bild 5-15: NH<sub>3</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug A – Messung 2

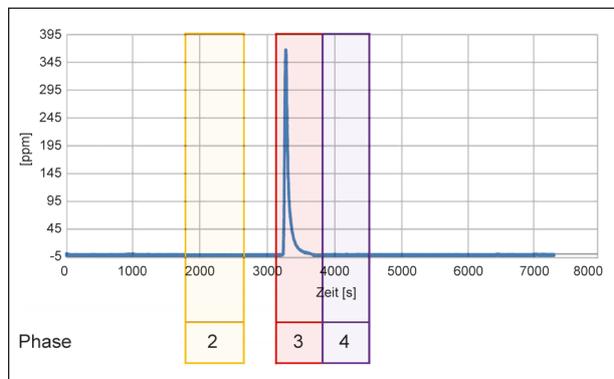


Bild 5-16: NH<sub>3</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug B – Messung 2

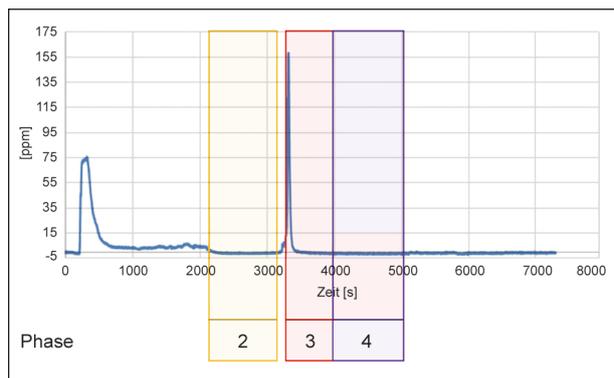


Bild 5-17: NH<sub>3</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug C – Messung 3

Ammoniak – NH <sub>3</sub> (gemessen über FTIR)			
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug		
	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A	-1,42	-2,20	-1,64
B	-1,05	20,88	-0,91
C	20,98	5,49	-1,42

Tab. 5-12: NH<sub>3</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

len Messungen ein NH<sub>3</sub>-Peak zu erkennen, welcher mit der abnehmenden NH<sub>3</sub>-Speicherfähigkeit der SCR-Beschichtung bei hohen Temperaturen erklärt werden kann. Der SCR-Katalysator besitzt ein ausgeprägtes NH<sub>3</sub>-Speichervermögen, das mit steigender Temperatur stark abnimmt. Das Speichervermögen hat einerseits den Vorteil, dass eine kurzzeitige Harnstoff-Überdosierung nicht direkt zu einem NH<sub>3</sub>-Schlupf führt und auch bei Temperaturen, die zu niedrig für eine Hydrolysereaktion sind, ein NO<sub>x</sub>-Umsatz mit dem eingespeicherten NH<sub>3</sub> ablaufen kann. Auf der anderen Seite besteht durch die Temperaturabhängigkeit des Speichervermögens die Gefahr, dass bei zu schnellen Temperaturerhöhungen ein Teil des adsorbierten NH<sub>3</sub> desorbiert.

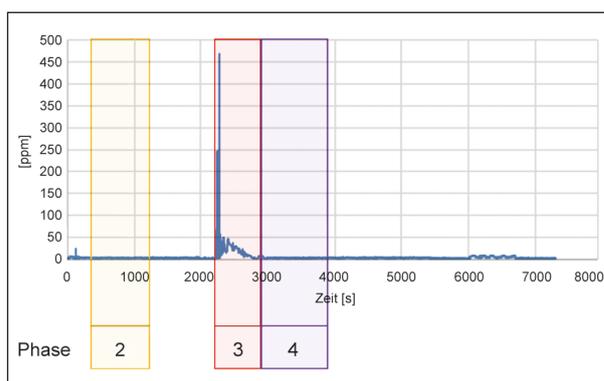
Analog zu dem CO-Peak ist die Ausprägung des NH<sub>3</sub>-Peaks bei Prüffahrzeug A vor der Regeneration am stärksten. Deshalb wird der Anstieg bei Prüffahrzeug A nicht in dem Mittelwert in Tabelle 5-12 erfasst. Bei Prüffahrzeug B und C tritt dieser Peak zu Beginn der Regeneration auf und ist in den Mittelwerten enthalten. Nach Absinken des Peaks und während des Aufbaus der Rußschicht werden nur sehr geringe NH<sub>3</sub>-Emissionen aufgezeichnet. Das Phänomen, dass die Messwerte zum Teil im negativen Wertebereich verlaufen, ist auf einen Drift des Analysators zurückzuführen.

Der Grund für den hohen Wert von Prüffahrzeug C in Phase 2 liegt darin begründet, dass bei diesem Fahrzeug die NH<sub>3</sub>-Emissionen zu Beginn einer Messung stark erhöht waren und bei Messung 2 in diesem Zeitraum die Phase 2 lag (siehe auch Bild 0-86 im Anhang). Wird bei Prüffahrzeug C nur die Messung 3 für Phase 2 herangezogen, ergibt sich eine NH<sub>3</sub>-Konzentration von -0,84 ppm (vgl. Tabelle 0-32 im Anhang).

### 5.3.8 Methan – CH<sub>4</sub>

Die Mittelwerte der CH<sub>4</sub>-Emissionen in den Phasen sind im Mittel mit unter 3 ppm sehr gering. Jedoch

Methan – CH <sub>4</sub> (gemessen über FTIR)			
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug		
	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A	2,48	-0,54	1,65
B	2,58	16,81	2,29
C	1,56	15,92	1,54

Tab. 5-13: CH<sub>4</sub>-Werte aus den einzelnen PhasenBild 5-18: CH<sub>4</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug B – Messung 3

Distickstoffmonoxid – N <sub>2</sub> O (gemessen über FTIR)			
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug		
	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A	6,04	0,43	5,55
B	6,04	3,20	4,75
C	3,82	0,43	2,95

Tab. 5-14: N<sub>2</sub>O-Werte aus den einzelnen Phasen

weisen alle Messungen einen Peak von 40 ppm bis zu 450 ppm beim Einleiten der Regeneration auf. Wie bei CO und NH<sub>3</sub> tritt der CH<sub>4</sub>-Peak bei Prüffahrzeug A vor der Phase 3 auf und ist somit nicht in der Mittelwertbildung in Tabelle 5-13 enthalten. Bei Prüffahrzeug B und C liegt der Peak innerhalb der Phase 3, wie auch im Diagramm in Bild 5-18 zu erkennen ist. Die CH<sub>4</sub>-Emissionen erhöhen sich dadurch im Mittel um Faktor 8.

### 5.3.9 Distickstoffmonoxid (Lachgas) – N<sub>2</sub>O

Die Messwerte der Gaskomponente N<sub>2</sub>O liegen in den Phasen außerhalb der Regeneration bei etwa 4-6 ppm (vgl. Tabelle 5-14). Während der Regeneration sinkt dieser Wert auf unter 1 ppm bei Prüffahrzeug B und C und um etwa die Hälfte auf 3 ppm bei Prüffahrzeug B.

Schwefeldioxid – SO <sub>2</sub> (gemessen über FTIR)			
Prüffahr- zeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwert aus 3 Messungen pro Fahrzeug		
	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A	1,08	6,57	1,40
B	1,78	4,09	1,11
C	1,97	7,37	2,40

Tab. 5-15: SO<sub>2</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

### 5.3.10 Schwefeldioxid – SO<sub>2</sub>

Die SO<sub>2</sub>-Emissionen steigen während der Regeneration auf etwa 4-7 ppm an. In den restlichen Phasen liegt der Wert bei ca. 1-2 ppm (vgl. Tabelle 5-15).

### 5.3.11 Zusammenfassung – Gaskomponenten

Bei der Analyse fällt neben den relativ konstanten Werten aus den einzelnen Phasen auf, dass insbesondere unmittelbar vor der Regeneration die Gaskomponenten CO, THC, NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> und CH<sub>4</sub> einen deutlichen Peak aufweisen, welcher dann mit Beginn der Regeneration wieder absinkt. Der Beginn kurz vor der Regeneration ist der Zeitpunkt, in dem das Motorsteuergerät die Abgastemperatur anhebt. In diesem Umschaltmoment der Motorparameter werden kurzzeitig die deutlich erhöhten Emissionen der genannten Gaskomponenten gemessen. Diese Peaks werden bei Prüffahrzeug B und C in den Messwerten der Regeneration erfasst und gehen in die Mittelwertbildung mit ein. Bei Prüffahrzeug A traten diese Peaks vor der Einleitung der Regeneration und noch während der Beschleunigungsphasen auf. Der konstante MBP bei 80 km/h wurde dann direkt im Anschluss angefahren. Daher gehen diese Anstiege bei Prüffahrzeug A nicht in die Mittelwertbildung mit ein.

Zur Bewertung der Emissionen wurden die Messwerte aus der Regeneration mit den Messwerten aus der Endbeladung verglichen und eine prozentuale Abweichung ermittelt. Eine positive Abweichung bedeutet, dass der Wert in der Regeneration höher liegt als bei der Endbeladung, bei einem negativen Abweichungswert ist der Messwert entsprechend geringer. Eine Abweichung von +100 % entspricht der Verdopplung des Ausgangsmesswertes. In Tabelle 5-16 sind die Änderungen der Gaskom-

ponenten in den einzelnen Phasen zusammengefasst. Die Referenz bildet die Endbeladungsphase.

Die Gaskomponenten, welche bei allen Prüffahrzeugen während der Regeneration einen signifikanten Anstieg aufwiesen, sind CO, NO und NO<sub>x</sub>, wobei NO und NO<sub>x</sub> in dem Zusammenhang stehen, dass NO ein Teil des NO<sub>x</sub> darstellt. Der NO- bzw. NO<sub>x</sub>-Wert erhöht sich während der Regeneration im Mittel um Faktor 67 bzw. 95 zum Referenzwert der Endbeladungsphase.

Der NO<sub>2</sub>-Wert erhöht sich im Mittel geringfügig um Faktor 2,5, der THC-Wert um Faktor 5 und der SO<sub>2</sub>-Wert um Faktor 4. Die Messwerte von NH<sub>3</sub> und CH<sub>4</sub> sind während der Regeneration grundsätzlich höher als in der Beladungsphase. Dies spiegelt sich in der Tabelle nicht wieder, da bei Prüffahrzeug A der Peak nicht erfasst wurde und bei Prüffahrzeug C der Referenzwert für NH<sub>3</sub> aus Phase 2 sehr hoch ausfällt. Die Konzentration von N<sub>2</sub>O ist während der Regeneration niedriger als in der Beladungsphase.

In Phase 4 sind die Änderungen gegenüber Phase 2 grundsätzlich geringer als während der Regenerationsphase. Auffallend ist, dass insbesondere der CO<sub>2</sub>-Wert bei allen Prüffahrzeugen geringer ist im Vergleich zur Endbeladungsphase.

Legende				
Merkmal positiv		Ø Abweichung in %	Merkmal negativ	Ø Abweichung in %
+++++ (5+)		> 10.000 %	----- (5-)	< -10.000 %
++++ (4+)		1.000 % bis 10.000 %	---- (4-)	-1.000 % bis -10.000 %
+++ (3+)		100 % bis 1.000 %	--- (3-)	-100 % bis -1.000 %
++ (2+)		10 % bis 100 %	-- (2-)	-10 % bis -100 %
+ (1+)		1 % bis 10 %	- (1-)	-1 % bis -10 %
0		0 % bis 1 %	0	-0 % bis -1 %
Messgröße	Einheit	Referenzwert Endbeladung (Ø-Wert) „Phase 2“	Abweichung Regeneration (Ø-Wert) „Phase 3“	Abweichung Filterkuchenaufbau (Ø-Wert) „Phase 4“
<b>Prüffahrzeug A</b>				
PN	#/s	1,63E+07	+++++ (5+)	+++++ (5+)
CO <sub>2</sub>	g/s	2,24	++ (2+)	- (1-)
CO	mg/s	0,0149	+++ (3+)	--- (3-)
THC	mg/s	0,0488	+++ (3+)	+++ (3+)
NO <sub>x</sub>	mg/s	0,0326	+++++ (5+)	+++ (3+)
NO	ppm	1,13	++++ (4+)	+++ (3+)
NO <sub>2</sub>	ppm	2,34	++ (2+)	-- (2-)
NH <sub>3</sub>	ppm	-1,42	-- (2-)	-- (2-)
CH <sub>4</sub>	ppm	2,48	--- (3-)	-- (2-)
N <sub>2</sub> O	ppm	6,04	-- (2-)	- (1-)
SO <sub>2</sub>	ppm	1,08	+++ (3+)	++ (2+)
<b>Prüffahrzeug B</b>				
PN	#/s	3,83E+07	+++++ (5+)	+++++ (5+)
CO <sub>2</sub>	g/s	2,55	++ (2+)	- (1-)
CO	mg/s	0,1440	++++ (4+)	-- (2-)
THC	mg/s	0,4550	++ (2+)	-- (2-)
NO <sub>x</sub>	mg/s	0,0246	+++++ (5+)	+++ (3+)
NO	ppm	0,73	+++++ (5+)	+++ (3+)
NO <sub>2</sub>	ppm	1,27	+++ (3+)	- (1-)
NH <sub>3</sub>	ppm	-1,05	++++ (4+)	++ (2+)
CH <sub>4</sub>	ppm	2,58	+++ (3+)	-- (2-)
N <sub>2</sub> O	ppm	6,04	-- (2-)	-- (2-)
SO <sub>2</sub>	ppm	1,78	+++ (3+)	-- (2-)
<b>Prüffahrzeug C</b>				
PN	#/s	1,40E+07	+++++ (5+)	+++++ (5+)
CO <sub>2</sub>	g/s	2,26	++ (2+)	- (1-)
CO	mg/s	0,0161	+++++ (5+)	+++ (3+)
THC	mg/s	0,0446	+++ (3+)	+++ (3+)
NO <sub>x</sub>	mg/s	0,0537	++++ (4+)	+++ (3+)
NO	ppm	2,02	++++ (4+)	+++ (3+)
NO <sub>2</sub>	ppm	2,65	++ (2+)	++ (2+)
NH <sub>3</sub>	ppm	20,98	-- (2-)	--- (3-)
CH <sub>4</sub>	ppm	1,56	+++ (3+)	0
N <sub>2</sub> O	ppm	3,82	-- (2-)	-- (2-)
SO <sub>2</sub>	ppm	1,97	+++ (3+)	++ (2+)

Tab. 5-16: Änderung der Konzentrationen und Massen der Gaskomponenten während der Phasen

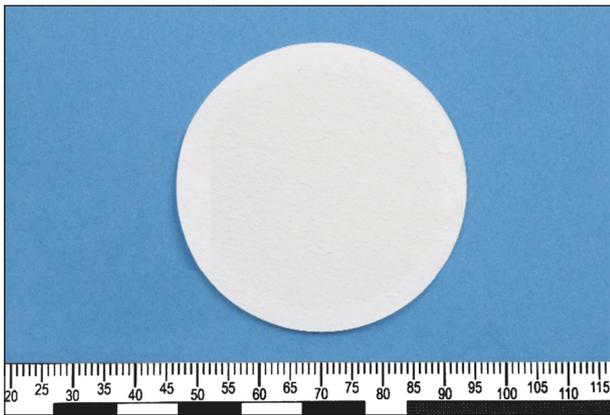


Bild 5-19: Filter Nr. 2 – Prüffahrzeug A – Messung 3

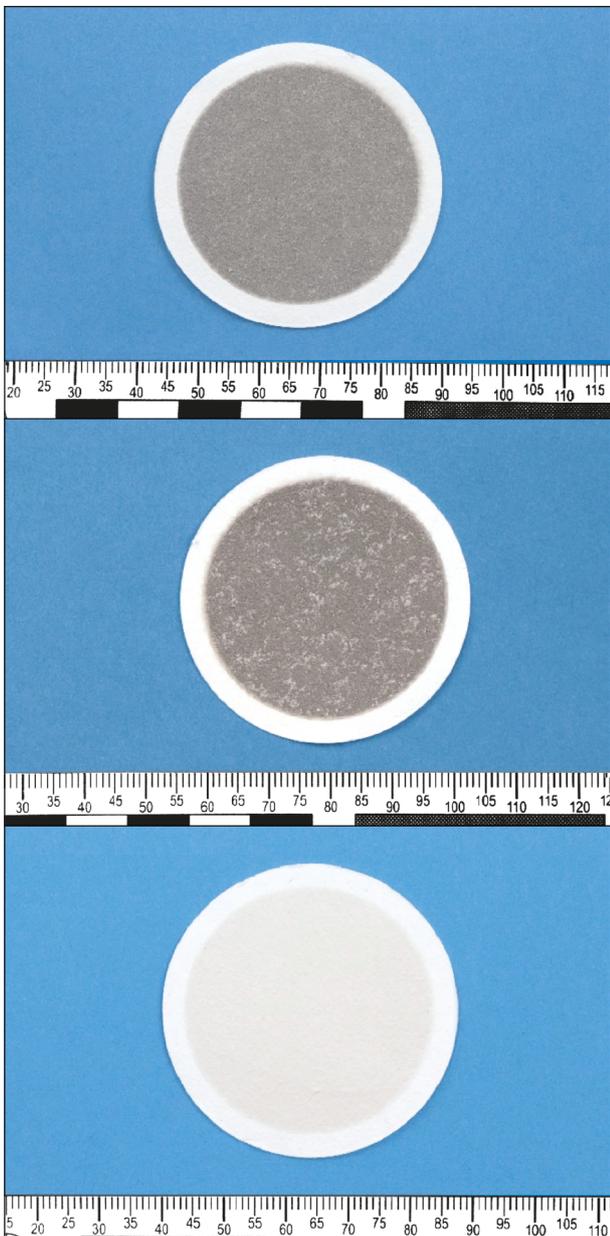


Bild 5-20: Filter Nr. 3 – Prüffahrzeug A (oben) – Prüffahrzeug B (Mitte) – Prüffahrzeug C (unten)

## 5.4 Elementanalyse

Es wurde je ein Filterblättchen zu Beginn einer Messung in die Halterung eingespannt. Das verdünnte Abgas wurde bis zur Regeneration durch dieses Filterblättchen geleitet. Die Filternummer ist an die entsprechende Phase im Messablauf angepasst. Die Partikel aus Filter Nr. 2 stammen somit aus der Endbeladungsphase sowie den nachfolgenden Beschleunigungen, um die Regeneration einzuleiten.

Mit Einsetzen der Regeneration wurde der Filterhalter inkl. Filterblättchen getauscht. Filter Nr. 3 wurde während der Regeneration durchströmt. Nach der Regeneration wurde der Filterhalter inkl. Filterblättchen erneut gewechselt. Filter Nr. 4 wurde unmittelbar nach der Regeneration bis zum Ende der Messung durchströmt. Filter Nr. 4 enthält also den vollständigen Aufbau der Rußschicht des DPF.

Der Filter Nr. 2 wies bei allen drei Prüffahrzeugen gleichermaßen keine signifikante optische Verfärbung auf (siehe Bild 5-19). Der Filter Nr. 3 aus der Regeneration hingegen weist bei allen Prüffahrzeugen eine deutliche Schwärzung auf, wobei sich die Ausprägung von Prüffahrzeug C unterscheidet (siehe Bild 5-20). Der optische Unterschied korreliert mit den Messwerten der Partikelanzahl und Partikelmasse (vgl. Kapitel 5.2.4). So zeigt die gravimetrische Messung, dass die Partikelmasse in Phase 2 bei Prüffahrzeug B ca. 1 mg beträgt und bei Prüffahrzeug C nur ca. 0,3 mg.

