

TEXTE

26/2019

Entwicklung einer neuen harmonisierten Testprozedur im Rahmen der Fahrzyklus- entwicklung (WLTP) für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge in der UNECE – Evaluierungsphase

Abschlussbericht

TEXTE 26/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3712 45 104
UBA-FB 002509

Entwicklung einer neuen harmonisierten Testprozedur im Rahmen der Fahrzyklusentwicklung (WLTP) für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge in der UNECE – Evaluierungsphase

Abschlussbericht

von

Felix Köhler
TÜV NORD Mobilität GmbH und Co. KG, Essen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

TÜV NORD Mobilität GmbH und Co. KG
Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität
Adlerstraße 7
45307 Essen

Abschlussdatum:

Februar 2017

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Martin Lange

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2019

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Im Januar 2011 wurde durch die europäische Kommission eine Arbeitsgruppe etabliert, welche zum Ziel hat die Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Realemissionen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen während des Typprüfprozesses zu bestimmen. Hintergrund hierfür ist die hohe NO₂-Luftbelastung, welche derzeit europaweit an Messstationen ermittelt wird. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird der Prozess, an dessen Ende eine Änderung, der für die Emissionsbewertung von Fahrzeugen maßgeblichen Verordnung EG (Nr.) 715/2007 stehen wird, durch den Auftragnehmer auf europäischer Ebene fachlich begleitet. Durch verschiedene Messungen an Fahrzeugen auf dem Rollenprüfstand, Ermittlung von Straßenlastkoeffizienten sowie Messungen im realen Straßenverkehr werden grundsätzliche Fragen zu Last- und Temperatureinflüssen auf den Emissionsausstoß von Fahrzeugen untersucht.

Mit Blick auf das Ziel der europäischen Kommission, ein robustes Verfahren zur Ermittlung des Schadstoffausstoßes im realen Verkehr einzuführen, werden zwei Fahrzeuge vermessen, um die in Diskussion befindliche Messprozedur (RDE „Real driving emissions“ – mittels PEMS „Portable Emission Measurement System“) sowohl auf Ihre Praxistauglichkeit, als auch Genauigkeit hin zu überprüfen.

Zur Untersuchung des Abgasverhaltens wurden diverse Messungen sowohl auf dem Rollenprüfstand als auch im realen Verkehr mittels PEMS durchgeführt. Die erste Variable stellte dabei die Start- und Umgebungstemperatur der Tests dar (5°C, 15°C, 25°C). Als zweite „Variable“ werden unterschiedliche Testzyklen gewählt um den Einfluss auftretender Lasten und variierender Dynamiken zu untersuchen. Es wird der für die Typprüfung relevante NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus), der für die Typprüfung ab 2017 vorgesehene WLTC (Worldwide harmonized Light duty vehicles Test Cycle), der wesentlich dynamischere CADC (Common Artemis Driving Cycle) sowie das sogenannte Random Cycle-Verfahren ausgewählt. Die PEMS-Messungen werden im Laufe des Tages insgesamt dreifach durchgeführt, wobei die beiden Wiederholungsmessungen keinen Kaltstart beinhalten können (Fahrzeug wird mit betriebswarmem Motor gestartet). Die Messungen der Abgasemissionen werden, abgesehen von den PEMS-Messungen, auf den Prüfständen des TÜV NORD in Essen durchgeführt. Das Abgaslabor TÜV NORD ist nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert. Die moderne Messtechnik ermöglicht neben Prüfungen entsprechend der aktuellen Abgasgesetzgebung auch die Untersuchung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben und die Messung von nicht limitierten Schadstoffen.

Das Forschungsvorhaben zeigt, dass sowohl eine Änderung des Typprüfverfahrens hin zu WLTP als auch die Einführung von RDE sinnvoll ist. Diese Verfahren erhöhen die Anforderungen an die Fahrzeuge und können dazu führen, dass die Fahrzeuge in Zukunft unter allen Bedingungen gute Emissionswerte erbringen müssen.

Abstract

In January 2011 the European union installed a working group for checking possibilities of implementation real-emission tests in the type approval procedure for passenger cars. The reason for this is the increasing air pollution with NO₂. The target of this research project is to technical attend the RDE-process at European level. By measuring different cars on the chassis-dyno, determination of road load-factors and measurements in real traffic there will be execute questions of temperature and road load influences regarding to exhaust emissions.

Regarding to the target of the European Commission to develop a procedure for real driving emissions there will be tested two cars to check the practicability and the accuracy of the measurements.

To analyze the exhaust emission there will be measurements on the chassis-dyno and in real traffic with a PEMS (Portable emission measurement system). The first considered variable is the test temperature (5°C, 15°C and 25°C). Second considered variables are different driving cycles, for analyzing different dynamics and loads. The cycles are, NEDC (Type approval Cycle), WLTC (provided cycle for type approval form 2017), CADC, Random-Cycle and RDE-Test. The RDE-Test were driven 3times a day, first with cold start following with hot start.

All measurements were performed at TÜV NORD lab in Essen or in case of RDE test in the surrounding environment. The lab is accredited for DIN EN ISO/IEC 17025. TÜV NORD is able, with modern analyzer systems, to measure according to the latest exhaust emission regulation in addition for cars with alternative powertrain and not limited pollutions.

The research project shows that a change of the type approval procedure to WLTP and implementation of RDE-tests are reasonable. These procedures increase the requirements for the tested vehicles and should lead to vehicles with decreasing exhaust emissions, which emit less emission in every case.

Inhaltsverzeichnis

Kurzbericht.....	10
Summary Report	14
1 Darstellung des Projekts.....	18
1.1 Kurzbeschreibung des Forschungsvorhabens.....	18
1.2 Fahrzeugauswahl	19
1.2.1 Ergebnisse der Eingangsmessungen	20
1.3 Messplan.....	21
1.3.1 Verwendete Zyklen für die Rollenprüfstandsmessungen	21
1.3.1.1 Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycle (WLTC)	21
1.3.1.2 Random-Cycle	23
2 Ergebnisse	25
2.1 Messungen auf dem Rollenprüfstand	25
2.1.1 Kompressionszündungsmotor (VW Passat).....	26
2.1.2 Fremdzündungsmotor (Audi A4).....	29
2.2 Realemissionsmessungen.....	31
2.2.1 Auswirkung der Ausrüstung der Fahrzeuge mit dem Messsystem	31
2.2.2 Ergebnisse der Vermessung im Straßenverkehr	34
2.2.2.1 Emissionsmessungen auf der Straße und mit zufällig generierten Zyklen im Labor	34
2.2.2.2 Auswertungen der ermittelten Messwerte mittels MAW- und SPF-Methode	37
2.2.3 Bewertung der MAW- und SPF-Methode.....	40
2.2.4 Schwankungen der Rahmenbedingungen und der Messergebnisse von RDE-Messungen (bezogen auf Draft 2015 – G3 4533297)	41
2.3 Übersicht der verschiedenen Messungen und zu Grenzwerten	42
3 Darstellung und Einschätzung des Entwicklungsprozesses	44
4 Ausblick.....	47
5 Quellenverzeichnis	48
6 Anhang	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Teilzyklus Low ₃ – WLTC /3/	22
Abbildung 2:	Teilzyklus Medium ₃₋₂ – WLTC /3/	22
Abbildung 3:	Teilzyklus High ₃₋₂ – WLTC /3/	23
Abbildung 4:	Teilzyklus Extra High ₃ – WLTC /3/.....	23
Abbildung 5:	Random-Cycle Generator	24
Abbildung 6:	Random-Cycle.....	24
Abbildung 7:	CO- bzw. NO _x -Emissionen bei drei Temperaturen	25
Abbildung 8:	Modalverlauf der NO _x -Emissionen	26
Abbildung 9:	NO _x und CO ₂ -Emissionen bei 5°C (Kompressionszündungsmotor).....	27
Abbildung 10:	NO _x und CO ₂ -Emissionen bei 15°C (Kompressionszündungsmotor).....	28
Abbildung 11:	NO _x und CO ₂ -Emissionen bei 25°C (Kompressionszündungsmotor).....	28
Abbildung 12:	CO und CO ₂ -Emissionen bei 5°C (Fremdzündungsmotor).....	29
Abbildung 13:	CO und CO ₂ -Emissionen bei 15°C (Fremdzündungsmotor).....	30
Abbildung 14:	CO und CO ₂ -Emissionen bei 25°C (Fremdzündungsmotor).....	30
Abbildung 15:	Vergleich der Fahrwiderstände mit und ohne portable Messtechnik.....	33
Abbildung 16:	Emissionen Random Cycle / PEMS.....	34
Abbildung 17:	Installation des PEMS-Systems am Prüffahrzeug – Audi A4	35
Abbildung 18:	Installation des PEMS-Systems am Prüffahrzeug – VW Passat	35
Abbildung 19:	Darstellung der PEMS Route.....	36
Abbildung 20:	MAW-Kurve.....	38
Abbildung 21:	Realemissionen bei 5°C (Kompressionszündungsmotor).....	38
Abbildung 22:	Realemissionen bei 15°C (Kompressionszündungsmotor).....	39
Abbildung 23:	Realemissionen bei 25°C (Kompressionszündungsmotor).....	39
Abbildung 24:	Realemissionen bei 5°C (Fremdzündungsmotor).....	39
Abbildung 25:	Realemissionen bei 15°C (Fremdzündungsmotor).....	40
Abbildung 26:	Realemissionen bei 25°C (Fremdzündungsmotor).....	40
Abbildung 27:	Streuung bei mehreren Fahrten und Temperaturen - NO _x (Kompressionszündungsmotor)	41
Abbildung 28:	Unterschiedliche Test-Temperaturen - CO (Fremdzündungsmotor).....	42
Abbildung 29:	Übersicht der Ergebnisse – VW Passat - NO _x	43
Abbildung 30:	Übersicht der Ergebnisse – Audi A4 – CO.....	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ergebnisse der Eingangsprüfung.....	20
Tabelle 2:	Darstellung der durchgeführten Messungen.....	21
Tabelle 3:	Lastkoeffizienten mit und ohne portabler Messtechnik (PEMS), sowie notwendige Kraft und Leistung für eine konstante Geschwindigkeit als Funktion dieser.	32
Tabelle 4:	Übersicht der Ergebnisse – VW Passat - NO _x	42
Tabelle 5:	Übersicht der Ergebnisse – Audi A4 - CO	42
Tabelle 6:	Ergebnisse der ersten Testreihe im CADC (Audi A4).....	50
Tabelle 7:	Ergebnisse der zweiten Testreihe im CADC (Audi A4).....	51
Tabelle 8:	Ergebnisse der ersten Testreihe im CADC (VW Passat).....	52
Tabelle 9:	Ergebnisse der zweiten Testreihe im CADC (VW Passat).....	53
Tabelle 10:	Ergebnisse der Testreihen 1+2 im WLTC und random (Audi A4).....	54
Tabelle 11:	Ergebnisse der Testreihen 1+2 im WLTC und random (VW Passat).....	55
Tabelle 12:	Ergebnisse der Testreihen RDE (Audi A4 TFSi).....	56
Tabelle 13:	Ergebnisse der Testreihen RDE (VW Passat TDI)	57

Abkürzungsverzeichnis

CADC	Common Artemis Dirving Cycle
DIN	Deutsche Institut für Normung
DSG	Direkt Schalt Getriebe
ECE	Economic Commission for Europe
EFM	Exhaust Flow Meter
EG	Europäische Gemeinschaft
EN	Europäische Norm
ISO	International Organization for Standardization
LDV	Light Duty Vehicle
MAW	Moving Average Window
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
PEMS	Portable Emission Measurement System
RDE	Real Driving Emission
SCR	Selective Catalyst Reduction
SPF	Standardized Power Frequency Distribution
TCMV	Technical Committee Motor Vehicles
WLTC	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

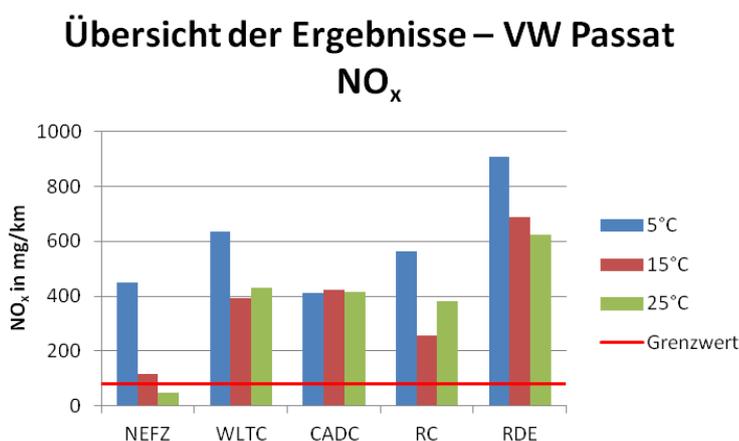
Kurzbericht

Einleitung

Übersicht der ermittelten Ergebnisse

Im Folgenden werden die ermittelten Ergebnisse des Forschungsvorhabens dargestellt. Alle Ergebnisse der Rollenprüfstandsmessungen wurden nach Grundlage der für die Typprüfung vorgeschriebenen Berechnungsformeln nach ECE 83 Anhang 4a durchgeführt. Der Fokus der politischen Diskussion bezüglich Realemissionen liegen aufgrund der deutlich erhöhten NO₂-Konzentrationen in der Luft in erster Linie auf den Stickoxidemissionen der Fahrzeuge mit Kompressionszündungsmotor. Abbildung 1 zeigt demnach die durch das Fahrzeug mit Kompressionsmotor emittierten NO_x Emissionen für die unterschiedlichen Temperaturbereiche in allen durchgeführten Testläufen.

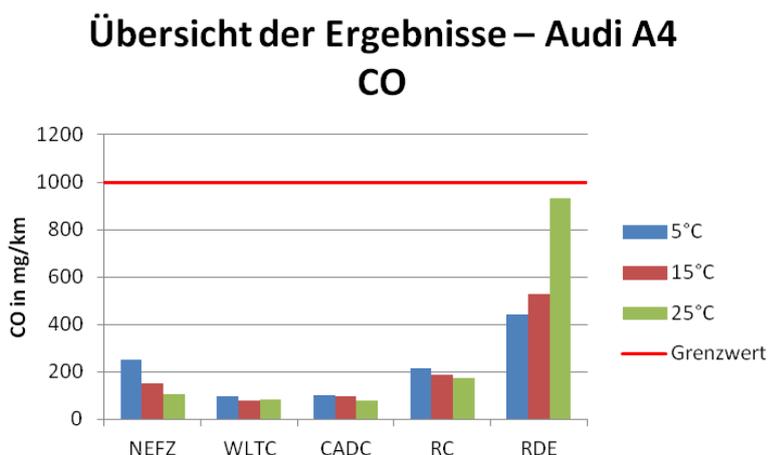
Abbildung1: Übersicht der Ergebnisse – VW Passat - NO_x



Der für die Typprüfung nach EURO-6 Abgasnorm im NEFZ einzuhaltende Grenzwert für NO_x-Emissionen liegt bei 80 mg/km. Wie in Abbildung 1 dargestellt wurde der Grenzwert nur unter den für die Typprüfung maßgeblichen Randbedingungen (Fahrzyklus NEFZ, Starttemperatur 25°C) eingehalten. Variationen in den Starttemperaturen bei unverändertem Fahrzyklus äußern sich durch signifikante Erhöhung der Emissionen. Bei Änderung der abgerufenen Leistung bzw. höherer Dynamik in den Fahrzyklen WLTC, CADC und RC zeigen sich auch bei Richtlinienkonformen Starttemperaturen (25°C) deutlich erhöhte Schadstoffkonzentrationen. Die Messungen im realen Straßenverkehr ergeben im Vergleich zum gültigen Grenzwert massive Erhöhungen der Stickoxidemissionen von über 600mg/km. Zur Einordnung der Messungen im realen Straßenverkehr ist zu beachten, dass es sich hierbei um reine Messdaten, ohne nachträgliche Evaluierung handelt. Es sind derzeit zwei Methoden zur Datenevaluierung in Diskussion (Standardized Power Frequency Distribution SPF- und Moving Average Windows -MAW-Methode) die das Ziel verfolgen die Schadstoffemissionen in Abhängigkeit der abgerufenen Leistung zu wichten. Hierzu wird jeweils die emittierte CO₂ Masse zu Hilfe genommen. Gleichzeitig werden durch die Richtlinie Rahmenbedingungen für die Messfahrt gesetzt, welche die Umgebungsbedingungen, die Routenkriterien und die zu nutzende Dynamik während einer Messung festlegen. Die so festgelegten Randbedingungen werden in naher Zukunft, wenn die Realemissionsmessungen Teil der Typprüfung werden, den normalen Nutzungsbereich eines Fahrzeugs neu definieren und die Anforderungen an die Abgasnachbehandlung deutlich erhöhen.

Die im Verlauf folgende Abbildungen 2 zeigen das Emissionsverhalten des Fahrzeugs mit Fremdzündungsmotor.

Abbildung 2: Übersicht der Ergebnisse – Audi A4 – CO



Aufgrund des Brennverfahrens, der Gemischbildung und des verwendeten Kraftstoffs, sind konventionelle Fremdzündungsmotoren nicht von der Stickoxidproblematik betroffen. Gleichzeitig werden die gasförmigen Schadstoffe Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickoxide durch die Verwendung eines 3-Wege-Katalysators sehr effektiv reduziert und spielen, nach Erreichen der Arbeitstemperatur des Abgasnachbehandlungssystems, eine untergeordnete Rolle. Wie Abbildung 2 zeigt, erfüllt das getestete Fahrzeug unter allen Bedingungen den geforderten Grenzwert für die hier exemplarisch dargestellte Schadstoffkomponente Kohlenmonoxid. Der Fokus der Realemissionsbestimmung von Fahrzeugen mit Fremdzündungsmotor liegt daher in der Partikelanzahlbestimmung, da gerade direkteinspritzende Fremdzündungsmotoren hier erhöhte Emissionen aufweisen. Die Messtechnik zur Bestimmung der Partikelanzahl ist derzeit in der Entwicklung und stand für das vorliegende Forschungsvorhaben nicht zu Verfügung.

Zusammenfassung

Darstellung und Einschätzung des Entwicklungsprozesses

Ende 2014 wurde der erste Entwurf der RDE-Verordnung durch die europäische Arbeitsgruppe RDE-LDV vorgelegt. In diesem sind unter anderem die Routenkriterien, die zu nutzende Analysetechnik und der Umfang, der im Zuge der Typgenehmigung zu vermessenden Fahrzeuge, festgelegt. Für die Auswertung der Messdaten sind die Methoden SPF und MAW beschrieben.

Nach dem Inkrafttreten der Richtlinie soll es aus Sicht des europäischen Gesetzgebers eine Validierungsphase geben, in der die durchzuführenden Messungen mit beiden Methoden ausgewertet werden müssen. Die Ergebnisse beider Methoden und der Realmesswert (als streckenbezogenes Integral über die Gesamtfahrt) sollen der Arbeitsgruppe zu Verfügung gestellt werden und so am Ende der Evaluierungsphase, zur Entwicklung der Methoden und zur Fehler- bzw. Potentialanalyse der selbigen, dienen (CF- als Abfederung von messtechnischen und statistischen Unsicherheiten). Ziel ist die Fortentwicklung, ggf. aber auch Neubewertung der RDE-Methoden angesichts neuer Erfahrungen. Diese sollen, geknüpft an die Grenzwerte des Typ I Tests, durch Faktoren bestimmt sein.

Die im Zusammenhang mit diesem Forschungsprojekt mittels PEMS durchgeführten Messungen im Realverkehr haben gezeigt, dass es aufgrund der bei RDE Messungen im Vergleich zu den Rollenprüfstandsmessungen nicht vorhandenen, genau definierten Umgebungsbedingungen wesentliche Einflussfaktoren gibt, die sich auf das Emissionsverhalten des Prüffahrzeugs auswirken. So trägt der Fahrereinfluss, welcher durch individuelles Verhalten des Fahrzeugführers bei z.B. topografischen Verän-

derungen im Routenprofil, vorrausschauendes Fahren, Beschleunigungs- und Bremsverhalten, Geschwindigkeit und Schaltverhalten sowie die unruhige Bedienung des Gaspedals, im Wesentlichen zur Erhöhung bzw. Verringerung der ausgestoßenen Schadstoffmengen bei.

Um größere Einflüsse der Route auf das Ergebnis zu minimieren, wurden in den Anforderungen des Draft 2015 – G4533297 mehrere Punkte definiert, außerhalb derer die Prüffahrt nicht gewertet werden darf:

- 1/3 Mix (Distanz): Innerorts $34 \pm \frac{10}{5}$ %, sowie Außerorts und Autobahn jeweils 33 ± 10 %
- mind. 16 km pro Teil
- Tripdauer: 90-120 min
- Innerorts: 0-60km/h; Außerorts: 60-90km/h; Autobahn 90-160 km/h
 - Autobahn bis 145 km/h, bis 3% der Autobahn 160km/h zulässig
- Durchschnittsgeschwindigkeit Innerorts: 15-30 km/h
- Standzeiten: <1km/h bei mind. 10% der Innerortszeit; Mehrere Stopps von mind. 10s; Ein langer Stopp von >80% der Gesamt-Stoppszeit ist verboten
- Durchschnittsgeschwindigkeit Autobahn 90-110 km/h
- mind. 10min \geq 110km/h

Die Datenlage ist derzeit nicht umfassend genug um eine Aussage über die Wiederholbarkeit von Messungen auf verschiedenen Fahrstrecken zu treffen. Da die Messungen im realen Verkehr stattfinden, gleich kein Fahrprofil dem anderen – Reihenfolge, Topographie, Verkehrsaufkommen und Aufteilung der Fahranteile beeinflussen das Emissionsverhalten und sollen daher im RDE-Verfahren festgelegt werden

Trotz vieler Einflussfaktoren während der Messung und deren Einfluss auf die Ergebnisse ist die Einführung von RDE sinnvoll. Gerade diese nicht vorhersehbaren Faktoren können dazu führen, dass die Fahrzeuge in Zukunft unter allen Bedingungen gute Emissionswerte erbringen müssen.

