

**Partikelanzahlmessung
im Rahmen der
Abgasuntersuchung
bei Fahrzeugen mit
Fremdzündmotoren**

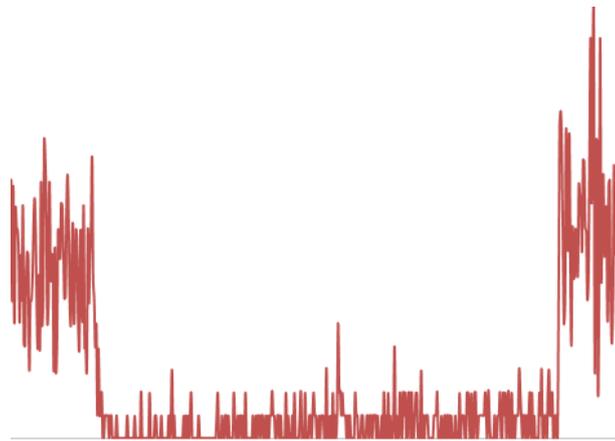
**Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

bast

Partikelanzahlmessung im Rahmen der Abgasuntersuchung bei Fahrzeugen mit Fremdzündmotoren

Schlussbericht

Projekt-Nummer: FE 84.0534/2020



Fabian Langwald

TÜV Rheinland Kraftfahrt GmbH, Köln

Kurzfassung

Die Einhaltung der Grenzwerte bezüglich der Partikelemissionen sind aufgrund neuer Technologien zur CO₂ Einsparung auch für Fahrzeuge mit Fremdzündmotoren eine technische Herausforderung. Insbesondere Fremdzündmotoren mit Benzin-Direkteinspritzung (BDE) weisen in bestimmten Betriebszuständen hohe Partikelemissionen auf.

Um die Partikelanzahlgrenzwerte welche im Rahmen der Typprüfung im WLTP-Zyklus und der RDE-Fahrt von den Fahrzeugen eingehalten werden müssen, nicht zu überschreiten, wird von den Fahrzeugherstellern ein Partikelfilter (Dieselpartikelfilter (DPF) / Ottopartikelfilter (engl. Gasoline Particulate Filter = GPF)) im Abgassystem verbaut. Da aktuell in fast allen modernen Ottomotor-Abgassystemen (Euro 6d) Partikelfilter verbaut werden, wird in diesem Projekt untersucht, mit welcher Messprozedur der GPF in Zukunft auf seine Effektivität im Rahmen der periodischen Abgasuntersuchung (AU) überprüft werden kann.

Ziel des Forschungsprojektes ist es, die für Fahrzeuge mit Kompressionszündungsmotor ausgearbeitete Partikelanzahl-Messprozedur der AU auf die Anwendung bei Fremdzündmotoren zu überprüfen und ggf. anzupassen. Darüber hinaus wird geprüft, ob eine Messung mit einer extern aufgetragenen Last eine zielführende Messprozedur liefern kann. Die PN-Rohemissionen von Diesel- und Ottomotoren unterscheiden sich deutlich. Bei einem Dieselmotor liegt die Partikelkonzentration im Rohabgas bereits im Leerlauf in einem Bereich von deutlich über $1\text{E}+06\text{ cm}^{-3}$ (Partikelanzahlmessung im Rahmen der Weiterentwicklung der Abgasuntersuchung, 2020). Deshalb kann ein DPF bei einer Messprozedur im Leerlauf zuverlässig geprüft werden. Um einen GPF zuverlässig prüfen zu können, muss vor dem Filter eine repräsentative Partikelanzahl vorhanden sein. Wird dann hinter dem Filter eine deutlich geringere Partikelanzahl gemessen, kann eine wirksame Filterwirkung nachgewiesen werden. Je geringer die Partikelanzahl vor dem Filter ist, desto ungenauer wird die Aussage über die Filterwirkung des GPF. Da bei der periodischen Abgasuntersuchung die Höhe der Partikelanzahl vor dem Filter unbekannt ist, muss über die Messprozedur sichergestellt werden, dass sich das Fahrzeug in einem Betriebszustand befindet, indem vor dem Filter hohe Partikelkonzentrationen vorherrschen. Um dies zu überprüfen, wurden bei den Messungen in diesem Projekt mindestens zwei PN-Messgeräte eingesetzt. Ein Gerät zeichnete die PN-Werte am Auspuffendrohr auf, während die Probenahme des zweiten Gerätes im Abgasstrom vor dem GPF erfolgte.

Die Messungen an zwei Prüffahrzeugen haben ergeben, dass der GPF primär für die Einhaltung der PN-Grenzwerte bei Kaltstart und hoher Motorlast ins Abgassystem integriert wird. Die Wirkung im Leerlauf ist zwar nachweislich vorhanden, aber aufgrund zu geringer Rohemissionen in der AU nicht transparent prüfbar. Die Rohemissionen im Leerlauf sind bei den untersuchten Fahrzeugen im Mittel zwischen 10.000 cm^{-3} bis 30.000 cm^{-3} grundsätzlich zu gering, um den GPF hinsichtlich seiner Filtereffizienz nach der AU PN-Dieselmessprozedur oder einem daran angelehnten Verfahren prüfen zu können. Eine Messung unter Last, wie im untersuchten ASM2050 Zyklus, erzeugt höhere PN-Rohemissionen als eine Leerlaufmessung. Die PN-Mittelwerte der ASM Zyklen liegen zwischen $6,9\text{E}+04\text{ cm}^{-3}$ und $1,2\text{E}+05\text{ cm}^{-3}$. Hier wird die Abweichung der Partikelanzahl im Rohabgas im Vergleich zum Diesel nochmals deutlich. Sie ist um ein bis zwei Zehnerpotenzen niedriger.

Bei einem der Prüffahrzeuge wird abschließend die Partikelgrößenverteilung am Auspuffendrohr sowohl während der Leerlaufmessung als auch der Lastmessung gemessen, um zu ermitteln, wie hoch bei Fremdzündungsmotoren der Anteil der kleineren Partikel an der Gesamtpartikelanzahl ist. Die Erfassung von kleineren Partikeln, als die aktuell für die Typprüfung oder der PTB-Anforderung für die Messgeräte zur Diesel-PN-AU geforderten 23 Nanometer, bringt in den durchgeführten Messungen sowohl im Leerlauf, als auch unter Last die Erkenntnis, dass das PN-Niveau um ca. Faktor 5 erhöht wird. In den Fällen in denen eine signifikante Partikelanzahl am Endrohr gemessen wurde, lag der Schwerpunkt der Größenverteilung zwischen 30 nm und 150 nm.

Zusammenfassend konnte die Studie an zwei Fahrzeugen exemplarisch zeigen, dass eine Überprüfung des GPF im Rahmen der periodischen Abgasuntersuchung mittels einer Messung im Leerlauf aktuell nicht zielführend erscheint. Dieses gilt auch bei der Messung von Partikeln im erweiterten Bereich von 10 nm-150 nm. Sollte ein GPF in Zukunft über eine PN-Messung beurteilt werden, könnte dieses mithilfe einer Messprozedur erfolgen, die unter Last erfolgt. Die Auswertung des ASM2050 unter 500 N Rollenlast hat gezeigt, dass hohe Lasten und Geschwindigkeiten erforderlich sind, um Motorbetriebspunkte zu erreichen, in denen eine Prüfung möglich erscheint.

Um einen geeigneten Lastzyklus auszuarbeiten, müsste eine signifikante Anzahl an Fahrzeugen mit unterschiedlichen Motorgrößen und GPF Anordnungen untersucht werden. Je nach Ergebnis der vorgeschlagenen Untersuchung wäre es denkbar, dass dieser Lastzyklus möglicherweise sogar fahrzeugspezifisch sein könnte.

Abstract

Due to new technologies for CO₂ reduction, compliance with the limits for particulate emissions has become a technical challenge for vehicles with positive-ignition engines. In particular, spark ignition engines with gasoline direct injection (BDE) have high particulate emissions under certain operating conditions.

In order not to exceed the particulate limits, which have to be complied by the vehicles in the context of the type approval tests, WLTC-cycle and RDE-test, the vehicle manufacturers install a gasoline particulate filter (GPF) in the exhaust system. Since particle filters are currently installed in almost all modern gasoline engine exhaust systems (Euro 6d), this project examines, which measurement procedure can be used in the future to test the effectiveness of the GPF in the context of the periodical technical inspection (PTI).

The aim of this research project is to check the particle-number-measurement procedure developed for vehicles with compression ignition engines for the application with positive ignition engines and to adapt it if necessary. Furthermore, it is examined, whether a measurement with an external load can provide a useful measurement procedure. The PN raw emissions of diesel and gasoline engines differ significantly. In the case of diesel engines, the particle concentration in the raw exhaust gas is already in a range of well over $1\text{E}+06\text{ cm}^{-3}$ at idling speed (Partikelanzahlmessung im Rahmen der Weiterentwicklung der Abgasuntersuchung, 2020). Therefore, a DPF can be reliably tested during an idling measurement procedure. To reliably test a GPF, a representative number of particles must be present upstream of the filter. If a significantly lower particle count is then measured behind the filter, a proper filter effect can be proven. The lower the particle number in front of the filter, the less accurate the statement about the filter effect of the GPF, independent of the measured value at the tailpipe. Since the level of the particle number upstream of the filter is unknown during the PTI, the measurement procedure must ensure that the vehicle is in an operating state in which high particle concentrations prevail upstream of the filter. In order to verify this, at least two PN measuring devices were used for all measurements in this project. One device sampled PN values at the exhaust tailpipe while the second device sampled the gas upstream of the GPF.

Measurements on two test vehicles have shown that the GPF is primarily integrated into the exhaust system for compliance with PN limits during cold starts and high engine loads. The effect at idle is present, but cannot be transparently tested due to too low raw emissions. The raw emission at idling speed is on average between $10,000\text{ cm}^{-3}$ and $30,000\text{ cm}^{-3}$ too low for the GPF to be tested with regard to its filter efficiency according to the AU PN diesel measurement procedure or a procedure based on it. A measurement under load, as in the ASM2050 cycle studied, produces higher PN raw emissions than an idle measurement. The PN average values of the ASM cycles lie between $6.9\text{E}+04\text{ cm}^{-3}$ and $1.2\text{E}+05\text{ cm}^{-3}$. Here, the deviation of the particle number in the raw exhaust gas compared to diesel becomes clear once again. It is lower by one to two decimal power.

Finally, the particle size distribution at the tailpipe of one of the test vehicles is determined both during the idling test and during the load test, to determine the proportion of smaller particles in the total number of particles in positive-ignition engines. The detection of smaller particles than the 23 nanometers currently required for the type approval test or the PTB requirement for the measuring instruments for diesel PN-AU, leads to the conclusion in the measurements carried out, both at idle and under load, that the PN level is increased by a factor of approx. 5. In the cases where a significant number of particles was measured at the tailpipe, the focus of the size distribution was in the range between 30 nm and 150 nm.

In summary, the study was able to show, using two vehicles as examples, that testing the GPF as part of the PTI by means of a measurement at idling speed does currently not appear to be expedient. This also applies to the measurement of particles in the extended range of 10 nm-150 nm. If in the future a GPF is to be assessed by a PN measurement, this could be done by means of a measurement procedure that is performed under load. Evaluation of the ASM2050 under 500 N load has shown, that high loads and speeds are required to reach motor operating points where testing appears possible.

In order to elaborate a suitable load cycle, a significant number of vehicles with different engine sizes and GPF arrangements would have to be investigated. Depending on the outcome of the proposed investigation, it is conceivable that this load cycle could even be vehicle-specific.

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	7
1. Ausgangssituation	8
1.1. Zielsetzung des Projektes	8
1.2. Vorgehensweise	9
2. Partikel bei Fremdzündmotoren	10
2.1. Partikelentstehung	10
2.2. Partikelminderung	10
2.2.1. Innermotorisch	10
2.2.2. Außermotorisch GPF	12
3. Aufbau der Messreihe	15
3.1. Prüffahrzeuge	15
3.1.1. Prüffahrzeug A - Audi A3	15
3.1.2. Prüffahrzeug B - Ford Focus	16
3.1.3. Einbau einer Probenahmestelle vor dem GPF	16
3.2. Messtechnik	18
3.2.1. TSI NPET 3795-(HC) und TSI NPET 3795	18
3.2.2. Horiba Rollenprüfstand	22
3.2.3. AVL-PN-Counter (Advanced)	22
3.2.4. Cambustion DMS500	23
4. Leerlaufmessung	24
4.1. Messpositionen	24
4.2. Überprüfung der Messtechnik	25
4.3. Messposition 1: Temperatur	26
4.3.1. Prüffahrzeug A (MP1: Temperatur)	26
4.3.2. Prüffahrzeug B (MP1: Temperatur)	29
4.3.3. Zusammenfassung Messposition 1: Temperatur	31
4.4. Messposition 2.1: Drehzahl – Erhöhter Leerlauf	33
4.4.1. Erhöhter Leerlauf - 2000 min ⁻¹	33
4.4.2. Erhöhter Leerlauf - 2600 min ⁻¹	34
4.4.3. Freie Beschleunigung	35
4.4.4. Zusammenfassung Messposition 2: Drehzahl	38
4.5. Messposition 3: Stabilisierungsphase	38
4.6. Messposition 4: Beruhigungsphase	40
4.7. Messposition 5: Messphase	41
4.7.1. Prüffahrzeug A (MP5: Messphase)	42
4.7.2. Prüffahrzeug B (MP5: Messphase)	44
4.7.3. Zusammenfassung Messposition 5: Messphase	46
4.8. Messposition Zusatz: Elektrische Verbraucher	46
4.9. Messposition 6: Vergleichsmessung	47
4.10. Zusammenfassung Leerlaufmessung	51
5. Lastmessung	52
5.1. Prüfzyklus	52
5.2. Messung	53
5.2.1. Messgerätevergleich	54

5.2.2. Messergebnisse	56
6. Zusammenfassung und Fazit	57
Literatur	59
Tabellenverzeichnis	60
Abbildungsverzeichnis	61
Anhang (Anlagen)	63

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3WC	3-Wege-Katalysator
AC	Klimaanlage (engl. air conditioning)
AGR	Abgasrückführung
ASM	acceleration simulation mode
AU	Abgasuntersuchung
BDE	Benzin-Direkteinspritzung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPC	Condensation Particle Counting
CSA	Catalytic Stripper
CVS	constant volume sampling
DAH	Drehzahlanhebung
DPF	Dieselpartikelfilter
GPF	Ottopartikelfilter (engl. gasoline particulate filter)
H ₂ O	Wasser
HEPA-Filter	High Efficient Particulate Air - Filter
MP	Messposition
NO _x	Stickstoffoxide
NPET	Nanopartikel-Emissionstester
OBD	On-Board-Diagnose
PM	Partikelmasse (engl. particulate matter)
PN	Partikelanzahl (engl. particulate number)
SiC	Siliziumcarbid
VPR	volatile particle remover

1. Ausgangssituation

In der Europäischen Verordnung (EG) 715/2007 sind die Grenzwerte der Fahrzeugemissionen aufgeführt, welche im Rahmen der Typprüfung im WLTP-Zyklus und der RDE-Fahrt von Fahrzeugen mit Selbstzündungsmotoren (Diesel) und Fahrzeugen mit Fremdzündungsmotoren (Otto) eingehalten werden müssen. Darin eingeschlossen sind auch Grenzwerte für die Partikelmasse (PM) und die Partikelanzahl (PN). Für Fahrzeuge mit Fremdzündmotor 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). Bei der RDE-Fahrt ist aufgrund von Messtoleranzen der portablen Messsysteme (PEMS) ein 1,5-fach höherer PN-Grenzwert zulässig. Um diese Werte einzuhalten, wird von den Fahrzeugherstellern ein Partikelfilter (Dieselpartikelfilter (DPF) / Ottopartikelfilter (engl. Gasoline Particulate Filter = GPF)) im Abgassystem verbaut.

Ein defekter Dieselpartikelfilter kann insbesondere durch die Messung der Partikelanzahlemissionen detektiert werden. Im Rahmen einer Änderung der Richtlinie zur Durchführung der Untersuchung der Abgase (AU-Rili) von Kraftfahrzeugen nach Nummer 6.8.2 der Anlage VIIIa StVZO, wurde eine Partikelanzahlmessung für Kompressionszündungsmotoren im Rahmen der AU zum 01.01.2021 angekündigt (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017). Die geplante Einführung der Partikelanzahlmessung wurde mit der Verlautbarung Nr. 126 im VkB. 16/2020 verschoben und der neue Einföhrungstermin 01.01.2023 mit der Verlautbarung Nr. 86 im VkB. 8/2021 bekannt gegeben.

Die Entwicklung der Messprozedur wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes von der BAST durchgeföhrt, an dem über den VdTÜV e.V. als Hauptauftragnehmer, auch der TÜV Rheinland beteiligt war (Partikelanzahlmessung im Rahmen der Weiterentwicklung der Abgasuntersuchung, 2020).

Die Einhaltung der Partikelemissionen sind aufgrund neuer Technologien zur CO₂ Einsparung auch für Fremdzündmotoren eine technische Herausforderung geworden. Insbesondere Fremdzündmotoren mit Benzin-Direkteinspritzung (BDE) weisen in einigen Betriebszuständen hohe Partikelemissionen auf. Der Entstehungspunkt der Partikelemissionen im Brennraum (innermotorisch) sind Zonen mit einem kraftstoffreichen Gemisch. In dem kurzen Zeitraum zwischen der Einspritzung in den Brennraum und der Verbrennung kann kein vollständig homogenes Gemisch gebildet werden: Kraftstofftropfen benetzen die kühle Zylinderwand. Die verzögerte Verdunstung des an der Wand abgelagerten Kraftstoffes stellt eine wesentliche Quelle für Rußpartikel in Fremdzündmotoren dar. Um mit der BDE Technik, welche durch die Spraykühlung zu einem besseren Wirkungsgrad des Verbrennungsprozesses föhrt, die Euro 6d PN-Grenzwerte in den entsprechenden Typprüfverfahren einhalten zu können, werden Ottopartikelfilter (GPF) verbaut. Die emittierten Emissionen am Abgasendrohr (Tailpipe-Emissionen) sind abhängig von den Rohemissionen und dem Filtereffizienzgrad des GPF.

Aufgrund der Entwicklung, dass auch in modernen Otto-Motor-Abgassystemen (Euro 6d) Partikelfilter verbaut werden, soll in Anlehnung an die bereits bestehende Messprozedur für Dieselfahrzeuge der EURO-Abgasstufe 6 untersucht werden, inwieweit der GPF in Zukunft auf seine Effektivität im Rahmen der AU überprüft werden kann.

1.1. Zielsetzung des Projektes

Ziel des Forschungsprojektes ist es, die für Fahrzeuge mit Kompressionszündungsmotor ausgearbeitete AU-PN-Messprozedur (Partikelanzahlmessung im Rahmen der Weiterentwicklung der Abgasuntersuchung, 2020) auf die Anwendung bei Fremdzündmotoren zu überprüfen und ggf. anzupassen. Darüber hinaus wird geprüft, ob eine Messung mit einer extern aufgebrachten Last eine zielföhrende Messprozedur liefern kann. Die Ergebnisse können als Entscheidungsbasis für die Einföhrung einer PN-Messung für Fremdzündungsmotoren im Rahmen der AU genutzt werden. Die Erkenntnisse, die in diesem Forschungsprojekt gewonnen werden, können einen wichtigen Beitrag zur Ausarbeitung zukünftiger Abgasvorschriften leisten.

1.2. Vorgehensweise

In diesem Forschungsprojekt werden zwei Prüffahrzeuge mit Ottomotor mit Benzindirekteinspritzung und GPF untersucht (*Prüffahrzeug A* und *Prüffahrzeug B*). Die Untersuchungen beinhalten bei beiden Fahrzeugen Leerlaufmessungen und bei einem Fahrzeug (*Prüffahrzeug B*) auch eine Lastmessung. Die Leerlaufmessungen erfolgen bei laufendem Motor und Fahrzeugstillstand und werden in Anlehnung an die zukünftig anzuwendende Diesel-AU-PN-Messprozedur durchgeführt. Die einzelnen Messschritte der Diesel-AU-PN-Messprozedur werden isoliert betrachtet und auf ihre Anwendung an Fremdmotoren ausgewertet. Im Anschluss wird die vorgeschlagene Messprozedur, welche sich aus den einzelnen Messschritten zusammensetzt, ganzheitlich durchgeführt. Die Messung unter Last wird auf einem Rollenprüfstand im Abgaslabor des TÜV Rheinland durchgeführt und simuliert unterschiedliche Fahrzustände.

Eine Partikelmessung ausschließlich am Auspuffendrohr kann theoretisch kein aussagekräftiges Ergebnis zur Filtereffizienz liefern, da die Rohemissionen, welche in den Filter eintreten nicht bekannt sind und somit eine Berechnungsgröße fehlt. Aus diesem Grund werden bei allen Messungen mindestens zwei PN-Messgeräte eingesetzt. Ein Gerät zeichnet die PN-Werte am Auspuffendrohr auf, während die Probenahme des zweiten Gerätes im Abgasstrom vor dem GPF erfolgt. Zusätzlich zu den beschriebenen Messungen der Partikelanzahl wird bei dem *Prüffahrzeug B* die Partikelgrößenverteilung am Auspuffendrohr sowohl während der Leerlaufmessung als bei der Lastmessung gemessen. Diese Messung erfolgt aufgrund der Messtechnik im Abgaslabor.

2. Partikel bei Fremdzündmotoren

2.1. Partikelentstehung

Der Trend hin zu kleinvolumigen Ottomotoren wird als Downsizing bezeichnet. Downsizing führt zu einer Senkung des Kraftstoffverbrauchs und des damit verbundenen CO₂-Ausstoßes bei gleichbleibender Ausgangsleistung. Dies wird durch den häufigeren Betrieb des Motors in einem Bereich des Motorkennfeldes 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 somit um eine „innere Gemischbildung“. Durch die Verdampfung des eingespritzten Kraftstoffes wird die Brennraumtemperatur gesenkt. Das ermöglicht eine größere Zylinderfüllung und ein höheres Verdichtungsverhältnis, wodurch der thermische Wirkungsgrad des Motors erhöht wird.

Im Gegensatz zur Saugrohreinjection 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 der 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).

Die emittierten Partikel werden unterschieden in „**Nucleation Mode**“ und „**Accumulation Mode**“.

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

Accumulation Mode: Überwiegend feste Partikel zwischen 30 nm und 150 nm. Diese entstehen aus einer unvollständigen Verbrennung (Ruß) und kondensierten Flüssigbestandteilen auf deren Oberfläche.

2.2. Partikelminderung

Um die Endrohr-Partikelemissionen aus BDE-Motoren zu reduzieren, stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- Innermotorische Maßnahmen: Der Verbrennungsvorgang wird dahingehend optimiert, dass die Partikelemissionen im Rohabgas reduziert werden
- Nachmotorische Maßnahmen: Mittels eines Partikelfilters werden die Partikel aus dem Rohabgas gefiltert und die Endrohremissionen somit gesenkt.

2.2.1. Innermotorisch

Als wichtigste Ansatzpunkte der innermotorischen Maßnahmen gelten die optimierte Gemischaufbereitung, das brennverfahrensoptimierte Strahlbild der Kraftstoffeinspritzung, die Erhöhung des Einspritzdruckes und die Aufteilung der Einspritzmenge auf mehrere Einspritzvorgänge pro Zündtakt (Mehrfacheinspritzung). (Basshuysen, 2017)

Die Partikelrohremissionen werden insbesondere bei Erhöhung des Einspritzdruckes erheblich reduziert. Beispielhaft sind in Abbildung 2-1 die Ergebnisse einer Untersuchung zum Einfluss des Einspritzdruckes auf die Partikelkonzentration und die Partikelanzahl im Schichtladungsbetrieb eines Ottomotors dargestellt (Schumann, Buri, Kubach, Hall, & Spicher, 2010). Wie zu erkennen ist, sinkt die Gesamtzahl der emittierten

Partikel mit steigendem Einspritzdruck im Bereich von 200 bis 600 bar deutlich ab. Im Bereich oberhalb von 600 bis hin zu 1000 bar ergibt sich nur noch eine geringe Abnahme in den Partikelrohmissionen bei dem untersuchten Betriebspunkt. Zudem sinkt der mittlere Durchmesser der Partikelgrößenverteilung von ca. 80 nm auf circa 40 nm. Dabei ist festzuhalten, dass mit steigendem Einspritzdruck sowohl der mittlere Partikeldurchmesser, als auch die Anzahl der Partikel im gesamten Größenklassenbereich abnimmt. (Basshuysen, 2017)

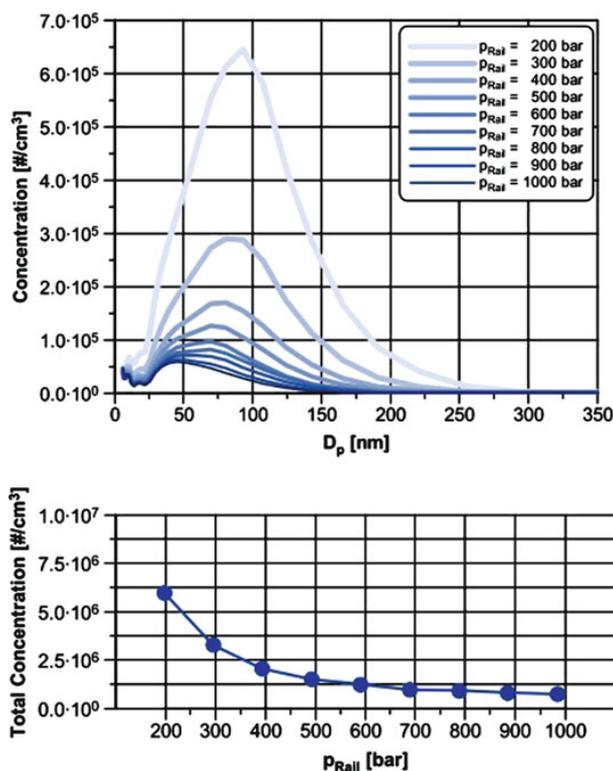


Abbildung 2-1 Partikelgröße und Konzentration über dem Einspritzdruck (Schumann, Buri, Kubach, Hall, & Spicher, 2010)

Für das *Prüffahrzeug A* gibt der Hersteller die folgenden Informationen zur Kraftstoffeinspritzung an: (Volkswagen AG, 2017):

„Diese Maßnahmen reduzieren die Entstehung von Partikeln:

- Eine Erhöhung des Kraftstoffdruckes: Die EA211 Motoren erreichen je nach Variante bereits im Leerlauf einen Druck von ca. 140bar und als Maximaldruck bis ca. 350bar. Dadurch werden die Kraftstofftröpfchen kleiner und sie vergasen schneller.

- Modifizierter Brennraum sowie modifizierte Einspritzventile und Einspritzzeitpunkte“

Abgasrückführung

Die Abgasrückführrate ist definiert als das Verhältnis von rückgeführtem Abgasmassenstrom zu Gesamtmassenstrom im Ansaugtrakt. Die Zielsetzung des Einsatzes der Abgasrückführung (AGR) bei einem Ottomotor weicht von der AGR bei einem Dieselmotor ab.

Beim Dieselmotor wird die AGR mit dem Ziel der Reduzierung der Stickoxidemissionen eingesetzt. Dazu wird eine externe Abgasrückführung verwendet. Bei der externen Abgasrückführung wird Abgas durch eine äußere Zufuhr aus dem Abgassystem in das Ansaugsystem zurückgeführt und durchläuft je nach Bauart noch einen AGR-Kühler. Die Rückführrate beträgt bei modernen Dieselmotoren bis zu 50 %. Die AGR senkt das Sauerstoffangebot, wodurch die NO_x-Entstehung direkt reduziert wird. Gleichzeitig wird durch die geringe Sauerstoffkonzentration die Brenngeschwindigkeit reduziert, was seinerseits die lokalen Spitzentemperaturen begrenzt. Eine weitere Reduktion der lokalen Spitzentemperaturen durch die Abgasrückführung wird durch die höhere spezifische Wärmekapazität der dreiatomigen Gase (CO₂ und H₂O) im rückgeführten Abgas erreicht (Mollenhauer & Tschöke, 2018). Die Herabsetzung der reaktiven Komponenten

im Brennraum führt zu einem Anstieg der Partikelemission, wodurch der rückführbare Abgasanteil begrenzt wird. Dieser gegenläufige Effekt zwischen NO_x -Emission und Partikelemission wird auch als NO_x -Partikel-Trade-Off bezeichnet. Aus diesem Grund hat die AGR bei Diesel-Kfz starken Einfluss auf die Partikelrohmissionen.

Bei der AGR der Ottomotoren gelten prinzipiell die gleichen Zusammenhänge wie bei der AGR für Dieselmotoren. Allerdings können bei einem stöchiometrischen Luft-Kraftstoffverhältnis von $\lambda \approx 1$, die NO_x -Emissionen im 3-Wege-Katalysator reduziert werden. Bei Otto-Fahrzeugen wird die AGR überwiegend zur Teillastentdrosselung und somit zur Kraftstoff- und CO_2 Einsparung eingesetzt. Bei modernen BDE-Motoren wird häufig auf eine externe AGR verzichtet und nur eine interne AGR über variable Ventilsteuerzeiten realisiert.

Die innere Abgasrückhaltung erfolgt mittels Reduzierung der Ventilüberschneidung, also durch Ventilunterschneidung und damit schlechter Ausspülung des Zylinders. Dadurch wird der Restgasanteil, (Abgasanteil), im Zylinder erhöht. Kleinere Rückföhraten haben in der Regel bei $\lambda \approx 1$ nur geringen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Üblich ist eine Abgasrückföhrate zwischen 5 bis 10 Vol.-%. Bei hohen Rückföhraten verschlechtert sich der Wirkungsgrad deutlich. (Basshuysen, 2017). Deshalb muss die Drosselklappe für die Quantitätsregelung der Frischladung weiter geöffnet werden um den herabgesetzten Sauerstoffeintrag zu kompensieren. Durch eine weiter geöffnete Drosselklappe entstehen weniger Strömungsverluste an der Drosselklappe beim Ladungswechsel*, was den Gesamtwirkungsgrad verbessert.

Aufgrund der niedrigen AGR-Raten bei Ottomotoren und der entschärften NO_x -Partikel-Trade-Off Problematik ist der Einfluss der AGR auf die Partikelrohmissionen deutlich geringer zu erwarten als bei Dieselmotoren.

(*Ladungswechsel = Austausch des Arbeitsmediums zwischen den Arbeitstakten des Motors)

2.2.2. Außermotorisch GPF

Die bei der Verbrennung entstandenen Partikel werden durch einen Otto-Partikelfilter geleitet. Der Filter hat eine wabenförmige Struktur mit wechselseitig verschlossenen Kanälen. Dadurch wird das Abgas gezwungen durch die porösen Wandungen zu strömen. Beim Durchströmen der Wände werden die Rußpartikel zunächst durch Diffusion zu den Porenwänden (im Innern der Substratwände) transportiert, wo sie haften bleiben (Tiefenfilterung). 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 Oberflächenfilterung für die folgende Betriebsphase bewirkt. Die aufgebaute Rußschicht wird auch Filterkuchen genannt.

Das Volumen des Partikelfilters entspricht in etwa dem Hubraum des Motors. Der Otto-Partikelfilter ist entweder im Motorraum (motornaher GPF), oder am Unterboden (Unterboden GPF) verbaut. Aufgrund der höheren Abgastemperaturen im Motorraum wird die motornahe Variante angestrebt. Jedoch muss im Motorraum ausreichend Bauraum vorhanden sein, damit der GPF integriert werden kann. 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 (siehe Abbildung 2-2 Skizze eines GPF (Volkswagen AG, 2017)). Die Kombination von GPF und Drei-Wege-Katalysator wird häufig als Vier-Wege-Katalysator vermarktet.

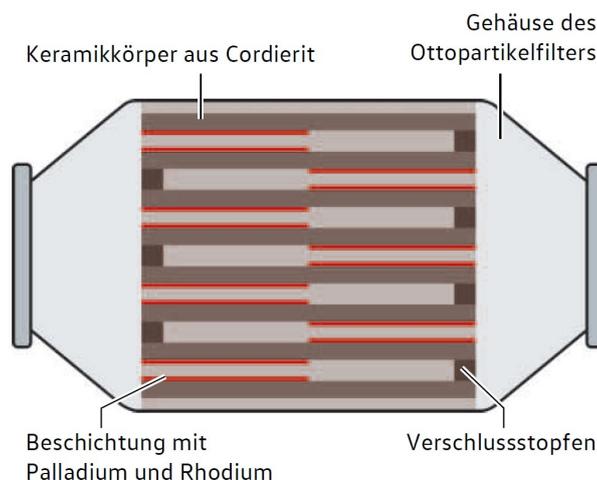


Abbildung 2-2 Skizze eines GPF (Volkswagen AG, 2017)

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. Man spricht deshalb auch von kohlenstoffhaltigen Verbindungen. 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 GPF fest. Flüchtige Stoffe verdampfen sehr schnell und belasten den GPF 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 Kraftstoffes oder Öls sowie der elementaren Zusammensetzung der Betriebsstoffe selbst liegen. (Dageförde, 2015)

Während die eingelagerten Rußpartikel durch die Regeneration verbrennen und den GPF somit verlassen, verbleiben die Aschepartikel auch nach der Regeneration im GPF. Für die Regeneration des GPF sind Abgastemperaturen von über 600°C erforderlich. Diese Abgastemperaturen werden bei Ottomotoren üblicherweise während einer Landstraßen- oder Autobahnfahrt erreicht. Neben der hohen Temperatur ist zur Regeneration auch Sauerstoffüberschuss notwendig, damit der kohlenstoffhaltige Ruß zu CO₂ 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 für eine sehr hohe 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. Die Trägerstruktur wird daher zumeist auf mineralischer Basis, aus dem besonders hitzebeständigen Cordierit, hergestellt. Bei Dieselmotoren verwendet man in der Regel keramische Filter aus Siliziumcarbit (SiC). Die Temperaturänderung führt zu mechanischen Spannungen zwischen dem inneren und dem äußeren Teil des Materials. Aufgrund der starken thermischen Belastung als Folge der Temperaturerhöhung zur aktiven DPF-Regeneration muss die DPF-Beschichtung thermoschockbeständiger sein. Das Abgastemperaturniveau ist beim Ottomotor höher als beim Dieselmotor (Temperaturbeständigkeit), die Regenerationstemperaturen und die erforderliche Thermoschockbeständigkeit jedoch niedriger (Nowak, 2018).

Eine Untersuchung von *Faurecia Clean Mobility* zeigt, dass ein DPF aus SiC Beschädigungen ab einer Rußbelastung von 12-14 g/l aufweist. Bei GPF aus Cordierit zeigen sich bereits ab 5 g/l Schäden. Allerdings wird der GPF aufgrund der kontinuierlichen Regeneration im Regelfall bei einer deutlich geringeren Rußbelastung betrieben. Darüber hinaus ist das Schadensbild zwischen DPF und GPF unterschiedlich. Beim DPF bilden sich aufgrund der thermischen Belastung mechanische Spannungen, welche zu Rissen im Filtermaterial führen. Beim GPF zeigen sich lokale Materialveränderungen durch das Schmelzen aufgrund von Temperaturspitzen an den zugesezten Kanälen. (Faurecia Clean Mobility, Emmanuel Jean, 2017)

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 (asymmetrisch). 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 (symmetrisch). (Faurecia Clean Mobility, Emmanuel Jean, 2017)

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

Anforderung	DPF	GPF
Thermische Belastung	hohe Temperaturtransienten	hohes Temperaturniveau
Gegendruck	Gegendruck mit Rußbeladung	Gegendruck ohne Rußbeladung

Tabelle 2-1 Anforderungen an DPF/GPF

Technologie	DPF	GPF
Material	SiC, TiAl hohe Thermoschockbeständigkeit	Cordierit hohe Temperaturbeständigkeit
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

Tabelle 2-2 Technische Daten zu DPF/GPF

3. Aufbau der Messreihe

3.1. Prüffahrzeuge

3.1.1. Prüffahrzeug A - Audi A3

Als *Prüffahrzeug A* wurde eine Audi A3 Limousine gewählt. In diesem Fahrzeug ist ein Motor der Baureihe EA211 mit einer Nennleistung von 85 kW verbaut. Der GPF ist motornah angeordnet und in den Drei-Wege-Katalysator integriert (siehe Abbildung 3-1). Das verwendete Substratmaterial des GPF ist Cordierit. Der Drei-Wege-Katalysator (3WC) ist mit einem Washcoat versehen, der Palladium- und Rhodium enthält. Der Kraftstoffeinspritzdruck bei EA211 Motoren liegt je nach Variante im Leerlauf bei einem Druck von ca. 140 bar. Als Maximaldruck werden ca. 350 bar angegeben (Volkswagen AG, 2017). Eine Übersicht der technischen Daten des Fahrzeuges ist in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

Hersteller	Audi
Modell	A3 Limousine 30 TFSI
Erstzulassung	01/2019
Hubraum	999 cm ³
Leistung	85 kW bei 5000 min ⁻¹
Drehmoment	200 Nm bei 2000 min ⁻¹
Motor	EA211 CHZD
Abgasnorm	Euro 6 d-Temp
Emissionsschlüssel	36AG
KM-Stand	13.500 km

Tabelle 3-1 Daten Audi A3



Abbildung 3-1 Anordnung von 3WC und GPF im Prüffahrzeug A (Volkswagen AG, 2017)

Über die OBD-Schnittstelle können Informationen aus dem Steuergerät des Fahrzeuges über den Zustand des GPF ausgelesen werden. Die ausgelesenen Daten zu Beginn der Messreihe sind in Tabelle 3-2 zusammengefasst. Die Rußbelastung entspricht einem realen Anwendungsfall nach einer Landstraßen- oder Autobahnfahrt mit Phasen der passiven Regeneration. Da die Messungen im Stand mit wenigen Motorstarts durchgeführt worden sind, ist keine nennenswerte Änderung dieser Werte während der Messreihe zu erwarten. Der Fehlerspeicher des Steuergerätes wurde während der Messungen regelmäßig ausgelesen. Es war zu keinem Zeitpunkt der Messkampagne ein Fehler im Fehlerspeicher des Steuergerätes hinterlegt.

