



Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise

**Berner Fachhochschule
Technik und Informatik**
Automobiltechnik

Abgasprüfstelle und
Motorenlabor (AFHB)

Gwerdtstrasse 5
CH-2560 Nidau

T +41 32 321 66 80

www.afhb.bfh.ch
info.afhb@bfh.ch

Untersuchungen der Wirksamkeit des OBD-Systems eines GDI-Fahrzeuges mit OEM-GPF

Beauftragt durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Projekt: Untersuchungen der Wirksamkeit des OBD-Systems eines GDI-Fahrzeugs mit OEM-GPF

BAFU-Vertragsnummer: 19.0106.PJ / B9FEEC29D

Imprint

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt **BAFU**

Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien, CH 3003 Bern

Das BAFU ist eine Bundesstelle des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Auftragsnehmer:

Berner Fachhochschule (BFH-TI)

Labor für Verbrennungsmotoren und Abgastechnik (AFHB)

Gwerdtstrasse 5, CH 2560 Nidau

Authors:

P. Comte, Dipl Ing. HTL

Prof. D. Engelmann

M. Clénin

Ph. Wili

August – Oktober 2020

R007

*) Abkürzungen, siehe Ende des Berichtes

INHALTSVERZEICHNIS

1. ZUSAMMENFASSUNG	3
2. EINFÜHRUNG	3
2.1. Forschungsthema des vorliegenden Berichtes	3
3. TEST METHODE	3
3.1. Fahrzyklen	4
3.2. Rollenprüfstand	5
3.3. Abgasmessgeräte	5
4. VERSUCHSFAHRZEUG, TREIBSTOFF UND SCHMIERÖL	6
4.1. Versuchsfahrzeug	6
4.2. Treibstoff	7
4.3. Schmieröl	7
5. RESULTATE	7
5.1. Ergebnisse der Emissionen in WLTC-Zyklen.	7
5.2. Tabelle der Resultate der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauches von den WLTC-Zyklen im kalten Zustand.	8
5.3. Tabelle der Resultate der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauches von den WLTC-Zyklen im warmen Zustand.	9
5.4. Ergebnisse der Emissionen in SSC-Zyklen.	9
5.5. Tabelle der Resultate der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauches der SSC-Zyklen.	10
6. SCHLUSSFOLGERUNG	10
7. LITERATUR	11
8. ABBILDUNGEN	11
9. ANHANG	12
10. ABKÜRZUNGEN	12

1. ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich der Wirksamkeit des fahrzeugeigenen On-Board Diagnostics (OBD) Systems hinsichtlich der Erkennung von Schäden am OEM-Partikelfilter (GPF) eines benzinbetriebenen Personenwagens mit Direkteinspritzung zusammen.

Ein Seat Leon 2.0 FSI, der mit einem OEM-Partikelfilter ausgerüstet ist, wurde für alle Versuche verwendet. Als Messprogramm wurden die folgenden Prüfzyklen auf den Rollenprüfstand gefahren:

- Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) kalt (1x)
- Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) heiss (1x)
- Steady State Cycle (SSC) (1x)

Dieses Messprogramm wurde für den Ausgangszustand (Referenz) und für drei Manipulationen zur Simulation der Abweichungen vom Normalbetrieb des Partikelfilters durchgeführt. Die gesetzlich vorgeschriebenen Komponenten der Abgasemissionen wurden jeweils gemessen.

Als erste Beschädigung wurden drei Verschlussstopfen der GPF-Kanäle weggenommen. Dies brachte keine Änderung der gemessenen Partikelanzahl (PN) Emissionen. Für den zweiten Schaden wurden 50 Verschlussstopfen entfernt. Dies verursachte wieder keine signifikante Verschlechterung der PN-Emissionen. Deshalb wurde nur ein WLTC-Zyklus im kalten Zustand gefahren. Als Letzte wurde das Substrat des GPF komplett entfernt. Dies erzeugte im Durchschnitt über die drei Zyklen 16,7 Mal mehr PN-Emissionen, während die anderen gemessenen Abgaskomponente mit denen in der Referenzversion identisch blieben.

Die gesetzlichen Abgasgrenzwerte wurden im Originalzustand sowie auch mit den defekten GPF erfüllt. Die sogenannte Motorkontrollleuchte (MIL = „Malfunction Indicator Light“) wurde nicht aktiviert. Trotzdem wurde ein sporadischer Fehler mit der Fehlercode P226D im Motorsteuergerät gespeichert.

2. EINFÜHRUNG

Seit Einführung der Abgasnorm Euro 6c für alle Fahrzeugtypen im September 2018 bzw. nach Ablauf der dreijährigen Übergangsfrist für die erhöhten Grenzwerte für Partikelanzahlemissionen bei der Typgenehmigung, sind die meisten der neu zugelassenen Fahrzeuge mit direkt eingespritztem Benzinmotor serienmässig mit einem Partikelfilter ausgerüstet. In diesem Zusammenhang ist von Interesse, wie das fahrzeugeigene OBD-System auf Abweichungen vom Normalbetrieb des Partikelfilters reagiert. Solche Abweichungen können durch mangelnde oder abweichende Sensorsignale, insbesondere aber auch durch einen beschädigten Partikelfilter auftreten.

2.1. Forschungsthema des vorliegenden Berichtes

Die oben erwähnten Abweichungen an einem benzinbetriebenen Fahrzeug mit Direkteinspritzung des neuesten Technologiestands mit OEM-Partikelfilter sollen simuliert werden und deren Einflüsse auf die Emissionen bei verschiedenen Betriebsbedingungen untersucht werden.

3. TEST METHODE

Alle Messungen wurden zwischen den 26.08.20 und den 01.09.20 durchgeführt.

Als Fahrzeugkonditionierung wurde ein WLTC-Zyklus vor dem Start der Referenzmessung durchgeführt. Zwischen den einzelnen Prüfzyklen wurde der Motor während der Analyse der Abgasemissionen abgeschaltet. Vor Beginn jedem neuen warmen Zyklus wurde das Fahrzeug 3 Minuten lang bei einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h mit dem Schalthebel auf Position «D» gefahren.

Am Ende der drei Zyklen im Referenzzustand wurde das Auto auf die Hebebühne angebracht und der Partikelfilter vom Auspuffstrang getrennt. Am Partikelfiltereingang und an seinem Rohr-Gegenstück wurden je ein Flansch angeschweisst, welche Mittels einer V-Band Schelle verbunden wurden. Da der Partikelfilterausgang bereits an der Abgasanlage mit einer Auspuffrohrschelle verbunden ist, erlaubte die angebrachte Modifikation

des Partikelfiltereingangs eine schnelle Montage und Demontage des GPF, um die verschiedenen Beschädigungen vornehmen zu können.

Die folgenden Versuche wurden ausgeführt:

1. Messung der Abgasemissionen und des Kraftstoffverbrauchs während 2 WLTC-Fahrzyklen (mit kaltem und warmem Start) und beim SSC-Zyklus mit dem Fahrzeug im Referenzzustand. Das SSC-Fahrprofil ist ein Stationär-Zyklus mit 5 Stufen (95, 61, 45, 26 km/h und Leerlauf) von je 20 Minuten, während welchem die Partikelgrößenverteilung gemessen wurde.
2. Gleiches Messprogramm wie in Punkt 1, mit der ersten Beschädigung des GPF, welche aus dem Wegnehmen von drei Verschlussstopfen der Kanäle des GPF besteht.
3. Zweite Beschädigung des GPF, welche aus dem Wegnehmen von fünfzig Verschlussstopfen der Kanäle des GPF besteht und Messung der Abgasemissionen und des Kraftstoffverbrauchs während dem WLTC-Fahrzyklus im kalten Motorzustand. Da dies bei den PN-Emissionen gegenüber der Referenz keine signifikante Änderung verursachte, wurde nur dieser Versuch ausgeführt.
4. Gleiches Messprogramm wie in Punkt 1, mit der kompletten Entfernung des GPF.

3.1. Fahrzyklen

Die Abbildung 1 stellt den WLTC Fahrzyklus dar und die Abbildung 2 den SSC-Zyklus (Zyklus mit konstanten Geschwindigkeiten).

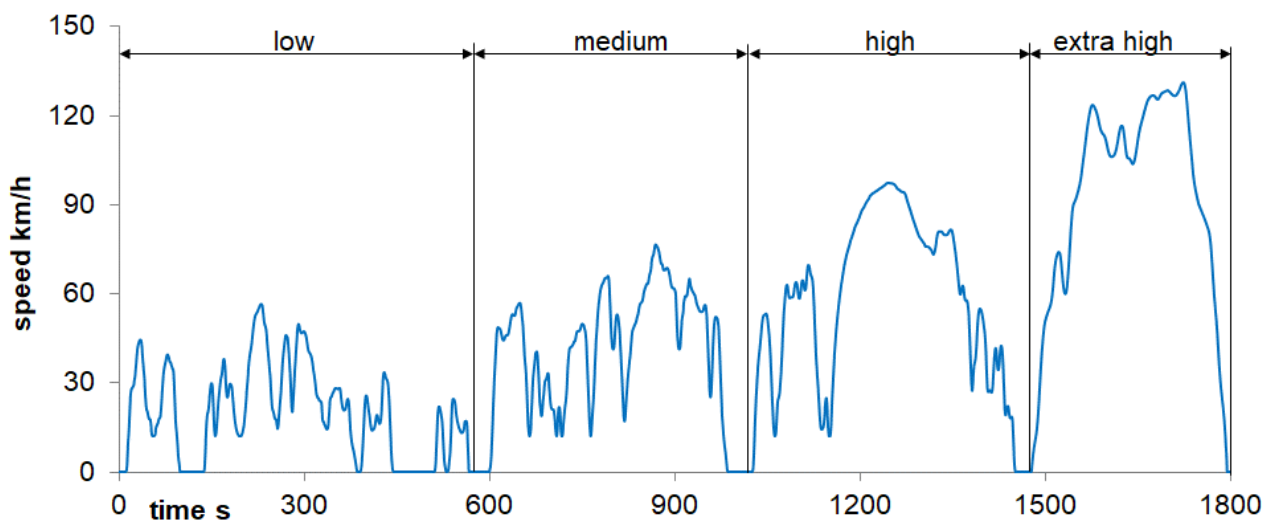


Abbildung 1: WLTC Fahrzyklus

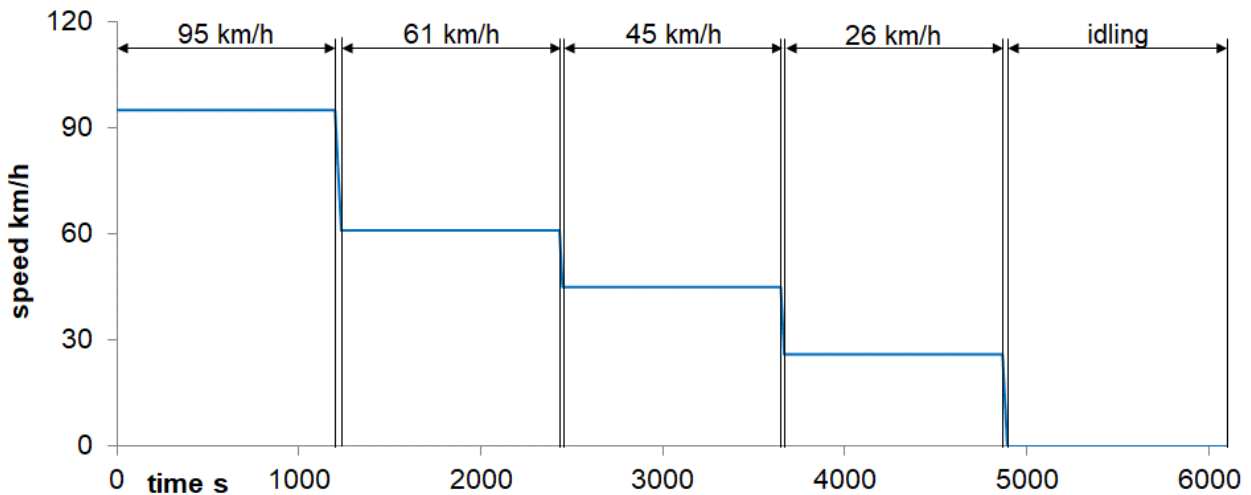
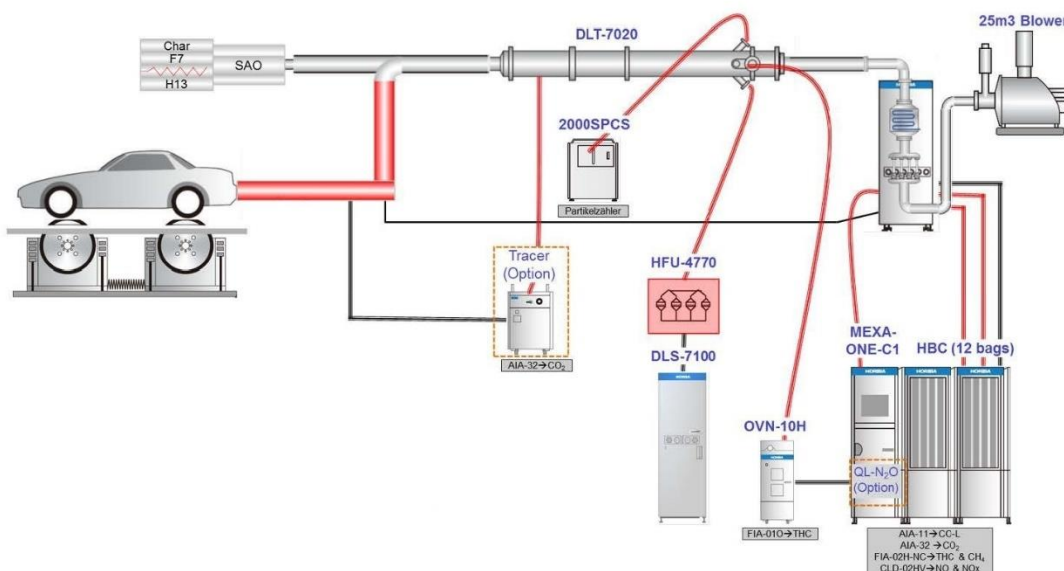


Abbildung 2: SSC Fahrzyklus

3.2. Rollenprüfstand

- Typ: Schenck 500 GS60
- Durchmesser der Rolle: 502 mm
- Fahrleitsystem: Tornado, Version 3.3
- CVS Verdünnungssystem: Horiba Mexa One mit Venturi-Rohre mit kritischer Strömung (CFV)
- Umgebungsbedingungen: Kontrolle von der Ansaugs- und Verdünnungsluft
 Temperatur: 20 - 30°C
 Feuchte: 5.5 - 12.2 g/kg

3.3. Abgasmessgeräte



Quelle: HORIBA

Abbildung 3: Abgasmessgeräte

Die vom Fahrzeug ausgestossenen Abgasemissionen werden, vor der Messung durch die Abgasanalytoren, im HORIBA CVS-ONE-System (CVS-System) verdünnt. Diese erfüllen die technischen Anforderungen der UN-ECE-Regelung Nr. 83 und eignen sich für die Messung von Fahrzeugabgasemissionen in der Schweiz und in der Europäischen Union.

- Flüchtige Abgaskomponenten wurden mit dem HORIBA MEXA ONE System gemessen:

CO, CO ₂ ...	NDIR-Analyzer
THC...	FID-Analyzer für die Totale der Kohlenwasserstoffe
CH ₄ ...	FID-Analyzer für Methan (CH ₄)
NO/NO _x ...	CLA-Analyzer

- Die Partikelemissionen wurden mit den Systemen HORIBA DLS-ONE (PM) und HORIBA MEXA-2100SPCS (PN) gemessen:

Partikelmasse (PM)...	Material des Filters:	PALLFLEX TX 40 HI 20-WW
	Temperatur des Filters:	über 20°C und unter 52 °C
	Wägungskammer:	Temperatur 22°C ± 1°C
		Relative Feuchte 45% ± 8%
	Konditionierung:	1 bis 8 h (22°C, relative Feuchte 45%)
	Waage:	Mettler Toledo XP2U
		Genauigkeit ± 1 µg

Partikelanzahl (PN)... Kondensationspartikel-Zähler (CPC)

- Die Partikelgrößenverteilung wurde mit dem SMPS-System 3936 von TSI gemessen. Das SMPS-System besteht aus dem elektrostatischen Klassifizier 3080, dem DMA 3081 und dem CPC 3772.

4. Versuchsfahrzeug, Treibstoff und Schmieröl

4.1. Versuchsfahrzeug

Die wichtigsten technischen Parameter des Versuchsfahrzeugs sind in der nachstehenden Tabelle aufgeführt. Das Fahrzeug ist mit einem turboaufgeladenen Ottomotor mit Direkteinspritzung angetrieben. Sein Abgasnachbehandlungssystem besteht aus einem Dreiwegekatalysator und einem GPF.



Abbildung 4: Versuchsfahrzeug Seat Leon am Rollenprüfstand.

Marke und Modell des Fahrzeuges	Seat Leon 2.0 TSI	
Motortyp	DKZA	
Anzahl Zylinder und Anordnung	4 / Reihe	
Bohrung / Hub	82.5 / 92.8	mm
Hubraum	1984	cm ³
Verdichtungsverhältnis ε	11.65:1	
Maximale Leistung	140	kW
Drehzahl der maximalen Leistung	6000	min ⁻¹
Maximales Drehmoment	320	Nm
Drehzahl des maximalen Drehmoments	1500	min ⁻¹
Treibstoff	Benzin	
Einspritzsystem	DI	
Leergewicht	1404	kg
Gesamtgewicht	1870	kg
Getriebe	m7a	
Reifen	225/45 ZR 17	
Antriebsachse	Front	
Erste Zulassung / Kilometerstand	13.06.2019 / 27300 km	
Erfüllte Abgasnorm	EURO 6d	
Abgasnachbehandlungssysteme	TWC, GPF	
VIN	VSSZZZ5FZKR084430	

Tabelle 1: technische Daten des Prüffahrzeuges

4.2. Treibstoff

Ein handelsüblicher Treibstoff wurde für die Versuche verwendet. Er entspricht der Schweizer Marktqualität (SN EN 228).

4.3. Schmieröl

Alle Messreihen wurden mit dem Original-Motoröl vorgenommen.

5. RESULTATE

Die Ergebnisse sind in den beigefügten Abbildungen grafisch dargestellt.

Auflistung der Abbildungen: siehe Kapitel 8, Abbildungen 1 bis 14.

5.1. Ergebnisse der Emissionen in WLTC-Zyklen.

Die kontinuierlich verdünnten gemessenen Abgasemissionen sind in den Abbildungen 5-1, 5-2, 6-1, 6-2, 7, 8-1 und 8-2 dargestellt. Die gasförmigen Emissionen (insbesondere CO & HC) sind aufgrund des kalten Katalysators bei dem Kaltstart des Motors am höchsten. Nach dem Warmstart weisen die stark reduzierten Abgasemissionen auf die Effizienz des 3-Wege-Katalysators hin. Nach etwa 19 Minuten kann ein NO_x-Peak bei der Beschleunigung beobachtet werden, welcher bei jedem WLTC-Zyklus sich wiederholt, sei es mit einem kalten oder warmen Start. Dies scheint ein Problem der Lambda-Regelung zu sein. Die durchgeführten Tests ohne GPF zeigen eine Partikelanzahlerhöhung von Minimum einer Grössenordnung gegenüber diejenigen mit GPF.

Die Abbildungen 9, 10, 12 und 13 zeigen die Abgasmassen und die Treibstoffverbräuche von den separaten WLTC-Phasen und vom ganzen Zyklus.

Zusätzlich zu den obigen Erkenntnissen zeigen die Abbildungen 9-1 und 10-1, dass die gasförmigen Schadstoffe, die CO₂-Emissionen und die Kraftstoffverbräuche weder durch Filterschädigung noch durch Filter-

ausbau beeinflusst werden. Die dargestellten Schwankungen der gasförmigen Emissionen, welche bei allen Zyklus-Phasen erkennbar sind, sind der natürlichen Mess- und Emissionsstreuungen des Fahrzeugs zuzuschreiben.

Die Abbildungen 9-2 und 10-2 stellen die Ergebnisse der PN-Emissionen sowie den Abscheidegrad des GPF in jeder Phase des WLTC-Zyklus und im ganzen Zyklus dar. Der Abscheidegrad erreicht mehr als 90% im ganzen WLTC-Zyklus, im kalten oder im warmen Zustand. Die maximale Effizienz des GPF beträgt 96.9 % in der Höchstwertphase (extra high Phase) des Warmstart-Zyklus. Es ist zu bemerken, dass der EURO 6d Grenzwert von $6.0 \cdot 10^{11}$ Partikelanzahl per km in keinem Fall (d.h. auch ohne GPF) überschritten wurde.