Ausblick

Der Entwurf der Arbeitsgruppe RDE-LDV zur Änderung der bestehenden Verordnung EG (Nr.) 715/2007 beschreibt alle Randbedingungen und Auswertekriterien für die Durchführung von Messungen im realen Verkehr.

Durch Aufnahme der Realemissionsermittlung in den Zulassungsprozess und die damit verbundene Ausweitung der Randbedingungen werden die Anforderungen an die Abgasnachbehandlungssysteme für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge deutlich erhöht. Zusätzlich sind eventuelle Defekte des Prüffahrzeugs oder des Messsystems aufgrund der nicht gegebenen Reproduzierbarkeit der Messungen nur in Extremfällen eindeutig zu erkennen. Der Abgleich des mobilen Messsystems mit der stationären Einrichtung auf dem Rollenprüfstand wird dadurch unabdingbar, Fehler in der Messeinrichtung zur Bestimmung des Massenstroms wirken sich beispielsweise multiplikativ auf die Messwerte aus und könne bei nicht vorgenommener Validierung von der Realität deutlich abweichende Ergebnisse verursachen.

Im Richtlinienentwurf festgelegt sind bereits Definitionsparameter für die Route sowie Durchführungskriterien für eine gültige Messfahrt. Es wurden Randbedingungen wie Umgebungstemperatur und Höhe sowie Testparameter wie Länge, Höchst- und Mindestgeschwindigkeit und Anteil der jeweiligen Streckenabschnitte von städtischem und außerstädtischem Fahren sowie der Autobahnanteil definiert. Eine genaue Systembeschreibung des zur Emissionsanalyse zu nutzenden Messaufbaus, die Installation des Aufbaus am Fahrzeug sowie die zur Erzielung von belastbaren Messwerten notwendigen Überprüfungen wurden definiert. Die Beiden, im Rahmen dieses Forschungsvorhaben dargestellten, Methoden zur Messwertanalyse (MAW/SPF) werden im Entwurf beschrieben.

Am 03.02.2016 hat das Europäische Parlament der Einführung des durch die Arbeitsgruppe RDE-LDV erarbeiteten Verfahrens zur Reglementierung der Realemissionen zugestimmt. Damit kommt es der bereits in der Verordnung EG (Nr.) 692/2008 festgelegten Forderung nach Reglementierung nach. Die Einführung wird demnach in drei Schritten erfolgen:

Mit Inkrafttreten der Richtlinie wird die Messung von Realemissionen für neue Fahrzeugtypen im Zuge der Typprüfung verbindlich. In dieser „Monitoring – Phase“ werden die ermittelten Werte keiner Grenzwertüberprüfung unterzogen, die ermittelten Daten sollen der Entwicklung der Auswerteprogramme dienen. Ab dem 01.09.2017 gilt ein „conformity factor (CF) von 2,1 – ab 01.01.2020 der CF von 1,5 – welcher sich aus einem Faktor von 1,0 für die Grenzwertbetrachtung und dem Faktor 0,5 für die Messunsicherheiten zusammensetzt.

Summary Report

Introduction

In 2011, the persistently high NO₂ atmospheric load across Europe was the impetus to establish a working group with the objective of determining possibilities for considering real emissions from passenger cars and light commercial vehicles during the homologation process.

The procedure proposed by the European Commission for the determination of the pollutant emissions of passenger cars and light commercial vehicles in real traffic—RDE, or "real driving emissions"—should be examined as to its practicality in the context of this research project. For this purpose, two vehicles are measured differently on the roll test stand and measured in real traffic by means of PEMS ("Portable Emission Measurement System"). The focus will be on the influence of temperature and load on emissions behaviour.

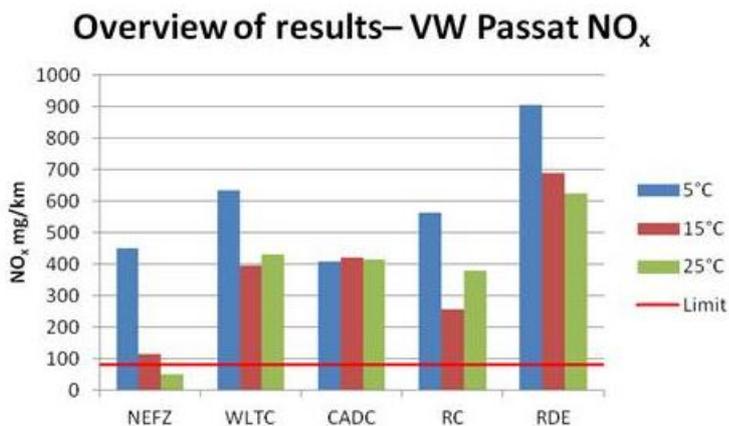
The roll test stand runs are carried out on TÜV NORD's 4-wheel climatic test facility in Essen. The laboratory is accredited according to DIN EN ISO / IEC 17025. In addition to tests according to current exhaust gas legislation, the modern measurement technology also allows the investigation of vehicles with alternative drives and the measurement of non-limited pollutants. The vehicles are conditioned to the respective starting temperature for a period of 12 hours. In the course of homologation testing according to Regulation EC 692/2008, the temperature to be maintained lies in the range of +20°C to +30°C. For the measurement program, test temperatures of 25°C, 15°C and 5°C were determined in order to be able to evaluate emissions behaviour at lower temperatures. The start temperatures for the RDE measurements have been adhered to accordingly. Because of the measuring method, the temperature curves for real-world measurements are subject to the natural fluctuations and cannot be maintained within a small tolerance range, unlike on the test stand. The RDE measurements were conducted three times within one day, once with cold start and subsequently at engine operating temperature.

In order to be able to analyse the influence of the performance called upon as well as the dynamics on emissions behaviour, the WLTC (Worldwide Harmonized Light Duty Vehicles Test Cycle), the more dynamic CADC (Common Artemis Driving Cycle) with a top speed of 160 km/h, and the so-called Random Cycle (RC) procedure were selected, in addition to the NEDC (New European Driving Cycle), which is relevant for approval.

Overview of the Results Obtained

The results of the research project are presented below. All results of the roll test stand measurements were conducted on the basis of the calculation formulas prescribed for the type test according to ECE 83 Appendix 4a. The focus of the political debate concerning real emissions lies, due to the significantly increased NO₂ concentrations in the air, primarily on the nitrogen oxide emissions of vehicles with compression-ignition engines. Figure 1 thus shows the NO_x emissions emitted by the vehicle with a compression motor in the different temperature ranges in all test runs performed.

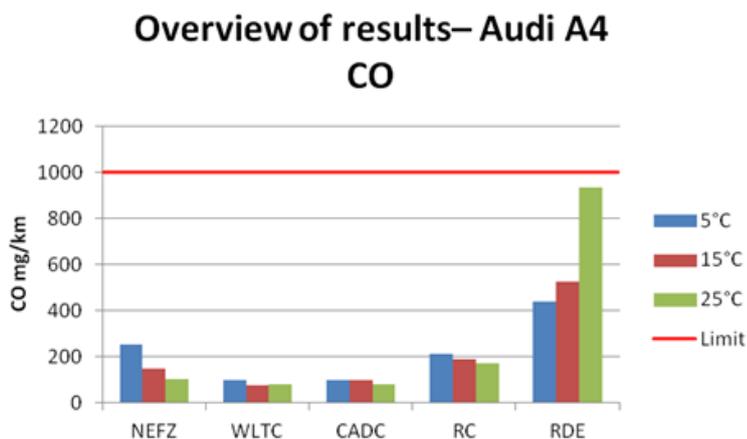
Figure 1: Overview of Results – VW Passat - NO_x



The limit for NO_x emissions to be complied with for homologation testing per the EURO-6 exhaust gas standard in the NEDC is 80 mg/km. As shown in Figure 1, the limit was maintained only under the boundary conditions definitive for homologation testing (NEDC driving cycle, starting temperature 25°C). Variations in the starting temperatures with an unchanged driving cycle are indicated by a significant increase in emissions. When changing the performance called for or higher dynamics in the driving cycles WLTC, CADC and RC, markedly increased pollutant concentrations also appear at guideline-compliant starting temperatures (25°C). The measurements in real road traffic result in a massive increase in nitrogen oxide emissions of over 600mg/km compared to the valid limit. In order to classify the measurements in real road traffic, it should be noted that these are pure measurement data, without subsequent evaluation. There are currently two methods of data validation under discussion: Standardized Power Frequency Distribution (SPF) and Moving Average Windows (MAW) that are designed to weigh the pollutant emissions depending on the performance requested. For this purpose, the emitted CO₂ mass is taken into account. At the same time, the directive sets basic parameters for the measurement run, which determine the environmental conditions, the route criteria and the dynamics to be used during a measurement. In the near future, when the real emission measurements become part of homologation testing, the boundary conditions thus defined will redefine the normal range of use of a vehicle and significantly increase the requirements for exhaust after-treatment.

The following figure 2 shows the emission behaviour of a vehicle with an externally-supplied ignition engine.

Figure 2: Overview of Results – Audi A4 – CO



Due to the combustion process, the mixture formation and the fuel used, conventional external ignition engines are not affected by the nitrogen oxide problem. At the same time, gaseous pollutants such as carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxides are very effectively reduced by the use of a 3-way catalytic converter and play a subordinate role after reaching the working temperature of the exhaust after-treatment system. As shown in Figure 2, the tested vehicle meets the required limit under all conditions for carbon monoxide, shown here as an example pollutant component. The focus of determining real emissions of vehicles with an external ignition engine therefore lies in determining the particle count, since direct-injection external ignition engines here show increased emissions. The measurement technology for determining the particle count is currently under development and was not available for the present research project.

Summary

Presentation and Evaluation of the Development Process

At the end of 2014, the first draft of the RDE regulation was presented by the European work group RDE-LDV. This includes, among other things, the route criteria, the analytical technique to be used and the extent of the vehicles to be surveyed in the course of homologation testing. The SPF and MAW methods are described for the evaluation of the measured data.

Upon ratification of the directive, the European legislature intends to provide a validation phase in which the measurements to be conducted must be evaluated by both methods. The results of both methods and the real measurement (as a track-related integral over the entire journey) are to be made available to the work group and thus serve to develop the methods and the error or potential analysis at the end of the evaluation phase (CF as a damper to metrological and statistical uncertainties). The aim is to further develop, possibly also re-evaluate, the RDE methods in the face of new information. These are determined by factors depending on the limits of the Type I test.

The measurements conducted in connection with this research project using PEMS have shown that, due to the clearly defined environmental conditions that are not present in RDE measurements compared to the roller test stand measurements, there are significant influencing factors on the emission behaviour of the test vehicle. The driver's influence increases or decreases the amount of pollutants, depending on such factors as topographical changes in the route profile, anticipatory driving, acceleration and braking behaviour, speed and shifting characteristics, as well as the restless operation of the accelerator pedal.

In order to minimize the influence of the route on the result, several points have been defined in the requirements of Draft 2015 - G4533297, outside which the test run may not be evaluated:

- 1/3 mix (distance): inner city $34 \pm \frac{10}{5}$ %, as well as highway and autobahn each 33 ± 10 %
- Min. 16 km per section
- Trip duration: 90-120 min
- Inner city: 0-60km/h; highway: 60-90km/h; autobahn 90-160 km/h
- Autobahn up to 145 km/h; 3% of autobahn up to 160 km/h allowable
- Average inner city speed: 15-30 km/h
- Idle time: <1 km/h at min. 10% of inner city time; multiple stops of min. 10 s; one long stop of >80% of total idle time is forbidden
- Average autobahn speed 90-110 km/h
- Min. 10 min \geq 110km/h

The data situation is currently not comprehensive enough to make a statement about the repeatability of measurements on different distances. Since the measurements take place in real traffic, no driving profile is the same. The sequence, topography, traffic volume and division of the driving sections influence the emission behaviour and should therefore be defined in the RDE process.

Despite many influencing factors during the measurement and their influence on the results, the introduction of RDE is meaningful. It is precisely these unpredictable factors that can lead to the vehicles' delivery of good emission values under all conditions in the future.

Outlook

The draft by the RDE-LDV work group amending the existing EC Regulation (No.) 715/2007 describes all the boundary conditions and evaluation criteria for carrying out measurements in real traffic.

The requirements for the exhaust gas after-treatment systems for passenger cars and light commercial vehicles are significantly increased by the inclusion of the real emission determination into the approval process and the associated expansion of the boundary conditions. In addition, any defects in the test vehicle or the measuring system can be clearly identified only in extreme cases due to the non-reproducibility of the measurements. Adjusting the mobile measuring system to the stationary device on the roll test stand is therefore indispensable. Errors in the measuring device for determining the mass flow, for example, have a multiplicative effect on the measurements and can lead to significantly different results from the reality if validation is not performed.

In the draft directive, the definition parameters for the route and implementation criteria for a valid test run are already defined. Boundary conditions such as ambient temperature and altitude, as well as test parameters such as length, maximum and minimum speed, proportion of the respective sections of city and highway driving, and the autobahn portion were defined. Also defined were a precise system description of the measurement setup to be used for emission analysis, the installation of the vehicle body, and the necessary checks to obtain reliable measurements. The two methods of measurement analysis (MAW & SPF) presented in the course of this research project are described in the draft.

On February 3, 2016, the European Parliament approved the introduction of the RDE-LDV work group on the regulation of real emissions. In this way, it complies with the requirement for regulation already laid down in Regulation EC (No.) 692/2008. The introduction will therefore take place in three phases:

With the ratification of the directive, the measurement of real emissions for new vehicle types will become mandatory in the course of the homologation test. In this "monitoring phase", the values determined are not subjected to a limit check, and the data transmitted are used to develop the evaluation programs. Starting September 1, 2017, a "Conformity Factor" (CF) of 2.1 applies. As of January 1, 2020, the CF will be 1.5, which is a factor of 1.0 for the limit consideration and 0.5 for measurement uncertainty combined.

1 Darstellung des Projekts

1.1 Kurzbeschreibung des Forschungsvorhabens

Im Januar 2011 wurde durch die europäische Kommission eine Arbeitsgruppe etabliert, welche zum Ziel hat die Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Realemissionen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen während des Typprüfprozesses zu bestimmen. Hintergrund hierfür ist die hohe NO₂-Luftbelastung, welche derzeit europaweit an Messstationen ermittelt wird. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird der Prozess, an dessen Ende eine Änderung, der für die Emissionsbewertung von Fahrzeugen maßgeblichen Verordnung EG (Nr.) 715/2007, stehen wird, durch den Auftragnehmer auf europäischer Ebene fachlich begleitet. Durch verschiedene Messungen an Fahrzeugen auf dem Rollenprüfstand, Ermittlung von Straßenlastkoeffizienten sowie Messungen im realen Straßenverkehr werden grundsätzliche Fragen zu Last und Temperatureinflüssen auf den Emissionsausstoß von Fahrzeugen untersucht.

Mit Blick auf das Ziel der europäischen Kommission, ein robustes Verfahren zur Ermittlung des Schadstoffausstoßes im realen Verkehr einzuführen, werden zwei Fahrzeuge vermessen, um die in Diskussion befindliche Messprozedur (RDE „real driving emissions“ mittels PEMS „Portable Emission Measurement System“) sowohl auf Ihre Praxistauglichkeit, als auch Genauigkeit zu überprüfen.

Zur Untersuchung des Abgasverhaltens wurden diverse Messungen sowohl auf dem Rollenprüfstand als auch im realen Verkehr mittels PEMS durchgeführt. Die erste Variable stellte dabei die Start- und Umgebungstemperatur dar. Die Fahrzeuge werden für beide Testmethoden, auf dem Klimaprüfstand für eine Abstellzeit von 12 Stunden, auf 5°C, 15°C und 25°C, konditioniert. Im Anschluss wird der Testlauf gestartet. Dabei wird der Rollenprüfstandslauf bei konstanter Umgebungstemperatur durchgeführt. Bei den Vermessungen im realen Verkehr wird bestmöglich auf gleichbleibende Umgebungstemperaturen nahe der vorgesehenen Prüftemperatur geachtet. Als zweite „Variable“ werden unterschiedliche Testzyklen gewählt um den Einfluss auftretender Lasten und variierender Dynamiken zu untersuchen. Es wird der für die Typprüfung relevante NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus), der für die Typprüfung ab 2017 vorgesehene WLTC (Worldwide harmonized Light duty vehicles Test Cycle), der wesentlich dynamischere CADC (Common Artemis Driving Cycle) mit einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h sowie das sogenannte Random Cycle-Verfahren ausgewählt. Die PEMS-Messungen werden im Laufe des Tages insgesamt dreifach durchgeführt, wobei die beiden Wiederholungsmessungen keinen Kaltstart beinhalten können (Fahrzeug wird mit betriebswarmem Motor gestartet) Die Messungen der Abgasemissionen werden, abgesehen von den PEMS-Messungen, auf den Prüfständen des TÜV NORD in Essen durchgeführt. Das Abgaslabor TÜV NORD ist nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert. Die moderne Messtechnik ermöglicht neben Prüfungen entsprechend der aktuellen Abgasgesetzgebung auch die Untersuchung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben und die Messung von nicht limitierten Schadstoffen.

1.2 Fahrzeugauswahl

Für das Projekt werden zwei Prüffahrzeuge ausgewählt. Hierbei wird auf das Brennverfahren (Selbst- und Fremdzündung), sowie die zum Zeitpunkt der Prüfung neueste Abgasnachbehandlungseinrichtung geachtet.

- ➔ Testfahrzeug 1: Volkswagen Passat Variant 2.0TDI (Modell 3C/ max. Leistung 105kW) EU6 mit SCR (selective catalytic reduction), DSG (Direktschaltgetriebe)– Laufleistung: 60.000 km
Das Fahrzeug ist ein Diesel-Fahrzeug mit Common Rail Einspritzung. Die Abgasnachbehandlung besteht aus Abgasrückführung, Oxidationskatalysator, Dieselpartikelfilter und aktiver SCR Einheit zur Stickoxidreduktion.
- ➔ Testfahrzeug 2: Audi A4 Avant (Modell B8/ max. Leistung 125kW) EU5 (EU6 Konzept, Formalrechtlich zum Zeitpunkt der Zulassung nicht EU6 zulassungsfähig) Der Motor nutzt kombinierte Benzin Direkt- und Saugrohreinspritzung und nutzt dieses Lastabhängig. Laufleistung: 6000 km

Die Fahrzeuge werden je einem Eingangstest (NEFZ nach EG (Nr.) 715/2007) unterzogen, um die Eignung als repräsentatives Fahrzeug und den technisch einwandfreien Zustand zu dokumentieren.

1.2.1 Ergebnisse der Eingangsmessungen

Beide Fahrzeuge bestätigen die im Zuge der Typprüfung ermittelten Ergebnisse in Abgas und Verbrauch. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Tabelle 1 den Grenzwerten der EU6 Gesetzgebung gegenübergestellt. Beide Fahrzeuge halten die jeweiligen EU6 Grenzwerte ein. Ein technisch einwandfreier Zustand und die Eignung für alle weiteren Tests gelten damit als nachgewiesen.

Tabelle 1: Ergebnisse der Eingangsprüfung

Audi A4 EU6 Konzept (Benzin)			
		Eingangsprüfung	Grenzwert EU6
CH4	in mg/km	3,31	--
HC	in mg/km	24,24	100
NMHC (EU5)	in mg/km	18,07	68
NOX	in mg/km	24,08	60
HC+NOX	in mg/km	43,79	--
CO	in mg/km	93,23	1000
CO2	in g/km	146,88	--
Partikel	in mg/km	0,33	5
Partikelanzahl	in 1/km	2,94E+11	6,00E+11 ¹
Passat EU6 SCR (Diesel)			
		Eingangsprüfung	Grenzwert EU6
CH4	in mg/km	7,62	--
HC	in mg/km	15,25	--
NMHC (EU5)	in mg/km	8,61	--
NOX	in mg/km	67,62	80
HC+NOX	in mg/km	82,87	170
CO	in mg/km	131,69	500
CO2	in g/km	173,25	--
Partikel	in mg/km	0,01	4,5
Partikelanzahl	in 1/km	1,14E+09	6,00E+11

Für die Prüfungen wird handelsüblicher Tankstellenkraftstoff verwendet. Eine Probe jedes Kraftstoffs wird zur Analyse gegeben um eventuelle Abweichungen zum Zertifizierungskraftstoff bei der Berechnung berücksichtigen zu können. Die Analyse des Kraftstoffes wird zum Abschluss des Projektes wiederholt, es konnten keine Abweichungen festgestellt werden. /1/

¹ Auf Antrag des Herstellers kann bis 2017/2018 ein höher Grenzwert von 6,00E+12 zur Anwendung kommen.

1.3 Messplan

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht aller durchgeführten Messungen.