GPF: Rußmasse Berechnet	42 mg
GPF: maximale Rußbelastung	6400 mg
GPF: Ölaschemasse	0 g
GPF: maximale Ölaschemasse	200 g

Tabelle 3-2 Daten aus der OBD zu Beginn der Messreihe

3.1.2. Prüffahrzeug B - Ford Focus

Als *Prüffahrzeug B* wurde ein Ford Focus mit 1,5L EcoBoost Motor ausgewählt. Der 3-Wege-Katalysator ist motornah verbaut. Der GPF sitzt am Unterboden und weist ein Volumen von 1398 cm³ auf (siehe Abbildung 3-2).

Eine Übersicht der technischen Daten des Fahrzeuges ist in Tabelle 3-3 zusammengefasst.

Hersteller	Ford
Modell	Focus Active
Erstzulassung	07/2020
Hubraum	1496 cm ³
Leistung	111 kW bei 6000 min ⁻¹
Drehmoment	240 Nm bei 1600 min ⁻¹
Motor	1.5L EcoBoost
Abgasnorm	Euro 6 d-Temp
Emissionsschlüssel	36DG
KM-Stand	4.500 km

Tabelle 3-3 Daten Ford Focus

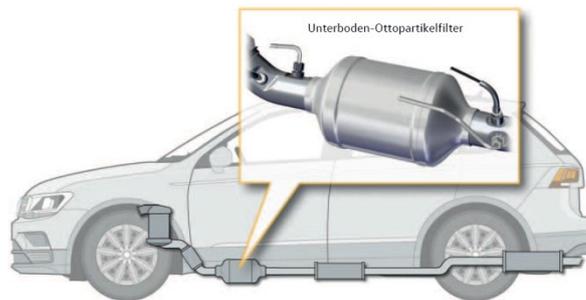


Abbildung 3-2 Anordnung von 3WC und GPF im Prüffahrzeug B (Volkswagen AG, 2019)

Auch bei diesem Fahrzeug wurde zu Beginn der Messreihe über die OBD-Schnittstelle die Filterbeladung ausgelesen. Der ausgelesene Parameter „*Partikelfilter-System-Prozentsatz der maximalen Rußbelastung*“ wurde dort mit 6 % angegeben. Der Fehlerspeicher des Steuergerätes wurde während der Messungen regelmäßig ausgelesen. Es war zu keinem Zeitpunkt der Messkampagne ein Fehler im Fehlerspeicher des Steuergerätes hinterlegt.

3.1.3. Einbau einer Probenahmestelle vor dem GPF

Abgasemissionen, welche direkt im Brennraum entstehen und durch das Auslassventil in die Abgasanlage gelangen, werden Rohemissionen genannt. Die Abgasemissionen, welche das Endrohr am Ende der Abgasanlage verlassen, werden als Tailpipe-Emissionen bezeichnet. Um die Filtereffektivität während der Messprozedur ermitteln zu können muss bekannt sein, wie hoch die PN-Emissionen vor dem GPF (Rohemissionen) sind und welche PN-Anzahl hinter dem GPF emittiert wird (Tailpipe-Emissionen). Deshalb muss eine Messstelle vor dem GPF in die Abgasanlage eingebracht werden, an welcher eine PN-Messsonde mit der Abgasanlage verbunden werden kann.

Um eine Probenahmestelle vor dem GPF zu realisieren, muss ein Zugang zum Abgassystem geschaffen werden. Dazu wurde in beide Prüffahrzeuge ein Edelstahlrohr mit einem Innendurchmesser von 8 mm in die Abgasanlage eingeschweißt (siehe Abbildung 3-3, Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5). Eine Mutter wurde mit einem Klemmring mit Rohrklemmung am eingeschweißten Rohr befestigt. Über die Mutter kann die Messsonde mit der Probenahmestelle verbunden werden. In Abbildung 3-4 ist im Vordergrund die Lambdasonde vor dem motornahen GPF und Drei-Wege-Katalysator des *Prüffahrzeug A* zu erkennen. In

Abbildung 3-5 ist auf der rechten Seite der Temperatursensor hinter dem Unterboden-GPF des *Prüffahrzeug B* zu sehen.



Abbildung 3-3 Edelstahlrohr mit Verbindungsmutter und Klemmring vor dem Einbau

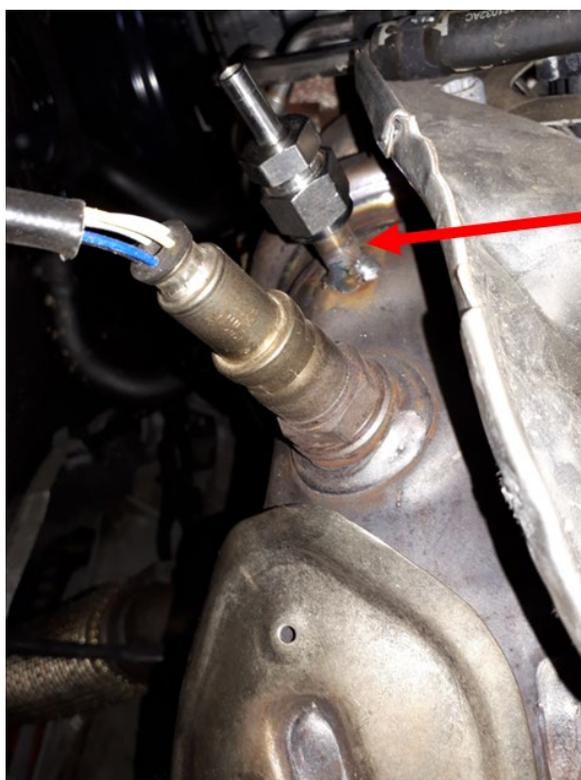


Abbildung 3-4 Edelstahlrohr mit Verbindungsmutter (Pfeil) eingeschweißt im Abgasstrang von Prüffahrzeug A



Abbildung 3-5 Edelstahlrohr mit Verbindungsmutter (Pfeil), eingeschweißt im Abgasstrang von Prüffahrzeug B

3.2. Messtechnik

Bei allen durchgeführten Messungen in diesem Projekt waren die portablen Messgeräte, „*TSI NPET's*“, im Einsatz. Bei der Geräte-Vergleichsmessung sowie bei den Messungen unter Last auf dem Rollenprüfstand kam zusätzlich die Partikelmessetechnik des *Cambustion DMS500* und der *AVL PN-Counter* hinzu.

3.2.1. TSI NPET 3795-(HC) und TSI NPET 3795

Als portable Messtechnik wurde der TSI Nanopartikel-Emissionstester (NPET) Modell 3795 sowie das Modell 3795-HC verwendet. Das TSI NPET-(HC) ist ein tragbares Instrument, das die Partikelanzahlkonzentration der festen (nicht-flüchtigen) Partikel nach dem CPC-Messverfahren (Condensation Particle Counting) erfasst. Das Modell 3795 wurde bereits zur Validierung der Diesel-AU-PN-Messprozedur verwendet (Partikelanzahlmessung im Rahmen der Weiterentwicklung der Abgasuntersuchung, 2020).

Das Modell 3795-HC (High Concentration) Gerät entspricht einem modifizierten NPET 3795. Aufgrund der höheren Anforderung bezüglich Temperatur und flüchtiger Partikel an das Messgerät bei einer Messung im Rohabgas, wurde die HC-Variante des NPET's für die Messungen vor GPF verwendet. Bei den Messungen an *Prüffahrzeug A* wurde auch ein *HC-NPET* am Endrohr verwendet (siehe Abbildung 3-6). Bei den Messungen an *Prüffahrzeug B* kam am Endrohr ein *NPET* zum Einsatz (siehe Abbildung 3-7).

Die Geräte besitzen eine Probenahmesonde mit integrierter Verdünnung von 1:10. Zur Probensonde führen zwei Leitungen, von welcher eine die konditionierte Verdünnungsluft zur integrierten Verdünnungsstufe führt. Die Verdünnungsluftkonditionierung erfolgt mittels Wasserabscheider, Siliziumdioxid-Trockner und HEPA-Filtern. Ein eingebauter katalytischer Stripper, der bei einer Temperatur von 350 °C arbeitet, dient zur Entfernung von volatilen Partikeln. Die Stromversorgung erfolgt aus dem Netz mit 220 V. Aufgrund der Leistungsanforderung der Heizung liegt die elektrische Leistung bei 100 bis 200 W. Vor dem Gerät sitzt ein 1 µm Zyklon als Vorkonditionierer mit integrierter Wasserfalle. Die Partikelanzahlkonzentration wird mit einem mit Isopropanol betriebenen CPC gemessen. Der PN-Messbereich des *NPET* liegt zwischen 1.000 cm⁻³ und 5.000.000 cm⁻³ (*HC-NPET* 2.000 cm⁻³ und 100.000.000 cm⁻³). Es werden von beiden Geräten Feststoffpartikel in einem Größenbereich von 23 nm bis 1 µm erfasst. Der Wert bei dem 50% Zählfizienz anliegen wird auch als Roll-Off mit d₅₀ bezeichnet. Das *NPET* und das *HC-NPET* weisen ein Roll-Off von d₅₀ = 23 nm auf. Die Messgeräte können bei Umgebungsbedingungen von -10°C bis 40°C und bei Höhen von 0 - 3000 m über NN betrieben werden. Die Aufwärmzeit für den katalytischen Stripper beträgt nach dem Einschalten des Gerätes ca. 10 Minuten. Die Messwerte werden mit einer Auflösung von 1Hz

aufgezeichnet. Die Datenblätter und die Kalibrierprotokolle der eingesetzten *TSI NPET3795(-HC)* sind im Anhang zu finden.



Abbildung 3-6 Skizze zur Anordnung/Aufbau der PN-Messgeräte und OBD-Diagnose (Prüffahrzeug A)

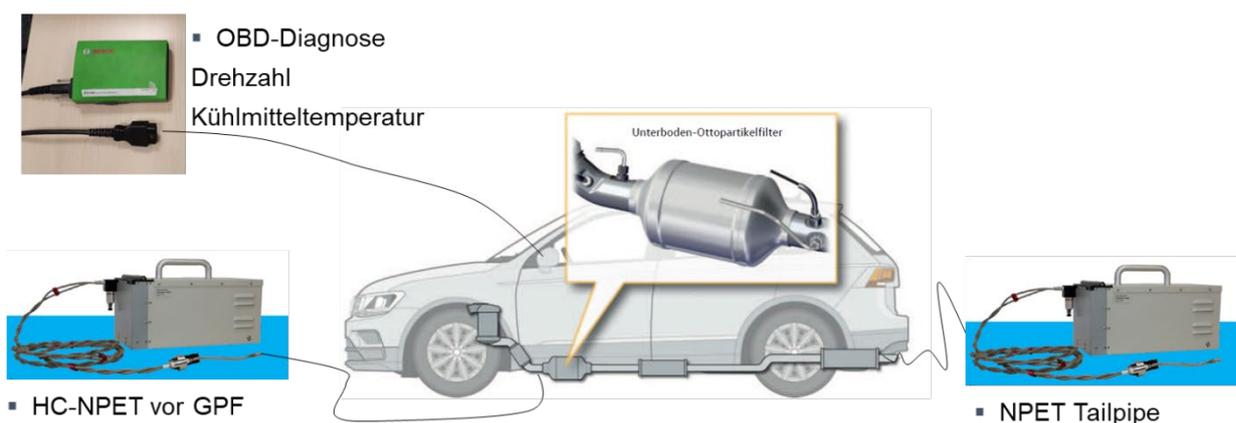


Abbildung 3-7 Skizze zur Anordnung/Aufbau der PN-Messgeräte und OBD-Diagnose (Prüffahrzeug B)

Für die Tailpipe-Messung konnte die Entnahmesonde etwa 12 cm in das Endrohr eingeführt und dort zur Befestigung geklemmt werden (siehe Abbildung 3-8).



Abbildung 3-8 Entnahmesonde im Abgasendrohr

Für die Probenahme vor GPF musste ein Druckminderer eingesetzt werden. Das Abgas strömt unter Druck in den Partikelfilter. Somit herrscht an der Probenahmestelle ein Überdruck. Das *HC-NPET* ist nicht dafür ausgelegt im Überdruckbereich zu Messen. Die Pumpe des *HC-NPET* saugt das Messgas an, verdünnt dieses mit HEPA-gefilterter Luft und leitet das verdünnte Messgas weiter ins Gerät. Der Überdruck muss gesenkt werden, um die benötigten Druckverhältnisse vor dem Messgerät sicherzustellen. Zur Druckminderung wurde eine Düse (Orifice), welche der Hersteller für dieses Gerät lieferte, eingesetzt (siehe Abbildung 3-9). Hinter der Düse folgt ein Impaktor zur Abscheidung grober Partikel. Damit das Gerät und die Pumpe auch ohne Überdruck (Motor ausgeschaltet) eingeschaltet bleiben kann, wird ein T-Stück mit HEPA-Filter eingesetzt. Bei ausgeschaltetem Motor wird dann überwiegend HEPA-gefilterte Umgebungsluft vom Messgerät angesaugt. Hinter dieser druckmindernden Vorrichtung wird die Entnahmesonde des *HC-NPET* über eine Schraubverbindung angeschlossen. In Abbildung 3-9 links ist die Zeichnung der Druckminderung zu sehen und in Abbildung 3-9 rechts die Umsetzung. Abbildung 3-10 zeigt die Druckminderungseinrichtung im verbundenen Zustand mit dem eingeschweißten Entnahmerohr hinter dem Turbolader von *Prüffahrzeug A* (vgl. Kapitel 3.1) und in Abbildung 3-11 im eingebauten Zustand am Unterboden-GPF von *Prüffahrzeug B*.

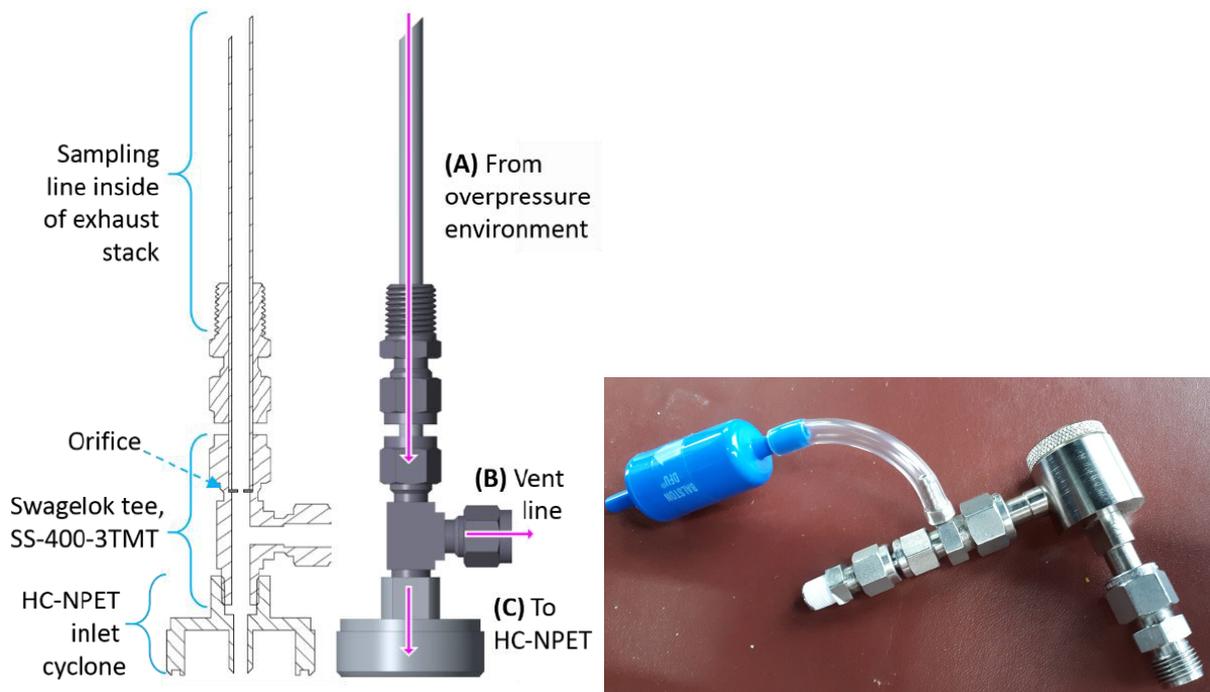


Abbildung 3-9 Druckminderung – (Links) Zeichnung und Prinzip – (Rechts) Umsetzung



Abbildung 3-10 Druckminderer eingebaut in Prüffahrzeug A und mit Entnahmerohr und Entnahmesonde verbunden



Abbildung 3-11 Druckminderer eingebaut in Prüffahrzeug B und mit Entnahmerohr und Entnahmesonde verbunden

3.2.2. Horiba Rollenprüfstand

Die abschließende Leerlaufmessung, sowie die Lastmessung von *Prüffahrzeug B*, wurde auf dem Rollenprüfstand im Abgaslabor des TÜV Rheinland in Lamsheim durchgeführt. Der Hersteller des Prüfstandes ist die Firma Horiba. Das Abgaslabor inklusive Rollenprüfstand ist von der Deutsche 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 Abbildung 3-12 wird das *Prüffahrzeug B* auf dem Rollenprüfstand im Abgaslabor Lamsheim gezeigt. Auf dem Rollenprüfstand kam neben den TSI NPET's der AVL-PN-Counter und das Cambustion DMS500 zum Einsatz.



Abbildung 3-12: Prüffahrzeug B auf dem Rollenprüfstand im Abgaslabor

3.2.3. AVL-PN-Counter (Advanced)

Der *AVL-PN-Counter (Advanced)* ist das Partikelzählgerät, welches bei den Messungen zur Typprüfung 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 3-4 aufgelistet. Partikelzählgeräte für die Typgenehmigung weisen einen Roll-Off von $d_{50} = 23 \text{ nm}$ auf. Das bedeutet, es werden fast ausschließlich Partikel des „Accumulation Mode“ erfasst.

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

Tabelle 3-4 Vorgaben an die Effizienz der Zählfunktion (VO (EU) 2017/1151)

3.2.4. 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 $d_{50} = 10$ nm auf und erfasst Partikel bis zu einer Größe von 5 nm. Das Gerät kann somit auch kleine Partikel („Nucleation Mode“) erfassen, welche mit dem *AVL PN-Counter* oder dem *TSI NPET(-HC)* 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 (siehe Abbildung 3-13). 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 der 22 Elektronenringe 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, wie bei allen anderen verwendeten Messgeräten auch, nur Feststoffpartikel analysiert.

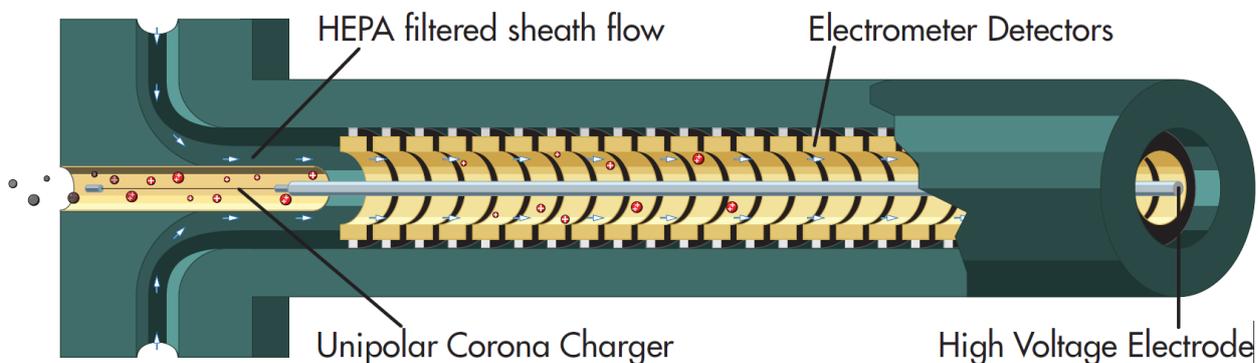


Abbildung 3-13 Darstellung vom Messprinzip des DMS500 (Cambustion Ltd)

4. Leerlaufmessung

4.1. Messpositionen

Die Diesel-AU-PN-Messprozedur sieht die Messschritte in Tabelle 4-1 und Abbildung 4-1 vor. Die einzelnen Messschritte der Diesel-AU-PN-Messprozedur werden isoliert betrachtet und auf Ihre Anwendung an Fremdzündmotoren ausgewertet. Im Anschluss wird die Messprozedur, welche sich aus den einzelnen Messschritten zusammensetzt, ganzheitlich durchgeführt. Die Messschritte werden in einzelnen Messpositionen (MP) bewertet. Eine Übersicht der Messpositionen ist Tabelle 4-2 zu entnehmen.

	Messschritt	Zeit
1	Stabilisierungsphase (Leerlauf)	15 s
2	Drehzahlanhebung auf $n_{\text{Mot}} = 1000 \text{ min}^{-1}$ über Leerlauf innerhalb von 5 s	$\approx 10 \text{ s}$
3	Beruhigungsphase (Leerlauf)	30 s
4	Messphase (Mittelwert aus je 3 x 30 Sekunden im Leerlauf) Oder „Fast Pass“ nach 30 s wenn $\text{PN} < 50.000 \text{ cm}^{-3}$	$3 * 30 \text{ s} = 90 \text{ s}$

Tabelle 4-1 Messprozedur Dieselfahrzeug

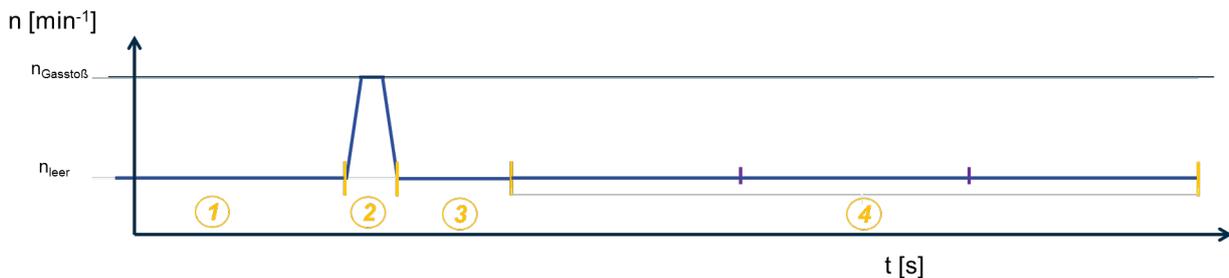


Abbildung 4-1 Messschritte der Diesel-AU-PN-Messprozedur

Messposition	Untersuchungsgegenstand
MP1	Temperatur (Konditionierung)
MP2	Prüfdrehzahl (Drehzahldynamik)
MP3	Stabilisationsphase
MP4	Beruhigungsphase
MP5	Messphase
MP6	Vergleichsmessung (PN-Geräte)
MP Zusatz	Elektrische Verbraucher

Tabelle 4-2 Messpositionen (MP)

An *Prüffahrzeug A* werden die Messpositionen eins bis fünf und die zusätzliche Messposition „elektrische Verbraucher“ durchgeführt. Eine Vergleichsmessung mit weiteren Messgeräten, welche auch Partikel kleiner 23 nm erfassen (MP6), wird nur bei *Prüffahrzeug B* durchgeführt.

Jede Messposition wurde mit dem *Prüffahrzeug A* dreimal-, und mit dem *Prüffahrzeug B* einmal gemessen. Bei den Messungen des *Prüffahrzeug A* lagen die PN-Werte, welche im Endrohr des Fahrzeuges (Post GPF) gemessen wurden, permanent unter 8.000 cm^{-3} und überwiegend unter dem Messbereich der Messtechnik von 2.000 cm^{-3} . In Abbildung 4-2 ist ein exemplarischer Verlauf der PN-Konzentration während einer Messung aufgetragen. Im Zeitraum zwischen 300 bis 700 Sekunden befindet sich die Messsonde im Endrohr des Fahrzeuges. Während dieser Zeit und während der HEPA-Messungen (gestrichelter Kreis)

vor und nach der Fahrzeugmessung ist die aufgezeichnete PN-Konzentration nahe 0 cm^{-3} . Dieser charakteristische „Post-GPF-Verlauf“ wurde bei *Prüffahrzeug A* und mit wenigen Ausnahmen bei *Prüffahrzeug B* bei allen durchgeführten Messungen beobachtet, unabhängig von der PN-Konzentration im Rohabgas (Pre GPF), der Motordrehzahl oder der Kühlmitteltemperatur. Auf den Messwert „PN-Post-GPF“ wird deshalb in den folgenden Ausführungen zu den einzelnen Messpositionen nur bei Abweichung dieser Beobachtung eingegangen.

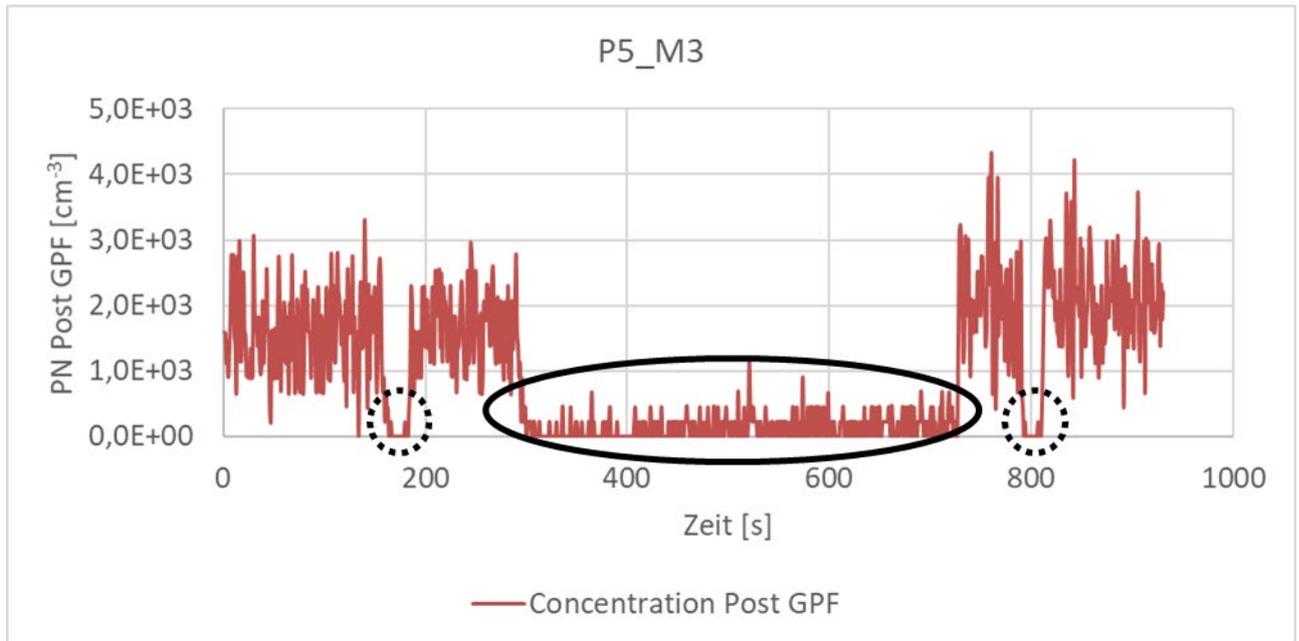


Abbildung 4-2 Exemplarischer PN-Verlauf Post GPF

4.2. Überprüfung der Messtechnik

Vor jeder Messung und nach jeder Messung wurden die ausgegebenen Messwerte der beiden Messgeräte mit dem Aufstecken eines HEPA-Filters auf Funktionalität überprüft. Bei aufgestecktem HEPA-Filter muss ein Messgerät, welches ordnungsgemäß funktioniert, einen Wert $<2000 \text{ cm}^{-3}$ anzeigen. In den meisten Fällen wird hier vom Gerät der Wert 0 cm^{-3} ausgegeben. In Abbildung 4-3 sind die PN-Messwerte beider Messgeräte aufgetragen. Bis 25 Sekunden messen beide Geräte die Partikelkonzentration in der Umgebungsluft von ca. 1.000 cm^{-3} bis 3.000 cm^{-3} . Im Anschluss folgt der HEPA-Test an dem Gerät, welches im Fahrzeug vor dem Partikelfilter misst (Pre GPF). Der Anzeigewert sinkt auf 0 cm^{-3} ab. Während des Einbaus der Messtechnik in die Abgasanlage sinkt der PN-Wert ab. Dies kann bei nicht laufendem Motor auf den Überdruck-HEPA-Filter zurückgeführt werden (vgl. Kapitel 3.2.1). Im Anschluss folgt die HEPA-Messung an dem Messgerät, welches am Endrohr eingesetzt wird. Der Messwert sinkt auf unter 2000 cm^{-3} ab.

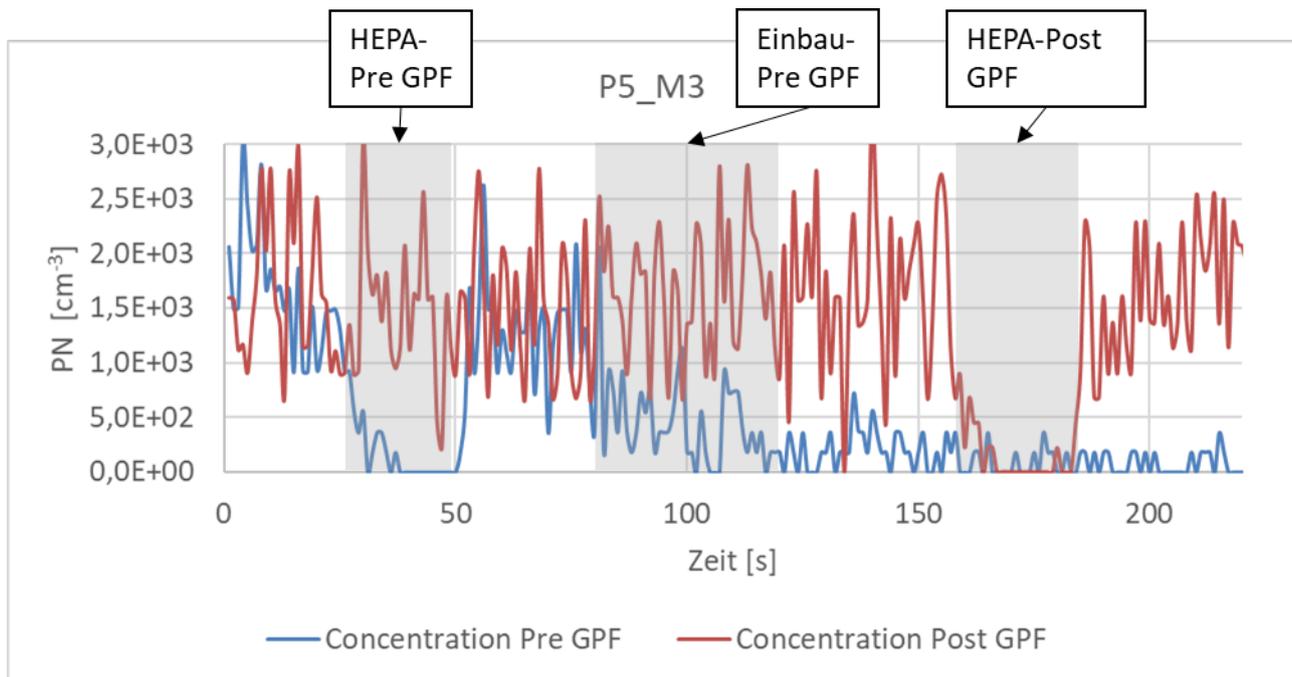


Abbildung 4-3 PN-Messwerte während eines HEPA-Filter Test

4.3. Messposition 1: Temperatur

In Messposition 1 (MP1) wird der Einfluss der (Kühlmittel-) Temperatur auf die Partikelanzahl im Leerlauf untersucht. Als Kaltstart ist hier ein Motorstart definiert, bei den die Kühlmitteltemperatur in etwa der Umgebungstemperatur von 20°C entspricht und der Motor mindestens 12 Stunden aus war. Der Warmstart wird mit einer Mindestkühlmitteltemperatur von 60°C definiert. Diese Temperatur entspricht der Mindesttemperatur für die zukünftige PN-Messung bei Dieselfahrzeugen. Alle Messpositionen außer die Kaltstartmessung wurden im Warmstart durchgeführt.

4.3.1. Prüffahrzeug A (MP1: Temperatur)

Kaltstart:

Mit dem *Prüffahrzeug A* wurden insgesamt drei Messungen im Kaltstart durchgeführt. Nach dem Starten des Motors ist die Leerlaufdrehzahl im Gegensatz zu einem aufgewärmten Motor erhöht. Der Wert beträgt ca. 1400 min⁻¹. Nach ca. 60 Sekunden sinkt die Drehzahl auf den Sollwert des Herstellers aus der Typgenehmigung von 950 min⁻¹ +/- 100 min⁻¹ ab. Der „Drehzahlüberhang“ bei einem Kaltstart beträgt bei dieser Messung somit ca. 60 Sekunden.

Unmittelbar nach Starten des Motors ist ein deutlicher Anstieg der PN-Rohemissionen zu beobachten. Dieser Peak sinkt nach ca. 60 Sekunden ab. Das Fahrzeug lief in „Messung 1“ für fünf Minuten und in „Messung 2“ und „Messung 3“ für jeweils acht Minuten im Leerlauf. Die Ergebnisse und Verläufe konnten in jeder durchgeführten Messung der MP1 reproduziert werden. In Abbildung 4-4 ist der Verlauf der Motordrehzahl und die PN-Rohemissionen nach einem Kaltstart (*Messung 2*) aufgetragen.

Abbildung 4-5 zeigt, dass die PN-Rohemissionen mit ansteigender Motortemperatur geringer werden. Von etwa 200.000 cm⁻³ sinkt der Wert über die Zeit auf 50.000 cm⁻³ am Ende der Messung, bei knapp 60 °C Kühlmitteltemperatur.

