



Emmen 11. Juni 2019

Partikelanzahl-Messungen an Dieselpersonenwagen

**Untersuchung an im Gebrauch stehenden Fahrzeugen der Abgasnorm
Euro 5b oder höher**

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Auftraggeber**Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien,**

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 93 11 · Fax. +41 58 462 99 81 · info@bafu.admin.ch · www.bafu.admin.ch

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer**Touring Club Schweiz**

Postadresse: Buholzstrasse 40, CH-6032 Emmen

Tel. +41 58 827 36 24 · Fax. +41 58 827 69 00 · experte.mobe@tcs.ch · www.tcs.ch

Autor

Sascha Grunder · Leiter Umwelt und Energie · TCS Mobilitätsberatung

Begleitung BAFU:

S. Krähenbühl, Sektion Verkehr, BAFU

„Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.“

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
1. Einleitung	5
2. Materialien und Methoden.....	5
2.1. TSI Nanopartikel-Emissionstester (NPET) Modell 3795	5
2.2. Testo NanoMet3.....	7
2.3. Messmethodik	8
3. Resultate	10
3.1. Messserie	11
3.2. Resultate Messungen NPET	12
3.3. Resultate Messungen NanoMet3	15
4. Diskussion.....	18
4.1. Untersuchung eines der auffälligen Partikelfilter	18
4.2. Partikelemissionen während der Regenerationsphase.....	19
4.3. Fazit	20
5. Verzeichnisse	21
5.1. Literatur	21
5.2. Abbildungen	21
5.3. Tabellen	21
5.4. Grafiken.....	21
6. Anhang.....	22
6.1. Technische Daten	22
6.2. Messresultate	23
6.3. Empa-Bericht Nr. 00.5082.PZ/S085-1577	31

Zusammenfassung

Spätestens seit der Einführung eines Partikelanzahl-Grenzwertes bei der Typengenehmigung von Kompressionszündungsmotoren der Abgasstufe Euro 5b für neue Fahrzeugtypen im September 2011 respektive für neu in Verkehr gesetzte Fahrzeuge ab Januar 2013 sind Diesel-Personenwagen mit Partikelfiltern ausgerüstet. 2017 waren rund 76% des Bestandes der dieselpetriebenen Personenwagen (Bundesamt für Statistik, 2018) mit einem Partikelfilter ausgerüstet. Diese Abgasnachbehandlungssysteme führen dazu, dass die Partikelemissionen bei der Mündung des Auspuffrohrs gemessen häufig geringer sind als in der Umgebungsluft, gemessen im Leerlauf und bei 2'000 U/min ohne Last. Zwei Studien (Kadijk, Elstgeest, Ligterink, & van der Mark, 2017) (AWEL, ETH-Conference 2018: Combustion Generated Nanoparticles - VERT-Forum 2018) haben jedoch bei Partikelfiltern in der Praxis Fehlerquoten von 5-7% resp. 10% festgestellt. Der TCS hat im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt zur Weiterentwicklung des Messverfahrens sowie zur Überprüfung der Fehlerquoten rund 100 Personenwagen gemessen. Dazu zählten Autos unterschiedlicher Marken, welche dem Emissionscode Euro 4, Euro 5a, 5b oder Euro 6b (88% waren Euro 5b oder neuer) genügten und zum Teil bis zu 200'000 km auf dem Zähler hatten. Alle gemessenen Fahrzeuge waren mit einem Partikelfilter ausgerüstet. Durchgeführt wurden die Messungen mit dem Nanopartikel-Emissionstester (NPET) Modell 3795 von TSI, ein von METAS-zertifiziertes Messgerät für Nanopartikel aus Verbrennungsmotoren. Bei einigen Messungen wurde parallel dazu – zur Verifizierung der Resultate – auch ein Gerät des Typs NanoMet3 von testo eingesetzt. Das NanoMet 3 ist das «golden instrument» für PN-Messungen im praktischen Fahrbetrieb (real driving emissions).

Die mit dem NPET gemessenen Partikelkonzentrationen bei 2'000 U/min waren im Durchschnitt doppelt so hoch wie diejenigen im Leerlauf. Die Messungen mit dem NanoMet3 wiesen mit dem NPET vergleichbare Grössenordnungen der Partikelkonzentrationen auf. Einzelne Messungen waren nicht 1:1 vergleichbar.

Bei sieben (im Leerlauf) resp. neun Fahrzeugen (bei 2'000U/min) waren die Partikelkonzentrationen über dem Vergleichswert von $2.50E+05$ Partikel/ccm. Fahrzeuge, die während der Regenerationsphase des Partikelfilters gemessen werden, können erhöhte Partikelkonzentrationen aufweisen. Dies zeigte ein vom TCS im Vorfeld durchgeführter Test. Bei der Messung der Partikelemissionen eines Seat Exeo während der Regenerationsphase ist gut ersichtlich, dass die Konzentration während insgesamt rund 20 Minuten von einigen Tausend Partikel/ccm zu auf bis zu über $7.00E+06$ Partikel/ccm zunimmt. Aus diesem Grund wurde bei allen auffälligen Fahrzeugen eine zweite Messung mit erneutem Warmfahren (rund 20km) durchgeführt.

Bei vier (Leerlauf) resp. fünf (2'000 U/min) Fahrzeugen war die Partikelkonzentration anschliessend auf unauffälligem Niveau. Eine Aussage zur Funktionsfähigkeit des Partikelfilter-Systems setzt demnach je nach Regenerationszyklus zwei Messungen voraus.

Vier Autos waren auch nach dem erneuten Fahren über dem Vergleichswert (bei 2'000 U/min), bei drei davon deutlich. Bei diesen Autos liegt der Verdacht nahe, dass es tatsächlich Probleme im Bereich Partikelfilter gibt. Bei den drei deutlich defekten Fahrzeugen handelt es sich um jeweils dieselbe Marke und dasselbe Modell (zwei der drei waren nicht als Personenwagen immatrikuliert). Auffallend war zudem, dass die Auspuffrohre dieser Fahrzeuge im Vergleich zu anderen Testwagen verrusst waren. Ein Fahrzeug emittierte erst in der Zweitmessung erhöhte PN.

Die in der vorliegenden Studie gemessene Anzahl Personenwagen ist zu klein, um Rückschlüsse auf den gesamten schweizerischen Fahrzeugbestand zu ziehen, dennoch lässt sich folgendes hervorheben: Die in dieser Studie beobachtete Fehlerquote der Partikelfilter liegt bei rund 7% (Leerlauf) resp. 9% (2000 U/min), nach Abzug der Fahrzeuge, die nicht persistent zu hohe PN-Emissionen aufwiesen z.B. aufgrund Regenerationseffekten, bei 3% (Leerlauf) resp. 4% (2'000 U/min), wenn der Vergleichswert bei $2.50E+05$ Partikel/ccm angewendet wird. Anzumerken ist, dass der aktuelle Betriebszustand des Fahrzeuges zum Zeitpunkt der Messung eine wichtige Rolle spielt insbesondere wegen möglichen Regenerationseffekten.

1. Einleitung

Moderne Diesel-Personenwagen sind spätestens seit der Einführung eines Partikelanzahl-Grenzwertes bei der Typgenehmigung von Kompressionszündungsmotoren der Abgasstufe Euro 5b für neue Fahrzeugtypen im September 2011 respektive für neu in Verkehr gesetzte Fahrzeuge ab Januar 2013 in der Regel mit einem geregelten Partikelfilter ausgerüstet. Beim Verbrennungsprozess entstehende Russpartikel werden also gefiltert. Auch der Partikelfilter zählt zu den vielen Komponenten, die dazu beigetragen haben, dass der zwar unzerstörbare, jedoch langsame, laute und unter Last schwarz rauchende Selbstzünder zum salonfähigen Antrieb für Personenwagen wurde. Mehr sogar: Wer nämlich bei einem modernen Diesel die Partikelemissionen misst, wird feststellen, dass die aus der Mündung des Auspuffrohrs strömende Luft sogar weniger Partikel enthält als die Umgebungsluft. Zumindest im Leerlauf und bei konstanter, mittlerer Drehzahl von 2'000 U/min ohne Last.

Kürzlich durchgeführte Studien (Kadijk, Elstgeest, Ligterink, & van der Mark, 2017) (AWEL, ETH-Conference 2018: Combustion Generated Nanoparticles - VERT-Forum 2018), zeichnen jedoch ein anderes Bild. Bei 5-7% resp. 10% der gemessenen Fahrzeuge waren die Partikelemissionen extrem hoch und auf dem Niveau älterer Fahrzeuge ohne Abgasnachbehandlung. Daraus resultierten dann folgende Schlüsse:

- Die Partikelfilter sind nur bei Neuwagen tatsächlich wirkungsvoll.
- Die Partikelfilter sind defektanfällig und sollten periodisch geprüft werden.
- Partikelfilter werden ausgebaut statt ersetzt bzw. zu Tuningzwecken entfernt.

Zur Weiterentwicklung des Messverfahrens sowie zur Überprüfung der Fehlerquoten hat der TCS im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt rund 100 Autos gemessen. Keine Neuwagen, sondern bis zu fünfjährige Fahrzeuge (Emissionscode Euro 5b und jünger) mit Laufleistungen bis zu 200'000 km. Die Fahrzeuge wurden aus verschiedenen Quellen zur Verfügung gestellt. Dabei handelte es sich zur Hälfte um zum Verkauf angebotene Occasionsfahrzeuge. Ergänzt wurden diese durch Fahrzeuge der öffentlichen Hand, Privatfahrzeuge, TCS Mitarbeiter- oder Patrouille-Fahrzeuge.

2. Materialien und Methoden

Für die Partikelanzahl-Messungen kam der Nanopartikel-Emissionstester (NPET) Modell 3795 von TSI zum Einsatz. Der NPET wurde speziell für die Schweiz entwickelt und von METAS zertifiziert. Er erlaubt Messungen nach Verordnung SR 941.242 (VAMV).

Bei einigen Messungen wurde das NanoMet3 von testo eingesetzt. Beim NanoMet3 handelt es sich um einen portablen Partikelzähler, welcher dazu geeignet ist, Partikelmessungen bei Dieselmotoren durchzuführen. Es ist das «golden instrument» für real driving emissions (RDE-Messungen).

2.1. TSI Nanopartikel-Emissionstester (NPET) Modell 3795

Der tragbare Nanopartikel-Emissionstester (NPET) Modell 3795 der Firma TSI ist ein einfach bedienbares Instrument, das die Anzahlkonzentration der festen (nicht flüchtigen) Partikel aus Verbrennungsquellen misst. Der NPET beinhaltet einen katalytischen Stripper zur Entfernung von flüchtigen Partikel sowie einen Isopropanol—betriebenen Kondensationspartikelzähler. Er ist robust, benutzerfreundlich gestaltet und kann gleichermassen von Wartungspersonal, Behörden und in der Forschung eingesetzt werden.

Abbildung 1 NPET (Modell 3795) von TSI



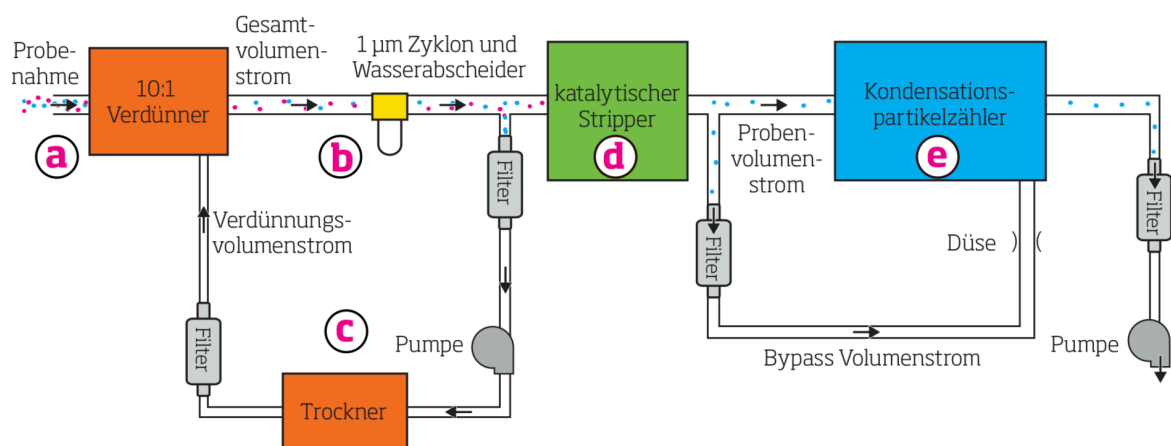
Der Nanopartikel-Abgastester misst die Anzahlkonzentration fester Partikel in Abgasemissionen von Fahrzeugen, die mit Dieselpartikelfiltern (DPF) ausgestattet sind. Die Ergebnisse können darauf hinweisen, ob sich z.B. Risse in den Filtern befinden und die Filter ausgetauscht werden sollten. Der Nanopartikel-Abgastester besteht aus einer Metall-Probenahmesonde mit Halteklemme und einem Aerosoltransportschlauch, ein VPR-System (Volatile Particle Remover), eine Probenverdünnung, einen Probenkonditionierung, ein VPR-System (Volatile Particle Remover), eine Probenverdünnung, einen Messsensor, die dazugehörige Elektronik, ein Netzteil, Pumpen, sonstige mechanische Hilfssysteme sowie das Temperaturmanagement mit Lüftern und einen Wärmeaustauscher.

Leistungsmerkmale

- Probenahmesonde mit integrierter Verdünnung
- Verdünnungsluftkonditionierung mittels Wasserabscheider, Siliziumdioxid-Trockner und HEPA-Filtern
- Eingebauter katalytischer Stripper zur Entfernung von flüchtigen Partikeln
- Weiter Betriebsbereich bei Umgebungsbedingungen
- -10°C bis 40°C
- 0 bis 3'000 m
- Konzentrationen von 1.00E+03 bis zu 5.00E+06 Partikel/ccm

Funktionsprinzip

Abbildung 2 Aufbau und Funktionsprinzip NPET



- Eine Edelstahl-Probenahmesonde mit integrierter 1:10 Verdünnung erlaubt die Partikelmessung direkt am Auspuff
- Ein 1µm Zyklon als Vorkonditionierer mit integrierter Wasserfalle
- Ein Konditionierkreislauf, in dem ein Silica Trockner und zwei HEPA Filter konstant trockene und saubere Verdünnungsluft bereitstellen
- Ein bei 350 °C betriebener katalytischer Stripper, um volatile Bestandteile zu entfernen
- Ein Isopropanol—betriebener CPC, um die Partikelanzahlkonzentration mit hoher Genauigkeit bei hohen und niedrigen Konzentrationen zu messen

Messmethoden

- Allgemein: Datenprotokollierung in Echtzeit
- Offiziell: Zertifizierung nach Schweizer Verordnung SR 941.242 (Messmittel für Nanopartikel aus Verbrennungsmotoren)

2.2. Testo NanoMet3

Der Festpartikelzähler NanoMet3 der Firma Testo eignet sich besonders für die Probenahme, Verdünnung, Aufbereitung und Zählung von Abgaspartikeln aus Diesel- und Fremdzündungsmotoren mit Direkteinspritzung. Dabei handelt es sich um ein Gerät zur Messung der Anzahldichte (Konzentration) und des durchschnittlichen Durchmessers von nanometergrossen Partikeln im Größenbereich 10...300 nm und funktioniert mit einem Diffusionsauflader.

Das Messgerät verfügt über eine separate Abgassonde und Steuereinheit, die die Probe an der Quelle (Endrohr, CVS-Tunnel oder Schornstein) wirksam verdünnt, um sie für eine präzise Messung zu konservieren. Zudem verfügt es über einen Diffusion Size Classifier (DiSC).

Abbildung 3 NanoMet3 von Testo



Leistungsmerkmale

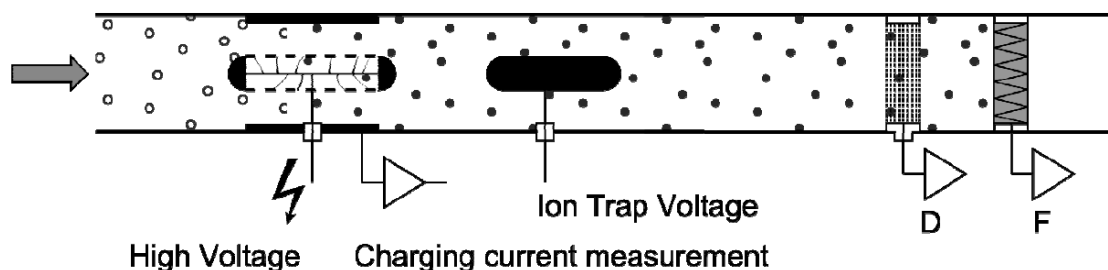
Der NanoMet3 von Testo ist ein robuster und tragbarer Zähler für feste Nanopartikel. Der Messsensor zählt die Partikel mithilfe elektrischer Ladung, was die Qualität der Gesamtmessung verbessert. Die Messung der Kohlenwasserstoffemissionen wird weder durch Butanolverunreinigungen im Prüfraum noch durch die verunreinigte Luft beeinflusst.