Die Abbildungen 12 und 13 stellen die kumulierten gasförmigen- und die Partikelanzahl-Emissionen dar. Der Vorteil dieser Darstellungen besteht darin, dass bei einem Vergleich mehrerer Varianten im gleichen Diagramm feststellen werden kann, zu welchem Zeitpunkt im Prüfzyklus hohe Emissionen ausgestossen werden. Bei der Abbildungen 12 ist es ersichtlich, dass die Kaltstartemissionen eine grosse Bedeutung auf das Endresultate haben. Z.B., nach einer Minute wurden mit allen gefahrenen Varianten mehr als 44% der CO-Emissionen ausgestossen. Mehr als 86% der Kohlenwasserstoffen-Emissionen wurden sogar nach einer Minute produziert. Schon nach 2.5 Minuten wurden 50% der gesamten Partikelanzahlemissionen ohne den GPF ausgestossen. Die Tabelle 2 fasst die Resultate der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauches von den WLTC-Zyklen im kalten Zustand zusammen und die Tabelle 3 diejenigen im warmen Zustand.

5.2. Tabelle der Resultate der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauches von den WLTC-Zyklen im kalten Zustand.

WLTC kalt	CO mg/km	CO2 g/km	HC mg/km	NMHC mg/km	NOx mg/km	PN #/km	Treibstoffverbrauch (berechnet) l/100km
Original							
Niedrigphase	1048.3	238.8	177.7	160.3	39.7	4.67E+10	10.4
Mittelphase	188.2	151.1	2.6	1.6	11.1	8.79E+09	6.5
Hochphase	197.0	122.9	1.1	0.9	12.2	1.33E+10	5.3
Höchstwertphase	104.9	128.9	0.8	0.8	1.4	1.71E+10	5.5
WLTC	274.6	146.1	24.5	22.0	11.8	1.81E+10	6.3
1. Schädigung							
Niedrigphase	1273.1	239.0	199.6	181.8	47.3	7.58E+10	10.4
Mittelphase	141.2	148.6	3.0	2.5	12.3	1.15E+10	6.4
Hochphase	204.5	121.4	1.8	1.5	19.5	7.12E+09	5.2
Höchstwertphase	92.0	127.6	1.3	1.4	1.7	8.36E+09	5.5
WLTC	293.4	144.8	28.1	25.6	15.4	1.76E+10	6.2
2. Schädigung							
Niedrigphase	996.5	236.9	176.3	159.5	43.7	7.67E+10	10.3
Mittelphase	149.3	147.6	2.1	1.4	25.3	1.60E+10	6.4
Hochphase	229.1	122.6	1.0	0.8	21.7	1.52E+10	5.3
Höchstwertphase	79.0	129.1	0.9	0.9	2.4	1.30E+10	5.6
WLTC	261.9	145.3	24.6	22.1	18.5	2.27E+10	6.3
Ohne GPF							
Niedrigphase	1140.9	232.1	143.5	130.1	32.8	1.14E+12	10.1
Mittelphase	264.5	150.8	1.8	0.8	13.9	2.61E+11	6.5
Hochphase	218.8	123.2	0.6	0.5	14.9	1.34E+11	5.3
Höchstwertphase	105.0	129.9	0.7	0.6	1.7	8.87E+10	5.6
WLTC	309.0	145.6	19.7	17.7	12.3	2.76E+11	6.3

Tabelle 2: Resultate der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauches von den WLTC-Zyklen im kalten Zustand.

5.3. Tabelle der Resultate der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauches von den WLTC-Zyklen im warmen Zustand.

WLTC warm	CO mg/km	CO ₂ g/km	HC mg/km	NMHC mg/km	NO _x mg/km	PN #/km	Treibstoffverbrauch (berechnet) l/100km
Original							
Niedrigphase	62.9	205.0	7.7	5.8	4.7	3.33E+09	8.8
Mittelphase	176.1	146.4	1.3	0.9	12.2	9.14E+09	6.3
Hochphase	156.5	120.4	0.7	0.6	13.4	4.58E+09	5.2
Höchstwertphase	76.0	126.9	0.4	0.5	1.7	6.31E+09	5.5
WLTC	119.6	139.2	1.7	1.3	7.9	5.96E+09	6.0
1. Schädigung							
Niedrigphase	42.6	202.6	9.5	7.7	5.2	2.55E+09	8.7
Mittelphase	194.9	145.4	2.0	1.4	52.9	2.68E+09	6.3
Hochphase	57.5	119.6	0.9	0.9	3.2	4.38E+09	5.1
Höchstwertphase	68.1	128.4	0.7	0.8	1.5	7.33E+09	5.5
WLTC	87.4	139.0	2.2	1.9	13.0	4.84E+09	6.0
Ohne GPF							
Niedrigphase	52.0	204.0	6.2	4.8	10.3	3.12E+10	8.8
Mittelphase	163.7	146.1	1.1	0.7	11.3	1.70E+11	6.3
Hochphase	166.6	121.8	0.6	0.4	12.8	5.08E+10	5.2
Höchstwertphase	102.0	131.3	0.4	0.5	3.9	2.06E+11	5.6
WLTC	127.8	141.1	1.4	1.1	9.0	1.28E+11	6.1

Tabelle 3: Resultate der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauches von den WLTC-Zyklen im warmen Zustand.

5.4. Ergebnisse der Emissionen in SSC-Zyklen.

Die kontinuierlich verdünnten gemessenen Abgasemissionen sind in den Abbildungen 5-3, 6-3 und 8-3 dargestellt. Zu erkennen ist der allgemein niedrige Wert der gasförmigen Schadstoffe und der Partikelanzahl Emissionen bei diesen konstanten Geschwindigkeiten.

Die Abbildungen 5-4, 6-4 und 8-4 zeigen die Partikelgrößenverteilung. Es wurden 4 Scans bei jeder konstanten Geschwindigkeit aufgenommen. Jede 5 Minuten wurde ein neuer Scan gestartet.

Die Abbildungen 5-5, 6-5 und 8-5 stellen die Mittelwerte und die Integralwerte der 4 Scans der verschiedenen Konstanten und des Leerlaufs dar. Ohne GPF, ausser bei der Stufe 61 km/h, bei der das Fahrzeug am Schluss dieses Betriebspunktes mehr Partikelemissionen produzierte (siehe auch die Abbildung 8-3, CPC-Diagramm), was den Mittelwert deutlich erhöhte, blieben die Konzentrationen der PN-Emissionen tief. Dies ist dem gut homogenisiert Luft-Kraftstoff Gemisch im Zylinder bei stationärer Betriebspunkte zuzuschreiben.

Die Balken Diagramme der Abbildung 11-1 stellen die berechneten Abgasmassen und die Treibstoffverbräuche bei den konstanten Geschwindigkeiten dar. Wie es bei den WLTC-Zyklen festgestellt wurde, sind die kleinen Schwankungen der Schadstoffe, welche bei allen Stufen erkennbar sind, der natürlichen Mess- und Emissionsstreuungen des Fahrzeugs zuzuschreiben. Die CO₂-Emissionen und die Treibstoffverbräuche bleiben unverändert. Dies bestätigt die Aussage des Kapitels 5.1, dass die CO₂-Emissionen, die gasförmigen Schadstoffe und die Kraftstoffverbräuche weder durch Filterschädigung noch durch Filterausbau beeinflusst werden.

Die Balken Diagramme der Abbildung 11-2 stellen die kumulierten SMPS-Konzentrationen und die, mittels CPC gemessen, kumulierten Partikelanzahlemissionen von den drei getesteten GPF-Zuständen bei den konstanten Betriebspunkten dar. Diese Darstellungen zeigen, dass die PN-Emissionen ohne GPF bei allen Stufen den grössten Anteil des Balkens aufweisen, was auch zu erwarten ist. Bei 95 km/h, 61 km/h und 26 km/h gibt es eine gute Korrelation zwischen den Verteilungen (Referenz, erste Schädigung und ohne GPF) der gemessenen PN-Emissionen, welche durch zwei verschiedene Messgeräte bestimmt wurden. Dies ist weniger der Fall bei 45 km/h und im Leerlauf. Die Erklärungen dazu sind, dass die gemessenen PN-Konzentrationen sehr klein sind, in einem Messbereich der Geräte, bei dem die Genauigkeit geringer ist.

Die Abbildung 14 zeigt die kumulierten Emissionen während der SSC-Zyklen.

Die rasche Erhöhung der NO_x-Emissionen im Originalzustand bei 95 km/h ist zu der Lambda-Regelung zuzuschreiben. Die Abbildung 5.3 zeigt bei dieser Stufe zwei Peak von Maximum 4 ppm in den verdünnten Abgasemissionen. Dies erklärt den Unterschied mit den zwei anderen NO_x-Kurven der Abbildung 14. Das NO_x-Niveau bleibt beim SSC-Zyklus sehr tief.

Die meisten PN-Emissionen wurden bei 95 und 61 km/h ausgestossen. Dies ist auch ersichtlich auf dem CPC-Diagramm der Abbildung 8.3.

Die Tabelle 4 fasst die Resultate der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauches der SSC-Zyklen zusammen.

5.5. Tabelle der Resultate der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauches der SSC-Zyklen.

SSC	CO mg/km	CO ₂ g/km	HC mg/km	NMHC mg/km	NO _x mg/km	PN (CPC) #/km	Treibstoffverbrauch (berechnet) l/100km
Original							
95 km/h	20.2	96.0	0.9	1.0	0.7	9.16E+07	4.1
61 km/h	17.5	76.4	1.6	0.6	0.0	3.90E+08	3.3
45 km/h	10.8	80.7	3.4	1.3	0.0	6.52E+07	3.5
26 km/h	24.8	115.6	7.0	2.8	0.0	1.04E+08	5.0
idling*	6.7	31.8	2.8	1.7	0.0	4.15E+07	1.4
1. Schädigung							
95 km/h	22.7	97.4	1.5	1.7	0.1	1.09E+08	4.2
61 km/h	15.6	76.2	2.2	1.0	0.1	3.33E+08	3.3
45 km/h	9.6	80.0	3.6	1.6	0.2	1.36E+08	3.4
26 km/h	21.5	114.5	7.3	2.9	0.0	1.72E+08	4.9
idling*	6.0	31.3	1.5	0.9	0.0	8.74E+07	1.3
Ohne GPF							
95 km/h	25.6	98.5	0.6	0.7	0.1	1.78E+09	4.2
61 km/h	20.1	76.7	2.2	0.7	0.1	2.07E+09	3.3
45 km/h	11.8	80.2	3.7	1.3	0.2	2.47E+08	3.4
26 km/h	24.5	115.8	8.8	3.1	0.5	5.68E+08	5.0
idling*	6.1	31.8	2.5	1.2	0.0	1.18E+08	1.4

*...: Emissionen in mg/min oder g/min oder #/min; Treibstoffverbrauch in l/100min.

Tabelle 4: Resultate der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauches der SSC-Zyklen.

6. SCHLUSSFOLGERUNG

- Im Allgemeinen weist das gemessene Fahrzeug sehr tiefe Emissionen auf.
- Die gesetzlichen Abgasgrenzwerte, welche für dieses Fahrzeug vorgeschrieben sind, wurden in alle 4 Zustände (Original, erste und zweite Schädigung und ohne GPF) erfüllt.
- Die sogenannte Motorkontrollleuchte (MIL = „Malfunction Indicator Light“) wurde nicht aktiviert. Ohne GPF wurden 177 km auf dem Rollenprüfstand gefahren. Das Motorsteuergerät (ECU) wurde bei einer AMAG-Vertretung mit dem Diagnosegerät der Marke gelesen. Ein sporadischer Fehler mit der Fehlercode P226D wurde 9 km nach dem Beginn des ersten Zyklus ohne GPF im ECU gespeichert. Gemäss Herstellerangaben entspricht die Beschreibung der Fehlercode P226D dem verursachten Fehler.
- Da das Motorsteuergerät die Fehlfunktion erkannt hat aber sie noch nicht dem Fahrer mittels der MIL-Lampe angezeigt, stellt sich die Frage nach wie viele Kilometer dies der Fall wäre.
- Die Verordnung 2018/1832 [1], Anhang XI (On-Board Diagnosesysteme für Kraftfahrzeuge), schreibt vor, dass die Hersteller der Typpgenehmigungsbehörde nachweisen können, dass bestimmte Bauteile oder Systeme nicht überwacht zu werden brauchen, wenn bei einem Totalausfall oder bei Entfernung die Emissionen die OBD-Schwellenwerte nicht überschreiten.

Jedoch ist, unter anderem, der Partikelfilter, der als selbständige Einheit oder als Bestandteil einer kombinierten emissionsmindernden Einrichtung an einen Selbstzündungsmotor angeschlossen ist, auf

Totalausfall oder Entfernung zu überprüfen (wenn deren Entfernung die Überschreitung der jeweiligen Emissionsgrenzwerte für die Typgenehmigung zur Folge hätte).

- Die Verordnung schreibt für die Partikelfilter für Fremdzündungsmotoren mit Direkteinspritzung nicht explizites vor.
- Es gibt keine OBD-Schwellenwerte für die PN-Emissionen, nur für die PM-Emissionen.

7. LITERATUR

- [1] *Amtsblatt der Europäischen Union.*: Verordnung (EU) 2018/1832 der Kommission vom 05 November 2018.

8. ABBILDUNGEN

- Abbildung 1 WLTC Fahrzyklus
- Abbildung 2 SSC Fahrzyklus
- Abbildung 3 Abgasmessgeräte
- Abbildung 4 Versuchsfahrzeug Seat Leon am Rollenprüfstand
- Abbildung 5-1 Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, cold, original condition.
- Abbildung 5-2 Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, warm, original condition.
- Abbildung 5-3 Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle SSC, original condition.
- Abbildung 5-4 Particles size distributions (PSD) during the driving cycle SSC, original condition.
- Abbildung 5-5 Particles size distributions (PSD) and integrated counts during the driving cycle SSC, original condition.
- Abbildung 6-1 Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, cold, 1st deterioration.
- Abbildung 6-2 Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, warm, 1st deterioration.
- Abbildung 6-3 Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle SSC, 1st deterioration.
- Abbildung 6-4 Particles size distributions (PSD) during the driving cycle SSC, 1st deterioration.
- Abbildung 6-5 Particles size distributions (PSD) and integrated counts during the driving cycle SSC, 1st deterioration.
- Abbildung 7 Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, cold, 2nd deterioration
- Abbildung 8-1 Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, cold, w/o GPF.
- Abbildung 8-2 Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, warm, w/o GPF.
- Abbildung 8-3 Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle SSC, w/o GPF.
- Abbildung 8-4 Particles size distributions (PSD) during the driving cycle SSC, w/o GPF.
- Abbildung 8-5 Particles size distributions (PSD) and integrated counts during the driving cycle SSC, w/o GPF.
- Abbildung 9-1 Exhaust emissions and fuel consumption during the WLTC driving cycle, cold.
- Abbildung 9-2 PN emissions during the WLTC driving cycle, cold.

- Abbildung 10-1 Exhaust emissions and fuel consumption during the WLTC driving cycle, warm.
- Abbildung 10-2 PN emissions during the WLTC driving cycle, warm.
- Abbildung 11-1 Exhaust emissions and fuel consumption during the SSC driving cycle.
- Abbildung 11-2 Integral values of the Particle Size Distributions (PSD's) and PN emissions during the SSC driving cycle.
- Abbildung 12 Accumulated exhaust gas emissions and particle number during the driving cycle WLTC cold.
- Abbildung 13 Accumulated exhaust gas emissions and particle number during the driving cycle WLTC warm.
- Abbildung 14 Accumulated exhaust gas emissions and particle number during the driving cycle SSC.

9. ANHANG

- Anhang 1 Particle Size Analysis

10. ABKÜRZUNGEN

AFHB	Abgasprüfstelle und Motorenlabor, FH Biel
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFH-TI	Berner Fachhochschule -Technik und Informatik
CO	Kohlenmonoxid
CFV	Critical Flow Venturi – Venturi-Rohr mit kritischer Strömung
CLA	Chemiluminescence Analyzer – Chemolumineszenz Messgerät
CPC	Condensation Particle Counter – Kondensationspartikelzähler
CVS	Constant Volume Sampling
DMA	Differential Mobility Analyser – Differentieller Mobilitätsanalysator
DI	Direct Injection
ECU	Engine Control Unit - Motorsteuergerät
EN	European Standard
EU	Europäische Union
FID	Flame Ionisation Detector - Flammenionisationsdetektor
HC	Kohlenwasserstoffe
NDIR	Non Dispersive Infrared
GDI	Gasoline Direct Injection – Benzin-Direkteinspritzung
GPF	Gasoline Particle Filter – Benzin Partikelfilter
HTL	Höhere Technische Lehranstalt
MIL	Malfunction Indicator Light – Motorkontrollleuchte
NDIR	Nondispersive Infrared – Nichtdispersiver Infrarotsensor
OBD	On-Board-Diagnose
OEM	Original Equipment Manufacturer – Originalhersteller
OK	Otto Kraftstoff
PM	Partikelmasse
PN	Particle Number - Partikelanzahl
SN	Schweizer Norm
SSC	Steady State Cycle – Stationärzyklus
UN-ECE	United Nations Economic Commission for Europe
UVEK	Eidgenössischer Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
WLTC	Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycle



Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise

**Berner Fachhochschule
Technik und Informatik**
Automobiltechnik

Abgasprüfstelle und
Motorenlabor (AFHB)

Gwerdtstrasse 5
CH-2560 Nidau

T +41 32 321 66 80

www.afhb.bfh.ch
info.afhb@bfh.ch

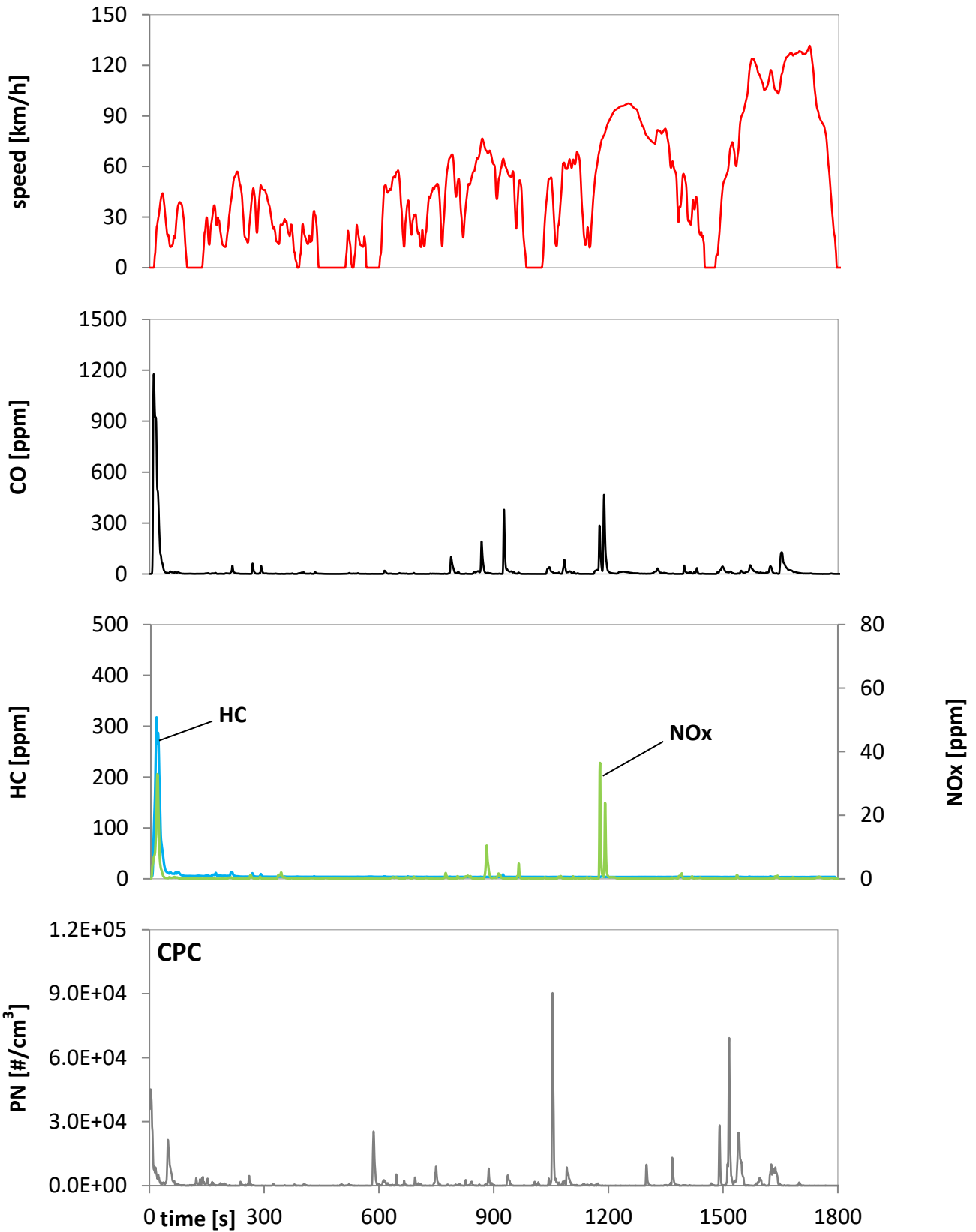
Untersuchungen der Wirksamkeit des OBD-Systems eines GDI- Fahrzeuges mit OEM-GPF

Abbildungen

Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, cold.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC and OEM GPF; fuel: OK(E5)

