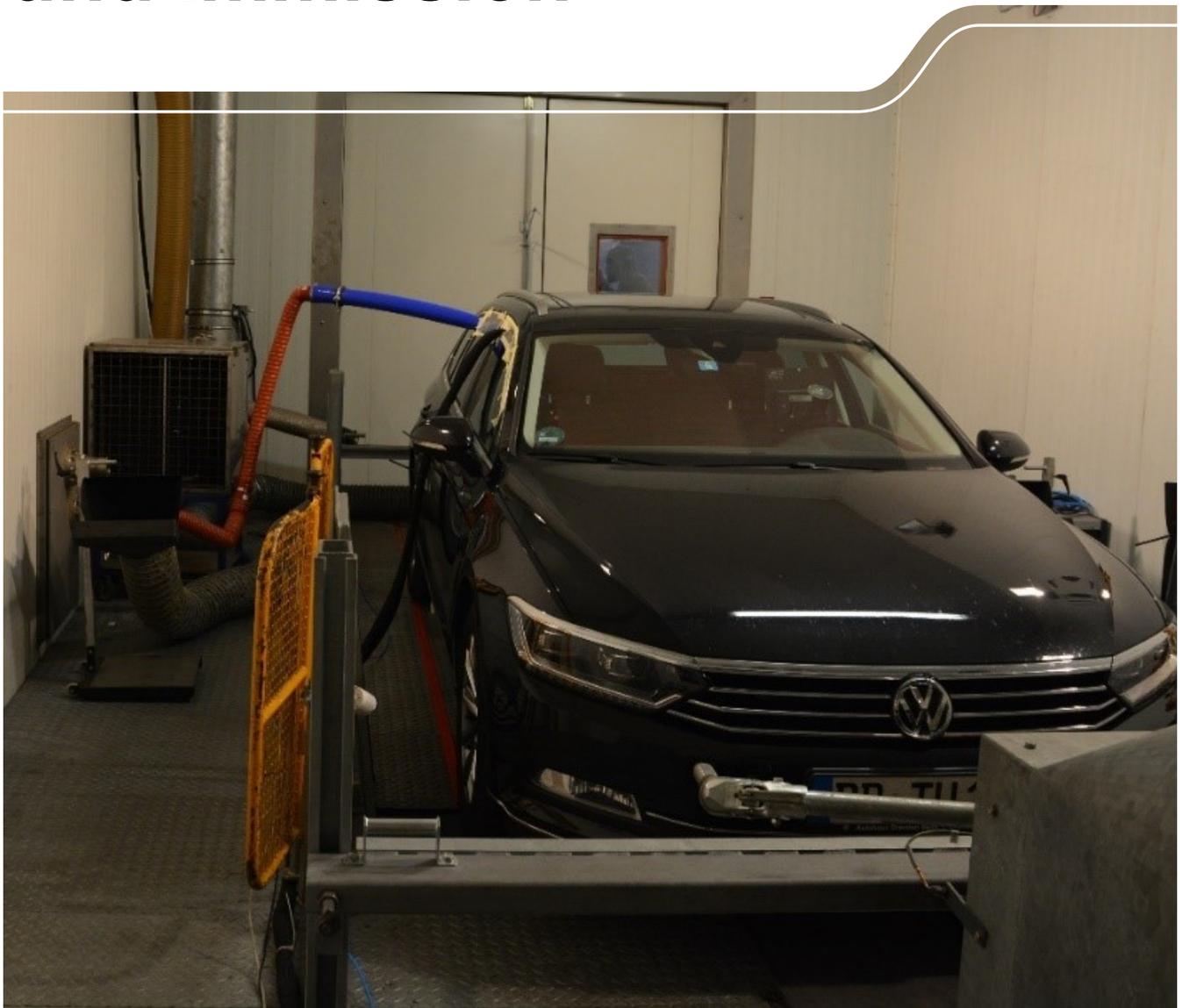


# Partikel in PKW-Emission und Immission



# Partikel in PKW-Emission und Immission

Kay Weinhold<sup>1</sup>, Bader Al Malkawi<sup>1</sup>, Maximilian Dobberkau<sup>2</sup>, Max Kulpe<sup>2</sup>, Tilo Roß<sup>2</sup>  
Frank Atzler<sup>2</sup>, Alfred Wiedensohler<sup>1</sup>

1 Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V.  
Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

2 Technische Universität Dresden  
Institut für Automobiltechnik  
Lehrstuhl Verbrennungsmotoren und Antriebssysteme  
George-Bähr-Str. 1b, 01069 Dresden

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau der Klimakammer und Messgeräte</b> .....	<b>12</b>
2.1	Prüfstand / Messtechnik .....	12
2.2	Aerosolmessgeräte vom TROPOS.....	15
<b>3</b>	<b>Erläuterung der verwendeten Fahrzeuge</b> .....	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>Vermessung der Fahrzeuge durch die TU-Dresden</b> .....	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>Qualitätssicherung der Partikelgrößenspektrometer am TROPOS</b> .....	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Charakterisierung der Klimakammer</b> .....	<b>28</b>
6.1	Partikelmessung in der Kammer ohne Fahrzeugbetrieb, Fahrzeug in der Kammer abgestellt .....	28
6.2	Partikelmessung in der Kammer mit Fahrzeugbetrieb, Abgas zum CVS-Tunnel ausgeleitet.....	31
6.3	Rußmessung in der Kammer, Fahrzeug nicht auf der Rolle aber auf dem Prüfstand .....	32
6.4	Partikelmessung in der Kammer, Fahrzeug auf der Rolle .....	33
<b>7</b>	<b>Kammerexperimente bei Temperaturen von 0 °C, 15 °C und 30 °C</b> .....	<b>35</b>
7.1	VW Golf 7 GTI TCR, mit Partikelfilter .....	37
7.2	Ford Focus MK3 Turnier, ohne Partikelfilter.....	42
7.3	Skoda Superb 2, mit Partikelfilter .....	46
7.4	VW Golf 6 TSI, ohne Partikelfilter .....	51
7.5	VW Passat B8 Variant, mit Partikelfilter .....	55
<b>8</b>	<b>Ergebnisse der Kammerexperimente</b> .....	<b>60</b>
<b>9</b>	<b>Vergleich der Kammermessungen zu den Messstationen</b> .....	<b>65</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>70</b>
<b>11</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>72</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>80</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Partikelgrößenverteilung sowie zugehörige Moden bei der unvollständigen Verbrennung in Diesel- (oben) sowie Benzinmotoren (unten).....	10
Abbildung 2: Mittlere Partikelgrößenverteilung der verkehrsnahen Messstation Dresden-Nord über einen Zeitraum von sechs Monaten.....	11
Abbildung 3: Schema des Abgasrollenprüfstandes .....	12
Abbildung 6: Foto vom Aufbau der Aerosolmesstechnik.....	16
Abbildung 7: Schema der Arbeitsweise eines Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometers.....	17
Abbildung 8: WLTC nach Verordnung EU 2017/1151 der Europäischen Kommission .....	20
Abbildung 9: Filter Partikelgravimetrie VW Golf 7 TCR und VW Golf 6 TSI. ....	23
Abbildung 10: Atmosphärennachbildung VW Golf 7 GTI TCR bei 15 °C .....	24
Abbildung 11: CO <sub>2</sub> -Konzentration KW 43 (oben); CO <sub>2</sub> -Abgleich Senseair-Analysator und Horiba APNA 370, Test Passat B8 15 °C (unten). ....	25
Abbildung 12: Zeitreihe der TROPOS Größenspektrometer im Vergleich zu einem Referenz Gesamtpartikelzähler über einen Zeitraum von 12 Stunden, vom Oktober 15; 18:00 Uhr bis Oktober 16; 06:00 Uhr.....	26
Abbildung 13: Partikelgrößenverteilungen der MPSS-Systeme DE-TROPOS Reference MPSS No.1 vs. MPSS No.4 für einen Zeitraum von 12 Stunden, Oktober 15; 18:00 Uhr bis Oktober 16; 06:00 Uhr.....	27
Abbildung 14: Korrelation zwischen Referenz-MPSS No.1 und MPSS No.4 über einen Zeitraum von 12 Stunden vom Oktober 15; 18:00 Uhr bis Oktober 16; 06:00 Uhr.....	27
Abbildung 15: Zeitreihen der Partikelanzahlkonzentration N10-800 nm der Messstation Dresden-Winckelmannstraße und der Klimakammer über einen Zeitraum von 3 Tagen.....	28
Abbildung 16: Partikelgrößenverteilungen der Messstation Dresden-Winckelmannstraße und der Klimakammer über einen Zeitraum von 3 Tagen.....	29
Abbildung 17: Partikelgrößenverteilungen der Messstation Dresden-Winckelmannstraße und der Klimakammer während einer Nacht, 29.10.2019, 18:00 Uhr bis 30.10.2019, 06:00 Uhr. ....	30
Abbildung 18: Zeitreihen der Rußmassenkonzentration an der Messstation Dresden-Winckelmannstraße und der Klimakammer über einen Zeitraum von 3 Tagen. ....	30
Abbildung 19: Zeitreihen der Rußmassenkonzentration während 3 verschiedener WLTC. Die Abgasanlage der PKWs wurde gasdicht an die Abgasmessanlage angeschlossen. ....	31
Abbildung 20: Position der beiden AE51 während der Zusatzmessung im Juli 2020.....	32
Abbildung 21: Rußmassenkonzentration bei unterschiedlichen Zuständen der Kammer, ohne Fahrzeug.....	32
Abbildung 22: Rußmassenkonzentration bei unterschiedlichen Zuständen der Kammer, ohne Fahrzeugbetrieb .....	33
Abbildung 23: Rußmassenkonzentration bei unterschiedlichen Zuständen der Kammer, Fahrzeug geschleppt .....	33
Abbildung 24: Rußmassenkonzentration bei Fahrzeugbetrieb, Motorabgas abgeleitet .....	34
Abbildung 25: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 0 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter). ....	37
Abbildung 26: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 0 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter). ....	38
Abbildung 27: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 15 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter). ....	38
Abbildung 28: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 15 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter). ....	39
Abbildung 29: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 30 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter). ....	39
Abbildung 30: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 30 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter). ....	40
Abbildung 31: Partikelgrößenverteilung vom VW Golf 7 GTI (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	40
Abbildung 32: Zeitreihe der Partikelanzahlkonzentration vom VW Golf 7 GTI (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	41
Abbildung 33: Zeitreihe der Rußmassenkonzentration vom VW Golf 7 GTI (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	41

Abbildung 34: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 0 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter). .....	42
Abbildung 35: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 0 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter). .....	42
Abbildung 36: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 15 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter). .....	43
Abbildung 37: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 15 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter). .....	43
Abbildung 38: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 30 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter). .....	44
Abbildung 39: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 30 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter). .....	44
Abbildung 40: Partikelgrößenverteilung vom Ford Focus (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	45
Abbildung 41: Zeitreihe der Partikelanzahlkonzentration vom Ford Focus (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	45
Abbildung 42: Zeitreihe der Rußmassenkonzentration vom Ford Focus (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	46
Abbildung 43: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 0 °C (Skoda Superb, mit Partikelfilter). .....	46
Abbildung 44: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 0 °C (Skoda Superb, mit Partikelfilter). .....	47
Abbildung 45: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 15 °C (Skoda Superb, mit Partikelfilter). .....	47
Abbildung 46: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 15 °C (Skoda Superb, mit Partikelfilter). .....	48
Abbildung 47: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 30 °C (Skoda Superb, mit Partikelfilter). .....	48
Abbildung 48: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 30 °C (Skoda Superb, mit Partikelfilter). .....	49
Abbildung 49: Partikelgrößenverteilung vom Skoda Superb (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	49
Abbildung 50: Zeitreihe der Partikelanzahlkonzentration vom Skoda Superb (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	50
Abbildung 51: Zeitreihe der Rußmassenkonzentration vom Skoda Superb (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	50
Abbildung 52: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 0 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter). .....	51
Abbildung 53: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 0 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter). .....	51
Abbildung 54: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 15 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter). .....	52
Abbildung 55: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 15 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter). .....	52
Abbildung 56: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 30 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter). .....	53
Abbildung 57: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 30 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter). .....	53
Abbildung 58: Partikelgrößenverteilung vom VW Golf 6 (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	54
Abbildung 59: Zeitreihe der Partikelanzahlkonzentration vom VW Golf 6 (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	54
Abbildung 60: Zeitreihe der Rußmassenkonzentration vom VW Golf 6 (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	55
Abbildung 61: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 0 °C (VW Passat, mit Partikelfilter). .....	55
Abbildung 62: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 0 °C (VW Passat, mit Partikelfilter). .....	56
Abbildung 63: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 15 °C (VW Passat, mit Partikelfilter). .....	56
Abbildung 64: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 15 °C (VW Passat, mit Partikelfilter). .....	57
Abbildung 65: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 30 °C (VW Passat, mit Partikelfilter). .....	57
Abbildung 66: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 30 °C (VW Passat, mit Partikelfilter). .....	58
Abbildung 67: Partikelgrößenverteilung vom VW Passat (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. ....	58
Abbildung 68: Zeitreihe der Partikelanzahlkonzentration vom VW Passat (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	59
Abbildung 69: Zeitreihe der Rußmassenkonzentration vom VW Passat (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.....	59
Abbildung 70: Partikelgrößenverteilung der PKW-Modelle bei 0 °C. ....	60
Abbildung 71: Partikelgrößenverteilung der PKW-Modelle bei 15 °C. ....	60

Abbildung 72: Partikelgrößenverteilung der PKW-Modelle bei 30 °C.....	61
Abbildung 73: Partikelgrößenverteilung der PKW-Modelle in Abhängigkeit von der Temperatur und ihrer Variabilität.....	62
Abbildung 74: Partikelanzahlkonzentration der N-Klassen bei unterschiedlichen Temperaturen, PKW-Modelle farblich kodiert. ....	63
Abbildung 75: Rußmassenkonzentration der PKW-Modelle in Abhängigkeit von der Temperatur. ....	64
Abbildung 76: Partikelanzahlkonzentration der Messstation Dresden-Nord und Leipzig-Mitte im Vergleich zu den im Prüfstand gemessenen PKW-Modellen. ....	66
Abbildung 77: Rußmassenkonzentration der Messstationen Dresden-Nord, Dresden Winckelmannstraße und in der Kammer bei unterschiedlichen PKW-Modellen. ....	67
Abbildung 78: Partikelgrößenverteilung bei 15 °C. Dargestellt sind die Messstationen Dresden-Nord, Leipzig-Mitte und die PKW-Modelle, gemessen in der Klimakammer TU Dresden. ....	67
Abbildung 79: Boxplot der 8 N-Klassen. Die Messstationen und PKW-Modelle werden in Abhängigkeit der Temperaturen 0 °C, 15 °C und 30 °C unterschieden.....	68
Abbildung 80: Rußmassenkonzentrationen für die Messstationen Leipzig-Mitte, Dresden-Nord, Dresden-Winckelmannstraße und die Klimakammer beim Betrieb unterschiedlicher PKW-Modelle.....	69

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Fahrzeugangaben zum VW Golf 7 GTI TCR .....	18
Tabelle 2:	Fahrzeugangaben zum Ford Focus MK3 Turnier .....	18
Tabelle 3:	Fahrzeugangaben zum Skoda Superb 2 Kombi .....	18
Tabelle 4:	Fahrzeugangaben zum VW Golf 6 TSI .....	19
Tabelle 5:	Fahrzeugangaben zum VW Passat B8 Variant .....	19
Tabelle 6:	Schadstoffgrenzwerte für Fahrzeuge mit Ottomotor .....	20
Tabelle 7:	Schadstoffgrenzwerte für Fahrzeuge mit Dieselmotor .....	20
Tabelle 8:	Ergebnisse Grundvermessung WLTC .....	22
Tabelle 9:	Messzyklen in den 1 ½ Wochen Messzeitraum .....	36

## Abkürzungsverzeichnis

BfUL	Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
C	Kohlenstoff
CLA	Chemilumineszens-Analysator
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CPC	Kondensationspartikelzähler
CVS	Constant Volume Sampling
h	Stunde
HC	Kohlenwasserstoffe
km	Kilometer
KW	Kalenderwoche
kW	Kilowatt
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt Landwirtschaft und Geologie
LKW	Lastkraftwagen
m	Masse
MBq	Megabecquerel
mg	Milligramm
MPSS	Partikelgrößenspektrometer
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
nm	Nanometer
NMHC	Kohlenwasserstoffe ohne Methan
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
O <sub>3</sub>	Ozon
P <sub>max</sub>	Maximale Leistung
PEMS	Portables Emissions-Messsystem
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
s	Sekunde
T-CPC	Gesamtpartikelzähler
T.HC	Totally. Hydro Carbons (Gesamtkohlenstoff)
TROPOS	Leipnitz- Institut für Troposphärenforschung
TU Dresden	Technische Universität Dresden
UFP	Ultrafeine Partikel
v	Geschwindigkeit
VW	Volkswagen
WLTC	World Wide Harmonized Light Vehicle Test Cycle
#/cm <sup>3</sup>	Partikelanzahlkonzentration je Kubikzentimeter
°C	Grad Celsius

# 1 Einleitung

Ultrafeine Partikel in der Außenluft (UFP) mit einem Partikeldurchmesser kleiner als 100 nm rücken neben den gesetzlich geregelten Luftschadstoffen zunehmend in den Fokus der öffentlichen Diskussion. Moderne PKW-Motoren ab EURO 5 gelten hinsichtlich ultrafeiner Partikel als besonders emissionsrelevant. Die zunehmende Marktdurchdringung der partikelrelevanten PKW-Motoren war in bisherigen Immissionsmessungen nicht erkennbar (Löschau et al., 2017; Pausch et al., 2019). Es war nicht bekannt, ob die unterschiedlichen Messverfahren für Emission und Immission oder Partikel-Umwandlungsprozesse nach Verlassen der Emissionsquelle oder der im Verhältnis zur Gesamtzahl an Kfz noch geringe Anteil von EURO-5- und EURO -6-d-Temp-PKW Ursachen dafür sind.

**Ziel des Projektes war es deshalb, das tatsächliche Partikel-Emissionsverhalten von EURO-5- und den z. modernsten EURO 6 d-Temp-PKW auf der Basis von Messungen im verdünnten Abgas zu ermitteln und gleichzeitig Hinweise zum Verhalten der emittierten Partikel in der Außenluft zu erhalten.** Schlussfolgerungen für die Weiterentwicklung der Konzeption für das sächsische Luftgüte-Messnetz sollen gezogen werden.

Um diese Frage zu beantworten wurden im Klimarollenprüfstand des Lehrstuhles „Verbrennungsmotoren und Antriebssysteme“, LVAS, der Technischen Universität Dresden Versuche durchgeführt. Diese beinhalteten die Vermessung der Emissionen im aktuellen Prüfzyklus WLTC sowie Messungen der Immissionen in der Klimakammer. Dabei wurde untersucht, ob die Immission in ähnlicher Weise dargestellt werden kann, wie sie unter realen Bedingungen an einer Messstation einer verkehrsbelasteten Region gemessen wird.

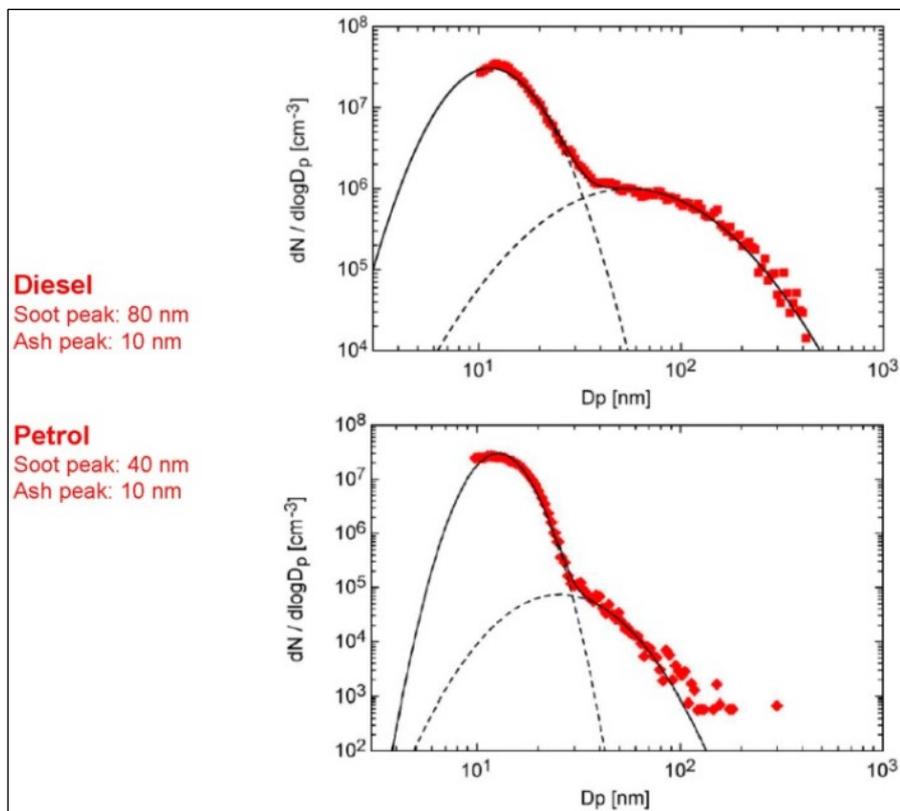
Zur Regelung der Immissionsbelastung der Prüfstandsluft wurden die Tracer  $\text{NO}_x$ - und  $\text{CO}_2$  als Indikatoren verwendet. Es wurde versucht, die ermittelten ppm-Konzentrationen an der Messstation Dresden-Nord durch Variation der Zu- und Abluftströme in der Klimakammer nachzustellen. Für das Vorhaben wurden jeweils ein Diesel- und ein Otto-PKW der Emissionsklassen EURO-5- und EURO-6 genutzt. Der Zeitplan sah für jedes der Fahrzeuge zwei Messblöcke ohne Wiederholungsmessungen vor. Im ersten Teil erfolgte zur Bestimmung der Fahrzeugemission und des Fahrzeugzustandes eine Vermessung im WLTC bei Normbedingungen. Im zweiten Messblock wurde bei 3 unterschiedlichen Temperaturen (0°C, 15°C und 30°C) eine Stadtfahrt simuliert.

UFP sind per Definition des VDI 2009 luftgetragene Partikel mit einem Durchmesser zwischen 1 nm und 100 nm. Sie sind damit eine Teilfraktion der „feinen“ Partikel, welche den gesamten Größenbereich kleiner 1000 nm abdecken. Die weitere Unterteilung der Partikelfraktion in UFP bei 100 nm ist dadurch zu begründen, dass die Quellen unterschiedlicher Herkunft sein können und zudem andere mikrophysikalische und chemische Eigenschaften aufweisen können. UFP bilden zahlenmäßig den größten Anteil der Partikelanzahlkonzentration. Damit spielen sie eine wesentliche Rolle in der Betrachtung der Luftgüte. Die Bestimmung der mikrophysikalischen Eigenschaften von UFP wurde durch wissenschaftliche Studien in den letzten Jahren deutlich verbessert. Unklarheiten hingegen gibt es nach wie vor bei den gesundheitlichen Auswirkungen. Diese sind unter anderem das Eindringen in den menschlichen Körper, deren Lungen- und Zellgängigkeit oder deren Potential, als krebserregende Stoffe zu fungieren.

Die kleinsten Partikel mit einem Durchmesser von kleiner als 10 nm werden größtenteils aus der Gasphase gebildet und sind sehr kurzlebig, da sie an Wände diffundieren oder durch Koagulation größere Partikel bilden. Dies wird als homogene Nukleation oder Partikelneubildung bezeichnet. Diese Partikel wachsen durch Kondensations- und Koagulationsprozesse an, sodass sie in kürzester Zeit Größen zwischen 50 nm und 100 nm erreichen können. Durch weitere Kondensationsprozesse wachsen sie in den Bereich des feinen Aerosols, des sogenannten Akkumulationsmodes, auf über 100 nm an. Diese Partikel besitzen die größte atmosphärische Lebensdauer von einigen Tagen bis Wochen und können über größere Entfernungen innerhalb der Stadt und darüber hinaus transportiert werden. Da sich die mikrophysikalischen Eigenschaften (Größe und Anzahlkonzentration) der UFP durch die oben genannten Prozesse sehr schnell ändern, werden sie den sehr kurzlebigen Schadstoffen zugeordnet. In der Atmosphäre dominieren die ultrafeinen Partikel die Partikelanzahlkonzentration, wogegen feine und grobe Partikel (u. a. Reifen- und Bremsabrieb) die Partikelmassenkonzentration bestimmen. Dies bedeutet, dass ultrafeine Partikel massenmäßig wenig relevant sind und mit den gesetzlich geregelten Parametern bisher nicht erfasst werden.

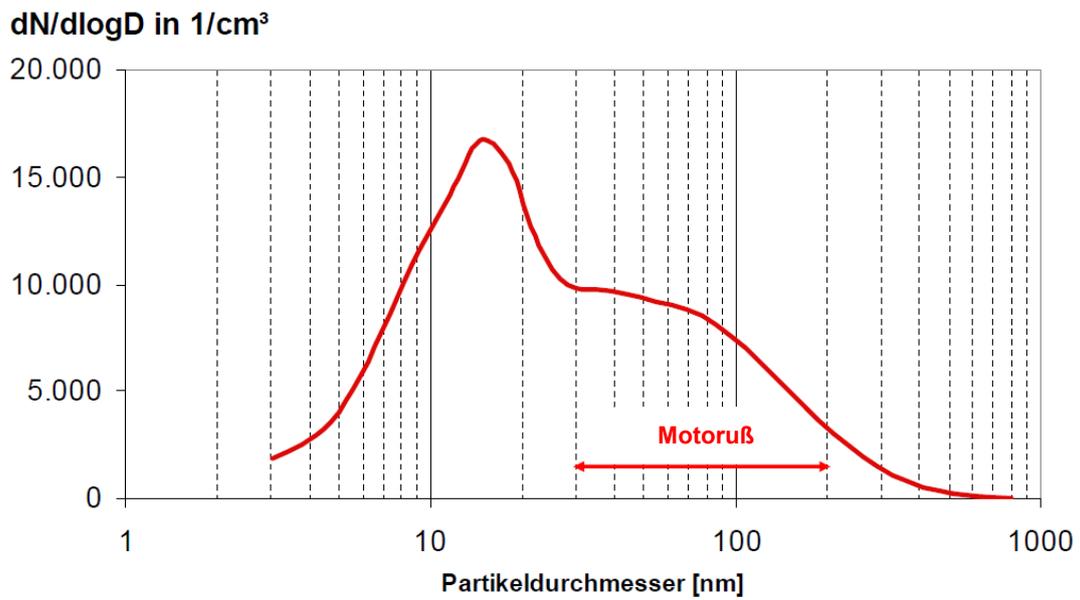
UFP können auf unterschiedliche Weise entstehen. Deren Emissionsquellen sind vorwiegend im Verkehr- aber auch im Industriesektor zu finden. „Durch unvollständige Verbrennungsprozesse werden vor allem durch Kraftfahrzeuge

Partikel mit einem Durchmesser von 10 nm bis 20 nm in die Außenluft emittiert und zeichnen sich durch ein deutliches Maximum in der Partikelgrößenverteilung aus“. (BURTSCHER & MAYER (2015) Dies ist sowohl für Benzin- als auch für Dieselmotoren der Fall. Ein zweites Maximum ergibt sich für Diesel-Fahrzeuge bei etwa 80 nm, für Benzinmotoren bei etwa 40 nm. Die entsprechenden Partikelgrößenverteilungen wurden durch BURTSCHER & MAYER (2015) näher betrachtet, siehe Abbildung 1.



**Abbildung 1: Partikelgrößenverteilung sowie zugehörige Moden bei der unvollständigen Verbrennung in Diesel- (oben) sowie Benzinmotoren (unten); Burtcher & Mayer (2015)**

Ultrafeine Partikel zählen zu den kurzlebigen Luftschadstoffen. Durch dynamische Prozesse wie Diffusion und Koagulation ändert sich die am Auspuff gemessene Partikelgrößenverteilung sehr schnell. In zunehmender Entfernung von der Straße (ca. 3-10 m) nimmt die zuvor am Auspuff emittierte „hohe“ Anzahlkonzentration durch Verdünnungsprozesse mit dem städtischen Hintergrund erheblich ab. Als Beispiel wird an dieser Stelle die Messstation Dresden-Nord, als Mittel über einen Zeitraum von 6 Monaten in Abbildung 2, herangezogen. Die Messstation befindet sich knapp neun Meter von der Straße entfernt. Das Maximum der Partikelgrößenverteilung liegt auch hier unterhalb 20 nm, allerdings ist die Amplitude deutlich geringer als bei Messungen direkt am Auspuff, was den Verdünnungseffekt mit der Entfernung von der Emissionsquelle deutlich veranschaulicht.



**Abbildung 2: Mittlere Partikelgrößenverteilung der verkehrsnahen Messstation Dresden-Nord über einen Zeitraum von sechs Monaten (09/2006-02/2007)**

# 2 Aufbau der Klimakammer und Messgeräte

Dieses Kapitel umfasst eine detaillierte Beschreibung der Klimakammer an der TU Dresden und der verwendeten Gas- und Aerosolmessgeräte. Dazu wird nicht nur die Funktionsweise der Klimakammer als Prüfstelle für verschiedene Kfz erläutert, vielmehr wird die Modifizierung der Messkammer als Modell für eine simulierte Atmosphäre, in der PKW-Modelle mit unterschiedlichen Euro Abgasnormen getestet wurden, beschrieben.

## 2.1 Prüfstand / Messtechnik

### ■ Abgasrollenprüfstand

Wesentliches Anwendungsgebiet des Rollenprüfstands ist es, unter reproduzierbaren Bedingungen die Abgasemission zu messen. Wechselwirkungen zwischen verschiedensten Fahrzeugteilsystemen können hier analysiert und praxisnah dargestellt werden. Den grundlegenden Prüfandaufbau zeigt Abbildung 3. Das Versuchsfahrzeug steht mit der angetriebenen Achse auf der Rolle, die sich in einem klimatisierten Prüfraum befindet, dargestellt durch die gestrichelte Systemgrenze. Über das vor dem Fahrzeug angeordnete Fahrtwindgebläse wird die Motorkühlung realisiert, wobei die Konditionierung der Ansaug- und Kühlluft durch die Klimaanlage gewährleistet wird. Grundlage jeder Fahrzeuguntersuchung ist der Übertrag des Fahrzeuges von der Straße auf den Prüfstand.

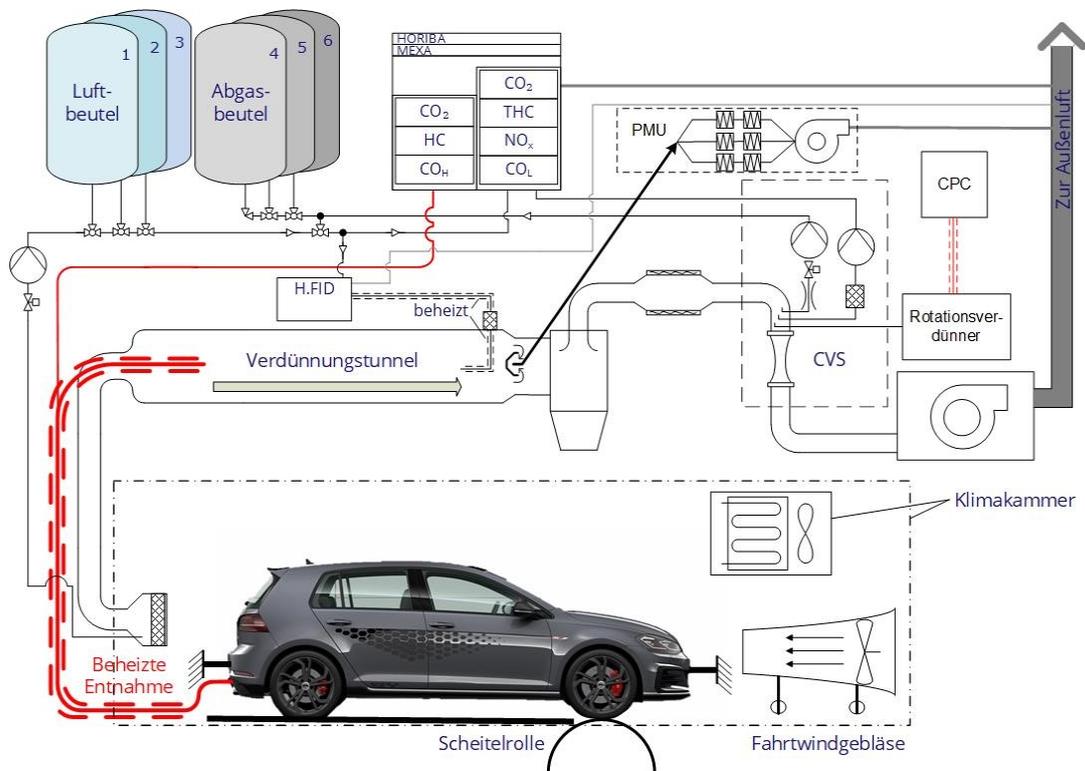


Abbildung 3: Schema des Abgasrollenprüfstandes

Um die Straßenverhältnisse auf der Rolle möglichst realistisch nachzubilden, werden die auf das Fahrzeug wirkende Geschwindigkeit und Zugkraft nachgebildet, was als „Straßenlastsimulation“ bezeichnet wird. Für den Übertrag auf den Rollenprüfstand werden diese Widerstände im Ausrollversuch nach der Verordnung 2017/1151 der europäischen Kommission auf der Straße bestimmt. Für die Messung des Fahrwiderstands auf der Straße wird ein serienmäßiges, eingefahrenes Versuchsfahrzeug auf einer ebenen Strecke lastfrei aus einer spezifizierten Geschwindigkeit, die die Prüfgeschwindigkeit im Zyklus um mindestens 10 km/h übersteigt, ausgerollt. Selbiges wird auf dem Rollenprüfstand wiederholt, um die veränderten Randbedingungen, wie zum Beispiel Reibung in der Rollenlagerung oder eine veränderte Latschfläche des Reifens zu korrigieren. Zur Überprüfung des Fahrzeugzustandes wird eine Constant Volume Sampling Anlage (CVS) verwendet. Das Abgas wird dazu luftdicht am Auspuff des Fahrzeugs abgesaugt (siehe Abbildung 3). Das Abgas gelangt zusammen mit gefilterter Verdünnungsluft aus dem Prüfraum in den sogenannten Verdünnungstunnel. Nach einem Zyklonabscheider wird das Abgas-Luft-Gemisch in einem Wärmetauscher auf konstante Temperatur konditioniert und durchströmt anschließend die CVS-Düse, ein im kritischen Bereich arbeitendes Venturi-Rohr. Bei konstanter Eingangstemperatur ist der Massendurchfluss oberhalb des kritischen Druckverhältnisses konstant. Durch die Einstellung einer konstanten Temperatur im Wärmetauscher sowie der Überwachung des durch den Blower bereitgestellten Unterdrucks ist damit der Abgasvolumen-

strom im CVS-System zu jedem Zeitpunkt konstant und bekannt. Bereits vor der Düse wird kontinuierlich eine Probe des verdünnten Abgases mit konstantem Messgasvolumenstrom entnommen und in einen der Abgasbeutel geleitet. Es muss eine Korrektur der Probenergebnisse um den Schadstoffgehalt der Verdünnungsluft erfolgen, daher wird auch von dieser eine kontinuierliche Probe in den Luftbeuteln gesammelt. Die Beutelauslese findet im Anschluss an den Fahrversuch statt, indem das Beutelgas in die Abgasmessanlage geleitet und ausgewertet wird. Mit dem CVS System ist eine gesetzeskonforme Emissionsberechnung möglich. Durch den bekannten über den Versuch integrierten Volumenstrom des Abgas-Luft-Gemisches kann mit Kenntnis der Schadstoffkonzentration aus den Beuteln eine Berechnung der Emissionsmasse erfolgen. Die Abgasverdünnung ist auch deshalb nötig, um Kondensationseffekte zu vermeiden. Zusätzlich zur Beutelmessung wird eine kontinuierliche Abgasmessung durchgeführt. Weiterhin wird ein definierter Abgasvolumenstrom durch eine Pilzsonde im CVS-Tunnel entnommen und durch zwei Filterebenen geleitet. Durch konditionierte gravimetrische Filtermassenbestimmung vor und nach dem Versuch kann somit die ausgestoßene Partikelmasse (PM) gemessen werden. Die Partikelanzahl (PN) wird über einen Kondensationskernzähler der Firma AVL kontinuierlich vor der Venturidüse gemessen. Die Schadstoffkonzentrationen werden durch eine Abgasmessanlage Horiba 9000 analysiert.

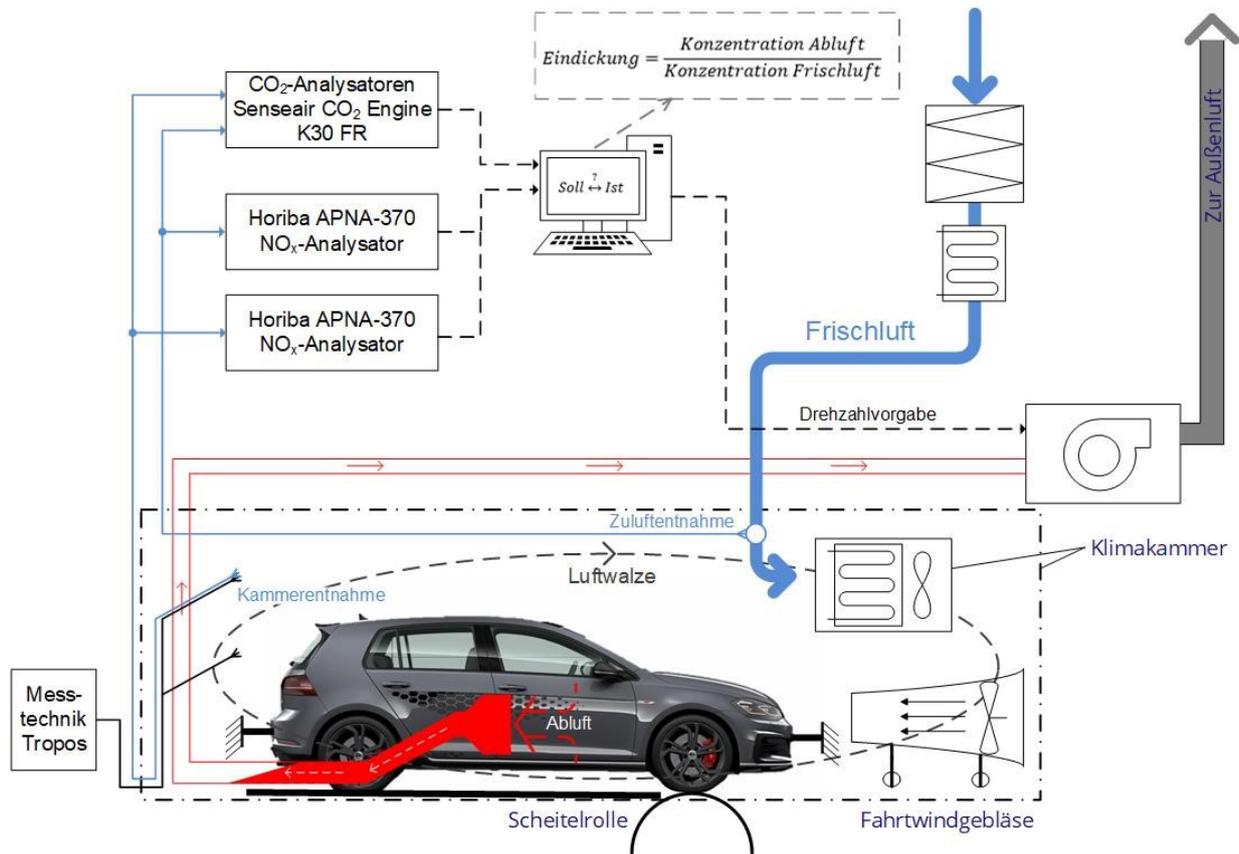
CO und CO<sub>2</sub> werden über einen nichtdispersiven Infrarot- Gasanalysator detektiert. Die Eigenschaft der Gase CO und CO<sub>2</sub>, elektromagnetische Strahlung im mittleren infraroten Bereich (d. h. Wellenlängen 3 bis 50 µm) zu absorbieren, wird dabei genutzt. Eine Lichtwelle im infraroten Bereich durchstrahlt hierbei zwei Zellen, eine Messzelle und eine mit Stickstoff gefüllte Referenzzelle. Dabei wird die Strahlung teilweise vom Messgas absorbiert. Nicht vom Messgas absorbierte Strahlung erwärmt anschließend eine Detektorzelle. Messtechnisch ausgewertet wird dann die Druckänderung durch die Erwärmung dieser Zelle im Vergleich zur Referenzzelle. Abwechselndes Verschließen und Freigeben der Infrarotquelle durch das sogenannte „Chopperrad“ bewirkt ein alternierendes Signal, was zu einer Erhöhung der Messgenauigkeit führt. Entsprechend ihrem Absorptionsspektrum erfolgt die Trennung zwischen CO und CO<sub>2</sub> durch einen optischen Filter, der der Detektorzelle vorgelagert ist.

NO<sub>x</sub> wird mit einem Chemiluminiszenzanalysator (CLA) gemessen. Chemilumineszenz ist eine chemische Reaktion, bei der sichtbare elektromagnetische Strahlung, d. h. sichtbares Licht, emittiert wird. Im Analysator wird das Messgas in Kontakt mit Ozon (O<sub>3</sub>) gebracht. Es kommt in Folge zu einer Oxidation von NO zu NO<sub>2</sub>. Ein Teil des NO<sub>2</sub> geht bei der Oxidation in einen angeregten, also energetisch höheren Zustand über. Um den energetischen Grundzustand wiederherzustellen, wird die überschüssige Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung abgegeben. Mit einem photoelektrischen Sensor wird die Stärke des emittierten Lichts erfasst. Lichtstärke und Schadstoffkonzentration sind hierbei direkt proportional. Prinzipbedingt kann der CLA also nur die NO-Konzentration direkt messen. Im Fall einer NO<sub>x</sub>-Messung wird das Messgas vor der Messzelle über einen Konverter geleitet, in welchem eine Umwandlung von NO<sub>x</sub> in NO stattfindet.

Der Flammenionisations-Detektor FID dient der Messung der Kohlenwasserstoff-Emission T.HC. Das Messgas wird in einer Wasserstoffflamme im elektrischen Feld verbrannt, wobei es zur Ionisation der Kohlenwasserstoffe kommt. An einer Elektrode werden die aus den C-Ionen frei gewordenen Elektronen erfasst. Stromfluss und HC-Konzentration sind proportional.

#### ■ Atmosphärennachbildung

Zur Bereitstellung äquivalenter Immissionskonzentrationen, wie sie an den Messstationen gemessen werden, wird das Abgas des Fahrzeuges in die Prüfkammer geleitet. Die Abgasabsaugung wird in Fahrzeuginnenraumrichtung auf Höhe der hinteren Türen auf beiden Fahrzeugseiten platziert, um eine Kurzschlusspülung des Abgases zu verhindern. Durch Analyse der Raumkonzentration an CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> im Vergleich zur Frischluftkonzentration, kann eine definierte Eindickung im Raum durch Regelung des Volumenstromes der Abgasabsaugung eingestellt werden. Abbildung 4 zeigt dazu den schematischen Prüfstands Aufbau.