Bei Filter Nr. 3 aus der Phase nach der Regeneration während dem Aufbau der Rußschicht auf den DPF ist eine leicht gräuliche Färbung zu erkennen. Diese ist bei allen Prüffahrzeugen ähnlich ausgeprägt (siehe Bild 5-21).

Die Filterblättchen wurden anschließend unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) mit der Energiedispersiver-Röntgenspektroskopie (EDX) analysiert. Für die Bestimmung der elementaren Zusammensetzung der Partikel wird der Partikel unter dem REM anvisiert und dann mit dem Elektronenstrahl angeregt.

Die Anregung hat bei einer angewendeten Beschleunigungsspannung von 20 keV eine Eindringtiefe von ca. 3  $\mu\text{m}$ . Das bedeutet, dass in jedem Spektrum neben dem anvisierten Partikel auch das Filtermaterial enthalten ist. Bei der REM-EDX wird die Gewichtung der Elementmassen im Prozent ausgedrückt.

Es kann keine Aussage darüber getroffen werden, in welcher molekularen Struktur das jeweilige Element vorliegt. Die Elemente liegen in festen Verbindungen vor. Diese Elemente können in unterschiedlichen molekularen Strukturen aus den Gasverbindungen hervorgegangen sein. Es lässt sich nicht nachweisen, ob die Partikel auf dem Filterblättchen in der Zusammensetzung bereits im Abgas vorhanden waren oder die Zusammensetzung erst an der Filterfaser durch Agglomeration entstanden ist.



Bild 5-21: Filter Nr. 4 – Prüffahrzeug A (oben) – Prüffahrzeug B (Mitte) – Prüffahrzeug C (unten)

#### 5.4.1 Referenzfilter

Neben den oben beschriebenen Filtern Nr. 2 bis Filter Nr. 4 aus den Messreihen sind zwei Referenzfilterblättchen analysiert worden, welche nicht mit Abgas durchströmt wurden. Dies ist erforderlich, um die Zusammensetzung des Filtermaterials bei der Auswertung zu berücksichtigen. Diese Filter werden im Folgenden als Referenzfilter A und Referenzfilter B bezeichnet.

In VO (EU) 2017/1151 – Anhang XXI – Unteranhang 5 – Punkt 4.2.1.3.5.3 ist vorgegeben, dass fluorkohlenstoffbeschichtete Glasfaserfilter oder Fluorkohlenstoff-Membranfilter verwendet werden müssen. Bild 5-22 zeigt den Ausschnitt des Filtermaterials bei einer 4.000-fachen Vergrößerung von Referenzfilter B. Es ist dort die Faserstruktur ohne angelagerte Partikel zu erkennen. In diesem Referenzfilter wurden 9 Spektren analysiert. Die Werte dieser Analyse sind in Tabelle 5-17 aufgelistet. Die Werte von Referenzfilter A sind in Tabelle 5-18 dargestellt. Aus den Tabellen ist zu entnehmen, dass die Elemente Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Fluor (F) über 75 % der Masse darstellen.

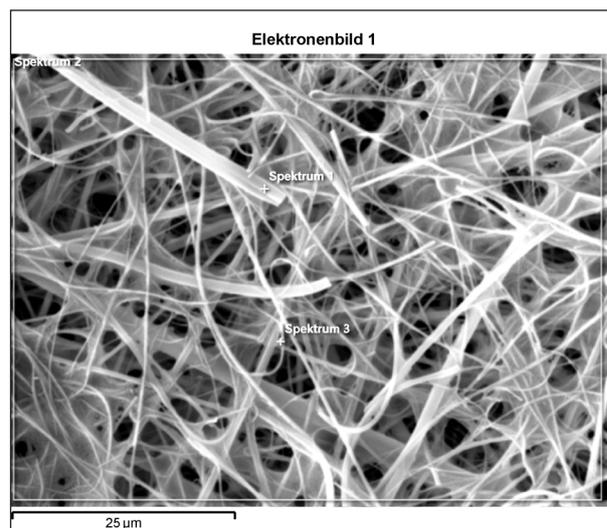


Bild 5-22: Referenzfilter B – 4.000-fache Vergrößerung

REM-EDX-Analyse [Massen-%] Werte aus 9 analysierten Spektren Werte aus 9 analysierten Spektren								
	C	N	O	F	Na	Mg	Al	Si
Max	21,5	-	33,7	41,6	5,1	0,2	1,9	18,5
Min	16,4	-	18,9	19,3	2,6	0,1	1,1	9,7
Standard-abw.	1,8	-	5,4	8,1	0,8	0,1	0,3	2,8
Ø	19,5	-	24,9	32,7	3,5	0,1	1,4	12,1
	S	K	Ca	Fe	Ni	Zn	Ba	
Max	-	2,1	1,0		0,6	3,4	4,2	
Min	-	0,9	0,4		0,1	1,2	1,7	
Standard-abw.	-	0,4	0,2		0,2	0,7	0,8	
Ø	-	1,1	0,6		0,2	1,7	2,2	

Tab. 5-17: Referenzfilter B – Elemente in Massenprozent

REM-EDX-Analyse [Massen-%] Werte aus 9 analysierten Spektren Werte aus 8 analysierten Spektren								
	C	N	O	F	Na	Mg	Al	Si
Max	29,00	-	38,0	48,5	5,8	0,2	1,7	13,9
Min	13,1	-	16,6	23,6	1,8	0,1	0,9	7,0
Standard-abw.	5,6	-	8,2	8,8	1,4	0,1	0,3	2,9
Ø	20,1	-	23,6	36,1	3,3	0,1	1,2	10,2
	S	K	Ca	Fe	Ni	Zn	Ba	
Max	-	1,8	0,7		0,3	3,0	3,6	
Min	-	0,5	0,2		0,1	0,8	1,2	
Standard-abw.	-		0,5	0,2		0,1	0,9	0,9
Ø	-	1,1	0,5		0,2	1,7	2,1	

Tab. 5-18: Referenzfilter A – Elemente in Massenprozent

#### 5.4.2 Filter Nr. 2: Endbeladungsphase

Bild 5-23 zeigt den Ausschnitt des Filtermaterials von Filter Nr. 2 aus Messung 2 von Prüffahrzeug A bei einer 4.000-fachen Vergrößerung. Zu erkennen sind Partikel mit einer Größe von ca. 1-2 µm. Diese Partikel weisen einen vergleichsweise hohen Eisenanteil (Fe) auf. Der Ursprung dieser Partikel ist auf Abrieb und Verschleiß der Bauteile zurückzuführen und nicht auf den Verbrennungsprozess. Neben den eisenhaltigen Partikeln sind an den Fasern keine Partikelanlagerungen zu erkennen. Die Analyse von Filter Nr. 2 der anderen Prüffahrzeuge zeigte ein ähnliches Bild.

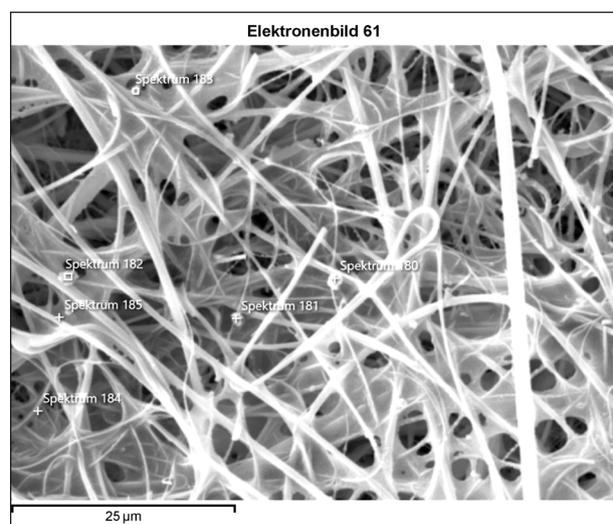


Bild 5-23: Prüffahrzeug A – Messung 2 – Filter Nr. 2 – 4.000-fache Vergrößerung

### 5.4.3 Filter Nr. 3: Regeneration

In Bild 5-24 und Bild 5-25 ist ein Ausschnitt des Filtermaterials von Filter Nr. 3 bei 4.000-facher Vergrößerung der Prüffahrzeuge A bis C zu sehen.

Zu erkennen ist die Anlagerung von Partikeln mit einer Größe bis über  $1\ \mu\text{m}$  an den Fasern des Filters. Da mit dem DMS500 eine maximale Partikelgröße von etwa  $200\ \text{nm}$  im Abgas nachgewiesen wurde, wird angenommen, dass die sichtbaren Partikel an den Fasern aus einer Agglomeration kleinerer Partikel entstanden sind. Der optische Eindruck wird durch die Vergrößerung unter dem REM bestätigt. Bei Prüffahrzeug A und B sind die gefilterten Partikel deutlich an den Fasern des Filters zu erkennen. Diese geben dem Filter eine schwarze Färbung. Bei Prüffahrzeug C sind die angelagerten Partikel noch wesentlich kleiner. Die Agglomeration an den Fasern scheint nicht so weit vorangeschritten zu sein, wodurch das Filterblatt grau verfärbt wird.

In Filter Nr. 3 der Prüffahrzeuge ist insbesondere auch Stickstoff und Schwefel nachgewiesen worden. Diese Elemente wurden in den Filtern der an-

deren Phasen nicht oder in deutlich geringerem Umfang gemessen.

Dies korreliert mit den Ergebnissen aus der Gasanalyse, in welcher die Gaskomponenten  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  während der Regeneration ebenfalls deutlich anstiegen.

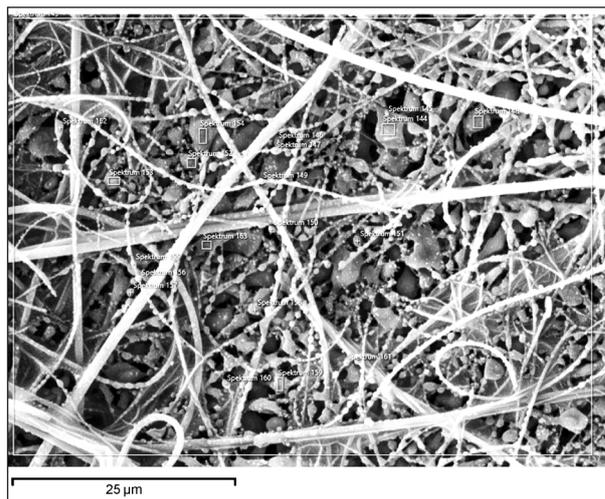


Bild 5-25: Prüffahrzeug B – Messung 3 – Filter Nr. 3 – 4.000-fache Vergrößerung

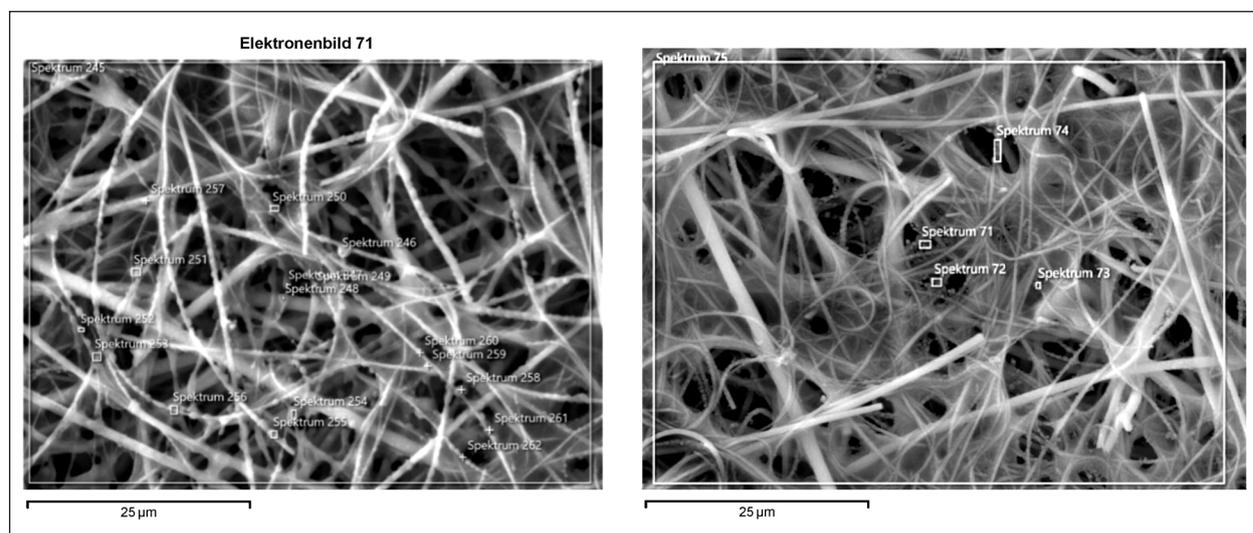


Bild 5-24: Prüffahrzeug A (links) – Prüffahrzeug C (rechts) – Filter Nr. 3 – 4.000-fache Vergrößerung

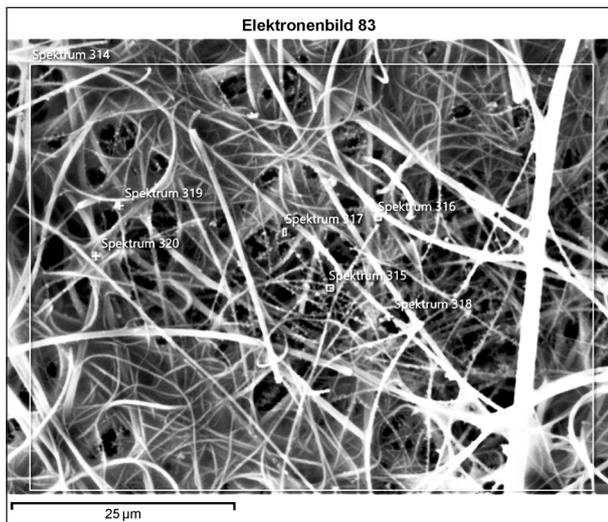


Bild 5-26: Prüffahrzeug A – Messung 2 – Filter Nr. 4 – 4.000-fache Vergrößerung

#### 5.4.4 Filter Nr. 4: Aufbau der Rußschicht im DPF

Bild 5-26 zeigt den Ausschnitt des Filtermaterials von Filter Nr. 4 aus der zweiten Messung von Prüffahrzeug A bei einer 4.000-fachen Vergrößerung. Zu erkennen ist die Anlagerung von feinen Partikeln an den Fasern des Filters. Der PN-Peak während des Aufbaus der Rußschicht flacht schneller ab als der PN-Peak bei der Regeneration. Somit durchströmen insgesamt weniger Partikel das Filterblättchen (vgl. Kapitel 5.2). Daraus kann abgeleitet werden, dass die Agglomeration der Partikel zwar vorhanden, aber noch nicht so weit fortgeschritten ist wie bei Filter Nr. 3. Dieses Bild zeichnete sich auch bei Prüffahrzeug B und C ab.

#### 5.4.5 Analyse der Massenprozent-Änderungen gegenüber dem Referenzfilter

Die ermittelten Massenprozentwerte der einzelnen Elemente in den Spektren unterliegen starken Schwankungen. Dadurch wird eine gezielte Analyse der Daten erschwert. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass in jedem Spektrum das Filtermaterial zu einem unbekanntem Anteil mit enthalten ist. Um dennoch Anhaltspunkte für die Änderungen zu erhalten, wurden die Mittelwerte aus allen Spektren der Filter Nr. 2, Filter Nr. 3 und Filter Nr. 4 je Prüffahrzeug gebildet, um einen Gesamtmittelwert für die jeweilige Phase zu erhalten. Ebenso wurde ein Mittelwert aus den Referenzfiltern ohne Beladung gebildet. Aus diesen statistischen Mittelwerten wird die Änderung der Massen-% ermittelt (siehe Tabelle 5-19).

Die Elemente, deren Massenprozentwerte gegenüber den Referenzfiltern

- geringer werden, sind nur im Filtermaterial und nicht in den Partikeln enthalten.
- gleichbleiben, sind entweder nicht oder in sehr geringem Anteil in den Partikeln enthalten.
- steigen, sind in den gefilterten Partikeln enthalten.

Die Analyse zeigt, dass bei allen durchströmten Filtern insbesondere der Massenanteil von Kohlenstoff (C) ansteigt. Dies bestätigt, dass die Partikel überwiegend aus Kohlenstoff bestehen.

Stickstoff (N) wurde nur während der Regeneration nachgewiesen. Dies kann mit den hohen  $\text{NO}_x$ -Emissionen während dieser Phase hergeleitet werden. Ähnlich verhält es sich bei Schwefel (S), wo auch bei der Gasanalyse während der Regeneration vermehrt  $\text{SO}_2$  erfasst wurde. Zudem konnten in Filter Nr. 3 mehr Sauerstoff und somit mehr Oxide nachgewiesen werden.

Darüber hinaus muss auf einen quantitativen Vergleich zwischen den Phasen mit Filter Nr. 1, Filter Nr. 2 und Filter Nr. 3 aufgrund der dominierenden Überlagerung des Filtermaterials verzichtet werden.

Analyse der Massenprozent-Änderungen gegenüber dem Referenzfilter									
Prüffahrzeug A									
	Spektren	C	N	O	F	Na	Mg	Al	Si
Ø Filter 2	151	26,0	0,0	25,1	27,8	2,7	0,2	1,1	9,6
Ø Filter 3	193	24,0	1,4	27,9	22,7	2,5	0,1	1,2	11,1
Ø Filter 4	120	24,9	0,0	25,2	25,4	3,1	0,1	1,4	12,4
Ø Referenz	17	19,8	0,0	24,2	34,4	3,4	0,1	1,3	11,1
	Spektren	S	K	Ca	Fe	Ni	Zn	Ba	
Ø Filter 2	151	0,2	0,9	0,5	2,6	0,2	1,3	1,6	
Ø Filter 3	193	2,2	1,4	0,6	0,1	0,2	2,0	2,8	
Ø Filter 4	120	0,1	1,4	0,6	0,3	0,3	2,2	2,8	
Ø Referenz	17	0,0	1,1	0,5	0,0	0,2	1,7	2,2	
Prüffahrzeug B									
	Spektren	C	N	O	F	Na	Mg	Al	Si
Ø Filter 2	20	23,4	0,0	22,2	35,4	3,7	0,3	1,0	9,0
Ø Filter 3	86	24,2	2,2	29,6	17,8	3,0	0,1	1,2	11,9
Ø Filter 4	42	21,5	0,0	24,1	30,3	3,9	0,2	1,3	12,2
Ø Referenz	17	19,8	0,0	24,2	34,4	3,4	0,1	1,3	11,1
	Spektren	S	K	Ca	Fe	Ni	Zn	Ba	
Ø Filter 2	20	0,0	0,9	0,5	0,1	0,2	1,2	1,4	
Ø Filter 3	86	3,3	1,3	0,7	0,0	0,3	2,0	2,2	
Ø Filter 4	42	0,0	1,4	0,7	0,0	0,3	1,8	2,2	
Ø Referenz	17	0,0	1,1	0,5	0,0	0,2	1,7	2,2	
Prüffahrzeug C									
	Spektren	C	N	O	F	Na	Mg	Al	Si
Ø Filter 2	23	21,1	0,0	21,5	36,3	2,9	0,1	1,0	8,8
Ø Filter 3	32	22,1	0,0	23,4	28,2	3,1	0,1	1,3	13,7
Ø Filter 4	37	19,2	0,0	27,1	26,6	3,7	0,1	1,5	14,2
Ø Referenz	17	19,8	0,0	24,2	34,4	3,4	0,1	1,3	11,1
	Spektren	S	K	Ca	Fe	Ni	Zn	Ba	
Ø Filter 2	23	0,1	0,9	0,5	3,6	0,2	1,1	1,3	
Ø Filter 3	32	0,3	1,8	0,9	0,1	0,2	2,1	2,5	
Ø Filter 4	37	0,0	1,6	0,8	0,1	0,3	1,9	2,5	
Ø Referenz	17	0,0	1,1	0,5	0,0	0,2	1,7	2,2	

Tab. 5-19: Massenprozent der Elemente in den einzelnen Phasen

## 6 Messablauf – Fahrzeuge mit Ottomotor

Wie zuvor in Kapitel 2 beschrieben, werden GPF kontinuierlich, passiv regeneriert. Deshalb weicht die Methode zur Beladung des Filters sowie der Messablauf zur Regeneration bei den Prüffahrzeugen mit Ottomotor und GPF von denen mit Dieselmotor und DPf ab.