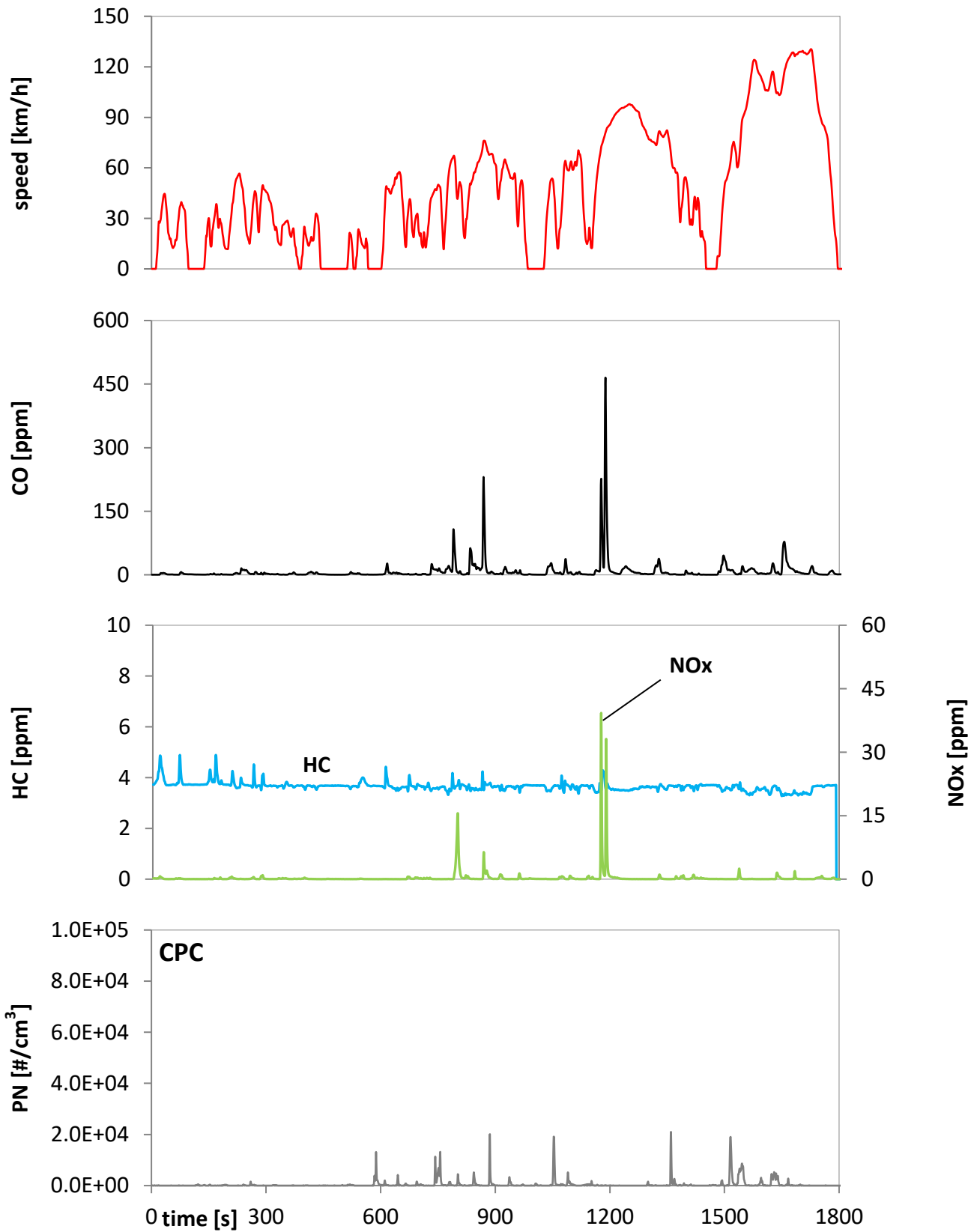
26.08.2020



Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, warm.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC and OEM GPF; fuel: OK(E5)

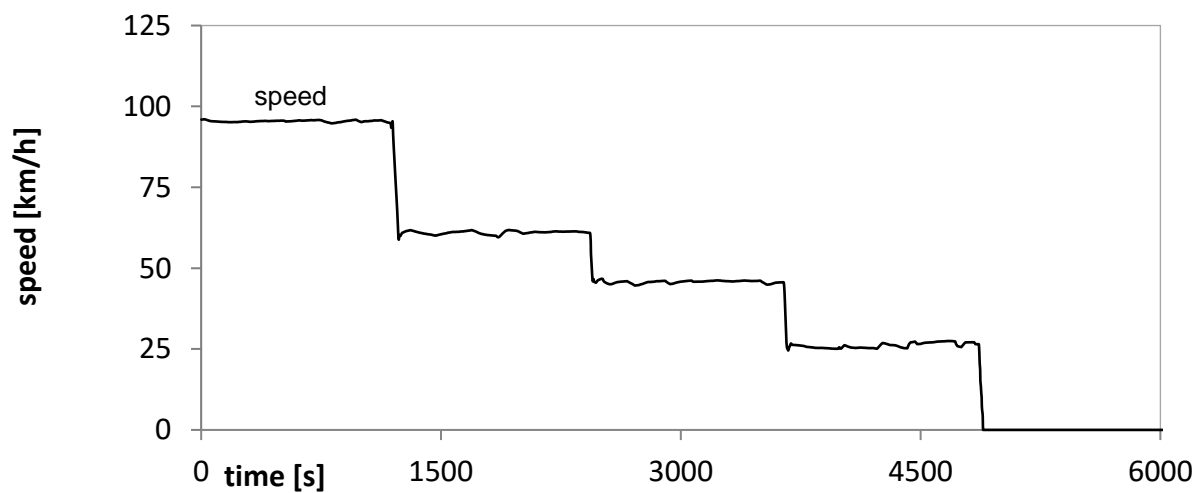
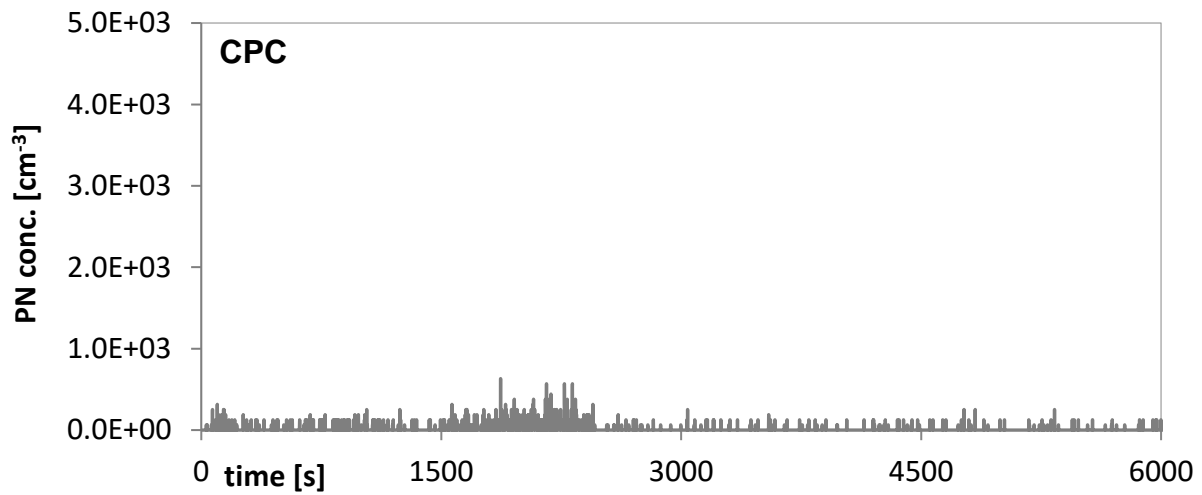
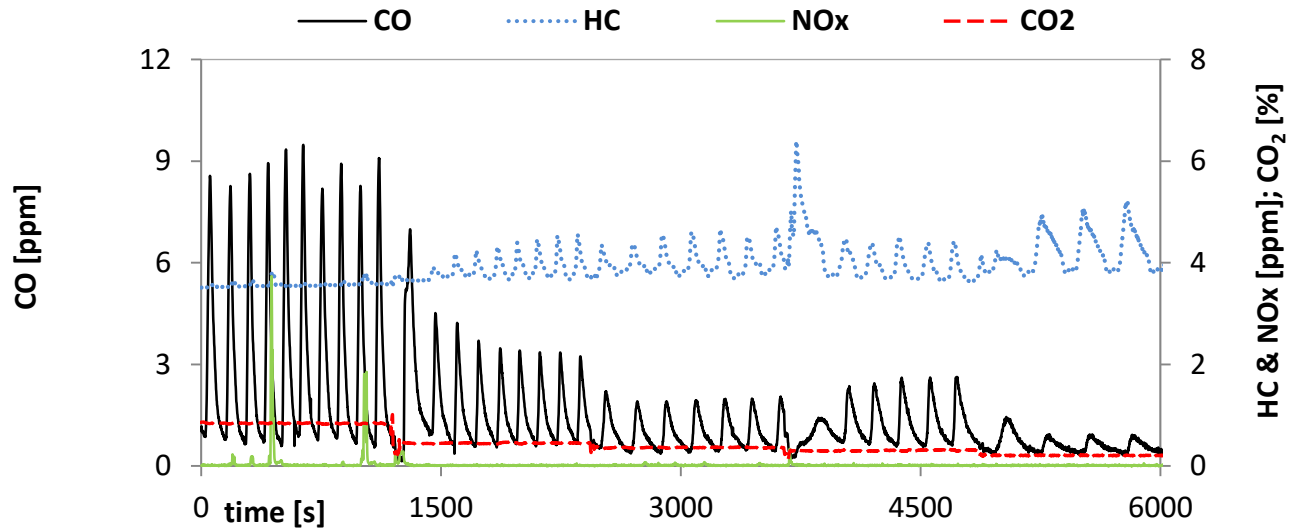
26.08.2020



Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle SSC.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC and OEM GPF; fuel: OK(E5)

26.08.2020

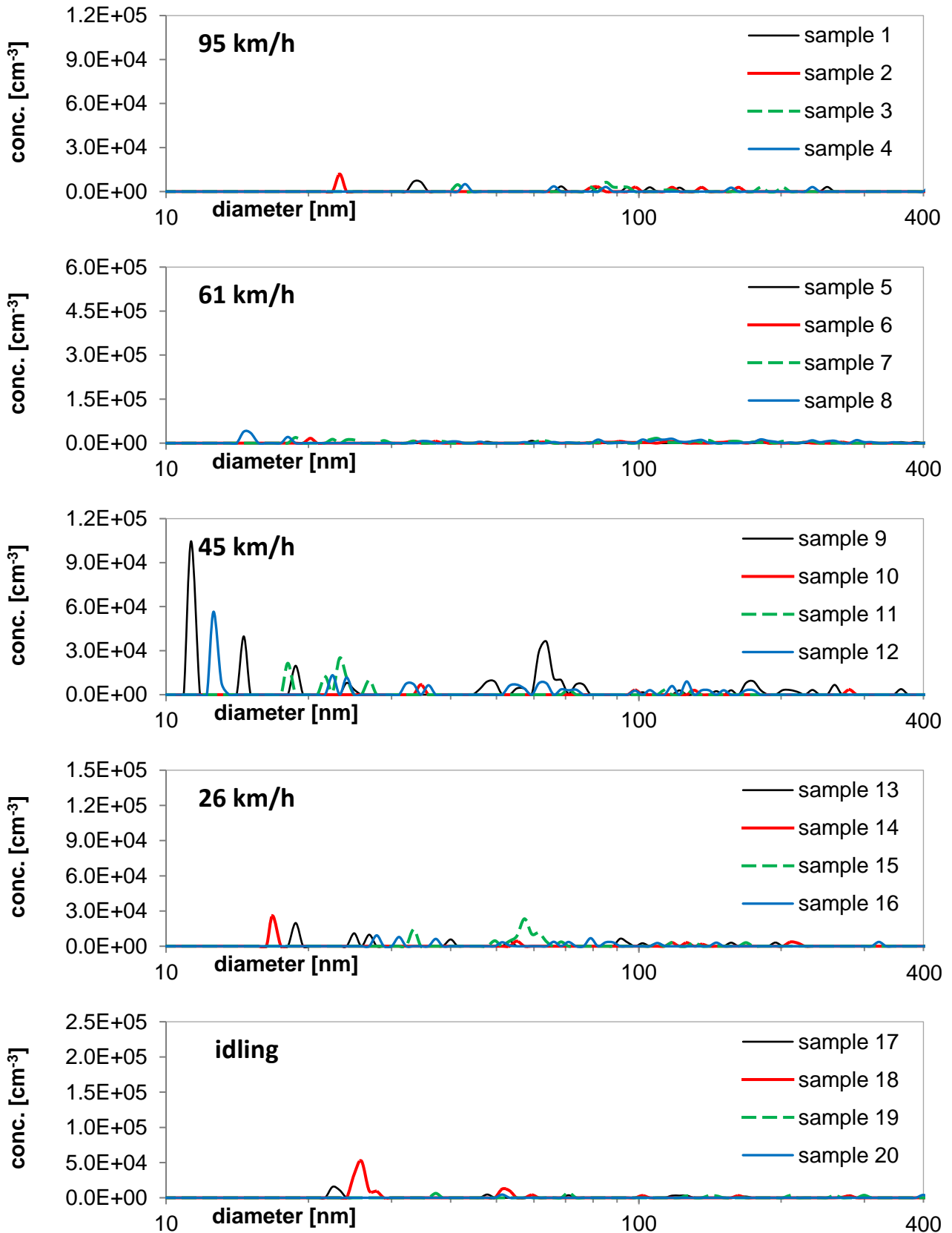


Particles size distributions (PSD) during the driving cycle SSC.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC and OEM GPF; fuel: OK(E5)

26.08.2020

SMPS

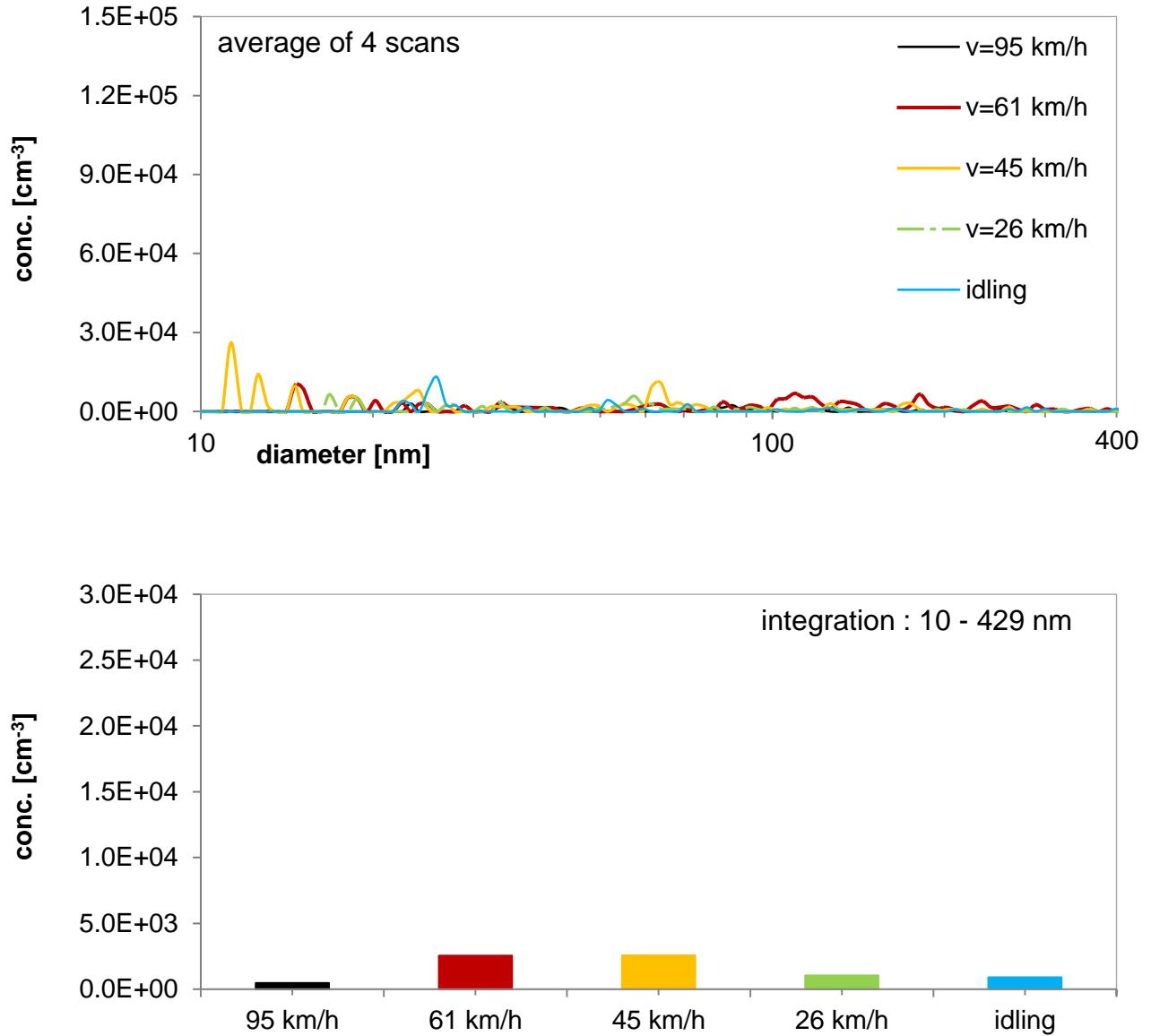


Particles size distributions (PSD) and integrated particle counts during the driving cycle SSC.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC and OEM GPF; fuel: OK(E5)

26.08.2020

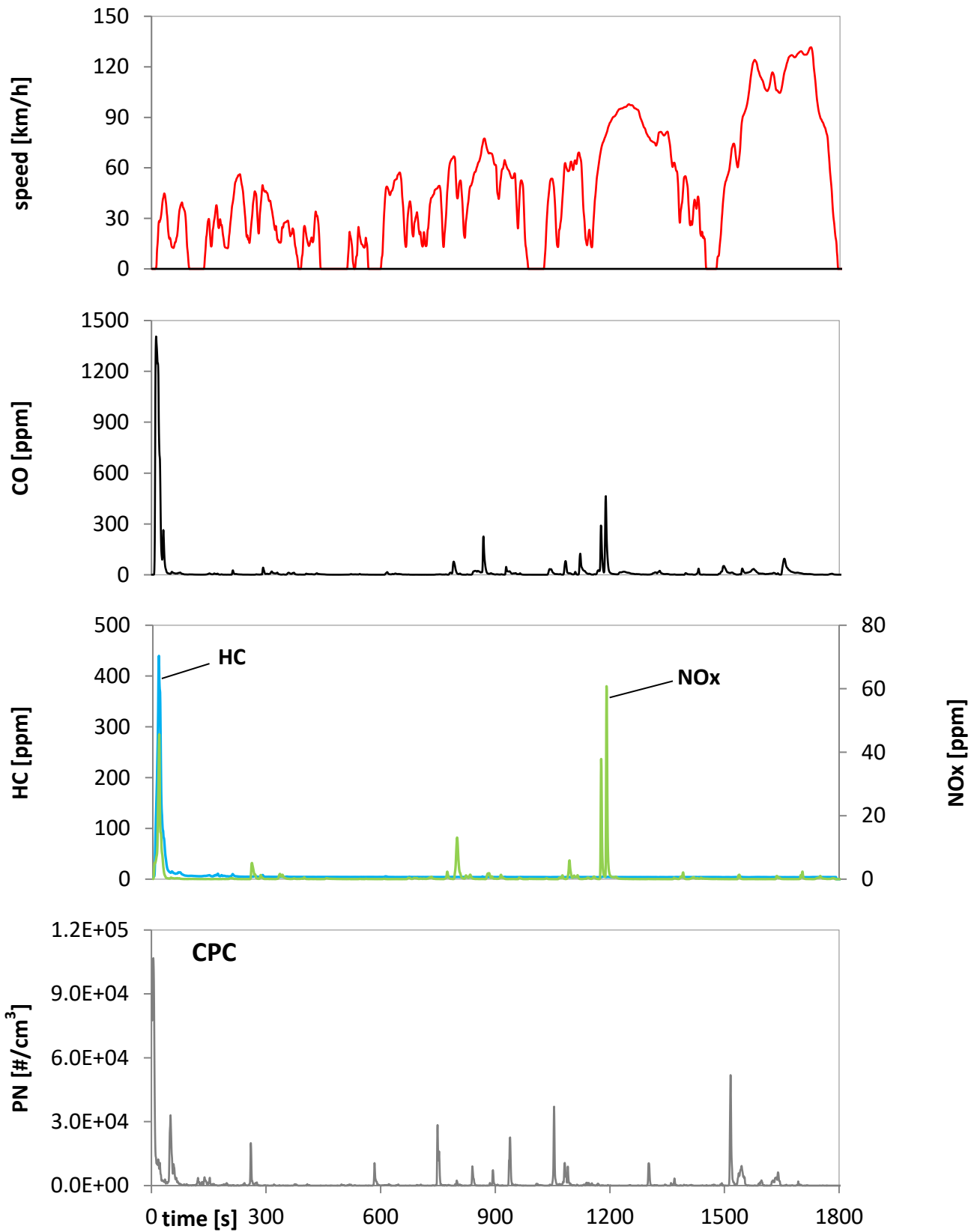
SMPS



Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, cold.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC and OEM GPF with the 1st deterioration; fuel: OK(E5)