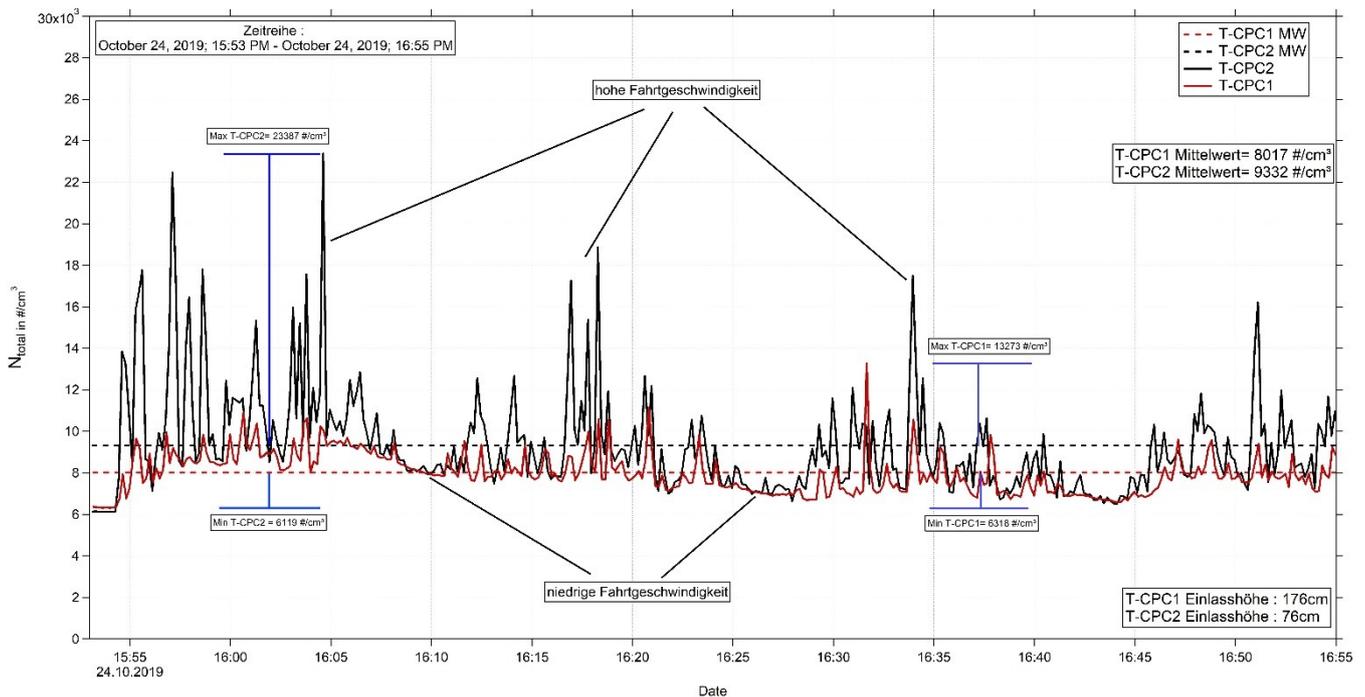


**Abbildung 4: Schema der Atmosphärennachbildung am Abgasrollenprüfstand**

Die Messung der Kammerkonzentration erfolgt nach Absprache mit den Mitarbeitern des Leibnitz-Instituts für Troposphärenforschung hinter und oberhalb des Fahrzeuges. An diesen Stellen befindet sich ebenfalls die Partikelprobenentnahme. Im Raum bildet sich durch die Gebläse der Klimatisierung eine Luftwalze aus, die im Uhrzeigersinn verläuft (Blickrichtung: auf die Beifahrerseite, Fahrzeug in Fahrtrichtung). Weiterhin trägt das Fahrtwindgebläse, das einen fahrgeschwindigkeitsäquivalenten Fahrtwind realisiert, zur Vermischung der Abgase bei. Die Entnahme an dieser Stelle lässt eine gute Durchmischung des Abgases und der Kammerluft vermuten und befindet sich außerhalb des Turbulenzfeldes nach Abriss der Fahrzeugumströmung hinter dem Fahrzeug. Die Leitungslängen von Frischluftentnahme und Abluftentnahme sind gleich. Erst kurz vor den Analysatoren teilt sich die Probenentnahme auf die vier Gasanalysatoren auf. Zur Analyse der Stickoxidimmission wurden Horiba APNA 370 Gasanalysatoren verwendet, welche von der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) zur Verfügung gestellt wurden. Diese arbeiten ebenso wie die lehrstuhleigenen Stickoxidanalysatoren mit dem Chemilumineszenzverfahren, messen jedoch in deutlich geringeren Konzentrationsbereichen. Die Analysatoren wurden vor Übergabe an den Lehrstuhl durch die BfUL kalibriert. Die CO<sub>2</sub>-Messung erfolgt über Analysatoren des Typs CO<sub>2</sub> Engine K30 FR der Firma Senseair. Senseair nutzt ebenfalls nichtdispersive Infrarot- Gasanalysatoren zur CO<sub>2</sub>-Messung. Die Analysatoren zeichnen sich durch eine sehr kompakte und robuste Bauweise aus und eignen sich durch den Messbereich von 0-5000 ppm zur Immissionsmessung. Die parallele CO<sub>2</sub>-Messlinie dient als Rückfallebene, da zu erwarten ist, dass Fahrzeuge der Abgasklasse Euro 6d-TEMP kaum Stickoxide emittieren und sich diese gegebenenfalls nicht als Tracer zur Einstellung der Raumkonzentration eignen. Kohlenstoffdioxid hingegen ist, als Hauptverbrennungsprodukt, immer in ausreichender Konzentration vorhanden.

## 2.2 Aerosolmessgeräte vom TROPOS

Wie schon im Abschnitt 2.1. „Aufbau der Klimakammer - Atmosphärennachbildung“ erwähnt, wurden am hinteren Ende der Messkammer, zwei 3/8 Zoll Einlassrohre mit jeweils einem Gesamtfluss von 8 l/min verlegt. Die Einlassöffnung lag im Innenraum der Kammer in einer Höhe von 0.76 m und 1.76 m über der Aufstandsebene des Fahrzeuges und in Fahrtrichtung. Dadurch wurden zwei verschiedene Lauflängen für das ausgestoßene Aerosol vom Auspuff des PKW realisiert, sodass eine unterschiedlich intensive Verdünnung mit der Luftströmung der Kammer erwartet werden kann. Das Aerosol wird durch die Luftwalze umgelenkt und über dem Fahrzeug zum Ventilationssystem transportiert. Zur Definition der Entnahmepunkte, wurden zwei Gesamtpartikelzähler genutzt. Der Einlass in Auspuffhöhe zeigt eine eher direkte aber schon verdünnte Partikelzählung. Die Variabilität ist aufgrund dynamischer Lastwechsel sehr hoch. Die Emissionen der PKW in Beschleunigungsphasen sind nahezu direkt in dieser Entnahmestelle sichtbar. Die zweite Entnahmestelle in einer Höhe von 1.76 m entspricht eher den realistischen Bedingungen einer Messstation. Dies zeigt die geringere Variabilität innerhalb eines Messzyklus. Exemplarisch wird in Abbildung 5 diese Variabilität während eines durchgeführten Messzyklus veranschaulicht.



**Abbildung 5: Vergleich der beiden T-CPC 1/2 während eines Messzyklus. Dargestellt ist die Variabilität in Beschleunigungs- und Ruhephasen.**

Der Abstand des PKW zur Rückwand der Kammer betrug ungefähr 2 m, sodass die umströmende Luft stark umgelenkt werden muss. Dies lässt eine hohe Turbulenz hinter dem Fahrzeug vermuten, welche abhängig vom verwendeten PKW (Länge, Breite und Anzahl der Auspuffrohre) und der im Messzyklus wechselnden Fahrzeuggeschwindigkeit, respektive Luftgeschwindigkeit ist und eine reproduzierbare definierte Verdünnung an der Entnahme erschwert. Erhöhte Verluste von UFP in der Entnahme sollten verhindert werden, weswegen die Leitungslänge für die Probenahme zum Messgerät minimal gestaltet werden musste. Die temperaturempfindliche Messtechnik musste jedoch außerhalb der Kammer platziert werden. Ein anderer Standort für die Aerosolmesstechnik war somit nicht möglich.

Die ca. 2 m langen Einlassrohre wurden unter der Türöffnung entlang in einen zweiten Raum geleitet, der die Aerosolmesstechnik beinhaltet, siehe **Abbildung 6**.



**Abbildung 6: Foto vom Aufbau der Aerosolmesstechnik. Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer und die beiden Gesamtpartikelzähler (T-CPC 1&2) auf der linken Seite und der Rußmonitor auf der rechten Seite. Im Hintergrund ist die Flügeltür zur Klimakammer. Foto: K. Weinhold (TROPOS)**

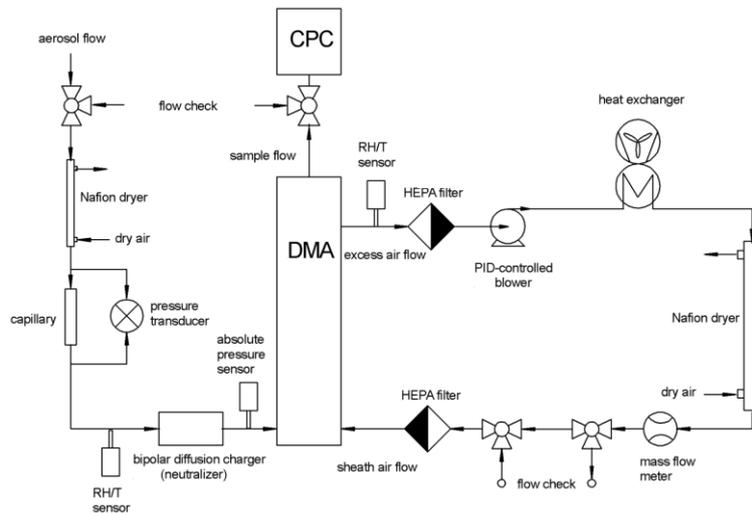
Folgende Messgeräte wurden durch TROPOS bereitgestellt und betrieben:

1. Ein Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer (Mobility Particle Size Spectrometer - MPSS) mit einem Scanbereich von 7 nm bis 800 nm.
2. Zwei Kondensationspartikelzähler (T-CPC) wobei der T-CPC 1 an der Probenahme in 1.76 m Höhe und der T-CPC 2 in 0.76 m über Grund angeschlossen wurde.
3. Einen Rußmonitor (MAAP), der die Rußmassenkonzentration detektiert.

Die im Punkt 2 erwähnten Kondensationspartikelzähler (Condensation Particle Counter, CPC) liefern die im Experiment dargestellte Gesamtpartikelanzahlkonzentration an den zwei Probenahmestellen in einer Zeitauflösung von 10 Sekunden. Dieses Messgerät gibt lediglich eine Aussage über die Gesamtpartikelanzahl jedoch keine Aussage über die größenabhängige Anzahl der UFP. Das Aerosol wird dabei im ersten Schritt im Sättiger (39 °C) mit Butanol-Dampf gesättigt. In einem zweiten Schritt wird das mit Butanol gesättigte Aerosol in eine gekühlte Kondensationsstrecke (22 °C) geleitet. Durch Abkühlung tritt eine Übersättigung auf, sodass die Partikel in optisch erfassbare Tropfen von einigen Mikrometern aufwachsen und dann im dritten Schritt mittels einer Streulichtmessung gezählt werden können. Der hier im Experiment verwendete CPC ist von der Firma TSI.

Das vom TROPOS bereitgestellte Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer wurde zur kontinuierlichen Erfassung der Partikelanzahlgrößenverteilung entwickelt. Es hat eine Zeitauflösung von 5 min, bestehend aus einem up- und down-Scan von jeweils 2 ½ Minuten. Der Scanbereich erstreckt sich von 7 nm bis 800 nm in bis zu 71 Kanälen. Dies gewährleistet eine sehr hohe Auflösung, aus der sich die geforderten 8 N-Klassen des LfULG berechnen lassen.

Das Messprinzip eines solchen MPSS basiert auf der physikalischen Eigenschaft der elektrischen Mobilität von Aerosolpartikeln, siehe Abbildung 7.



**Abbildung 7: Schema der Arbeitsweise eines Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometers, entwickelt am TROPOS**

Die Partikel werden in einem bipolaren Diffusionsauflader in ein elektrisches Ladungsgleichgewicht gebracht. Häufig werden dafür Krypton85-Quellen mit einer Stärke von 370 MBq oder neuerdings auch Nickel63 mit einer Stärke von 100 MBq verwendet. Anschließend werden die Partikel im differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA) in einem elektrischen Feld nach ihrer elektrischen Mobilität klassiert und einem Kondensationspartikelzähler (CPC) zugeführt. Dort werden sie letztendlich gezählt. Mithilfe einer Ladungsinversionsroutine kann aus der gemessenen Mobilitätsverteilung eine Partikelanzahlgrößenverteilung bestimmt werden. Der Vorteil der Messung der Partikelanzahlgrößenverteilung liegt in der partikelgrößenabhängigen Konzentrationsbestimmung. Damit können mehr Informationen und Schlussfolgerungen zur Herkunft der Partikel gewonnen werden, als im Vergleich zu einer reinen Partikelanzahlkonzentrationsmessung. Die Partikelanzahlkonzentration kann zudem aus dem Integral der Größenverteilung berechnet werden. Oberflächen-, Volumen- und Massenkonzentration sind ebenso berechenbar. Durch die bessere Interpretation der Daten kann schneller auf Quellen von UFP geschlossen werden.

### 3 Erläuterung der verwendeten Fahrzeuge

Da der Partikelaustritt von Verbrennungsmotoren vor allem durch die Direkteinspritzung getrieben ist, wurden Euro 5 und Euro 6 Fahrzeuge als Versuchsträger ausgewählt. Außerdem repräsentieren diese den Großteil der deutschen Fahrzeugflotte mit einem Anteil von insgesamt 53,4 % am 1. Januar 2019 (KRAFTFAHRTBUNDESAMT, 2019). Es wurden fünf Fahrzeuge vermessen, welche im Folgenden kurz beschrieben sind. Es sind zwei verschiedene „Euro-6“-Klassen vertreten. In der Abgasnorm Euro 6c müssen alle Fahrzeuge die Emissionsgrenzwerte auf dem Abgasrollenprüfstand im WLTC einhalten. In der Abgasnorm Euro 6d-TEMP kommt zusätzlich der Nachweis auf der Straße unter realen Fahrbedingungen hinzu.

#### ■ VW Golf 7 GTI TCR

**Tabelle 1: Fahrzeugangaben zum VW Golf 7 GTI TCR**

	Angaben
Modell	VW Golf 7 GTI TCR
Schaltung	7- Gang Direktschaltgetriebe
Euro Norm	Euro 6d-TEMP
Kilometerstand	~15000 km
Motordaten	EA 888 Gen.3 2.0 Liter TFSI
Kraftstoff	Super 98
Leistung	$P_{max}$ 213 kW
Abgasnachbehandlung	3-Wege-Katalysator, <b>Ottopartikelfilter</b>

#### ■ Ford Focus MK3 Turnier

**Tabelle 2: Fahrzeugangaben zum Ford Focus MK3 Turnier**

	Angaben
Modell	Ford Focus MK3 Turnier
Schaltung	6-Gang Handschaltgetriebe
Euro Norm	Euro 5
Kilometerstand	~120000 km
Motordaten	1.6 Liter Ecoboost
Kraftstoff	Super 95
Leistung	$P_{max}$ 110 kW
Abgasnachbehandlung	3-Wege-Katalysator <b>kein Partikelfilter</b>

#### ■ Skoda Superb 2

**Tabelle 3: Fahrzeugangaben zum Skoda Superb 2 Kombi**

	Angaben
Modell	Skoda Superb 2 Kombi
Schaltung	6-Gang Direktschaltgetriebe
Euro Norm	Euro 5
Kilometerstand	~115000 km
Motordaten	EA 189 2.0 Liter TDI
Kraftstoff	Diesel
Leistung	$P_{max}$ 103 kW
Abgasnachbehandlung	Dieseloxydationskat., <b>Dieselpartikelfilter</b>

■ VW Golf 6 TSI

**Tabelle 4: Fahrzeugangaben zum VW Golf 6 TSI**

	Angaben
Modell	VW Golf 6 TSI
Schaltung	7-Gang Direktschaltgetriebe
Euro Norm	Euro 5
Kilometerstand	~52000 km
Motordaten	EA 111 1.4 Liter TSI
Kraftstoff	Super 95
Leistung	$P_{\max}$ 118 kW
Abgasnachbehandlung	3-Wege-Katalysator, <b>kein Partikelfilter</b>

■ VW Passat B8 Variant

**Tabelle 5: Fahrzeugangaben zum VW Passat B8 Variant**

	Angaben
Modell	VW Passat B8 Variant
Schaltung	7-Gang Direktschaltgetriebe
Euro Norm	Euro 6c
Kilometerstand	~25000 km
Motordaten	EA 288 2.0 Liter TDI
Kraftstoff	Diesel
Leistung	$P_{\max}$ 140 kW
Abgasnachbehandlung	Dieseloxydationskat., SCR-Kat., <b>Dieselpartikelfilter</b>

# 4 Vermessung der Fahrzeuge durch die TU-Dresden

## ■ Grundvermessung

Nach Aufbau, Fesselung und Korrektur der Fahrwiderstände auf dem Abgasrollenprüfstand wurde jedes Fahrzeug im ersten Versuch grundvermessen, um den technischen Zustand nachzuweisen. Der dazu gewählte Zyklus ist der WLTC nach der VERORDNUNG EU 2017/1151, der in Abbildung 8 abgebildet ist. Vor Start des Zyklus müssen die Fahrzeuge bei 23°C konditioniert sein.

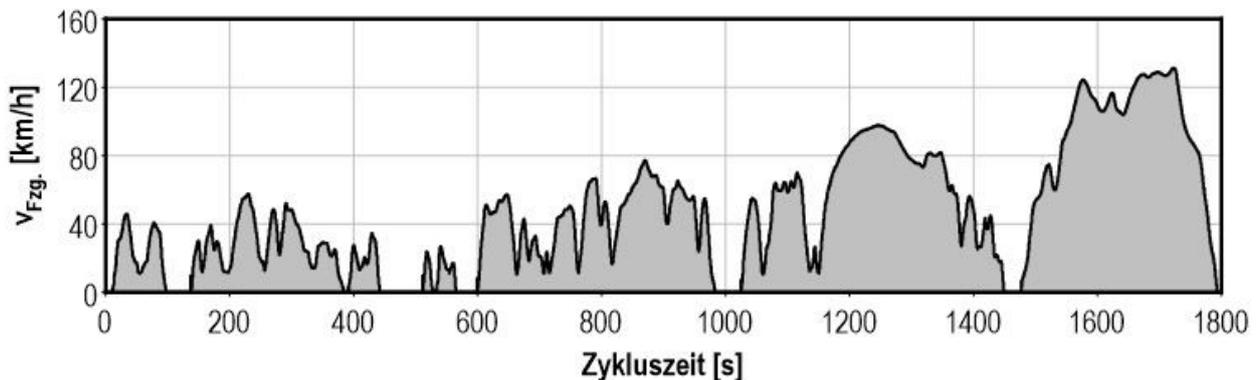


Abbildung 8: WLTC nach Verordnung EU 2017/1151 der Europäischen Kommission

Der WLTC ist 1800 s lang, entspricht einer Strecke von 23 km bei einer mittleren Geschwindigkeit von 46,3 km/h. Die maximale Beschleunigung beträgt ungefähr 1,8 m/s<sup>2</sup>.

Alle Fahrzeuge, welche der Euro 5 Abgasnorm genügen, wurden nach dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) zertifiziert (siehe Anhang A.1), dementsprechend existieren zu diesen Fahrzeugen Schadstoffgrenzwerte nur für den NEFZ. Es ist zu erwarten, dass diese Grenzwerte im WLTC durch die Euro 5 Fahrzeuge nicht eingehalten werden. Die Grenzwerte zur zugehörigen Abgasnorm sind in Tabelle 6 und 7 dargestellt. Die Protokolle zu den Testzyklen der Fahrzeuge sind im Anhang A.2 zu finden.

Tabelle 6: Schadstoffgrenzwerte für Fahrzeuge mit Ottomotor

Norm	CO	T.HC	NMHC	NOx	T.HC+NOx	PM	PN
	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[Anz./km]
Euro 5 (NEFZ)	1000	100	68	60	-	5	-
Euro 6 (WLTC)	1000	100	68	60	-	4,5	6e+11

Tabelle 7: Schadstoffgrenzwerte für Fahrzeuge mit Dieselmotor

Norm	CO	T.HC	NMHC	NOx	T.HC+NOx	PM	PN
	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[Anz./km]
Euro 5 (NEFZ)	500	-	-	180	230	5	6e+11
Euro 6 (WLTC)	500	-	-	80	170	4,5	6e+11

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Grundvermessung für jedes Fahrzeug aufgeführt. **Bei der Vermessung war es unerheblich, in welchem Zyklus das Fahrzeug homologiert war. Es wurde immer im WLTC gemessen, und dabei lediglich festgestellt, ob die Abgasreinigung generell funktionsfähig war.**

Die Grenzwertausnutzung gibt die prozentuale Ausschöpfung des Grenzwertes an, auch wenn die Grenzwertüberschreitung im WLTC für ein NEFZ-zugelassenes Fahrzeug aus Sicht des Gesetzgebers irrelevant ist!

Grundsätzlich konnten alle Fahrzeuge als tauglich und intakt bewertet werden.

Auffällig war ein Fahrzeug:

Der Golf 6 Otto-Direkteinspritzer, zugelassen nach EU5 im NEFZ, hatte deutlich überhöhte PM und PN Werte im WLTC. Allerdings war das Fahrzeug im NEFZ homologiert und in diesem Messbereich wurde das Gesetz wahrscheinlich erfüllt.

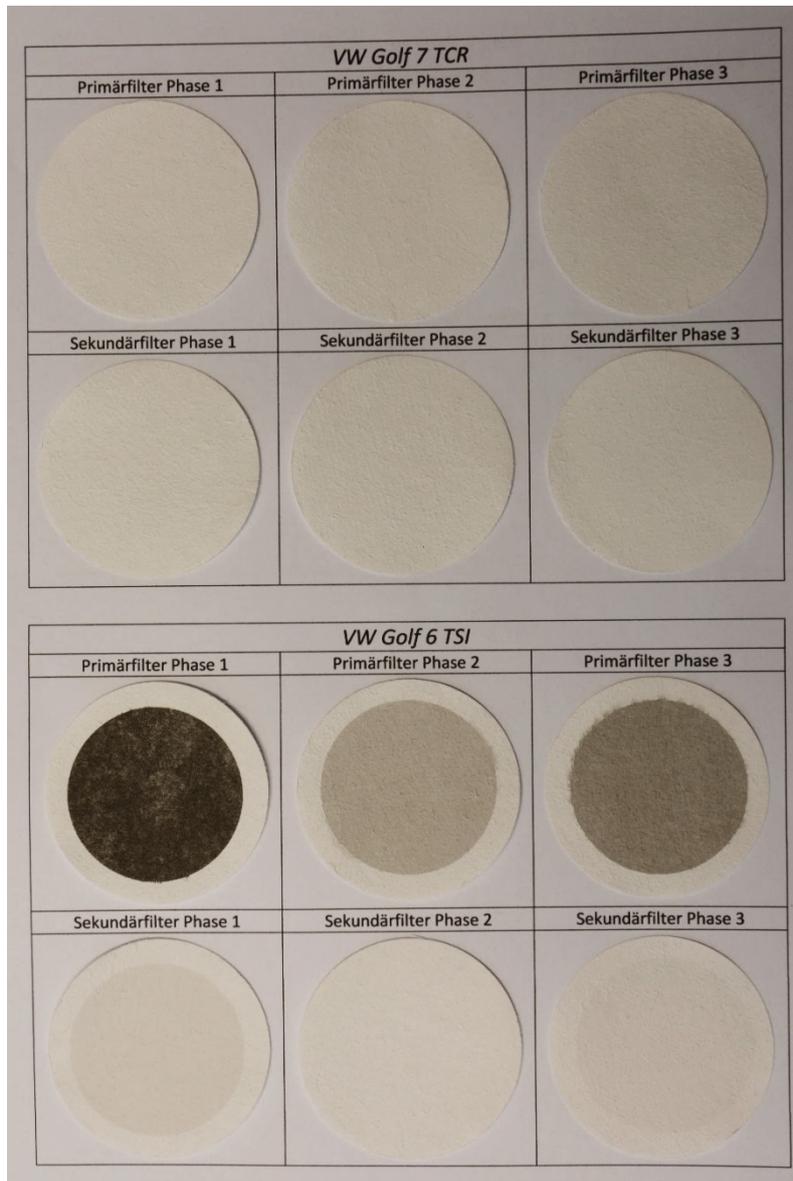
Die nahezu dreifache Grenzwertüberschreitung des Golf 6 bezüglich des Partikelmassengrenzwertes kann jedoch nicht allein mit der Messung im WLTC gegenüber der Homologation im NEFZ erklärt werden. Es lässt sich nur die Vermutung aus der Fahrzeughistorie und dem Fahrverhalten des Fahrzeugbesitzers aufstellen, dass der Luftpfad des Fahrzeugs stark verschmutzt war. Das Fahrzeug wurde überwiegend im Kurzstreckenverkehr bewegt. Gestützt wird diese Vermutung durch die dritte Messphase zur gravimetrischen Partikelmassenbestimmung (siehe Abbildung 10). Der Messfilter zeigte eine deutliche Schwärzung, die auf ein Auslagern der Versottungen aus dem Luftpfad bei hohen Temperaturen und Abgasmassenströmen hindeutet.

Der Skoda TDI, zugelassen nach EU5 im NEFZ mit DPF, hatte dementsprechend leicht erhöhte NO<sub>x</sub> und PN Werte im WLTC.

In Abbildung 9 sind weiterhin die Abscheidefilter der Partikelgravimetrie für den Golf 7 abgebildet. Der Fahrzyklus wurde dazu in drei Phasen geteilt, wobei je Phase ein Primärfilter und ein Sekundärfilter in Reihe geschaltet beladen wurden. Je mehr Partikel abgeschieden wurden, desto stärker ist der Schwarz-Weiß-Kontrast. Grundsätzlich ist der Effekt des in die Abgasanlage serienmäßig eingebauten Partikelfilters des Golf 7 deutlich zu erkennen. Eine gravimetrische Partikelmassenbestimmung ist bei Euro 6d-TEMP-Fahrzeugen mit Ottomotor kaum möglich, da nahezu keine großen Partikel emittiert werden. Das trifft im Übrigen auch auf moderne Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter zu. Nachdem die Anzahl an feinen Partikeln für die negativen Effekte auf die Gesundheit als wichtiger eingeschätzt wird als die Partikelmasse, und weil selbst bei sehr kleinen Partikelmassen hohe Partikelanzahlen emittiert werden können, wurde entschieden den Partikelanzahlgrenzwert einzuführen.

**Tabelle 8: Ergebnisse Grundvermessung WLTC**

<b>Fahrzeug</b>	<b>VW Passat B8 Variant</b>	<b>Grenzwertausnutzung WLTC</b>	<b>Bemerkung</b>
<b>Emission</b>	<b>Messwert</b>	<b>[%]</b>	<b>[-]</b>
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	136.2	kein Grenzwert	Fahrzeug im NEFZ homologiert (Euro 6c), dennoch keine Auffälligkeiten im WLTC, Abgasreinigung voll funktionsfähig (Oxidationskatalysator, SCR-Katalysator, Dieselpartikelfilter)
mCO [mg/km]:	8.0	1.6	
mHC [mg/km]:	0.8	-	
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	71.7	89.6	
NMHC [mg/km]:	-	-	
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	72.5	42.6	
PM [mg/km]:	0.1	2.2	
PN [# /km]:	1.70E+10	2.8	
<b>Fahrzeug</b>	<b>VW Golf 7 TCR</b>	<b>Grenzwertausnutzung WLTC</b>	<b>Bemerkung</b>
<b>Emission</b>	<b>Messwert</b>	<b>[%]</b>	<b>[-]</b>
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	157.9	kein Grenzwert	Fahrzeug im WLTC homologiert (Euro 6d- temp), keine Auffälligkeiten, Abgasreinigung voll funktionsfähig (3-Wegekatalysator, Ottopartikelfilter)
mCO [mg/km]:	199.8	20.0	
mHC [mg/km]:	13.6	13.6	
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	21.1	35.2	
NMHC [mg/km]:	-	-	
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	-	-	
PM [mg/km]:	1.5	32.9	
PN [# /km]:	5.51E+10	9.2	
<b>Fahrzeug</b>	<b>VW Golf 6 TSI</b>	<b>Grenzwertausnutzung WLTC</b>	<b>Bemerkung</b>
<b>Emission</b>	<b>Messwert</b>	<b>[%]</b>	<b>[-]</b>
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	124.6	kein Grenzwert	Fahrzeug im NEFZ homologiert (Euro 5a), 3 Wege Katalysator funktioniert, kein Partikelfilter vorhanden, daher sehr hohe PN-Werte, auffällig hohe PM-Werte (Vergleich Ford Focus), Verschmutzung Luftpfad wegen starkem Kurzstreckenbetrieb
mCO [mg/km]:	366.2	36.6	
mHC [mg/km]:	36.2	36.2	
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	36.6	61.0	
NMHC [mg/km]:	-	-	
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	-	-	
PM [mg/km]:	14.4	320.4	
PN [# /km]:	1.98E+12	330.0	
<b>Fahrzeug</b>	<b>Ford Focus MK3 Turnier</b>	<b>Grenzwertausnutzung WLTC</b>	<b>Bemerkung</b>
<b>Emission</b>	<b>Messwert</b>	<b>[%]</b>	<b>[-]</b>
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	137.0	kein Grenzwert	Fahrzeug im NEFZ homologiert (Euro 5a), 3 Wege Katalysator funktioniert, kein Partikelfilter vorhanden, daher sehr hohe PN-Werte
mCO [mg/km]:	901.8	90.2	
mHC [mg/km]:	46.5	46.5	
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	33.1	55.2	
NMHC [mg/km]:	-	-	
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	-	-	
PM [mg/km]:	1.1	23.3	
PN [# /km]:	1.91E+12	318.3	
<b>Fahrzeug</b>	<b>Skoda Superb 2 Kombi</b>	<b>Grenzwertausnutzung WLTC</b>	<b>Bemerkung</b>
<b>Emission</b>	<b>Messwert</b>	<b>[%]</b>	<b>[-]</b>
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	148.5	kein Grenzwert	Fahrzeug im NEFZ homologiert (Euro 5a), Grenzwertüberschreitung bei NO <sub>x</sub> wegen erweitertem Motorbetriebsbereich im WLTC, Abgasreinigung voll funktionsfähig (Oxidationskatalysator, Dieselpartikelfilter)
mCO [mg/km]:	88.0	17.6	
mHC [mg/km]:	11.8	-	
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	215.0	268.7	
NMHC [mg/km]:	-	-	
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	226.7	133.4	
PM [mg/km]:	0.6	12.4	
PN [# /km]:	6.12E+11	102.0	

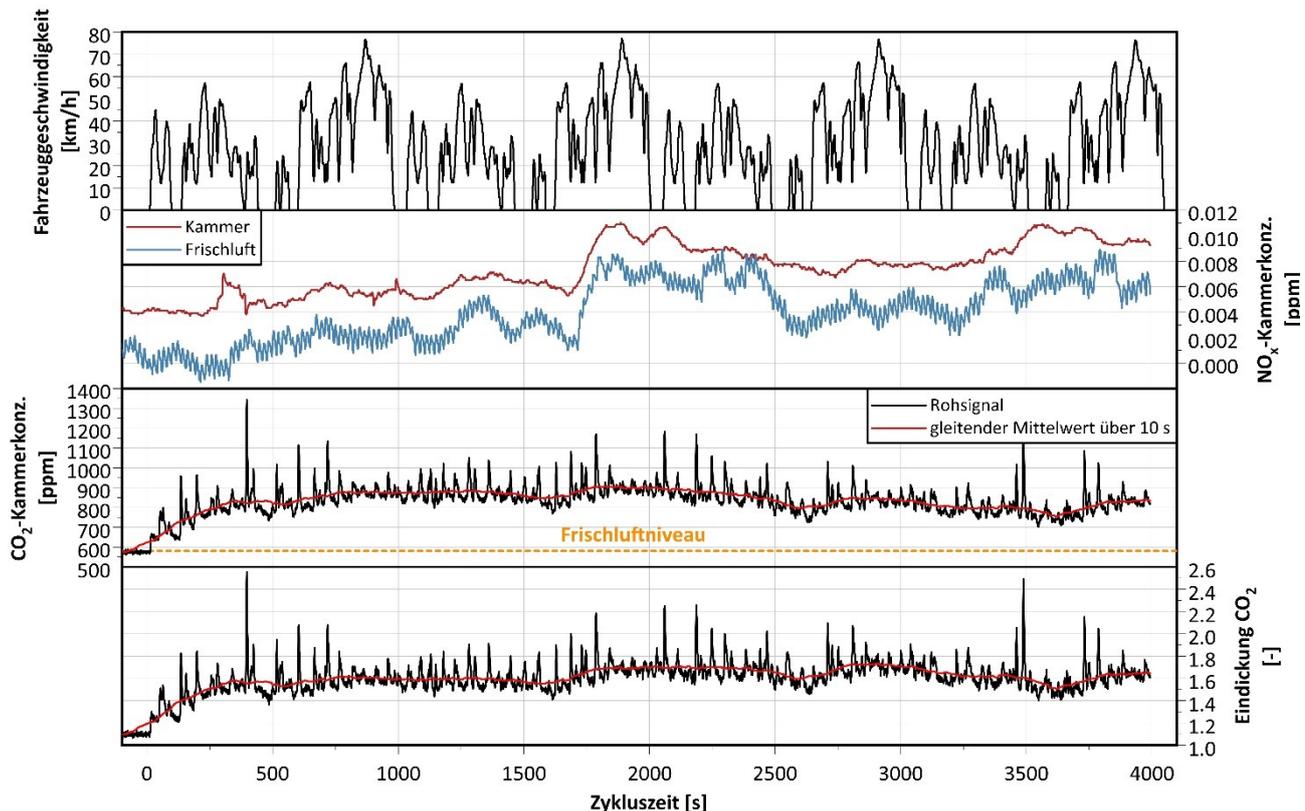


**Abbildung 9: Filter Partikelgravimetrie VW Golf 7 TCR und VW Golf 6 TSI. Foto: M. Dobberkau (TU Dresden)**

Die Messfilter des Golf 6 (EU5 ohne serienmäßigem Partikelfilter) lassen einen deutlich erhöhten Partikelaustritt zu Beginn des Zyklus erkennen, der auf den Kaltstart zurückzuführen ist. Weiterhin ist der oben genannte stärkere Kontrast in der dritten Phase zu erkennen, was durch das Partikelaustritt bei hohen Geschwindigkeiten und Temperaturen zu erklären ist. Die Filterfotos der anderen Fahrzeuge sind im Anhang A.3 zu finden.

### ■ Atmosphärenachbildung

Vor jeder Vermessung der Fahrzeuge wurde die Testkammer mit Frischluft gespült bis die Partikelbelastung im Raum auf ein Grundniveau gesunken war und stabil blieb. Gleichzeitig wurde die Testtemperatur eingestellt. Der gewählte Testzyklus zur Abbildung der Atmosphäre um die Messstationen war der „low“ und der „medium“-Teil des WLTC, der den Stadtverkehr gut abbildet. In Vorversuchen zeigte sich, dass dieser Zyklus viermal hintereinander gefahren werden musste, um eine stabile Abgas- und Partikelkonzentration im Raum einzustellen. Der resultierende Zyklus ist exemplarisch in Abbildung 10 dargestellt.



Frischluft: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 21.10.2019, Start: 16:03 Uhr, VW Golf 7 GTI TCR, Euro 6d temp, Super 98

**Abbildung 10: Atmosphärennachbildung VW Golf 7 GTI TCR bei 15 °C**

Zu erkennen ist, dass die Stickoxidkonzentration im Raum ungefähr 2 ppb über der Konzentration der Frischluft liegt. Allerdings ist kein auf das Fahrprofil zurückzuführendes Verhalten zu erkennen. Speziell der NO<sub>x</sub>-Sprung bei circa 1750 s zeigt, dass der Einfluss äußerer Faktoren wie zum Beispiel NO<sub>x</sub>-Emissionen, die von außerhalb des Prüfraumes angesaugt werden, einen höheren Einfluss auf die Raumkonzentration als der Versuchsträger hat.

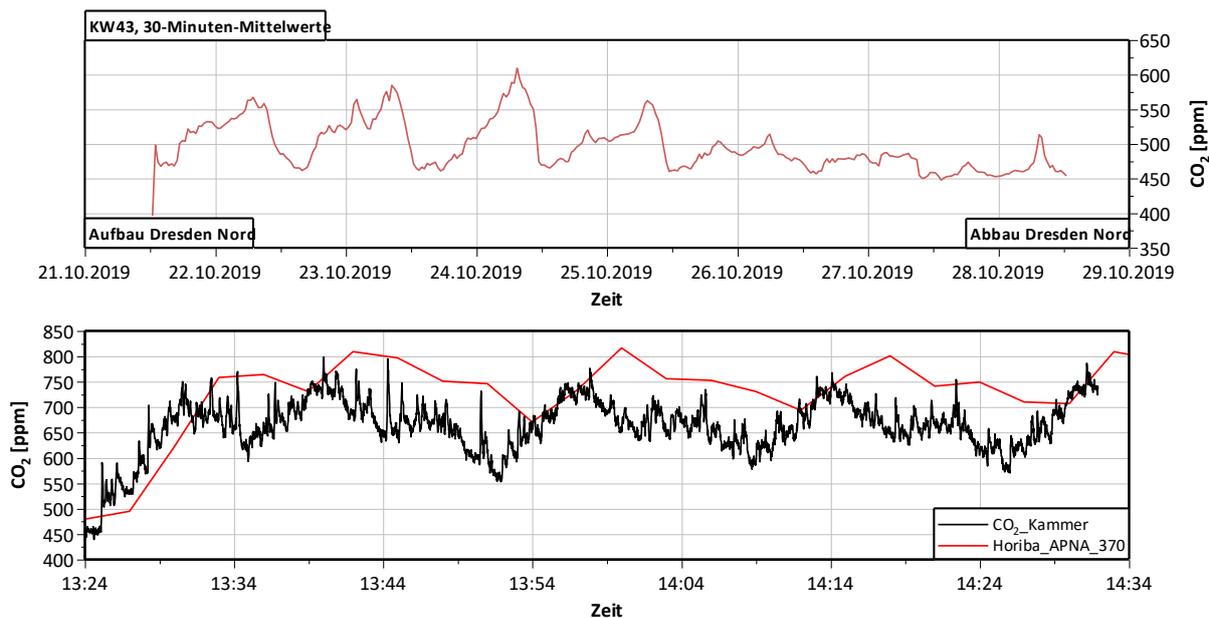
Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum zeigt bereits nach dem ersten WLTC-low-medium- Zyklus bei 1000 s eine Sättigung. Die Konzentrationserhöhung zu Beginn des Zyklus durch das Versuchsfahrzeug ist deutlich zu erkennen. Die Gleichung beschreibt die Berechnung des Eindickungsfaktors im Raum.

$$\text{Eindickung}_{CO_2} = \frac{\text{Kammerkonzentration}_{CO_2}}{\text{Zuluftkonzentration}_{CO_2}}$$

Der resultierende Eindickungsfaktor schwingt um 1.6 (rote Linie), wobei dies vom Fahrprofil und den daraus resultierenden Motorbetriebspunkten abhängt. Die Partikelraumkonzentration ist jedoch erst kurz vor 3000 s stabil, weswegen der Zyklus entsprechend lang gewählt wurde. Die CO<sub>2</sub>-Sättigung entspricht einer Raumkonzentration von circa 800 ppm. Zur Einschätzung der Frischluftkonzentration, ist diese exemplarisch orange dargestellt und liegt knapp unter 600 ppm.

Zur Bewertung des CO<sub>2</sub>-Niveaus bezüglich der Konzentration an der Messstelle wurde zusätzlich ein CO<sub>2</sub>-Horiba APNA 370 Analysator an der Messstelle Dresden-Nord installiert. Abbildung 12 visualisiert dazu den CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf an der Messstelle Dresden-Nord in der Kalenderwoche 43, der parallel zur Messkampagne in der TU-Dresden aufgezeichnet wurde. Das Diagramm oben zeigt den CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf der 30-Minuten Mittelwerte der 43. Kalenderwoche. Im Maximum wird eine Konzentration von ungefähr 600 ppm CO<sub>2</sub> erreicht. Diese wird am Prüfstand in jedem Versuch trotz maximaler Gebläsedrehzahl der Absaugung und größtem Frischluftvolumenstrom überschritten. Dies ist mit der teilweise sehr hohen Konzentration an CO<sub>2</sub> in der Frischluft zu begründen, die sich außerhalb des Gebäudes einstellte. Teilweise wurden auch auf der Frischluftseite Konzentrationen von 600 ppm gemessen. Die Konzentration in der Kammer muss zwangsweise über der in Dresden-Nord liegen. Dementsprechend kann die Atmosphäre an der Messstelle Dresden-Nord nicht auf gleichem Niveau simuliert werden, was auch bei der Bewertung der Partikelimmission zu beachten ist.

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration an der Bergstraße konnte aus Platzgründen im Messcontainer leider nicht bestimmt werden. Aufgrund der Steigung an der Messstation und des höheren Verkehrsaufkommens ist dort jedoch mit einer erheblich höheren CO<sub>2</sub>-Konzentration zu rechnen.



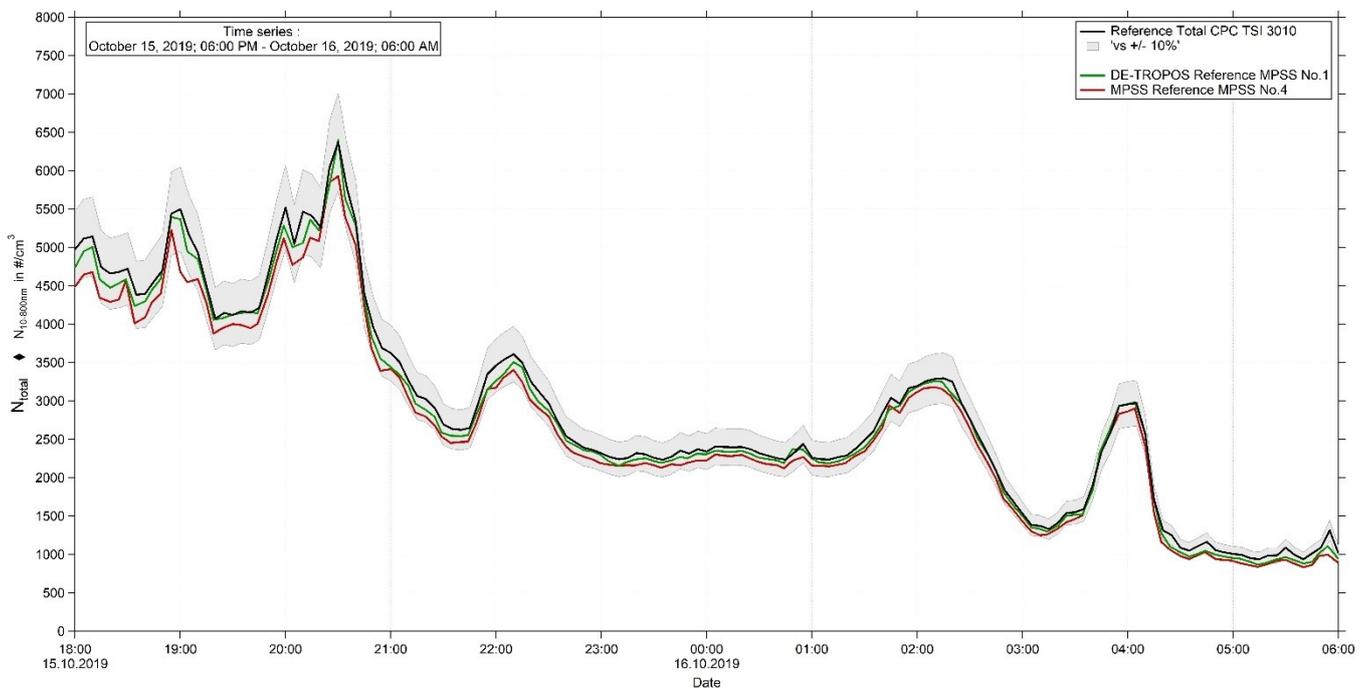
**Abbildung 11: CO<sub>2</sub>-Konzentration KW 43 (oben); CO<sub>2</sub>-Abgleich Senseair-Analysator und Horiba APNA 370, Test Passat B8 15 °C (unten).**

In Abbildung 11 unten ist der Abgleich der CO<sub>2</sub>-Analysatoren zu erkennen. Dazu wurde der CO<sub>2</sub>-Horiba-APNA-370-Analysator am 29.10. in der Messstation Dresden-Nord abgebaut und am Prüfstand parallel zu den integrierten CO<sub>2</sub>-Analysatoren von Senseair integriert. Zur Überprüfung wurde die Raumkonzentration bei dem 15 °C- Atmosphärentest des VW Passat B8 mit beiden Analysatoren gemessen. Der Horiba-Analysator (rote Linie) legt die gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentration mit der höchsten Abtastung als 3-Minuten-Mittelwert ab. Deshalb werden im Vergleich zum Senseair-Analysator (schwarze Linie) weniger Datenpunkte erhalten. Es ist festzuhalten, dass beide Analysatoren ein ähnliches Verhalten zeigen und somit zur Analyse der Raumkonzentration geeignet sind.