### 6.1 Beladung des Ottopartikelfilters

Der Trend hin zu kleinvolumigen Otto-Motoren wird als Downsizing bezeichnet. Downsizing führt zu einer Senkung des Kraftstoffverbrauchs und des damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei gleichbleibender Ausgangsleistung. Dies wird durch den häufigeren Betrieb des Motors in einem Bereich des Motor-kennfeldes mit einem höheren Wirkungsgrad erreicht. Realisiert wird das Konzept insbesondere durch die Turboaufladung und die Benzindirekteinspritzung (BDE). Bei der BDE wird der Kraftstoff während des Ansaugtaktes direkt in den Brennraum eingespritzt. Es handelt sich um eine innere Gemischbildung. Durch die Verdampfung des eingespritzten Kraftstoffes wird die Brennraumtemperatur gesenkt. Dies ermöglicht eine größere Zylinderfüllung und ein höheres Verdichtungsverhältnis, wodurch der thermische Wirkungsgrad des Motors erhöht wird.

Im Gegensatz zur Saugrohreinspritzung ist der Zeitraum und der Weg für die Kraftstoff-Luft Gemischbildung bei der BDE geringer. Dadurch ist die Vermischung inhomogener. Entstehungspunkt der Partikelemissionen im Brennraum sind Zonen mit einem sehr kraftstoffreichen Gemisch unter Voraussetzung ausreichend hoher Temperaturen. Da sich durch den erhöhten Einspritzdruck die Eindringtiefe der einzelnen Tropfen in den Brennraum bis zur vollständigen Verdunstung erhöht, setzt sich ein Teil des flüssigen Kraftstoffes an den Brennraumwänden ab. Infolgedessen kann eine ausreichende Homogenisierung des Gemisches nicht in allen Betriebspunkten gewährleistet werden. Die Spraykühlung führt zu einer Absenkung der Wandtemperatur. Dadurch verdunstet der dabei entstehende Wandfilm nur langsam und kann in der begrenzten verbleibenden Zeit bis zum Beginn der Verbrennung nicht mehr genügend homogenisiert werden. Diese verzögerte Verdunstung des an der Wand abgelagerten Kraftstoffes stellt eine wesentliche Quelle für

Rußpartikel in Fremdzündungsmotoren mit BDE dar (REIF, 2014).

Der zuvor beschriebene Effekt von hohen PN-Emissionen ist überwiegend im Kaltstart ausgeprägt. Bei dem ersten Benzin-Prüffahrzeug D konnte über die OBD-Schnittstelle die berechnete Rußmasse des GPF ausgelesen werden. Durch erste Vorabmessungen wurde festgestellt, dass die Rußbeladung überwiegend während des ersten Motorstarts, Kaltstart, steigt. Dabei erhöht sich die Rußbeladung um ca. 10 mg. Bei weiteren Motorstarts mit aufgewärmtem Motor erhöht sich die Rußbeladung um maximal 1 mg. Während des Fahrbetriebes wird je nach Fahrprofil in etwa die Rußmasse passiv regeneriert, die beim Motorstart und während der Fahrt beladen wird. Aus diesen Gründen konnte eine Beladung des Filters, entsprechend der Phase 1 und Phase 2 bei Dieselfahrzeugen, bei den Prüffahrzeugen mit GPF nicht durch eine Straßen- und Prüfstandsfahrt realisiert werden.

Um eine Beladung des GPF zu realisieren, wurden deshalb Prüffahrzeug D und auch Prüffahrzeug E in einem Kühlcontainer auf -15 °C heruntergekühlt (siehe Bild 6-1). In dieser Umgebung wurden in Abständen von 30 Minuten Kaltstarts mit anschließendem Motorleerlauf für 15 Sekunden durchgeführt. Mit dieser Methode konnte bei Prüffahrzeug D durch 28 Kaltstarts eine Rußbeladung von 327 mg erzeugt werden (siehe Tabelle 6-2). Diese Beladung entspricht in etwa einem realen Anwendungsfall eines überwiegend über Kurzstrecke im Stadtverkehr bewegten Fahrzeuges in der kalten Jahreszeit.



Bild 6-1: Prüffahrzeug D im Kühlcontainer für die Kaltstarts bei -15 °C

Bei Prüffahrzeug E konnte die Rußbelastung mithilfe im Fahrzeug verbauter Drucksensoren, welche die Druckdifferenz zwischen GPF-Eintritt und GPF-Austritt messen, durch die OBD-Schnittstelle ausgelesen werden. Als Referenz wurde hier der Differenzdruck im Leerlauf herangezogen (siehe Tabelle 6-3). Bei einem leeren GPF liegt der Differenzdruck bei -0,3 kPa. Der negative Wert ist durch Drift des Sensors erklärbar. Nach 28 Kaltstarts bei -15 °C ist ein Differenzdruck von ca. 11 kPa im Leerlauf gemessen worden. Nach den Regenerationsmessungen stellte sich erneut ein Differenzdruck von -0,3 kPa bzw. -0,2 kPa ein.

## 6.2 Messzyklus – Fahrzeuge mit Ottomotor

Wie in Kapitel 2 beschrieben, benötigt ein GPF zur passiven Regeneration eine Mindesttemperatur von etwa 600 °C und Sauerstoffüberschuss. Diese beiden Parameter müssen über einen Fahrzyklus auf dem Rollenprüfstand eingestellt werden. Die Abgastemperatur kann über die Motorlast geregelt werden. Je mehr Last auf den Motor aufgebracht wird, desto höher wird die Temperatur am Eingang des GPF. Für einen Sauerstoffüberschuss muss ein mageres Luft-Kraftstoffgemisch vorhanden sein ( $\lambda > 1$ ). Dies ist beim Ottomotor konzeptbedingt nur in Schub- oder Rollphasen der Fall. Aus diesen Gegebenheiten folgt, dass die kontrollierte und vollständige passive Regeneration des GPF nicht in ei-

nem konstanten Motorbetriebspunkt, wie beim DPF, erfolgen kann.

Um die Anforderungen für die passive Regeneration zu erfüllen, ist der folgend beschriebene Messablauf entwickelt und danach durchgeführt worden (siehe Tabelle 6-1 und Bild 6-2). Das Prüffahrzeug steht zunächst ohne Betätigung der Bremsanlage mit eingeschaltetem Motor im Leerlauf auf der Prüfstandsrolle. Die Prüfstandsrolle beschleunigt im Anschluss das Fahrzeug auf 80 km/h, ohne dass das Gaspedal betätigt wird. Danach wird unabhängig von der Motorlast permanent eine Geschwindigkeit von 80 km/h eingeregelt. Dann wird der Gang eingelegt. Bei beiden Prüffahrzeugen wurde der 5. Gang gewählt. Nach dem Einkuppeln befindet sich der Motor im Schubbetrieb. Der Motor wird dabei vom Prüfstand geschleppt, was in Bild 6-2 durch eine negative Last zu erkennen ist. Dies entspricht

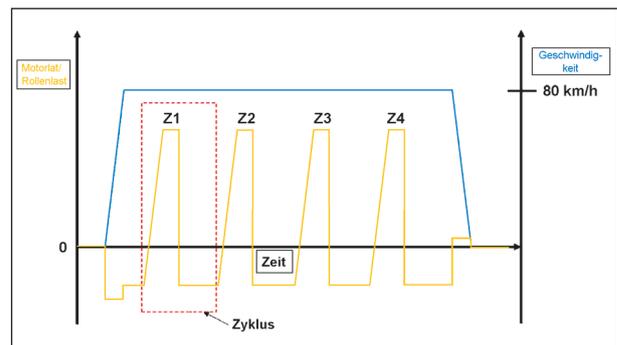


Bild 6-2: Messablauf zur passiven GPF-Regeneration

Schritt	Zyklus	Beschreibung	Gaspedal	Schritt Start	Schritt Ende
1	-	Bremse gelöst, Motor an (Leerlauf)	nicht betätigt	Start der Messung	nach ca. 50 s
2	-	Prüfstandsrolle beschleunigt das Fahrzeug. auf 80 km/h	nicht betätigt	nach ca. 50 s	nach ca. 70 s
3	-	5. Gang einlegen	nicht betätigt	nach ca. 80 s	-
4		Schubbetrieb	nicht betätigt	nach ca. 80 s	nach ca. 100 s
5	Z1	Aufbringung der Motorlast (Lastbetrieb)	betätigt	nach ca. 100 s (bei Z1) danach bei 500 °C nach Schritt 6	650 °C bis 700 °C
6		Passive Regeneration (Schubbetrieb)	nicht betätigt	650 °C bis 700 °C	500 °C
...	Z2, Z3, ...	Wiederholung von Schritt 4 und 5			
7		Gang Neutral einlegen	nicht betätigt		
8	-	Prüfstandsrolle bremst das Fahrzeug. auf 0 km/h	nicht betätigt		
9	-	Bremse gelöst, Motor an (Leerlauf)	nicht betätigt		Ende der Messung nach 1.800 s

Tab. 6-1: Schritte im Messablauf zur passiven GPF-Regeneration

dem Fahrzustand eines Fahrzeugs, welches im 5. Gang bei konstant 80 km/h einen Berg herunterrollt. Nun beginnt mit Schritt 5 der erste Zyklus, Z1, zur passiven Regeneration. Zur Anhebung der Abgastemperatur wird das Gaspedal betätigt. Die Prüfstandsrolle wird mit entsprechender Last geregelt, um die Geschwindigkeit von 80 km/h konstant zu halten. Dies entspricht dem Fahrzustand eines Fahrzeugs, welches im 5. Gang bei konstant 80 km/h einen Berg hinauffährt. Dieser Fahrzustand wird gehalten, bis sich eine Abgastemperatur am GPF von 650 °C bis 700 °C einstellt. Im Anschluss wird das Gaspedal losgelassen. Damit wird die passive Regeneration, Schritt 6, eingeleitet. Durch den Schubtrieb des Motors bei ausreichend hoher Temperatur des GPF kann der Filter passiv regeneriert werden. In diesem Fahrzustand sinkt die Abgastemperatur durch den Schubtrieb wieder ab. Wenn die GPF-Temperatur 500 °C erreicht hat, wiederholt sich Schritt 5 und der zweite Zyklus, Z2, zur passiven Regeneration beginnt. Nach mehrfacher Wiederholung des Zyklus wird wieder in den Gang, Neutral, geschaltet und das Fahrzeug vom Prüfstand bis zum Stillstand abgebremst. Für eine vollständige Messung stehen 1800 Sekunden zur Verfügung. Es werden pro Messung so viele Zyklen durchgeführt, wie in diesem Zeitraum möglich sind, auch wenn der GPF bereits vollständig regeneriert ist. Die Zyklen der passiven Regeneration werden analog zu den Dieselmessungen als Phase 3 bezeichnet. Die Zyklen mit leerem GPF werden analog zu der Bezeichnung der Dieselmessungen mit Phase 4 bezeichnet. Die Zyklen mit leerem GPF der Phase 4 werden als Referenzwerte zu den Zyklen der passiven Regeneration, Phase 3, herangezogen.

Mit Prüffahrzeug D sind zwei Messungen durchgeführt worden (siehe Tabelle 6-2). Dabei konnte neben der Abgastemperatur vor dem GPF auch die berechnete Rußmasse über die OBD Schnittstelle ausgelesen werden. Der Verlauf der Abgastemperatur, der Rollenlast und der GPF-Beladung von Prüffahrzeug D, Messung 1, ist in Bild 6-3 abgebildet. Dort ist zu erkennen, dass die passive GPF-Regeneration, wie oben beschrieben, in den Schubphasen mit entsprechend hoher Abgastemperatur stattfindet. Es werden 8 Zyklen benötigt, bis eine Rußbeladung von 327 mg auf 0 mg regeneriert wurde (Phase 3). Die anschließenden 3 Zyklen sind der Phase 4 mit leerem GPF zugeordnet. Für ca. die Hälfte der Beladung von 165 mg aus Messung 2 wurden 4 Zyklen zur Regeneration benötigt.

Bei Prüffahrzeug E konnte über den Differenzdruck des GPF im Leerlauf qualitativ auf die Rußbeladung geschlossen werden. Mit diesem Fahrzeug sind drei Messungen durchgeführt worden (siehe Tabel-

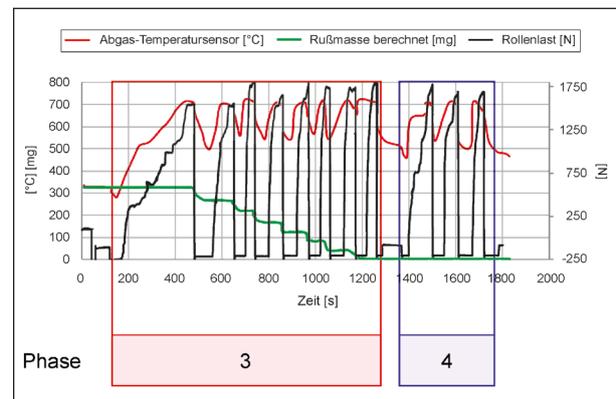


Bild 6-3: Prüffahrzeug D – Messung 1

Prüffahrzeug D		
	Messung 1	Messung 2
Kaltstarts	28	13
GPF: Berechnete Rußmasse	327 mg	165 mg
Benötigte Zyklen zur Regeneration (Phase 3)	8 (Z1 – Z8)	4 (Z1 – Z4)
Zyklen mit leerem Filter (Phase 4)	3 (Z9 – Z11)	4 (Z4 – Z8)
Max. Temperatur GPF je Zyklus (Start der passiven Regeneration)	700 °C	700 °C
Min. Temperatur GPF je Zyklus (Ende der passiven Regeneration)	500 °C	500C

Tab. 6-2: Kaltstarts für GPF-Beladung – Prüffahrzeug D

le 6-3). Die Messung 1 ist allerdings als Fehlmessung zu werten. Dabei wurde die Temperatur am Eingang des Unterboden-GPF auf ca. 750 °C erhöht und die Regeneration bereits bei 550 °C mit Einleitung des nächsten Zyklus unterbrochen. Diese hohen Temperaturen führten trotz Kühlung zu einem Schmelzen der Verbindungsstelle zwischen Abgasendrohr des Fahrzeuges und der CVS-Anlage. Bei den weiteren Messungen 2 und 3 wurde die Temperatur vor GPF maximal bis 650 °C erhöht und der Zyklus erst bei einer Temperatur von 500 °C beendet. Dadurch sind keine weiteren Probleme an den Komponenten aufgetreten.

Mit dem daraufhin frisch regenerierten GPF nach Messung 1 folgte im Anschluss die Messung 2, welche dementsprechend mit allen 10 Zyklen der Phase 4 einem leeren GPF zugeordnet wird (siehe Bild 6-4). Nach 28 Kaltstarts und einem Differenzdruck

von 11 kPa im Leerlauf ist Messung 3 als Regenerationsmessung durchgeführt worden (siehe Bild 6-5). Hier werden alle 12 Zyklen der Regeneration zugeordnet, da der Filter im Anschluss mit einem Differenzdruck -0,2 kPa nahezu vollständig regeneriert ist. Zusammengefasst bilden für Prüffahrzeug E die 10 Zyklen von Messung 2 die Phase 4, leerer GPF, ab. Die 12 Zyklen von Messung 3 bilden die Phase 3, Regeneration, ab. Messung 1 wird nicht weiter betrachtet.

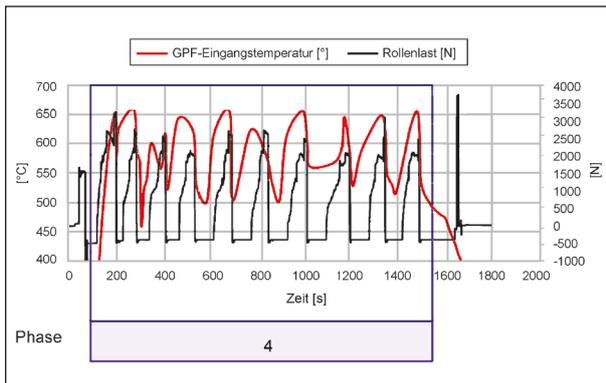


Bild 6-4: Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF

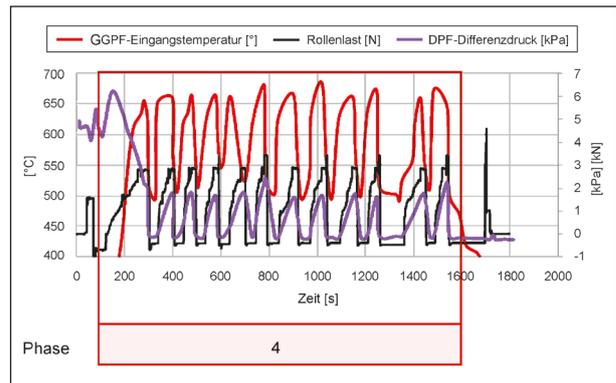


Bild 6-5: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration

Prüffahrzeug E			
	Messung 1 – (Fehlmessung)	Messung 2 – Phase 4 „leerer GPF“	Messung 3 – Phase 3 „Regeneration“
Kaltstarts	25	0	28
GPF: Differenzdruck (im Leerlauf) vor der Messung	10 kPa	-0,3 kPa	11 kPa
GPF: Differenzdruck (im Leerlauf) nach der Messung	-0,3 kPa	-0,3 kPa	-0,2 kPa
Benötigte Zyklen zur Regeneration („Phase 3“)	-	0	12 (Z1 – Z12)
Zyklen mit leerem Filter („Phase 4“)	-	10 (Z1 – Z10)	0
Max. Temperatur GPF je Zyklus (Start der passiven Regeneration)	750 °C	650 °C	650 °C
Min. Temperatur GPF je Zyklus (Ende der passiven Regeneration)	550 °C	500 °C	500 °C

Tab. 6-3: Kaltstarts für GPF-Beladung – Prüffahrzeug E

PN (gemessen mit AVL-PN-Counter)		
Prüffahr- zeug	Absolut Wert [#s] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	9,14E+07	1,03E+08
E	5,27E+09	3,04E+08

Tab. 7-1: PN-Mittelwerte – Prüffahrzeug D und E

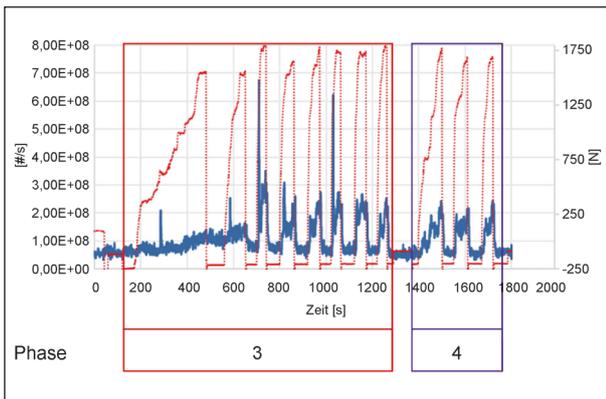


Bild 7-1: Prüffahrzeug D – Messung 1 (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

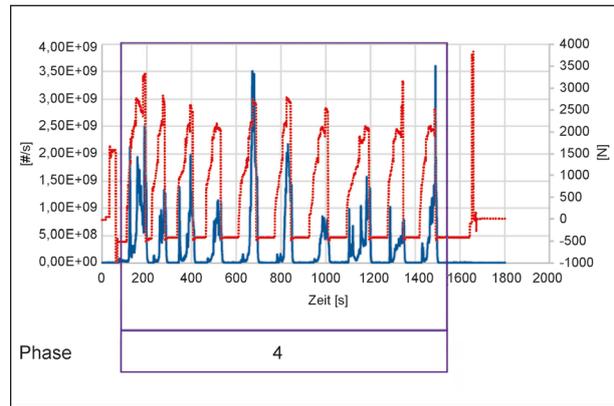


Bild 7-2: Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

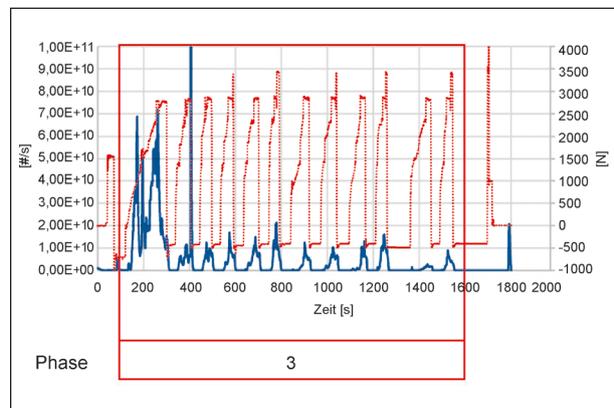


Bild 7-3: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

## 7 Messergebnisse – Fahrzeuge mit Ottomotor

### 7.1 Partikelanzahlmessung

Die Aufnahme und Auswertung der Partikelanzahlwerte erfolgt analog zu den Dieselmessungen in Kapitel 5.1. Die gemittelten Partikelanzahlwerte der einzelnen Phasen sind in Tabelle 7-1 aufgeführt. Dort ist zu erkennen, dass der Trend der Partikelanzahl in den Phasen nicht eindeutig ist. Während bei Prüffahrzeug D kein signifikanter Unterschied zwischen Phase 3 und Phase 4 erkennbar ist, sind die PN-Emissionen bei Prüffahrzeug E während der Regeneration in Phase 3 erhöht.

