Technische Universität München

Wissenschafts Zentrum STRAUBING

Technische Universität München/ Wissenschaftszentrum Straubing

Masterstudiengang Nachwachsende Rohstoffe

Realemissionen eines Flexible Fuel Vehicles (FFV) beim Betrieb mit ethanolhaltigen Kraftstoffen

vorgelegt von:

Maximilian Frankl

(Matrikelnummer: 03668592)

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades:

Master of Science (M.Sc.)

durchgeführt am:

Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

vorgelegt am: 08.05.2017

Betreuer an der Technischen Universität-München: Prof. Dr. Josef Kainz

Betreuung am Technologie- und Förderzentrum: Dr. Edgar Remmele

Dr. Klaus Thuneke

Dipl.-Ing. (FH) Georg Huber, M.Sc.

Danksagung

Bei Herrn Prof. Dr. Josef Kainz vom Wissenschaftszentrum Straubing möchte ich mich sehr herzlich für die Übernahme der Betreuung meiner Masterarbeit und seinem großen Interesse am Thema dieser Arbeit danken.

Ein großer Dank gilt besonders Herrn Dr. Edgar Remmele, Herrn Dr. Klaus Thuneke und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Georg Huber, M.Sc. vom Technologie- und Förderzentrum Straubing (TFZ) für die hervorragende fachliche Betreuung, die wertvollen Anregungen und die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Danken möchte ich auch Herrn Thomas Kieslinger, Herrn Sebastian Kirner und Herrn Fabian Nebel für ihre Unterstützung beim Messaufbau und den Messfahrten, sowie allen anderen Mitarbeitern des TFZ, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Masterarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt wurde. Alle verwendeten Passagen wurden kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Maximilian Frankl

Straubing, 08.05.2017

Abstract

In order to save air quality and human health, tailpipe emissions of cars are regulated by European legislation and measured on chassis dynamometers using driving-cycles.

Portable emission measurement systems (PEMS) showed higher emissions for cars in real-world-driving and confirmed, based on current air quality recording, the suspicion of big differences between the test-stand-cycles and driving under real traffic conditions.

Some studies detected lower tail pipe emissions for ethanol-containing fuel-blends compared to standard fuels using driving cycles as NEDC, WLTC or CADC in flexible-fuel-vehicles on a chassis dynamometer. Previous portable measurements led to the same conclusions.

The objective of this master thesis is to get additional real-world driving emission data of a flexible fuel vehicle using ethanol-blends. Therefore, an Audi A4 Avant 2.0 TFSI flexible fuel was tested under real-world driving conditions regulated by EU-ordinance 427/2016 and 646/2016 and operating with E5, E10 and E85. The CO-, NO_x-, CO_2- and PM-Emissions were measured by a portable emission measurement system. The data-processing was made by different methods.

Over the whole driving-distance the CO-, NO_x- and CO_2-Emissions decreased with the use of E85 compared to E5 or E10. Additional to the specific emission factors of the whole measurement-distance, the car showed lower CO-, NO_x- and CO_2-emissions in the three operating modes - urban, rural and motorway - by the use of E85. During the whole driving-distance and the operating modes the car indicated any significant differences using E5 or E10. The conclusions of this study are in one line to other investigations.

Hence biofuels may not only reduce greenhouse gas but as well tailpipe emissions. It's important to get more real-emission-data from the use of several ethanol-containing fuel-blends.

Zusammenfassung

Seit den 1960-ger Jahren unterliegen Abgase zum Schutz von Luftqualität und Gesundheit einer gesetzlichen Regulierung. Trotz stetig verschärfter EU-Abgasgrenzwerte konnte der Ausstoß von limitierten Emissionen wie Stickstoffoxiden oder Partikeln kaum reduziert werden. In diesem Zusammenhang werden v. a. die europäischen Typprüfungsverfahren für Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Prüfstandsbedingungen, die zu niedrigeren Emissionswerten als im realen Straßenbetrieb führen, stark kritisiert. Daher genügt es nicht die Emissionen nur am Prüfstand zu messen, sondern auch bei Realfahrten mit Hilfe portabler Emissionsmessgeräte. Neben gesundheitsschädlichen Emissionen gilt es auch Treibhausgase zu reduzieren. Dazu können Biokraftstoffe zu fossilen Otto- und Dieselkraftstoffen beigemischt werden. So wurden ab dem Jahr 2006 die Kraftstoffe E5, E10 und B7 eingeführt. Daneben existieren reine Biokraftstoffe die nur in speziell angepassten Fahrzeugen verwendet werden können. Zu diesen Fahrzeugen zählen sogenannte Flexible-Fuel-Vehicle (FFV), die mit einem Ethanolgehalt von bis zu 85 % im Ottokraftstoff betrieben werden können.

Bisherige Untersuchungen zum Einsatz von Ethanol-Kraftstoffen fanden überwiegend auf stationären Prüfständen statt. Mit Hilfe von FFV wurden bei Ethanol-Kraftstoffen mit hohem Ethanolgehalt bei stationären Messungen geringere Emissionen als bei Standardkraftstoffen gemessen. Zu Emissionen beim Einsatz im realen Fahrbetrieb gibt es jedoch nur wenige Untersuchungen.

Ziel dieser Masterarbeit ist es deshalb die Realemissionen von den Ethanol-Kraftstoffen E5, E10 und E85 mit einem Audi A4 Avant 2.0 TFSI flexible fuel unter Kalt- und Warmstartbedingungen im realen Straßenverkehr zu ermitteln und zu vergleichen. Als Emissionskomponenten wurden Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x), Kohlendioxid (CO_2) und Partikelmasse (PM) gemessen.

Die Messungen erfolgten nach den Vorgaben der EU-Verordnungen 427/2016 und 646/2016. Die Auswertung der Messdaten und Berechnung entfernungsspezifischer CO, NO_x- und CO_2-Emissionen wurde zum einen nach der in den Verordnungen vorgeschriebenen Moving-Average-Window-Methode durchgeführt. Zum anderen wurden die Ergebnisse zusätzlich über einen arithmetischen Mittelwert bestimmt. Die PM-Emissionen wurden über ein Berechnungsverfahren des Messgeräteherstellers berechnet. Darüber hinaus wurde ermittelt, welche Fahrsituationen besonderen Einfluss auf das Ergebnis nehmen.
Während einer Messfahrt muss das Fahrzeug nach EU-Verordnung 427/2016 in den drei Betriebsarten Stadt-, Landstraßen- und Autobahnbetrieb bewegt werden, die über Geschwindigkeitsintervalle definiert sind. Neben den entfernungsspezifischen Emissionen einer gesamten Fahrt wurden auch die Emissionen in den einzelnen Betriebsarten ermittelt und verglichen.

Beim Einsatz von E5 und E10 zeigten sich zwischen den beiden Kraftstoffen hinsichtlich ihrer Emissionen meist keine signifikanten Unterschiede, wohingegen der Betrieb mit E85 durchwegs geringere Emissionen hervorbrachte. So konnten bei E85 v.a. deutlich

geringere CO- und NO_x-Emissionen als bei E5 oder E10 gemessen werden. Die PM-Emissionen zeigten aufgrund großer Schwankungsbreiten keinen signifikanten Unterschied zwischen den Kraftstoffen. Tendenziell gingen aber auch hier aus dem Betrieb mit E85 die geringsten Emissionen hervor.

Die geringeren CO- und NO_x-Emissionen beim Einsatz von E85 konnten durch geringere Emissionsspitzenwerte erklärt werden, die bei allen Kraftstoffen einen großen Einfluss auf die Gesamtemission besitzen. Diese Spitzenwerte kamen bei allen Fahrten an den gleichen Streckenpunkten zu Stande und haben je nach Schadstoff unterschiedliche Ursachen. Bei den CO-Emissionen konnte ein absinkender Lambdawert als Ursache für die Spitzenwerte ermittelt werden. Für die NO_x-Emissionen war in diesen Situationen eine vergleichsweise hohe Motorlast ausschlaggebend. Emissionsunterschiede in den CO_2-Emissionen von E85 zu E5 und E10 ließen sich maßgeblich auf die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Kraftstoffe zurückführen.

Zudem wurden die Emissionen des Fahrzeugs in den Betriebsarten Stadt, Landstraße und Autobahn verglichen. Dabei konnten für den Autobahnbetrieb die höchsten und für den Landstraßenbetrieb die geringsten Emissionen festgestellt werden. Beim Einsatz von E85 waren die CO- und NO_x-Emissionen gegenüber E5 und E10 geringer, wohingegen zwischen den beiden letzten kein signifikanter Unterschied zu sehen war.

Die höheren CO- und NO_x-Emissionen im Autobahnbetrieb wurden auf ein höheres Drehzahlniveau gegenüber den beiden anderen Betriebsarten zurückgeführt. Bei den NO_x-Emissionen konnte zusätzlich eine länger anhaltende hohe Motorlast im Autobahnbetrieb als zusätzliche Ursache ermittelt werden. Die unterschiedlichen CO_2-Emissionen in den einzelnen Betriebsarten wurden als Folge von unterschiedlicher Fahrweise gesehen.

Über die ganze Fahrt und während der einzelnen Betriebsarten konnten bei diesem FFV im Betrieb mit einem hohen Ethanolgehalt von 85 % (E85) im Kraftstoff geringere CO-, NO_x- und CO_2-Emissionen festgestellt werden. Dadurch ließen sich an diesem Fahrzeug die in anderen Studien beobachteten Erkenntnisse zu Ethanolkraftstoffen im realen Straßenverkehr nachweisen.

Es lohnt sich daher noch weitere Ethanol-Kraftstoffe mit Ethanolgehalten zwischen 10 % und 85 % in diesem und anderen Fahrzeugen zu testen.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung II

Eidesstattliche Erklärung III

Abstract IV

Zusammenfassung V

Inhaltsverzeichnis VII

Abbildungsverzeichnis IX

Tabellenverzeichnis XI

Formelzeichen und Abkürzungen XII

1 Einleitung 17

2 Stand des Wissens 18

2.1 Ethanol-Kraftstoffe 18

2.2 Flexible-Fuel-Vehicle 21

2.3 Emissionsgesetzgebung und Prüfzyklen 23

2.4 Stationäre Emissionsmessung beim Einsatz von Ethanol-Kraftstoffen 29

2.5 Mobile Emissionsmessung beim Fahrzeugbetrieb mit Ethanol-Kraftstoffen 31

2.6 Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen 32

3 Problemstellung und Zielsetzung 33

4 Material und Methoden 34

4.1 Fahrzeug 34

4.2 Prüfkraftstoffe und Betankung des Fahrzeugs 35

4.3 Portables Emissionsmesssystem 37

4.3.1 Power Distribution and Control Module (PDCM) 38
4.3.2 Fuel Economy Meter (FEM) 40
4.3.3 NO/NO_2 Gas Analyzer (NO_x) 41
4.3.4 Micro Proportional Sampling System (MPS) 41
4.3.5 Particulate Filter System (PFS) 43
4.3.6 Continuous Particulate Monitor (CPM) 43
4.3.7 In-Vehicle Control Module (ICM) 44
4.3.8 Energieversorgung des PEMS 44

4.4 Messaufbau und Analyseweg 45

4.4.1 Messaufbau und Probenahme ... 45
4.4.2 Analyseweg ... 48

4.5 Messbedingungen ... 48

4.5.1 PEMS-Teststrecke ... 48
4.5.2 Fahrzeuganforderungen ... 52
4.5.3 Anforderungen während der Messfahrt ... 53
4.5.4 Messfahrten ... 54

4.6 Auswertung der Emissionsmessungen ... 55

4.6.1 Bestimmung der momentanen gasförmigen Masseemission ... 55
4.6.2 Partikelmasseemissionen ... 56
4.6.3 Moving-Average-Window-(MAW)-Methode ... 57
4.6.4 Mittelwertberechnung ... 59

5 Ergebnisse und Diskussion ... 60

5.1 Kalt- und Warmstartemissionen nach MAW- und MW-Methode ... 60

5.1.1 CO-Emissionen ... 60
5.1.2 NO_x-Emissionen ... 62
5.1.3 CO_2-Emissionen ... 63
5.1.4 PM-Emissionen ... 67
5.1.5 Vergleichende Darstellung der Emissionen aus den einzelnen Prüfkraftstoffen ... 68

5.2 Kumulierte Kalt- und Warmstartemissionen ... 69

5.2.1 CO-Emissionen ... 73
5.2.2 NO_x-Emissionen ... 76
5.2.3 CO_2-Emissionen ... 79

5.3 Kalt- und Warmstartemissionen in den einzelnen Betriebsarten ... 81

5.3.1 CO-Emissionen ... 82
5.3.2 NO_x-Emissionen ... 83
5.3.3 CO_2-Emissionen ... 85

5.4 Einordnung der Ergebnisse ... 87

6 Fazit und Ausblick ... 90

Literaturverzeichnis ... 92

Anhang ... 96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteile an der weltweiten Ethanolproduktion (nach [29]) 18

Abbildung 2: Software-Struktur einer Motorsteuerung für den Flex-Fuel-Betrieb [28] 21

Abbildung 3: Anpassungen wichtiger Bauteile an den Flex-Fuel-Betrieb [28] 22

Abbildung 4: Ottomotor mit Flex-Fuel-Betrieb (Flexible-Fuel-Komponenten: 2 Tankentlüftungsventil, 4 Hochdruckpumpe, 5 Ethanolsensor, 6 Kraftstoffverteilerrohr, 8 Hochdruckeinspritzventil, 17 Hochdrucksensor, 22 Motorsteuergerät, 28 Kraftstoffördermodul mit Niederdruck-Pumpe) [28] 23

Abbildung 5: Entwicklung der europäischen Abgasgrenzwerte [4] 24

Abbildung 6: Europäischer Prüfzyklus NEDC [4] 26

Abbildung 7: Europäischer CADC-Fahrzyklus [1] 27

Abbildung 8: Aufbau und Funktion eines Rollenprüfstands mit Constant-Volume-Sampling-System [2] 28

Abbildung 9: Testfahrzeug Audi A4 Avant 2.0 TFSI flexible-fuel 34

Abbildung 10: Analysatoren für gasförmige Emissionen (linker Turm) und Partikelemissionen (rechter Turm) 38

Abbildung 11: Power Distribution and Control Module (PDCM) 39

Abbildung 12: Webbrowser basierte Benutzeroberfläche des PEMS-Systems 39

Abbildung 13: Fuel Economy Meter (FEM) 40

Abbildung 14: NO/NO_2 Gas Analyzer (NO_x) 41

Abbildung 15: Micro Proportional Sampling System (MPS) 42

Abbildung 16: Remote-Diluter 42

Abbildung 17: Particulate Filter System (PFS) 43

Abbildung 18: Continuous Particulate Monitor (CPM) 44

Abbildung 19: Übersicht des Messaufbaus am Fahrzeugheck (Quelle: TFZ) 46

Abbildung 20: Probeentnahme für gasförmige Emissionen (Quelle: TFZ) 46

Abbildung 21: Probenentnahme für Partikelemissionen (Quelle: TFZ) 47

Abbildung 22: Übersicht Messaufbau im Fahrzeuginnenraum (Quelle: TFZ) 47

Abbildung 23: Höhenprofil der Messstrecke 50

Abbildung 24: Übersicht der PEMS-Teststrecke 51

Abbildung 25: Charakteristische CO_2-Kurve des Fahrzeugs [19] 58

Abbildung 26: Charakteristische CO2-Kurve des Fahrzeugs mit Stadt-, Landstraßen- und Autobahneinteilung [19] 58

Abbildung 27: CO-Emissionen eines FFV im Betrieb mit den Ethanol-Kraftstoffen E5, E10 und E85 60

Abbildung 28: NO_x- Emissionen eines FFV im Betrieb mit den Ethanol-Kraftstoffen E5, E10 und E85 62

Abbildung 29: CO_2- Emissionen eines FFV im Betrieb mit den Ethanol-Kraftstoffen E5, E10 und E85 63

Abbildung 30: PM- Emissionen eines FFV im Betrieb mit den Ethanol-Kraftstoffen E5, E10 und E85 67

Abbildung 31: Emissionsminderungspotential von E10 und E85 gegenüber E5..... 68

Abbildung 32: Beispiel für CO-Messwertverlauf über die Prüfstrecke..... 70

Abbildung 33: Beispiel für NO_x-Messwertverlauf über die Prüfstrecke 71

Abbildung 34: Beispiel für CO_2-Messwertverlauf über die Prüfstrecke 71

Abbildung 35: Kumulierte CO-Emissionsmasse über die Messwerte der CO-Konzentration 73

Abbildung 36: kumulierte CO-Emissionsmasse über die Prüfstrecke..... 74

Abbildung 37: Kumulierte NO_x-Emissionsmasse über die NO_x-Messwerte 76

Abbildung 38: Kumulierte NO_x-Emissionen über die Prüfstrecke..... 77

Abbildung 39: Kumulierte CO_2-Emissionsmasse über CO_2-Messwerte..... 79

Abbildung 40: Kumulierte CO_2-Emissionen über die Prüfstrecke 80

Abbildung 41: Vergleich der spezifischen CO-Emissionen der jeweiligen Betriebsart mit der spezifischen CO-Gesamtemission..... 82

Abbildung 42: Vergleich der spezifischen NO_x-Emissionen der jeweiligen Betriebsart mit der spezifischen NO_x -Gesamtemission..... 83

Abbildung 43: Vergleich der spezifischen CO_2-Emissionen der jeweiligen Betriebsart mit der spezifischen CO_2-Gesamtemission..... 85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aktuelle Abgasnormen für Ottomotoren [5] 25

Tabelle 2: Technische Daten Audi A4 Avant flexible fuel [2] [3] 35

Tabelle 3: Kraftstoffeigenschaften und durchschnittlich verbrauchte Stoffmengen an im Kaltstart 65

Tabelle 4: Kraftstoffeigenschaften und durchschnittlich verbrauchte Stoffmengen an im Warmstart.....66

Tabelle 5: Stöchiometrisches CO_2-Minderungspotential beim Einsatz von E85.....66

Formelzeichen und Abkürzungen

%	Prozent
°C	Grad Celcius
B7	Dieselkraftstoff mit maximal 7 % Biodieselgehalt
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CAN	Controller Area Network
CH_4	Methan
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CO_2	Kohlenstoffmonoxid
CPM	Continous Particulate Monitor
CVS	Constant-Volume-Sampling-System
DIN	Deutsche Industrienorm
E0	Ethanolkraftstoff ohne Ethanolbeimischung
E10	Ethanolkraftstoff mit maximal 5 % Ethanolgehalt
E5	Ethanolkraftstoff mit maximal 10 % Ethanolgehalt
E75	Ethanolkraftstoff mit maximal 75 % Ethanolgehalt
E85	Ethanolkraftstoff mit maximal 85 % Ethanolgehalt
ECE	Economic Commission for Europe
EG	Europäische Gemeinschaft
EN	Europäische Norm
EPA	Environmental Protection Agency
ETBE	Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether
EU	Europäische Union
EUDC	Extra-Urban-Driving-Cycle
EURO 4	Europäische Abgasstufe 4

EURO 5	Europäische Abgasstufe 5
EURO 6	Europäische Abgasstufe 6
FEM	Fuel Economy Meter
FFV	Flexible-Fuel-Vehicle
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
g/km	Gramm pro Kilometer
g/s	Gramm pro Sekunde
GPS	Global Positioning System
Hz	Hertz
ICM	In-Vehicle Control Modul
K	Grad Kelvin
k	Verdünnungsfaktor MPS
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
LAN	Local Area Network
Masse-%	Massenprozent
MAW	Moving-Average-Window-Methode
M_C	molare Masse von Kohlenstoff
M_{Filter}	Partikelmasse auf Filter
mg/km	Milligramm pro Kilometer
M_H	molare Masse von Wasserstoff
min	Minuten
min^{-1}	Umdrehungen pro Minute
M_K	molare Masse des Kraftstoffs
m_K	Masse des eingesetzten Kraftstoffs
M_O	molare Masse von Sauerstoff

M_P	reale Partikelmasse
MPS	Micro Proportional Sampling System
MW	Mittelwert-Methode
n_C	Stoffmenge an Kohlenstoff im Kraftstoff
NDIR	Nicht-dispersive Infrarotspektrometrie
NEDC	New European Driving Cycle
NEDC-Typ-I	New European Driving Cycle nach Typ I
NEDC-Typ-IV	New European Driving Cycle nach Typ IV
n_H	Stoffmenge an Wasserstoff im Kraftstoff
n_K	Stoffmenge des eingesetzten Kraftstoffs
NMHC	Nicht-Methan Kohlenwasserstoffe
NO	Stickstoffmonoxid
n_O	Stoffmenge an Sauerstoff im Kraftstoff
NO_2	Stickstoffdioxid
NO_x	Stickstoffoxide
OBDII	On-Board-Diagnose II
PDCM	Power Distribution and Control Module
PEMS	Portable Emission Measurement-System
PFS	Particulate Filter System
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
RDE	Real-Driving-Emission
ROZ	Research-Oktanzahl
s	Sekunden
TFZ	Technologie- und Förderzentrum
THC	gesamte Kohlenwasserstoffe

u. a.	unter anderem
UDC	Urban-Driving-Cycle
USA	United States of America
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche
V_K	Volumen des eingesetzten Kraftstoffs
Vol.-%	Volumenprozent
Wdh.	Wiederholung
WLAN	Wireless Local Area Network
WLTC	Wolrdwide harmonized light-duty-vehicle test cycle
z. B.	zum Beispiel
λ	Lambda-Wert
ρ_K	Dichte des eingesetzten Kraftstoffs

1 Einleitung

Viele Schadstoffemissionen unterliegen bereits seit einigen Jahrzehnten gesetzlichen Limitierungen. Dazu gehören auch die Abgasemissionen von Fahrzeugen, die erstmals in den 1960er Jahren in Kalifornien reglementiert wurden [28] [4]. Dies führte zur heutigen EPA-Gesetzgebung in den USA sowie entsprechenden Abgasvorschriften aller modernen Industrieländer wie den aktuellen EU-Gesetzgebungen [28] [4].

Auslöser für die Reglementierung der Abgase war die ansteigende Luftverschmutzung in den Städten und die damit verbundene Gesundheitsgefährdung [28]. Trotz einer stetigen Verschärfung der EU-Abgasgrenzwerte konnten jedoch gesundheitsschädliche Immissionen wie Stickstoffoxide oder Feinstaub bisher kaum gesenkt werden, sodass bereits seit einiger Zeit die aktuellen europäischen Prüfbedingungen für Fahrzeuge kritisiert werden [38]. Die Realemissionen der Fahrzeuge scheinen von den Prüfstandsemissionen stark abzuweichen und die Laborbedingungen zu unrealistisch für den realen Straßenverkehr. Daher wurde es für notwendig erachtet die Emissionen der Fahrzeuge auch im realen Fahrbetrieb mit Hilfe portabler Emissionsmessgeräte zu überprüfen [18].

Neben dem Gesundheitsschutz spielt auch der Klimaschutz bei Abgasemissionen von Fahrzeugen eine entscheidende Rolle. So wurde mit der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie 2009/28/EG das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2020 einen Anteil von erneuerbaren Energien im Verkehrssektor von 10 % zu erreichen und die Treibhausgasemissionen zu senken, was über das deutsche Biokraftstoffquotengesetz und die Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung umgesetzt wird [21] [7]. Infolgedessen wurden Ethanol und Biodiesel flächendeckend als Beimischung zu den konventionellen Otto- und Dieselkraftstoffen im Markt etabliert und seit dem Jahr 2006 die neuen Kraftstoffe E5 und E10 mit maximal 5 % bzw. 10 % Ethanolanteil sowie B7 mit höchstens 7 % Biodieselgehalt eingeführt [22] [17] [16]. Über die Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung wird eine klimaschonende Kraftstoffherstellung gewährleistet, sodass bei seiner Produktion gegenüber fossilen Kraftstoffen Treibhausgase eingespart werden können [7]. Zusätzlich zu den Biokraftstoffen wird auch die Elektromobilität als Möglichkeit zum Erreichen der verordneten Ziele gesehen, wobei diese derzeit noch mit Problemen wie zu geringen Reichweiten oder einer fehlenden Ladeinfrastruktur kämpft [26] [14].

Neben den neu eingeführten Kraftstoffen existieren bereits schon seit den 1990-ger Jahren Biokraftstoffe, die als Reinkraftstoff von speziell umgerüsteten Fahrzeugen genutzt werden können [21]. Darunter fallen auch sogenannte Flexible-Fuel-Vehicle (FFV) die mit einem Ethanolgehalt von bis zu 85 % im Ottokraftstoff fahren können [21].

Der Verbrennungsmotor wird sicher auch in den nächsten Jahren noch in Bestandsfahrzeugen und für bestimmte Anwendungen, wie Hybridfahrzeuge oder den Schwerlastverkehr, Marktbedeutung haben. Im Sinne von Gesundheits- und Klimaschutz sollte dieser aber so umweltfreundlich wie möglich werden. Dabei stellt sich die Frage, ob Biokraftstoffe nicht nur zu geringeren Treibhausgasen, sondern auch zu verringerten limitierten Abgasemissionen im realen Fahrbetrieb beitragen können.

2 Stand des Wissens

In den folgenden Abschnitten sollen zunächst Ethanol-Kraftstoffe und Flexible-Fuel-Vehicle (FFV) vorgestellt werden. Anschließend wird auf die derzeitige Abgasgesetzgebung im PKW-Bereich sowie auf derzeit angewandte Prüfstandszyklen eingegangen. Zuletzt werden stationäre Emissionsmessungen von Ethanolmischkraftstoffen und die dort gewonnen Ergebnisse vorgestellt. Im Anschluss wird über die Ergebnisse aus mobilen Messungen berichtet.

2.1 Ethanol-Kraftstoffe

In Brasilien kommen Ethanol-Kraftstoffe im Rahmen des Proalcool-Projekts bereits seit den 1970-ger Jahren, ursprünglich als Reaktion auf die steigenden Kraftstoffpreise während der ersten Ölkrise, zum Einsatz, wodurch Brasilien heute nach den USA zum zweitgrößten Ethanolproduzenten weltweit wurde und die flächendeckende Verwendung dieser Kraftstoffe begründete (siehe Abbildung 1)[8] [21].

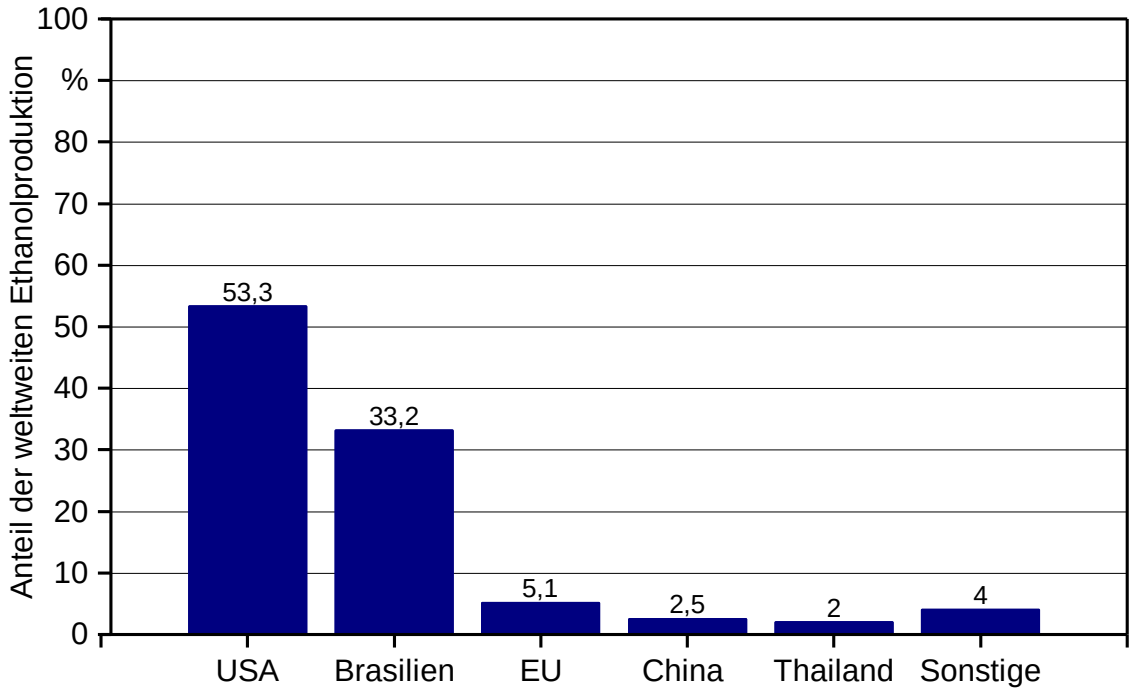


Abbildung 1: Anteile an der weltweiten Ethanolproduktion (nach [29])

Ethanol wird in der Regel aus zucker- und stärkehaltigen Pflanzen hergestellt [21]. Dazu zählen z.B. Zuckerrohr, das der brasilianischen Ethanolindustrie als Rohstoff dient, Mais (USA) oder Zuckerrüben und Getreide (Europa) [21].

Das Ethanol kommt in der Regel nicht als Reinkraftstoff, sondern als Beimischung zu fossilen Ottokraftstoffen zum Einsatz [21]. Die Bezeichnung von Ethanol-Kraftstoffen

setzt sich immer aus dem Buchstaben E für ethanolhaltig und einer Zahl zusammen, die den prozentualen Ethanolgehalt (Vol.-%) des Kraftstoffs beschreibt [21]. So handelt es sich z. B. bei E30 um einen ethanolhaltigen Kraftstoff mit 30 Vol.-% Ethanolgehalt.

Die Beimischungsquote in Ottokraftstoffen stieg in Brasilien von 4,5 Vol.-% im Jahr 1977 auf heute bis zu 24 Vol.-% im E24-Kraftstoff an [8] [28]. 90 % der brasilianischen Neuwagen sind Flexible-Fuel-Vehicle (FFV), die teils auch mit E100-Kraftstoff betrieben werden [8].

In den USA werden dem Ottokraftstoff seit 1978 bis zu 10 Vol.-% Ethanol beigemengt und der Kraftstoff E15 wurde durch die US-EPA 2011 auf den Weg gebracht [35]. Auch in den USA steigt die Zahl der FFV stetig an [35].

Durch die EU-Biokraftstoffrichtlinie 2003/30/EG und die darin veranlagte Biokraftstoffquote wurden auch in Europa Ethanol-Kraftstoffe als neue Ottokraftstoffe im Markt etabliert [21]. Das Ziel lag hierbei u. a. dabei, klimaschonendere Kraftstoffe zu verwenden, bei deren Verbrennung und Herstellung weniger Kohlenstoffdioxid als bei fossilen Kraftstoffen entsteht [21]. Infolgedessen kamen in Deutschland durch das Biokraftstoffquotengesetz ab dem Jahr 2006 die neuen Ottokraftstoffe E5 und E10 mit maximal 5 % bzw. 10 % Ethanolanteil auf den Markt [21] [22]. Zusätzlich ist auch E85-Kraftstoff erhältlich, der nur von Flexibel-Fuel-Vehicles getankt werden kann [28]. 2015 wurden rund 1,17 Mio. t an Ethanol für die Kraftstoffbeimischung in Deutschland verwendet, was zum Großteil auf die Produktion von rund 15 Mio. t E5-Kraftstoff entfiel [9]. Die Nachfrage nach E10 ist seit seiner Einführung verhalten und sank nach kurzem Aufschwung von rund 2,8 Mio. t 2014 auf rund 2,5 Mio. t im Jahr 2015 [9]. Der deutlichste Rückgang ist bei E85 zu verzeichnen, dessen Nachfrage innerhalb eines Jahres von rund 10.000 t auf rund 6.800 t im Jahr 2015 stark zurückgegangen ist und an Tankstellen aufgrund von Absatzschwierigkeiten in Folge einer erhöhten Besteuerung seit dem 01.01.2016 kaum noch angeboten wird [9]. Neben den Ethanol-Kraftstoffen wird Ethanol im Kraftstoffadditiv Ethyl-tertiärbutylether (ETBE) verwendet [4].

Für eine gleichbleibende Qualität entsprechen die in Deutschland angebotenen Ottokraftstoffe E5 und E10 der DIN EN 228 und E85 der DIN 51625 [16] [15]. Darin werden u. a. Anforderungen an den Ethanolgehalt im Kraftstoff gestellt, wobei dieser für E5 höchstens 5 Vol.-% sowie für E10 mehr als 5 Vol.-% und maximal 10 Vol.-% beträgt. Bei E85-Kraftstoff wird zwischen A- und B-Qualität unterschieden. So liegt der Ethanolgehalt vom 1. Mai bis zum 30. September zwischen 75 Vol.-% und 86 Vol.-% (A-Qualität) und vom 1. Oktober bis zum 30. April zwischen 70 Vol.-% und 80 Vol.-% (B-Qualität). [16] [15]

Eigenschaften von Alkoholkraftstoffen

Ethanol-Kraftstoffe gehören zu den Alkoholkraftstoffen, die im Vergleich zu konventionellen, fossilen Ottokraftstoffen wesentliche Unterschiede in ihren Eigenschaften besitzen [4].