# 5 Qualitätssicherung der Partikelgrößenspektrometer am TROPOS

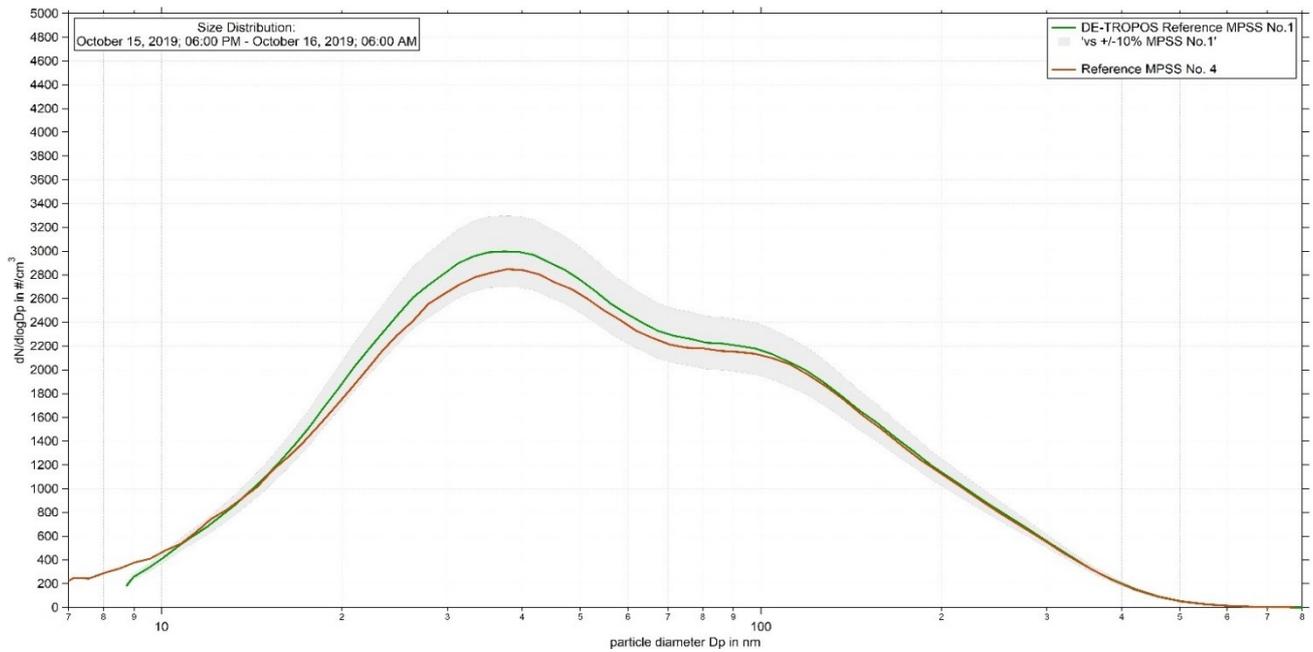
Das während der Kampagne verwendete Größenspektrometer wurde am TROPOS gegen ein Referenz Spektrometer und einen T-CPC verglichen. Diese Geräte gehören dem World Calibration Center for Aerosol and Physics (WCCAP) an und bilden den Standard für Größenspektrometer. Normalerweise werden die Größenspektrometer in einem Flussverhältnis von 1:5 betrieben. Wobei die 1 für 1 l/min Aerosolstrom und 5 für 5 l/min Schleierluftstrom stehen. Unter diesen Bedingungen ist ein maximaler Scanbereich von 10 nm bis 800 nm möglich. Um dennoch den im Projekt geforderten Größenbereich von 7 nm bis 800 nm optimal abdecken zu können, wurde das Flussverhältnis auf 1:6 umgestellt. Mit dieser Änderung im Setup kann der Scanbereich vergrößert und somit kleinere Durchmesser abgescannt werden. Dies hat zur Folge, dass das System einer weiteren Qualitätssicherung am TROPOS unterzogen werden musste, um den Richtlinien des WCCAP zu genügen (WIEDENSOHLER ET AL., 2018). Im Folgenden soll die Performance des verwendeten Größenspektrometers kurz dargestellt werden.

In Abbildung 12 sind beide Größenspektrometer gegen einen Reference T-CPC TSI 3010, der mit einem grau hinterlegten Toleranzbereich von +/-10 % gekennzeichnet ist, in einem Zeitraum von 12 Stunden verglichen. Über den gesamten Zeitraum liegen beide Spektrometer im geforderten Toleranzbereich. Zudem weisen beide Größenspektrometer zueinander eine gute Übereinstimmung auf, welches auf eine gute Performance hinweist. Es werden Schwankungen und Unterschiede in der Außenluftkonzentration gut abgebildet.



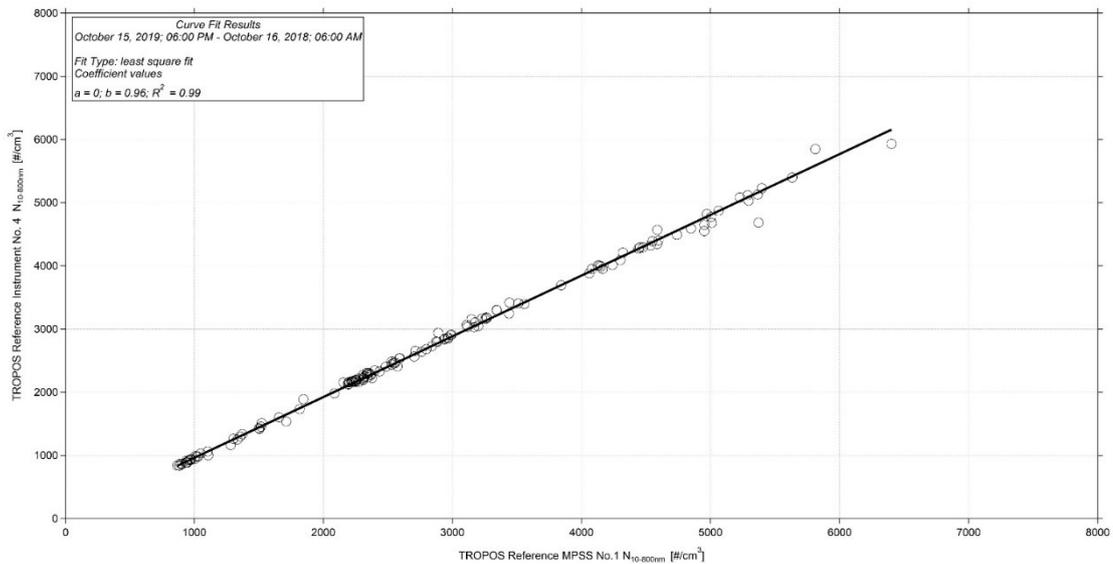
**Abbildung 12: Zeitreihe der TROPOS Größenspektrometer im Vergleich zu einem Referenz Gesamtpartikelzähler über einen Zeitraum von 12 Stunden, vom Oktober 15; 18:00 Uhr bis Oktober 16; 06:00 Uhr.**

Eine weitere Möglichkeit die Performance der Messgeräte zu beurteilen ist die Betrachtung der Größenverteilung. Im Rahmen dieses Projektes spielt dies eine wichtige Rolle, da verschiedene N-Klassen aus den Größenspektrometerdaten berechnet werden müssen. Hierfür ist eine korrekte Selektion der Aerosolpartikel von 7 nm bis 800 nm zwingend nötig. In der folgenden Abbildung 13 wird das im Projekt verwendete Größenspektrometer gegen das am TROPOS verwendete Referenz-MPSS des WCCAP (No.1) verglichen. An dieser Stelle wird dem Referenz-MPSS No.1 die Toleranzgrenze von +/-10% zugeordnet. Es ist deutlich zu erkennen, dass das MPSS No.4 (das verwendete System während der Kampagne) im geforderten Toleranzbereich liegt.



**Abbildung 13: Partikelgrößenverteilungen der MPSS-Systeme DE-TROPOS Reference MPSS No.1 vs. MPSS No.4 für einen Zeitraum von 12 Stunden, Oktober 15; 18:00 Uhr bis Oktober 16; 06:00 Uhr.**

Als letztes soll die Korrelation der Geräte betrachtet werden. In der Abbildung 14 wird das Referenz-MPSS No.1 auf der x-Achse zum MPSS No.4 auf der y-Achse verglichen. Der Anstieg liegt bei 0.96 und das  $R^2$  bei 0.99. Dies bedeutet, dass das verwendete MPSS einen Minderbefund von 4 % aufweist. Um diesen Minderbefund wird das hier verglichene und in Dresden verwendete MPSS No.4 korrigiert.



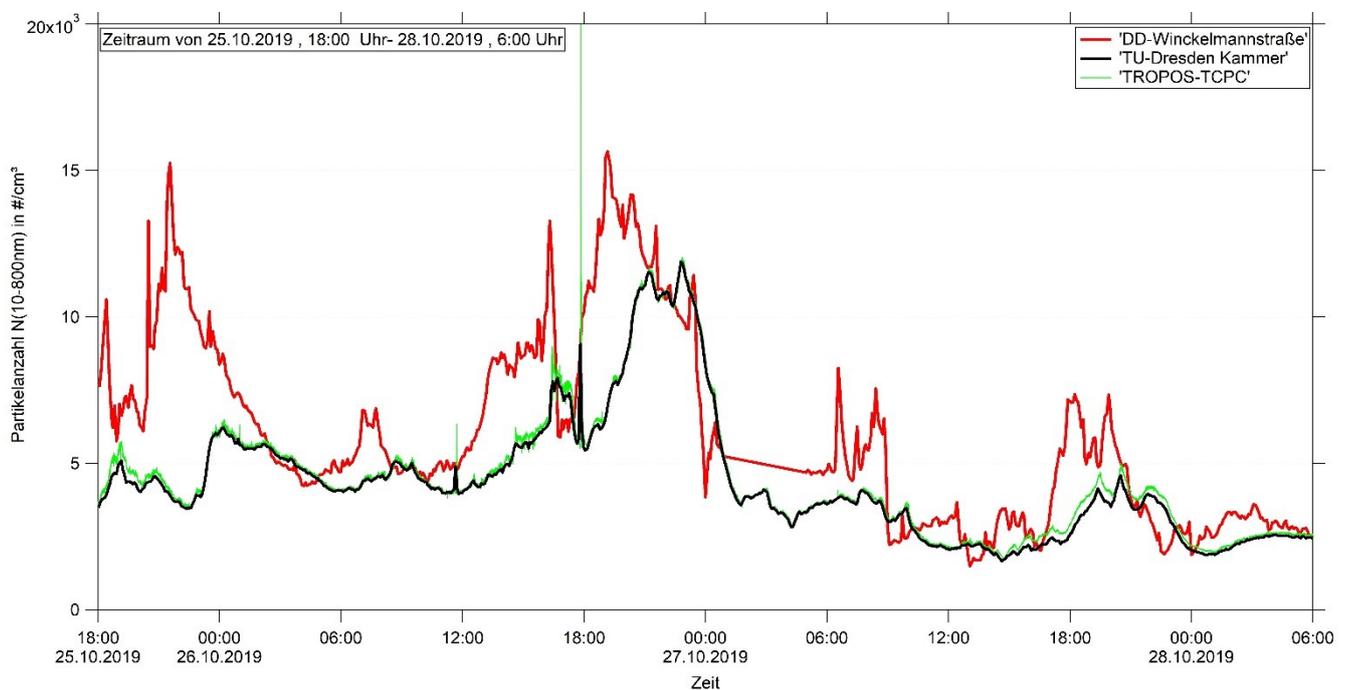
**Abbildung 14: Korrelation zwischen Referenz-MPSS No.1 und MPSS No.4 über einen Zeitraum von 12 Stunden vom Oktober 15; 18:00 Uhr bis Oktober 16; 06:00 Uhr.**

# 6 Charakterisierung der Klimakammer

## 6.1 Partikelmessung in der Kammer ohne Fahrzeugbetrieb, Fahrzeug in der Kammer abgestellt

Um einen Eindruck über die Vergleichbarkeit der Partikelanzahl- und Rußmassenkonzentration in der Klimakammer der TU-Dresden zur Messstation Dresden-Winckelmannstraße zu erhalten, wird in Abbildung 15 ein Wochenende während der Messkampagne betrachtet. In einem Zeitraum von 3 Tagen (25. Oktober bis zum 28. Oktober 2019) wurden die Messwerte in der Kammer ohne Betrieb der Anlagentechnik (ausgenommen Belüftung) mit denen der Messstation verglichen. Die Messstation Dresden-Winckelmannstraße ist ebenfalls mit einem MPSS vom TROPOS und einem MAAP der gleichen Baureihe ausgestattet.

Zum Ablauf: Es wurden am Freitag, dem 25. Oktober, letzte Messungen durchgeführt und dann sämtliche Emissionsquellen abgeschaltet. Das zuletzt verwendete Fahrzeug wurde in der Kammer belassen. Die Frischluftzufuhr und damit das Ventilationssystem in die Klimakammer wurde auf Maximum gestellt, so dass ein ständiger Eintrag von Frischluft und die Umwälzung in der Klimakammer gewährleistet war.

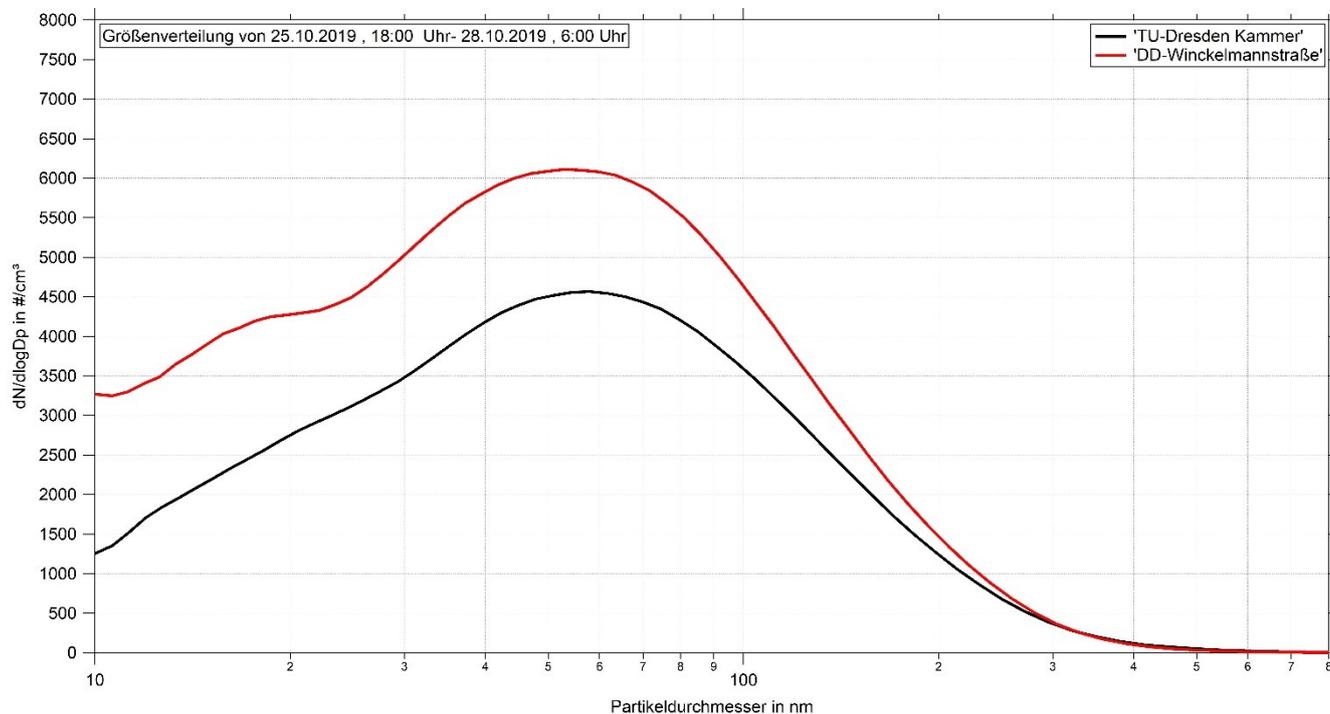


**Abbildung 15: Zeitreihen der Partikelanzahlkonzentration N10-800 nm der Messstation Dresden-Winckelmannstraße und der Klimakammer über einen Zeitraum von 3 Tagen.**

Im Vergleich der Zeitreihe der Messstation Dresden-Winckelmannstraße (rote Linie) zu der in der Klimakammer installierten Aerosolmesstechnik (schwarze und grüne Linie) lassen sich folgende Aussagen treffen:

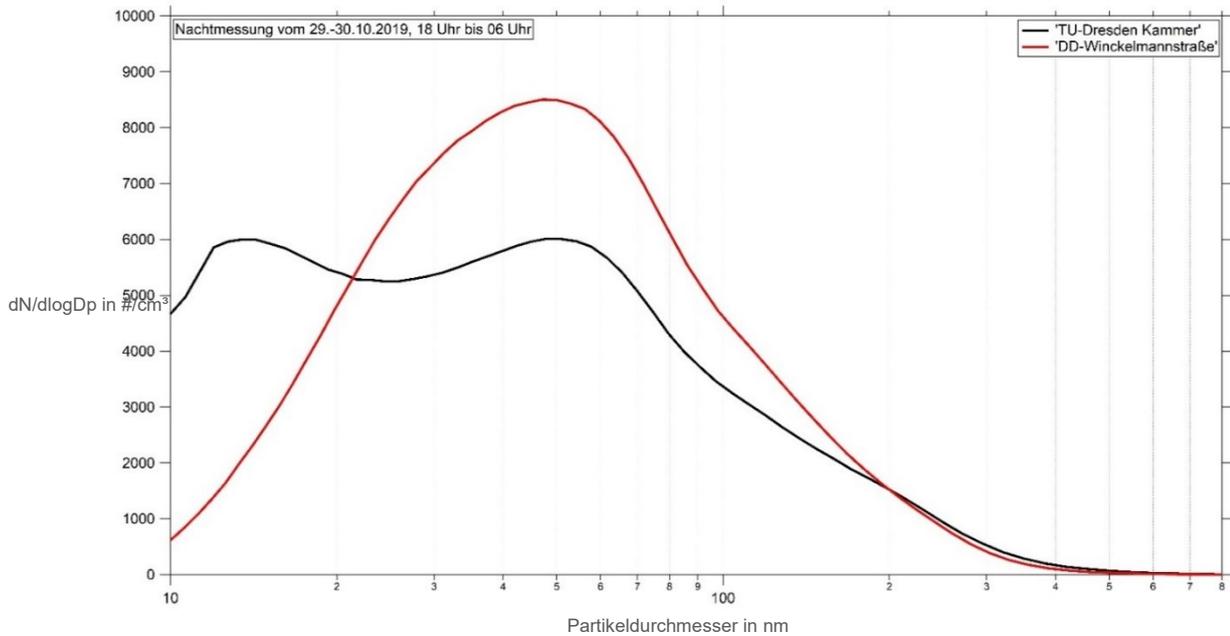
1. Der in der Klimakammer parallel zum MPSS verwendete T-CPC zeigt über das gesamte Wochenende, unabhängig von den Schwankungen der Partikelanzahlkonzentration das gleiche Verhalten und Konzentrationsniveau wie das MPSS. Dies ist eine indirekte Qualitätssicherung des MPSS und zeigt die gleichbleibend gute Performance nach der Hälfte der in Dresden durchgeführten Messungen.
2. Das an der Station DD-Winckelmann betriebene MPSS weist eine leicht erhöhte, zeitlich verschobene aber doch vergleichbare Verteilung auf. Die Prüfkammer wirkt als Puffer, weshalb atmosphärische Phänomene ggf. zeitversetzt gemessen werden. Weiterhin beträgt die Entfernung von der Messstation Winckelmannstraße circa 800 m, weshalb lokale Konzentrationsunterschiede auftreten können, insbesondere durch die Nähe zum Nürnberger Platz, der zwischen der Universität und der Messstation liegt. Speziell in den verkehrsarmen Nachtstunden zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Der Wochenendeffekt durch Emissionen aus Kaminen, Grill- und Lagerfeuern (PAUSCH ET AL., 2016) ist in beiden Messreihen zu erkennen. Das verwendete Einlasssystem der Kammer ist nicht für Aerosolpartikel optimiert und weist daher vermutlich überdurchschnittliche Verluste für UFP < 100 nm auf.

Dies spiegelt sich ebenfalls in der Abbildung 16 dargestellten Partikelgrößenverteilung wieder. Zu sehen ist der Mittelwert über den Zeitraum vom 25.10.2019 18:00 Uhr bis 28.10.2019; 06:00 Uhr. Beide Verteilungen zeigen das gleiche Maximum bei ca. 50 nm. Die Station DD-Winkelmann zeigt die höheren Konzentrationen, was auf weitere lokale Quellen und/oder eine Partikelabscheidung im Einlasssystem der Klimakammer oder der Kammer selbst zurückzuführen sein kann. Dies kann aktuell nicht evaluiert werden, da im Rahmen der Versuche keine Partikelmesstechnik im Einlasssystem der Kammer vorgesehen war. Es konnte eine qualitative Übereinstimmung zwischen Kammer- und Atmosphärenmessung gefunden werden.



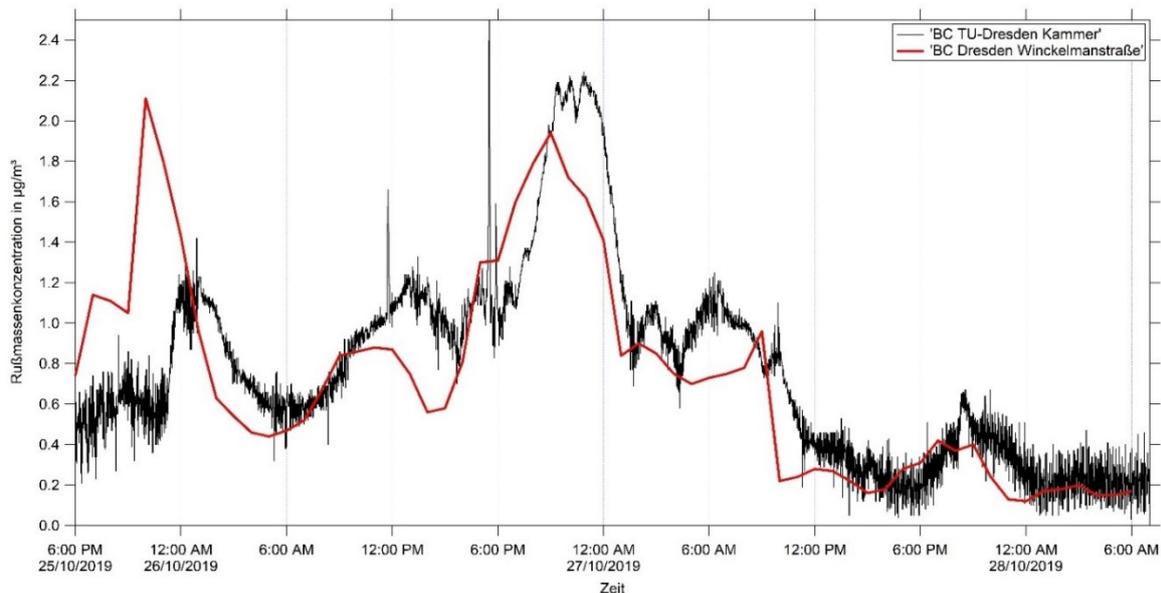
**Abbildung 16: Partikelgrößenverteilungen der Messstation Dresden-Winkelmannstraße und der Klimakammer über einen Zeitraum von 3 Tagen.**

Die Nachtmessung vom 29.10.2019 auf den 30.10.2019 in Abbildung 17 zeigt einen auffälligen Unterschied zwischen den Partikelgrößenverteilungen in Kammer und Außenluft an der Winkelmannstraße. Die Klimakammer wies während der Nachtstunden für den Bereich < 30 nm deutlich höhere Partikelanzahlkonzentration auf. Die Ursache - Aerosol-Quellen in der Kammer, lokale Quellen am Kammereinlass oder Luftströme aus anderen Teilen des Gebäudes – konnte nicht gefunden werden. Dies ist eine Unsicherheit bei der Betrachtung der Hintergrundbelastung in der Klimakammer während der Messzyklen.



**Abbildung 17: Partikelgrößenverteilungen der Messstation Dresden-Winckelmannstraße und der Klimakammer während einer Nacht, 29.10.2019, 18:00 Uhr bis 30.10.2019, 06:00 Uhr.**

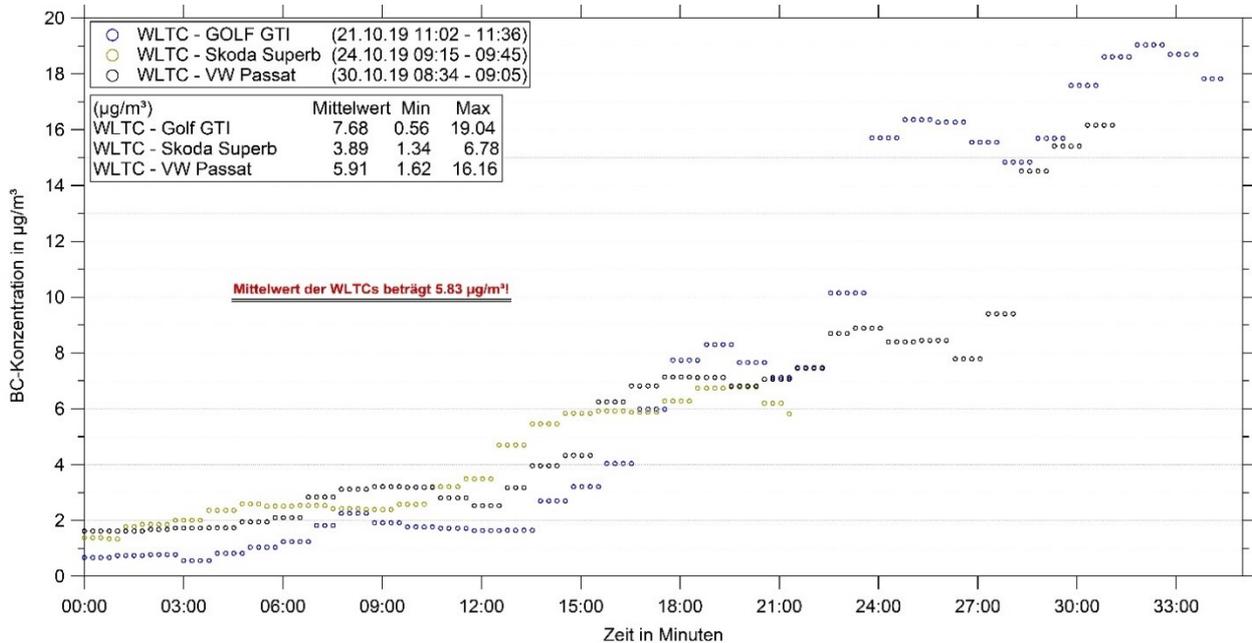
Der Verlauf der Rußmassenkonzentration (Abbildung 18) stimmt gut mit der der Partikelanzahlkonzentration vom 25. bis 28.10.2019 (Abbildung 16) überein. Es werden ca. 2.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  erreicht. Diese Konzentration ist unabhängig vom Betrieb eines Fahrzeuges in der Kammer und stammt vermutlich aus der Außenluft.



**Abbildung 18: Zeitreihen der Rußmassenkonzentration an der Messstation Dresden-Winckelmannstraße und der Klimakammer über einen Zeitraum von 3 Tagen.**

## 6.2 Partikelmessung in der Kammer mit Fahrzeugbetrieb, Abgas zum CVS-Tunnel ausgeleitet

Um die „Hintergrundbelastung“ der Kammer speziell von Rußpartikeln (BC) genauer zu beleuchten, wurden die im Kapitel 4, Grundvermessung, beschriebenen WLTC Messzyklen genauer betrachtet. Während dieser Messzyklen wurde die Aerosolmesstechnik vom TROPOS weiter betrieben. Somit liegen zusätzlich BC-Rußmassenkonzentrationen aus der Kammer, während der WLTC von 1800 Sekunden vor. In der Messzeit, die in Abbildung 19 dargestellt ist, wurden verschiedene Fahrzeuge gemessen. Das Abgas wurde zu Abgasanalyse gasdicht aus der Klimakammer geführt, so dass kein motorisches Abgas in den Raum gelangen konnte.



**Abbildung 19: Zeitreihen der Rußmassenkonzentration während 3 verschiedener WLTC. Die Abgasanlage der PKWs wurde gasdicht an die Abgasmessanlage angeschlossen.**

Es ist deutlich zu erkennen, dass die BC-Konzentration während der Messzeit ansteigt. Das Startniveau lag zu Beginn der Messung unter  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und blieb in den ersten 10 Minuten recht konstant, etwa auf dem Niveau der Hintergrundbelastung, wie in Abbildung 18 gezeigt. Nach ca. 12 Minuten lässt sich ein deutlicher Anstieg erkennen. Die Rußmassenkonzentration erreicht bis zum Messende  $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Daraus lässt sich ableiten, dass **eine BC-Quelle nicht-motorischen Ursprungs vorhanden sein muss. Eine Korrelation zum Geschwindigkeitsprofil des WLTC (Abbildung 8) ist dennoch ersichtlich.**

Aus diesem Grund, wurden im Juli 2020 Zusatzmessungen in der Kammer vorgenommen, um die unbekanntesten Aerosolquellen zu lokalisieren. Dazu stellte TROPOS für einen Tag zwei Rußmonitore AE51 der Firma AethLabs zur Verfügung, siehe Abbildung 21. Diese wurden jeweils in der Kammer direkt hinter dem PKW und neben der e-Maschine, im unteren Teil des Prüfstandes, positioniert. In den folgenden Abbildungen 22 bis 25 werden die Ergebnisse dieser Zusatzmessungen detailliert dargestellt. Alle Aktivitäten oder Veränderungen sind durch Trennlinien hervorgehoben und beschrieben. Die x-Achse zeigt den Zeitraum der Messung und die y-Achse die Rußmassenkonzentration der AE51 in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  an. Die Position der Messgeräte ist farblich kodiert. Das AE51 mit der Seriennummer 821, grüne Linie, repräsentiert die Kammerkonzentration hinter dem PKW und die Seriennummer 829, rote Linie, neben der e-Maschine die Rußmassenkonzentration im unteren Teil des Prüfstandes.



Abbildung 20: Position der beiden AE51 während der Zusatzmessung im Juli 2020. AE51 mit der SN: 821 (grüner Kreis) befindet sich in der Kammer hinter dem PKW. AE51 mit der SN: 829 (roter Kreis) befindet sich unter der Kammer in Höhe der e-Maschine.

### 6.3 Rußmessung in der Kammer, Fahrzeug nicht auf der Rolle aber auf dem Prüfstand

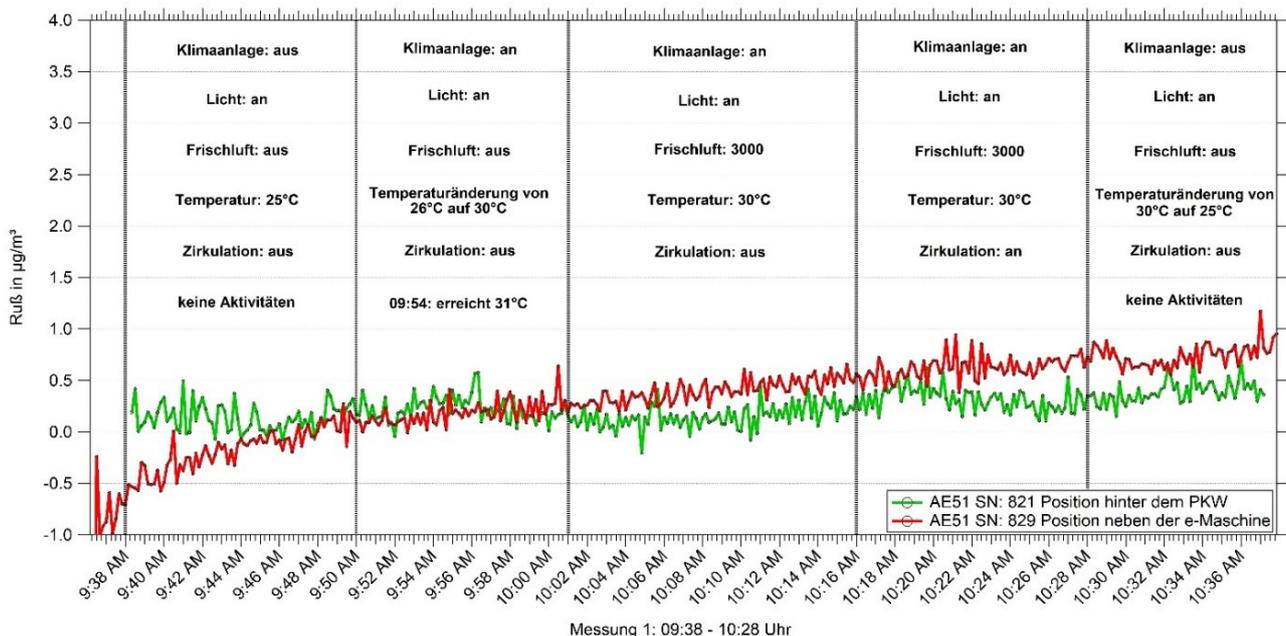


Abbildung 21: Rußmassenkonzentration bei unterschiedlichen Zuständen der Kammer, ohne Fahrzeug

Messungen ohne jegliche andere Aktivitäten in der Kammer bestätigen, dass die Rußmassenkonzentration, gemessen mit beiden AE51, unter  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  liegt, siehe Abbildung 21 und Abbildung 22. Die negative Rußmassenkonzentration vom AE51 SN: 829 in den ersten 5 Minuten, kann ein Einschwing-Effekt des Messgerätes sein und mit den lokalen Begebenheiten im unteren Teil der Messkammer zusammenhängen. Die Anlagentechnik des Prüfstandes wurde schrittweise aktiviert, sodass eine evtl. Änderung in der gemessenen Rußmassenkonzentration auf die zuvor aktivierte Quelle zurückgeführt werden könnte. Es wurden nacheinander die Heizwendel der Klimaanlage, die Frischluftzufuhr, die Raumzirkulation, und die e-Maschine zugeschaltet. Dann wurde alles abgeschaltet und die Kammer gekühlt. Es konnten dabei keine erhöhten Rußmassenkonzentrationen in der Kammer, wie in Abbildung 19, nachgewiesen werden.

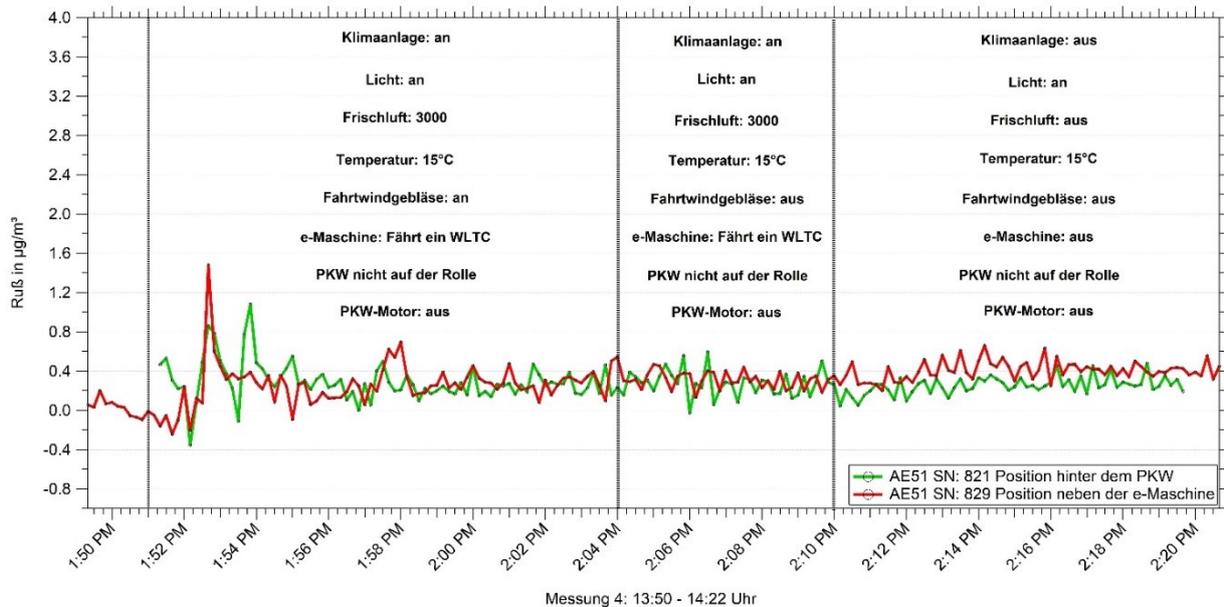


Abbildung 22: Rußmassenkonzentration bei unterschiedlichen Zuständen der Kammer, ohne Fahrzeugbetrieb

Fazit: Es wurde keine Erhöhung der Rußmassenkonzentration festgestellt.

## 6.4 Partikelmessung in der Kammer, Fahrzeug auf der Rolle

Um die Emission von Rußpartikeln durch Verbrennungsprozesse im Motorraum im ersten Schritt auszuschließen, blieb der Motor in Abbildung 23 ausgeschaltet, aber die e-Maschine trieb die bewegliche Fahrzeugachse an.

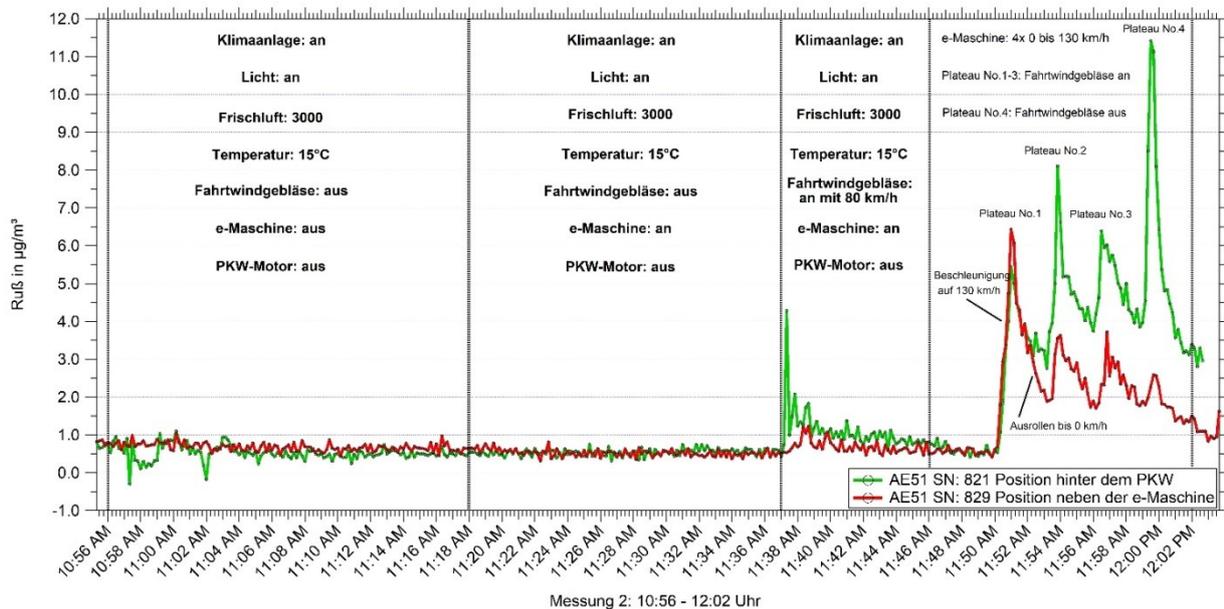
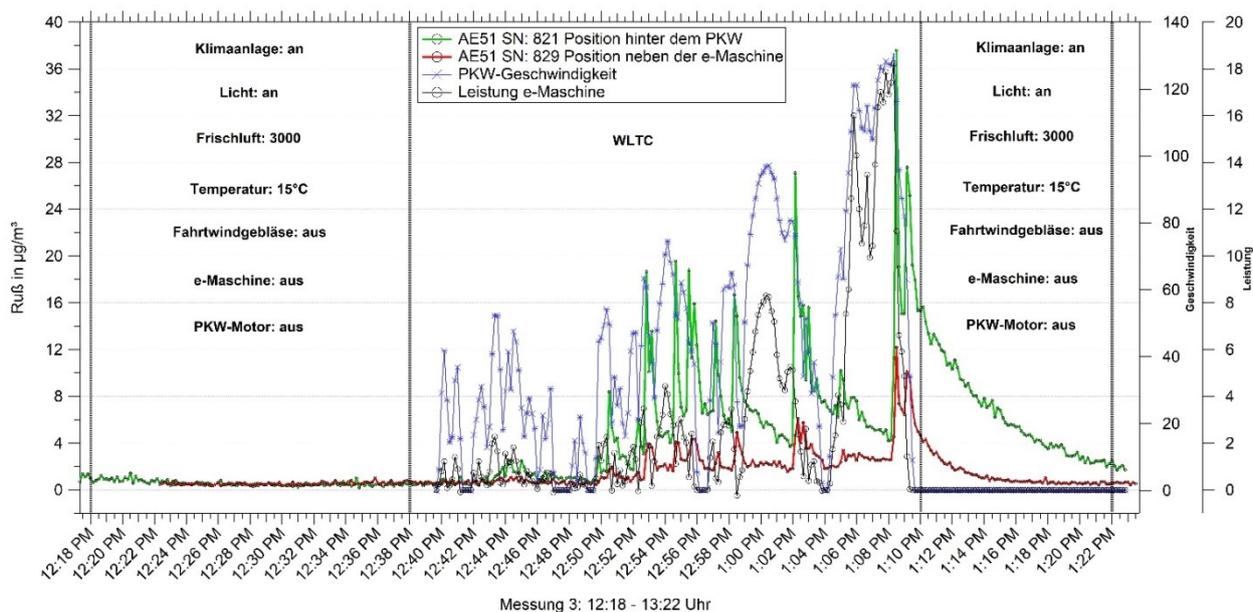


Abbildung 23: Rußmassenkonzentration bei unterschiedlichen Zuständen der Kammer, Fahrzeug geschleppt

Abbildung 23 zeigt den Einfluss der Reifenbewegung auf die Rußmassenkonzentration. In diesem Versuch wurde die Antriebsachse des PKW von der e-Maschine des Rollenprüfstandes geschleppt. Der Motor des PKW blieb abgeschaltet. Das Einschalten des Fahrtwindgebläses wirbelte anscheinend Staub auf. Beim Schleppen der Räder, letzter Abschnitt rechts, steigt die Rußmassenkonzentration deutlich an.