Tabelle 2: Darstellung der durchgeführten Messungen

	Anzahl		Anzahl
Eingangsmessung unter Typprüfbedingungen*	1		
Vermessungen auf dem Rollenprüfstand		Vermessung im Realen Straßenverkehr	
bei 5°C		bei 5°C	1**
Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	2	bei 15°C	1**
Worldwide Harmonized Driving Cycle (WLTC)	2	bei 25°C	1**
Common Artemis Driving Cycle (CADC)	2		
Random Cycle	2	Bestimmung der veränderten Lastbedingungen auf dem Prüfgelände	1
Vermessungen auf dem Rollenprüfstand			
bei 15°C		* nach Herstellerangabe	
Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	2	** eine Messung mit Kaltstart und drei Wiederholungen	
Worldwide Harmonized Driving Cycle (WLTC)	2		
Common Artemis Driving Cycle (CADC)	2		
Random Cycle	2		
Vermessungen auf dem Rollenprüfstand			
bei 25°C			
Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	2		
Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycle (WLTC)	2		
Common Artemis Driving Cycle (CADC)	2		
Random Cycle	2		

1.3.1 Verwendete Zyklen für die Rollenprüfstandsmessungen

1.3.1.1 Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycle (WLTC)

Die Basis für den WLTP stellt der dazugehörige Fahrzyklus WLTC dar. Der WLTC besteht insgesamt aus 4 Abschnitten: Low, Medium, High und Extra High. Je nach Fahrzeugkategorie (vehicle class / Ausgewählt nach „Power-to-Mass Ratio“) werden die entsprechend vorgeschriebenen Teilzyklen ausgewählt. Bei leistungsschwächeren Fahrzeugen (Stichwort: Power-to-Mass Ratio) wird auf den Extra High – Abschnitt verzichtet. Insgesamt wird in 1800 Sekunden eine Strecke von ca. 23,3 km (vehicle class 3b) zurückgelegt.

Die Abbildung 1 bis Abbildung 4 zeigen das Geschwindigkeits-Zeit-Profil der WLTC-Teilzyklen passend zu in diesem Forschungsvorhaben getesteten Fahrzeugen. /3/

Abbildung 1: Teilzyklus Low₃ – WLTC /3/

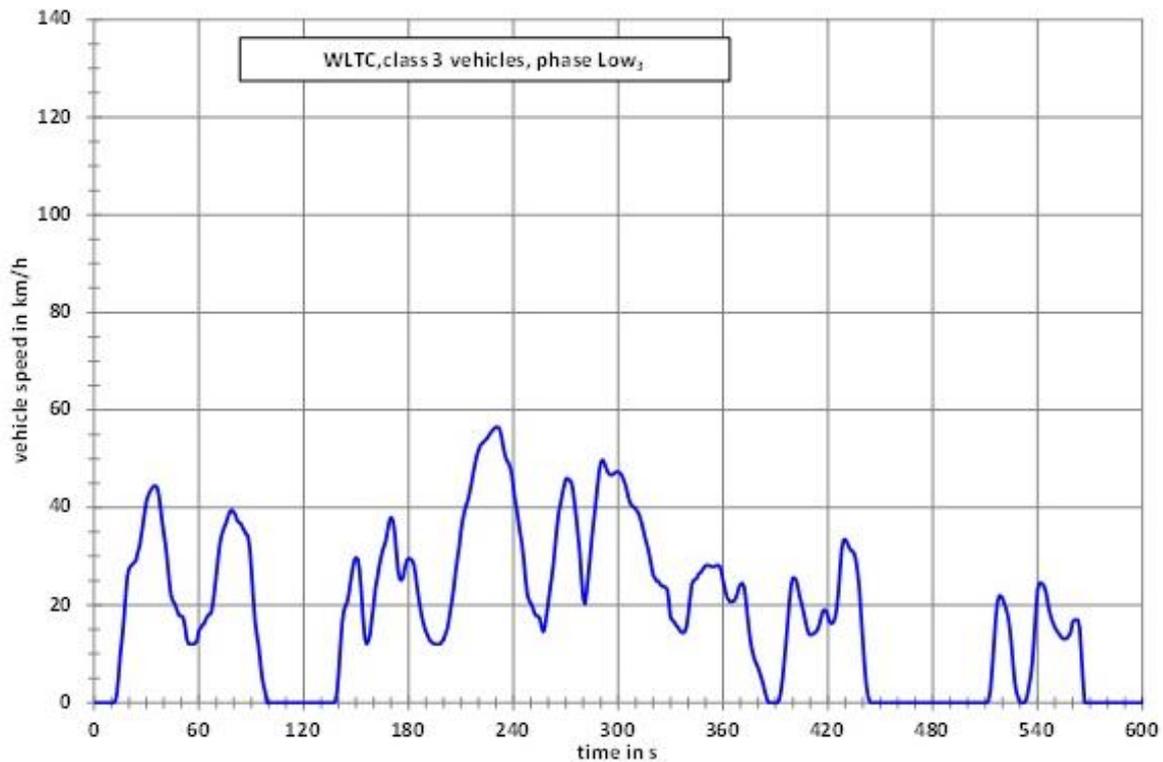


Abbildung 2: Teilzyklus Medium₃₋₂ – WLTC /3/

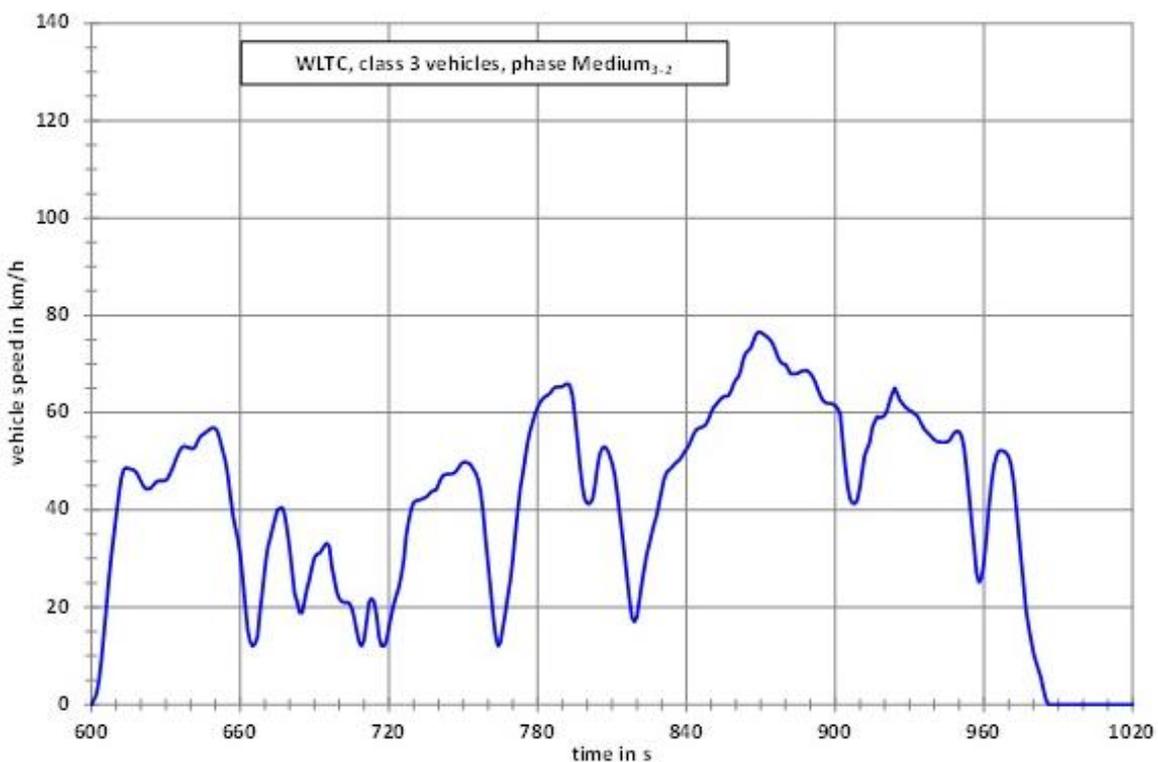


Abbildung 3: Teilzyklus High₃₋₂ – WLTC /3/

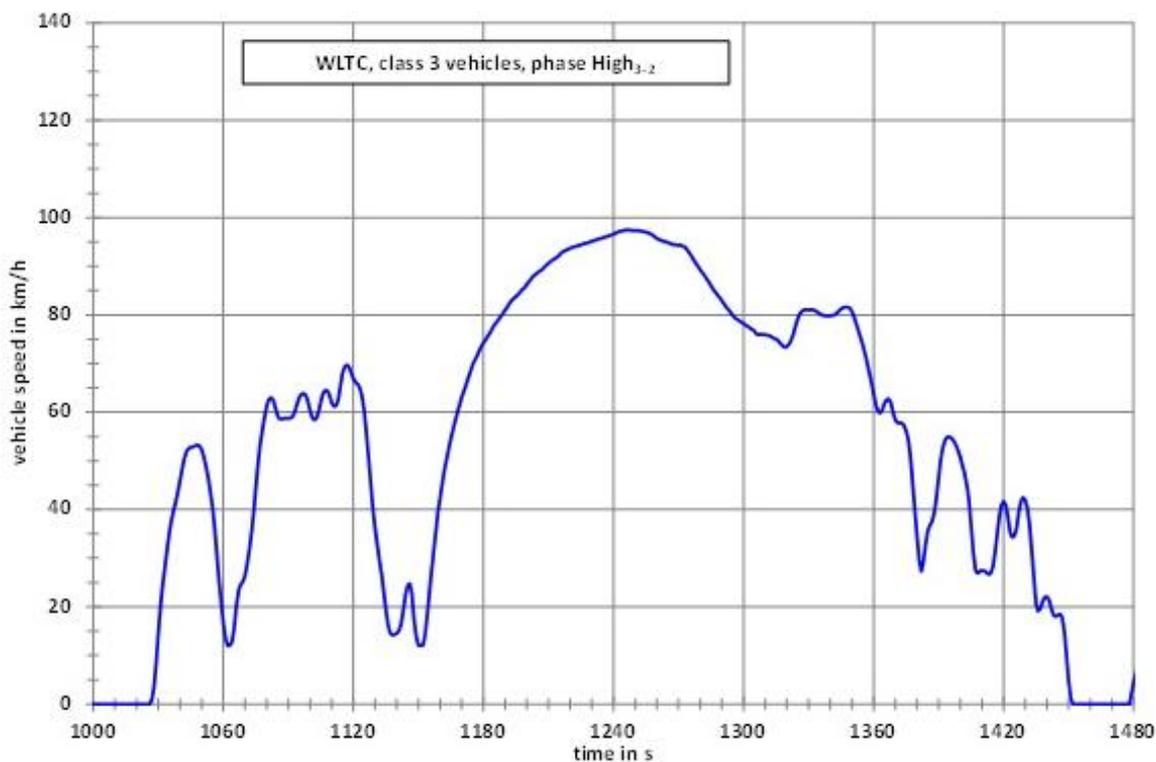
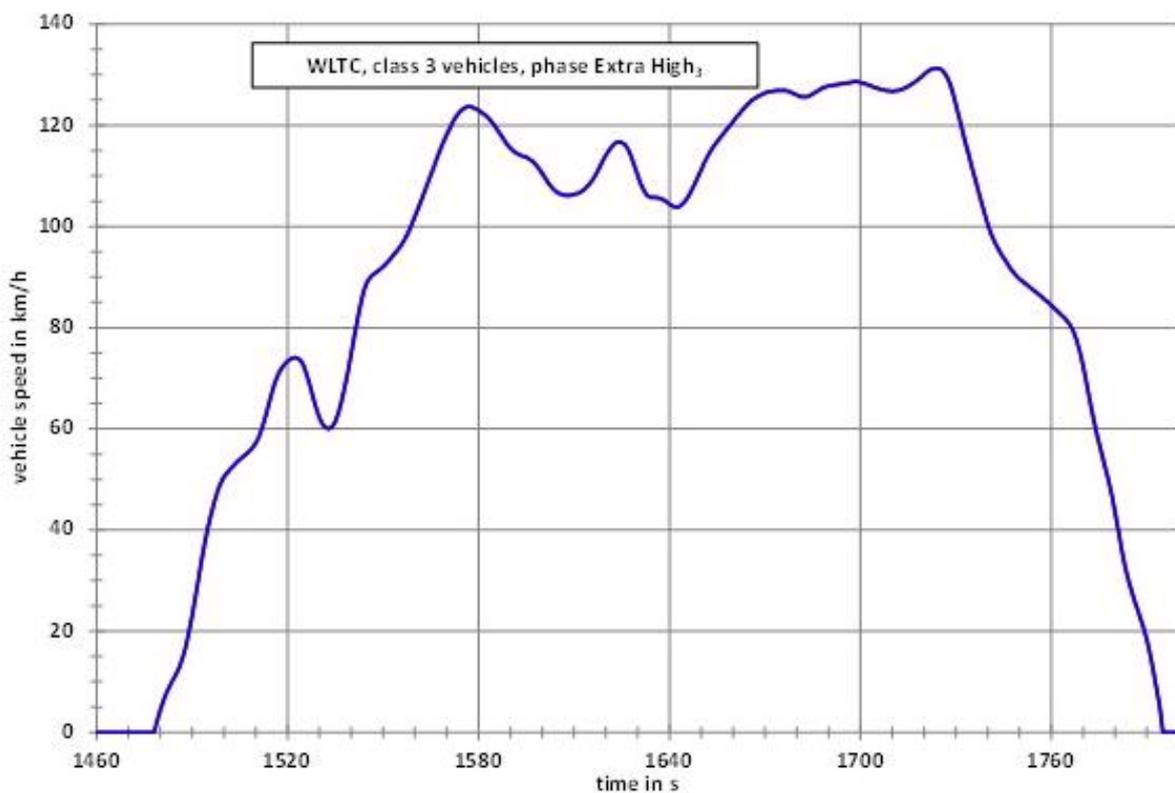


Abbildung 4: Teilzyklus Extra High₃ – WLTC /3/



1.3.1.2 Random-Cycle

Abbildung 6 zeigt die jeweilig generierten Random Cycle für das Fahrzeug Volkswagen Passat bzw. Audi A4. Der Zyklus wird in Abhängigkeit der Fahrzeugparameter (Gewicht, Motorleistung, Getriebeübersetzung, Fahrwiderstandskurve) aus 30.000 Einzelteilen ausgewählt und

zusammen-gesetzt. Abbildung 5 zeigt den hierzu genutzten RDE-Generator der Firma Bertrandt. Das Verfahren erstellt für jedes Fahrzeug einen individuellen Zyklus. Mit Rücksicht auf die Vergleichbarkeit wurde der Zyklus für die unterschiedlichen Temperaturbereiche beibehalten.

Abbildung 5: Random-Cycle Generator

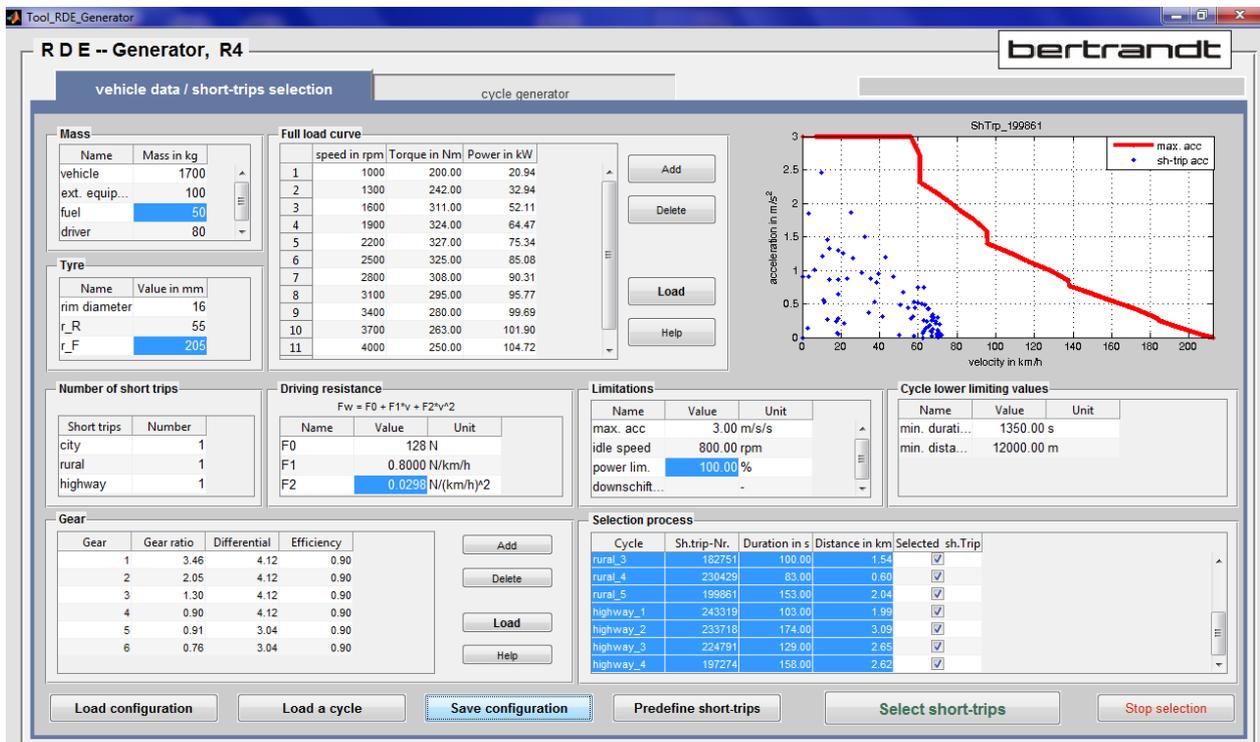
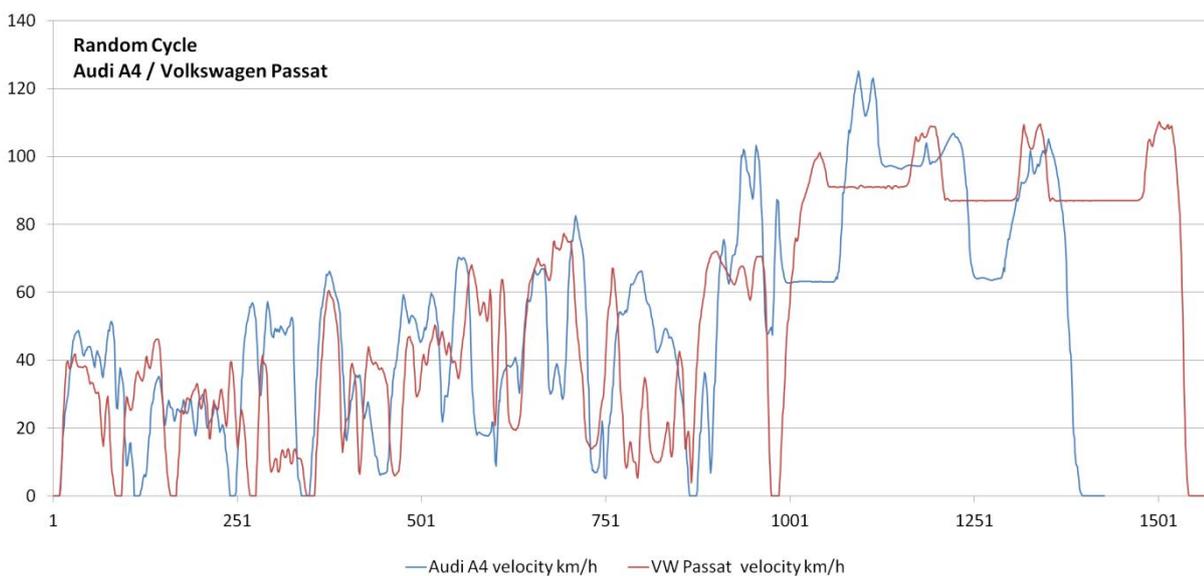


Abbildung 6: Random-Cycle



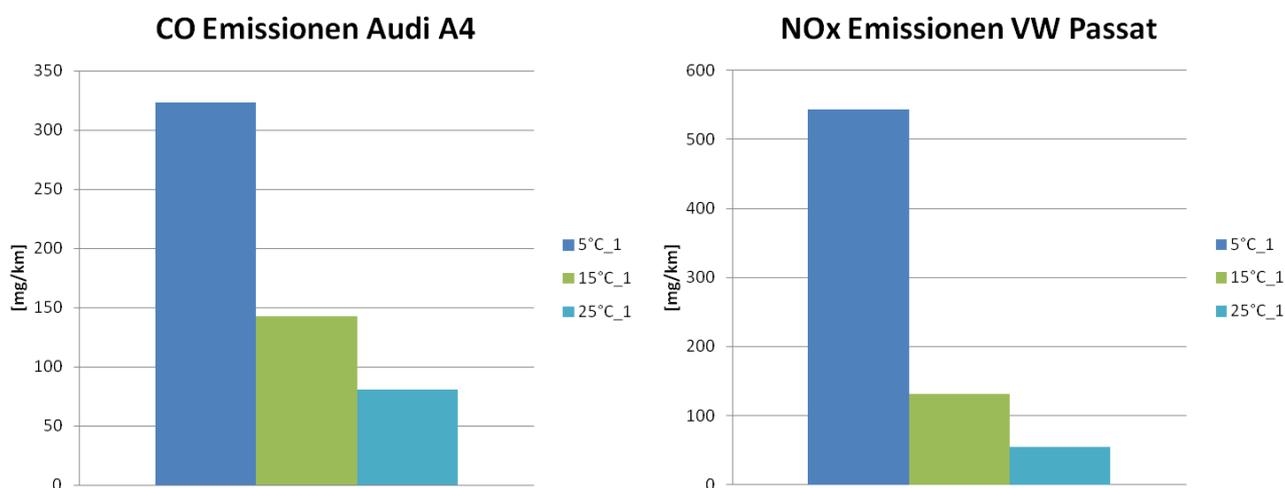
2 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt. Die Berechnung der Ergebnisse für die Rollenprüfstandsmessungen wird dabei nach Grundlage der für die Typprüfung vorgeschriebenen Berechnungsformeln nach ECE 83 Anhang 4a durchgeführt. Bei der Ergebnisbetrachtung werden die für den RDE Prozess maßgeblichen Emissionskomponenten für das jeweilige Brennverfahren fokussiert. Für das Prüffahrzeug mit Kompressionszündungsmotor liegt der Schwerpunkt auf den Stickoxidemissionen, für das Prüffahrzeug mit Fremdzündungsmotor auf den Kohlenmonoxidemissionen. Für beide Konzepte werden weiterhin die Kohlendioxidemissionen betrachtet. Eine tabellarische Übersicht sämtlicher Messergebnisse findet sich in Anhang 1. Betrachtet wird der Einfluss verschiedener Umgebungstemperaturen auf die Emissionen entsprechender Abgaskomponenten. Der Einfluss der Konditionierungs- und Starttemperatur ist signifikant und geht aus Abbildung 7 hervor.