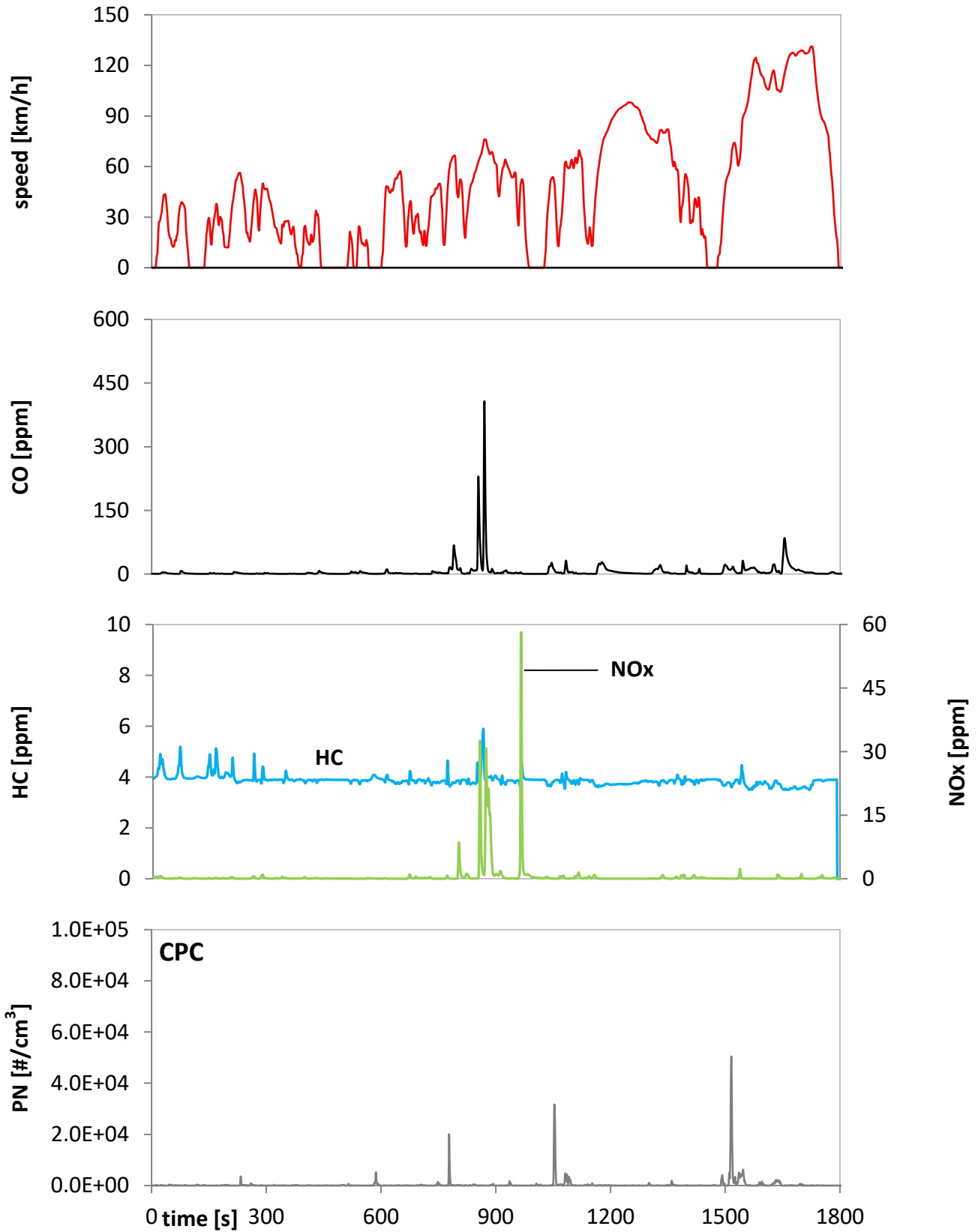
29.08.2020



Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, warm.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC and OEM GPF with the 1st deterioration; fuel: OK(E5)

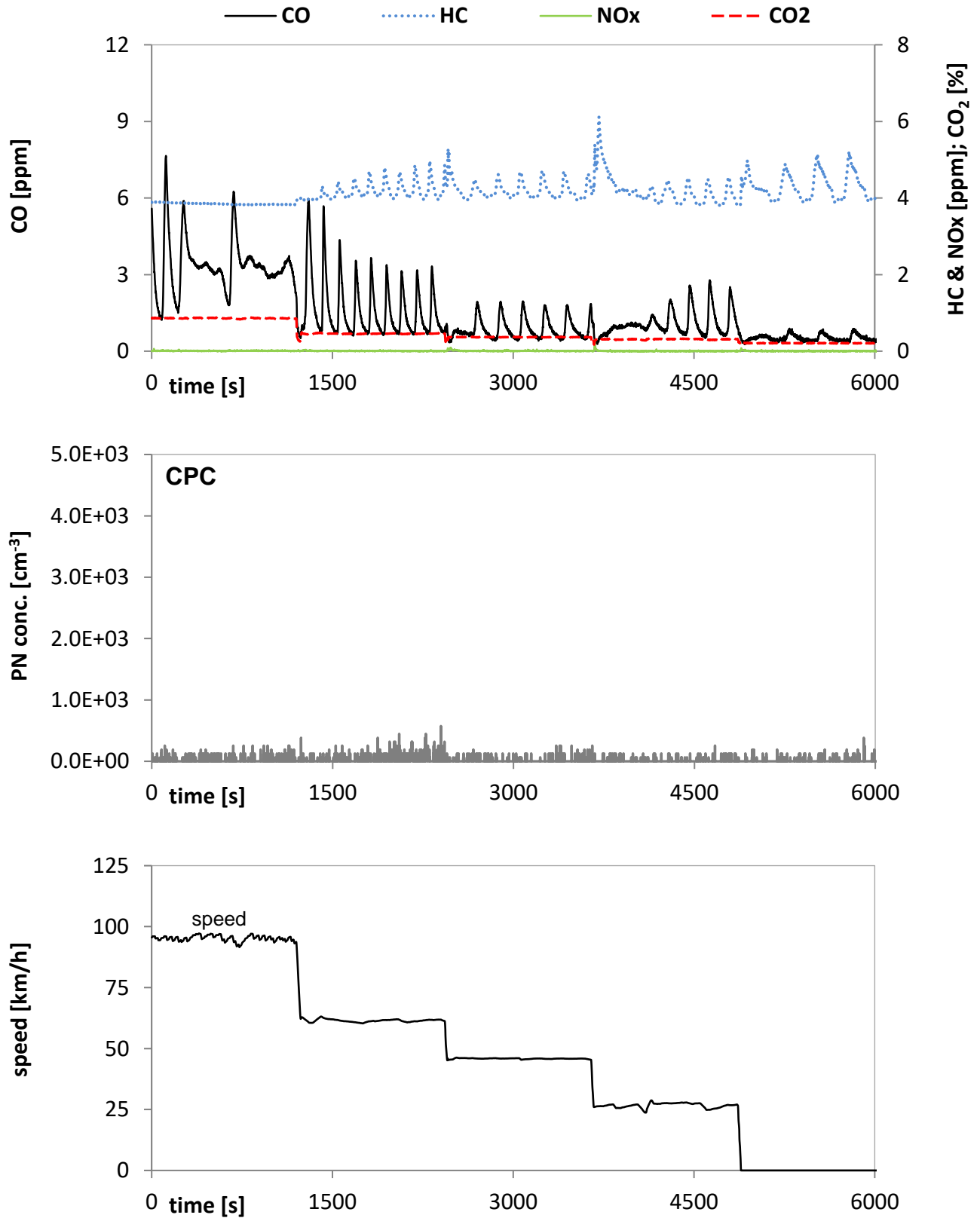
29.08.2020



Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle SSC.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC and OEM GPF with the 1st deterioration; fuel: OK(E5)

29.08.2020

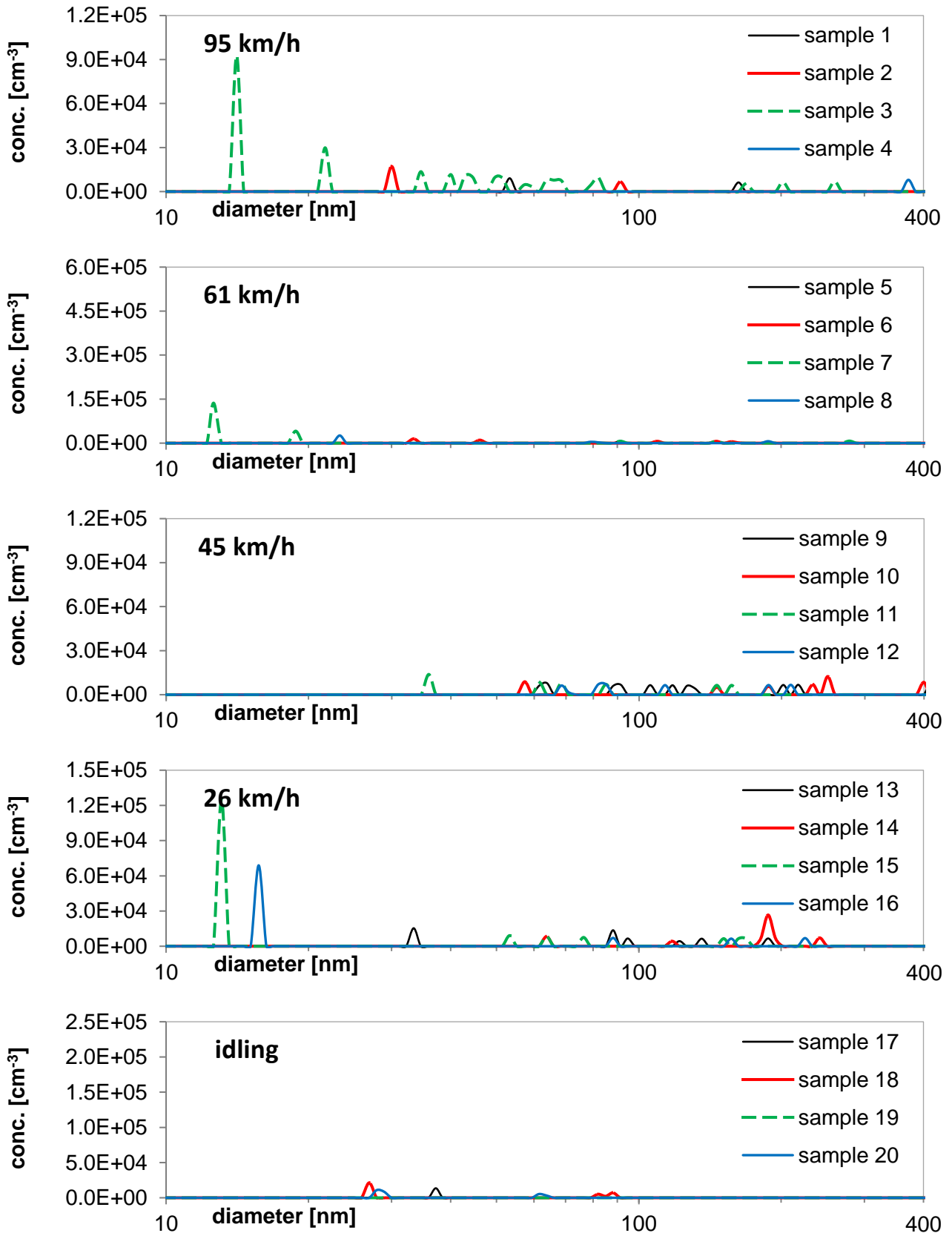


Particles size distributions (PSD) during the driving cycle SSC.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC and OEM GPF with the 1st deterioration; fuel: OK(E5)

29.08.2020

SMPS

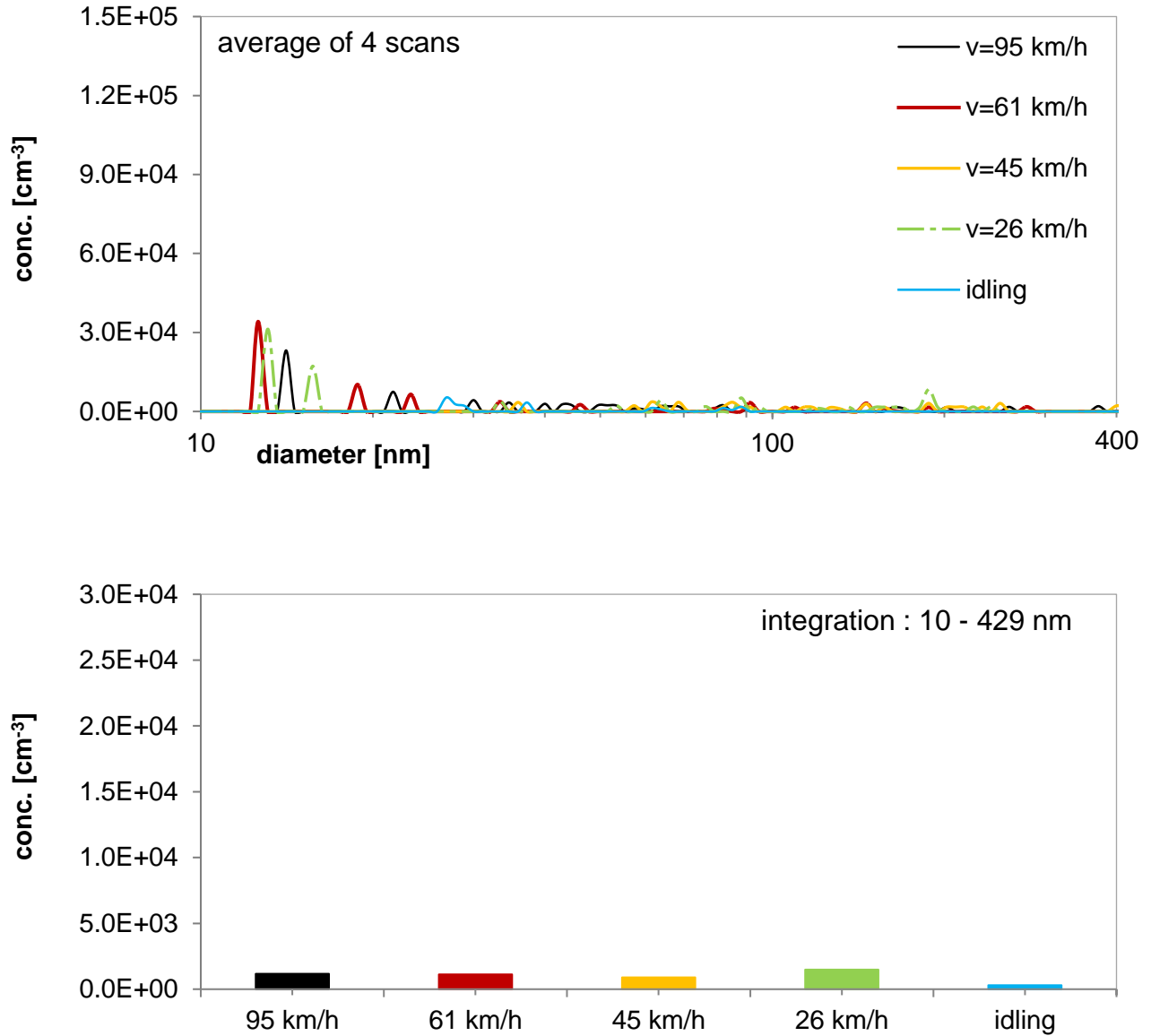


Particles size distributions (PSD) and integrated particle counts during the driving cycle SSC.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC and OEM GPF with the 1st deterioration; fuel: OK(E5)

29.08.2020

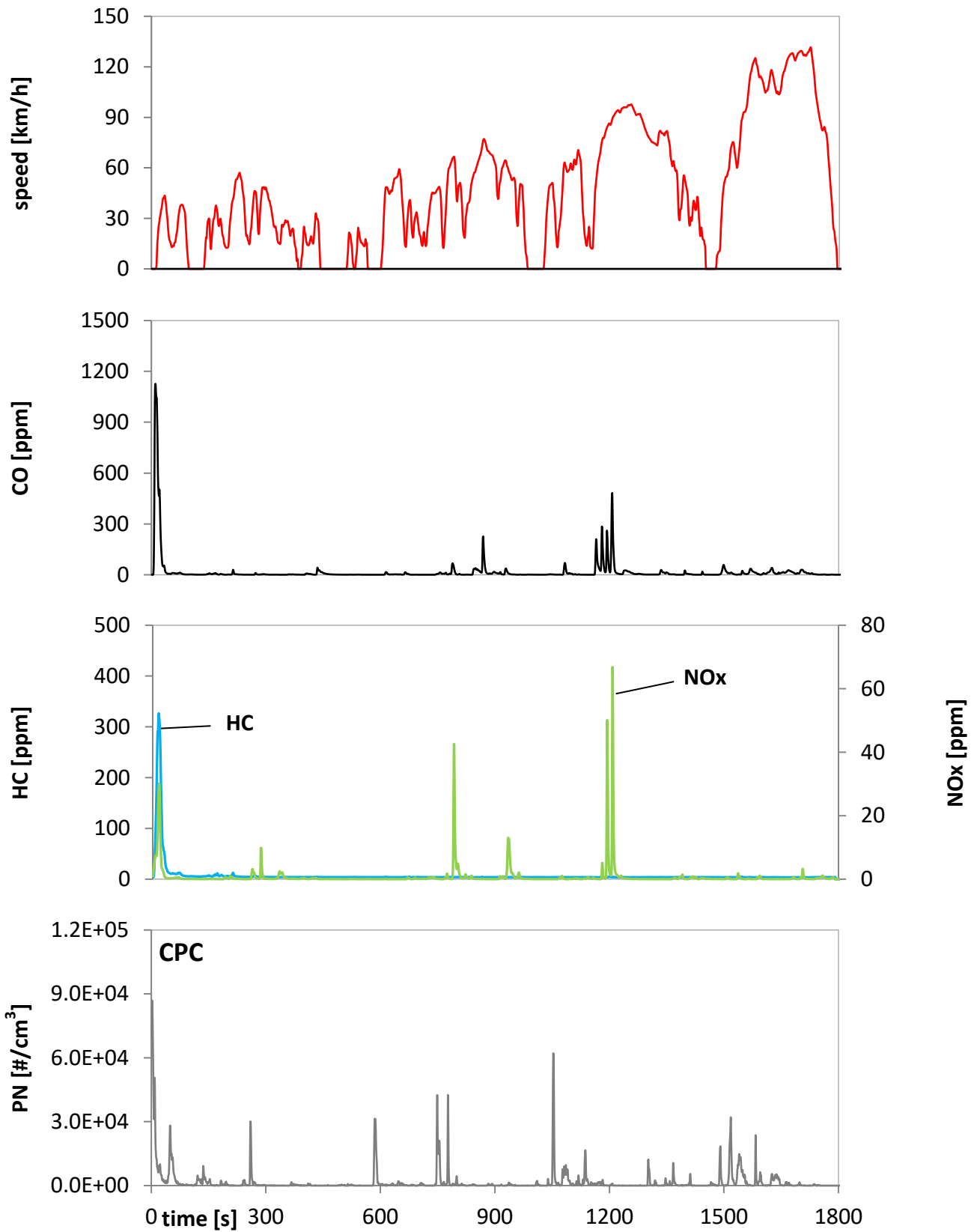
SMPS



Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, cold.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC and OEM GPF with the 2nd deterioration; fuel: OK(E5)