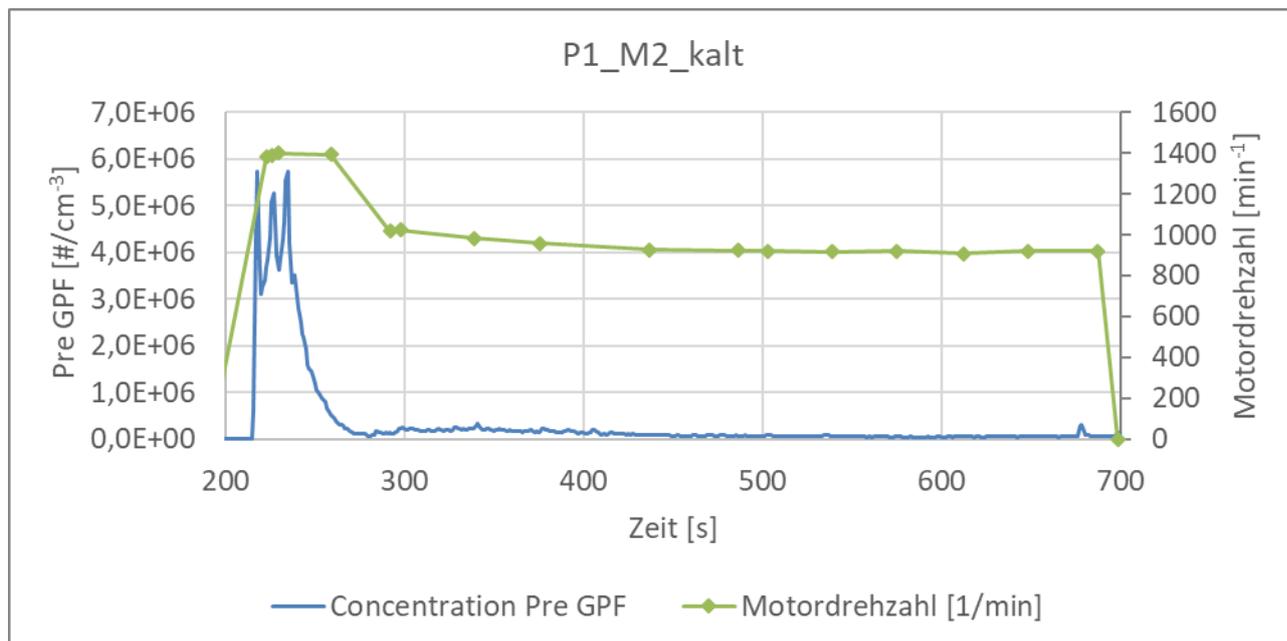


Abbildung 4-4 Kaltstart „Messung 2“: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug A)

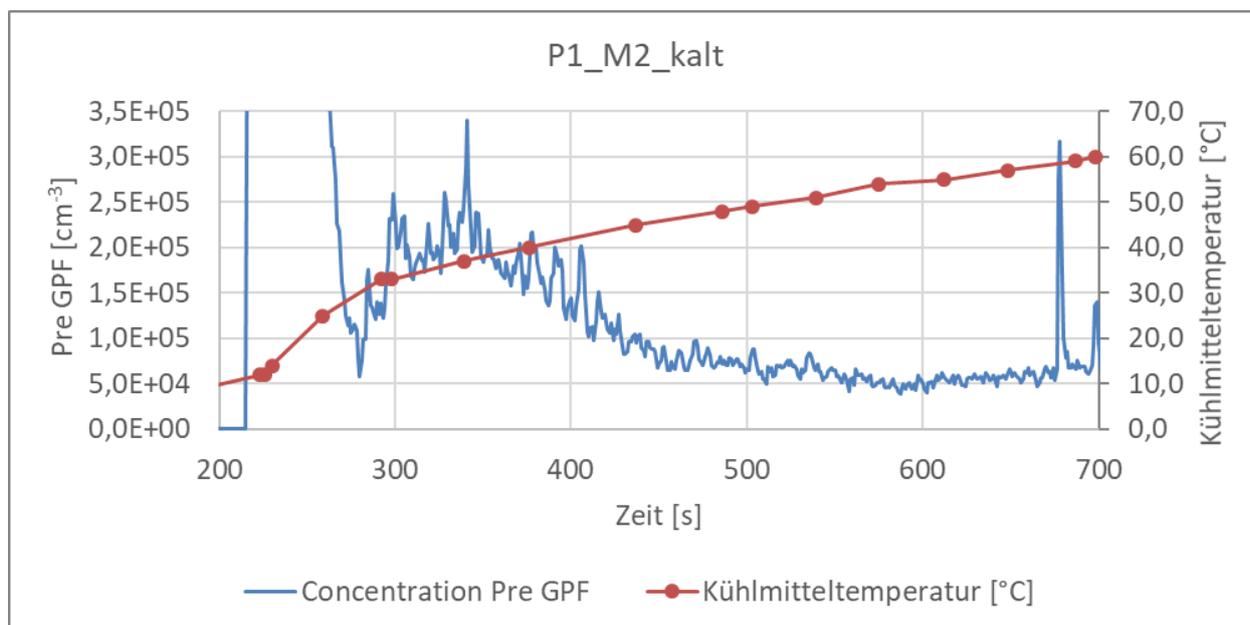


Abbildung 4-5 Kaltstart Messung 2: Ansteigende Kühlmitteltemperatur – sinkende PN Roh-Konzentration (Prüffahrzeug A)

Warmstart:

Beim Warmstart lief der Motor des *Prüffahrzeug A* in „Messung 1“ für vier Minuten und in „Messung 2“ und „Messung 3“ für jeweils sechs Minuten im Leerlauf. In Abbildung 4-6 ist erkennbar, dass die erhöhte Drehzahl nach dem Motorstart („Drehzahlüberhang“) bereits nach 10 Sekunden auf die Standard-Leerlaufdrehzahl eingeregelt wird. Dieses Regelverhalten unterscheidet sich deutlich vom Kaltstart.

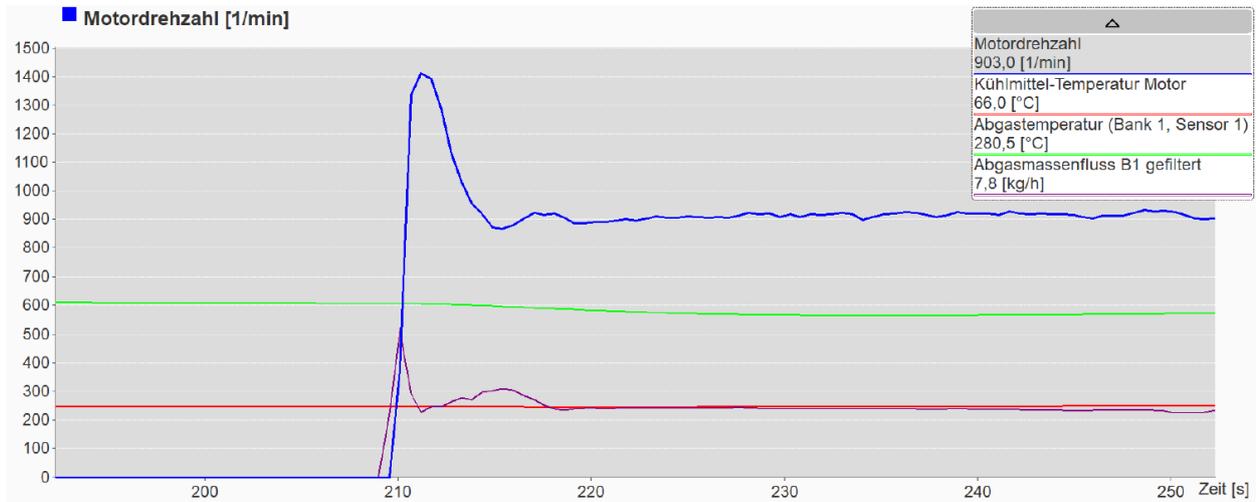


Abbildung 4-6 Warmstart Messung 2: Drehzahlüberhang < 10 Sekunden (Prüffahrzeug A)

In Abbildung 4-7 ist der Verlauf der Motordrehzahl und die PN-Rohemissionen nach einem Warmstart (*Messung 2*) aufgetragen. Mit der schnelleren Drehzahländerung springt auch die PN-Emission nach dem „warmen“ Motorstart schneller zurück auf einen Wert von $2E+04 \text{ cm}^{-3}$ bis $4E+04 \text{ cm}^{-3}$ als bei einem Kaltstart. Abbildung 4-8 zeigt ein ähnliches Verhalten zu der Kaltstartmessung. Die PN-Rohemissionen werden mit steigender Kühlmitteltemperatur geringer. Nach dem PN-Peak aufgrund des Motorstarts pendelt sich zu Beginn bei einer Kühlwassertemperatur von 65 °C der Wert bei 60.000 cm^{-3} ein. Nach sechs Minuten im Leerlauf ist die Kühlmitteltemperatur auf 80 °C angestiegen und der PN-Wert liegt im Bereich von 30.000 cm^{-3} .

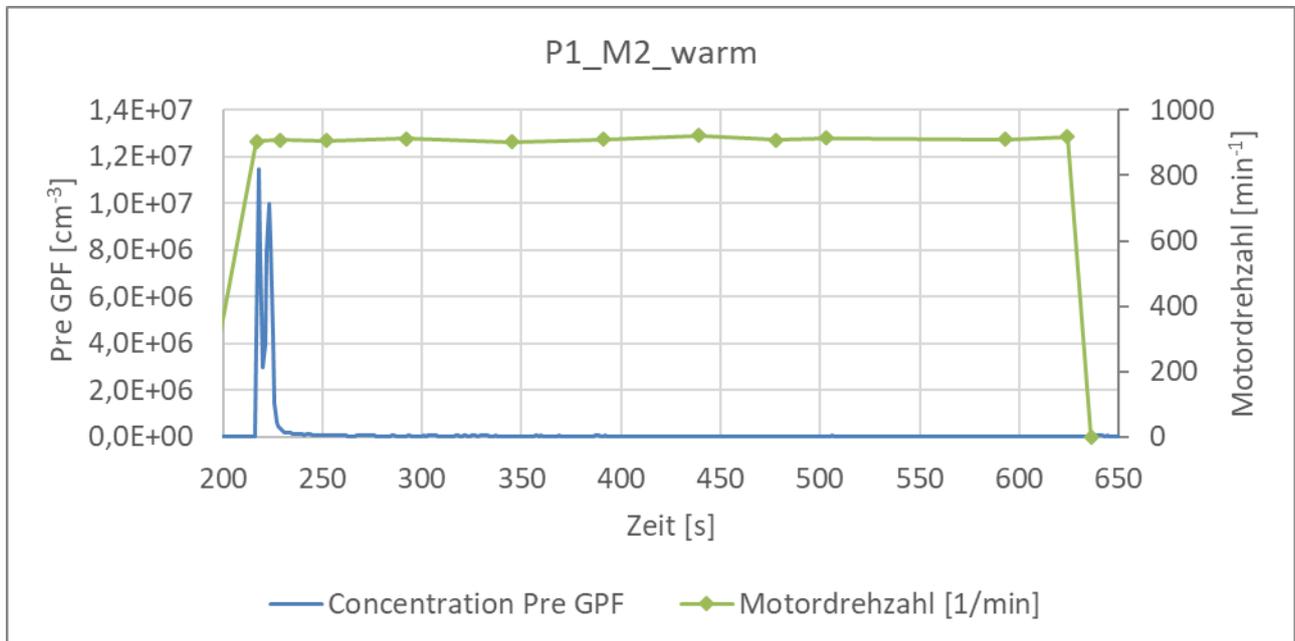


Abbildung 4-7 Warmstart „Messung 2“: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug A)

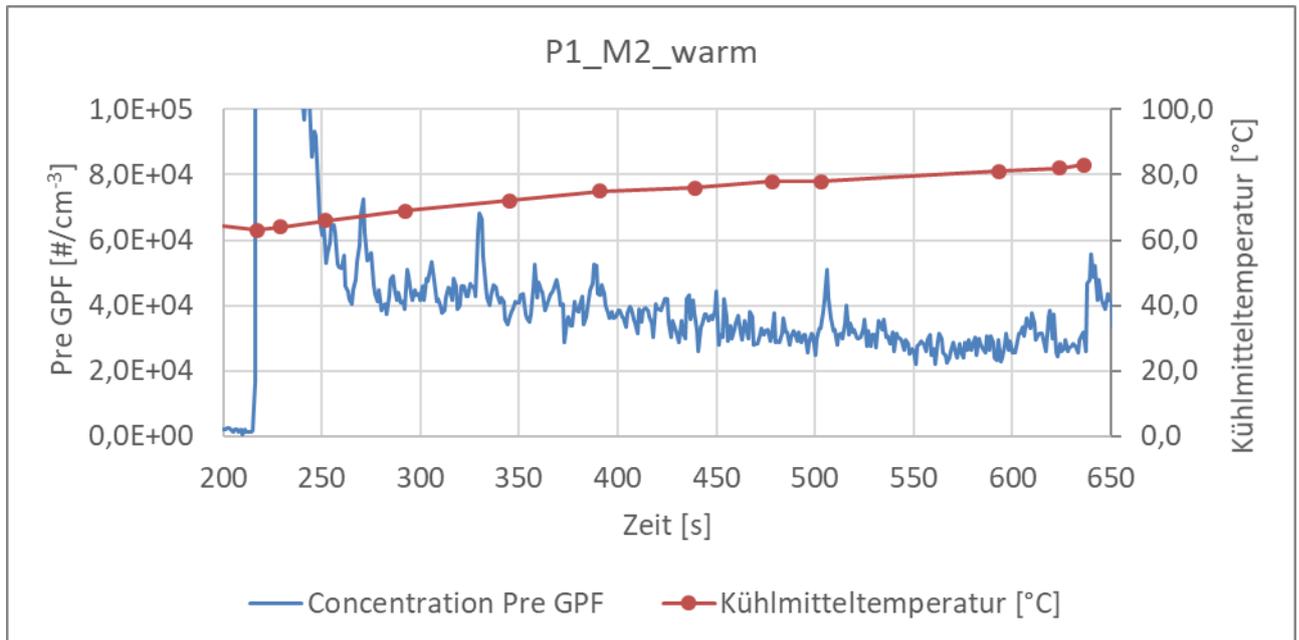


Abbildung 4-8 Warmstart Messung 2: Ansteigende Kühlmitteltemperatur – sinkende PN Roh-Konzentration (Prüffahrzeug A)

4.3.2. Prüffahrzeug B (MP1: Temperatur)

Kaltstart:

Nach dem Starten des kalten Motors beträgt die Leerlaufdrehzahl ca. 1240 min^{-1} . Nach ca. 30 Sekunden sinkt die Drehzahl auf etwa 1000 min^{-1} ab (siehe Abbildung 4-9). Die in den Typgenehmigungsunterlagen ausgewiesene Leerlaufdrehzahl von $860 \text{ min}^{-1} \pm 100 \text{ min}^{-1}$ wird etwa 160 Sekunden nach Motorstart eingeregelt.

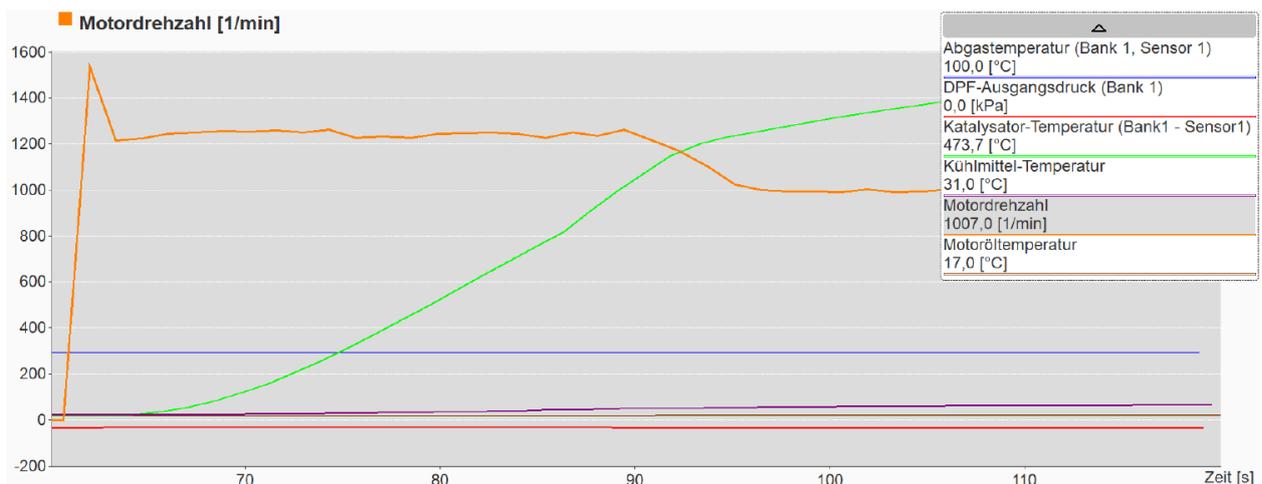


Abbildung 4-9 Kaltstart Messung: Erhöhte Drehzahl nach Startvorgang (Prüffahrzeug B)

In Abbildung 4-10 ist der Verlauf der Motordrehzahl und die PN-Rohemissionen nach dem Kaltstart aufgetragen. Unmittelbar nach Starten des Motors ist ein deutlicher Anstieg der PN-Rohemissionen auf $2,0\text{E}+07 \text{ cm}^{-3}$ zu beobachten. Der Messwert reduziert sich nach ca. 60 Sekunden auf einen Wert zwischen $2,0\text{E}+06 \text{ cm}^{-3}$ bis $3,0\text{E}+06 \text{ cm}^{-3}$. Etwa 220 Sekunden nach Motorstart sinken die PN-Rohemissionen schlagartig auf unter 10.000 cm^{-3} . Der Übergang ist akustisch am Fahrzeug wahrnehmbar. Es ist anzunehmen, dass die Motorsteuerung an diesem „Umschaltpunkt“ verschiedene Motorparameter wie z.B. die Einspritzung verändert um den Motor schneller auf Betriebstemperatur zu bringen. Das Fahrzeug lief nach dem

Kaltstart für zwölf Minuten im Leerlauf. Die Kühlmitteltemperatur stieg über den Zeitraum von 18°C auf 60°C. Abbildung 4-11 zeigt, den PN-Verlauf der Rohemissionen und der Tailpipe-Emissionen. Die Verläufe sind ähnlich. Der Tailpipe-Messwert ist jedoch um ca. zwei Zehnerpotenzen geringer. Der akustisch wahrnehmbare Umschaltzeitpunkt der Motorsteuerung, in dem Diagramm bei 250 Sekunden erkennbar, ab welchem die PN-Rohemissionen absinken, spiegelt sich auch in den Tailpipe-Emissionen deutlich wieder.

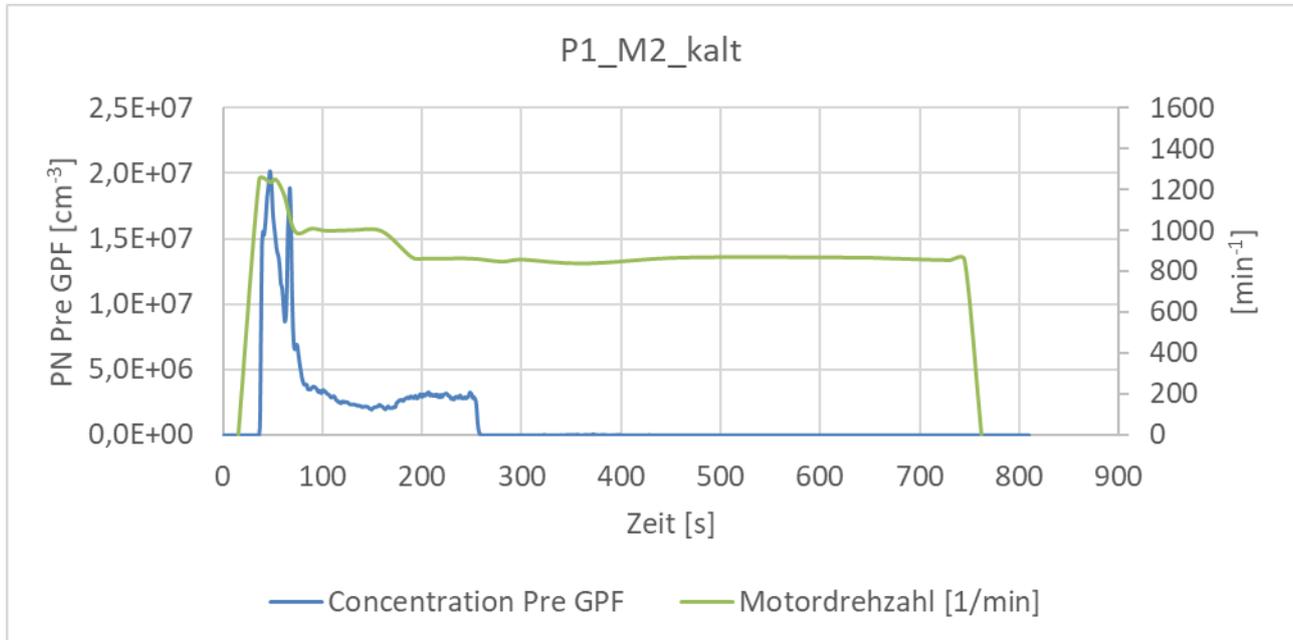


Abbildung 4-10 Kaltstart: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug B)

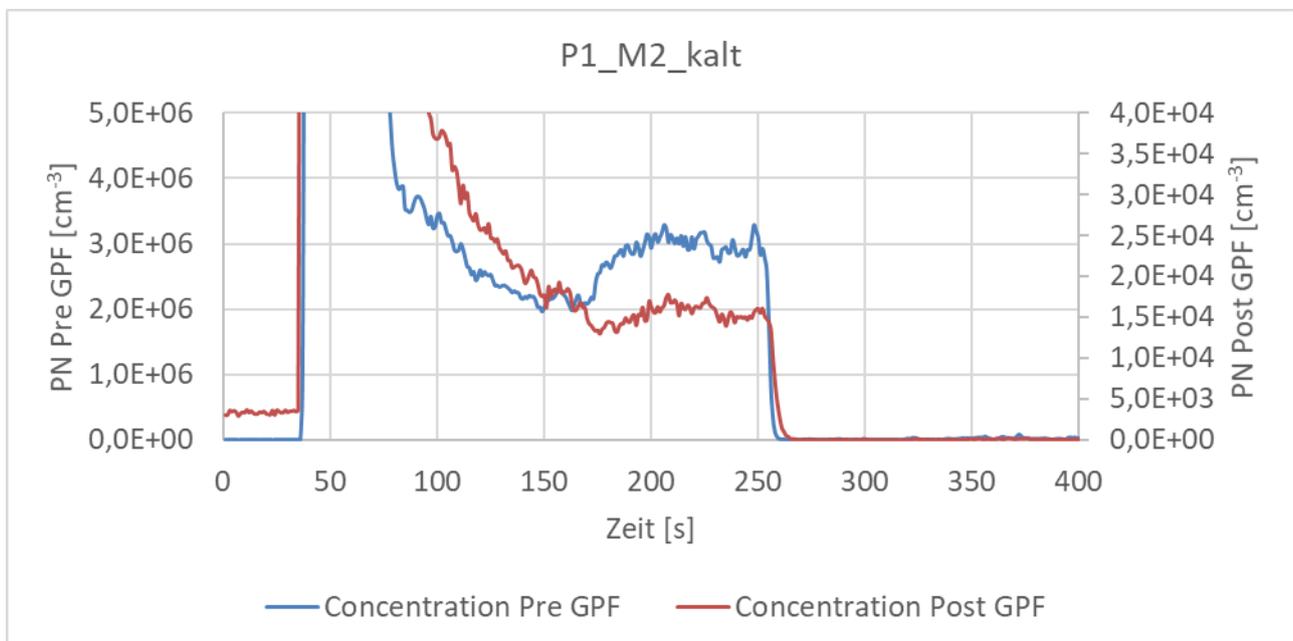


Abbildung 4-11 Kaltstart: PN Konzentration vor und nach GPF (Prüffahrzeug B)

Warmstart:

Das Fahrzeug wurde mit 60°C Kühlmitteltemperatur gestartet und lief anschließend für sechs Minuten im Leerlauf (siehe Abbildung 4-12). Die erhöhte Drehzahl nach dem Motorstart („Drehzahlüberhang“) wurde nach 30 Sekunden auf die Standard-Leerlaufdrehzahl eingeregelt. Dieses Regelverhalten unterscheidet sich vom Kaltstart. Die PN-Rohemissionen weisen beim Motorstart einen Peak von maximal 7,3E+06 cm⁻³

³ auf. Nach etwa 15 Sekunden fällt der Wert auf unter 10.000 cm^{-3} und bleibt für den Rest der Messung konstant auf diesem Niveau.

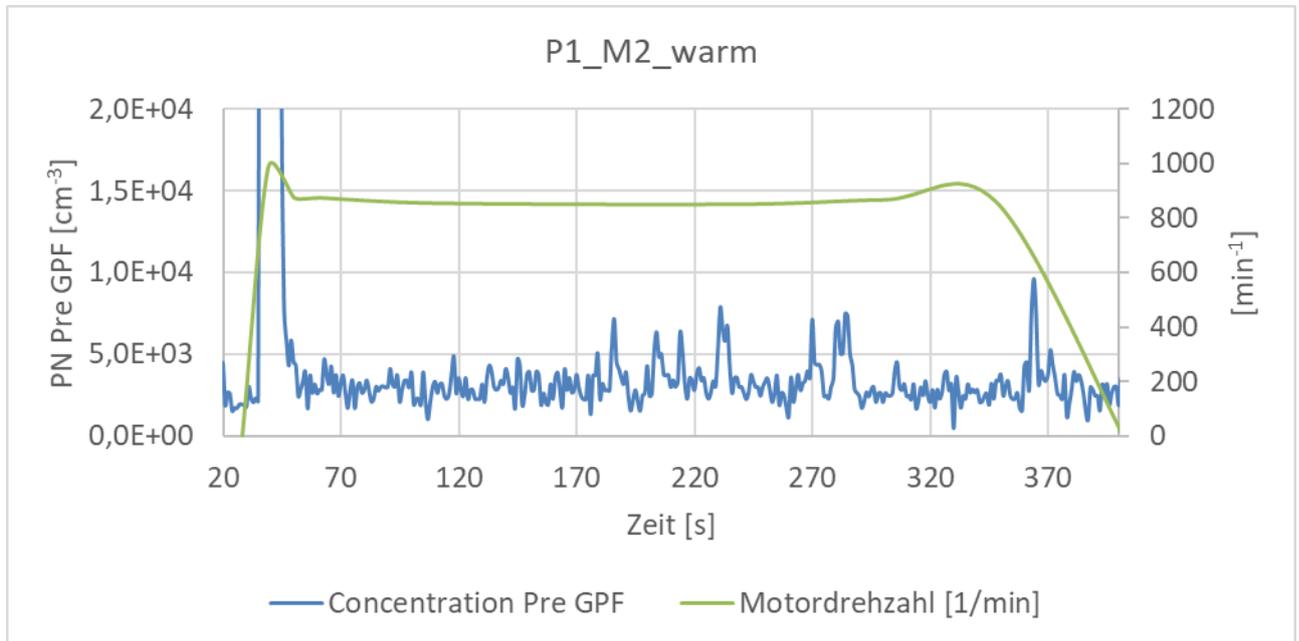


Abbildung 4-12 Warmstart: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug B)

4.3.3. Zusammenfassung Messposition 1: Temperatur

Um den hohen Peak beim Starten des Motors nicht mit in die Bewertung der Messergebnisse mit einzubeziehen, beginnt die Auswertung der Messwerte 60 Sekunden nach Start des Motors bis zum Ende der Messung. Bei den Kaltstartmessungen von *Prüffahrzeug A* beträgt der Auswertzeitraum bei „Messung 1“ vier Minuten und bei „Messung 2“ und „Messung 3“ sieben Minuten. Bei *Prüffahrzeug B* beträgt die Auswertzeit fünf Minuten.

Die Dauer des Auswertzeitraums ist bei *Prüffahrzeug A* ab 60 Sekunden nach Motorstart unerheblich, da sich die Messwerte nicht mehr nennenswert verändern. Bei *Prüffahrzeug B* werden vor dem „Umschalt-punkt“ deutlich höhere PN-Emissionen gemessen, nach dem Umschalt-punkt allerdings deutlich geringere PN-Emissionen, gegenüber *Prüffahrzeug A*.

Nach dem Starten des Motors werden bei beiden Fahrzeugen, sowohl bei kaltem, als auch bei aufgewärmtem Motor kurzzeitig hohe Peaks zwischen $6,0E+06 \text{ cm}^{-3}$ bis $2,0E+07 \text{ cm}^{-3}$ gemessen. Diese Peaks sinken relativ schnell wieder ab. Der Zeitraum bis zum Absinken dieser Peaks ist temperaturabhängig. Bei einem Kaltstart stabilisierten sich die PN-Werte bei *Prüffahrzeug A* spätestens 60 Sekunden nach Motorstart auf einen Wert deutlich unter 500.000 cm^{-3} . *Prüffahrzeug B* hat einen Umschalt-punkt bei ca. 220 Sekunden nach Motorstart, bis zu welchem die PN-Rohemissionen mit $3,0E+06 \text{ cm}^{-3}$ deutlich erhöht sind.

Zusammengefasst sind die Messergebnisse aus der Kaltstartmessung in Tabelle 4-3.

Messposition 1: Temperatur - Kaltstart					
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	T.Coolant [°C]
Messung		Prüffahrzeug A			
1	Min	9,29E+04	<2000	914	43,0
	Max	4,04E+05	<2000	945	57,0
	Ø	1,60E+05	<2000	924	48,9
2	Min	3,94E+04	<2000	909	33,0
	Max	3,40E+05	<2000	1024	59,0
	Ø	1,06E+05	<2000	946	46,8
3	Min	6,01E+04	<2000	942	30,0
	Max	4,80E+05	<2000	1137	51,0
	Ø	1,28E+05	<2000	986	39,9
Messung		Prüffahrzeug B			
1	Min	<2000	<1000	836	31,0
	Max	3,73E+06	4,33E+04	1007	48,0
	Ø	1,52E+06	1,14E+04	912	39,5

Tabelle 4-3 Zusammenfassung der Auswertung MP1: Kaltstart

Für den Kaltstart gibt der Hersteller Volkswagen für seine Ottomotoren folgendes an:

„Es ist tatsächlich so, dass ein Ottomotor mit Direkteinspritzung einen leicht höheren Partikelausstoß hat, als ein Ottomotor mit Saugrohreinspritzung. Das gilt aber nur für den Kaltstart und die ersten 1 - 2 Minuten danach.“

Ein Benzinmotor mit Direkteinspritzung erzeugt Partikel vorwiegend im Kaltstart bei niedrigen Außentemperaturen und direkt nach dem Motorstart.“ (Volkswagen AG, 2017)

Diese Angaben des Herstellers konnten durch die Messungen dieser Studie bestätigt werden und treffen auch herstellerübergreifend auf beide Prüffahrzeuge zu.

Für den Warmstart beginnt die Auswertung der Messwerte analog zum Kaltstart 60 Sekunden nach Start des Motors bis zum Ende der Messung. Zusammengefasst sind die Messergebnisse aus der Warmstartmessung in Tabelle 4-4.

Messposition 1: Temperatur - Warmstart					
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	T.Coolant [°C]
Messung		Prüffahrzeug A			
1	Min	3,12E+04	<2000	900	75,0
	Max	6,20E+05	<2000	924	81,0
	Ø	6,91E+04	<2000	916	77,5
2	Min	2,19E+04	<2000	902	69,0
	Max	7,24E+04	<2000	922	82,0
	Ø	3,60E+04	<2000	912	76,4
3	Min	2,86E+04	<2000	903	66,0
	Max	3,68E+05	<2000	936	80,0
	Ø	5,77E+04	<2000	917	73,0
Messung		Prüffahrzeug B			
1	Min	<2000	<1000	851	63,0
	Max	9,65E+03	3991	867	69,0
	Ø	3,25E+03	<1000	858	66,8

Tabelle 4-4 Zusammenfassung der Auswertung MP1: Warmstart

Beim Warmstart von *Prüffahrzeug A* erfolgte die Stabilisierung der PN innerhalb von 60 Sekunden auf deutlich unter 250.000 cm^{-3} . In der anschließenden Leerlauf-Phase steigt die Kühlmitteltemperatur weiter an und die PN-Rohemissionen sinken ab. Sechs Minuten nach einem Warmstart liegen die PN-Rohemissionen bei ca. 30.000 cm^{-3} . Der höchste gemessene Peak am Endrohr während eines Motorstarts (Kaltstart) lag bei *Prüffahrzeug A* bei 7.650 cm^{-3} .

Bei *Prüffahrzeug B* stellte sich bereits 15 Sekunden nach einem Warmstart ein konstantes PN-Rohemissionsniveau von unter 10.000 cm^{-3} ein.

4.4. Messposition 2.1: Drehzahl – Erhöhter Leerlauf

In MP2 wird der Einfluss der Drehzahl auf die Partikelanzahl im Stand (Gang Neutral) untersucht.

4.4.1. Erhöhter Leerlauf - 2000 min^{-1}

Zunächst wurde der Motor gestartet und für fünf Minuten im Leerlauf betrieben. Im Anschluss wurde für 60 Sekunden eine Drehzahl von 2000 min^{-1} angefahren. Nach weiteren 60 Sekunden im Leerlauf wurden erneut 2000 min^{-1} für 60 Sekunden angefahren.

In Abbildung 4-13 ist der Verlauf der Motordrehzahl und die PN-Rohemissionen von *Prüffahrzeug A* „Messung 2“ aufgetragen. Sie verlaufen im Mittel konstant und bilden auch bei erhöhter Drehzahl, mit Ausnahme der Peaks, das gleiche Niveau ab, wie im Leerlauf (ca. 30.000 cm^{-3}). Peaks mit einer Höhe von deutlich unter 200.000 cm^{-3} bilden sich überwiegend in den Lastwechselphasen aus, beim Beschleunigung und bei der Gaswegnahme. Die Ergebnisse und Verläufe der drei Messungen sind reproduzierbar.

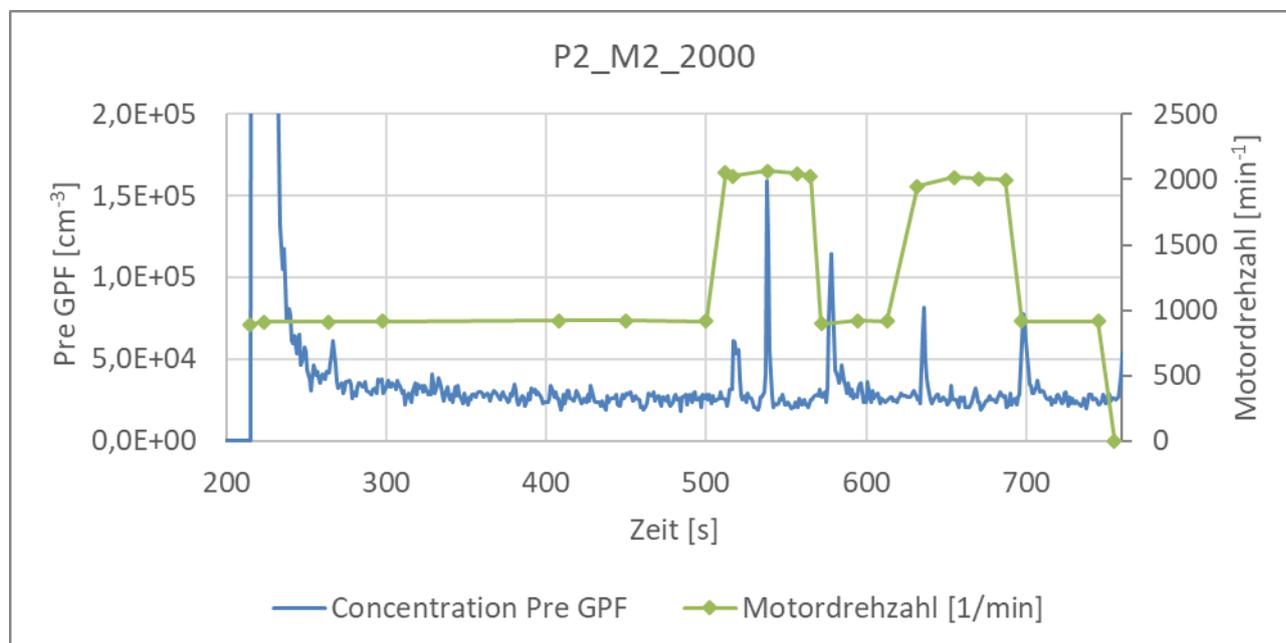


Abbildung 4-13 n_2000 Messung 2: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug A)

In Abbildung 4-14 ist der Verlauf der Motordrehzahl und die PN-Rohemissionen des *Prüffahrzeug B* zu sehen. Das Grundniveau im Leerlauf ist mit $<10.000 \text{ cm}^{-3}$ sehr gering. Es zeichnen sich in dieser Messung drei Peaks ab. Der Peak zwischen 30 – 40 Sekunden ist auf den Motorstart zurückzuführen. Während der starken Erhöhung der PN-Rohemissionen zwischen 260 – 270 Sekunden war ein abweichender Motorlauf („Rasseln“) akustisch wahrnehmbar. Es ist darauf hinzuweisen, dass dieses „Rasseln“ nur in dem Zeitraum

der hohen PN-Rohemissionen zu hören war. Das „Rasseln“ ist während der Messreihe regelmäßig aufgetreten und wird in Kapitel 4.7.2 näher betrachtet. Der anschließende Peak während der Drehzahlerhöhung flacht innerhalb von 5 Sekunden wieder auf das geringe Grundniveau ab. Bei der zweiten Phase mit 2000 min⁻¹ (Bereich 500 s) sind nur marginale Veränderungen der Rohemissionen zu beobachten. Insgesamt ist das PN-Rohemissionsniveau bei beiden Prüffahrzeugen sehr gering, wie der Übersicht in Tabelle 4-5 zu entnehmen ist. Bewertet wurden hier die Messwerte aus der Phase des erhöhten Leerlaufes.