In den ersten beiden Abschnitten konnte übereinstimmend mit den anderen Messungen ohne bewegtes Fahrzeug (Abbildung 21, Abbildung 22) eine Rußmassenkonzentration von unter  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nachgewiesen werden. Lediglich beim Einschalten des Fahrtwindgebläses wurde offensichtlich etwas Staub aufgewirbelt (Abschnitt 3, von links). Im letzten Messabschnitt ganz rechts wurde das Fahrzeug vier Mal auf  $130 \text{ km}/\text{h}$  beschleunigt und anschließend ausgerollt ohne die Bremse zu betätigen. Erst mit Beginn der Rotation der Räder lässt sich eine deutliche Rußmassenkonzentration zwischen  $6$  bis  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  detektieren. Die Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit ist deutlich ersichtlich. Wobei der Rußmonitor an der e-Maschine eine geringere Rußmassenkonzentration detektiert. Nachdem die Anlagentechnik als Quelle nun ausgeschlossen werden kann, sind offensichtlich die Reifen die Rußquelle. Weiterhin lässt sich ein Zusammenhang zwischen Rollgeschwindigkeit, Zeit und Reifentemperatur, also der übertragenen Leistung, herleiten, da die Rußmassenkonzentration mit steigender Fahrgeschwindigkeit und mit steigender Erwärmung der Reifen zunimmt. Zur Validierung dieser Ergebnisse wurde ein WLTC, komplett mit motorischem Antrieb der Achse und Betätigung der Fahrzeugbremse gefahren, dadurch steigt die übertragene Leistung an den Reifen nochmals an, siehe Abbildung 24. Die Abgase wurden über die Abgasmessanlage gasdicht vom Endrohr des PKW aus der Kammer entfernt. Die Kammer wurde vor diesem Versuch ausgiebig gespült, was die Rußmassenkonzentration von unter  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zu Beginn des WLTC belegt. Zur besseren Interpretation der Messwerte, wurde zusätzlich ein Geschwindigkeits- und Leistungsprofil der e-Maschine im Diagramm abgebildet. Es lässt sich eine deutliche Erhöhung der Rußmassenkonzentration erkennen, die gut mit dem Fahrtzyklus korreliert. Insbesondere beim Bremsen steigen die Rußmassenkonzentrationen stark an. Es ist also möglich, dass auch beim Bremsen Rußpartikel produziert werden. Eine Feststellung der Anteile aus Reifen- und Bremsabrieb wurde nicht unternommen. In JRC Science and Policy Reports „Non-exhaust traffic related emissions Brake and tyre wear PM“ aus dem Jahr 2014 wurde sowohl Brems- als auch Reifenabrieb in hohen Konzentrationen und im feinen und ultrafeinen Partikelgrößenbereich festgestellt. Wobei die Emission der Partikel stark von der Temperatur und dem Fahrmanöver abhängt. Bis zu  $10 \%$  des Reifenabriebs gelangt in die Atmosphäre und fällt nicht direkt wieder aus, wobei sich die Partikelemission auf der Straße und dem Prüfstand in Größe und Anzahl unterscheidet. Es wurde gezeigt, dass der Anteil an ultrafeinen Partikeln mit steigender Temperatur zunimmt.



**Abbildung 24: Rußmassenkonzentration bei Fahrzeugbetrieb, Motorabgas abgeleitet**

Abbildung 24 zeigt die Rußmassenkonzentration in der Kammer beim Durchfahren eines WLTC, wobei die Abgase des PKW komplett in die Abgasanlage abgeleitet werden. Die Vermutung einer Abhängigkeit von der Reifentemperatur wird durch den anfänglich flachen Verlauf der Rußmassenkonzentration bestätigt. Erst nach ungefähr 10 Minuten beginnt die Rußmassenkonzentration zu steigen. Die Vermutung liegt nahe, dass ein Zusammenhang zur Reifentemperatur besteht. Es wurden allerdings keine Reifentemperaturen mitgemessen. Weitere Studien könnten Aufschluss über die chemische Zusammensetzung und die Partikelgrößenverteilung liefern, sowie die Herkunft von Reifen und Bremse bestätigen.

**Der Verbrennungsmotor als hauptsächliche Rußquelle kann an dieser Stelle jedoch ausgeschlossen werden, was in der Interpretation der folgenden Messergebnisse berücksichtigt werden muss.**

# 7 Kammerexperimente bei Temperaturen von 0 °C, 15 °C und 30 °C

Im folgenden Kapitel wird die Vermessung der einzelnen PKWs abhängig von der eingestellten Temperatur dargestellt. Die Messungen fanden an der TU Dresden über einen Zeitraum von 1 ½ Wochen vom 21.10.2019 bis zum 30.10.2019 statt. Mit dem Aufbau und einer ersten Testphase wurde von Seiten der TU Dresden schon am 14.10.2019 begonnen. Die Klimakammer wurde für dieses geplante Experiment hergerichtet und erste Gasmonitore testweise in Betrieb genommen. Das TROPOS begann mit seinem Aufbau der Aerosolmesstechnik am 17.10.2019. In dieser Phase wurde die Kammer zusammen mit den Kollegen vor Ort neu begutachtet und ein geeigneter Standort für die Aerosolmesstechnik festgelegt. Die Geräte wurden wie in Kapitel 2 „Aufbau der Messkammer und Messgeräte“ außerhalb der Klimakammer hinter der schwenkbaren Kammertür platziert. Dies garantierte eine optimale Position für die Durchführung der verwendeten Einlässe in die Klimakammer.

Der Aufbau und die Testphase vom TROPOS beinhaltete eine komplette Kalibrierung und Überprüfungen der Aerosolmesstechnik. Dazu gehörte eine Dokumentation des Einlasssystems, um mögliche Verluste so gering wie möglich zu halten. Weiterhin wurden alle Geräte einem Nulltest unterzogen, d. h. es wurden Nullfilter vor jedes einzelne Gerät und anschließend vor das gesamte Einlasssystem gehängt, um interne Lecks ausschließen zu können. Diese Nullmessung wurde mehrfach während der gesamten Kampagne wiederholt. Weitere Qualitäts-sicherungsmaßnahmen sind die Dokumentation der internen wie externen Aerosolflüsse, der Statuswerte aller Geräte und einer eventuell notwendigen Kalibrierung. Speziell für das MPSS-System wurde noch die Hochspannung überprüft. Nach erfolgreicher Installation und Testphase der Messgeräte wurden erste Probeläufe in der Klimakammer gefahren, um die Position des Aerosoleinlasses zu überprüfen und die korrekte Funktion der Kammertechnik zu gewährleisten. Diese Tests wurden bis zum 18.10.2019 abgeschlossen.

## ■ Messzyklen

Die folgende Tabelle 8 zeigt die durchgeführten Messungen im Zeitraum von 1 ½ Wochen. Die „Fett“ markierten Messzyklen sind diejenigen, die später in der Auswertung näher betrachtet werden. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass die Klimakammer nach jeder durchgeführten Messung möglichst gut gespült wurde, um eine geringe Hintergrundbelastung für den nächsten Messzyklus vorzufinden. Teilweise waren Wartezeiten von mehr als 1-2 Stunden nötig. In der folgenden Reihenfolge wurden die PKW-Modelle getestet:

1. VW Golf 7 GTI (Euro 6d-TEMP, Super 98, mit Ottopartikelfilter)
2. Ford Focus (Euro 5, Super 95, kein Partikelfilter)
3. Skoda Superb (Euro 5, Diesel, mit Dieselpartikelfilter)
4. VW Golf 6 (Euro 5, Super 95, kein Partikelfilter)
5. VW Passat (Euro 6c, Diesel, mit Dieselpartikelfilter)

**Tabelle 9: Messzyklen in den 1 ½ Wochen Messzeitraum**

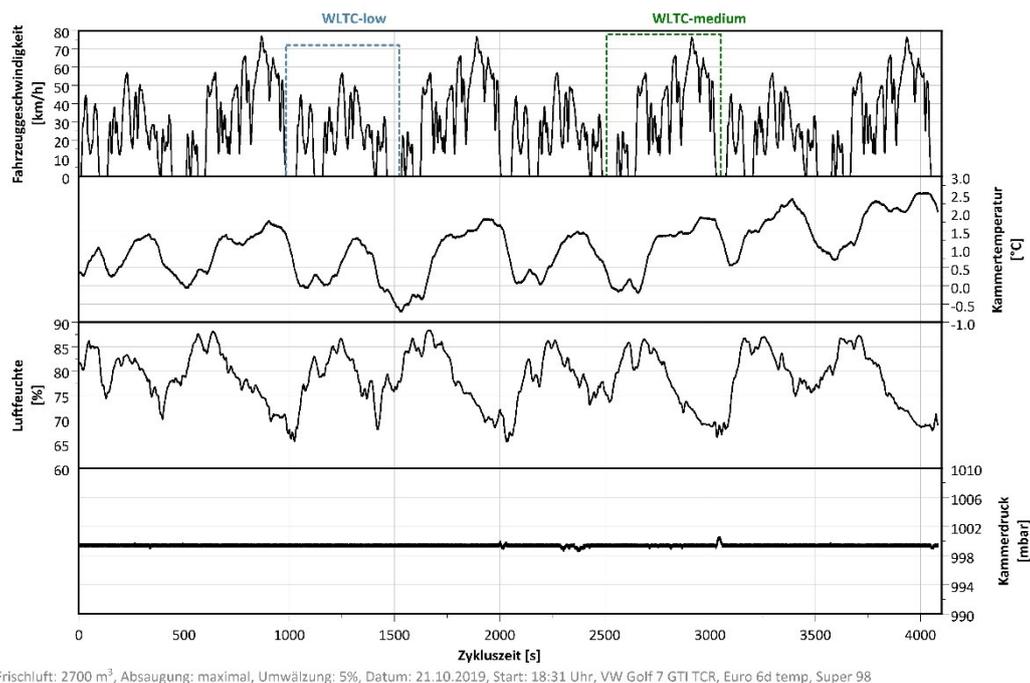
Tag	Montag 21.10.2019	Dienstag 22.10.2019	Mittwoch 23.10.2019	Donnerstag 24.10.2019	Freitag 25.10.2019
Vormittag	Grundvermessung Golf 7 TCR Euro 6d-TEMP Otto	<b>WLTC_I_m_30 °C Golf 7 TCR Euro 6d-TEMP Otto</b> WLTC_I_m_30 °C Golf 7 TCR Euro 6d-TEMP Otto FW-GebL. Konstant	Grundvermessung Ford Focus Euro 5 Otto <b>WLTC_I_m_15 °C Ford Focus Euro 5 Otto</b>	Grundvermessung Skoda Superb Euro 5 Diesel <b>WLTC_I_m_15 °C Skoda Superb</b>	Fahrzeugumbau <b>WLTC_I_m_30 °C VW Golf 6 Euro 5 Otto</b>
Nachmittag	WLTC_I_m_15°C Golf 7 TCR hohe Verdickung Euro 6d-TEMP Otto	Fahrzeugumbau <b>WLTC_I_m_30 °C Ford Focus Euro 5 Otto</b>	WLTC_I_m_25Grad Ford Focus Euro 5 Otto plus Lastsprünge	<b>WLTC_I_m_30 °C Skoda Superb Euro 5 Diesel</b>	<b>WLTC_I_m_15 °C VW Golf 6 Euro 5 Otto</b>
Abend	<b>WLTC_I_m_15°C Golf 7 TCR Euro 6d-TEMP Otto</b> WLTC_I_m_0Grad Golf 7 TCR Euro 6d-TEMP Otto	<b>WLTC_I_m_0 °C Ford Focus Euro 5 Otto</b>	Fahrzeugumbau Partikelfilter- regeneration	<b>WLTC_I_m_0 °C Skoda Superb Euro 5 Diesel</b>	<b>WLTC_I_m_0 °C VW Golf 6 Euro 5 Otto</b>
Nacht	Nullmessung	Nullmessung Konditionierung 23 °C	Konditionierung 23 °C	Fahrzeugumbau	Konditionierung 23 °C
Tag	Montag 28.10.2019	Dienstag 29.10.2019	Mittwoch 30.10.2019	Donnerstag 31.10.2019	Freitag 01.11.2019
Vormittag	Grundvermessung Golf 6 Euro 5 Otto	WLTC_I_m_30 °C VW Passat Euro 6c Diesel	Grundvermessung VW Passat Euro 6c Diesel		
Nachmittag	Fahrzeugumbau	<b>WLTC_I_m_15 °C VW Passat Euro 6c Diesel</b>	<b>WLTC_I_m_30 °C VW Passat Euro 6c Diesel</b>		
Abend	Fahrzeugumbau	WLTC_I_m_0 °C VW Passat Euro 6c Diesel	<b>WLTC_I_m_0 °C VW Passat Euro 6c Diesel</b>		
Nacht	Nullmessung	Konditionierung 23 °C			

Die folgenden fünf Unterkapitel zeigen die durchgeführten Messungen der PKW-Modelle im Detail. Jeder Messzyklus hatte eine Länge von ca. 4100 Sekunden, in dem der PKW eine festgelegte Fahrtstrecke mit unterschiedlichen Ruhe- und Beschleunigungsphasen durchläuft. Während dieser Zeit wurden sämtliche Parameter in der Klimakammer wie auch der Aerosolmesstechnik aufgezeichnet. Die Aerosolmesstechnik zeichnet auch während der nicht aktiven Messzyklen ständig die Aerosolkonzentration in der Klimakammer auf, um das Konzentrationsniveau vor und nach jeder Messung zu beurteilen. Dieses Kapitel soll die Ergebnisse der einzelnen Messungen lediglich veranschaulichen aber nicht weiter interpretieren. Eine genaue Auswertung und Interpretation der gewonnenen Daten erfolgt ab dem Kapitel 8 Ergebnisse der Kammerexperimente.

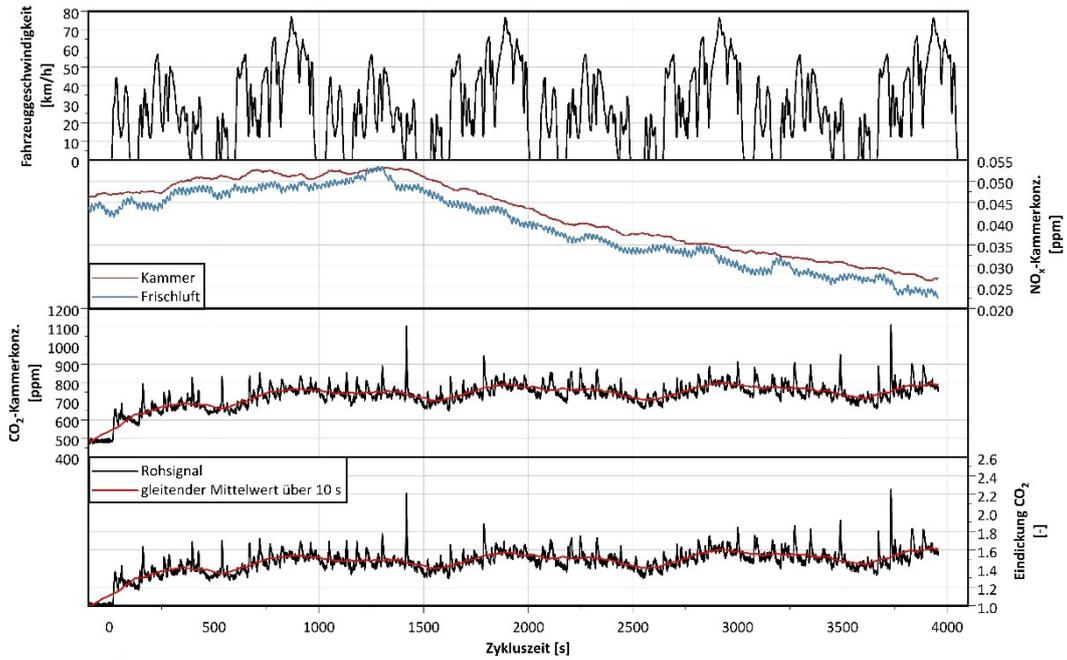
1. Parameter der Klimakammer für die gemessenen Temperaturen 0 °C, 15 °C und 30 °C:
  - a. Fahrzeuggeschwindigkeit: Dargestellt ist die Geschwindigkeit der PKW während des gesamten Messzyklus in km/h. Ein Messzyklus erstreckte sich über eine Zeit von 4100 Sekunden. Die Abbildungen zeigen eine typische Stadtfahrt mit zahlreichen Stopps und Beschleunigungen bis zu 70 km/h.
  - b. NO<sub>x</sub>-Kammerkonzentration
  - c. CO<sub>2</sub>-Kammerkonzentration: Diese wurde als Tracer zur Regulierung der Frischluft und Abluftzufuhr benötigt. Mit der Regulierung der Kammerluft auf Umgebungsluftwerte sollte auch eine möglichst realistische Partikelanzahlkonzentration in der Klimakammer gewährleistet werden. Als Referenz diente die CO<sub>2</sub>-Konzentration an der Messstation DD-Nord. Weitere Informationen dazu enthält Kapitel 6. In Rot der gleitende Mittelwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration
  - d. Eindickungsfaktor der Klimakammer bzgl. CO<sub>2</sub>, in Rot der gleitende Mittelwert des Eindickungsfaktors

2. Partikelgrößenverteilung für die gemessenen Temperaturen 0 °C, 15 °C und 30 °C:  
Dargestellt ist die mittlere Partikelgrößenverteilung für jede einzelne Temperatur. Auf der x-Achse befindet sich der Durchmesser von 7 nm bis 800 nm und auf der y-Achse die Partikelanzahlkonzentration in  $dN/d\log D_p$ . Die gemessenen Temperaturen sind farblich kodiert. Blau steht für 0 °C, grün für 15 °C und rot für 30 °C.
3. Partikelanzahlkonzentration als Zeitreihe für die gemessenen Temperaturen 0 °C, 15 °C und 30 °C:  
Für jeden PKW sind 3 Messzyklen dargestellt, die jeweils das MPSS und die 2 zusätzlich installierten Gesamtpartikelzähler zeigen. Der Plot beinhaltet den Messzyklus von 4100 Sekunden und jeweils 20 min vor und nach dem Messzyklus, welches durch die blauen Trennbalken veranschaulicht wird. Diese 20 Minuten soll das Konzentrationsniveau der Messkammer zu Beginn und das Abklingverhalten durch Spülung nach jeder Messung veranschaulichen. Das Größenspektrometer wird als „TROPOS MPSS Instrument“ bezeichnet. Die zwei Gesamtpartikelzähler jeweils als T-CPC1 und T-CPC 2. Diese T-CPCs dienen zur Charakterisierung der beiden Einlasssysteme. Zu erwarten ist, dass T-CPC-2 eine höhere Variabilität zeigt, da sich der Einlass näher an der Emissionsquelle befindet.
4. Rußmassenkonzentration als Zeitreihe für die gemessenen Temperaturen 0 °C, 15 °C und 30 °C:  
Wie bei der Partikelanzahlkonzentration in Punkt 3 wird die Rußmassenkonzentration für jeden Messzyklus als Zeitreihe dargestellt. Zeit und Farbkodierung ist ebenfalls gleich.

## 7.1 VW Golf 7 GTI TCR, mit Partikelfilter

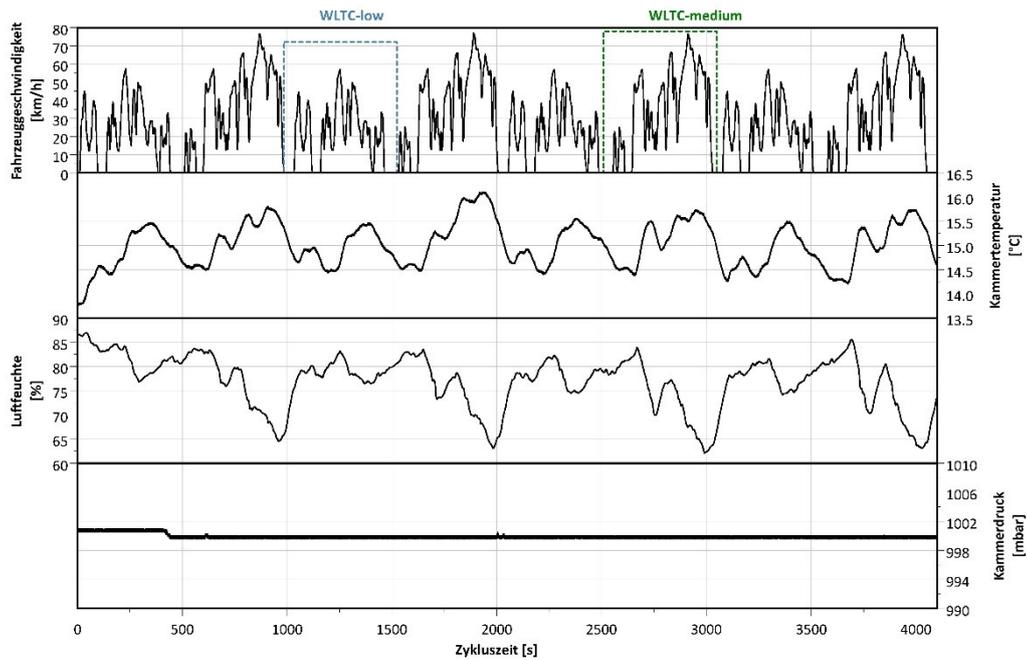


**Abbildung 25: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 0 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter).**



Frischlufte: 2700 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 21.10.2019, Start: 18:31 Uhr, VW Golf 7 GTI TCR, Euro 6d temp, Super 98

**Abbildung 26: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 0 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter).**



Frischlufte: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 21.10.2019, Start: 16:03 Uhr, VW Golf 7 GTI TCR, Euro 6d temp, Super 98

**Abbildung 27: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 15 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter).**

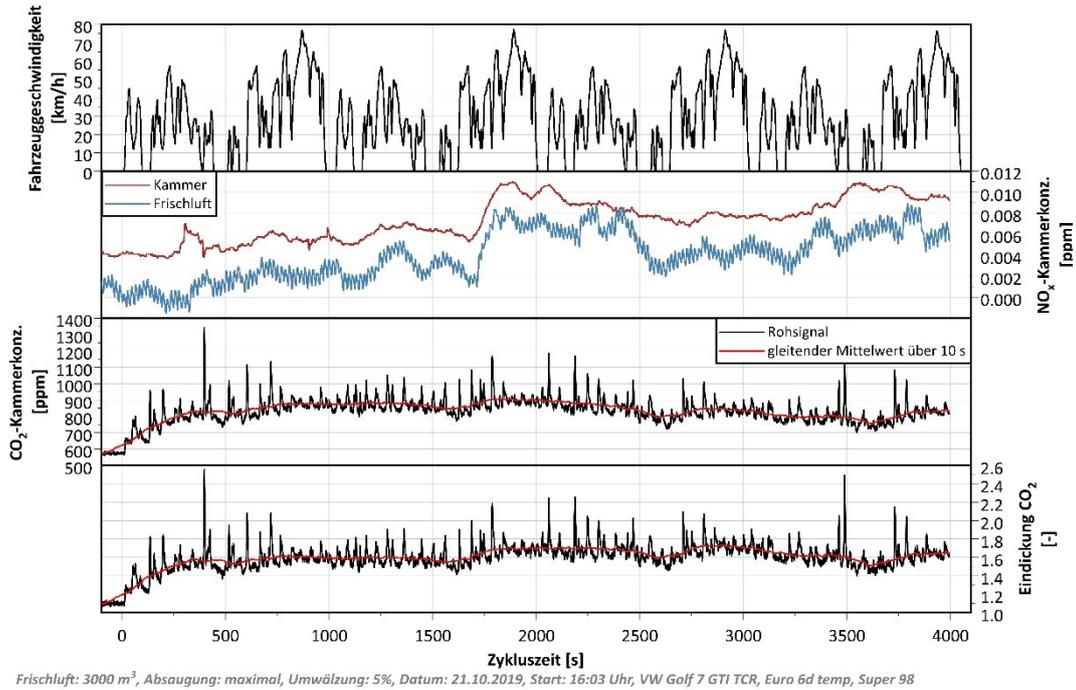


Abbildung 28: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 15 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter).

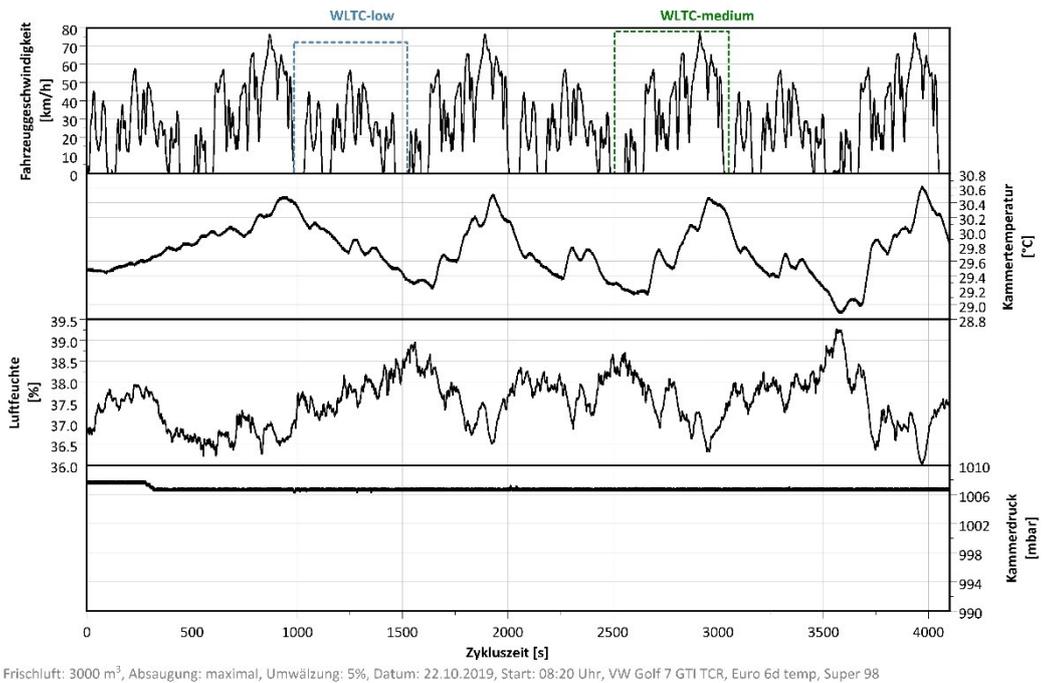
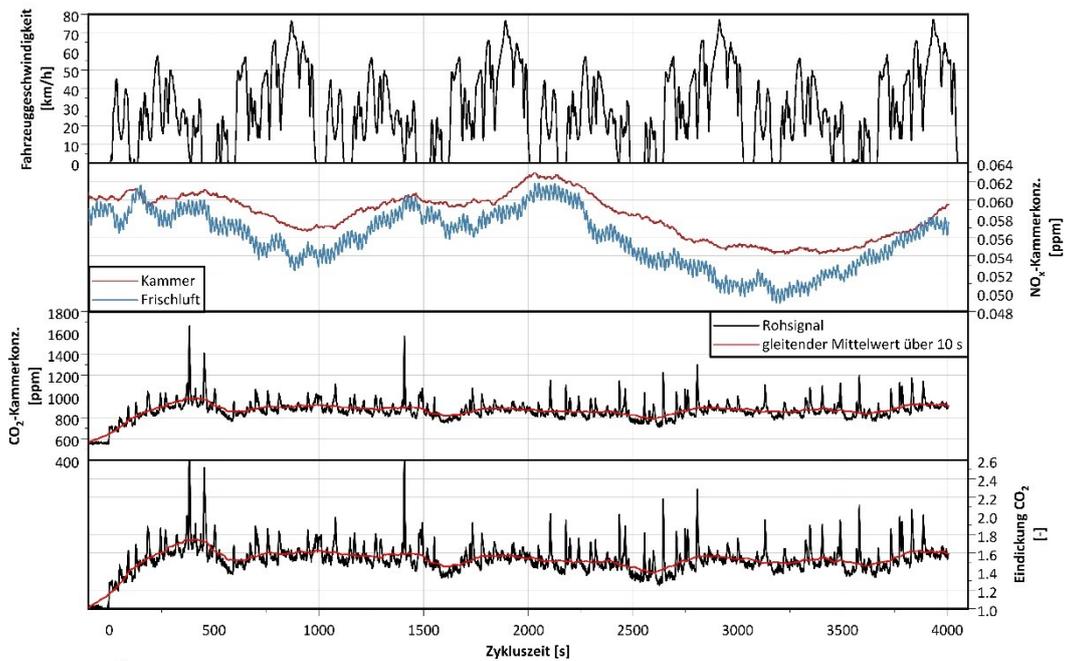


Abbildung 29: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 30 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter).



Frischluf: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 22.10.2019, Start: 08:20 Uhr, VW Golf 7 GTI TCR, Euro 6d temp, Super 98

Abbildung 30: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 30 °C (VW Golf 7 GTI, mit Partikelfilter).

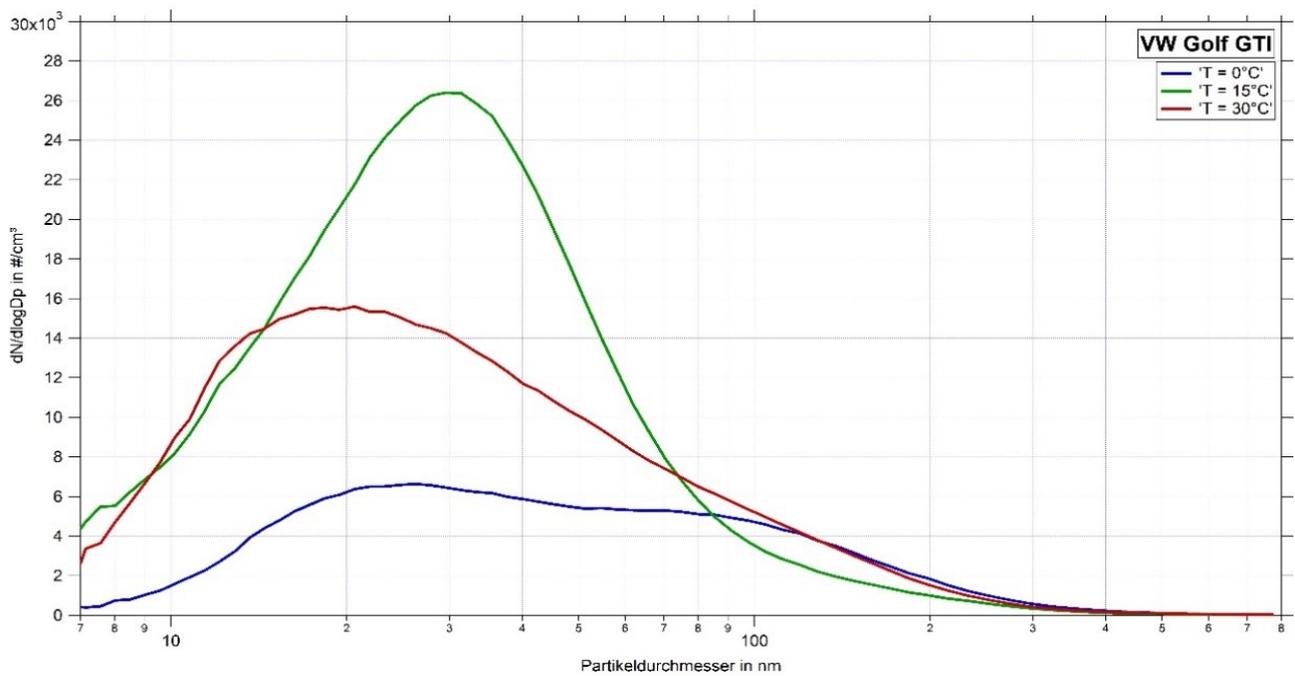
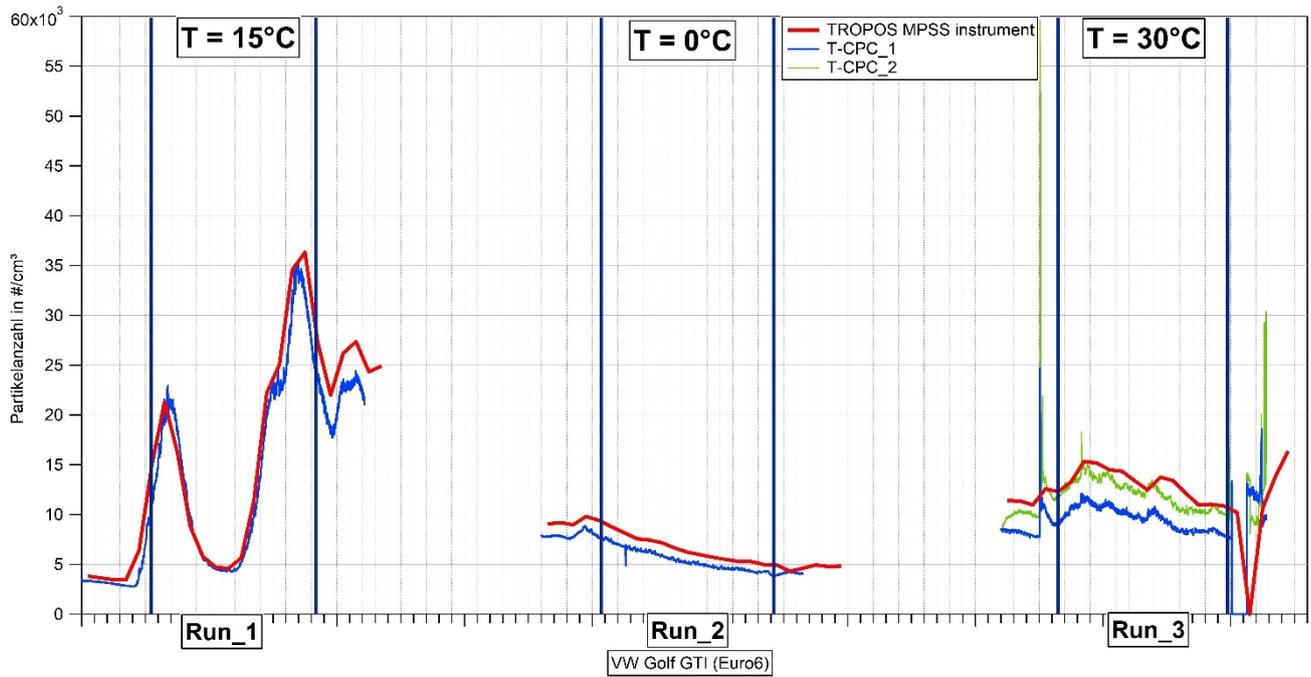
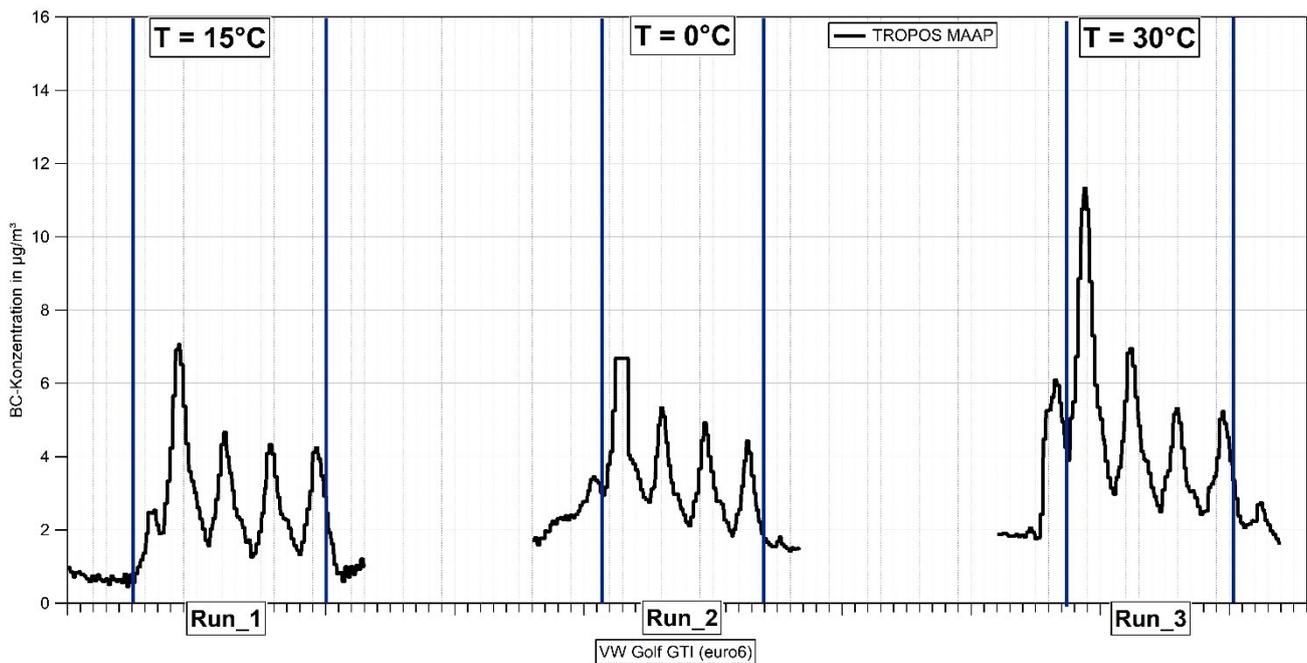


Abbildung 31: Partikelgrößenverteilung vom VW Golf 7 GTI (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.

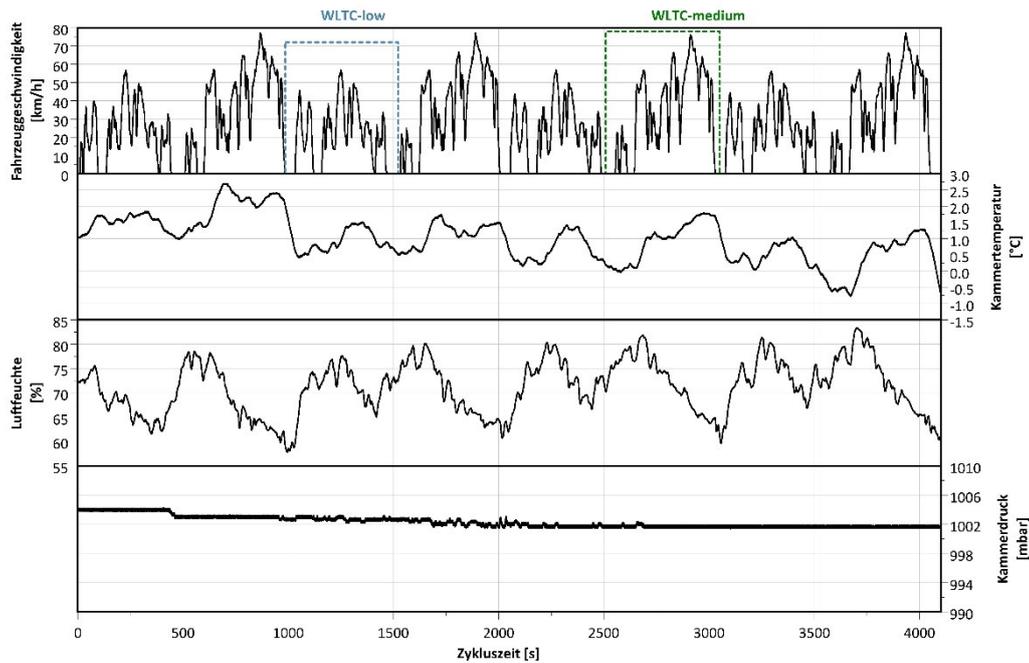


**Abbildung 32: Zeitreihe der Partikelanzahlkonzentration vom VW Golf 7 GTI (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. Jeder Run hat einen Messzyklus von 4100 Sekunden, welcher durch die beiden Trennlinien gekennzeichnet ist.**



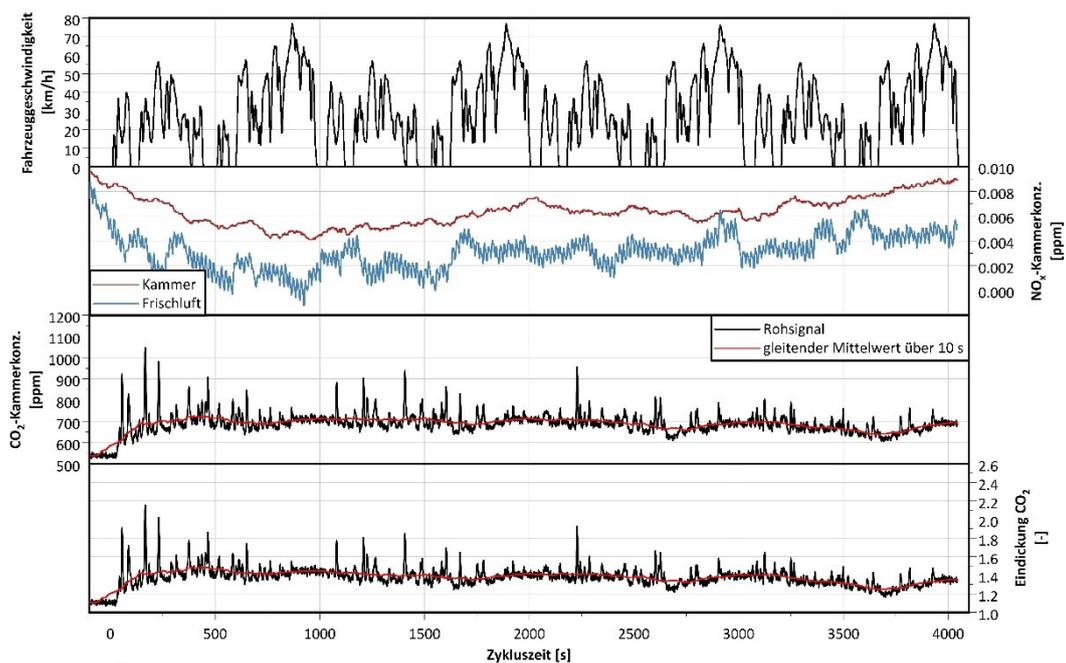
**Abbildung 33: Zeitreihe der Rußmassenkonzentration vom VW Golf 7 GTI (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. Jeder Run hat einen Messzyklus von 4100 Sekunden, welcher durch die beiden Trennlinien gekennzeichnet ist.**

## 7.2 Ford Focus MK3 Turnier, ohne Partikelfilter



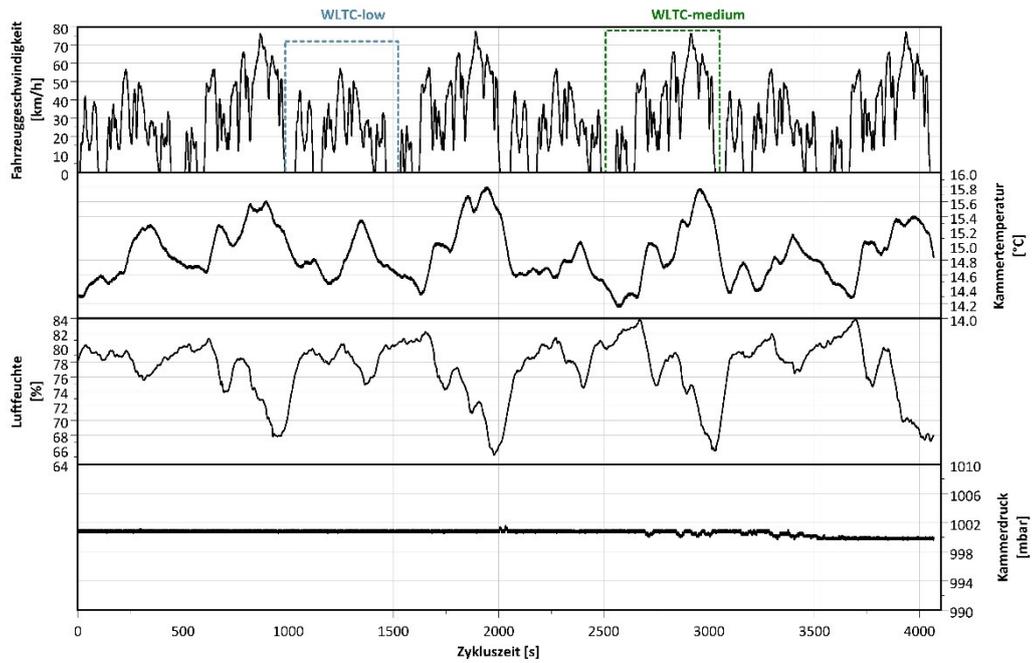
Frischluf: 2700 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 22.10.2019, Start: 17:04 Uhr, Ford Focus MK3 Turnier 1.6l ECO-Boost, Euro5, Super 95

Abbildung 34: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 0 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter).