Laut MENRAD et al. (1982) [27] und BASSHYSEN et al. (2013) [4] unterscheiden sie sich bereits in ihrer molekularen Zusammensetzung. So besitzen Alkoholkraftstoffe gegenüber Benzin einen geringeren Kohlenstoff- und einen höheren Sauerstoffgehalt. Dies führt zu einem geringeren Verbrennungsluftbedarf und einem geringeren Heizwert der Alkohole und damit zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch gegenüber dem Benzinbetrieb. [27] [4]

Beide Kraftstoffe unterscheiden sich zudem in ihren Verdampfungsenthalpien. Diese liegen bei den Alkoholen deutlich über denen von Benzinen, was zu einer Absenkung der Verdichtungsend- und Verbrennungstemperatur führt. Dadurch wird das innermotorische Temperaturgefälle reduziert, was den thermischen Wirkungsgrad des Motors erhöht, da sich der Verbrennungsprozess dem isochoren Vergleichsprozess stärker als beim Benzinbetrieb annähert. Zugleich hat die hohe Verdampfungsenthalpie auch nachteilige Folgen hinsichtlich des Kaltstartverhaltens. Um ein zündfähiges Gemisch zu erzeugen, muss genau diese Verdampfungswärme aufgebracht werden, was bei sehr tiefen Temperaturen für die Alkohole daher schwieriger ist als für herkömmliche Ottokraftstoffe. [27] [4] [5]

Grundsätzlich ist die Spannweite zwischen oberer und unterer Zündgrenze bei Alkoholen größer als bei Benzinen. Das bedeutet, dass sich sowohl sehr reiche als auch sehr magere Alkoholgemische gut entzünden lassen. Allgemein wurde festgestellt, dass sich mit Alkoholkraftstoffen betriebene Motoren v. a. in Teillast sehr gut bei hohen Luftüberschüssen betreiben lassen. [27] [4] [5]

Alkoholkraftstoffe besitzen gegenüber Benzinen höhere Oktanzahlen. Dies führt zu erhöhter Klopffestigkeit, welche eine stärkere Verdichtung und damit eine Leistungssteigerung des Motors ermöglicht. [27] [4] [5]

Besonders Ethanol-Kraftstoffe besitzen sehr hygroskopische Eigenschaften, wobei diese mit steigendem Ethanolgehalt im Kraftstoff zunehmen. Daher wird beispielsweise der Wassergehalt von E85 in der DIN 51625 auf maximal 0,3 Masse-% beschränkt. [15]

Mit steigendem Ethanolgehalt nimmt die Neigung zur Entmischung der Kraftstoffkomponenten bei sinkender Temperatur stark zu. [27]

Zudem neigen Alkoholkraftstoffe zu einer höheren Korrosivität als herkömmliche Ottokraftstoffe. [27]

Um einen Ottomotor mit Alkoholkraftstoffen betreiben und dessen Vorteile nutzen zu können, müssen die Fahrzeuge bei höheren Alkoholgehalten oft Anpassungen unterzogen werden [28] [5]. Bei Ethanol-Kraftstoffen werden diese Fahrzeuge als Flexible-Fuel-Vehicle (FFV) bezeichnet. [28]

2.2 Flexible-Fuel-Vehicle

Bei den Flexible-Fuel-Vehicles handelt es sich laut REIF et al. (2014) [28] um Fahrzeuge die mit einem beliebigen Mischungsverhältnis aus Ethanol und Benzin zwischen zwei Grenzen betrieben werden können. Sie besitzen dafür eine spezielle Anpassung, die es ihnen ermöglicht sich an unterschiedliche Ethanolgehalte im Kraftstoff anzupassen. Dabei muss das Fahrzeug zum einen unterschiedliche Kraftstoffe erkennen und über seine Steuerung darauf reagieren können, zum anderen müssen die einzelnen Komponenten auf den Betrieb mit hohen Ethanolanteilen im Kraftstoff abgestimmt sein. [28]

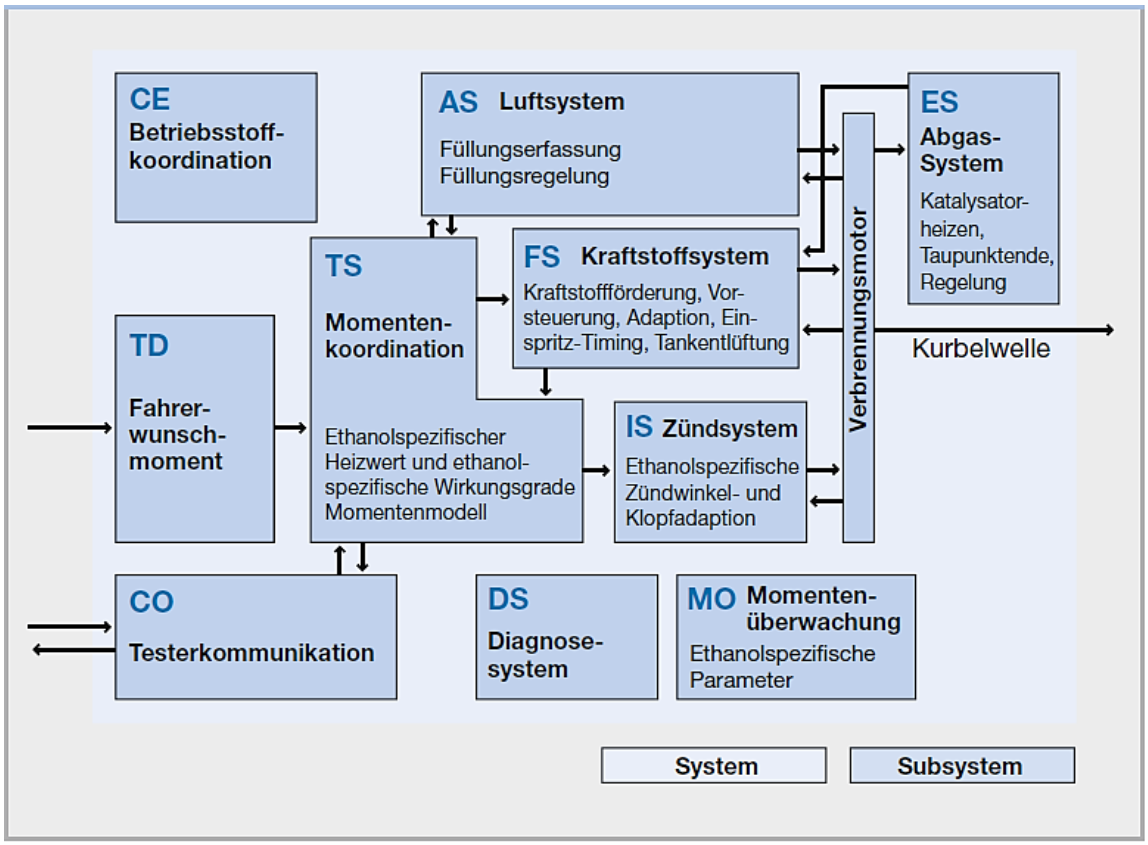


Abbildung 2: Software-Struktur einer Motorsteuerung für den Flex-Fuel-Betrieb [28]

Wie Abbildung 2 zeigt, müssen vom Motorsteuergerät je nach Ethanolgehalt des Kraftstoffs zahlreiche Parameter verändert werden. Da Kraftstoffe mit hohen Ethanolgehalten geringere Heizwerte als herkömmliche Ottokraftstoffe besitzen, müssen vom Kraftstoffsystem größere Kraftstoffmengen bereitgestellt werden und die Einspritzzeiten verlängert, sowie die Einspritzmengen erhöht werden. Neben dem Kraftstoff werden auch die Luftmenge variabel angepasst sowie die Zündzeiten verändert. Aufgrund der höheren Klopffestigkeit des Ethanols muss die Zündung gegenüber herkömmlichen Ottokraftstoffen Richtung früh verstellt werden, was besonders bei Volllast zutrifft. Bei besonders tiefen Temperaturen verfügen FFV über spezielle Kaltstartstrategien wie elektrisch Zusatzheizungen, um den Kraftstoff vorzuwärmen und so ein verdampfbares Luft-Kraftstoffgemisch zu erzeugen. [28]

Zudem wurden auch die verwendeten Materialien an die erhöhte Korrosionsneigung von Ethanol angepasst. Dazu zählen alle kraftstoffführenden Teile wie Kraftstoffleitungen, Pumpen oder Injektoren. Für den Flexible-Fuel-Betrieb kommen hier widerstandsfähigere Oberflächenbeschichtungen, Legierungen, Kunststoff- und Gummiteile zum Einsatz. Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die gängigsten geänderten Teile. [28]

Komponente	Bild	Anpassung
Kraftstoff-Fördermodul		Kraftstoff-Pumpe für E85 oder E100, isolierte elektrische Verbindungen, Tankstandsgeber ethanolfest
Druckregler		Ethanolfeste Ausführung
Kraftstoff-Rail		Ethanolfeste Ausführung
Saugrohr-Einspritzventil		Erweiterter Zumessbereich
Hochdruck-Einspritzventil		Edelstahl-Ausführung, angepasster Zumessbereich
Hochdruck-Pumpe		Edelstahl-Ausführung, angepasster Zumessbereich

Abbildung 3: Anpassungen wichtiger Bauteile an den Flex-Fuel-Betrieb [28]

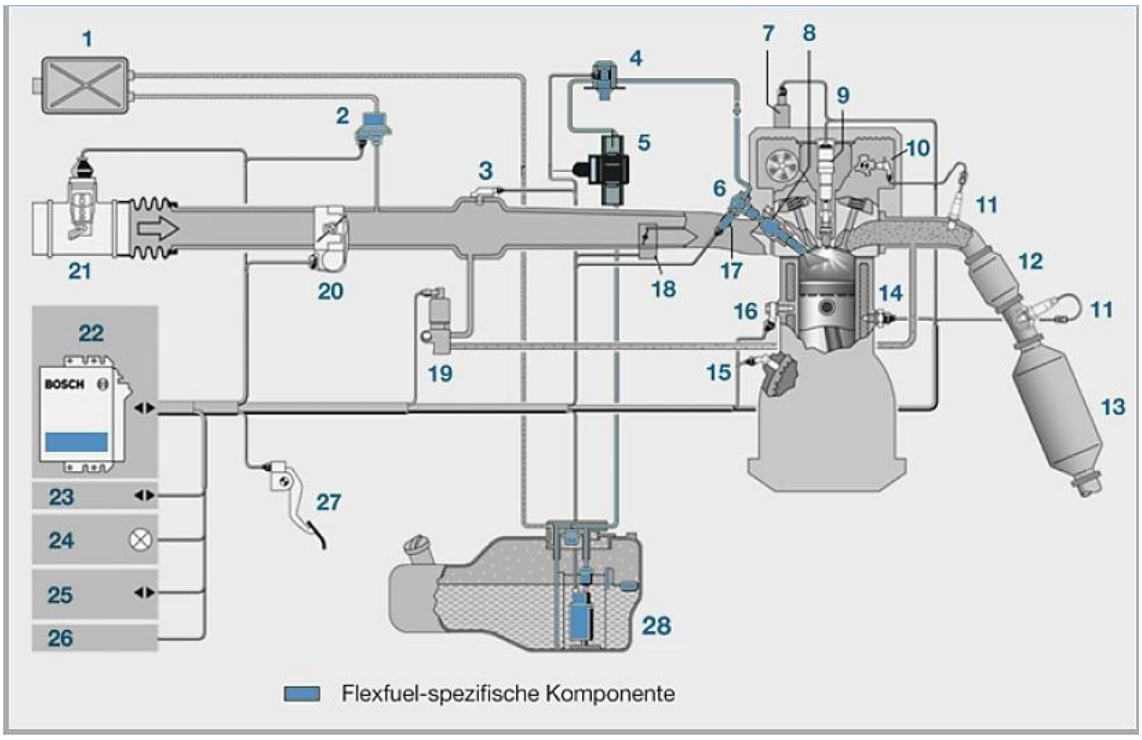


Abbildung 4: Ottomotor mit Flex-Fuel-Betrieb (Flexible-Fuel-Komponenten: 2 Tankentlüftungsventil, 4 Hochdruckpumpe, 5 Ethanolsensor, 6 Kraftstoffverteilerrohr, 8 Hochdruckeinspritzventil, 17 Hochdrucksensor, 22 Motorsteuergerät, 28 Kraftstoffördermodul mit Niederdruck-Pumpe) [28]

Zur Bestimmung des Ethanolgehalts kommt in den meisten Fällen ein dielektrischer oder optischer Sensor zum Einsatz der vor der Hochdruckpumpe angebracht ist (siehe Abbildung 4). [28]

Im Laufe des Fahrbetriebs wird ein Teil des Kraftstoffs in das Motoröl eingetragen, was zu einer veränderten Viskosität und damit zu kürzeren Motorölwechselintervallen führt. [27] [28]

Derzeit werden in Europa keine Flexible-Fuel-Vehicles als Neuwagen angeboten. Bis zum Jahr 2014 waren u. a. bei Audi, Bentley, Dacia, Ford, Opel, Peugeot, Renault, Saab und Volvo dementsprechende Modelle erhältlich. Der größte Markt für FFVs besteht derzeit in Brasilien, wo v. a. Volkswagen verschiedene Modelle anbietet. [8]

2.3 Emissionsgesetzgebung und Prüfzyklen

In nahezu allen Industrieländern der Welt werden Abgasemissionen gesetzlich limitiert. Innerhalb Europas erfolgte dies erstmals 1971 durch die ECE-R15/00 mit der die ersten Grenzwerte für CO- und HC-Emissionen definiert wurden. 1992 wurden mit der Einführung des EURO-1-Standards die heute geltenden EURO-5- und EURO-6-Abgasnormen

begründet. Seit den ersten Emissionsgesetzgebungen in den 70-ger Jahren wurden die Emissionen immer weiter begrenzt (siehe Abbildung 5). [4] [5]

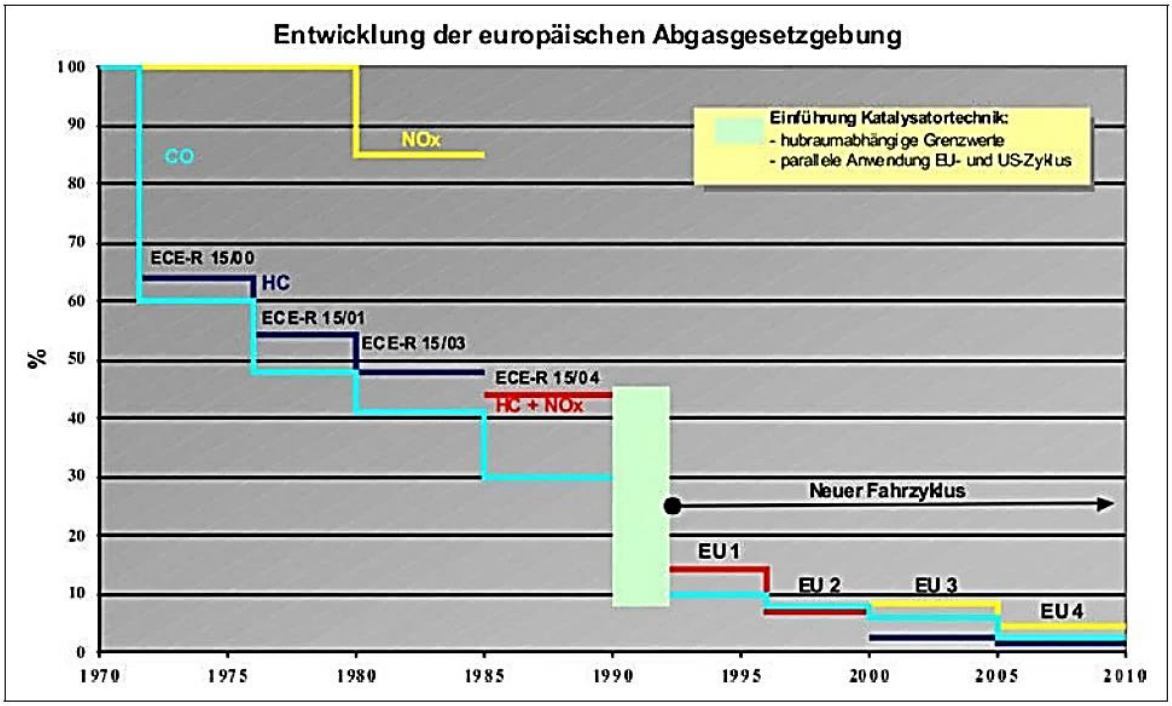


Abbildung 5: Entwicklung der europäischen Abgasgrenzwerte [4]

In Tabelle 1 sind die aktuellen Grenzwerte für Fahrzeuge mit Ottomotor zu sehen.

Tabelle 1: Aktuelle Abgasnormen für Ottomotoren [5]

	Masse des-Kohlen-monoxid (CO) [mg/km]	Masse der gesamten Kohlen-wasserstoffe (THC) [mg/km]	Masse der Nicht-Methan-Kohlen-wasserstoffe (NMHC) [mg/km]	Masse der Stickstoffoxide (NO_x) [mg/km]	Partikelmasse (PM) [mg/km]
EURO 5	1.000	100	68	60	5
EURO 6	1.000	100	68	60	5

Die Einhaltung der Grenzwerte wird mit Hilfe der Typzulassungs- und der Serienprüfung sowie der Feldüberwachung und der Abgasuntersuchung kontrolliert, wobei die ersten drei Prüfungen den Fahrzeughersteller und die letzte den Fahrzeughalter betreffen. Bei den ersten drei Untersuchungen wird mit dem Fahrzeug auf einem Rollenprüfstand ein festgelegter Zyklus unter genau definierten und gleichbleibenden Bedingungen abgefahren, bei dem die Grenzwerte eingehalten werden müssen. [28]

In der EU handelt es sich dabei um den New European Driving Cycle (NEDC), der mehrere Typen besitzt. Die wichtigsten sind der Typ-I-Test bei 20 °C bis 30 °C Umgebungstemperatur, sowie der Typ-VI-Test der bei einer Umgebungstemperatur von 7 °C durchgeführt wird und zur Überprüfung der CO- und HC-Emissionen unter besonderen Kaltstartbedingungen dient. Der NEDC setzt sich aus einem Stadt- und einem Überlandteil zusammen, wobei der Stadtteil (ECE) aus einer viermaligen Wiederholung des Urban-Driving-Cycle (UDC) besteht. Der Überlandteil wird als Extra-Urban-Driving-Cycle (EUDC) bezeichnet. Wie in Abbildung 6 zu sehen, beginnt die Fahrt im ECE und endet im EUDC. Während der insgesamt 1.180 s langen Testfahrt erreicht das Fahrzeug eine mittlere Geschwindigkeit von 33,6 km/h sowie eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h und legt rund 11,2 km zurück. [28][4]

Die Testbedingungen wurden in den letzten Jahren immer wieder als zu unrealistisch kritisiert, da die Anforderungen im Vergleich zum realen Straßenverkehr zu gering sind und nur ein Teil der dort vorherrschenden Fahrsituationen geprüft wird. [32][11]

Zudem konnten bestimmte Schadstoffe wie Stickstoffoxide oder Feinstaub durch die stetig verschärften Grenzwerte nicht ausreichend reduziert werden, um vor allem die Luftqualität in Städten zu verbessern [5]. Die Stickstoffoxid- und Feinstaubproblematik betrifft besonders Dieselfahrzeuge [5]. Doch auch Fahrzeuge mit Ottomotor weisen bei Direkteinspritzung einen vermehrten Partikelausstoß auf, wobei es sich dabei meist um Partikelgrößen kleiner 2,5 µm handelt, die sich als besonders gesundheitsschädlich erwiesen haben [5]. Besonders problematisch ist hier die Partikelanzahl, die deshalb in der Abgasstufe EURO 6 auf $6x10^{11}$ Partikel/km beschränkt wird [5].

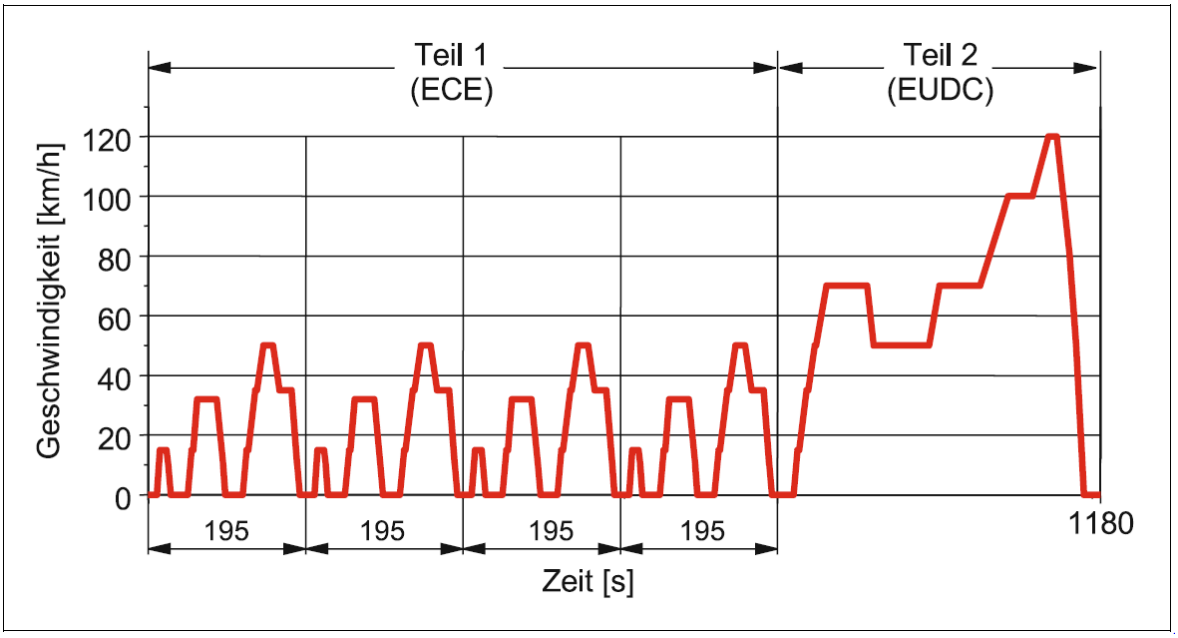


Abbildung 6: Europäischer Prüfzyklus NEDC [4]

Aufgrund dieser Tatsachen wurde im ersten Schritt von 2009 bis 2014 der Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle, kurz WLTC, als neuer Real-Driving-Cycle entwickelt, der den NEDC als Prüfzyklus ablöst. Dazu wurden von mehr als 400 Fahrzeugen, u. a. in der EU und den USA, mittels Dataloggern reale Fahrdaten gesammelt und ausgewertet. Der Zyklus umfasst die vier Phasen Low, Medium, High und Extra-High, die nacheinander innerhalb von 1.800 s und einer Fahrstrecke von rund 23,3 km am Rollenprüfstand durchfahren werden, wobei sich die Höchst- und Durchschnittsgeschwindigkeit von Phase zu Phase erhöht. Im Vergleich zum NEDC wird der Zyklus an das zu vermessende Fahrzeug angepasst, indem es nach seiner Leistungsdichte in eine von drei Klassen einsortiert wird. Je nach Klasse werden Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit angepasst, sowie teils Phasen weggelassen. Der WLTC enthält durch die Entwicklung aus den Daten zu realen Fahrsituationen eine realitätsnähere Fahrdynamik als der NEDC. Zudem wird mit 46,5 km/h eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit erreicht und nicht nur bis auf 120 km/h, sondern auf bis zu 131,3 km/h beschleunigt. [32]

Neben NEDC und WLTC existiert mit dem Common Artemis Driving Cycle, kurz CADC, ein weiterer Prüfzyklus, der aus dem von der EU-Kommission initiierten ARTEMIS-Projekt (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) hervorging. Wie beim WLTC handelt es sich bei diesem ebenfalls um einen sogenannten Real-Driving-Cycle, der anhand von aufgezeichneten Daten aus dem realen Straßenbetrieb von 77 PKW auf europäischen Straßen entwickelt wurde. Der CADC besteht aus den drei Teilen Stadt, Landstraße und Autobahn, die nacheinander innerhalb von 3.068 s am Prüfstand durchfahren werden und zusammen eine Strecke von rund 50,5 km ergeben, wobei es für den Autobahnteil eine Variante mit 130 km/h und eine Variante mit 150 km/h als Höchstgeschwindigkeit gibt. Landstraßen- und Autobahnteil enthalten am Anfang und am Ende Abschnitte die einem Stadtbetrieb des Fahrzeugs

entsprechen und deshalb bei der Auswertung abgeschnitten und als Konditionierungsphase verstanden werden. Durch diese Vorkonditionierung wird der CADC als Warmstartzyklus und die beiden anderen Prüfzyklen als Kaltstartzyklus bezeichnet. [1]

Im Vergleich mit NEDC und WLTC kommt der CADC der Realität am nächsten. Er wird daher gerne für Forschungszwecke verwendet, soll aber in keiner zukünftigen Gesetzgebung Anwendung finden. [32]

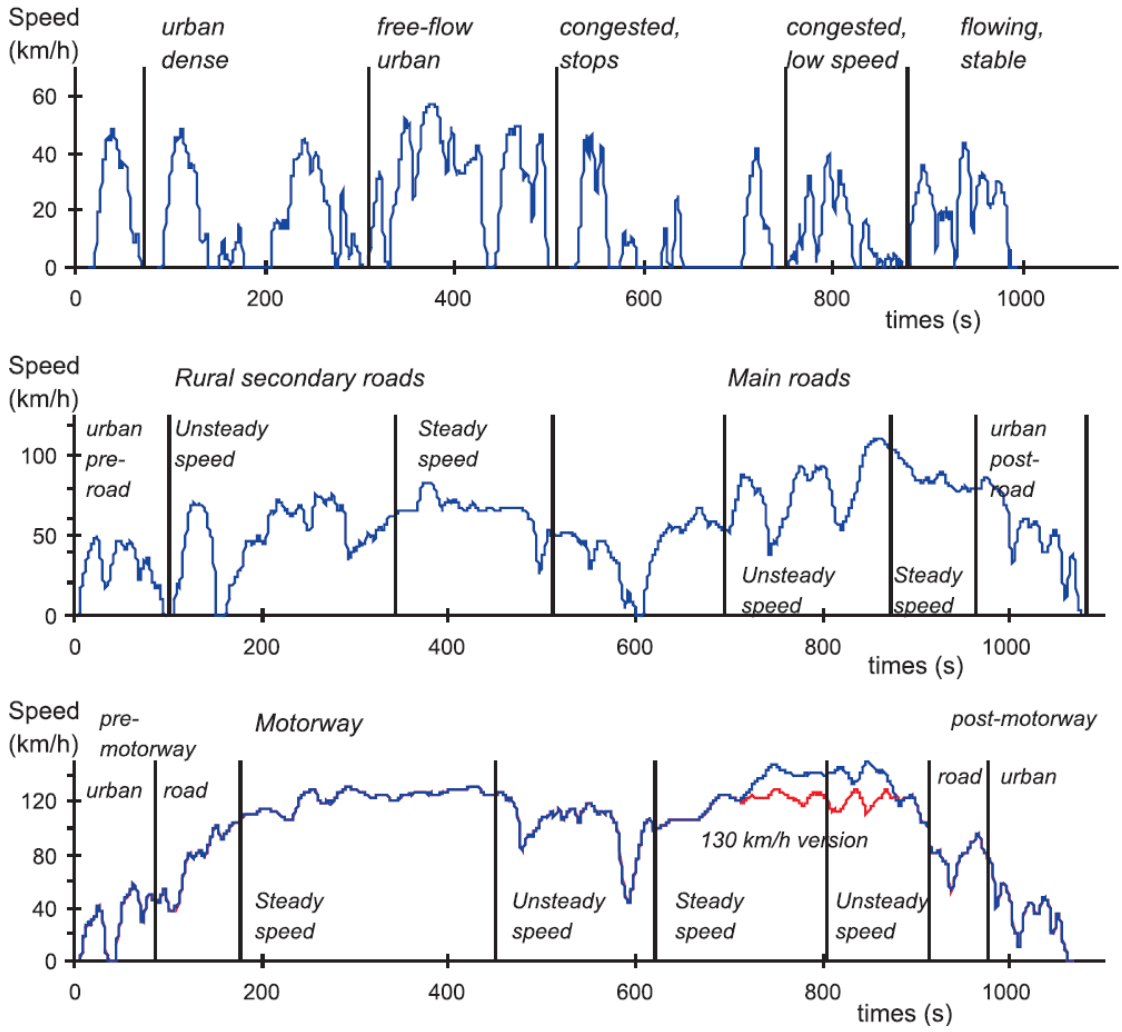


Abbildung 7: Europäischer CADC-Fahrzyklus [1]

Bei allen stationären Messungen kommt ein Constant-Volume-Sampler-System (CVS) zum Einsatz, das in Abbildung 8 zu sehen ist. Dabei werden die vom Fahrzeug kommenden Abgase mittels Frischluft teilstromverdünnt und pro Zyklusphase in einen Gassack abgefüllt, dessen Inhalt nach der Messung mittels nicht-dispersiver Infrarotspektroskopie (CO, CO_2), Flammenionisationsdetektor (HC) und Chemilumineszenzdetektor (NO,NO_2) analysiert wird. [2]

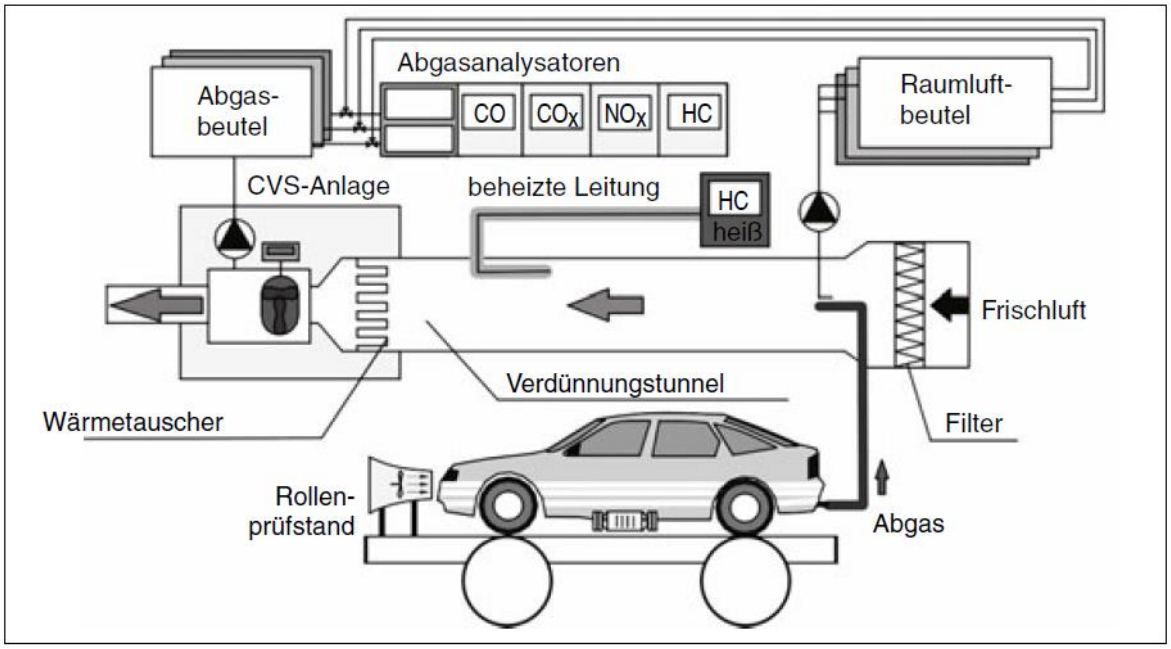


Abbildung 8: Aufbau und Funktion eines Rollenprüfstands mit Constant-Volume-Sampling-System [2]

Wie bereits erwähnt, wird der NEDC als Prüfzyklus vom WLTC abgelöst. Zudem müssen im nächsten Schritt ab dem 01. September 2017 alle Fahrzeuge, die neu auf den europäischen Markt gebracht werden sollen durch den Hersteller einer Realemissionsmessung mittels portabler Emissionsmessgeräte unterzogen werden. Das Fahrzeug darf dabei in der Realität nur das 2,1-fache des Grenzwertes überschreiten. Ab 2021 wird diese Regelung nochmals verschärft, wodurch nur noch eine 1,5-fache Überschreitung des Abgasgrenzwertes erlaubt ist. [18]

Mobile Messungen liefern den höchsten Realitätsbezug. Ihre Messbedingungen sind jedoch schwieriger reproduzierbar als Prüfstandsbedingungen. So zeigten sich bei FREY et al. (2003) [23] verschiedene Parameter, die die realen Emissionen beeinflussen. Hier werden u.a. Routenführung, Fahrstil, Tageszeit und Fahrzeugparameter als Ausschlag gebende Einflüsse genannt.

Um dabei die Messbedingungen so gut wie möglich zu standardisieren, wurde die bisherige EU-Verordnung 692/2008 zur Regelung der Typgenehmigung mit den EU-Verordnungen 427/2016 und 646/2016 entsprechend novelliert. Diese enthalten die genauen Anforderungen an Messgeräte, Messbedingungen und Messdatenauswertung für eine Realemissions-Messung. [19][20]

2.4 Stationäre Emissionsmessung beim Einsatz von Ethanol-Kraftstoffen

Bisherige Emissionsmessungen von Ethanol-Kraftstoffen erfolgten fast ausschließlich auf Rollenprüfständen unter Verwendung von NEDC, WLTC oder CADC.

DARDIOTIS et al. (2014) [11] verglichen die beiden Kraftstoffe E75 und E85 mit E5. Ziel war hierbei einerseits die CO, CO_2-, NO_x- und HC-Emissionen zweier Fahrzeuge unterschiedlicher Motorentechnik und Abgasstufen beim Betrieb mit den Kraftstoffmischungen zu testen. Anderseits sollten die Emissionen bei verschiedenen Fahrzyklen und Umgebungsbedingungen mit steigendem Ethanolgehalt bestimmt werden.
Es kamen dazu zwei FFV mit Saugrohr- und Direkteinspritzung der Abgasstufen EURO 4 und EURO 5 zum Einsatz. Mit den Kraftstoffmischungen wurde mit beiden Fahrzeugen der NEDC und der CADC am Rollenprüfstand durchlaufen. Die Untersuchungen fanden bei einer Umgebungstemperatur von -7 °C und +22 °C statt, wobei bei den tieferen Temperaturen E75 an Stelle von E85 verwendet wurde. Die Emissionen wurden mit Hilfe eines stationären CVS-Geräts aufgezeichnet. Zusätzlich wurden wichtige Fahrzeugdaten über die OBDII-Schnittstelle des jeweiligen Fahrzeugs aufgenommen.
E85 führte bei 22 °C während des NEDC bei beiden Fahrzeugen zu geringeren CO- und NO_x-Emissionen als mit E5. Bei einer Umgebungstemperatur von -7 °C stiegen mit dem Ethanolgehalt die CO- und NO_x-Emissionen im Falle des Saugrohreinspritzerfahrzeugs an, der PKW mit Direkteinspritzung jedoch zeigte hier nur erhöhte HC-Emissionen.
Beim CADC wurden beim Direkteinspritzerfahrzeug die CO-Emissionen im Betrieb mit E85 und 22 °C Umgebungstemperatur gegenüber E5 gesenkt. Die NO_x-Emissionen konnten bei diesem Fahrzeug nur im Land- und Autobahnabschnitt des CADC gesenkt werden. Das zweite FFV zeigte mit steigendem Ethanolgehalt erhöhte NO_x-Emissionen während des Landstraßen- und Autobahnabschnitts.
Die CO_2-Emissionen wurden bei beiden Fahrzeugen während beider Zyklen und Temperaturen durch einen steigenden Ethanolanteil im Kraftstoff verringert. Die HC-Emissionen blieben vom Ethanolgehalt unbeeinflusst.

SUAREZ-BERTOA et al. (2014) [33] testeten neun verschiedene Ethanol-Mischkraftstoffe auf ihre Emissionen. Dabei handelte es sich um die hydrierten und dehydrierten Mischungen E10, E15, E75 und E85 sowie um einen E5-Referenzkraftstoff. Ziel war es hier u. a. die regulierten (z. B. NO_x, CO) und unregulierten Emissionen der Kraftstoffmischungen mit dem E5-Kraftstoff zu vergleichen. Dazu wurde ein direkteinspritzender FFV-PKW der Abgasstufe EURO 5 mit den Kraftstoffen am Rollenprüfstand im NEDC und WLTC betrieben und die Emissionen mit einem stationären CVS-System aufgenommen. Die Messungen erfolgten bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen von -7 °C und +23 °C.
Allgemein wurden bei einer Umgebungstemperatur von -7 °C höhere Emissionen als im Falle der höheren Temperatur gemessen. Zwischen den hydrierten und anhydrierten Kraftstoffen konnte keine signifikanten Emissionsunterschiede festgestellt werden. E10 und E15 zeigten ähnliche Emissionen und unterschieden sich nicht signifikant von den Emissionen des E5-Kraftstoffs. E75 und E85 senkten die NO_x-Emissionen gegenüber E5. Dies traf v.a. für den WLTC und besonders für die kalten Umgebungsbedingungen

zu. Im Falle der CO-Emissionen waren die entgegengesetzten Effekte zu beobachten. Für die CO_2-Emissionen konnte kein eindeutiger Trend abgegeben werden.

URBANEK et al. (2009) 0 führten mit den Kraftstoffmischungen E5, E10 und E85 Langzeitemissionsmessungen von 8.000 bis 10.000 km am Rollenprüfstand durch. E0 diente als Referenz. Für die Messungen wurden fünf Fahrzeuge benutzt. Ein benzinbetriebener PKW mit Saugrohreinspritzung und zwei direkteinspritzende PKW mit Ottomotor und Turboaufladung wurden dazu mit E0, E5 und E10 geprüft. Zwei weitere FFV wurden mit E0, E5 und E85 betankt und getestet. Alle Fahrzeuge erfüllten die Abgasstufe EURO 4. Die Messungen erfolgten sowohl über den NEDC als auch über den CADC. Der NEDC wurde bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen von -7 °C (NEDC-Typ-IV) und +23 °C (NEDC-Typ-I) gefahren. Die Aufnahme der Emissionen erfolgte mittels stationärer CVS-Technik.
E5 und E10 konnten im Vergleich zu E0 die Emissionen kaum senken. Bei E85 konnte eine Zunahme von CO- und HC-Emissionen bei -7 °C festgestellt werden. Die CO_2-Emissionen wurden durch den Einsatz von E85 geringfügig gesenkt.

Eine ähnliche Untersuchung wurde von CLAIROTTE et al. (2012) [10] durchgeführt. Hier wurden ebenfalls E5, E10 und E85 an fünf Fahrzeugen getestet. Bei drei Fahrzeugen handelte es sich um saugrohreinspritzende PKW mit Ottomotor der Abgasstufe EURO 4. Die beiden anderen Fahrzeuge waren FFV der Abgasstufe EURO 4 bzw. EURO 5 mit Direkteinspritzung. Diese wurden wie bei URBANEK et.al. (2009) 0 mit E5 und E85 betankt, die drei normalen Benziner nur mit E5 und E10. Die Messungen wurden auch hier während eines NEDC und CADC vorgenommen. Die beiden FFV wurden nicht nur bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C, sondern auch bei -7 °C gemessen. Bei den kälteren Temperaturen kam E75 als Ersatz für E85 zum Einsatz. Die Emissionen wurden über ein CVS-System aufgenommen.
Wie bei URBANEK et.al. (2009) wurden hier bei E75 im Vergleich zu E5 höhere CO-Emissionen festgestellt. Bei 22 °C zeigten die beiden FFV im Betrieb mit E85 gegenüber E5 verringerte CO- und NO_x-Emissionen. Die CO_2-Emissionen wurden mit steigendem Ethanolgehalt bei allen Fahrzeugen gesenkt.

SHORT et al. (2012) [31] untersuchte 2008 u.a. die Partikelmasseemission beim Betrieb von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Ethanol-Kraftstoffen. Dabei wurden die PM-Emissionen von fünf Fahrzeugen mit Hilfe eines stationären Partikelfiltersystems aufgenommen. Bei den Fahrzeugen handelte es sich um drei Fahrzeuge mit einem saugrohreinspritzenden Ottomotor und zwei PKW mit direkteinspritzendem Ottomotor. Allgemein zeigten die Direkteinspritzer höhere PM-Emissionen als die Saugrohreinspritzer. Die Direkteinspritzer zeigten bei zunehmendem Ethanolgehalt eine PM-Emissionsminderung.

Zusammenfassend kann zu den Prüfstandsmessungen folgendes gesagt werden: Es wurden die Kraftstoffe sowohl in Fahrzeugen mit Saugrohr- und/oder Direkteinspritzung getestet. Dabei handelte es sich meist um FFV. Es wurden sowohl die Emissionen der gesetzlich regulierte Schadstoffe CO, NO_x und HC mittels stationärer CVS-Geräte als auch unregulierte Schadstoffe wie Formaldehyd oder Lachgas mit Hilfe eines FTIR erfasst und ausgewertet. Die Messungen wurden zur Erprobung des Kaltstartverhaltens in

der Regel bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Meist wurden Mischkraftstoffe mit hohem und niedrigem Ethanolanteil miteinander hinsichtlich ihrer Emissionen verglichen.
Allgemein konnte in vielen Untersuchungen mit steigendem Ethanolgehalt eine Emissionsminderung bestimmter Schadstoffe während des Zyklus nachgewiesen werden. So konnten in der Regel die CO_2- und NO_x-Emissionen gesenkt werden. Die CO- und HC-Emissionen stiegen mit höheren Ethanolanteilen bei kalten Umgebungsbedingungen. PM-Emissionen können durch einen höheren Ethanolgehalt im Kraftstoff gesenkt werden.

2.5 Mobile Emissionsmessung beim Fahrzeugbetrieb mit Ethanol-Kraftstoffen

Neben den Prüfstandsmessungen wurden vereinzelt Realemissionsmessungen zu Ethanolkraftstoffen durchgeführt.

ZHAI et al. (2013) [39] untersuchten die Emissionen von FFV auf dem Rollenprüfstand und bei einer Realemissionsfahrt in Lissabon. Zusätzlich wurden theoretische Emissionsberechnungen durchgeführt. Die RDE-Messung wurde mit einem Ford Focus Flexifuel 1.8 mit saugrohreinspritzendem Ottomotor durchgeführt. Dazu wurde das Fahrzeug mit E0 und E85 betrieben. Mit jedem Kraftstoff wurde zweimal ein innerstädtischer Rundkurs absolviert und dabei die CO_2-, CO- und NO_x-Emissionen mit einem PEMS aufgenommen. Zusätzlich wurden GPS-Daten, Fahrzeuggeschwindigkeit und Motordrehzahl aufgezeichnet. Auf Basis der PEMS-Daten und bei vorausgegangenen Untersuchungen erstellte Geschwindigkeitsprofile wurden Emissionsmodelle entwickelt, um für andere Fahrzeuge Realemissionen abschätzen zu können. Zusätzlich wurden am Rollenprüfstand zwei weitere Fahrzeuge vermessen. Bei dem einen Fahrzeug handelt es sich um einen Ford Taurus, bei dem anderen um einen Chevrolet Lumina. Beide wurden ebenfalls mit E0 und E85 betrieben. Neben den Emissionsmessungen wurde auch eine stöchiometrische CO_2-Emissionsberechnungen zu den beiden Kraftstoffen durchgeführt.
Bei den Messungen und der Berechnung wurden ähnliche CO_2-Werte für alle Kraftstoffe und Schadstoffe bestimmt. Für die Realemissionsmessung konnten für E85 geringere CO-Emissionen ermittelt werden.