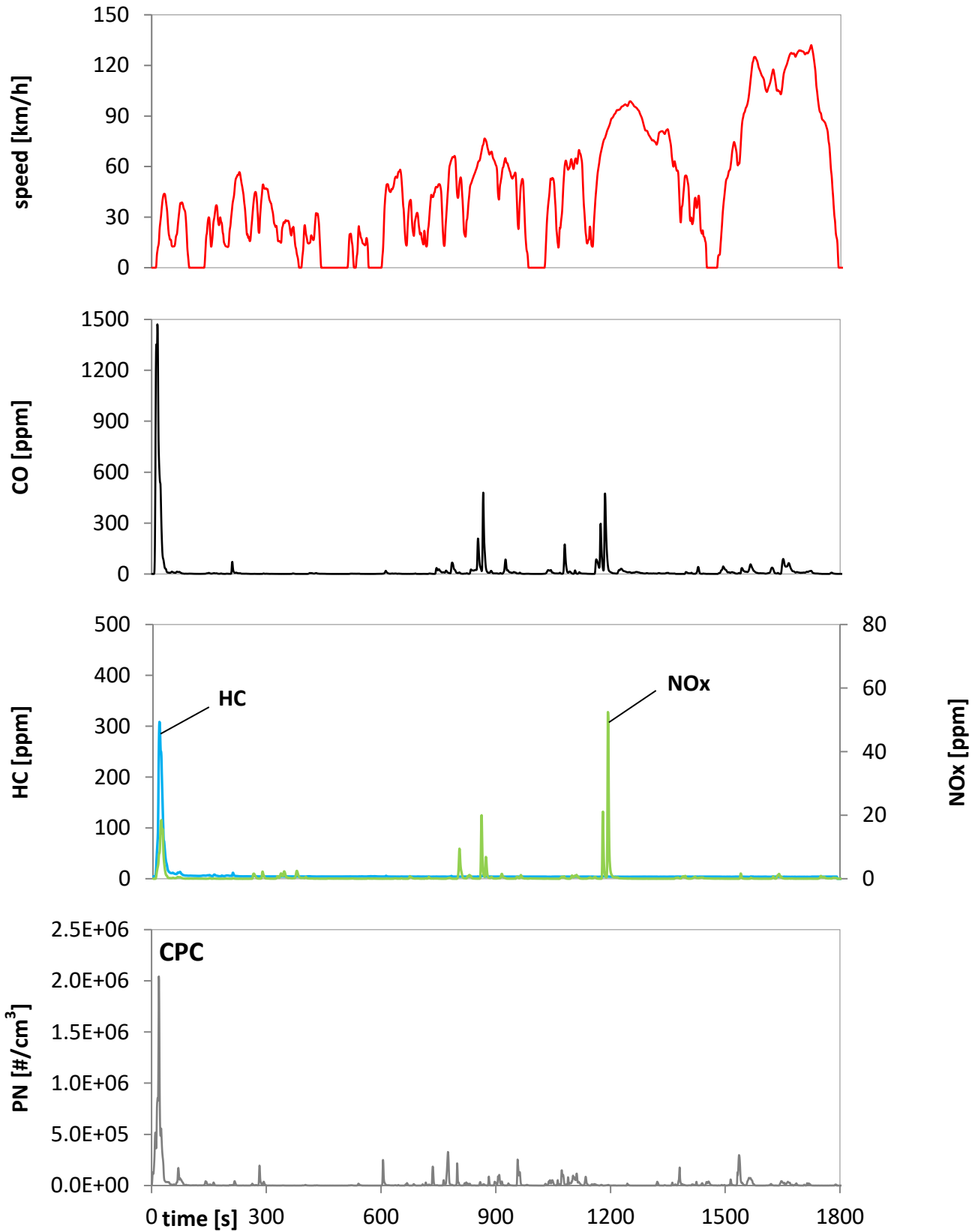
31.08.2020



Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, cold.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC w/o GPF; fuel: OK(E5)

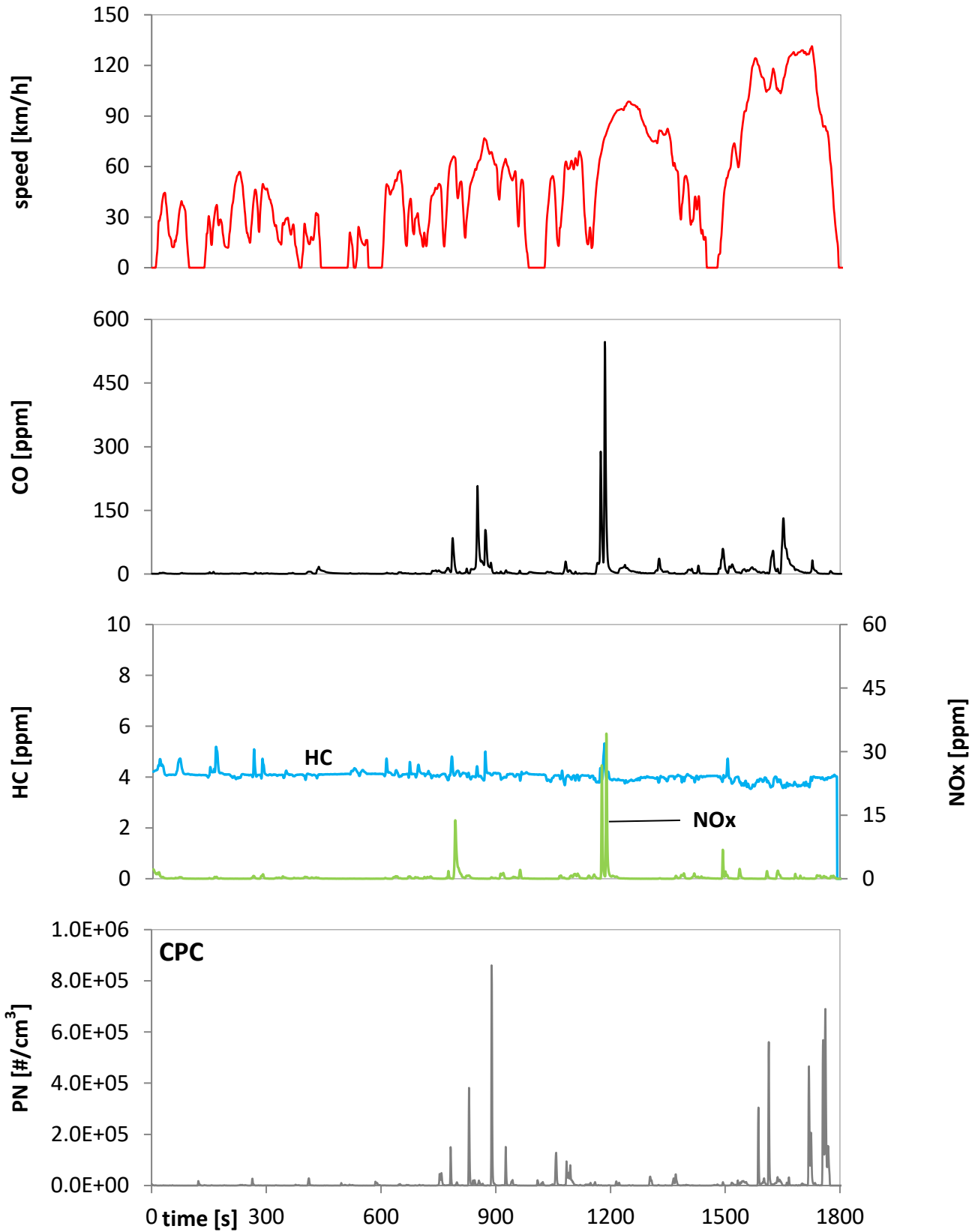
01.09.2020



Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle WLTC, warm.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC w/o GPF; fuel: OK(E5)

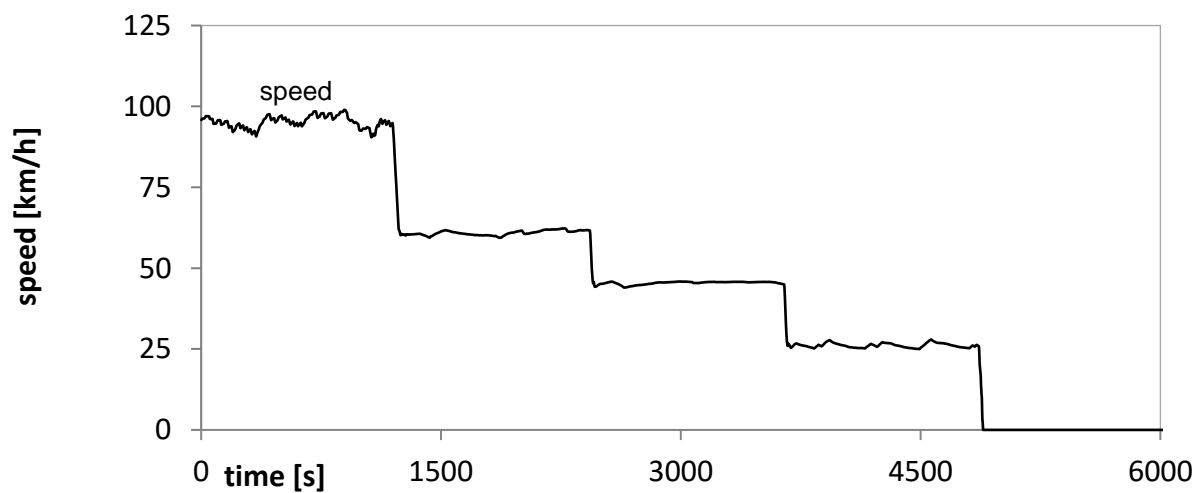
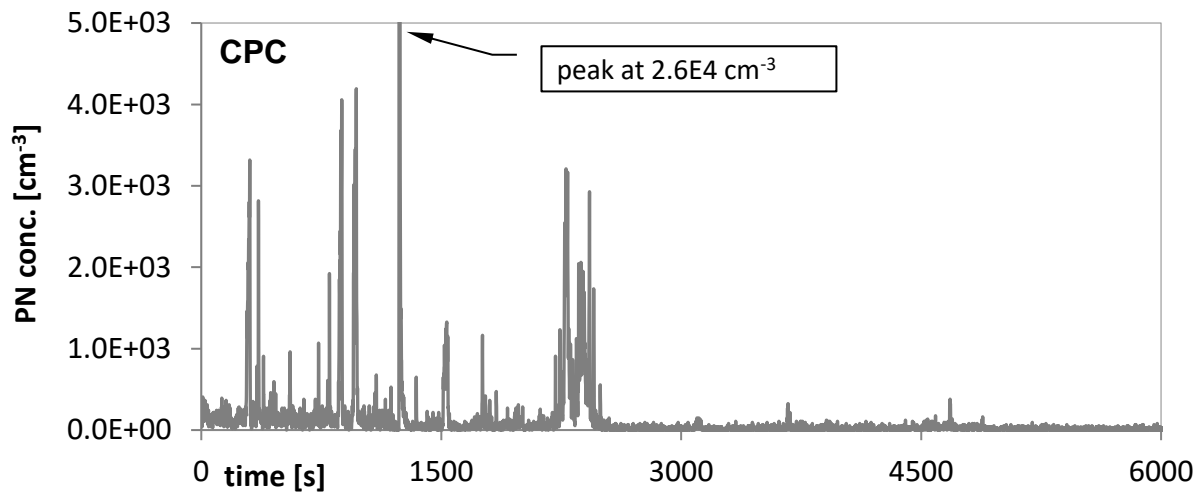
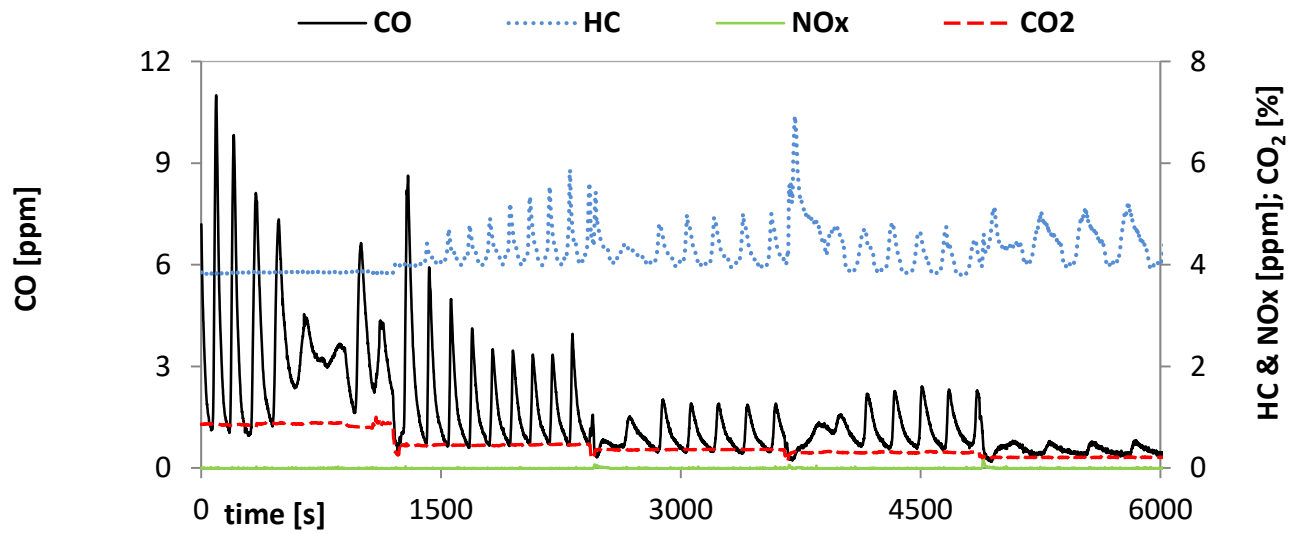
01.09.2020



Particles count and diluted exhaust emissions during the driving cycle SSC.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC w/o GPF; fuel: OK(E5)

01.09.2020

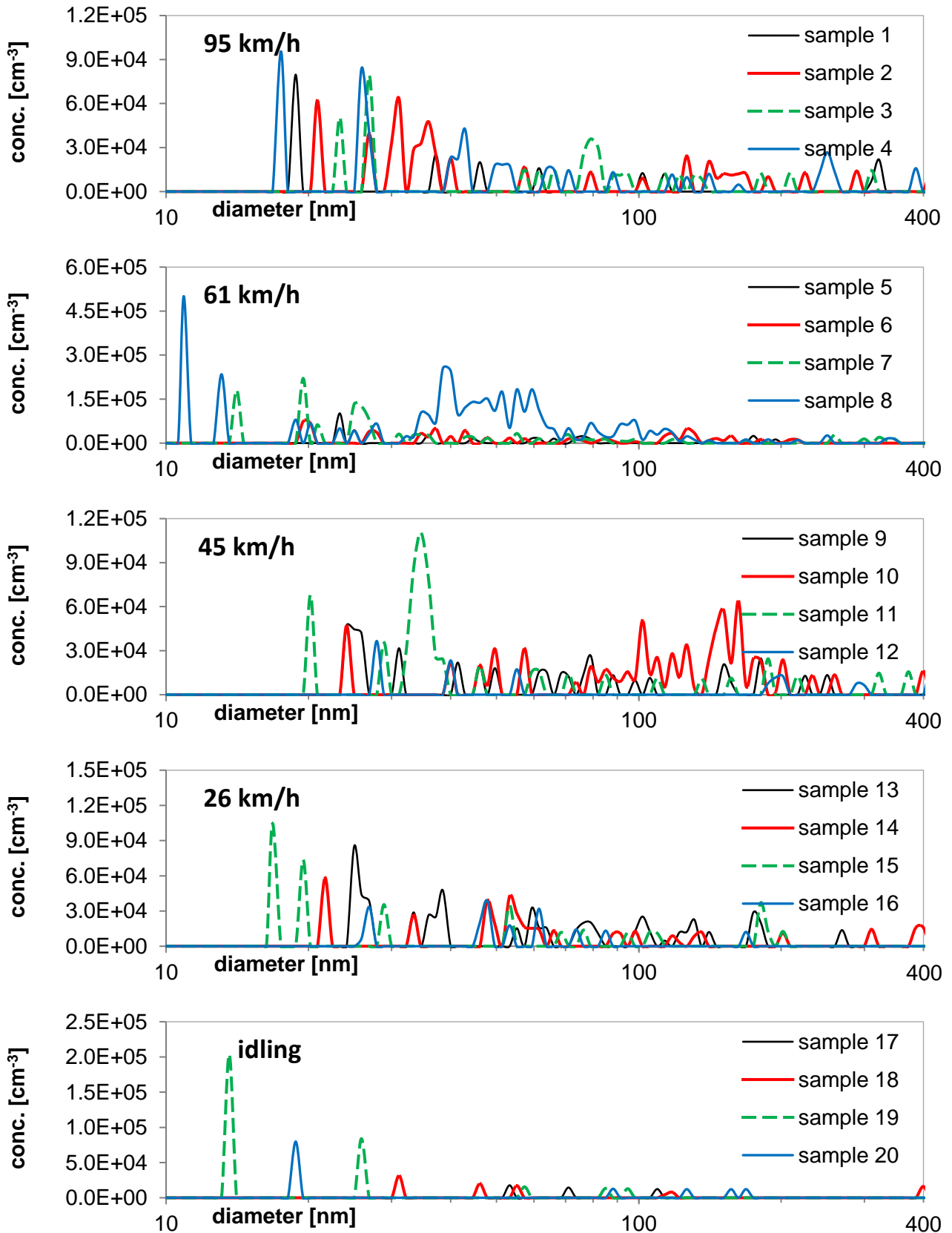


Particles size distributions (PSD) during the driving cycle SSC.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC w/o GPF; fuel: OK(E5)

01.09.2020

SMPS

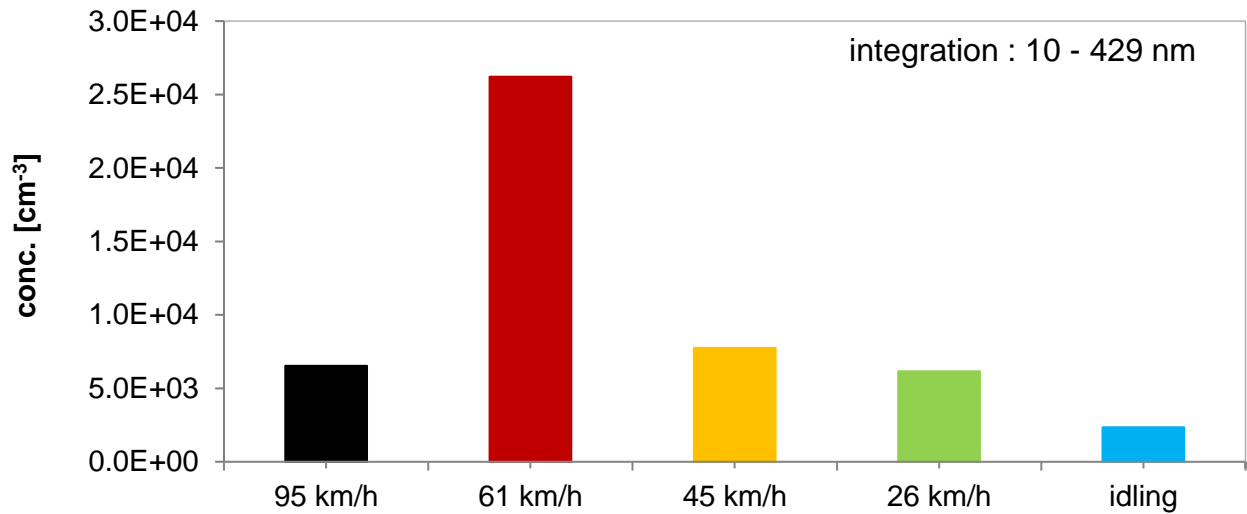
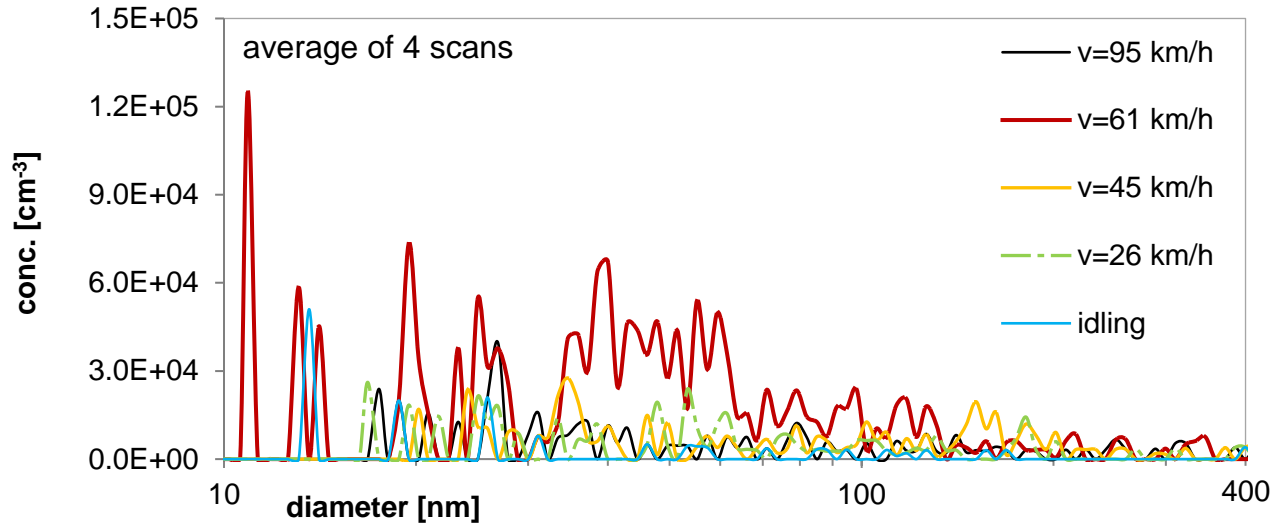


Particles size distributions (PSD) and integrated particle counts during the driving cycle SSC.