- variable Aerosolverdünnung (fünf Standardverdünnungsfaktoren, DF)
- Verdünnungsverhältnis einstellbar, weder Werkzeug noch Nachkalibrierung erforderlich
- Unterdrückung der Bildung flüchtiger Partikel, um den Feststoffanteil zu messen
- eingebaute Heizung mit vordefinierter Temperatur, um die Messung von kondensierten flüchtigen Stoffen zu vermeiden
- rasche Erfassung kurzfristiger Änderungen der Aerosolkonzentration
- butanolfreier Betrieb

Funktionsprinzip

Unipolare Diffusionsauflader sind präzise, robust und tragbar. Ihre Funktionsweise basiert auf der elektrischen Aufladung von Partikeln durch eine Koronaentladung. Der DiSC-Sensor zur Klassifizierung der Diffusionsgrößen lädt das Aerosol in einem unipolaren Diffusionsauflader auf. Nach dem Aufladen werden überschüssige Ionen über eine Ionenfalle entfernt. Das geladene Aerosol durchläuft eine Diffusionsstufe, in der die Partikel durch Diffusion abgeschieden und als elektrischer Strom gemessen werden. Die restlichen Partikel landen in einer zweiten Stufe, der Filterstufe, in welcher ebenfalls die Stromstärke gemessen wird. Das Verhältnis der beiden Ströme ist ein Mass für die durchschnittliche Partikelgröße und wird während der Gerätekalibrierung bestimmt. Da die Ladung pro Partikel vom Partikeldurchmesser abhängt, kann, sobald dieser bekannt ist, die Partikelzahl aus dem Gesamtstrom und der Strömungsdichte berechnet werden.

Abbildung 4 Funktionsprinzip unipolarer Diffusionsauflader



Das NanoMet3 unterteilt Abgasprobenahme und -aufbereitung in die folgenden Schritte:

- Verdünnung der Verbrennungsmotoremissionen aus Endrohr oder CVS mittels eines Rotationsverdünners. Die Verdünnung in einem von 10 bis 300 einstellbaren Faktorbereich erfolgt in einem Block mit rotierenden Scheiben, wodurch thermophoretische Verluste minimiert werden.
- Entfernung flüchtiger Partikel im Verdampferrohr, wo die Temperatur auf 300 °C eingestellt ist. In der Abkühlzone findet keine Rekondensation statt, wenn das Messgas nach der Verdünnung unter dem Taupunkt liegt.

2.3. Messmethodik

Die Hauptmessserie wurde mit dem NPET von TSI durchgeführt. Dazu wurde das offizielle Messverfahren verwendet, welches in der Baurichtlinie Luft (Bundesamt für Umwelt (BAFU), Februar 2016; Erstausgabe 2009) im Anhang A5 beschrieben ist: Die Dauer der offiziellen Messungen beträgt insgesamt 40 Sekunden. Sie setzt sich zusammen aus:

15 s Wartezeit; 5 s Messung 1; 5 s Pause; 5 s Messung 2; 5 s Pause; 5 s Messung 3. Aus den drei Messintervallen wird der arithmetische Mittelwert gebildet. Das NPET führt das offizielle Messverfahren auf Knopfdruck selbständig aus. Dieses Messverfahren wurde für die Abgaswartung von Baumaschinen mit Partikelfilter entwickelt. Es wurde unverändert bei der vorliegenden Studie angewendet.

Für Vergleichsmessungen wurde das NanoMet3 von Testo eingesetzt. Diese Messungen wurden parallel an einer Stichprobe von 30 Fahrzeugen durchgeführt. Für die Auswertung wurde das folgende Zeitfenster für alle Messungen verwendet: Die Messsonde wurde bei laufendem Motor im Abgasstrahl fixiert. Danach wurde die Standmessung im Leerlauf gestartet. Die Messung dauerte zw. 40 und 60 Sekunden. Danach wurde die Messung beendet und die Daten abgespeichert. Nun wurde der Motor bei 2'000 U/min gehalten. Die zweite Messung wurde gestartet. Auch diese Messung dauerte zw. 40 und 60 Sekunden. Die Messung wurde danach beendet und die Daten gespeichert. Die ersten 10 Sekunden jeder einzelnen Messung wurden verworfen. Danach wurde aus dem Zeitintervall zw. Sekunde 11 und Sekunde 31 das arithmetische Mittel gebildet.

Abbildung 5 Partikelmessung



Konditionierung Fahrzeuge

Die Fahrzeuge wurden vor den Messungen während ca. 15 bis 20 Minuten eingefahren, so dass die Motoren und Abgasnachbehandlungssysteme auf Betriebstemperatur waren. Die Motoren wurden vor den Messungen jeweils nicht mehr ausgeschaltet.

Messablauf

Die Messsonde wurde bei laufendem Motor in den Abgasstrom gehalten. Dazu wurde die Sonde am Auspuff fixiert. Bei den Vergleichsmessungen wurde, falls vorhanden, an zwei Auspuffrohren gleichzeitig gemessen. War nur ein Auspuffrohr vorhanden, wurde die Messsonde nach der NPET-Messung durch diejenige des NanoMet3 ersetzt.

In einer ersten Messung wurde die Partikelanzahl bei Leerlaufdrehzahl gemessen. In einer gleich darauffolgenden, zweiten Messung wurde der Motor auf eine Drehzahl von zirka 2'000 U/min eingestellt. Die Hauptmessungen wurden mit dem offiziellen Messverfahren für die Abgasprüfung für Baumaschinen und mit dem Messgerät NPET von TSI, welches zertifiziert ist gemäss SR 941.242, durchgeführt.

Bei insgesamt 30 Fahrzeugen wurde parallel mit dem NanoMet3 von testo gemessen. Auch hier wurde die erste Messung im Leerlauf und die zweite bei 2'000 U/min durchgeführt. Besass das Fahrzeug eine verzweigte Auspuffanlage, konnten die Messungen mit beiden Messgeräten gleichzeitig durchgeführt werden. War nur ein Auspuffrohr vorhanden, so wurden zuerst beide Messungen mit dem NPET und danach die beiden Messungen mit dem NanoMet3 durchgeführt.

Danach wurden die fahrzeugrelevanten Daten aufgenommen. Dabei handelte es sich um:

- Marke und Modellbezeichnung
- TG-Nummer
- Fahrgestell-Nummer
- Abgasnorm
- Kilometerstand

Bei erhöhter Partikelanzahl wurde eine Nachmessung durchgeführt. Dazu wurde das Fahrzeug zw. 10 und 40 km (mehrheitlich Autobahn) gefahren, im Schnitt 20 km. Die Nachmessungen wurden analog zum oben beschriebenen Messablauf durchgeführt.

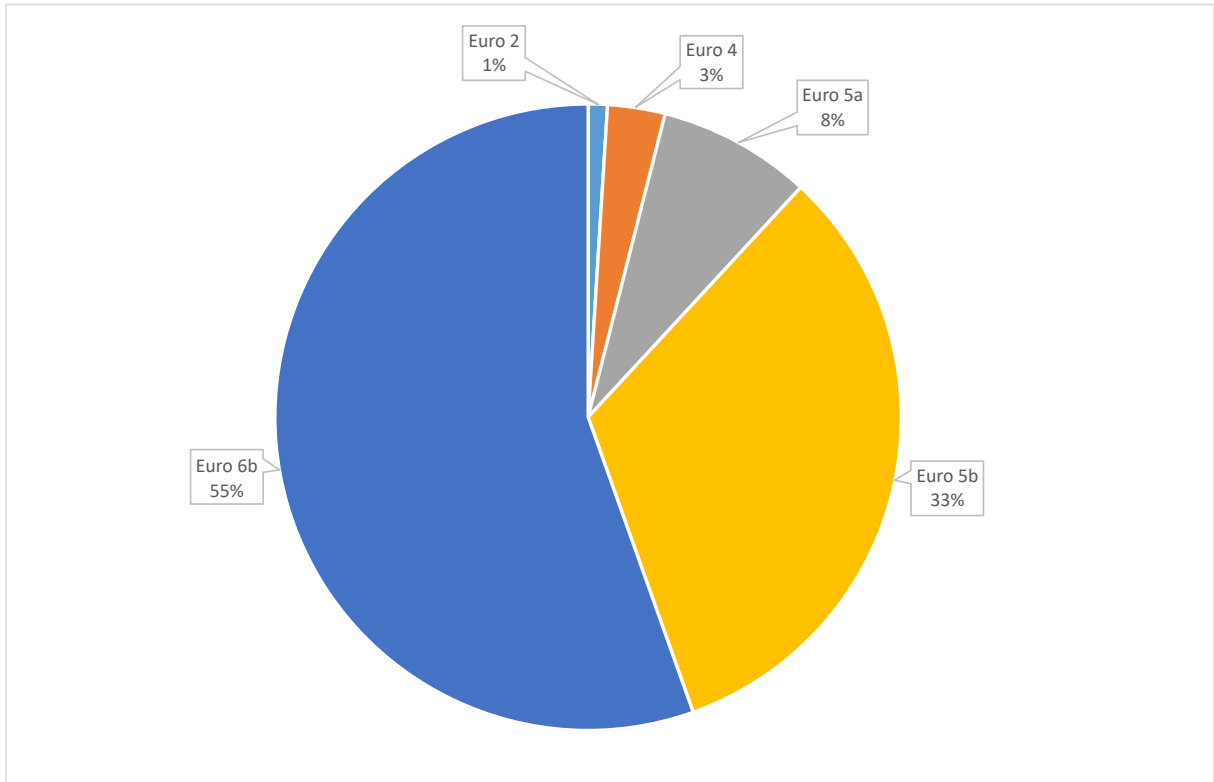
Die Partikelbelastung der Umgebungsluft belief sich während der Messungen in der Regel auf $1E+04$ bis $2.5E+04$ Partikel/ccm. Auf eine Vergleichsmessung wurde während den Messungen verzichtet.

3. Resultate

Für die Messserie standen insgesamt 101 Fahrzeuge von 16 verschiedenen Marken zur Verfügung. Die Fahrzeuge wurden aus verschiedenen Quellen zur Verfügung gestellt. 50% stammen direkt vom Autohändler. Dabei handelte es sich um zum Verkauf angebotene Occasionen. Bei 29% der Fahrzeuge handelte es sich um solche der öffentlichen Hand, bei 15% um TCS Mitarbeiter-Fahrzeuge und bei 5% um TCS Patrouille Fahrzeuge. 2% stammen aus privater Hand.

Alle Fahrzeuge waren mit einem geregelten Partikelfilter ausgerüstet (Ausnahme T4 Euro 2 als Referenzmessung). Der grösste Anteil, rund 88%, machten Euro 5b oder Euro 6b aus. 8% genügten der Euro-Norm 5a und 3% der Euro-Norm 4.

Grafik 1 Verteilung der Stichprobe nach Euro-Norm



3.1. Messserie

Tabelle 1 listet die Messungen nach Marken auf. Insgesamt wurden 291 Messungen durchgeführt. Bei sechs Fahrzeugen wurden aufgrund hoher Partikelkonzentrationen Nachmessungen mit dem NPET durchgeführt, bei zwei mit dem NanoMet3. Hierfür wurden die Fahrzeuge auf einer Strecke von ca. 20 km (Autobahn) nochmals warmgefahren und danach im Leerlauf und bei 2'000 U/min gemessen.

Anzumerken ist, dass bei acht Fahrzeugen Zweitmessungen durchgeführt werden mussten. Der Grund hierfür war, dass das NPET durch eine Messung mit extrem hoher Partikelbelastung verschmutzt wurde. Die nachfolgenden Messungen wurden mit einem Ersatzgerät wiederholt. Diese Messungen werden in der Folge als Zweitmessungen bezeichnet und ersetzen die Messungen mit dem Originalmessgerät. Zwei Messungen konnten nicht wiederholt werden, da das Fahrzeug zum Zeitpunkt der Messungen ausgemustert war. Hier fließen nur die Messungen mit dem NanoMet3 in die Betrachtung ein. Im Anhang auf Seite 22 sind die Messwerte detailliert aufgeführt.

Tabelle 1: Messungen nach Marke und Messgerät

Marke	Anzahl Fahrzeuge	Messungen NPET	davon Nachmessungen	davon Zweit-Messungen	Messungen NanoMet3	davon Nach-Messung
Alfa	1	2	-	-	-	-
Audi	10	22	2	-	-	-
BMW	12	25	1	-	18	2
Chevrolet	2	4	-	-	-	-
Citroën	3	6	-	-	-	-
Fiat	2	4	-	-	-	-
Ford	2	12	2 ¹	4 (+2 ¹)	4	-
Honda	1	2	-	-	-	-
Hyundai	1	2	-	-	-	-
Jaguar	1	2	-	-	-	-
Mercedes-Benz	14	44	2	10	24	2
Opel	1	2	-	-	-	-
Seat	3	6	-	-	-	-
Skoda	9	20	2	-	2	-
Volvo	16	32	-	-	-	-
VW	23	48	-	2	16	-
Total	101	227	9	16 (+2 ¹)	64	4

¹ Nachmessungen der Zweitmessung

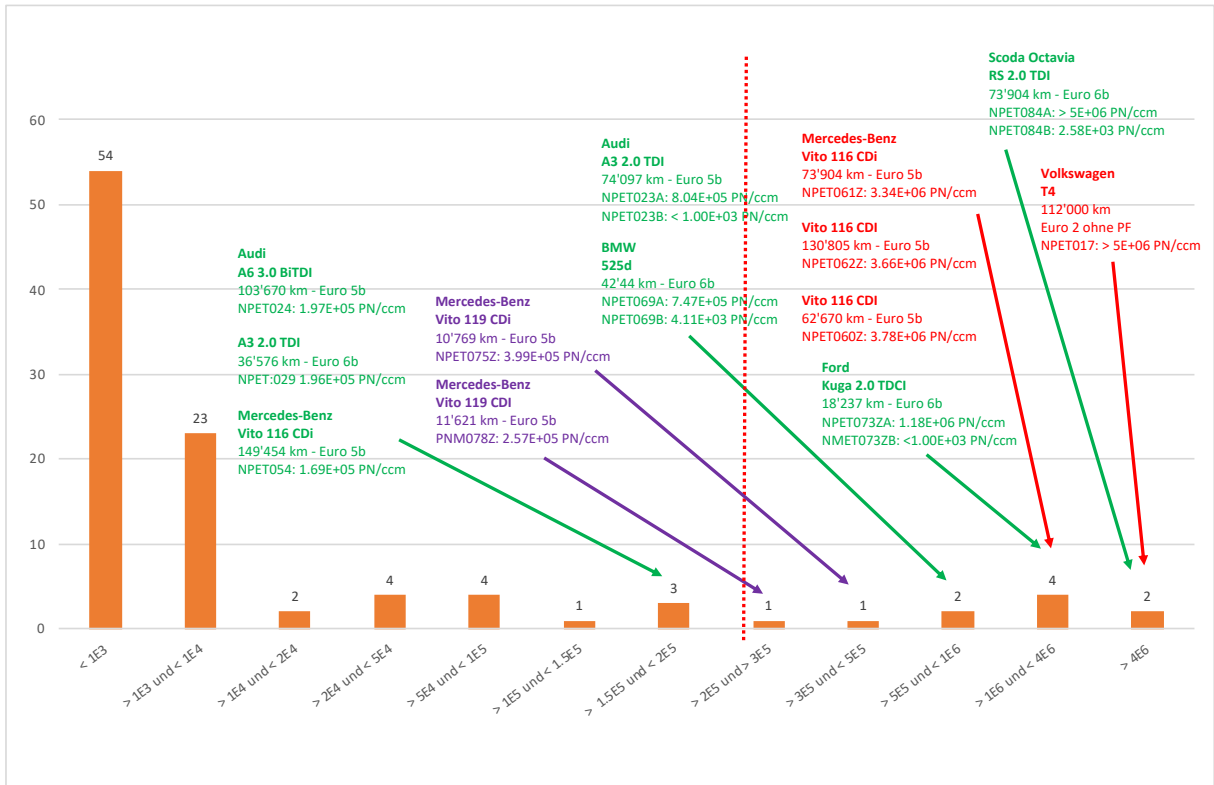
3.2. Resultate Messungen NPET

Die einzelnen Messungen wurden mit folgender Logik bezeichnet:

- NPET001A → Ausgangsmessung
- NPET001B → Nachmessung
- NPET001Z → Zweitmessung. Falls eine Nachmessung der Zweitmessung nötig war, wurde die Zweitmessung mit NPET001ZA und die Nachmessung mit NPET001ZB bezeichnet.

Die Analyse der Messresultate, welche mittels NPET erhoben wurden, sind in Grafik 2 (bei 2'000 U/min) und Grafik 3 (im Leerlauf) dargestellt. Details zu den Messungen, welche eine erhöhte Partikelanzahl aufweisen, sind direkt in den Grafiken zu finden.