HERNANDEZ et al. (2014) [25] untersuchten die Realemissionen von sechs Ethanol-Mischkraftstoffen bei Fahrten mit drei unterschiedlichen PKW im mexikanischen Monterrey. Die Emissionen wurden während der Fahrt mit Hilfe eines PEMS der Marke Snap On®, Modell AL293-001; Kenosha, WI, USA aufgezeichnet. Bei den drei Fahrzeugen handelte es sich um einen saugrohreinspritzenden VW Derby (Baujahr 2005) mit einem 1.8 l Ottomotor, einen Nissan Tsuru (Baujahr 2004) mit einem 1.6 l Ottomotor mit Saugrohreinspritzung sowie einen direkteinspritzenden Jeep Compass mit einem 2,4 l Ottomotor. Die beiden ersten Fahrzeuge verfügten über ein Handschaltgetriebe, der dritte Wagen über eine Automatik. Für die Ethanol-Blends und als E0-Kraftstoff dienten die in Mexiko verfügbaren Kraftstoffsorten Regular (ROZ 91, R) und Premium (ROZ 98, P). Daraus wurden durch Ethanolbeimischung die Blends E5R und E5P sowie E15R und

E15P hergestellt. Alle Emissionsmessungen fanden auf einer 16,8 km langen Route mit Stadt-, Landstraßen- und Autobahnanteil statt. Es wurden sowohl Kalt- als auch Warmstartmessungen durchgeführt. Auf einem Verkehrsübungsplatz wurden zusätzlich mit jedem Fahrzeug und Kraftstoff Fahrten bei einer konstanten Geschwindigkeit von 40 km/h durchgeführt. Pro Fahrzeug, Kraftstoff und Testart wurden fünf Wiederholungsmessungen durchgeführt.
Im Warmstart wurden geringere Emissionen als im Kaltstart festgestellt. E5 und E15 zeigten geringere CO_2-Emissionen als die E0-Kraftstoffe. E5 erzielte geringere CO_2-Emissionen als E15. Zwischen den CO-, NO_x- und HC-Emissionen von E0 und E5 konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Bei E15 wurden geringere HC- und NO_x-Emissionen gegenüber den anderen Kraftstoffen festgestellt. Zu den Emissionen konnte nur bei E15P-Kraftstoff eine eindeutige Emissionsminderung gegenüber den anderen Kraftstoffen festgestellt werden. Während der Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit konnten keine signifikanten Unterschiede für die CO_2-Emissionen bestimmt werden. Die CO-Emissionen konnten verglichen mit E0 am stärksten mit den E15-Blends reduziert werden. Auch die HC- und NO_x-Emissionen konnten reduziert werden. Blends mit dem Regular-Kraftstoff als Basiskomponente zeigten im Vergleich zu den Blends aus Premium-Kraftstoff höhere CO- und NO_x-Emissionen. Bei den HC-Emissionen stellte sich genau das Gegenteil ein.

2.6 Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen

Es wurden bereits einige Emissionsmessungen von ethanolhaltigen Ottokraftstoffen durchgeführt. Dabei wurden meist nur gasförmige Emissionen und vereinzelt auch Partikelemissionen untersucht. Dabei konnte bei einem steigenden Ethanolanteil im Kraftstoff eine Emissionsminderung beobachtet werden. Dies trifft v.a. auf die CO_2-, NO_x- und PM-Emissionen zu. Zudem wurden während des Kaltstarts bei sehr niedrigen Umgebungstemperaturen auch negative Auswirkungen eines hohen Ethanolgehalts auf die CO- und HC-Emissionen festgestellt. Neben den stationären Messungen wurden bereits vereinzelte mobile Messungen durchgeführt. Dabei konnten ähnliche Ergebnisse wie am Rollenprüfstand ermittelt werden. Es wurden für alle mobilen Messungen feste Messstrecken verwendet. Bei den Routen handelt es sich im Vergleich zu den Prüfstandzyklen um keine nach einheitlichen Vorgaben zusammengestellten Streckenverläufe.

3 Problemstellung und Zielsetzung

Bei den FFV wurden in den letzten Jahren hauptsächlich Prüfstandsmessungen mit unterschiedlichen Ethanolgehalten durchgeführt. Die Anzahl der Realemissionsmessungen mit derartigen Mischungen ist bisher sehr gering. Bei beiden Messarten ließen sich beim Einsatz von Kraftstoffen mit hohem Ethanolanteil geringere Emissionen feststellen.
Die Prüfstandsmessungen wurden mit allgemein gültigen Zyklen durchgeführt, wohingegen die Prüfstrecke bei den Realfahrten keiner Standardisierung unterlag. Da die gefahrene Route aber die Emissionen neben anderen Parametern maßgeblich beeinflusst (vgl. Kapitel 2.3), wird die Vergleichbarkeit von Messergebnissen unterschiedlicher Realemissionsuntersuchungen bei voneinander abweichenden Routen deutlich verschlechtert. Die EU-Verordnungen 427/2016 [19] und 646/2016 [20] ermöglichen genau diese bisher fehlende Standardisierung der Realemissionsmessung im PKW-Bereich.
Zusammenfassend lässt sich daher sagen, dass weiter Daten zu Realemissionen von Biokraftstoffen, im Speziellen von Ethanol, erhoben werden sollten. Dazu zählen die Emissionsaufnahme von Kohlenstoffmonoxid-, Kohlenstoffdioxid-, Stickstoffoxid-, Kohlenwasserstoff- und Partikelemissionen. Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen sollten diese ähnlich den Prüfstandsuntersuchungen unter den zum jetzigen Zeitpunkt gegebenen Vorgaben zur Standardisierung der Realemissionsmessung erfolgen.

Ziel dieser Masterarbeit ist es daher weitere Realemissionen eines FFV unter Verwendung von ethanolhaltigen Kraftstoffen zu erfassen. Dabei sollen die Realemissionen eines Audi A4 Avant 2.0 TFSI flexible fuel im Betrieb mit E5, E10 und E85 unter Kalt- und Warmstartbedingungen miteinander verglichen werden. Dazu sollen die CO, CO_2-, NO_x- sowie und PM-Emissionen auf einer ausgewählten Route im realen Straßenverkehr mit Hilfe eines portablen Emissionsmesssystems aufgezeichnet werden.

Im Anschluss an die Messung sollen die Rohdaten nach verschiedenen Methoden ausgewertet und so die entfernungsspezifischen Emissionen in g/km bestimmt werden. Dabei wird für die CO-, NO_x und CO_2-Emissionen die in der EU-Verordnung 427/2016 dargestellte Moving-Average-Window-Methode, sowie eine Berechnung des arithmetischen Mittelwerts verwendet. Die PM-Emissionen werden über ein Berechnungsverfahren des Messgeräteherstellers ermittelt.

Das Fahrzeug durchläuft während einer Messfahrt verschiedene Betriebsarten, die sich in Stadt-, Landstraßen-, und Autobahnbetrieb untergliedern lassen. Neben den Emissionen der gesamten Fahrt, sollen getrennt voneinander die Emissionen in den Betriebsarten betrachtet werden.

Zuletzt sollen Auffälligkeiten bei den Emissionswerten näher betrachtet werden, um Ursachen für ein unterschiedliches Emissionsverhalten des Fahrzeugs bei den verschiedenen Kraftstoffen zu suchen.

4 Material und Methoden

Im Folgenden werden die für die Untersuchungen verwendeten Materialien und Methoden beschrieben. Dabei werden zunächst Angaben zum Versuchsfahrzeug, den eingesetzten Kraftstoffen und den einzelnen Messgeräten gemacht. Im Anschluss werden der Messaufbau dargestellt und die Messbedingungen beschrieben. Im letzten Abschnitt erfolgt die Erläuterung der Auswertemethoden.

4.1 Fahrzeug

Die folgenden Messungen wurden an dem in Abbildung 9 dargestellten Audi A4 Avant 2.0 TFSI flexible-fuel durchgeführt. Tabelle 2 zeigt die technischen Fahrzeugdaten.

Quelle: TFZ

Abbildung 9: Testfahrzeug Audi A4 Avant 2.0 TFSI flexible-fuel

Tabelle 2: Technische Daten Audi A4 Avant flexible fuel [2] [3]

Technische Daten	
Typ:	Audi A4 Avant 2.0 TFSI flexible fuel
Karosserie:	5-türige Kombi-Limousine
Motor:	Reihen-Vierzylinder-Ottomotor, sequentielle Hochdruckdirekteinspritzung mit adaptiver Leerlauffüllungsregelung, Abgasturboaufladung, Ladeluftkühlung
Hubraum:	1984 cm^3
Leistung:	132 kW /4000-6000 min^{-1}
Max. Drehmoment:	320 Nm/1500-3900 min^{-1}
Getriebe:	6-Gang Handschaltgetriebe, vollsynchronisiert
Antrieb:	Frontantrieb
Abgasnachbehandlung:	Drei-Wege-Katalysator
Leergewicht (inkl. Fahrer 75 kg):	1570 kg
Zulässiges Gesamtgewicht:	2065 kg
Reifengröße:	225/55 R16 M+S
CO_2-Emissionen:	149 g/km (Super schwefelfrei ROZ 95) 144 g/km (Ethanol-Kraftstoff E85) (gemäß 692/2008)
Höchstgeschwindigkeit:	228 km/h
Abgasnorm	EURO 5
Kilometerstand zu Beginn der Messungen:	195.204 km
Erstzulassung:	04.08.2010

4.2 Prüfkraftstoffe und Betankung des Fahrzeugs

Für die Messung der Realemissionen wurden die Ethanol-Kraftstoffe E5, E10 und E85 verwendet.

Die Kraftstoffe E5 und E10 wurden an der gleichen Tankstelle und Zapfsäule entnommen. Da nicht alle zu vermessenden Kraftstoffe an einer Tankstelle zu bekommen waren, mussten E85 und die beiden anderen Kraftstoffe an unterschiedlichen Tankstellen entnommen werden.

Die Entnahme an der Tankstelle garantiert eine genormte Kraftstoffqualität nach DIN EN 228 bzw. DIN 51625. Um die Kraftstoffe noch genauer zu analysieren, wurde von allen Kraftstoffsorten Proben entnommen und im Labor auf folgende Kriterien hin untersucht:

- Aussehen (nach DIN 228)
- Dichte (15°C) (nach DIN EN ISO 12185)
- Ethanolgehalt (nach DIN EN ISO 22854)
- C-H-O-Verhältnis (nach DIN EN ISO 22854)
- Klopffestigkeit ROZ (nach DIN EN ISO 5164)
- Heizwert (nach DIN 51900)
- Wassergehalt (nach DIN EN 15489)

Alle Kraftstoffe entsprachen laut den Laboranalysen den Anforderungen der genannten Normen. Die genauen Analysenwerte sind in Anhang 1 dargestellt.

Es wurden alle Versuchsfahrten mit einem Kraftstoff durchgeführt und dann auf den nächsten Kraftstoff gewechselt. Um wirklich nur einen Kraftstoff und kein Kraftstoffgemisch zu testen, war es notwendig, dass sich im Kraftstoffsystem des Fahrzeugs nur der zu prüfende Kraftstoff befindet. Um dies sicherzustellen, musste das Kraftstoffsystem möglichst vollständig entleert werden. Da das Abpumpen aus dem Tank und ein Entleeren der Kraftstoffleitungen nicht ohne weiteres möglich war, musste das Kraftstoffsystem des Fahrzeugs mit dem neuen Kraftstoff gespült werden. Dazu wurde das Kraftstoffsystem leer gefahren bis laut Bordcomputerreichweite und Tankanzeige kein Kraftstoff mehr im System vorhanden war. Anschließend wurden bei E5 und E10 zunächst jeweils zehn Liter und bei E85 zunächst jeweils 15 Liter des neuen Kraftstoffs aus einem Kanister in den Tank eingefüllt. Danach wurde die Messstrecke abgefahren. Dabei wurde mit Hilfe des PEMS über die OBDII-Schnittstelle des Fahrzeugs der Wert des Ethanolsensors abgegriffen und dieser während der Fahrt beobachtet.

Während der Fahrt wurde über den Ethanolsensor beobachtet, ab wann sich der Ethanolgehalt im Normbereich des neuen Kraftstoffes befindet. Es wurden solange immer wieder zehn bzw. 15 Liter nachgetankt und die Messstrecke abgefahren, bis sich der Wert im Normbereich des neuen Kraftstoffs befand und dieser Wert dauerhaft stabil blieb. Nach den Spülfahrten wurde das Fahrzeug für die PEMS-Messungen vollgetankt. Um eine ausreichende Menge für alle PEMS-Messungen eines Kraftstoffs zur Verfügung zu haben, wurden zusätzlich geeignete Kraftstoffkanister befüllt.

4.3 Portables Emissionsmesssystem

Für die Erfassung der Realemissionen wurde das portable Emissionsmesssystem Semtech Ecostar Plus der Firma Sensors verwendet. Abbildung 10 zeigt die Messgeräte. Die Messeinrichtung besteht aus zwei Teilen. Der linke Messturm beinhaltet das zentrale Steuerungs- und Versorgungsmodul sowie die für die Erfassung der gasförmigen Abgaskomponenten notwendigen Einzelkomponenten:

- NO/NO_2 Gas Analyzer (NO_x)
- Fuel Economy Meter (FEM)
- Power Distribution and Control Module (PDCM)

Im rechten Turm ist die Messtechnik für die Partikelemissionserfassung untergebracht:

- Micro Proportional Sampling System (MPS)
- Continuous Particulate Monitor (CPM)
- Particulate Filter System (PFS)

Neben den Emissionen werden über die OBDII-Schnittstelle des Fahrzeugs bei allen Messungen CAN-Daten wie Kühlmitteltemperatur oder Ethanolgehalt des Kraftstoffes kontinuierlich erfasst. Dies erfolgt mittels folgender Komponenten:

- In Vehicle Control Module (ICM)
- OBDII-Kabel

Eine Wettersonde versorgt das Messsystem mit Daten zu Luftfeuchte und Außentemperatur. Ein GPS-Modul erfasst Position und Geschwindigkeit des Fahrzeugs. In den folgenden Abschnitten werden Aufbau und Funktionsweise der einzelnen Messkomponenten näher erläutert.

Alle Daten wurden mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet.

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 10: Analysatoren für gasförmige Emissionen (linker Turm) und Partikelemissionen (rechter Turm)

4.3.1 Power Distribution and Control Module (PDCM)

Das PDCM stellt das zentrale Steuerungs-, Versorgungs- und Datenerfassungsmodul dar (siehe Abbildung 11). Das Gerät verfügt über zwei 12 V Gleichstromeingänge, die den gleichzeitigen Anschluss eines 230 V Netzteils und einer 12 V Batterie ermöglichen. Beide Energiequellen können parallel genutzt werden, wobei das Gerät immer die Energiequelle mit der höheren Spannung verwendet. Fällt eine der beiden Quellen aus, wird ohne Unterbrechung auf die andere Quelle umgeschaltet. Das Gerät enthält sieben Anschlüsse für die einzelnen Messgeräte. Am PDCM sind alle Gas- und Partikelanalysatoren angeschlossen. Über diese Verbindung werden alle Geräte mit Strom versorgt und Daten auf das PDCM übertragen. Die auf das PDCM übertragenen Daten können im Falle einer Messung über den integrierten Recorder aufgezeichnet werden. Über LAN-Buchsen und einen WLAN-Hotspot können mobile Endgeräte wie Notebooks, Smartphones oder Tablets mit dem PDCM verbunden werden. Über die in Abbildung 12 gezeigte webbrowserbasierte Benutzeroberfläche können die Messgeräte vom mobilen Endgerät aus bedient werden. [30]

Quelle: Sensors Inc.

Abbildung 11: Power Distribution and Control Module (PDCM)

Quelle: Sensors Inc.

Abbildung 12: Webbrowser basierte Benutzeroberfläche des PEMS-Systems

4.3.2 Fuel Economy Meter (FEM)

Das in Abbildung 13 dargestellte Fuel Economy Meter (FEM) erfasst den Abgasmassenstrom nach dem Bernoulli-Prinzip (Pitot-Rohr) und dient als CO/CO_2 Analysator. Zudem wird mit ihm der Kraftstoffverbrauch bestimmt. Dessen Berechnung erfolgt auf Basis des ermittelten Abgasmassenstroms und einer Kohlenstoffbilanz. Diese wird über die Abgaszusammensetzung und die Elementarzusammensetzung des Kraftstoffs durchgeführt. Eine Messung der Kohlenwasserstoffe mit bedingter Genauigkeit ist möglich. Das FEM besteht aus zwei Teilen. Dem eigentlichen Messgerät und der Flow-Tube. Die Auswahl der richtigen Flow-Tube erfolgt nach der zu erwartenden Menge des Abgasmassenstroms. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde eine 2,5"-Flow-Tube mit einem Messbereich von 15-800 kg/h verwendet. Die Flow-Tube enthält die Probenaufbereitung, die sich aus der internen Probenahmesonde, einem beheizten Filter, einem Wasserabscheider und einem Nafion® Trockner zusammensetzt. Die getrocknete und gefilterte Probe wird im Messgerät durch einen nicht dispersiven Infrarot-Analysator (NDIR) geführt und die Konzentration von Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid und Kohlenwasserstoffen als Hexan bestimmt. Aufgrund der werksseitig nicht bekannten Genauigkeit kann die Kohlenwasserstoffkonzentration nur als grober Richtwert verstanden werden. Eine präzise Bestimmung der Kohlenwasserstoffe kann nur mit einem Flammenionisationsdetektor erfolgen. Ein elektrochemischer Sensor erfasst die Sauerstoffkonzentration in der Probe. Am FEM sind des Weiteren auch eine Wettersonde (Temperatur, relative Feuchtigkeit und Umgebungsdruck) und ein GPS Receiver angeschlossen. Die Umgebungsbedingungen und Positionsdaten werden zusammen mit allen anderen Messwerten aufgezeichnet. [30]

Quelle: Sensors Inc.

Abbildung 13: Fuel Economy Meter (FEM)

4.3.3 NO/NO_2 Gas Analyzer (NO_x)

Abbildung 14 zeigt den Stickstoffoxidanalysator. Wird der NO/NO_2 Gas Analyzer wie in den folgenden Untersuchungen in Kombination mit dem FEM betrieben, wird der Analysator durch das FEM über Verbindungsrohre mit aufbereitetem Abgas versorgt. Das Messgerät bestimmt mit Hilfe eines nicht dispersiven Ultra-Violett-Analysators (NDUV) die Konzentrationen von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid. [30]

Quelle: Sensors, Inc.

Abbildung 14: NO/NO_2 Gas Analyzer (NO_x)

4.3.4 Micro Proportional Sampling System (MPS)

Das MPS ist ein Teilstromverdünnungssystem nach den Vorgaben von US EPA CFR 40 part 1065 und ISO 16183. In Abbildung 15 ist das Gerät dargestellt. Da das Messgerät im vorliegenden Fall in Verbindung mit dem FEM genutzt wird, fungiert es hier als Proportionalverdünner. Im Proportionalmodus ist der Strom des verdünnten Abgases proportional zum Strom des Rohabgases. Dies wird über eine Magnetventilschaltung realisiert. Die eigentliche Verdünnung des Abgases erfolgt mittels des Remote-Diluters möglichst nahe an der Entnahmestelle, da das Aerosol erst durch die Verdünnung stabilisiert wird. In Abbildung 16 ist der Remote-Diluter dargestellt. [30]

Quelle: Sensors Inc.

Abbildung 15: Micro Proportional Sampling System (MPS)

Quelle: Sensors Inc.

Abbildung 16: Remote-Diluter

4.3.5 Particulate Filter System (PFS)

Das Particulate Filter System (PFS) dient zur gravimetrischen Bestimmung der Partikelmasse im Abgas eines Verbrennungsmotors (siehe Abbildung 17). Nach der Verdünnung des Abgases durch das MPS wird es über ein Verbindungsrohr in das PFS überführt und über einen der drei 47 mm Filterhalter mit Teflonfiltern (Porosität 178 µm)geleitet. Die im Abgas enthaltenen Partikel werden dabei am Filter abgeschieden. Durch eine Konditionierung und Wägung der Filter vor und nach der Beladung und mit Hilfe der vom MPS ermittelten filtrierten Abgasmasse kann die Partikelmassekonzentration im Abgas bestimmt werden. Eine integrierte, mikroprozessorgesteuerte Heizung hält die Temperatur von verdünntem Abgas und Filtersystem konstant. [30]

Quelle: Sensors Inc.

Abbildung 17: Particulate Filter System (PFS)

4.3.6 Continuous Particulate Monitor (CPM)

Das Continuous Particulate Monitor (CPM) Modul basiert auf einem Pegasor® PPS-M Sensor. In diesem werden die im Abgas eines Verbrennungsmotors enthaltenen Partikel durch eine Corona Entladung elektrostatisch aufgeladen und in einem Spülstrom berührungsfrei durch den Sensor geführt. Die Ladung der Partikel ist proportional zu deren Größe. Durch ein integriertes Elektrometer wird die Ladung gemessen und je nach Konfiguration des Sensors entweder die Partikelanzahl oder -masse im Abgas ausgegeben. Der verdünnte Abgasprobenstrom wird wie beim PFS durch das MPS aufbereitet und dem CPM zugeführt. In Abbildung 18 ist das CPM dargestellt. [30]

Quelle: Sensors Inc.

Abbildung 18: Continuous Particulate Monitor (CPM)

4.3.7 In-Vehicle Control Module (ICM)

Das In-Vehicle Control Module (ICM) bildet die Schnittstelle zwischen dem PEMS und dem Fahrzeug. Für eine PEMS Messung und deren Auswertung werden bestimmte Fahrzeugbetriebsdaten (z. B. Motordrehzahl) benötigt. Diese Informationen können in der Regel aus dem CAN-Bus-Netzwerk moderner Fahrzeuge bezogen werden. Im hier vorliegenden Light-Duty-Bereich findet der OBDII Standard über den J1979 CAN-Bus Anwendung. Das ICM wird über ein Adapterkabel mit der OBDII-Diagnosesteckdose des Fahrzeuges verbunden und in der Sensor Tech Pro Software der jeweilige CAN-Bus ausgewählt. Nach einem automatischen Verbindungsaufbau, können alle verfügbaren Fahrzeug-Signale dargestellt und parallel zu den Daten der Messgeräte aufgezeichnet werden. [30]

4.3.8 Energieversorgung des PEMS

Die realen Emissionen von Fahrzeugen sollen durch die Messtechnik möglichst wenig beeinflusst bzw. verfälscht werden. Daher dürfen die Messgeräte nicht durch das Fahrzeug selbst mit Energie versorgt werden, sondern benötigen eine unabhängige Stromversorgung.

Die Spannungsversorgung der Analysatoren erfolgt wie in Kapitel 4.1.1 dargestellt über das Power Distribution and Control Module (PDCM). Dieses wurde in den folgenden Untersuchungen durch 12 V Akkumulatoren und ein 230 V Netzteil gespeist. Während der Messfahrt wurde das PDCM über zwei parallel geschaltete Akkumulatoren mit Strom versorgt. Dabei handelte es sich um zwei vom Hersteller empfohlene Batterien des Typs Q-Quality® 12LC-134 AGM-Akku mit Vlies-Technologie, 12 V Betriebsspannung und ei-

ner Kapazität von 143 Ah bzw. 160 Ah. Während der Aufwärmphase der Messgeräte und zwischen den Messfahrten erfolgte die Stromversorgung über das Netzteil.

Die Akkumulatoren wurden von einem Ladegerät vom Typ AEG LW 60.0 mit einer Betriebsspannung von 12 V und einem maximalen Ladestrom von 20 A über Nacht geladen. Zwischen der ersten und zweiten täglichen Messfahrt wurden die Batterien mit maximal 60 A für eine Stunde zwischengeladen.

4.4 Messaufbau und Analyseweg

Das in 4.2 beschriebene portable Emissionsmesssystem wurde für die nachfolgenden Untersuchungen in das zu vermessende Fahrzeug eingebaut. Ein Teil des Messaufbaus befindet sich am Heck des Fahrzeugs. Der andere Teil ist im Fahrzeuginnenraum untergebracht. Die einzelnen Teile des Messaufbaus, die Probennahme und der Analyseweg der Proben sollen im Folgenden näher erläutert werden.

4.4.1 Messaufbau und Probenahme

Wie in Abbildung 19 zu sehen, ist der äußere Teil des Messaufbaus an einem umfunktionierten Heckklappenfahrradträger montiert. Auf diesem wurde die Flow-Tube sowie die Entnahme der Abgasprobe für die Partikelmesstechnik (siehe Abbildung 21) angebracht. Die Zuführung des Abgases an die Entnahmestellen erfolgt durch eine an den Auspuffendschalldämpfern angebrachte Verrohrung. An der rechten Seite des Fahrradständers wurde die Wettersonde angebracht (siehe Abbildung 20). Die aus dem Abgasstrom entnommenen Proben werden getrocknet und gefiltert über die beiden Schläuche durch das Seitenfenster zu den Messgeräten in den Innenraum geführt. Auf dem Dach des zu vermessenden Fahrzeugs befindet sich der GPS-Receiver. Wettersonde und GPS-Receiver sind an der Flow-Tube angeschlossen.

Im Innenraum des Testfahrzeugs befinden sich die in 4.2 beschriebenen Analysatoren und deren Stromversorgung (siehe Abbildung 22).

Abbildung 19: Übersicht des Messaufbaus am Fahrzeugheck (Quelle: TFZ)

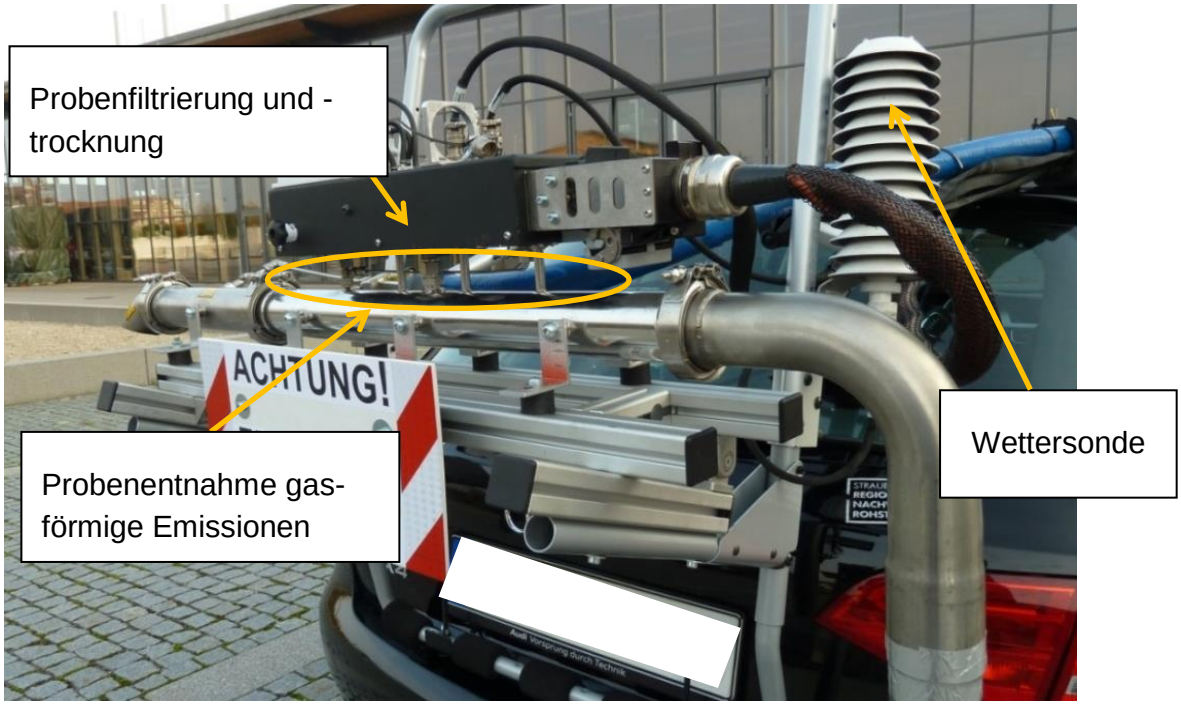


Abbildung 20: Probeentnahme für gasförmige Emissionen (Quelle: TFZ)

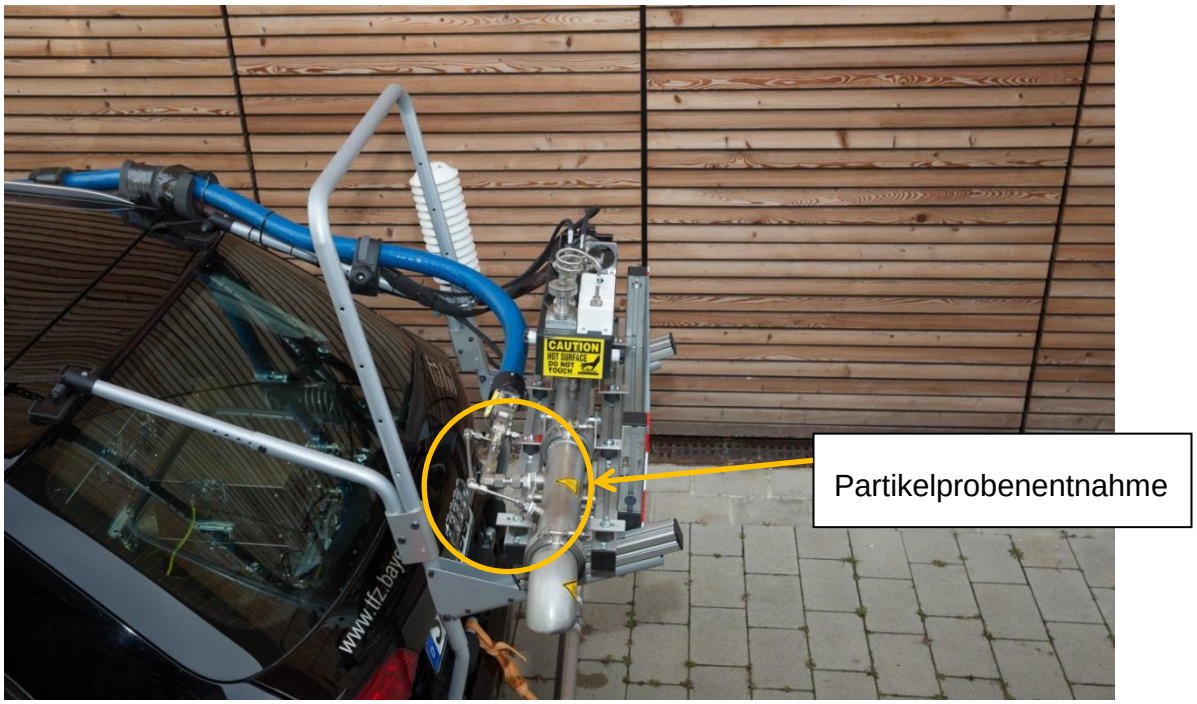


Abbildung 21: Probenentnahme für Partikelemissionen (Quelle: TFZ)

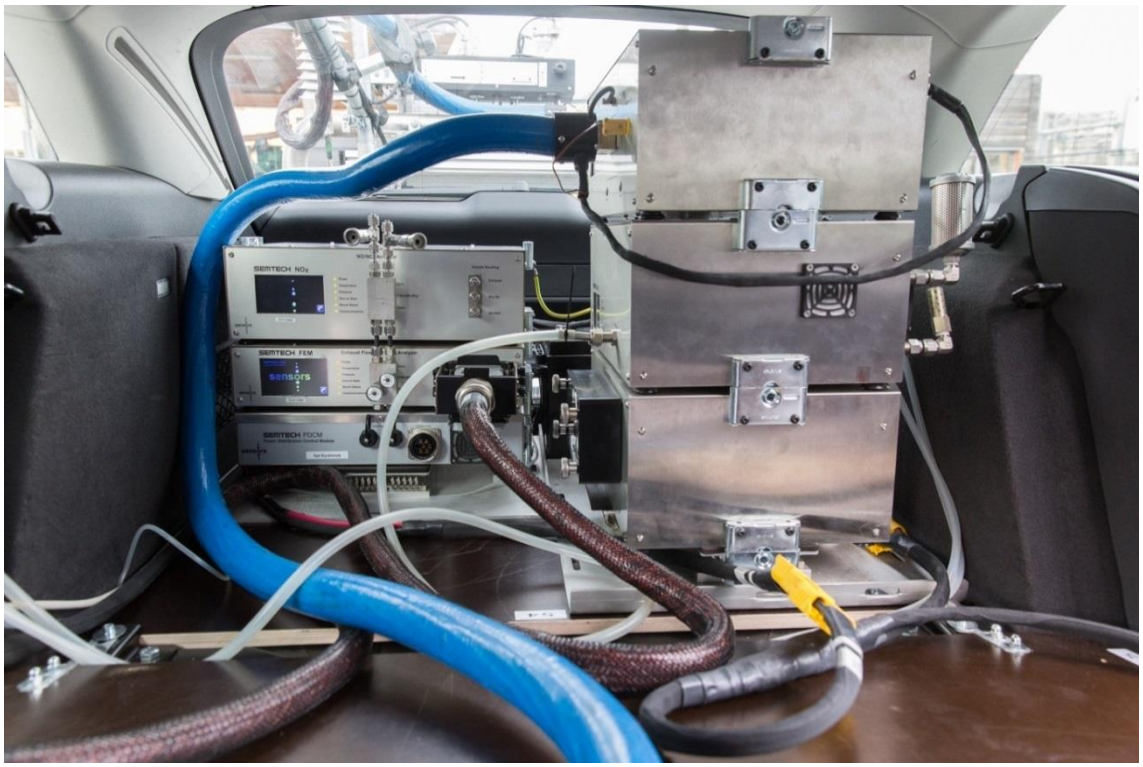


Abbildung 22: Übersicht Messaufbau im Fahrzeuginnenraum (Quelle: TFZ)

4.4.2 Analyseweg

Der blaue Schlauch führt die Abgasprobe zum MPS im Partikelmessturm. Der rot-schwarze Schlauch bringt eine Abgasprobe zum FEM im Gasmessturm. Dieser Schlauch verfügt über unterschiedliche Kanäle, die sowohl dem Zuführen der Probe zum Analysator als auch der Abfuhr der bereits analysierten Proben dienen. Zur Bestimmung der CO- und CO_2-Konzentration im Abgas wird die entnommene und aufbereitete Probe im FEM analysiert. Anschließend wird die Probe wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben in den NO/NO_2 Gas Analyzer weitergeleitet, um die Konzentration der Stickstoffoxide im Abgas zu bestimmen. Die analysierte Probemenge wird über die Abfuhrkanäle des rot-schwarzen Schlauches wieder in den Abgasstrom zurückgeführt und so an die Umwelt entlassen.

Die für die Vermessung der Partikelmasse zugeführte Probe durchläuft zunächst das MPS und wird hier proportional zum Abgasmassenstrom verdünnt. Im Anschluss durchläuft die Probe das CPM. Danach erfolgt im PFS die Partikelaufnahme an einem im Gerät eingelegten Filter. Die analysierten und nicht mehr benötigten Proben werden über gesonderte Schläuche durch das Seitenfenster des Fahrzeugs in die Umwelt entlassen.

4.5 Messbedingungen

Für eine gute Vergleichbarkeit der Messungen sind möglichst konstante Messbedingungen wichtig. Diese sind in den EU-Verordnungen 427/2016 und 646/2016 definiert. Darin werden u.a. genaue Anforderungen an die Fahrstrecke, Randbedingungen sowie Zustand und Betrieb des Fahrzeugs vorgegeben. In den nächsten Abschnitten werden das Streckenprofil und die Messbedingungen für die vorliegenden Messungen näher erläutert.

4.5.1 PEMS-Teststrecke

Die Messstrecke wurde nach den in der EU-Verordnung 427/2016 Anhang IIIa [19] angegebenen Kriterien zusammengestellt. Die Streckenzusammensetzung bestimmt sich maßgeblich aus der Vorgabe der Streckenaufteilung in "Stadt-, Landstraßen- und Autobahnbetrieb" des Fahrzeugs. Zudem muss die Messfahrt in der Stadt beginnen. Die Abgrenzung der einzelnen Betriebsarten erfolgt über Geschwindigkeitsintervalle:

Stadtbetrieb:	0 km/h bis 60 km/h
Landstraßenbetrieb:	mehr als 60 km/h bis 90 km/h
Autobahnbetrieb:	mehr als 90 km/h

Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt während des Autobahnbetriebs 145 km/h. Für maximal 3 % der Gesamtdauer des Autobahnbetriebs darf diese um 15 km/h überschritten werden. Ein weiteres Kriterium ist die vorgegebene Fahrzeit von 90 min bis

120 min. Für die Streckenlänge der einzelnen Betriebszustände gibt es prozentuale Vorgaben die an der Gesamtfahrstrecke bemessen werden:

Stadtbetrieb:	34 % bzw. mindestens 29 %, höchstens 44 %
Landstraßenbetrieb:	33±10 %
Autobahnbetrieb:	33±10 %

Der Mindeststreckenanteil je Betriebsart beträgt jedoch immer 16 km. Neben den Streckenanteilen werden u.a. auch verschiedene Angaben zur Höhenlage vorgegeben. So darf im Rahmen der gemäßigten Höhenlagebedingung eine Höhenlage von 700 m über dem Meeresspiegel während der Messfahrt nicht überschritten werden. Ein weiterer Punkt für die Streckenauswahl stellen verschiedene Vorgaben zu Haltezeiten dar. Daher ist auf ausreichende Haltezeit während der Fahrt zu achten. Dieses Kriterium konnte beispielsweise durch die Einbindung einiger ampelgeregelter Kreuzungen eingehalten werden. [19]

Zusätzlich zu den EU-Vorgaben wurde bei der Zusammenstellung der Messstrecke auf bestimmte Kriterien geachtet, die das Emissionsverhalten beeinflussen könnten.