In Bild 7-1 bis Bild 7-3 sind die PN-Verläufe der einzelnen Prüffahrzeuge dargestellt. Die Anstiege der PN-Emissionen erfolgen immer bei aufgebracht Motorlast, Schritt 5. Während des Schubbetriebs, Schritt 6, sinken die PN-Emissionen ab. Bei Prüffahrzeug E ist auffällig, dass die PN-Anstiege bei der Messung 3, der Regeneration, deutlich höher sind als bei der Messung 2 mit leerem Filter. Insbesondere in Zyklus 1, Schritt 5, sind stark erhöhte PN-Emissionen aufgezeichnet worden.

### 7.2 Partikelgrößenverteilung

#### 7.2.1 Nucleation mode + Accumulation mode

Die aus Kapitel 5.2 bekannten Konturdiagramme zur Darstellung des gesamten Größenspektrums der Partikel sowohl des Accumulation Mode als auch des Nucleation Mode zusammen sind für die Messungen an Fahrzeugen mit GPF in Bild 7-4 bis Bild 7-6 abgebildet.

Prüffahrzeug D (Bild 7-4) zeigt bei der ersten Lastaufbringung zu Beginn von Phase 3 einen geringfügigen Anstieg der Partikelanzahlkonzentration, welcher sich gleichmäßig über das Größenspektrum von 5 nm bis 50 nm verteilt und mit zunehmender Partikelgröße bis 200 nm abnimmt. Die weiteren marginalen Ausschläge erfolgten ebenfalls unter Aufbringen einer Motorlast.

Bei Prüffahrzeug E zeigen sich deutliche Unterschiede bei den PN-Konzentrationen hinsichtlich

Phase 3 (Bild 7-6) und Phase 4 (Bild 7-5). In den Konturdiagrammen spiegeln sich die Ergebnisse der Partikelanzahlmessung (Bild 7-3 und Bild 7-2) wider. Während sich bei leerem Filter in Phase 4 kaum Ausschläge ergeben, kann in Phase 3 in 11 von 12 Zyklen das Aufbringen der Motorlast, Schritt 5, nachvollzogen werden. Dabei ist zu erkennen, dass die Partikelgrößencharakteristik insbesondere bei Zyklus 1 im Vergleich zu den folgenden Zyklen

abweicht. Während sich ab Zyklus 2 die Anstiege überwiegend im Accumulation Mode verteilen, ist in Zyklus 1 das gesamte Größenspektrum erhöht. Während der Lastaufbringung sind zunächst die Partikel zwischen 10 nm und 150 nm erhöht. Im weiteren Verlauf bildet sich ein extremer Peak von Partikeln im Nucleation Mode zwischen 5 nm und 20 nm aus. Gleichzeitig erhöhen sich auch die Partikel mit einer Größe bis zu 500 nm. Sobald in den Schubbetrieb, Schritt 6, gewechselt wird, verringert sich die Partikelanzahlkonzentration im gesamten Größenspektrum schlagartig.

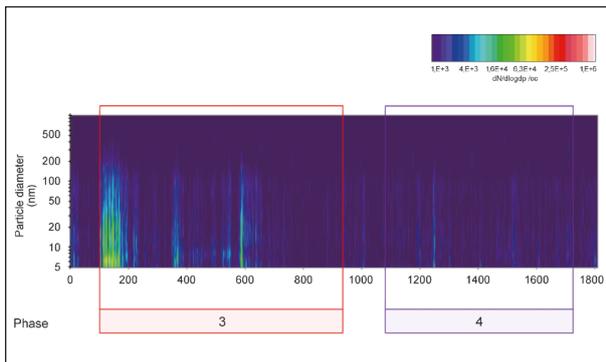


Bild 7-4: Prüffahrzeug D – Messung 2

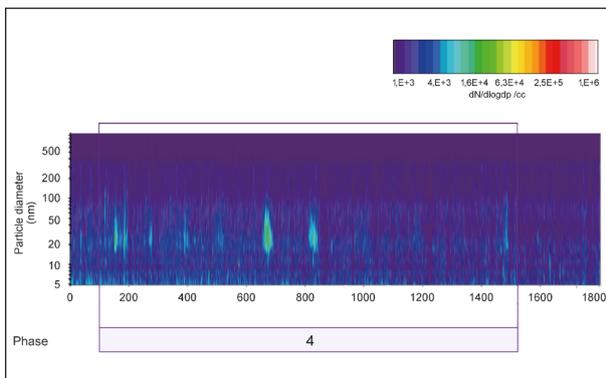


Bild 7-5: Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF

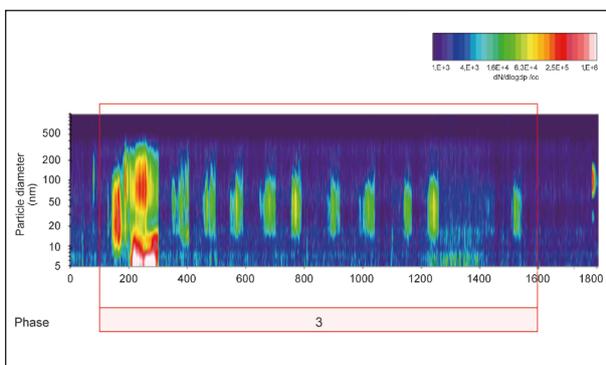


Bild 7-6: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration

### 7.2.2 Accumulation mode

Die Analyse der Partikelgrößenverteilung soll eine mögliche Änderung der Größencharakteristik der emittierten Partikel sichtbar machen. Dabei wird zwischen Nucleation Mode und Accumulation Mode unterschieden. Wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben eignet sich die durchschnittliche Größe der Partikel (GMD) und die Standardabweichung (GSD) zur Beschreibung der Partikelgrößencharakteristik. Tabelle 7-2 zeigt, dass sich die durchschnittliche Partikelgröße im Accumulation Mode phasenübergreifend nicht wesentlich verändert.

Wie bei den Dieselfahrzeugen wurde aus der Anzahl der Partikel, welche ein Filterblättchen durchströmt haben, und deren Masse ein Quotient gebildet. Die Ergebnisse lassen keinen Trend hinsichtlich der Größenverteilung der Partikel erkennen. Die Quotienten liegen in derselben Größenordnung der Dieselfahrzeuge (vgl. Kapitel 5.2.3). In Tabelle 7-3 wird die durchschnittliche Partikelanzahl aller Messungen zur Ermittlung des Quotienten berücksichtigt. Das Diagramm 7-7 zeigt die Quotienten der Einzelmessungen in der Phasen 3 und 4.

Partikelcharakteristik – Accumulation Mode				
Messung	Phase 3 Regeneration		Phase 4 leerer GPF	
	GMD [nm]	GSD [-]	GMD [nm]	GSD [-]
D	65,89	2,10	73,10	2,02
E	63,38	1,99	62,89	2,03

Tab. 7-2: Accumulation Mode – Prüffahrzeug D und E

Partikelmasse – Partikelanzahl					
	Einheit	Prüffahrzeug D		Prüffahrzeug E	
		Ø Phase 3 Regeneration	Ø Phase 4 leerer GPF	Ø Phase 3 Regeneration	Ø Phase 4 leerer GPF
Partikel pro Filter	#	1,02E+11	6,01E+10	8,09E+12	4,47E+11
Partikelmasse	mg	0,036015	0,006055	0,2394	0,1224
Quotient	#/mg	2,84E+12	9,93E+12	3,38E+13	3,65E+12

Tab. 7-3: Korrelation zwischen Partikelmasse und Partikelanzahl

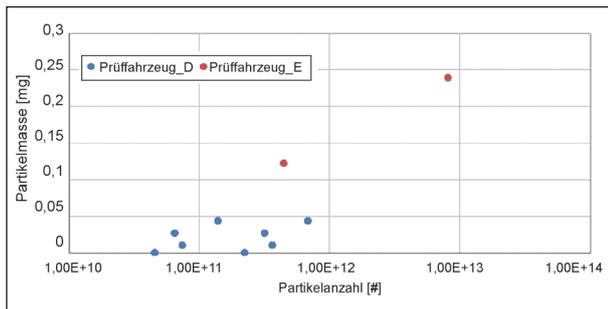


Bild 7-7: Korrelation zwischen Partikelmasse und Partikelanzahl – Prüffahrzeug D und E (Einzelmessungen Phase 3 und Phase 4)

Partikelcharakteristik – Nucleation Mode				
Messung	Phase 3 Regeneration		Phase 4 leerer GPF	
	GMD [nm]	GSD [-]	GMD [nm]	GSD [-]
D	11,16	1,65	10,24	1,58
E	9,69	1,72	15,58	1,68

Tab. 7-4: Nucleation Mode – Prüffahrzeug D und E

### 7.2.3 Nucleation mode

Tabelle 7-4 zeigt, dass sich die durchschnittliche Partikelgröße im Nucleation Mode phasenübergreifend bei Prüffahrzeug D nicht wesentlich verändert. Bei Prüffahrzeug E steigt bei leerem GPF die durchschnittliche Partikelgröße im Nucleation Mode auf ca. 15 nm an.

## 7.3 Analyse der Gaskomponenten

Neben den Partikeln sind dieselben Gaskomponenten analog der Messungen an Dieselfahrzeugen aus Tabelle 5-5 in Kapitel 5 gemessen und analysiert worden. Bei den GPF-Messungen kommt zusätzlich die Analyse des mit dem FTIR aufgezeichneten Formaldehyds (HCHO) hinzu.

Die Verläufe der Gaskomponenten über sämtliche Messungen sind im Anhang Bild 0-165 bis Bild

Kohlenstoffdioxid – CO <sub>2</sub> (gemessen über Verdünnmodale)		
Prüffahr- zeug	Absolut Wert [g/s] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	3,46	3,28
E	6,24	4,57

Tab. 7-5: CO<sub>2</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

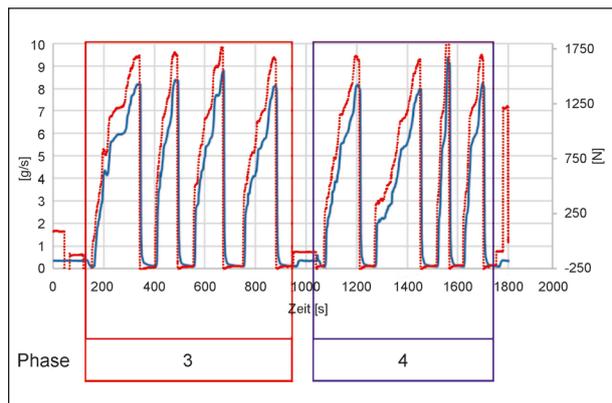


Bild 7-8: Prüffahrzeug D – Messung 2, CO<sub>2</sub> (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

0-208 zu entnehmen. Die Mittelwerte der Gaskomponenten in den Phasen sind im Anhang in Tabelle 0-52 bis Tabelle 0-73 aufgeführt.

### 7.3.1 Kohlenstoffdioxid – CO<sub>2</sub>

Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß ist direkt abhängig von dem verbrannten Kraftstoff. Je höher die Last ist, desto höher der erforderliche Kraftstoffeinsatz. Diese Abhängigkeit ist in den CO<sub>2</sub>-Diagrammen, wie exemplarisch in Bild 7-8 dargestellt, gut zu erkennen. Der CO<sub>2</sub>-Verlauf folgt der Rollenlast. Dies führt dazu, dass der CO<sub>2</sub>-Messwert überwiegend von der Last bestimmt wird. Deshalb sind die Ergebnisse der Mittelwerte in Tabelle 7-5 nicht zwangsläufig auf die Regeneration zurückzuführen.

Kohlenstoffmonoxid – CO (gemessen über Verdünnmodale)		
Prüffahr- zeug	Absolut Wert [mg/s] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	0,806	0,423
E	26,8	9,69

Tab. 7-6: CO-Werte aus den einzelnen Phasen

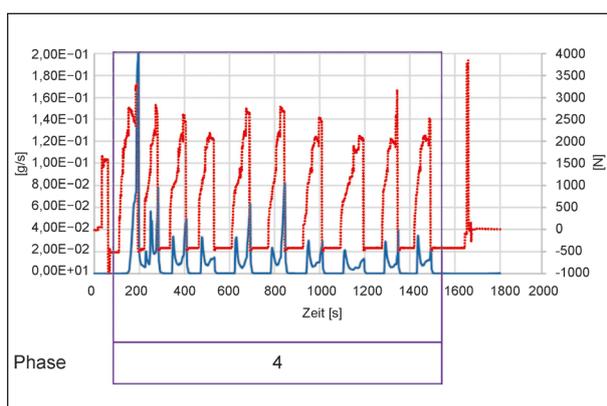


Bild 7-9: Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF, CO (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

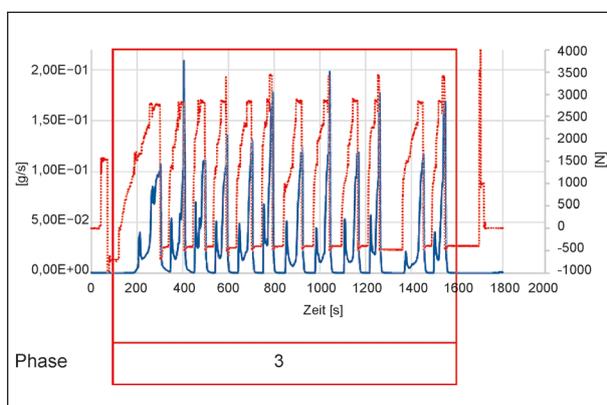


Bild 7-10: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration, CO (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

### 7.3.2 Kohlenstoffmonoxid – CO

Die Mittelwerte der CO-Emissionen sind in Tabelle 7-6 zusammengefasst. Dort sind große Unterschiede zwischen den Prüffahrzeugen D und E zu erkennen. Bei beiden Prüffahrzeugen steigen die CO-Emissionen während der Lastaufbringung, Schritt 5, an und sinken während des Schubbetriebes, Schritt 6, ab. Bei Prüffahrzeug E sind die CO-Emissionen um etwa Faktor 20 – 30 höher als bei Prüffahrzeug D. Der Verlauf ist dabei über die Zyklen weitestgehend in allen Phasen reproduzierbar (siehe Bild 7-9 und Bild 7-10).

Kohlenwasserstoff – THC (gemessen über Verdünnmodale)		
Prüffahr- zeug	Absolut Wert [mg/s] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	0,388	0,245
E	0,510	0,317

Tab. 7-7: THC-Werte aus den einzelnen Phasen

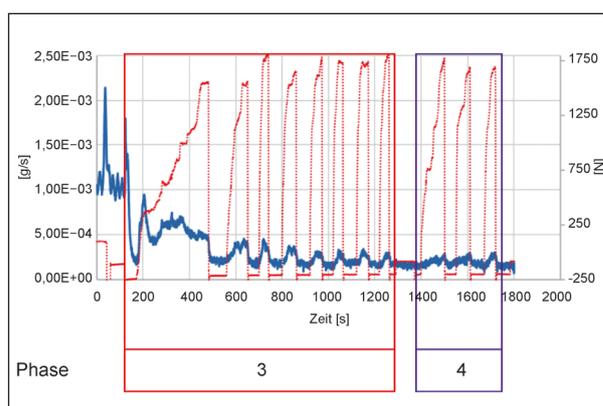


Bild 7-11: Prüffahrzeug D – Messung 1, THC (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

Eine mögliche Erklärung für die deutlich geringeren CO-Emissionen bei Prüffahrzeug D ist die motornahere Integration des GPF in den 3-Wege-Katalysator (3WC). Die entstehenden Kohlenmonoxide (CO) können direkt durch den 3WC oder durch den nachgeschalteten Unterboden-3WC oxidiert werden. Bei Prüffahrzeug E ist kein weiterer Katalysator dem Unterboden-GPF nachgeschaltet.

### 7.3.3 Kohlenwasserstoff – THC

Bei der Regeneration entstehen vor allem beim Unterboden-GPF Kohlenwasserstoffe (HC) dadurch, dass sich Kondensate ansammeln können, welche dann verbrannt werden. Dies kann eine Erklärung für die leicht höheren THC-Emissionen bei Prüffahrzeug E sein (siehe Tabelle 7-7).

In Bild 7-11 ist zu erkennen, dass die THC-Emissionen während der Lastaufbringung (Schritt 5) ansteigen und während des Schubbetriebes (Schritt 6) absinken. Der Anstieg ist während der Phase 3 stärker ausgeprägt als in Phase 4.