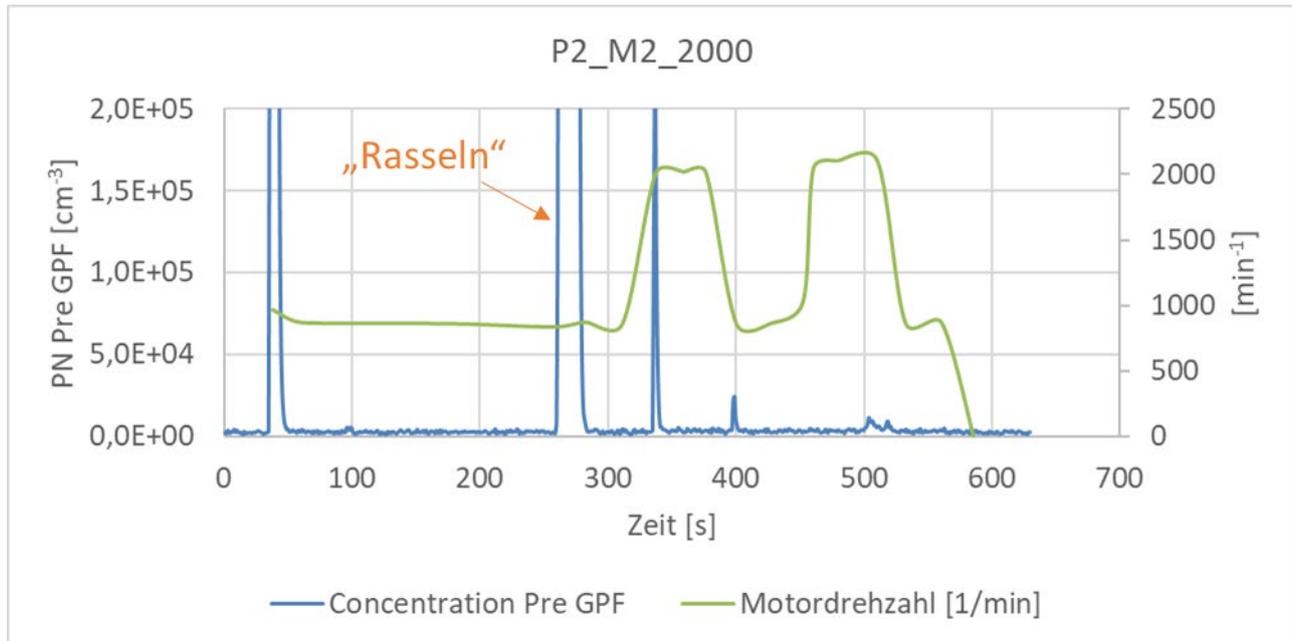


Abbildung 4-14 n_2000: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug B)

Messposition 2: Drehzahl – 2000 min ⁻¹						
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	T.Coolant [°C]	
Messung						
Prüffahrzeug A						
1	Min	1,93E+04	<2000	1966	82,0	
	Max	1,18E+05	<2000	1999	83,0	
	Ø	3,19E+04	<2000	1981	82,4	
2	Min	1,89E+04	<2000	1946	80,0	
	Max	1,59E+05	<2000	2067	86,0	
	Ø	2,96E+04	<2000	2017	82,4	
3	Min	1,65E+04	<2000	2000	82,0	
	Max	2,31E+05	<2000	2060	87,0	
	Ø	3,27E+04	<2000	2034	84,9	
Messung						
Prüffahrzeug B						
1	Min	1,57E+03	<1000	1025	78,0	
	Max	2,19E+05	2993	2103	85,0	
	Ø	7,69E+03	<1000	1917	81,0	

Tabelle 4-5 Zusammenfassung der Auswertung MP2: Drehzahl 2000 rpm

4.4.2. Erhöhter Leerlauf - 2600 min⁻¹

Um das niedrige PN-Niveau auch bei noch höheren Drehzahlen zu bestätigen wurde einmalig mit dem *Prüffahrzeug A* die Drehzahl 2600 min⁻¹ angefahren. Der Ablauf und die Auswertung dieser Messung ist identisch zu der Messung bei 2000 min⁻¹ mit dem Unterschied, dass die Leerlaufphase vor der erhöhten Drehzahl hier zwei Minuten andauerte. Das Ergebnis ist ebenfalls sehr ähnlich zu den Messungen bei 2000

min⁻¹ (siehe Abbildung 4-15). Das PN-Niveau ändert sich auch bei 2600 min⁻¹ nicht. Ausschläge unterschiedlicher Ausprägung sind nur bei den Lastwechseln zu erkennen. Die zusammengefassten Messergebnisse in Tabelle 4-6 unterstreichen dies.

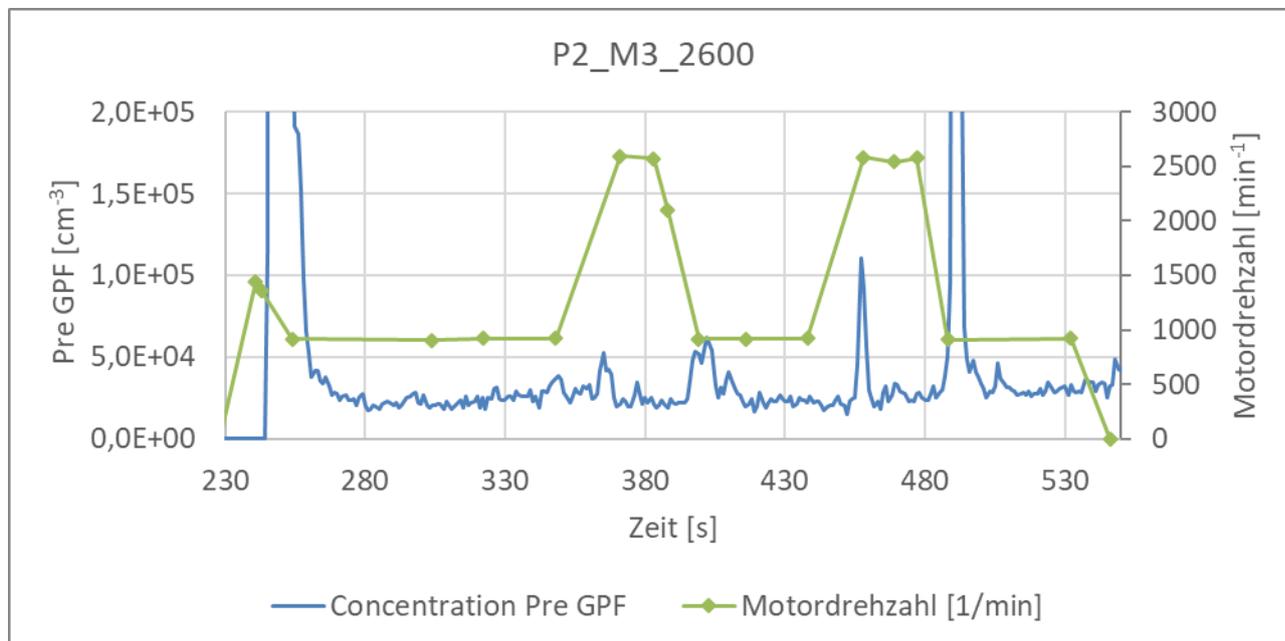


Abbildung 4-15 n_2600: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug A)

Messposition 2: Drehzahl – 2600 min ⁻¹					
Messung	Prüffahrzeug A				
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	T.Coolant [°C]
1	Min	1,54E+04	<2000	2096	83,0
	Max	1,10E+05	<2000	2596	87,0
	Ø	2,95E+04	<2000	2495	85,0

Tabelle 4-6 Zusammenfassung der Auswertung MP2: Drehzahl 2600 rpm (Prüffahrzeug A)

4.4.3. Freie Beschleunigung

Im Anschluss an die konstanten Drehzahlen wurde mit der „freien Beschleunigung“ das PN-Verhalten bei dynamischer Drehzahländerung untersucht. Nach dem Start des Motors wurde das Fahrzeug für 60 Sekunden im Leerlauf betrieben. Dann folgten insgesamt vier freie Beschleunigungen von der Leerlaufdrehzahl auf ca. 3800 min⁻¹. Von Beginn der Beschleunigung bis zur Einregelung der Leerlaufdrehzahl vergingen pro Beschleunigung ca. 15 Sekunden. Daran schloss sich eine 15 Sekunden andauernde Beruhigungsphase an, bevor die nächste Beschleunigung startete. Eine freie Beschleunigung umfasst somit 30 Sekunden (siehe Abbildung 4-16). Bewertet wurden alle vier freien Beschleunigungen während einer Messung.

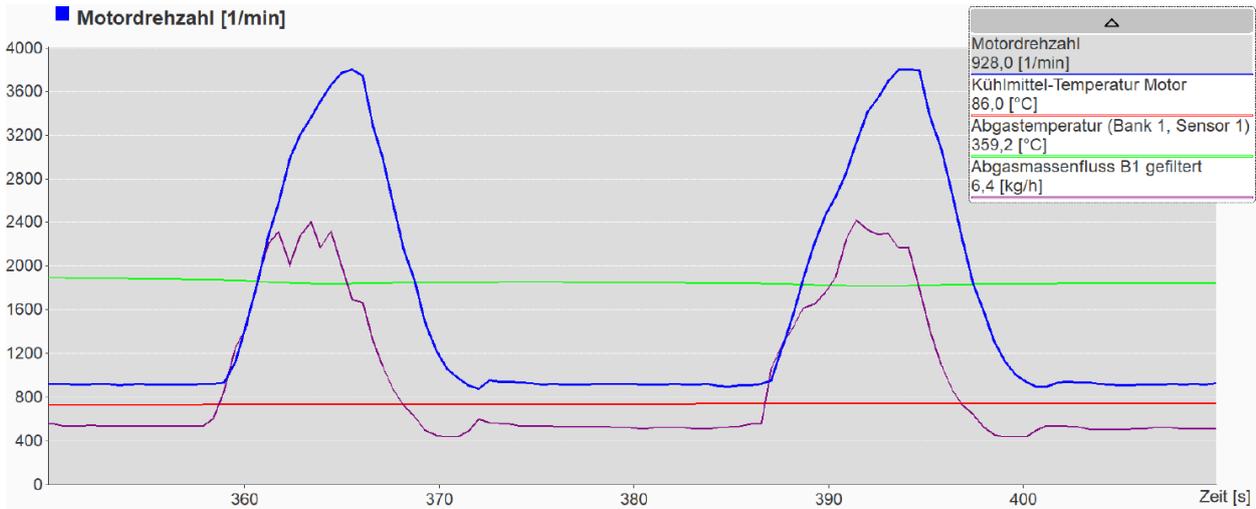


Abbildung 4-16 freie Beschl. Messung 3: Beschleunigung Nr.3 und Nr. 4 (Prüffahrzeug A)

In Abbildung 4-17 ist der Verlauf der Motordrehzahl und die PN-Rohemissionen der freien Beschleunigung (*Messung 3*) von *Prüffahrzeug A* aufgetragen. Die aufgetragene Motordrehzahl setzt sich in diesem Diagramm nur aus wenigen Stützstellen zusammen. Der PN-Verlauf ist wie bei allen Messungen mit 1 Hz aufgezeichnet worden. Es ist zu erkennen, dass die Peaks, wie bereits bei den Messungen zur konstanten Drehzahl, während der Beschleunigung und der Gaswegnahme in unterschiedlicher Ausprägung auftreten. Bei der freien Beschleunigung fallen diese Peaks allerdings deutlich höher aus, als bei den vorangegangenen Messungen.

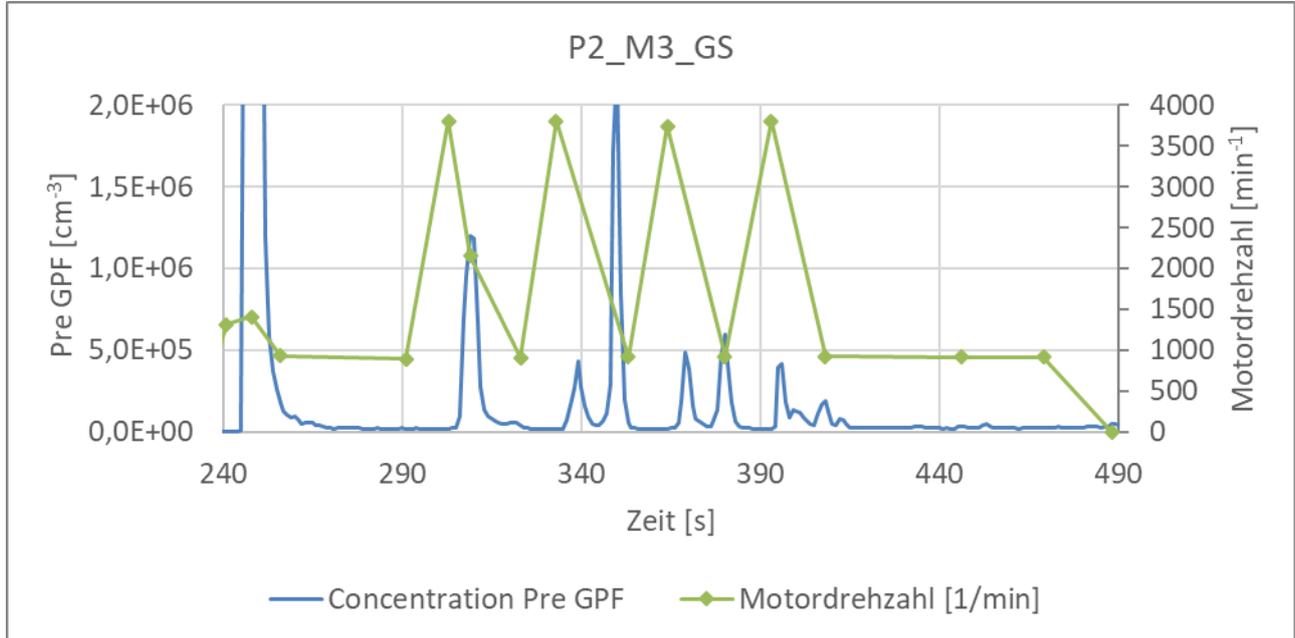


Abbildung 4-17 freie Beschl. Messung 3: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug A)

In Abbildung 4-18 ist der Verlauf der Motordrehzahl und die PN-Rohemissionen der freien Beschleunigung von *Prüffahrzeug B* aufgetragen. Die vier durchgeführten Beschleunigungen sind in den PN-Rohemissionen zu erkennen, wobei der erste Peak bis 217.000 cm^{-3} ansteigt und die weiteren Anstiege einen Wert von ca. 50.000 cm^{-3} erreichen. Der Peak bei 30 Sekunden ist auf den Motorstart zurückzuführen und der Peak ab 160 Sekunden auf das „Rasseln“ des Motors.

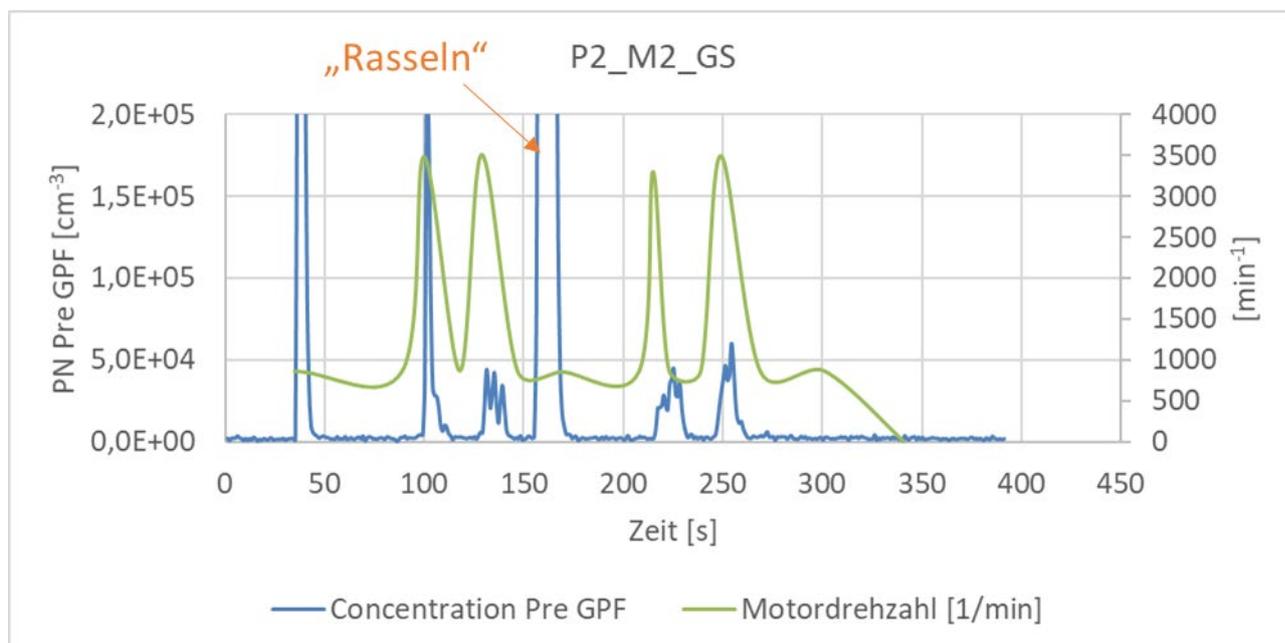


Abbildung 4-18 freie Beschl.: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug B)

Tabelle 4-7 zeigt, dass aufgrund der Peaks durch die Drehzahländerung höhere PN-Rohemissionen als im konstanten Leerlauf vorhanden sind. Der PN-Mittelwert der freien Beschleunigungen hängt stark von den Peaks ab. Auf die drei Messungen von *Prüffahrzeug A* bezogen, weisen die maximalen Peaks, Schwankungen zwischen $2,23\text{E}+06\text{ cm}^{-3}$ bis $8,17\text{E}+06\text{ cm}^{-3}$ auf. Die Mittelwerte der Rohemissionen schwanken in einem ähnlichen Verhältnis, um eine Zehnerpotenz reduziert, zwischen $1,67\text{E}+05\text{ cm}^{-3}$ bis $8,73\text{E}+05\text{ cm}^{-3}$. Die Reproduzierbarkeit ist hier also nur bedingt gegeben. Aufgrund der nur kurzzeitig auftretenden Peaks ist eine Messtechnik mit kurzen Ansprechzeit erforderlich. Die durch die Gasstöße hervorgerufenen PN-Peaks und Mittelwerte der Rohemissionen von *Prüffahrzeug B* liegen etwa eine Zehnerpotenz unter den Werten von *Prüffahrzeug A*.

Messposition 2: Drehzahl – freie Beschleunigung					
		Conc. Pre GPF [cm^{-3}]	Conc. Post GPF [cm^{-3}]	nMot [1/min]	T.Coolant [$^{\circ}\text{C}$]
Messung					
Prüffahrzeug A					
1	Min	$3,10\text{E}+04$	<2000	917	75,0
	Max	$8,17\text{E}+06$	<2000	3724	79,0
	\emptyset	$8,73\text{E}+05$	<2000	1725	77,3
2	Min	$1,80\text{E}+04$	<2000	908	79,0
	Max	$5,36\text{E}+06$	<2000	3809	84,0
	\emptyset	$3,32\text{E}+05$	<2000	1884	81,8
3	Min	$1,63\text{E}+04$	<2000	913	80,0
	Max	$2,23\text{E}+06$	<2000	3807	86,0
	\emptyset	$1,67\text{E}+05$	<2000	2690	83,1
Messung					
Prüffahrzeug B					
1	Min	$1,39\text{E}+03$	<1000	855	83,0
	Max	$2,17\text{E}+05$	2817	2359	91,0
	\emptyset	$1,63\text{E}+04$	<1000	1299	87,0

Tabelle 4-7 Zusammenfassung der Auswertung MP2: freie Beschleunigung

4.4.4. Zusammenfassung Messposition 2: Drehzahl

Bei der Prüfung mit einer konstanten Drehzahl erzeugt eine erhöhte Leerlaufdrehzahl gegenüber der Standard-Leerlaufdrehzahl keine höheren Rohemissionen und somit keine bessere Prüfbedingungen. Das Niveau der PN-Rohemissionen bleibt auch bei erhöhter Leerlaufdrehzahl ähnlich gering. Ausschläge unterschiedlicher Ausprägung entstehen bei den Lastwechseln. Dies zeigt sich insbesondere bei den Messungen mit freier Beschleunigung. So werden bei der freien Beschleunigung die höchsten Rohemissionen gemessen. Die Peaks treten allerdings nur sehr kurz auf. Aufgrund des geringen Messwertniveaus haben die Peaks einen großen Einfluss auf die Mittelwertbildung. Da keine belastbare Reproduzierbarkeit der Peaks gegeben ist, schwankt auch der Wert der gemittelten Rohemissionen. Bei allen Drehzahländerungen und freien Beschleunigungen bleiben die PN-Emissionen am Endrohr stets unter 3000 cm^{-3} .

Die Messungen haben gezeigt, dass eine Drehzahlerhöhung oder eine freie Beschleunigung nicht den Effekt erzielen, stabile und ausreichend hohe PN-Rohemissionen zur aktuell möglichen Prüfung des GPF in einer PTI zu erzeugen.

4.5. Messposition 3: Stabilisierungsphase

In MP3 wird die erforderliche Dauer der Stabilisierungsphase untersucht. Erste Anhaltspunkte dazu wurden bereits in der Messposition 1 (Temperatur) ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass unmittelbar nach einem Motorstart zunächst eine erhöhte Leerlaufdrehzahl eingeregelt wird („Drehzahlüberhang“). Der Zeitpunkt, wann die Standard-Leerlaufdrehzahl durch das Motorsteuergerät eingeregelt wird, kann durch die Kühlmitteltemperatur abgeschätzt werden. Ähnlich verhält es sich mit dem PN-Rohemissionspeak nach dem Motorstart. Je höher die Kühlmitteltemperatur, desto schneller flacht der Peak ab. In Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20 sind die Verläufe hinsichtlich Drehzahl und PN-Rohemissionen eines Motorstarts von *Prüffahrzeug A* aufgetragen.

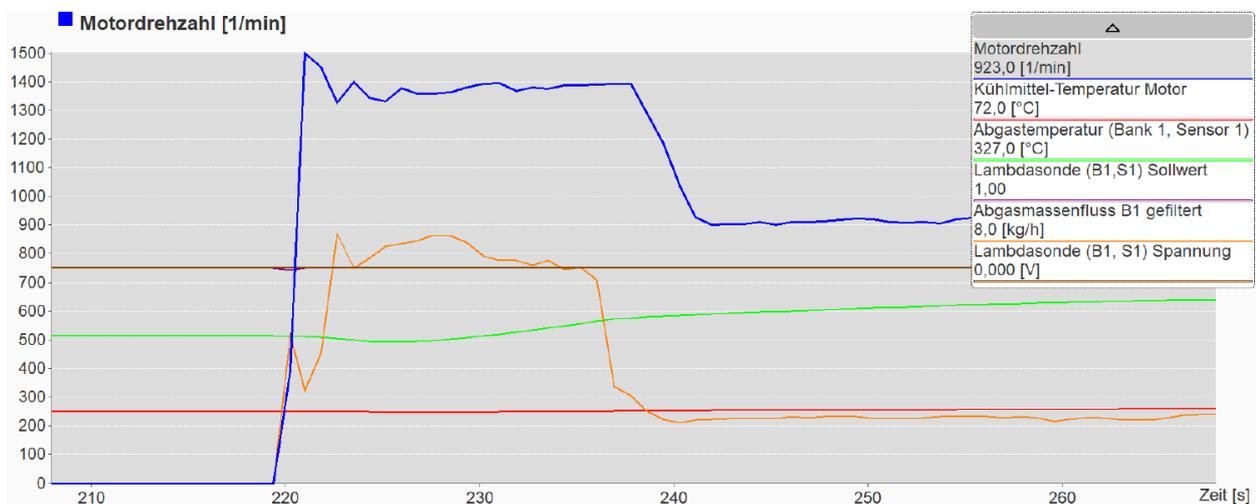


Abbildung 4-19 MP3 Messung 1: Motorstart – Drehzahlverhalten (Prüffahrzeug A)

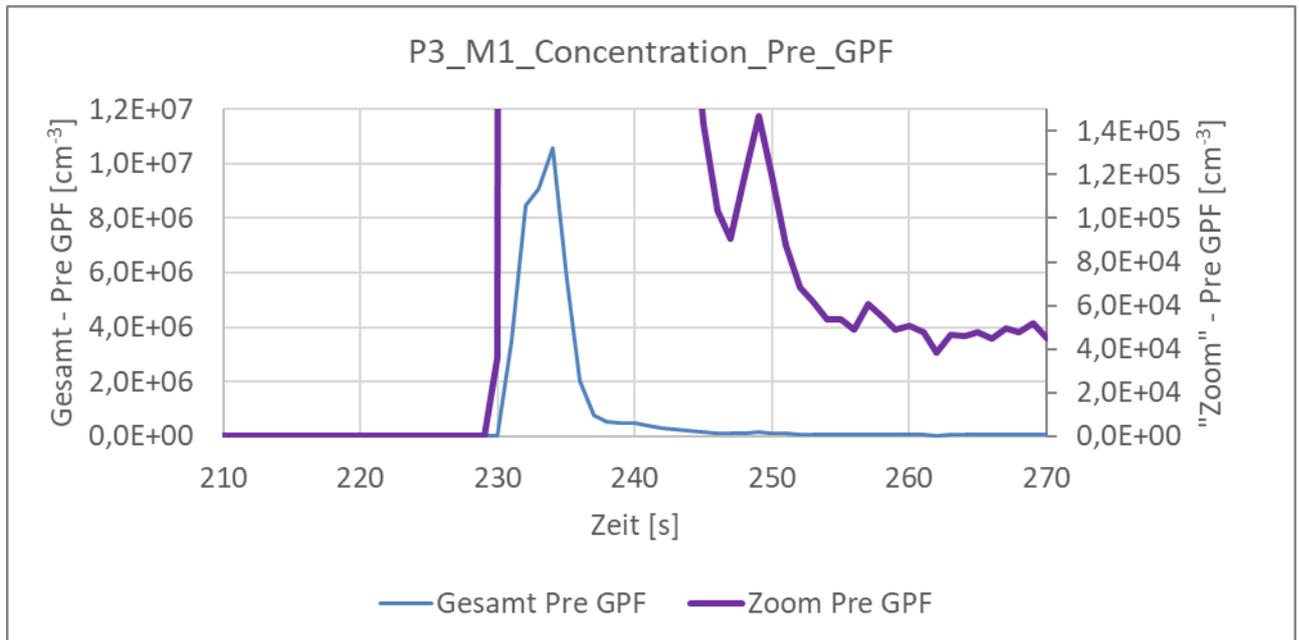


Abbildung 4-20 MP3 Messung 1: Motorstart – PN-Rohemissionen (Prüffahrzeug A)

Zur Ermittlung der Dauer einer Stabilisationsphase werden die folgenden Parameter herangezogen:

- Motortemperatur beim Motorstart
- Dauer des Drehzahlüberhangs
- Zeitraum zwischen Motorstart und PN-Rohemissionen $< 50.000 \text{ cm}^{-3}$

Es wurde ein Anhaltswert von 50.000 cm^{-3} herangezogen, da aufgrund der Beobachtung beim Unterschreiten dieses Wertes der PN-Verlauf annähernd konstant ist und keine signifikanten Messwertänderungen mehr zu erwarten sind (siehe Messposition 1). In Tabelle 4-8 sind die Parameter aus den Messungen dargestellt. Es zeigt sich, dass je höher die Kühlmitteltemperatur ist, desto geringer fällt der Drehzahlüberhang und die Dauer des PN-Peaks aus.

Messposition 3: Stabilisationsphase			
	Zeit bis Conc. Post GPF $< 50.000 \text{ cm}^{-3}$	Dauer Drehzahlüberhang	Motorstart T.Coolant
Messung			
Prüffahrzeug A			
1	30 s	20 s	66,0 °C
2	25 s	10 s	72,0 °C
3	45 s	40 s	60,0 °C
Messung			
Prüffahrzeug B			
1	8 s	5 s	84,0 °C
2 (MP1 Warm)	9 s	30 s	60,0 °C

Tabelle 4-8 Auswertung Zeiten Stabilisationsphase

Zusammenfassung Messposition 3 Stabilisationsphase:

Bei 60°C Kühlmitteltemperatur werden demnach mindestens 45 Sekunden Stabilisationszeit für eine Drehzahlanpassung vorgeschlagen. Die unterschiedliche Dauer bis der PN-Peak des Motorstarts abgeflacht ist zeigt, dass dieser Wert fahrzeugspezifisch ist.

4.6. Messposition 4: Beruhigungsphase

In MP4 wird die erforderliche Dauer der Beruhigungsphase nach einer Drehzulanhebung (DAH) untersucht. Die DAH beinhaltet eine kurzzeitige Erhöhung der Drehzahl auf mindestens 1000 min^{-1} über der Standard-Leerlaufdrehzahl. Ca. 3 bis 5 Sekunden nach dem Erreichen dieser erhöhten Drehzahl wird das Gaspedal losgelassen und die Standard-Leerlaufdrehzahl eingeregelt. Mit Betätigung des Gaspedals zur Einleitung der DAH bis zur Einregelung der Leerlaufdrehzahl wird ein Zeitraum von 15 Sekunden angesetzt. Daran anschließend beginnt dann die Beruhigungsphase. Die DAH wurde bei der AU-PN-Dieselprozedur eingeführt um sicherzustellen, dass das AGR-Ventil in den meisten Fällen zu Beginn der Messung geöffnet ist. Da die Prüffahrzeuge in diesem Projekt über keine externe AGR verfügen, kann dieses Verhalten hier nicht auftreten. Dennoch wird zunächst an der DAH festgehalten, um einen definierten Zustand zu erlangen, ab welchem die Mittelwertbildung der PN-Werte in der Messphase beginnt. In Abbildung 4-21 ist der Verlauf der „Messung 1“ von Prüffahrzeug A hinsichtlich der PN-Rohemissionen aufgetragen. Prüffahrzeug B hat bereits vor dem GPF sehr geringe PN-Rohemissionen. Durch die DAH ist ein geringfügiger Anstieg auf 15.000 cm^{-3} zu erkennen (siehe Abbildung 4-22).

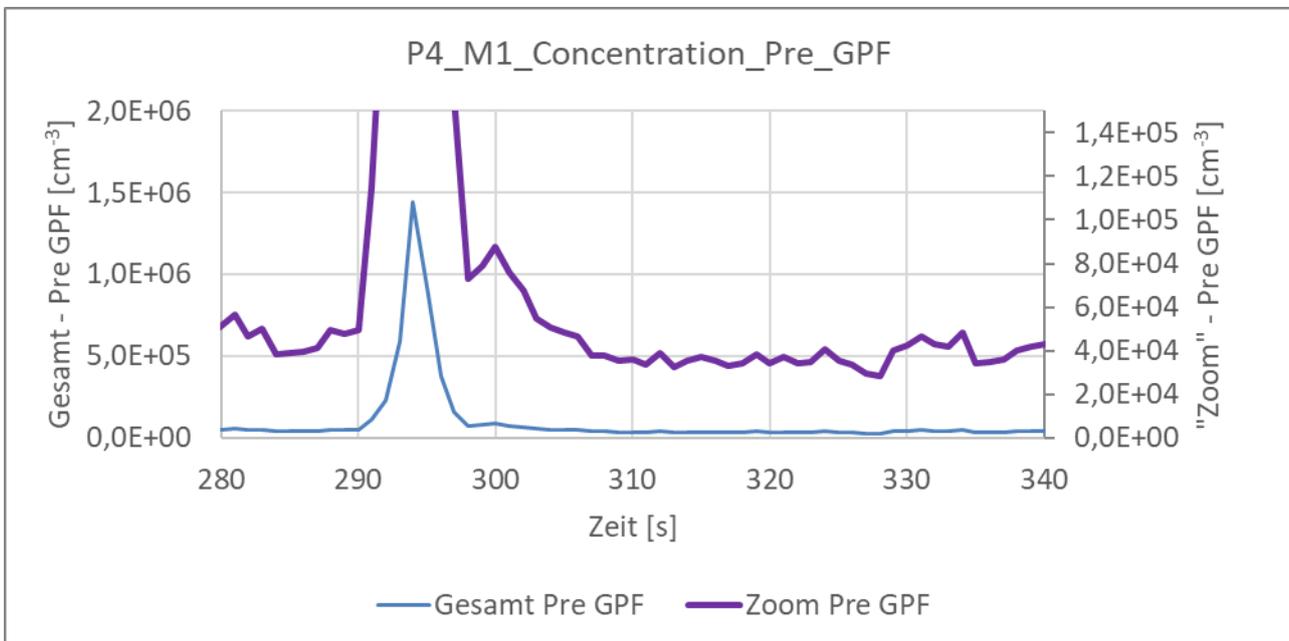


Abbildung 4-21 MP4 „Messung 1“: DAH bei 290s und anschl. Beruhigungsphase – PN-Rohemissionen (Prüffahrzeug A)

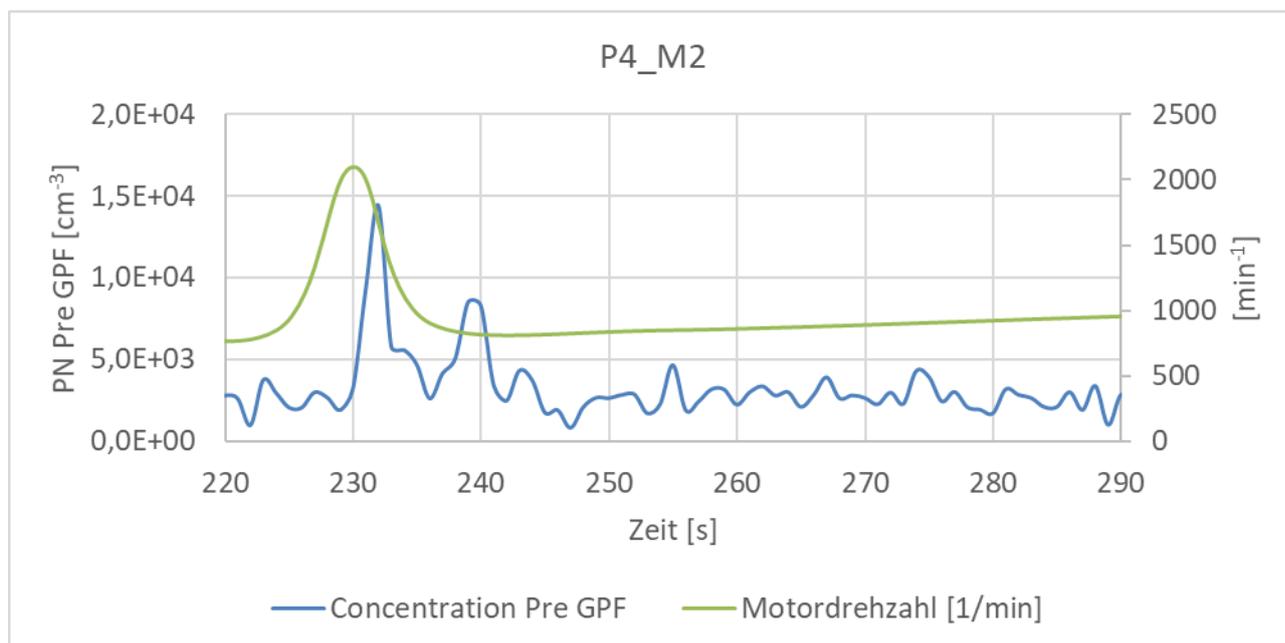


Abbildung 4-22 DAH bei 225s und anschl. Beruhigungsphase – PN-Rohemissionen (Prüffahrzeug B)

Zusammenfassung Messposition 4: Beruhigungsphase:

In Tabelle 4-9 sind die wichtigsten Erkenntnisse aus den Messungen zusammengefasst. Im Anschluss an die DAH wird die Leerlaufdrehzahl innerhalb weniger als 10 Sekunden eingeregelt. Spätestens 20 Sekunden nach Betätigung des Gaspedals verlaufen die PN-Rohemissionen konstant und der Peak ist abgeklungen. Unter Berücksichtigung der Ansprechzeit der Messtechnik ist für die beiden Prüffahrzeuge eine Beruhigungsphase von 30 Sekunden ausreichend.