So wurde ein Streckenabschnitt mit Steigungs- und Gefällestrecken in den Landstraßenanteil integriert. Dieser Abschnitt soll zur Beobachtung der Emissionswerte bei häufig aufeinander folgenden Lastwechseln dienen. Der Landstraßenbetrieb teilt sich daher zu annähernd gleichen Teilen in den Streckenabschnitt mit häufig aufeinander folgenden Lastwechseln und einen Abschnitt mit geringen Steigungs- und Gefälleabschnitten auf.

Bei der Zusammenstellung des Innerortsanteils wurde darauf geachtet, Straßen unterschiedlicher Rangfolge in die Strecke zu integrieren. So sind Haupt- wie Nebenstraßen enthalten. Hauptverkehrsrouten und geschwindigkeitslimitierte Bereiche wie Tempo-30-Zonen wurden ebenfalls berücksichtigt. Die Einbindung von wichtigen innerstädtischen Verkehrsadern schien für die realistische Emissionsabbildung im Stop-and-go-Verkehr von Bedeutung.

Abbildung 23 zeigt das Höhenprofil der Messstrecke und Abbildung 24 eine Übersicht der PEMS-Teststrecke.

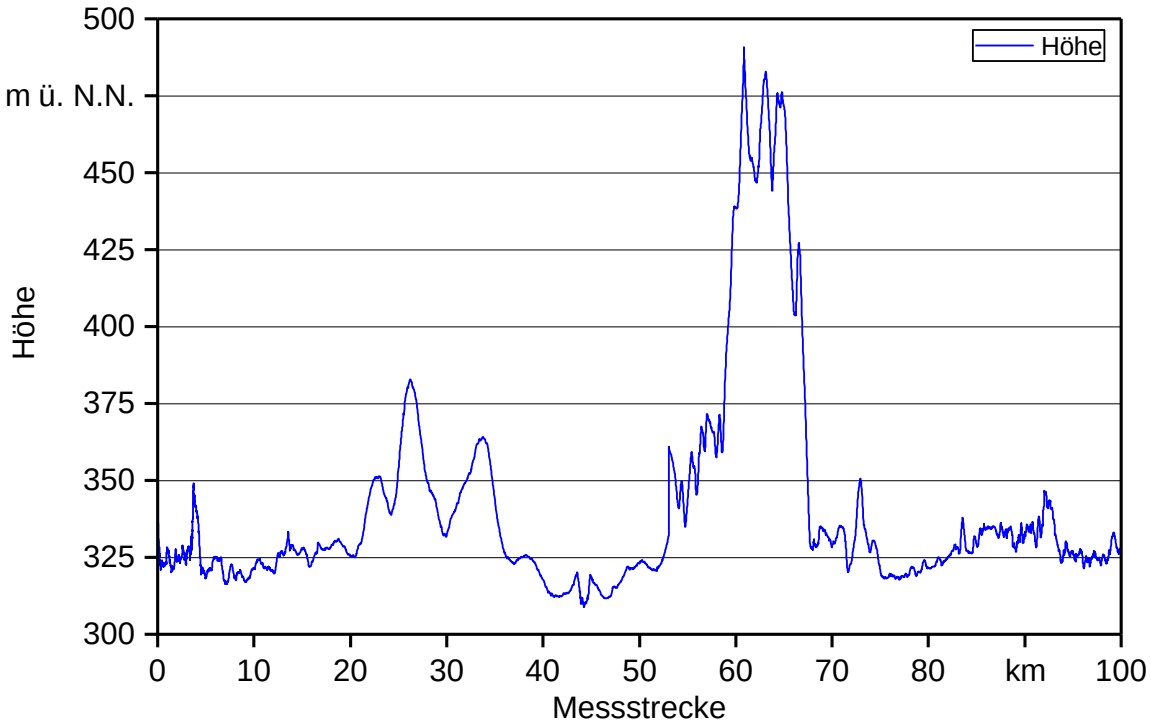
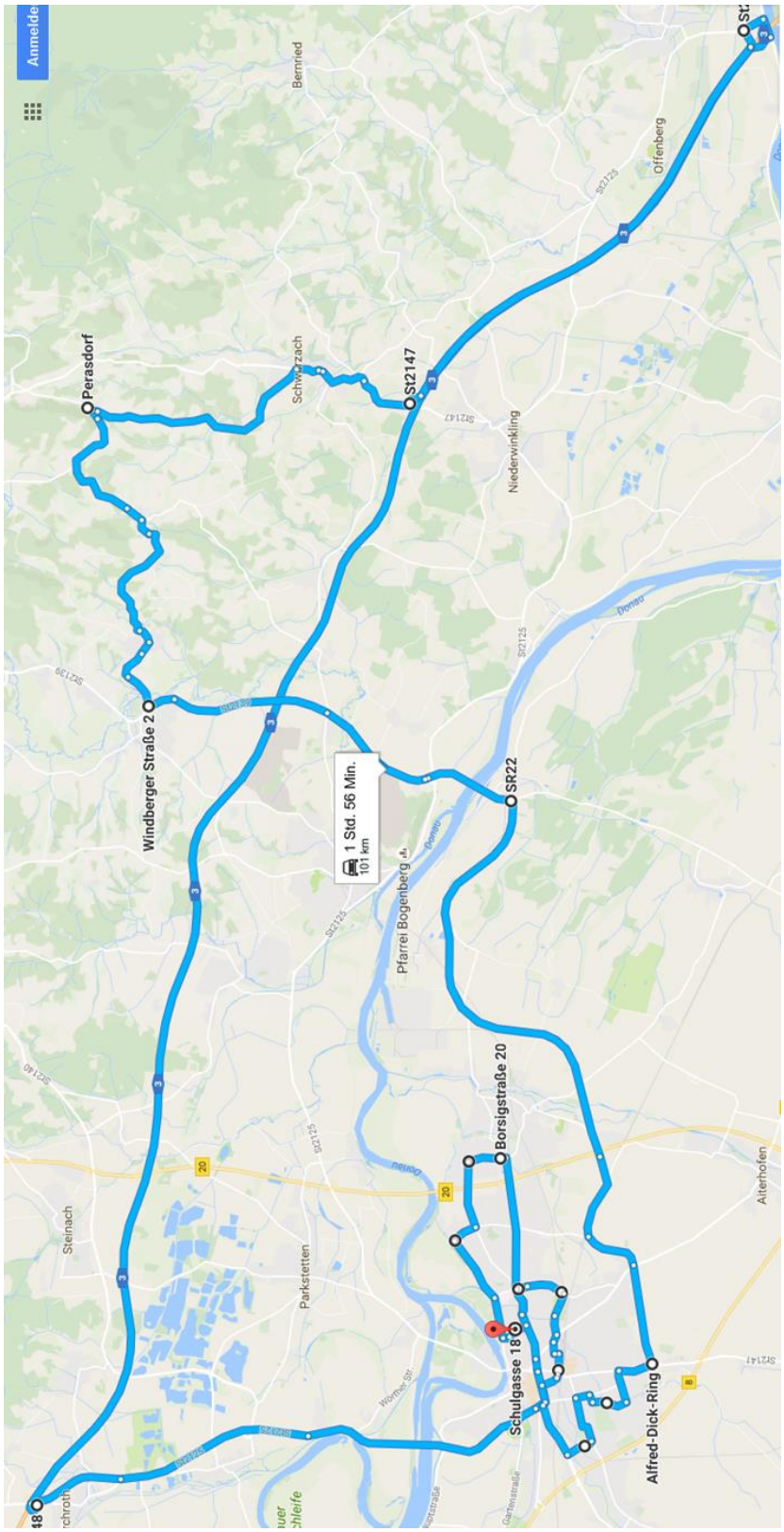


Abbildung 23: Höhenprofil der Messstrecke



Quelle: Google Maps

Abbildung 24: Übersicht der PEMS-Teststrecke

4.5.2 Fahrzeuganforderungen

Den Anforderungen an den Zustand des Fahrzeugs kommt eine wichtige Rolle bei den Messfahrten zu.

So wird in der EU-Verordnung 427/2016 [19] verlangt, das Fahrzeug nur mit den vom Hersteller freigegebenen Betriebsstoffen zu befüllen. Der Motorölstand des Fahrzeugs wurde vor jeder Fahrt kontrolliert, um eine ausreichende Schmierung des Motors zu gewährleisten. Der Ottokraftstoff für den Betrieb des Fahrzeugs darf nach Herstellervorgabe einen maximalen Ethanolgehalt von 85 Vol.-% aufweisen.

Des Weiteren werden Ausführungen zu Parametern wie Nebenverbraucher, die die Messung beeinflussen, gemacht. Laut Angabe sind Nebenverbraucher wie Klimaanlage oder Licht während der Messfahrt mitzubenutzen, um den Alltagsbetrieb des Fahrzeugs so realistisch wie möglich abzubilden. Daher wurden folgende Nebenverbraucher stets mitbenutzt:

- Klimaanlage (Einstellung: 20 °C)
- Abblend- und Tagfahrlicht
- Radio
- elektrischer Zuheizer

Der Reifenluftdruck wurde vor jeder Fahrt kontrolliert. Dabei wurden die Herstellervorgaben eingehalten. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass das Fahrzeug witterungsbedingt mit Winterreifen ausgerüstet war.

Da die Nutzung technischer Möglichkeiten zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs ebenfalls zum Alltagsbetrieb eines Fahrzeugs gehört, werden diese bei allen Messfahrten verwendet.

Moderne Fahrzeuge verfügen über verschiedene technische Möglichkeiten zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Im vorliegenden Fall verfügt das Fahrzeug über eine Start-Stopp-Automatik. Sobald bei einem Halt in den Leerlauf geschaltet und danach ausgekuppelt wird, stellt sich der Motor des Fahrzeugs ab. Wird wieder eingekuppelt startet der Motor wieder. Das System kann per Tastendruck deaktiviert werden. [3]

Das Fahrzeug verfügt zudem über eine Gangwahlempfehlung, die dem Fahrer mittels Pfeilen eine Anweisung gibt, ob er runter- oder hochschalten soll. Diese kann im Bordmenü ebenfalls deaktiviert werden. [3]

Die Messtechnik soll während der Fahrt einen möglichst geringen Einfluss auf die Messung nehmen. Daher werden die Messgeräte wie in 4.3.1 beschrieben nicht über das Bordnetz des Fahrzeugs, sondern über Batterien mit Energie versorgt. Eine Versorgung über das Bordnetz würde zu einer erhöhten Belastung des Fahrzeuggenerators und damit zu einem erhöhten Verbrauch und letztendlich höheren Emissionswerten führen.

4.5.3 Anforderungen während der Messfahrt

Die Messergebnisse werden nicht nur vom Zustand des Fahrzeugs, sondern auch vom individuellen Fahrverhalten beeinflusst [23]. Damit das Fahrverhalten während der Messfahrten möglichst unverändert bleibt, wurden die Fahrten alle vom selben Testfahrer durchgeführt. Zudem wurde nach bestimmten Vorgaben gefahren, die die einzelnen Fahrten so gut wie möglich vereinheitlichen sollten.

So ging es u.a. darum, stets mit einem möglichst hohen und damit kraftstoffsparenden Gang zu fahren. Dazu bot sich die Gangwahlempfehlung des Fahrzeugs an. In ersten Probefahrten mit dem Fahrzeug ergaben sich aber Probleme. So gibt die Anzeige erst nach einer kurzen Fahrstrecke eine erneute Anweisung in welchen Gang geschalten werden soll. Daher ist sie für den eigentlichen Beschleunigungsvorgang nach dem Anfahren oder beim Auffahren auf die Autobahn nicht geeignet. Zudem werden bei Steigungs- und Gefällestrecken keine dazu passenden Schaltanweisungen gegeben. So schlägt das Fahrzeug beispielsweise an einer starken Steigung vor, diese im fünften Gang zu fahren, was wiederum fast zum Abwürgen des Motors führt. Ein Befolgen der Gangwahlempfehlung war daher nur beim längeren Verbleib in einem Geschwindigkeitsbereich und auf Strecken mit geringer Steigung und/oder geringem Gefälle sinnvoll. Auf Basis dieses Wissens wurde bei den Schaltvorgängen folgendermaßen vorgegangen:

- Stadtbetrieb:

    1. Beschleunigen auf die erlaubte Höchstgeschwindigkeit unter Durchschalten der Gänge
    2. Nach Schaltanweisung weiter in einen höheren Gang schalten

- Landstraßenbetrieb ohne große Steigungen und Gefälle:

    1. Beschleunigen auf die erlaubte Höchstgeschwindigkeit unter Durchschalten der Gänge
    2. Nach Schaltanweisung weiter in einen höheren Gang schalten

- Landstraßenbetrieb mit großen Steigungen und Gefällen:

    1. Schaltanweisungen werden nicht beachtet
    2. Es wird immer beim Erreichen festgelegter Punkte geschalten

- Autobahnbetrieb:

    1. Beim Auffahren auf Richtgeschwindigkeit unter durchschalten der Gänge bis zum fünften Gang beschleunigen
    2. Nach Schaltanweisung den sechsten Gang einlegen

Um in den Phasen in denen die Gangempfehlung nicht zum Einsatz kommt, eine möglichst gleichmäßige Fahrweise zu gewährleisten, wurden folgende Sprit-Spar-Anweisungen berücksichtigt [28]:

- Motor ohne Gaspedalbetätigung starten
- Nach dem Losfahren sofort in den zweiten Gang schalten
- schnell mit 3/4 durchgetretenen Gaspedal beschleunigen
- bei 2000 U/min bereits schalten
- vorausschauend fahren
- Schubabschaltung nutzen

Bei Landstraßenbetrieb mit großen Steigungen und Gefällen konnte nicht bei 2000 U/min geschalten werden.

Damit während Haltezeiten nicht unnötig Kraftstoff verbraucht wurde, kam bei Haltezeiten von mehr als 10 s die Start-Stopp-Automatik des Fahrzeugs zum Einsatz. Diese war allerdings nicht immer aktiv, da das Abschalten des Motors laut Bordbuch des Fahrzeugs nur unter definierten Bedingungen funktioniert. Werden diese nicht erfüllt, wird der Motor nicht abgeschaltet oder nach einer kurzen Abschaltphase wieder von selbst gestartet. Zu diesen Bedingungen zählen beispielsweise Außentemperatur oder Energiebedarf der Nebenverbraucher.

4.5.4 Messfahrten

Mit jedem Kraftstoff wurden drei Messungen unter Kaltstart- und Warmstartbedingungen durchgeführt. Pro Messtag erfolgte zunächst eine Kalt- und eine Warmstartmessung. Zwischen dem Kalt- und Warmstart wurde das Fahrzeug für eine Stunde abgestellt.
Der Kaltstart wird in der EU-Verordnung 427/2016 [19] über die Kühlmitteltemperatur und die Zeit definiert. So wird der Kaltstartzeitraum als der Zeitraum zwischen dem ersten Starten des Verbrennungsmotors und dem erstmaligen Erreichen einer Kühlmitteltemperatur von 343 K (70 °C) festgelegt und umfasst maximal fünf Minuten [19]. Daraus wurde abgeleitet, dass die Kühlmitteltemperatur für einen Warmstart vor dem Starten des Motors mindestens 70 °C aufweisen muss. Um dies für einen Warmstart zu gewährleisten, wurde in der einstündigen Standzeit die Kühlmitteltemperatur permanent durch das PEMS über die OBDII-Schnittstelle des Fahrzeugs beobachtet.
Die Steuerung der Messgeräte erfolgte über ein Panasonic Tough-Book CF 53, das über WLAN mit dem PDCM permanent verbunden war.
Zu Beginn des Messtages wurden die Messgeräte für die gasförmigen Emissionen nach Herstellervorgabe aufgeheizt und kalibriert.
Ebenso wurden zwei neue eingewogene Teflon-Filter (Porosität 178 µm) in das PFS eingelegt. Pro Fahrt wurde ein Filter mit Partikeln beladen. Die Partikelmessgeräte müssen nach Herstellervorgabe nur einmalig beim Einbau in das Fahrzeug kalibriert werden.

Zwischen Kalt- und Warmstart wurde die Drift der Messgeräte kontrolliert.
Alle Fahrten erfolgten mit einem Beifahrer, der die Messung während der Fahrt überwachte.
Es wurde mit steigendem Ethanolgehalt vermessen, d. h. es wurden zuerst alle Kalt- und Warmstartmessungen mit E5, dann mit E10 und zum Schluss mit E85 durchgeführt.

4.6 Auswertung der Emissionsmessungen

Im den folgenden Kapiteln wird die Auswertung der Messdaten näher beschrieben. Diese erfolgt sowohl nach den Vorgaben der EU-Verordnungen 427/2016 [19] als auch mittels eigener Berechnungen und Berechnungen nach den Vorgaben des Messgeräteherstellers. Aufgrund ihres großen Umfangs werden die nach EU-Verordnung 427/2016 genannten Berechnungsmethoden nur zum Verständnis skizziert. Für eine detaillierte Betrachtung wird in diesem Zusammenhang auf die genannte Verordnung verwiesen.

4.6.1 Bestimmung der momentanen gasförmigen Masseemission

Die aufgezeichneten Rohdaten werden gemäß den Vorgaben der Anlage 4 EU-Verordnung 427/2016 [19] bearbeitet und so die Emissionsmassenströme in g/s bestimmt. Dazu erfolgt zunächst eine Zeitkorrektur aller aufgezeichneten Daten von Abgasbestandteilen, Abgasmassenstrom und Fahrzeugdaten.
Da mit den vorliegenden Messgeräten im trockenen Bezugszustand gemessen wurde, müssen die gemessenen Emissionen im Anschluss auf einen feuchten Zustand umgerechnet werden [19].
Zuletzt erfolgt die Berechnung des momentanen Massenstroms der einzelnen Schadstoffkomponente mit Hilfe von Gleichung (4.1).

$$m_{gas,i} = u_{gas} \cdot c_{gas,i} \cdot q_{mew,i} \qquad (4.1)$$

$m_{gas,i}$ Masse des Abgasbestandteils „Gas“ [g/s]

u_{gas} Verhältnis zwischen der Dichte des Abgasbestandteils „Gas“ und der Gesamtdichte des Abgases

$c_{gas,i}$ gemessene Konzentration des Abgasbestandteils „Gas“ im Abgas [ppm]

$q_{mew,i}$ gemessener Abgasmassendurchsatz [kg/s]

i Nummer der Messung

Die dimensionslose Kennzahl u_{gas} ist in der Tabelle 1 von Anhang 4 aufgeführt und bezieht sich auf Standardkraftstoffe. Da hier nur E10- und E85 -Kraftstoff, aber kein E5-Kraftstoff aufgeführt sind, wurden die Werte für u_{gas} im vorliegenden Fall auf andere Art und Weise berechnet.
Die Werte wurden hier alternativ über die gemessenen Emissionskonzentrationen und das im Labor für jeden eingesetzten Kraftstoff ermittelte C-H-O-Verhältnis berechnet [30]. Alle oben genannten Schritte werden durch das Programm Sensor Tech Post Processor (Version 6.12) ausgeführt. Der Messgerätehersteller macht zur alternativen Methodik jedoch keine näheren Angaben.
Um die Abweichung von den Standardkraftstoffen aus der Tabelle zu beobachten, wurde m_{gas} für die vorliegenden Messungen auch mit den Werten aus der Tabelle berechnet. Hierzu wurden die Emissionen aus dem Betrieb mit E5 mit Hilfe des Tabellenwerts für E10 ermittelt. Bei E5, E10 und E85 ergaben sich vernachlässigbare Änderungen gegenüber den festgestellten Emissionen nach den Laborwerten.

4.6.2 Partikelmasseemissionen

Zur Bestimmung der emittierten Partikelmasse wurden 47 mm Teflon-Filter zuvor in einer Klimakammer eingewogen. Pro Fahrt wurde je ein Filter mit Partikeln beladen, indem der Filter mit dem durch das MPS teilverdünnten Abgas überströmt wurde. Nach der Fahrt wurde der Filter wieder in der Klimakammer rückgewogen. Die gewonnenen Massenwerte mussten aber noch um den tatsächlichen Abgasmassenstrom korrigiert werden, um ein korrektes Partikelmasseergebnis zu erhalten. Dies geschah mit Hilfe des Berechnungs-Tools Sensor Tech PM-Report (Version 1.0.0.20). Der Messgerätehersteller macht dazu folgende Angaben: die eingegebene Filtermasse wird mit den Daten zum Abgasmassenstrom aus dem FEM und der Verdünnung durch das MPS auf die tatsächliche ausgestoßene gesamte Partikelmasse der Fahrt nach Gleichung (4.2) korrigiert.

$$M_P = \frac{M_{Filter}}{k} \tag{4.2}$$

mit:

M_P reale Partikelmasse

M_{Filter} Partikelmasse auf Filter

k Verdünnungsfaktor MPS

Für eine entfernungsspezifische Emission wurde die Gesamtmasse durch die gefahrenen Kilometer geteilt. [30]

4.6.3 Moving-Average-Window-(MAW)-Methode

Die EU-Verordnung 427/2016 [19] gibt zwei unterschiedliche Möglichkeiten vor um die Gesamtemissionen im Fahrbetrieb zu bestimmen und zu bewerten.

In Anlage 5 der Verordnung wird die Methode des gleitenden Mittelungsfensters (engl.: Moving-Average-Window (MAW)) als eine Möglichkeit der Emissionsbestimmung genannt. Dabei wird die RDE-Fahrt in verschiedene Teildatensätze gegliedert, die als Mittelungsfenster bezeichnet werden. Die Länge des Fensters richtet sich nach der CO_2-Masse die vom Fahrzeug zuvor während eines WLTC im Labor ausgestoßen wurde. Das Zeitinkrement zur Berechnung im Mittelungsfenster entspricht der Datenerfassungsfrequenz. Als CO_2-Bezugsmasse wird die halbe im WLTC ausgestoßene CO_2-Masse herangezogen. Es wird nun bei jedem nach Anlage 4 berechneten momentanen Massenwert ein Fenster begonnen und dieses wieder geschlossen, sobald die Bezugsmasse erreicht wird. [19]
Innerhalb jedes Fensters wird eine entfernungsabhängige Masse für alle Schadstoffe sowie eine durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet [19].
Im nächsten Schritt wird die Fahrdynamik geprüft. Dazu wird als Referenz eine sogenannte charakteristische CO_2-Kurve anhand der CO_2-Masse des WLTC erstellt. Der WLTC teilt sich in die vier Phasen "low", "medium", "high" und "extra-high" auf. Für die Festlegung der charakteristischen CO_2-Kurve werden die Durchschnittsgeschwindigkeit und die emittierte CO_2-Masse aus den Phasen "low", "high" und "extra-high" verwendet. Über die jeweilige CO_2-Masse und die Durchschnittsgeschwindigkeit können die drei Punkte P1, P2 und P3 definiert werden. Es werden nun die zwei Geraden P1P2 und P2P3 gebildet werden (siehe Abbildung 25). [19]

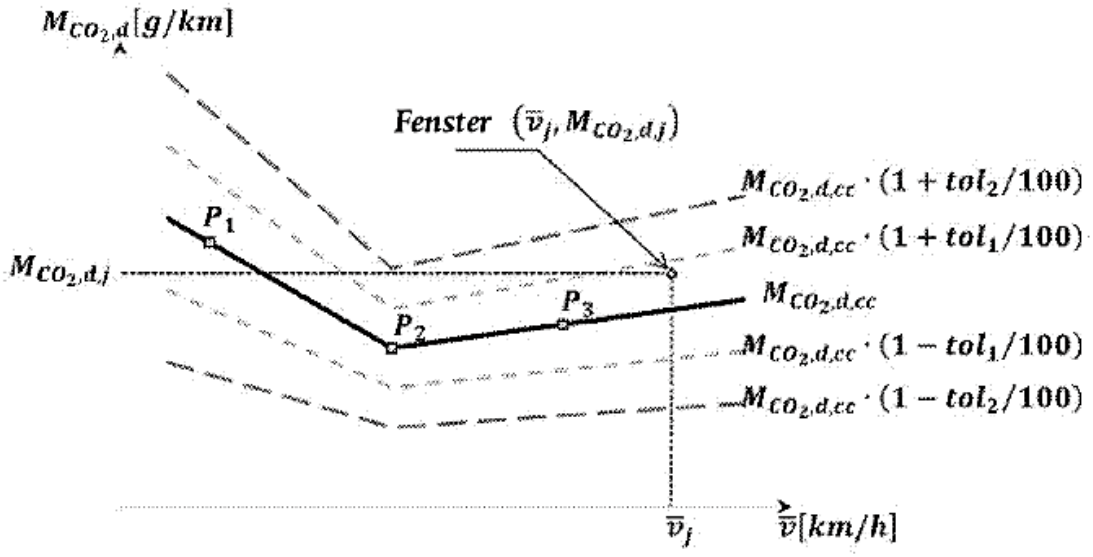


Abbildung 25: Charakteristische CO_2-Kurve des Fahrzeugs [19]

Zudem werden durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeiten für Stadt, Landstraße und Autobahn definiert (siehe Abbildung 26) [19].

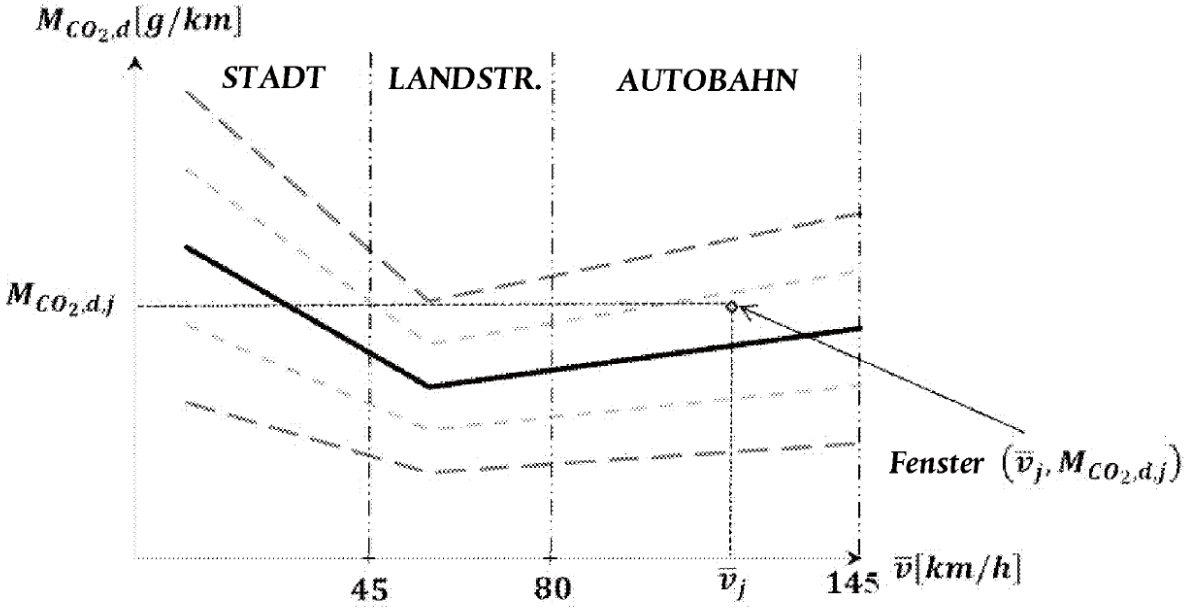


Abbildung 26: Charakteristische CO2-Kurve des Fahrzeugs mit Stadt-, Landstraßen- und Autobahneinteilung [19]

Im Anschluss wird eine primäre und sekundäre Toleranzgrenze von ±25 % bzw. ± 50 % deklariert. Anhand dieser Toleranzgrenzen werden die Fenster einer Normalitätsprüfung

unterzogen. Dabei wird überprüft, ob sich die für ein Fenster ermittelte CO_2-Masse mindestens innerhalb der sekundären Toleranzgrenze befindet. Es müssen mindestens je 15 % der Fenster auf Stadt-, Landstraße oder Autobahn entfallen. Um die Fahrt als normal zu bezeichnen, müssen sich mindestens 50 % aller Fenster innerhalb der primären Toleranzgrenze befinden. [19]
Darauffolgend werden die gewichteten entfernungsabhängigen Emissionen aller Schadstoffe berechnet. Dazu werden alle Fenster mit einem Gewichtungsfaktor versehen. Dieser richtet sich danach in welchem Bereich sich dessen Wert zwischen den Toleranzgrenzen und der charakteristischen CO_2-Kurve befindet. Die Gewichtungsfaktoren werden in ihrer Berechnung zudem von einem Index der Strenge beeinflusst. [19]
Im letzten Schritt werden die Emissionen für die gesamte Fahrt ermittelt [19].

Alle MAW-Berechnungen wurden mit dem Programm Sensor Tech-LDV (Version 1.14 b12 beta) durchgeführt.

Die EU-Verordnung 427/2016 schreibt in Anlage 2 nur das Aufzeichnen, aber kein Auswerten von Kaltstartfahrten vor. Daher wird in Anlage 5 darauf hingewiesen, dass Kaltstarts nach Anlage 4 Punkt 4.4 von der MAW-Methode ausgenommen sind und daher nicht in die Berechnung mitaufgenommen werden. Das Gleiche gilt für Fahrzeuggeschwindigkeiten <1 km/h und Zeiten in denen der Verbrennungsmotor ausgeschaltet ist. [19]

Die für den CO_2-Bezug benötigte CO_2-Masse aus dem WLTC wurde mit Hilfe eines stationären CVS-Systems am Rollenprüfstand der Abgasprüfstelle an der Fachhochschule Bern ermittelt.

4.6.4 Mittelwertberechnung

Die MAW-Methode enthält vielfältige Freiheiten bei der Berechnung, die je nach Einstellung zu anderen Ergebnissen führen kann. Daher wurden die Messwerte zusätzlich nach einem weiteren Verfahren ausgewertet. Dabei wurden die in 4.6.1 beschriebenen momentanen Massen einer Fahrt aufsummiert und diese Summe durch die gefahrenen Kilometer der Prüfstrecke geteilt. So wird wie bei der MAW-Methode ein entfernungsspezifischer Wert bestimmt.

Diese Methode ermöglicht auch weitere Untersuchungen, die in den nächsten Kapiteln beschrieben werden.

5 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messfahrten dargestellt und diskutiert.

5.1 Kalt- und Warmstartemissionen nach MAW- und MW-Methode

In den nächsten Abschnitten werden die ermittelten Emissionen dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse, ausgewertet nach der Moving-Average-Window (MAW)-Methode und der Mittelwert (MW)-Methode, verglichen. Zudem werden die Kalt- und Warmstartemissionen der eingesetzten Ethanol-Kraftstoffe gegenübergestellt. Zuletzt soll das Emissionsminderungspotential von E10 und E85 gezeigt werden. Dazu werden deren Emissionen in Bezug auf E5 als Referenz bewertet. Es werden jeweils die Emissionen von je drei Fahrten unter Kaltstart- und Warmstartbedingungen gemittelt.

5.1.1 CO-Emissionen

Wie in Abbildung 27 zu sehen, waren die CO-Emissionen nach MAW- und MW-Methode bei E85 im Vergleich zu E5 und E10 unter Kalt- und Warmstartbedingungen deutlich geringer.

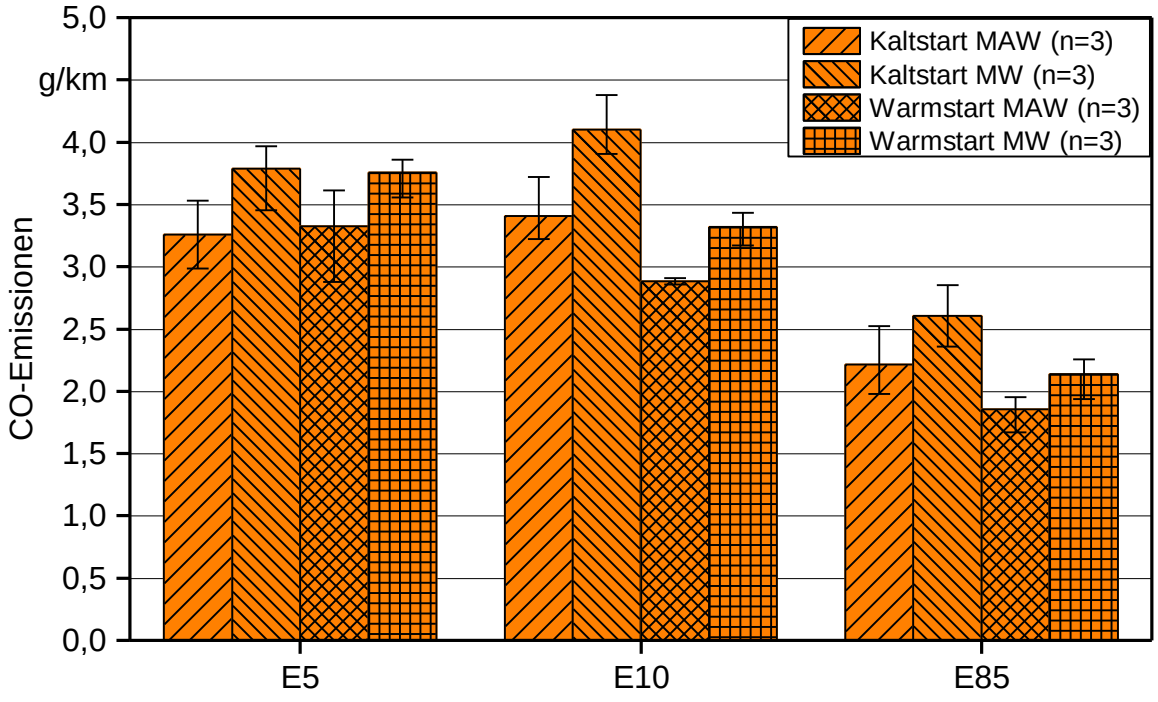


Abbildung 27: CO-Emissionen eines FFV im Betrieb mit den Ethanol-Kraftstoffen E5, E10 und E85

Die Emissionen nach MW-Methode lagen im Mittel immer über den Emissionen nach MAW-Methode. Im Warmstart sanken die CO-Emissionen mit steigendem Ethanolgehalt

des Kraftstoffs. Unter Kaltstartbedingungen konnten für E10 im Mittel die höchsten Emissionen festgestellt werden. Bei E10 und E85 wurde während eines Warmstarts weniger Kohlenstoffmonoxid emittiert als bei einem Kaltstart, wohingegen sich bei E5 im Mittel kein signifikanter Unterschied zwischen Kalt- und Warmstart zeigte.

Die geringeren Emissionswerte bei der MAW-Methode im Vergleich zur MW-Methode lassen sich durch die unterschiedliche Berechnungsmethodik erklären.
Bei der MAW-Methode werden bestimmte Werte von der Berechnung ausgeschlossen und gewichtet. So fließen Emissionen der Kaltstartphase im Sinne der EU-Verordnung 427/2016 Anlage 4 Nummer 4.4, Emissionen bei Fahrzeuggeschwindigkeiten <1 km/h und Werte, die bei ausgeschaltetem Verbrennungsmotor aufgenommen wurden, nicht mit ein.
Die Emissionen werden bei der MAW-Methode zudem als gewichteter Durchschnitt der Stadt-, Landstraßen- und Autobahnfenster berechnet, wobei die Emissionen getrennt für Stadt-, Landstraßen- und Autobahnfenster ermittelt werden. Wie in Kapitel 4.6.3 beschrieben, werden die pro Fenster errechneten CO_2-Emissionen einer Normalitätsprüfung unterzogen und dort in Bereiche mit verschiedenen Toleranzgrenzen einsortiert. Über diese Eingruppierung wird auch der Gewichtungsfaktor bestimmt, der in die Berechnung der durchschnittlichen Emissionen bei Stadt-, Landstraßen- und Autobahnfenstern miteinfließt. Dabei erhalten Werte die über oder unter der sekundären Toleranzgrenze liegen den Gewichtungsfaktor 0 zugeteilt und entfallen somit komplett aus der Berechnung. Bei der Berechnung der Gesamtemissionen werden die Emissionen in Stadt-, Landstraßen- und Autobahnfenster wieder jeweils mit einem Strenge-Index versehen und schließlich gemittelt. Der Strenge-Index steht in direktem Zusammenhang mit dem Gewichtungsfaktor. [19]
Bei der MW-Methode hingegen, werden alle gemessenen Werte miteinbezogen und besitzen die gleiche Gewichtung.
Es lässt sich also sagen, dass den Messwerten in der MAW-Methode durch ihre Gewichtung ein unterschiedlicher Einfluss auf die Gesamtemissionen zugeteilt wird. Zudem werden Messwerte auf zwei Wege von der Emissionsberechnung ausgenommen. Zum einen werden bestimmte Werte von vornherein aussortiert. Zum anderen entfallen Werte in der Berechnung durch ihren zugewiesenen Gewichtungsfaktor. Alles führt letztendlich dazu, dass die Emissionen nach MAW-Methode geringer als nach der MW-Methode ausfallen.
Der allgemein geringere Kohlenstoffmonoxidausstoß bei E85 und speziell im Warmstart mit steigendem Ethanolgehalt, könnte durch die bereits in Kapitel 2.1 erwähnten Punkte nach MENRAD et al. (1982) [27] verursacht worden sein:
Alkoholkraftstoffe besitzen gegenüber Ottokraftstoffen einen höheren Sauerstoffgehalt im Molekül, woraus sich ein verminderter Luftbedarf ergibt. Dies führt laut DENK (2015) 0 zu einer erhöhten Luftzahl. In REIF et al. (2013) [28] ist zu lesen, dass Luftzahl und CO-Emissionen in unmittelbarem Zusammenhang stehen. Die CO-Emissionen steigen mit sinkender Luftzahl. Ist es nun möglich den Verbrennungsmotor mit Hilfe von Alkoholkraftstoffen bei einem erhöhten Lambdaniveau zu betreiben, sinken auch die CO-Emissionen. Steigt der Ethanolanteil im Kraftstoff, nimmt auch der beschriebene Effekt zu. Daher ist dieser bei E85 wohl am stärksten zu sehen.