Seat Leon FR 2.0 TSI ; TWC w/o GPF; fuel: OK(E5)

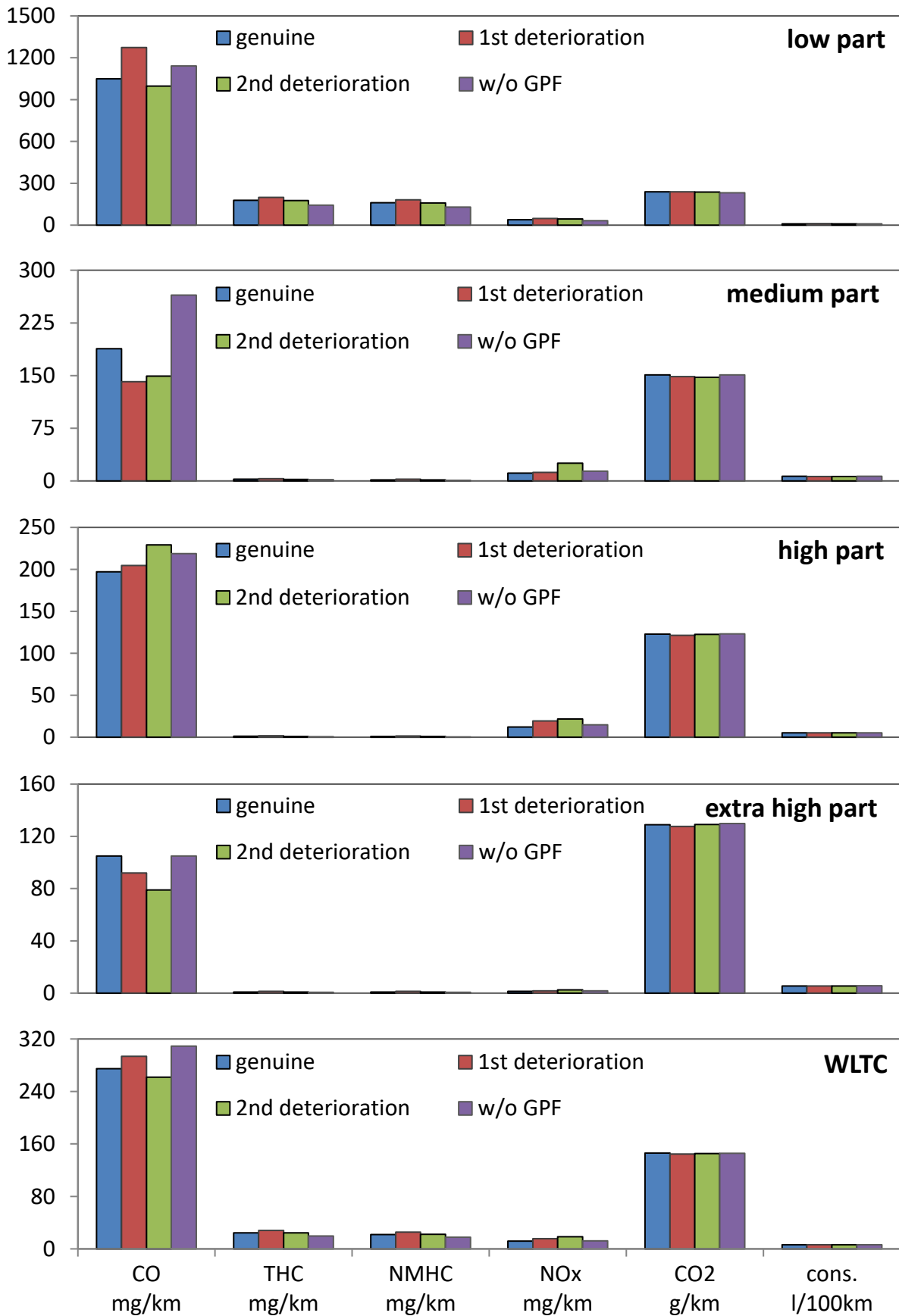
01.09.2020

SMPS



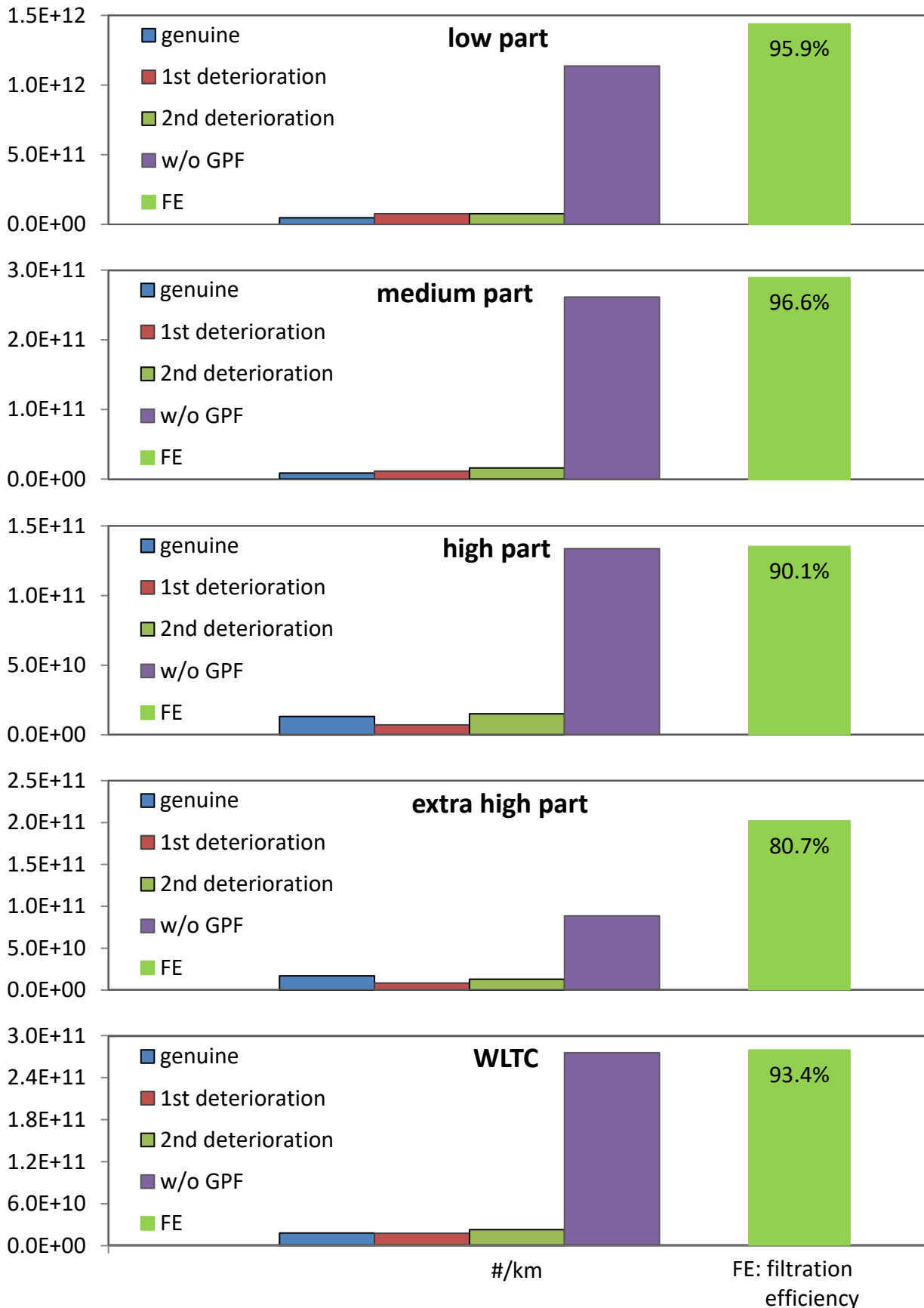
Exhaust emissions and fuel consumption during the WLTC driving cycles, cold.

Seat Leon FR; TWC; with & w/o GPF; fuel: OK(E5)



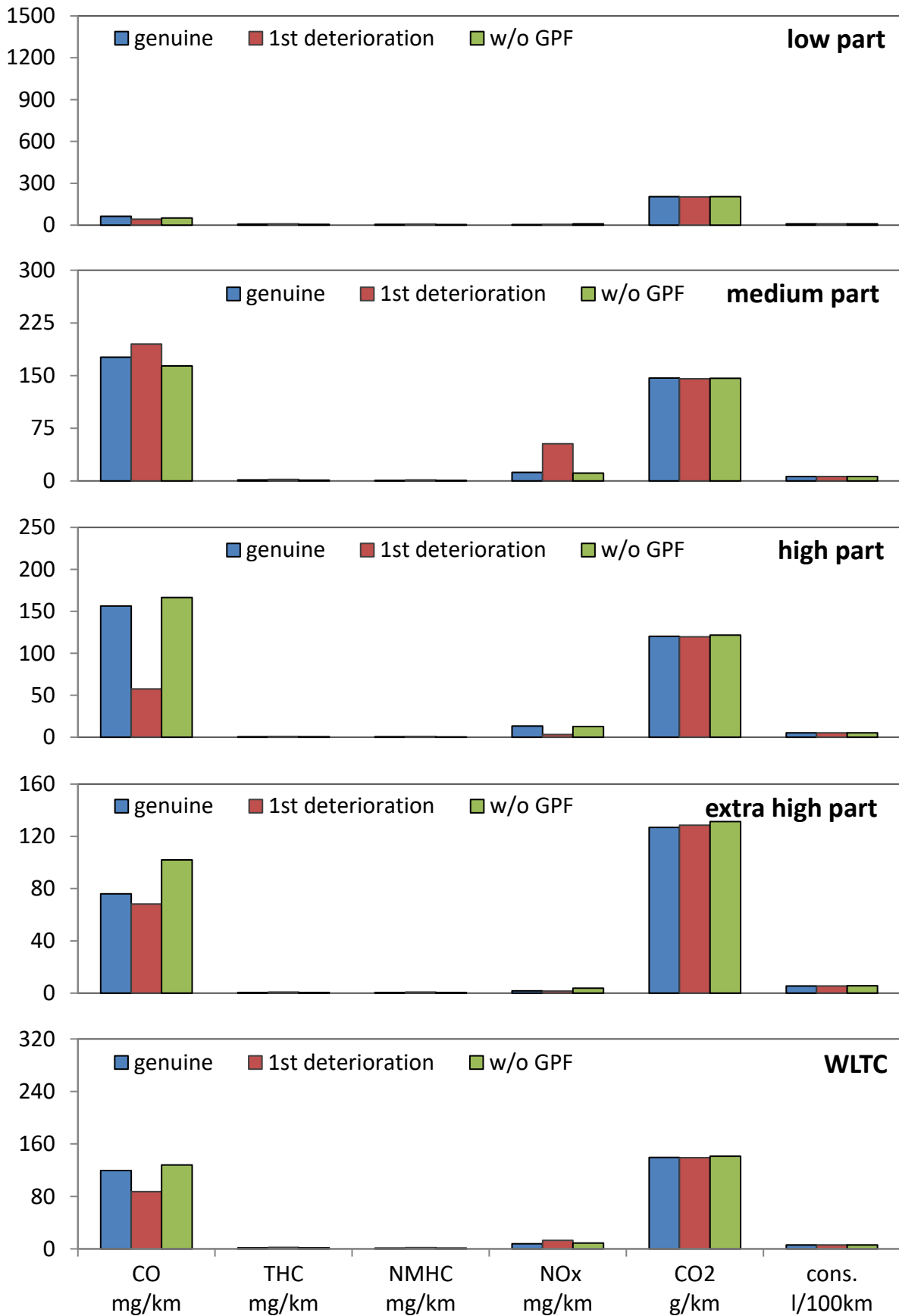
PN emissions during the WLTC driving cycles, cold.

Seat Leon FR; TWC; with & w/o GPF; fuel: OK(E5)



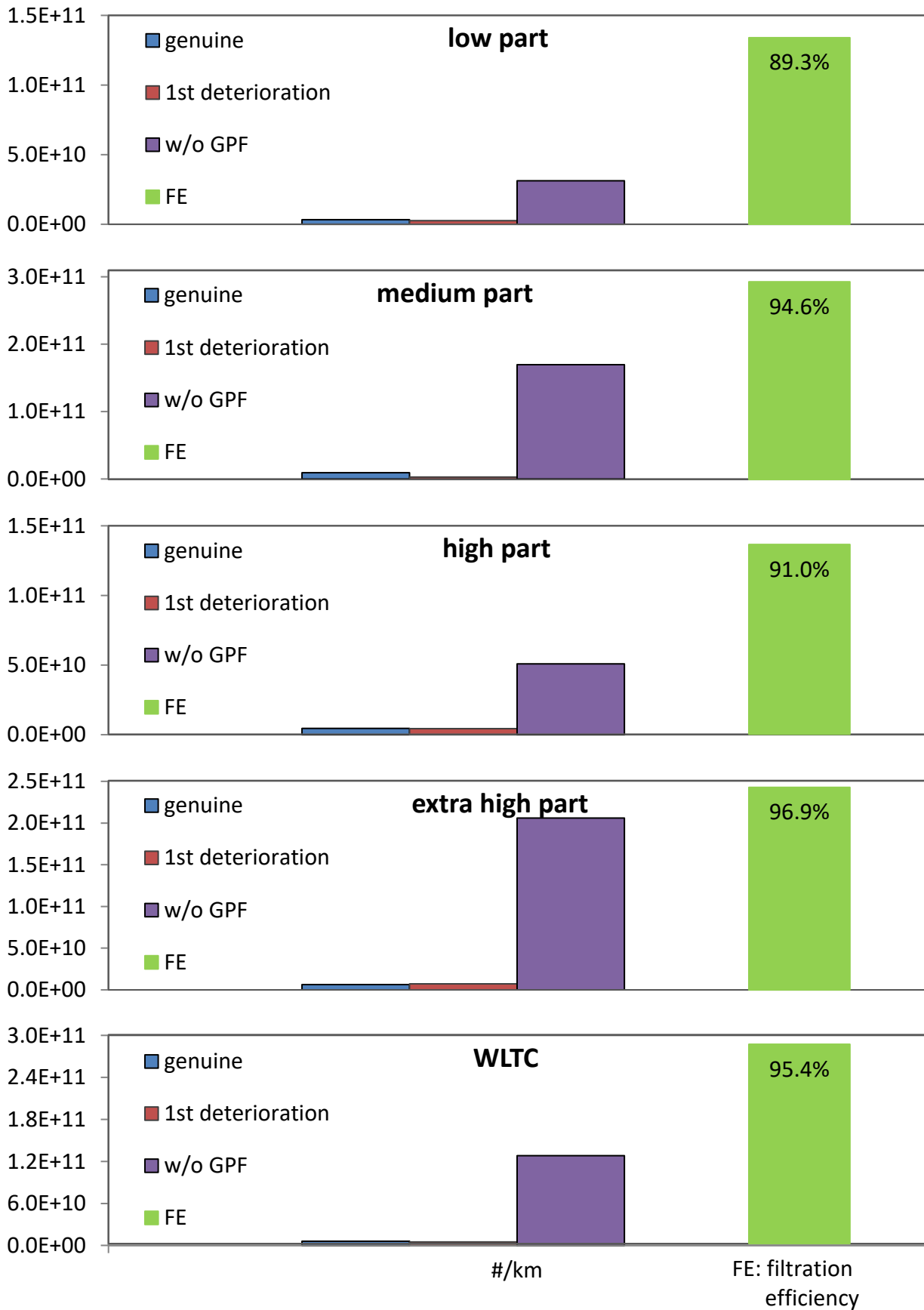
Exhaust emissions and fuel consumption during the WLTC driving cycles, warm.

Seat Leon FR; TWC; with & w/o GPF; fuel: OK(E5)



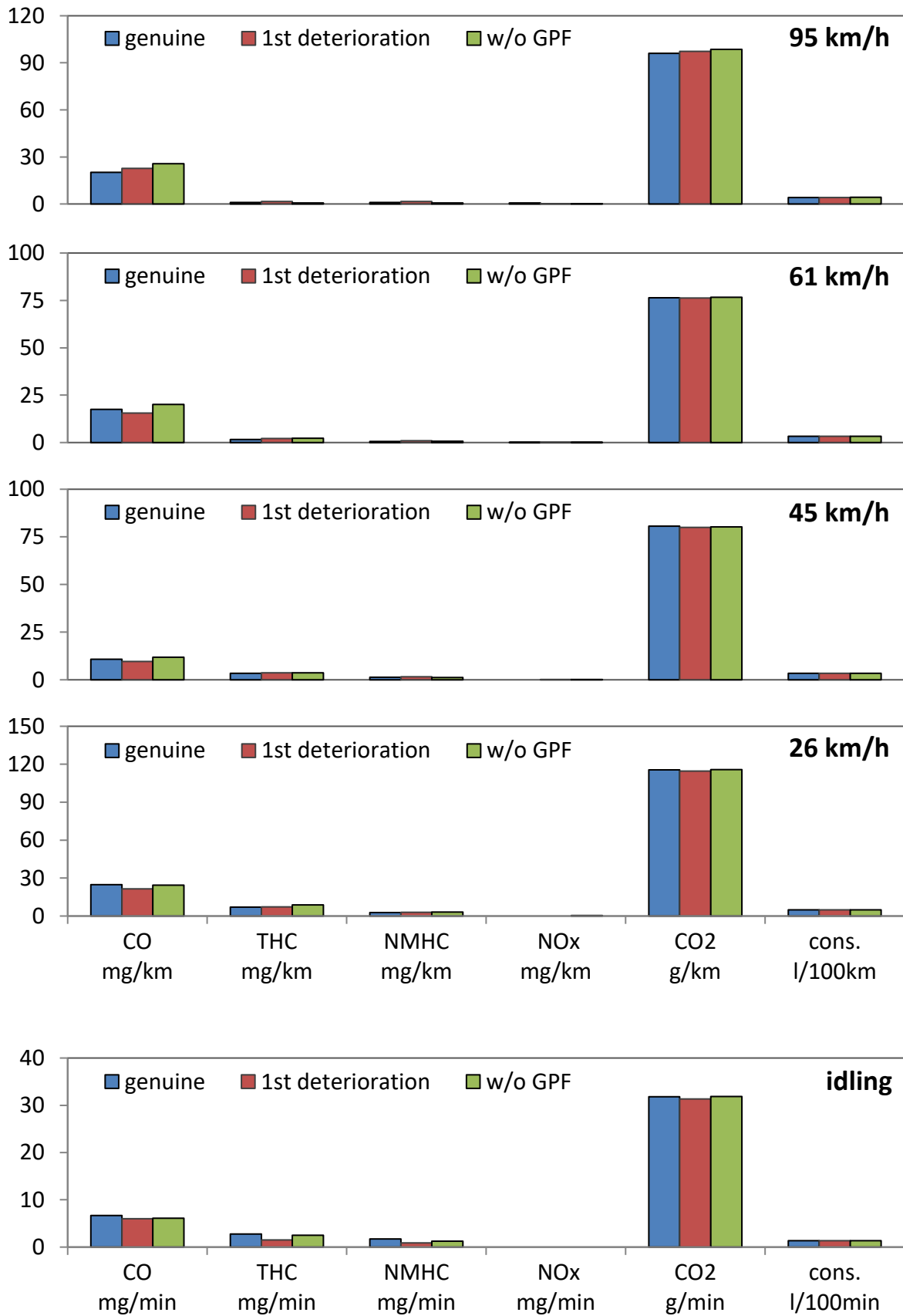
PN emissions during the WLTC driving cycles, warm.

Seat Leon FR; TWC; with & w/o GPF; fuel: OK(E5)



Exhaust emissions and fuel consumption during the SSC driving cycles.

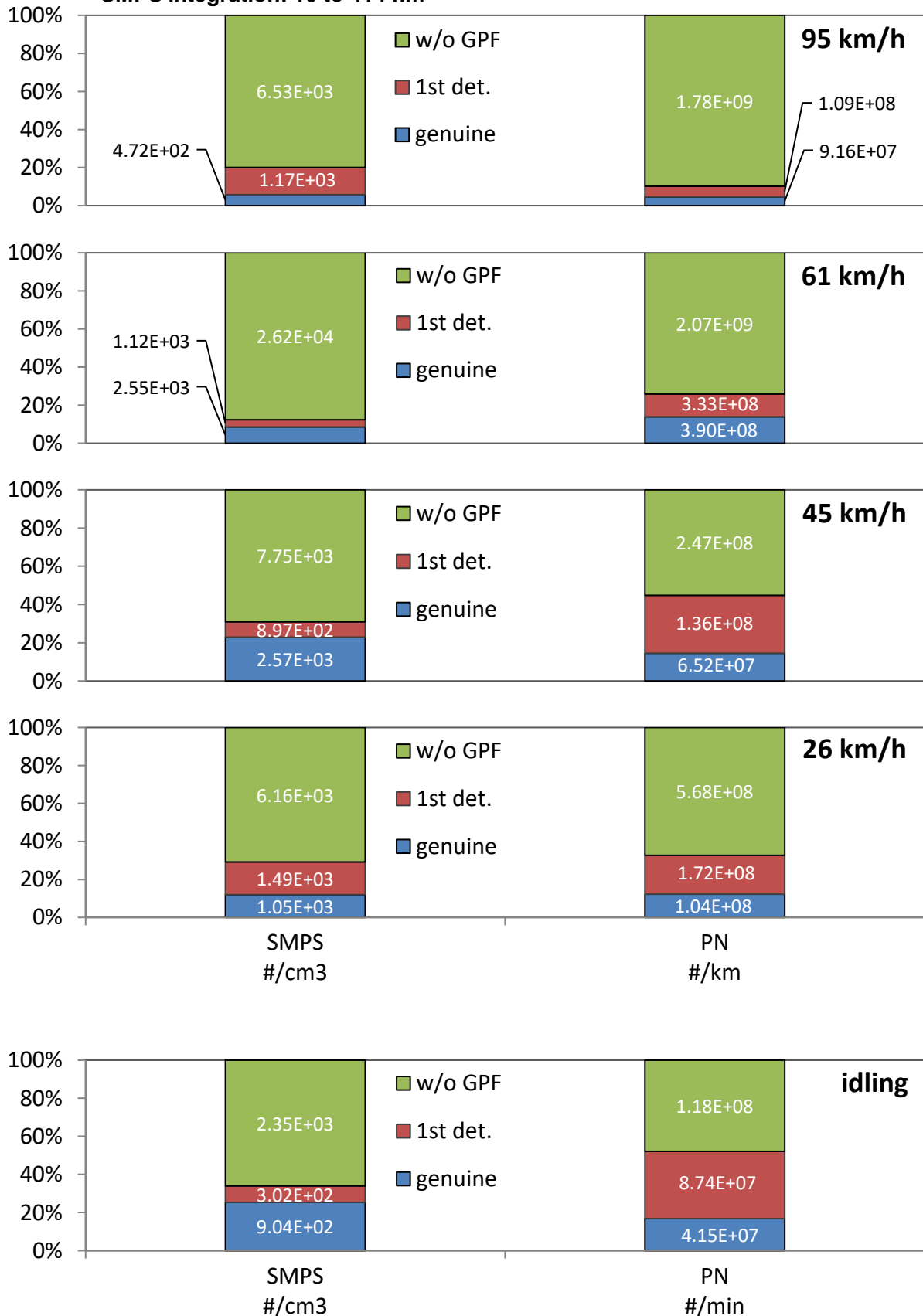
Seat Leon FR; TWC; with & w/o GPF; fuel: OK(E5)



Integral values of the Particle Size Distributions (PSD's) and PN emissions during the SSC driving cycles.