2.1 Messungen auf dem Rollenprüfstand

Abbildung 7 veranschaulicht die Messergebnisse des Audi A4 bzw. VW Passat im NEFZ.

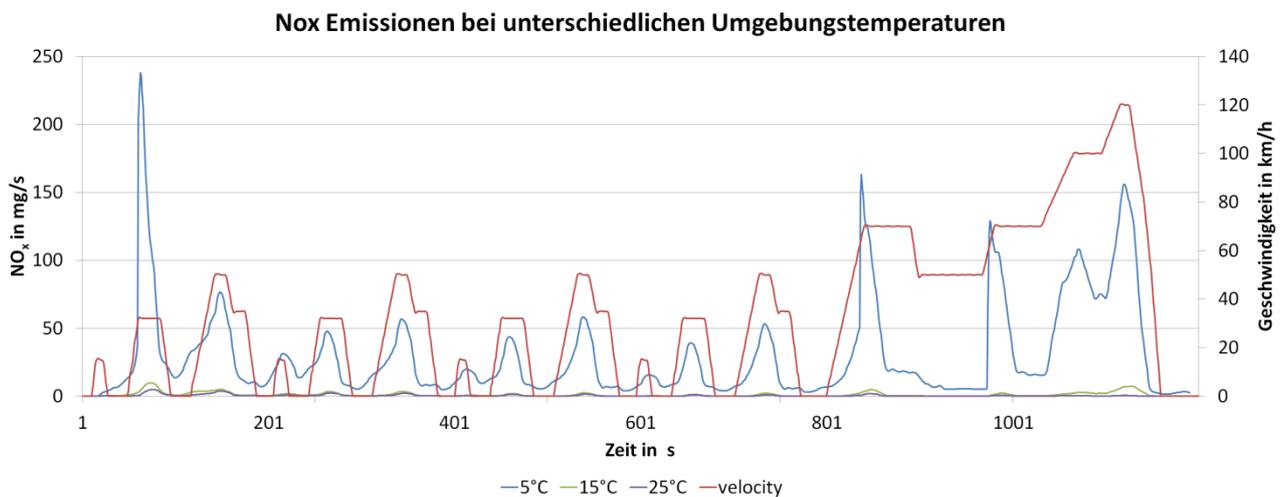
Abbildung 7: CO- bzw. NO_x-Emissionen bei drei Temperaturen



Die Darstellung verdeutlicht, dass die Emissionen während des zur Typprüfung genutzten NEFZ-Fahrzyklus mit abnehmender Temperatur und damit abweichenden Bedingungen gegenüber der Typprüfung sehr deutlich zunehmen. Der Prüfung ging eine einheitliche Konditionierungsphase von 12 Stunden bei entsprechender Testtemperatur voraus. Die ermittelten Modaldaten (siehe Abbildung 8) bestätigen die Vermutung, dass die Starttemperatur des Fahrzeugs (entspricht der Öltemperatur) den größten Einfluss auf das Emissionsverhalten hat. Die im Prüfraum vorherrschende Temperatur beeinflusst die Ergebnisse im Vergleich zum Kaltstart-Peak hingegen nicht signifikant.

2.1.1 Kompressionszündungsmotor (VW Passat)

Abbildung 8: Modalverlauf der NO_x-Emissionen



Mit Blick auf den dargestellten sekundlichen Verlauf der Emissionen bei dem Fahrzeug mit Kompressionszündungsmotor (VW Passat TDI) wird deutlich, dass sowohl bei der Messung mit 5°C Starttemperatur als auch bei der Messung bei 15°C die auftretenden Emissionen nicht vollständig durch die vorgesehenen Abgasnachbehandlungssysteme zur Stickoxidreduktion erfasst werden. Deutlich wird dies im Außerortsteil (ab Sekunde 900 im Zyklus). Ein Blick in die Verordnung EG (Nr.) 715/2007 zeigt, dass durch den Gesetzgeber die Arbeitsbereitschaft des Systems zur selektiven katalytischen Reduktion von Stickoxiden (SCR) auch bei niedrigen Temperaturen sichergestellt werden muss. Hierzu sind zwei Prüfungen im Zuge der Zulassung vorgeschrieben. Es wird abgeprüft ob im NEFZ bei einer Starttemperatur von -7°C die Light-off-Temperatur des SCR Katalysators, welche bei den meisten Systemen bei 120°C liegt, nach spätestens 400 Sekunden erreicht wird. Außerdem soll sichergestellt werden, dass das Reagenz nicht einfriert, bzw. falls es eingefroren ist nach 1200s Dosierbereitschaft besteht. Beide Tests stellen sicher, dass das System auch bei niedrigen Umgebungstemperaturen arbeitsbereit ist. Da die Emissionen bei beiden Versuchen nicht reglementiert sind und nicht gemessen werden, wird jedoch nicht überprüft, ob die Systeme arbeiten.

Dem dargestellten Emissionsverhalten liegen erfahrungsgemäß zwei Ursachen zu Grunde: Zum Einen scheint die Dosierrate des SCR-Systems nicht hoch genug zu sein um die auftretenden Emissionen vollständig umzuwandeln. Zum Anderen scheinen die Rohemissionen des Fahrzeugs bei den vorliegenden Umgebungsbedingungen so hoch zu sein, dass das SCR-System nicht in der Lage ist sie auszugleichen. Die Ursache der erhöhten Rohemissionen, mit Blick auf die im Fokus stehende Abgaskomponente der Stickoxide, lässt auf eine eingeschränkte Funktion des Systems zur Abgasrückführung schließen. Die gezielte Rückführung von Abgasen in den Brennraum sorgt für eine Verringerung der Abgastemperatur und somit zur Verminderung von Stickoxidemissionen.

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Rollenprüfstandsmessungen im NEFZ, WLTC und CADC für die relevanten Emissionskomponenten dargestellt. In Abbildung 9 bis Abbildung 11 sind die Ergebnisse für das Prüffahrzeug mit Kompressionszündungsmotor (VW Passat TDI) und in Abbildung 12 bis Abbildung 14 für das Fahrzeug mit Fremdzündungsmotor (Audi A4 TFSI) aufgeführt. /2/,/5/

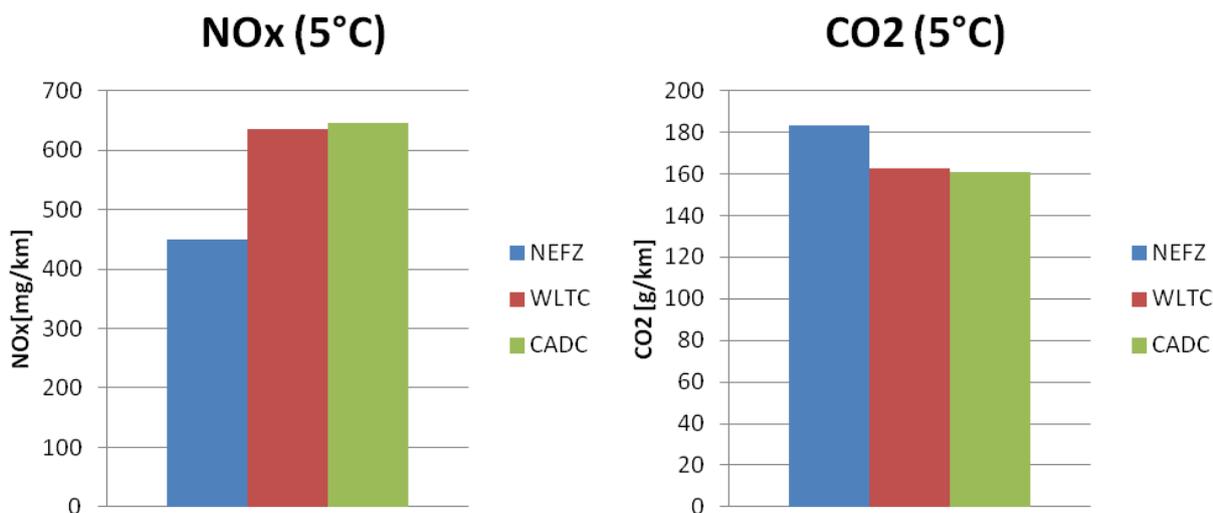
Abbildung 9: NO_x und CO₂-Emissionen bei 5°C (Kompressionszündungsmotor)

Abbildung 9 zeigt die Emissionen von Stickoxiden und CO₂ bei 5°C des Prüffahrzeugs mit Kompressionszündungsmotor (VW Passat) für die Zyklen NEFZ, WLTC und CADC. Der Vergleich zeigt, dass erhöhte Stickoxidemissionen auch in den dynamischeren Zyklen WLTC, welcher ab 2017 für die Zulassung von Neufahrzeugen relevant wird, als auch im CADC, welcher derzeit zur Bestimmung der Emissionsfaktoren genutzt wird, auftreten. Die Euro 6 Einstufung ist bei 80mg/km limitiert. Somit sind die NO_x-Emissionen bei 5°C im NEFZ auf ca. das 5,5-Fache, im WLTC und CADC auf ca. das 8-Fache im Vergleich zum Grenzwert erhöht. Der Blick auf die folgenden Abbildungen (Abbildung 10 und Abbildung 11), welche sich lediglich in der Starttemperatur unterscheiden, zeigt, dass dort, wo im NEFZ die Emissionen bei steigender Prüfraumtemperatur sinken und schließlich bei 25°C den gültigen Grenzwert unterschreiten, wesentliche Reduktionen der Stickoxide weder im WLTC, noch im CADC zu erkennen sind. Ein Grund dafür, dass die NO_x-Emissionen im NEFZ mit steigender Prüftemperatur sinken, ist der, dass alle Abgasnachbehandlungssysteme schneller ihre Betriebstemperatur erreichen. Ein weiterer Grund ist die eingeschränkte Funktion der AGR bei niedrigen Temperaturen um die Verbrennungstemperatur zu steigern, damit der Motor bei optimaler Temperatur betrieben wird. Dass dies gelingt ist an den fast identischen CO₂-Emissionen bei allen Temperaturen zu erkennen. Die im Vergleich zum NEFZ höheren NO_x-Emissionen im WLTC und CADC sind auf die gesteigerte Dynamik zurückzuführen, die einen Motorbetrieb in Kennfeldbereichen mit erhöhtem NO_x-Ausstoß zur Folge hat. Der Grund für die höheren NO_x-Emissionen im WLTC bei 5°C, als bei 15°C und 25°C, ist zum Einen wieder in der eingeschränkten Funktion der AGR und zum Anderen in der Dauer, die die Abgasnachbehandlungssysteme benötigen um Betriebstemperatur zu erreichen, zu sehen. Dass die NO_x-Emissionswerte im CADC bei Temperaturanstieg nicht sinken liegt vor allem an der Distanz, die im CADC zurück gelegt wird groß ist. Durch die große Distanz ist der Einfluss erhöhter Emissionen bei einem Kaltstart auf das Gesamtergebnis gering. Die spezifische emittierte NO_x-Masse steigt wegen der höheren Umgebungstemperatur und damit verbundenen höheren Abgastemperaturwerten sogar an.

Abbildung 10: NO_x und CO₂-Emissionen bei 15°C (Kompressionszündungsmotor)

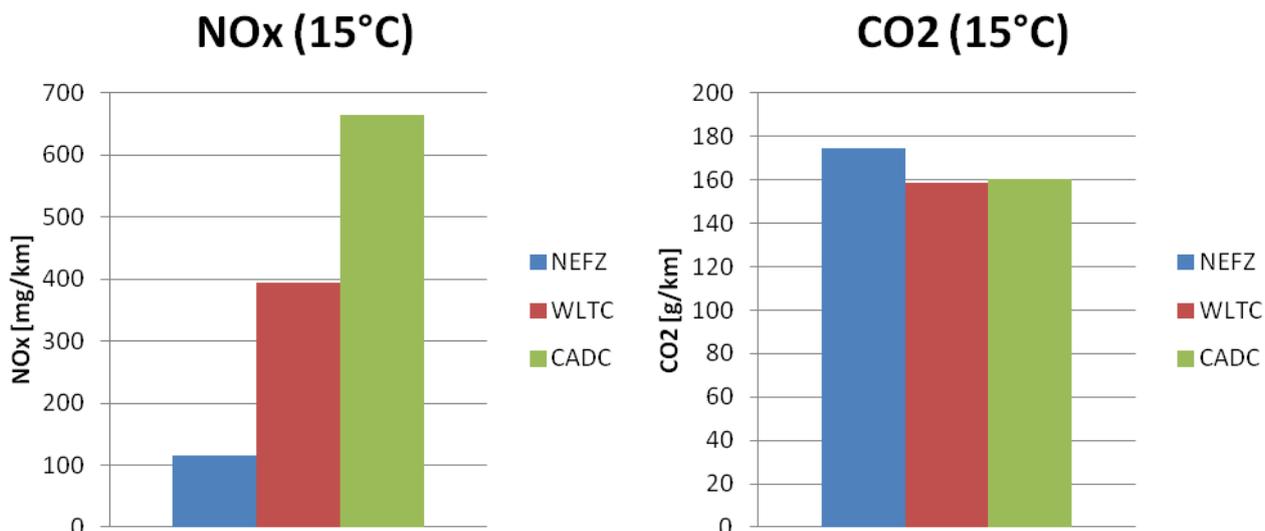
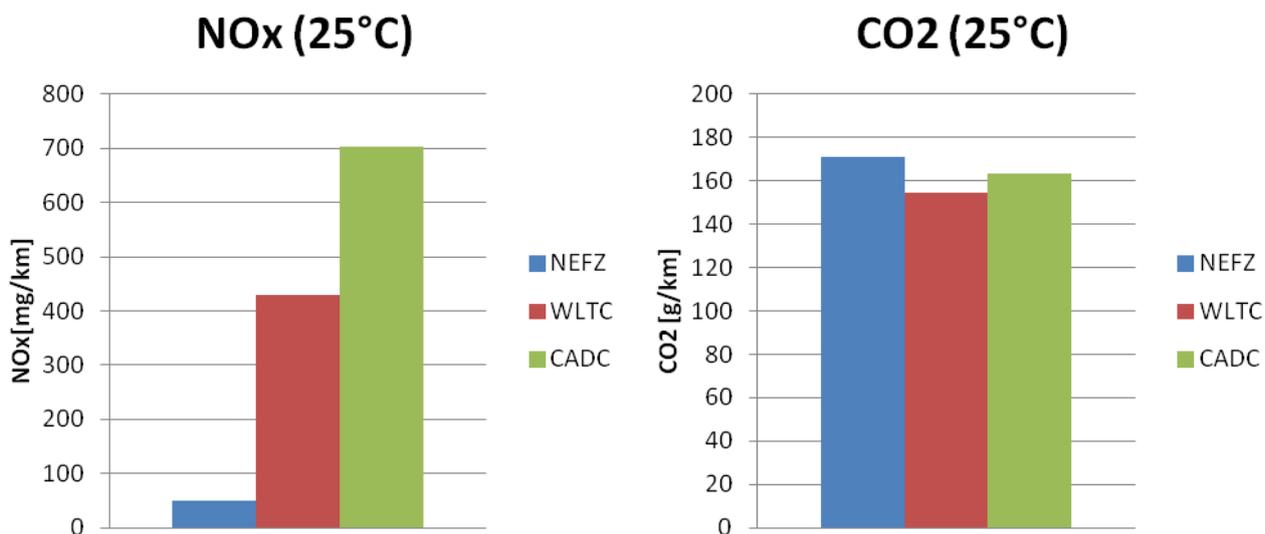


Abbildung 11: NO_x und CO₂-Emissionen bei 25°C (Kompressionszündungsmotor)



Die Darstellung verdeutlicht die Abhängigkeit des Emissionsverhaltens von der Umgebungstemperatur, Last und Fahrdynamik. Der Vergleich mit den Fahrzyklen WLTC und CADC zeigt den Einfluss des derzeit zur Typprüfung genutzten NEFZ, welcher nur geringe Lasten und eine sehr niedrige Dynamik fordert.

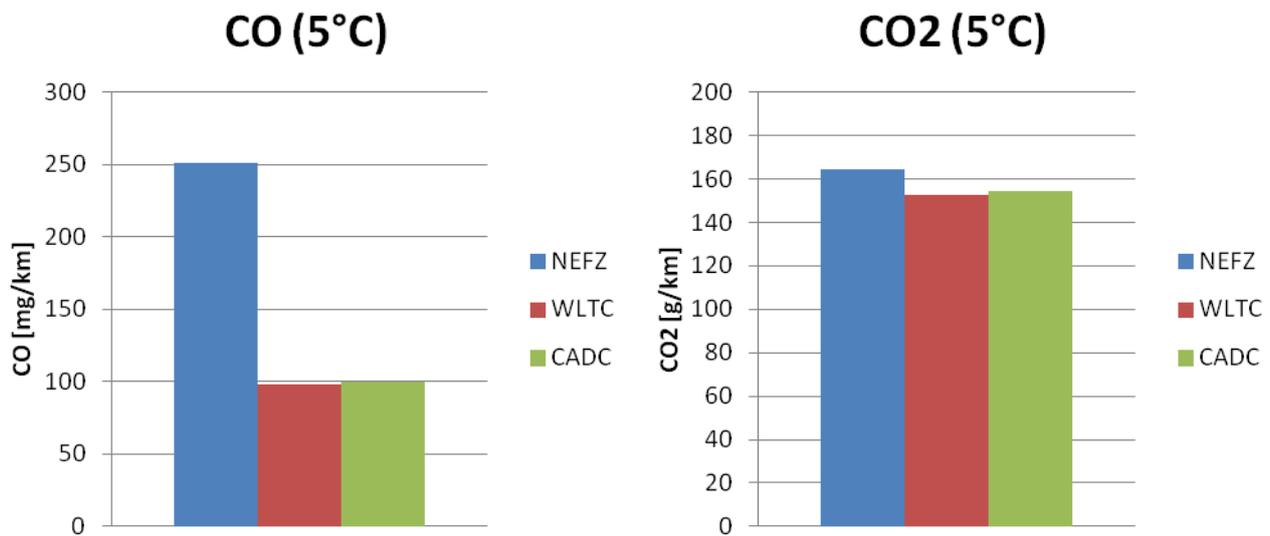
Ein Blick auf die CO₂-Emissionen zeigt, dass der CO₂-Ausstoß nicht mit Zunahme an Dynamik und Last steigt. Der CO₂-Ausstoß des Fahrzeugs liegt im WLTC und CADC unterhalb der im NEFZ ermittelten Werte. Der Grund liegt zum einen in der Nutzung der NEFZ-Ausrollkoeffizienten für WLTC und CADC. Durch die hohe Dynamik der Zyklen arbeitet der Motor häufiger in effizienteren Lastbereichen und kann so größere Streckenanteile in verbrauchsgünstigeren Betriebszuständen zurücklegen, was in der Gesamtbetrachtung zu einem geringeren CO₂-Ausstoß führt. Die Verwendung der Ausrollkoeffizienten

und Schwungmasse nach WLTP führt einer ICCT-Studie² zur Folge zu einem Anstieg der CO₂-Emissionen im WLTC gegenüber dem NEFZ.

2.1.2 Fremdzündungsmotor (Audi A4)

Abbildungen 12 bis 14 geben einen Überblick über die ermittelten CO und CO₂ Emissionen des Prüffahrzeugs mit Fremdzündungsmotor.

Abbildung 12: CO und CO₂-Emissionen bei 5°C (Fremdzündungsmotor)



Die Auswertung der Messergebnisse zeigt deutlich die Temperaturabhängigkeit des Abgasnachbehandlungssystems. Durch die erhöhte Dynamik in WLTC und CADC erreicht der Katalysator schnell seine zur Katalyse benötigte Temperatur und konvertiert unter anderem die CO Emissionen durch Oxidation zu CO₂. Dieses Verhalten lässt sich auch auf die Emissionen von Kohlenwasserstoffen übertragen, die hier nicht gezeigt sind (diese werden zu CO₂ und H₂O oxidiert).