5.1.2 NO_x-Emissionen

Bei Fahrten unter Kalt- und Warmstartbedingungen führte der Betrieb mit E85 zu geringeren NO_x-Emissionen als beim Einsatz von E5 und E10 (siehe Abbildung 28). Im Mittel zeigte E10 unter Kaltstartbedingungen die höchsten NO_x-Emissionen. Bei beiden Kraftstoffen lagen die Emissionen unter Warmstart- über denen bei Kaltstartbedingungen. E85 hingegen zeigte bei den Stickstoffoxid-Emissionen zwischen Kalt- und Warmstartbedingungen keinen nennenswerten Unterschied. MAW- und Mittelwertmethode führten zu den gleichen genannten Erkenntnissen, wobei die Mittelwert-Emissionen wieder höher als die Emissionen nach MAW-Methode waren.

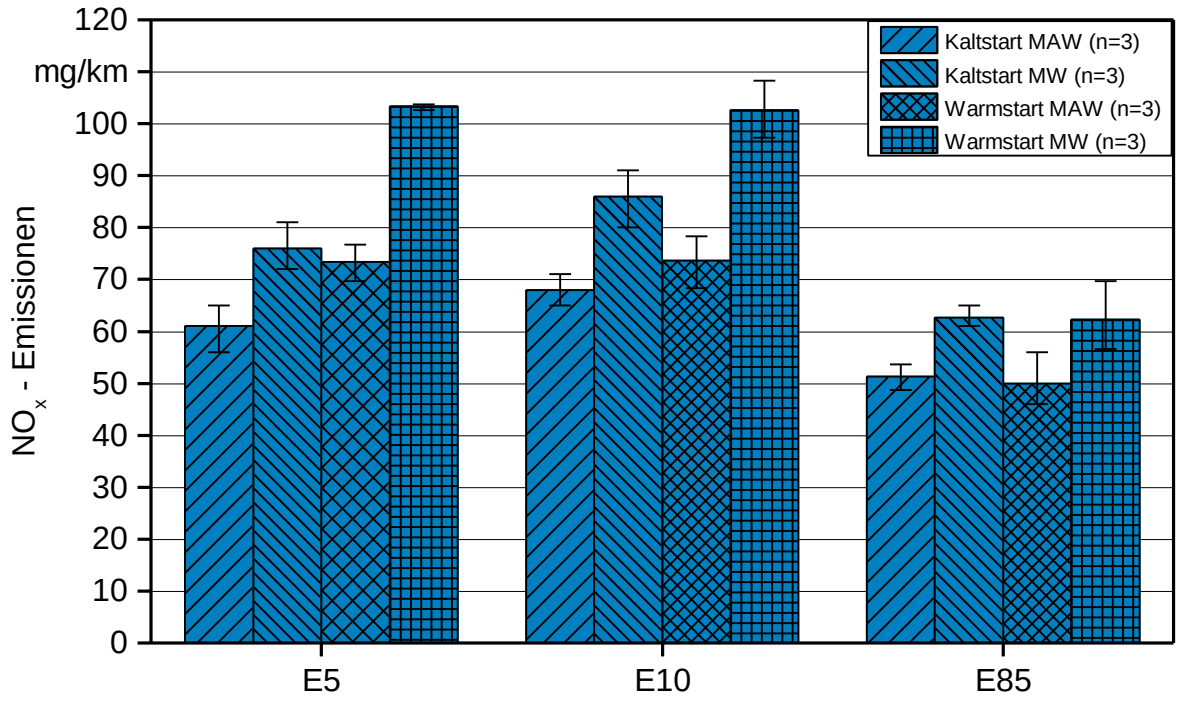


Abbildung 28: NO_x- Emissionen eines FFV im Betrieb mit den Ethanol-Kraftstoffen E5, E10 und E85

Die höheren Emissionswerte nach MW-Methode im Vergleich zur MAW-Methode sind wie bei den CO-Emissionen auf unterschiedliche Berechnungsweisen zurückzuführen.

Die geringeren NO_x-Emissionen bei E85 könnten auf die bei Alkoholkraftstoffen im Vergleich zu konventionellen Ottokraftstoffen erhöhte Verdampfungswärme zurückgeführt werden, welche zu geringeren Verbrennungstemperaturen führt [27] [5]. Die Stickstoffoxidemissionen steigen bekanntermaßen mit der Verbrennungstemperatur an [28] [4] [5].

Wird die Verbrennungstemperatur jedoch durch den Einsatz von Alkoholkraftstoffen gesenkt, wird auch die Entstehung von Stickstoffoxiden gehemmt. Wie bei den CO-Emissionen ist auch hier die stärkere Ausprägung des Effekts mit höherem Ethanolgehalt (E85) zu beobachten.

5.1.3 CO_2-Emissionen

Auch bei den CO_2-Emissionen konnte beim Betrieb mit E85 ein - wenn auch geringer - Emissionsvorteil gegenüber E5 und E10 festgestellt werden (siehe Abbildung 29). Bei allen Kraftstoffen war zwischen den CO_2-Emissionen beim Betrieb unter Kalt- und Warmstartbedingungen kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Im Mittel zeigte E10 unter Kaltstartbedingungen die höchsten Emissionen. Die Ergebnisse aus der Mittelwertmethode sind erwartungsgemäß wieder höher als bei Anwendung der MAW-Methode, wobei beide Methoden dieselben Erkenntnisse liefern.

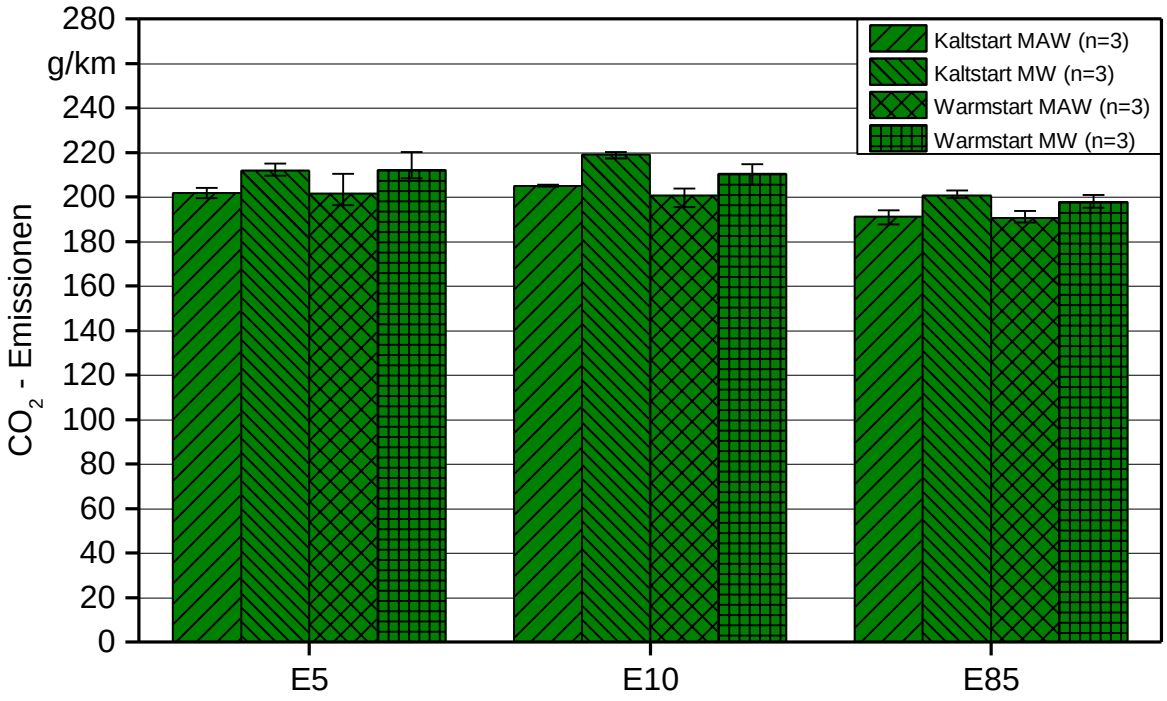


Abbildung 29: CO_2- Emissionen eines FFV im Betrieb mit den Ethanol-Kraftstoffen E5, E10 und E85

Die höheren Emissionen nach MW-Methode im Vergleich zur MAW-Methode ergeben sich wieder aus denen in Kapitel 5.1.1 dargestellten methodischen Gründen.

Die Ursache für die geringeren CO_2-Emissionen bei E85 gegenüber E5 kann in der chemischen Zusammensetzung des Kraftstoffs zu finden sein. Für jeden Kraftstoff wurde im Labor das C-H-O-Verhältnis ermittelt. Daraus lassen sich die stöchiometrisch korrekten Summenformeln bilden und die folgenden Reaktionsgleichungen zur Verbrennung der Kraftstoffe aufstellen:

$$E5: \quad CH_{1,845}O_{0,017} + 1{,}453\ O_2 \rightleftharpoons CO_2 + 0{,}923\ H_2O \tag{5.1}$$

$$E10: \quad CH_{1,897}O_{0,035} + 1{,}457\ O_2 \rightleftharpoons CO_2 + 0{,}949\ H_2O \tag{5.2}$$

$$E85: \quad CH_{2,666}O_{0,356} + 1{,}489\ O_2 \rightleftharpoons CO_2 + 1{,}333\ H_2O \tag{5.3}$$

Die Edukte E5, E10 und E85 besitzen unterschiedliche molare Sauerstoff- und Wasserstoffanteile. Bei E85 sind diese deutlich höher als bei E5 und E10. Daraus resultiert bei E85 ein größerer Wasseranteil bei den Produkten.
Die molare Masse M_K (5.4) von E85 lag mit 20,388 g/mol über der von E5 mit 14,143 g/mol und E10 mit 14,458 g/mol.
Wird mit Hilfe von Gleichung (5.5) die Masse des verbrauchten Kraftstoffs m_K berechnet, kann über Gleichung (5.6) die während der Fahrt benötigte Stoffmenge n_K an Treibstoff ermittelt werden. Tabelle 3 und 4 zeigen die Ergebnisse.

$$M_K = n_C \cdot M_C + n_H \cdot M_H + n_O \cdot M_O \tag{5.4}$$

mit:

M_K molare Masse des Kraftstoffs

n_C Stoffmenge an Kohlenstoff im Kraftstoff

M_C molare Masse von Kohlenstoff

n_H Stoffmenge an Wasserstoff im Kraftstoff

M_H molare Masse von Wasserstoff

n_O Stoffmenge an Sauerstoff im Krafstoff

M_O molare Masse von Sauerstoff

$$m_K = \rho_K \cdot V_K \qquad (5.5)$$

mit:

m_K Masse des eingesetzten Kraftstoffs

ρ_K Dichte des Kraftstoffs

V_K Volumen des eingesetzten Kraftstoffs

$$n_K = \frac{m_K}{M_K} \qquad (5.6)$$

mit:

n_K Stoffmenge des eingesetzten Kraftstoffs

m_K Masse des eingesetzten Kraftstoffs

M_K molare Masse des Kraftstoffs

Tabelle 3: Kraftstoffeigenschaften und durchschnittlich verbrauchte Stoffmengen an im Kaltstart

	Dichte ρ_K	Kraftstoff-volumen V_K	Kraftstoff-masse m_K	Molare Kraftstoff-masse M_K	Stoffmenge Kraftstoff n_K
E5	745 kg/m³	9,31 l	6,94 kg	14,1 g/mol	491 mol
E10	745 kg/m³	9,86 l	7,35 kg	14,5 g/mol	508 mol
E85	781 kg/m³	12,0 l	9,33 kg	20,4 g/mol	458 mol

Tabelle 4: Kraftstoffeigenschaften und durchschnittlich verbrauchte Stoffmengen an im Warmstart

	Dichte ρ_K	Kraftstoff-volumen V_K	Kraftstoff-masse m_K	Molare Kraftstoff-masse M_K	Stoffmenge Kraftstoff n_K
E5	745 m³/kg	9,33 l	6,95 kg	14,1 g/mol	491 mol
E10	745 m³/kg	9,43 l	7,02 kg	14,5 g/mol	486 mol
E85	781 m³/kg	11,7 l	9,15 kg	20,4 g/mol	449 mol

Betrachtet man die Reaktionsgleichungen, zeigt sich, dass sich für die Stoffmenge an eingesetztem Kraftstoff die gleiche Stoffmenge an CO_2 ergibt. E5 und E10 benötigten pro Messfahrt eine höhere Stoffmenge an Treibstoff als E85. Daher muss aus dem Betrieb von E5 und E10 rein stöchiometrisch auch ein höherer CO_2-Ausstoß als beim Einsatz von E85 hervorgehen.
Tabelle 4 zeigt die Veränderung der CO_2-Emissionen bei E85 gegenüber E5 und E10 nach stöchiometrischer Berechnung.

Tabelle 5: Stöchiometrisches CO_2-Minderungspotential beim Einsatz von E85

	CO_2-Minderungspotential von E85 gegenüber E5	CO_2-Minderungspotential von E85 gegenüber E10
Kaltstart	- 6,8 %	- 10,0 %
Warmstart	- 8,7 %	- 7,6 %

Die Werte sind mit den Ergebnissen aus der Emissionsmessung und den Untersuchungen nach ZHAI et al. (2012) [39] vergleichbar.

5.1.4 PM-Emissionen

In der EU-Verordnung 427/2016 ist eine Bestimmung der Partikelmasse nicht vorgesehen, weshalb es für die Bestimmung der PM-Emissionen keine MAW-Methodik gibt. Die Berechnung erfolgt daher wie in Kapitel 4.6.2 beschrieben.

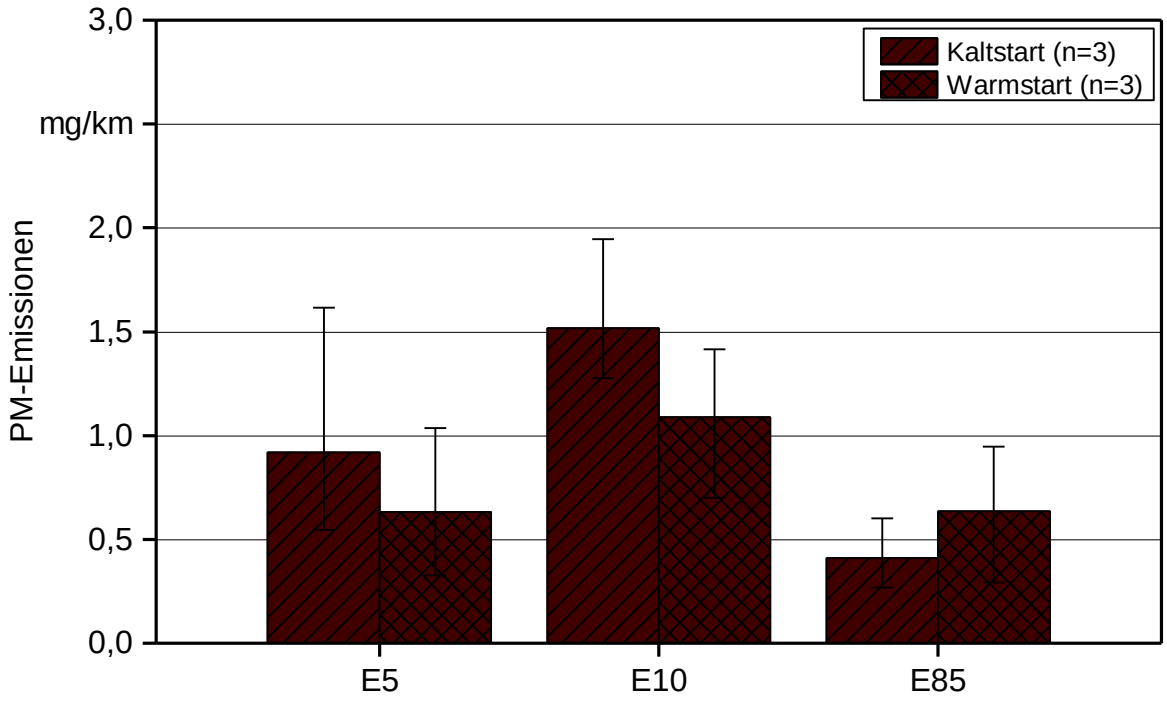


Abbildung 30: PM- Emissionen eines FFV im Betrieb mit den Ethanol-Kraftstoffen E5, E10 und E85

Für die Partikelmasse ließ sich aufgrund hoher Schwankungen bei den Wiederholungsmessungen kein signifikanter Unterschied zwischen den Kraftstoffen feststellen. Im Mittel zeigten sich bei E10 die höchsten PM-Emissionen, wohingegen E85 im Mittel die geringsten PM-Emissionen aufwies.

Unterschiede in den PM-Emissionen können wie die CO_2-Emissionen wohl auf die unterschiedliche chemische Struktur der Kraftstoffe zurückgeführt werden. Je höher der Ethanolgehalt im Kraftstoff, desto höher ist auch der Sauerstoffanteil. Bei Fahrzeugen mit Direkteinspritzung wird der Kraftstoff direkt in den Brennraum eingesprüht. Dabei können sich Kraftstofftropfen auf dem Kolben und den Zylinderwänden absetzen. Bei der Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches werden diese Anlagerungen meist unzureichend verbrannt und dabei Ruß bzw. Partikel gebildet. Der Sauerstoff im Ethanol ermöglicht eine punktuell hohe Sauerstoffanreicherung und dadurch eine partiell sehr gute Verbrennung. Dadurch können die Anhaftungen im Brennraum besser verbrannt und die Partikel somit verringert werden. Je höher nun der Ethanolanteil im Kraftstoff, desto geringer die Partikel. [5]

Zudem verdunsten laut BENNINGER et al. [6] die Kraftstoffanhaftungen mit hohen Ethanolgehalten im Kraftstoff besser und werden so auch optimaler mitverbrannt.

5.1.5 Vergleichende Darstellung der Emissionen aus den einzelnen Prüfkraftstoffen

Am Ende dieses Kapitels sollen die ermittelten Emissionsunterschiede der getesteten Kraftstoffe nochmals zusammenfassend dargestellt werden.

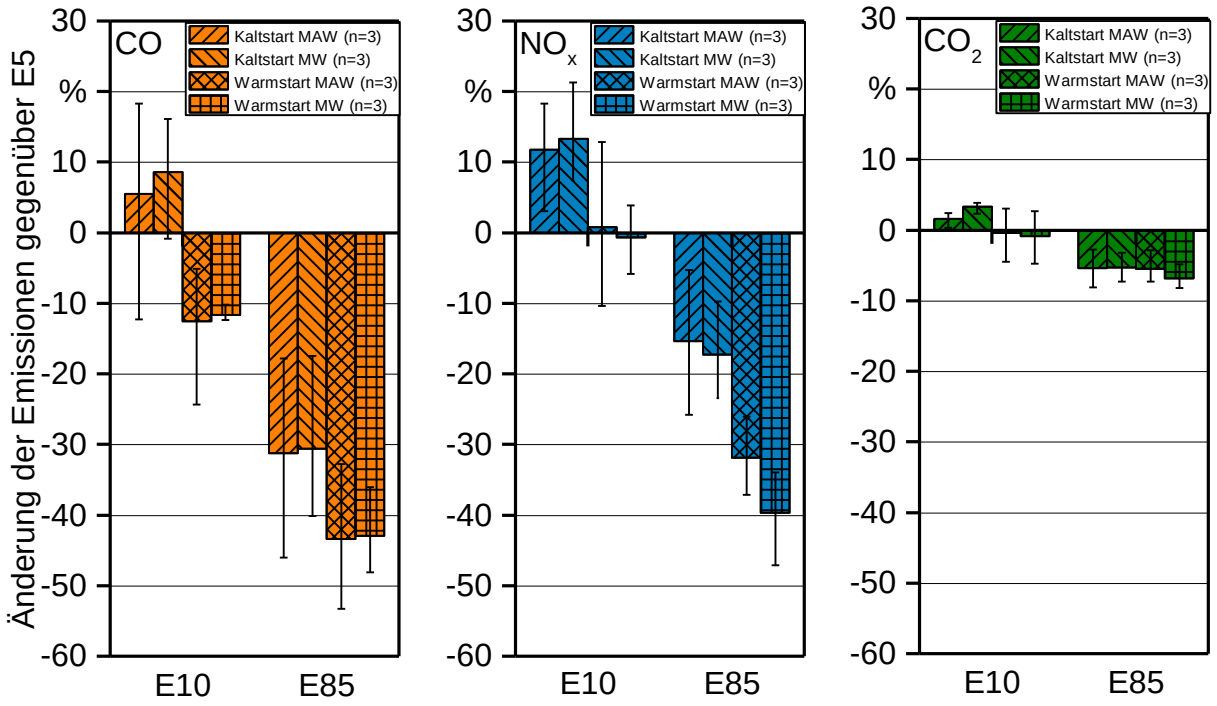


Abbildung 31: Emissionsminderungspotential von E10 und E85 gegenüber E5

Dazu wurden, wie in Abbildung 31 zu sehen, die Emissionen aus dem Betrieb mit E10 und E85 an den Emissionen aus dem Einsatz von E5 gemessen, da E5 den Standard-Ottokraftstoff in Deutschland darstellt.

Der verwendete E10-Kraftstoff bewirkte gegenüber E5 unter Kaltstartbedingungen im Mittel keine Emissionsabnahme, sondern eine Emissionszunahme aller gasförmigen Schadstoffe. So erhöhten sich die CO-Emissionen durchschnittlich um 5,5 % (MAW) bzw. 8,6 % (MW), die NO_x-Emissionen um 12 % (MAW) bzw. 14 % (MW) und die CO_2-Emissionen um 1,6 % (MAW) bzw. 3,2 % (MW). Im Warmstart konnten die CO-Emissionen bei der Verwendung von E10 reduziert werden. Hier sanken die CO-Emissionen im Mittel um 13 % (MAW) bzw. 12 % (MW) vermindert werden, wohingegen die NO_x-und CO_2-Emissionen nicht gesenkt wurden.

Beim E85-Kraftstoff konnte bei Kalt- und Warmstart eine deutliche Emissionsminderung gegenüber E5 festgestellt werden. Im Kaltstart konnten die CO-Emissionen um durchschnittlich 31 % (MAW) bzw. 30 % (MW), die NO_x-Emissionen im Mittel um 15 % (MAW) bzw. 17 % (MW) und die CO_2-Emissionen um 5,4 % (MAW) bzw. 5,3 % (MW). Im Warmstart wurden noch größere Emissionseinsparungen deutlich. Hier konnten im Mittel um 43 % (MAW) bzw. 43 % (MW) reduzierte CO-Emissionen, um 32 % (MAW) bzw. 31 % (MW) verminderte NO_x-Emissionen und um 5,5 % (MAW) bzw. 6,8 % (MW) gesenkte CO_2-Emissionen gemessen werden.

Fazit

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass es bei diesem Fahrzeug möglich war mit Hilfe eines hohen Ethanolanteils im Kraftstoff den Schadstoffausstoß zu verringern. Die Auswertung der Messdaten erfolgte mit zwei unterschiedlichen Methoden, die beide die gleichen Erkenntnisse lieferten. Die MW-Methode bezieht im Vergleich zur MAW-Methode alle Werte mit ein und liefert daher ein genaueres Abbild der tatsächlich ausgestoßenen Emissionen.

5.2 Kumulierte Kalt- und Warmstartemissionen

Die Ursache für das andere Emissionsverhalten des Fahrzeugs beim Betrieb mit E85 wurde bereits über die nach Literaturangaben von konventionellen Ottokraftstoffen unterschiedlichen Eigenschaften von Ethanol diskutiert. Bislang wurden nur die Mittelwerte der gesamten Fahrt betrachtet. In den folgenden Abschnitten werden die Messwertverläufe der einzelnen Emissionskomponenten analysiert, anhand dessen nach den genauen Ursachen des Emissionsunterschieds gesucht wird und die theoretischen Erkenntnisse überprüft werden. Dazu werden auch die vom PEMS mitaufgezeichneten Fahrzeugparameter genauer betrachtet. Die Messwertverläufe ergeben sich aus den momentanen Masseemissionen in g/s, die die Grundlage für die MAW- und die MW-Methode bilden (siehe Kapitel 4.6.1).

Da der Verlauf der Emissionswerte für E10 im Wesentlichen dem von E5 entspricht und sich zwischen den Kraftstoffen meist kein signifikanter Unterschied zeigte, wird dieser hier nicht dargestellt.

Für die Partikelmasse wurden mit Hilfe des CPM Emissionsverläufe aufgezeichnet (siehe Kapitel 4.3.6). Die Auswertung der Daten ergab unplausible Ergebnisse, weshalb diese für die weiteren Analysen nicht verwendet werden konnten. Das Gerät wurde zur Reparatur eingeschickt.

In Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 34 ist der CO-, NO_x- und CO_2-Messwertverlauf zweier ausgewählter Messfahrten mit E5 und E85 beispielhaft dargestellt.

Beide Verläufe weisen Peaks auf, wobei im Fall von E85 die Peaks weniger ausgeprägt als bei E5 sind. Dies konnte auch bei allen anderen Fahrten (siehe Anhang 3) festgestellt werden.

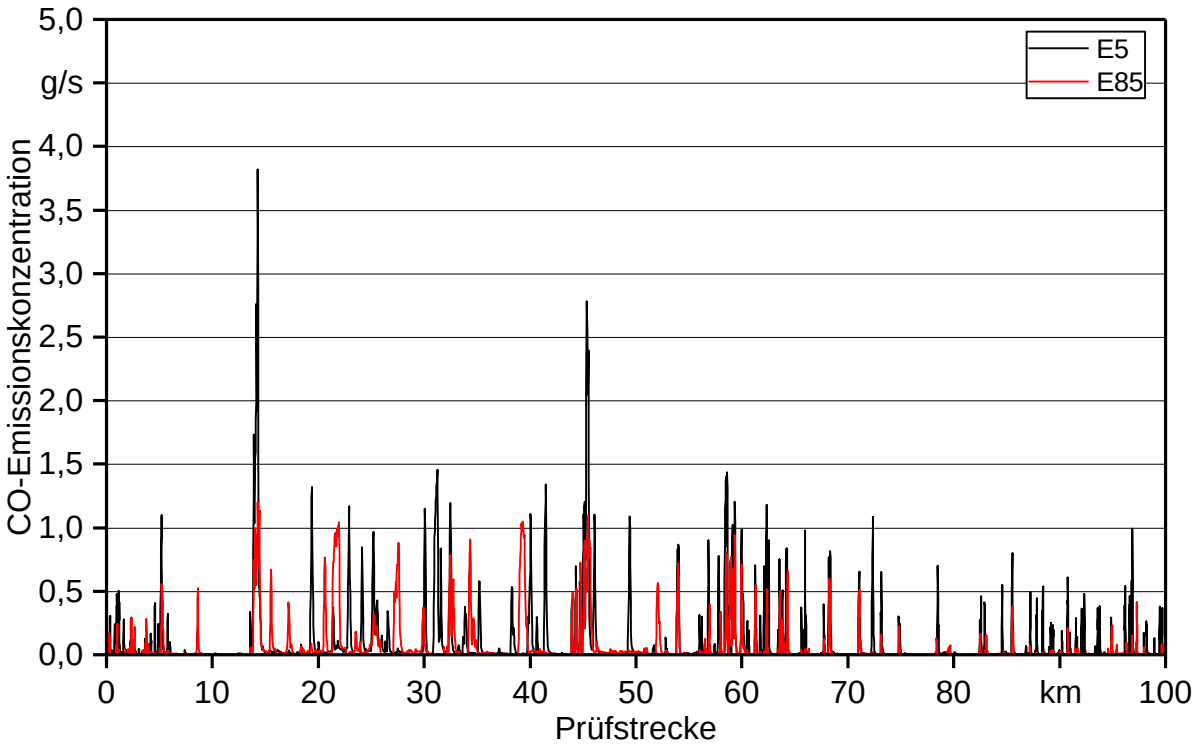


Abbildung 32: Beispiel für CO-Messwertverlauf über die Prüfstrecke

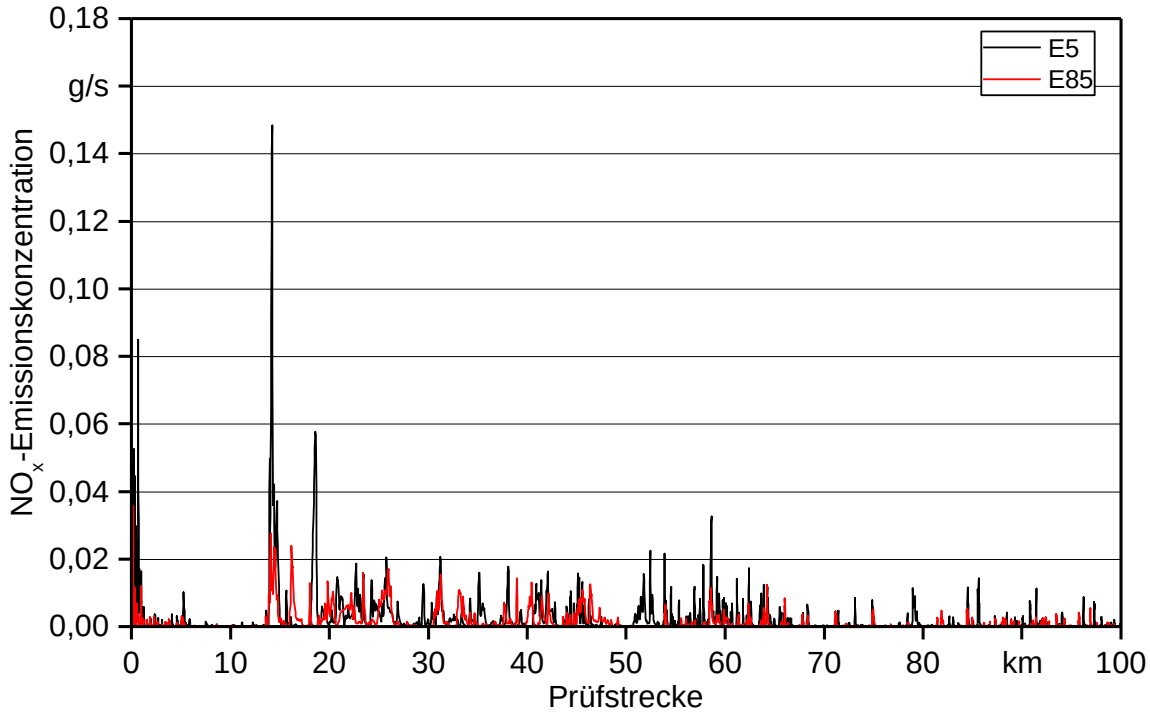


Abbildung 33: Beispiel für NO_x-Messwertverlauf über die Prüfstrecke

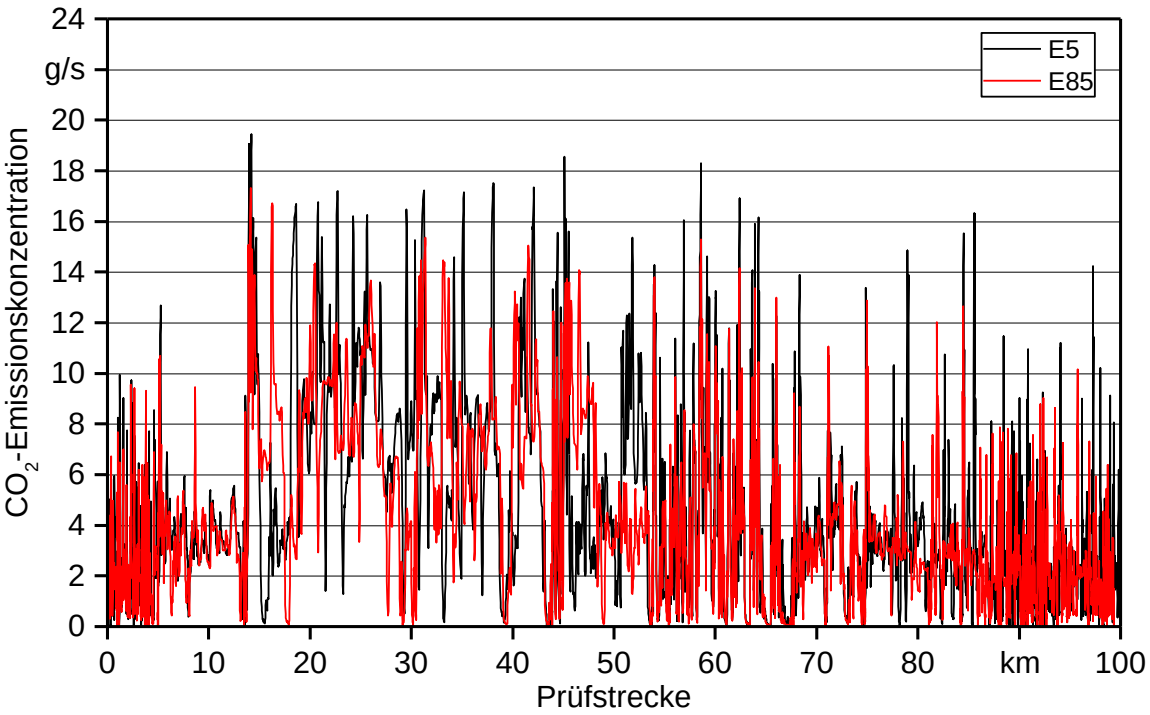


Abbildung 34: Beispiel für CO_2-Messwertverlauf über die Prüfstrecke

Daher war es von Interesse den Einfluss der Spitzenwertgrößen auf die Gesamtemission näher zu untersuchen.

Dazu wurden die Werte für jeden Schadstoff bei jeder Fahrt nach deren Höhe in g/s sortiert und anschließend kumuliert.

Um die Entwicklung der Emissionsmasse jeder Emissionskomponente über die Messfahrt beobachten zu können, wurden die Messwerte zudem in chronologischer Abfolge kumuliert und zusätzlich Streckenabschnitte markiert. Die Streckenabschnitte dienen zur groben Abgrenzung, in welchem Bereich der Prüfstrecke sich das Fahrzeug gerade befindet und wie sich in diesem Abschnitt die Emissionsmasse entwickelt.

Des Weiteren konnte durch diese Darstellungsweise der Unterschied zwischen Warmstart- und Kaltstartbedingungen beobachtet werden. Insbesondere konnten die Emissionen in der eigentlichen Kaltstartphase bis zum Erreichen einer Kühlmitteltemperatur von 70 °C genauer betrachtet werden.

Alle kumulierten Darstellungen wurden wie die Messwertverläufe aus den momentanen Masseemissionen in g/s entwickelt.

5.2.1 CO-Emissionen

In Abbildung 35 ist die kumulierte CO-Emissionsmasse von E5 und E85 über die während der Kalt- und Warmstartfahrten aufgetretenen Messwerte in g/s dargestellt.

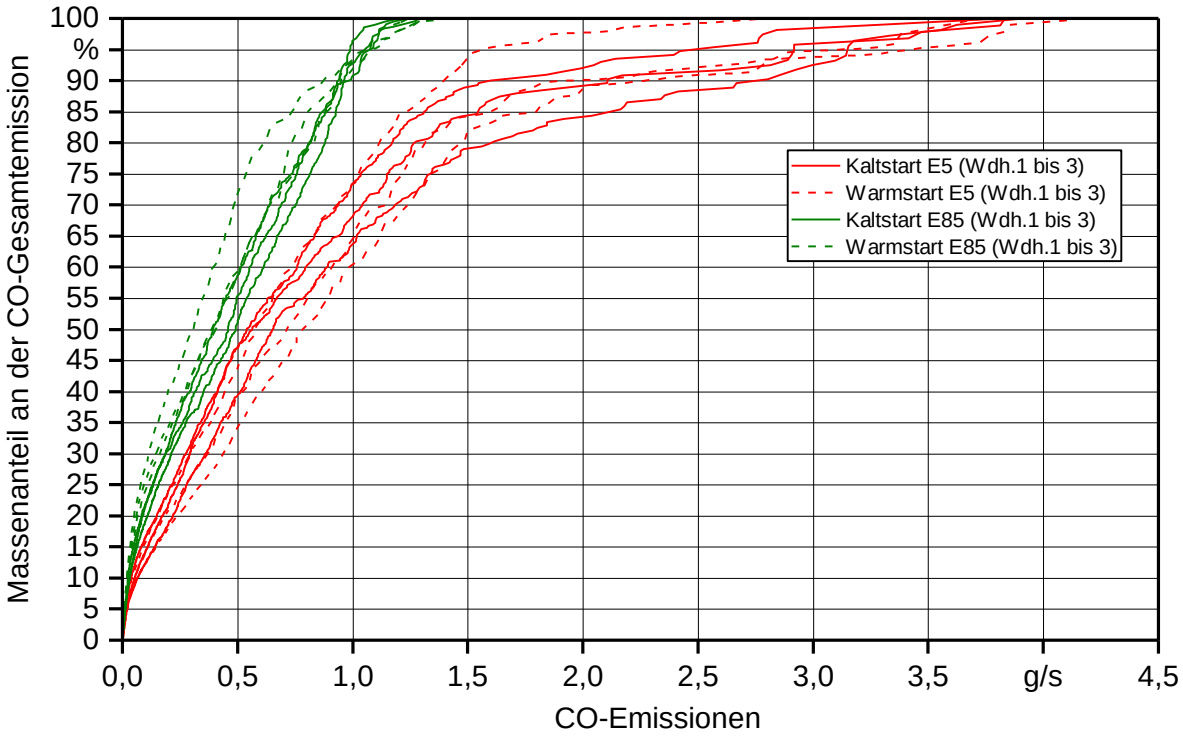


Abbildung 35: Kumulierte CO-Emissionsmasse über die Messwerte der CO-Konzentration

Die maximale Emissionsmenge wird bei E85 mit Konzentrationen von weniger als 1,2 g/s erreicht, wohingegen bei E5 maximale Konzentrationswerte von 2,7 bis 4,2 g/s auftraten. Die höheren Spitzenwerte beim Fahrzeugbetrieb mit E5 nehmen einen Anteil von bis zu 25 % der Gesamtemissionen ein.