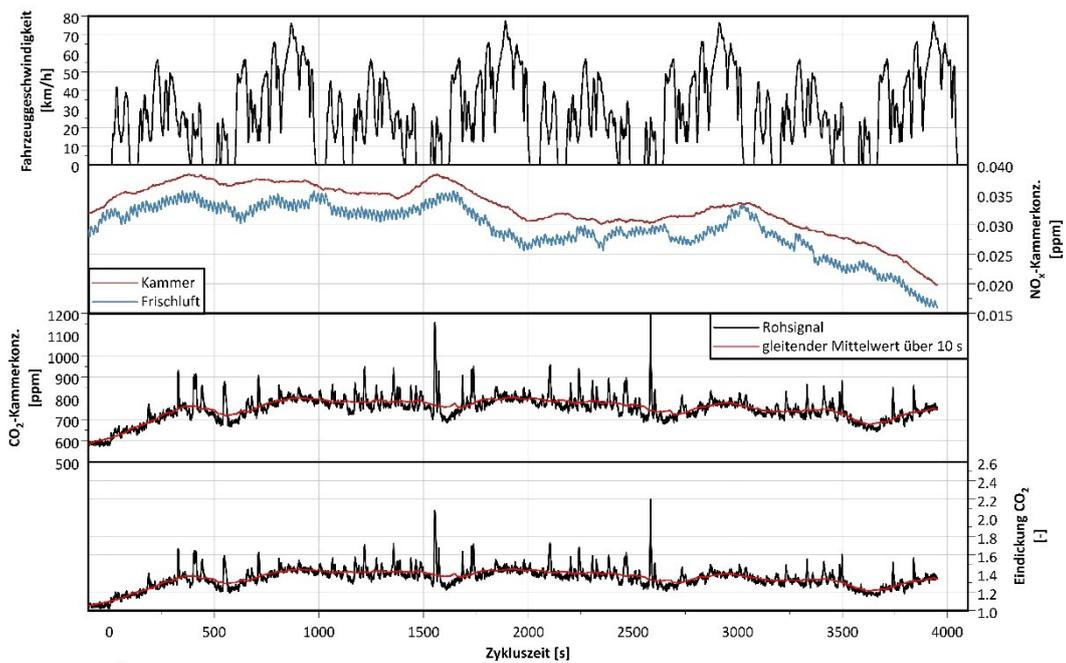
Frischluf: 2700 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 22.10.2019, Start: 17:04 Uhr, Ford Focus MK3 Turnier 1.6l ECO-Boost, Euro5, Super 95

Abbildung 35: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 0 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter).



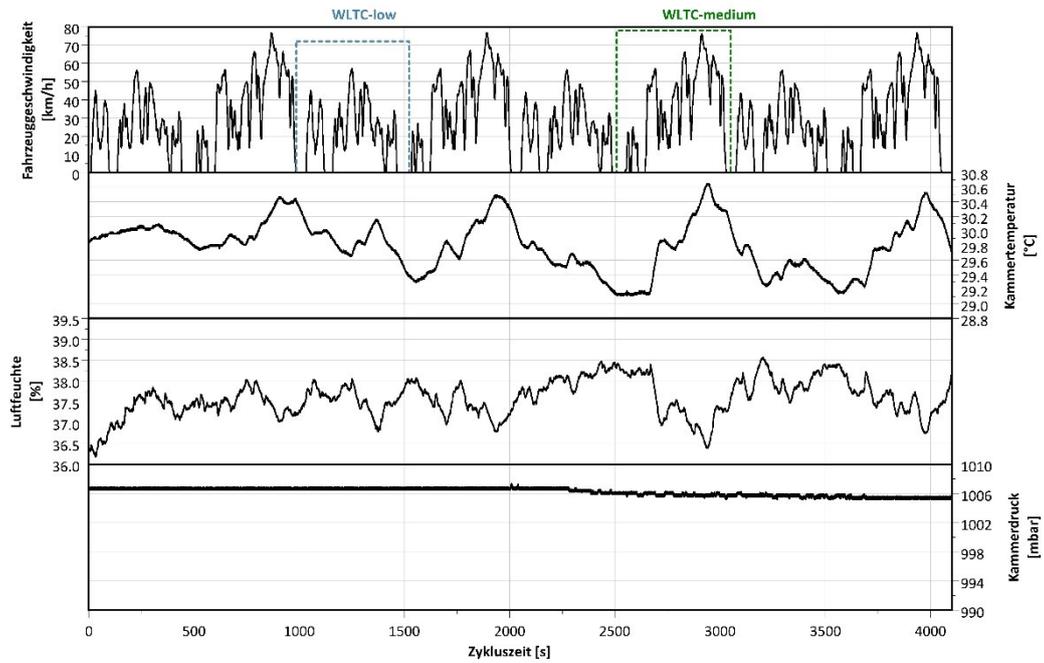
Frischlufft: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 23.10.2019, Start: 10:56 Uhr, Ford Focus MK3 Turnier 1.6l ECO-Boost, Euro5, Super 95

**Abbildung 36: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 15 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter).**

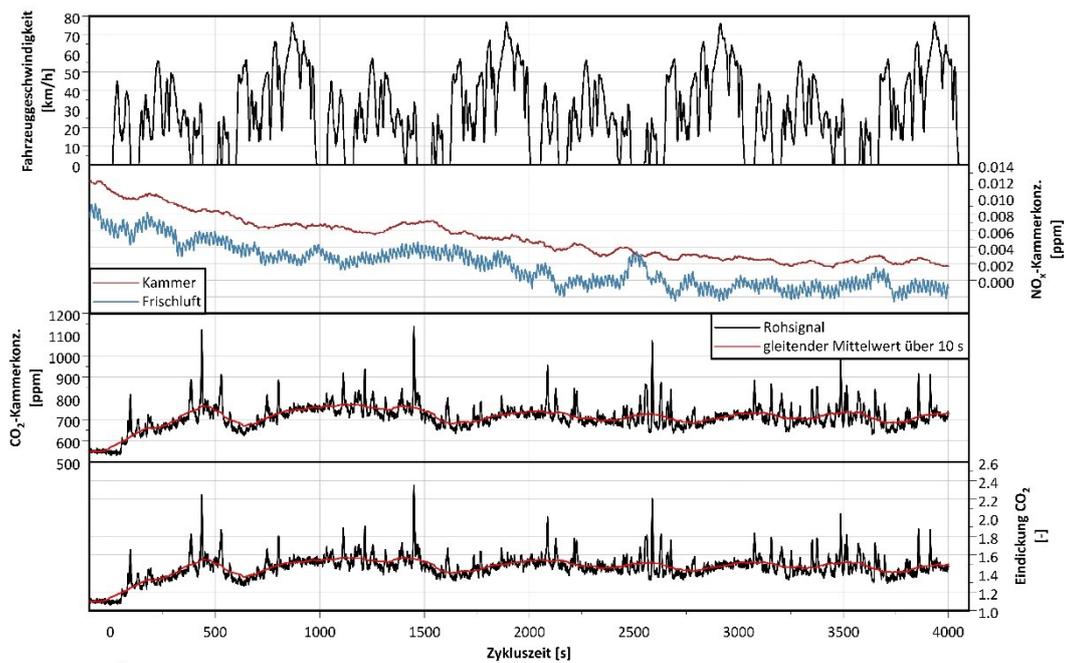


Frischlufft: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 23.10.2019, Start: 10:56 Uhr, Ford Focus MK3 Turnier 1.6l ECO-Boost, Euro5, Super 95

**Abbildung 37: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 15 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter).**



**Abbildung 38: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 30 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter).**



**Abbildung 39: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 30 °C (Ford Focus, ohne Partikelfilter).**

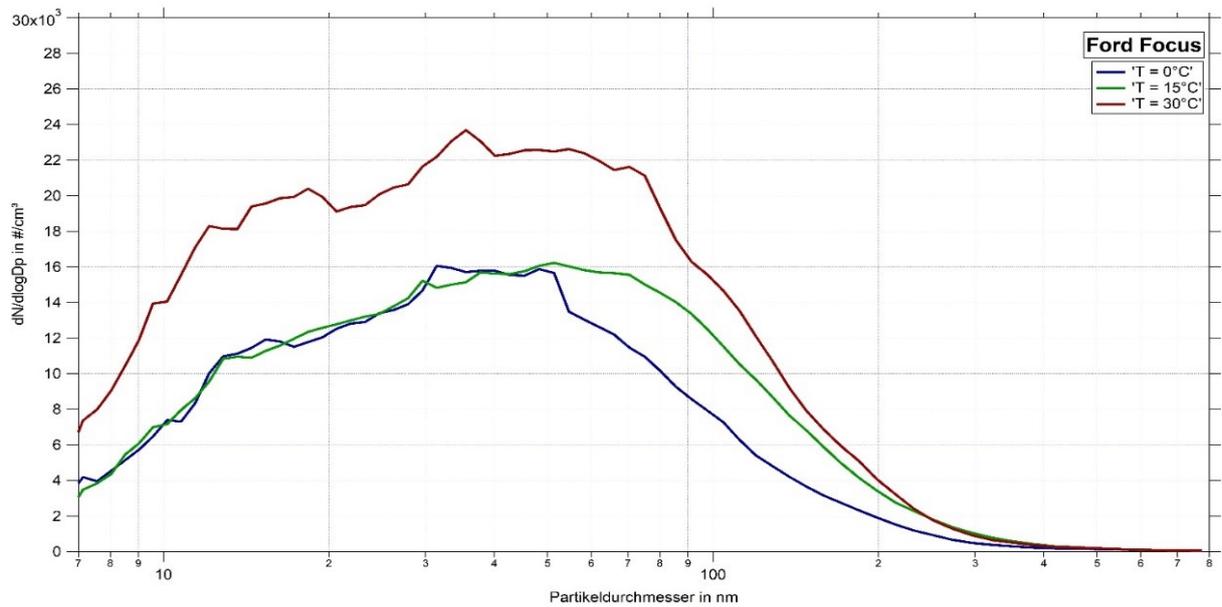


Abbildung 40: Partikelgrößenverteilung vom Ford Focus (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. Bei der stärksten Erwärmung der Reifen ist die PN am höchsten.

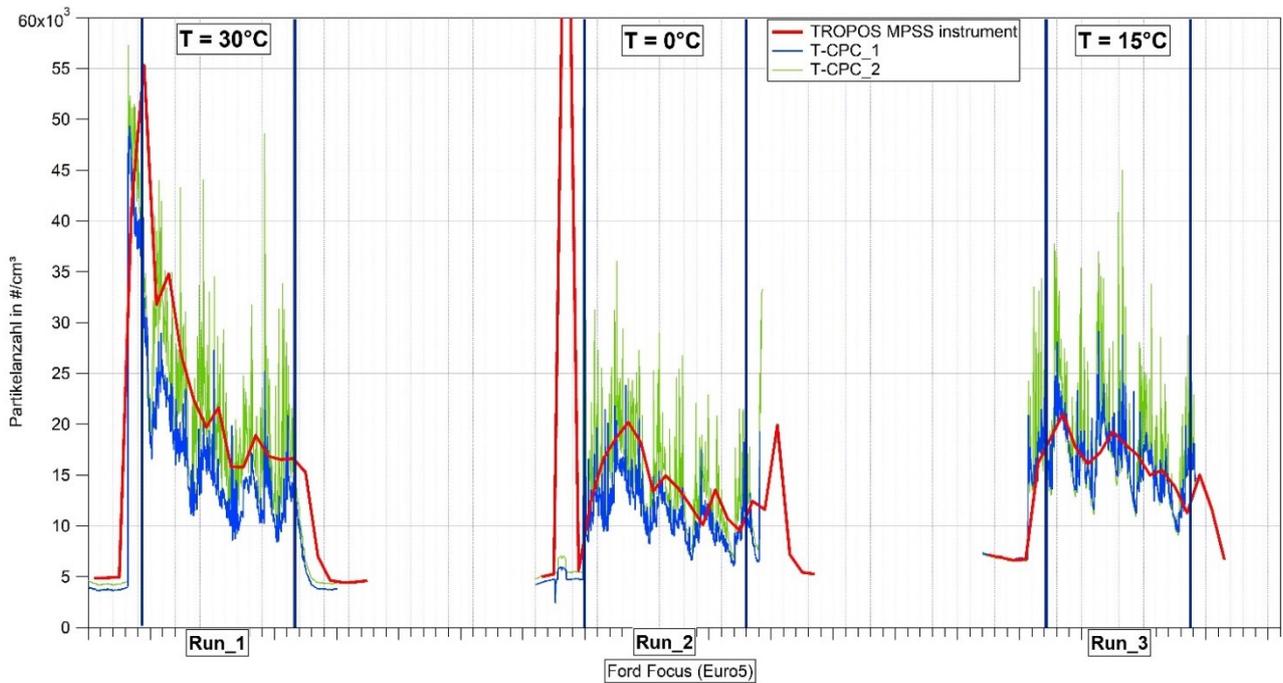


Abbildung 41: Zeitreihe der Partikelanzahlkonzentration vom Ford Focus (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. Jeder Run hat einen Messzyklus von 4100 Sekunden, welcher durch die beiden Trennlinien gekennzeichnet ist.

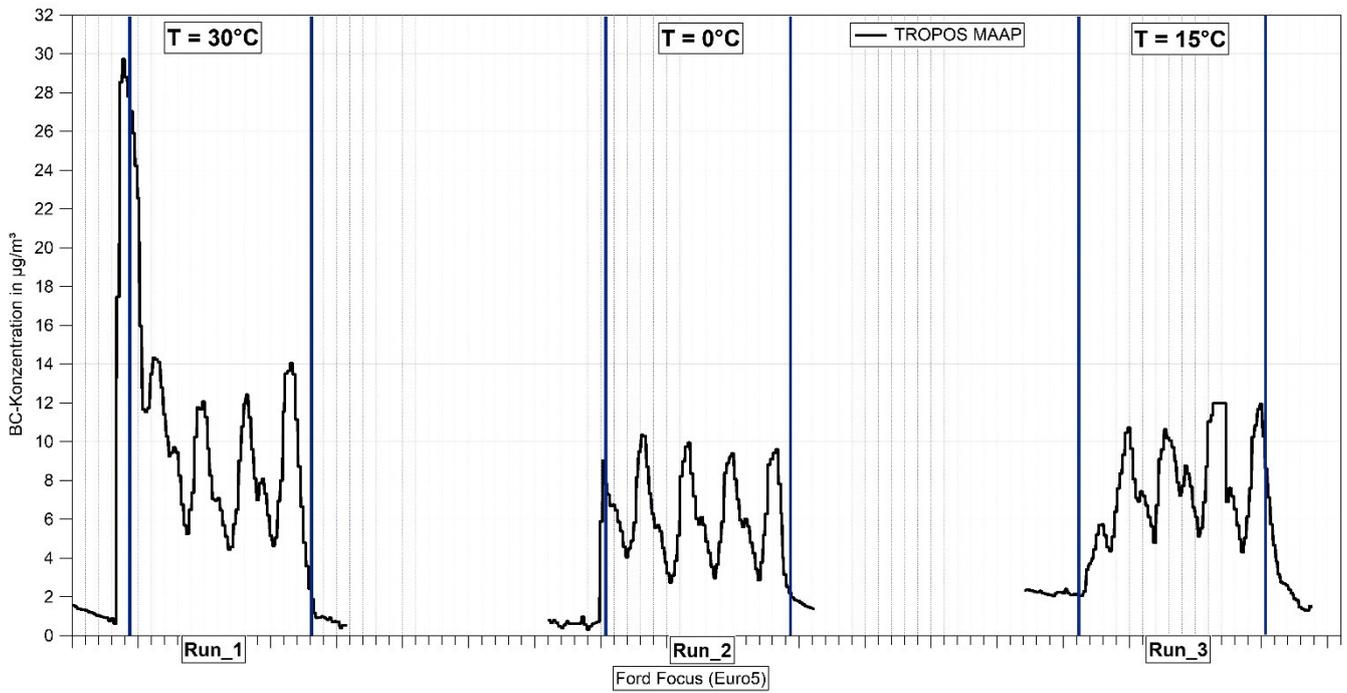
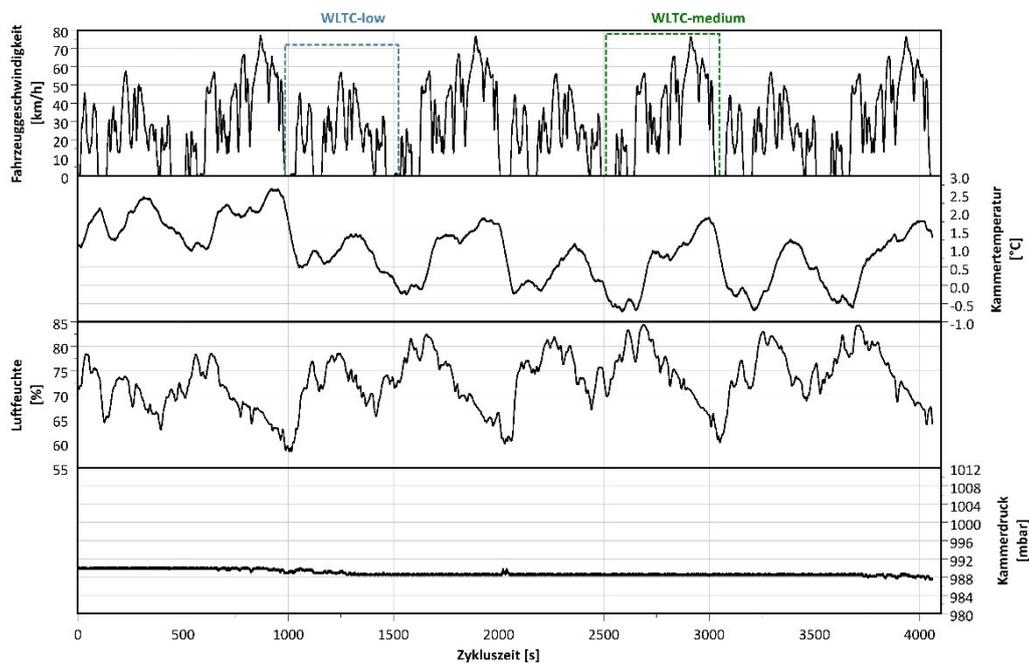


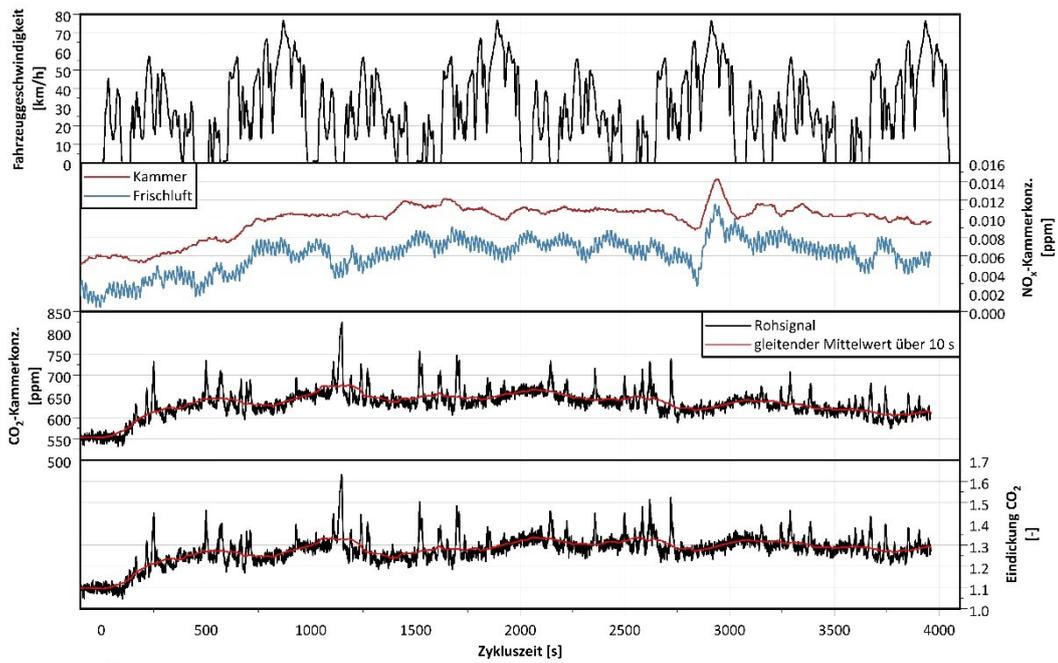
Abbildung 42: Zeitreihe der Rußmassenkonzentration vom Ford Focus (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. Jeder Run hat einen Messzyklus von 4100 Sekunden, welcher durch die beiden Trennlinien gekennzeichnet ist.

### 7.3 Skoda Superb 2, mit Partikelfilter



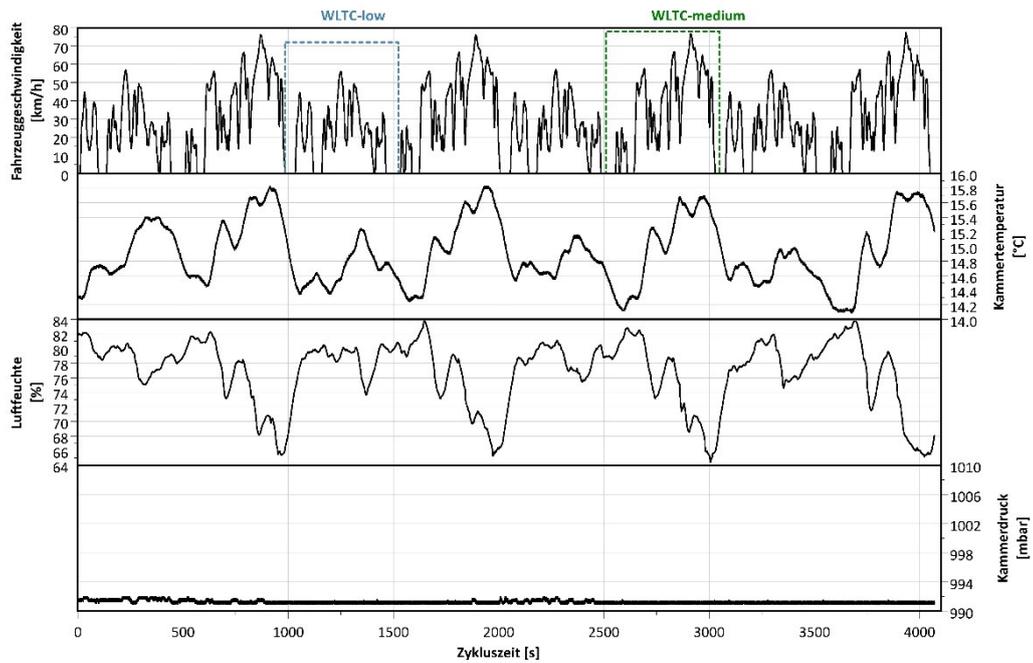
Frischlucht:  $2700 \text{ m}^3$ , Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 24.10.2019, Start: 15:53 Uhr, Skoda Superb 2 2.0l TDI EA189, Euro5, Diesel

Abbildung 43: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei  $0^\circ\text{C}$  (Skoda Superb, mit Partikelfilter).



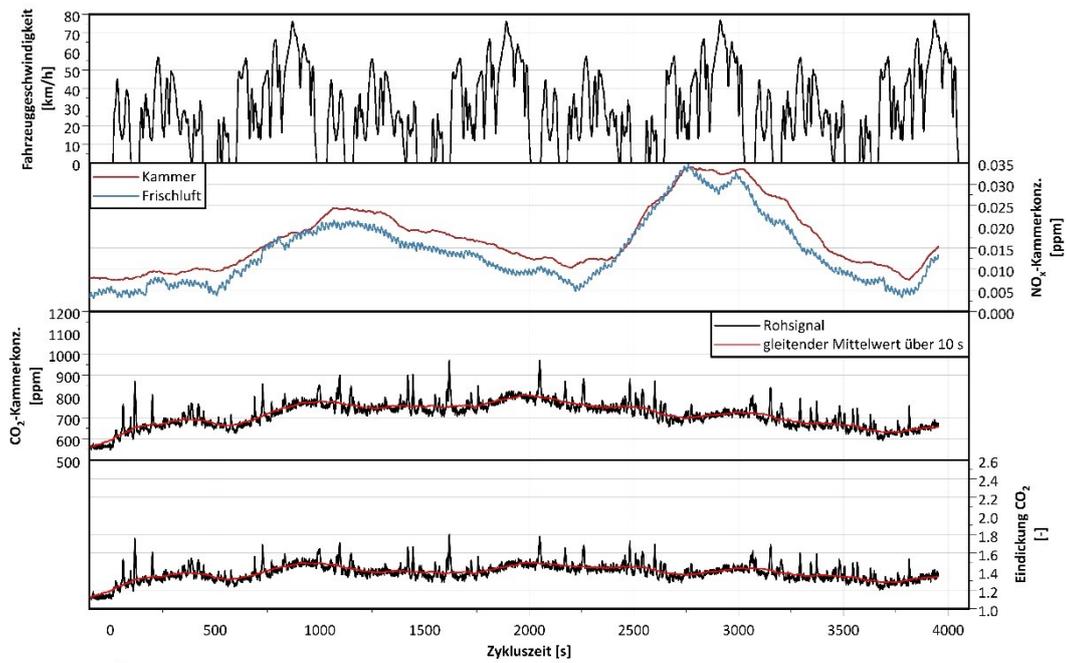
Frischluf: 2700 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 24.10.2019, Start: 15:53 Uhr, Skoda Superb 2 2.0l TDI EA189, Euro5, Diesel

**Abbildung 44: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 0 °C (Skoda Superb, mit Partikelfilter).**



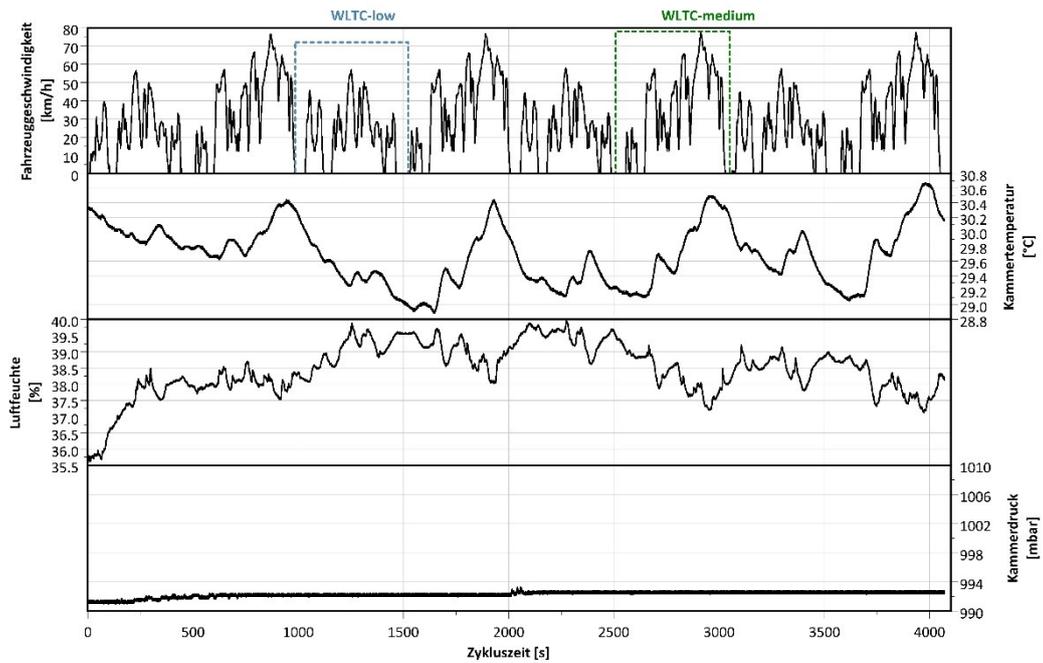
Frischluf: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 24.10.2019, Start: 10:57 Uhr, Skoda Superb 2 2.0l TDI EA189, Euro5, Diesel

**Abbildung 45: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 15 °C (Skoda Superb, mit Partikelfilter).**



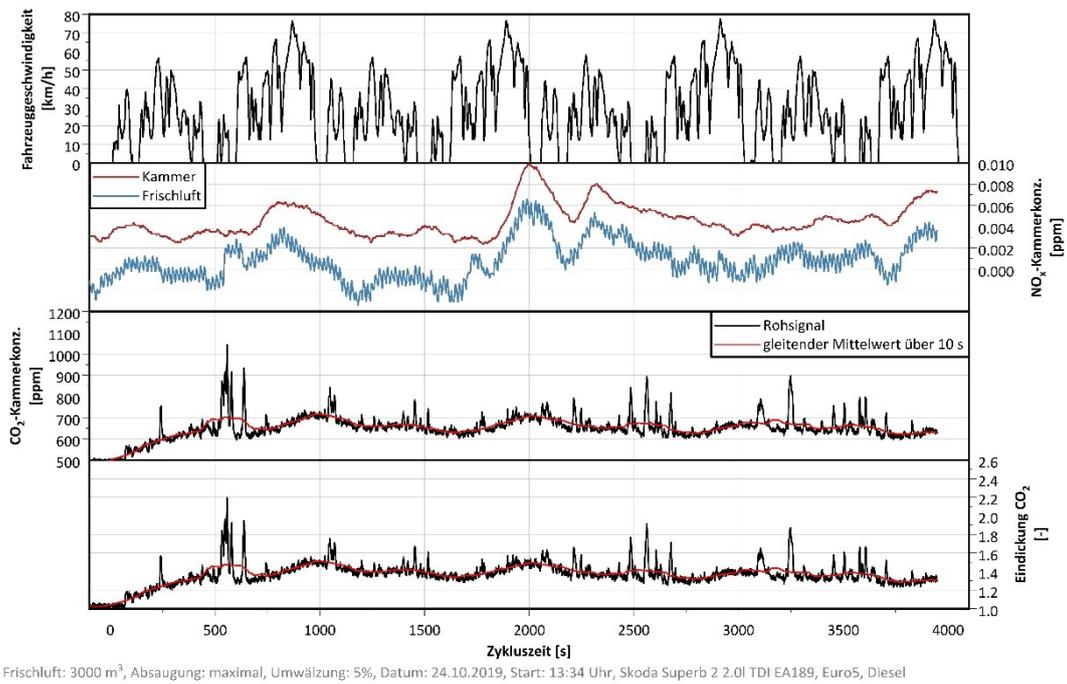
Frischluft: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 24.10.2019, Start: 10:57 Uhr, Skoda Superb 2 2.0l TDI EA189, Euro5, Diesel

**Abbildung 46: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 15 °C (Skoda Superb, mit Partikelfilter).**

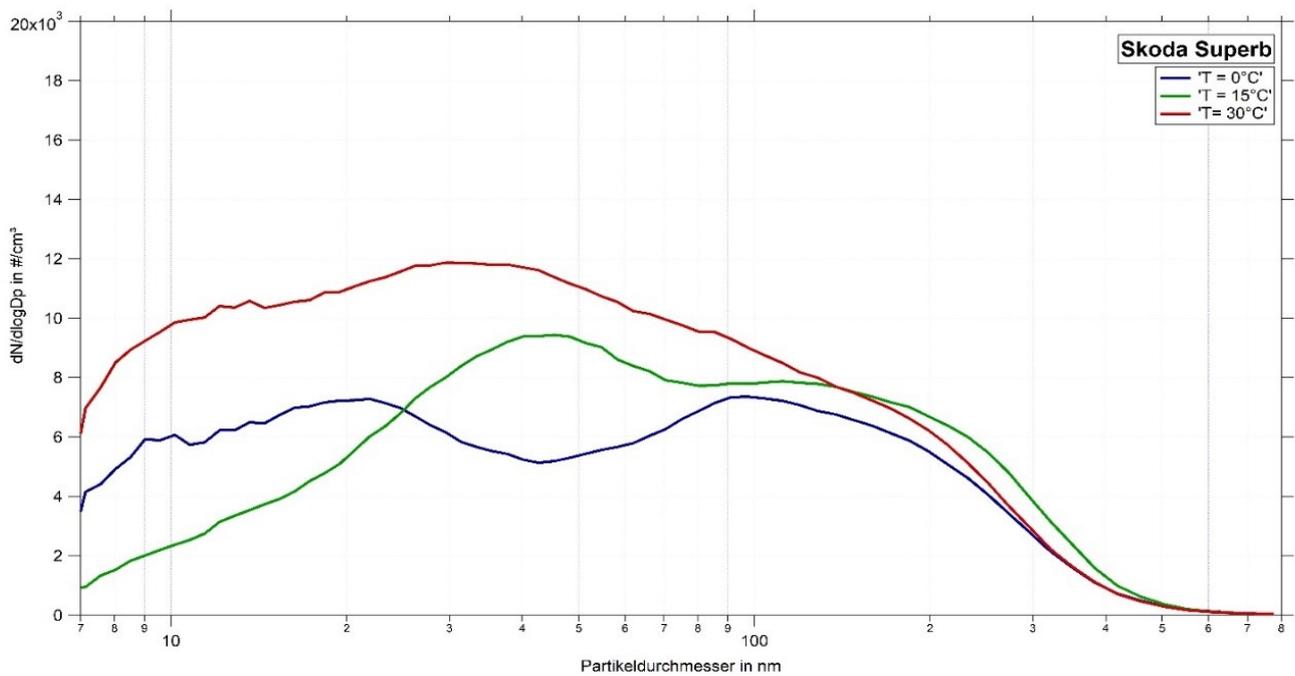


Frischluft: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 24.10.2019, Start: 13:34 Uhr, Skoda Superb 2 2.0l TDI EA189, Euro5, Diesel

**Abbildung 47: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 30 °C (Skoda Superb, mit Partikelfilter).**



**Abbildung 48: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 30 °C (Skoda Superb, mit Partikelfilter).**



**Abbildung 49: Partikelgrößenverteilung vom Skoda Superb (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.**

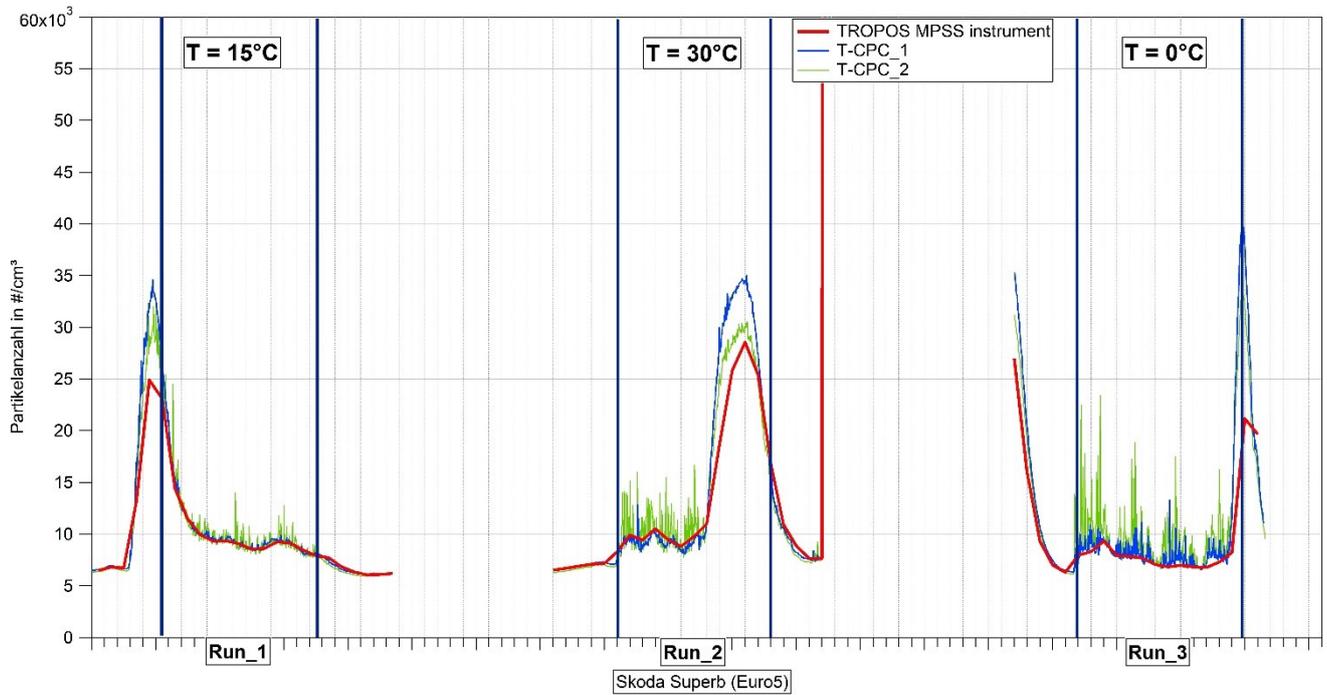


Abbildung 50: Zeitreihe der Partikelanzahlkonzentration vom Skoda Superb (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. Jeder Run hat einen Messzyklus von 4100 Sekunden, welcher durch die beiden Trennlinien gekennzeichnet ist.

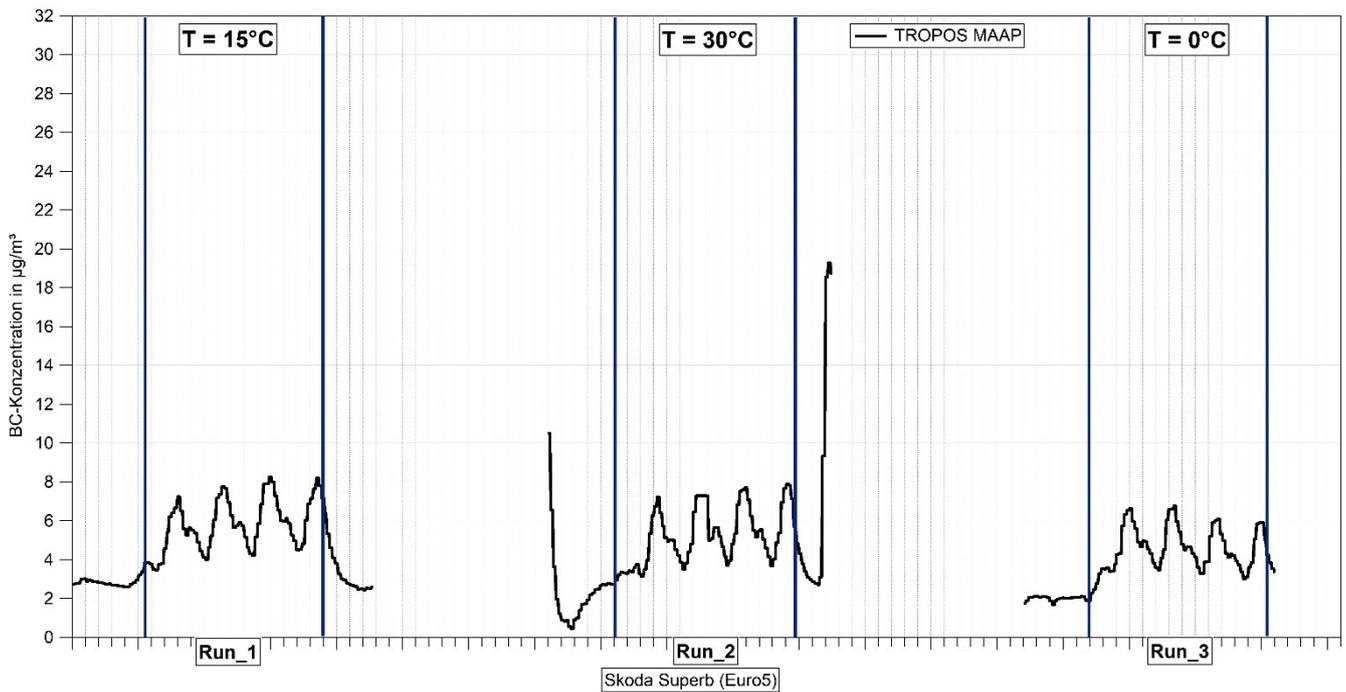


Abbildung 51: Zeitreihe der Rußmassenkonzentration vom Skoda Superb (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. Jeder Run hat einen Messzyklus von 4100 Sekunden, welcher durch die beiden Trennlinien gekennzeichnet ist.

## 7.4 VW Golf 6 TSI, ohne Partikelfilter

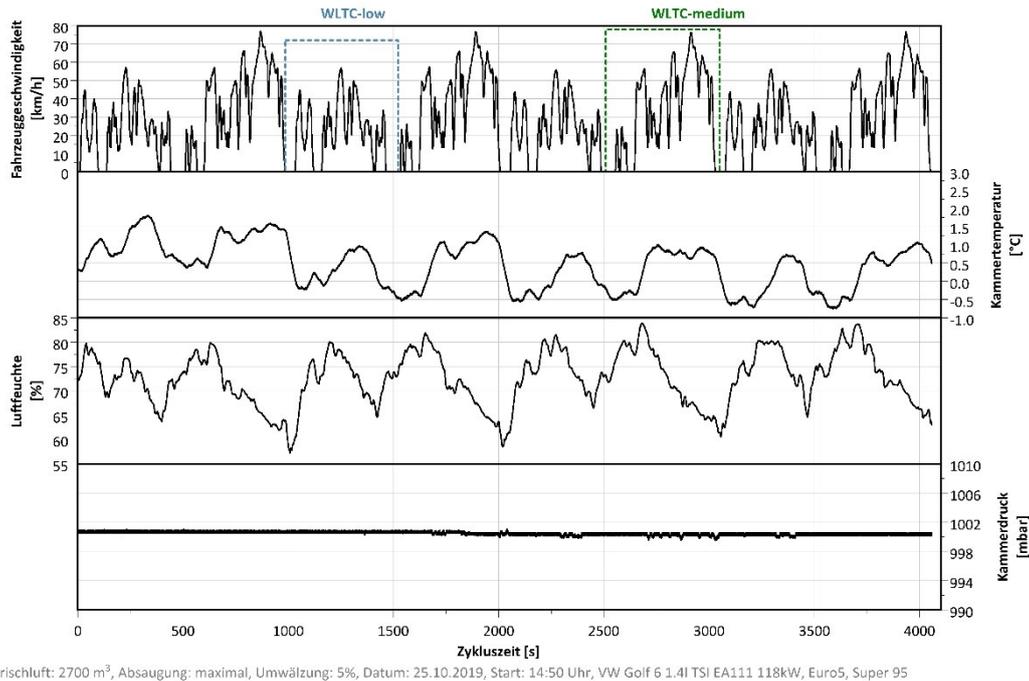


Abbildung 52: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 0 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter).