Grafik 2 NPET – Partikelanzahl Standmessung bei 2'000 U/min



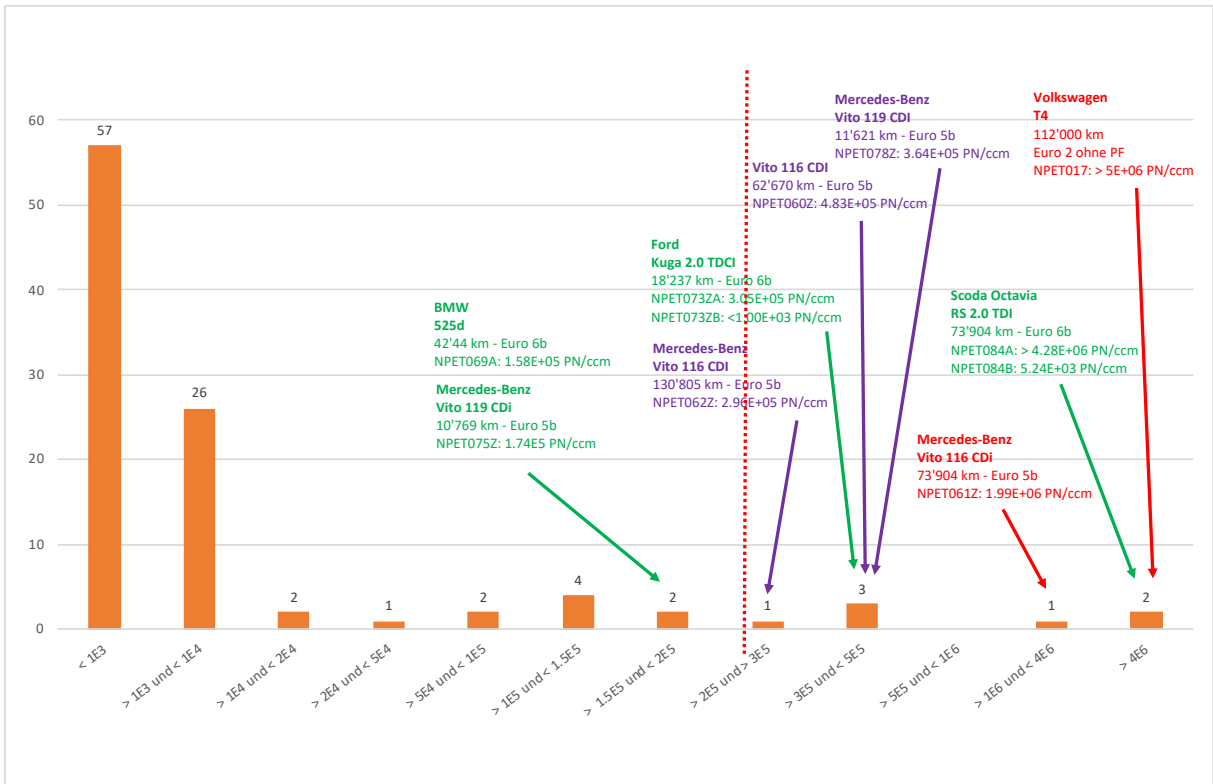
Als Vergleichswert wurden der Grenzwert 2.50E+05 Partikel/ccm² nach der Baurichtlinie Luft (Bundesamt für Umwelt (BAFU), Februar 2016; Erstausgabe 2009) gewählt. Die Emissionsmessung eines Euro 2 Fahrzeuges (> 5.00E+06 Partikel/ccm), welches ohne Partikelfilter ausgerüstet ist, dient als Referenz für einen nicht vorhandenen oder nicht funktionierenden Partikelfilter.

Betrachtet man die Partikelemissionen bei der Standmessung bei 2'000 U/min, so wiesen 77%³ der Fahrzeuge sehr geringe Partikelkonzentrationen von weniger als 1.00E+04 Partikel/ccm auf. Diese Emissionen entsprechen denjenigen eines gut funktionierenden, geregelten Partikelfilters. Weitere zehn Fahrzeuge emittierten Partikelemissionen weit unter dem Vergleichswert für Baumaschinen (2.50E+05 Partikel/ccm). Fünf Fahrzeuge wiesen Emissionen im Bereich des Vergleichswerts für Baumaschinen auf (zwei davon mit Werten leicht über 2.50E+05 Partikel/ccm). Neun Fahrzeuge wurden als problematisch eingestuft, da die gemessene Partikelkonzentration über dem Vergleichswert von 2.50E+05 Partikel/ccm lagen. Bei fünf Fahrzeugen konnte durch eine Nachmessung die Funktionalität des Partikelfilters bestätigt werden. Die drei der restlichen vier Fahrzeuge emittierten Partikel in einer Grössenordnung, die darauf schliessen lässt, dass der Partikelfilter nicht funktionstüchtig ist. Bei einem Fahrzeug liegt der Wert mit 3.99E+05 zwar über dem Vergleichswert, dies aber nicht so deutlich wie bei den restlichen drei. Es ist anzumerken, dass es sich bei allen Fahrzeugen mit Partikelkonzentrationen über dem Vergleichswert um dasselbe Modell (Mercedes Vito 116 CDI oder 119 CDI) handelt. Die Fahrzeuge werden mehrheitlich zum Personentransport eingesetzt und kommen grösstenteils auf sehr kurzen Strecken zum Einsatz.

² Messungen vom JRC, Ricardo Suarez Bertoa (2017, unveröffentlicht) haben ergeben, dass dem PN-Grenzwert gemäss Typengenehmigung von 6.00E+11 Partikel/km einem PN-Konzentrationswert von rund 5.00E+04 Partikel/ccm entspricht.

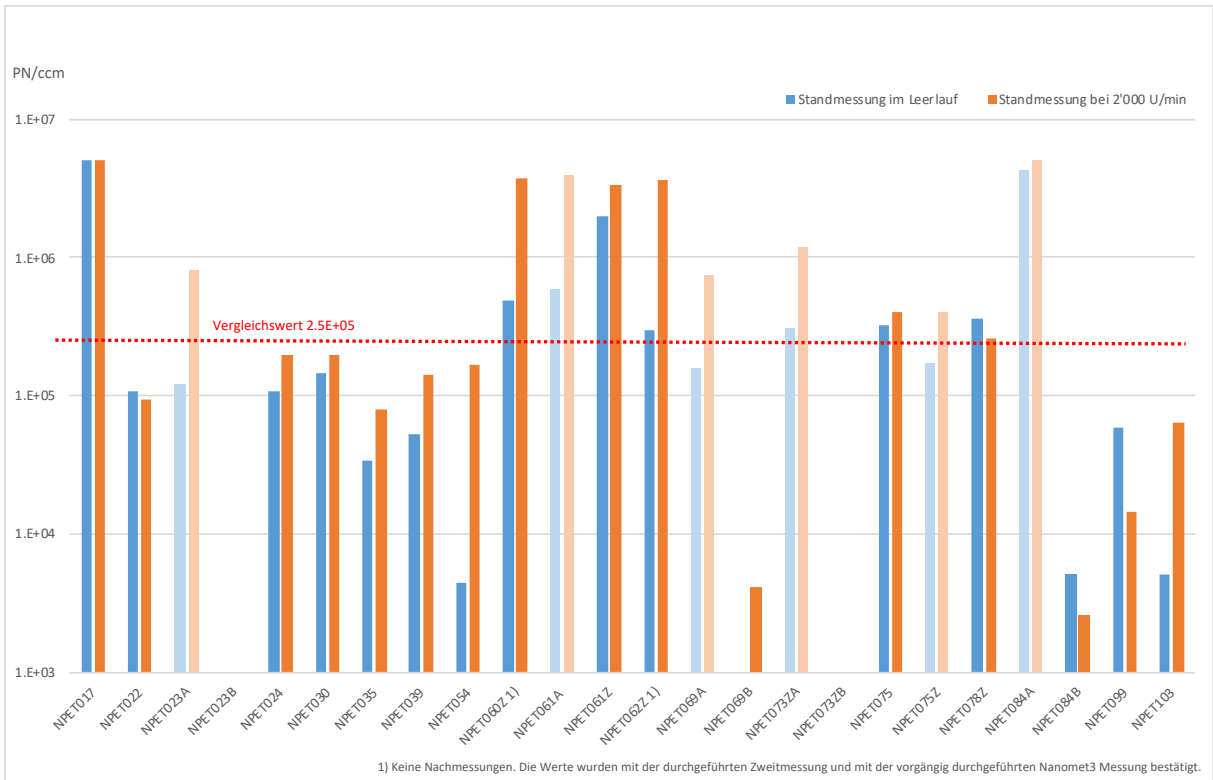
³ Es wurden zwar 101 Fahrzeuge gemessen, die Messung des Volkswagen T4 wurde nicht in die Gesamtbetrachtung mit einbezogen. Deshalb bilden die restlichen 100 Fahrzeuge die Basis für die prozentuale Betrachtung. Die Messung NPET063 konnte nicht bestätigt werden, da das Fahrzeug zum Zeitpunkt der Zweitmessung schon ausgemustert war. Das Fahrzeug wurde nur mit der NanoMet3 Messung (NMET063) berücksichtigt.

Grafik 3 NPET – Partikelanzahl Standmessung im Leerlauf



Betrachtet man die Standmessungen im Leerlauf zeigt sich ein ähnliches Bild. Hier wiesen 83% der Fahrzeuge sehr geringe Partikelemissionen auf. Neun Fahrzeuge emittierten Werte weit unter dem Vergleichswert. Sechs Fahrzeuge wiesen Emissionen im Bereich des Vergleichswerts (vier davon leicht über 2.50E+05 Partikel/ccm) auf. Drei der schon als problematisch eingestuft Fahrzeuge emittierten auch im Leerlauf Partikelkonzentrationen, welche auf eine Fehlfunktion der Abgasnachbehandlung schliessen lässt.

Grafik 4 NPET – Vergleich Partikelanzahl Standmessung im Leerlauf und bei 2'000 U/min



1) Keine Nachmessungen. Die Werte wurden mit der durchgeführten Zweitmessung und mit der vorgängig durchgeführten Nanomet3 Messung bestätigt.

Bei Messungen, die halbtransparent dargestellt sind, wurde eine Nachmessung durchgeführt.

Die mit dem NPET gemessenen Partikelkonzentrationen bei 2000 U/min waren im Durchschnitt doppelt so hoch wie diejenigen im Leerlauf. Im Bereich von tiefen Partikelkonzentrationen (im Leerlauf und bei 2'000 U/min kleiner $1.00E+04$) ist ein Vergleich nicht sinnvoll, da insbesondere das NPET an seine Messgrenzen stösst. Bei einzelnen Messungen mit höherer Konzentration (ab $1.00E+05$ Partikel/ccm) zeigten sich aber auch grössere Unterschiede. So nahm die Partikelkonzentration bei einzelnen Messungen um das 6.5 bis 12.4-fache zu. Insbesondere der Mercedes-Benz Vito (Messung NPET062Z) liegt im Leerlauf mit $2.96E+05$ im Bereich des Vergleichswerts für Baumaschinen, bei 2'000 U/min steigt die Partikelkonzentration auf $3.70E+06$ aber deutlich höher liegen.

In Grafik 4 sind alle Messungen mit dem NPET aufgelistet, welche eine Partikelkonzentration von über $5.00E+04$ aufweisen, im Leerlauf und/oder bei 2000U/min.

Interessant sind die Messungen, welche Partikelkonzentrationen über dem Vergleichswert ($2.50E+05$) aufwiesen. Dabei handelt es sich um deren neun Fahrzeuge (NPET017 ist die Vergleichsmessung ohne Partikelfilter).

- Bei NPET023A, NPET069A, NPET073ZA und NPET084A konnte die Funktion des Partikelfilters mittels der Nachmessungen bestätigt werden.
- NPET078Z emittierte erst in der Zweitmessung zu hohe Partikelkonzentrationen.
- NPET075Z wies Partikelkonzentrationen knapp über dem Vergleichswert auf.
- Bei den Messungen NPET060, NPET061 und NPET062 scheint tatsächlich ein Problem der Abgasnachbehandlung vorzuliegen. Das Messergebnis konnte in allen drei Fällen mit der korrespondierenden NanoMet3-Messung bestätigt werden.

Tabelle 2: NPET mit Partikelkonzentrationen grösser $2.50E+05$ Partikel/ccm

Bezeichnung	Leerlauf	2'000 U/min
NPET017 – ohne DPF	> $5.00E+06$	> $5.00E+06$
NPET023A	$1.21E+05$	$8.04E+05$
NPET023B	< $1.00E+03$	< $1.00E+03$
NPET060Z ⁴	$4.83E+05$	$3.78E+06$
NMET060	$3.60E+05$	$1.50E+06$
NPET061A	$5.89E+05$	$3.99E+06$
NPET061Z	$1.99E+06$	$3.34E+06$
NPET062Z ⁴	$2.96E+05$	$3.66E+06$
NMET062	$4.16E+05$	$2.06E+06$
NPET069A	$1.58E+05$	$7.47E+05$
NPET069B (NMET069)	($1.50E+03$)	$4.11E+03$
NPET073ZA	$3.05E+05$	$1.18E+06$
NPET073ZB	< $1.00E+03$	< $1.00E+03$
NPET075	$3.26E+05$	$3.98E+05$
NPET075Z	$1.74E+05$	$3.99E+05$
NPET078Z ⁴	$3.64E+05$	$2.57E+05$
NMET078	$3.34E+04$	$2.78E+04$
NPET084A	$4.28E+06$	> $5E+06$
NPET084B	$5.14E+03$	$2.58E+03$

Violett: über dem Vergleichswert (> $2.50E+05$ und < $5.00E+05$) - Rot: deutlich über dem Vergleichswert (> $5.00E+05$)

⁴ Keine Nachmessungen. Die Werte wurden mit der durchgeführten Zweitmessung und mit der vorgängig durchgeführten NanoMet3 Messung bestätigt

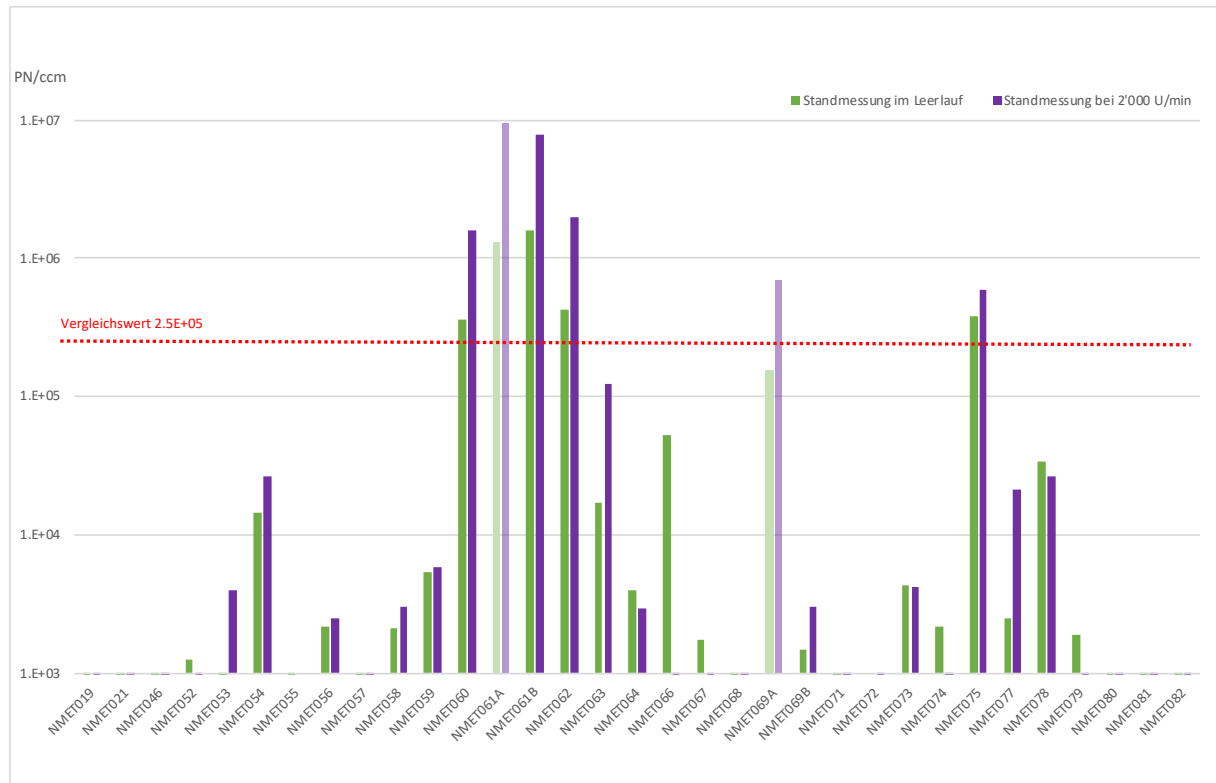
3.3. Resultate Messungen NanoMet3

Die einzelnen Messungen wurden mit folgender Logik bezeichnet:

NMET001A → Ausgangsmessung NMET001B → Nachmessung

Insgesamt wurden 31 Fahrzeuge zusätzlich zu den Messungen mit dem NPET mittels NanoMet3 gemessen. Waren zwei Auspuffrohre vorhanden, konnten die Messungen parallel durchgeführt werden. Bei nur einem Auspuffrohr wurde die jeweilige Standmessung im Leerlauf im Anschluss zu derjenigen mit dem NPET durchgeführt. Für die Standmessung bei 2'000 U/min wurde gleichermassen verfahren.