Messposition 4: Beruhigungsphase			
	Konstanter Verlauf Conc. Post GPF	Dauer LL-Drehzahl Einregelung	T.Coolant bei DAH
Messung			
Prüffahrzeug A			
1	Nach 20 s bei 50.000 cm ⁻³	< 10 s	69,0 °C
2	Nach 15 s bei 30.000 cm ⁻³	< 10 s	74,0 °C
3	Nach 15 s bei 30.000 cm ⁻³	< 10 s	73,0 °C
Messung			
Prüffahrzeug B			
1	Nach <10 s bei <10.000 cm ⁻³	< 10 s	91,0 °C
2	Nach <10 s bei <10.000 cm ⁻³	< 10 s	92,0 °C

Tabelle 4-9 Auswertung Beruhigungsphase nach Drehzalanhebung

4.7. Messposition 5: Messphase

Nach der isolierten Betrachtung der unterschiedlichen Phasen der Messprozedur wird in Messposition 5 die ganzheitliche Messprozedur durchgeführt und ausgewertet. Die Messungen wurden nach dem zeitlichen Ablauf in Tabelle 4-10 durchgeführt. Nach dem Motorstart vergehen 60 Sekunden bis zur DAH. Davon werden 15 Sekunden dem Motorstart zugerechnet und 45 Sekunden der Stabilisationsphase. Die DAH dauert vom Betätigen des Gaspedals bis zum Abklingen der erhöhten Drehzahl insgesamt 15 Sekunden. Daran schließt sich die Beruhigungsphase von 15 Sekunden an. Dann folgt die Messphase, welche in dieser Messposition ausgewertet wird. Der Motor läuft in der Messphase 180 Sekunden im Leerlauf. Es

werden die PN-Rohemissionsmittelwerte von 3x15 Sekunden, 3x30 Sekunden und 3x60 Sekunden bewertet.

MP	Messschritt	Zeit
	Motor Start	0 s – 15 s
3	Stabilisierungsphase (Leerlauf)	45 s
4	Drehzahlanhebung auf $n_{\text{Mot}} = 1000 \text{ min}^{-1}$ über Leerlauf innerhalb von 5 s	$\approx 15 \text{ s}$
4	Beruhigungsphase (Leerlauf)	15 s
5	Messphase (Mittelwert aus je 3 x 30 / 3 x 30 / 3x60 Sekunden im Leerlauf)	180 s

Tabelle 4-10 Messprozedur Messphase

4.7.1. Prüffahrzeug A (MP5: Messphase)

Die Kühlmitteltemperatur lag beim Motorstart bei „Messung 1“ bei 63°C und bei „Messung 2“ und „Messung 3“ bei jeweils 69°C und somit über dem vorgeschlagenen Konditionierungswert von mindestens 60°C .

In Abbildung 4-23 und Abbildung 4-24 sind die Verläufe von *Messung 1* hinsichtlich Drehzahl, Kühlmitteltemperatur und PN-Rohemissionen aufgetragen. In Tabelle 4-11 bis Tabelle 4-13 sind die Messergebnisse zusammengefasst.

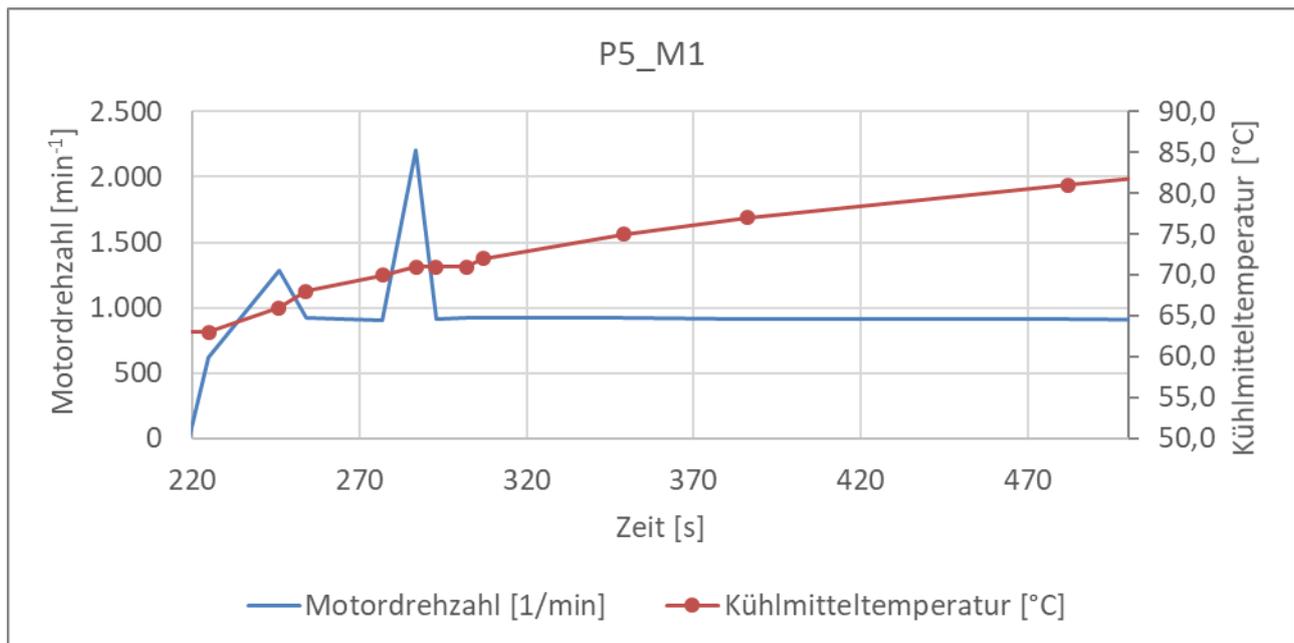


Abbildung 4-23 MP5 „Messung 1“: Drehzahl- und Kühlmitteltemperaturverlauf (Prüffahrzeug A)

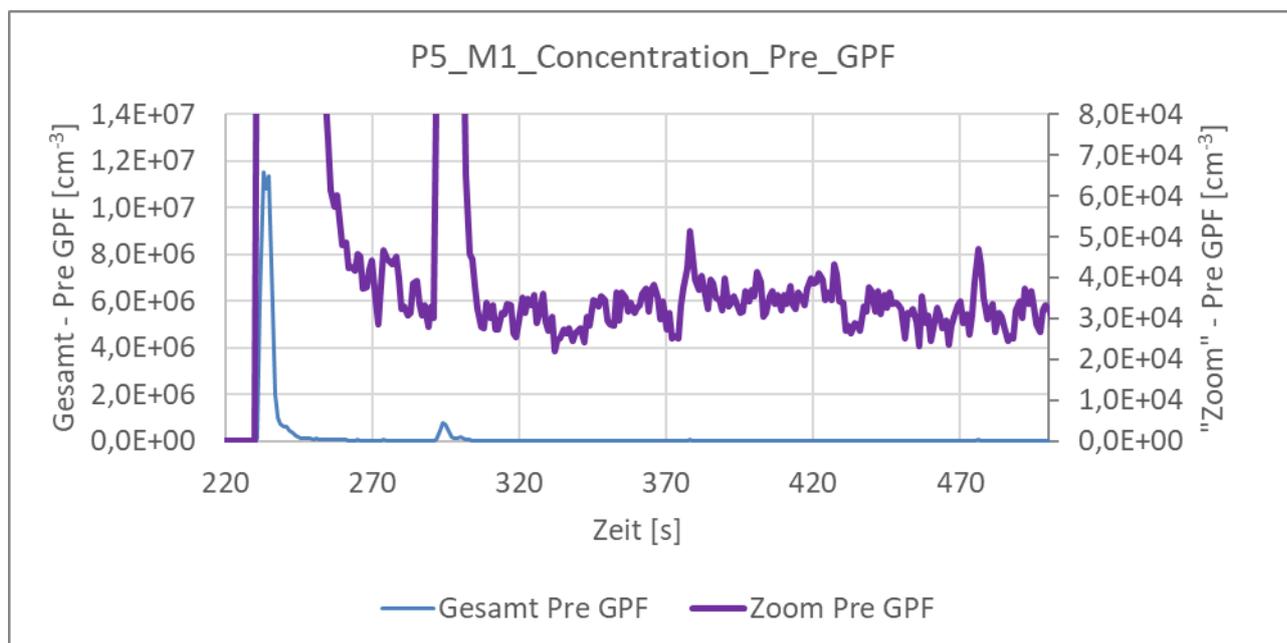


Abbildung 4-24 MP5 „Messung 1“: PN-Rohemissionsverlauf (Prüffahrzeug A)

Messposition 5: Messphase						
Messung 1	Prüffahrzeug A					
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	T.Coolant [°C]	
3*15	Min	2,19E+04	<2000	922	75,0	
	Max	3,66E+04	<2000	922	75,0	
	Ø	3,05E+04	<2000	922	75,0	
3*30	Min	2,19E+04	<2000	911	75,0	
	Max	5,16E+04	<2000	922	77,0	
	Ø	3,29E+04	<2000	917	76,0	
3*60	Min	2,19E+04	<2000	910	75,0	
	Max	5,16E+04	<2000	922	81,0	
	Ø	3,28E+04	<2000	914	77,7	

Tabelle 4-11 Auswertung MP5: Messung 1 (Prüffahrzeug A)

Messposition 5: Messphase						
Messung 2	Prüffahrzeug A					
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	T.Coolant [°C]	
3*15	Min	1,50E+04	<2000	-	-	
	Max	3,18E+04	<2000	-	-	
	Ø	2,38E+04	<2000	-	-	
3*30	Min	1,50E+04	<2000	908	80,0	
	Max	3,18E+04	<2000	908	80,0	
	Ø	2,25E+04	<2000	908	80,0	
3*60	Min	1,32E+04	<2000	908	80,0	
	Max	3,18E+04	<2000	915	83,0	
	Ø	2,21E+04	<2000	912	81,5	

Tabelle 4-12 Auswertung MP5: Messung 2 (Prüffahrzeug A)

Messposition 5: Messphase					
Messung 3	Prüffahrzeug A				
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	T.Coolant [°C]
3*15	Min	1,55E+04	<2000	916	79,0
	Max	2,89E+04	<2000	916	79,0
	Ø	2,04E+04	<2000	916	79,0
3*30	Min	1,29E+04	<2000	916	79,0
	Max	2,89E+04	<2000	919	81,0
	Ø	1,93E+04	<2000	918	80,0
3*60	Min	1,29E+04	<2000	916	79,0
	Max	2,96E+04	<2000	919	85,0
	Ø	2,07E+04	<2000	917	81,7

Tabelle 4-13 Auswertung MP5: Messung 3 (Prüffahrzeug A)

4.7.2. Prüffahrzeug B (MP5: Messphase)

Bei *Prüffahrzeug B* wurde die Messung ebenfalls drei Mal durchgeführt. Während der Messphase ist bei allen drei Durchführungen zwei bis vier Minuten nach Motorstart für ca. 10 Sekunden ein akustisch wahrnehmbares „Rasseln“ des Motorlaufes aufgetreten. Während dieses „Rasselns“ sind hohe Peaks der PN-Rohemissionen erfasst worden, welche den Mittelwert stark überlagern. Abbildung 4-25 zeigt den Verlauf von „Messung 1“ mit den Peaks der PN-Rohemissionen beim Motorstart und beim „Rasseln“. Zu allen anderen Zeitpunkten der Messung lag der PN-Wert unter 10.000 cm⁻³.

Die Ursache für das „Rasseln“ im Motor kann nur vom Fahrzeughersteller beantwortet werden. Denkbar ist, dass in dieser Zeit eine OBD-Überwachungsfunktion (z.B. Überwachung des Katalysators) vom Steuergerät durchgeführt wird und dazu kurzzeitig ein fettes Gemisch ($\lambda < 1$) erforderlich ist, welches hohe PN-Rohemissionen zur Folge hat.

Die Ergebnisse der „Messung 1“ sind in Tabelle 4-14 zusammengefasst. Um den Einfluss des „Rasselns“ auf den Mittelwert quantifizierbar zu machen, ist die Auswertung der „Messung 1“ ohne Berücksichtigung des durch das „Rasseln“ hervorgerufenen Peaks in Tabelle 4-15 dargestellt. Die Ergebnisse der weiteren Messungen sind in Tabelle 4-16 und Tabelle 4-17 zu sehen. Dabei ist in den Auswertungen deutlich zu erkennen, dass das „Rasseln“ bei „Messung 2“ nur bei 3*60 Sekunden Auswertung erfasst wird und bei „Messung 3“ bereits bei 3*15 Sekunden in der Auswertung enthalten ist.

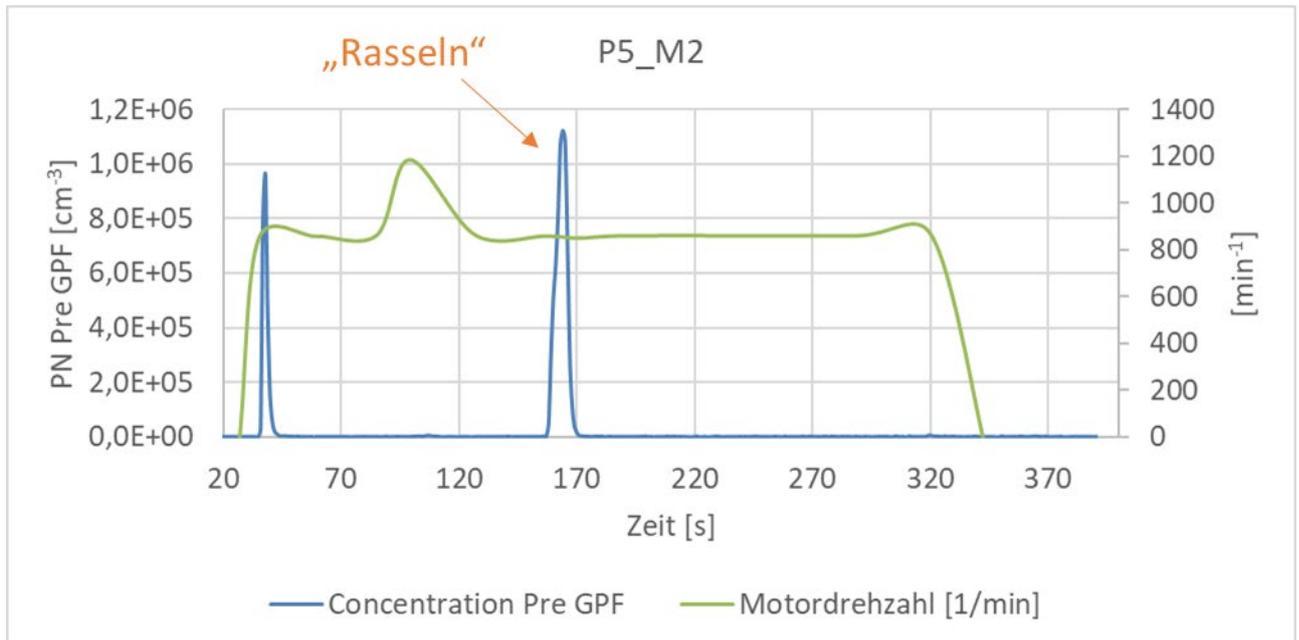


Abbildung 4-25 MP5 Messung 1: PN-Rohemissionsverlauf und Drehzahl (Prüffahrzeug B)

Messposition 5: Messphase					
Messung 1	Prüffahrzeug B				
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	T.Coolant [°C]
3*15	Min	1,24E+03	<1000	860	92,0
	Max	1,12E+06	3612	863	93,0
	Ø	1,23E+05	<1000	862	92,5
3*30	Min	1,24E+03	<1000	851	92,0
	Max	1,12E+06	6846	863	93,0
	Ø	7,63E+04	<1000	859	92,8
3*60	Min	1,19E+03	<1000	851	92,0
	Max	1,12E+06	6846	863	93,0
	Ø	3,96E+04	<1000	859	92,6

Tabelle 4-14 Auswertung MP5: Messung 1 (Prüffahrzeug B)

Messposition 5: Messphase – ohne Berücksichtigung des „Rasseln“					
Messung 1	Prüffahrzeug B				
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	T.Coolant [°C]
3*15	Min	1,24E+03	<1000	860	92,0
	Max	4,13E+03	<1000	863	93,0
	Ø	2,46E+03	<1000	862	92,5
3*30	Min	1,24E+03	<1000	851	92,0
	Max	6,58E+03	3876	863	93,0
	Ø	2,62E+03	<1000	859	92,8
3*60	Min	1,19E+03	<1000	851	92,0
	Max	6,58E+03	3876	863	93,0
	Ø	2,62E+03	<1000	859	92,6

Tabelle 4-15 Auswertung MP5: Messung 1 – exklusive „Rasseln“ (Prüffahrzeug B)

Messposition 5: Messphase					
Messung 2	Prüffahrzeug B				
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	T.Coolant [°C]
3*15	Min	1,03E+03	<1000	836	72,0
	Max	5,42E+03	<1000	836	72,0
	Ø	2,34E+03	<1000	836	72,0
3*30	Min	8,48E+02	<1000	836	72,0
	Max	5,42E+03	<1000	868	74,0
	Ø	2,25E+03	<1000	852	73,0
3*60	Min	8,48E+02	<1000	836	72,0
	Max	1,43E+06	11461	868	77,0
	Ø	5,90E+04	<1000	855	74,5

Tabelle 4-16 Auswertung MP5: Messung 2 (Prüffahrzeug B)

Messposition 5: Messphase					
Messung 3	Prüffahrzeug B				
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	T.Coolant [°C]
3*15	Min	1,05E+03	<1000	k.A.	k.A.
	Max	4,32E+05	1014	k.A.	k.A.
	Ø	4,24E+04	<1000	k.A.	k.A.
3*30	Min	6,80E+02	<1000	861	91,0
	Max	4,32E+05	1771	868	91,0
	Ø	2,30E+04	<1000	865	91,0
3*60	Min	6,80E+02	<1000	861	91,0
	Max	4,32E+05	1771	868	92,0
	Ø	1,26E+04	<1000	864	91,3

Tabelle 4-17 Auswertung MP5: Messung 3 (Prüffahrzeug B)

4.7.3. Zusammenfassung Messposition 5: Messphase

Zusammenfassung Messposition 5: Messphase:

Sowohl die Verläufe, als auch die gemittelten Werte zeigen mit Ausnahme des „Rasselns“ reproduzierbare Ergebnisse. Die PN-Rohemissionen sind sehr konstant und weisen bei *Prüffahrzeug A* spätestens 15 Sekunden nach der DAH ein Niveau im Bereich zwischen 20.000 cm⁻³ und 35.000 cm⁻³ auf, welches bis zum Ende der Messung konstant bleibt. Dies ist auch in den unterschiedlichen Auswertezwischenräumen zu erkennen. Die Mittelwerte zwischen 3*15 Sekunden, 3*45 Sekunden und 3*60 Sekunden unterscheiden sich nur marginal.

Bei *Prüffahrzeug B* wird die Mittelwertbildung durch die PN-Peaks des kurzzeitig auftretenden „Rasselns“ überlagert. Wird dieser Peak bei der Auswertung nicht berücksichtigt, zeigt sich, dass eine Bewertung von 3*15 Sekunden ausreicht. Je nach zeitlichem Auftreten des Rasselns, welches nicht nach einer konstanten Zeiteinheit erfolgt, ist der Peak bei unterschiedlichen Mittelwerten enthalten. Aus diesem Grund ist eine Auswertung auch nach 3*15 Sekunden wählbar. Die Messwerte sind ohnehin sehr gering.

4.8. Messposition Zusatz: Elektrische Verbraucher

Alle vorgestellten Messpositionen wurden ohne zusätzliche elektrische Verbraucher durchgeführt. Nachfolgend aufgeführte elektrische Verbraucher wurden bei den Messungen hinzu- oder abgeschaltet:

- Klimaanlage (AC) aus
- Scheiben- Sitzheizung aus
- Licht aus
- Infotainmentsystem aus

Über die einzelnen Phasen der Messprozedur hinaus wurde bei *Prüffahrzeug A* in der Zusatzmessposition der Einfluss von elektrischen Verbrauchern im Leerlauf auf die PN-Rohemissionen untersucht. Dazu wurde das Fahrzeug gestartet (Warmstart) und zunächst ohne elektrische Verbraucher, wie bei den vorangegangenen Messpositionen, im Leerlauf betrieben. Dann wurden die elektrischen Verbraucher hinzu- oder abgeschaltet. Abbildung 4-26 zeigt, wie sich der Verlauf des Motordrehmomentes und die PN-Rohemissionen verändern. Das Einschalten der Klimaanlage auf maximale Leistung (AC-Max) erfordert ein Drehmomentanstieg von ca. 18 Nm auf etwa 35 Nm. Die Drehzahl verläuft dabei weiter konstant, sodass der Leistungsbedarf der Klimaanlage nur über ein erhöhtes Drehmoment bereitgestellt wird. Die aufgebrachte Last kann in den PN-Rohemissionen durch einen Peak von ca. $2E+06 \text{ cm}^{-3}$ nachvollzogen werden. Wie zu erkennen ist, hat die Klimaanlage den größten Einfluss auf das Motordrehmoment und die PN-Rohemissionen.

Der prozentuale Einfluss von elektrischen Verbrauchern auf die vom Motor abgegebene Leistung ist im Leerlauf sehr hoch und kann wie dargestellt, die Motorlast um bis zu 100 % erhöhen. Um vergleichbare Messbedingungen zu schaffen, sollte die Klimaanlage bei einer PN-Messung im Leerlauf ausgeschaltet sein.

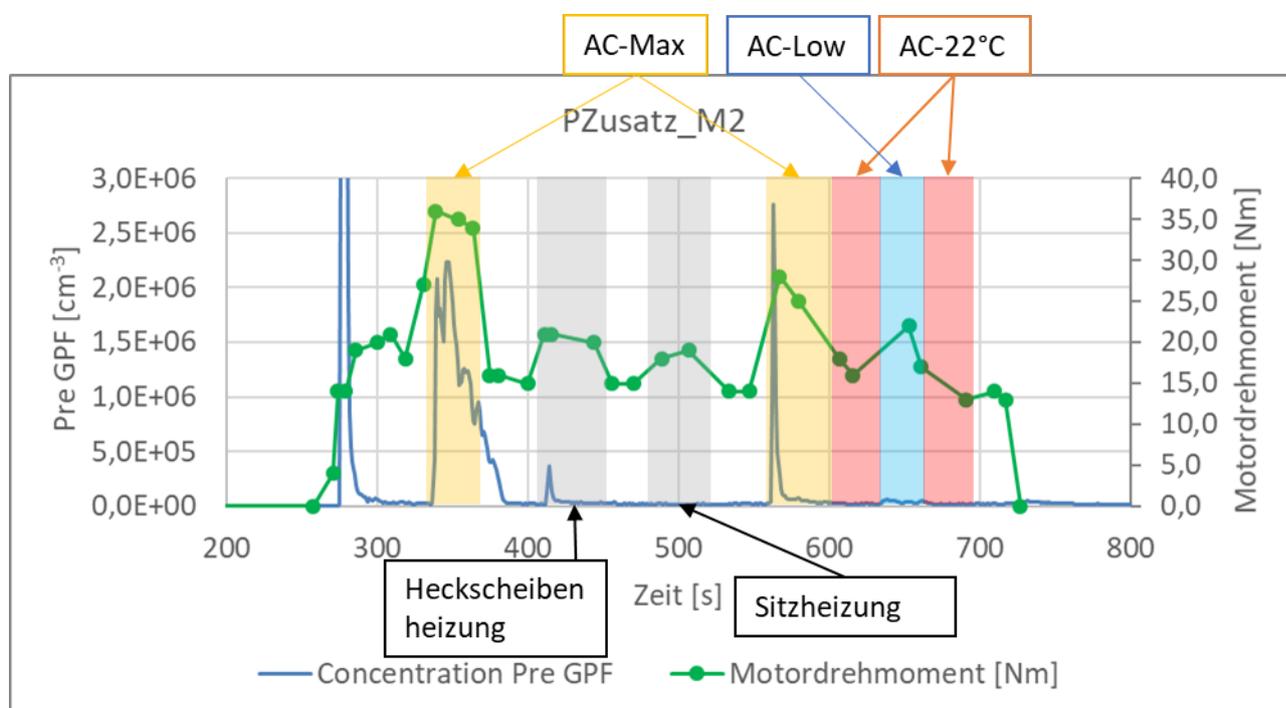


Abbildung 4-26 MP Zusatz Messung 2: Motordrehmoment und PN-Rohemissionen (Prüffahrzeug A)

4.9. Messposition 6: Vergleichsmessung

In Messposition 6 wurde die gesamte Leerlauf-Messprozedur (vergl. MP5 in Kapitel 4.7) mit erweiterter Messtechnik im Abgaslabor durchgeführt. Diese Messung ist nur mit *Prüffahrzeug B* durchgeführt worden. Die Anordnung der Messtechnik ist in Abbildung 4-27 skizziert. Das *HC-NPET* wird analog zu den vorangegangenen Messungen über eine Schraubverbindung vor dem GPF mit der Abgasanlage verbunden. Bei dem *DMS500* und dem *NPET* erfolgt die Probenahme am Endrohr des Fahrzeuges über eine Schraubverbindung vor der CVS-Anlage (CVS = Constant Volume Sampling) zur Abgasverdünnung (siehe Abbildung 4-28). Die Erfassung der Partikel mit dem *AVL-Particle-Counter* erfolgt wie bei der Typprüfung im verdünnten Abgas.

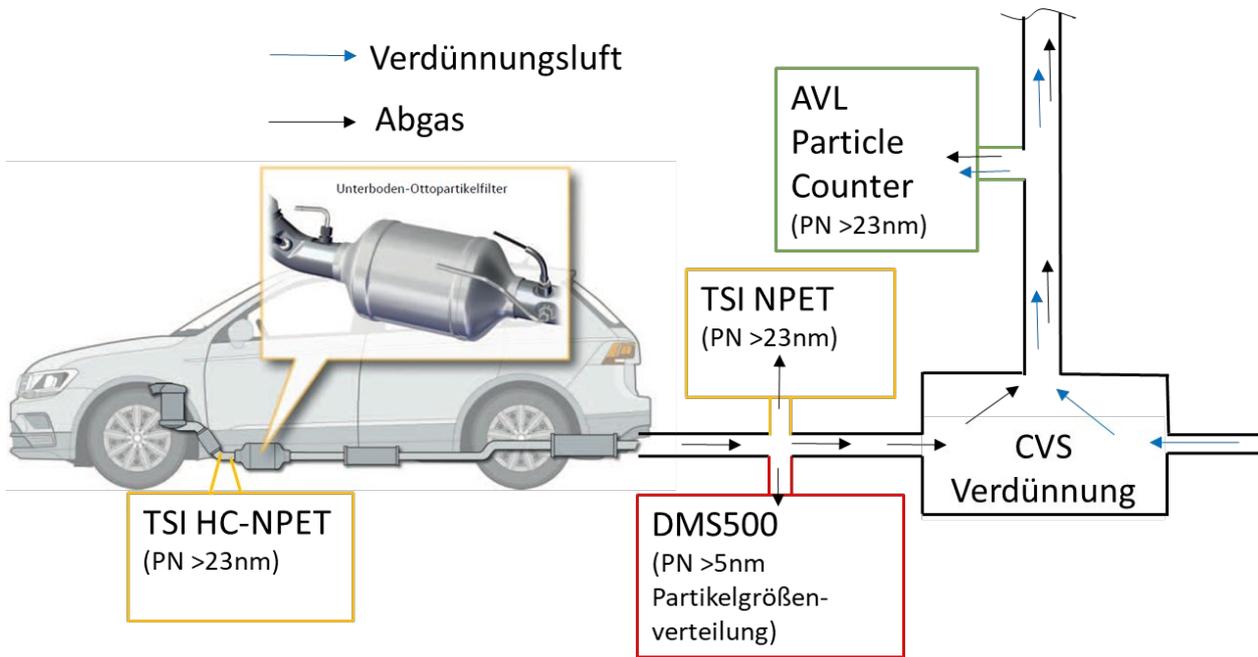


Abbildung 4-27 Skizze der Anordnung der Messtechnik auf dem Rollenprüfstand

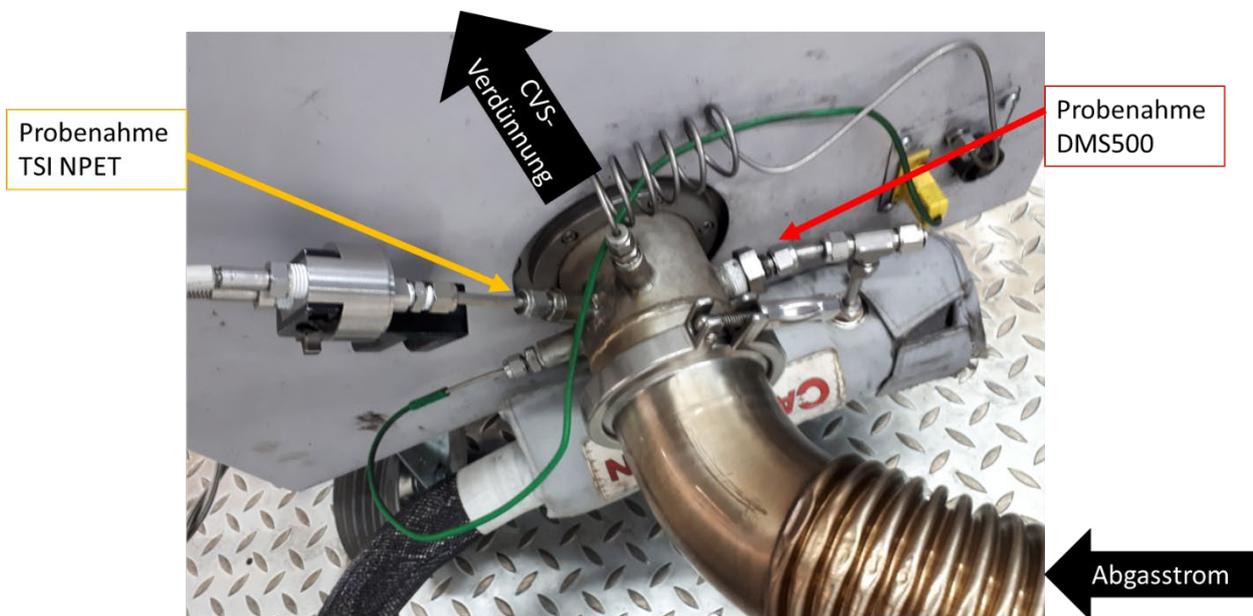


Abbildung 4-28 Probenahme vom TSI NPET und DMS500

Zum Abgleich der unterschiedlichen Messgeräte ist der Verlauf der Endrohrmissionen der gesamten Messprozedur herangezogen worden. Das *TSI NPET* und der *AVL-PN-Counter* weisen einen Roll-Off von $d_{50} = 23 \text{ nm}$ auf. Um eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der erfassten Partikel zu gewährleisten wurde für diese Vergleichsmessung bei dem *DMS500* nur der „Accumulation Mode“ ausgewertet. Der „Accumulation Mode“ beinhaltet überwiegend feste Partikel zwischen 30 nm und 150 nm .

In Abbildung 4-29 ist der Verlauf der erfassten PN-Emissionen am Auspuffendrohr von den drei Messgeräten zu sehen. Der Peak bei 40 Sekunden ist auf den Motorstart zurückzuführen und wird von dem *AVL-PN-Counter* als auch dem *DMS500* in einem Größenbereich von etwa 58.000 cm^{-3} erfasst. Das *TSI NPET* zeigt

einen Ausschlag von etwa 90.000 cm^{-3} . Anschließend folgt die Messprozedur inkl. DAH. Die gemessenen PN-Werte sind hier bei allen Geräten permanent unter 10.000 cm^{-3} . Eine Ausnahme bildet hier das weiter oben beschriebene „Rasseln“ des Motors bei ca. 250 Sekunden. Hier werden Werte von etwa 10.000 cm^{-3} gemessen. Das *TSI NPET* zeigt einen geringfügig höheren Ausschlag an.

Das sehr geringe PN-Emissionsniveau im Leerlauf wird von allen Messgeräten gleichermaßen erfasst. Eine Zusammenfassung der Messwerte ist Tabelle 4-18 zu entnehmen. Die Bewertung umfasst hier die gesamte Messprozedur inkl. Motorstart. Die Mittelwerte der Messung liegen alle im untersten Messbereich der Geräte oder darunter, werden hier aber zur Vergleichbarkeit angegeben.

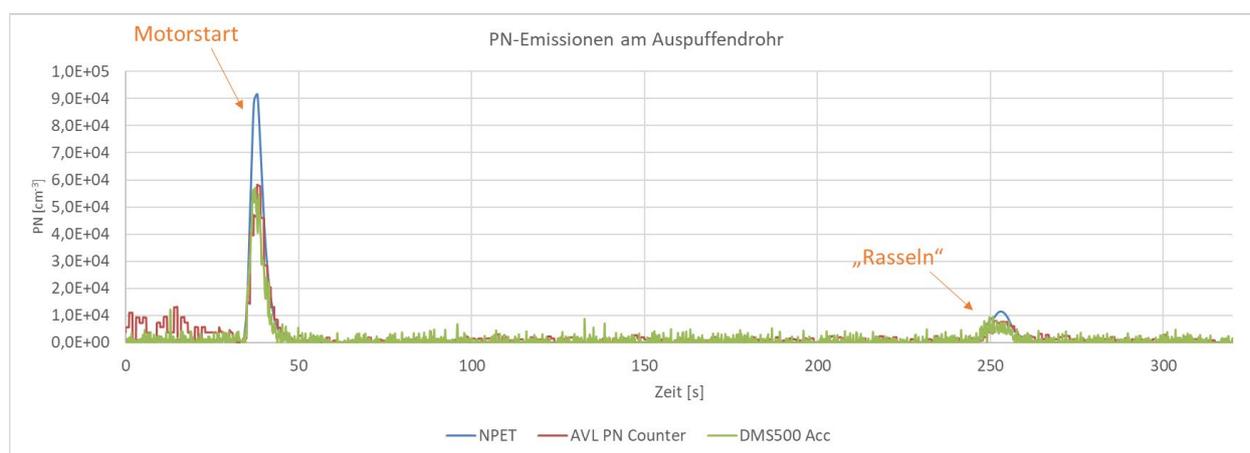


Abbildung 4-29 Vergleich der Partikelzählgeräte

Messposition 6: Gerätevergleich - Leerlaufmessung		
Prüffahrzeug B		
		Conc. Post GPF [cm^{-3}]
TSI NPET	Min	14
	Max	9,15+04
	Ø	1879
AVL-PN-Counter	Min	0
	Max	5,84E+04
	Ø	2041
DMS500 – Accumulation Mode	Min	0
	Max	5,70E+04
	Ø	1491

Tabelle 4-18 Vergleich der Messgeräte - Leerlaufmessung

In Abbildung 4-30 ist das mit dem *DMS500* aufgezeichnete Größenspektrum der Vergleichsmessung in einem Konturdiagramm dargestellt. Das gesamte Größenspektrum des Gerätes umfasst einen Bereich von 5 nm bis 1000 nm. Es sind die beiden Ausschläge vom Motorstart und vom „Rasseln“ sichtbar. Es zeigt sich, dass die Partikel beim Motorstart einen Größenbereich zwischen ca. 15 nm bis 200 nm abdecken. Die Partikel während des „Rasselns“ sind in einem Größenbereich zwischen 50 nm und 200 nm einzuordnen. Zu allen anderen Zeitpunkten ist aufgrund der geringen Partikelanzahlemission nur ein Hintergrundrauschen zu erkennen. Diese Erkenntnis wird in Abbildung 4-31 noch deutlicher. Dort ist der Verlauf im „Accumulation Mode“ und der Verlauf des gesamten Größenspektrums aufgetragen. Der grundsätzliche Verlauf ist identisch, jedoch zeigt der Graph des gesamten Größenspektrums ein ausgeprägtes Rauschsignal an. Die quantifizierbaren Ergebnisse sind in Tabelle 4-19 zusammengefasst. Der Mittelwert steigt durch das Hintergrundrauschen von 1.491 cm^{-3} (Größenbereich 30 nm – 150 nm) auf 7.296 cm^{-3} (Größenbereich 5 nm – 1000 nm) an.