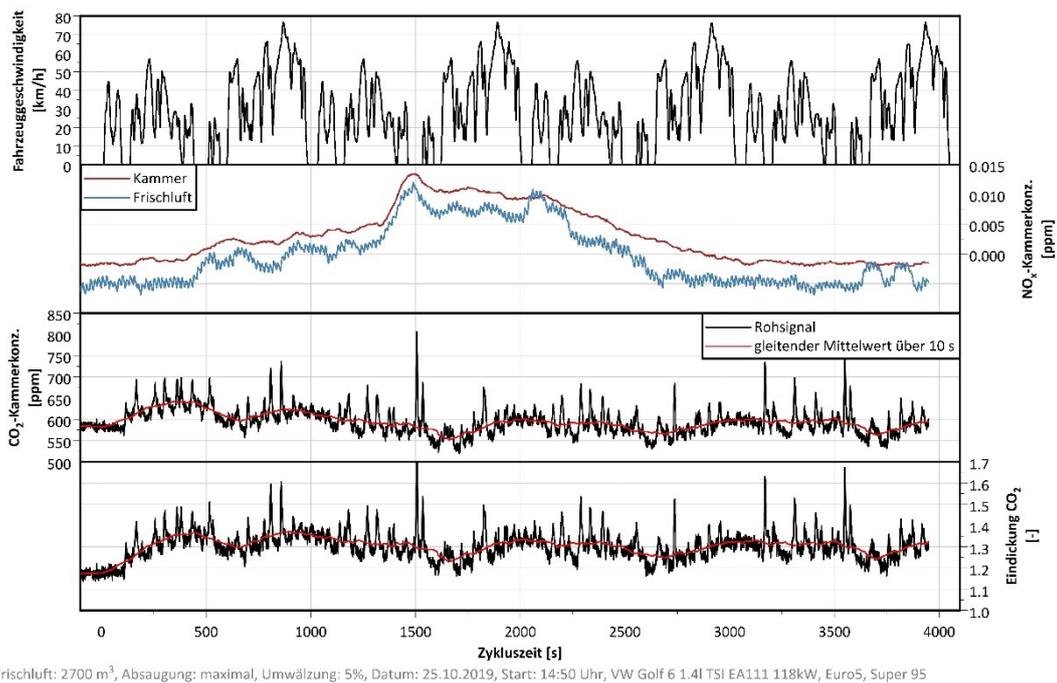
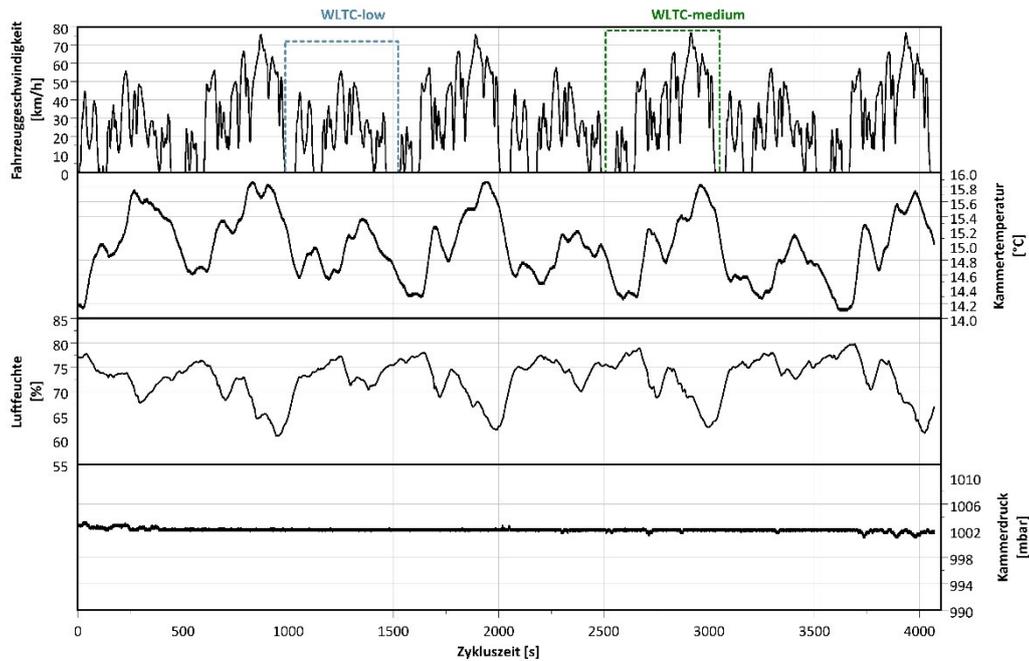
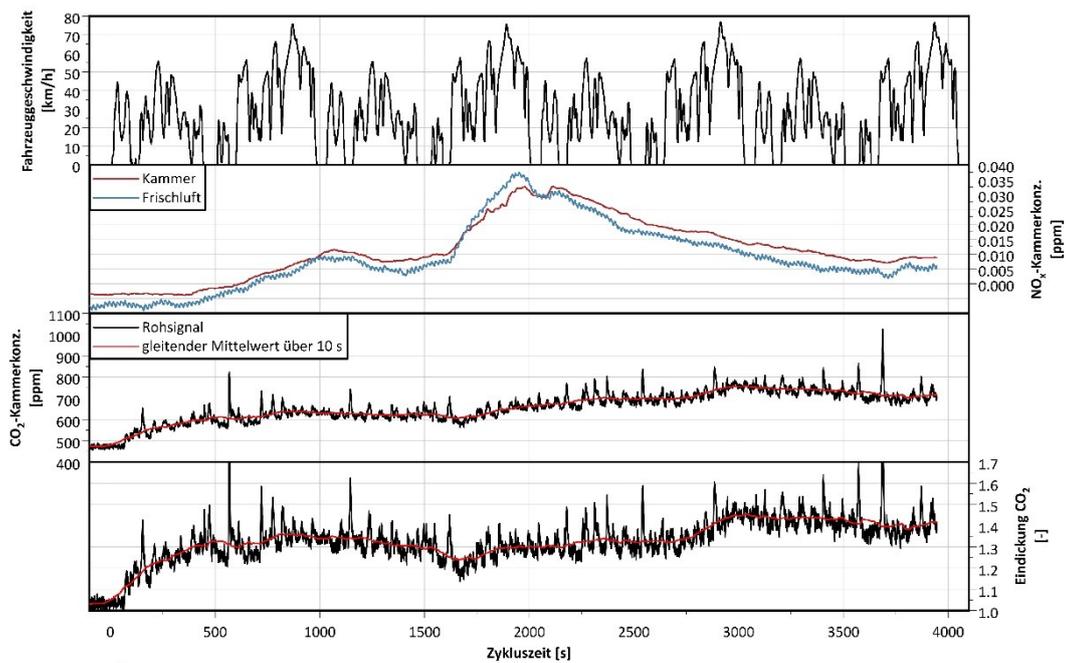


Abbildung 53: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 0 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter).



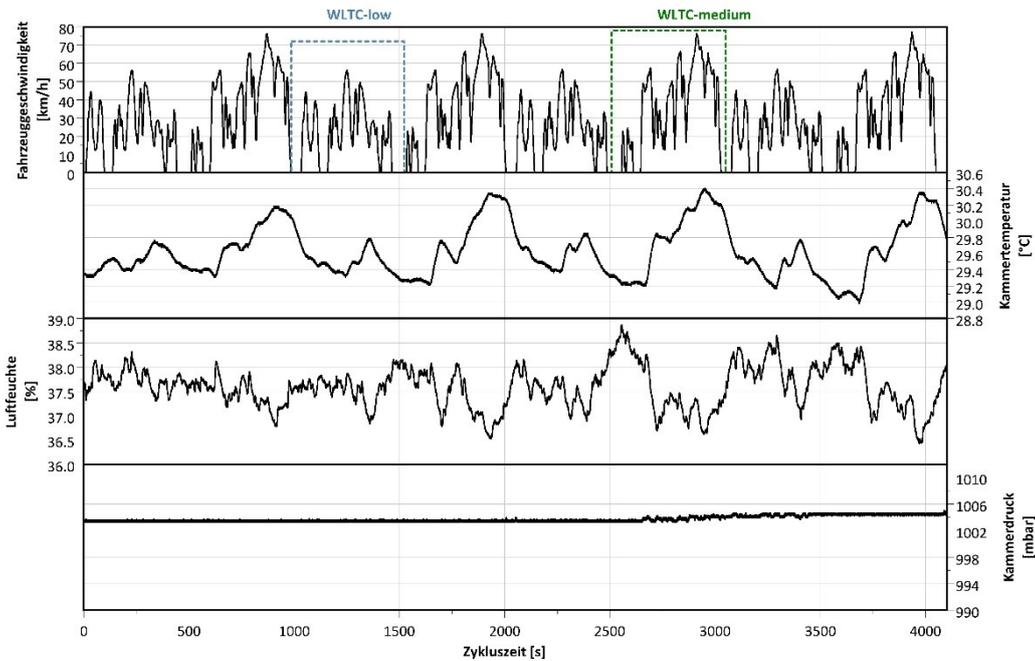
Frischluf: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 25.10.2019, Start: 12:55 Uhr, VW Golf 6 1.4l TSI EA111 118kW, Euro5, Super 95

**Abbildung 54: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 15 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter).**



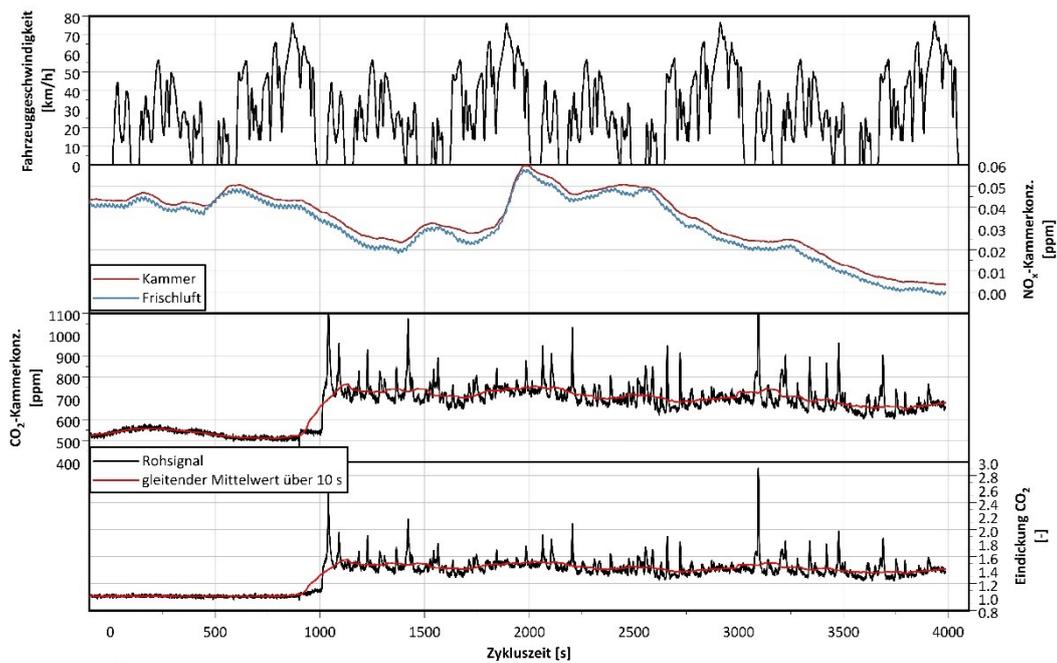
Frischluf: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 25.10.2019, Start: 12:55 Uhr, VW Golf 6 1.4l TSI EA111 118kW, Euro5, Super 95

**Abbildung 55: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 15 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter).**



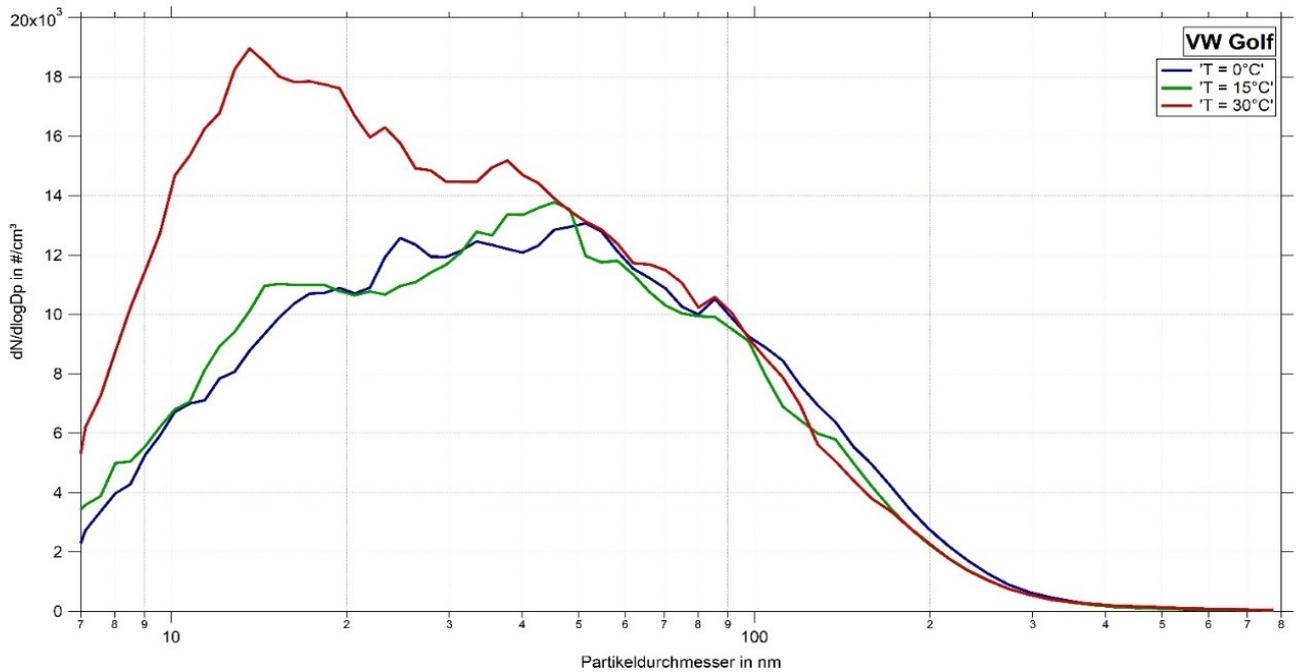
Frischlufte: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 25.10.2019, Start: 11:00 Uhr, VW Golf 6 1.4l TSI EA111 118kW, Euro5, Super 95

**Abbildung 56: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 30 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter).**

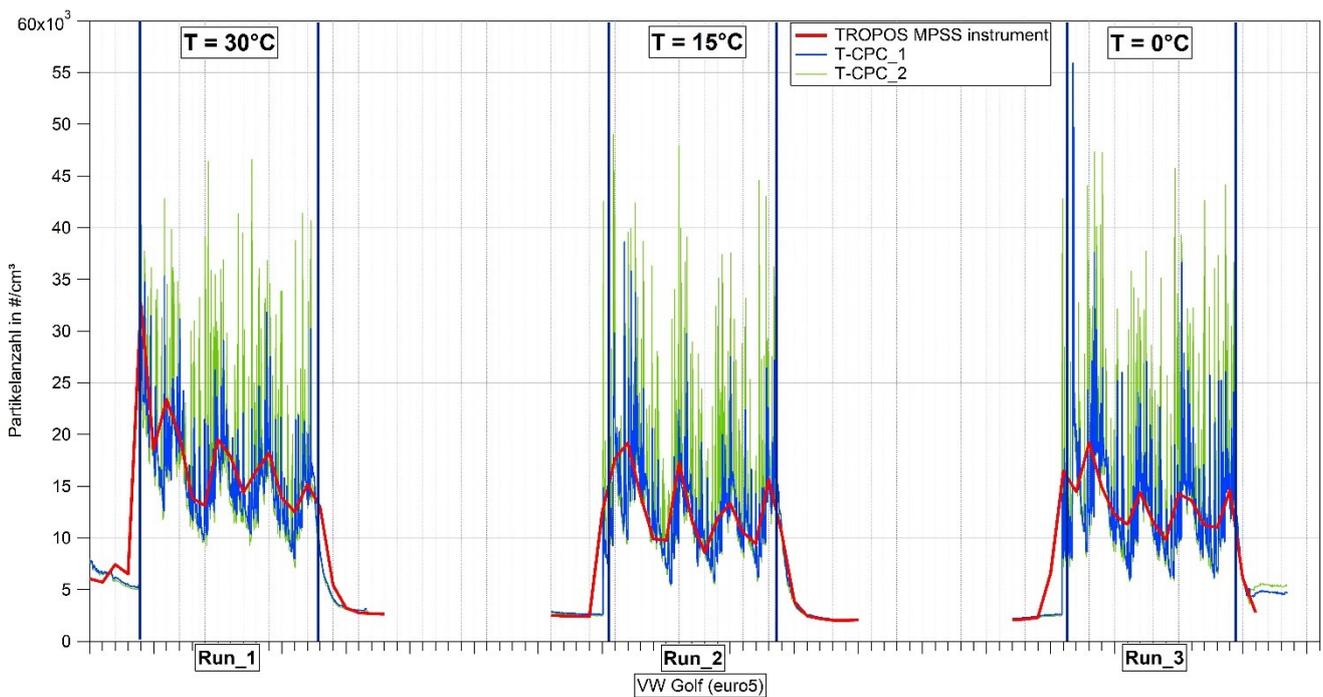


Frischlufte: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 25.10.2019, Start: 11:00 Uhr, VW Golf 6 1.4l TSI EA111 118kW, Euro5, Super 95

**Abbildung 57: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 30 °C (VW Golf 6, ohne Partikelfilter).**



**Abbildung 58: Partikelgrößenverteilung vom VW Golf 6 (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.**



**Abbildung 59: Zeitreihe der Partikelanzahlkonzentration vom VW Golf 6 (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. Jeder Run hat einen Messzyklus von 4100 Sekunden, welcher durch die beiden Trennlinien gekennzeichnet ist.**

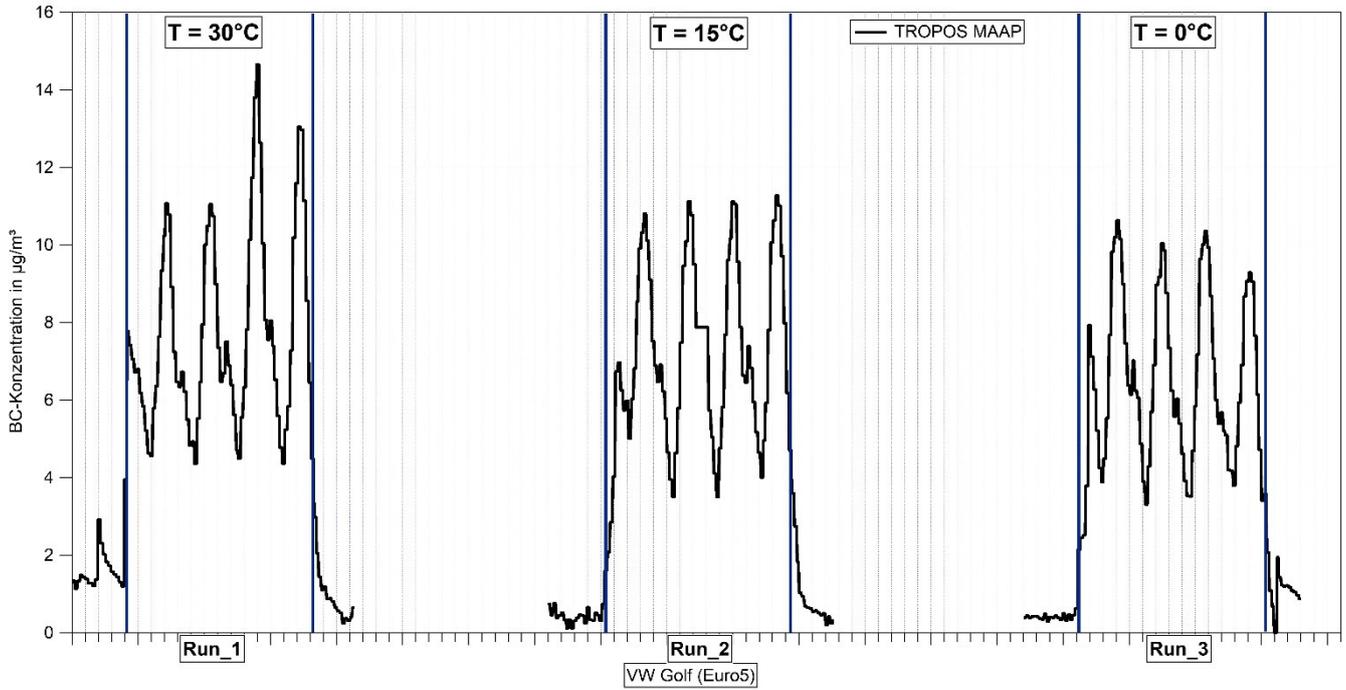
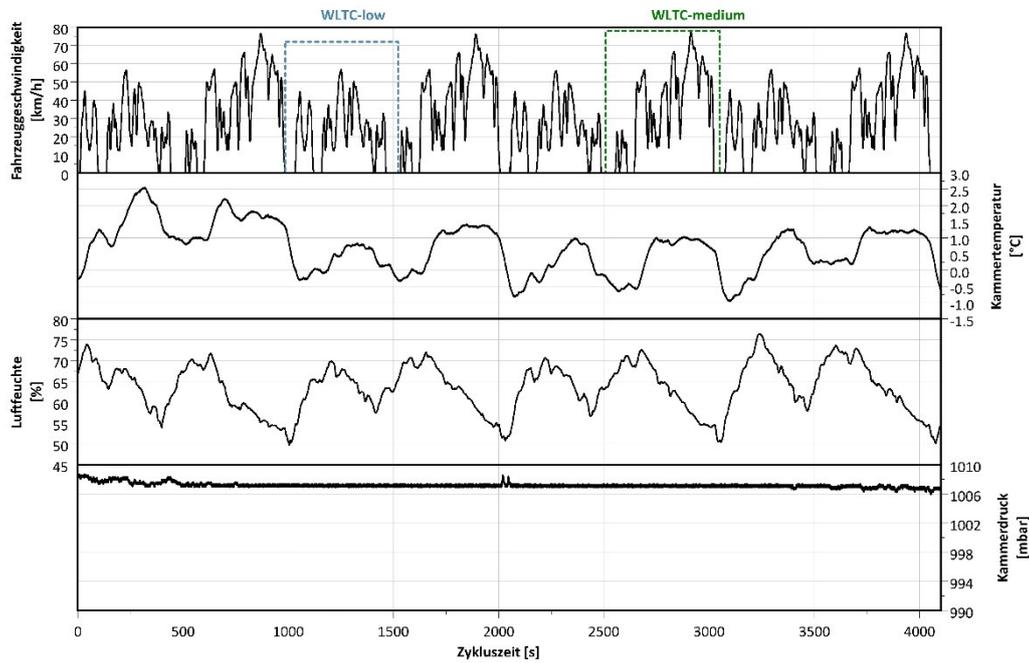


Abbildung 60: Zeitreihe der Rußmassenkonzentration vom VW Golf 6 (ohne Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. Jeder Run hat einen Messzyklus von 4100 Sekunden, welcher durch die beiden Trennlinien gekennzeichnet ist.

## 7.5 VW Passat B8 Variant, mit Partikelfilter



Frischlucht: 2700 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 30.10.2019, Start: 14:10 Uhr, VW Passat B8 EA288 2.0l, Euro6c, Diesel

Abbildung 61: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 0 °C (VW Passat, mit Partikelfilter).

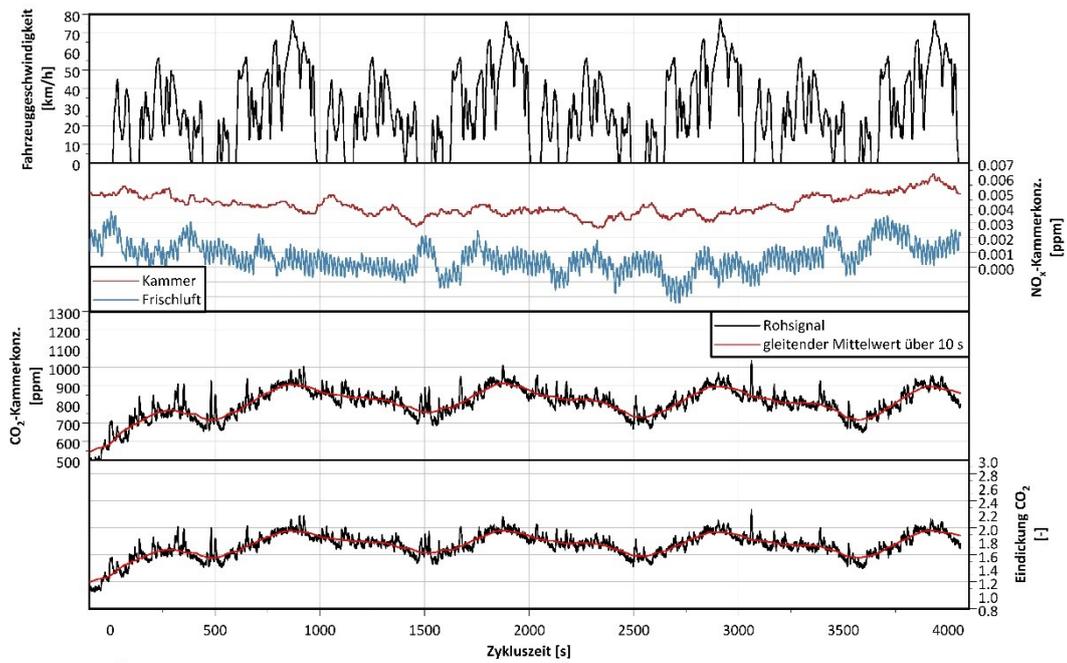


Abbildung 62: Umweltanalysatoren in der Klimakammer bei 0 °C (VW Passat, mit Partikelfilter).

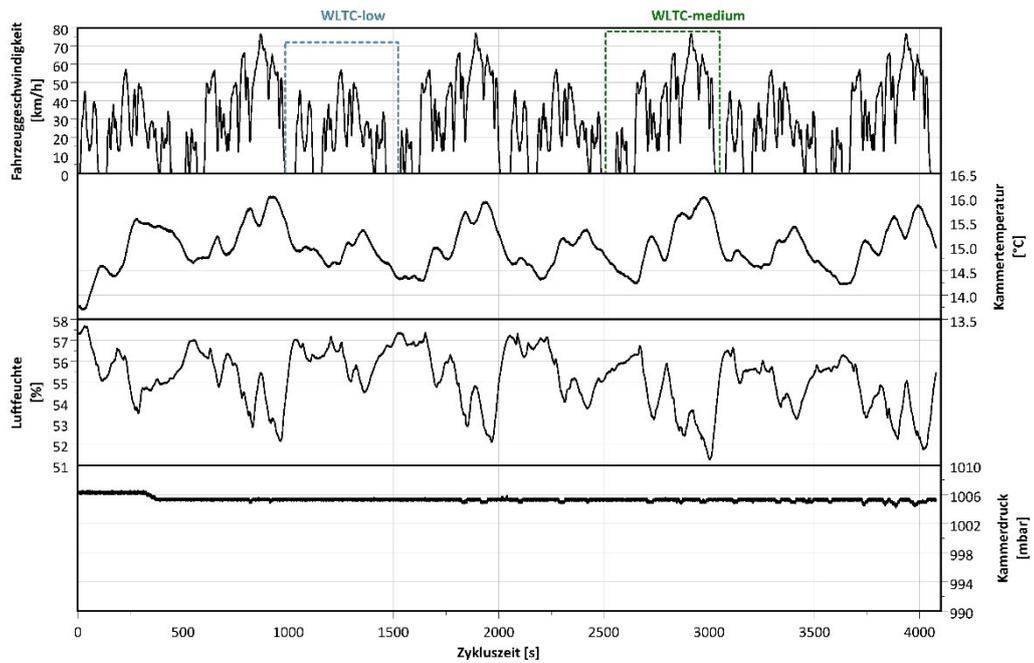
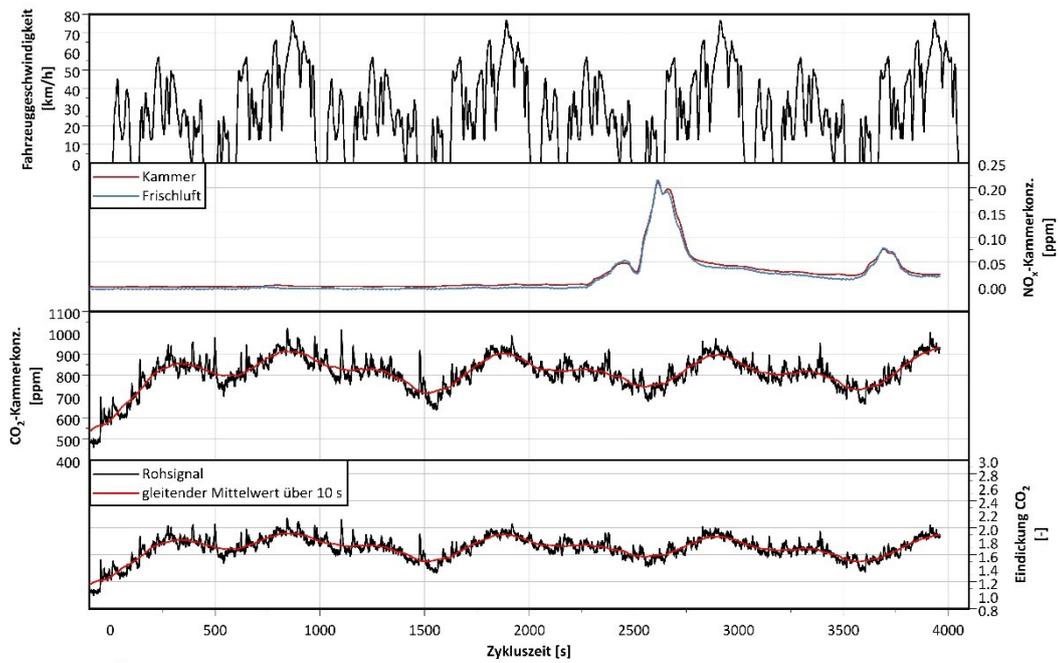
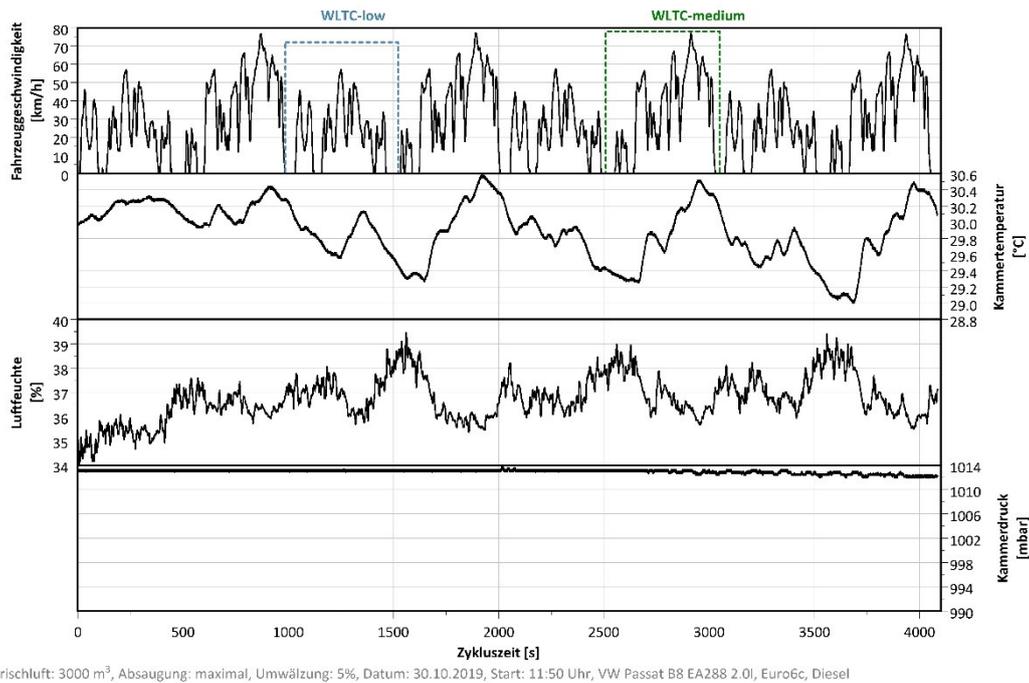


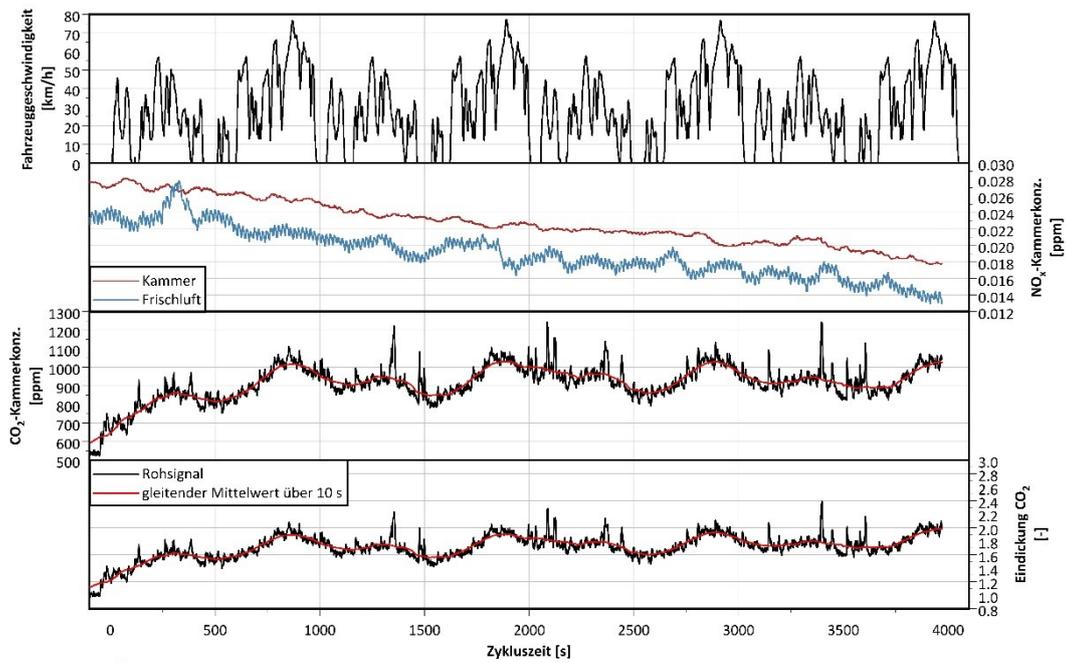
Abbildung 63: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 15 °C (VW Passat, mit Partikelfilter).



**Abbildung 64: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 15 °C (VW Passat, mit Partikelfilter).**



**Abbildung 65: Gemessene Parameter in der Klimakammer bei 30 °C (VW Passat, mit Partikelfilter).**



Frischluf: 3000 m<sup>3</sup>, Absaugung: maximal, Umwälzung: 5%, Datum: 30.10.2019, Start: 11:50 Uhr, VW Passat B8 EA288 2.0l, Euro6c, Diesel

Abbildung 66: Umweltanalytoren in der Klimakammer bei 30 °C (VW Passat, mit Partikelfilter).

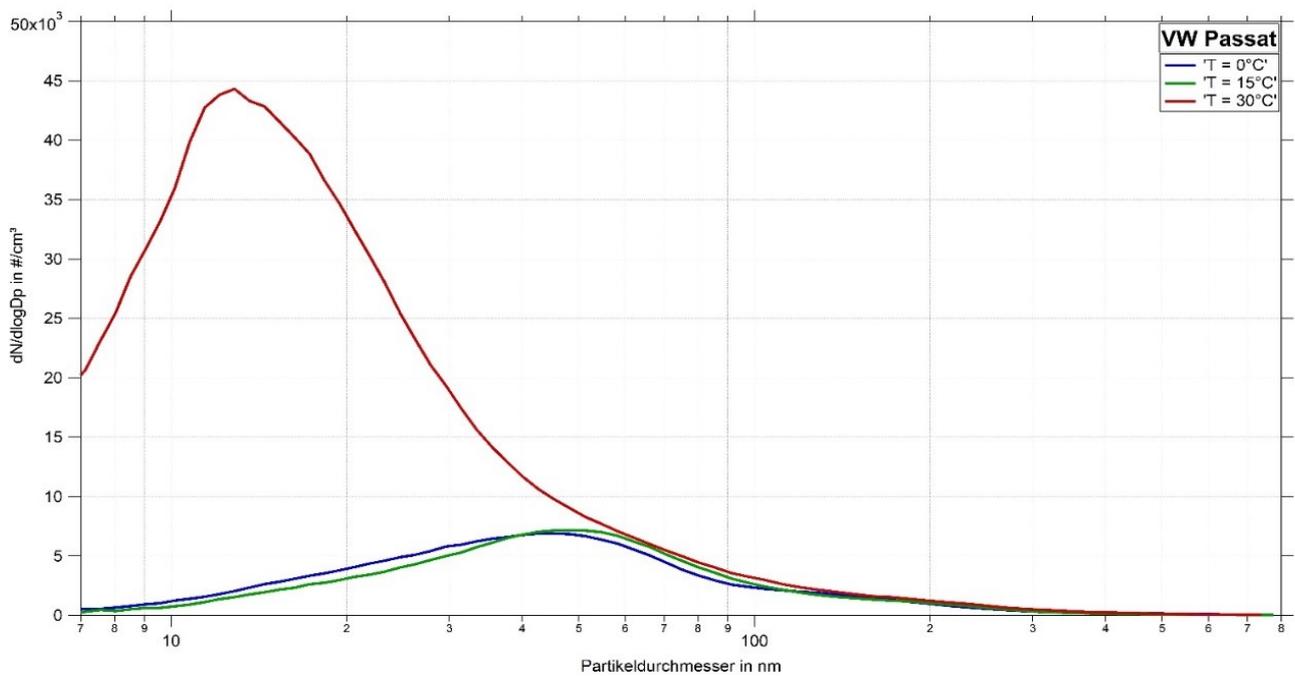


Abbildung 67: Partikelgrößenverteilung vom VW Passat (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen.

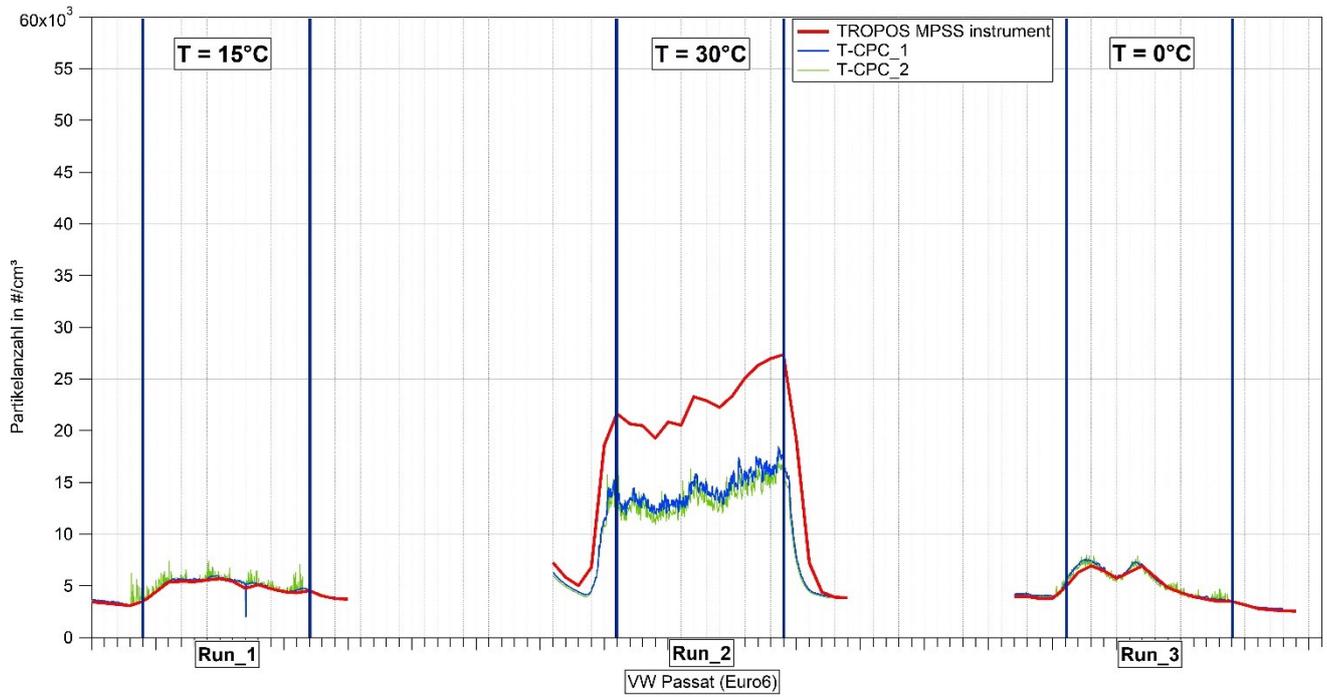


Abbildung 68: Zeitreihe der Partikelanzahlkonzentration vom VW Passat (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. Jeder Run hat einen Messzyklus von 4100 Sekunden, welcher durch die beiden Trennlinien gekennzeichnet ist.

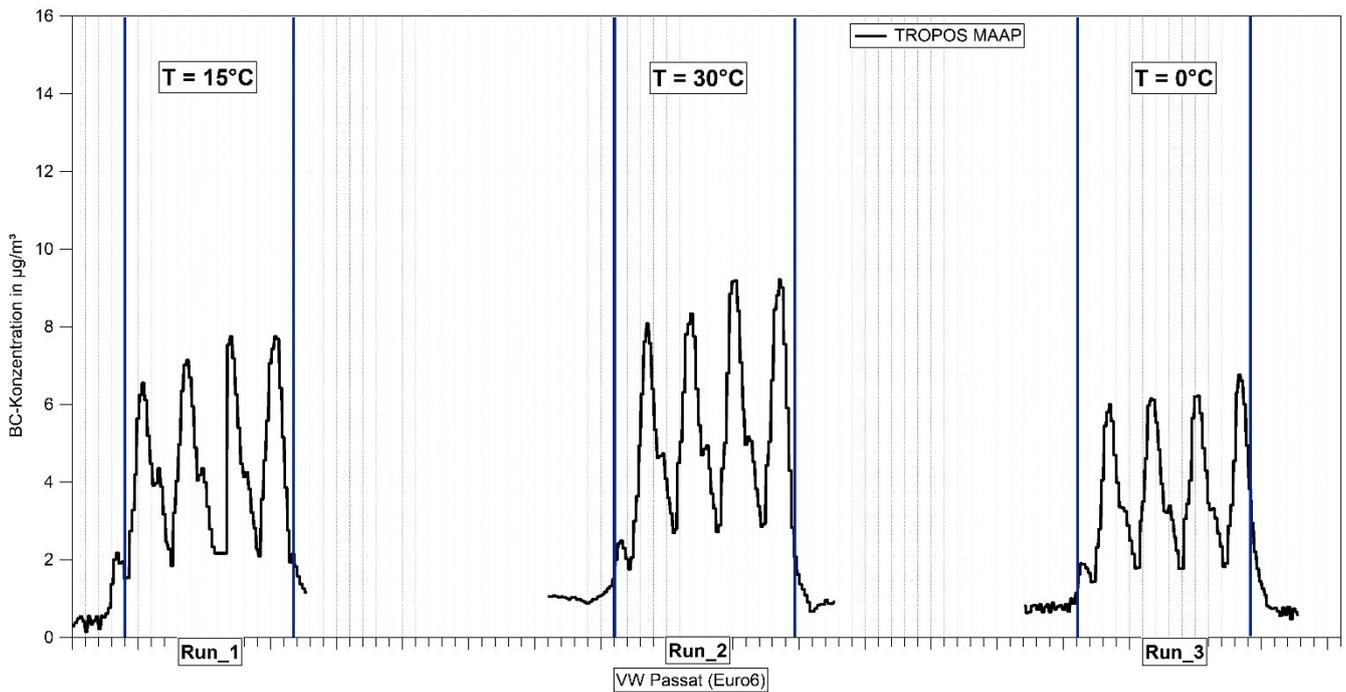


Abbildung 69: Zeitreihe der Rußmassenkonzentration vom VW Passat (mit Partikelfilter) bei unterschiedlichen Temperaturen. Jeder Run hat einen Messzyklus von 4100 Sekunden, welcher durch die beiden Trennlinien gekennzeichnet ist.

# 8 Ergebnisse der Kammereperimente

Um nun die PKW-Modelle besser untereinander vergleichen zu können, werden in den nächsten 3 Abbildungen jeweils die PKW-Modelle nach den unterschiedlichen Temperaturen zusammengefasst betrachtet. Jeder Messzyklus wurde gemittelt und farblich kodiert nach PKW-Modell als Partikelgrößenverteilung dargestellt. Auf der x-Achse ist der Partikeldurchmesser und auf der y-Achse die Partikelanzahlkonzentration  $dN/d\log D_p$  in Partikel pro  $\text{cm}^3$  aufgetragen.

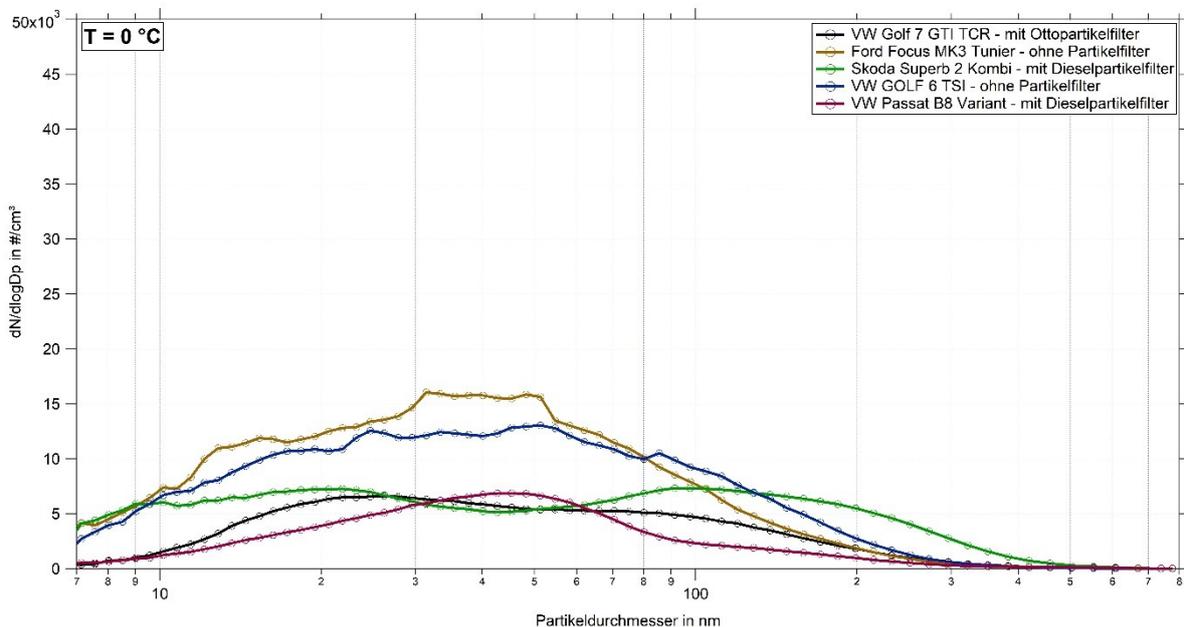


Abbildung 70: Partikelgrößenverteilung der PKW-Modelle bei 0 °C.