Grafik 5 NanoMet3 – Vergleich Partikelanzahl Standmessung im Leerlauf und bei 2'000 U/min



Bei Messungen, die halbtransparent dargestellt, sind wurde eine Nachmessung durchgeführt.

Von den insgesamt 64 Messungen (davon sechs Nachmessungen) waren fünf verschiedene Fahrzeuge auffällig (Tabelle 3). Dabei sind auch die gleichen drei Fahrzeuge (Mercedes-Benz Vito 116 CDI), die auch erhöhte Werte bei den NPET Messungen zeigten (NMET060, NMET061A/B, NMET062). Wie auch schon bei den Messungen mit dem NPET sank die Partikelkonzentration bei der Nachmessung des BMW 525d (NMET069A/B) um zwei Zehnerpotenzen. NMET075 war bei der NPET-Messung knapp über dem Vergleichswert, hier auch bei der Messung mit dem NanoMet3.

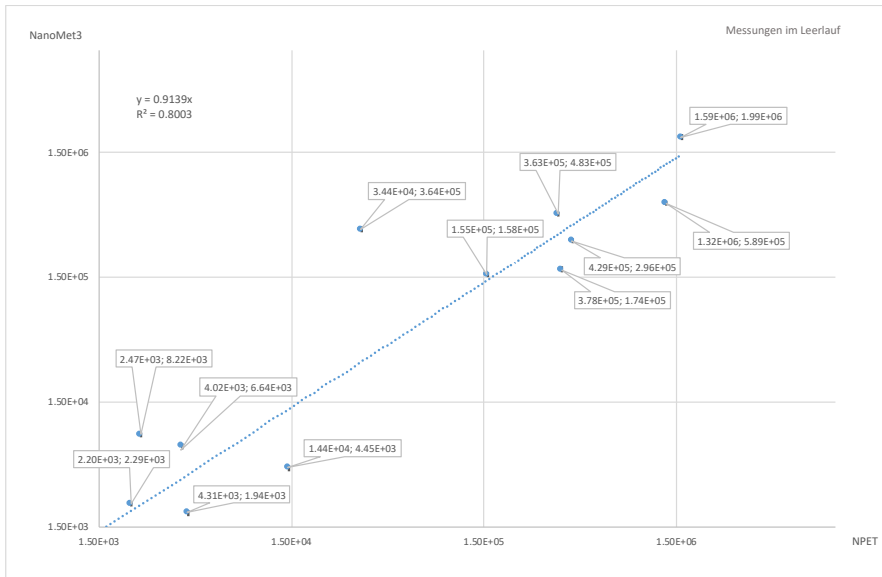
Tabelle 3: NanoMet3 mit Partikelkonzentrationen grösser 2.50E+05 Partikel/ccm

Bezeichnung	Leerlauf	2'000 U/min
NMET060	3.60E+05	1.50E+06
NMET061A	1.31E+06	9.34E+06
NMET061B	1.62E+06	8.25E+06
NMET062	4.16E+05	2.06E+06
NMET069A	1.28E+05	5.46E+05
NMET069B	1.52E+03	2.36E+03
NMET075	3.64E+05	5.93E+05

Violett: über dem Vergleichswert (> 2.50E+05 und < 5.00E+05) - Rot: deutlich über dem Vergleichswert (> 5.00E+05)

Die Standmessungen mit NPET und NanoMet3 korrelieren ($R^2 = 0.80$) im Leerlauf sehr gut miteinander (Grafik 5). Bei 2'000 U/min ist dies immer noch der Fall aber die Korrelation ($R^2 = 0.63$) ist schwächer. Gründe dafür lassen sich einerseits darin finden, dass die Messungen nicht parallel ausgeführt wurden und, dass bei 2'000 U/min der Fahrer die Tourenzahl manuell mittels Gaspedals halten musste. Die Werte unterhalb $1.50E+03$ wurden nicht dargestellt.

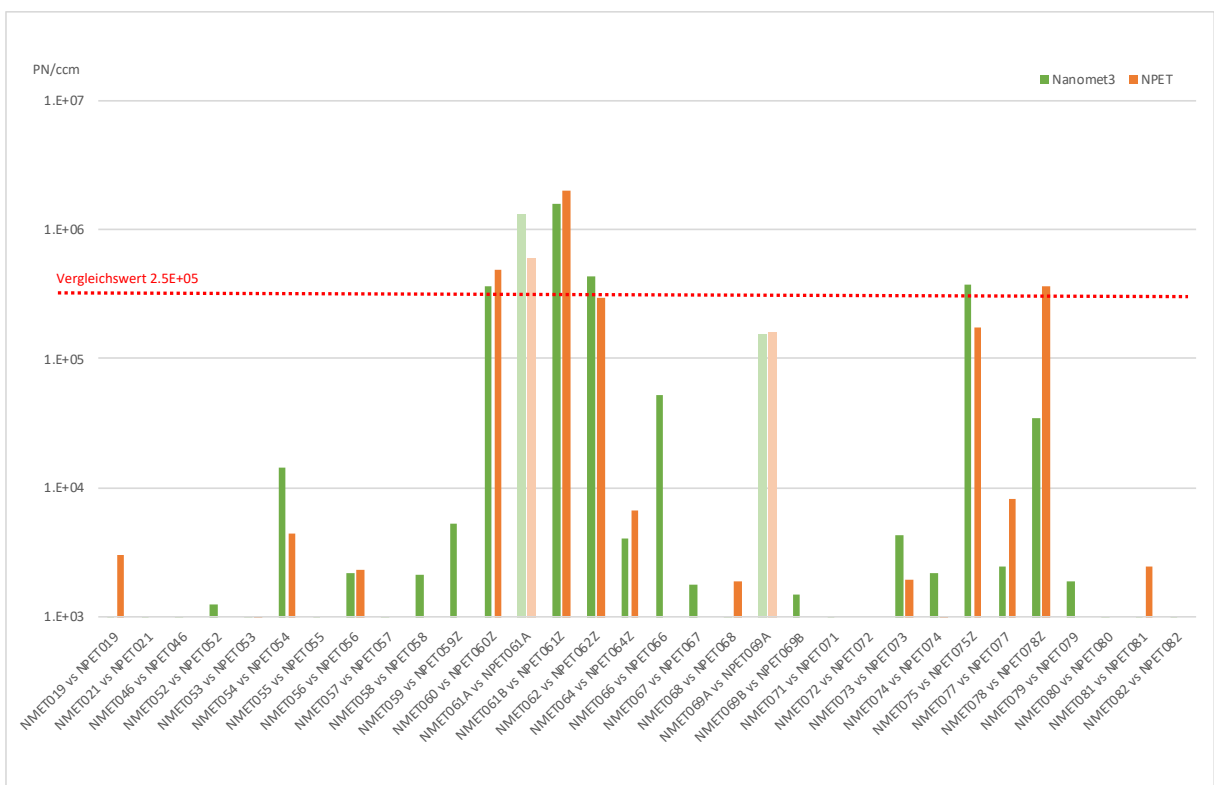
Grafik 6 Korrelation NPET und NanoMet3



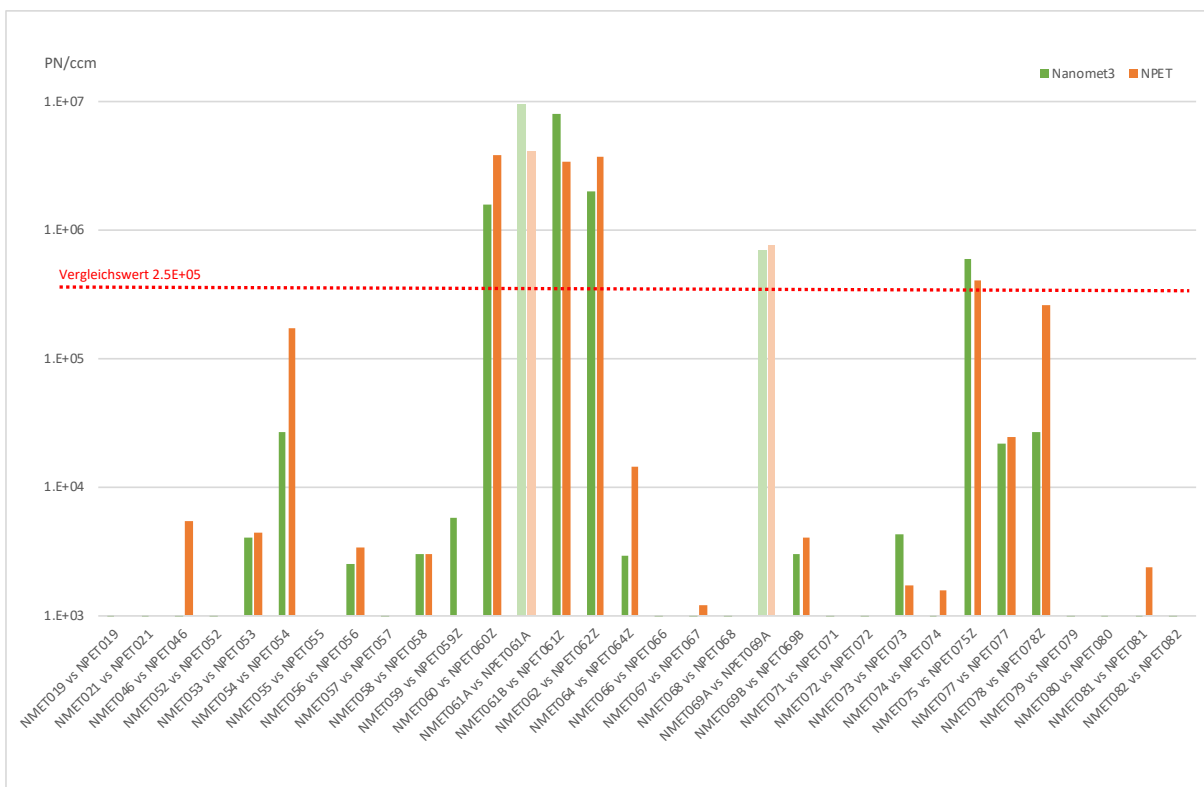
Vergleicht man die Resultate der beiden Messgeräte sehen wir, dass bei einigen Messungen grössere Unterschiede zwischen dem NanoMet3 und dem NPET bestehen. Die Grössenordnung bleibt aber vergleichbar. Es ist anzumerken, dass die Zweitmessungen drei Monate nach den Ausgangsmessungen durchgeführt wurden und deshalb das Fahrzeug auch in einem unterschiedlichen Betriebszustand gewesen sein kann.

In den folgenden beiden Grafiken sind die einzelnen Messungen mit dem NanoMet3 und dem NPET einander gegenübergestellt. Auch hier sind diejenigen Messungen transparent dargestellt, bei welchen die hohen Werte durch die Nachmessung nicht bestätigt werden konnten.

Grafik 7 NanoMet3 gegenüber NPET – Vergleich Partikelanzahl Standmessung im Leerlauf



Grafik 8 NanoMet3 gegenüber NPET – Vergleich Partikelanzahl Standmessung bei 2'000 U/min



Bei Messungen, die halbtransparent dargestellt sind wurde eine Nachmessung durchgeführt

Tabelle 4: NanoMet3 zu NPET Vergleich Partikelkonzentration grösser 2.50E+05 Partikel/ccm

Bezeichnung	Leerlauf NanoMet3	Leerlauf NPET	2'000 U/min NanoMet3	2'000 U/min NPET
NMET060 vs NPET060Z	3.63E+05	4.83E+05	1.58E+06	3.78E+06
NMET061A vs NPET061A	1.32E+06	5.89E+05	9.43E+06	3.99E+06
NMET061B vs NPET061Z	1.59E+06	1.99E+06	7.93E+06	3.34E+06
NMET062 vs NPET062Z	4.29E+05	2.96E+05	1.98E+06	3.66E+06
NMET069A vs NPET069A	1.55E+05	1.58E+05	6.89E+05	7.47E+05
NMET075 vs NPET075Z	3.78E+05	1.74E+05	5.88E+05	3.99E+05
NMET078 vs NPET078Z	3.44E+04	3.64E+05	2.65E+04	2.57E+05

Violett: über dem Vergleichswert (> 2.50E+05 und < 5.00E+05) - Rot: deutlich über dem Vergleichswert (> 5.00E+05)

4. Diskussion

Betrachtet man die Messungen mit dem NPET, waren bei sieben (im Leerlauf) resp. neun Fahrzeugen (bei 2'000U/min) die Partikelkonzentrationen über dem Vergleichswert von $2.50E+05$ Partikel/ccm.

Fahrzeuge, die während der Regenerationsphase des Partikelfilters gemessen werden, können erhöhte Partikelkonzentrationen aufweisen. Dies zeigte ein vom TCS im Vorfeld durchgeführter Test. Bei der Messung der Partikelemissionen eines Seat Exeo während der Regenerationsphase ist gut ersichtlich, dass die Konzentration während insgesamt rund 20 Minuten von einigen Tausend Partikel/ccm zu auf bis zu über $7.00E+06$ Partikel/ccm zunimmt. Aus diesem Grund wurde bei allen sieben Fahrzeugen eine zweite Messung mit erneutem Warmfahren durchgeführt.

Bei drei (im Leerlauf) resp. vier (bei 2'000 U/min) Fahrzeugen fielen die Partikelkonzentrationen bei der zweiten Messung, nach der Fahrt, auf ein völlig unauffälliges Niveau. Hier dürfte die Aufzeichnung einer Filter-Regenerationsphase die Erklärung für den kurzzeitig erhöhten Partikelaustritt liefern. Klar scheint folgendes: Bei den Fahrzeugen, die auch bei der zweiten Messung versagt haben, bestehen Probleme im Bereich der Partikelfilter.

Interessant ist auch das Faktum, dass es sich bei drei Fahrzeugen um dieselbe Marke und dasselbe Modell handelt (zwei der vier Fahrzeuge sind nicht als Personenwagen, sondern als Transporter eingelöst). Die drei Mercedes-Benz Vito 116 CDI werden zudem für denselben Zweck eingesetzt. In der Regel sind die gefahrenen Strecken eher kurz. Zudem ist dem Messpersonal aufgefallen, dass die Auspuffrohre im Vergleich zu anderen Fahrzeugen verrusst waren.

4.1. Untersuchung eines der auffälligen Partikelfilter

Die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) Abteilung Fahrzeugantriebssysteme wurde mit der Untersuchung eines der mangelhaften Partikelfilter (Fahrzeug 061 - Mercedes-Benz Vito 116 CDI: Messungen NPET061A, NPET061B, NPET061Z, NMET061A und NMET061B) beauftragt. Details zu der Untersuchung können im Empa-Bericht Nr. 00.5082.PZ/S085-1577 im Anhang 6.3 auf Seiten 31 und folgende nachgeschlagen werden.



In einem ersten Schritt wurde der Filter makroskopisch untersucht. Dazu wurde dieser aufgeschnitten und das Filtermedium aus der Abdichtungsmatte gelöst. Der Ausgangstrichter zeigte eine sehr starke Verrussung. Im Filtermedium zeigte sich ein deutlicher Riss mit schwarzer Partikelspur (Russ) entlang dieses Risses. Es konnte keine Partikelströmung vom Rissbereich über die Matte zum Ausgangsquerschnitt nachgewiesen werden.

In einem zweiten Schritt wurde das Filtermedium halbiert und diverse Proben unter dem Lichtmikroskop untersucht. Interessanterweise wiesen die Einlasskanäle einen grösseren Querschnitt als die Auslasskanäle auf. Dies wurde als eher ungewöhnlich eingestuft. Weitere Risse waren nun erkennbar und zwar unregelmässig über das Filtermedium verteilt. Es konnten Russablagerungen entlang der Einlasskanälen und der Risse nachgewiesen werden.

Schlussendlich wurden weiter Proben des Filtermediums (Rissbereich) mittels Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM) untersucht. Diese Untersuchungen zeigten mikrometergrosse Risse und Poren in der Kanalwand (Schwachstellen). Zudem konnten verschiedene Schichten von Russablagerung (mögliche Regenerationsphasen mit unvollständigem Russ Abbau) gefunden werden. Hinweise auf eine Schmelze konnte hingegen nicht gefunden werden.