² <http://www.theicct.org/wltp-how-new-test-procedure-cars-will-affect-fuel-consumption-values-eu>

Abbildung 13: CO und CO₂-Emissionen bei 15°C (Fremdzündungsmotor)

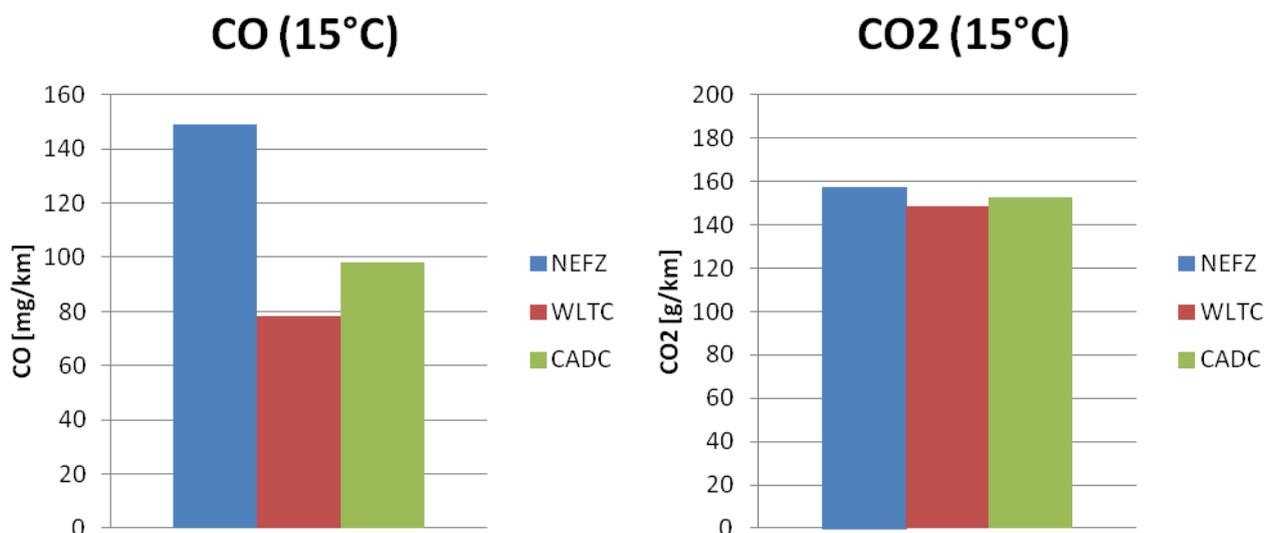
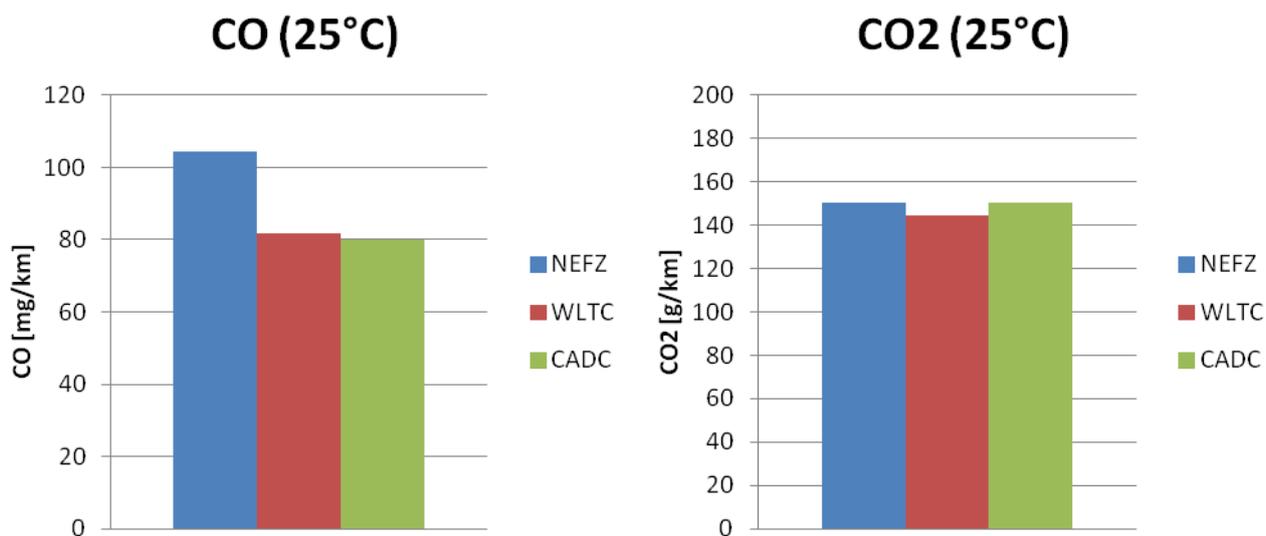


Abbildung 14: CO und CO₂-Emissionen bei 25°C (Fremdzündungsmotor)



Durch die deutlich verringerten Kaltstartemissionen bei den Messungen bei 15°C und 25°C sind die Emissionswerte für CO deutlich geringer, als bei den Messungen bei 5°C. Der grundsätzliche Emissionsverlauf in NEFZ, WLTC und CADC bleibt, abgesehen von der Änderung im Kaltstartverhalten, gleich.

Der Blick auf die CO₂-Emissionen offenbart das gleiche Verhalten des Fahrzeugs mit Fremdzündungsmotor wie es bereits beim Fahrzeug mit Selbstzündungsmotor dargelegt wurde. Die CO₂-Emissionen in WLTC und CADC sind geringer als im NEFZ.

Mit Einführung des WLTC in 2017 werden auch die Randbedingungen der Messung – die sogenannte Testprozedur – angepasst. So wird ein neues Verfahren zur Ermittlung der Straßenlastkoeffizienten eingeführt und die Prüfmasse an reale Fahrzeugmassen angenähert. Zum Zeitpunkt der Durchführung der Messungen für dieses Forschungsvorhaben waren die genauen Vorgehensweisen noch nicht bekannt bzw. definiert. Es werden daher die Parameter, die für den NEFZ massgeblich sind, auf den WLTC übertragen. /3/ Dies hat zur Folge, dass geringere Fahrzeugmassen verwendet werden und auch der von der EU-Kommission angekündigte, sogenannte 14°C-Test („Ambiant Temperature Correction Test“), nicht durchgeführt werden kann.

2.2 Realemissionsmessungen

Die im Januar 2011 ins Leben gerufene Arbeitsgruppe „RDE-LDV“ beschäftigt sich mit der Aufgabe, die Realemissionen von Fahrzeugen zu erfassen und ein robustes Mess- und Auswerteverfahren festzulegen. Hierzu standen zu Beginn des Prozesses zwei grundsätzliche Ansätze zur Diskussion:

1. Messung der Emissionen auf der Straße (PEMS). („Labor auf die Straße“)
2. Messung im Labor mit einem zufällig generierten Zyklus auf Basis einer Fahrdatenbank (*Random Cycle*).

In Mitte 2012 wurde die Messung auf der Straße mittels PEMS (Portable Emission Measurement System) als Messmethode im RDE-Kontext festgelegt. Diese Methode ist bereits in der Richtlinie ECE R49, welche die Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge reglementiert, beschrieben und im Rahmen der Feldüberwachung der Fahrzeuge fest verankert.

2.2.1 Auswirkung der Ausrüstung der Fahrzeuge mit dem Messsystem

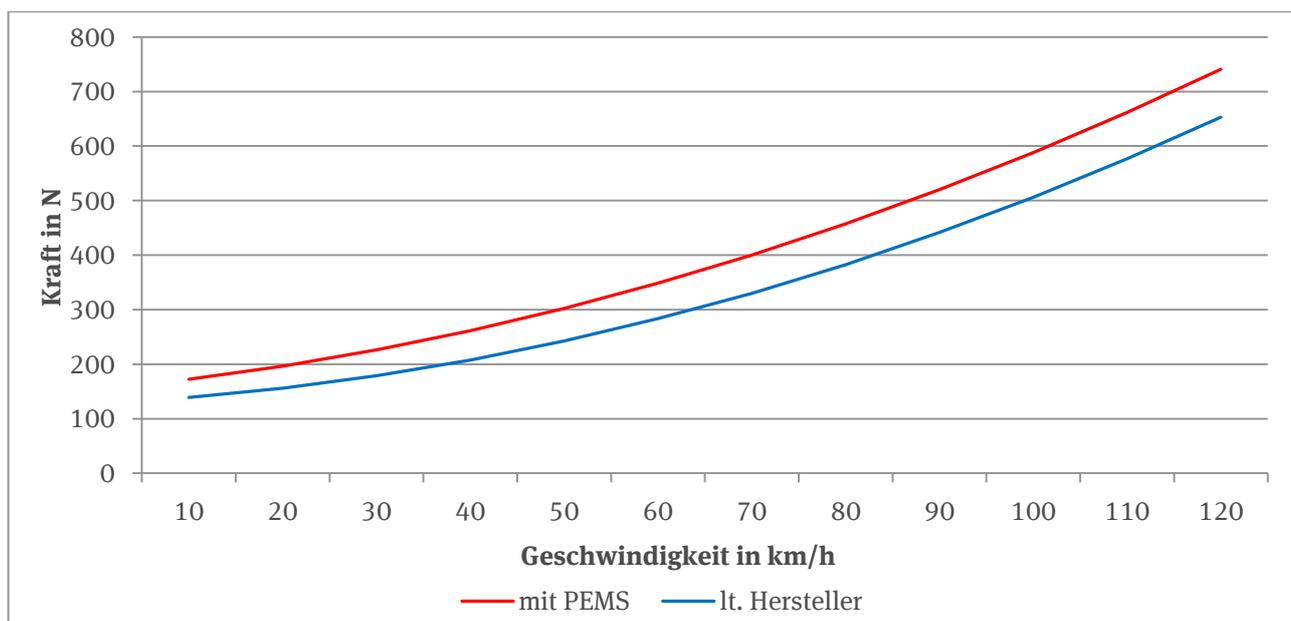
Die im Rahmen dieses Forschungsprogrammes festgelegten und durchgeführten Messungen (vgl. Tabelle 2) sehen neben den Messungen auf dem Rollenprüfstand auch Messungen im realen Verkehr vor. Hierzu wird ein mobiles Messsystem (engl. *Portable Emissions Measurement System*, PEMS) verwendet. Dieses wird im und am Fahrzeug installiert und mitgeführt. Um den Einfluss der durch die Messtechnik aufgebrachten Masse auf den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen einschätzen zu können wird eine Neubestimmung der Straßenlastkoeffizienten durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt. Delta ist dabei die prozentuale Abweichung der aufgezeichneten Kraft zu der vom Hersteller angegebenen Kraft bei jeweiliger Geschwindigkeit.

Tabelle 3: Lastkoeffizienten mit und ohne portabler Messtechnik (PEMS), sowie notwendige Kraft und Leistung für eine konstante Geschwindigkeit als Funktion dieser.

mit PEMS			lt. Hersteller			
F0 (N)	F1 (N/(km/h))	F2 (N/(km/h) ²)	F0 (N)	F1 (N/(km/h))	F2 (N/(km/h) ²)	
153,23	1,6067	0,0274	128	0,8	0,0298	
Lastberechnung aus F0 F1 F2			Lastberechnung aus F0 F1 F2			
v	F	P	v	F	P	Delta
in km/h	in N	in kW	in km/h	in N	in kW	%
10	172	0,48	10	139	0,39	+23,7
20	196	1,09	20	156	0,87	+25,6
30	226	1,88	30	179	1,49	+26,3
40	261	2,90	40	208	2,31	+25,5
50	302	4,20	50	243	3,37	+24,3
60	348	5,80	60	283	4,72	+23,0
70	400	7,78	70	330	6,42	+21,2
80	457	10,16	80	383	8,50	+19,3
90	520	12,99	90	441	11,03	+17,9
100	588	16,33	100	506	14,06	+16,2
110	662	20,21	110	577	17,62	+14,7
120	741	24,69	120	653	21,77	+13,5

Tabelle 3 zeigt die für die Berechnung der Koeffizienten notwendigen Kräfte und Leistungsaufnahmen für die sechs Stützstellen der Straßenausrollung nach EG (Nr.) 715/2007 am Beispiel des Volkswagen Passat. Dabei werden die durch eine Kontrollmessung im Serienzustand validierten Messungen des Herstellers mit den ermittelten Daten des Fahrzeugs im messbereiten Zustand gegenübergestellt. Es zeigt sich eine mittlere Abweichung von 20,9%. Zur Verdeutlichung der veränderten Straßenlast sind in Abbildung 15 die Ausrolldaten in Form von Ausrollkurven dargestellt:

Abbildung 15: Vergleich der Fahrwiderstände mit und ohne portable Messtechnik



Der dargestellte Einfluss der PEMS-Messtechnik auf die Straßenlast ist Anlass für eine Wiederholungsmessreihe zur Abschätzung des Einflusses auf das Emissionsverhalten. Die Auswertung der durchgeführten Messungen ergab einen nahezu linearen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch sowie den CO₂ Ausstoß. Ein deutlicher Einfluss auf die limitierten Schadstoffkomponenten konnte nicht festgestellt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Messungen auf dem Rollenprüfstand stattfanden und im realen Verkehr mit einem erhöhtem Einfluss auf die limitierten Abgaskomponenten zu rechnen ist, da in diesem Fall durch Randbedingungen, wie beispielsweise Steigung und Gegenwind in Kombination mit dem Zusatzgewicht des notwendigen portablen Messgerätes lastbedingt andere Kennfeldbereiche erreicht werden. Des Weiteren ist bei den RDE-Messungen eine deutlich gesteigerte Dynamik, im Vergleich zu den Rollenprüfstandsmessungen, vorzufinden.

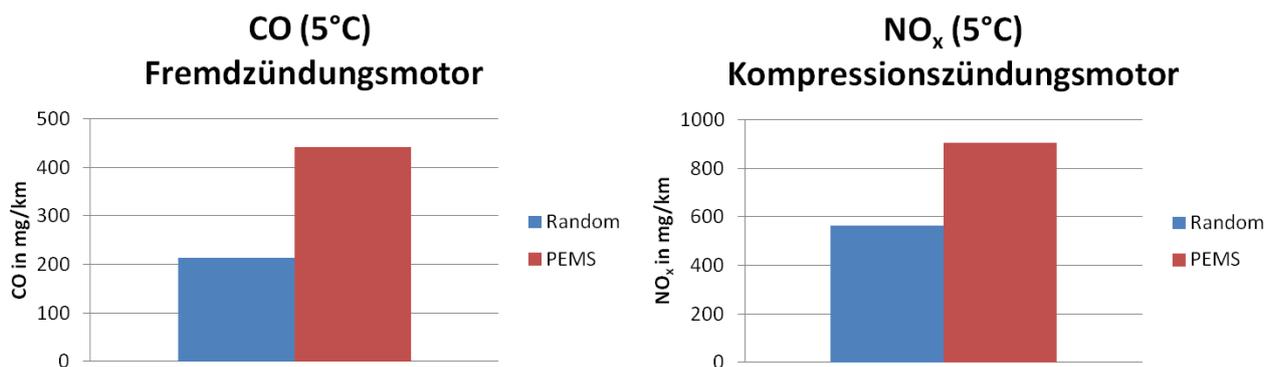
Mit Blick auf den Prozess zur Einführung von RDE als Bestandteil der Typprüfung ist festzuhalten, dass eine Herausforderung darin besteht, die Einflussmöglichkeiten der Messsysteme so gering wie möglich zu halten. /1/

2.2.2 Ergebnisse der Vermessung im Straßenverkehr

2.2.2.1 Emissionsmessungen auf der Straße und mit zufällig generierten Zyklen im Labor

Im Zuge eines „RDE-Arbeiten“ begleitenden Forschungsprogramms werden sowohl Messungen auf der Straße als auch nach einem zufällig generierten Zyklus (s. Abschnitt 1.3.1 Random Cycle) auf dem Prüfstand durchgeführt. Der dabei für alle Schadstoffe im Allgemeinen einheitlich festgestellte Trend wird in Abbildung 16 exemplarisch für CO und NO_x, jeweils bei 5°C, dargestellt.

Abbildung 16: Emissionen Random Cycle / PEMS



Der Vergleich der Messdaten zeigt bei den durchgeführten Messungen, dass die Emissionen in einem zufällig generierten Zyklus auf dem Prüfstand im Vergleich zu den auf der Straße ermittelten Emissionen niedriger sind. Dies ist vermutlich u.a. auf mikrotransiente Einflüssen von Fahrer und Fahrzeug auf der Straße zurückzuführen, die auf dem Prüfstand nicht abzubilden sind. Die Entscheidung, die Realemissionen direkt auf der Straße zu bestimmen, ist somit auch vor diesem Hintergrund zweckmäßig.

Die Geräte zur Emissionsmessung von Fahrzeugen im Realverkehr ist bereits im Nutzfahrzeuggestrich vorhanden. Die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Messungen werden mit einem Messsystem aus dem Nutzfahrzeuggestrich vorgenommen. Das System besteht im Einzelnen aus Gasanalytoren zur Ermittlung der Konzentrationen von CO₂, CO, NO, NO_x und HC welche im Kofferraum des Prüffahrzeugs installiert werden. Der für die Berechnung benötigte Abgasmassenstrom wird am Endrohr mittels eines EFM (Exhaust Flow Meter) bestimmt. Der Probenstrom wird den Analytoren mittels einer beheizten Leitung zugeführt. Die benötigte Energie wird durch einen Generator, welcher auf der Anhängerkupplung des Fahrzeugs platziert ist, erzeugt. Abbildung 17 zeigt den Aufbau im Fahrzeug.

Abbildung 17: Installation des PEMS-Systems am Prüffahrzeug – Audi A4



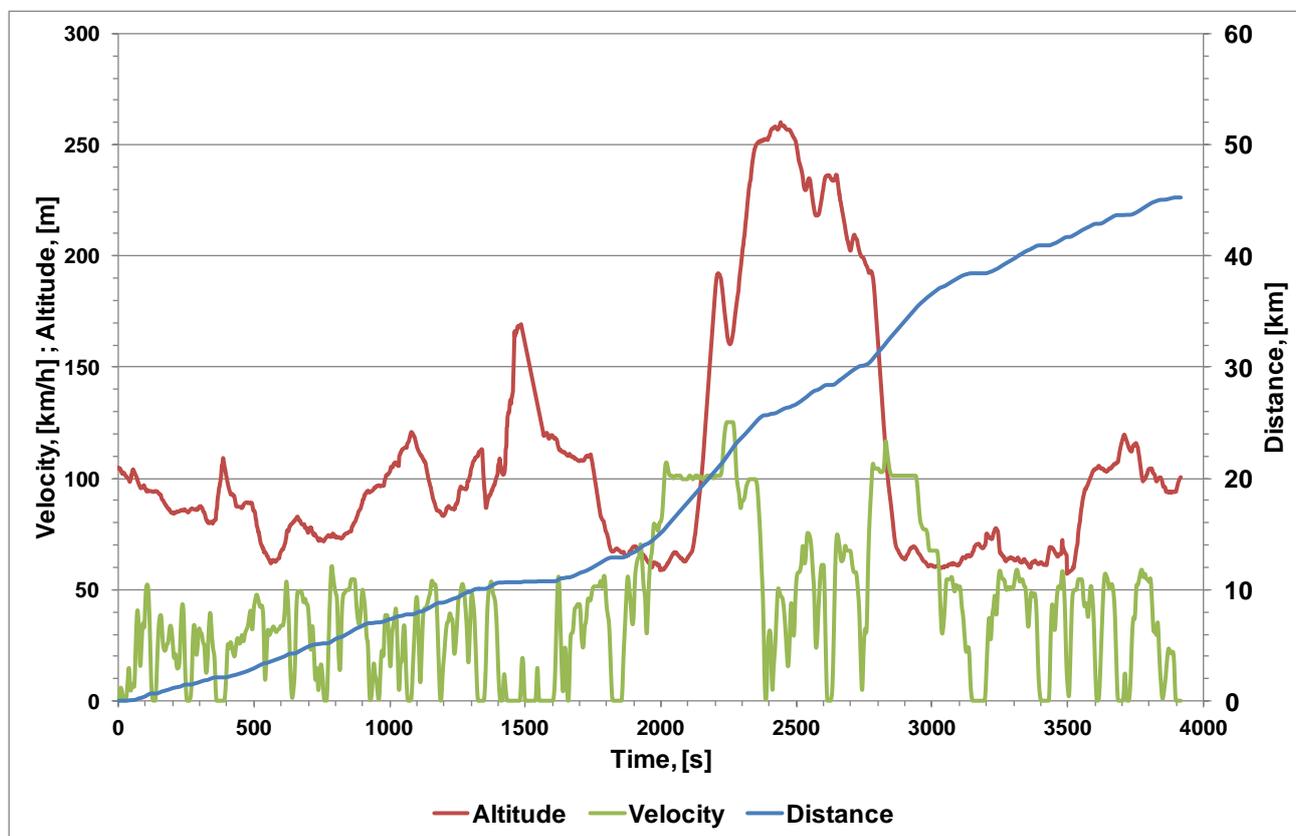
Abbildung 18: Installation des PEMS-Systems am Prüffahrzeug – VW Passat



Das genutzte System hat seinen Ursprung in der Vermessung von schweren Nutzfahrzeugen. Da hier durch den Laderaum viel Platz zur Verfügung steht, fallen die einzelnen Komponenten recht groß und schwer aus und wurden nicht auf die Anforderungen zur Vermessung eines Personenkraftwagens zugeschnitten. Das Gewicht des Gesamtsystems liegt in der verwendeten Version bei 300kg. Der Einfluss auf die Straßenlastkoeffizienten ist, wie in Tabelle 3 dargestellt sehr groß und muss bei der Diskussion der Ergebnisse bedacht werden. Das Fahrzeug wird durch die Installation des Messsystems an die Grenze der zulässigen Beladung gebracht. Mittlerweile sind mehrere PEMS Geräte auf dem Markt erhältlich, welche speziell auf den Einsatz im PKW-Bereich abgestimmt wurden und die damit unter anderem deutlich kleiner und leichter sind. Durch die Entscheidung innerhalb der RDE-LDV Arbeitsgruppe, die Kohlenwasserstoffemissionen zunächst nicht zu reglementieren (und damit auch nicht messen zu müssen), entfällt ein Analysator, sowie die zum Betrieb notwendige Prüfgasflasche, was zum einen dem Gewicht und zum anderen der Sicherheit zu Gute kommt. Des Weiteren ist durch diesen Schritt die notwendige Energiemenge zur Versorgung der Geräte drastisch gesunken, was bei aktuellen Geräten den Wegfall des Generators möglich macht. In diesem Projekt werden die Kohlenwasserstoffemissionen jedoch mit untersucht und ein Generator ist somit notwendig. Der vorläufige Verzicht auf die Reglementierung der Kohlenwasserstoffemissionen erscheint mit Blick auf das Emissionsverhalten derzeit unkritisch, da das Ansprechverhalten des Abgasnachbehandlungssystems über die Komponente CO ausreichend dokumentiert wird.