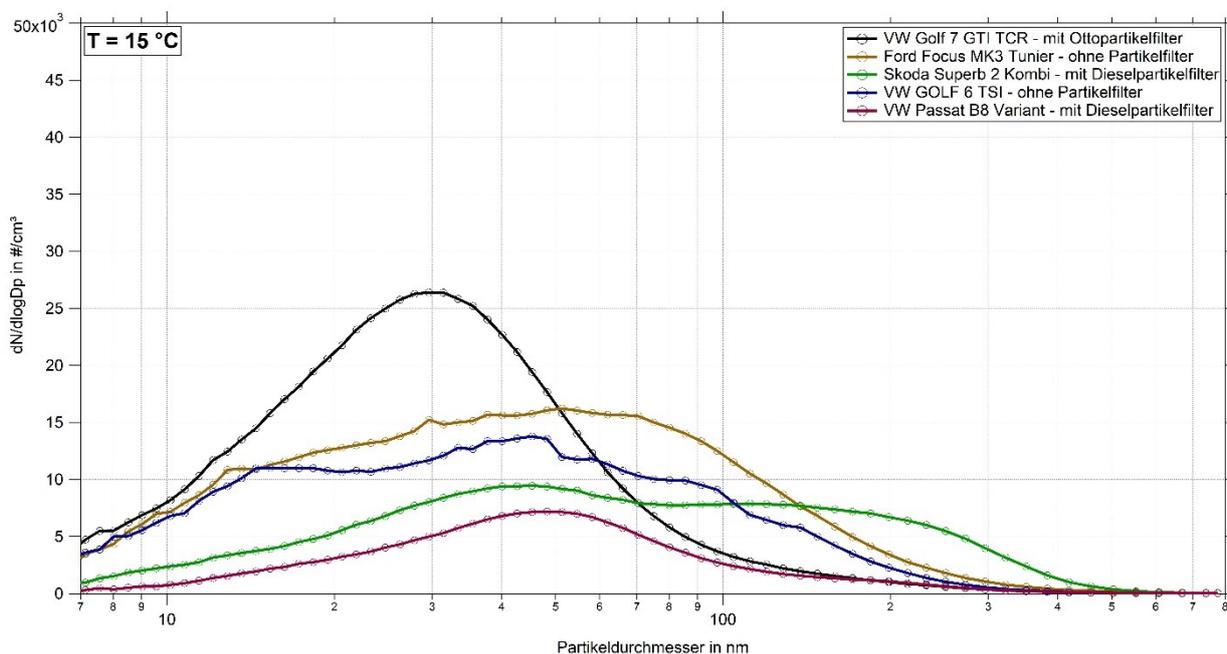
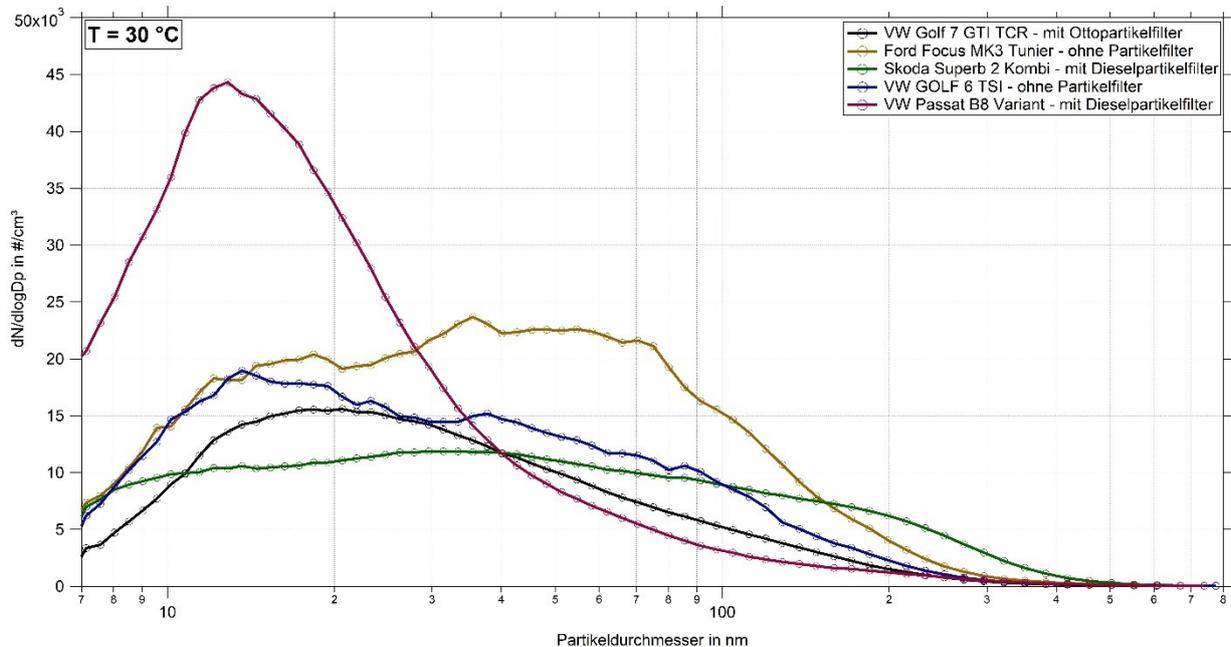


Abbildung 71: Partikelgrößenverteilung der PKW-Modelle bei 15 °C.



**Abbildung 72: Partikelgrößenverteilung der PKW-Modelle bei 30 °C.**

Bei 0°C bilden die Modelle Ford Focus und VW Golf 6 eine Gruppe, die ähnliche Größenverteilungen und die höchsten Konzentrationen aufweisen. Diese Fahrzeugtypen erreichen eine Partikelanzahlkonzentration von mehr als 12.000 Partikeln pro cm<sup>3</sup> im Partikelgrößenbereich zwischen 30 nm und 60 nm. Wohingegen die Modelle VW-Golf 7 GTI und VW Passat zertifiziert nach der Euro 6 Abgasnorm unter 6.000 Partikel pro cm<sup>3</sup> bleiben. Der Skoda Superb zeigt eine Art bimodale Verteilung und eine erhöhte Konzentration im Akkumulationsmode.

Bei 15°C zeigt sich ein ähnliches Verhalten. Die beiden PKW Modelle Ford Focus und VW Golf 6 bilden wieder eine Gruppe und weisen die höchsten Konzentrationen, um die 12.000 Partikel pro cm<sup>3</sup>, auf. Die Verteilung scheint glatter zu sein und leicht zu größeren Durchmessern hin verschoben. Der VW Passat zeigt die geringste Konzentration von 6.000 Partikel pro cm<sup>3</sup> mit einem Maximum bei 50 nm. Der VW Golf 7 GTI hingegen weist eine deutliche Überhöhung der Partikelanzahlkonzentration um die 30 nm auf und zeigt im Mittel eine Konzentration von bis zu 26.000 Partikel pro cm<sup>3</sup>. Die Partikelkonzentration vor Beginn des Messzyklus lag unter 5.000 Partikel pro cm<sup>3</sup> (Abbildung 32). Die Partikelüberhöhung könnte in einer externen Emissionsquelle begründet sein, da die Messung 16 Uhr startete. Zu dieser Zeit tritt der Großteil der Mitarbeiter auf dem Campus der TU Dresden den Heimweg an, sodass eine erhöhte Emissionsbelastung vor der Frischluftansaugung des Abgasrollenprüfstandes vorgelegen haben kann (Ansaugung liegt direkt bei der Campusausfahrt), die sich auf die Messwerte in der Kammer auswirkt. Der Vergleich der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Kammer in den Abbildungen: Abbildung 26, Abbildung 28 und Abbildung 30 zeigt ein geringfügig erhöhtes CO<sub>2</sub> Niveau bei der Messung mit 15°C Kammertemperatur, was für ein erhöhtes Verkehrsaufkommen auf dem Campus spricht. In zukünftigen Versuchen wäre somit eine umfassende Charakterisierung der Ansaugluft notwendig, um externe Einflüsse zu verhindern bzw. in der Auswertung zu berücksichtigen. Der am Abend des gleichen Tages durchgeführte Messzyklus bei einer Temperatur von 0°C weist keine Konzentrationsüberschreitung beim VW Golf 7 GTI auf und entspricht somit der Erwartung.

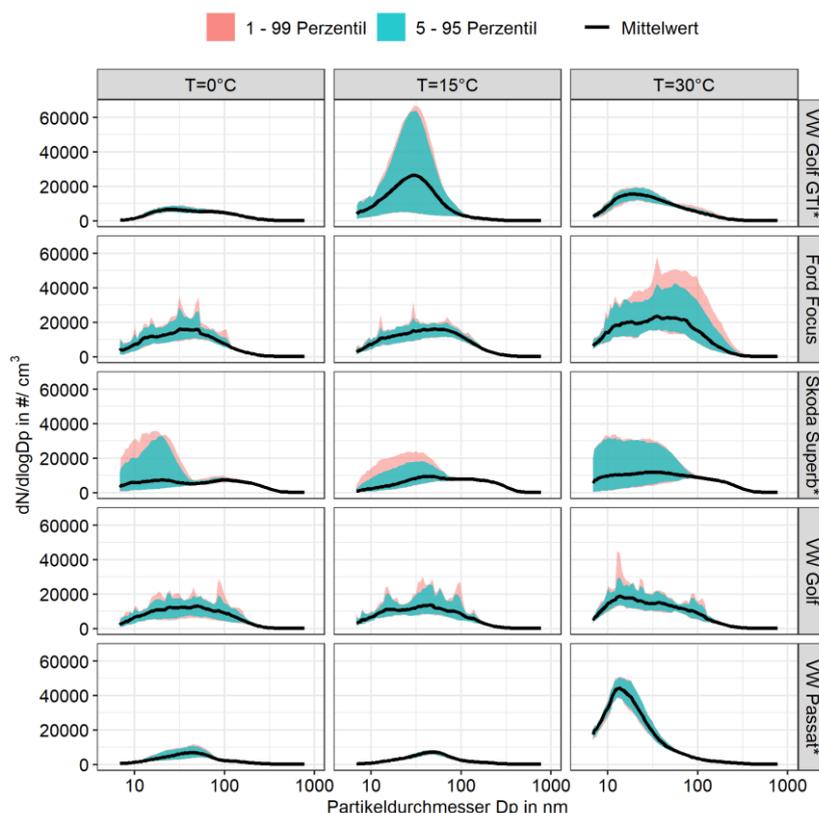
Ein ähnliches Verhalten zeigte sich bei den Messungen bei einer Temperatur von 30°C. In diesem Fall trat am 30.10.2019 beim VW Passat eine deutlich erhöhte Konzentration von bis zu 45.000 Partikel pro cm<sup>3</sup> um die 20 nm auf. Diese erhöhten Werten könnten zwei Ursachen haben:

Einerseits wurde in Kapitel 6.1 gezeigt, dass bei erhöhten Kammer- und damit auch Reifentemperaturen die Partikelanzahl und die Rußmassenkonzentration steigen. Auch hier ließe sich der Peak bei 30°C durch Reifenerwärmung erklären. Allerdings wäre eine unabhängige Messung der Größenverteilung von Reifenabrieb (z. B. von einem Reifenprüfstand) zur Plausibilisierung wünschenswert. Andererseits besteht die Möglichkeit einer Partikelneubildung aus der Gasphase. Es ist möglich, dass eine Konditionierung der PKW-Abgase mit einem vorgeschalteten Thermodenuder mit Aktivkohle zu deutlich niedrigeren Partikelanzahlkonzentrationen führen würde, da die im Abgasstrom enthaltenen flüchtigen Aerosolpartikel entfernt werden. Welche Faktoren am Ende eine Rolle spielten, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden.

Generell hat es den Anschein, dass bei allen 30°C Messzyklen die emittierten Partikel aller PKW-Modelle zu kleineren Durchmessern hin verschoben sind, wobei jedoch eine höhere Partikelkonzentration gemessen wurde.

Eine genaue Analyse der Partikelgrößenverteilung von Reifenpartikeln und Bremspartikeln würde an dieser Stelle eine genauere Zuordnung der Partikelquelle zulassen. Ein weiteres Beispiel für ein auffälliges Verhalten der Partikelanzahlkonzentration während eines Messzyklusses ist in Abbildung 50 ersichtlich. Bei der 30°C Messung des Skoda Superb tritt ungefähr nach der Hälfte der Messzeit ein hoher Peak in der Partikelanzahlkonzentration auf, welcher jedoch nicht in der Rußmassenkonzentration gesehen werden kann (Abbildung 51). Dies legt ebenfalls einen Einfluss von außerhalb der Kammer nahe und kann nicht mit einem erhöhten Reifenverschleiß bei 30°C begründet werden.

Im Folgenden wird die mittlere Größenverteilung und deren Variabilität in Abbildung 73 betrachtet. Die PKW-Modelle sind horizontal angeordnet, die eingestellten Temperaturen vertikal. Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert jedes Messzyklus, die Variabilität ist farblich kodiert. Rot zeigt das Perzentil 1 bis Perzentil 99. Blau das Perzentil 5 bis Perzentil 95. Es ist nochmal anschaulich zu erkennen, dass abhängig vom PKW-Typ und somit vom verwendeten Kraftstoff und deren Partikelfiltersystem der Ausstoß von UFPs stark variiert. Die mit der neusten Motorentechnologie ausgerüsteten PKW-Modelle weisen in der Regel eine geringe Variabilität im gesamt gemessenen Größenspektrometerbereich auf.

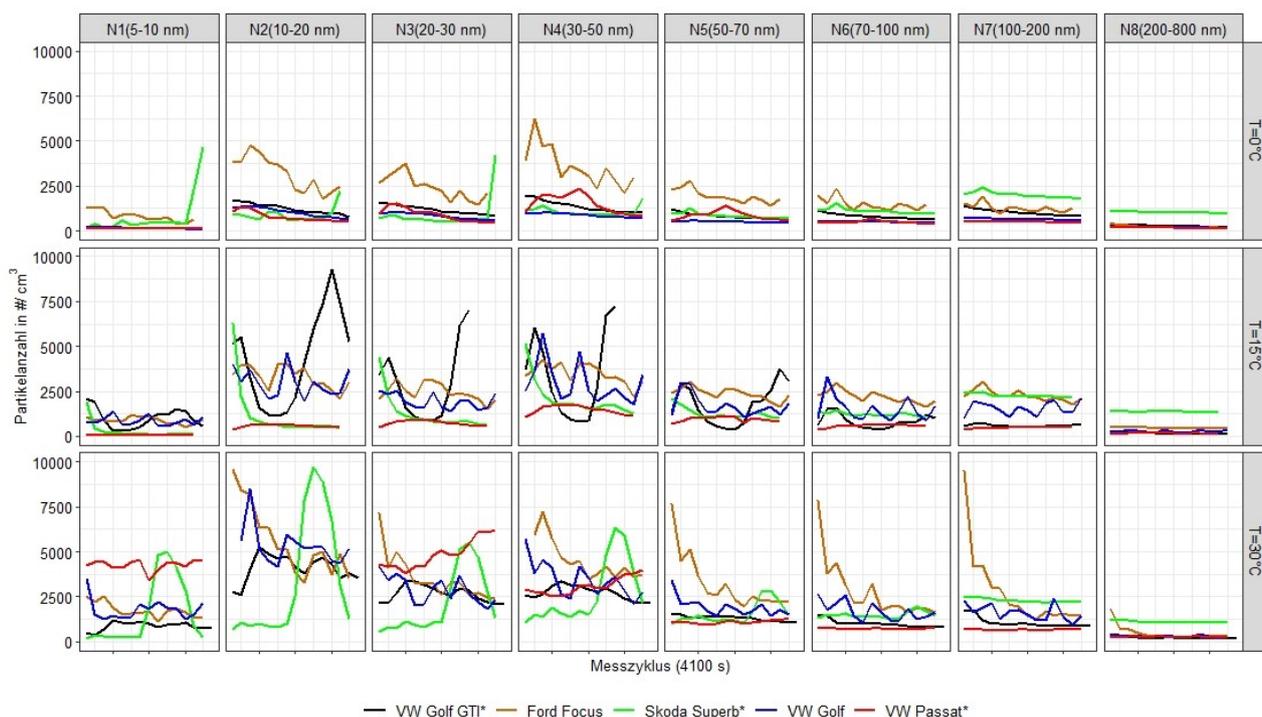


**Abbildung 73: Partikelgrößenverteilung der PKW-Modelle in Abhängigkeit von der Temperatur und ihrer Variabilität. PKW-Modelle mit Partikelfilter sind mit \* gekennzeichnet.**

Als nächstes werden die N-Klassen betrachtet. Dazu wurden die Partikelgrößenspektrometer-Daten für jeden Messzyklus in 8 Integrationsbereiche eingeteilt, die sich nach den Vorgaben des LfULG richten. Die N-Klassen sind wie folgt eingeteilt:

- N1: Integrationsbereich 5 bis 10 nm
- N2: Integrationsbereich 10 bis 20 nm
- N3: Integrationsbereich 20 bis 30 nm
- N4: Integrationsbereich 30 bis 50 nm
- N5: Integrationsbereich 50 bis 70 nm
- N6: Integrationsbereich 70 bis 100 nm
- N7: Integrationsbereich 100 bis 200 nm
- N8: Integrationsbereich 200 bis 800 nm

Die Abbildung 74 zeigt horizontal die Temperatur von 0 °C, 15 °C und 30 °C und vertikal die N-Klassen, sowie farblich kodiert die 5 gemessenen PKW-Modelle. Betrachtet man als erstes den Akkumulationsmode (N7 und N8) wird deutlich, dass alle PKW-Modelle unabhängig von der Temperatur ein konstantes niedriges Niveau in der Partikelanzahlkonzentration aufweisen. Dies ist darin zu begründen, dass dieser Größenbereich hauptsächlich vom Hintergrundaerosol der Klimakammer und der zugeführten Frischluft bestimmt wird. Sehr deutlich ist zu erkennen, dass der Skoda Superb eine erhöhte Konzentration in der Klasse N8 aufweist, wohingegen alle anderen PKW im selben Konzentrationsniveau liegen. Der Skoda hatte zwar einen Partikelfilter, jedoch auch eine erhebliche Laufleistung. Es wäre also möglich, dass die Filterwirkung aufgrund kleiner Beschädigungen nicht mehr optimal ist oder dem Baujahr entsprechend ein nicht so wirkungsvolles Filtersubstrat verbaut ist. Betrachtet man nun die Klassen N2 bis N5 sieht man deutliche Unterschiede zwischen den PKW-Modellen. Abhängig von den Euro Abgasnormen, den verwendeten Verbrennungsmotoren sowie deren Kraftstoff zeigen sich unterschiedliche Immissionsmuster.



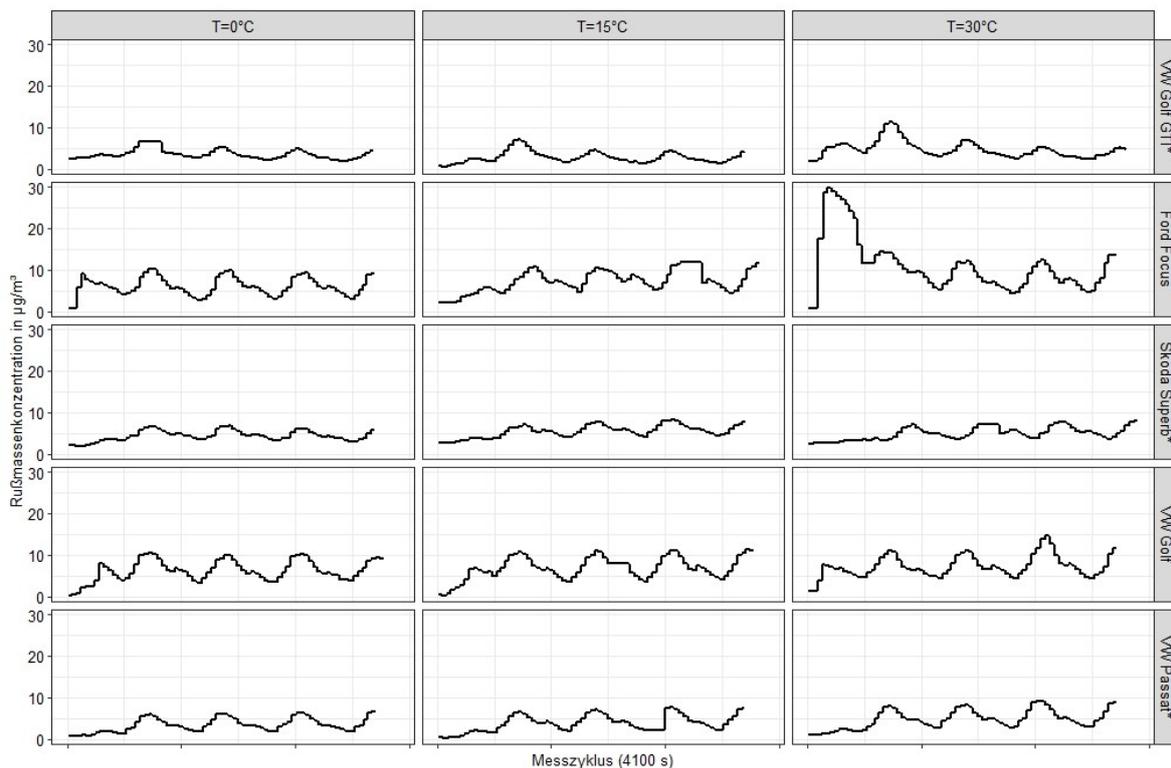
**Abbildung 74: Partikelanzahlkonzentration der N-Klassen bei unterschiedlichen Temperaturen, PKW-Modelle farblich kodiert. Jeder Messzyklus hat eine Länge von 4100 Sekunden. PKW-Modelle mit Partikelfilter sind mit „\*“ gekennzeichnet.**

Bei einer Temperatur von 0 °C scheint der Ford Focus (kein Partikelfilter) im Vergleich zu allen anderen Modellen die höchste Partikelanzahlkonzentration in allen Klassen aufzuweisen. Der Ford Focus erreicht Konzentrationspitzen in der Klasse N4 von über 5.000 Partikel pro cm<sup>3</sup>, wohingegen die anderen Modelle unter 2.500 Partikel pro cm<sup>3</sup> liegen. Der in den Klassen N7 und N8 erhöhte Skoda Superb reiht sich in den kleineren N-Klassen in die Ergebnisse der Mehrheit ein. Bei einer Temperatur von 0 °C scheint die Partikelanzahlkonzentration über alle Klassen hinweg niedriger zu sein als bei den höheren Temperaturen. Die höchste Variabilität zwischen den einzelnen PKW-Modellen konnte bei einer Temperatur von 30 °C festgestellt werden. Eventuell kann das durch verschiedene Gummimischungen und unterschiedliches Alter der Reifen begründet werden, was auch einen unterschiedlichen Reifenverschleiß bedingt.

Die Ursache für die Konzentrationsspitzen des VW Golf GTI bei 15 °C und des VW Passat bei 30°C wurden zu Abbildung 71 und Abbildung 72 schon thematisiert. Eine Partikelfilterregeneration kann ausgeschlossen werden, da die Abgastemperaturen nicht das entsprechende Niveau zeigten. Die Ursache für diese Unterschiede ist aber gänzlich unklar. Eine Wiederholung der Messung wäre zur Einordnung des Phänomens bezüglich der Reproduzierbarkeit wünschenswert.

Der letzte Abschnitt dieses Kapitels richtet den Fokus auf die Rußmassenkonzentration. In den unter Kapitel 7 gezeigten Abbildungen zur Rußmassen- und Partikelkonzentration fällt bspw. in Abbildung 41 und Abbildung 42 teilweise eine sehr starke Erhöhung der Konzentration vor oder zu Messbeginn auf. Aus Abbildung 23 geht jedoch hervor, dass eine kurzer Konzentrationsanstieg bei Aktivierung des Fahrtwindgebläses auftreten kann. Da die Dreh-

zahl des Fahrtwindgebläses direkt an die Fahrzeuggeschwindigkeit gekoppelt ist, tritt dieses Phänomen zu Beginn der Messungen auf. Es wird zwar nur die eigentliche Messzeit ausgewertet, weshalb der Peak für die Messung nicht relevant ist. Allerdings wäre ein so ein deutlicher Anstieg für evtl. spätere Messungen zu berücksichtigen.



**Abbildung 75: Rußmassenkonzentration der PKW-Modelle in Abhängigkeit von der Temperatur. Jeder Messzyklus hat eine Länge von 4100 Sekunden. PKW-Modelle mit Partikelfilter sind mit „\*“ gekennzeichnet.**

Der Aufbau der Abbildung 75 ist ähnlich der der Partikelanzahlgrößenverteilung und zeigt horizontal die verschiedenen PKW-Modelle und vertikal die Temperaturen. Die Peaks korrelieren mit den gefahrenen Geschwindigkeiten im Zyklus, also mit der übertragenen Leistung zwischen Reifen und Rolle. Die PKW-Modelle der Euro 6 Abgasnorm, VW Golf 7 GTI und VW Passat, weisen die niedrigsten Rußmassenkonzentrationen auf, deutlich unter  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dahingegen liegen die Euro 5 PKW-Modelle in den Spitzen über  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Besonders der Ford Focus sticht hier bei  $30^\circ\text{C}$  mit Rußmassenkonzentrationen über  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  heraus. Dieses Phänomen liegt einerseits im fehlenden Partikelfilter der Euro 5 Ottofahrzeuge begründet, andererseits lassen die unter Kapitel 6 dargestellten zusätzlichen Versuche eine erhöhte Rußmassenkonzentration bei höheren Reifentemperaturen vermuten.

## 9 Vergleich der Kammermessungen zu den Messstationen

Abschließend werden in diesem Kapitel die Kammermessungen mit den in Dresden-Nord und Leipzig-Mitte vorhandenen Messstationen verglichen. Beide Stationen werden durch die BfUL betrieben. Beide hier betrachteten Standorte spiegeln Messstationen an einer stark befahrenen Straße im Stadtzentrum wieder. Die Station Dresden-Nord befindet sich im Stadtteil Dresden Neustadt, auf dem Schlesischen Platz vor dem Neustädter Bahnhof weniger als neun Meter vom Fahrbahnrand und ca. 55 Meter von der nächsten verkehrsreichen Kreuzung entfernt. Das durchschnittliche Verkehrsaufkommen lag 2018 bei ca. 14500 Kraftfahrzeugen pro Tag, davon 700 LKW. Die Messstation Leipzig-Mitte hingegen befindet sich direkt im Stadtzentrum von Leipzig, 5 m vom Fahrbahnrand und ca. 35 m von der nächsten verkehrsreichen Kreuzung entfernt. Das durchschnittliche Verkehrsaufkommen 2018 lag bei ca. 42000 Kraftfahrzeugen pro Tag, davon 1400 LKW. Beide Messstationen sind mit der gleichen Aerosolmesstechnik ausgestattet, welche auch während der Messkampagne an der TU Dresden eingesetzt wurde. Diese Messgeräte werden durch das TROPOS jährlich mindestens einer Qualitätssicherung vor Ort und einer weiteren am TROPOS unterzogen. Damit sind diese Messungen, wie auch die in der Klimakammer, rückgeführt, also zertifiziert nach SI-Standards.

Um nun die Messstations-Daten mit den in der Klimakammer gewonnenen Ergebnisse zu vergleichen, werden folgende Annahmen getroffen:

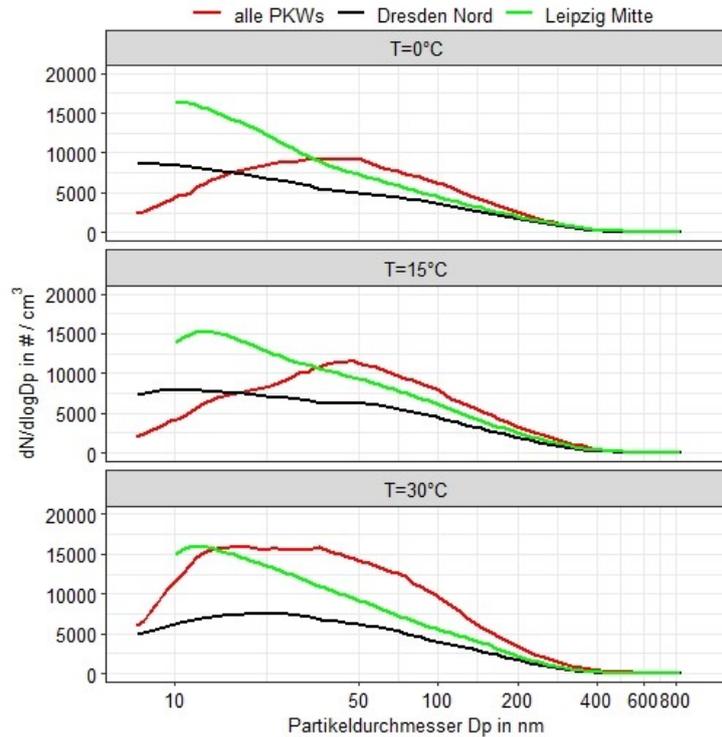
Die Temperaturbereiche in der Klimakammer von 0 °C, 15 °C und 30 °C, lassen sich entsprechenden Jahreszeiten zuordnen. Somit wird 0 °C als Wintertemperatur betrachtet und diesem Datensatz die Messzeiträume Dezember bis Februar zugeordnet. Die Kammertemperatur von 15°C wird dem Herbst zugeordnet, also den Monaten September bis November. Die 30 °C entsprechen dann den Sommermonate Juli bis August. Da für 2019 keine vollständigen Datensätze der Stationen Dresden-Nord und Leipzig-Mitte vorliegen, wird auf das Jahr 2018 zurückgegriffen, in welchem nach aktuellem Stand im Mittel ein ähnliches Konzentrationsverhalten wie im Jahr 2019 auftrat. Die Messstationen erfassen die Partikelanzahl- und Rußmassenkonzentration verschiedener Emissionsquellen, wie z. B. des Straßenverkehrs. Um dies nun mit den Messergebnissen der Kammer vergleichen zu können wurden alle PKW-Messergebnisse bei einer Temperatur jeweils gemittelt. Das Zusammenfassen der Messungen in den unterschiedlichen Temperaturbereichen erlaubt einen ersten Vergleich der Emission in der Klimakammer mit den berechneten jahreszeitlich abhängigen Stationsdatensätzen.

In der Abbildung 76 werden die gemittelten PKW-Messdaten als rote, die Daten der Station Dresden-Nord als schwarze und von Leipzig-Mitte als grüne Line gekennzeichnet. An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass die PKW-Modelle VW Golf 7 GTI bei 15°C und der VW Passat bei 30°C aufgrund der unklaren Konzentrationsspitzen nicht in die Mittelwertbildung aller PKW-Modelle einfließen.

Bei Betrachtung der PKW-Messungen in der Kammer ist zu erkennen, dass sich mit steigender Temperatur das Maximum der Verteilung zu kleineren Partikeln hin verschiebt und die Konzentration ansteigt. Das heißt, bei einer Temperatur von 0 °C erreicht man bei ca. 45 nm eine Konzentration von circa 10.000 Partikel pro cm<sup>3</sup>. Bei 15 °C 13.000 Partikel pro cm<sup>3</sup> und bei 30 °C über 16.000 Partikel pro cm<sup>3</sup> bei einem Partikeldurchmesser von circa 20 nm. Dieses Verhalten ist an den Messstationen Dresden-Nord und Leipzig-Mitte nicht erkennbar. Die Station Leipzig-Mitte zeigt durch das deutlich höhere Verkehrsaufkommen pro Tag generell eine höhere Partikelanzahlkonzentration als die Messstation DD-Nord. Vergleicht man dies nun mit den gewonnenen Daten aus der Klimakammer, erscheint speziell bei den Temperaturen 0 °C und 15 °C der Größenbereich ab 50 nm überrepräsentiert, wohingegen der Bereich kleiner 50 nm deutlich niedriger ausfällt. Dies kann folgende Gründe haben: Die Klimakammer ist ein in sich geschlossenes System, welches lediglich durch die interne Ventilation, Frischluftzufuhr und Abluft reguliert wird. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration innerhalb der Messkammer sollte als Indikator für die Eindickung verwendet werden. Um diese auf einem Level der Außenluft zu halten, wurden die Zu- und Abluftströme an der technisch möglichen Obergrenze der Klimakammer gefahren. Welche Auswirkungen diese Betriebsart und das Anreichern von Aerosolpartikeln im Strömungsfeld der Klimakammer haben, kann in diesem Bericht nicht lückenlos geklärt werden. Die Wände der Klimakammer gelten als Senke für Aerosolpartikel und können deshalb die Ursache für niedrige Partikelanzahlkonzentrationen kleiner 50 nm sein.

Schlussfolgernd kann dennoch ein positives Ergebnis festhalten werden. Die Übereinstimmung der Größenordnung der gezählten Partikel zwischen Kammerexperiment und Stationsdaten ist erstaunlich gut. Im Experiment konnten ähnliche Partikelanzahlkonzentrationen mit unterschiedlichen PKW-Modellen simuliert und bestätigt

werden. Der Einfluss der Reifen und dessen Temperaturabhängigkeit in der Kammer wird sehr wahrscheinlich an den Messstationen aufgrund ihrer weit größeren Entfernung zu den Fahrzeugen nicht erfasst.

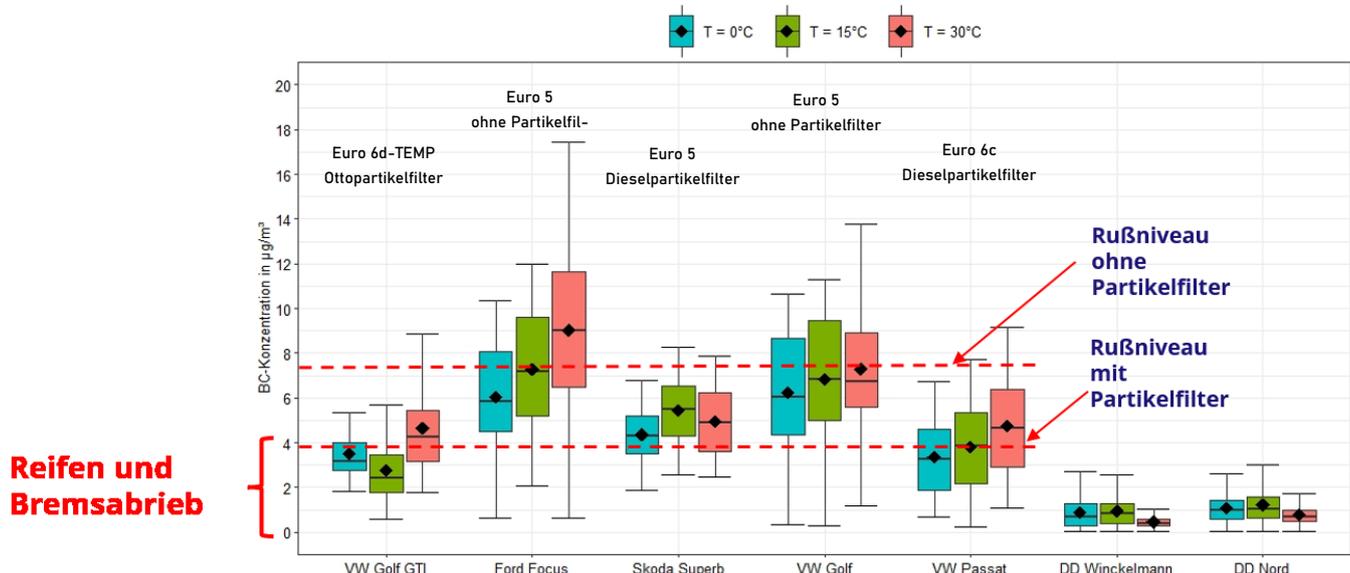


**Abbildung 76: Partikelanzahlkonzentration der Messstation Dresden-Nord und Leipzig-Mitte im Vergleich zu den im Prüfstand gemessenen PKW-Modellen. Die Partikel an den Messstationen stammen aus sämtlichen Partikelquellen, nicht ausschließlich aus der motorischen Verbrennung. Die Temperatur repräsentiert die verschiedenen „Jahreszeiten“.**

In Abbildung 77 wird auf die gleiche Art und Weise die Rußmassenkonzentration betrachtet. Die Datensätze der Messstationen sind von 2018 und in den entsprechenden „Jahreszeiten“ gemittelt. Die Rußmessungen an den Stationen zeigen bei 30 °C eine niedrigere Rußmassenkonzentration als bei den Temperaturen 0 °C und 15 °C. Für die PKW-Modelle ist es umgekehrt. Dort zeigt sich, dass mit steigender Temperatur die Rußmassenkonzentration zunimmt, was die Vermutung bestätigt, dass an der Messstation der Einfluss des Reifens auf die Rußmassenkonzentration nicht detektiert wird. Lediglich der Skoda Superb zeigt ein indifferentes Bild, was durch den gealterten Partikelfilter begründet werden kann.

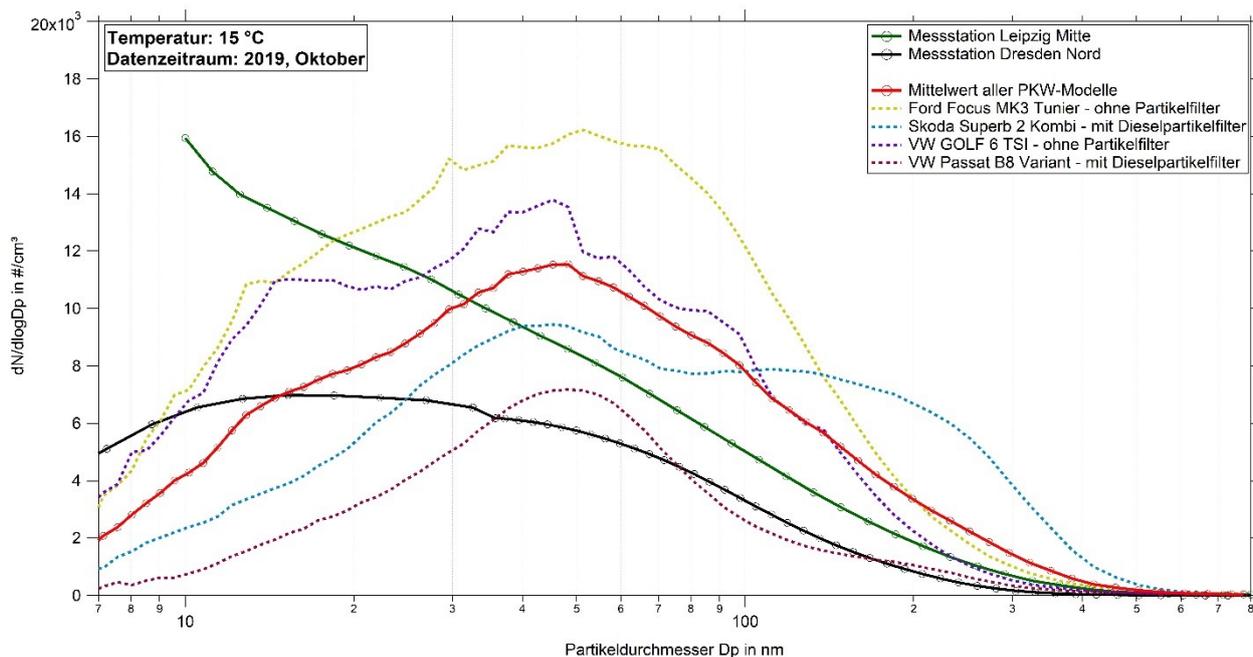
Die Konzentration in der Kammer lag ganzzeitlich leicht über der Konzentration an der Messstation, da teilweise CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Ansaugluft gemessen wurden, welche den Maximalwert an den Messstationen überschritten haben. Dementsprechend muss die Partikel- und Rußmassenkonzentration im Vergleich zur Messstation leicht erhöht sein, was jedoch externen Quelle zugeschrieben werden kann.

Klar zu sehen ist der Einfluss des Partikelfilters. Das Rußniveau der Fahrzeuge ohne Partikelfilter liegt ungefähr 3-4 µg/m<sup>3</sup> über dem der Fahrzeuge mit Partikelfilter. Die erhöhte Rußmassenkonzentration der Fahrzeuge mit Partikelfilter gegenüber den Messstationen kann dem Reifenabrieb zugeordnet werden (Kapitel 6). Weitere Faktoren, die die Rußmassenkonzentration an den Messstationen beeinflussen, sind zum Beispiel der Wind und weitere Rußquellen, die in der Kammermessung nicht mit betrachtet werden konnten.



**Abbildung 77: Rußmassenkonzentration der Messstationen Dresden-Nord, Dresden Winckelmannstraße und in der Kammer bei unterschiedlichen PKW-Modellen. Die betrachteten Temperaturen sind farblich kodiert. Die Daten der Messstationen sind von 2018.**

In Abbildung 78 werden die Ergebnisse bei 15 °C im Detail betrachtet. Die Stationsdaten Leipzig-Mitte und Dresden-Nord wurden im Zeitraum von 01.10.2019 bis 30.10.2019 ausgewertet und gemittelt. Um statistisch einen aussagekräftigen Datensatz zu erhalten wurde der gesamte Monat betrachtet.



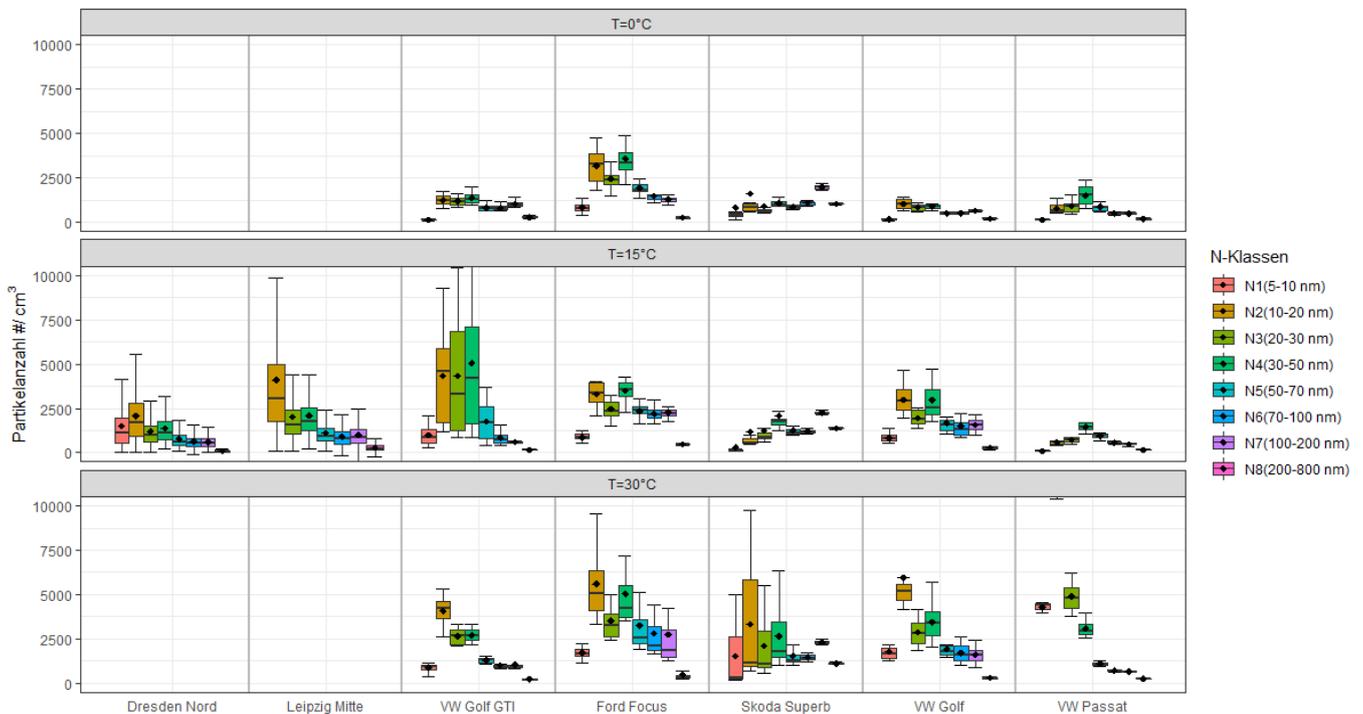
**Abbildung 78: Partikelgrößenverteilung bei 15 °C. Dargestellt sind die Messstationen Dresden-Nord, Leipzig-Mitte und die PKW-Modelle, gemessen in der Klimakammer TU Dresden.**

Die Partikelgrößenverteilungen von den Messstationen zeigen im Vergleich zu der der PKW in der Klimakammer bei 15 °C, dass die Fahrzeuge ohne Partikelfilter (EU5, Benziner) den größten Anteil zum Anstieg des Mittelwertes aller PKW-Modelle beitragen, wohingegen die Modelle mit Partikelfilter (EU5 und EU6 Diesel) unterhalb des Mittelwertes liegen. Bezogen auf die Grundfragestellung, dass die Anzahl der UFP <100 nm in den letzten Jahren stetig und signifikant zurückgegangen ist, kann durch die Zunahme der Fahrzeuge mit Partikelfilter in der Flotte begründet werden. Der Golf GTI wurde aufgrund der extremen Überhöhung der Messung nicht in dieses Diagramm einbezogen (Abbildung 27). Die Abweichung der Partikelgrößenverteilung ist vermutlich im Reifen- und Bremsabrieb zu suchen, welcher an den Messstationen ggf. nicht detektiert wird. Weiterhin lassen die hauptsächlich sehr kleinen Partikel, welche an der Messstation gemessen werden, eine Nukleation aus der Gasphase vermuten, welche

in die Klimakammer nicht nachgebildet werden kann. Die Partikelanzahlkonzentration in der Kammer stimmt jedoch im Betrag mit der an den Messstationen überein.