Aufgrund der mikroskopischen und REM Untersuchung konnten keine eindeutigen Zeichen auf die Rissentstehung gefunden werden. Ungewöhnlichen Schwachstellen in der Kanalwand (mikrometergrosse Risse und Poren) in Kombination mit der asymmetrischen Bauweise (Auslasskanäle kleiner als

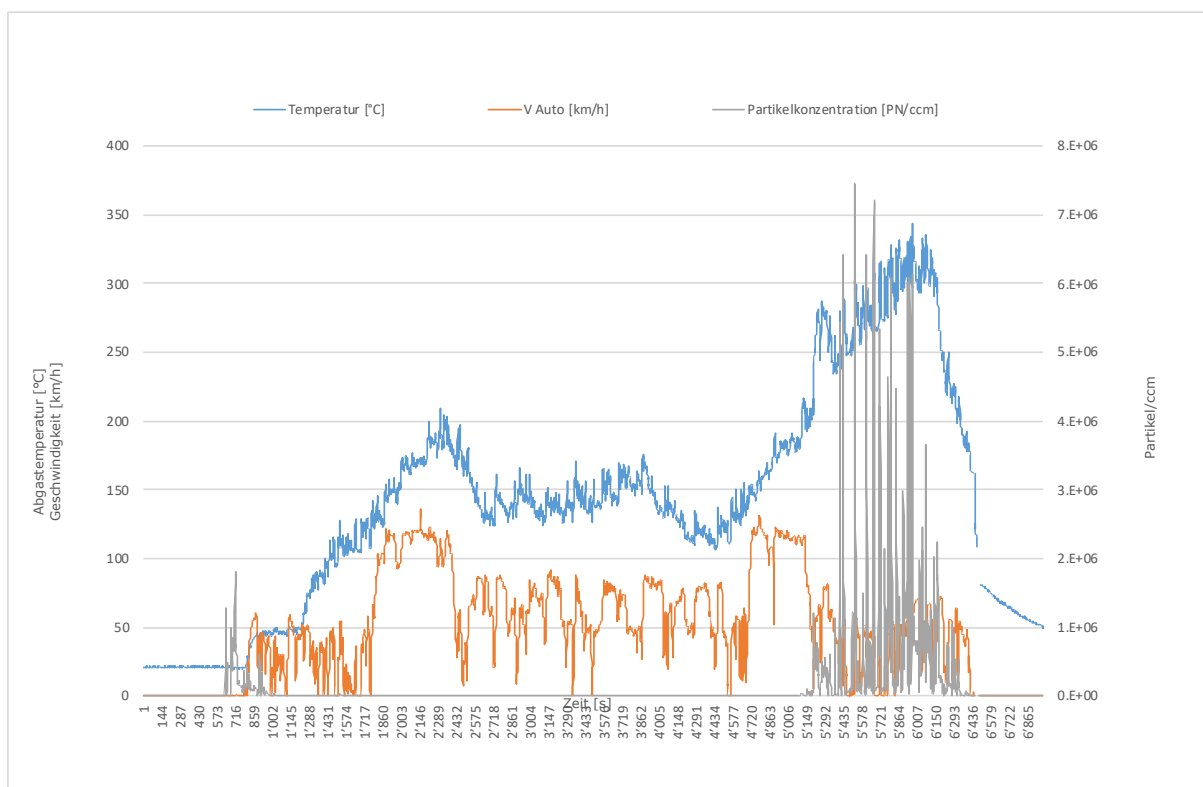
Einlasskanäle) könnten aber einen Einfluss auf die Rissbildung haben. Das Motorabstellen während einer aktiven Regeneration (erhöhte Wahrscheinlichkeit bei vermehrtem Kurzstreckeneinsatz) kann zu einer hohen thermischen Belastung der Partikelfilterstruktur führen. Dabei können erste Risse entstehen. Weist das Filtermedium Risse auf, kann dies zu einem Druckverlust über dem Filter führen. Nimmt der Druck über dem Partikelfilter während der Regeneration ab, führt dies zu einem vorzeitigen Abbruch. In der Folge können weitere Regenerationen ausbleiben, da der Druck über dem Filter die Schwelle für die Auslösung einer aktiven Regeneration nicht mehr erreichen kann.

Die durchgeführte Untersuchung zeigte, dass die nicht mehr vorhandene Wirkung des Partikelfilters klar auf die Risse im Filtermedium zurückzuführen waren. Eine konkrete Ursache für die Rissentstehung wurde hingegen nicht identifiziert.

4.2. Partikelemissionen während der Regenerationsphase

In Personenwagen eingesetzte Partikelfilter werden periodisch regeneriert. Bei einem bezüglich dieser Thematik geprüften Seat Exeo 2.0 TDI findet diese Filter-Regeneration nach dem Softwareupdate (welches als Folge „Diesel-Abgasskandals“ durchgeführt werden musste) etwa alle 500 bis 800 km statt. Die grüne Kurve zeigt die Partikelkonzentration im Abgas, gemessen mit dem Semtech LDV von SENSORS Incorporated. Unmittelbar nach dem Motorstart ist eine erhöhte Konzentration zu beobachten. Während der Regeneration (auf der Zeitachse ab ca. 5'500 s) nimmt die Konzentration auf bis zu über $7.00E+06$ Partikel/ccm zu. Dass es sich in diesem Zeitfenster um eine Regeneration handelt, lässt sich an dem durch entsprechende Verbrennung provozierten Temperaturanstieg (blaue Kurve) erkennen. Am Auspuffrohr sind dann fast 350°C messbar.

Grafik 9 Partikelemissionen eines dieselbetriebenen Autos während der Regenerationsphase



Selbst bei Autobahnfahrt mit 120 km/h (orange Kurve) steigt diese Temperatur kaum auf über 200°C . Die komplette Regeationsphase dauert – im vorliegenden Fall bei Ausserortstempo – rund 18 Minuten. Bei den Fahrzeugen, die anlässlich der ersten Partikelemissionsmessung erhöhte Werte zeigten, dürfte also folgendes passiert sein: Der Motor führte während der Messung eine Regenerationsphase durch. Entsprechend sind die in diesen Betriebszuständen generierten Resultate nicht repräsentativ.

4.3. Fazit

Die in der vorliegenden Studie gemessene Anzahl Personenwagen ist zu klein, um Rückschlüsse auf den gesamten schweizerischen Fahrzeugbestand zu ziehen, dennoch sind die Erkenntnisse sehr interessant und es lässt sich folgendes hervorheben:

Die in dieser Studie beobachtete Fehlerquote der Partikelfilter (Vergleichswert bei $2.50E+05$ Partikel/ccm) liegt im Leerlauf bei rund 7% und bei 2'000 U/min bei 9%. Diese Werte sind durchaus mit den beiden Studien des AWEL (AWEL, ETH-Conference 2018: Combustion Generated Nanoparticles - VERT-Forum 2018) und TNO (Kadijk, Elstgeest, Ligterink, & van der Mark, 2017) vergleichbar. Nach Abzug der Fahrzeuge, die nicht persistent zu hohe PN-Emissionen aufwiesen, z.B. aufgrund Regenerationseffekten, liegt die Fehlerquote jedoch nur noch bei rund 3% im Leerlauf resp. 4% bei 2'000 U/min. Zudem handelt es sich bei den der Fehlerquote zugrunde liegenden Fahrzeugen um solche, die als leichte Nutzfahrzeuge ausgelegt wurden.

Der TCS empfiehlt, bei 2'000 U/min zu messen, da die Werte im Leerlauf und bei 2'000 U/min die gleichen Grössenordnungen bei den Partikelkonzentrationen abdecken. Funktioniert die Abgasnachbehandlung nicht oder nur teilweise, treten die Mängel bei der Messung mit 2'000 U/min massiver auf.

Anzumerken bleibt, dass eine einmalige Messung der Partikelkonzentration an der Auspuffmündung eine unter Umständen nicht repräsentative Momentaufnahme darstellt. Der Partikelfilter wird im Schnitt etwa alle 500 bis 800 km regeneriert. Das bedeutet, dass sich ein Diesel-Personenwagen mit Partikelfilter im Schnitt während rund 4% seiner Betriebszeit in der Regenerationsphase befindet und deshalb mit erhöhtem Partikelaustritt unterwegs ist. Wird die Messung genau in diesem Zeitfenster durchgeführt, ist das Messresultat nicht aussagekräftig. Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Filtersystems sollte im Fall auffällig erhöhter Partikelanzahl-Werte nach einer Fahrt von etwa 20 km resp. während zehn bis 20 Minuten bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 60 km/h eine zweite Messung durchgeführt werden.

Um festzustellen, ob ein Fahrzeug während der Messung im Zustand der Regeneration ist, könnte die Temperatur des Abgasstroms gemessen oder, wenn vorhanden, direkt über ODB die nötigen Informationen abgerufen werden.

Der Kraftstoffverbrauch ist während der Regenerationsphase stark erhöht. Um verlässliche Verbrauchsdaten zu erhalten, muss sich das Fahrzeug jedoch bewegen; so kann ein stark schwankender Verbrauch während 15 bis 20 Minuten festgestellt werden. Es ist anzumerken, dass Partikelfilter nicht nur während der Regeneration, sondern auch unmittelbar danach erhöhte Partikelemissionen aufweisen. Erst wenn sich ein «Filterkuchen» gebildet hat, ist der Partikelfilter wieder voll einsatzfähig und liefert die besten Werte.

Es wäre sinnvoll eine grösser ausgelegte Messreihe mit Messgeräten, welche zur Bestimmung der Partikelkonzentration aus Verbrennungsmotoremissionen am Endrohr geeignet sind, durchzuführen. Ein höherer Anteil von leichten Nutzfahrzeugen wäre aus Sicht der Autoren zielführend. Regenerationseffekte müssten erkannt und ausgeschlossen werden können.

Abbildung 6 Ein Blick auf den im Seat Exeo 2.0 TDI verbauten Partikelfilter



5. Verzeichnisse

5.1. Literatur

- AWEL. (ETH-Conference 2018: Combustion Generated Nanoparticles - VERT-Forum 2018).
Praxiseinsatz II zur BD-Akademie. *Funktionskontrolle von Dieselpartikelfiltersystemen
mittels Partikelanzahlmessungen anlässlich der periodischen Fahrzeugkontrolle im
Strassenverkehrsamt Albisgüetli ZH*. Zürich:
http://www.nanoparticles.ch/archive/2018_Gloor_FO.pdf und [https://vert-
dpf.eu/j3/images/pdf/VERT_FORUM_2018/day1/06-Gloor---VERT-Forum-2018.pdf](https://vert-dpf.eu/j3/images/pdf/VERT_FORUM_2018/day1/06-Gloor---VERT-Forum-2018.pdf).
BorgWarner. (04. 02 2016). Von
<http://www.turbos.borgwarner.com/de/products/turbochargerAdvantages.aspx> abgerufen
Bosch Mobility Solutions. (04. 02 2016). Von [http://produkte.bosch-mobility-
solutions.de/specials/de/abgasnachbehandlung/de/page/Systemintegration_3.html](http://produkte.bosch-mobility-
solutions.de/specials/de/abgasnachbehandlung/de/page/Systemintegration_3.html) abgerufen
Bundesamt für Statistik. (2. Mai 2018). Strassenfahrzeugbestand: Personenwagen ab 2015.
Bundesamt für Umwelt (BAFU). (Februar 2016; Erstausgabe 2009). *Luftreinhaltung auf Baustellen -
Richtlinie über betriebliche und technische Massnahmen zur Begrenzung der Luftschadstoff-
Emissionen von Baustellen (Baurichtlinie Luft)*. Bern: Bundesamt für Umwelt (BAFU).
Kadijk, G., Elstgeest, M., Ligterink, N. E., & van der Mark, P. J. (2017). *Investigation into a Periodic
Technical Inspection (PTI) test method to check for presence and proper functioning of Diesel
Particulate Filters in light-duty diesel vehicles – part 2*. Den Haag: TNO 2017 R10530.
kfz-tech.de. (04. 02 2016). Von <http://www.kfz-tech.de/CommonRailPiezo.htm> abgerufen
Wikipedia - Abgasnorm. (29. 01 2016). Von <https://de.wikipedia.org/wiki/Abgasnorm> abgerufen
Wikipedia - Common-Rail-Einspritzung. (22. 01 2016). Von [https://de.wikipedia.org/wiki/Common-Rail-
Einspritzung](https://de.wikipedia.org/wiki/Common-Rail-
Einspritzung) abgerufen

5.2. Abbildungen

Abbildung 1 NPET (Modell 3795) von TSI	5
Abbildung 2 Aufbau und Funktionsprinzip NPET	6
Abbildung 3 NanoMet3 von Testo	7
Abbildung 4 Funktionsprinzip unipolarer Diffusionsauflader	8
Abbildung 5 Partikelmessung	8
Abbildung 6 Ein Blick auf den im Seat Exeo 2.0 TDI verbauten Partikelfilter	20

5.3. Tabellen

Tabelle 1: Messungen nach Marke und Messgerät	11
Tabelle 2: NPET mit Partikelkonzentrationen grösser 2.50E+05 Partikel/ccm	14
Tabelle 3: NanoMet3 mit Partikelkonzentrationen grösser 2.50E+05 Partikel/ccm	15
Tabelle 4: NanoMet3 zu NPET Vergleich Partikelkonzentration grösser 2.50E+05 Partikel/ccm	17
Tabelle 5: Messserie NPET	23
Tabelle 6: Messserie NanoMet3	29

5.4. Grafiken

Grafik 1 Verteilung der Stichprobe nach Euro-Norm	10
Grafik 2 NPET – Partikelanzahl Standmessung bei 2'000 U/min	12
Grafik 3 NPET – Partikelanzahl Standmessung im Leerlauf	13
Grafik 4 NPET – Vergleich Partikelanzahl Standmessung im Leerlauf und bei 2'000 U/min	13
Grafik 5 NanoMet3 – Vergleich Partikelanzahl Standmessung im Leerlauf und bei 2'000 U/min	15
Grafik 6 Korrelation NPET und NanoMet3	16
Grafik 7 NanoMet3 gegenüber NPET – Vergleich Partikelanzahl Standmessung im Leerlauf	16
Grafik 8 NanoMet3 gegenüber NPET – Vergleich Partikelanzahl Standmessung bei 2'000 U/min ..	17
Grafik 9 Partikelemissionen eines dieselpetriebenen Autos während der Regenerationsphase	19

6. Anhang

6.1. Technische Daten

TSI Nanopartikel-Emissionstester (NPET) Modell 3795

Detektionseffizienz: < 50% bei 23 nm > 50% bei 41 nm
max. erfassbare Partikelgrösse: 1 µm, begrenzt durch einlassseitigen Zyklon
Einzelpartikelzählung (Nennverdünnung 10:1): 1'000 bis 5 x 10⁶ Partikel/cm³
Partikelkonzentrationsgenauigkeit: Referenzwert ± 10%
Reaktionszeit: T10% bis 90% 4 s +/- 0.5 s / T90% bis 10% 4 s +/- 0.5 s / T0% bis 90% 8 s +/- 0.5 s
Probenahme-Volumenstrom: 0.7 l/min (nominal)
CPC-Messvolumenstrom: 0.1 l/min (nominal)
CPC-Nebenstrom: 0.6 l/min (nominal)
Arbeitsflüssigkeit: Isopropanol (Reinheit besser als 99.5 %)
Befüllung: Wechseldocht, nachfüllbar
Messzeit pro Füllung: 4 Stunden
Katalytischer Stripper: 350 °C – Abscheidung flüchtiger Partikel > 99% für polydisperse C₄₀H₈₂ – Partikel mit 30 nm mittlerem Durchmesser
Abgaszustand: Geeignet zur Probenahme in heissen (bis zu 300 °C) und korrosiven (NO_x, HC, H₂O, H₂SO₄) Motorabgasen.
Temperaturbereich: -10 bis +40 °C
Druckbereich: 70 bis 106 kPa

testo NanoMet3

Detektionseffizienz: ± 30% für Partikelgrößen und Partikelanzahl
max. erfassbare Partikelgrösse: 0.1 bis 0.7 µm
Einzelpartikelzählung: 1'000 bis 5 x 10⁶ Partikel/cm³, bei Verdünnung (10:1) 1 x 10⁴ bis 3 x 10⁸ Partikel/cm³
Partikelkonzentrationsgenauigkeit: Referenzwert ± 10%
Probenahme-Volumenstrom: 4.0 l/min, mittels interner Pumpe aktiv zugeführt
Messvolumenstrom: 0.96 l/min
Befüllung: Wechseldocht, nachfüllbar
Messzeit pro Füllung: 4 Stunden
Katalytischer Stripper: 350 °C – Abscheidung flüchtiger Partikel > 99% für polydisperse C₄₀H₈₂ – Partikel mit 30 nm mittlerem Durchmesser
Abgaszustand: Geeignet zur Probenahme von Umgebungstemperatur bis zu 300 °C
Temperaturbereich: +5 bis +35 °C
Luftfeuchtigkeit: 0 bis 80% relative Luftfeuchtigkeit