Die unterschiedlichen CO-Emissionen der beiden Kraftstoffe werden also maßgeblich durch unterschiedlich große Spitzenwerte beeinflusst.

In Abbildung 36 wurden die kumulierten CO-Emissionen aus den chronologisch sortierten Messwerten über der Prüfstrecke aufgetragen und Streckenabschnitte markiert.

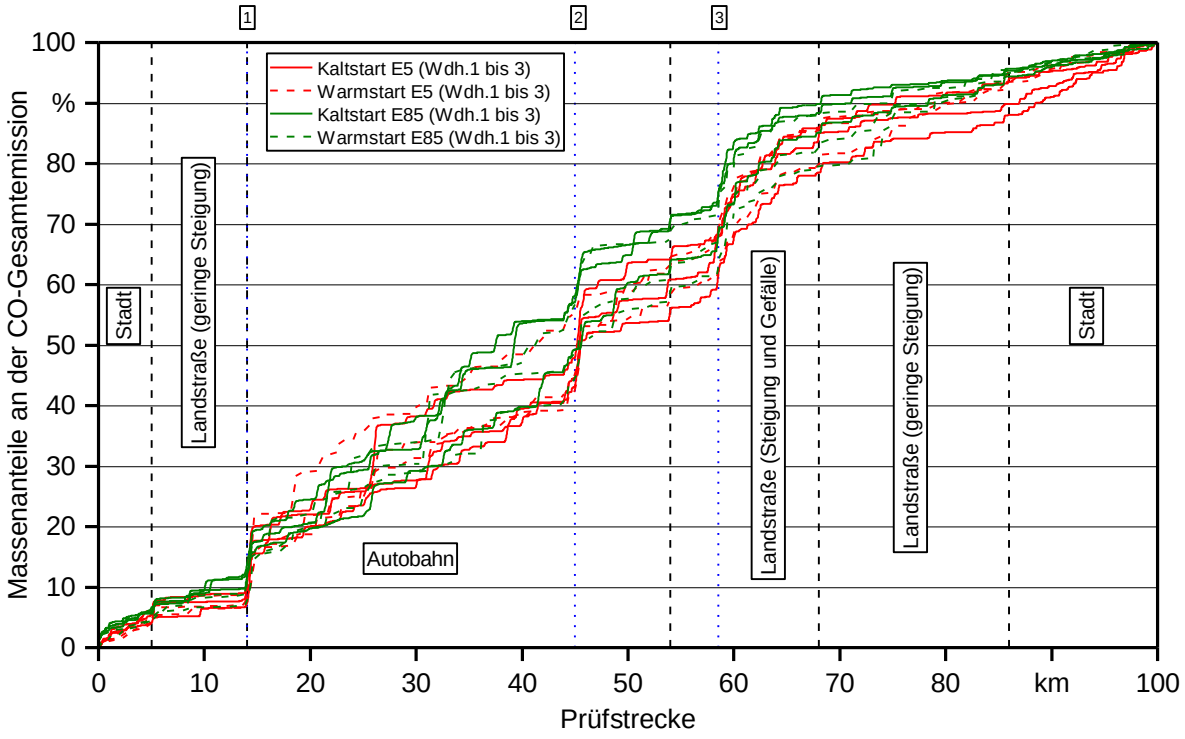


Abbildung 36: kumulierte CO-Emissionsmasse über die Prüfstrecke

Dabei zeigten sich auf der Prüfstrecke die Situationen 1 bis 3, in denen bei nahezu allen Messfahrten ein abrupter Anstieg der CO-Emissionen von rund 10 % erfolgte. Bei der ersten Situation handelt es sich um die Beschleunigungsphase bei der ersten Autobahnauffahrt an der Ausfahrt 105 bei Kirchroth nach den ersten 13 Kilometern der Prüfstrecke. Nachdem 45 km der Prüfstrecke zurückgelegt waren, erfolgte ebenfalls unter Beschleunigung die zweite Autobahnauffahrt an der Ausfahrt 109 bei Metten. Im letzten Punkt musste bei Kilometer 58 eine große Steigung überwunden werden, die den Beginn von mehreren Steigungen und Gefällen in schnellem Wechsel darstellt.

Allein diese drei Fahrsituationen verursachten letztendlich bei beiden Kraftstoffen rund 30 % der gesamten CO-Emissionen. Daher nehmen die Fahrsituationen in den drei Punkten starken Einfluss auf die Gesamtemission. Sind die Emissionswerte für einen Kraftstoff in diesen Punkten geringer, kann erwartet werden, dass auch die Gesamtemissionen dadurch geringer ausfallen.

Wurde hierzu der Messwertverlauf jeder Fahrt betrachtet, ließ sich in den Punkten für beide Kraftstoffe ein erhöhter CO-Emissionsspitzenwert feststellen, der für E5 deutlich größer als für E85 war.

Neben den drei Punkten wurden in Abbildung 36 auch Streckenabschnitte eingezeichnet, in denen unterschiedliche Emissionsentwicklungen deutlich werden. So steigen auf Landstraßen mit geringen Steigungen sowie im Stadtgebiet die Emissionen nur geringfügig an. Am stärksten hingegen stieg die CO-Emission auf Landstraßen mit Steigungen

und Gefällen. Besonders stark erfolgte die Emissionszunahme nach Punkt 3. Auch auf der Autobahn konnte ein großer Emissionszuwachs festgestellt werden.

Nachdem die Emissionsspitzen in den drei Fahrsituationen als wichtiger Einfluss auf den Emissionsunterschied zwischen den Kraftstoffen ermittelt werden konnten, stellt sich die Frage was zu den starken Emissionsanstiegen in den einzelnen Punkten führte. Dazu müssen die genauen Gegebenheiten an jedem Punkt betrachtet werden. Dies betrifft v. a. die spezifischen Fahrzeugparameter. Im vorliegenden Fall wurden durch das PEMS u. a. Daten zu Motorlast und -drehzahl sowie zum Lambdawert aufgezeichnet.

Betrachtet man die Situationen 1, 2 und 3, ist an allen Punkten ein starker Anstieg der Motordrehzahl und der Motorlast zu erkennen. Zudem sinkt der Lambdawert in den unterstöchiometrischen Bereich ab.

Vergleicht man die Betriebsdaten des Fahrzeugs in den drei Situationen beim Betrieb mit E5 und E85 fällt Folgendes auf:

Zwischen Motorlast und -drehzahl sind keine Unterschiede erkennbar. Der Lambdawert im Betrieb mit E5-Kraftstoff sinkt aber stärker ab als beim Einsatz von E85-Kraftstoff.

Laut REIF et al. (2013) [28] steht die CO-Emission in unmittelbarem Zusammenhang zur Luftzahl. Bei $\lambda<1$ steigt die CO-Emission stark an.

Je stärker also der Lambdawert in den unterstöchiometrischen Bereich absinkt, desto höher sind die CO-Emissionen. Aus diesem Grund fallen wohl die CO-Emissionen bei gleicher Lastanforderung für E85 im selben Punkt geringer aus.

URBANEK et al. (2009) [37] konnten bei Motorprüfstandsuntersuchungen mit verschiedenen Ethanol-Kraftstoffen die Klopffestigkeit als wichtiges Kriterium für die Schwerpunktslage der Verbrennung feststellen. So muss durch Klopfereignisse bei Volllast die Zündung in Richtung spät verstellt werden, wodurch sich die Abgastemperatur erhöht, was wiederum einen Anreicherungsbedarf des Gemisches hervorruft. Mit dem Ethanolgehalt im Kraftstoff steigt auch die Oktanzahl und damit die Klopffestigkeit im Kraftstoff, wodurch die Zündung in Richtung früh eingestellt werden kann. Zusätzlich sinkt die Abgastemperatur und damit auch der Anreicherungsbedarf. Des Weiteren steigen Wirkungsgrad und Drehmoment des Motors. Der Versuchsmotor konnte in weiten Teilen mit einem Lambdawert nahe 1 betrieben werden.

Dies trifft auch auf den vorliegenden Fall zu. So sank die Luftzahl auch im Volllastbetrieb bei E85 nur auf 0,95 ab, wohingegen der Wert bei E5 auf bis zu 0,86 abgesenkt wurde. Am Testfahrzeug konnten beim Einsatz von E5 und E85 verschiedene Zündwinkel festgestellt werden. So wurde der Zündwinkel in den drei Fahrsituationen beim Einsatz von E85 nahe der optimalen Verbrennungsschwerpunktslage von 8 ° Kurbelwinkel vor dem oberen Totpunkt eingestellt, wohingegen die Zündung bei E5 auf einen späteren Zündzeitpunkt verstellt wurde. Zudem wurden beim Betrieb mit E85 in den drei Fahrsituationen geringere Abgastemperaturen gemessen.

5.2.2 NO_x-Emissionen

Wie in Abbildung 37 zu sehen, wurde die Masse der NOx-Emissionen wie die CO-Emissionen in kumulierter Weise über die einzelnen Messwerte aufgetragen.

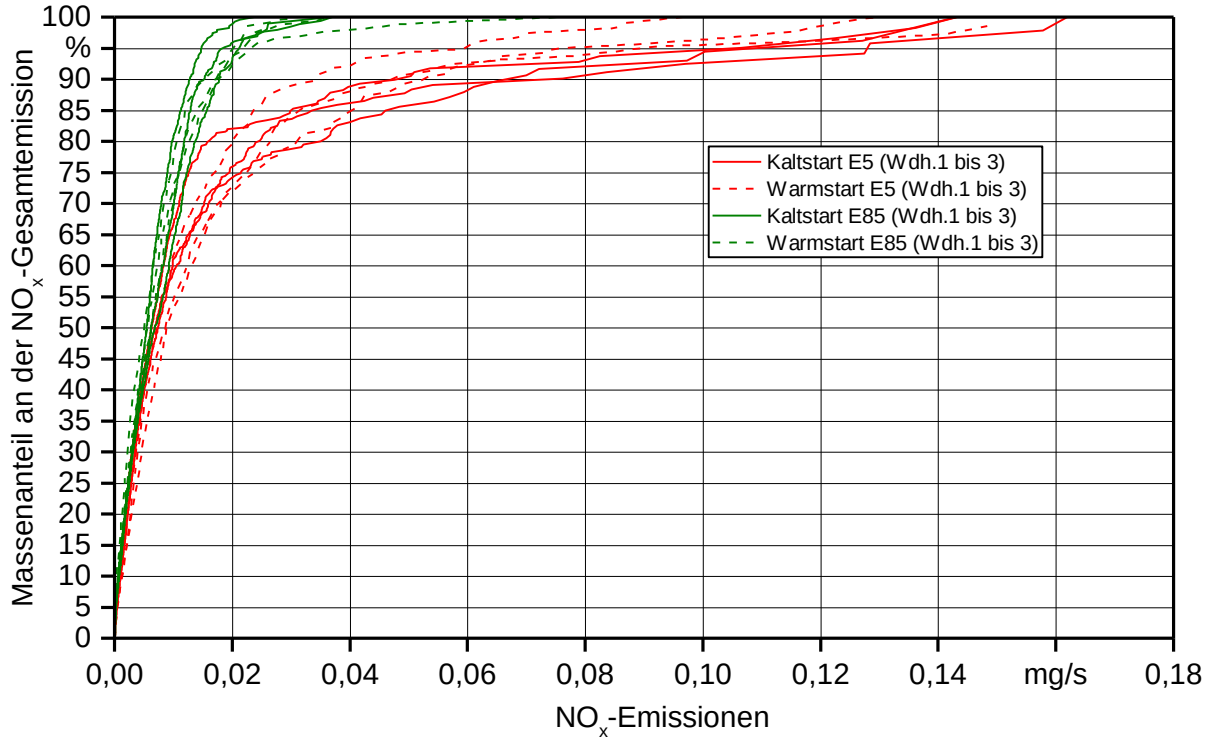


Abbildung 37: Kumulierte NO_x-Emissionsmasse über die NO_x-Messwerte

Ähnlich zu den CO-Emissionen basieren auch die NO_x-Emissionen bei E85 auf geringeren Emissionskonzentrationen als bei E5. So werden bei E85 bis zu einer Konzentration von 0,035 bis 0,65 mg/s 100 % der gesamten Emissionsmasse erreicht. Bei E5 geschieht dies erst bei Werten von 0,092-0,162 mg/s.
In Abbildung 37 wachsen die NO_x-Emissionen beider Kraftstoffe bis zur Hälfte der Emissionsmassen mit gleicher Geschwindigkeit an. Bei E85 steigen diese unverändert weiter und flachen erst bei Werten über 90 % – ähnlich den CO-Emissionen – wieder ab. Bei E5 hingegen steigen die Emissionen mit geringerer Steigung weiter an.
Es kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die höheren Emissionen im Betrieb mit E5 durch hohe Emissionsspitzen gegenüber dem Betrieb mit E85 zustande kommen.
Werden auch für die NO_x-Emissionen, wie in Abbildung 19 zu sehen, die kumulierten NO_x-Emissionen aus den chronologisch sortierten Messwerten aufgetragen, zeigt sich in den gleichen Situationen wie bei den CO-Emissionen sowie unter Warmstartbedingungen auch zu Beginn der Fahrt ein sprunghafter Emissionsanstieg.

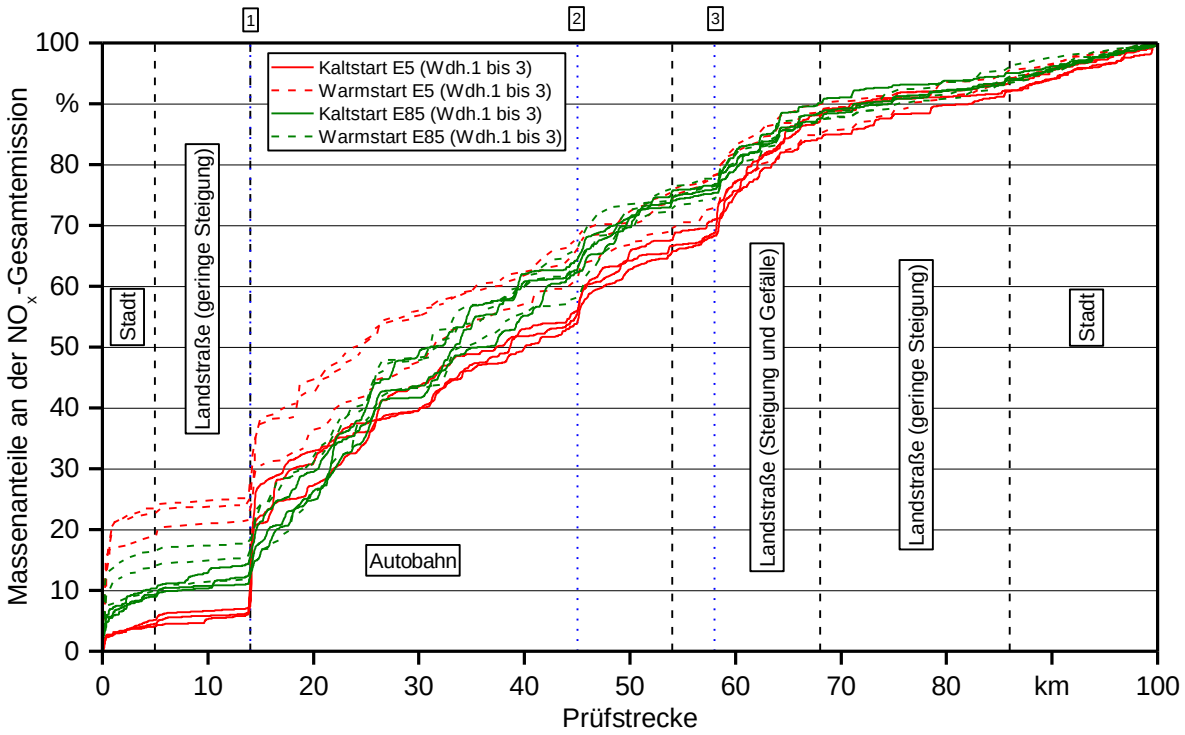


Abbildung 38: Kumulierte NO_x-Emissionen über die Prüfstrecke

Die Emissionsanstiege unterscheiden sich hier stärker voneinander als bei den CO-Emissionen. So zeigen sich zu Beginn der Fahrt und in der ersten Situation deutlich größere Anstiege als in den Punkten 2 oder 3. Der gesamte Massenanteil der Punkte beträgt rund 30-50 %. Daher nehmen die Fahrsituationen in den drei Punkten starken Einfluss auf die Gesamtemission.

Neben den drei Situationen wurden auch Streckenabschnitte in Abbildung 38 markiert. Auf Landstraßen mit geringen Steigungen sowie im zweiten Stadtabschnitt stiegen die Emissionen nur geringfügig an. Auf der Autobahn und auf Landstraßen bei Steigungen und Gefällen wuchs die Emissionsmasse stärker an. Im ersten Abschnitt mit Stadtbetrieb zeigte sich zwischen den NO_x-Emissionen aus Fahrten mit Warm- und Kaltstartbedingungen ein unterschiedliches Bild. So stiegen die NO_x-Emissionen zu Beginn des Warmstarts stärker an als im Kaltstart.

Nachdem auch bei den NO_x-Emissionen bestimmte Fahrsituationen als eine Ursache für die Emissionsunterschiede zwischen den Kraftstoffen gefunden wurden, stellt sich auch hier die Frage, warum in den Punkten die Emissionen stärker anstiegen. Dazu wurden wieder die die aufgezeichneten Fahrzeugparameter Motorlast und -drehzahl sowie der Lambdawert herangezogen.
Wie bereits erwähnt, erhöhte sich in den drei Situationen sowohl Motorlast als auch Motordrehzahl sehr stark. Zudem sanken die Lambdawerte in den unterstöchiometrischen Bereich ab. NO_x-Emissionen sinken ober- und unterhalb von ihrem Höhepunkt bei

λ=1,05 bis 1,1 stark ab [28]. Im vorliegenden Fall liegt der Wert bei λ<1. Daher scheidet der Lambdawert hier als Begründung für erhöhte Emissionen aus.
Laut REIF et al. (2013) steigen die NO_x-Emissionen bei steigender Motorlast. Dies wird auf eine steigende Verbrennungstemperatur zurückgeführt. Bei zu geringem Restgasgehalt im Brennraum kann auch eine steigende Motordrehzahl die Bildung von NO_x fördern. [28]
Bei beiden Kraftstoffen war die gleiche Lastanforderung und Motordrehzahl in den drei Punkten vorhanden. Laut MENRAD et al. (1982) [27] und BASSHUYSEN et al. (2013) [4] senken Alkoholkraftstoffe wie Ethanol über ihre hohe Verdampfungswärme die Verbrennungstemperatur durch Kühlung des Kraftstoff-Luft-Gemisches.
Dadurch kann es möglich sein, dass E85 gegenüber E5 in den drei Punkten trotz gleicher Bedingungen niedrigere NO_x-Emissionen erzielte.

Neben den drei charakteristischen Punkten konnte im Warmstart auch zu Beginn ein starker Anstieg der NO_x-Emissionen festgestellt werden.

Zum einen könnte die beim Warmstart gegenüber dem Kaltstart zu Beginn der Fahrt deutlich höhere Motortemperatur Einfluss auf die NO_x-Emissionen genommen haben.

Zum andern war durch die einstündige Pause zwischen Kalt- und Warmstartmessung zudem der Katalysator bis zur Warmstartmessung abgekühlt. Damit der Katalysator mindestens 50 % der Schadstoffe konvertiert, benötigt er in der Regel eine Temperatur von 300 °C (Light-Off-Temperatur) [4] [5]. Eine vollständige Konvertierung erfolgt erst bei rund 400 bis 800 °C [28]. Betrachtet man die Katalysatortemperatur des Testfahrzeugs im Warmstart wird die Light-Off-Temperatur erst nach einigen hundert Metern Fahrt erreicht. Während dieser Fahrstrecke sind große Emissionsspitzen zu finden.

Es scheint also möglich, dass durch die erhöhten Temperaturen beim Warmstart zu Beginn der Fahrt mehr NO_x emittiert wurde. Zudem ist anzunehmen, dass der Katalysator aufgrund der noch nicht erreichten Light-Off-Temperatur die Emissionen noch nicht ausreichend konvertieren konnte.

5.2.3 CO_2-Emissionen

In Abbildung 39 sind die CO_2-Messwerte in g/s aufsteigend geordnet und kumuliert.

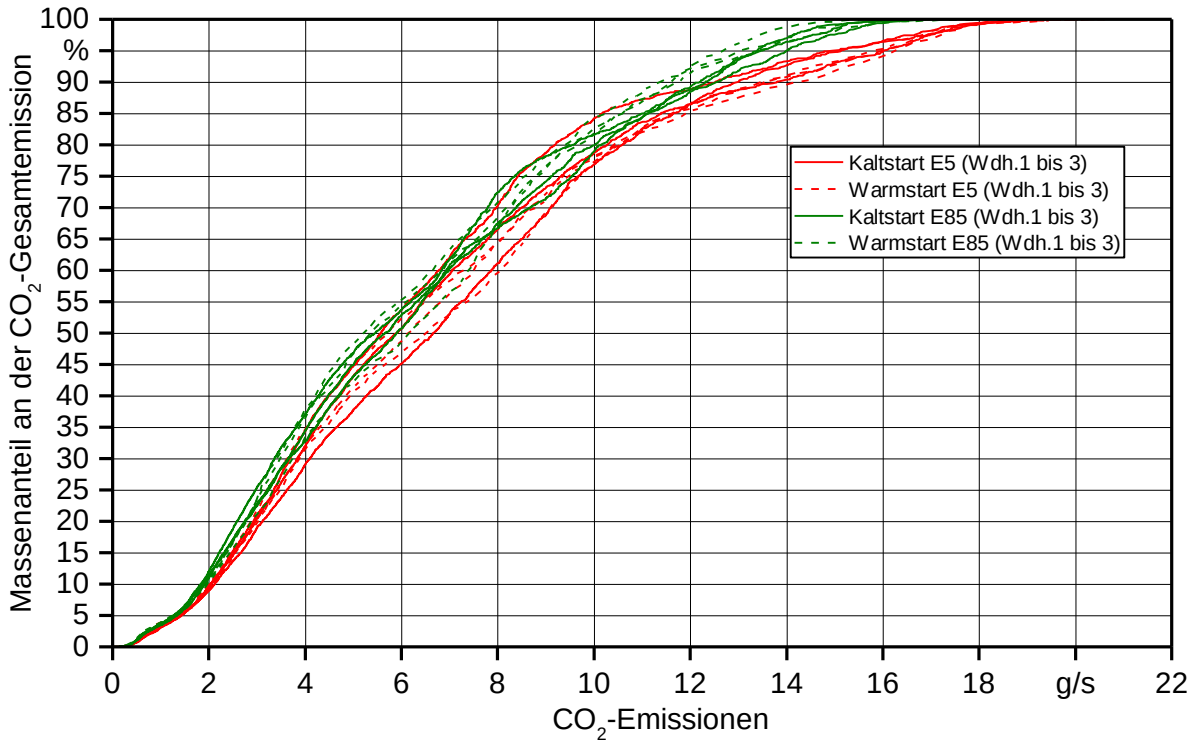


Abbildung 39: Kumulierte CO_2-Emissionsmasse über CO_2-Messwerte

Die CO_2-Emissionsmassen von E5 und E85 entwickeln sich unterschiedlich. Der Unterschied zwischen E5 und E85 ist hier ähnlich wie bei den absoluten Werten geringer als bei den CO- und NO_x-Emissionen. Die maximale Emissionsmasse wird mit E85 bei maximalen Konzentrationen von 15-17 g/s erreicht mit E5 hingegen erst bei Konzentrationen von 18-19 g/s.

Die CO-Emissionen entwickeln sich bei beiden Kraftstoffen bis zu einem Massenanteil von 80 % mit gleicher Steigung. Im weiteren Verlauf nimmt die Emissionsmasse bei E5 mit geringerer Steigung als bei E85 zu.

Die Emissionsunterschiede resultieren auch hier aus den unterschiedlichen stark ausgeprägten Peaks der Kraftstoffe. In Abbildung 40 wurden dazu die aus den chronologisch sortierten Messwerten kumulierten CO_2-Emissionen dargestellt.

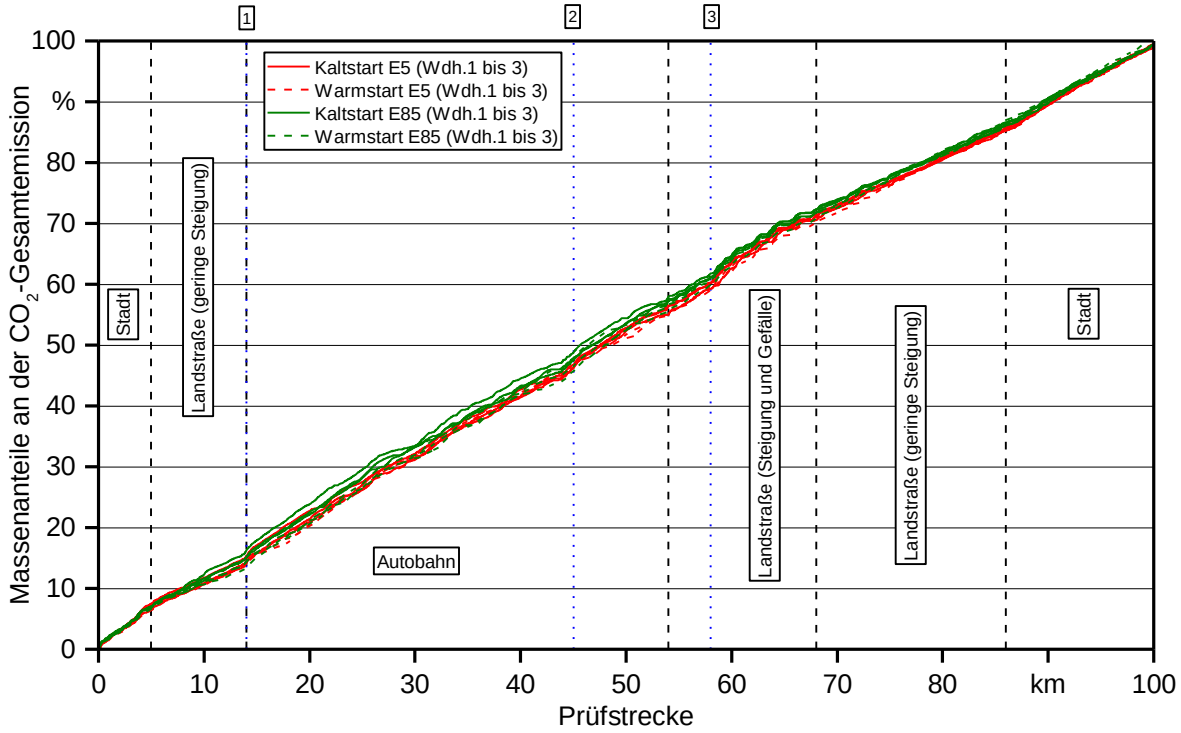


Abbildung 40: Kumulierte CO_2-Emissionen über die Prüfstrecke

Beobachtet man hier wieder die drei Stellen mit den bestimmten Fahrsituationen, erfolgt zwar ein Anstieg der CO_2-Emissionen. Dieser ist aber weniger stark als bei CO- und NO_x-Emissionen. Der Anteil dieser Werte an der Gesamtemission beträgt nur 5 %.

Zwischen den in der Darstellung eingetragenen Streckenabschnitten gibt es kaum Unterschiede in der Emissionsentwicklung. Die Emissionen steigen in allen Abschnitten nahezu linear an. Lediglich Landstraßenstrecken bei geringeren Steigungen weisen einen etwas flacheren Kurvenverlauf auf.

Im Vergleich zu den CO- und NO_x-Emissionen scheint bei den CO_2-Emissionen keine spezielle Fahrsituation für die Emissionsunterschiede ausschlaggebend zu sein. Die in Kapitel 5.1.3 ermittelten stöchiometrischen Unterschiede zwischen den beiden Kraftstoffen haben hier den größeren Einfluss auf das Gesamtergebnis.

Fazit

Bei den kumulierten Emissionen aus den nach Größe geordneten Messwerten konnte festgestellt werden, dass bei allen erfassten Emissionskomponenten die maximale Emissionsmasse im Fall von E85 früher und damit bei geringeren Emissionswerten erreicht wurde. Wurden die Emissionswerte aus den chronologisch über die Fahrstrecke geordneten Werten kumuliert, konnte beobachtet werden, dass nur wenige Peaks bei Beschleunigungsvorgängen auf die Autobahn und an Steigungen einen großen Anteil an der gesamten Emissionsmasse bei CO- und NO_x-Emissionen haben. Bei E85 waren diese Peaks weniger ausgeprägt, wodurch sich u. a. dessen geringeren Gesamtemissionen

erklären lassen. Die Ursache für die Emissionsspitzen kann im Falle von CO ein geringerer Lambdawert sein. Bei E5 lag deutlich niedriger als bei E85, wodurch dessen Spitzenemissionen höher waren. Bei den NO_x-Emissionen liegt die Ursache für die Spitzenwerte in der hohen Motorlast mit hohen Verbrennungstemperaturen. Ein steigender Ethanolgehalt führt zum Rückgang der Temperaturen im Brennraum und damit auch der NO_x-Emissionen. Bei den CO_2-Emissionen hatten die Betriebspunkte nur einen untergeordneten Einfluss. Hier sind die unterschiedlichen Gesamtergebnisse im Betrieb bei der Verwendung verschiedener Ethanolkraftstoffe in den unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen von E5 und E85 erklärbar.

5.3 Kalt- und Warmstartemissionen in den einzelnen Betriebsarten

Im ersten Schritt der Ergebnisbetrachtung wurden die Emissionen der gesamten Fahrt untersucht. Im zweiten Schritt wurde neben der Ursachenforschung für die geringeren Emissionswerte bei E85 auch eine grobe Unterteilung der Messstrecke vorgenommen. Dabei zeigte sich, dass sich v. a. die CO-und NO_x-Emissionsmassen in den einzelnen Bereichen der Prüfstrecke unterschiedlich entwickelten. Um hier eine genauere Betrachtung vorzunehmen, werden daher abschließend die entfernungsspezifischen Emissionen (g/km) in den einzelnen Betriebsarten des Fahrzeugs untersucht, aus denen sich die Prüfstrecke zusammensetzt (siehe Kapitel 4.5.1).

Wie in Kapitel 4.5.1 erläutert, wird das Fahrzeug während der Messfahrt in den drei Betriebsarten Stadt-, Landstraßen- und Autobahnbetrieb bewegt, die in der EU-Verordnung 427/2016 über folgende Geschwindigkeitsintervalle definiert werden:

Stadtbetrieb:	0 km/h bis 60 km/h
Landstraßenbetrieb:	mehr als 60 km/h bis 90 km/h
Autobahnbetrieb:	mehr als 90 km/h

Die Betriebsarten entsprechen nicht zwangsläufig den Streckenabschnitten im vorangegangenen Kapitel, da ein Streckenabschnitt mehrere Betriebsarten enthalten kann. So wird beispielsweise ein Bereich auf einer Landstraße, auf dem die Fahrgeschwindigkeit unter 60 km/h liegt (z.B. Durchfahren einer Ortschaft) dem Stadtbetrieb zugeordnet.

Um die entfernungsspezifischen Emissionen in den einzelnen Betriebsarten zu bestimmen, wurden die Emissionsmesswerte innerhalb des zugehörigen Geschwindigkeitsintervalls aufsummiert und durch die in der jeweiligen Betriebsart zurückgelegten Strecke dividiert. Die Berechnung erfolgt entsprechend der MW-Methode, bei der im Gegensatz zur MAW-Methode alle Messwerte z. B. auch während der Kaltstartphase oder bei Emissionspeaks gleich gewichtet einfließen. Somit ist es möglich die bisher beobachteten Entwicklungen und die Betriebsarten zu vergleichen.

5.3.1 CO-Emissionen

In Abbildung 41 sind die entfernungsspezifischen Emissionen der drei Betriebsarten Stadt-, Landstraßen- und Autobahnbetrieb und der gesamten Fahrt unter Kalt- und Warmstartbedingungen dargestellt.

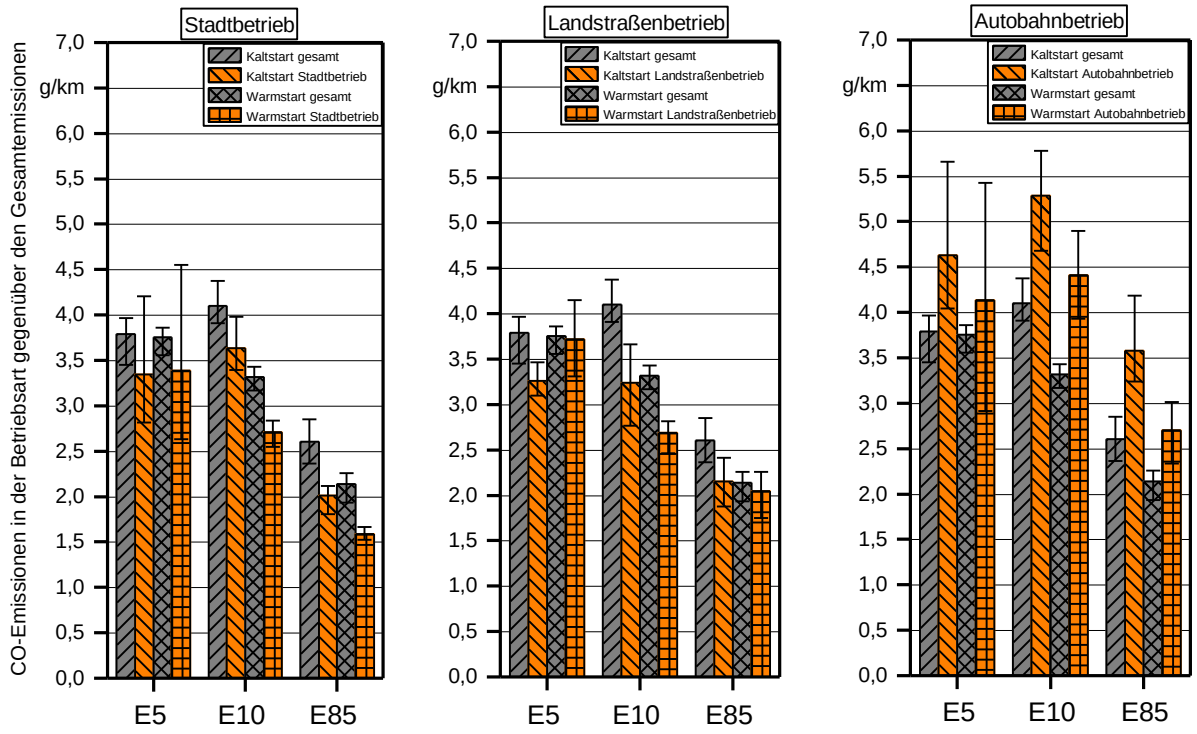


Abbildung 41: Vergleich der spezifischen CO-Emissionen der jeweiligen Betriebsart mit der spezifischen CO-Gesamtemission

Die CO-Emissionen waren während des Autobahnbetriebs am höchsten und lagen mit allen Kraftstoffen im Mittel über den Gesamtemissionen. In allen Betriebsarten waren die Emissionen für E85 im Mittel am geringsten. Während des Landstraßenbetriebs waren beim Warmstart für E10 und E85 gegenüber E5 geringere Emissionen festzustellen.

Die Ergebnisse passen zu den Erkenntnissen der kumulierten Betrachtung in Abbildung 36 in Kapitel 5.2.1. So stiegen dort die CO-Emissionen im Stadtgebiet und auf Landstraßen mit geringeren Steigungen als auf der Autobahn an.

Um heraus zu finden welche Ursache den erhöhten CO-Emissionen im Autobahnbetrieb zu Grunde liegt, werden wieder die Fahrzeugparameter Motorlast, Motordrehzahl und Luftzahl betrachtet. Gegenüber den anderen Betriebsarten lag der entscheidende Unterschied in der Motordrehzahl. So befand sich das Fahrzeug im Autobahnbetrieb in einem höheren Drehzahlniveau als auf Landstraßen oder in der Stadt. Eine erhöhte Drehzahl verkürzt die Zeit zur Verbrennung und Aufbereitung des Kraftstoff-Luft-Gemisches und fördert dadurch die Entstehung von CO-Emissionen [28].

Wenn man wie in Kapitel 5.2 die Messwertverläufe betrachtet, ist zu sehen, dass sich während des Autobahnbetriebs mehrere Emissionsspitzenwerte finden lassen. Hierzu wurden wieder die zugehörigen Lambdawerte näher betrachtet. Es zeigte sich, dass bei steigender Last der Lambdawert aufgrund des in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Anreicherungsbedarfs in Folge einer erhöhten Verbrennungstemperatur abfällt. Dabei sinkt er beim Einsatz von E5 aufgrund geringerer Klopffestigkeit stärker als bei der Verwendung von E85. Daraus könnten bei E85 die geringeren CO-Emissionen während des Autobahnbetriebs zu erklären sein.

5.3.2 NO_x-Emissionen

Abbildung 42 stellt die entfernungsspezifischen NO_x-Emissionen der jeweiligen Betriebsart und der gesamten Fahrt unter Kalt- und Warmstartbedingungen dar.