Die Messungen im realen Verkehr mittels PEMS werden analog der Messungen auf dem Rollenprüfstand bei drei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Dabei wird das mit Analysetechnik ausgerüstete Fahrzeug vor Testbeginn für 12 Stunden auf einem Klimaprüfstand konditioniert. Die Messungen finden auf einer Testroute rund um das Abgaslabor in Essen statt. Abbildung 19 zeigt den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit der genutzten Route:

Abbildung 19: Darstellung der PEMS Route



Die Route basiert auf dem zum Zeitpunkt der Durchführung der Messungen vorliegende Routenkriterien. Sie hat eine Länge von 45,8 km und eine durchschnittliche Dauer von ca. einer Stunde. Der Anteil von Stadt, Land und Autobahn beträgt jeweils ein Drittel. Mit der Vorstellung des ersten RDE-LDV Draft Ende 2014 wurden einige Kriterien der Route geändert, so dass die vorliegende Route mittlerweile nicht mehr den geforderten Randbedingungen entspricht.

Die im Forschungsvorhaben abgefahrenen Route hält folgende Kriterien, des aktuellen Drafts (2015 - G3 4533297) nicht ein:

- Fahrzeit: ca. 65min. (gefordert mind. 90min)
- Fahranteile, Außerorts und Autobahn: ca. 8km und 14km (gefordert mind. 16km)
- Fahranteile Prozentual, Außerorts und Autobahn): 51% und 17% (gefordert 33%±10)
- Schneller als 100km/h: 4,4min (gefordert mind. 5min.)

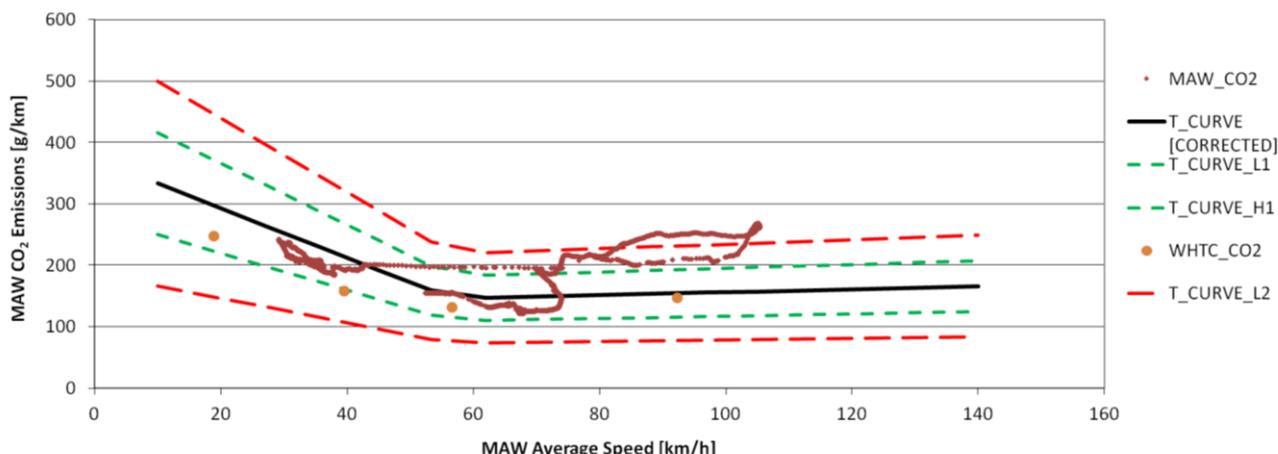
Grundsätzliche Aussagen über das Mess- und Auswerteverfahren behalten dennoch ihre Gültigkeit.

2.2.2.2 Auswertungen der ermittelten Messwerte mittels MAW- und SPF-Methode

Neben der Festlegung der Hardware und Routendefinitionen stellt sich die Frage, wie die Auswertung der Messdaten sowie die Bewertung derselben im Zuge einer robusten Reglementierung festgelegt werden kann. Hier werden derzeit zwei Ansätze intensiv diskutiert: die Auswertung mit Hilfe von Clear nach dem Prinzip der standardisierten Leistungsfrequenzverteilung (SPF – *standardized power frequency distribution*) und mit Hilfe von Emroad, bei der Mittelungsfenster eingesetzt werden (MAW – *Moving Averaging Windows*).

Zum einen gibt es die Bestrebung, die bereits im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge genutzte Methode der „Moving Averaging Windows“ (MAW) zu nutzen. Diese Methode öffnet sekundlich Messfenster, welche solange geöffnet bleiben, bis die halbe CO₂-Masse, welche das Fahrzeug im WLTC ausstößt, erreicht ist. Somit werden pro Messfahrt tausende dieser Messfenster erzeugt. Der Mittelwert dieser Emissionen eines jeden Fensters geht in die Auswertung ein. Zusätzlich wird eine bi-lineare CO₂-Kurve aus den unterschiedlichen Phasen des WLTC, (nur: „low“, „high“ und „extra high“) berechnet und um den erhöhten Lastwiderstand korrigiert, um einen Bereich für den normalen Fahrbetrieb zu definieren. Die ermittelten distanz-spezifischen CO₂-Fensterwerte der Messfahrt werden über der mittleren Geschwindigkeit aufgetragen. Die Last-korrigierte WLTC Kurve (Hier berechnet nach altem Stand: WLTC mit NEFZ Lasteinstellung gefahren) wird als normale Fahrweise betrachtet, dabei wird eine Abweichung von derzeit ± 25% toleriert. Abweichungen zwischen 25% und 50% werden anteilig gewichtet. Der Gewichtungsfaktor nimmt im Toleranzbereich von 25 bis 50% Werte kleiner als 1 an und fällt zum äußeren Rand des Bereichs auf null ab. Alle Fenster oberhalb von ± 50% werden ausgeschlossen. Abbildung 20 zeigt exemplarisch die beschriebene MAW-Kurve: /4/

Abbildung 20: MAW-Kurve



Bemerkung zu Abbildung 20: CO₂-Kurve mit WLTC Ergebnissen, die mit NEFZ Lasteinstellung herausgefahren wurden, berechnet.

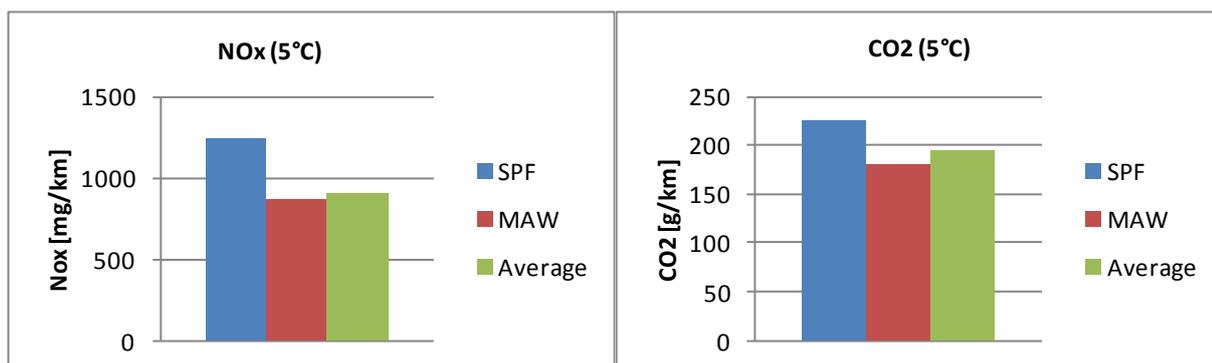
Zum anderen existiert die Methode der standardisierten Leistungsfrequenzverteilung (SPF – standardized power frequency distribution). Die gemessenen Emissionen werden in Abhängigkeit des Fahrzustandes in Leistungsklassen eingeteilt und entsprechend dieser Leistungsklassen gewichtet. Die im jeweiligen Fahrzustand abgerufene Leistung wird über eine Willians-Linie bestimmt. Der Mittelwert, der einer Leistungsklasse zugeordneten Abgaskomponente, wird entsprechend einer für eine Fahrt als normal angenommenen Verteilung gewichtet. Dieser leistungsbezogene Ansatz ordnet die ermittelten Messwerte einem Leistungskennfeld zu. Die Zuordnung erfolgt über den Indikator „Leistung“ der aus der emittierten CO₂-Menge über eine Willans-Linie bestimmt wird. Die gemittelten Klassenwerte werden im Nachgang mit Faktoren für die „Normal“-Verteilung belegt. Somit ergibt die Summe der normten Klassen eine „Normfahrt“.

Im Folgenden werden die ermittelten Messwerte jeweils dem Stand von Ende 2014 (Emroad 5.8B9 / Clear 1.8.6) der Auswertemethoden unterzogen und dem Roh-Messwert gegenübergestellt. Das Verhalten und der Einfluss der Auswertemethode kann so eingeschätzt werden.

2.2.2.2.1 Kompressionszündungsmotor (VW Passat)

Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse des Fahrzeugs mit Kompressionszündungsmotor bei 5°C Umgebungstemperatur für die Komponenten NO_x und CO₂, jeweils als streckenbezogener Durchschnittswert der Roh-Messwerte (Average) sowie ausgewertet mit Clear (SPF) und Emroad (MAW).

Abbildung 21: Realemissionen bei 5°C (Kompressionszündungsmotor)



Die dargestellten Ergebnisse zeigen das Wirkprinzip der Auswerte- bzw. Normierungswerkzeuge. Es gibt einen großen Unterschied zwischen den beiden Auswertemethode SPF und MAW: Bei der SPF-Methode werden die Messwerte je nach Lastzustand erhöht oder verringert. Die MAW Methode hingegen bewertet das Fahrverhalten, sowie die Gültigkeit der Fahrt, in Bezug auf die CO₂-Emissionen des WLTC und schließt ermittelte Messdaten, die außerhalb der zuvor definierten Bereichs liegen aus oder gewichtet bis zum Faktor 1. Die Ergebnisse der SPF Methode liegen bei diesem Fahrzeug über den Roh-Messdaten. Bei Anwendung der MAW Methode liegen die Ergebnisse hingegen leicht unter den Rohemissionen. Das Verhalten ist bei allen Temperaturen gleich und unterscheidet sich lediglich in der absoluten Höhe der Emissionen. Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen die Emissionen bei 15°C und 25°C.

Abbildung 22: Realemissionen bei 15°C (Kompressionszündungsmotor)

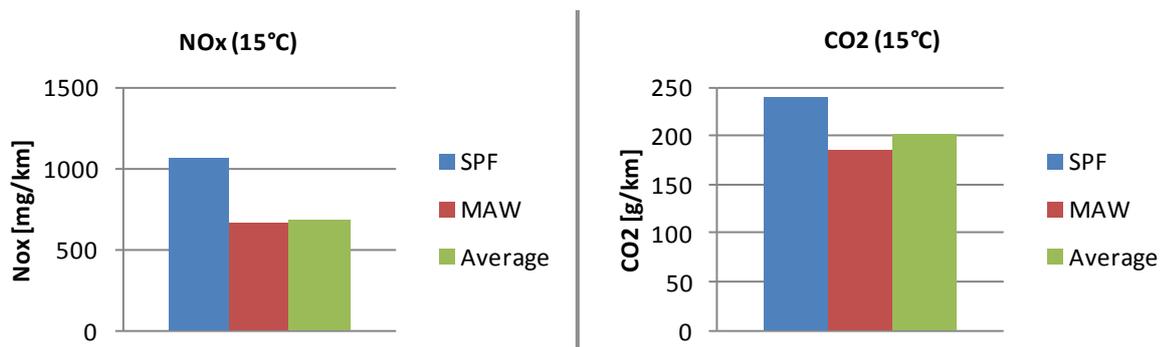
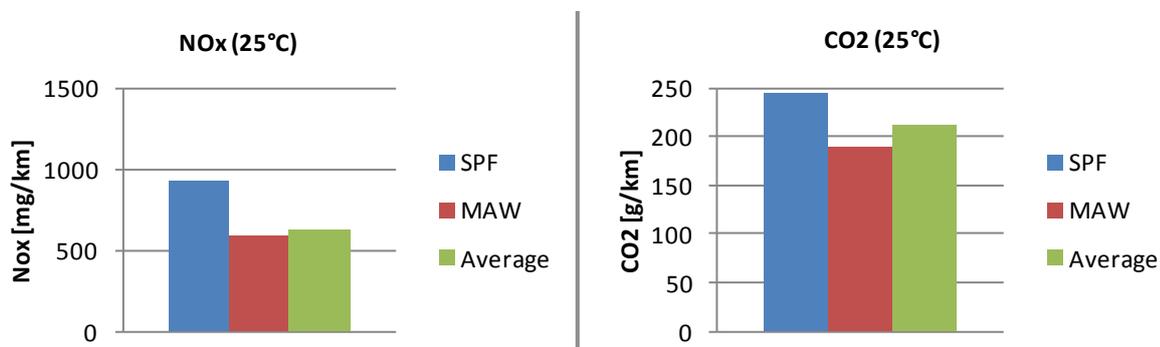


Abbildung 23: Realemissionen bei 25°C (Kompressionszündungsmotor)



2.2.2.2.2 Fremdzündungsmotor (Audi A4)

Ein Blick auf die Ergebnisse des Fahrzeugs mit Fremdzündungsmotor zeigt darüber hinaus die Abhängigkeit der SPF-Methode vom jeweiligen Fahrzeugtyp bzw. der Leistung und dem Brennverfahren:

Abbildung 24: Realemissionen bei 5°C (Fremdzündungsmotor)

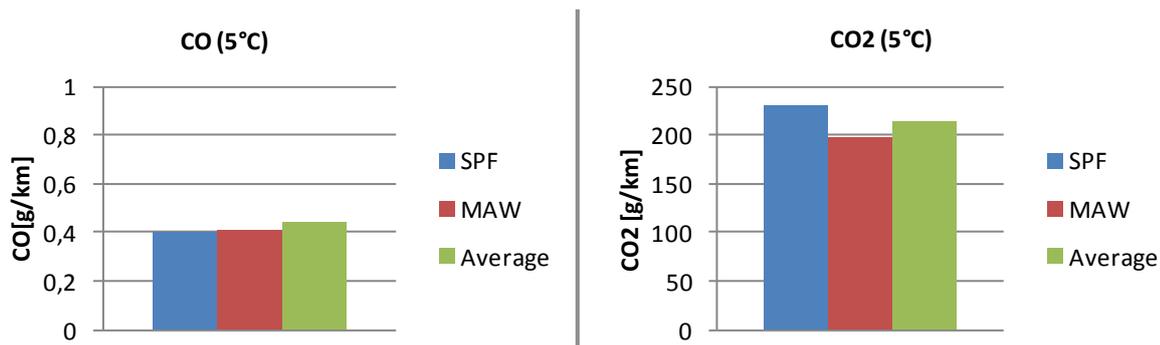


Abbildung 24 zeigt, dass die CO-Emissionen im Gegensatz zu den NO_x-Emissionen des Fahrzeugs mit Kompressionszündungsmotor durch die SPF Methode verringert werden. Die MAW-Methode zeigt ein ähnliches Verhalten, im direkten Vergleich sind die Abweichungen der Emissionen zu den Roh-Messdaten wesentlich geringer als beim Fahrzeug mit Kompressionszündungsmotor. Die CO₂-Emissionen werden, wie bereits beim Prüffahrzeug mit Kompressionszündungsmotor, durch die Benutzung der SPF Methode erhöht so dass auch hier die Emissionen oberhalb der realen Roh-Messdaten liegen. Das gleiche Verhalten ist bei den Messungen bei 15°C und 25°C zu beobachten, welche in den Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellt sind:

Abbildung 25: Realemissionen bei 15°C (Fremdzündungsmotor)

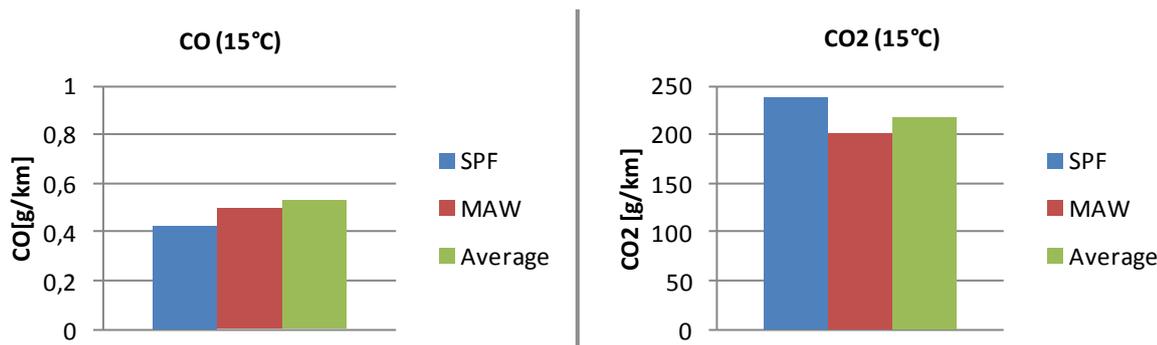
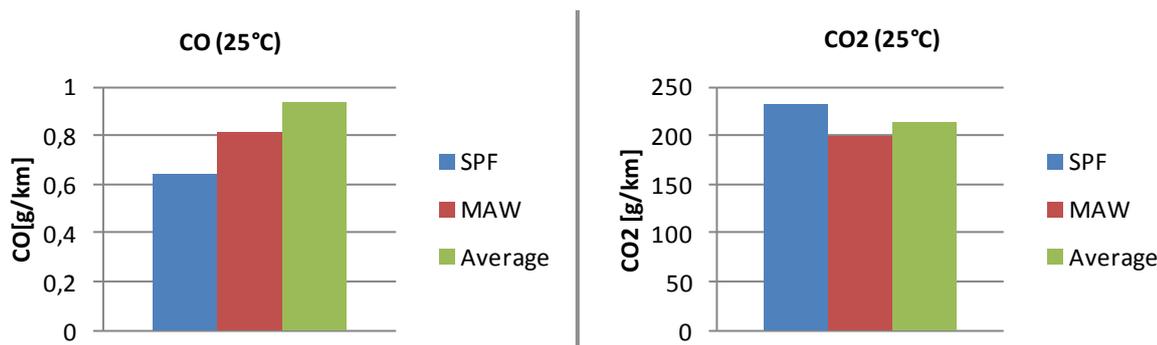


Abbildung 26: Realemissionen bei 25°C (Fremdzündungsmotor)



2.2.3 Bewertung der MAW- und SPF-Methode

Aus dem Vergleich der Auswertemethoden lässt sich der Einfluss dieser Methoden auf die Emissionsergebnisse erkennen. Die mit Blick auf die realen Messwerte erhöhten Stickoxidemissionen zeigen, dass die SPF-Methode direkten Einfluss auf die Messwerte nimmt. Es stellt sich die Frage, ob dies dem Ziel einer robusten Auswertungsmethode entspricht, da nicht die real emittierten Schadstoffe bewertet werden, sondern Ergebnisse aus einer Simulation auf Basis von Normalverteilungen und aus der Messung gewonnenen Kennfelddaten. Das Kennfeld wird während der Messung mit Emissionsdaten in Abhängigkeit von Motorleistung und Geschwindigkeit gefüllt und kann so nicht die Dynamik eines Abgasnachbehandlungssystems abbilden. Ein weiteres Problem ergibt sich durch die Einteilung in Leistungsklassen der Normalverteilung, welche zur deutlichen Überbewertung der Emissionen führen kann. Der Grund hierfür liegt in der Breite der Leistungsklassen. Es werden an der unteren und oberen Grenze der jeweiligen Klasse, Lastbereiche mit geringen Emissionen und Lastbereiche mit erhöhten Emissionseffekten, zusammen bewertet und in selber Höhe gewichtet. Durch diese starre Zuordnung kann die einer Abgasnachbehandlung eigene Thermodynamik nicht zufriedenstellend abgebildet und berücksichtigt werden. Durch die Einführung von komplexen Abgasnachbehandlungssystemen ist die Annahme, dass Lastzustand des Motors und gemessene Emission in direktem Zusammenhang und in direkter Abhängigkeit stehen, welche für diese Methode vorausgesetzt wird, nicht mehr gegeben. Für ein SCR-System kann beispielweise eine längere Bergabfahrt im Schubbetrieb einen erneuten Kaltstart

am Ende dieser Schubphase bedeutenden. Emissionseffekte die in einem Lastbereich mit geringer Gewichtung auftreten, aber erst im Zustand geringer Last zu messen sind, werden so ggf. falsch bewertet und das Emissionsverhalten könnte verzerrt dargestellt werden.