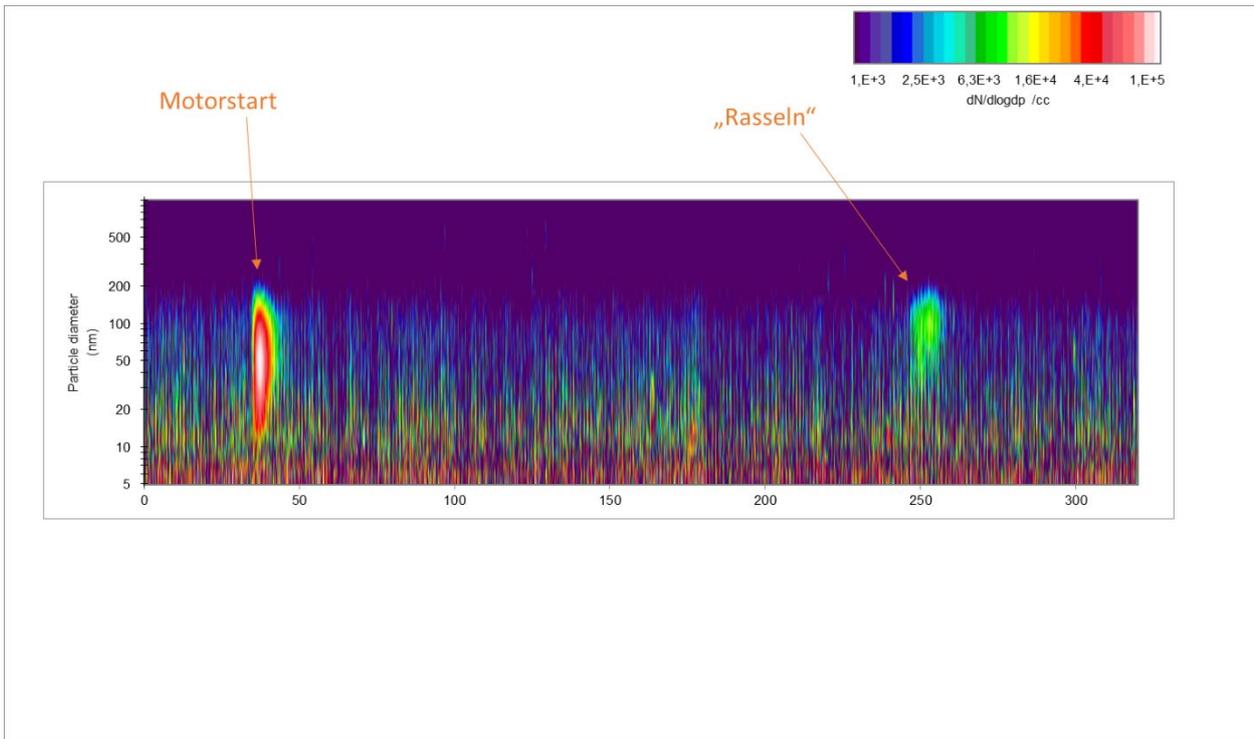


Abbildung 4-30 Konturdiagramm - Vergleichsmessung Leerlauf

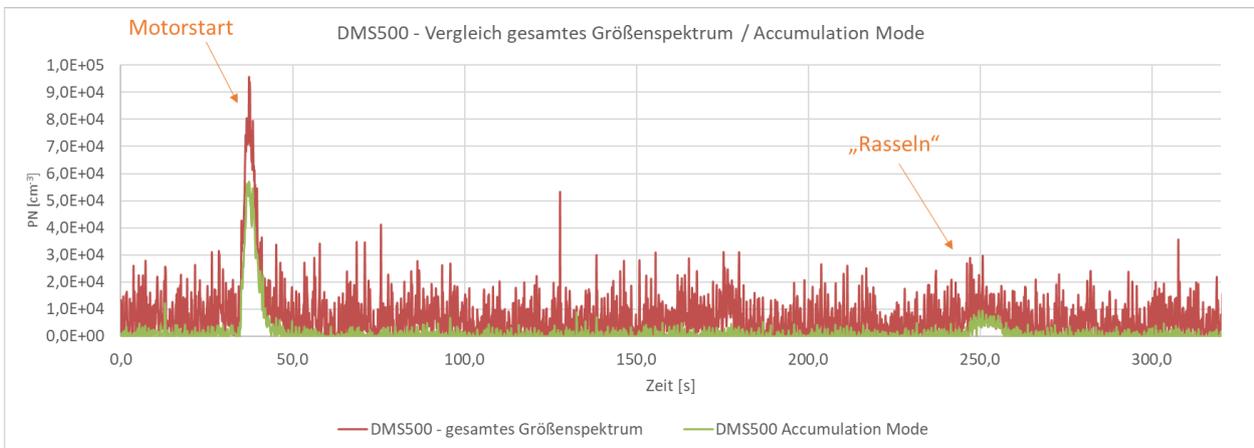


Abbildung 4-31 DMS500: gesamtes Größenspektrum im Vergleich zum „Accumulation Mode“

Messposition 6: Gerätevergleich - Leerlaufmessung		
Prüffahrzeug B		
		Conc. Post GPF [cm ⁻³]
DMS500 – Gesamtes Spektrum	Min	0
	Max	9,55E+04
	Ø	7296
DMS500 – Accumulation Mode	Min	0
	Max	5,70E+04
	Ø	1491

Tabelle 4-19 Vergleich der Auswertung „Accumulation Mode“ / gesamtes Größenspektrum

Die Zustände, in denen erhöhte PN-Emissionen erfasst wurden (Motorstart, „Rasseln“), lagen fast ausschließlich im Größenbereich des „Accumulation Mode“. Es wurde eine geringe Anzahl von Partikel im Bereich von 10-23 nm gemessen. Diese Werte bringen vor dem Hintergrund der Messgenauigkeit allerdings keine zusätzliche Erkenntnis.

4.10. Zusammenfassung Leerlaufmessung

Die beiden untersuchten Prüffahrzeugen zeigten Unterschiede in der Ausprägung der PN-Rohemissionen. Bei dem motornah verbauten und in den 3-Wege-Katalysator integrierten GPF von *Prüffahrzeug A* konnten direkt hinter dem Turbolader Rohemissionen von durchschnittlich etwa 30.000 cm^{-3} gemessen werden. *Prüffahrzeug B* wies vor dem Unterboden-GPF jedoch hinter dem 3-Wege-Katalysator im Schnitt unter 10.000 cm^{-3} auf. Die PN-Emissionen am Endrohr lagen bei beiden Prüffahrzeugen nahezu permanent im Bereich der Umgebungsluft und unter dem Messbereich der eingesetzten Messgeräte. Ausnahmen dazu bilden nur der Motorstart und bei *Prüffahrzeug B* das Auftreten des „Rasselns“. Ein solches Phänomen sollte bei der Prüfung durch Offenlegung des Fahrzeugherstellers bekannt sein, da es das Messergebnis stark beeinflusst. Grundsätzlich sind die Rohemissionen bei den geprüften Fahrzeugen so gering, dass eine Prüfung des GPF im Leerlauf nicht zielführend erscheint. Eine Erweiterung des zu erfassenden Größenbereiches auf 10 nm zeigt, dass die Peaks im Größenbereich des „Accumulation Modes“ liegen. Das bedeutet, wenn Partikel in großer Anzahl erfasst werden, haben diese eine Größe zwischen 20 und 200 nm. Kleinere Partikel sind zwar vorhanden, aber nur in geringer Anzahl.

5. Lastmessung

Der Aufbau von *Prüffahrzeug B* auf dem Rollenprüfstand, sowie die eingesetzte Messtechnik und dessen Anordnung bei der Lastmessung ist identisch zu Messposition 6 der Leerlaufmessung (vgl. Kapitel 4.9)

5.1. Prüfzyklus

Die Lastmessung wird im ASM2050 Zyklus durchgeführt (ASM = Acceleration Simulation Mode). Dieser Zyklus enthält Beschleunigungen von 0 auf 20 km/h und von 20 km/h auf 50 km/h sowie die Konstantfahrt bei 20 km/h und 50 km/h (siehe Abbildung 5-1). Die Rollenlast ist dabei konstant auf 500 N eingestellt.

Dieser Zyklus wurde u.a. bei einem Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes für die zukünftige Prüfung von Stickoxid-Emissionen an Dieselfahrzeugen angewendet (Fortentwicklung der Abgasuntersuchung, 01/2020). Eine konstante Rollenlast sollte im Hinblick auf eine periodische Reihenuntersuchung angestrebt werden, da andernfalls, für jedes Fahrzeug die Fahrwiderstandskoeffizienten bei der Prüfung vorliegen müssen und der Prüfstand dahingehend die Last individuell einregeln muss. 500 N Rollenlast entsprechen je nach dem individuellen Fahrwiderstand des Fahrzeuges einer Konstantfahrt bei ca. 80 km/h bis 100 km/h in der Ebene. Eine konstante Rollenlast von 500 N bei 20 km/h bzw. 50 km/h simuliert somit eine leichte Bergauffahrt von 2-3 % Steigung bei den entsprechenden Beschleunigungen und Geschwindigkeiten.

Das in Abbildung 5-1 dargestellte Profil des ASM2050 wurde fünfmal hintereinander abgefahren mit einer Pause im Leerlauf von 60 Sekunden.

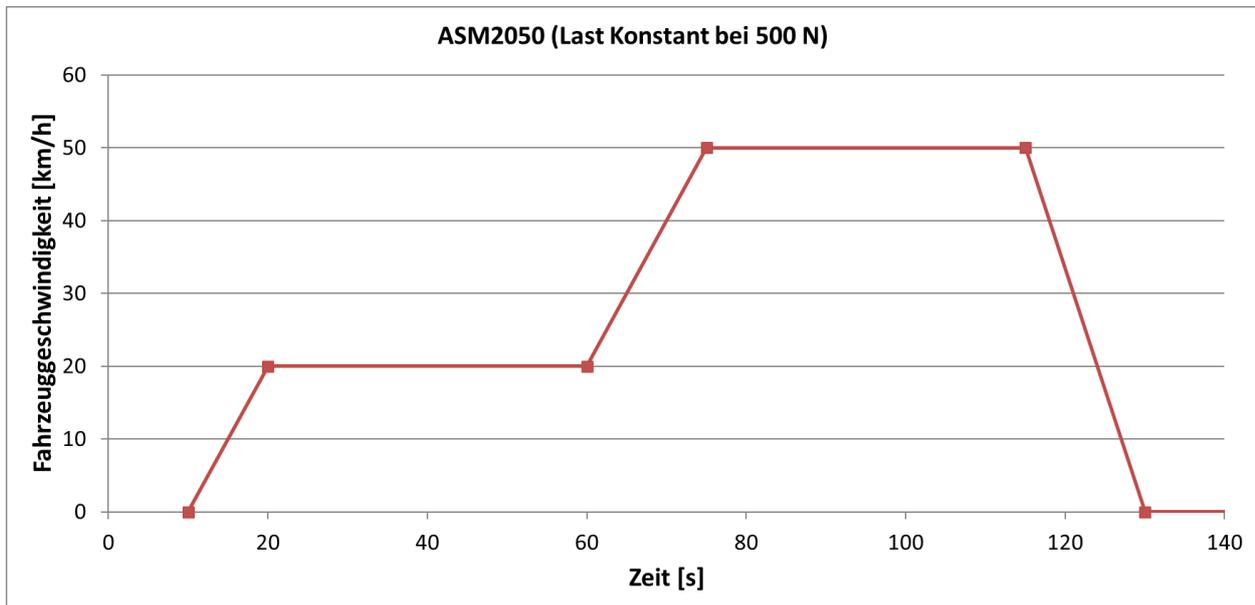


Abbildung 5-1 Verlauf ASM2050 Zyklus

5.2. Messung

Um die Auslastung des Motors zu berücksichtigen sind in Tabelle 5-1 die Motorbetriebspunkte und die PN-Emissionen, gemessen mit dem TSI (HC-)NPET Geräten, während der Phasen im Zyklus zusammengefasst. Die Motordrehzahl und der „Absolute Lastwert“ konnten über die OBD-Schnittstelle ausgelesen werden. In den Phasen der Konstantfahrt von 20 km/h und 50 km/h ergibt sich ein „absoluter Lastwert“ von ca. 30 bzw. 40 %. In der Beschleunigungsphase von 20 km/h auf 50 km/h wird der Motor deutlich höher ausgelastet mit bis zu 70 % „absolutem Lastwert“. Mit der erhöhten Motorlast steigen auch die PN-Emissionen an. Der Grund für die höheren Mittelwerte bei 50 km/h Konstantfahrt liegt an der Ausprägung des PN-Anstiegs, welcher durch die Beschleunigung hervorgerufen wird, aber erst zu Beginn der Konstantfahrt sein Maximum erreicht.

Zur Verdeutlichung sind der 1. ASM2050-Zyklus in Abbildung 5-2 und der 5. ASM2050-Zyklus in Abbildung 5-3 abgebildet. Der grün dargestellte Graph zeigt qualitativ den Geschwindigkeitsverlauf mit den beiden Konstantfahrten von 20 km/h und 50 km/h. Die PN-Emissionen bilden sich bei allen durchgeführten ASM Messungen überwiegend während der Beschleunigungsphase von 20 km/h auf 50 km/h aus. Während der Konstantfahrt von 50 km/h verringern sich die PN-Emissionen wieder. Die Messwerte vor GPF und nach GPF haben in den fünf durchgeführten ASM2050-Zyklen einen nahezu identischen Verlauf. Die PN-Emissionen hinter dem GPF sind entsprechend dem Filterwirkungsgrad reduziert.

ASM2050 500N Rollenlast: Motorbetriebspunkte					
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]	nMot [1/min]	Absoluter Lastwert [%]
20 km/h	Max	1,47E+05	3405	1888	35
	Ø	7,56E+03	<1000	1805	32
Beschleunigung von 20 km/h auf 50 km/h	Max	9,55E+05	2,44E+04	2341	73
	Ø	1,67E+05	3747	2160	68
50 km/h	Max	1,62E+06	3,81E+04	1754	46
	Ø	2,05E+05	4208	1713	41

Tabelle 5-1 Mittelwerte der einzelnen Phasen der ASM2050 Zyklen

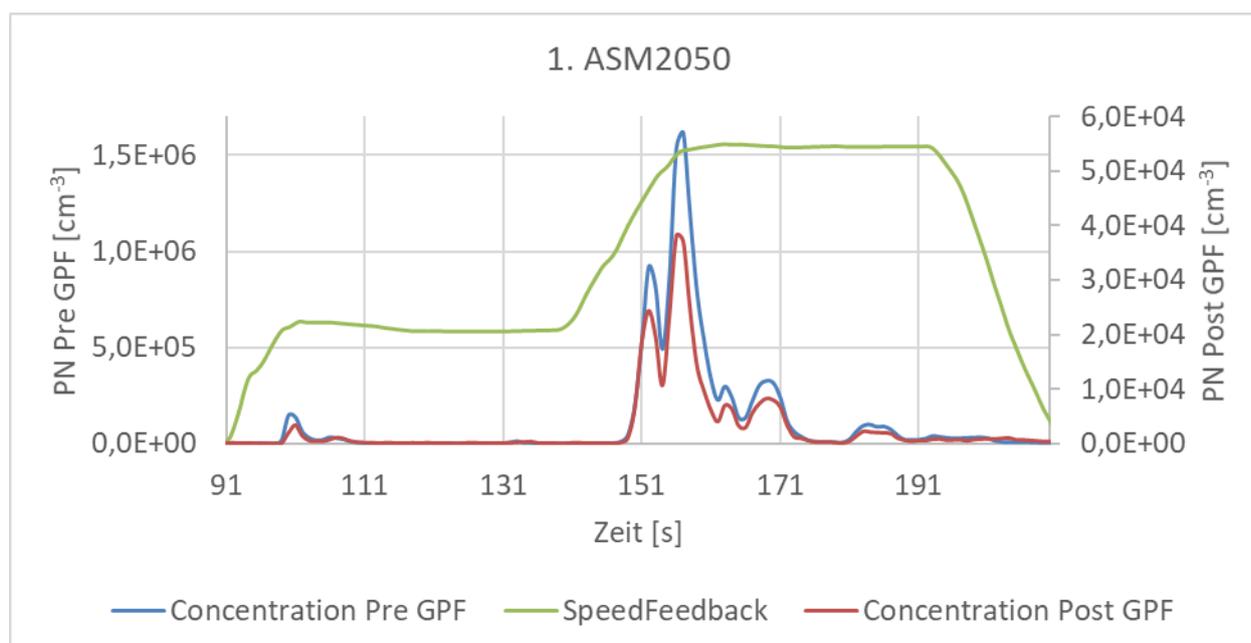


Abbildung 5-2 Verlauf der PN Emissionen vor und nach GPF über einen ASM2050 (1. Zyklus)

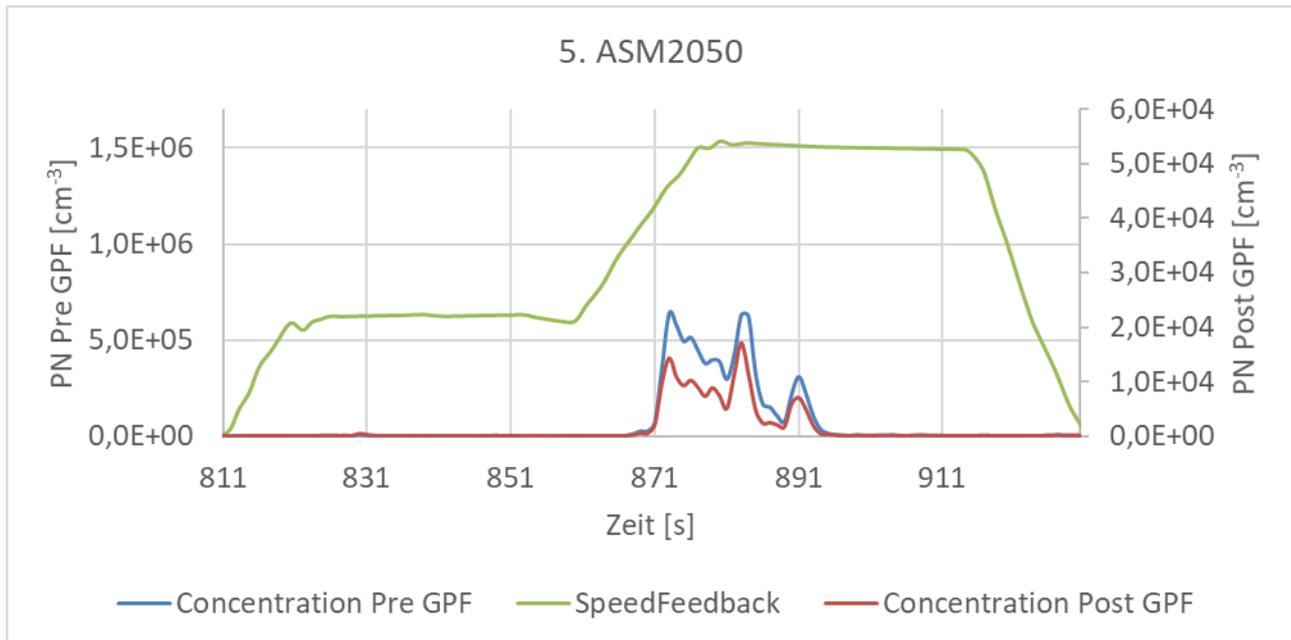


Abbildung 5-3 Verlauf der PN Emissionen vor und nach GPF über einen ASM2050 (5. Zyklus)

Die Messergebnisse des Prüffahrzeuges weisen darauf hin, dass eine hohe Beschleunigung bzw. eine erhöhte Motorlast für eine ausreichend hohe Partikelanzahl im Rohabgas erforderlich ist, um eine Prüfung in Anlehnung an die Prüfprozedur des DPF zu gewährleisten.

Bei der Konstantfahrt ist kein Anstieg der PN-Emissionen erfasst worden. Vielmehr ist in dieser Phase der Anstieg der PN-Emissionen aus der Beschleunigung abgeklungen. Hier sei noch einmal darauf hingewiesen, dass mit konstant 500 N Rollenlast bereits eine leichte Bergauffahrt simuliert wurde. Die Emissionen auf ebener Strecke mit weniger Last fallen aufgrund der niedrigeren Lastanforderung voraussichtlich noch geringer aus.

Die erforderlichen Beschleunigungen und Motorlasten zur Erzeugung höherer PN-Emissionen sind mit großer Wahrscheinlichkeit motor- und fahrzeugspezifisch. So ist es denkbar, dass ein Motor mit 1.0 L Hubraum bei anderen Lasten einen Motorbetriebspunkt mit erhöhten PN-Rohemissionen erreicht, als beispielsweise ein 3.0 L Motor mit entsprechend größeren Leistungsreserven.

5.2.1. Messgerätevergleich

Im Abbildung 5-4 ist der Vergleich der Messgeräte am Endrohr (nach GPF) anhand des 1. ASM 2050 Zyklus dargestellt. Analog zur Leerlaufmessung wurde bei dem Gerätevergleich bei dem DMS500 der „Accumulation Mode“ herangezogen. Es ist erkennbar, dass alle Messgeräte den Verlauf der PN-Emissionen auf gleichem Niveau erfassen. Das TSI NPET gibt bei Peaks, analog zur Leerlaufmessung, einen geringfügig höheren Wert aus als der AVL-PN-Counter und das DMS500 im „Accumulation Mode“.

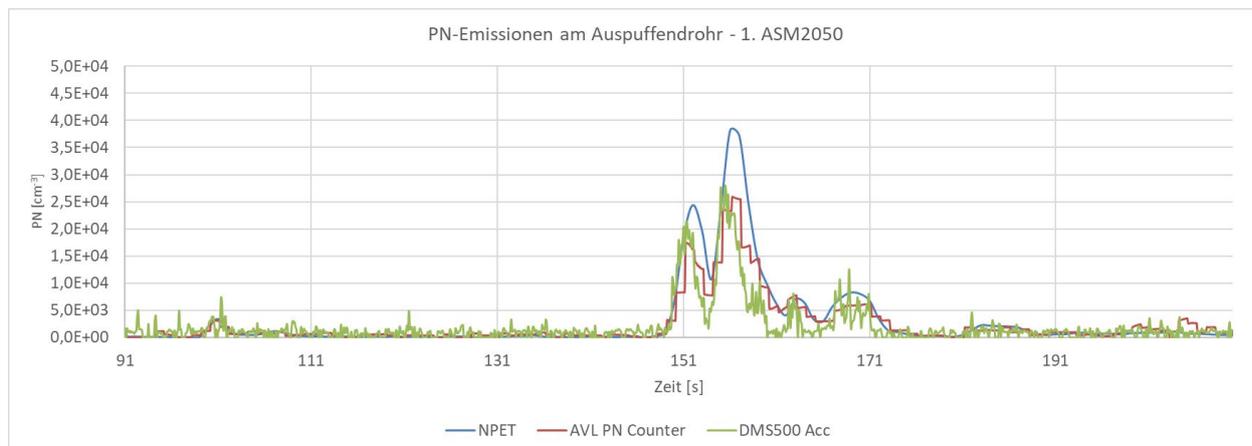


Abbildung 5-4 Verlauf der PN Emissionen am Endrohr mit verschiedenen Messgeräten über einen ASM2050 (1. Zyklus)

In Abbildung 5-5 ist das mit dem *DMS500* aufgezeichnete Größenspektrum von 5 nm bis 1000 nm des 1. ASM2050 in einem Konturdiagramm dargestellt. Unter dem Konturdiagramm ist der Geschwindigkeitsverlauf und die mit den *NPET*'s aufgezeichneten PN-Emissionen zu sehen. Die Ausschläge während der Beschleunigung von 20 km/h auf 50 km/h werden von Partikeln in einem Größenbereich zwischen 20 nm bis 200 nm hervorgerufen und liegen somit im Bereich des „Accumulation Mode“. Es ist keine erhöhte Partikelkonzentration im Bereich kleiner 23 nm erfasst worden. Das gleiche Bild zeigt Abbildung 5-6, in welcher der Verlauf des „Accumulation Mode“ und der Verlauf des gesamten Größenbereich aufgetragen ist. Es ist zu erkennen, dass sich das Hintergrundrauschen der kleinen Partikel gleichmäßig auf das Grundsignal des „Accumulation Mode“ verteilt. Dabei sei darauf hingewiesen, dass flüchtige Partikel durch einen Catalytic Stripper vor dem *DMS500* entfernt- und somit nur Feststoffpartikel erfasst werden.

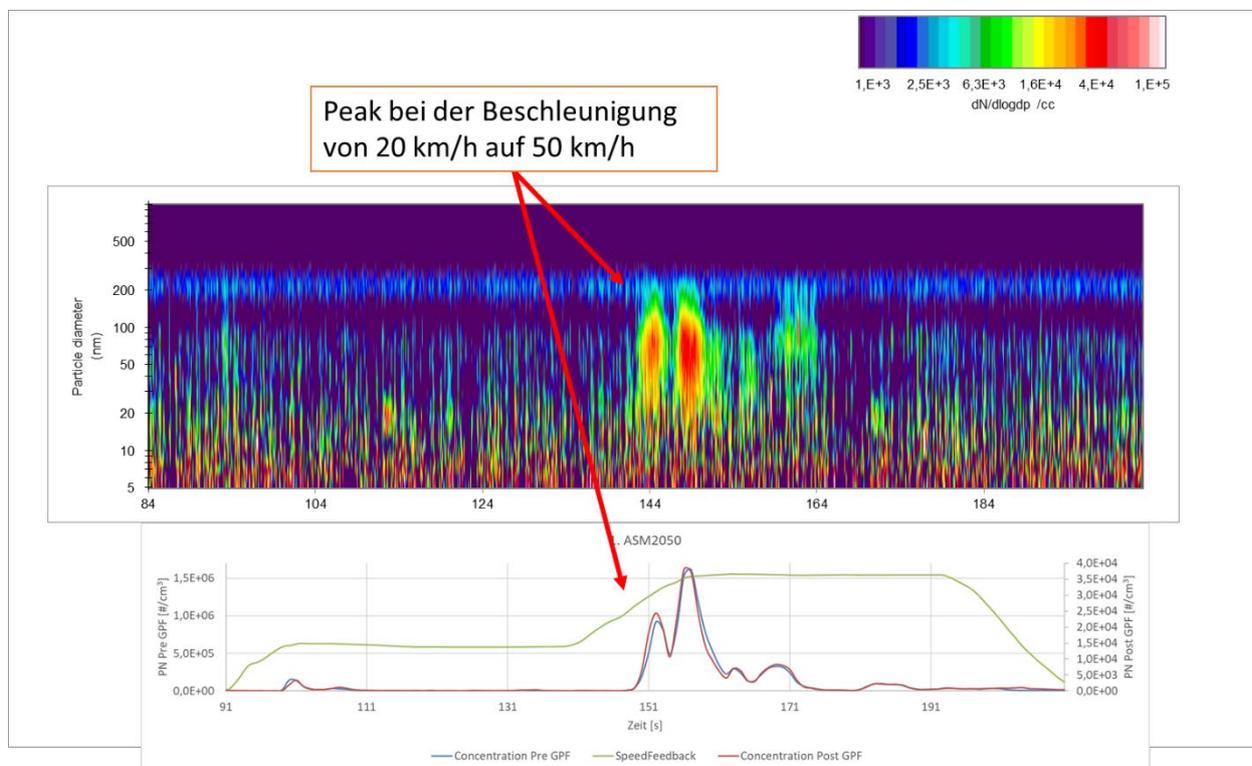


Abbildung 5-5 Konturdiagramm der Partikelgrößenverteilung nach GPF über einen ASM2050 (1. Zyklus)

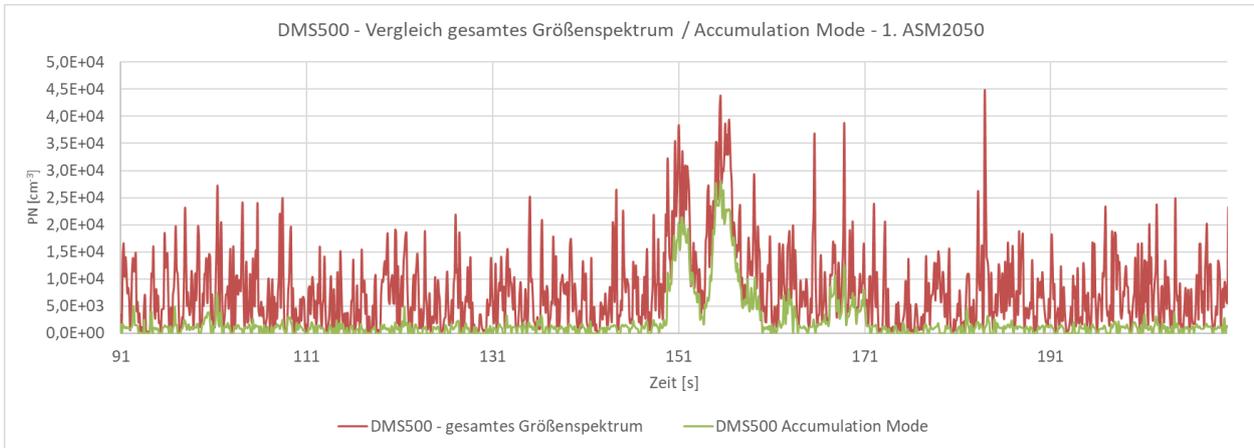


Abbildung 5-6 Vergleich PN-Verlauf am Endrohr über einen ASM2050 (1. Zyklus) gesamtes Spektrum / „Accumulation Mode“

5.2.2. Messergebnisse

Die Ergebnisse der fünf durchgeführten ASM2050 Zyklen sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst. Hier wurde jeweils der gesamte ASM2050 Zyklus ausgewertet. Die PN-Rohemissionen vor dem GPF weisen Mittelwerte zwischen 70.000 - 120.000 cm⁻³ auf. Dabei bestimmt überwiegend die Ausprägung des maximalen Wertes bei der Beschleunigung von 20 km/h auf 50 km/h die Höhe des Mittelwertes. Es sind bei diesem Fahrzeug deutlich höhere PN-Rohemissionen unter Last gemessen worden als bei einer Leerlaufmessung.

Die Ergebnisse der drei verwendeten Messgeräte für die Tailpipe-Emissionen zeigen Werte zwischen 1400 – 2900 cm⁻³ und liegen somit am untersten Messbereich der Geräte oder darunter. Für das DMS500 wurde die Auswertung sowohl für den Größenbereich „Accumulation Mode“ (30 nm – 150 nm), als auch für das gesamte Größenspektrum durchgeführt. Das oben beschriebenen Hintergrundrauschen der Partikel im „Nucleation Mode“ erhöht die gemittelten Werte entsprechend.

Lastmessung ASM2050 – 500 N Rollenlast – Prüffahrzeug B						
		TSI HC-NPET	TSI NPET	AVL PN Counter	DMS500 30-150 nm „Acc-Mode“	DMS500 5-1000 nm
		Conc. Pre GPF [cm ⁻³]	Conc. Post GPF [cm ⁻³]			
1. ASM2050	Max	1,62E+06	3,81E+04	1,29E+05	2,80E+04	4,41E+04
	Ø	1,19E+05	2.894	2.370	2.082	7.876
2. ASM2050	Max	6,79E+05	1,49E+04	1,12E+04	2,12E+05	9,71E+05
	Ø	1,07E+05	2.216	1.973	2.575	11.892
3. ASM2050	Max	9,55E+05	2,10E+04	1,28E+04	1,97E+05	8,90E+05
	Ø	1,10E+05	2.113	1.970	2.974	14.488
4. ASM2050	Max	6,51E+05	1,45E+04	1,36E+04	2,05E+05	8,06E+05
	Ø	7,06E+04	1.475	1.441	2.808	13.072
5. ASM2050	Max	6,40E+05	1,72E+04	1,76E+04	1,39E+05	6,26E+05
	Ø	6,95E+04	1.504	1.540	1.938	10.596

Tabelle 5-2 Messergebnisse der 5 ASM2050 Zyklen

6. Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieser Studie werden Filter für Abgassysteme von zwei Kfz mit Fremdzündmotoren hinsichtlich der Prüfbarkeit der Filterfunktion in der PTI untersucht. Dieses erfolgt in Anlehnung an die bereits entwickelte Messprozedur für Fahrzeuge mit Kompressionszündungsmotoren.

Die Filtertechnik in Fahrzeugen mit Kompressionszündungsmotoren und Fremdzündmotoren unterscheidet sich sowohl in dem Filter selbst als auch in der Funktion im Betrieb eines Fahrzeugs. Um einen Partikelfilter zuverlässig prüfen zu können sollte vor dem Filter eine repräsentative Partikelanzahl vorhanden sein. Wird dann hinter dem Filter eine deutlich geringere Partikelanzahl gemessen, kann eine wirksame Filterwirkung nachgewiesen werden. Die PN-Rohemissionen von Diesel- und Ottomotoren unterscheiden sich deutlich. Beim Dieselmotor liegt die Partikelkonzentration im Rohabgas bereits im Leerlauf in einem Bereich von deutlich über $1\text{E}+06\text{ cm}^{-3}$. Deshalb kann ein DPF bei einer Messprozedur im Leerlauf zuverlässig geprüft werden.

Der GPF wird laut Fahrzeughersteller primär für die Einhaltung der PN-Grenzwerte bei Kaltstarts und hoher Motorlast ins Abgassystem integriert. Um dies zu überprüfen wurden in dem Projekt Messungen vor und nach dem GPF durchgeführt. Das Ergebnis der Leerlaufmessungen dieser Studie zeigt bei den beiden untersuchten Fahrzeugen eine geringe Anzahl von Partikeln. Vor dem GPF lagen die PN-Werte im Leerlauf bei *Prüffahrzeug A* mit motornahem GPF durchschnittlich bei etwa 30.000 cm^{-3} . Beim *Prüffahrzeug B* mit Unterboden-GPF wurden vor dem GPF im Leerlauf Werte von weniger als 10.000 cm^{-3} gemessen. Die höchsten PN-Rohemissionswerte im Leerlauf konnten während der ersten 60 Sekunden nach einem Motor-Kaltstart gemessen werden.

Die untersuchte Messpositionen im Leerlauf zeigten, dass kein Betriebspunkt, weder Leerlaufdrehzahl, noch erhöhte Drehzahl, noch freie Beschleunigung für eine Untersuchung eines GPFs aktuell ausreichend hohe, kontrollierbare Rohemissionen lieferte. Bei der Untersuchung der freien Beschleunigung lag das max. Niveau der Partikelanzahl bei *Prüffahrzeug B* bei 50.000 cm^{-3} . Lediglich durch einen Kaltstart eines Fahrzeuges wurde eine hohe Menge an Partikeln, mit einem maximalen Mittelwert von $1,52\text{E}+06\text{ cm}^{-3}$ im Leerlauf erzeugt. Am Abgasendrohr wurden in allen Messpositionen ein Mittelwert von $< 2.000\text{ cm}^{-3}$ gemessen. Die einzige Ausnahme bildet der Kaltstart von *Prüffahrzeug B* welcher einen Mittelwert vom $1,14\text{E}+04\text{ cm}^{-3}$ aufwies.

Die Rohemissionen im Leerlauf sind bei den untersuchten Fahrzeugen somit grundsätzlich zu gering, um den GPF hinsichtlich seiner Filtereffizienz nach der AU PN-Dieselmessprozedur oder einem daran angelehnten Verfahren prüfen zu können. Es konnte mit den Messungen der Studie bestätigt werden, dass „erhöhte“ PN-Rohemissionen im Leerlauf auf die Kaltstartphase und/oder eine Motorlast z.B. durch freie Beschleunigungen oder das Einschalten von elektrischen Verbrauchern beschränkt sind.

Zusätzlich zur Leerlaufmessung wurde ein Fahrzeug unter Last gemessen. Diese Messung im ASM2050 Zyklus unter einer Rollenlast von 500 N erzeugte weitaus höhere PN-Rohemissionen. Die maximalen Peaks der Rohemissionen bei der Beschleunigung von 20 km/h auf 50 km/h liegen im Bereich von $6,5\text{E}+05\text{ cm}^{-3}$ bis $1,6\text{E}+06\text{ cm}^{-3}$, während die Mittelwerte der ASM Zyklen zwischen $6,9\text{E}+04\text{ cm}^{-3}$ und $1,2\text{E}+05\text{ cm}^{-3}$ liegen. Dabei bestimmt überwiegend die Ausprägung des maximalen Wertes bei der Beschleunigung von 20 km/h auf 50 km/h die Höhe des Mittelwertes. Die Ergebnisse der drei verwendeten Messgeräte für die Tailpipe-Emissionen zeigen Werte zwischen $1400 - 2900\text{ cm}^{-3}$ und liegen somit am untersten Messbereich der Geräte oder darunter.

Des Weiteren wurde die Erfassung von kleineren Partikeln als die aktuell für die Typprüfung oder der PTB-Anforderung für die Messgeräte zur Diesel-PN-AU geforderten 23 nm bei einem Fahrzeug untersucht. Die Erfassung der kleineren Partikel von bis zu 10 nm bringt in den durchgeführten Messungen sowohl im Leerlauf, als auch unter Last die Erkenntnis, dass sich das gesamte PN-Niveau nur leicht erhöht. In den Fällen, in denen eine signifikante Partikelanzahl am Endrohr gemessen wurde, liegt der Schwerpunkt der Größenverteilung zwischen 30 nm und 150 nm und wird somit von den aktuell eingesetzten Geräten erfasst.

Zusammenfassend konnte die Studie an zwei Fahrzeugen exemplarisch zeigen, dass eine Überprüfung des GPF im Rahmen der periodischen Abgasuntersuchung mittels einer Messung im Leerlauf aktuell nicht

zielführend erscheint. Dieses gilt auch bei der Messung von Partikeln im erweiterten Bereich von 10 nm-150 nm. Sollte ein GPF in Zukunft über eine PN-Messung beurteilt werden, könnte dieses mithilfe einer Messprozedur erfolgen, die unter Last erfolgt. Die Auswertung des ASM2050 unter 500 N Rollenlast hat gezeigt, dass hohe Lasten und Geschwindigkeiten erforderlich sind, um Motorbetriebspunkte zu erreichen, in denen eine Prüfung möglich erscheint.