6.2. Messresultate

Tabelle 5: Messserie NPET

Bezeichnung	Datum	Marke	Modell	Euro-Norm	TG	Kilometerstand	Leerlauf	2'000 U/min	Bemerkung
NPET001	01.05.2018	VW	Sharan 2.0D	B5b	X	54'107	1.62E+03	< 1.00E+03	
NPET002	08.05.2018	Skoda	Octavia C RS D 4x4	B6b	1SG149	81'378	< 1.00E+03	5.70E+03	
NPET003	14.05.2018	Chevrolet	Captiva 2.2 TD 4x4	B5b	3CA109	170'620	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET004	14.05.2018	VW	Multivan	B5b	X	87'055	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET005	15.05.2018	VW	Caddy	B6b	-	neu	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET006	15.05.2018	VW	Caddy	B6b	-	neu	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET007	16.05.2018	Chevrolet	Captiva 2.0 D	B04	1CA708	180'125	1.38E+03	3.36E+03	
NPET008	16.05.2018	BMW	530d	B5a	1BB872	173'828	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET009	16.05.2018	Citroën	C5 2.0 Hdi FAP	B5a	1CE388	128'325	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET010	16.05.2018	Citroën	C5 2.0 Hdi FAP	B5a	1CE311	169'464	1.17E+04	2.38E+04	
NPET011	16.05.2018	Honda	CR-V i-DTEC	B5b	1HA392	159'389	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET012	16.05.2018	Seat	Alhambra 2.0 TDI	B5b	1SH198	142'384	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET013	16.05.2018	VW	Passat2.0 TDI	B5b	X	71'600	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET014	16.05.2018	Skoda	Superb 2.0 TDI	B6b	-	25'977	1.61E+03	8.39E+03	
NPET015	16.05.2018	BMW	X3 2.0d	B5b	1BE777	146'027	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET016	16.05.2018	Opel	Insignia 2.0 TD	B5b	1OB607	218'016	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET017	17.04.2018	VW	T4	B02	3VD170	112'000	> 5.00E+06	> 5.00E+06	Ohne DPF
NPET018	17.04.2018	Mercedes-Benz	CLA 220 CDI	B6b	1MG197	98'872	3.07E+03	4.73E+04	

Bezeichnung	Datum	Marke	Modell	Euro-Norm	TG	Kilometerstand	Leerlauf	2'000 U/min	Bemerkung
NPET019	17.04.2018	VW	Touran 2.0 TDI	B6b	1XP393	26'117	3.05E+03	< 1.00E+03	
NPET020	26.04.2018	Skoda	Octavia C RS D 4x4	B6b	1SG252	2'470	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET021	27.04.2018	Seat	Exeo ST 2.0 TDI	B5a	1XB860	99'194	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET022	27.04.2018	Skoda	Octavia C RS D 4x4	B6b	1SG149	66'419	1.07E+05	9.52E+04	
NPET023A	22.05.2018	Audi	A3 2.0 TDI	B5b	-	74'097	1.21E+05	8.04E+05	Nachmessung von NPET023A
NPET023B	22.05.2018					74'131	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET024	22.05.2018	Audi	A6 3.0 BiTDI	B5b	1AD228	103'670	1.09E+05	1.97E+05	
NPET025	22.05.2018	Skoda	Octavia 2.0 TDI	B5b	1SF770	84'388	< 1.00E+03	3.15E+03	
NPET026	22.05.2018	VW	Golf 1.6 TDI	B5b	-	130'902	2.21E+03	1.56E+03	
NPET027	22.05.2018	Audi	A3 2.0 TDI	B6b	1AD928	26'900	1.82E+03	9.49E+03	
NPET028	22.05.2018	Audi	A3 2.0 TDI	B6b	-	37'735	< 1.00E+03	3.88E+03	
NPET029	22.05.2018	Audi	A3 2.0 TDI	B6b	-	17'229	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET030	22.05.2018	Audi	A3 2.0 TDI	B6b	-	36'576	1.44E+05	1.96E+05	
NPET031	22.05.2018	Audi	A4 2.0 TDI	B6b	1AD387	116'893	1.03E+04	3.06E+03	
NPET032	22.05.2018	Audi	Q5 2.0 TDI	B6b	-	11'940	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET033	22.05.2018	Hyundai	Tucson 2.0 CRDI	B6b	1XM367	neu	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET034	22.05.2018	Mercedes-Benz	C250d	B6b	1MG485	39'750	1.62E+03	1.67E+03	
NPET035	22.05.2018	Seat	Leon 1.6 CR	B6b	-	24'402	3.43E+04	8.04E+04	
NPET036	22.05.2018	Skoda	Kodiaq 2.0 TDI	B6b	1SG202	4'133	1.47E+03	1.32E+03	
NPET037	22.05.2018	Skoda	Octavia 2.0 TDI	B6b	-	46'513	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET038	22.05.2018	Skoda	Superb 2.0 TDI	B6b	1SG124	5'739	1.08E+03	2.08E+03	

Bezeichnung	Datum	Marke	Modell	Euro-Norm	TG	Kilometerstand	Leerlauf	2'000 U/min	Bemerkung
NPET039	22.05.2018	Volvo	XC60 D4	B6b	-	24'826	5.27E+04	1.40E+05	
NPET040	22.05.2018	VW	Caddy	B6b	-	2'408	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET041	22.05.2018	VW	Golf 2.0 TDI	B6b	-	44'937	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET042	22.05.2018	VW	Tiguan 2.0 TDI	B6b	1VG583	5'051	6.95E+03	3.42E+04	
NPET043	22.05.2018	VW	Tiguan 2.0 TDI	B6b	1VF752	18'529	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET044	22.05.2018	VW	Tiguan 2.0 TDI	B6b	-	24'826	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET045	22.05.2018	VW	T-Roc 2.0 TDI	B6b	1VG611	3'453	1.19E+03	< 1.00E+03	
NPET046	06.06.2018	VW	Touareg 3.0 V6	B04	1VD284	185'611	< 1.00E+03	5.44E+03	
NPET047	06.06.2018	Jaguar	XF 2.2D	B5b	1XK342	32'597	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET048	06.06.2018	BMW	420d	B6b	X	89'577	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET049	06.06.2018	Citroën	C4 Picasso 2.0 Hdi	B6b	1CE996	94'662	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET050	06.06.2018	VW	Golf VII 2.0GTD	B6b	1VF410	71'392	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET051	06.06.2018	Audi	A3 2.0 TDI	B5b	-	74'000	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET052	12.06.2018	Mercedes-Benz	316 CDI	B5a	3MH481C	223'900	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET053	12.06.2018	BMW	530d Touring	B5a	1BB978	139'838	1.01E+03	4.40E+03	
NPET054	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 116 CDI	B5a	3MH934C	149'454	4.45E+03	1.69E+05	
NPET055	12.06.2018	BMW	525d	B5b	1BC367	95'759	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET056	12.06.2018	BMW	525d	B5b	1BC367	149'550	2.29E+03	3.36E+03	
NPET038	12.06.2018	Skoda	Superb 2.0 TDI	B6b	1SG124	5'739	1.08E+03	2.08E+03	
NPET057	12.06.2018	BMW	525d	B5b	1BC220	152'159	< 1.00E+03	< 1.00E+03	

Bezeichnung	Datum	Marke	Modell	Euro-Norm	TG	Kilometerstand	Leerlauf	2'000 U/min	Bemerkung
NPET058	12.06.2018	BMW	530d	B5b	1BC382	172'690	< 1.00E+03	3.04E+03	
NPET059 NPET059Z	12.06.2018	Ford	Transit Custom	B5b	1FJ548	44'252 51'495	1.85E+03 < 1.00E+03	1.95E+03 < 1.00E+03	
NPET060 NPET060Z	12.06.2018 12.09.2018	Mercedes-Benz	Vito 116 CDI	B5b	3MJ901C	62'670 64'968	2.92E+03 4.83E+05	2.89E+03 3.78E+06	Messung NPET060 nicht gültig ersetzt Messung NPET060. Keine Nachmessung möglich, das Fahrzeug stand nicht zur Verfügung. Die Messung wurde durch NMET060 plausibilisiert.
NPET061A NPET061B NPET061Z	12.06.2018 12.06.2018 12.09.2018	Mercedes-Benz	Vito 116 CDI	B5b	3MJ337C	73'904 73'968 80'419	5.89E+05 3.01E+03 1.99E+06	3.99E+06 7.54E+03 3.34E+06	Messung NPET061B nicht gültig ersetzt Nachmessung NPET61B
NPET062 NPET062Z	12.06.2018 12.09.2018	Mercedes-Benz	Vito 116 CDI	B5b	1ME745	130'805 139'850	2.72E+03 2.96E+05	2.55E+03 3.66E+06	Messung NPET062 nicht gültig ersetzt Messung NPET062. Die Messung wurde mit NMET062 plausibilisiert.
NPET063 NPET063Z	12.06.2018 12.09.2018	Mercedes-Benz	Vito 116 CDI	B5b	1ME745	186'737 -	3.55E+03 -	2.64E+03 -	Messung NPET063 nicht gültig. Die Messung wird nicht verwendet, da das Fahrzeug zum Zeitpunkt der Zweitmessung schon ausgemustert war
NPET064 NPET064Z	12.06.2018 12.09.2018	VW	Caddy 2.0D	B5b	1VE167C	80'856 84'703	2.38E+03 6.64E+03	2.70E+03 1.46E+04	Messung NPET064 nicht gültig ersetzt Messung NPET064
NPET065	12.06.2018	VW	Passat2.0 TDI	B5b	1VE664	72'454	< 1.00E+03	1.04E+03	
NPET066	12.06.2018	VW	Passat2.0 TDI	B5b	1VE399	115'126	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET067	12.06.2018	VW	Passat2.0 TDI	B5b	1VE399	167'876	< 1.00E+03	1.20E+03	
NPET068	12.06.2018	BMW	525d	B6b	1BJ262	9'577	1.89E+03	< 1.00E+03	
NPET069A NPET069B	12.06.2018 12.06.2018	BMW	525d	B6b	1BG215	42'444 42'485	1.58E+05 -	7.47E+05 4.11E+03	Nachmessung von NPET069A Messung im Leerlauf nicht durchgeführt
NPET071	12.06.2018	BMW	X3 30d	B6b	1BG312	60'801	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET072	12.06.2018	BMW	525d	B6b	1BD530	71'315	< 1.00E+03	< 1.00E+03	

Bezeichnung	Datum	Marke	Modell	Euro-Norm	TG	Kilometerstand	Leerlauf	2'000 U/min	Bemerkung
NPET073	12.06.2018					13'483	1.94E+03	1.70E+03	Messung nicht gültig
NPET073ZA	12.09.2018	Ford	Kuga 2.0 TDCI	B6b	1FK313	18'202	3.05E+05	1.18E+06	Nachmessung von NPET073
NPET073ZB	12.09.2018					18'237	< 1.00E+03	< 1.00E+03	ersetzt Messung NPET060
NPET074	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 119	B6b	1MH284	9'648	1.03E+03	1.60E+03	
NPET075	12.06.2018					10'769	3.26E+05	3.98E+05	Messung nicht gültig
NPET075Z	12.09.2018	Mercedes-Benz	Vito 119	B6b	1MH284	16'925	1.74E+05	3.99E+05	ersetzt Messung NPET075
NPET077	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 119	B6b	1MG584	91'556	8.22E+03	2.46E+04	
NPET078	12.06.2018					11'621	3.12E+03	3.20E+03	Messung nicht gültig
NPET078Z	12.09.2018	Mercedes-Benz	Vito 119	B6b	3MM655C	12'510	3.64E+05	2.57E+05	ersetzt Messung NPET078
NPET079	12.06.2018	VW	Passat2.0 TDI	B6b	1VF542	71'313	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET080	12.06.2018	VW	Passat2.0 TDI	B6b	1VF542	102'123	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET081	12.06.2018	VW	Tiguan 2.0 TDI	B6b	1VF233	34'173	2.44E+03	2.38E+03	
NPET082	12.06.2018	Mercedes-Benz	516	B6b	3MJ658C	13'651	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET083	30.04.2018	Alfa	Romeo Giulietta 2.0 JTDM	B6b	-	19'000	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET084A	30.04.2018	Skoda	Octavia RS 2.0 TDI	B6b	-	8'188	4.28E+06	> 5.00E+06	
NPET084B						8'231	5.14E+03	2.58E+03	Nachmessung von NPET084A
NPET085	01.05.2018	Volvo	V60 D4	B6B	-	46'600	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET086	30.04.2018	Volvo	XC 60 D3	B5b	-	89'600	1.03E+03	1.48E+03	
NPET087	01.05.2018	Volvo	XC90 D5	B6b	-	34'500	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET088	30.04.2018	Audi	A1 1.6TDI	B6b	-	70'400	2.37E+03	4.79E+03	
NPET089	30.04.2018	Volvo	V40 D3	B6b	-	23'800	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET090	30.04.2018	Volvo	V60 D4	B5b	-	170'700	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET091	30.04.2018	Volvo	XC60 D3	B5a	-	195'000	2.75E+03	9.42E+03	

Bezeichnung	Datum	Marke	Modell	Euro-Norm	TG	Kilometerstand	Leerlauf	2'000 U/min	Bemerkung
NPET092	01.05.2018	Volvo	V40 D3	B6b	-	27'082	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET093	30.04.2018	Fiat	Sedici	B5b	-	89'991	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET094	01.05.2018	Volvo	V40 D3	B5b	-	92'266	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET095	30.04.2018	Volvo	V60 D5	B5a	-	101'300	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET096	30.04.2018	Volvo	XC60 D4	B6b	-	17'500	2.53E+03	4.80E+03	
NPET097	30.04.2018	Fiat	Tipo	B6b	-	12'097	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET098	30.04.2018	Volvo	V60 D3	B6b	-	25'000	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET099	30.04.2018	Volvo	V90 D5	B6b	-	25'970	5.90E+04	1.47E+04	
NPET100	30.04.2018	Volvo	XC60 D4	B5b	-	58'400	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET101	30.04.2018	Mercedes-Benz	ML350	B5b	-	47'637	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET102	30.04.2018	Volvo	V40 D4	B6b	-	26'600	< 1.00E+03	< 1.00E+03	
NPET103	30.04.2018	Volvo	XC60 D5	B6b	-	11'000	5.14E+03	6.33E+04	

Tabelle 6: Messserie NanoMet3

Bezeichnung	Datum	Marke	Modell	Euro-Norm	TG	Kilometerstand	Leerlauf	2'000 U/min	Bemerkung
NMET019	12.06.2018	VW	Touran 2.0 TDI	B6b	1XP393	26'117	4.42E+01	3.32E+01	
NMET021	12.06.2018	Seat	Exeo ST 2.0 TDI	B5a	1XB860	99'194	1.07E+00	3.68E+02	
NMET046	12.06.2018	VW	Touareg 3.0V6	B04	1VD284	185'611	1.16E+01	2.81E+02	
NMET052	12.06.2018	Mercedes-Benz	316 CDI	A05	3MH481C	223'900	7.61E+02	1.77E+02	
NMET053	12.06.2018	BMW	530d Touring	B5a	1BB978	139'838	7.86E+02	3.95E+03	
NMET054	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 116 CDI	B5a	3MH934C	149'454	8.65E+03	2.16E+04	
NMET055	12.06.2018	BMW	525d	B5b	1BC367	95'759	3.18E+02	-	Keine Messung bei 2'000 U/min
NMET056	12.06.2018	BMW	525d	B5b	1BC367	149'550	1.05E+03	2.61E+03	
NMET057	12.06.2018	BMW	525d	B5b	1BC220	152'159	2.62E+01	2.56E+02	
NMET058	12.06.2018	BMW	530d	B5b	1BC382	172'690	1.36E+03	2.97E+03	
NMET059	12.06.2018	Ford	Transit Custom	B5b	1FJ548	44'252	5.35E+03	5.33E+03	
NMET060	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 116 CDI	B5b	3MJ901C	62'670	3.60E+05	1.50E+06	Keine Nachmessung möglich, das Fahrzeug stand nicht zur Verfügung. Die Messung wurde durch NPET060Z plausibilisiert.
NMET061A	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 116 CDI	B5b	3MJ337C	73'904	1.31E+06	9.34E+06	Nachmessung von NMET061A
NMET061B	12.06.2018					73'968	1.62E+06	8.25E+06	
NMET062	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 116 CDI	B5b	1ME745	130'805	4.16E+05	2.06E+06	Die Messung wurde durch NPET062Z plausibilisiert.
NMET063	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 116 CDI	B5b	1ME745	186'737	1.73E+04	1.04E+05	Keine korrespondierende Messung mit dem NPET, da zum Zeitpunkt der Zweitmessung das Fahrzeug schon ausgemustert war. Messung NPET063 ist nicht gültig
NMET064	12.06.2018	VW	Caddy 2.0D	B5b	1VE167C	80'856	3.85E+03	2.47E+03	