In Abbildung 79 werden die verschiedenen N-Klassen betrachtet. Die Temperaturabhängigkeit der Konzentrationszunahme bestätigt sich auch in dieser Abbildung. Es wurde der Datensatz Oktober 2019 für die Messstationen Dresden-Nord und Leipzig-Mitte verwendet. Der Boxplot zeigt horizontal die 3 gemessenen Temperaturen und in den ersten zwei Kolonnen die Stationen Dresden-Nord und Leipzig-Mitte, gefolgt von den PKW-Modellen. Der Boxplot zeigt jeweils den Mittelwert (Punkte) und die Variabilität (Balken) für jede berechnete N-Klasse. Die Werte der Messstationen sind, entsprechend der Oktobertemperatur, lediglich bei 15 °C vorhanden.

Die Integrationsklasse N1 der Messstation Leipzig-Mitte ist nicht repräsentativ, da das Größenspektrometer für den Partikelgrößenbereich 10 nm bis 800 nm optimiert ist, wohingegen das Spektrometer der Station Dresden-Nord den gesamten Partikelgrößenbereich von 5 nm bis 800 nm abdeckt. Es ist sehr gut zu erkennen, dass beide Stationen die höchste Variabilität in den unteren N-Klassen aufweisen und zu größeren Klassen stabiler werden, was auf eine Wetterabhängigkeit im Bereich der Partikelneubildung hinweisen könnte. Die Station Dresden-Nord weist aufgrund ihres geringeren Verkehrsaufkommens in allen N-Klassen niedrigere Partikelanzahlkonzentrationen im Vergleich zur Messstation Leipzig-Mitte auf. Die Kammerkonzentrationen beim Betrieb der Fahrzeugtypen Ford Focus und VW Golf 6 liegen über dem Mittelwert der Messstationen, wohingegen beim VW Passat das Konzentrationsniveau dem der aktuell erhobenen Stationsdaten entspricht und eine geringere Variabilität aufweist. Der Skoda Superb, ein Euro 5 Diesel mit eingebautem Partikelfilter, weist deutlich niedrigere N-Klassenkonzentrationen auf und reiht sich bei 15 °C bezüglich der Partikelanzahlkonzentration eher in die Euro 6 Abgasnorm der PKW-Modelle ein.

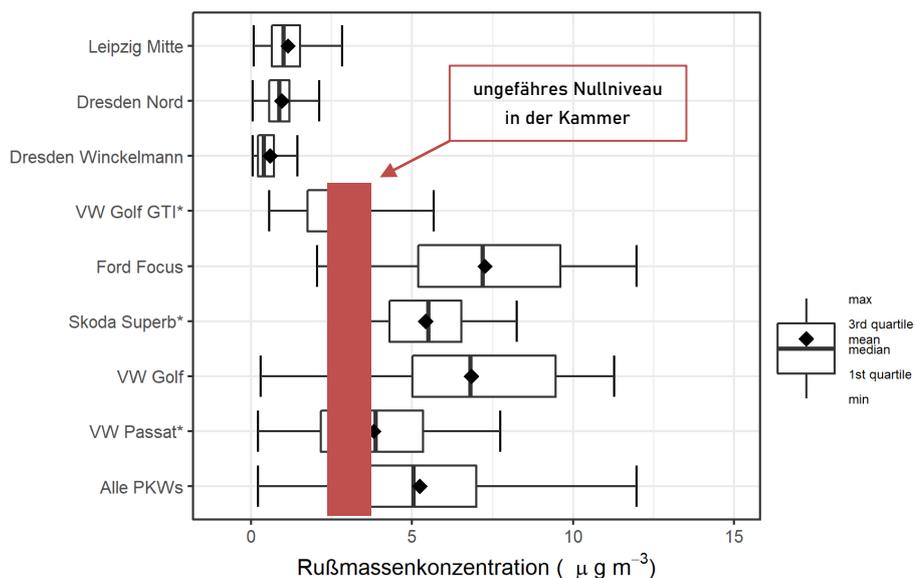


**Abbildung 79: Boxplot der 8 N-Klassen. Die Messstationen und PKW-Modelle werden in Abhängigkeit der Temperaturen 0 °C, 15 °C und 30 °C unterschieden. PKW-Modelle mit Partikelfilter sind mit „\*“ gekennzeichnet.**

Die Variabilität nimmt von niedrigeren Temperaturen zu höheren Temperaturen bei allen PKW zu, da der Reifenverschleiß steigt und der Einfluss der Gummimischung somit zunimmt. Vor allem die Klassen N2 bis N5 sind davon betroffen. Die 15°C Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung zu den Messstationen (ausgenommen Golf GTI).

Abschließend wird der „frische“ Ruß betrachtet, siehe Abbildung 80, der also noch nicht gealtert/agglomeriert ist. Dieser Ruß wurde direkt 1 bis 1,5 m hinter der Auspuffmündung gemessen. Die Vergleichsbasis bildet der Messzeitraum Oktober 2019 und es wurde zusätzlich die Hintergrundstation Dresden-Winkelmannstraße hinzugezogen. Die geringere Rußmassenkonzentration von verkehrsberuhigten Regionen (städtischer Hintergrund, DD-Winkelmannstraße) im Vergleich zu den hoch frequentierten Verkehrsadern ist gut erkennbar. Auch die Variabilität der Messung lässt mit geringerem Verkehrsaufkommen nach.

Der Mittelwert aller PKW liegt bei circa  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und ist im Mittel deutlich höher als der der Messstationen von circa  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die Erkenntnisse aus Kapitel 6 müssen jedoch mit bilanziert werden, sodass sich ein Nullniveau in der Kammer aufgrund von Reifen- und Bremsverschleiß bei ungefähr  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ergibt. Trotzdem können Aussagen über die PKW-Modelle und deren Euro Abgasnorm gemacht werden. Generell ist auch hier eine Gruppierung der PKW-Modelle in die Euro Abgasnormen erkennbar. Der VW Golf 7 GTI und der VW Passat, beide Euro 6, weisen die geringsten Rußemissionen auf. Die gemessenen Werte liegen unter dem Mittelwert von  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und ihre Variabilität fällt geringer aus. Der VW Golf 7 GTI als Benziner weist von allen getesteten PKW-Modellen die niedrigste Rußemission auf. Betrachtet man nun die Euro 5 Abgasnorm, vertreten durch Skoda Superb (Diesel), Ford Focus (Benzin) und VW Golf 6 (Benzin) ist deutlich zu erkennen, dass der Skoda Superb mit Dieselpartikelfilter dem Mittelwert von  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  entspricht, wohingegen die ungefilterten Benziner deutlich über dem Mittelwert liegen. Zudem steigt die Variabilität an. Es wird bestätigt, dass die Fahrzeugtypen ohne Partikelfilter eine höhere Rußemission aufweisen als die mit Partikelfiltern. Das wird durch die Messungen der „Umweltzone Leipzig“ von 2009 bis 2016 auch eindeutig bestätigt. Zwischen 2009, dem Jahr der Einführung des Dieselpartikelfilters, und 2016 wurde ein deutlicher Rückgang sowohl der BC-Masse als auch der Partikelanzahl nachgewiesen.



**Abbildung 80: Rußmassenkonzentrationen für die Messstationen Leipzig-Mitte, Dresden-Nord, Dresden-Winkelmannstraße und die Klimakammer beim Betrieb unterschiedlicher PKW-Modelle. PKW-Modelle mit Partikelfilter sind mit „\*“ gekennzeichnet. Der rote Balken markiert das ungefähre Nullniveau der Kammer.**

# 10 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieses Projektes war, das tatsächliche Partikel-Emissionsverhalten von EURO-5- und EURO-6-PKW, bzw. von Fahrzeugen mit und ohne Partikelfilter, auf der Basis von Messungen im WLTC sowie im verdünnten Abgas in einer dafür geeigneten Prüfkammer der TU Dresden zu analysieren und gleichzeitig Hinweise zum Verhalten der emittierten Partikel in der Außenluft zu erhalten. Dazu wurden 5 verschiedene PKW-Modelle im Zeitraum vom 21.10.2019 bis 30.10.2019 an der TU Dresden vermessen. Die TU Dresden hat für diesen Zeitraum einen Rollenprüfstand in einer Klimakammer zur Verfügung gestellt, in der jeweils ein WLTC und ein Messzyklus einer WLTC-Stadtfahrt bei Temperaturen von 0 °C, 15 °C und 30 °C durchfahren wurde. Die Kammer wurde von Seiten der TU Dresden mit Gasanalysatoren für CO<sub>2</sub> ausgestattet. Die BfUL stellte zwei NO<sub>x</sub>-Analysatoren zur Verfügung. Das TROPOS lieferte die Aerosolmesstechnik, d. h. ein Größenspektrometer, einen Rußmonitor und zwei Gesamtpartikelzähler. Für das Experiment wurden folgende PKW-Modelle ausgewählt:

1. VW Golf 7 GTI TCR (Euro 6d-TEMP, Benzin Super 98, mit Ottopartikelfilter)
2. Ford Focus MK3 Turnier (Euro 5, Benzin Super 95, ohne Partikelfilter)
3. Skoda Superb 2 Kombi (Euro 5, Diesel, mit Dieselpartikelfilter)
4. VW Golf 6 TSI (Euro 5, Benzin Super 95, ohne Partikelfilter)
5. VW Passat B8 Variant (Euro 6c, Diesel, mit Dieselpartikelfilter)

Für jeden Fahrzeugtyp wurden ca. zwei Werktage angesetzt, in denen das Fahrzeug am Prüfstand vermessen wurde. Vor jeder Messung wurde darauf geachtet, dass die Kammer ausreichend gespült wurde, um eventuelle Störfaktoren, wie z. B. Verschmutzung durch den PKW-Wechsel, externer Eintrag von Aerosolpartikeln usw., so gering wie möglich zu halten. Die Eindickung in der Messkammer konnte mit Hilfe der regulierbaren Frischluft- und Abluftströme verändert werden. Um die Bedingungen einer verkehrsbelasteten Messstation zu simulieren wurden die Indikatoren NO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub> verwendet. Um eine Abschätzung der Belastung der Außenluft zum Zeitpunkt der Kammermessungen zu bekommen, installierte die BfUL parallel an der Station Dresden-Nord einen CO<sub>2</sub>-Gasmonitor für den Zeitraum der Intensivmessungen. Die Messungen ergaben für CO<sub>2</sub> eine Schwankung um die 600 ppm, abhängig von der Tageszeit. Dieser Wert diente während aller Kammermessungen als Referenzwert.

Die Prüfung der PKW im WLTC zeigte, dass die Euro 6-PKW die Grenzwerte einhalten und ermöglichte die Beurteilung der Wirksamkeit der Abgasreinigung in den nach der Euro 5-Norm im NEFZ zugelassenen PKW.

Für alle PKW-Modelle hat sich die Rußmassenkonzentration als ein aussagekräftiger Parameter erwiesen. Betrachtet man alle verwendeten PKW-Modelle jeglicher Messzyklen, wurde zunächst eine mittlere Rußmassenkonzentration von 5 µg/m<sup>3</sup> in der Klimakammer festgestellt. Es war aber fraglich, ob diese Partikelkonzentration dem Verbrennungsprozess des Motors zuzuordnen ist, denn die Konzentrationen in der Außenluft an den Vergleichs-Messstationen liegen eher im Bereich von 1-2 µg/m<sup>3</sup>. Eine Zusatzmessung im Juli 2020 mit einem vom TROPOS gestellten Rußmonitor AE51 hat ergeben, dass sich in der Kammer eine weitere signifikante Emissionsquelle befindet. Abhängig vom gefahrenen WLTC werden durch die Reibung der Reifen mit dem Rollenprüfstand sowie die Reibbremse des Fahrzeugs (Ruß)partikel in die Kammer emittiert. Ihre chemische Zusammensetzung wie auch Partikelgröße ist nicht bekannt und könnte in weiteren Studien näher untersucht werden. Weitere Einflussparameter können der Antrieb - Vorderrad- oder Hinterrad - und unterschiedlicher Reifentypen sein.

Generell ist festzustellen, dass Fahrzeuge mit Partikelfilter deutlich weniger Rußpartikel emittieren als Fahrzeuge ohne Partikelfilter. Gruppieren man die PKW-Modelle, erhält man folgendes Bild. Der Ford Focus und der VW Golf 6, jeweils ohne Partikelfilter, lagen im Verhältnis zu den anderen getesteten PKW-Modellen ca. 2 µg/m<sup>3</sup> über dem Mittelwert. Der mit einem Rußpartikelfilter ausgestattete Skoda Superb, Euro 5-Abgasnorm, weist im Durchschnitt 5 µg/m<sup>3</sup> auf. Die Fahrzeugtypen VW Golf 7 GTI Ottopartikelfilter und VW Passat 2,0 TDI mit Dieselpartikelfilter eingestuft in die Euro 6-Abgasnorm, liegen unter 5 µg/m<sup>3</sup> Rußmassenkonzentration. Somit lässt sich aus diesem Experiment ein Unterschied der Rußmassenkonzentration zwischen Abgasnachbehandlungssystemen mit und ohne Filter von ca. 3 µg/m<sup>3</sup> in der Klimakammer feststellen.

Die Partikelanzahlkonzentrationen in der Klimakammer liegen beim Betrieb der Fahrzeugtypen Ford Focus und VW Golf 6 über dem Mittelwert der Außenluft an Messstationen, wohingegen beim VW Passat das Konzentrationsniveau dem der aktuell erhobenen Stationsdaten entspricht und eine geringere Variabilität aufweist. Der

Skoda Superb, ein Euro 5 Diesel mit eingebautem Partikelfilter, weist deutlich niedrigere N-Klassen-Konzentrationen auf und reiht sich bei 15 °C bezüglich der Partikelanzahlkonzentration eher in die Euro 6-Abgasnorm der PKW-Modelle ein. Das Experiment zeigte auch, dass es einen Temperatur-Effekt gibt, bei dem die Partikelanzahlkonzentration in der Klimakammer mit steigender Temperatur zunimmt, was vermutlich auf den steigenden Reifenverschleiß zurück zu führen ist.

Die Partikelanzahlkonzentration in der Klimakammer stimmt in der Größenordnung mit der in der Außenluft an den Messstationen überein. Die grundsätzliche Eignung der eingesetzten Messverfahren sowohl für quellenaher als auch für Außenluftmessungen ist damit gegeben.

Weitere Erkenntnisse zur differenzierten Ursachenanalyse von Luftschadstoffkonzentrationen könnten durch Vorschaltung eines Thermodenuders vor dem MPSS an den Messstationen gewonnen werden. Damit wäre die Bestimmung der Rußgrößenverteilung möglich.

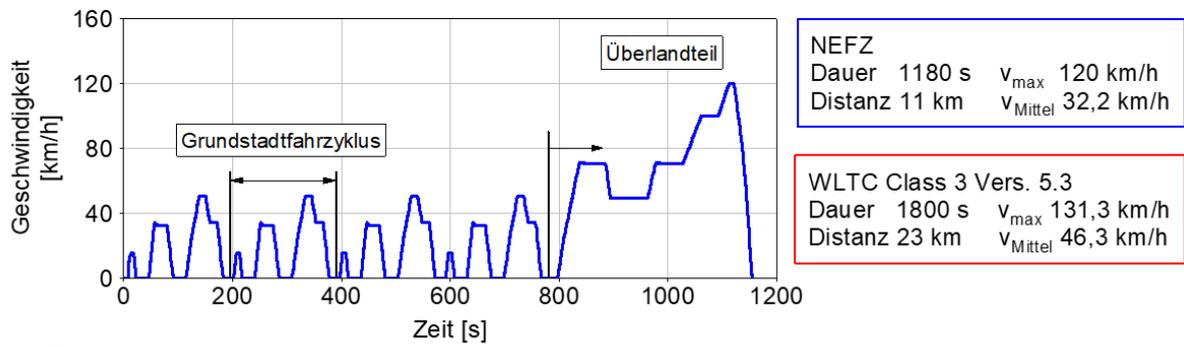
Im Rahmen dieses Projektes wurden Erkenntnisse bezüglich der Partikelanzahl- und Rußmassenkonzentrationen für in Euro 5 und Euro 6 eingestufte PKW-Modelle gewonnen. Dennoch konnten nicht alle Fragen ausreichend beantwortet werden bzw. sind neue entstanden. Ansatzpunkte zur Klärung/Absicherung der Ergebnisse könnten sein:

- Modellierung des Strömungsfeldes in der Klimakammer für die optimale Platzierung der Messeinlässe
- Zeitgleiche Messung in der zugeführten Frischluft
- Messung der Rußgrößenverteilung
- Untersuchungen zur Quantifizierung der Partikelneubildung aus der Gasphase
- Wiederholungsmessungen an verschiedenen Tagen
- Chemische und physikalische Charakterisierung von Brems- und Reifenabrieb
- Vergleichsmessungen im Fahrbetrieb auf der Straße.

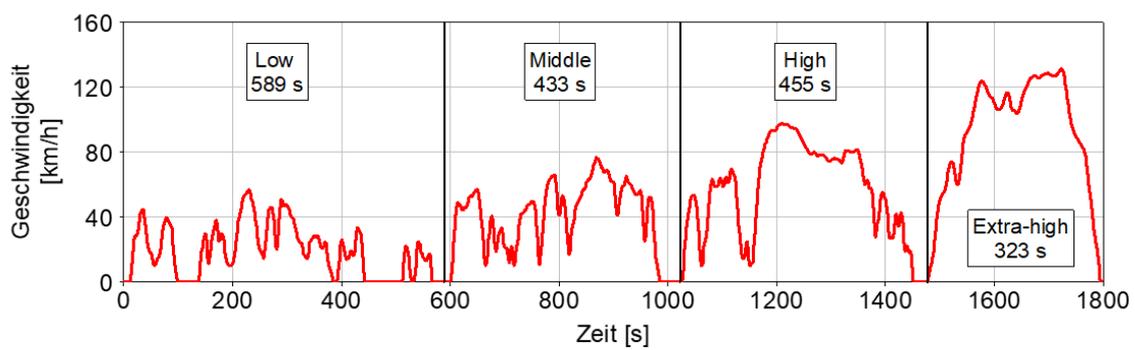
# 11 Anhang

## A.1 Vergleich NEFZ-WLTC

### NEFZ



### WLTC



## Protokoll Rollenprüfstand IAD

**Fahrzeugdaten:** **Datum:** 21.10.2019

Hersteller:	VW	Fzg.- Ident.- Nr.:			
Modell:	Golf VII	Antriebsart:	Frontantrieb	Kraftstoffdichte [kg/l]:	0.7495
Typ:	GTI	Kennzeichen:	DD-TU97	Dichte CO <sub>2</sub> [g/l]:	1.964
Motorenbaureihe:	EA888	Kilometerstand:		Dichte CO [g/l]:	1.25
Euro-Norm:	Euro-6	Verdünnung	13.4	Dichte HC [g/l]:	0.631
Kraftstoff:	Benzin(E5)	Rechenfaktor:	0.118	Dichte NO <sub>x</sub> [g/l]:	2.05

**Zyklusdaten:**

Fahrzyklus:	WLTC	Zyklusnummer:	6b	T <sub>O1</sub> vor Test [°C]:	23.4
Fahrer:	Grafe	Luftdruck [kPa]:	100.11	T <sub>O1</sub> nach Test [°C]:	103.8
Bediener:	Halbasch	rel. Feuchte [%]:	48.53	T <sub>Raumluft</sub> [°C]:	23.4
Zykluszeit [s]:	1802.15	Gesamtweg [m]:	23241.82		

**Prüfstandskonfiguration:**

F0 [N]:	147.32	Prüfmasse [kg]:	1592
F1 [Nh/km]:	0.247	Rollenträgheit [kgm <sup>2</sup> ]:	513
F2 [Nh <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> ]:	0.0377	CVS-Düse [Nr./ C1]:	120123/ 0.2545

**Testbemerkung:**

Mit CPC

**Testphasen**

	Beutelpaar_1	Beutelpaar_2	Beutelpaar_3
Phasenzeit [s]	589.6	433.7	778.8
Pd [kPa]:	2.9	2.9	2.9
H [g H <sub>2</sub> O / kg Luft]:	8.8	8.8	8.8
kH (Faktor NO <sub>x</sub> ):	0.9	0.9	0.9
Verdünnungsf. (DF):	33.6	25.0	14.7
V <sub>mix_CVS</sub> [m <sup>3</sup> ]:	103.8	76.0	136.7
Wegstrecke [m]:	3097.3	4753.6	15390.8

**Emmissionen**

CO <sub>2</sub> [g]	681.46	707.17	2281.27
CO [mg]	2192.91	172.53	2279.19
T.HC [mg]	421.81	-119.13	13.71
NO <sub>x</sub> [mg]	263.06	73.96	154.28
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	220.02	148.76	148.22
mCO [mg/km]:	708.00	36.29	148.09
mHC [mg/km]:	136.18	-25.06	0.89
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	84.93	15.56	10.02
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	221.11	-9.50	10.92
PM [mg/km]	2.31	1.88	1.18
PN [# /km]	3.46E+11	1.56E+10	8.95E+09
Kraftstoffvbr. [l/100km]:	9.52	6.39	6.38

	Gesamt	Grenzwert	Ausnutzung
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	157.9	kein Grenzwert	
mCO [mg/km]:	199.8	1000	20 %
mHC [mg/km]:	13.6	100	14 %
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	21.1	60	35 %
NMHC [mg/km]	-	kein Grenzwert	
PM [mg/km]	1.5	4.50	33 %
PN [# /km]	5.51E+10	6.00E+11	9 %
Kraftstoffvbr. [l/100km]	6.8		

# Protokoll Rollenprüfstand IAD

**Fahrzeugdaten:** **Datum:** 23.10.2019

Hersteller:	Ford	Fzg.- Ident.- Nr.:			
Modell:	Focus	Antriebsart:	Frontantrieb	Kraftstoffdichte [kg/l]:	0.7495
Typ:	MK3	Kennzeichen:	DD-LM3008	Dichte CO <sub>2</sub> [g/l]:	1.964
Motorenbaureihe:	1_6_ECO-Boc	Kilometerstand:		Dichte CO [g/l]:	1.25
Euro-Norm:	Euro-5	Verdünnung	13.4	Dichte HC [g/l]:	0.631
Kraftstoff:	Benzin(E5)	Rechenfaktor:	0.118	Dichte NO <sub>x</sub> [g/l]:	2.05

**Zyklusdaten:**

Fahrzyklus:	WLTC	Zyklusnummer:	1	T <sub>O<sub>2</sub></sub> vor Test [°C]:	23.3
Fahrer:	Dobberkau	Luftdruck [kPa]:	100.40	T <sub>O<sub>2</sub></sub> nach Test [°C]:	23.3
Bediener:	Kulpe	rel. Feuchte [%]:	48.42	T <sub>Raumluft</sub> [°C]:	23.2
Zykluszeit [s]:	1801.16	Gesamtweg [m]:	23247.08		

**Prüfstandskonfiguration:**

F0 [N]:	104.00	Prüfmasse [kg]:	1415
F1 [Nh/km]:	0.700	Rollenträgheit [kgm <sup>2</sup> ]:	513
F2 [Nh <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> ]:	0.0280	CVS-Düse [Nr./ C1]:	120123/ 0.2545

**Testbemerkung:**

Mit CPC

**Testphasen**

	Beutelpaar_1	Beutelpaar_2	Beutelpaar_3
Phasenzeit [s]	589.2	433.7	778.3
Pd [kPa]:	2.8	2.8	2.8
H [g H <sub>2</sub> O / kg Luft]:	8.6	8.6	8.6
kH (Faktor NO <sub>x</sub> ):	0.9	0.9	0.9
Verdünnungsf. (DF):	38.2	27.1	16.8
V <sub>mix_CVS</sub> [m <sup>3</sup> ]:	104.0	76.3	137.1
Wegstrecke [m]:	3090.7	4756.0	15400.4

**Emmissionen**

	Beutelpaar_1	Beutelpaar_2	Beutelpaar_3
CO <sub>2</sub> [g]	565.69	642.15	1976.89
CO [mg]	13462.07	3200.52	4300.49
T.HC [mg]	1092.62	-140.90	128.56
NO <sub>x</sub> [mg]	177.70	167.57	424.99
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	183.03	135.02	128.37
mCO [mg/km]:	4355.72	672.94	279.25
mHC [mg/km]:	353.52	-29.63	8.35
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	57.50	35.23	27.60
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	411.02	5.61	35.94
PM [mg/km]	4.08	0.47	0.62
PN [# /km]	6.46E+12	1.50E+12	1.12E+12
Kraftstoffvbr. [l/100km]:	8.21	5.84	5.54

	Gesamt	Grenzwert	Ausnutzung
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	137.0	kein Grenzwert	
mCO [mg/km]:	901.8	1000	90 %
mHC [mg/km]:	46.5	100	46 %
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	33.1	60	55 %
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	79.6	kein Grenzwert	
PM [mg/km]	1.1	4.5	23 %
PN [# /km]	1.91E+12	6.00E+11	318 %
Kraftstoffvbr. [l/100km]	6.0		

# Protokoll Rollenprüfstand IAD

**Fahrzeugdaten:** **Datum:** 24.10.2019

Hersteller:	Skoda	Fzg.- Ident.- Nr.:			
Modell:	Superb	Antriebsart:	Frontantrieb	Kraftstoffdichte [kg/l]:	0.835
Typ:	TDI	Kennzeichen:	DD-KF1029	Dichte CO <sub>2</sub> [g/l]:	1.964
Motorenbaureihe:	EA188	Kilometerstand:		Dichte CO [g/l]:	1.25
Euro-Norm:	Euro-5	Verdünnung	13.5	Dichte HC [g/l]:	0.623
Kraftstoff:	Diesel(B7)	Rechenfaktor:	0.116	Dichte NO <sub>x</sub> [g/l]:	2.05

**Zyklusdaten:**

Fahrzyklus:	WLTC	Zyklusnummer:	1b	T <sub>O<sub>2</sub></sub> vor Test [°C]:	23.2
Fahrer:	Dobberkau	Luftdruck [kPa]:	99.34	T <sub>O<sub>2</sub></sub> nach Test [°C]:	23.2
Bediener:	Seeländer	rel. Feuchte [%]:	48.93	T <sub>Raumluft</sub> [°C]:	23.2
Zykluszeit [s]:	1801.11	Gesamtweg [m]:	23287.84		

**Prüfstandskonfiguration:**

F0 [N]:	105.00	Prüfmasse [kg]:	1591
F1 [Nh/km]:	1.460	Rollenträgheit [kgm <sup>2</sup> ]	513
F2 [Nh <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> ]:	0.0293	CVS-Düse [Nr./ C1]:	120123/ 0.2545

**Testbemerkung:**

Mit CPC

**Testphasen**

	Beutelpaar_1	Beutelpaar_2	Beutelpaar_3
Phasenzeit [s]	589.5	433.3	778.4
Pd [kPa]:	2.9	2.9	2.9
H [g H <sub>2</sub> O / kg Luft]:	8.8	8.8	8.8
kH (Faktor NO <sub>x</sub> ):	0.9	0.9	0.9
Verdünnungsf. (DF):	37.9	26.8	15.3
V <sub>mix_CVS</sub> [m <sup>3</sup> ]:	103.0	75.3	135.7
Wegstrecke [m]:	3094.5	4760.7	15432.6

**Emmissionen**

CO <sub>2</sub> [g]	595.63	657.79	2204.34
CO [mg]	1155.55	693.55	200.92
T.HC [mg]	53.66	-16.16	236.37
NO <sub>x</sub> [mg]	855.58	567.00	3583.75
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	192.48	138.17	142.84
mCO [mg/km]:	373.41	145.68	13.02
mHC [mg/km]:	17.34	-3.40	15.32
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	276.48	119.10	232.22
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	293.82	115.70	247.54
PM [mg/km]	0.63	0.41	0.59
PN [# /km]	2.99E+12	3.71E+11	2.09E+11
Kraftstoffvbr. [l/100km]:	7.32	5.25	5.42

	Gesamt	Grenzwert	Ausnutzung
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	148.5	kein Grenzwert	
mCO [mg/km]:	88.0	500	18 %
mHC [mg/km]:	11.8	kein Grenzwert	
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	215.0	180	119 %
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	226.7	230	99 %
PM [mg/km]	0.6	5	11
PN [# /km]	6.12E+11	6.00E+11	102 %
Kraftstoffvbr. [l/100km]	5.6		

# Protokoll Rollenprüfstand IAD

**Fahrzeugdaten:** **Datum:** 28.10.2019

Hersteller:	VW	Fzg.- Ident.- Nr.:	
Modell:	Golf_6	Antriebsart:	Frontantrieb
Typ:	1_4_TSI	Kennzeichen:	BZ_HR199
Motorenbaureihe:		Kilometerstand:	
Euro-Norm:	Euro-5	Verdünnung	13.4
Kraftstoff:	Benzin(E5)	Rechenfaktor:	0.118

**Zyklusdaten:**

Fahrzyklus:	WLTC	Zyklusnummer:	1	T <sub>01</sub> vor Test [°C]:	23.0
Fahrer:	Grafe	Luftdruck [kPa]:	100.47	T <sub>01</sub> nach Test [°C]:	23.3
Bediener:	Pahler	rel. Feuchte [%]:	37.71	T <sub>Raumluft</sub> [°C]:	23.3
Zykluszeit [s]:	1801.08	Gesamtweg [m]:	23194.59		

**Prüfstandskonfiguration:**

F0 [N]:	59.00	Prüfmasse [kg]:	1361
F1 [Nh/km]:	0.597	Rollenträgheit [kgm <sup>2</sup> ]:	513
F2 [Nh <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> ]:	0.0245	CVS-Düse [Nr./ C1]:	120123/ 0.2545

**Testbemerkung:**

Mit CPC

**Testphasen**

	Beutelpaar_1	Beutelpaar_2	Beutelpaar_3
Phasenzeit [s]	589.8	433.1	778.2
Pd [kPa]:	2.9	2.9	2.9
H [g H <sub>2</sub> O / kg Luft]:	6.7	6.7	6.7
kH (Faktor NO <sub>x</sub> ):	0.9	0.9	0.9
Verdünnungsf. (DF):	39.4	29.7	19.2
V <sub>mix_CVS</sub> [m <sup>3</sup> ]:	104.2	76.2	137.2
Wegstrecke [m]:	3082.4	4737.2	15375.0

**Emmissionen**

CO <sub>2</sub> [g]	569.33	590.97	1729.68
CO [mg]	6570.52	955.86	966.60
T.HC [mg]	865.44	-118.87	92.52
NO <sub>x</sub> [mg]	423.95	128.04	297.34
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	184.71	124.75	112.50
mCO [mg/km]:	2131.65	201.78	62.87
mHC [mg/km]:	280.77	-25.09	6.02
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	137.54	27.03	19.34
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	418.31	1.94	25.36
PM [mg/km]	42.02	21.24	6.79
PN [# /km]	8.53E+12	1.64E+12	7.83E+11
Kraftstoffvbr. [l/100km]:	8.12	5.37	4.84

	Gesamt	Grenzwert	Ausnutzung
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	124.6	kein Grenzwert	
mCO [mg/km]:	366.2	1000	37 %
mHC [mg/km]:	36.2	100	36 %
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	36.6	60	61 %
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	72.8	kein Grenzwert	
PM [mg/km]	14.4	4.5	320 %
PN [# /km]	1.98E+12	6.00E+11	330
Kraftstoffvbr. [l/100km]	5.4		

# Protokoll Rollenprüfstand IAD

**Fahrzeugdaten:** **Datum:** 30.10.2019

Hersteller:	VW	Fzg.- Ident.- Nr.:			
Modell:	Passat	Antriebsart:	Frontantrieb	Kraftstoffdichte [kg/l]:	0.835
Typ:	B8	Kennzeichen:	DD-TU103	Dichte CO <sub>2</sub> [g/l]:	1.964
Motorenbaureihe:	EA288	Kilometerstand:		Dichte CO [g/l]:	1.25
Euro-Norm:	Euro-6	Verdünnung	13.5	Dichte HC [g/l]:	0.623
Kraftstoff:	Diesel(B7)	Rechenfaktor:	0.116	Dichte NO <sub>x</sub> [g/l]:	2.05

**Zyklusdaten:**

Fahrzyklus:	WLTC	Zyklusnummer:	1	T <sub>O<sub>2</sub></sub> vor Test [°C]:	23.0
Fahrer:	Grafe	Luftdruck [kPa]:	101.30	T <sub>O<sub>2</sub></sub> nach Test [°C]:	23.1
Bediener:	Kulpe	rel. Feuchte [%]:	36.54	T <sub>Raumluft</sub> [°C]:	23.1
Zykluszeit [s]:	1801.38	Gesamtweg [m]:	23183.56		

**Prüfstandskonfiguration:**

F0 [N]:	105.00	Prüfmasse [kg]:	1541
F1 [Nh/km]:	1.460	Rollenträgheit [kgm <sup>2</sup> ]	513
F2 [Nh <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> ]:	0.0293	CVS-Düse [Nr./ C1]:	120123/ 0.2545

**Testbemerkung:**

Mit CPC

**Testphasen**

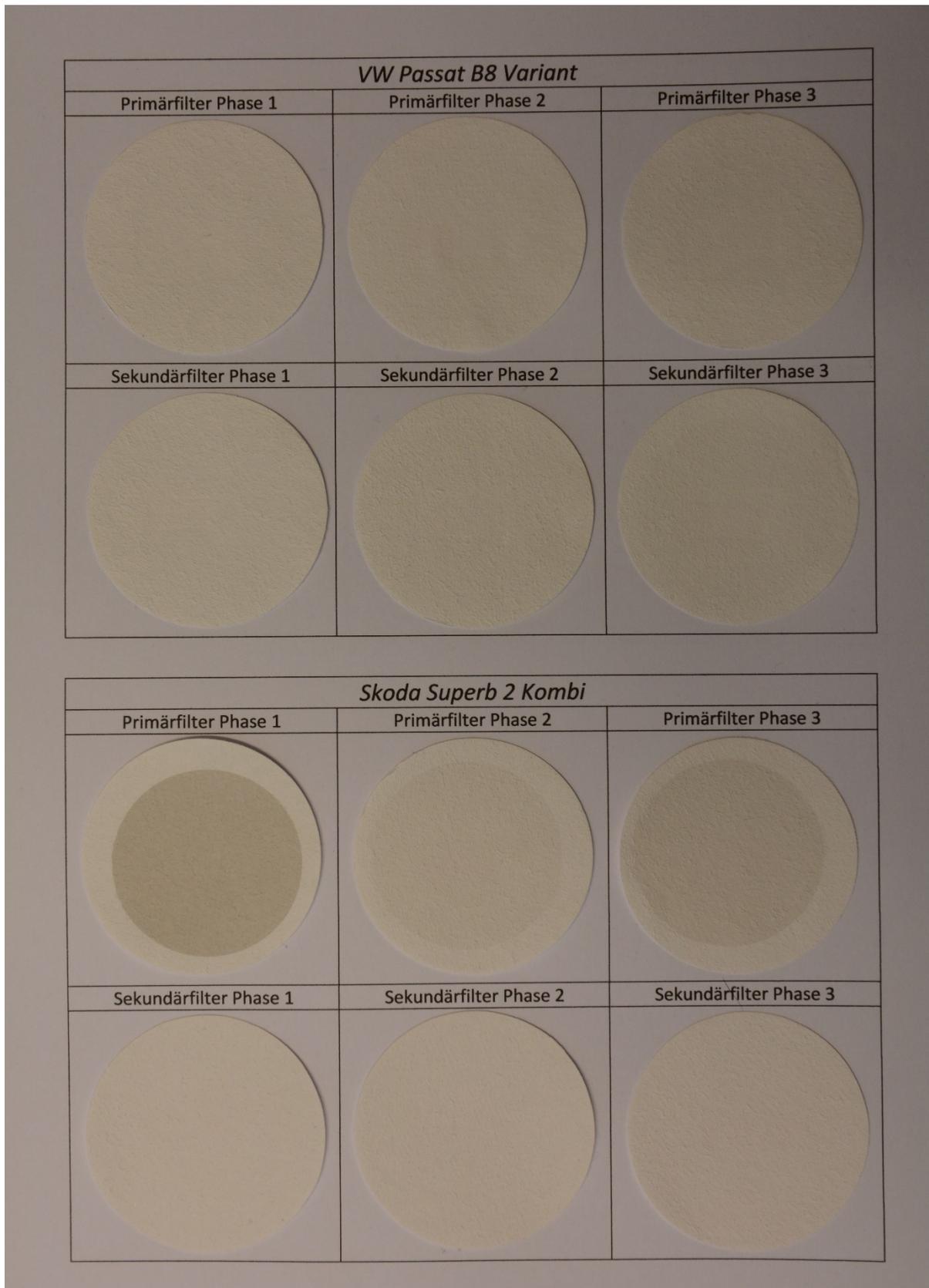
	Beutelpaar_1	Beutelpaar_2	Beutelpaar_3
Phasenzeit [s]	589.9	433.3	778.2
Pd [kPa]:	2.8	2.8	2.8
H [g H <sub>2</sub> O / kg Luft]:	6.4	6.4	6.4
kH (Faktor NO <sub>x</sub> ):	0.9	0.9	0.9
Verdünnungsf. (DF):	41.8	28.4	17.0
V <sub>mix_CVS</sub> [m <sup>3</sup> ]:	105.1	76.9	138.4
Wegstrecke [m]:	3080.5	4738.5	15364.5

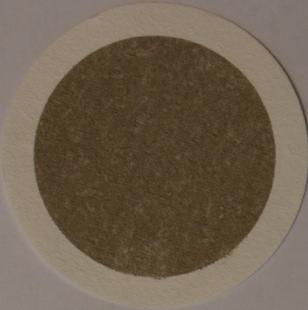
**Emmissionen**

CO <sub>2</sub> [g]	540.89	626.11	1989.80
CO [mg]	252.67	-16.49	-50.37
T.HC [mg]	1.65	3.03	13.98
NO <sub>x</sub> [mg]	565.29	256.74	839.14
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	175.59	132.13	129.51
mCO [mg/km]:	82.02	-3.48	-3.28
mHC [mg/km]:	0.53	0.64	0.91
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	183.50	54.18	54.62
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	184.04	54.82	55.52
PM [mg/km]			
PN [# /km]	4.54E+10	1.93E+10	1.06E+10
Kraftstoffvbr. [l/100km]:	6.66	5.01	4.91

	Gesamt	Grenzwert	Ausnutzung
mCO <sub>2</sub> [g/km]:	136.2	kein Grenzwert	
mCO [mg/km]:	8.0	500	2 %
mHC [mg/km]:	0.8	kein Grenzwert	
mNO <sub>x</sub> [mg/km]:	71.7	80	90 %
mNO <sub>x</sub> + mHC [mg/km]:	72.5	170	43 %
PM [mg/mk]	0.1	4.5	2 %
PN [# /km]	1.70E+10	6.00E+11	3 %
Kraftstoffvbr. [l/100km]	5.2		

■ A.3 Particle-Measurement Unit, Partikelfilter; Fotos: M. Dobberkau (TU Dresden)



<i>Ford Focus MK3 Tunier</i>		
Primärfilter Phase 1	Primärfilter Phase 2	Primärfilter Phase 3
		
Sekundärfilter Phase 1	Sekundärfilter Phase 2	Sekundärfilter Phase 3
		

# Literaturverzeichnis

- BURTSCHER, H. & MAYER, A.: Field Instrumentation for ultrafine particles. Präsentation am Ultrafine Particles Workshop Feb 11-13, 2015, U.S. EPA, Research Triangle Park, NC., 2015
- GRÖß, J., HAMED, A., SONNTAG, A. ET AL.: Atmospheric new particle formation at the research station Melpitz, Germany: connection with gaseous precursors and meteorological parameters. *Atmospheric Chemistry Physics* 18: 1835-1861, 2018.
- HEI – Health Effects Institute: Understanding the health effects of ambient ultrafine particles. HEI Perspectives 3, Health Effects Institute, Boston, Massachusetts, USA, 2013.
- KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2019): Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2019, [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html), zugegriffen am 27.11.2019.
- LÖSCHAU, G.; HAUSMANN, A., WOLF, U.; SOMMER, W.; WIEDENSOHLER, A.; RASCH, F.; SPINDLER, G.; MÜLLER, K.; BIRMILI, W.; HERMANN, H.; ANHALT, M.; BÖHME, U.; DIETZ, V.; KATH, H.-G. & KÜHNE, H. (2017): Umweltzone Leipzig, Abschlussbericht, Broschüre des LfULG, <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/29757>
- MA, N. & BIRMILI, W.: Estimating the contribution of photochemical particle formation to ultrafine particle number averages in an urban atmosphere, *Sci. Tot. Environ.*, 512–513, 154-166, 2015.
- PAASONEN, P., KUPIAINEN, K., KLIMONT, Z., VISSCHEDIJK, A., DENIER VAN DER GON, H.A.C., AMANN, M.: Continental anthropogenic primary particle number emissions. *Atmos. Chem. Phys.*, 16: 6823-6840, 2016.
- PAUSCH, A.; FRANKE, J.; HAUSMANN, A.; LÖSCHAU, G. (2017): Luftqualität in Sachsen, Jahresbericht 2016, Broschüre des LfULG, <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11388>.
- PAUSCH, A.; FRANKE, J.; LÖSCHAU, G.; MÜHLNER, M.; STRAKOVÁ, M. & MANNEWITZ, A. (2019): Luftqualität in Sachsen, Jahresbericht 2018, Broschüre des LfULG, <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/34122>.
- VDI 2009: VDI Richtlinie 3867 Blatt I: Messen von Partikeln in der Außenluft. Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung von Aerosolen - Grundlagen, 2009.
- VERORDNUNG (EU) 2017/1151 der Kommission vom 1. Juni 2017 zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typp Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission sowie der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission; <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1151/oj>
- WIEDENSOHLER, A., WIESNER, A., WEINHOLD, K., BIRMILI, W., HERMANN, M., MERKEL, M., MÜLLER, T., PFEIFER, S., SCHMIDT, A., TUCH, T., VELARDE, F., QUINCEY, P., SEEGER, S. & NOWAK, A., Mobility Particle Size Spectrometers: Calibration procedures and measurement uncertainties, *Aerosol Science and Technology*, 52:2.146-164, 2018.
- THEODOROS GRIGORATOS AND GIORGIO MARTINI, 2014 Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear M, European Commission

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: +49 351 2612-0  
Telefax: +49 351 2612-1099  
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de  
www.lfulg.sachsen.de

Das LfULG ist eine nachgeordnete Behörde des  
Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft.

**Autor:**

Kay Weinhold  
Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V.  
Permoserstraße 15  
04318 Leipzig  
Leipzig Telefon: +49 34127177308  
E-Mail: weinhold@tropos.de

**Redaktion:**

Andrea Hausmann  
Abteilung 5/Referat 51  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: +49 351 2612-5100  
Telefax: +49 351 2612-5099  
E-Mail: andrea.hausmann@smul.sachsen.de

**Titelfoto:**

Maximilian Dobberkau, TU Dresden

**Redaktionsschluss:**

14.10.2020

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für  
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de