Um einen geeigneten Lastzyklus auszuarbeiten, müsste eine signifikante Anzahl an Fahrzeugen mit unterschiedlichen Motorgrößen und GPF Anordnungen untersucht werden. Dabei sollten analog zu diesem Projekt, die PN-Rohemissionen gemessen werden, um die tatsächliche Filtereffizienz in dem Lastzyklus zu ermitteln. Dabei sollte auch Messungen mit verschlissenen, defekten oder manipulierten Filtern durchgeführt werden um den dadurch verursachten Anstieg der PN-Emissionen quantifizierbar zu machen. Dieses Vorgehen würde für die anschließende Grenzwertgestaltung wichtige Daten liefern. Je nach Ergebnis der vorgeschlagenen Untersuchung wäre es denkbar, dass dieser Lastzyklus möglicherweise sogar fahrzeug-spezifisch sein könnte.

Literatur

- Basshuysen, R. (2017). *Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung 4. Aufl.* Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2017). *Verkehrsblatt 19/2017 - Verlautbarung Nr. 158.*
- 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.
- Mollenhauer, K., & Tschöke, H. (2018). *Handbuch Dieselmotoren 4. Aufl.* Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Nowak, D. (2018). *Ruß- und Aschedeposition in Ottopartikelfiltern.* Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Reif, K. (2014). *Ottomotor - Management.* Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schumann, Buri, Kubach, Hall, & Spicher. (2010). *Untersuchung zur Partikelemission bei Benzin-Direkteinspritzung mit Einspritzdrücken bis 1000 bar.* Aachen: 19. Aachener Kolloquium für Fahrzeug- und Motorentechnik 2010.
- VdTÜV e.V.; ASA-Verband; IERC GmbH; TÜV Nord; TÜV Rheinland; TÜV Süd. (01 01/2020). *Fortentwicklung der Abgasuntersuchung.* Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/fortentwicklung-der-abgasuntersuchung> abgerufen
- VdTÜV e.V.; Dekra; ASA Verband; BAST. (08 2020). *Partikelanzahlmessung im Rahmen der Weiterentwicklung der Abgasuntersuchung.* Von <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/2361> abgerufen
- VO (EU) 2017/1151. (kein Datum).
- Volkswagen AG. (2017). *Selbststudienprogramm 558 - Der motornahe Ottopartikelfilter.* Wolfsburg.
- Volkswagen AG. (2019). *Selbststudienprogramm 590 - Der Unterboden-Ottopartikelfilter.* Wolfsburg.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Anforderungen an DPF/GPF.....	14
Tabelle 2-2 Technische Daten zu DPF/GPF.....	14
Tabelle 3-1 Daten Audi A3.....	15
Tabelle 3-2 Daten aus der OBD zu Beginn der Messreihe.....	15
Tabelle 3-3 Daten Ford Focus.....	16
Tabelle 3-4 Vorgaben an die Effizienz der Zählfunktion (VO (EU) 2017/1151).....	22
Tabelle 4-1 Messprozedur Dieselfahrzeug.....	24
Tabelle 4-2 Messpositionen (MP).....	24
Tabelle 4-3 Zusammenfassung der Auswertung MP1: Kaltstart.....	32
Tabelle 4-4 Zusammenfassung der Auswertung MP1: Warmstart.....	32
Tabelle 4-5 Zusammenfassung der Auswertung MP2: Drehzahl 2000 rpm.....	34
Tabelle 4-6 Zusammenfassung der Auswertung MP2: Drehzahl 2600 rpm (Prüffahrzeug A).....	35
Tabelle 4-7 Zusammenfassung der Auswertung MP2: freie Beschleunigung.....	37
Tabelle 4-8 Auswertung Zeiten Stabilisationsphase.....	39
Tabelle 4-9 Auswertung Beruhigungsphase nach Drehzahlanhebung.....	41
Tabelle 4-10 Messprozedur Messphase.....	42
Tabelle 4-11 Auswertung MP5: Messung 1 (Prüffahrzeug A).....	43
Tabelle 4-12 Auswertung MP5: Messung 2 (Prüffahrzeug A).....	43
Tabelle 4-13 Auswertung MP5: Messung 3 (Prüffahrzeug A).....	44
Tabelle 4-14 Auswertung MP5: Messung 1 (Prüffahrzeug B).....	45
Tabelle 4-15 Auswertung MP5: Messung 1 – exklusive „Rasseln“ (Prüffahrzeug B).....	45
Tabelle 4-16 Auswertung MP5: Messung 2 (Prüffahrzeug B).....	46
Tabelle 4-17 Auswertung MP5: Messung 3 (Prüffahrzeug B).....	46
Tabelle 4-18 Vergleich der Messgeräte - Leerlaufmessung.....	49
Tabelle 4-19 Vergleich der Auswertung „Accumulation Mode“ / gesamtes Größenspektrum.....	50
Tabelle 5-1 Mittelwerte der einzelnen Phasen der ASM2050 Zyklen.....	53
Tabelle 5-2 Messergebnisse der 5 ASM2050 Zyklen.....	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Partikelgröße und Konzentration über dem Einspritzdruck (Schumann, Buri, Kubach, Hall, & Spicher, 2010)	11
Abbildung 2-2 Skizze eines GPF (Volkswagen AG, 2017)	13
Abbildung 3-1 Anordnung von 3WC und GPF im Prüffahrzeug A (Volkswagen AG, 2017)	15
Abbildung 3-2 Anordnung von 3WC und GPF im Prüffahrzeug B (Volkswagen AG, 2019)	16
Abbildung 3-3 Edelstahlrohr mit Verbindungsmutter und Klemmring vor dem Einbau.....	17
Abbildung 3-4 Edelstahlrohr mit Verbindungsmutter (Pfeil) eingeschweißt im Abgasstrang von Prüffahrzeug A.....	17
Abbildung 3-5 Edelstahlrohr mit Verbindungsmutter (Pfeil), eingeschweißt im Abgasstrang von Prüffahrzeug B.....	18
Abbildung 3-6 Skizze zur Anordnung/Aufbau der PN-Messgeräte und OBD-Diagnose (Prüffahrzeug A).....	19
Abbildung 3-7 Skizze zur Anordnung/Aufbau der PN-Messgeräte und OBD-Diagnose (Prüffahrzeug B).....	19
Abbildung 3-8 Entnahmesonde im Abgasendrohr	20
Abbildung 3-9 Druckminderung – (Links) Zeichnung und Prinzip – (Rechts) Umsetzung.....	21
Abbildung 3-10 Druckminderer eingebaut in Prüffahrzeug A und mit Entnahmerohr und Entnahmesonde verbunden.....	21
Abbildung 3-11 Druckminderer eingebaut in Prüffahrzeug B und mit Entnahmerohr und Entnahmesonde verbunden.....	21
Abbildung 3-12: Prüffahrzeug B auf dem Rollenprüfstand im Abgaslabor.....	22
Abbildung 3-13 Darstellung vom Messprinzip des DMS500 (Cambustion Ltd)	23
Abbildung 4-1 Messschritte der Diesel-AU-PN-Messprozedur	24
Abbildung 4-2 Exemplarischer PN-Verlauf Post GPF	25
Abbildung 4-3 PN-Messwerte während eines HEPA-Filter Test	26
Abbildung 4-4 Kaltstart „Messung 2“: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug A)	27
Abbildung 4-5 Kaltstart Messung 2: Ansteigende Kühlmitteltemperatur – sinkende PN Roh-Konzentration (Prüffahrzeug A)	27
Abbildung 4-6 Warmstart Messung 2: Drehzahlüberhang < 10 Sekunden (Prüffahrzeug A)	28
Abbildung 4-7 Warmstart „Messung 2“: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug A)	28
Abbildung 4-8 Warmstart Messung 2: Ansteigende Kühlmitteltemperatur – sinkende PN Roh-Konzentration (Prüffahrzeug A)	29
Abbildung 4-9 Kaltstart Messung: Erhöhte Drehzahl nach Startvorgang (Prüffahrzeug B)	29
Abbildung 4-10 Kaltstart: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug B).....	30
Abbildung 4-11 Kaltstart: PN Konzentration vor und nach GPF (Prüffahrzeug B)	30
Abbildung 4-12 Warmstart: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug B).....	31
Abbildung 4-13 n ₂₀₀₀ Messung 2: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug A).....	33
Abbildung 4-14 n ₂₀₀₀ : Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug B).....	34
Abbildung 4-15 n ₂₆₀₀ : Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug A).....	35
Abbildung 4-16 freie Beschl. Messung 3: Beschleunigung Nr.3 und Nr. 4 (Prüffahrzeug A).....	36
Abbildung 4-17 freie Beschl. Messung 3: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug A).....	36
Abbildung 4-18 freie Beschl.: Drehzahl und PN Konzentration vor GPF (Prüffahrzeug B)	37
Abbildung 4-19 MP3 Messung 1: Motorstart – Drehzahlverhalten (Prüffahrzeug A)	38
Abbildung 4-20 MP3 Messung 1: Motorstart – PN-Rohemissionen (Prüffahrzeug A).....	39
Abbildung 4-21 MP4 „Messung 1“: DAH bei 290s und anschl. Beruhigungsphase – PN-Rohemissionen (Prüffahrzeug A)	40
Abbildung 4-22 DAH bei 225s und anschl. Beruhigungsphase – PN-Rohemissionen (Prüffahrzeug B)	41
Abbildung 4-23 MP5 „Messung 1“: Drehzahl- und Kühlmitteltemperaturverlauf (Prüffahrzeug A).....	42
Abbildung 4-24 MP5 „Messung 1“: PN-Rohemissionsverlauf (Prüffahrzeug A).....	43
Abbildung 4-25 MP5 Messung 1: PN-Rohemissionsverlauf und Drehzahl (Prüffahrzeug B)	45
Abbildung 4-26 MP Zusatz Messung 2: Motordrehmoment und PN-Rohemissionen (Prüffahrzeug A).....	47
Abbildung 4-27 Skizze der Anordnung der Messtechnik auf dem Rollenprüfstand	48
Abbildung 4-28 Probenahme vom TSI NPET und DMS500	48
Abbildung 4-29 Vergleich der Partikelzählgeräte	49
Abbildung 4-30 Konturdiagramm - Vergleichsmessung Leerlauf	50
Abbildung 4-31 DMS500: gesamtes Größenspektrum im Vergleich zum „Accumulation Mode“	50

Abbildung 5-1 Verlauf ASM2050 Zyklus	52
Abbildung 5-2 Verlauf der PN Emissionen vor und nach GPF über einen ASM2050 (1. Zyklus).....	53
Abbildung 5-3 Verlauf der PN Emissionen vor und nach GPF über einen ASM2050 (5. Zyklus).....	54
Abbildung 5-4 Verlauf der PN Emissionen am Endrohr mit verschiedenen Messgeräten über einen ASM2050 (1. Zyklus)	55
Abbildung 5-5 Konturdiagramm der Partikelgrößenverteilung nach GPF über einen ASM2050 (1. Zyklus)	55
Abbildung 5-6 Vergleich PN-Verlauf am Endrohr über einen ASM2050 (1. Zyklus) gesamtes Spektrum / „Accumulation Mode“	56

Anhang (Anlagen)

Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-PL-11165-03-00 nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Datenblatt Cambustion DMS500

Datenblatt TSI HC-NPET/NPET

Kalibrierprotokoll TSI HC-NPET 202901

Kalibrierprotokoll TSI HC-NPET 182601

Kalibrierprotokoll TSI NPET 194101



Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH

Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-PL-11165-03-00 nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Gültig ab: 09.07.2021

Ausstellungsdatum: 09.07.2021

Urkundeninhaber:

**TÜV Rheinland Kraftfahrt GmbH
Technologiezentrum Typprüfstelle
Königsberger Straße 20d, 67245 Lamsheim**

Prüfungen in den Bereichen:

Prüfungen in den Prüfgebieten Motor-/Schadstoffemission und Räder/Reifen von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger im Anwendungsbereich der Verordnung (EU) 2018/858 sowie der Verordnung (EU) 167/2013 und Verordnung (EU) 168/2013 sowie nationalen Prüfverfahren und anderer Prüfverfahren der Mitgliedsstaaten oder Drittländern

Auf Grund der Ermächtigung des Kraftfahrt Bundesamtes gemäß § 31 Abs. 2 EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung (EG-FGV) in Verbindung mit Art. 67 Abs. 1 Satz 2 VO (EU) 2018/858 wird bestätigt, dass der Urkundeninhaber kompetent ist Prüfungen im Sinne der DIN EN ISO/IEC 17025:2018 im Anwendungsbereich der Verordnung (EU) 2018/858 in den nachfolgend genannten Bereichen durchzuführen und die Anforderungen an Technische Dienste der Kategorie A gemäß Art. 68 bis 71 der Verordnung (EU) 2018/858 erfüllt.

Die Anforderungen an das Managementsystem in der DIN EN ISO/IEC 17025 sind in einer für Prüflaboratorien relevanten Sprache verfasst und stehen insgesamt in Übereinstimmung mit den Prinzipien der DIN EN ISO 9001.

Die Urkunde samt Urkundenanlage gibt den Stand zum Zeitpunkt des Ausstellungsdatums wieder. Der jeweils aktuelle Stand des Geltungsbereiches der Akkreditierung ist der Datenbank akkreditierter Stellen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) zu entnehmen. <https://www.dakks.de/content/datenbank-akkreditierter-stellen>

verwendete Abkürzungen: siehe letzte Seite

Seite 1 von 7



Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-PL-11165-03-00

Innerhalb der angegebenen Rechtsakte^x und den jeweils zugewiesenen Kompetenzfeldern^{xx} gemäß Kennzahlenkatalog des KBA, ist dem Prüflaboratorium, ohne dass es einer vorherigen Information und Zustimmung der DAkkS bedarf, die Anwendung der genormten oder ihnen gleichzusetzenden Prüfverfahren gestattet, soweit diese im Rechtsakt benannt sind. Dem Prüflaboratorium ist die Anwendung der vorgenannten Prüfverfahren in den jeweils gültigen Ausgabeständen gestattet.

Das Prüflaboratorium verfügt über eine aktuelle Liste aller Prüfverfahren im flexiblen Akkreditierungsbereich.

^{xx} Kompetenzfelder

A = Quer-, Längs und Vertikaldynamik
C = Antriebsemissionen
D = Geometrische Sachverhalte inkl. Anbauprüfungen, Massen
E = Festigkeit Komponenten und Struktur
K = Simulation, virtuelle Methoden, alternative Berechnungen

Innerhalb der mit ^{xxx} gekennzeichneten Prüfbereiche ist dem Prüflaboratorium, ohne dass es einer vorherigen Information und Zustimmung der DAkkS bedarf, die Anwendung der hier aufgeführten genormten oder ihnen gleichzusetzenden Prüfverfahren mit unterschiedlichen Ausgabeständen gestattet. Die aufgeführten Prüfverfahren sind beispielhaft. Das Prüflaboratorium verfügt über eine aktuelle Liste aller Prüfverfahren im flexiblen Akkreditierungsbereich.

Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-PL-11165-03-00

1. Prüfungen von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger im Anwendungsbereich der Verordnung (EU) 2018/858 sowie der Verordnung (EU) 167/2013 und Verordnung (EU) 168/2013 (gemäß Kennzahlenkatalog des KBA) ^x

Motor-/Schadstoffemission		02	
Emission von zwei-, drei- und vierrädrigen Kraftfahrzeugen, Kleinkraftködern, land- oder forstwirtschaftlichen Zugmaschinen, Kraftstoff- und Stromverbrauch, Klimaanlage		02-01	
70/220/EWG * 2003/76/EG	Richtlinie 70/220/EWG des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung	02-01-01	C
VO (EG) 715/2007 (einschl. VO (EG) 692/2008) * VO (EU) 2017/1151 (einschl. VO (EU) 2018/1832 sowie VO (EU) 2020/49)	Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge <i>VO (EG) 715/2007 (Anhänge III-VIII, X-XII (Emission Fz); Anhang XIII (Emission Bauteil))</i> <i>VO (EU) 2017/1151 (Anhänge I, II, IIIA, IV, V, IX-XIII, XXI)</i>	02-01-05	C K
VO (EU) 134/2014 (Anhänge II - VIII, X) * VO (EU) 2018/295	Delegierte Verordnung (EU) Nr. 134/2014 der Kommission vom 16. Dezember 2013 zur Ergänzung der Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Anforderungen an die Umweltverträglichkeit und die Leistung der Antriebseinheit sowie zur Änderung ihres Anhangs V <i>Anhang VII Anlage 2 (Stromverbrauch) und Anlage 3.3 (Elektrische Reichweite)</i>	02-01-09	C
UN-R 83 (Fremdzündungs motor) ÄS 07 06-2019	Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Emission von Schadstoffen aus dem Motor entsprechend den Kraftstoffanforderungen des Motors <i>Anhänge 4a, 5, 6, 9, 11, 12, 14</i>	02-01-11	C


Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-PL-11165-03-00

UN-R 103 ÄS 00 06-2014	Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von emissionsmindernden Einrichtungen für den Austausch für Kraftfahrzeuge	02-01-24	C
Ermittlung des Absorptionskoeffizienten von Dieselmotoren		02-02	
72/306/EWG * 2005/21/EG	RICHTLINIE DES RATES vom 2. August 1972 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission verunreinigender Stoffe aus Dieselmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen	02-02-01	C
Emission von Dieselmotoren von zwei-, drei- und vierrädrigen Kraftfahrzeugen, mobilen Maschinen und Geräten		02-03	
UN-R 83 (Selbstzündungs motor) ÄS 07 06-2019	Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Emission von Schadstoffen aus dem Motor entsprechend den Kraftstoffanforderungen des Motors <i>Anhänge 4a, 9, 11, 12, 13, 14</i>	02-03-13	C
Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs		02-04	
80/1268/EWG * 2004/3/EG	RICHTLINIE DES RATES vom 16. Dezember 1980 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über den Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen	02-04-01	C
UN-R 84 ÄS 00 01-1992	Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen, die mit einem Verbrennungsmotor ausgerüstet sind, hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs	02-04-11	C
Räder/Reifen		05	
Räder/Sonderräder		05-02	
UN-R 124 ÄS 00 01-2011	Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Rädern für Personenkraftwagen und ihre Anhänger	05-02-21	A D E

Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-PL-11165-03-00

2. Ausgewählte weitere nationale Prüfverfahren ^{xxx}

Schadstoffemissions- und Verbrauchsprüfungen

StVZO §47 Abgase
11-2019

StVZO §47 Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Partikel von
Anlage Kraftfahrzeugen mit Selbstzündungsmotor
XXVI
01-2006

Rad-/Reifenkombinationen

StVZO §30 Richtlinien für die Prüfung von Sonderrädern für Kraftfahrzeuge und
11-1998 ihre Anhänger vom 25. November 1998
4.6.1 Umlaufbiegeprüfung;
4.6.2 Abrollprüfung;
4.6.4 Impacttest

VdTÜV Mbl Begutachtung von baulichen Veränderungen an M- und N-Fahrzeugen
751 unter besonderer Berücksichtigung der Betriebsfestigkeit
01-2018 *Anh. I Nr. I.5.1.1 Prüfung der Festigkeit der Räder;*
Anh. I Nr. I.5.1.2 Anbauprüfung der Räder;
Anh. I Nr. I.5.1.3 Zuordnung Räder und Reifen;
Anh. I Nr. I.5.1.4 Freigängigkeit von Rädern und Reifen;
Anh. I Nr. I.5.1.5 Eignung der Reifen;
Anh. I Nr. I.5.1.6 Tragfähigkeit von Räder und Reifen, Achslasten;
Anh. I Nr. I.5.1.7 Verwendbarkeit von Schneeketten;
Anh. I Nr. I.5.1.8 Wirksamkeit der Radabdeckungen;
Anh. I Nr. I.5.1.9 Auswirkungen von Änderungen des Lenkrollhalbmessers;
Anh. I Nr. I.5.1.10 Thermische Belastung der Bremsanlage;
Anh. I Nr. I.5.1.11 Bremsverhalten;
Anh. I Nr. I.5.1.12-13 Fahrerprobung;
Anh. I Nr. I.5.1.14 Übereinstimmung mit weiteren gesetzlichen Vorschriften

Fahrzeuggesteuer- / -höherlegungen

VdTÜV Mbl Begutachtung von baulichen Veränderungen an M- und N-Fahrzeugen
751 unter besonderer Berücksichtigung der Betriebsfestigkeit
01-2018 *Anh. II Nr. II.5.2 u. II.5.3 Kennlinie der Achsfederung;*
Anh. II Nr. II.5.4 Einbauprüfung;
Anh. II Nr. II.5.5 Maß der Tiefer- und Höherlegung;
Anh. II Nr. II.5.6 Bodenfreiheit und Notlaufeigenschaften;
Anh. II Nr. II.5.9 u. II.5.10 Fahrerprobung;

Gültig ab: 09.07.2021
Ausstellungsdatum: 09.07.2021



Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-PL-11165-03-00

*Anh. II Nr. II.5.11 Verbindung mit Rad-/Reifenkombination;
 Anh. II Nr. II.5.12 Bremsverhalten;
 Anh. II Nr. II.5.13 Höhe Kupplungskugel;
 Anh. II Nr. II.5.14 Höhe Kennzeichen und Beleuchtung;
 Anh. II Nr. II.5.15 Prüfungen bei höhenverstellbaren Fahrwerken*

Motortuning-Maßnahmen

VdTÜV Mbl 751 01-2018 Begutachtung von baulichen Veränderungen an M- und N-Fahrzeugen unter besonderer Berücksichtigung der Betriebsfestigkeit
*Anh. IV Nr. IV.5.1.2 Motorleistungsmessung auf einem stationären Leistungsprüfstand;
 Anh. IV Nr. IV.5.2 Prüfung der Emissionen;
 Anh. IV Nr. IV.5.3 Prüfung der 3l bzw. 5l-Fz bzw. CO₂-Werte;
 Anh. IV Nr. IV.5.4 Prüfung der Geräuschentwicklung;
 Anh. IV Nr. IV.5.5 Ermittlung der Höchstgeschwindigkeit in Anlehnung an ECE-R 68;
 Anh. IV Nr. IV.5.6 Prüfung der Bremsanlage;
 Anh. IV Nr. IV.5.8 Eignung der Reifen;
 Anh. IV Nr. IV.5.9 Fahrerprobung;
 Anh. IV Nr. IV.5.10 Prüfung der Eignung des Geschwindigkeitsmessers;
 Anh. IV Nr. IV.5.11 Prüfung der zulässigen Anhängelast;
 Anh. IV Nr. IV.5.12 Übereinstimmung mit weiteren gesetzlichen Vorschriften;
 Anh. IV Nr. IV.5.13 Maßnahmen gegen Manipulation;
 Anh. IV Nr. IV.5.14 Zusätzliche Prüfungen bei Leistungs- und Drehmomentsteigerungen über 20% bis 40%;
 Anh. IV Nr. IV.5.15 Zusätzliche Prüfungen bei Leistungs- und Drehmomentsteigerungen über 40%*

Äußere Fahrzeugteile an Kraftfahrzeugen der Klassen M1 und N1

VdTÜV Mbl 744 07-2012 Prüfung von äußeren Fahrzeugteilen an Kraftfahrzeugen der Klassen M1 und N1
*Nr. 4.1 Aerodynamische Eigenschaften/Fahrverhalten;
 Nr. 4.2 u. Anh. I Nr. I.2.1 - I.2.2.2 u. Anh. II Nr. II.1.1 Formgebung und Materialbeschaffenheit;
 Nr. 4.3 Auswirkungen von äußeren Fahrzeugteilen im Frontbereich auf die Bremsanlage;
 Nr. 4.4 Auswirkungen von äußeren Fahrzeugteilen auf die Spezifikation der Fahrzeugklasse*

Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-PL-11165-03-00

3. Ausgewählte weitere Prüfverfahren von Drittländern ^{xxx}

Rad-/Reifenkombinationen

SAE J328 03-2016	Wheels passenger Car and Light Truck Performance Requirements and Test Procedures <i>Chapter 4 Dynamic Cornering Fatigue;</i> <i>Chapter 5 Dynamic Radial Fatigue</i>
SAE J175 03-2016	(R) Wheels - Impact Test Procedure – Road Vehicles
SAE J2530 04-2016	Aftermarket Wheels - Passenger Cars and Light Truck - Performance Requirements and Test Procedures
ABNT NBR 6750 04-2020	Automobile Wheels - Resistance and durability testing <i>4.1.1, 4.2.1, 5.1 Rotational fatigue testing</i> <i>4.1.2, 4.2.2, 5.2 Radial load fatigue testing</i>
ABNT NBR 6752 04-2020	Aluminium alloy wheels for passenger cars, light trucks and SUVs - Performance verification testing <i>4.1.1, 4.2.1, 5.1 Disc Rotational fatigue test</i> <i>4.1.2, 4.2.2, 5.2 Radial load fatigue testing</i> <i>4.1.3, 4.2.3, 5.3 Impact resistance testing</i>

verwendete Abkürzungen:

ABNT NBR	Associaçao Brasileira de Normas Tecnicas
ÄS	Änderungsserie
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
ISO	Internationale Organisation für Standardisierung
SAE	Society of Automotive Engineers, USA
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
UN-R	United Nations Regulation
VdTÜV Mbl	Merkblätter vom Verband der Technischen Überwachungs-Vereine
VO	Verordnung des Europäischen Rates

* in Verbindung mit Änderung bzw. Ergänzung durch

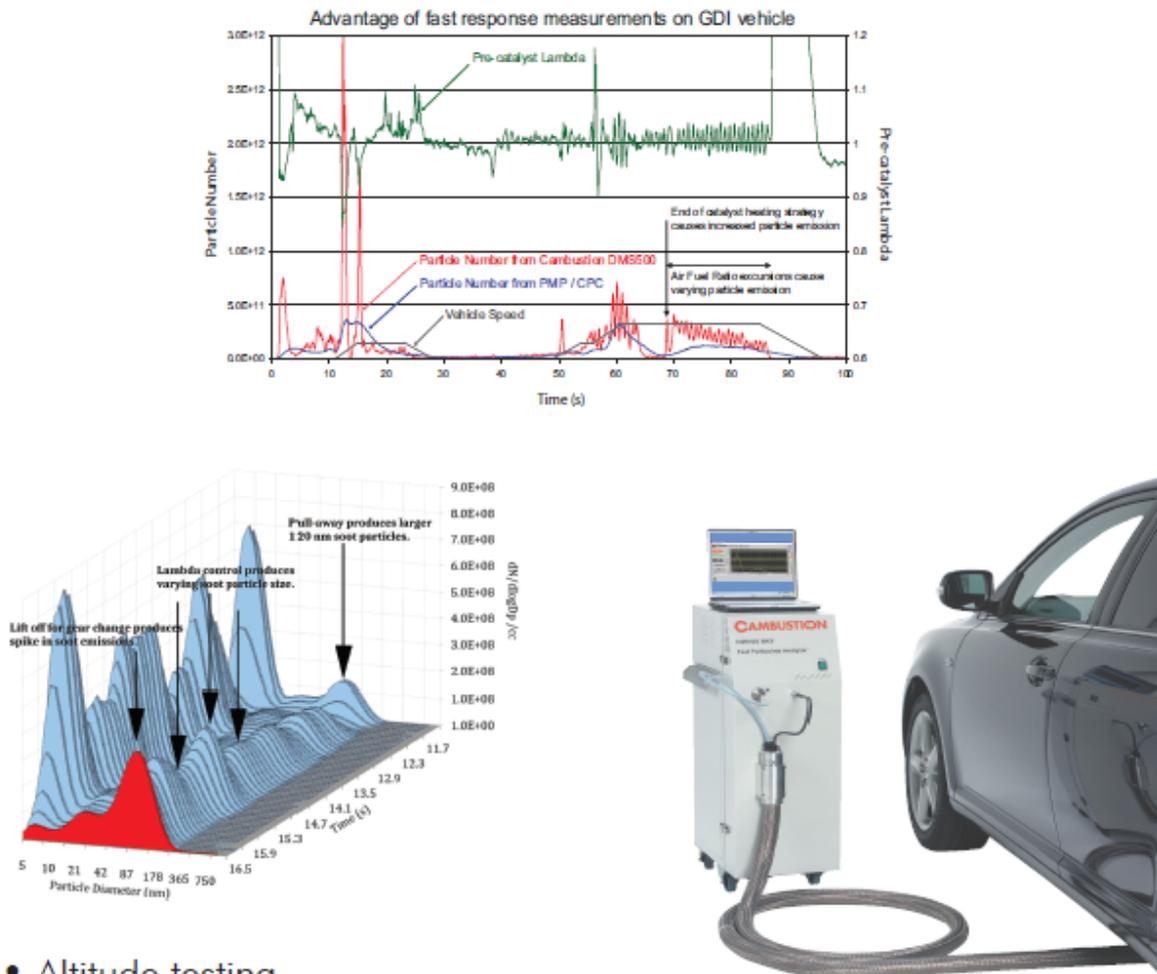
Gültig ab: 09.07.2021
Ausstellungsdatum: 09.07.2021

CAMBUSTION DMS500 MkII

The Rapid Response Engine Particulate Analyzer

- Particle size distributions from 5nm–1 μ m (5nm–2.5 μ m option)
- Particle Number (PN) with selectable 10nm & 23nm roll-offs
- Particle Mass (PM)

...all from a single instrument!



- Altitude testing
- Sub 0°C sampling capability
- Pre- and post- GPF/DPF, tailpipe or CVS sampling
- Fastest available time response (10Hz data, 200ms $T_{10-90\%}$)

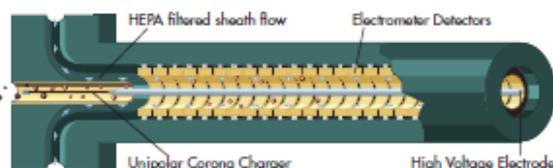
Introduction to the DMS500 MkII

The Cambustion DMS500 was the world's first production real-time nanoparticle size spectrometer. Since its launch in 2002 it has become the particulate instrument of choice at research labs, universities and the majority of vehicle OEMs worldwide.

In 2008 the DMS500 MkII updated this concept with specific attention to evolving engine testing requirements, incorporating enhancements such as higher sensitivity (ideal for post-DPF/GPF or GDI measurements) and a more flexible dilution system. Designed with engine test cell use in mind, it combines the latest in particle measurement technology with Cambustion's many years of experience at the forefront of transient engine emissions instrumentation and research.

Such refinement means that the DMS user does not need to be a particle expert. Unique and powerful data summary features allow the user to remain detached from the underlying complex aerosol data, acquiring the metric they need whilst advanced users still have access to the full particle size spectrum.

Operating Principle



The DMS500 uses a high voltage discharge to charge each particle proportional to its surface area. Charged particles are introduced into a classification section with a strong radial electrical field. This field causes particles to drift through a sheath flow toward the electrometer detectors. Particles are detected at different distances down the column, depending upon their aerodynamic drag/charge ratio. Outputs from the 22 electrometers are processed in real-time at 10Hz to provide spectral data and other metrics. To view an animation please visit: www.cambustion.com/dms

The DMS500 operates at fixed pressure to eliminate any concern about online pressure correction algorithms. It samples through a choked orifice to discourage particle agglomeration. This facilitates the wide size range of the instrument, improves time response and isolates the instrument from fluctuating sample pressure.

Unique Combination of Real-time Data

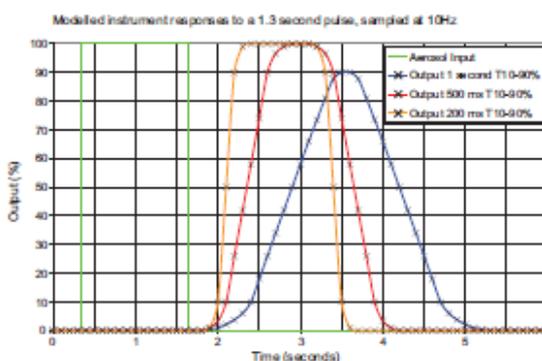
Particulate emissions legislation confronts engine developers with two issues. The traditional gravimetric technique for measuring engine particulate emissions is inherently offline, offering no information to engineers regarding emissions performance at different engine conditions. The particle number standard requires measurement of solid particle number.

The DMS500 is uniquely able to output particle size,

gravimetrically-correlated mass and particle number correlated with the Euro 6 requirements in real-time. Its integrated sampling system allows it to sample at any point between the exhaust valve and the CVS tunnel, enabling studies of engine and aftertreatment performance.

Fastest Available Time Response

The DMS500 remains the fastest available nanoparticle size spectrometer with an output data rate of up to 10Hz. However, a fast data rate is not sufficient in itself. Unique design means that the DMS500's response to a step change in concentration ($T_{10-90\%}$) is ~200ms, or ~300ms with a 5 m sample line.



An instrument can only be deemed suitable for transient measurements after considering its response to a transient, rather than simply the data logging frequency.

Calibrations for Diesel, GDI and alternative fuels

The difference in combustion processes between gasoline and Diesel results in the production of different particle types:

Nucleation mode

Both gasoline and Diesel engines (including alternative fuels) produce a nucleation mode. This mode consists of small spherical particles typically 5–50nm in diameter. These particles are composed of condensed liquids such as water, sulphuric acid, fuel, lubricating oil and compounds produced during combustion.

Accumulation mode

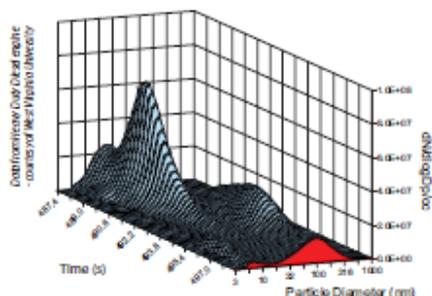
Diesel engines inject droplets of fuel into cylinder conditions where the fuel will combust spontaneously. The burning rate is limited by diffusion of oxygen to the surface of the fuel droplet which leads to locally rich combustion. This produces solid primary soot particles (typically 25nm in diameter). Due to the high concentration these particles adhere to form agglomerates.

Gasoline engines tend to produce accumulation mode particles which are closer to a spherical morphology. To allow the DMS series instruments to calculate particle mass that correlates with filter paper measurements and particle number that correlates with

CAMBUSTION

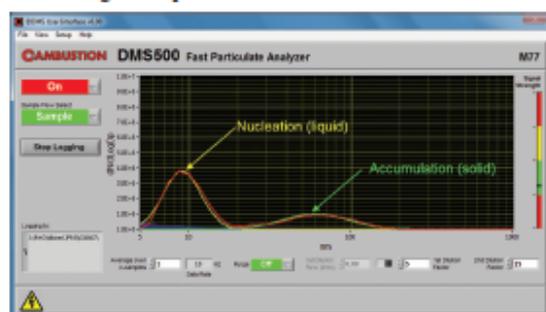
DMS500 MkII Transient Engine Particulate Analyzer

Euro 6 requirements, the software separates the nucleation and accumulation modes.



Furthermore, in all unipolar diffusion (corona) charger-based instruments, the different morphologies of accumulation mode particles from different engine types require different calibrations to most accurately give particle mass and number.

The DMS500 can be supplied with calibrations suitable for both Diesel and gasoline particulates which can be switched in software.



In the above example (Diesel engine), the continuous total spectrum in red is accompanied in real-time by the nucleation (volatile) mode in yellow, and accumulation (solid) mode in green.

Each mode is automatically summarised in the data file; recording size, particle number and gravimetrically-correlated mass. These quantities may also be sent to any of four analogue outputs for easy test cell integration. No post-processing of the text output data file is required. A suite of MS Office compatible data presentation tools is provided.



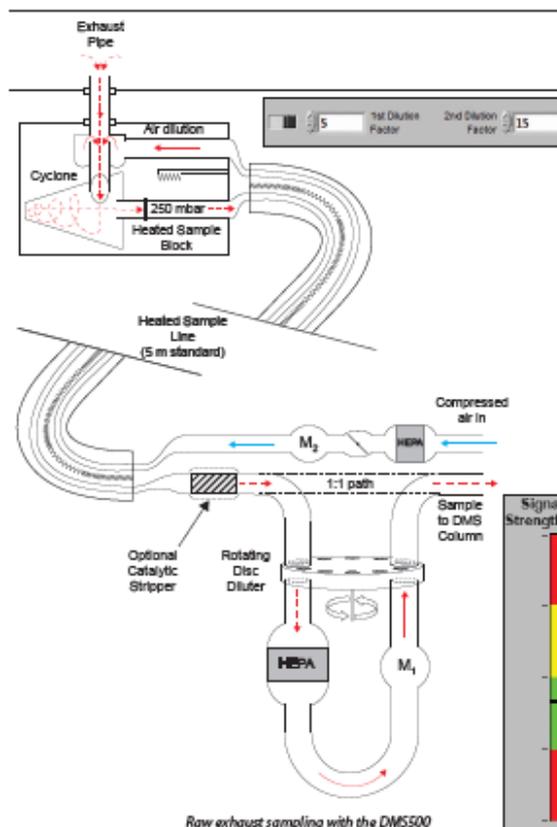
DMS500 shown with other ultra-fast Combustion analyzers (HC, NO_x, CO & CO₂)

Fully Integrated Conditioning and Dilution system

The DMS500 is fitted with a fully integrated two-stage dilution system specifically for direct engine exhaust measurements.