### 7.3.4 Stickstoffoxide – NO<sub>x</sub>

Der Verlauf der NO<sub>x</sub>-Emissionen ist sowohl bei der Regeneration in Phase 3 als auch bei leerem Filter der Phase 4 bei beiden Prüffahrzeugen ähnlich ausgeprägt. Es kann keine Veränderung aufgrund der passiven Regeneration festgestellt werden. Zu Beginn der Lastaufbringung, Schritt 5, bildet sich ein Peak aus, welcher im Anschluss absinkt (vgl. Bild 7-12). Ein zweiter Peak ist zu Beginn des Schubbetriebes, Schritt 6, zu erkennen. Tabelle 7-8 zeigt, dass die Werte bei der Regeneration auf ähnlichem Niveau liegen.

### 7.3.5 Stickstoffmonoxid – NO

Die Verhältnisse der Änderungen der Mittelwerte der NO-Konzentration liegen auf ähnlichem Niveau wie die NO<sub>x</sub>-Werte (siehe Tabelle 7-9). Auch der Verlauf der NO-Konzentration deckt sich mit den NO<sub>x</sub>-Emissionen (vgl. Bild 7-13). Dies deutet darauf hin, dass NO die dominierende Verbindung in den zusammengefassten NO<sub>x</sub>-Emissionen darstellt.

Stickstoffoxide – NO <sub>x</sub> (gemessen über Verdünnmodale)		
Prüffahrzeug	Absolut Wert [mg/s] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	1,01E-01	7,83E-02
E	0,115	0,888

Tab. 7-8: NO<sub>x</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

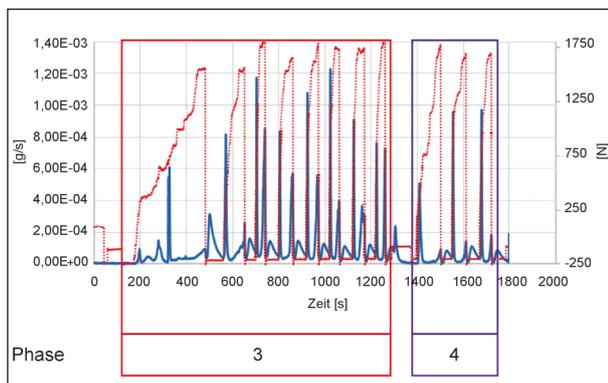


Bild 7-12: Prüffahrzeug D – Messung 1, NO<sub>x</sub> (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

### 7.3.6 Stickstoffdioxid – NO<sub>2</sub>

Die Phasen Regeneration und leerer Filter haben prüffahrzeugübergreifend keinen Einfluss auf die NO<sub>2</sub>-Konzentration (siehe Tabelle 7-10 und Bild 7-14).

Stickstoffmonoxid – NO (gemessen über FTIR)		
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	10,90	8,83
E	7,49	17,89

Tab. 7-9: NO-Werte aus den einzelnen Phasen

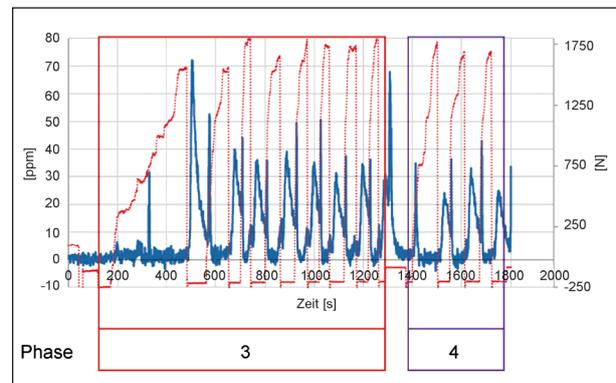


Bild 7-13: Prüffahrzeug D – Messung 1, NO (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

Stickstoffdioxid – NO <sub>2</sub> (gemessen über FTIR)		
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	2,77	3,04
E	2,94	2,44

Tab. 7-10: NO<sub>2</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

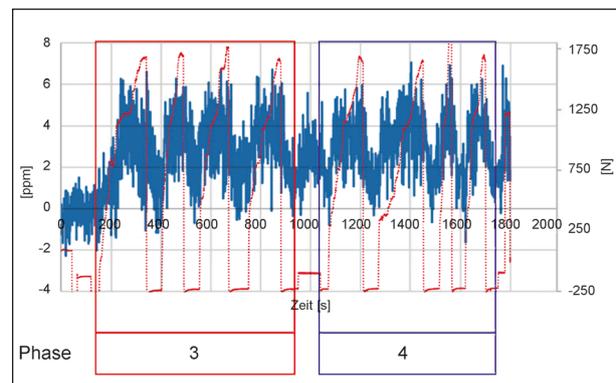


Bild 7-14: Prüffahrzeug D – Messung 2, NO<sub>2</sub> (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

### 7.3.7 Ammoniak – NH<sub>3</sub>

Eine der Gaskomponenten, bei welcher eine Erhöhung während der Regeneration gemessen werden konnte, ist Ammoniak (NH<sub>3</sub>) (siehe Tabelle 7-11). NH<sub>3</sub> kann durch eine Nebenreaktion im 3-Wege-Katalysator entstehen. Dabei reagieren Stickstoffmonoxid (NO) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) zu Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O).

In Bild 7-15 ist der NH<sub>3</sub>-Verlauf von Prüffahrzeug D – Messung 1 aufgetragen. Der erste NH<sub>3</sub>-Anstieg bildet sich während der Lastaufbringung, Schritt 5,

Ammoniak – NH <sub>3</sub> (gemessen über FTIR)		
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	19,28	4,96
E	11,47	0,54

Tab. 7-11: NH<sub>3</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

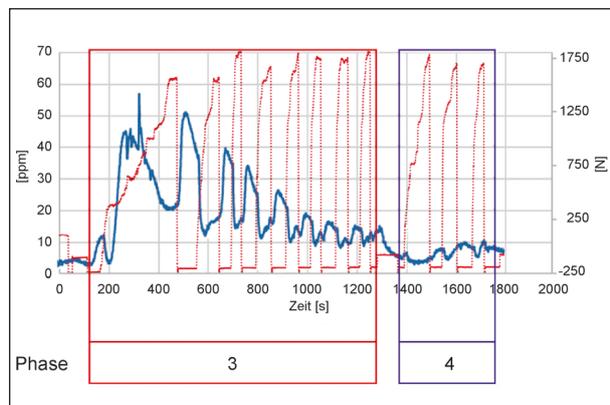


Bild 7-15: Prüffahrzeug D – Messung, NH<sub>3</sub> (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

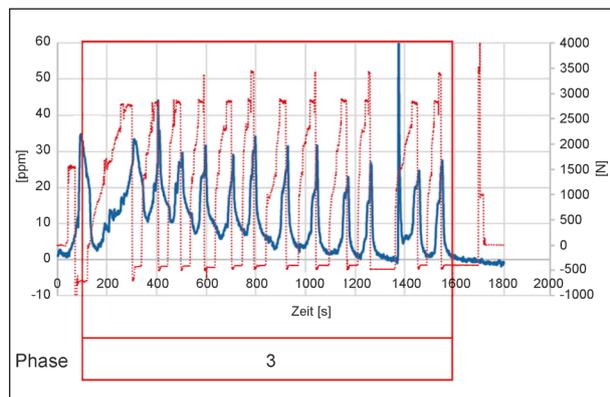


Bild 7-16: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration, NH<sub>3</sub> (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

aus. Die weiteren Anstiege bilden sich während des Schubbetriebes, Schritt 6, aus. Dabei nimmt die Höhe des Anstieges mit abnehmender Filterbelastung ab. Ebenso sinkt mit jedem Zyklus während der Lastaufbringung der untere NH<sub>3</sub>-Wert.

In Bild 7-16 ist die Messung 3, Regeneration, von Prüffahrzeug E aufgetragen. Hier sinkt ebenfalls mit jedem Zyklus während der Lastaufbringung der unterste NH<sub>3</sub>-Wert. Der abweichende Verlauf während des Schubbetriebs liegt möglicherweise daran, dass dem Unterboden-GPF kein weiterer 3-Wege-Katalysator nachgeschaltet ist, in welchem die Nebenreaktion ablaufen kann.

### 7.3.8 Methan – CH<sub>4</sub>

Die CH<sub>4</sub>-Konzentration ist im Mittel während der Regenerationsphase um ein Vielfaches erhöht (siehe Tabelle 7-12). Insgesamt sind die CH<sub>4</sub>-Emissionen im Bericht von ppm. Der erhöhte Mittelwert setzt sich aus den CH<sub>4</sub>-Anstiegen während der Lastaufbringung, Schritt 5, zusammen (siehe Bild 7-17 und Bild 7-18). Bei allen Messungen ist zu Beginn der ersten Lastaufbringung ein kurzer Peak erfasst worden.

Methan – CH <sub>4</sub> (gemessen über FTIR)		
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	3,62	0,08
E	3,82	-0,39

Tab. 7-12: CH<sub>4</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

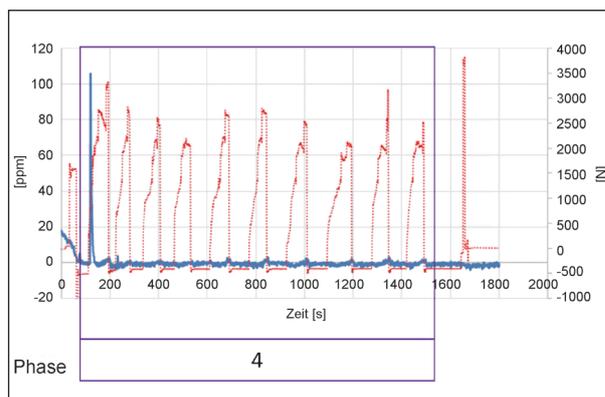


Bild 7-17: Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF, CH<sub>4</sub> (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

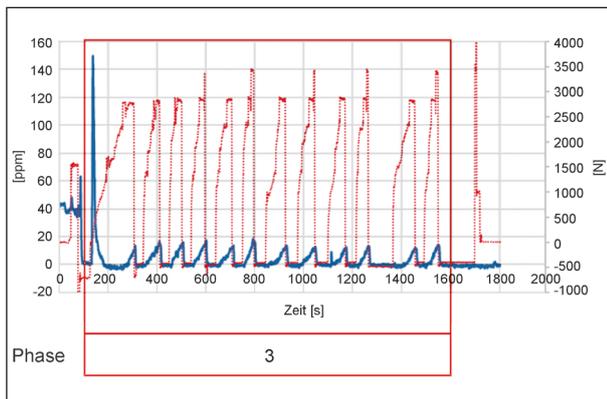


Bild 7-18: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration, CH<sub>4</sub> (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

Distickstoffmonoxid – N <sub>2</sub> O (gemessen über FTIR)		
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	0,95	0,36
E	0,25	0,00

Tab. 7-13: N<sub>2</sub>O-Werte aus den einzelnen Phasen

Schwefeldioxid – SO <sub>2</sub> (gemessen über FTIR)		
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	2,21	2,41
E	3,05	1,72

Tab. 7-14: SO<sub>2</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

### 7.3.9 Distickstoffmonoxid (Lachgas) – N<sub>2</sub>O

Die Phasen Regeneration und leerer Filter haben prüffahrzeugübergreifend keinen Einfluss auf die N<sub>2</sub>O-Konzentrationen und sind im Bereich von ppm (siehe Tabelle 7-13).

### 7.3.10 Schwefeldioxid – SO<sub>2</sub>

Die Phasen Regeneration und leerer Filter haben keinen signifikanten Einfluss auf die SO<sub>2</sub>-Konzentration (siehe Tabelle 7-14).

### 7.3.11 Formaldehyd – HCHO

Bei Prüffahrzeug D wurde ein Anstieg der Formaldehydkonzentration erfasst (siehe Tabelle 7-15 und

Formaldehyd – HCHO (gemessen über FTIR)		
Prüffahrzeug	Absolut Wert [ppm] – Mittelwerte	
	Phase 3 Regeneration	Phase 4 leerer GPF
D	14,39	6,46
E	5,46	5,52

Tab. 7-15: HCHO-Werte aus den einzelnen Phasen

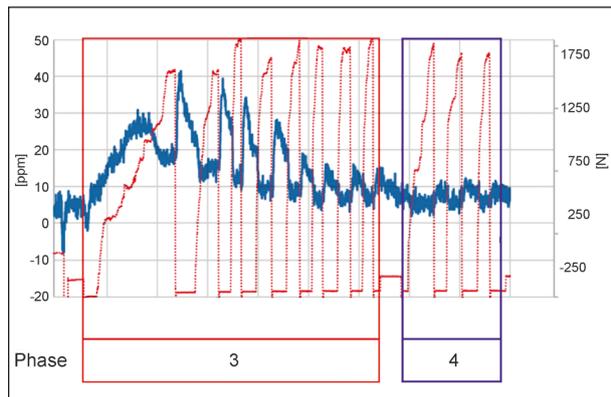


Bild 7-19: Prüffahrzeug D – Messung 1, HCHO (Lastverlauf rot gestrichelte Linie)

Bild 7-19). Der Verlauf der Formaldehydkonzentration gleicht dem der Ammoniakkonzentration. Der erste HCHO-Anstieg bildet sich während der Lastaufbringung, Schritt 5, aus. Die weiteren Anstiege bilden sich während des Schubbetriebes, Schritt 6, aus. Dabei nimmt die Höhe des Anstieges mit abnehmender Filterbelastung ab. Ebenso sinkt mit jedem Zyklus während der Lastaufbringung der untere HCHO-Wert. Dieses Verhalten ist bei beiden Messungen von Prüffahrzeug D reproduzierbar erfasst worden. Bei Prüffahrzeug E konnte dieser Verlauf ebenfalls erfasst werden. Allerdings ergaben sich dabei keine Auswirkungen auf den gebildeten Mittelwert.

### 7.3.12 Zusammenfassung Gaskomponenten

Zur Bewertung der Emissionen wurden die Messwerte aus der Regeneration mit den Messwerten des leeren GPF verglichen und eine prozentuale Abweichung ermittelt. Eine positive Abweichung bedeutet, dass der Wert in der Regeneration höher liegt als bei leerem GPF, bei einem negativen Abweichungswert ist der Messwert entsprechend geringer. Eine Abweichung von +100 % entspricht der Verdopplung des Ausgangsmesswertes. In Tabelle 7-16 sind die prozentualen Änderungen zusammengefasst. Die Auswertung der Änderung der

Emissionen, welche durch die passive Regeneration hervorgerufen werden, wird durch die Anforderung eines dynamischen Messablaufes erschwert. Die Analyse der Emissionsverläufe über die Zyklen zeigt, dass alle erhöhten Emissionen außer NH<sub>3</sub>, HCHO und zum Teil NO während der Aufbringung der Last und nicht während des Schubbetriebes und somit der passiven Regeneration anstiegen.

Die Änderungen der Mittelwerte aus der Regeneration sind im Vergleich zum leeren Filter deutlich geringer als die Änderungen bei den DPF (vgl. Kapitel 5.3.11). Die starke relative Erhöhung von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O ist auf die sehr geringen Referenzwerte zurückzuführen. Auffällig bei Prüffahrzeug E ist der starke Anstieg der CO-Emission und der Partikelanzahl.

Legende					
Merkmal positiv		Ø Abweichung in %	Merkmal negativ		Ø Abweichung in %
++++ (5+)		> 10.000 %	----- (5-)		< -10.000 %
+++ (4+)		1.000 % bis 10.000 %	---- (4-)		-1.000 % bis -10.000 %
++ (3+)		100 % bis 1.000 %	--- (3-)		-100 % bis -1.000 %
+ (2+)		10 % bis 100 %	-- (2-)		-10 % bis -100 %
+ (1+)		1 % bis 10 %	- (1-)		-1 % bis -10 %
0		0 % bis 1 %	0		-0 % bis -1 %

Messgröße	Einheit	Abweichung Regeneration (Ø-Wert) Phase 3	Referenzwert leerer GPF (Ø-Wert) Phase 4
Prüffahrzeug D			
PN	#/s	+ (1+)*	1,03E+08
CO <sub>2</sub>	g/s	+ (1+)	3,28
CO	mg/s	++ (2+)	0,423
THC	mg/s	++ (2+)	0,245
NO <sub>x</sub>	mg/s	++ (2+)	7,83E-02
NO	ppm	++ (2+)	8,83
NO <sub>2</sub>	ppm	-(1-)	3,04
NH <sub>3</sub>	ppm	+++ (3+)	4,96
CH <sub>4</sub>	ppm	++++ (4+)	0,08
N <sub>2</sub> O	ppm	+++ (3+)	0,36
SO <sub>2</sub>	ppm	-(1-)	2,41
HCHO	ppm	+++ (3+)	6,46
Prüffahrzeug E			
PN	#/s	++++ (4+)	3,04E+08
CO <sub>2</sub>	g/s	++ (2+)	4,57
CO	mg/s	+++ (3+)	9,69
THC	mg/s	++ (2+)	0,317
NO <sub>x</sub>	mg/s	-- (2-)	0,888
NO	ppm	-- (2-)	17,89
NO <sub>2</sub>	ppm	++ (2+)	2,44
NH <sub>3</sub>	ppm	++++ (4+)	0,54
CH <sub>4</sub>	ppm	++++ (4+)	-0,39
N <sub>2</sub> O	ppm	++++ (4+)	0,00
SO <sub>2</sub>	ppm	++ (2+)	1,72
HCHO	ppm	0	5,52

\* Bewertung ohne Mittelwertbildung über gesamte Phase 3; Begründung: Durch die Anforderung einer dynamischen Motorlast zum mehrmaligen Anstoßen der Regeneration kommt es zu Überlagerungen zwischen den Regenerations- und den Lastbedingten PN-Emissionen.

Tab. 7-16: Änderung der Konzentrationen und Massen der Gaskomponenten während der Phasen

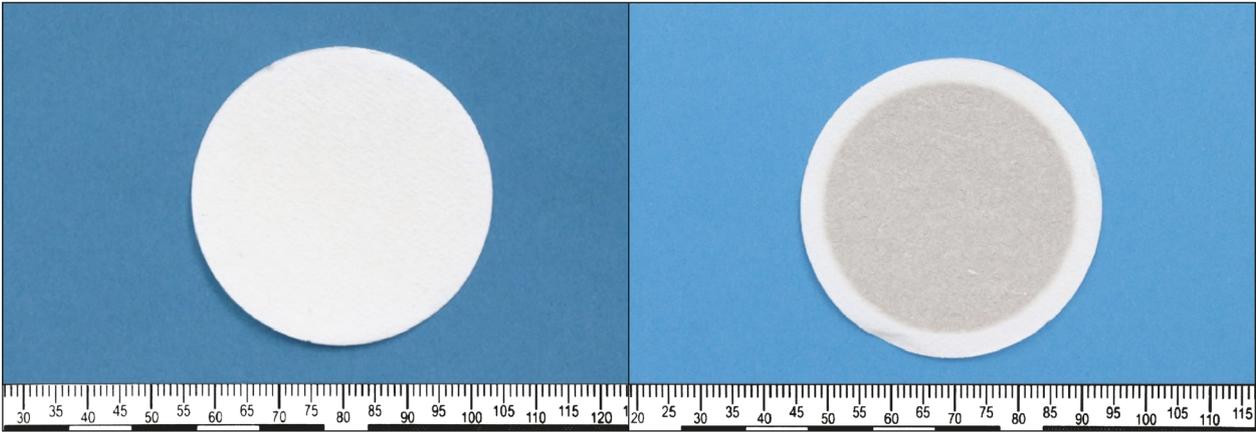


Bild 7-20: Filter Nr. 3 – Prüffahrzeug D (links) – Prüffahrzeug E (rechts)

## 7.4 Elementanalyse

Es wurde je ein Filterblättchen zu Beginn einer Messung in die Halterung eingespannt. Das verdünnte Abgas wurde bei Prüffahrzeug D bis zum Ende der Regeneration durch dieses Filterblättchen geleitet. Die Filternummer ist an die entsprechende Phase im Messablauf angepasst. Die Partikel aus Filter Nr. 3 stammen somit aus den Zyklen der Regenerationsphase (Phase 3). Nach Abschluss der Regeneration wurde der Filterhalter inkl. Filterblättchen getauscht und Filter Nr. 4 (Phase 4) für die Zyklen mit leerem Filter eingesetzt.