Die Betrachtung der Ergebnisse der MAW-Methode zeigt, dass diese Methode nicht die Messwerte selbst sondern die Fahrt bzw. Fahrweise über die CO₂-Emission bewertet und eventuelle Randbereiche ausschließt, bzw. extreme Ereignisse (immer bezogen auf CO₂) in positiver und negativer Richtung anteilig gewichtet. Hier ist die Frage, ob CO₂ als Bewertungsgrundlage für die Messfensterlänge und die Dynamik einer Fahrt der richtige Ansatz ist. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ermittelten Daten zeigen die grundsätzliche Korrelation mit den Realdaten und geben so die Möglichkeit der realistischen Bewertung des Emissionsverhaltens. Die Methode bietet grundsätzlich die Möglichkeit jedweden Parameter zur Fensterbewertung zu definieren und so die Auswertung entsprechend der im Zuge der Validierungsphase gesammelten Erfahrungen anzupassen. /4/

2.2.4 Schwankungen der Rahmenbedingungen und der Messergebnisse von RDE-Messungen (bezogen auf Draft 2015 – G3 4533297)

Die Rahmenbedingungen für RDE-Messungen können grob in drei Gruppen aufgeteilt werden. Die Umgebungsbedingungen, die Routenkriterien und die dynamischen Routenkriterien.

Umgebungsbedingungen:

- Moderate Höhenmeter der Testroute: ≤ 700m über N.N.
- Erweiterte Höhenmeter der Testroute: ≤ 1300m über N.N.
- Moderate Temperatur während des Tests: 0°C bis 30°C
- Erweiterte Temperatur während des Tests: -7°C bis 35°C

Die Umgebungsbedingungen können von Test zu Test und aber auch innerhalb eines Tests sehr unterschiedlich sein.

Die Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die Auswirkungen einer geänderten Testtemperatur auf die NO_x-Emissionen bei einem Fahrzeug mit Kompressionszündungsmotor und die CO-Emissionen bei einem Fahrzeug mit Fremdzündungsmotor.

Die Stickoxidemission beim VW Passat (Kompressionszündungsmotor) erhöht sich mit sinkender Temperatur. Die CO-Emissionen beim Audi A4 (Fremdzündungsmotor) steigen mit steigender Temperatur.

Die Routenkriterien sind in Kapitel 0 aufgeführt. Die Auswirkungen verschiedener Testrouten/Parameter wurden in diesem Forschungsvorhaben nicht betrachtet. Einzig die Streuung unterschiedlicher Fahrten auf selber Route kann und ist in Abbildung 27 beispielhaft dargestellt. Die maximale Abweichung zum Mittelwert dieses Beispiels beträgt ca. 9%.

Die Dynamischen Routenkriterien sind in Abschnitt 2.2.2.2 erklärt und bewertet.

Abbildung 27: Streuung bei mehreren Fahrten und Temperaturen - NO_x (Kompressionszündungsmotor)

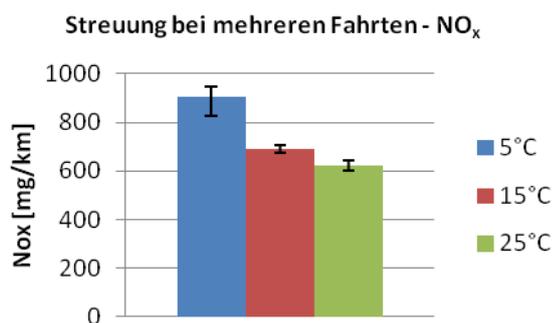
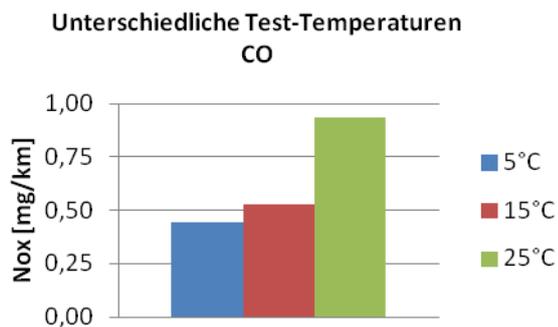


Abbildung 28: Unterschiedliche Test-Temperaturen - CO (Fremdzündungsmotor)



2.3 Übersicht der verschiedenen Messungen und zu Grenzwerten

Tabelle 4 und Tabelle 5 sowie Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen eine Übersicht der ermittelten Ergebnisse und deren Grenzwert.

Der VW Passat weist unter geänderten Randbedingungen erhöhte Stickoxidemissionen auf.

Der Audi A4 erfüllt unter allen Bedingungen den geforderten Grenzwert.

Tabelle 4: Übersicht der Ergebnisse - VW Passat - NO_x

NO _x						
		NEFZ	WLTC	CADC	RC	RDE
5°C	in mg/km	449,8609	634,8909	410,3074	564,8775	906,2380
15°C	in mg/km	115,4661	394,6650	422,2903	258,5133	688,9394
25°C	in mg/km	50,1371	429,9724	415,4528	381,1529	623,9795
GW	in mg/km	80				

Tabelle 5: Übersicht der Ergebnisse - Audi A4 - CO

CO						
		NEFZ	WLTC	CADC	RC	RDE
5°C	in mg/km	251,3871	97,6759	99,7383	213,1554	441,1980
15°C	in mg/km	149,0929	78,0793	98,2428	188,9415	526,3020
25°C	in mg/km	104,3768	81,6319	79,9589	173,3177	933,7911
GW	in mg/km	1000				

Abbildung 29: Übersicht der Ergebnisse – VW Passat - NO_x

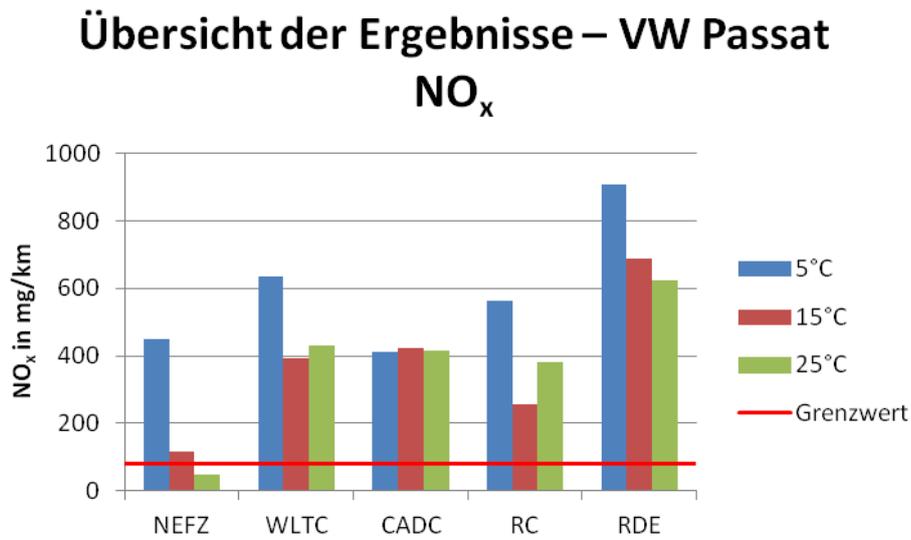
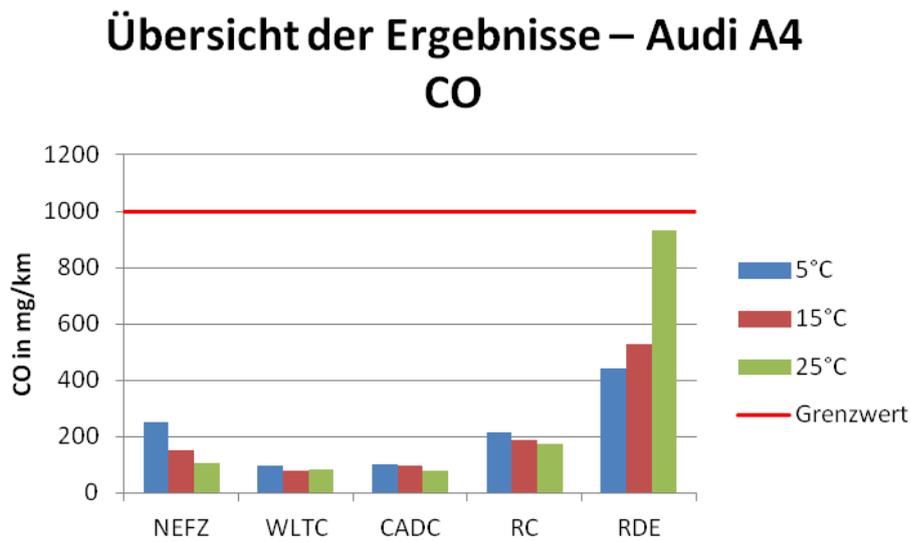


Abbildung 30: Übersicht der Ergebnisse – Audi A4 – CO



3 Darstellung und Einschätzung des Entwicklungsprozesses

Der im Jahr 2011 mit der Gründung der Arbeitsgruppe RDE-LDV angestoßene Evaluierungsprozess zum Thema Reglementierung der Realemissionen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen hat zur Vorlage erster Entwürfe für eine RDE-Verordnung Ende des Jahres 2014 geführt. In diesen sind auch die Routenkriterien definiert, die zu nutzende Analysetechnik und der Umfang, der im Zuge der Typgenehmigung zu vermessenden Fahrzeuge, festgelegt. Für die Auswertung der Messdaten sind beide beschriebenen Methoden (SPF und MAW) beschrieben.

Nach dem Inkrafttreten der Richtlinie soll es aus Sicht des europäischen Gesetzgebers eine Validierungsphase geben, in der die durchzuführenden Messungen mit beiden Methoden ausgewertet werden müssen. Die Ergebnisse beider Methoden und der Realmesswert (als streckenbezogenes Integral über die Gesamtfahrt) sollen der Arbeitsgruppe zu Verfügung gestellt werden und so am Ende der Evaluierungsphase, zur Entwicklung der Methoden und zur Fehler- bzw. Potentialanalyse der selbigen, dienen (CF- als Abfederung von messtechnischen und statistischen Unsicherheiten). Ziel ist die Fortentwicklung, ggf. aber auch Neubewertung der RDE-Methoden angesichts neuer Erfahrungen. Diese sollen, geknüpft an die Grenzwerte des Typ I Tests, durch Faktoren bestimmt sein.

Im Folgenden werden die im Zuge der Messungen gesammelten Erfahrungen zusammengefasst und dargestellt.

Fahrereinfluss auf das Messergebnis:

Der Fahrereinfluss ist ein grundlegender Einfluss bei RDE-Messungen, und der Einfluss ist i.d.R. in den gemittelten Messwerten, einer Fahrt, im Vergleich zu weiteren Fahrern zu erkennen. Fahrerabhängige Einflussfaktoren sind intuitives Fahren z.B. ausnutzen des Schubtriebs sowie Einstellung auf topografische Veränderungen (Bergab-, Bergauffahrt). Des Weiteren gehören vorrausschauendes Fahren, Beschleunigungs- und Bremsverhalten, Geschwindigkeit und das Schaltverhalten zu den fahrerabhängigen Einflussfaktoren. Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Einflussfaktor ist das konstante Fahren, hierbei kann z.B. eine GRA (Geschwindigkeitsregelanlage) genutzt werden. Diese verhindert unbewusste Änderungen an der Gaspedalstellung und/oder Geschwindigkeitsschwankungen. Dazu zählen im Detail auch so genannte Micropulsationen, die durch Nutzen einer GRA nicht auftreten. Micropulsationen beeinflussen zwar den CO₂-Ausstoß sowie den Kraftstoffverbrauch nicht sichtbar, jedoch werden andere Schadstoffkomponenten, z.B. die Stickoxid-Emissionen (NO_x), erhöht.

Eine Schulung der Fahrer könnte ggf. zu einer Verringerung der Ergebnisschwankungen führen, bzw. eine gewisse Beeinflussung der Ergebnisse zur Folge haben.

Routenauswahl:

Die Routenauswahl erfolgt jeweils nach Stand des RDE-Drafts. Die Routenerstellung erfolgt von Hand, da hier einige Parameter eingehalten und die Route intuitiv durch Erfahrungswerte gewählt werden muss. Die praktische Vorgehensweise beginnt mit der Erstellung einer Anforderungsliste für die nach dem RDE-Draft einzuhalten Parameter. Die Planung der Fahrroute erfolgt elektronisch. Da die Route einen Rundkurs darstellen soll und vor und nach der Testfahrt eine Kalibration der Messgeräte notwendig ist, wurde das IFM als Start- und End-Punkt festgelegt. Zu beachten ist, dass wenn möglich eine Strecke gewählt wird, auf der verkehrstechnisch eine niedrige Fluktuation vorzufinden ist. Dies erleichtert das regelmäßige Einhalten der vorgegebenen Kriterien. Um nun die Gültigkeit im Fahrbetrieb zu testen, müssten diverse Testrunden gefahren und ausgewertet werden. Der Unterschied in der Praxis liegt darin, dass die Streckenanteile anhand der Fahrgeschwindigkeit ermittelt werden, somit auch der Verkehr den

Anteil bestimmen / verändern kann. Durch die Auswertung der praktisch ermittelten Fahrdaten auf der erstellten Route kann nun eine mögliche Anpassung der Route erfolgen. Hier muss ggf. mehrfach approximiert werden.

Routenanforderungen nach Draft 2015 - G3 4533297:

- 1/3 Mix (Distanz): Innerorts $34 \pm \frac{10}{5}$ %, sowie Außerorts und Autobahn jeweils 33 ± 10 %
- mind. 16 km pro Teil
- Tripdauer: 90-120 min
- Innerorts: 0-60km/h; Außerorts: 60-90km/h; Autobahn 90-160 km/h
 - Autobahn bis 145 km/h, bis 3% der Autobahn 160km/h zulässig
- Durchschnittsgeschwindigkeit Innerorts: 15-30 km/h
- Standzeiten: <1km/h bei mind. 10% der Innerortszeit; Mehrere Stopps von mind. 10s; Ein langer Stopp von >80% der Gesamt-Stoppzeit ist verboten
- Durchschnittsgeschwindigkeit Autobahn 90-110 km/h
- mind. 10min \geq 110km/h

Um eine Aussage über die Wiederholbarkeit bzw. Gleichheit von Messungen auf verschiedenen Fahrstrecken vorzunehmen ist die Datenlage zu gering. Es sind jedoch diverse Möglichkeiten vorstellbar. So ist anzunehmen, dass die Routenführung in Ihrer Aufteilung der jeweiligen Fahranteile, großen Einfluss nehmen kann. Auch die Reihenfolge der Fahranteile kann die Ergebnisse beeinflussen, diese soll deshalb im RDE-Verfahren auch dezidiert festgelegt werden. Topografisch verschiedenartige Streckenführungen verändern ebenso die Lastprofile, was sich in einer Veränderung im Ergebnis widerspiegeln kann und dürfte. Routenführungen, die auf Straßen in Orten mit stark schwankendem Verkehrsaufkommen durchgeführt werden, dürften ebenfalls deutlich fluktuierende Ergebnisse hervorbringen. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Annahmen mit Blick auf die hier vermessenen und nicht-RDE-validen Fahrzeuge zu sehen sind. Davon ausgehend, dass RDE zu einer deutlichen Fortentwicklung der Leistungsfähigkeit der Abgasnachbehandlung zur Kompensation höherer Rohemissionen führt, könnten sich diese Effekte für RDE-Fahrzeuge zukünftig durchaus anders darstellen.

Validierung des Systems-Fahrzeug-PEMS:

Die Validierung des PEMS-Equipments gegenüber dem Abgasrollenprüfstand stellt eine zusätzliche Kontrolle der Richtigkeit der Messungen dar. Das mit Messtechnik ausgerüstete Fahrzeug wird auf dem Abgasrollenprüfstand im WLTC gefahren. Die Bestimmung der Abgasbestandteile erfolgt parallel mit beiden Analysenanlagen (PEMS und Abgasprüfstandsmessung). Korrelieren müssen die PEMS-Daten mit den Beutelwerten der Prüfstandsanalyse (nach ECE 83 Anhang 4a). Für die zu messenden Abgasbestandteile gibt es jeweils eine unterschiedlich zulässige Abweichung. Um eventuelle Fehler nachzuvollziehen, erfolgt bei der Prüfstandsmessung ein Modal-Mitschrieb. Es ist eine geeignete Durchflussstufe für die CVS zu wählen. Grundsätzlich waren die durchgeführten Validierungsmessungen immer der Qualität der Messung zuträglich. Gravierende Fehler lassen sich so bereits frühzeitig erkennen und beheben.

Messsysteme:

Der Aufbau des Messsystems (kein neues LDV Gerät) ist zeitaufwändig. Benötigt werden ein geeigneter Einbauplatz sowie entsprechende Vorrichtungen um das Messequipment ausreichend zu sichern. Dies wird in der Regel mit Zurrgurten erreicht. Das Fahrzeug muss durch

Polstern oder Abkleben gegen Beschädigungen gesichert werden. Die Montage des EFM gestaltet sich auf einer Anhängerkupplung als einfach und schnell. Die Montage auf einem Heckträger nimmt mehr Zeit in Anspruch. Eine alternative Lösung ist zeitaufwändig und schwierig umzusetzen. Bei der Auswahl des Montageplatzes, ebenso der Batterie, ist darauf zu achten, dass das Fahrzeug möglichst wenig beeinflusst wird. Ein aerodynamischer Nachteil durch falsche Beladung ist auszuschließen. Bei Durchführung der Tests ist auch ein Gaswarngerät mitzuführen, da die Abgase zur Analyse in das Fahrzeug bzw. Messgerät geleitet werden müssen. /4//5/

Trotz vieler Einflussfaktoren während der Messung und deren Einfluss auf die Ergebnisse ist die Einführung von RDE sinnvoll. Gerade diese nicht vorhersehbaren Faktoren können dazu führen, dass die Fahrzeuge in Zukunft unter allen Bedingungen gute Emissionswerte erbringen müssen.

4 Ausblick

Die im Januar 2011 durch die europäische Kommission etablierte Arbeitsgruppe RDE-LDV hat einen Verordnungsentwurf zur Ergänzung der bestehenden Verordnung EG (Nr.) 715/2007 erarbeitet. In diesem Entwurf sind alle Randbedingungen und Auswertekriterien für die Durchführung von Messungen im realen Verkehr festgelegt.

Die Diskussionen zu RDE zeigen, dass die Ermittlung der realen Emissionen durch die im Vergleich zu Messungen auf dem Rollenprüfstand deutlich weiteren Randbedingungen eine große Herausforderung darstellt. Eine Wiederholbarkeit ist nicht gegeben. Jede Messung ist einzeln zu bewerten, was das Erkennen von Defekten des Messsystems oder des Prüffahrzeugs erschwert – hier ist eine Validierung mit dem Rollenprüfstand für jeden Messaufbau unabdingbar, da Fehler welche beispielweise in der Einrichtung zur Bestimmung des Abgasmassenstroms auftreten multiplikativ auf die Messwerte wirken. Wichtiger jedoch als die Wiederholbarkeit der Messungen ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterschiedlicher Messungen untereinander und deren Abgleich mit RDE-Emissionsanforderungen.

Im Richtlinienentwurf festgelegt sind bereits Definitionsparameter für die Route sowie Durchführungskriterien für eine gültige Messfahrt. Es wurden Randbedingungen wie Umgebungstemperatur und Höhe sowie Testparameter wie Länge, Höchst- und Mindestgeschwindigkeit und Anteil der jeweiligen Streckenabschnitte von städtischem und außerstädtischem Fahren sowie der Autobahnanteil definiert. Eine genaue Systembeschreibung des zur Emissionsanalyse zu nutzenden Messaufbaus, die Installation des Aufbaus am Fahrzeug sowie die zur Erzielung von belastbaren Messwerten notwendigen Überprüfungen wurden definiert. Die Beiden, im Rahmen dieses Forschungsvorhaben dargestellten, Methoden zur Messwertanalyse (MAW/SPF) werden im Entwurf beschrieben.