This provides 1st dilution at the point of sampling to avoid condensation and agglomeration, and a high factor 2nd diluter to allow sampling from a very wide range of concentrations. Control of the dilution system is integral to the PC-based user interface and the measured particulate concentration is automatically corrected for the total applied dilution.

An optional Catalytic Stripper removes volatile particles and can be bypassed if desired.



Raw exhaust sampling with the DMS500

The dilution system is calibrated for particle losses during instrument calibration and this correction is automatically applied.

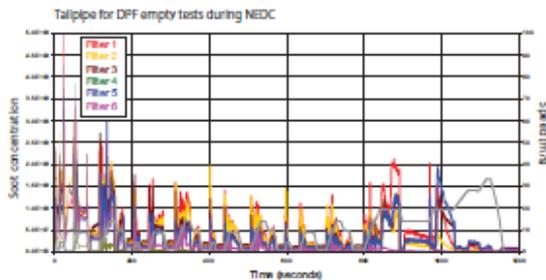
The heated sampling line can operate at up to 191°C allowing sampling directly from the exhaust of an engine with no need for a CVS. This permits measurement either side of a DPF/GPF or a general after-treatment system.

Applications

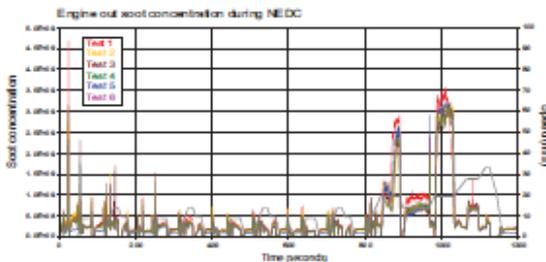
1. Gasoline & Diesel Particulate Filter Evaluation

The DMS500's raw exhaust sampling capability makes it ideal for evaluating DPF or GPF performance. Measurement upstream

of the filter allows calculation of the particle mass and number being presented to the filter, and optimization of engine-out emissions. Downstream measurement allows filter performance to be evaluated, the DMS software producing real-time data for both particle number and particle mass, coupled with particle size spectra.



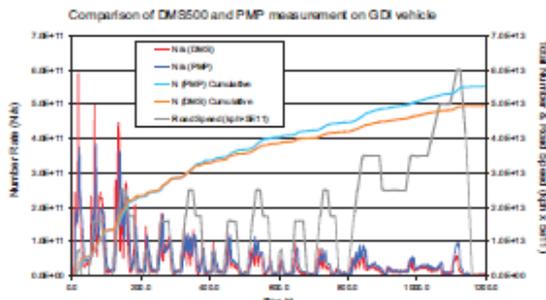
The wide dynamic range of the DMS500 and dilution system allows it to distinguish between filters of differing performance, as well as detecting a failed filter (even though the overall performance may still meet the particle number limit.)



The DMS500's sophisticated analogue inputs allow online correction from a measured concentration in N/cc to number of particles/second (using exhaust flow). Additional use of vehicle speed can show whether engine operating conditions comply with the solid particle limit.

2. GDI Calibration

The adoption of GDI technology means that engineers now need to optimise gasoline engines for particulate emissions.

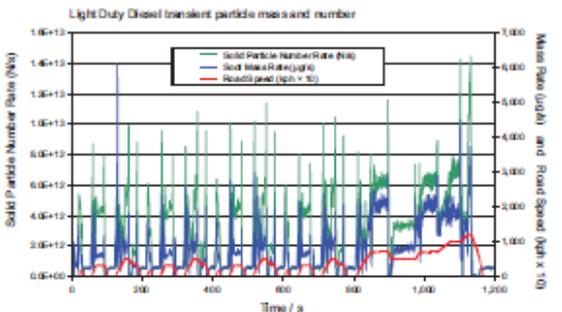


Due to the greater challenge of mixture preparation in GDI, transient engine conditions can lead to very high particle emissions,

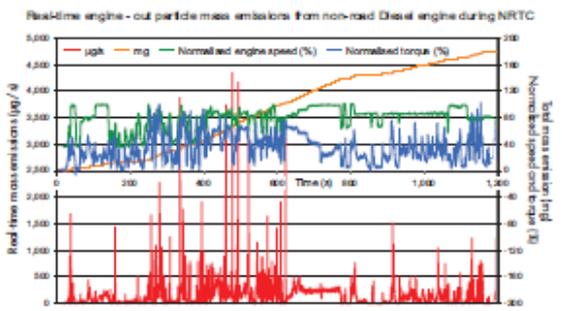
particularly just after cold start. The DMS500 can identify these transient spikes where slower PMP measurements may not (see also front cover), and can be used to evaluate different calibrations in a time-efficient manner. Even when a GPF is fitted, the reduced soot load means the GPF's efficiency never reaches that of a loaded DPF — optimization of GDI engine-out particle number remains an important task.

3. Diesel Calibration

Diesel engine calibrators now have better control over fuel injection, boost and other parameters affecting emissions. However, during engine transients, parameters such as airflow may be less accurately controlled, leading to poor combustion and resultant particle emissions. Such behaviour may also be very sensitive to external conditions.



As with GDI particle measurement, the DMS500 provides an online output of particle mass and number (including the ability to sample between the engine and the aftertreatment) — aiding engineers in reducing total emissions. The instrument's fast time response is particularly relevant when calibrating for transient cycles, including the Non-Road Transient Cycle.



4. Other engine applications

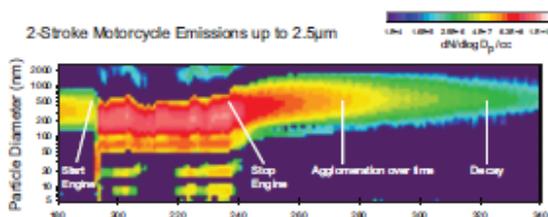
Crankcase emissions may represent a significant source of particles for some engine types. The DMS500's broad size range makes it ideal for studying such emissions which can be highly variable with engine load etc. The DMS500 also offers the ability to characterise devices such as oil mist separators.

This is particularly of interest during GDI engine development, since carbonised deposits can accumulate on the inlet valve stem, which is no longer washed with gasoline as in a PFI engine.

CAMBUSTION

DMS500 MkII Transient Engine Particulate Analyzer

Two stroke engines are often used for lighter vehicles, with an increasing emphasis on GDI to reduce hydrocarbon emissions. The introduction of small amounts of lubricating oil into the combustion air means that crankcase-scavenged two strokes present a unique problem for particle control since they can produce particles greater than 600nm. The DMS500 with its wide size range (up to 2.5 μm) is well suited for such an application.



The DMS500 is also capable of measuring the particle concentration upstream and downstream of an EGR cooler, feeding into improved EGR cooler clogging models.

Application Notes

A variety of supporting application notes regarding sampling techniques and correlation data are available at <http://www.cambustion.com/applications/DMS>

Powerful Test Cell Integration, Easy to Use Software

The DMS500 is designed as a rugged instrument to add particulate monitoring capability to a test cell. Controlled via a dedicated PC, it includes support for the AK protocol (via serial or Ethernet) allowing easy integration with the test cell, including remote control, status monitoring and data output, facilitating projects such as automated mapping.

The DMS500 also offers four channels each of analogue input and output for seamless integration with existing emissions equipment.

Instrument operation will be straightforward for gas analyzer users — PC software includes full error detection and warning. The system requires a stabilisation period of 30 minutes, and zero concentration is set automatically via an internal HEPA filter with no need for access to the sample line.

User-configurable parameters such as dilution factors and sampling rate can be set via the AK interface from the test cell, and data output is also available over AK for test bench recording if required. Rugged metal cased construction gives the DMS500 the durability to operate under industrial conditions yet it remains easily transportable between locations with quick release piping / cabling plus wheels and handles.

The DMS500 is completely controlled from the PC with no need to refer to the front of the instrument. Ethernet communications enable easy switching between different computers.

Enhanced MS Office Data Presentation Tools

DMS500 data files require no post-processing. Each file contains

all summary and spectral data. The plain text data files give the flexibility of being readable with MS Excel, MATLAB/Scilab or equivalents. A freely distributable Excel add-in assists with data presentation and produces contour plots/waterfall animations to share with colleagues, with no need for them to install additional proprietary software.

Improved Sensitivity; Wide Dynamic Range

The DMS500 with integrated dilution offers over 9 orders of magnitude in dynamic range (see specifications table). The signal strength indicator guides the operator to set dilution appropriately. Suitable use of the diluter greatly increases the instrument cleaning interval even for engine emissions. An easy-to-use cleaning tool is supplied; cleaning takes around 10 minutes.

The instrument *measures* its own true baseline noise during the automatic zeroing function, plots this on the interface and records to the data file, providing warnings both on screen and in data files when cleaning is required.

Calibration

The DMS500 is traceably calibrated for size against standard polystyrene latex (PSL) spheres and with a variety of representative aerosols through comparison with a differential mobility analyzer (DMA). A traceable standard electrometer is used for number calibration using a methodology similar to that recommended for condensation particle counter (CPC) calibration (as used in the solid particle number counting system). Aerosols used include real soot and volatile sulphuric acid. This final empirical calibration accounts for particle losses inside the instrument. Traceable calibration certificates are provided.

Dual Sampling Accessory (DSA)

This allows automated switching of the DMS500 between two different sample locations (such as pre- and post-DPF/GPF, as in the illustration below).



DMS500 with Dual Sampling Accessory for GPF/DPF studies

For more information see: www.cambustion.com/products/dsa

Specifications:

Particle size range	5nm - 1µm (5nm - 2.5µm option)
Number of Electrometers	22
Size Classification	Electrical Mobility
Dilution Factor Range	~1 - 3,000
Heated Sample Line	7, 5 or 2 metres length
Maximum 1st Dilution & Heated Line Temperature	191°C
Sample Conditioning	Optional catalytic stripper for volatile particle removal
Roll off function	Software selectable: 23 nm for Euro 6 sub 23 nm for proposed PMP4S
Max Sample Temperature	800°C
Minimum Sample Pressure	600 mb (4,200 m / 13,000 ft equivalent)
Sample Flow Rate	8 slpm (1 µm range) at 0°C + 100kpa
Instrument Dimensions / Weight	980h x 380w x 520d mm with wheels 80Kg
External Pump Dimensions / Weight	480h x 330w x 450l with wheels 46Kg
Analogue / AK Outputs	4 @ 10Hz; software configurable
Analogue / AK Inputs	4 @ 10Hz; software configurable
Instrument Zeroing	Automatic; internal HEPA filter
Stabilisation Time	30 minutes from switch on
Spectral Elements	16 or 32 / decade
Output Data Rate	10/sec - 1/min
Time Response	T _{10-90%} 200ms T _{10-90%} 300ms with 5m heated line
Calibrations:	Spherical: By NIST traceable PSL spheres & DMA size-selected NaCl / H ₂ SO ₄ , comparison with standard electrometer Agglomerate: DMA size-selected soot, comparison with standard electrometer
Service / Calibration interval	12 months
Warranty Period	12 months (extendable)
Max concentration	1 × 10 ¹¹ N/cc
PC Interface	Ethernet
Remote Control	AK Protocol (Ethernet)
Controlling Computer	Windows PC (Laptop or Desktop)

Services Required:

Electrical Supply	110-115 / 220-240 VAC 50/60Hz 1500W (main unit) 750W (pump)
-------------------	---

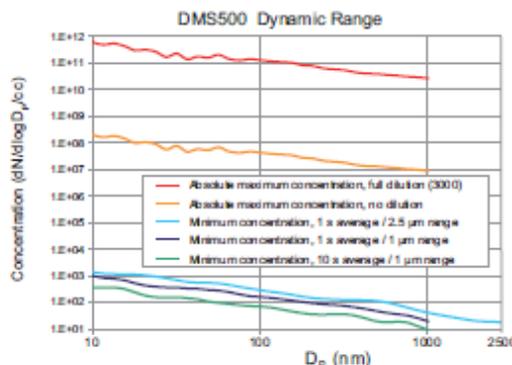
Exhaust pipe connection	6mm or 1/4 inch Swagelok
Compressed Air (for raw exhaust sampling)	Oil-free @ 3-8 bar gauge Dew point 3°C or lower ISO 8573 Class 1.4.1
Extract for vacuum pump exhaust	12 mm internal diameter pipe
Internet connection (recommended)	For remote technical support

Sensitivity (RMS at 1 Hz):

10 nm	1.0 × 10 ³ (dN/dlogD _p / cc)
30 nm	4.0 × 10 ²
100 nm	1.7 × 10 ²
300 nm	8.0 × 10 ¹
Sensitivity to typical Diesel accumulation mode (80 nm, σ _g = 1.8)	Number: ~170 N/cc Mass: ~0.5 µg/m ³ indicates typical level at which lognormal mode falls below detection threshold

All specifications subject to change without notice.

Aerosol Science Applications



The DMS500 is also suitable for general aerosol science applications. For more information please see our alternative brochure or visit www.cambustion.com/products/dms500.

Key features of the DMS500 classifier are protected by Cambustion patents: GB2,374,671 (2003), GB2,378,510 (2003) and US6,828,794 (2004).

For more information and application notes please contact:

Represented in Germany/Austria by MS4 Analysentechnik		
Telefon. +49 6033 9235-0		Email: office@ms4.info

sales@cambustion.com

tel: +44 1223 210250

www.cambustion.com

fax: +44 1223 210190

North America

tel: 1-800-416-9304

UK HQ: Cambustion Ltd

J6 The Paddocks, 347 Cherry Hinton Road,
Cambridge, CB1 8DH United Kingdom

NANOPARTICLE EMISSION TESTER MODEL 3795-HC

PORTABLE AND ACCURATE
FOR HIGH CONCENTRATIONS

Originating from the Regulatory Compliant NPET, the High Concentration NPET has been designed to measure total solid particle number concentration in emissions directly from the tailpipe. Measurements are derived from sources in-use or in the field. Sources can be internal combustion engines, gasoline- or diesel-powered engines, or biomass power plants. Featuring a robust and user-friendly design, the High Concentration NPET can be used by researchers, regulatory inspectors, and maintenance personnel alike.



The High Concentration NPET derives from the basic and unique design of the NPET 3795, which allows you to bring laboratory-grade particle counting to your worksite. With similar design to instruments used in certification testing, the built-in catalytic stripper removes volatile particles to enable measurements of total solid particle emissions only.

This design is able to handle emission levels well beyond certification levels, including the engine output upstream of the after-treatment system.

Features and Benefits

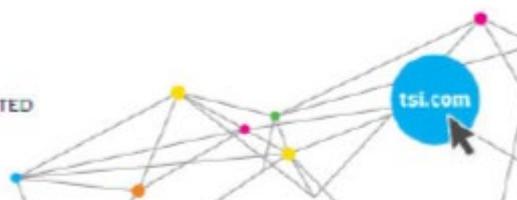
- Direct measurement of particle number concentration using proven Condensation Particle Counter (CPC) technology
- Sampling probe with integrated dilution to measure concentration up to 100,000,000 particles/cm³
- Selectable measurement modes:
 - Real-time data logging for research
 - User-defined protocols for reporting test cycle results

Applications

- In-use diesel machinery compliance certification
- Exhaust after-treatment inspection and maintenance programs
- Diesel Particulate Filter (DPF) retrofit programs
- Gasoline Particle Filter (GPF) characterization
- Fleet emissions profiling
- DPF/GPF regeneration studies
- Cold start emission measurements
- Combustion emissions research (biomass, wood burning)



UNDERSTANDING, ACCELERATED



SPECIFICATIONS

NANOPARTICLE EMISSION TESTER MODEL 3795-HC

Differences between the NPET Models

	3795	3795-HC
Application	Standard tailpipe measurements or certification according to Swiss Regulation for non-road mobile machinery SR 941.242	High concentrations such as upstream of DPF/GPF, cold start or biomass burning
Concentration Range	1,000 to 5×10^6 particles/cm ³	2,000 to 1×10^8 particles/cm ³

SPECIFICATIONS

Particle Size Range	<50% at 23 nm >50% at 41 nm Solid particles from 23 nm to 1 µm
Concentration Accuracy	± 10%
Response Time	$T_{20\%,20\%}$ and $T_{80\%,20\%}$ 4 ± 0.5 seconds
Sampling flow	0.7 L/min (nominal)
Working fluid	99.5%+ reagent-grade isopropyl alcohol, one charge lasts up to 4 hours
Catalytic Stripper	Removes > 99% of volatile particles (Equivalent 30 nm Number Median Diameter (NMD), Polydisperse $C_{50}(H_{25})$)
Environmental Operating Conditions	-10 °C to 40 °C 75 kPa to 106 kPa
Power Requirement	100 to 240 VAC, 50/60 Hz, 100 W nominal, 200 W peak
Communications	Ethernet, B-wire RJ-45 jack, 10/100 BASE-T, TCP/IP
Dimensions (H x W x D)	10.2" x 13" x 22.4" (26 cm x 33 cm x 57 cm)
Weight	13.1 kg (29.0 lbs.)

OPTIONAL ACCESSORIES

3795-TAB	Dell Tablet in protective case with Ethernet adapter
MSPR04	Microsoft Surface Tablet (w/o case or adapter)
3795L00	Hose and probe assembly for 3795
3795-HCPR00E	Hose and probe assembly for 3795-HC
803105	Isopropyl alcohol pre-soaked wicks (50 ea.)
801624	Replacement wick assembly to load wicks into NFET
8016	30 ml, Isopropyl alcohol bottles (16)



UNDERSTANDING, ACCELERATED

TSI Incorporated - Visit our website www.tsi.com for more information.

USA	Tel: +1 800 874 2011	India	Tel: +91 80 67 077 200
UK	Tel: +44 149 3 459200	China	Tel: +86 10 8219 7500
France	Tel: +33 1 41 19 21 99	Singapore	Tel: +65 6595 6288
Germany	Tel: +49 241 529050		

PM 3002220 REV. A (0-0)

©2018 TSI 000 016208

PR001 EU,SA

TSI PN 2000157



CERTIFICATE OF CALIBRATION

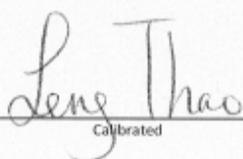
TSI Incorporated, 500 Carillon Road, Shoreview, MN 55126 USA
 TEL: 1-800-874-2811 1-651-450-2811 FAX: 1-651-490-3828 www.tsi.com

Environmental Conditions at Test			Model	3795HC
Temperature	23.5	°C	Serial Number	3795HC202901
Relative Humidity	45.7	%		
Barometric Pressure	98.4	kPa		

<input checked="" type="checkbox"/> As Left	<input checked="" type="checkbox"/> In Tolerance
<input type="checkbox"/> As Found	<input type="checkbox"/> Out of Tolerance

Calibration Standards			
Measurement Variable	System ID	Date Last Calibrated	Calibration Due Date
Temperature	E010456, E010457	12/09/2019, 12/09/2019	12/31/2020, 12/31/2020
Relative Humidity	E010456, E010457	12/09/2019, 12/09/2019	12/31/2020, 12/31/2020
Barometric Pressure	E010456, E010457	12/09/2019, 12/09/2019	12/31/2020, 12/31/2020
Total Flow	E010344	05/15/2020	08/31/2020
CPC and Secondary Dilution Volume Flow	E010592	12/04/2019	12/31/2020
Dilution Flow	E010345	05/18/2020	08/31/2020
Electrostatic Classifier	E005752	03/02/2020	03/31/2021
Condensation Particle Counter	E005733	03/02/2020	03/21/2021

TSI Incorporated does hereby certify that the above described instrument conforms to the original manufacturer's specifications (not applicable to As Found data) and has been calibrated using standards whose accuracies are traceable to the National Institute of Standards and Technology within the limitations of NIST's calibration services or have been derived from accepted values of natural physical constants or have been derived by the ratio type of self calibration techniques. TSI is registered to ISO 9001:2000 and meets the requirements of ISO 10012:2003, Quality Assurance Requirements for Measuring Equipment. This report may not be reproduced, except in full, unless permission for the publication of an approved abstract is obtained in writing from the calibration organization issuing this report.



 Calibrated

July 16, 2020

_____ Date

TSI PM 2007157



CERTIFICATE OF CALIBRATION

TSI Incorporated, 500 Carillon Road, Shoreline, WA 98148 USA
 TEL: 1-800-874-2811 1-425-493-2511 FAX: 1-852-430-3824 www.tsi.com

Calibration Interval	
Calibration Date	Expiration Date
July 16, 2020	July 16, 2021

Environmental Conditions for Flow Calibration	
Temperature	23.5 °C
Relative Humidity	45.7 %
Barometric Pressure	98.4 kPa

Flow Rates and Dilution Factors						
Flow	Target Value [L minute ⁻¹]	Reference [L minute ⁻¹]	UUT Measured [L minute ⁻¹]	Error [%]	Allowable Range [%]	Pass/Fail
CPC Flow	0.100	0.101	0.097	-3.6	±5	Pass
Bypass Flow	0.60 +/- 0.02	0.601	0.595	-1.0	±5	Pass
Primary Dilution Air Flow	6.3	6.266	6.300	0.5	±5	Pass
Primary Dilution Factor	10	9.932	10.003	0.7	±10	Pass
Secondary Dilution Sample Flow	0.025 to 0.050	0.039	0.039	0.6	±5	Pass
Secondary Dilution Factor	14 to 30	18.031	17.371	-3.7	±10	Pass

Environmental Conditions for CPC Calibration	
Temperature	23.7 °C
Relative Humidity	42.0 %
Barometric Pressure	98.3 kPa

CPC Calibration (Polydisperse Soot)	
Reference Concentration [cm ⁻³]	UUT CPC Uncorrected Concentration [cm ⁻³]
1.287E+03	9.752E+02
2.656E+03	2.082E+03
7.225E+03	5.736E+03
1.310E+04	1.020E+04
2.517E+04	2.030E+04
7.390E+04	6.057E+04
1.682E+05	1.412E+05
2.702E+05	2.347E+05
4.770E+05	4.039E+05
5.384E+05	4.331E+05

Calibration Coefficients	
Parameter	Value
C1	1.1215
C2	-3.6734E-02
C3	3.1279E-03

CPC Linearity					
Reference Concentration [cm ⁻³]	UUT CPC Concentration [cm ⁻³]	Linearity Residual [cm ⁻³]	Difference [%]	Allowable Range [%]	Pass/Fail
1.287E+03	1.281E+03	5.785E+00	-0.4	±10	Pass
2.656E+03	2.698E+03	-4.136E+01	1.6	±10	Pass
7.225E+03	7.284E+03	-5.938E+01	0.8	±10	Pass
1.310E+04	1.279E+04	3.068E+02	-2.3	±10	Pass
2.517E+04	2.507E+04	1.038E+02	-0.4	±10	Pass
7.390E+04	7.332E+04	5.851E+02	-0.8	±10	Pass
1.682E+05	1.692E+05	-9.767E+02	0.6	±10	Pass
2.702E+05	2.805E+05	-1.024E+04	3.8	±10	Pass
4.770E+05	4.829E+05	-5.957E+03	1.2	±10	Pass
5.384E+05	5.181E+05	2.033E+04	-3.8	±10	Pass
Linearity Parameter		Value	Allowable Values	Pass/Fail	
Slope (a ₁)		1.01	1.00 ± 0.10	Pass	
r ²		0.9992	0.97 - 1.00	Pass	

TSI P/N 2300157



CERTIFICATE OF CALIBRATION

TSI Incorporated, 500 Carlglen Road, Shoreview, MN 55126 USA
 TEL: 1-800-874-2813 1-651-480-2801 FAX: 1-651-495-3824 www.tsi.com

Environmental Conditions for System Tests	
Temperature [°C]	23.8
Relative Humidity [%]	43.0
Barometric Pressure [kPa]	98.5

Particle Concentration Correction Factor (200 nm monodisperse soot)				
Reference Concentration [cm ⁻³]	Downstream Concentration [cm ⁻³]	Ratio	Allowable Range	Pass/Fail
5.772E+03	3.896E+03	1.48	1.00-1.80	Pass
1.796E+04	1.293E+04	1.39	1.00-1.80	Pass
2.778E+04	1.967E+04	1.41	1.00-1.80	Pass
Parameter	Value	Allowable Values	Pass/Fail	
C _d	1.4072	1.00 - 1.80	Pass	

System Efficiency (monodisperse soot)					
Particle Size [nm]	Reference Concentration [cm ⁻³]	UUT Concentration [cm ⁻³]	Efficiency [%]	Allowable Range [%]	Pass/Fail
23.0	6.367E+03	3.019E+03	47.4	20-60	Pass
41.0	7.396E+03	6.351E+03	85.9	30-110	Pass
70.0	7.022E+03	6.700E+03	95.4	70-110	Pass
200.0	8.148E+03	8.506E+03	104.4	90-110	Pass

False Particle Count/Zero Count				
Type	Sample Time [seconds]	Average Concentration [cm ⁻³]	Maximum Allowed Concentration [cm ⁻³]	Pass/Fail
One Hour Quality Check	3600	0.00	1.0	Pass

*Volumes are given at standard conditions. Standard conditions are defined as 20°C and 101.325 kPa

Model 3795HC SN 3795HC202901 Thursday, July 16, 2020

Page 3 of 3

TSI PM 2900157



CERTIFICATE OF CONFORMANCE AND TESTING

TSI Incorporated, 500 Cardigan Road, Shoreview, MN 55126 USA
Tel: 1-800-874-2811 1-651-490-2811 Fax: 1-651-490-3824 <http://www.tsi.com>

Environment Conditions			Model	3795
Temperature	73.84 (23.2)	°F (°C)		
Relative Humidity	35.5	%RH		
Barometric Pressure	28.96 (980.7)	inHg (hPa)		
			Serial Number	3795194101

As Left In Tolerance
 As Found Out of Tolerance

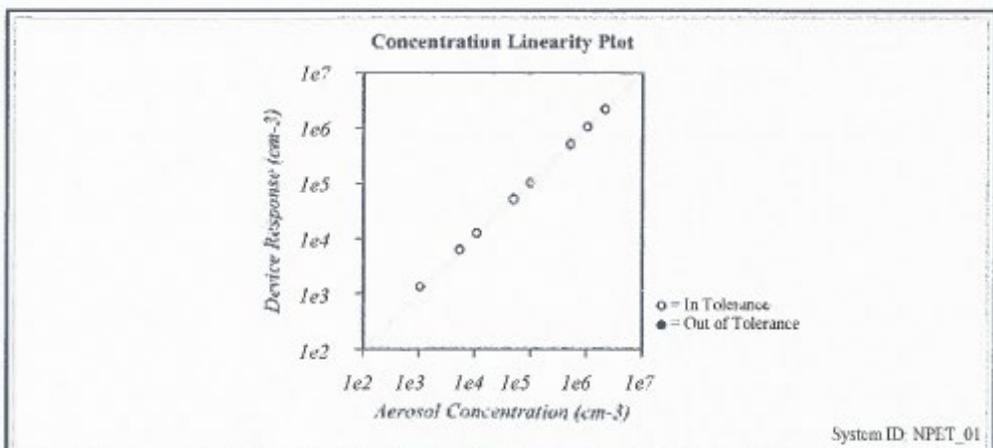
FLOW VERIFICATION		SYSTEM NPET_01			Unit: lpm
Parameter	Reference	Measured	% Difference	Allowable Range	
Bypass Flow	0.591	0.592	0.250 %	< 7.0 %	
CPC Flow	0.099	0.100	1.440 %	< 7.0 %	
Dilution Flow	6.316	6.300	0.250 %	< 7.0 %	

EFFICIENCY VERIFICATION		SYSTEM NPET_01			Unit: cm ³
Size	Reference	Measured	Efficiency	Allowable Range %	
23nm	5163.214	290.614	5.629 %	< 45.0 %	
41nm	16782.140	10159.320	60.536 %	> 50.0 %	

CONCENTRATION VERIFICATION		SYSTEM NPET_01			Unit: cm ³
#	Reference	Measured	Efficiency	Allowable Range %	
1	1058.153	1328.718	125.570 %	70.0 ~ 130.0 %	
2	5474.750	6256.675	114.282 %	70.0 ~ 130.0 %	
3	10995.660	12324.230	112.083 %	70.0 ~ 130.0 %	
4	48900.930	51785.390	105.899 %	85.0 ~ 115.0 %	
5	97917.260	100950.200	103.097 %	85.0 ~ 115.0 %	
6	504907.900	506312.700	100.278 %	85.0 ~ 115.0 %	
7	1042382.000	1040238.000	99.794 %	85.0 ~ 115.0 %	
8	4959329.000	4948984.000	99.791 %	85.0 ~ 115.0 %	

Model 3795 SN 3795194101 October 09, 2019
Page 1 of 2

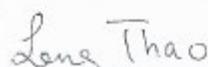
45100002 NPET 01



SLOPE AND R ² VERIFICATION				SYSTEM NPET_01			
Parameter	Target	Measured	Allowable Range	Parameter	Target	Measured	Allowable Range
Slope	1.000	0.998	0.950 - 1.050	R ²	1.000	1.000	0.950 - 1.000

TSI Incorporated does hereby certify that all materials, components, and workmanship used in the manufacture of this equipment are in strict accordance with the applicable specifications agreed upon by TSI and the customer and with all published specifications. All performance and acceptance tests required under this contract were successfully conducted according to required specifications.

Measurement Variable	System ID	Last Cal	Cal. Due	Measurement Variable	System ID	Last Cal	Cal. Due
CPC 3776	E005275	05-08-19	11-30-19	Inlet Flow	E010344	08-08-19	11-30-19
Dilution Flow	E010345	08-08-19	11-30-19	Bypass Flow	E010346	08-08-19	11-30-19
CPC Flow	E010347	08-08-19	11-30-19	Classifier	E005276	11-16-18	11-30-19



 Calibrated

October 9, 2019

 Date


TSI INCORPORATED

500 Cardigan Road, Shoreview, MN 55126 USA
 tel 651 450 2811 + toll free 800 674 2811 + fax 651 765 3729 + web www.tsi.com

Manufacturer's Declaration of Conformity

In accordance with ISO 17050-1:2010

Manufacturer's Name	TSI Incorporated
Manufacturer's Address	500 Cardigan Road Shoreview, MN 55116 USA
Measuring Instrument Type	Measuring instruments for nanoparticles from combustion engines
Designation of Measuring Instrument	Model 3795 NPET (NanoParticle Emission Tester)
Conformity Evaluation Body	METAS-Cert
Address of Conformity Evaluation Body	No. CH01 Lindenweg 50 CH-3003 Bern-Wabern, Switzerland

TSI Incorporated does hereby declare that, to the best of its knowledge and belief, the Model 3795 NPET meets the essential requirements and is in conformity with the following ordinances:

- Ordinance of 15 February 2006 on Measuring Instruments (OIMes, SR 941.210), Annex 2, Module B
- Ordinance of the FDJP of 19 March 2006 on Exhaust Gas Analysers (OIGE, SR 941.242), Annexes 4 and 5

Instrument serial number (SN) **3795194101** meets the requirements listed above.

Signed for and on behalf of TSI Incorporated:

Ryan Snell
Vice President of Operations

October 9, 2019

Date

European Contacts:

TSI GmbH - Aachen
Neukoellner Strasse 4
52068 Aachen
Germany
Tel: +49-241-523030
Fax: +49-241-5230349

TSI Instruments Ltd.
Stirling Road
Cressex Business Park
High Wycombe, Buckinghamshire
HP12 3RT
United Kingdom
Telephone: +44 (0) 149 4 459200
Fax: +44 (0) 149 4 459700

TSI France Inc.
Hôtel technologique
BP 100
Technopôle de Château-Gombert
13382 Marseille Cédex 13
France
Phone: +33 (0)4 91 11 87 64
Fax: +33 (0)4 91 11 87 65

TBI Part 230015



CERTIFICATE OF CALIBRATION

TSI Incorporated, 700 Carigan Road, Shoreview, MN 55124 USA
 Tel: 1-800-874-3811 1-651-489-3811 Fax: 1-651-459-3821 www.tsi.com

Calibration Interval	
Calibration Date	Expiration Date
November 2, 2020	November 2, 2021
Environmental Conditions for Flow Calibration	
Temperature	19.2 °C
Relative Humidity	50.6 %
Barometric Pressure	98.0 kPa

Flow Rates and Dilution Factors						
Flow	Target Value [L minute ⁻¹]	Reference [L minute ⁻¹]	UUT Measured [L minute ⁻¹]	Error [%]	Allowable Range [%]	Pass/Fail
CPC Flow	0.100	0.100	0.100	-0.2	±5	Pass
Bypass Flow	0.60 ± 0.03	0.611	0.600	-1.8	±5	Pass
Primary Dilution Air Flow	0.3	6.343	6.300	-0.7	±5	Pass
Primary Dilution Factor	10	9.916	9.997	0.8	±10	Pass
Secondary Dilution Sample Flow	0.025 to 0.050	0.039	0.039	-1.0	±5	Pass
Secondary Dilution Factor	14 to 30	18.145	18.050	-0.5	±10	Pass

Environmental Conditions for CPC Calibration	
Temperature	10.2 °C
Relative Humidity	42.0 %
Barometric Pressure	98.7 kPa

CPC Calibration (Polydisperse Soot)	
Reference Concentration [cm ⁻³]	UUT CPC Uncorrected Concentration [cm ⁻³]
1.506E+03	1.116E+03
2.849E+03	2.134E+03
6.323E+03	5.290E+03
1.236E+04	6.622E+03
2.971E+04	1.855E+04
7.176E+04	5.758E+04
1.634E+05	1.364E+05
2.866E+05	2.303E+05
4.587E+05	4.240E+05
5.051E+05	4.569E+05
Calibration Coefficients	
Parameter	Value
C1	1.0706
C2	-1.0456E-02
C3	-8.1518E-05

CPC Linearity					
Reference Concentration [cm ⁻³]	UUT CPC Concentration [cm ⁻³]	Linearity Residual [cm ⁻³]	Difference [%]	Allowable Range [%]	Pass/Fail
1.506E+03	1.457E+03	4.971E+01	-3.3	±10	Pass
2.849E+03	2.789E+03	5.995E+01	-2.1	±10	Pass
6.323E+03	6.876E+03	-5.527E+02	8.7	±10	Pass
1.236E+04	1.741E+04	-4.065E+01	0.3	±10	Pass
2.972E+04	2.361E+04	1.150E+02	-0.5	±10	Pass
7.176E+04	7.093E+04	8.304E+02	-1.2	±10	Pass
1.634E+05	1.625E+05	9.218E+02	-0.6	±10	Pass
2.866E+05	2.679E+05	1.866E+04	-6.5	±10	Pass
4.587E+05	4.778E+05	-1.910E+04	4.2	±10	Pass
5.051E+05	5.228E+05	-7.672E+03	1.5	±10	Pass
Linearity Parameter		Value	Allowable Values	Pass/Fail	
Slope (s ₁)		0.99	1.00 ± 0.10	Pass	
r		0.9988	0.97 - 1.00	Pass	

REF: 00007 PHL 001 001



CERTIFICATE OF CALIBRATION

TSI Incorporated, 200 Cardigan Road, Shoreville, MN 55118 USA
 TEL: 1-800-871-3811 1-851-491-3811 FAX: 1-851-490-3824 email: tsinfo@tsi.com

Environmental Conditions for System Tests

Temperature [°C]	20.2
Relative Humidity [%]	42.6
Barometric Pressure [kPa]	98.7

Particle Concentration Correction Factor (200 nm monodisperse soot)

Reference Concentration [cm ⁻³]	Downstream Concentration [cm ⁻³]	Ratio	Allowable Range	Pass/Fail
6.442E+03	3.668E+03	1.76	1.00-1.80	Pass
1.683E+04	5.601E+03	1.75	1.00-1.80	Pass
2.917E+04	1.644E+04	1.77	1.00-1.80	Pass
Parameter	Value	Allowable Values	Pass/Fail	
C ₁	1.7684	1.00 - 1.80	Pass	

System Efficiency (monodisperse soot)

Particle Size (nm)	Reference Concentration [cm ⁻³]	ULP Concentration [cm ⁻³]	Efficiency [%]	Allowable Range [%]	Pass/Fail
25.0	5.928E+03	2.352E+03	39.7	20-60	Pass
41.0	8.705E+03	6.705E+03	77.0	30-110	Pass
70.0	6.736E+03	6.632E+03	98.5	70-110	Pass
200.0	5.811E+03	5.945E+03	102.3	90-110	Pass

False Particle Count/Zero Count

Type	Sample Time (seconds)	Average Concentration [cm ⁻³]	Maximum Allowed Concentration [cm ⁻³]	Pass/Fail
One Hour Quality Check	3600	0.00	1.0	Pass

*Volumes are given at standard conditions. Standard conditions are defined as 20°C and 101.325 kPa

Model 3795HC SN 3795HC182601 Monday, November 03, 2020

Page 3 of 3