Bezeichnung	Datum	Marke	Modell	Euro-Norm	TG	Kilometerstand	Leerlauf	2'000 U/min	Bemerkung
NMET066	12.06.2018	VW	Passat2.0 TDI	B5b	1VE399	115'126	6.68E+03	6.94E+02	
NMET067	12.06.2018	VW	Passat2.0 TDI	B5b	1VE399	167'876	5.44E+02	3.93E+02	
NMET068	12.06.2018	BMW	525d	B6b	1BJ262	9'577	3.28E+02	4.14E+02	
NMET069A NMET069B	12.06.2018	BMW	525d	B6b	1BG215	42'444 42'485	1.28E+05 1.52E+03	5.46E+05 2.36E+03	Nachmessung von NMET069A
NMET071	12.06.2018	BMW	X3 30d	B6b	1BG312	60'801	2.82E+02	3.21E+02	
NMET072	12.06.2018	BMW	525d	B6b	1BD530	71'315		2.40E+02	
NMET073	12.06.2018	Ford	Kuga 2.0 TDCI	B6b	1FK313	13'483	3.91E+03	3.93E+03	
NMET074	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 119	B6b	1MH284	9'648	7.99E+02	6.41E+02	
NMET075	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 119	B6b	1MH284	10'769	3.64E+05	5.93E+05	
NMET077	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 119	B6b	1MG584	91'556	2.62E+03	2.20E+04	
NMET078	12.06.2018	Mercedes-Benz	Vito 119	B6b	3MM655C	11'621	3.34E+04	2.78E+04	
NMET079	12.06.2018	VW	Passat2.0 TDI	B6b	1VF542	71'313	7.24E+02	1.42E+03	
NMET080	12.06.2018	VW	Passat2.0 TDI	B6b	1VF542	102123	8.18E+02	2.70E+02	
NMET081	12.06.2018	VW	Tiguan 2.0 TDI	B6b	1VF233	34'173	4.88E+02	5.23E+02	
NMET082	12.06.2018	Mercedes-Benz	516	B6b	3MJ658C	13'651	2.75E+02	2.76E+02	

6.3. Empa-Bericht Nr. 00.5082.PZ/S085-1577



Untersuchung eines „in TCS-Messungen auffälligen“ Diesel Partikel Filters (DPF)

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa)
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf

Abteilung Fahrzeugantriebssysteme

Panayotis Dimopoulos Eggenschwiler, Anthi Liati, Jacqueline Tschudin

Dübendorf, den 17.04.2019

Inhalt

1.	Makro Fotos	3
2.	Lichtmikroskopische Erkenntnisse	5
3.	Raster Elektronen Mikroskopie (REM) – Probenahme	7
4.	Schlussfolgerungen.....	11

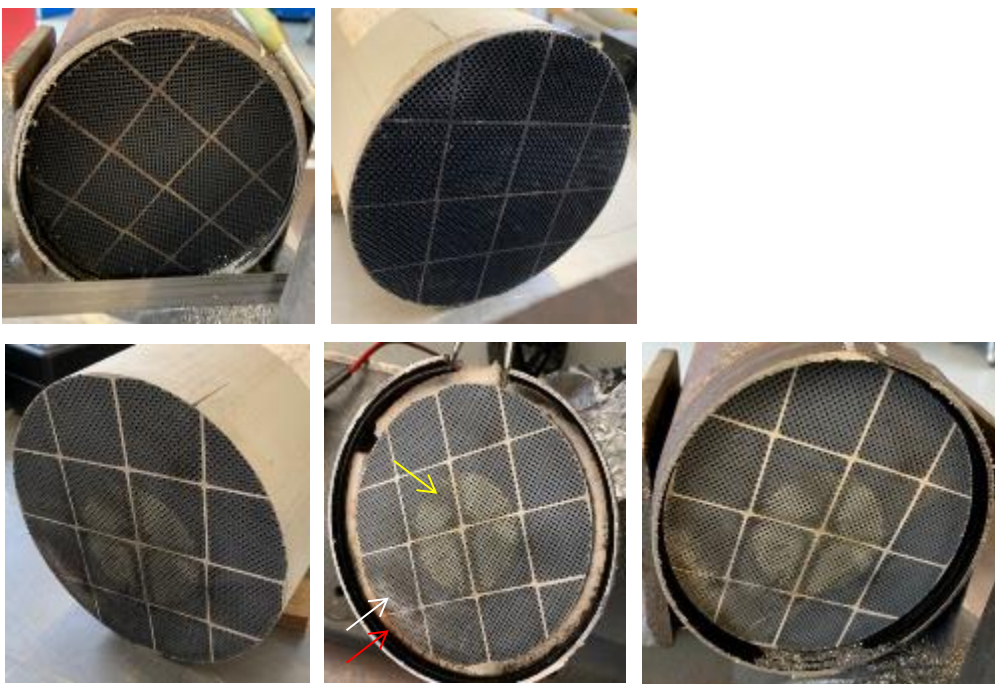
1. Makroskopische Erkenntnisse

Gehäuse geöffnet, Eingangstrichter (rechts) erwartungsgemäss sehr stark verrusst, Ausgangstrichter (links) überraschenderweise stark verrusst.

DPF war gut in Gehäuse befestigt, mit Matte abgedichtet



Eingangsstirnfläche stark verrusst, Ausgangsstirnfläche, heller gelblicher Kreis in der Mitte (gelber Pfeil) und rötliche-weiße Ablagerungen am Rand (rot und weisser Pfeil).

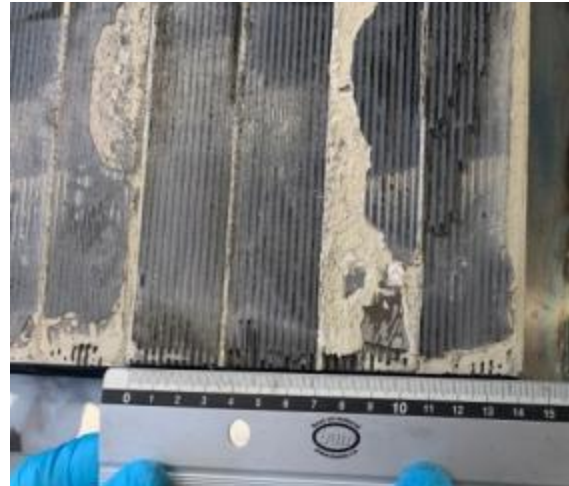


Ca. 20 - 40 mm vom Ausgangsquerschnitt deutlicher Riss, Partikelspur entlang des Risses, deutlich auch auf der Matte sichtbar Rötliche Färbung auf der Matte sichtbar (Asche? Roter Pfeil).



Allerdings zeigt die Spur auf keine Partikelströmung vom Rissbereich über die Matte zum Ausgangsquerschnitt.

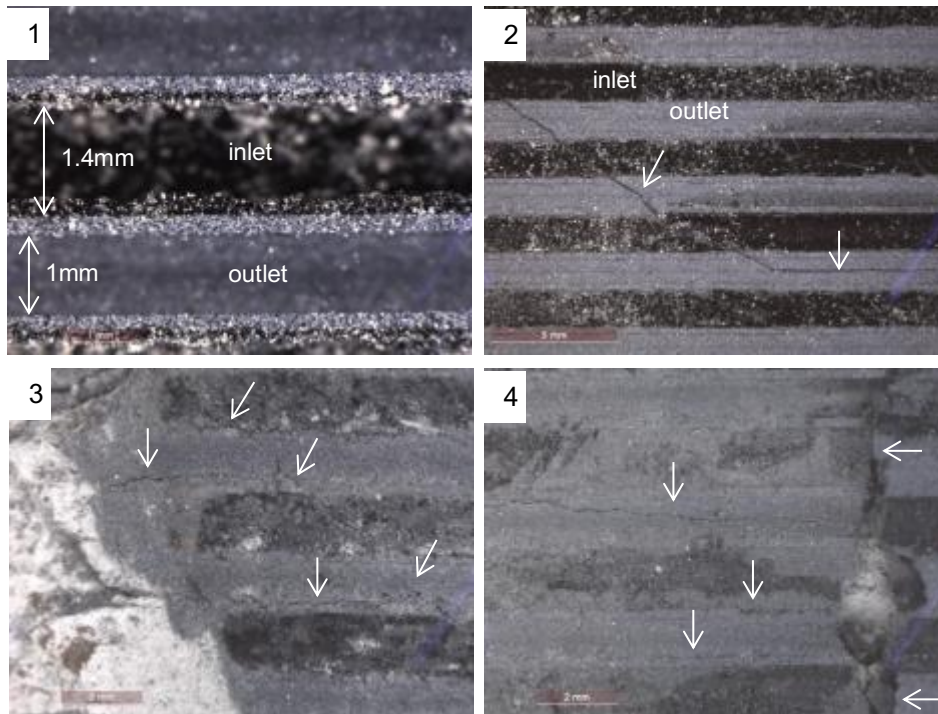
DPF halbiert. Wenig Asche an den Enden der Einlasskanäle (ca. 10 mm). Optisch guter Kontrast zwischen Einlasskanälen (schwarz, verrusst) und Auslasskanälen (grau).



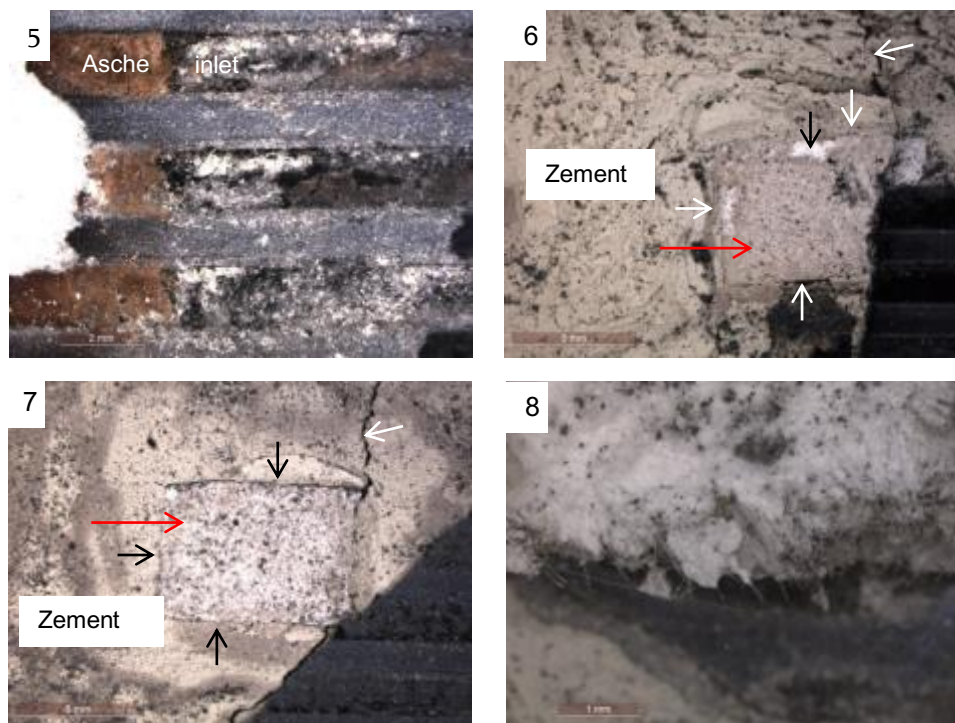
Im Bereich vom Riss (weisse Pfeile) scheinen – in diesem Massstab – einige Auslasskanäle auch verrusst zu sein, Zeichen von Partikelüberströmung.

2. Lichtmikroskopische Erkenntnisse

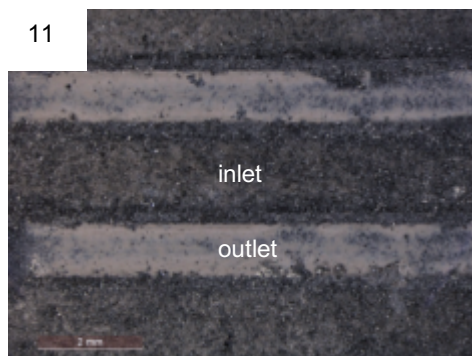
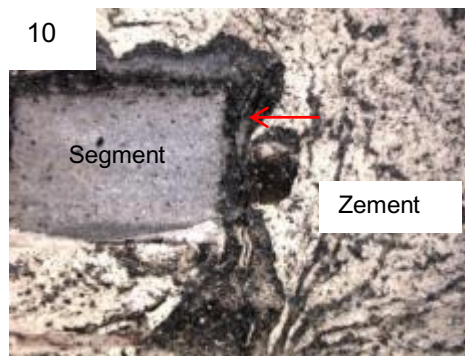
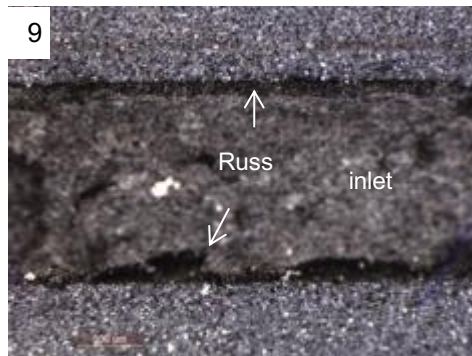
- Einlasskanäle breiter als Auslasskanäle (f. 1)
- Weitere Risse erkennbar: entlang der Mitte der Auslasskanäle (f. 2), durchquerend (f. 2), und unregelmässig verteilt (f. 3, 4)



- Asche nur am Ende von Einlasskanälen (f. 5)
- Zement zwischen Segmenten zeigt spezielle eckige Strukturen (roter Pfeil - f. 6, 7); oft Risse entlang dieser Strukturen (f. 6, 7) oder ausgehend von diesen.
- Weisse flockige Schicht mit Fasern zwischen Zement und Segment (f. 6, 7, 8)

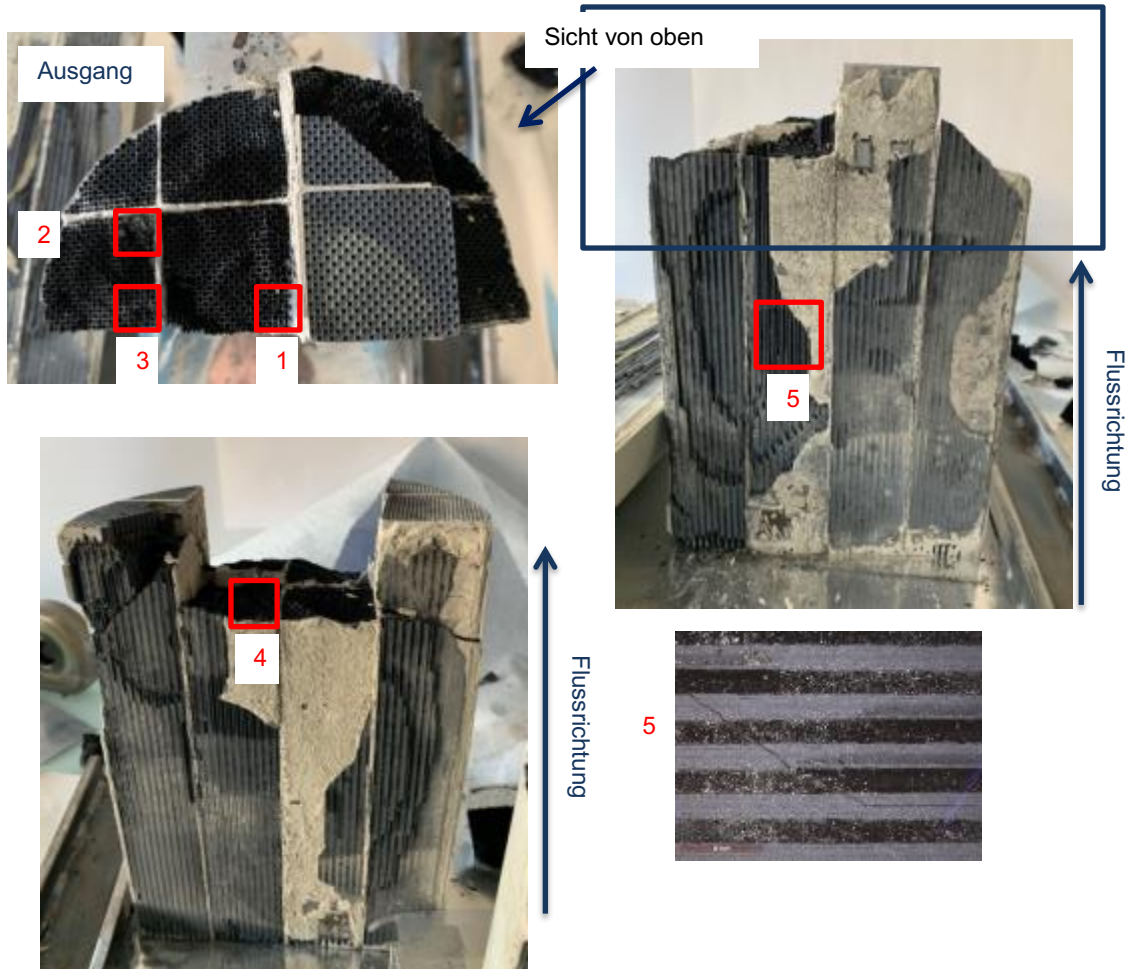


- Russablagerungen entlang der Einlasskanälen (f. 9)
- Russ Ansammlung erkennbar entlang der Risse (roter Pfeil - f. 10).
- Stellenweise hellgraue Verfärbung (Ablagerung ?) entlang der Auslasskanälen (f. 11)



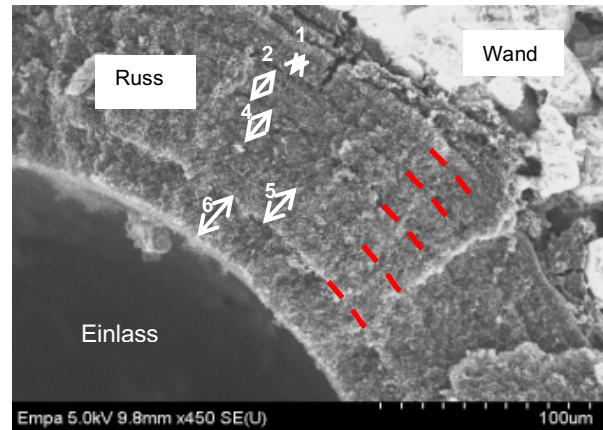
3. Raster Elektronen Mikroskopie (REM) – Probenahme