Am 03.02.2016 hat das Europäische Parlament der Einführung des durch die Arbeitsgruppe RDE-LDV erarbeiteten Verfahrens zur Reglementierung der Realemissionen zugestimmt. Damit kommt es der bereits in der Verordnung EG (Nr.) 692/2008 festgelegten Forderung nach Reglementierung nach. Die Einführung wird demnach in drei Schritten erfolgen:

Mit Inkrafttreten der Richtlinie wird die Messung von Realemissionen für neue Fahrzeugtypen im Zuge der Typprüfung verbindlich. In dieser „Monitoring – Phase“ werden die ermittelten Werte keiner Grenzwertüberprüfung unterzogen, die ermittelten Daten sollen der Entwicklung der Auswerteprogramme dienen. Ab dem 01.09.2017 gilt ein „conformity factor (CF) von 2,1 – ab 01.01.2020 der CF von 1,5 – welcher sich aus einem Faktor von 1,0 für die Grenzwertbetrachtung und dem Faktor 0,5 für die Messunsicherheiten zusammen setzt. /4/ /6/

5 Quellenverzeichnis

- /1/ Amtsblatt der Europäischen Union: Verordnung (EG) Nr. 715/2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, Amtsblatt der Europäischen Union, 2007
- /2/ Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg, 7. Auflage 2013
- /3/ ECE/TRANS/180/Add.15: Addendum 15: Global technical regulation No. 15, Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure, Global Registry, 2014
United Nations
- /4/ KOM_RDE_annex-ver.1-Internal working document, RDE-DRAFT, Dezember 2014
- /5/ Abschlussbericht „PEMS-Messungen an drei EURO 6-Diesel-Pkw auf Streckenführungen in Stuttgart und München sowie auf Außerortsstrecken, LUBW, TNM, Kleinebrahm, Steven, 2012
- /6/ ANNEX to the Commission Regulation amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6)

6 Anhang

Tabelle 6: Ergebnisse der ersten Testreihe im CADC (Audi A4)

Audi A4 Testreihe 1								
5°C	Abgasbestandteil	Einheit	cuk	cuw	cr	cm	warm	kalt
							CADC (cuw/cr/cm)	CADC (cuk/cr/cm)
5°C	HC	in mg/km	118,677	9,721	3,738	8,035	21,494	6,760
	CH4	in mg/km	8,745	2,923	0,458	1,674	5,055	1,386
	NMHC	in mg/km	110,949	7,138	3,333	6,556	17,027	5,535
	NOX	in mg/km	96,757	55,158	13,678	12,163	80,998	16,734
	NO	in mg/km	94,050	53,539	13,827	11,666	79,033	16,347
	HC+NOx	in mg/km	215,433	64,879	17,416	20,198	102,493	23,494
	CO	in mg/km	316,126	68,706	39,468	149,999	258,172	105,412
	CO2	in g/km	292,681	258,162	131,194	150,714	540,070	154,358
	Partikel	in mg/km	3,398	0,533	0,366	0,377	1,276	0,388
	Partikelanzahl	in 1/km	3,899E+12	1,055E+12	5,904E+11	7,355E+11	2,381E+12	7,1732E+11
15°C	HC	in mg/km	78,333	5,951	3,347	10,025	19,324	7,411
	CH4	in mg/km	8,199	2,388	0,679	1,576	4,644	1,354
	NMHC	in mg/km	71,086	3,841	2,747	8,632	15,220	6,214
	NOX	in mg/km	81,953	52,377	25,614	13,077	91,069	20,979
	NO	in mg/km	84,239	53,298	25,749	12,306	91,353	20,670
	HC+NOx	in mg/km	160,286	58,329	28,962	23,102	110,393	28,390
	CO	in mg/km	285,438	51,527	34,890	150,743	237,160	102,685
	CO2	in g/km	276,328	252,132	129,684	148,970	530,786	152,287
	Partikel	in mg/km	1,467	0,566	0,440	0,365	1,371	0,409
	Partikelanzahl	in 1/km	2,319E+12	8,837E+11	6,999E+11	6,638E+11	2,247E+12	6,9663E+11
25°C	HC	in mg/km	76,934	10,809	4,205	6,379	21,393	6,072
	CH4	in mg/km	7,362	3,702	0,814	1,257	5,772	1,340
	NMHC	in mg/km	70,428	7,538	3,486	5,268	16,292	4,888
	NOX	in mg/km	71,386	80,776	38,453	12,845	132,074	27,818
	NO	in mg/km	71,054	79,655	38,412	11,566	129,633	26,967
	HC+NOx	in mg/km	148,320	91,586	42,658	19,223	153,467	33,890
	CO	in mg/km	460,302	23,267	28,507	85,786	137,560	60,752
	CO2	in g/km	271,224	250,963	129,254	146,291	526,508	150,502
	Partikel	in mg/km	0,853	0,612	0,368	0,406	1,386	0,413
	Partikelanzahl	in 1/km	1,484E+12	1,215E+12	6,937E+11	6,797E+11	2,588E+12	7,3498E+11

Tabelle 7: Ergebnisse der zweiten Testreihe im CADC (Audi A4)

Audi A4 Testreihe 2								
5°C	Abgasbestandteil	Einheit	cuk	cuw	cr	cm	warm CADC (cuw/cr/cm)	kalt CADC (cuk/cr/cm)
		HC	in mg/km	120,481	7,481	3,073	8,465	19,019
	CH4	in mg/km	9,981	2,540	0,483	1,078	4,101	1,017
	NMHC	in mg/km	111,661	5,236	2,647	7,513	15,395	5,672
	NOX	in mg/km	88,233	46,787	14,777	9,671	71,234	14,879
	NO	in mg/km	85,948	45,851	13,641	9,750	69,242	14,456
	HC+NOx	in mg/km	208,714	54,267	17,850	18,136	90,254	21,449
	CO	in mg/km	398,673	44,308	34,088	137,348	215,745	94,065
	CO2	in g/km	294,835	255,143	131,039	150,566	536,747	153,906
	Partikel	in mg/km	2,937	0,234	0,224	0,309	0,767	0,274
	Partikelanzahl	in 1/km	3,640E+12	7,969E+11	5,594E+11	6,895E+11	2,046E+12	6,5617E+11
15°C	HC	in mg/km	75,897	5,883	3,568	7,640	17,091	6,114
	CH4	in mg/km	7,363	2,406	0,654	1,210	4,270	1,137
	NMHC	in mg/km	69,390	3,757	2,990	6,571	13,318	5,109
	NOX	in mg/km	92,003	85,642	15,446	11,409	112,498	19,762
	NO	in mg/km	92,646	84,111	14,783	11,270	110,164	19,316
	HC+NOx	in mg/km	167,900	91,525	19,014	19,050	129,589	25,875
	CO	in mg/km	252,171	37,753	28,212	141,548	207,513	93,883
	CO2	in g/km	277,966	252,657	130,965	148,773	532,395	152,623
	Partikel	in mg/km	1,817	0,265	0,290	0,388	0,944	0,344
	Partikelanzahl	in 1/km	2,311E+12	1,256E+12	6,920E+11	7,393E+11	2,687E+12	7,7224E+11
25°C	HC	in mg/km	76,934	6,088	3,925	9,910	19,923	7,549
	CH4	in mg/km	7,362	2,676	0,650	1,688	5,014	1,435
	NMHC	in mg/km	70,428	3,724	3,351	8,418	15,492	6,282
	NOX	in mg/km	71,386	53,121	15,697	10,852	79,671	16,459
	NO	in mg/km	71,054	53,013	14,858	10,530	78,402	15,985
	HC+NOx	in mg/km	148,320	59,210	19,623	20,762	99,594	24,008
	CO	in mg/km	460,302	36,954	31,558	149,022	217,534	99,197
	CO2	in g/km	271,224	247,863	128,455	146,716	523,035	150,157
	Partikel	in mg/km	0,853	0,710	0,415	0,488	1,613	0,484
	Partikelanzahl	in 1/km	1,484E+12	8,880E+11	5,070E+11	6,301E+11	2,025E+12	6,1330E+11

Tabelle 8: Ergebnisse der ersten Testreihe im CADC (VW Passat)

Volkswagen Passat Testreihe 1								
	Abgasbestandteil	Einheit	cuk	cuw	cr	cm	warm CADC (cuw/cr/cm)	kalt CADC (cuk/cr/cm)
5°C	HC	in mg/km	4,530	0,000	0,000	0,000	0,427	0,000
	CH4	in mg/km	1,705	3,516	0,863	0,466	0,715	0,887
	NMHC	in mg/km	3,045	0,000	0,000	0,000	0,287	0,000
	NOX	in mg/km	1115,548	747,501	412,326	778,733	688,055	653,406
	NO	in mg/km	732,717	394,545	241,018	335,301	341,240	309,403
	HC+NOx	in mg/km	1120,078	747,501	412,326	778,733	688,482	653,406
	CO	in mg/km	147,862	13,842	6,748	9,180	21,431	8,808
	CO2	in g/km	301,068	246,661	133,867	162,311	165,879	160,773
	Partikel	in mg/km	0,355	0,859	0,218	0,899	0,620	0,667
	Partikelanzahl	in 1/km	6,657E+09	2,414E+09	1,099E+09	2,895E+09	2,649E+09	2,250E+09
15°C	HC	in mg/km	6,077	0,000	0,000	0,000	0,572	0,000
	CH4	in mg/km	4,930	2,540	1,123	0,055	0,871	0,646
	NMHC	in mg/km	1,782	0,000	0,000	0,000	0,168	0,000
	NOX	in mg/km	668,500	749,663	407,810	796,335	654,499	662,163
	NO	in mg/km	409,975	359,447	203,705	339,076	300,532	295,785
	HC+NOx	in mg/km	674,577	749,663	407,810	796,335	655,071	662,163
	CO	in mg/km	134,994	12,528	8,100	8,411	20,231	8,696
	CO2	in g/km	280,891	247,358	134,683	161,393	163,727	160,586
	Partikel	in mg/km	0,137	0,496	0,180	0,833	0,549	0,583
	Partikelanzahl	in 1/km	1,611E+10	4,020E+09	4,434E+09	7,165E+09	7,095E+09	5,956E+09
25°C	HC	in mg/km	1,198	0,000	0,000	0,000	0,113	0,000
	CH4	in mg/km	5,540	2,497	0,735	0,012	0,774	0,488
	NMHC	in mg/km	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	NOX	in mg/km	586,034	619,862	411,799	870,183	690,285	693,456
	NO	in mg/km	456,119	328,979	226,526	406,314	350,944	338,965
	HC+NOx	in mg/km	587,232	619,862	411,799	870,183	690,397	693,456
	CO	in mg/km	165,726	17,156	7,851	15,112	26,874	12,880
	CO2	in g/km	290,062	259,805	137,082	164,730	167,299	164,470
	Partikel	in mg/km	0,262	0,554	0,299	1,183	0,801	0,828
	Partikelanzahl	in 1/km	4,555E+09	2,675E+09	1,973E+09	4,009E+09	3,380E+09	3,203E+09

Tabelle 9: Ergebnisse der zweiten Testreihe im CADC (VW Passat)

Volkswagen Passat Testreihe 2								
5°C	Abgasbestandteil	Einheit	cuk	cuw	cr	cm	warm CADC (cuw/cr/cm)	kalt CADC (cuk/cr/cm)
		HC	in mg/km	8,590	0,000	0,000	0,000	0,000
	CH4	in mg/km	0,039	2,825	0,854	0,228	3,907	1,120
	NMHC	in mg/km	8,556	0,000	0,000	0,000	0,000	8,556
	NOX	in mg/km	1206,711	725,341	408,288	755,628	636,771	682,112
	NO	in mg/km	794,511	380,232	236,247	341,949	958,427	1372,706
	HC+NOx	in mg/km	1215,301	725,341	408,288	755,628	1889,256	2379,217
	CO	in mg/km	178,503	14,649	7,608	9,987	32,244	196,098
	CO2	in g/km	301,283	246,463	135,499	162,397	544,359	599,180
	Partikel	in mg/km	0,620	0,430	0,176	0,881	1,487	1,677
	Partikelanzahl	in 1/km	4,346E+09	1,705E+09	1,070E+09	2,611E+09	5,386E+09	8,027E+09
15°C	HC	in mg/km	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
	CH4	in mg/km	15,627	2,068	0,764	0,293	3,125	16,684
	NMHC	in mg/km	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
	NOX	in mg/km	594,861	733,197	436,771	793,022	1962,990	1824,655
	NO	in mg/km	372,683	345,592	231,412	331,831	908,834	935,926
	HC+NOx	in mg/km	594,861	733,197	436,771	793,022	1962,990	1824,655
	CO	in mg/km	162,820	13,147	6,701	8,674	28,523	178,195
	CO2	in g/km	278,989	246,887	133,549	162,062	542,498	574,6
	Partikel	in mg/km	0,021	0,583	0,291	0,838	1,711	1,150
	Partikelanzahl	in 1/km	6,329E+09	3,875E+09	1,415E+09	3,918E+09	9,208E+09	1,166E+10
25°C	HC	in mg/km	7,958	0,000	0,000	0,000	0,000	7,958
	CH4	in mg/km	4,841	2,552	0,853	0,107	3,513	5,802
	NMHC	in mg/km	3,741	0,000	0,000	0,000	0,000	3,741
	NOX	in mg/km	668,423	744,889	419,106	877,432	2041,427	1964,961
	NO	in mg/km	405,356	354,212	221,797	383,114	959,123	1010,267
	HC+NOx	in mg/km	676,381	744,889	419,106	877,432	2041,427	1972,919
	CO	in mg/km	163,616	16,847	6,923	9,958	33,728	180,497
	CO2	in g/km	277,233	251,735	135,300	162,480	549,516	575,013
	Partikel	in mg/km	0,444	0,235	0,142	0,999	1,376	1,584
	Partikelanzahl	in 1/km	3,956E+09	7,797E+09	4,562E+09	4,092E+10	5,328E+10	4,944E+10

Tabelle 10: Ergebnisse der Testreihen 1+2 im WLTC und random (Audi A4)

Audi A4 Testreihe 1+2						
			WLTC1	WLTC2	random1	random2
5°C	Abgasbestandteil	Einheit				
	HC	in mg/km	29,578	41,573	67,762	43,844
	CH4	in mg/km	2,788	2,751	4,416	3,836
	NMHC	in mg/km	27,113	39,142	63,860	40,454
	NOX	in mg/km	19,614	22,952	45,072	39,265
	NO	in mg/km	19,257	22,624	42,393	38,170
	HC+NOx	in mg/km	49,192	64,525	112,835	83,109
	CO	in mg/km	86,689	108,662	261,681	164,630
	CO2	in g/km	152,689	152,352	147,642	147,780
	Partikel	in mg/km	1,009	0,669	2,213	2,471
	Partikelanzahl	in 1/km	1,011E+12	8,889E+11	2,224E+12	1,997E+12
15°C	HC	in mg/km	25,074	20,094	33,922	30,501
	CH4	in mg/km	2,512	2,445	3,444	3,304
	NMHC	in mg/km	22,854	17,933	30,878	27,581
	NOX	in mg/km	18,752	17,706	26,893	44,692
	NO	in mg/km	18,265	17,197	26,042	43,748
	HC+NOx	in mg/km	43,826	37,800	60,815	75,193
	CO	in mg/km	85,356	70,803	201,878	176,005
	CO2	in g/km	148,316	148,610	143,390	143,693
	Partikel	in mg/km	0,694	0,601	1,682	1,145
	Partikelanzahl	in 1/km	7,742E+11	6,028E+11	1,877E+12	1,452E+12
25°C	HC	in mg/km	16,449	16,629	32,261	30,917
	CH4	in mg/km	2,301	2,315	3,052	3,244
	NMHC	in mg/km	14,415	14,582	29,564	28,050
	NOX	in mg/km	21,843	20,405	27,788	39,651
	NO	in mg/km	21,072	18,041	27,109	39,160
	HC+NOx	in mg/km	38,292	37,033	60,049	70,568
	CO	in mg/km	75,884	87,380	179,462	167,173
	CO2	in g/km	144,561	144,684	140,683	139,483
	Partikel	in mg/km	0,486	0,688	0,968	0,869
	Partikelanzahl	in 1/km	5,826E+11	6,039E+11	1,623E+12	1,293E+12

Tabelle 11: Ergebnisse der Testreihen 1+2 im WLTC und random (VW Passat)

Volkswagen Passat Testreihe 1+2						
			WLTC1	WLTC2	random1	random2
5°C	Abgasbestandteil	Einheit				
	HC	in mg/km	1,275	0,375	1,514	1,223
	CH4	in mg/km	1,223	0,640	0,998	0,622
	NMHC	in mg/km	0,668	0,017	1,104	0,986
	NOX	in mg/km	628,610	641,172	567,170	562,585
	NO	in mg/km	331,927	340,764	303,894	277,309
	HC+NOx	in mg/km	629,884	641,547	568,684	563,808
	CO	in mg/km	41,271	40,101	46,080	44,086
	CO2	in g/km	162,086	163,512	155,280	154,226
	Partikel	in mg/km	0,424	0,283	0,234	0,229
	Partikelanzahl	in 1/km	1,354E+10	1,927E+10	4,130E+10	3,041E+10
15°C	HC	in mg/km	1,415	0,989	0,907	1,245
	CH4	in mg/km	2,034	1,788	1,768	1,163
	NMHC	in mg/km	0,503	0,181	0,364	0,927
	NOX	in mg/km	393,999	395,331	273,270	243,757
	NO	in mg/km	203,632	201,767	156,825	142,529
	HC+NOx	in mg/km	395,414	396,320	274,176	245,002
	CO	in mg/km	38,251	37,643	38,955	33,796
	CO2	in g/km	158,262	158,410	150,517	150,045
	Partikel	in mg/km	0,164	0,206	0,115	0,161
	Partikelanzahl	in 1/km	1,852E+09	1,427E+09	5,080E+09	3,503E+09
	25°C	HC	in mg/km	6,965	0,000	1,900
CH4		in mg/km	2,211	1,931	1,811	1,662
NMHC		in mg/km	5,566	0,000	1,170	1,146
NOX		in mg/km	431,049	428,896	396,567	365,738
NO		in mg/km	202,006	205,943	200,620	199,053
HC+NOx		in mg/km	438,013	428,896	398,467	367,538
CO		in mg/km	42,825	45,965	42,699	46,520
CO2		in g/km	154,985	154,596	146,090	146,031
Partikel		in mg/km	0,198	0,354	0,168	0,149
Partikelanzahl		in 1/km	6,374E+09	2,752E+09	2,553E+09	7,305E+09

Tabelle 12: Ergebnisse der Testreihen RDE (Audi A4 TFSI)

5°C						
	CO in g/km			CO ₂ in g/km		
	SPF	MAW	Average	SPF	MAW	Average
1	0,46117532	0,42069355	0,48977171	247,200319	193,061741	217,306289
2	0,38815345	0,44028261	0,45648310	218,115998	199,442140	211,304057
3	0,36475306	0,37612609	0,41124823	221,269929	197,950386	209,998984
4	0,39824926	0,39271782	0,40728880	234,808456	200,973475	213,298925
Mittelwert	0,40308277	0,40745502	0,44119796	230,348675	197,856936	212,977064
15°C						
	CO in g/km			CO ₂ in g/km		
	SPF	MAW	Average	SPF	MAW	Average
1	0,27624455	0,28187494	0,31275949	239,663364	202,813088	210,840564
2	0,36924498	0,96062248	0,45784427	228,171605	205,154888	217,028090
3	0,73693629	0,43667168	1,01526358	241,400520	200,319034	222,997851
4	0,30237062	0,30042865	0,31934052	240,682059	195,380978	222,031905
Mittelwert	0,42119911	0,49489944	0,52630197	237,479387	200,916997	218,224602
25°C						
	CO in g/km			CO ₂ in g/km		
	SPF	MAW	Average	SPF	MAW	Average
1	0,35627925	0,81365218	0,45032902	221,476102	201,680261	209,210250
2	0,70914678	0,81365218	1,24385110	229,603351	201,680261	212,392371
3	0,71271826	1,18339723	1,14141734	225,742293	197,286526	208,174665
4	0,79569155	0,42921682	0,89956686	249,899755	194,746471	224,365678
Mittelwert	0,64345896	0,80997960	0,93379108	231,680375	198,848380	213,535741

Tabelle 13: Ergebnisse der Testreihen RDE (VW Passat TDI)

5°C						
	NO _x in g/km			CO ₂ in g/km		
	SPF	MAW	Average	SPF	MAW	Average
1	1238,86519	883,484912	920,742447	223,055280	181,063875	194,129704
2	1230,11420	890,739767	932,739073	221,393782	180,212576	194,670133
3	1345,18746	920,652298	946,660782	229,536202	181,677208	198,550405
4	1185,08294	795,594914	824,809738	228,404775	181,044046	192,462361
Mittelwert	1249,81245	872,617973	906,238010	225,597510	180,999426	194,953151
15°C						
	NO _x in g/km			CO ₂ in g/km		
	SPF	MAW	Average	SPF	MAW	Average
1	1025,76709	642,976088	685,580396	245,066583	188,493129	210,685101
2	1056,35289	660,374843	686,479664	241,849951	184,499210	201,094711
3	1031,97807	642,976088	675,656896	231,337439	188,493129	194,372693
4	1117,00420	678,024011	708,040589	244,257962	182,74829	201,156942
Mittelwert	1057,77556	656,087758	688,939386	240,627984	186,058440	201,827362
25°C						
	NO _x in g/km			CO ₂ in g/km		
	SPF	MAW	Average	SPF	MAW	Average
1	940,335134	598,273481	604,247898	234,501430	209,041518	193,873050
2	917,225857	599,443280	618,305706	233,027165	183,382927	202,035207
3	971,400757	591,058602	630,758886	238,221877	182,135391	205,867232
4	889,756610	582,486912	642,605512	273,402663	179,229566	242,661262
Mittelwert	929,679590	592,815569	623,979501	244,788284	188,447350	211,109188