Wie in Kapitel 6.2 beschrieben bildet für Prüffahrzeug E jeweils die Messung 2 die Phase 4 und die Messung 3 die Phase 3 ab. Deshalb ist bei diesen Messungen je ein Filterblättchen über den gesamten Messzeitraum durchströmt worden. Die Filterblättchen wurden anschließend unter dem Rasterelektronenmikroskop mit der Energiedispersiver Röntgenspektroskopie analysiert.

### 7.4.1 Filter Nr. 3: Regeneration

Die beiden Filter Nr. 3 aus der passiven Regeneration sind in Bild 7-20 dargestellt. Es ist ein deutlicher Unterschied bei der optischen Färbung zu erkennen. Während das Filterblättchen von Prüffahrzeug D keine Färbung aufweist, ist bei Prüffahrzeug E eine gräuliche Verfärbung zu beobachten.

Bei 4.000-facher Vergrößerung unter dem REM sind die Unterschiede ebenfalls sichtbar. Bei dem Ausschnitt des Filters von Prüffahrzeug D sind keine Partikel an den Fasern zu erkennen (siehe Bild 7-21). Lediglich vereinzelte gröbere Partikel sind in den Fasern zu finden. Ein anderes Bild zeigt die

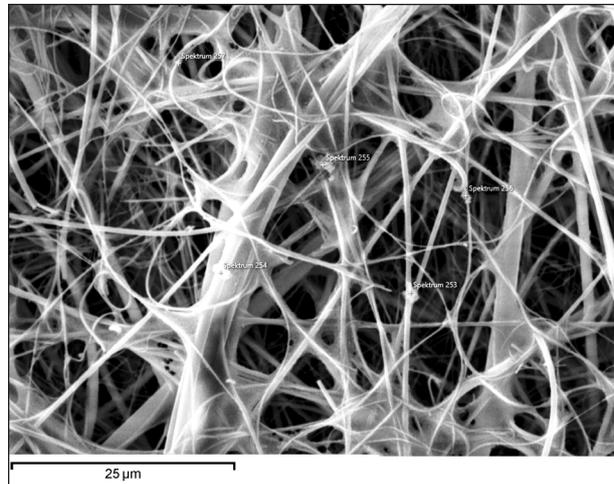


Bild 7-21: Prüffahrzeug D – Messung 1 – Filter Nr. 3 – 4.000-fache Vergrößerung – Ausschnitt 2

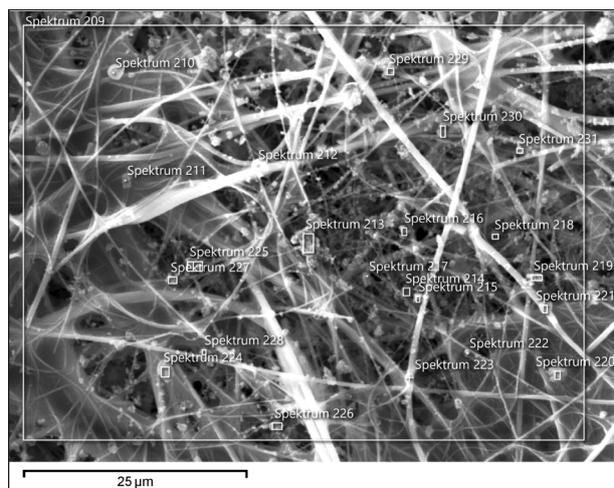


Bild 7-22: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Regeneration – Filter Nr. 3 – 4.000-fache Vergrößerung – Ausschnitt 1

Vergrößerung des Filterausschnitts von Prüffahrzeug E in Bild 7-22. Dort sind einige Partikel in der Faserstruktur angelagert.

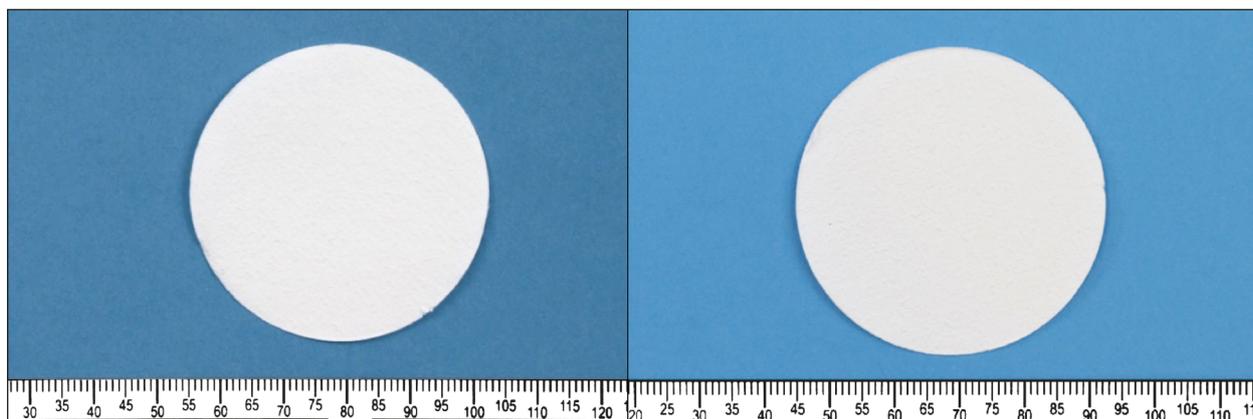


Bild 7-23: Filter Nr. 4 – Prüffahrzeug D (links) – Prüffahrzeug E (rechts)

#### 7.4.2 Filter Nr. 4: leerer GPF

Die Filter Nr. 4 aus den Zyklen mit leerem GPF weisen optisch keine Veränderung auf (siehe Bild 7-23). Die Ausschnitte unter dem REM zeigten ebenfalls keine Anlagerungen von Partikeln.

#### 7.4.3 Analyse der Massenprozent-Änderungen gegenüber dem Referenzfilter

Wie in Kapitel 5.4.5 beschrieben ist in jedem Spektrum das Filtermaterial zu einem unbekanntem Anteil mit enthalten. Dies erschwert die Analyse. Um dennoch Anhaltspunkte für die Änderungen zu erhalten, wurden die Mittelwerte aus allen Spektren der Filter Nr. 3 und Filter Nr. 4 je Prüffahrzeug gebildet, um einen Gesamtmittelwert für die jeweilige Phase zu erhalten. Als Referenz dienen die bereits in Kapitel 5.4.5 verwendeten Referenzfilter A und B. Die Ergebnisse der EDX Untersuchung sind Tabelle 7-17 zusammengefasst.

Die Elemente, dessen Massenprozentwerte gegenüber den Referenzfiltern

- geringer werden, sind nur im Filtermaterial und nicht in den Partikeln enthalten.
- gleichbleiben, sind entweder nicht oder in sehr geringem Anteil in den Partikeln enthalten.
- steigen, sind in den gefilterten Partikeln enthalten.

Die Analyse zeigt, dass insbesondere bei Prüffahrzeug E der Massenanteil von Kohlenstoff (C) während der Regeneration deutlich ansteigt. Dies unterstreicht zum einen die erhöhten Partikelemissionen

und zum anderen die erhöhten CO-Konzentrationen während dieser Messung.

Für alle weiteren untersuchten Elemente in der Tabelle konnten mit dem REM-EDX Verfahren keine signifikanten Änderungen erfasst werden. Auch Elemente wie Titan, Chrom, Mangan, Kupfer, Barium, Cer oder Platin wiesen keine erkennbare Änderung gegenüber den Referenzfiltern auf. Darüber hinaus muss auf einen quantitativen Vergleich zwischen den Phasen (Filter Nr. 3 und Filter Nr. 4) aufgrund der dominierenden Überlagerung des Filtermaterials verzichtet werden.

Analyse der Massenprozent-Änderungen gegenüber dem Referenzfilter									
Prüffahrzeug D									
	Spektren	C	N	O	F	Na	Mg	Al	Si
∅ Filter Regeneration	27	19,7	0,5	30,2	25,5	3,9	0,1	1,8	10,8
∅ Filter nach Regeneration	12	21,8	0,0	24,7	33,0	3,3	0,1	1,2	10,1
∅ Referenz	17	19,8	0,0	24,2	34,4	3,4	0,1	1,3	11,1
	Spektren	S	K	Ca	Fe	Ni	Zn	Ba	
∅ Filter Regeneration	27	0,1	1,0	0,5	0,8	0,2	1,2	2,7	
∅ Filter nach Regeneration	12	0,0	1,0	0,7	0,4	0,2	1,3	1,5	
∅ Referenz	17	0,0	1,1	0,5	0,0	0,2	1,7	2,2	
Prüffahrzeug E									
	Spektren	C	N	O	F	Na	Mg	Al	Si
∅ Filter Regeneration	114	33,8	0,0	24,1	23,9	2,4	0,1	0,9	8,7
∅ Filter nach Regeneration	54	23,2	0,0	23,3	32,9	2,7	0,1	1,0	8,8
∅ Referenz	17	19,8	0,0	24,2	34,4	3,4	0,1	1,3	11,1
	Spektren	S	K	Ca	Fe	Ni	Zn	Ba	
∅ Filter Regeneration	114	0,2	0,9	0,7	0,7	0,2	1,4	1,8	
∅ Filter nach Regeneration	54	0,2	1,0	0,8	2,2	0,2	1,5	1,9	
∅ Referenz	17	0,0	1,1	0,5	0,0	0,2	1,7	2,2	

Tab. 7-17: Massenprozent der Elemente in den einzelnen Phasen

## 8 Zusammenfassung und Fazit

In der Studie wurden drei Diesel- und zwei Benzin-kraftfahrzeuge hinsichtlich ihrer Emissionen während der Regeneration untersucht. Die Untersuchung beinhaltete eine hohe fahrzeugspezifische Beladung der Filter, die Ermittlung der Referenzmessung getrennt für Diesel- und Benzin-kraftfahrzeuge, die Messung der Regeneration und im Anschluss der erneute Aufbau eines Filterkuchens. Aufgrund wesentlicher Unterschiede zwischen den Kraftfahrzeugen mit Diesel und Benzinmotoren werden die Ergebnisse folgend getrennt erläutert.

Die Regeneration der Dieselfahrzeuge wird durch das Steuergerät des Fahrzeugs eingeleitet, wenn der Filter beladen ist und die erforderliche Abgastemperatur im Fahrbetrieb erreicht wird. In der Regel wird der Filter dann vollständig entladen, da die exotherme Reaktion des Rußabbrands für eine ausreichend hohe Temperatur sorgt. Aus diesem Grund erfolgte die Messung der aktiven Regeneration der Dieselfahrzeuge in einem konstanten Motorbetriebspunkt bei einer Konstantfahrt in der Ebene mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h auf einem Rollenprüfstand bei einer Starttemperatur von

600 °C oder 450 °C, je nach Regenerationsstrategie. Durch den konstanten Motorbetriebspunkt konnten fahrdynamische Einflüsse auf die Messwerte der Studie weitestgehend ausgeschlossen werden.

Die Messergebnisse haben gezeigt, dass einige Fahrzeugemissionen während einer Diesel-Partikelfilterregeneration und unmittelbar im Anschluss daran von den zuvor festgelegten Referenzmesswerten einer Filterbeladungsphase abweichen.

Insbesondere die Partikelanzahl steigt im Vergleich zu den Referenzwerten sehr stark an. Der Mittelwert der Partikelanzahl erhöht sich während einer aktiven Regeneration in einer Größenordnung von drei Zehnerpotenzen. Der charakteristische Verlauf beinhaltet einen Peak, welcher sich nach Einsetzen der Regeneration ausbildet und dann bis zum Ende der Regeneration absinkt. Im Anschluss der Regeneration bildet sich ein zweiter Peak aus, welcher schneller abflacht als der Regenerationspeak. Zwei der drei Dieselfahrzeuge zeigten während der aktiven Regeneration deutliche Anstiege der Partikelkonzentration im Größenbereich der Partikel von 5 nm – 50 nm.

Bei der Analyse der Gaskomponenten fällt auf, dass insbesondere unmittelbar vor der Regeneration die Gaskomponenten CO, THC, NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> und CH<sub>4</sub> einen deutlichen Peak aufweisen, welcher dann zu Beginn der Regeneration wieder absinkt. Der Beginn kurz vor der Regeneration ist der Zeitpunkt, in dem das Motorsteuergerät die Abgastemperatur anhebt. In diesem Umschaltzeitpunkt der Motorparameter werden kurzzeitig die deutlich erhöhten Emissionen der genannten Gaskomponenten gemessen. Die Gaskomponenten, welche bei allen Diesel-Prüffahrzeugen während der Regeneration einen signifikanten Anstieg aufwiesen, sind CO, NO und NO<sub>x</sub>. Der NO- bzw. NO<sub>x</sub>-Wert erhöht sich während der Regeneration im Mittel um Faktor 67- bzw. 95 zum gewählten Referenzwert. Der NO<sub>2</sub>-Wert erhöht sich im Mittel um den Faktor 2,5, der THC-Wert um den Faktor 5 und der SO<sub>2</sub>-Wert ist um Faktor 4 erhöht. Im Vergleich zum Referenzwert sind die Messwerte von NH<sub>3</sub> und CH<sub>4</sub> während der Regeneration grundsätzlich höher und die N<sub>2</sub>O-Konzentration niedriger. Nach der Regeneration sind die Änderungen der gasförmigen Emissionen im Vergleich zu den Referenzwerten grundsätzlich geringer als während der Regenerationsphase. Auffallend ist, dass besonders der CO<sub>2</sub>-Wert bei allen Prüffahrzeugen geringer ist. Dies ist durch den geringeren Gegendruck des leeren Filters zu erklären.

Der Anstieg von SO<sub>2</sub> und NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>-Emissionen während der Regeneration konnte auch in der Analyse der Filterrückstände auf einem Filterblatt mit dem EDX-Verfahren durch den Nachweis von Schwefel und Stickstoff beobachtet werden. Durch die im Vergleich zum Filtermaterial kleinen emittierten Partikel wird das Filtermaterial selbst, welches teilweise die gleichen Elemente wie die Abgaspartikel enthält, bei der Spektralanalyse miteingesammelt. Das führt dazu, dass eine belastbare qualitative und keine belastbare quantitative Aussage über die vorhandenen Elemente der Partikel im Filterblättchen getroffen werden kann.

Die Ottopartikelfilter werden passiv, kontinuierlich während des Fahrbetriebs regeneriert. Es ist erforderlich, über Lastaufbringung die Abgastemperatur zu erhöhen und anschließend in einer Schubphase den GPF mit einem Sauerstoffüberschuss zu versehen. Diese Anforderungen führten zu einem zyklischen Fahrprofil, mit welchem die Benzinfahrzeuge geprüft wurden. Der Zyklus umfasste bei einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h eine Lastaufbringung über die Rolle eines Rollenprüfstandes, bis max. 700 °C Abgastemperatur erreicht wur-

den und danach eine Schubphase ohne Last, die durch ein Absinken der Abgastemperatur auf 500 °C beendet wurde. Der Zyklus wurde mehrfach wiederholt bis der Filter entladen war.

Die Auswertung der Messwerte im Vergleich zu den gewählten Referenzwerten, welche durch die passive Regeneration hervorgerufen werden, wird durch die Anforderung eines dynamischen Messablaufes erschwert. Die meisten Emissionswerte erhöhten sich während der Aufbringung der Last innerhalb eines Zyklus und nicht während des Schubbetriebes, der zur passiven Regeneration führt. Der Vergleich der Messwerte eines Zyklus mit beladenem Filter zu einem Zyklus mit einem leeren Filter wies nur geringe Änderungen der Emissionen auf. Bei den geprüften Fahrzeugen zeigte sich zwischen den Fahrzeugen eine im Vergleich zu der Zyklusveränderung größere Veränderung. Dieses kann durch die unterschiedliche Anordnung des GPF im Fahrzeug und die Anzahl der Katalysatoren verursacht werden.

Die größte Messwerterhöhung ergab sich bei der Partikelanzahl eines Fahrzeugs. Während der Partikelanzahlwert bei beiden Prüffahrzeugen mit leerem GPF im Bereich von ca. 1E+08 #/s lag, stieg der Wert während der Regeneration bei dem Prüffahrzeug mit Unterboden-GPF um eine Zehnerpotenz auf 1E+09 #/s an. Bei dem Prüffahrzeug mit motornahem GPF hingegen veränderte sich die PN-Konzentration nur geringfügig.

Die CO-Emissionen wiesen ebenfalls große Abweichungen zwischen den Prüffahrzeugen auf. Das Prüffahrzeug mit Unterboden-GPF hatte während der passiven Regeneration eine CO-Konzentration von 25 mg/s. Eine hohe Kohlenstoffkonzentration, bedingt durch die erhöhten PN und CO-Emissionen, konnte auch auf dem Filterblättchen durch eine Elementanalyse nachgewiesen werden. Das Prüffahrzeug mit motornahem GPF stieß während der Regeneration lediglich 0,8 mg/s aus. Die Gaskomponenten, deren Konzentration während der Schubphase und somit während der passiven Regeneration anstieg, waren insbesondere bei dem Prüffahrzeug mit motornahem GPF Ammoniak und Formaldehyd. Dies kann auf eine Nebenreaktion im 3-Wege-Katalysator zurückgeführt werden.

Zusammenfassend zeigte die Analyse der Dieselmessungen eindeutige und reproduzierbare Ergebnisse. Hier konnten durch die aktive Regeneration die Phasen Beladung, Regeneration und Filterkuchenaufbau in einem konstanten Motorbetriebs-

punkt abgegrenzt und die Veränderungen der Emissionen untersucht werden. Es erfolgte eine vergleichende Bewertung zwischen den Phasen Entbeladung als Referenz und Regeneration. Diese Bewertung ergab bei den meisten Emissionen, wie zuvor quantitativ erläutert, eine Zunahme. Die Analyse der Ottomessungen hatte ein weniger eindeutiges Ergebnis. Dies ist zum einen auf die passive Regeneration zurückzuführen, welche eine Regeneration über mehrere Zyklen erforderte. Dadurch überlagern teilweise dynamische Einflüsse das Ergebnis. Zum anderen ist verbrennungstechnisch bedingt bei einem Ottomotor die Rußmasse in einem GPF deutlich geringer als in einem DPF. Dadurch wird weniger Ruß verbrannt und die Veränderung der Schadstoffe fällt geringer aus. Generell ist aber auch hier eine, wenn auch geringe, Zunahme der meisten Emissionen zu erkennen.