Proben 1-4 wurden von der Rissfläche senkrecht zur Flussrichtung entnommen; Probe 5 von einer Stelle in der Mitte des DPFs

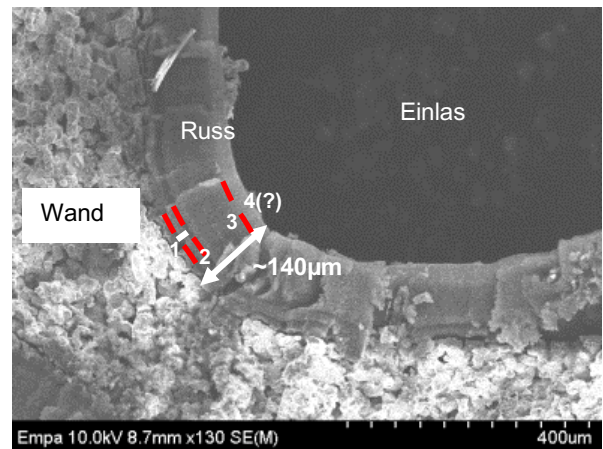


Probe 1

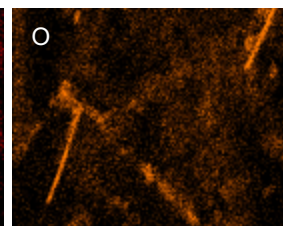
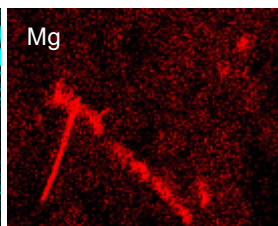
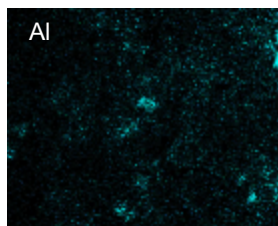
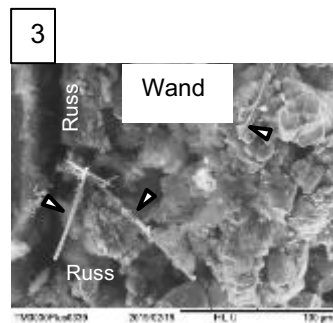
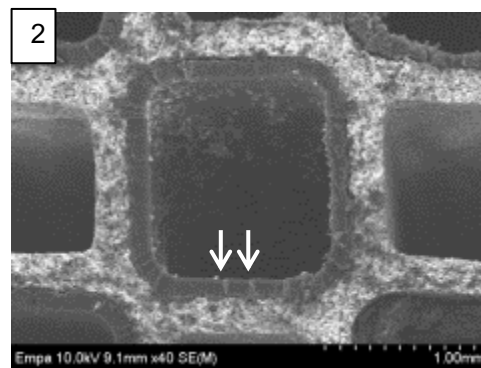
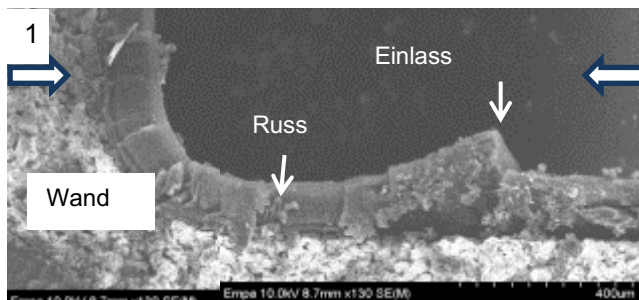
- Verschiedene «Generationen» (bis zu 6) von Russablagerung, die auf partielle Regenerationsphasen (partieller Russ Abbau) hindeuten.
- Dicke der gesamten Russschicht an der Ecke eines Einlasskanals: 130 µm; Dicke individueller Russschichten: 15 - 25 µm.
- Drei (oder 4) «Generationen» von Russablagerung bzw. partielle Regenerations-Phasen (partieller Russ Abbau).



- Dicke der gesamten Russschicht an der Ecke eines Einlasskanals: 140 µm; Dicke individueller Russschichten: 15 - 120 µm

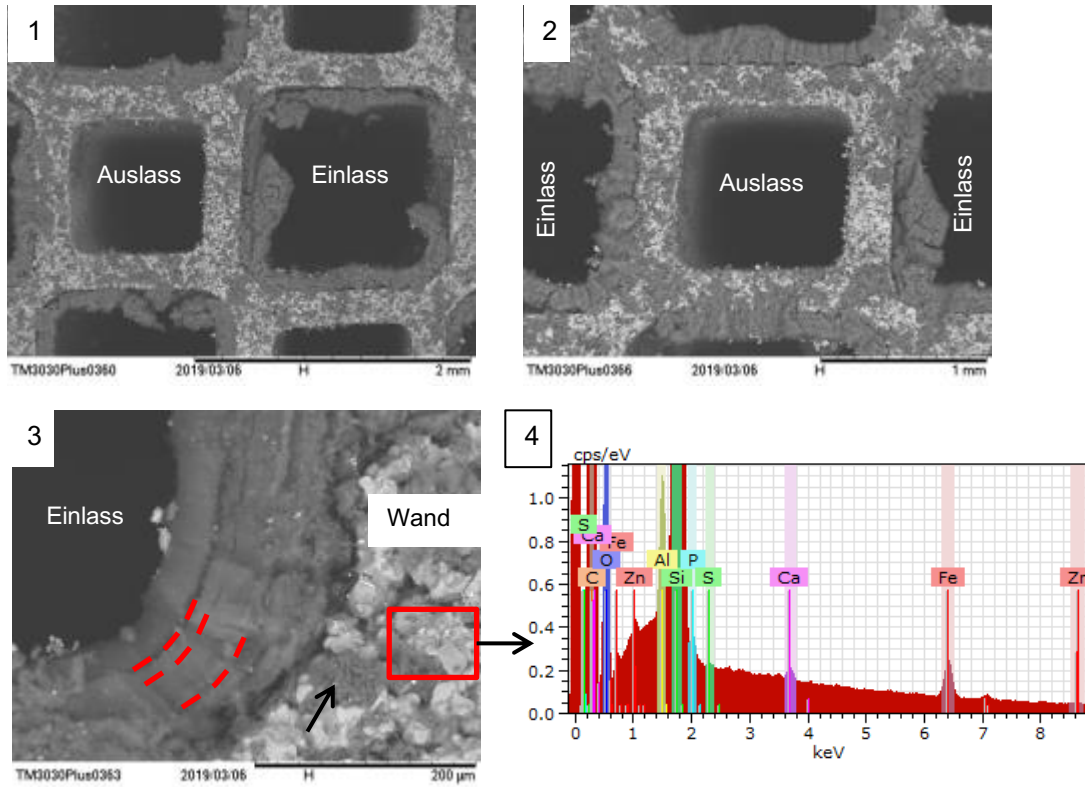


- Stressregime nach der letzten Russ Ablagerungsphase verursacht lokale Ablösung der Russschicht von der Kanalwand (#1) und/oder ihre lokale Verlagerung (#1 und #2, weisse Pfeile).
- Nadel (aus der Matte?) in (und auf) der Russschicht, sowie in (und auf) der Kanalwand (s. Pfeile, #3). Die Nadel (bestehen vorwiegend aus Al, O; weniger häufig aus Mg, O (#3, Element Mapping)).



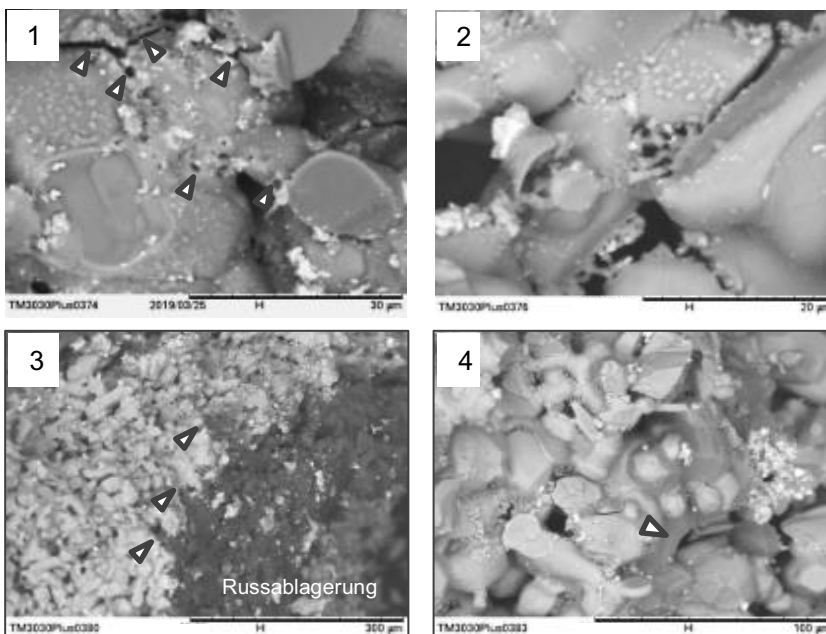
Probe 2

- Russablagerung in Einlasskanäle und auf der Rissfläche; keine Russablagerung in den Auslasskanälen (#1 und #2); Auslasskanäle kleiner als Einlasskanäle (Asymmetrie).
- Verschiedene 'Generationen' von Russablagerung (#3)
- Ausser Russ wurden auch Asche-Elemente (Ca, P, Zn, S) sowie Fe und Al in der Wand-Ablagerung analysiert (Quadrat in #3 und entspricht EDX-Spektrum #4).
- Russ dringt in einen Wand Riss ein (#3, Pfeil)



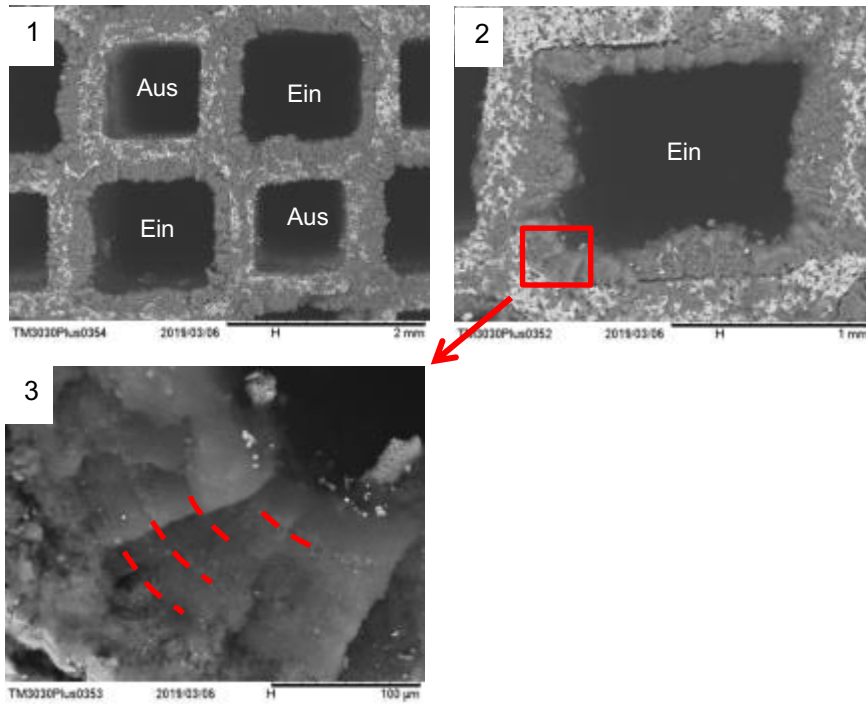
Probe 3

- Die Kanalwand zeigt stellenweise Mikrometer-grosse Risse und/oder Poren auf (#1, 2)
- Russ durchdringt in manchen Stellen die Wand (#3, 4) (durch vorhandene Risse ?)



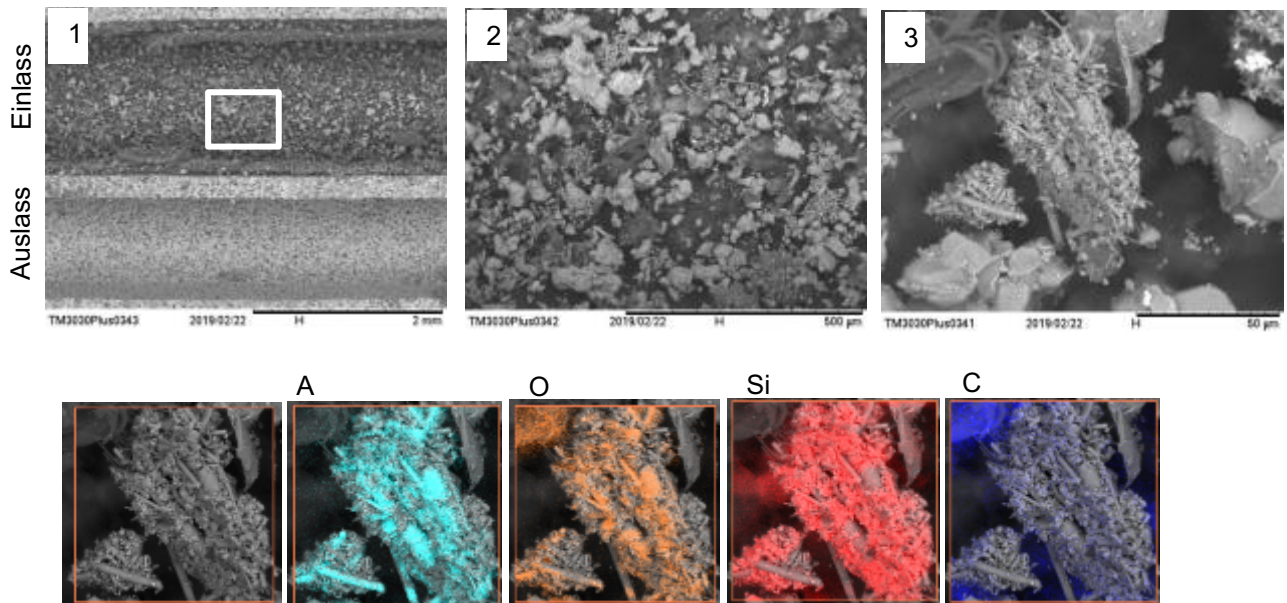
Probe 4

- Russablagerung in Einlasskanäle und auf der Rissfläche; keine Russablagerung in den Auslasskanälen (#1);
- Verschiedene 'Generationen' von Russablagerung (#2 Ecke unten links und Vergrößerung #3)



Probe 5

- Zahlreiche Aggregate aus SiC-Fragmenten, Nadeln und Russ in den Einlasskanälen (Beispiel #1-3 und Elemente-Kartierung untere Reihe); Auslasskanäle frei.



4. Schlussfolgerungen

- Ca. 20-40mm vom Ausgangsquerschnitt deutlicher Riss; schwarzer Partikelspur (Russ) entlang des Risses, deutlich auch auf der umgebenden Matte sichtbar; Russ-Entweichung durch den Riss (Ausgangstrichter sehr stark verrusst). Weitere Risse erkennbar, unregelmässig verteilt im ganzen DPF, manche entlang der Mitte der Auslasskanäle.
- Ungewöhnliche, mikrometer-grosse Risse und Poren in der Kanalwand (Schwachstellen), unter dem REM erkennbar.
- Asche am Ende von Einlasskanälen vorhanden; auch auf der Kanalwand und auf der Rissfläche der untersuchten Proben erkennbar.
- Verschiedene 'Generationen' (bis zu 6) von Russablagerung unter dem REM erkennbar, die auf Regenerationsphasen mit unvollständiger Russ Abbau hindeuten (der Riss könnte zu einer Reduktion des Druckverlustes führen und somit zu vorzeitig abgebrochene aktive Regenerationen; dann sollte der Riss seit mind. 6x aktive Regenerationen vorhanden sein).
- Nach der letzten Russ Ablagerungsphase ein Stressregime (dessen Richtung in dieser Untersuchung nicht definiert wurde) verursachte lokale Verlagerung der Russschicht und stellenweise lokale Ablösung von der Kanalwand.
- Keine Hinweise auf Schmelze erkennbar.
- Aufgrund der mikroskopischen Untersuchung wurden keine eindeutigen Zeichen, auf die die Rissentstehung zurückgeführt werden kann. Das Vorhandensein von ungewöhnlichen Schwachstellen in der Kanalwand (mikrometer-grosse Risse und Poren) in Kombination mit der unsymmetrischen Bauweise (Auslasskanäle kleiner als Einlasskanäle) kann bei Motorabstellen während aktiver Russ-Regeneration zu hoher thermischen Belastung der DPF Struktur führen. Dabei können die ersten Risse entstanden sein. Mit Rissen nimmt der Druckverlust über dem DPF ab. Dies führt zu vorzeitigem Abbrüchen von den folgenden aktiven Regenerationen.