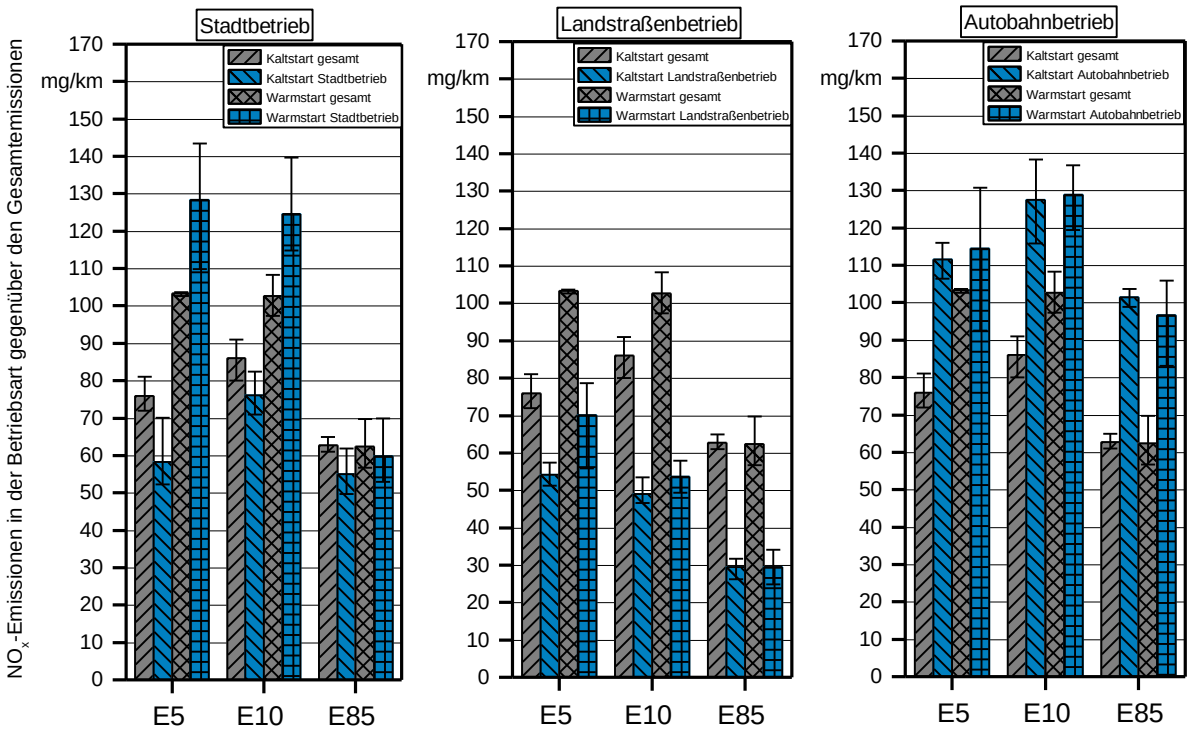


Abbildung 42: Vergleich der spezifischen NO_x-Emissionen der jeweiligen Betriebsart mit der spezifischen NO_x -Gesamtemission

Die NO_x-Emissionen waren im Landstraßenbetrieb am geringsten und im Autobahnbetrieb meist am höchsten. Im Stadt- und Landstraßenbetrieb lagen im Mittel die Warmstart- über den Kaltstartemissionen. Im Landstraßenbetrieb zeigten alle Kraftstoffe geringere Emissionen als die Gesamtemission. E85 erzielte in allen Betriebsarten überwiegend geringere NO_x-Emissionen als E5 und E10. Lediglich im Stadtbetrieb zeigten sich im Kaltstart keine signifikanten Unterschiede.

Vergleicht man hier die Ergebnisse mit den kumulierten Werten in Abbildung 38, so lassen sich Übereinstimmungen finden. So stieg in Abbildung 38 die NO_x-Emission auf Landstraßen mit geringer Steigung kaum an. Auf der Autobahn hingegen wuchsen die NO_x-Emissionen stark an. In Abbildung 42 waren die NO_x-Emissionen im Autobahnbetrieb am höchsten. Zudem war ein unterschiedliches Emissionsverhalten zu Beginn der Fahrten zu beobachten.
Bei Warmstartfahrten war in Abbildung 38 ein schneller Emissionsanstieg zu Beginn der Fahrt zu erkennen. Auch in Abbildung 42 zeigten die NO_x-Emissionen im Stadtbetrieb während des Warmstarts erhöhte Werte. Diese sind auf die Spitzenwerte zu Beginn der Fahrt zurückzuführen, wo ausschließlich Geschwindigkeiten auftraten, die in den Stadtbetrieb fallen. Wie diese zustande kamen, wurde bereits in 5.2.2 näher erläutert. In beiden Abbildungen zeigte E85 während des Warmstarts geringere NO_x-Emissionen im Stadtbetrieb als E5.

In 5.2.2 wurden die Motordrehzahl und die Motorlast als wichtige Einflussgrößen auf die NO_x-Emission genannt. Betrachtet man beide Größen über den Streckenverlauf, steigt v. a. das Motordrehzahlniveau im Autobahnbetrieb. Während sich die Drehzahl im Stadt- und Landstraßenbetrieb im Mittel bei 1500 U/min befand, liegt diese im Autobahnbetrieb durchschnittlich bei 2500 U/min. Die NO_x-Emissionen können sich durch verminderte Restgasgehalte bei steigender Drehzahl erhöhen [28].
Neben der erhöhten Drehzahl konnten während des Autobahnbetriebs auch vermehrt hohe Motorlastanstiege beobachtet werden. Die Motorlast wurde hier zudem lange auf konstant hohem Niveau gehalten. Wie bereits in 5.2.2 erläutert, führt eine erhöhte Motorlast zu erhöhten Verbrennungstemperaturen und somit zu erhöhten NO_x-Emissionen [28] [4] [5].
Im vorliegenden Fall waren während des Autobahnbetriebs sowohl ein erhöhtes Drehzahlniveau als auch vermehrte starke Motorlastanstiege auf länger anhaltende hohe Motorlasten zu beobachten. Dies führte hier wohl zu erhöhten NO_x-Emissionen. Im Landstraßenbetrieb bei geringen Steigungen wurden hohe Motorlasten nur kurz erbracht. Das Drehzahlniveau war im Mittel geringer als auf der Autobahn. Insgesamt war die Fahrweise in diesem Abschnitt sehr konstant. Daher kamen in dieser Betriebsart geringere NO_x-Emissionen zustande.

5.3.3 CO_2-Emissionen

In Abbildung 43 sind die entfernungsspezifischen CO2-Emissionen der jeweiligen Betriebsart und der gesamten Fahrt bei Kalt- und Warmstartbedingungen dargestellt.

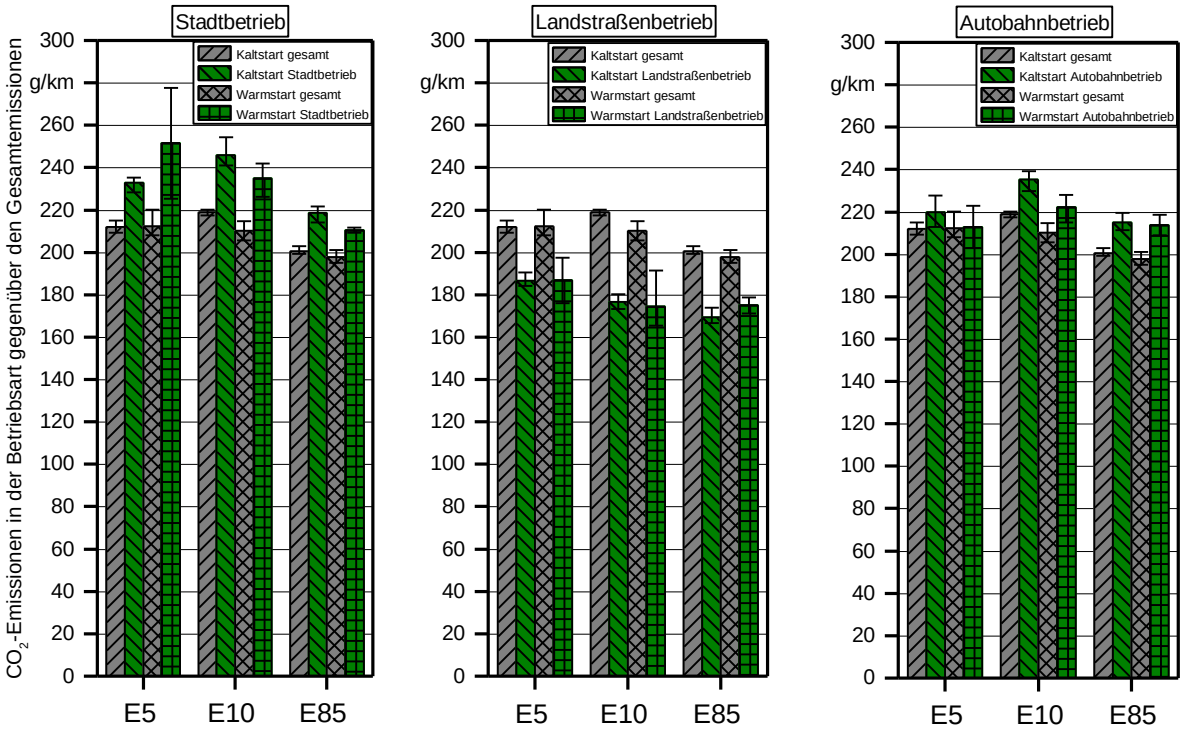


Abbildung 43: Vergleich der spezifischen CO_2-Emissionen der jeweiligen Betriebsart mit der spezifischen CO_2-Gesamtemission

Die CO_2-Emissionen waren im Stadtbetrieb am höchsten und im Landstraßenbetrieb am geringsten. Bei E85 war im Stadtbetrieb die geringste CO_2-Emission festzustellen.

Vergleicht man die Ergebnisse aus Abbildung 43 mit Abbildung 40 zeigen sich Gemeinsamkeiten. In Abbildung 40 entwickelten sich die CO_2-Emissionen nahezu linear über die gesamte Strecke. Im Detail war auf der Autobahn und in der Stadt sowie auf Landstraßen mit Steigungen und Gefällen ein starker Anstieg der kumulierten Emissionsmasse zu erkennen. Dies spiegelt sich in Abbildung 43 wider. So waren auch hier die Emissionen im Stadt- und Autobahnbetrieb höher als im Landstraßenbetrieb.

Wie die Gleichungen (5.1), (5.2) und (5.3) zeigen, besteht zwischen eingesetzter Kraftstoffmenge und CO_2-Emissionen ein unmittelbarer Zusammenhang. Steigt der Kraftstoffverbrauch, steigt auch die CO_2-Emission. Laut REIF et al. (2013) [28] wird der Kraftstoffverbrauch von vielen Faktoren beeinflusst. Als ein maßgeblicher Einflussfaktor kann hier die Fahrweise genannt werden, die einerseits vom Fahrer selbst und andererseits von der Fahrsituation beeinflusst wird. Bei ungleichmäßiger Fahrweise treten vermehrt schnell wechselnde Lastanforderungen auf, die den Kraftstoffverbrauch erhöhen.

Während der Messungen war die Fahrweise je nach Streckenabschnitt und Betriebsart unterschiedlich. So erfolgte in der Stadt z.B. aufgrund von vielen Kreuzungen und Kreisverkehren ein stetiger Wechsel von positiver wie negativer Beschleunigung und somit eine sehr ungleichmäßige Fahrweise. Das Gleiche gilt für den Streckenabschnitt mit Landstraßenbetrieb und einem stetigen Wechsel von Gefällen und Steigungen. Während des Autobahnbetriebs und auf Landstraßen mit geringen Steigungen hingegen war ein vergleichsweise gleichmäßiges Fahren durch eine möglichst konstante Geschwindigkeit möglich.

Betrachtet man den Verlauf von Motorlast und Motordrehzahl, folgten Lastwechsel in den Bereichen mit ungleichmäßiger Fahrweise in kürzeren Abständen als bei gleichmäßiger Fahrweise aufeinander. In den Abschnitten mit gleichmäßiger Fahrweise waren längere Abschnitte mit möglichst stabiler Drehzahl zu finden, wohingegen in den anderen Teilen mehrere Drehzahlsprünge unmittelbar hintereinander folgten.
Neben den Drehzahlsprüngen fanden sich unterschiedliche Drehzahlniveaus. So wurde zwar auf der Autobahn möglichst gleichmäßig gefahren, aber das Drehzahlniveau war gegenüber dem Landstraßenbetrieb mit geringen Steigungen deutlich erhöht. Die höhere Drehzahl resultiert aus einer höheren Geschwindigkeit auf der Autobahn und der damit verbundenen höheren Leistungsanforderung an den Motor. Höhere Drehzahlen führen zu einem erhöhten Verbrauch und damit zu einem erhöhten CO_2-Ausstoß. Dies erklärt die im Vergleich zum Landstraßenbetrieb erhöhten CO_2-Emissionen. Im Stadtbetrieb und auf der Landstraße bei Steigungen und Gefällen sorgten wohl die ständigen Lastwechselreaktionen für die erhöhten CO_2-Werte.

Fazit

Es wurden in den vorausgegangenen Kapiteln die Emissionen in den einzelnen Betriebsarten des Fahrzeugs näher betrachtet. Dabei ließ sich feststellen, dass die Emissionen während des Autobahnbetriebs am höchsten waren. Bei E85 traten beim Stadt- und Landstraßenbetrieb geringere CO- und NO_x-Emissionen als bei E5 und E10 auf. Bei den NO_x- und CO-Emissionen konnten im Landstraßenbetrieb die geringsten Emissionen ermittelt werden. Bei den CO-Emissionen konnte als Ursache für die unterschiedlichen Werte höhere Motordrehzahlen und Emissionsspitzen im Autobahnbetrieb ermittelt werden. Für die erhöhten NO_x-Emissionen beim Warmstart in der Stadt und während des Autobahnbetriebs waren zum einen die in Kapitel 5.2.2 erläuterten Phänomene sowie eine erhöhte Motordrehzahl und länger anhaltende hohe Motorlasten als Ursache zu finden. Bei den CO_2-Emissionen konnte der Einfluss der Fahrweise als Erklärung für die geringeren Emissionen im Landstraßenbetrieb herangezogen werden.

5.4 Einordnung der Ergebnisse

Wie in Kapitel 2 vorgestellt, wurden bereits Emissionsmessungen mit Ethanol-Kraftstoffen durchgeführt, die nun mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung verglichen werden sollen. Bei den bisherigen Studien handelte es sich in den meisten Fällen um Prüfstandsuntersuchungen mit Anwendung der Prüfzyklen NEDC, WLTC und CADC. Der CADC stellt im Vergleich zu den beiden anderen Zyklen einen Warmstart- und keinen Kaltstartzyklus dar (siehe Kapitel 2.3), weshalb sich dessen Ergebnisse am besten mit den Ergebnissen aus den Realfahrten unter Warmstartbedingungen und die Kaltstartfahrten mit den beiden anderen Prüfzyklen abgleichen lassen. Neben den stationären Messungen waren auch wenige mobile Messungen zu finden.

Grundsätzlich können die Ergebnisse der vorliegenden Messungen nur bedingt mit Prüfstandsmessungen sowie anderen Realfahrten verglichen werden. So werden Prüfstandsmessungen bei stabileren Messbedingungen und unter geringeren Lastanforderungen und Beschleunigungen als Messungen im realen Fahrbetrieb durchgeführt, wobei die Ähnlichkeit mit einer RDE-Fahrt von NEDC über WLTC hin zum CADC zunimmt [32]. Bei den bisherigen Untersuchungen zu Realfahrten im PKW-Bereich gab es kaum einheitliche Vorgaben zu den Messbedingungen. Entsprechend zeigten sich dabei größere Schwankungsbreiten in den Ergebnissen.

Die Kohlenstoffmonoxidemissionen waren bei den stationären Messungen von DARDIOTIS et al. (2014) [11] im NEDC beim Betrieb mit E85 gegenüber dem Einsatz von E5 um bis zu 40 % geringer, was etwas über den Kaltstartergebnissen der vorliegende Realfahrten mit maximal 31 % liegt. Wurden die gleichen Messungen im CADC durchgeführt, lag die Minderung mit 43 % auf dem gleichen Niveau mit den RDE-Warmstartfahrten.
In denselben Messungen wurden beim E85-Betrieb im NEDC um bis zu 43 % und im CADC bis zu 40 % weniger Stickstoffoxide ausgestoßen. Diese Ergebnisse konnten bei den Realfahrten mit rund 17 % unter Kaltstart- und rund 32 % unter Warmstartbedingungen nicht erreicht werden.
Die CO_2-Emissionen waren im NEDC bzw. CADC mit 6,8 % bzw. 6,7 % beim Einsatz von E85 nur geringfügig niedriger als beim E5-Betrieb und bewegten sich in einem zu den Realfahrten ähnlichen Bereich.
Der CADC gliedert sich in die drei Abschnitte Urban, Rural und Motorway [32]. Diese bewegen sich in ähnlichen Geschwindigkeitsintervallen wie die Betriebsarten des vorliegenden Fahrzeugs. Daher lassen sich hier auch Vergleiche mit den in Kapitel 5.3 in den einzelnen Betriebsarten bestimmten Emissionen unter Warmstartbedingungen treffen, wobei sich die Emissionsunterschiede zwischen den am Prüfstand ermittelten Emissionen für alle Kraftstoffe nicht so einheitlich wie bei den Realfahrten darstellten. Eine gute Übereinstimmung zeigte sich jedoch zwischen der stationären und mobilen Messung hinsichtlich der hohen Emissionen auf der Autobahn. Durch E85 ließ sich in allen Phasen des CADC für das direkteinspritzende FFV die CO-, NO_x- und CO_2-Emissionen gegenüber E5 reduzieren, wohingegen die Emissionen in der Realfahrt nur teilweise durch den Einsatz von E85 reduziert wurden.

Die Untersuchungen von SUAREZ-BERTOA et al. (2014) [33] zu Ethanolmischkraftstoffen im NEDC und WLTC kamen abweichend zu den vorliegenden Realfahrten zur Erkenntnis, dass sich die CO-Emissionen im NEDC und WLTC von E5 zu E85 erhöhten. Die Stickstoffoxide hingegen wurden mit steigendem Ethanolanteil im Kraftstoff während des NEDC um bis zu 40 % und im WLTC um bis zu 69 % gemindert, was wieder über den Ergebnissen der vorliegenden Realemissionsmessungen unter Kaltstartbedingungen lag. Wie bei DARDIOTIS et al. (2014) [11] und in Realfahrten führte ein hoher Ethanolgehalt (E85) zu rund 3,3 % (WLTC) bzw. 7,7 % (NEDC) geringeren CO_2-Emissionen.
URBANEK et al. (2009) 0 führten an verschiedenen PKW Langzeitemissionsmessungen im NEDC und CADC durch und kamen wie in den vorliegenden Untersuchungen zur Erkenntnis, dass ein geringer Ethanolanteil von bis zu 10 % keine signifikante Verringerung von Emissionen bewirkt.
Auch die stationären Emissionsmessungen von CLAIROTTE et al. (2012) [10] zeigen, dass ein Ethanolgehalt von bis zu 10 % zu keinen geringeren Emissionen führt. Dahingegen zeigten die beiden getesteten FFV im Betrieb mit E85 deutlich geringere Emissionen als beim E5-Betrieb. So sanken der CO-Ausstoß des direkteinspritzenden FFV im NEDC beim E85-Betrieb um bis zu 43 % und die Stickstoffoxidemissionen um bis zu 58 %, was wie in den anderen Studien über den Ergebnissen aus den eigenen Untersuchungen lag. Bei den PM-Emissionen verringerte sich deren Ausstoß um bis 41 %. Dieser Rückgang der PM-Emissionen deckt sich mit den vorliegenden Realemissionsmessungen. Die CO_2-Emissionen gingen um rund 5,8 % zurück, was sich mit den Erkenntnissen aus den realen Kaltstartmessungen dieser Untersuchung vergleichen lässt.
Im CADC erreichte das Fahrzeug mit E85 um 40 % geringere CO- und um 44 % geringere NO_x-Emissionen sowie einen um 6,7 % niedrigeren CO_2-Ausstoß. Die Ergebnisse für die CO- und CO_2-Emissionen sind mit den vorliegenden Realfahrten auf einem Niveau, die NO_x-Emissionen sanken durch E85 im Vergleich zu E5 stärker. Vergleicht man auch hier die Emissionen aus den Phasen des CADC mit den Warmstartemissionen in den einzelnen Betriebsarten des Fahrzeugs in Kapitel 5.3, konnte in allen CADC-Phasen mit dem Einsatz von E85 eine Emissionsminderung gegenüber dem E5-Betrieb festgestellt werden. Bei den Realfahrten war dies nur im Stadt- und Landstraßenbetrieb möglich.

Neben den stationären Messungen wurden bereits wenige mobile Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse ebenfalls mit den Erkenntnissen aus der vorliegenden Untersuchung abgeglichen werden können.

Bei ZHAI et al. (2012) [39] wurden Prüfstand- und Realemissionsmessungen sowie stöchiometrische Berechnungen verknüpft um die realen Emissionen von Fahrzeugen rechnerisch abschätzen zu können. Die Prüfstandemissionen wurden während des FTP-75 Zyklus aufgenommen, welcher in Europa in etwa dem NEDC entspricht. Die Berechnungen ergaben beim Einsatz von E85 gegenüber E0 eine durchschnittliche Minderung der CO-Emissionen von 22 %. Die NO_x-Emissionen konnten hingegen lediglich um 8 % verringert werden. Es wurde hier allgemein kein Unterschied zwischen Kalt- und Warmstart getroffen. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden größere Emissionsunterschiede festgestellt.

HERNANDEZ et al. (2013) [25] stellten bei ihren Realemissionsmessungen mit E5- und E15-Kraftstoffen ähnliche Emissionsunterschiede zu den vorliegenden Ergebnissen fest. So wurde beim Einsatz von E5 statt E0 kein signifikanter Emissionsunterschied gemessen, wohingegen der E15-Betrieb zu geringeren Emissionen als bei der Verwendung des E0-Kraftstoffs führte. Unter Warmstartbedingungen wurden geringere Emissionen als im Kaltstart gemessen, was sich bis auf die NO_x-Emissionen mit den Realfahrten der vorliegenden Untersuchung deckt. Unter Kaltstartbedingungen konnten, gemittelt für alle Testfahrzeuge, die CO-Emissionen unter Verwendung der E15P-Blends um bis zu 30 % und die NO_x-Emissionen um bis zu 45 % verringerten werden. Bei den Warmstartfahrten und bei den CO_2-Emissionen wurde kein Unterschied zwischen den einzelnen Kraftstoffen festgestellt. Die ermittelte Emissionsminderung beim Einsatz von Ethanolkraftstoffen mit mehr als 15 % Ethanolgehalt liegt wie bei den Prüfstandmessungen über den Ergebnissen aus den vorliegenden Realfahrten.

Sowohl in den Vergleichsstudien als auch in der vorliegenden Untersuchung ließ sich ein Emissionsvorteil beim Betrieb der Fahrzeuge mit einem Ethanolgehalt im Kraftstoff von über 10 Vol.-% im realen Straßenverkehr und am Prüftstand nachweisen. Jedoch waren die Emissionsunterschiede zwischen Kraftstoffen mit hohem und niedrigem Ethanolgehalt in anderen Untersuchungen größer als in den vorliegenden Realfahrten. Zudem lagen die Emissionen in der Realität weit über den Emissionen am Prüfstand und überschritten oftmals gültige Grenzwerte für limitierte Schadstoffe (vergleiche Kapitel 2.3).

6 Fazit und Ausblick

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es die Realemissionen eines Audi A4 Avant 2.0 TFSI flexible fuel bei Betrieb mit den Ethanolmischkraftstoffen E5, E10 und E85 zu ermitteln und zu verglichen. Dazu wurde das Fahrzeug im realen Straßenverkehr nach den Vorgaben der EU-Verordnungen 427/2016 und 646/2016 bei Kalt- und Warmstartbedingungen bewegt und dabei die CO-, NO_x-, PM und CO_2-Emissionen mit einem portablen Emissionsmessgerät aufgezeichnet. Im Anschluss wurden mit Hilfe der Moving-Average-Window-Methode nach EU-Verordnung 427/2016 und der Mittelwert-Methode die entfernungsspezifischen Emissionen bestimmt, wobei sich für die Ergebnisse aus der Mittelwert-Methode höhere Werte ergaben. Dies wurde auf die unterschiedliche Berechnungsmethodik zurückgeführt.

Grundsätzlich führten die aus beiden Methoden hervorgegangenen Ergebnisse beim Kraftstoffvergleich aber zu denselben Erkenntnissen.

Beim Vergleich der Ergebnisse für die einzelnen Kraftstoffe konnten v. a. für den Betrieb mit E85 in den meisten Fällen geringere Emissionen als beim Einsatz von E5 und E10 festgestellt werden. Die CO-Emissionen verringerten sich beim E85-Betrieb gegenüber E5 um bis zu 43 %, die NO_x-Emissionen um bis zu 32 % und die CO_2-Emissionen um bis zu 6,8 %. Zwischen E5 und E10 ließen sich hingegen keine signifikanten Emissionsunterschiede feststellen. Bei den PM-Emissionen war aufgrund sehr großer Schwankungsbreiten kein signifikanter Unterschied unter den Kraftstoffen erkennbar. Im Mittel wies das Testfahrzeug beim Betrieb mit E85 geringere Partikelmasseemissionen auf

Als Ursache für die geringeren Emissionen im E85-Betrieb konnten die unterschiedlichen Emissionsspitzenwerte zwischen E85 und E5 ermittelt werden. Zudem wurden bei allen Messfahrten Fahrsituationen festgestellt, die erheblichen Einfluss auf die Gesamtemissionen von CO und NO_x nehmen. Die geringeren CO_2-Emissionen im E85-Betrieb sind überwiegend auf die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Kraftstoffmoleküle zurückzuführen.

Die unterschiedlichen Emissionen in den Punkten konnten auf die Beeinflussung der Fahrzeugparameter durch die unterschiedlichen Kraftstoffeigenschaften zurückgeführt werden. So wurden die erhöhten CO-Emissionen maßgeblich von absinkenden Lambdawerten und die NO_x-Emissionen durch einen starken Anstieg der Motorlast verursacht.

Über den Verlauf der Prüfstrecke konnte v. a. bei den CO- und NO_x-Emissionen eine unterschiedliche Entwicklung der Emissionsmasse beobachtet werden, woraufhin die Kalt- und Warmstartemissionen in den einzelnen Betriebsarten des Fahrzeugs betrachtet wurden. Im Autobahnbetrieb war der Schadstoffausstoß des Fahrzeugs bei allen Kraftstoffen am größten. Im Stadt- und Landstraßenbetrieb brachte der Einsatz von E85 gegenüber dem Betrieb mit E5 oder E10 geringere Emissionen hervor. Die unterschiedlichen NO_x-Emissionen konnten auf verschiedene Drehzahlniveaus und länger anhaltende Motorlasten zurückgeführt werden. Die CO_2-Emissionen waren sehr stark vom Kraftstoffverbrauch und dieser wiederum von der Fahrweise abhängig.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein erhöhter Ethanolanteil im Kraftstoff zu geringeren CO-, NO_x- und CO_2- Emissionen des Testfahrzeugs im realen Fahrbetrieb führte. Somit bestätigten sich hier die in vorausgegangenen Prüfstandversuchen anderer Studien mit ähnlichen Fahrzeugen ermittelten Ergebnisse im realen Straßenverkehr.

Eine Emissionsreduktion stellte sich in der vorliegenden Untersuchung erst bei E85 und damit bei einem sehr großen Ethanolanteil im Kraftstoff ein. Es wäre daher in Zukunft interessant weitere ethanolhaltige Kraftstoffe mit einem Ethanolanteil zwischen 10 % und 85 % bei RDE-Fahrten zu testen.

Sollten sich die Erkenntnisse dieser Arbeit bei weiteren Untersuchungen an anderen Fahrzeugen bestätigen, könnten Ethanolkraftstoffe in Zukunft eine noch größere Bedeutung bei Verbrennungsmotoren einnehmen. Zum einen um die immer strenger werdenden Grenzwerte einzuhalten und die Luftqualität zu verbessern, zum anderen um weitere positive Eigenschaften dieser Kraftstoffe wie die erhöhte Klopffestigkeit in der Motorenentwicklung zu nutzen.

Literaturverzeichnis

[1] André, M. (2004): The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. In: Science of The Total Environment. Jahrgang: 334-335. Seite 73–84.

[2] AUDI AG (2008): Technische Daten Audi Avant A4 2.0 TFSI (132 kW). Stand September 2008. 1 Seite

[3] AUDI AG (2009): Betriebsanleitung Audi A4

[4] BASSHUYSEN, R. V. (2013): Ottomotor mit Direkteinspritzung-Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenziale. 3., aktual. u. erw. Aufl.. Wiesbaden: Springer-Vieweg. ISBN: 978-3-658-01407-0. 476 Seiten

[5] BASSHUYSEN, R. V.; SCHÄFER, F. (2015): Handbuch Verbrennungsmotor-Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Wiesbaden: Springer-Vieweg. 7., vollst. überarb. u. erw. Aufl.. ISBN: 978-3-658-04677-4. 1232 Seiten

[6] BENNINGER et al. (2007): Flexfuel-Systeme für Ottomotoren mit Direkteinspritzung. In: Motorentechnische Zeitschrift, Ausgabe 07-08, Jg. 2007. Seite 592-597

[7] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2014): Kraftstoffe in der Energie- und Umweltpolitik. URL: http://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachwachsende-Rohstoffe/Bioenergie/e10/FAQ_node.html#doc3172274bodyText5. (zuletzt geprüft am 02.04.2017)

[8] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN BIOETHANOLINDUSTRIE (2016): Bioethanol weltweit. URL: https://www.bdbe.de/daten/bioethanol-weltweit (zuletzt geprüft am 02.04.2017)

[9] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN BIOETHANOLINDUSTRIE (2016): Bioethanol 2015/2016. In: Zuckerrübe. Ausgabe 5/2016. S. 36-38

[10] CLAIROTTE, M.; ADAM, T. W.; ZARDINI, A. A.; MANFREDI, U.; MARTINI, G.; KRASENBRINK, A.; VICET, A.; TOURNIÉ (2013): Effects of low temperature on the cold start gaseous emissions from light duty vehicles fuelled by ethanol-blended gasoline. In: Applied Energy. Jg.: 102. DOI:10.1016/j.apenergy.2012.08.010. Seite. 44-54

[11] DARDIOTIS, C.; FONTARAS, G.; MAROTTA, A.; MARTINI, G.; MANFREDI, U. (2015): Emissions of modern light duty ethanol flex-fuel vehicles over different operating and environmental conditions. In: Fuel. Jg. 140. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.09.085. Seite 531-540

[12] DENK, C. (2013): Motor- und fahrzeugtechnische Anforderungen von E5, E10, E85 und E100. In: ForschungsNetzwerk Biogene Kraftstoffe (ForNeBik), Fachhochschule Oberösterreich (Hg.) 2013 – ForNeBik-Fachgespräche und jährliche Mitgliederversammlung

[13] DEUTSCHE BUNDEREGIERUNG: Regierungsprogramm Elektromobilität. Mai 2011. 62 Seiten

[14] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. August 2009. 53 Seiten

[15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2008): DIN 51625. Ottokraftstoff - Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge-Anforderungen und Prüfverfahren. August 2008. Berlin: Beuth. 20 Seiten

[16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2013): DIN EN 228. Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge- Ethanolkraftstoff-Anforderungen und Prüfverfahren. Januar 2013. Berlin: Beuth. 8 Seiten

[17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN 590. Dieselkraftstoff - Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge-Anforderungen und Prüfverfahren. April 2014. Berlin: Beuth. 16 Seiten

[18] ENGELJEHRINGER, K. (2016): Stand der RDE-Einführung. In: Förderkreis Abgasnachbehandlungstechnologien für Dieselmotoren e. V. (Hg.) 2016 – RDE und mobile Abgasmesstechnik. Seite 1-40

[19] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2016): Verordnung (EU) 2016/427 vom 10. März 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6). Amtsblatt der Europäischen Union

[20] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2016): Verordnung (EU) 2016/646 der Kommission vom 20. April 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6)

[21] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (2017): Biokraftstoffe. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). 60 Seiten

[22] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V.(FNR) (2017) : E10-Fragen und Antworten zu E10. URL: https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/bioethanol/e-10/ (Stand:25.03.2017)

[23] FREY, H. C.; UNAL, A.; ROUPHAIL, N. M.; COLYAR, J. D. (2003): On-Road Measurement of Vehicle Tailpipe Emissions Using a Portable Instrument. In: Journal of the Air & Waste Management Association. Ausgabe 8. Jg. 53. DOI: 10.1080/10473289.2003.10466245. Seite 992–1002.

[24] GIECHASKIEL, B.; RICCOBONO, F.; VLACHOS, T.; MENDOZA-VILLAFUERTE, PABLO; SUAREZ-BERTOA, RICARDO; FONTARAS (2015): Vehicle Emission Factors of Solid Nanoparticles in the Laboratory and on the Road Using Portable Emission Measurement Systems (PEMS). In: Frontiers in Environmental Science. Jg. 3. DOI: 10.3389/fenvs.2015.00082

[25] HERNANDEZ, M., MENCHACA, L., MENDOZA, A. (2014): Fuel economy and emissions of light-duty vehicles fueled with ethanolegasoline blends in a Mexican City. In : Renewable Energy. Jg.: 72. Seite 236-242

[26] KAMPKER, A., VALLÉ, D., SCHNETTLER, A. (2013): Elektromobilität- Grundlagen der Zukunftstechnologie, Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg. 344 Seiten. ISBN: 978-3-642-31986-0

[27] MENRAD, H.; KÖNIG, A. (1982): Alkoholkraftstoffe, Wien, New York: Springer-Verlag. 280 Seiten. ISBN: 978-3-7091-8664-0

[28] REIF, K. (2014): Ottomotoren-Management. Steuerung, Regelung und Überwachung, 4. Auflage, Wiesbaden: Springer-Vieweg, 475 Seiten. ISBN: 978-3-8348-2102-7

[29] RENEWABLE FUEL ASSOCIATION (2009): Anteil der wichtigsten Länder an der Ethanolproduktion; In: Statista. URL: https://de-statista-com.eaccess.ub.tum.de/statistik/daten/studie/162452/umfrage/ethanolproduktion-2009/. Stand: 24.03.2017

[30] SENSORS INC. (2016): Herstellerangaben zum Messsystem Sensors Semtech Ecostar Plus

[31] SHORT, D. Z. (2014): Investigation of Particle and Gaseous Emissions from Conventional and Emerging Vehicle Technologies Operating on Bio-Fuels

[32] SILEGHEM, L.; BOSTEELS, D.; MAY, J.; FAVRE, C.; VERHELST, S. (2014): Analysis of vehicle emission measurements on the new WLTC, the NEDC and the CADC. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment. Jg.: Jg. 32. Seite 70-85

[33] SUAREZ-BERTOA, R.; ZARDINI, A.; KEUKEN, H.; ASTORGA, C. (2015): Impact of ethanol containing gasoline blends on emissions from a flex-fuel vehicle tested over the Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle (WLTC). Fuel. Jg. 143. Seite 173-182

[34] TUTUIANU, M.; BONNEL, P.; CIUFFO, B.; HANIU, T.; ICHIKAWA, N.; MAROTTA, A.; PAVLOVIC, J.; STEVEN, H. (2015): Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation. Transportation Research Part D: Transport and Environment. Jg. 40. Seite 61-75

[35] United States Environmental Protection Agency (2017): Gasoline Standards-Ethanol Waivers (E10 and E15). URL:https://www.epa.gov/gasoline-standards/ethanol-waivers-e15-and-e10. (Stand: 02.04.2017)

[36] URBANEK, M.; HOFMANN, P.; GERINGER, B. (2009): Emission Performance of Passenger Cars Operated with Ethanol Blends. In : Bartz (Hg.) 2009 – Fuels 2009. Seite 191-198

[37] URBANEK, M.; HOLUB, F.; GERINGER, B.; HOFMANN, P. (2008): Flottentest- und Prüfstandsuntersuchungen mit Bioethanol verschiedener Konzentrationen - Ergebnisse eines österreichischen Forschungsprogramms. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hg.) 2008 – Innovative Fahrzeugantriebe 2008. Seite 191–212

[38] WEISS, M.; BONNEL, P.; HUMMEL, R., PROVENZA, A.; MANFREDI, U. (2011): On-Road Emissions of Light-Duty Vehicles in Europe. In Environmental Science and Technology. Jg. 45. Seite 8575–8581. DOI: 10.1021/es2008424

[39] ZHAI, HAIBO; FREY, H. CHRISTOPHER; ROUPHAIL, N. M.; GONÇALVES, GONÇALO A.; FARIAS, TIAGO L. (2009) Comparison of Flexible Fuel Vehicle and Life-Cycle Fuel Consumption and Emissions of Selected Pollutants and Greenhouse Gases for Ethanol 85 Versus Gasoline. Journal of the Air & Waste Management Association. Jg. 42. Seite 912-924. DOI:10.3155/1047-3289.59.8.912

Anhang

Anhang 1:Krafstoffparameter

Kraftstoffparameter	E5	E10	E85
Dichte[1] (15 °C) [kg/m³]	745,0	745,00	780,9
Ethanolgehalt[1] [Vol.-%]	5,03	10,26	79,1
Kohlenstoffgehalt[1] [Masse-%]	84,94	82,97	58,91
Wasserstoffgehalt[1] [Masse-%]	13,15	13,21	13,18
Sauerstoffgehalt[1] [Masse-%]	1,91	3,82	27,91
ROZ[1] [-]	95,2	95,0	114
Heizwert[2] [MJ/kg]	43,3	44,3	32,9
Wassergehalt[2] [Masse-%]	<0,3	<0,3	<0,3

[1] ASG Analytik-Service GmbH
[2] Technologie- und Förderzentrum

Anhang 2 Beschreibung der Prüfstrecke

Straßenname	Straßen-kategorie	Strecken-anteil [km]	zulässige Höchst-geschwin-digkeit [km/h]	maximal gefahrene Geschwin-digkeit [km/h]	Betriebszu-stand Fahr-zeug	Fahrtrichtung	am-pel-gere-gelte Kreu-zung	Kreis-ver-kehr	Bahn-über-gang	Fuß-gänger-ampel	Fuß-gänger-über-weg	Bus-halte-stelle
TFZ-Technikum Schulgasse 18a, 94315 Straubing	Privat-gelände	0,10	Schrittge-schwindig-keit	Schritt-geschwin-digkeit	Stadtbetrieb	nach rechts in Feuerhausgas-se abbiegen	0	0	0	0	0	0
Feuerhaus-gasse, 94315 Straubing	Neben-straße	0,10	30	≤ 30	Stadtbetrieb	am Ende nach links in Schul-gasse abbiegen	0	0	0	0	0	0
Schulgasse, 94315 Straubing	Neben-straße	0,07	30	≤ 30	Stadtbetrieb	am Ende nach links in Heer-straße abbiegen	1	0	0	0	0	0
Heerstraße, 94315 Straubing	Haupt-straße	0,22	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Vorfahrtsstraße nach rechts folgen und ge-radeaus in Itt-linger Straße	0	0	0	0	1	0
Ittlinger Straße, 94315 Straubing	Haupt-straße	0,45	50	≤ 50	Stadtbetrieb	an Kreuzung zur St.-Nikola-Straße links in St.-Nikola-Straße abbie-gen	1	0	0	1	0	1
St.-Nikola-Straße,	Haupt-straße	0,19	30	≤ 30	Stadtbetrieb	Kreuzung zur Augsburger	1	0	0	0	1	0