Die in diesem Projekt durchgeführten Messungen sollten die Regeneration in einem für die Straßenfahrt typischen Fahrbetrieb untersuchen und Anhaltspunkte für das veränderte Emissionsverhalten der Fahrzeuge während der Regeneration liefern. Es ist bei Dieselfahrzeugen eine deutliche Erhöhung einiger Emissionen zu erkennen. Die Studie zeigt, welche Emissionen während einer Regeneration zu einer möglichen Überschreitung der Grenzwerte für einen in Zukunft angedachten Grenzwert führen könnten, falls dieser für alle Fahrzustände gleich angesetzt würde und gegebenenfalls bei der Gesetzgebung der EURO Abgasstufe 7 reduziert würde. Weiterhin zeigt sich, dass die aktuell für Pkw noch nicht gesetzlich limitierten Emissionen Methan, Ammoniak, Lachgas und Formaldehyd während des Regenerationsprozesses ausgestoßen werden. Die Filter von Benzinmotoren haben im Fahrbetrieb in der Regel keine hohe Rußbeladung, da sie häufig passiv regenerieren. Die Emissionen, die während einer Regeneration zusätzlich entstehen, sind im Verhältnis zu einer Beschleunigungsphase eines Fahrzeugs relativ gering. Die Analyse der Feststoffe für Fahrzeuge beider Motorentypen ergab keinen Hinweis auf nicht bereits bekannte und damit erwartete Elemente.

## Literatur

Cambustion Ltd. (kein Datum). Datenblatt DMS500 MkII. Cambridge.

DAGEFÖRDE, H. (2015). Untersuchung innermotorischer Einflussgrößen auf die Partikelemission eines Ottomotors mit Direkteinspritzung. Karlsruhe: Dissertation am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Faurecia Clean Mobility, Emmanuel Jean. (2017). GPF, Just a DPF for Gasoline Engines? Bavans, France: 26th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology.

MERKER, G. & TEICHMANN, R. (2019). Grundlagen Verbrennungsmotoren. Wiesbaden: Springer Vieweg.

NOWAK, D. (2018). Ruß- und Aschedeposition in Ottopartikelfiltern. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

REIF, K. (2014). Dieselmotor Management. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.

REIF, K. (2014). Ottomotor – Management. Wiesbaden: Springer Vieweg.

VO (EU) 2017/1151. (kein Datum).

Volkswagen AG. (2017). Selbststudienprogramm 558 – Der motornahe Ottopartikelfilter. Wolfsburg.

## Bilder

Bild 3-1: Anordnung der Abgasnachbehandlungskomponenten in den Diesel Prüffahrzeugen

Bild 3-2: Motorraum mit Bezeichnung der Komponenten von Prüffahrzeug A (links) und Prüffahrzeug C (rechts)

Bild 3-3: Anordnung der Abgasnachbehandlungskomponenten bei Prüffahrzeug D

Bild 3-4: Anordnung der Abgasnachbehandlungskomponenten bei Prüffahrzeug E

Bild 3-5: Unterboden GPF von Prüffahrzeug E

Bild 3-6: Skizze zur Anordnung der Messtechnik

Bild 3-7: Prüffahrzeug A (rechts) und Prüffahrzeug C (links) auf dem Rollenprüfstand

Bild 3-8: Filterblättchen und Filterhalter zur Montage in die CVS-Anlage

Bild 3-9: Leeres Filterblättchen

Bild 4-1: Die vier Phasen einer Messung

Bild 4-2: Prüffahrzeug A – Messung 1

Bild 4-3: Prüffahrzeug B – Messung 3

Bild 4-4: Prüffahrzeug C – Messung 2

Bild 5-1: Prüffahrzeug A – Messung 1

Bild 5-2: Prüffahrzeug B – Messung 3

Bild 5-3: Prüffahrzeug C – Messung 2

Bild 5-4: Vergleich der AVL-PN-Counter/DMS500 – Prüffahrzeug A – Messung 2

Bild 5-5: Prüffahrzeug A – Messung 1

Bild 5-6: Prüffahrzeug B – Messung 3

Bild 5-7: Prüffahrzeug C – Messung 3

Bild 5-8: Korrelation zwischen Partikelmasse und Partikelanzahl – Prüffahrzeug B und C

Bild 5-9: CO<sub>2</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug A – Messung 3

Bild 5-10: CO-Verlauf – Prüffahrzeug A – Messung 1

Bild 5-11: CO-Verlauf – Prüffahrzeug C – Messung 2

Bild 5-12: THC-Verlauf – Prüffahrzeug B – Messung 3

Bild 5-13: NO<sub>x</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug B – Messung 2

Bild 5-14: NO-Verlauf – Prüffahrzeug B – Messung 2

Bild 5-15: NH<sub>3</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug A – Messung 2

Bild 5-16: NH<sub>3</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug B – Messung 2

Bild 5-17: NH<sub>3</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug C – Messung 3

- Bild 5-18: CH<sub>4</sub>-Verlauf – Prüffahrzeug B – Messung 3
- Bild 5-19: Filter Nr. 2 – Prüffahrzeug A – Messung 3
- Bild 5-20: Filter Nr. 3 – Prüffahrzeug A (oben) – Prüffahrzeug B (Mitte) – Prüffahrzeug C (unten)
- Bild 5-21: Filter Nr. 4 – Prüffahrzeug A (oben) – Prüffahrzeug B (Mitte) – Prüffahrzeug C (unten)
- Bild 5-22: Referenzfilter B – 4.000-Fache Vergrößerung
- Bild 5-23: Prüffahrzeug A – Messung 2 – Filter Nr. 2 – 4.000-fache Vergrößerung
- Bild 5-24: Prüffahrzeug A (links) – Prüffahrzeug C (rechts) – Filter Nr. 3 – 4.000-fache Vergrößerung
- Bild 5-25: Prüffahrzeug B – Messung 3 – Filter Nr. 3 – 4.000-fache Vergrößerung
- Bild 5-26: Prüffahrzeug A – Messung 2 – Filter Nr. 4 – 4.000-fache Vergrößerung
- Bild 6-1: Prüffahrzeug D im Kühlcontainer für die Kaltstarts bei -15 °C
- Bild 6-2: Messablauf zur passiven GPF-Regeneration
- Bild 6-3: Prüffahrzeug D – Messung 1
- Bild 6-4: Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF
- Bild 6-5: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration
- Bild 7-1: Prüffahrzeug D – Messung 1, PN
- Bild 7-2: Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF, PN
- Bild 7-3: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration, PN
- Bild 7-4: Prüffahrzeug D – Messung 2
- Bild 7-5: Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF
- Bild 7-6: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration
- Bild 7-7: Korrelation zwischen Partikelmasse und Partikelanzahl – Prüffahrzeug D und E (Einzelmessungen Phase 3 und Phase 4)
- Bild 7-8: Prüffahrzeug D – Messung 2, CO<sub>2</sub>
- Bild 7-9: Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF, CO
- Bild 7-10: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration, CO
- Bild 7-11: Prüffahrzeug D – Messung 1, THC
- Bild 7-12: Prüffahrzeug D – Messung 1, NO<sub>x</sub>
- Bild 7-13: Prüffahrzeug D – Messung 1, NO
- Bild 7-14: Prüffahrzeug D – Messung 2, NO<sub>2</sub>
- Bild 7-15: Prüffahrzeug D – Messung 1, NH<sub>3</sub>
- Bild 7-16: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration, NH<sub>3</sub>
- Bild 7-17: Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF, CH<sub>4</sub>
- Bild 7-18: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration, CH<sub>4</sub>
- Bild 7-19: Prüffahrzeug D – Messung 1, HCHO
- Bild 7-20: Filter Nr. 3 – Prüffahrzeug D (links) – Prüffahrzeug E (rechts)
- Bild 7-21: Prüffahrzeug D – Messung 1 – Filter Nr. 3 – 4.000-fache Vergrößerung – Ausschnitt 2
- Bild 7-22: Prüffahrzeug E – Messung 3 = Regeneration – Filter Nr. 3 – 4.000-fache Vergrößerung – Ausschnitt 1
- Bild 7-23: Filter Nr. 4 – Prüffahrzeug D (links) – Prüffahrzeug E (rechts)

### Im Anhang

- Bild 01: Prüffahrzeug A – Messung 1
- Bild 02: Prüffahrzeug A – Messung 2
- Bild 03: Prüffahrzeug A – Messung 3
- Bild 04: Prüffahrzeug B – Messung 1
- Bild 05: Prüffahrzeug B – Messung 2

---

Bild 06:	Prüffahrzeug B – Messung 3	Bild 037:	Prüffahrzeug A – Messung 1
Bild 07:	Prüffahrzeug C – Messung 1	Bild 038:	Prüffahrzeug A – Messung 2
Bild 08:	Prüffahrzeug C – Messung 2	Bild 039:	Prüffahrzeug A – Messung 3
Bild 09:	Prüffahrzeug C – Messung 3	Bild 040:	Prüffahrzeug B – Messung 1
Bild 010:	Prüffahrzeug A – Messung 1	Bild 041:	Prüffahrzeug B – Messung 2
Bild 011:	Prüffahrzeug A – Messung 2	Bild 042:	Prüffahrzeug B – Messung 3
Bild 012:	Prüffahrzeug A – Messung 3	Bild 043:	Prüffahrzeug C – Messung 1
Bild 013:	Prüffahrzeug B – Messung 1	Bild 044:	Prüffahrzeug C – Messung 2
Bild 014:	Prüffahrzeug B – Messung 2	Bild 045:	Prüffahrzeug C – Messung 3
Bild 015:	Prüffahrzeug B – Messung 3	Bild 046:	Prüffahrzeug A – Messung 1
Bild 016:	Prüffahrzeug C – Messung 1	Bild 047:	Prüffahrzeug A – Messung 2
Bild 017:	Prüffahrzeug C – Messung 2	Bild 048:	Prüffahrzeug A – Messung 3
Bild 018:	Prüffahrzeug C – Messung 3	Bild 049:	Prüffahrzeug B – Messung 1
Bild 019:	Prüffahrzeug A – Messung 1	Bild 050:	Prüffahrzeug B – Messung 2
Bild 020:	Prüffahrzeug A – Messung 2	Bild 051:	Prüffahrzeug B – Messung 3
Bild 021:	Prüffahrzeug A – Messung 3	Bild 052:	Prüffahrzeug C – Messung 1
Bild 022:	Prüffahrzeug B – Messung 1	Bild 053:	Prüffahrzeug C – Messung 2
Bild 023:	Prüffahrzeug B – Messung 2	Bild 054:	Prüffahrzeug C – Messung 3
Bild 024:	Prüffahrzeug B – Messung 3	Bild 055:	Prüffahrzeug A – Messung 1
Bild 025:	Prüffahrzeug C – Messung 1	Bild 056:	Prüffahrzeug A – Messung 2
Bild 026:	Prüffahrzeug C – Messung 2	Bild 057:	Prüffahrzeug A – Messung 3
Bild 027:	Prüffahrzeug C – Messung 3	Bild 058:	Prüffahrzeug B – Messung 1
Bild 028:	Prüffahrzeug A – Messung 1	Bild 059:	Prüffahrzeug B – Messung 2
Bild 029:	Prüffahrzeug A – Messung 2	Bild 060:	Prüffahrzeug B – Messung 3
Bild 030:	Prüffahrzeug A – Messung 3	Bild 061:	Prüffahrzeug C – Messung 1
Bild 031:	Prüffahrzeug B – Messung 1	Bild 062:	Prüffahrzeug C – Messung 2
Bild 032:	Prüffahrzeug B – Messung 2	Bild 063:	Prüffahrzeug C – Messung 3
Bild 033:	Prüffahrzeug B – Messung 3	Bild 064:	Prüffahrzeug A – Messung 1
Bild 034:	Prüffahrzeug C – Messung 1	Bild 065:	Prüffahrzeug A – Messung 2
Bild 035:	Prüffahrzeug C – Messung 2	Bild 066:	Prüffahrzeug A – Messung 3
Bild 036:	Prüffahrzeug C – Messung 3	Bild 067:	Prüffahrzeug B – Messung 1

Bild 068: Prüffahrzeug B – Messung 2	Bild 099: Prüffahrzeug B – Messung 1
Bild 069: Prüffahrzeug B – Messung 3	Bild 0100: 0 Prüffahrzeug B – Messung 2
Bild 070: Prüffahrzeug C – Messung 2	Bild 0101: 1 Prüffahrzeug B – Messung 3
Bild 071: Prüffahrzeug C – Messung 3	Bild 0102: 2 Prüffahrzeug C – Messung 2
Bild 072: Prüffahrzeug A – Messung 1	Bild 0103: 3 Prüffahrzeug C – Messung 3
Bild 073: Prüffahrzeug A – Messung 2	Bild 0104: 4 Prüffahrzeug A – Messung 1
Bild 074: Prüffahrzeug A – Messung 3	Bild 0105: 5 Prüffahrzeug A – Messung 2
Bild 075: Prüffahrzeug B – Messung 1	Bild 0106: 6 Prüffahrzeug A – Messung 3
Bild 076: Prüffahrzeug B – Messung 2	Bild 0107: 7 Prüffahrzeug B – Messung 1
Bild 077: Prüffahrzeug B – Messung 3	Bild 0108: 8 Prüffahrzeug B – Messung 2
Bild 078: Prüffahrzeug C – Messung 2	Bild 0109: 9 Prüffahrzeug B – Messung 3
Bild 079: Prüffahrzeug C – Messung 3	Bild 0110: 0 Prüffahrzeug C – Messung 2
Bild 080: Prüffahrzeug A – Messung 1	Bild 0111: 1 Prüffahrzeug C – Messung 3
Bild 081: Prüffahrzeug A – Messung 2	Bild 0112: 2 Referenzfilter A
Bild 082: Prüffahrzeug A – Messung 3	Bild 0113: 3 Referenzfilter B
Bild 083: Prüffahrzeug B – Messung 1	Bild 0114: 4 Referenzfilter A – 400: 0-Fache Vergrößerung – Ausschnitt 1
Bild 084: Prüffahrzeug B – Messung 2	Bild 0115: 5 Referenzfilter A – 400: 0-Fache Vergrößerung – Ausschnitt 2
Bild 085: Prüffahrzeug B – Messung 3	Bild 0116: 6 Referenzfilter A – 400: 0-Fache Vergrößerung – Ausschnitt 3
Bild 086: Prüffahrzeug C – Messung 2	Bild 0117: 7 Referenzfilter B – 400: 0-Fache Vergrößerung – Ausschnitt 1
Bild 087: Prüffahrzeug C – Messung 3	Bild 0118: 8 Referenzfilter B – 400: 0-Fache Vergrößerung – Ausschnitt 2
Bild 088: Prüffahrzeug A – Messung 1	Bild 0119: 9 Referenzfilter B – 400: 0-Fache Vergrößerung – Ausschnitt 3
Bild 089: Prüffahrzeug A – Messung 2	Bild 0120: 0 Prüffahrzeug A – Messung 1 – Filter Nr. 2
Bild 090: Prüffahrzeug A – Messung 3	Bild 0121: 1 Prüffahrzeug A – Messung 2 – Filter Nr. 2
Bild 091: Prüffahrzeug B – Messung 1	Bild 0122: 2 Prüffahrzeug A – Messung 3 – Filter Nr. 2
Bild 092: Prüffahrzeug B – Messung 2	Bild 0123: 3 Prüffahrzeug A – Messung 1 – Filter Nr. 2 – 400: 0-fache Vergrößerung – Ausschnitt 1
Bild 093: Prüffahrzeug B – Messung 3	
Bild 094: Prüffahrzeug C – Messung 2	
Bild 095: Prüffahrzeug C – Messung 3	
Bild 096: Prüffahrzeug A – Messung 1	
Bild 097: Prüffahrzeug A – Messung 2	
Bild 098: Prüffahrzeug A – Messung 3	

- Bild 0124: 4 Prüffahrzeug A – Messung 1 – Filter  
Nr. 2 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 2
- Bild 0125: 5 Prüffahrzeug B – Messung 3 – Filter  
Nr. 2
- Bild 0126: 6 Prüffahrzeug B – Messung 3 – Filter  
Nr. 2 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 1
- Bild 0127: 7 Prüffahrzeug B – Messung 3 – Filter  
Nr. 2 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 2
- Bild 0128: 8 Prüffahrzeug C – Messung 3 – Filter  
Nr. 2
- Bild 0129: 9 Prüffahrzeug C – Messung 3 – Filter  
Nr. 2 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 1
- Bild 0130: 0 Prüffahrzeug C – Messung 3 – Filter  
Nr. 2 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 2
- Bild 0131: 1 Prüffahrzeug A – Messung 1 – Filter  
Nr. 3
- Bild 0132: 2 Prüffahrzeug A – Messung 2 – Filter  
Nr. 3
- Bild 0133: 3 Prüffahrzeug A – Messung 3 – Filter  
Nr. 3 c
- Bild 0134: 4 Prüffahrzeug A – Messung 1 – Filter  
Nr. 3 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 1
- Bild 0135: 5 Prüffahrzeug A – Messung 1 – Filter  
Nr. 3 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 2
- Bild 0136: 6 Prüffahrzeug B – Messung 3 – Filter  
Nr. 3
- Bild 0137: 7 Prüffahrzeug B – Messung 3 – Filter  
Nr. 3 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 1
- Bild 0138: 8 Prüffahrzeug B – Messung 3 – Filter  
Nr. 3 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 2
- Bild 0139: 9 Prüffahrzeug C – Messung 3 – Filter  
Nr. 3
- Bild 0140: 0 Prüffahrzeug C – Messung 3 – Filter  
Nr. 3 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 1
- Bild 0141: 1 Prüffahrzeug C – Messung 3 – Filter  
Nr. 3 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 2
- Bild 0142: 2 Prüffahrzeug A – Messung 1 – Filter  
Nr. 4
- Bild 0143: 3 Prüffahrzeug A – Messung 2 – Filter  
Nr. 4
- Bild 0144: 4 Prüffahrzeug A – Messung 3 – Filter  
Nr. 4
- Bild 0145: 5 Prüffahrzeug A – Messung 1 – Filter  
Nr. 4 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 1
- Bild 0146: 6 Prüffahrzeug A – Messung 1 – Filter  
Nr. 4 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 2
- Bild 0147: 7 Prüffahrzeug B – Messung 3 – Filter  
Nr. 4
- Bild 0148: 8 Prüffahrzeug B – Messung 3 – Filter  
Nr. 4 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 1
- Bild 0149: 9 Prüffahrzeug B – Messung 3 – Filter  
Nr. 4 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 2
- Bild 0150: 0 Prüffahrzeug C – Messung 3 – Filter  
Nr. 4
- Bild 0151: 1 Prüffahrzeug C – Messung – Filter  
Nr. 4 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 1
- Bild 0152: 2 Prüffahrzeug C – Messung 3 – Filter  
Nr. 4 – 400: 0-fache Vergrößerung –  
Ausschnitt 2
- Bild 0153: 3 Prüffahrzeug D – Messung 1
- Bild 0154: 4 Prüffahrzeug D – Messung 2
- Bild 0155: 5 Prüffahrzeug E – Messung 2 =  
Phase 4 – leerer GPF
- Bild 0156: 6 Prüffahrzeug E – Messung 3 =  
Phase 3 – Regeneration