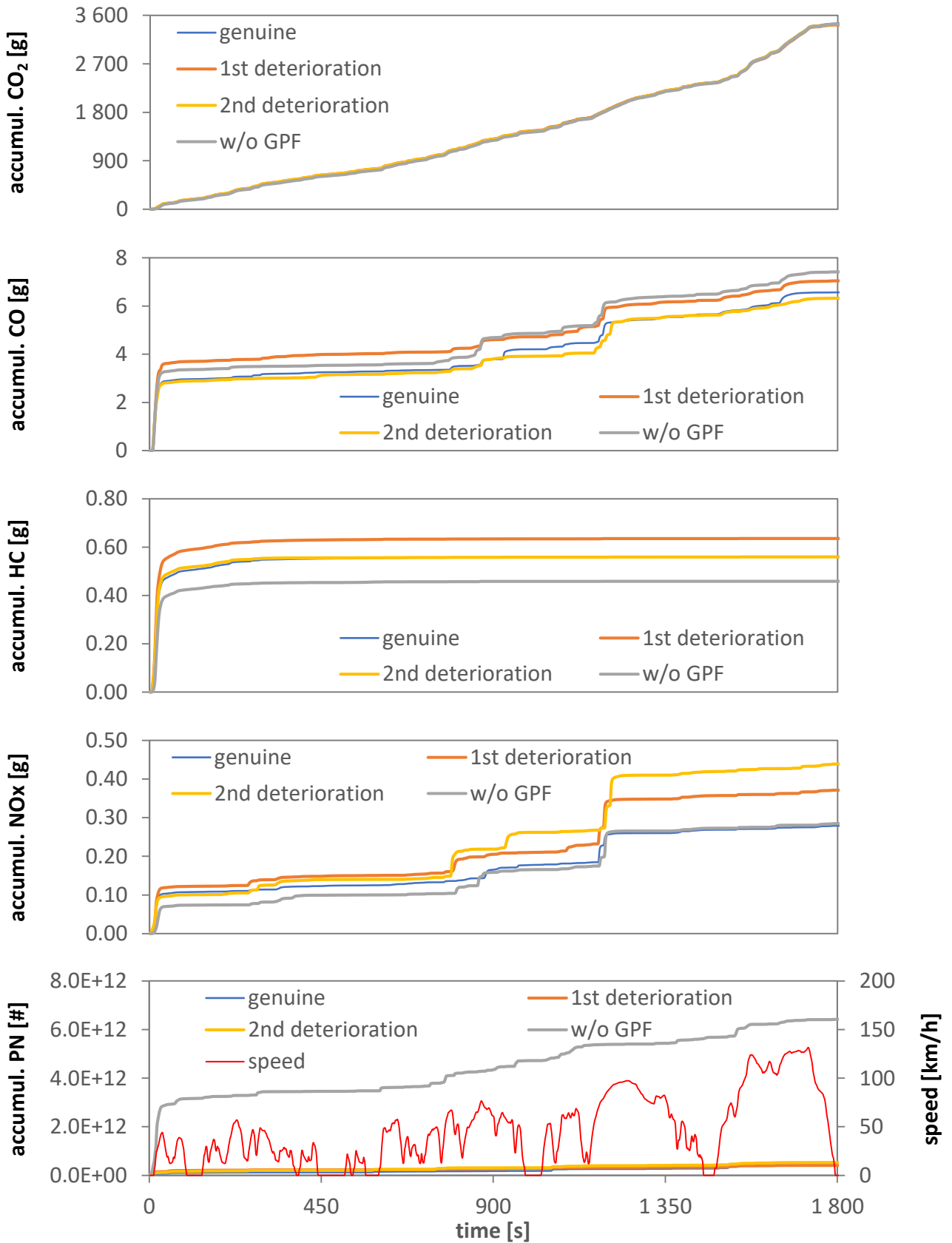
Seat Leon FR; TWC; with & w/o GPF; fuel: OK(E5)

SMPS integration: 10 to 414 nm



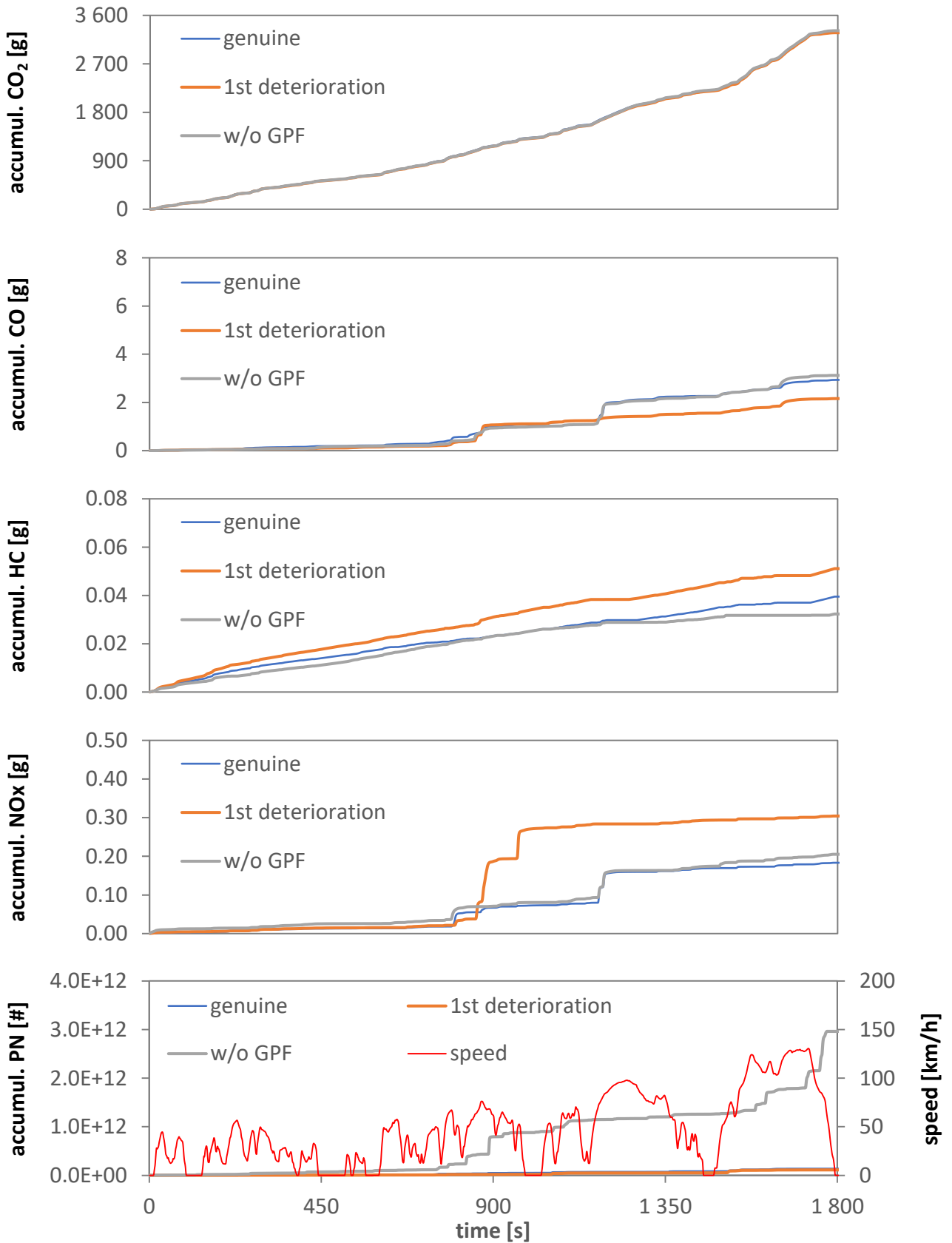
Accumulated exhaust gas emissions and particle number during the driving cycle WLTC cold.

Seat Leon FR; TWC; with & w/o GPF; fuel: OK(E5)



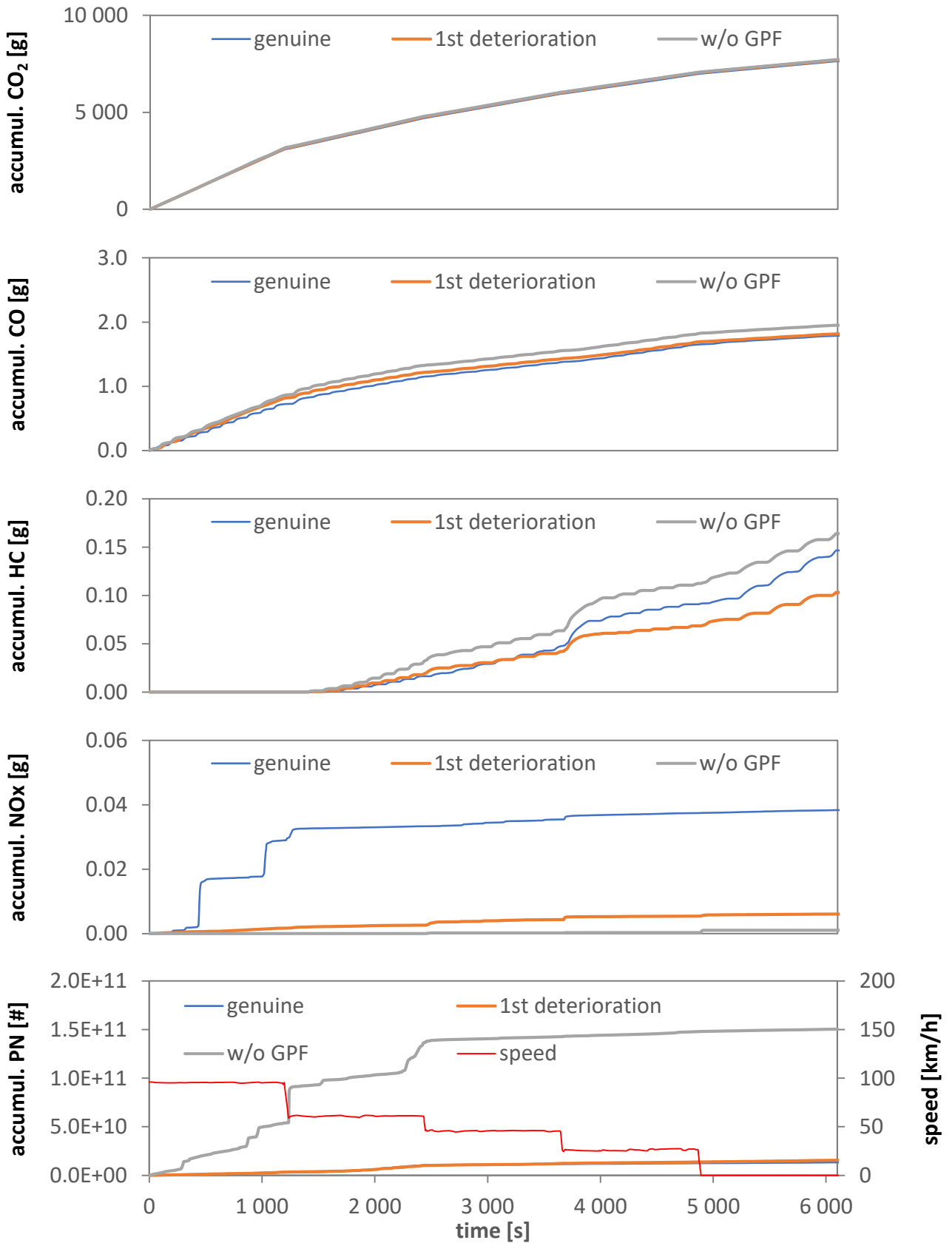
Accumulated exhaust gas emissions and particle number during the driving cycle WLTC warm.

Seat Leon FR; TWC; with & w/o GPF; fuel: OK(E5)



Accumulated exhaust gas emissions and particle number during the driving cycle SSC.

Seat Leon FR; TWC; with & w/o GPF; fuel: OK(E5)





Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise

**Berner Fachhochschule
Technik und Informatik**
Automobiltechnik

Abgasprüfstelle und
Motorenlabor (AFHB)

Gwerdtstrasse 5
CH-2560 Nidau

T +41 32 321 66 80

www.afhb.bfh.ch
info.afhb@bfh.ch

Untersuchungen der Wirksamkeit des OBD-Systems eines GDI- Fahrzeuges mit OEM-GPF

Anhang

Particle Size Analysis

1. Overview

Several non-regulated particle measurement and characterisation methods are applied.

Fig. 1 shows their possible position in the sampling process and their principal time and size resolution.

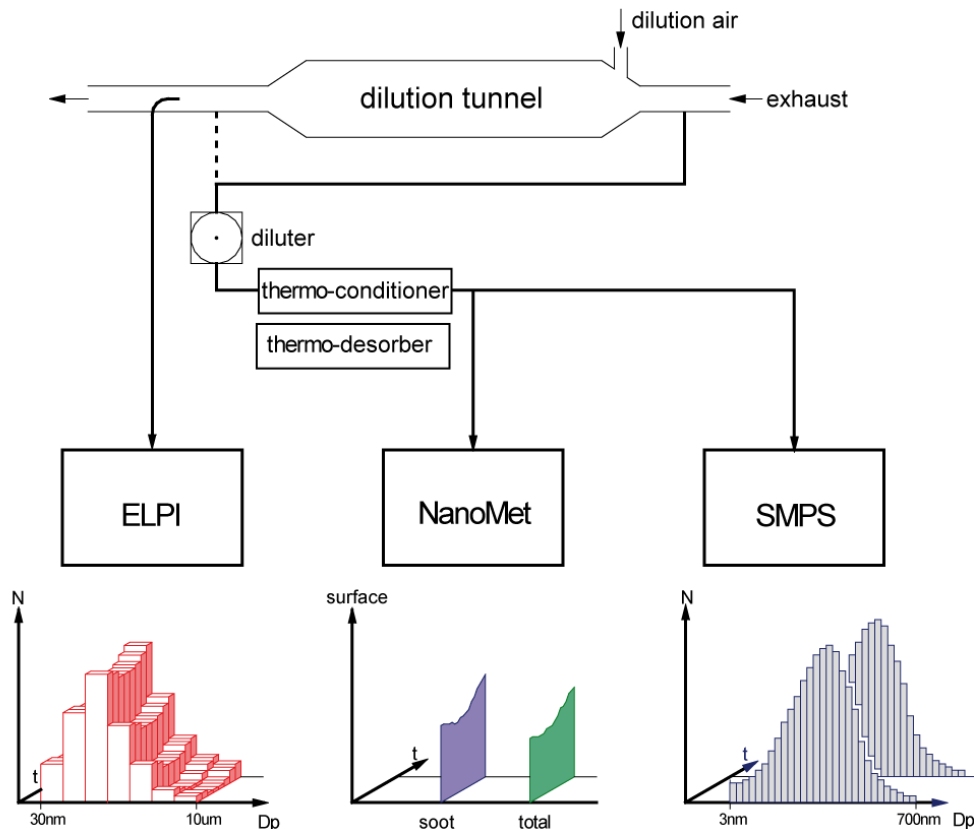


Fig. 1: Nanoparticle measurement systems, particle characterisation and time resolution

The methods and their main characteristics are as follows:

- **ELPI, Electrical Low Pressure Impactor.** Particle size distribution based on aerodynamic diameter. Low size resolution but high time resolution down to 1 second.
- **SMPS, Scanning Mobility Particle Sizer.** Particle size distribution based on mobility diameter. High size resolution but low time resolution, typically 1 – 3 min scan time.
- **Thermoconditioner,** particle evaporation temperature is chosen by adjustable heating temperature up to 330°C.
- **DC, Diffusion Charging sensor (NanoMet).** Integral signal for total active particle surface with time resolution down to 0.5 second.
- **PAS, Photoelectric Aerosol Sensor (NanoMet).** Integral signal for soot surface with time resolution down to 0.5 second.
- **MD19, tunable minidiluter (NanoMet).** Exhaust sampling and dilution with direct connection to tail pipes.

Table 1 shows selected properties of this measurement- and sampling equipment used in the reported test. Detailed descriptions are given in chapter 2.

equipment system	type	physical property	size range selection mode	size resolution	time resolution
ELPI (DEKATI)		number concentration	30nm...10 μ m aerodyn. diam.	12 stages	\geq 1 sec
SMPS (TSI)	DMA 3071 + CPC 3025A DMA 3081 + CPC 3010	number concentration	16nm...660nm mobility diam.	105 channels	1 – 3 min
NanoMet DC (Matter Eng.)	LQ1-DC	total active surface	1nm...1 μ m	integrated value	\geq 0.5 sec
NanoMet PAS (EcoChem)	PAS 2000	total soot surface	1nm...1 μ m	integrated value	\geq 0.5 sec
Thermodesorber (ETH Zürich)	own construction	distinction solid/volatile	adjustable regulated heating temp. up to 330 °C activated char coal zone water cooled		
Minidiluter (Matter Eng.)	MD19-2E	aerosol dilution	adjustable dilution ratio from 1 : 30 to 1 : 3000 undiluted zone and dil. air heated to 80 – 150 °C		

Table 1: Properties of the measurement equipment

2. Description of the measurement equipment and systems

ELPI

The ELPI (**E**lectrical **L**ow **P**ressure **I**mpactor) as shown in block diagram Fig. 2 is a 12 (13) stage cascade impactor that measures particle number concentrations as a function of aero-dynamic diameter.

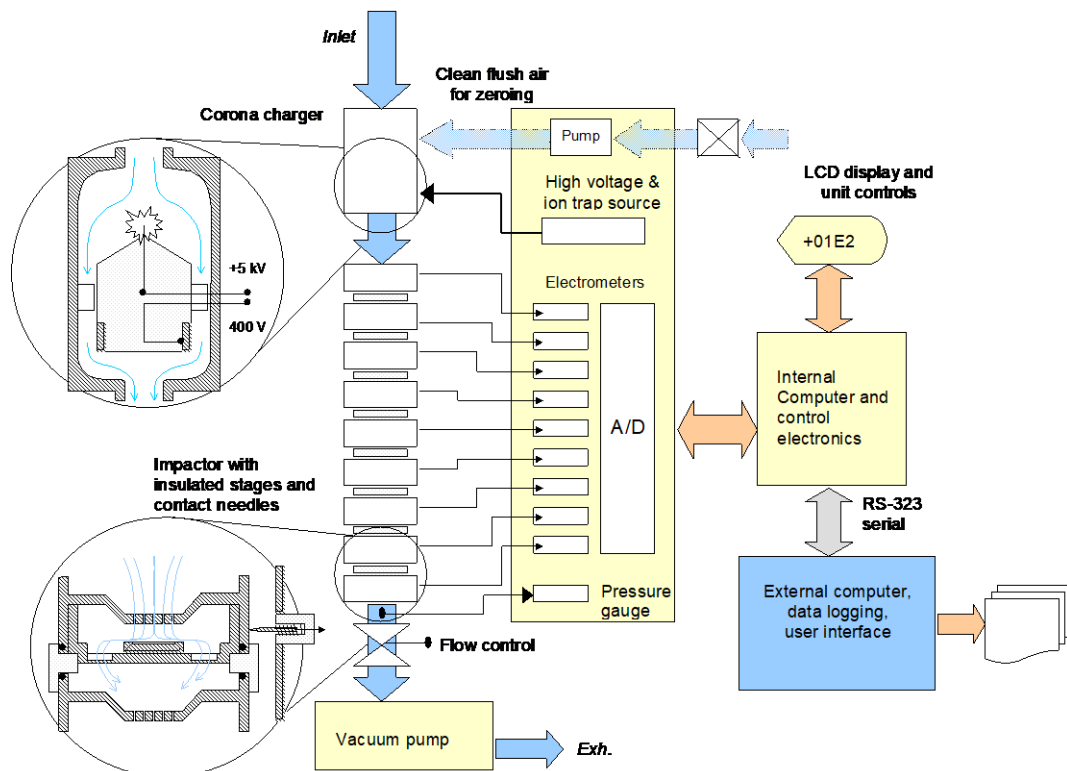


Fig. 2: ELPI block diagram

An impactor is a size selective element where the aerosol is guided through a nozzle behind which a plate forces the gas flow to change direction abruptly. Due to their inertia, particles cannot follow the bent gas streamlines but are driven towards the plate. Only friction with the gas makes them accommodate with the new flow direction. Depending on their size-to-mass ratio - that is, their mass density - the particles are deposited on the plate and thereby removed from the aerosol flow. The diameter defined by this separation process is called the aerodynamic diameter. The size limit between particles that pass the impactor and those being deposited on the plate – the cutoff diameter - depends on the velocity in and pressure drop across the nozzle, the geometry of the impactor and, as stated before, particle mass density. By variation of these parameters, usually the pressure behind the nozzle, the cutoff diameter is adjusted to the desired value.