Bild 0157: 7 Prüffahrzeug D – Messung 1	Bild 0180: 0 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration
Bild 0158: 8 Prüffahrzeug D – Messung 2	Bild 0181: 1 Prüffahrzeug D – Messung 1
Bild 0159: 9 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF	Bild 0182: 2 Prüffahrzeug D – Messung 2
Bild 0160: 0 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration	Bild 0183: 3 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF
Bild 0161: 1 Prüffahrzeug D – Messung 2	Bild 0184: 4 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration
Bild 0162: 2 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF	Bild 0185: 5 Prüffahrzeug D – Messung 1
Bild 0163: 3 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration	Bild 0186: 6 Prüffahrzeug D – Messung 2
Bild 0164: 4 Korrelation zwischen Partikelmasse und Partikelanzahl – Prüffahrzeug D und E	Bild 0187: 7 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF
Bild 0165: 5 Prüffahrzeug D – Messung 1	Bild 0188: 8 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration
Bild 0166: 6 Prüffahrzeug D – Messung 2	Bild 0189: 9 Prüffahrzeug D – Messung 1
Bild 0167: 7 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF	Bild 0190: 0 Prüffahrzeug D – Messung 2
Bild 0168: 8 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration	Bild 0191: 1 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF
Bild 0169: 9 Prüffahrzeug D – Messung 1	Bild 0192: 2 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration
Bild 0170: 0 Prüffahrzeug D – Messung 2	Bild 0193: 3 Prüffahrzeug D – Messung 1
Bild 0171: 1 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF	Bild 0194: 4 Prüffahrzeug D – Messung 2
Bild 0172: 2 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration	Bild 0195: 5 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF
Bild 0173: 3 Prüffahrzeug D – Messung 1	Bild 0196: 6 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration
Bild 0174: 4 Prüffahrzeug D – Messung 2	Bild 0197: 7 Prüffahrzeug D – Messung 1
Bild 0175: 5 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF	Bild 0198: 8 Prüffahrzeug D – Messung 2
Bild 0176: 6 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration	Bild 0199: 9 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF
Bild 0177: 7 Prüffahrzeug D – Messung 1	Bild 0200: 0 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration
Bild 0178: 8 Prüffahrzeug D – Messung 2	Bild 0201: 1 Prüffahrzeug D – Messung 1
Bild 0179: 9 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF	Bild 0202: 2 Prüffahrzeug D – Messung 2
	Bild 0203: 3 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF

Bild 0204: 4 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration

Bild 0205: 5 Prüffahrzeug D – Messung 1

Bild 0206: 6 Prüffahrzeug D – Messung 2

Bild 0207: 7 Prüffahrzeug E – Messung 2 = Phase 4 – leerer GPF

Bild 0208: 8 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Phase 3 – Regeneration

Bild 0209: 9 Prüffahrzeug D – Messung 1 – Filter Nr. 3

Bild 0210: 0 Prüffahrzeug D – Messung 1 – Filter Nr. 3 – 400: 0-fache Vergrößerung – Ausschnitt 1

Bild 0211: 1 Prüffahrzeug D – Messung 1 – Filter Nr. 3 – 400: 0-fache Vergrößerung – Ausschnitt 2

Bild 0212: 2 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Regeneration – Filter Nr. 3

Bild 0213: 3 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Regeneration – Filter Nr. 3 – 400: 0-fache Vergrößerung – Ausschnitt 1

Bild 0214: 4 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Regeneration – Filter Nr. 3 – 400: 0-fache Vergrößerung – Ausschnitt 2

Bild 0215: 5 Prüffahrzeug E – Messung 3 = Regeneration – Filter Nr. 3 – 400: 0-fache Vergrößerung – Ausschnitt 3

Bild 0216: 6 Prüffahrzeug D – Messung 1 – Filter Nr. 4

Bild 0217: 7 Prüffahrzeug D – Messung 1 – Filter Nr. 4 – 400: 0-fache Vergrößerung – Ausschnitt 1

Bild 0218: 8 Prüffahrzeug D – Messung 1 – Filter Nr. 4 – 400: 0-fache Vergrößerung – Ausschnitt 2

Bild 0219: 9 Prüffahrzeug E – Messung 2 = leerer Filter – Filter Nr. 4

Bild 0220: 0 Prüffahrzeug E – Messung 2 = leerer Filter – Filter Nr. 4 – 400: 0-fache Vergrößerung – Ausschnitt 1

Bild 0221: 1 Prüffahrzeug E – Messung 2 = leerer Filter – Filter Nr. 4 – 400: 0-fache Vergrößerung – Ausschnitt 2

## Tabellen

Tab. 2-1: Anforderungen an DPF/GPF (Faurecia Clean Mobility, Emmanuel Jean, 2017)

Tab. 2-2: Technische Daten zu DPF/GPF (Faurecia Clean Mobility, Emmanuel Jean, 2017)

Tab. 3-1: Prüffahrzeuge Diesel

Tab. 3-2: Prüffahrzeuge Ottomotor

Tab. 3-3: VO (EU) 2017/1151

Tab. 4-1: Konstanter Motorbetriebspunkt der Prüffahrzeuge

Tab. 4-2: Trigger-Anforderungen zum Einleiten der aktiven Regeneration

Tab. 4-3: Regenerationsintervalle der Prüffahrzeuge

Tab. 5-1: PN-Mittelwerte aus 3 Messungen pro Prüffahrzeug

Tab. 5-2: Accumulation Mode – Prüffahrzeug A, B, C

Tab. 5-3: Korrelation zwischen Partikelmasse und Partikelanzahl

Tab. 5-4: Nucleation Mode – Prüffahrzeug A, B, C

Tab. 5-5: Analytierte Gaskomponenten

Tab. 5-6: CO<sub>2</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

Tab. 5-7: CO-Werte aus den einzelnen Phasen

Tab. 5-8: THC-Werte aus den einzelnen Phasen

Tab. 5-9: NO<sub>x</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

Tab. 5-10: NO-Werte aus den einzelnen Phasen

Tab. 5-11: NO<sub>2</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

Tab. 5-12: NH<sub>3</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

Tab. 5-13: N<sub>2</sub>O-Werte aus den einzelnen Phasen

Tab. 5-14: CH<sub>4</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

Tab. 5-15: SO<sub>2</sub>-Werte aus den einzelnen Phasen

Tab. 5-16: Änderung der Konzentrationen und Massen der Gaskomponenten während der Phasen

Tab. 5-17: Referenzfilter B – Elemente in Massenprozent	<b>Im Anhang</b>
Tab. 5-18: Referenzfilter A – Elemente in Massenprozent	Tab. 01: Prüffahrzeug A – PN
Tab. 5-19: Massenprozent der Elemente in den einzelnen Phasen	Tab. 02: Prüffahrzeug B – PN
Tab. 6-1: Schritte im Messablauf zur passiven GPF-Regeneration	Tab. 03: Prüffahrzeug C – PN
Tab. 6-2: Kaltstarts für GPF-Beladung – Prüffahrzeug D	Tab. 04: Accumulation Mode – Prüffahrzeug A
Tab. 6-3: Kaltstarts für GPF-Beladung – Prüffahrzeug E	Tab. 05: Nucleation Mode – Prüffahrzeug A
Tab. 7-1: PN-Mittelwerte – Prüffahrzeug D und E	Tab. 06: Accumulation Mode – Prüffahrzeug B
Tab. 7-2: Accumulation Mode – Prüffahrzeug D und E	Tab. 07: Nucleation Mode – Prüffahrzeug B
Tab. 7-3: Korrelation zwischen Partikelmasse und Partikelanzahl	Tab. 08: Accumulation Mode – Prüffahrzeug C
Tab. 7-4: Nucleation Mode – Prüffahrzeug D und E	Tab. 09: Nucleation Mode – Prüffahrzeug C
Tab. 7-5: CO <sub>2</sub> -Werte aus den einzelnen Phasen	Tab. 010: Partikelmasse – Prüffahrzeug B
Tab. 7-6: CO-Werte aus den einzelnen Phasen	Tab. 011: Partikelmasse – Prüffahrzeug C
Tab. 7-7: THC-Werte aus den einzelnen Phasen	Tab. 012: Prüffahrzeug A – CO <sub>2</sub>
Tab. 7-8: NO <sub>x</sub> -Werte aus den einzelnen Phasen	Tab. 013: Prüffahrzeug B – CO <sub>2</sub>
Tab. 7-9: NO-Werte aus den einzelnen Phasen	Tab. 014: Prüffahrzeug C – CO <sub>2</sub>
Tab. 7-10: NO <sub>2</sub> -Werte aus den einzelnen Phasen	Tab. 015: Prüffahrzeug A – CO
Tab. 7-11: NH <sub>3</sub> -Werte aus den einzelnen Phasen	Tab. 016: Prüffahrzeug B – CO
Tab. 7-12: CH <sub>4</sub> -Werte aus den einzelnen Phasen	Tab. 017: Prüffahrzeug C – CO
Tab. 7-13: N <sub>2</sub> O-Werte aus den einzelnen Phasen	Tab. 018: Prüffahrzeug A – THC
Tab. 7-14: SO <sub>2</sub> -Werte aus den einzelnen Phasen	Tab. 019: Prüffahrzeug B – THC
Tab. 7-15: HCHO-Werte aus den einzelnen Phasen	Tab. 020: Prüffahrzeug C – THC
Tab. 7-16: Änderung der Konzentrationen und Massen der Gaskomponenten während der Phasen	Tab. 021: Prüffahrzeug A – NO <sub>x</sub>
Tab. 7-17: Massenprozent der Elemente in den einzelnen Phasen	Tab. 022: Prüffahrzeug B – NO <sub>x</sub>
	Tab. 023: Prüffahrzeug C – NO <sub>x</sub>
	Tab. 024: Prüffahrzeug A – NO
	Tab. 025: Prüffahrzeug B – NO
	Tab. 026: Prüffahrzeug C – NO
	Tab. 027: Prüffahrzeug A – NO <sub>2</sub>
	Tab. 028: Prüffahrzeug B – NO <sub>2</sub>
	Tab. 029: Prüffahrzeug C – NO <sub>2</sub>
	Tab. 030: Prüffahrzeug A – NH <sub>3</sub>
	Tab. 031: Prüffahrzeug B – NH <sub>3</sub>

---

Tab. 032: Prüffahrzeug C – NH <sub>3</sub>	Tab. 064: Prüffahrzeug D – NH <sub>3</sub>
Tab. 033: Prüffahrzeug A – CH <sub>4</sub>	Tab. 065: Prüffahrzeug E – NH <sub>3</sub>
Tab. 034: Prüffahrzeug B – CH <sub>4</sub>	Tab. 066: Prüffahrzeug D – CH <sub>4</sub>
Tab. 035: Prüffahrzeug C – CH <sub>4</sub>	Tab. 067: Prüffahrzeug E – CH <sub>4</sub>
Tab. 036: Prüffahrzeug A – N <sub>2</sub> O	Tab. 068: Prüffahrzeug D – N <sub>2</sub> O
Tab. 037: Prüffahrzeug B – N <sub>2</sub> O	Tab. 069: Prüffahrzeug E – N <sub>2</sub> O
Tab. 038: Prüffahrzeug C – N <sub>2</sub> O	Tab. 070: Prüffahrzeug E – SO <sub>2</sub>
Tab. 039: Prüffahrzeug A – SO <sub>2</sub>	Tab. 071: Prüffahrzeug E – SO <sub>2</sub>
Tab. 040: Prüffahrzeug B – SO <sub>2</sub>	Tab. 072: Prüffahrzeug D – HCHO
Tab. 041: Prüffahrzeug C – SO <sub>2</sub>	Tab. 073: Prüffahrzeug E – HCHO
Tab. 042: Prüffahrzeug D – Rollenlast	
Tab. 043: Prüffahrzeug E – Rollenlast	
Tab. 044: Prüffahrzeug D – PN	
Tab. 045: Prüffahrzeug E – PN	
Tab. 046: Accumulation Mode – Prüffahrzeug D	
Tab. 047: Nucleation Mode – Prüffahrzeug D	
Tab. 048: Accumulation Mode – Prüffahrzeug E	
Tab. 049: Nucleation Mode – Prüffahrzeug E	
Tab. 050: Partikelmasse – Prüffahrzeug D	
Tab. 051: Partikelmasse – Prüffahrzeug E	
Tab. 052: Prüffahrzeug D – CO <sub>2</sub>	
Tab. 053: Prüffahrzeug E – CO <sub>2</sub>	
Tab. 054: Prüffahrzeug D – CO	
Tab. 055: Prüffahrzeug D – CO	
Tab. 056: Prüffahrzeug D – THC	
Tab. 057: Prüffahrzeug D – THC	
Tab. 058: Prüffahrzeug D – NO <sub>x</sub>	
Tab. 059: Prüffahrzeug E – NO <sub>x</sub>	
Tab. 060: Prüffahrzeug D – NO	
Tab. 061: Prüffahrzeug E – NO	
Tab. 062: Prüffahrzeug E – NO <sub>2</sub>	
Tab. 063: Prüffahrzeug E – NO <sub>2</sub>	

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

#### 2015

**F 100: Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver**

Powelleit, Muhrer, Vollrath, Henze, Liesner, Pawellek € 17,50

**F 101: Altersabhängige Anpassung von Menschmodellen für die passive Fahrzeugsicherheit**

Wagner, Segura, Mühlbauer, Fuchs, Peldschus, Freßmann € 19,00

**F 102: 6th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“**

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 103: Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Nutzfahrzeugen**

Süßmann, Lienkamp

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 104: Abbiege-Assistenzsystem für Lkw – Grundlagen eines Testverfahrens**

Schreck, Seiniger € 14,50

**F 105: Abgasverhalten von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Feldüberwachung**

Schmidt, Georges € 14,50

**F 105b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – In-service conformity**

Schmidt, Johannsen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 106: Untersuchung des Abgasverhaltens von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Austauschkatalsatoren**

Schmidt, Johannsen € 13,50

**F 106b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – Replacement catalytic converters**

Schmidt, Johannsen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 107: Sicherheitsaspekte beim Laden von Elektrofahrzeugen**

Vogt, Link, Ritzinger, Ablingyte, Reindl € 16,50

**F 108: Interoperabilität zwischen öffentlichem Verkehrsmanagement und individuellen Navigationsdiensten – Maßnahmen zur Gewährleistung**

von der Ruhren, Kirschfink, Ansorge, Reusswig, Riegelhuth, Karina-Wedrich, Schopf, Sparmann, Wöbbeking, Kannenberg € 17,50

**F 109: Ermittlung des Umfangs von Abweichungen bei Durchführung der Abgasuntersuchung zwischen Messung am Auspuff und Abfrage des On-Board-Diagnosesystems**

Schröder, Steickert, Walther, Ranftl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 110: Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen**

Altinsoy, Landgraf, Rosenkranz, Lachmann, Hagen, Schulze, Schlag

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 111: Geräuschminderung von Dünnschichtbelägen**

Schulze, Kluth, Ruhnau, Hübelt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 112: Ersatz von Außenspiegeln durch Kamera-Monitor-Systeme bei Pkw und Lkw**

Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens € 17,50

#### 2016

**F 112b: Final Report Camera-Monitor-Systems as a Replacement for Exterior Mirrors in Cars and Trucks**

Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 113: Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe**

Bergk, Heidt, Knörr, Keller € 15,50

**F 114: Barrierefreiheit bei Fernlinienbussen**

Oehme, Berberich, Maier, Böhm € 17,50

**F 115: Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich – Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit**

Frey

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 116: Lang-Lkw – Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt**

Süßmann, Förg, Wenzelis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 117: 7th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference 2016 at Hannover Medical School**

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 118: Bedeutung kompensativer Fahrerstrategien im Kontext automatisierter Fahrfunktionen**

Voß, Schwalm € 16,50

**F 119: Fahrzeugtechnische Eigenschaften von Lang-Lkw**

Förg, Süßmann, Wenzelis, Schmeiler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 120: Emissionen von über 30 Jahre alten Fahrzeugen**

Steven, Schulte, Hammer, Lessmann, Pomsel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 121: Laufleistungsabhängige Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen von neuen Pkw**

Pellmann, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

**F 122: Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge – Bedarfsanalyse auf Basis einer Vorstudie**  
Auf der Maur, Strassburg, Knörr, Heidt, Wuethrich  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 123: Motorradsschutzhelme – Identifizierung ihres Verbesserungspotenzials unter Berücksichtigung des Motorradunfallgeschehens**  
Pollak, Schueler, Bourdet, Deck, Willinger € 19,50

**F 124: Aufbau eines Qualitätsmanagementsystems für die Erfassung und Weiterverarbeitung von Daten für IVS-Dienste**  
Heinrich, Pollesch, Schober, Stamatakis, Grzebellus, Radike, Schneider, Stapelfeld, Huber  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 125: Untersuchung zu Elektrokleinstfahrzeugen**  
Bierbach, Adolph, Frey, Kollmus, Bartels, Hoffmann, Halbach € 19,50

## 2019

**F 126: Einfluss zunehmender Fahrzeugautomatisierung auf Fahrkompetenz und Fahrkompetenzerwerb**  
Weißgerber, Grattenthaler, Hoffmann € 15,50

**F 127: Erhöhung der Verkehrssicherheit älterer Kraftfahrer durch Verbesserung ihrer visuellen Aufmerksamkeit mittels „Sehfeldassistent“**  
Kupschick, Bürglen, Jürgensohn € 16,50

**F 128: Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung**  
Rösener, Sauerbier, Zlocki, Eckstein, Hennecke, Kemper, Oeser  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 129: Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung zur Vermeidung der Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer**  
Kosmas, Kobbert, Khan € 15,50

**F 130: Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens – Grundlagenprojekt**  
Dierkes, Friedrich, Heinrich, Hoffmann, Maurer, Reschka, Schendzielorz, Ungureanu, Vogt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 131: Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssysteme (FAS/FIS) – Personale Voraussetzungen ihres Erwerbs und Nutzung durch ältere Kraftfahrerinnen und -fahrer**  
Hargutt, Kenntner-Mabiala, Kaussner, Neukum  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2020

**F 132: Handbuch Barrierefreiheit im Fernbuslinienverkehr**  
Boenke, Grossmann, Nass, Schäfer € 17,50

**F 133: Lkw-Notbremsassistentensysteme**  
Seiniger, Heini, Bühne, Gail € 15,50

**F 134: Stationär-Geräusch von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen**  
Altinsoy, Lachmann, Rosenkranz, Steinbach € 19,00

**F 135: Abweichungen von der akzeptierten Fahrleistungsschwelle in automatisierten Fahrsituationen**  
Voß, Schwalm € 18,00

## 2021

**F 136: Kamera-Monitor-Systeme als Fahrerinformationsquelle**  
Leitner, Oehme, de Silva, Blum, Berberich, Böhm  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 137: Konzept für die Erzeugung eines ISO-konformen UML-Modells und Generierung eines GML-Applikationsschemas für DATEX II zur Verbesserung der Interoperabilität**  
Lauber, Steiger, Kopka, Lapolla, Freudenstein, Kaltwasser  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 138: Grundlagen zur Kommunikation zwischen automatisierten Kraftfahrzeugen und Verkehrsteilnehmern**  
Schaarschmidt, Yen, Bosch, Zwickert, Schade, Petzold € 16,50

**F 139: Einfluss von Notbremsystemen auf die Entwicklung von Lkw-Auffahrunfällen auf Bundesautobahnen**  
Straßgütl, Sander € 14,50

**F 140: Reibwertprognose als Assistenzsystem**  
Leschik, Sieron, Gregull, Müller, Trapp, Brandenburg, Haalman, Terpstra  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 141: Methoden für die Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion beim teilautomatisierten Fahren**  
Schömig, Wiedemann, Julier, Neukum, Wiggerich, Hoffmann € 18,00

**F 142: Schräglagenangst**  
Scherer, Winner, Pleß, Will, Neukum, Stanglmayr, Bäumler, Siebke, Prokop € 14,50

## 2022

**F 143: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbags**  
Holtz, Heidt, Müller, Johannsen, Jänsch, Hammer, Büchner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 144: Entwicklung eines Verfahrens zur Generierung eines Safety Performance Indikators aus der Bewertung von Euro NCAP**  
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**F 145: Regeneration von Partikelfiltern bei Benzin- und Dieselmotorkraftfahrzeugen**  
Langwald  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

---

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.