In the ELPI, 12 impactor stages operate in sequence, each with a smaller cutoff diameter. Thus, particles collected in one stage belong to one size class which is limited by the cutoff diameters of the two subsequent impactor stages.

After size classification, the deposited particle load has to be quantified. In classical impactor design, the particle mass deposited on the plate is determined by gravimetric analysis, but this technique has shortcomings as it needs high particle loads to be accurate, and analysis is carried out after measurement - the method is off-line. In order to make ELPI an on-line instrument, aerosol particles are electrically charged before they enter the cascade impactor. Each impactor collector plate is connected to an electrometer amplifier. Thus, instead of collecting deposited particle mass, the plates take up the electric charge of the impinging particles and pass it on as measurement current.

Number size distributions are calculated from the measured current, the size dependent average charge per particle, and the deposition probability per impactor stage. The time resolution is around one second; the covered particle size range is from 30 nm to 10 μm (Fig.3).

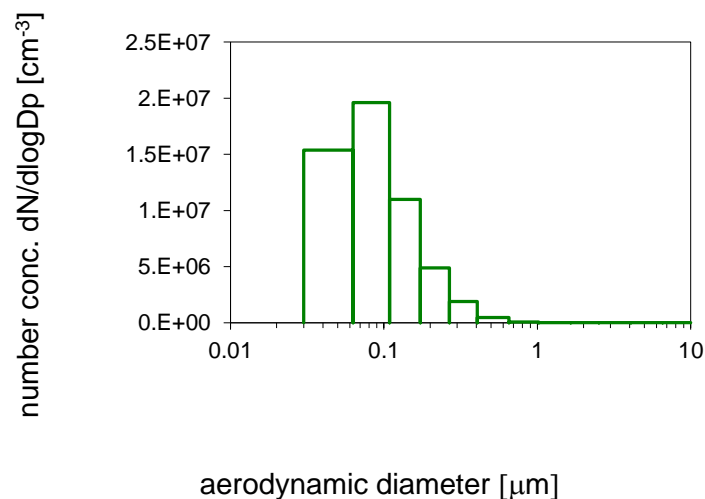


Fig. 3: Typical ELPI size distribution. Particles were sampled from the exhaust pipe of a common rail diesel passenger car at 70 km/h on a roller dynamometer.

SMPS

SMPS (**S**canning **M**obility **P**article **S**izer) illustrated in block diagram Fig. 4 is a method to determine the number size distribution of submicron aerosol particles. It uses a measurement system consisting of an electric charger, a mobility classifier, a counter, and PC control [4].

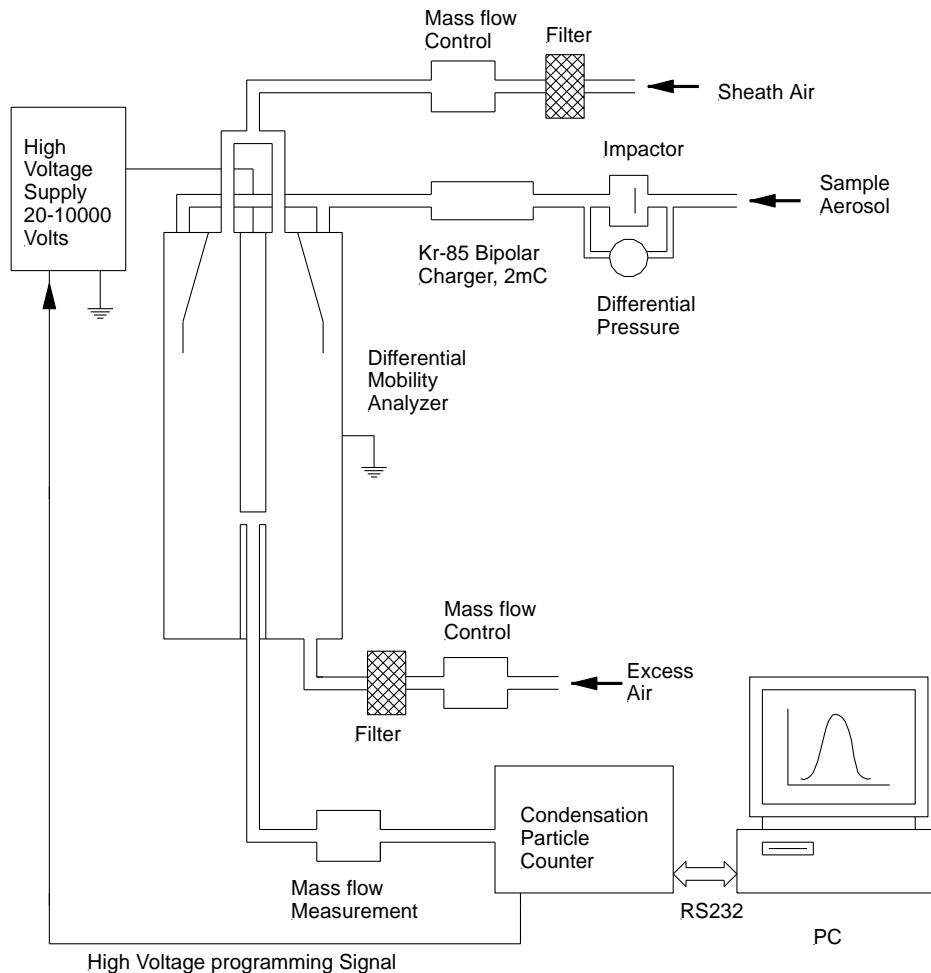


Fig. 4: Block diagram of SMPS particle sizer system

The aerosol is first guided into a neutralizer [6]. This is a chamber in which the air is ionized by beta rays from a radioactive source (^{85}Kr). Positively and negatively charged ions diffuse onto the surface of the aerosol particles until a charge equilibrium is established. The probability for 100 nm particles to carry one elementary charge is about 20% for positive and 40% for negative charging, while the rest of the particles leave the neutralizer with zero electric charge - hence the name "neutralizer".

The charged aerosol particles are now classified by their mobility in a Differential Mobility Analyzer (DMA) [7]. The DMA is a long condenser through which a laminar flow of particle free air is guided. For practical reasons it has cylindrical geometry. The aerosol particles enter through a narrow slit at the upper end of the DMA. When a voltage is applied between outer and inner electrode, the charged particles are dragged towards the centre. Their velocity is determined by the equilibrium of electric force and friction with the suspension air - small particles move faster, larger ones are slower. While the particles move in radial direction, the laminar air flow carries them along the cylinder axis. Thus, they hit the centre electrode below the inlet, large particles later and further downstream than small ones. At its lower end the centre rod has a narrow outlet slit where particles of a certain size arrive. This size can be tuned by varying the voltage applied to the electrodes. The other particles are either deposited on the walls or they are transported out of the DMA with the sheath air.

The number concentration of the size selected particles is determined using a Condensation Particle Counter (CPC). Since the particles are too small for optical detection, they have to be magnified by condensing volatile material onto their surface. This is accomplished by guiding the fine particles through saturated vapour of butanol (or vapour of another volatile substance) and subsequently cooling the mixture. The vapour molecules use the aerosol particles as condensation nuclei for the formation of droplets, one out of each aerosol particle. The final size of the butanol droplets is around one micron which is just large enough to be detected using light scattering.

By computer control the DMA voltage is increased so that larger and larger particles are fed into the CPC. The software combines CPC counts with particle size calculated from the DMA voltage and calculates a size spectrum (Fig. 5).

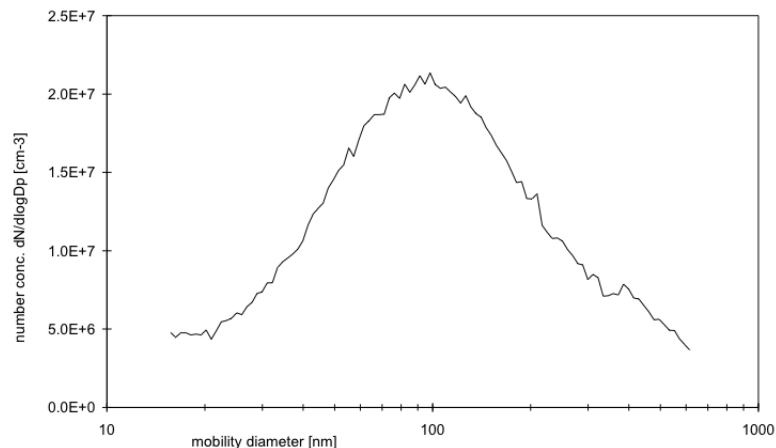


Fig. 5: Typical size spectrum from SMPS measurement. The particles were emitted from a diesel engine at low rpm and high load.

NanoMet

NanoMet is a modular measurement system for on-line characterization of aerosols, consisting of a diluter, an evaporation tube, two sensors and various accessories [2, 3]. Being both robust and user friendly NanoMet is also well suited for field use. The following NanoMet components are used in the reported test:

- a mini-diluter to reduce the aerosol concentrations to levels within the nominal ranges of the NanoMet sensors,
- a thermal conditioner (evaporation tube) to evaporate remaining droplets of volatile material still present after the diluter,
- two real time sensors, the diffusion charging sensor (DC) for active surface and the photoelectric aerosol sensor (PAS) for soot surface.

MD19 minidiluter

A compact minidiluter is used as a stand alone direct sampling and dilution device [8]. Its main features are its simple and stable operation, the wide adjustable dilution range over 2 decades and the possible connection to closed systems with undiluted exhaust. The setup is shown in Fig. 6.

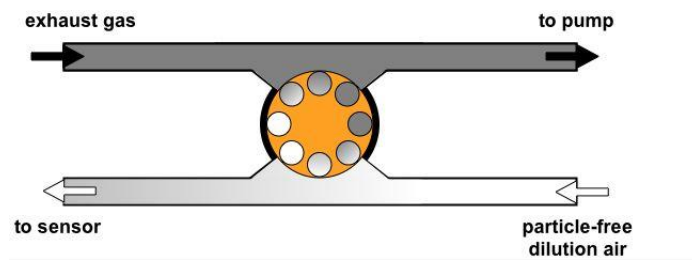


Fig. 6: Schematic diagram of the MD19 rotating disc diluter

Dilution takes place in a heated steel block with separated gas channels, one for the raw gas and one for the diluted measuring gas. A rotating disk with cavities on the side to the dilution block shifts the raw gas in the cavities into the measuring gas channel, such that the diluter works like a "revolving door" for particles. The dilution ratio depends on the rotation frequency, the gas flow in the measuring gas channel, the volume and the number of cavities on the disk.

The dilution ratio can be tuned continuously from 1:15 to 1:3000 by varying the rotation frequency and choosing between disks with 10 or 8 cavities. The undiluted gas section as well as the dilution air are heated to regulated temperatures, adjustable to 80°C, 120°C or 150°C. This heating and the large dilution ratio prevent spontaneous nucleation to volatile nanoparticles as it is often observed in dilution of combustion exhaust in standard dilution tunnels at lower dilution ratios with cold dilution air.

Evaporation tube (Thermoconditioner)

By definition, DPF efficiency is related to solid exhaust gas particles. In addition to solid soot and ash particles, exhaust contains many volatile substances that pass the DPF as vapour: hydrocarbons (HC), sulfate and water. When the exhaust cools down to ambient temperature these volatiles tend to nucleate and condense into nanosized droplets. As most particle analysing instruments cannot distinguish droplets from solid particles, the two fractions have to be separated in the sampling system in order to get a valid measurement of the DPF efficiency.

A very straightforward method to remove droplets of volatiles from the exhaust gas sample is to evaporate them in a heated tube [3]. If the exhaust gas sample contains volatiles in high concentration, they will re-nucleate into new droplets after the heated tube, and there will be no benefit of the thermal treatment. However, if the exhaust sample is diluted before entering the evaporation tube, concentration of the volatiles will be low enough to keep them in vapour phase after heating. This method is called post-dilution thermo-conditioning (PDTC). PDTC does not remove the volatile substances from the exhaust sample, but it keeps them in vapour phase rather than in particle phase.

Fig. 7 shows the principal setup of PDTC, consisting of an MD19 rotating disc diluter and a heated tube (thermal conditioner).

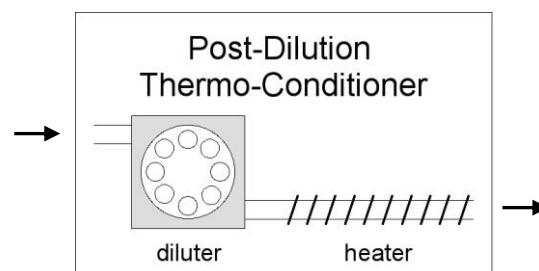


Fig. 7: PDTC, consisting of an MD19 rotating disc diluter and a heated tube

PAS and DC sensor

The 2 particle sensors monitor submicron particles by charging them before they are deposited in a insulated particle filter. The principle of operation is illustrated in Fig. 8, [2].

Two different charging methods are used to characterise the particles depending on their size, chemical composition and number concentration. In either sensor an electrometer amplifier converts the integrated electrical charge of the particles into a dc-voltage signal with a response time below 0.5 seconds. The measured current is proportional to the charging probability of the particles.

Unipolar diffusion charging (DC) by corona discharge is used in the DC sensor to charge the particles. The charging efficiency depends on the particle size and is almost independent of the chemical composition. The charge measured in the electrometer is a measure for the active surface or Fuchs surface. The active surface is proportional to the geometric particle surface $\pi (D_p)^2$ in the range of free molecular motion where the particle size is below the mean free path λ of the carrier gas molecules ($\lambda \cong 66$ nm). For large particles, where the carrier gas is treated as a continuous fluid, the active surface scales with the mobility diameter D_p according to Stokes' law. The intermediate range is interpolated by an empirical function proportional to $D_p^X (D_p)$ where the exponent $X (D_p)$ is a function decreasing from 2 to 1 as D_p increases from the molecular to the Stokes range.

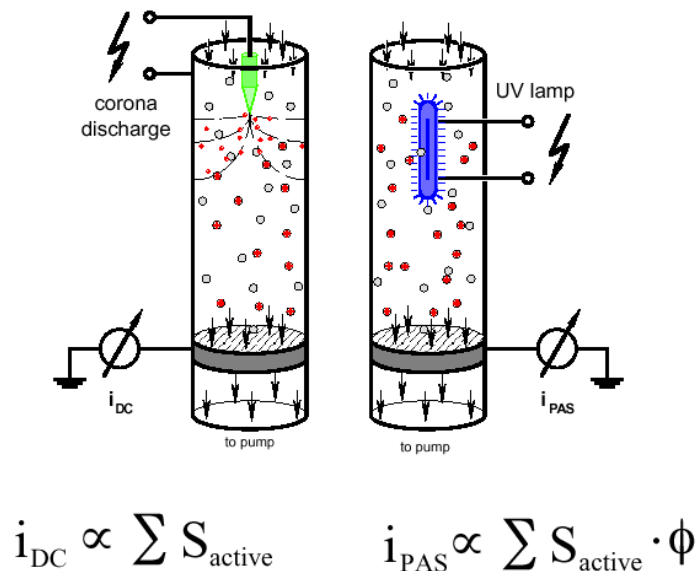


Fig. 8: Principle operation block diagram of PAS und DC sensor

- i_{DC}, i_{PAS} : filter current of DC sensor / PAS
- S_{active} : active surface of a single particle
- ϕ : material coefficient of the aerosol
- \sum : sum over all particles

The calculation of the active surface is based on a relation deduced by Keller et al. [9]. The product of mobility and mass transfer coefficient for gas ions is a constant independent of the particle mobility diameter. This size independent relation allows the calibration of the DC sensor by using standard particle analysing equipment. The calibration is carried out by comparison of the DC signal with the number concentration measured in a condensation particle counter (CPC), both fed with monodisperse aerosol from a differential mobility analyser (DMA).

The photoelectric aerosol sensor (PAS) charges particles with monochromatic 222 nm UV-light from an Excimer lamp. The size dependence of the charging efficiency is similar to that of the DC sensor but the charging efficiency depends on the chemical composition of the particles. Numerous investigations have proved a high photoelectric charging efficiency for carbonaceous soot particles from fossil fuel combustion.

The PAS signal has been shown to correlate well with the concentration of particle bound aromatic hydrocarbons (PAH) for various combustion sources [10] as well as with the elemental carbon content of diesel soot [11]. For non-soot particles in combustion exhaust - e.g. fly ash or volatile particles or water droplets from spontaneous nucleation in the dilution process - the photoelectric charging efficiency with the UV wave length applied in PAS is orders of magnitude lower. PAS is therefore an ideal selective soot detector with low cross sensitivity to other particles and gas compounds.

Simultaneous monitoring of combustion aerosols with PAS and DC offers two valuable pieces of information: the PAS/DC ratio is characteristic for different combustion sources which allows source apportionment in a limited range (see Fig. 9). It is furthermore possible to identify the presence of additional soot particles in combustion exhaust.

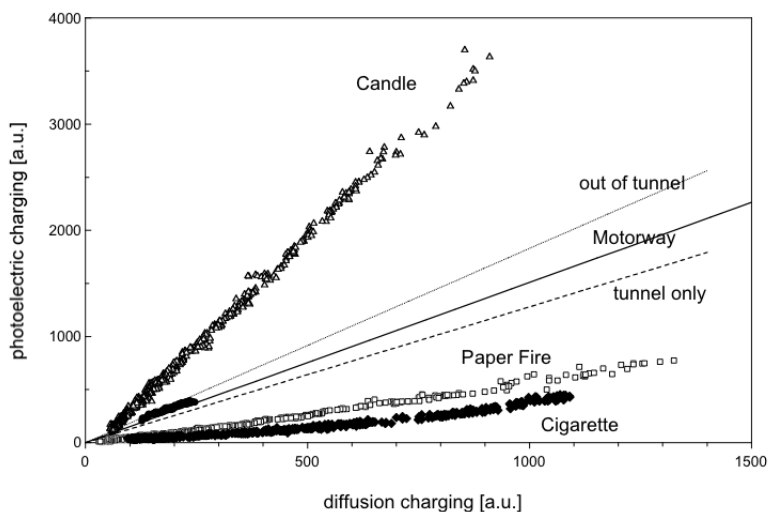


Fig. 9: PAS versus DC signal for combustion aerosols from different sources

3. References

1. Mayer, A, Czerwinski, J, Legerer, F, Wyser, M (2002) VERT Particulate Trap Verification. SAE 2002-01-0435
2. Kasper, M, Matter, U, Burtscher, H, Bukowiecki, N, Mayer, A (2001) NanoMet, a New Instrument for On-line Size- and Substance-Specific Particle Emission Analysis. SAE 2001-01-0216
3. Kasper, M. (2004) The Number Concentration of Non-Volatile Particles Design Study for an Instrument According to the PMP Recommendations, SAE 2004-01-0960
4. Wang, S C, Flagan, R C (1990) Scanning Electrical Mobility Spectrometer, Aerosol Sci. Technol. 13, 230-240
5. Hinds, W C (1999) Aerosol Technology, 2nd ed., J. Wiley & Sons New York
6. Adachi, M., Kousaka, Y., and Okuyama, K. (1985) J. Aerosol Sci. 16, 109
7. Knutson, E.O. and Whitby, K.T. (1975a) J. Aerosol Sci. 6, 443, and (1975b) J. Aerosol Sci. 6, 453
8. Hueglin, Ch., Scherrer, L., Burtscher, H. (1997) An Accurate, Continuously Adjustable Dilution System (1:10 to 1:104) for Submicron Aerosols, J. Aerosol Sci. 28/6, 1049-1055
9. Keller, A., Fierz, M., Siegmann, K., Siegmann, H.C., Filippov, A. (2001) Surface Science with Nanosized Particles in a Carrier Gas, J. Vac. Sci. Technol. A19(1)
10. Burtscher, H., Siegmann, H.C. (1994) Monitoring PAH-Emissions from Combustion Processes by Photoelectric Charging, Combust. Sci. Tech. 101, 327-332
11. Matter, U., Siegmann, H.C., Burtscher, H. (1999) Dynamic Field Measurement of Submicron Particles from Diesel Engines, Environ. Sci. Tech. 33, 1946-1952