94315 Straubing						Straße geradeaus in Amselstraße überfahren						
Amselstraße, 94315 Straubing	Hauptstraße	0,35	30	≤ 30	Stadtbetrieb	Fahrt bis Dr.-Heisse-Straße, Weiterfahrt auf Amselstraße	0	0	0	0	0	0
Amselstraße, 94315 Straubing	Hauptstraße	0,40	50	≤ 50	Stadtbetrieb	rechts abbiegen in Friedhofstraße	0	0	0	0	0	0
Friedhofstraße, 94315 Straubing	Nebenstraße	0,15	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Fahrt auf Friedhofstraße, Weiterfahrt auf Friedhofstraße	0	0	0	0	1	0
Friedhofstraße, 94315 Straubing	Nebenstraße	0,24	30	≤ 30	Stadtbetrieb	am Ende der Friedhofstraße links in die Dürnitzlstraße abbiegen	0	0	0	0	1	0
Dürnitzlstraße, 94315 Straubing	Hauptstraße	0,35	50	≤ 50	Stadtbetrieb	an der Kreuzung zur Äußeren Passauer Straße nach rechts in die Äußere Passauer Straße abbiegen	1	0	0	0	0	1
Äußere Passauer Straße	Hauptstraße	0,15	50	≤ 50	Stadtbetrieb	nach links in die Schildhauerstraße abbiegen	0	0	0	0	1	0

Schildhauer-straße	Haupt-straße	0,20	50	≤ 50	Stadtbetrieb	abknickender Vorfahrtstraße nach links in die Innere Frühling-straße folgen	0	0	0	0	1	0
Innere Früh-lingstraße	Haupt-straße	0,09	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt ge-radeaus auf den Bahnhofplatz	0	0	0	0	1	0
Bahnhofplatz	Haupt-straße	0,40	50	≤ 50	Stadtbetrieb	am Jahnplatz in den Kreisver-kehr einfahren	0	1	0	0	2	1
Jahnplatz	Haupt-straße	0,04	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreisverkehr an der ersten Aus-fahrt in die Bahnhofstraße verlassen	0	0	0	0	1	0
Bahnhofstraße	Haupt-straße	0,11	50	≤ 50	Stadtbetrieb	in den Kreisver-kehr einfahren	0	1	0	0	1	1
Bahnhofstraße	Haupt-straße	0,22	30	≤ 30	Stadtbetrieb	Kreisverkehr an der ersten Aus-fahrt verlassen, Weiterfahrt auf Bahnhofsstraße	0	0	0	0	1	0
Stadtgraben	Haupt-straße	0,19	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit Wittelsbacher-straße gerade-aus überfahren	1	0	0	0	0	0
Stadtgraben	Haupt-straße	0,07	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Stadtgraben weiter folgen	1	0	0	0	0	0
Stadtgraben	Haupt-	0,08	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Stadtgraben	1	0	0	0	0	0

	straße					weiter folgen						
Stadtgraben	Haupt-straße	0,14	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit Theresienplatz geradeaus in Am Kinseher Berg überfahren	1	0	0	0	0	0
Am Kinseher Berg	Haupt-straße	0,15	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit Unterm Rain geradeaus überfahren	1	0	0	0	0	0
Am Kinseher Berg	Haupt-straße	0,23	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt ge-radeaus auf Westtangente	0	0	0	0	1	0
SR48/West-tangente	Haupt-straße	0,50	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR48/West-tangente	1	0	0	0	0	0
SR48/West-tangente	Haupt-straße	0,12	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR48/West-tangente	0	0	0	0	1	0
SR48/West-tangente	Land-straße	1,38	100	≤ 90	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR48/West-tangente	0	0	0	0	0	0
SR48/West-tangente	Land-straße	0,29	80	≤ 80	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR48/West-tangente	0	0	0	0	0	0
SR48/West-tangente	Land-straße	0,70	100	≤ 90	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR48/West-tangente	0	0	0	0	0	0
SR48/West-	Land-	0,45	80	≤ 80	Landstra-	Weiterfahrt auf	0	0	0	0	0	0

tangente	straße				ßenbetrieb	SR48/West-tangente						
SR48/West-tangente	Land-straße	0,55	70	≤ 70	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf St2125	0	0	0	0	0	0
St2125	Land-straße	3,40	100	≤ 90	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf St2148	0	0	0	0	0	0
St2148	Land-straße	1,30	100	≤ 90	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf St2149	0	0	0	0	0	0
St2148	Land-straße	0,29	70	≤ 70	Landstra-ßenbetrieb	nach links Ab-biegen auf BAB 3 AS/105 Kirchroth	0	0	0	0	0	0
AS 105/Kirchroth	Autobahn	0,28	>100	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf BAB 3 bis AS/109 Metten	0	0	0	0	0	0
BAB 3	Autobahn	29,62	> 100	≤ 145	Autobahnbe-trieb	abfahren von BAB 3 bei AS 109/Metten	0	0	0	0	0	0
AS 109/Metten	Autobahn	0,40	>100	≤ 60	Stadtbetrieb	nach links ab-biegen auf DEG15	0	0	0	0	0	0
DEG15	Land-straße	0,35	100	≤ 90	Landstra-ßenbetrieb	nach links ab-biegen auf St2125	0	0	0	0	0	0
St2125	Land-straße	0,40	100	≤ 90	Landstra-ßenbetrieb	nach links auf BAB 3 AS 109/Metten ab-biegen	0	0	0	0	0	0
AS 109/Metten	Autobahn	0,35	>100	≤ 60	Stadtbetrieb	auf BAB 3 in	0	0	0	0	0	0

						Richtung Regensburg auffahren						
BAB 3	Autobahn	8,60	> 100	≤ 145	Autobahnbetrieb	bis AS 108/Schwarzach auf BAB 3 fahren und dort abfahren	0	0	0	0	0	0
AS 108/Schwarzach	Autobahn	0,25	>100	≤ 60	Stadtbetrieb	nach links auf St2147 abbiegen	0	0	0	0	0	0
St2147	Landstraße	1,30	100	≤ 90	Landstraßenbetrieb	Weiterfahrt auf der St2147	0	0	0	0	0	0
St2147	Landstraße	0,12	70	≤ 70	Landstraßenbetrieb	Weiterfahrt auf St2147/ Deggendorfer Straße, Schwarzach	0	0	0	0	0	0
St2147/Deggen-dorfer Straße, 94374 Schwarzach	Hauptstraße	1,00	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf St2147/Marktplatz, 94373 Schwarzach	0	0	0	0	0	0
St2147/Marktplatz, 94374 Schwarzch	Hauptstraße	0,09	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf St2147/Bayerwaldstraße, 94374 Schwarzach	0	0	0	0	0	0
St2147/Bayerwaldstraße, 94374	Hauptstraße	0,40	50	≤ 50	Stadtbetrieb	nach links abbiegen auf Penzkofener	0	0	0	0	0	0

Schwarzach						Straße, 94374 Schwarzach						
Penzkofener Straße, 94374 Schwarzach	Neben-straße	0,80	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf der Penzkofe-ner Straße nach Schmiedstraße, 94366 Peras-dorf	0	0	0	0	1	0
Penzkofener Straße, 94374 Schwarzach	Land-straße	0,25	100	≤ 70	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf der Penzkofe-ner Straße nach Schmiedstraße, 94366 Peras-dorf	0	0	0	0	0	0
Penzkofener Straße, 94374 Schwarzach	Land-straße	0,10	100	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf der Penzkofe-ner Straße nach Schmiedstraße, 94366 Peras-dorf	0	0	0	0	0	0
Penzkofener Straße, 94374 Schwarzach	Land-straße	0,75	100	≤ 75	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf der Penzkofe-ner Straße nach Schmiedstraße, 94366 Peras-dorf	0	0	0	0	0	0
Penzkofener Straße, 94374 Schwarzach	Land-straße	0,40	100	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf der Penzkofe-ner Straße nach Schmiedstraße, 94366 Peras-	0	0	0	0	0	0

						dorf						
Penzkofener Straße, 94374 Schwarzach	Land-straße	1,20	100	≤ 80	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf der Penzkofe-ner Straße nach Schmiedstraße, 94366 Peras-dorf	0	0	0	0	0	0
Penzkofener Straße, 94374 Schwarzach	Land-straße	0,21	100	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf der Penzkofe-ner Straße nach Schmiedstraße, 94366 Peras-dorf	0	0	0	0	0	0
Penzkofener Straße, 94374 Schwarzach	Land-straße	0,35	100	≤ 80	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf Schmiedstraße, 94366 Peras-dorf	0	0	0	0	0	0
Schmiedstraße, 94366 Peras-dorf	Neben-straße	0,23	50	≤ 50	Stadtbetrieb	am Ende der Schmiedstraße links auf SR3/Laurentius straße, 94366 Perasdorf ab-biegen	0	0	0	0	0	0
SR3/Laurentius straße, 94366 Perasdorf	Haupt-straße	0,26	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR3	0	0	0	0	0	0
SR3	Land-straße	0,35	100	≤ 80	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR3	0	0	0	0	0	0
SR3	Land-	0,26	100	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf	0	0	0	0	0	0

	straße					SR3						
SR3	Land-straße	0,40	100	≤ 80	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR3	0	0	0	0	0	0
SR3	Land-straße	0,09	100	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR3	0	0	0	0	0	0
SR3	Land-straße	0,30	100	≤ 70	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR3	0	0	0	0	0	0
SR3	Land-straße	0,26	100	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR3	0	0	0	0	0	0
SR3	Land-straße	0,75	100	≤ 80	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR3/Hauptstraße, 94336 Meiden-dorf/Windberg	0	0	0	0	0	0
SR3/Haupt-straße, 94336 Meiden-dorf/Windberg	Haupt-straße	0,40	50	≤ 50	Stadtbetrieb	nach rechts abbiegen auf SR49/Windberger Straße, 94336 Meiden-dorf/Windberg	0	0	0	0	0	0
SR49/Wind-berger Straße, 94336 Meiden-dorf/Windberg	Neben-straße	0,30	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR49	0	0	0	0	0	0
SR49	Land-straße	0,29	100	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR49	0	0	0	0	0	0
SR49	Land-straße	0,12	100	≤ 80	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR49	0	0	0	0	0	0
SR49	Land-	0,05	100	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf	0	0	0	0	0	0

	straße					SR49							
SR49	Land-straße	1,20	100	≤ 70	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR49	0	0	0	0	0	0
SR49	Land-straße	0,25	100	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR49	0	0	0	0	0	0
SR49	Land-straße	0,98	100	≤ 70	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR49	0	0	0	0	0	0
SR49	Land-straße	0,35	100	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR49/Meidendorfer Straße, 94336 Windberg	0	0	0	0	0	0
SR49/Meidendorfer Straße, 94336 Windberg	Haupt-straße	0,29	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR49/Hunderdorfer Straße, 94336 Windberg	0	0	0	0	0	0
SR49/Hunderdorfer Straße, 94336 Windberg	Haupt-straße	0,35	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR49	0	0	0	0	0	0
SR49	Land-straße	0,40	100	≤ 80	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR49/Windberger Straße, 94336 Hunderdorf	0	0	0	0	0	0
SR49/Windberger Straße, 94336 Hunderdorf	Neben-straße	0,70	50	≤ 50	Stadtbetrieb	nach rechts abbiegen auf St2139/Bahnhofstraße, 94336	0	0	0	0	0	0

						Hunderdorf							
St2139/Bahnhofstraße, 94336 Hunderdorf	Hauptstraße	0,50	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf St2139	0	0	0	0	1	0
St2139	Landstraße	2,40	80	≤ 80	Landstraßenbetrieb	Weiterfahrt auf St2139	0	0	0	0	0	0
St2139	Landstraße	0,10	70	≤ 70	Landstraßenbetrieb	Weiterfahrt auf St2139	0	0	0	0	0	0
St2139	Landstraße	0,30	50	≤ 50	Stadtbetrieb	in Kreisverkehr einfahren und an der zweiten Ausfahrt wieder verlassen, Weiterfahrt auf St2139	0	1	0	0	0	0
St2139	Landstraße	1,30	100	≤ 90	Landstraßenbetrieb	Weiterfahrt auf St2139	0	0	0	0	0	0
St2139	Landstraße	0,80	70	≤ 70	Landstraßenbetrieb	Kreuzung geradeaus überfahren auf SR22	1	0	0	0	0	0
SR22	Landstraße	1,60	100	≤ 90	Landstraßenbetrieb	nach rechts abbiegen auf SR12 Richtung Straubing-Sand	0	0	0	0	0	0
SR12	Landstraße	2,50	100	≤ 90	Landstraßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR12	0	0	0	0	0	0
SR12	Landstraße	0,75	70	≤ 70	Landstraßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR12	0	0	0	0	0	0

SR12	Land-straße	0,20	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR12	0	0	1	0	0	0
SR12	Land-straße	1,35	70	≤ 70	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR12	0	0	1	0	0	0
SR12	Land-straße	2,50	100	≤ 90	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR12	0	0	0	0	0	0
SR12	Land-straße	0,10	80	≤ 80	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR12	0	0	0	0	0	0
SR12	Land-straße	0,25	60	≤ 60	Stadtbetrieb	einfahren in Kreisverkehr und diesen an der zweiten Ausfahrt auf die SR11 verlassen	0	1	0	0	1	0
SR11	Land-straße	0,75	60	≤ 60	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf SR11	0	0	0	0	0	0
SR11	Land-straße	0,45	70	≤ 70	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR12	0	0	0	0	0	0
SR12	Land-straße	1,60	70	≤ 70	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf SR12	0	0	0	0	0	0
SR12	Land-straße	0,35	50	≤ 50	Stadtbetrieb	in den Kreisver-kehr einfahren und diesen an der zweiten Ausfahrt in den Alfred-Dick-Ring verlassen	0	1	0	0	2	0
Alfred-Dick-Ring, 94315	Land-straße	1,30	70	≤ 70	Landstra-ßenbetrieb	Weiterfahrt auf Alfred-Dick-	0	0	0	0	0	0

Straubing						Ring						
Alfred-Dick-Ring, 94315 Straubing	Stadtbetrieb	0,45	50	≤ 50	Stadtbetrieb	in den Kreisverkehr einfahren und diesen an der ersten Ausfahrt in die Landshuter Straße verlassen	0	1	0	0	3	0
Landshuter Straße	Stadtbetrieb	0,55	50	≤ 50	Stadtbetrieb	an der Kreuzung zur Rückertstraße nach links in die Rückertstraße abbiegen	1	0	0	0	0	0
Rückertstraße	Hauptstraße	0,60	50	≤ 50	Stadtbetrieb	nach rechts in die Gottfried-Keller-Straße abbiegen	0	0	0	0	1	1
Gottfried-Keller-Straße	Nebenstraße	0,60	50	≤ 50	Stadtbetrieb	nach rechts Straße weiter in die Rennbahnstraße folgen	0	0	0	0	0	0
Rennbahnstraße	Nebenstraße	0,12	50	≤ 50	Stadtbetrieb	an der Kreuzung mit der Gabelsbergerstraße nach links in die Gabelsbergerstraße abbiegen	1	0	0	0	0	0
Gabelsberger-	Haupt-	0,24	50	≤ 50	Stadtbetrieb	an der Kreu-	1	0	0	0	1	0

straße	straße					zung mit der Wittelsbacher-höhe nach links in die Wittels-bacherhöhe abbiegen						
Wittelsbacher-höhe	Haupt-straße	0,85	50	≤ 50	Stadtbetrieb	nach rechts in den Hermann-Stiefvater-Ring	0	0	0	1	3	2
Hermann-Stiefvater-Ring	Haupt-straße	0,55	50	≤ 50	Stadtbetrieb	in den Kreisver-kehr einfahren und diesen an der ersten Aus-fahrt in die Gei-selhöringer Straße verlas-sen	0	0	1	0	2	0
Geiselhöringer Straße	Haupt-straße	0,80	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit Zur Wieskapelle geradeaus überfahren und Geiselhöringer Straße folgen	1	0	0	0	0	0
Geiselhöringer Straße	Haupt-straße	0,15	50	≤ 50	Stadtbetrieb	an der Kreu-zung mit dem Stadtgraben nach rechts in den Stadtgra-ben abbiegen	1	0	0	0	0	0
Stadtgraben	Haupt-straße	0,06	50	≤ 50	Stadtbetrieb	nach links ab-biegen und	1	0	0	0	1	0

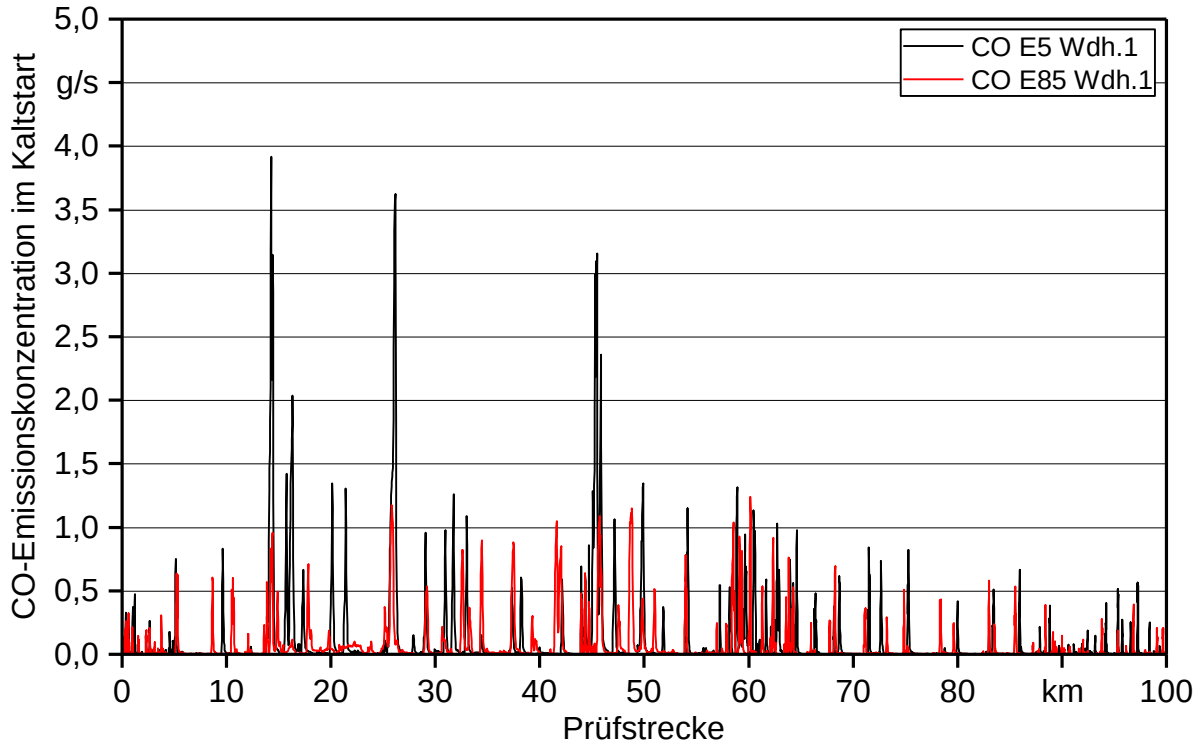
						Stadtgraben weiter folgen						
Stadtgraben	Haupt-straße	0,11	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit der Wittelsba-cherstraße ge-radeaus über-fahren	1	0	0	0	1	0
Stadtgraben	Haupt-straße	0,19	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit der Bahnhof-straße gerade-aus überfahren	1	0	0	0	1	0
Stadtgraben	Haupt-straße	0,25	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit Kolbstraße ge-radeaus in die Mühlsteingasse überfahren	1	0	0	0	1	1
Mühlsteingasse	Haupt-straße	0,21	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit Innerer Passauer Stra-ße geradeaus in die Heerstraße überfahren	1	0	0	0	1	0
Heerstraße	Haupt-straße	0,65	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit Stockergasse geradeaus in die Heerstraße überfahren	1	0	0	1	0	1
Heerstraße	Haupt-straße	0,24	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Vorfahrtsstraße nach rechts folgen und ge-radeaus in Itt-	0	0	0	0	1	0

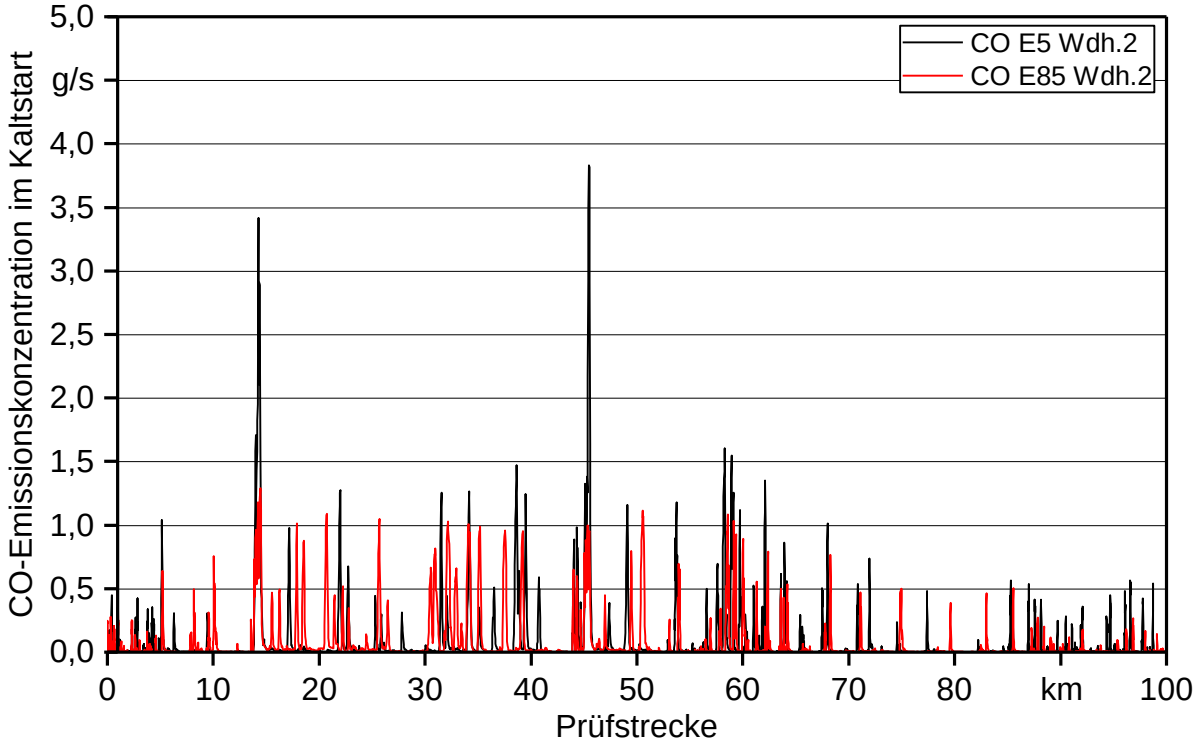
						linger Straße						
Ittlingerstraße	Haupt-straße	0,45	50	≤ 50	Stadtbetrieb	an Kreuzung zur St.-Nikola-Straße gerade-aus der Ittlinger Straße folgen	1	0	0	1	0	1
Ittlingerstraße	Haupt-straße	1,10	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit dem Hirschber-ger-Ring gera-deaus in die Ittlinger Straße überfahren	1	0	0	2	2	0
Ittlingerstraße	Haupt-straße	0,45	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit dem Dresdner Straße gerade-aus in die Ittlin-ger Straße überfahren	1	0	0	0	1	0
Ittlingerstraße	Haupt-straße	0,20	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit B20 Ausfahrt geradeaus in die Ittlinger Straße überfah-ren	1	0	0	0	1	1
Ittlingerstraße	Haupt-straße	0,35	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Kreuzung mit B20 Ausfahrt geradeaus in die Ittlinger Straße überfah-ren	1	0	0	0	0	0
Ittlingerstraße	Haupt-	0,22	50	≤ 50	Stadtbetrieb	an Kreuzung	1	0	0	0	0	0

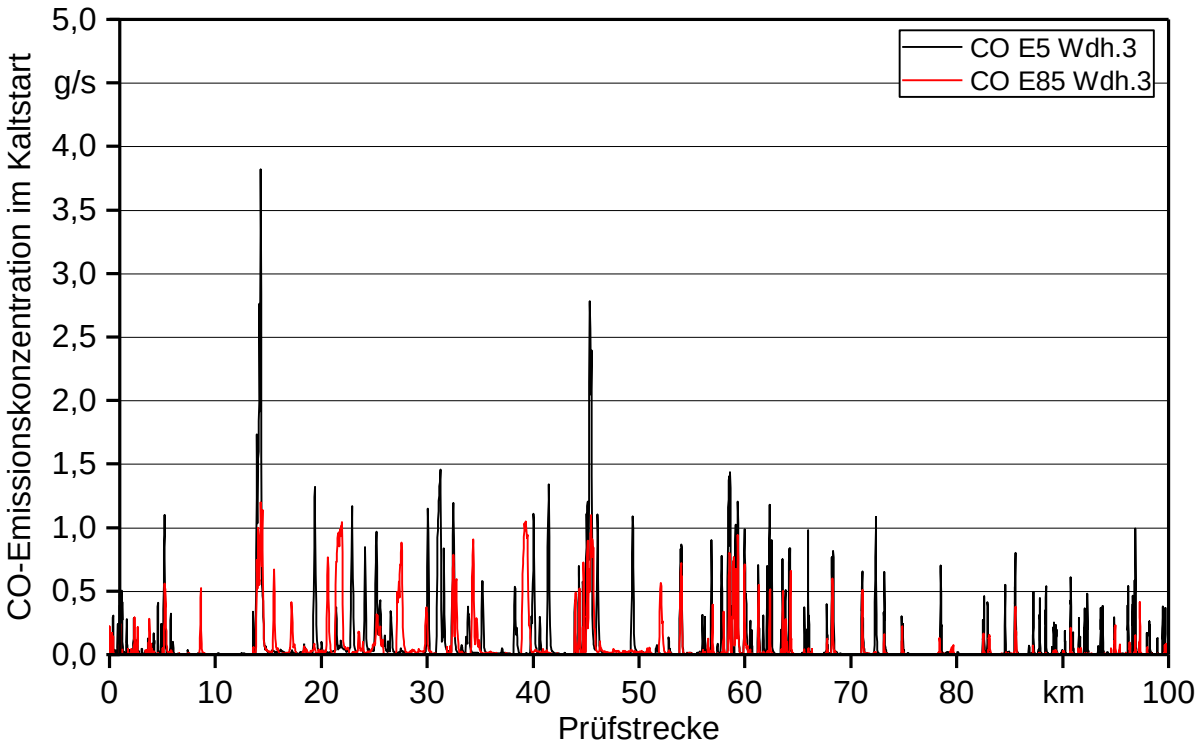
	straße					mit Borsigstraße nach links in Borsigstraße abbiegen						
Borsigstraße	Nebenstraße	0,70	50	≤ 50	Stadtbetrieb	am Ende der Straße nach links in die Schlesische Straße abbiegen	0	0	0	0	1	1
Schlesische Straße	Hauptstraße	1,10	50	≤ 50	Stadtbetrieb	an Kreuzung mit Arbertraße nach rechts in Arberstraße abbiegen	1	0	0	0	0	2
Arberstraße	Nebenstraße	0,45	50	≤ 50	Stadtbetrieb	am Ende der Straße nach links in den Schanzlweg abbiegen	0	0	0	0	1	0
Schanzlweg	Nebenstraße	0,80	30	≤ 30	Stadtbetrieb	Weiterfahrt auf Schanzlweg	0	0	0	0	1	1
Schanzlweg	Nebenstraße	0,40	50	≤ 50	Stadtbetrieb	Straße geradeaus in die Uferstraße folgen	0	0	0	0	0	0
Uferstraße	Hauptstraße	0,30	50	≤ 50	Stadtbetrieb	nach links in die Uferstraße abbiegen	0	0	0	0	1	0
Uferstraße	Nebenstraße	0,09	50	≤ 50	Stadtbetrieb	nach rechts in die Petersgasse	0	0	0	0	1	0

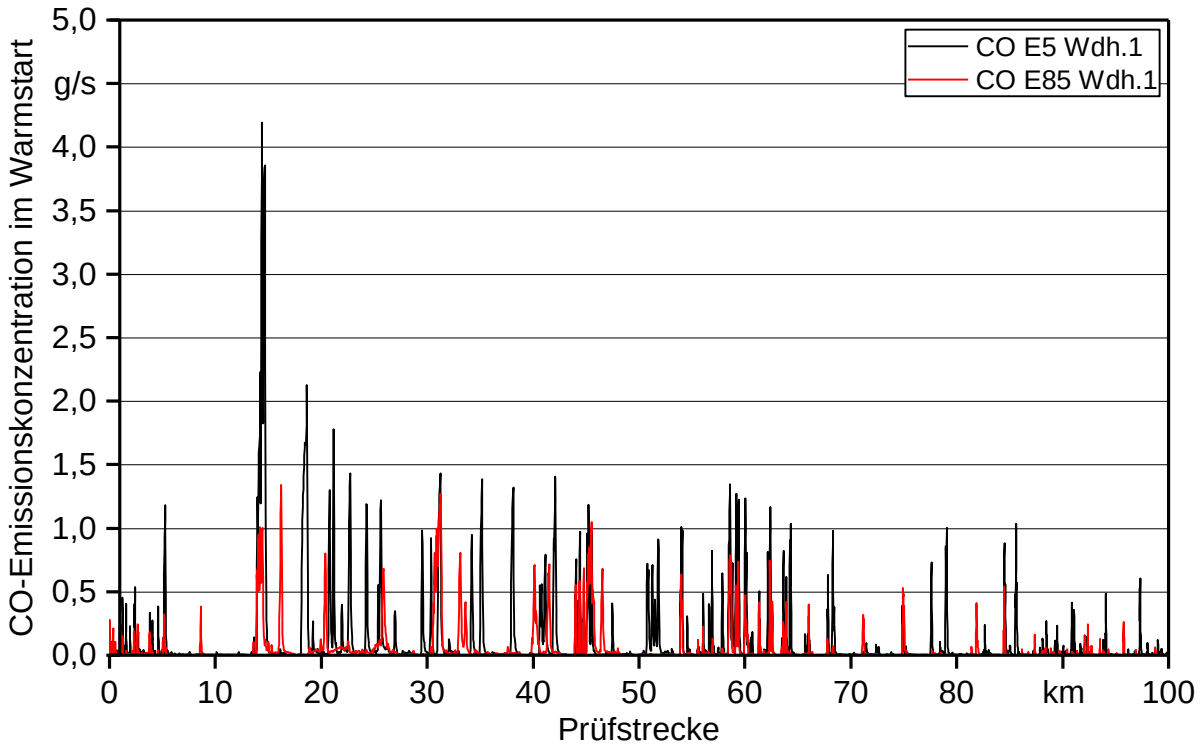
						abbiegen						
Petersgasse	Neben-straße	0,30	30	≤ 30	Stadtbetrieb	nach links auf das KoNaRo-Gelände abbie-gen	0	0	0	0	0	0
KoNaRo-Gelände	Privatge-lände	0,13	Schritt-geschwin-digkeit	Schritt-geschwin-digkeit	Stadtbetrieb	Ende der Mes-sung am TFZ-Technikum Schulgasse 18a, 94315 Straubing	0	0	0	0	0	0
Summe		29,68 (29,03 %)			Stadtbetrieb		28	6	2	6	44	15
		34,33 (33,58 %)			Landstra-ßenbetrieb		1	0	1	0	0	0
		38,22 (37,39 %)			Autobahnbe-trieb		0	0	0	0	0	0
		102,23 (100 %)			Gesamt		29	6	3	6	44	15

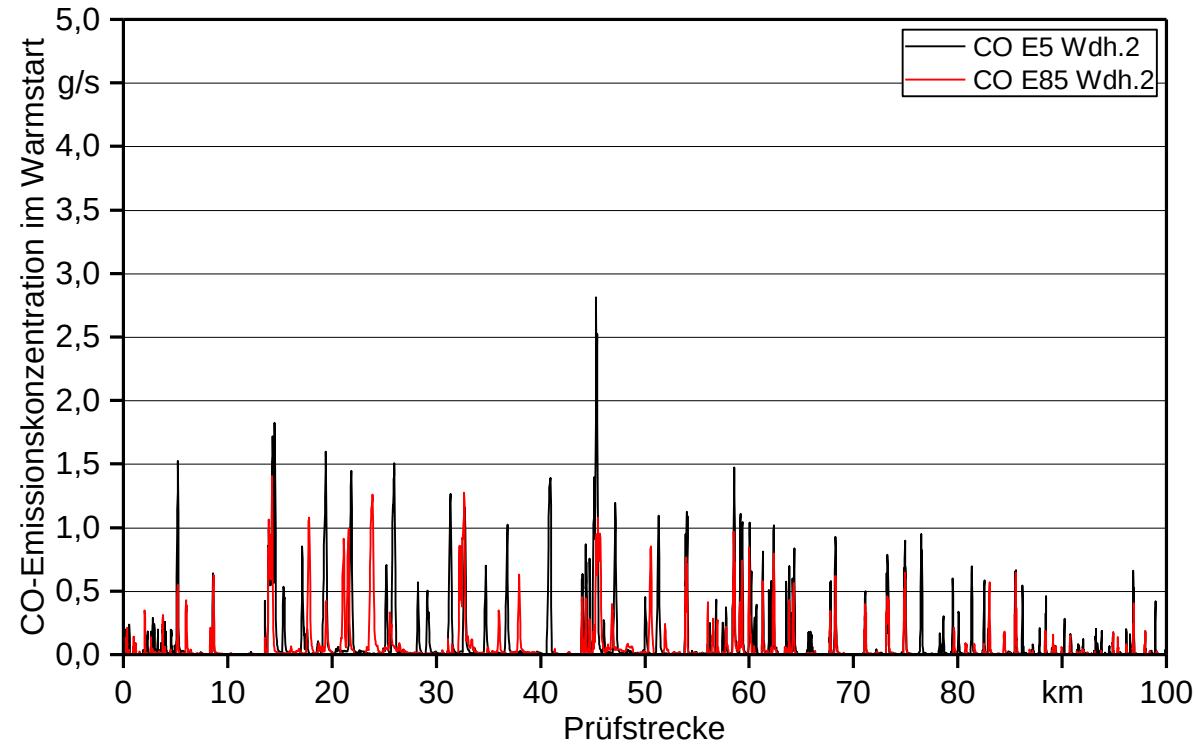
Anlage 3: Messwertverläufe der gemessenen Emissionskomponenten

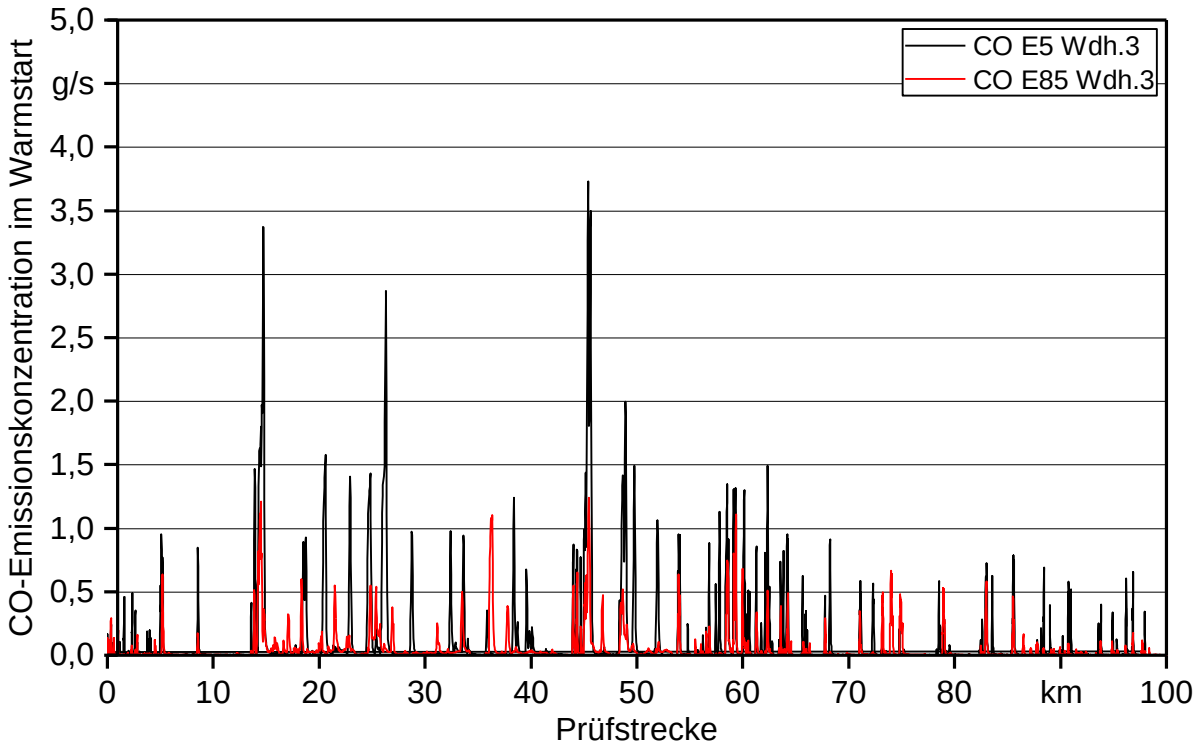


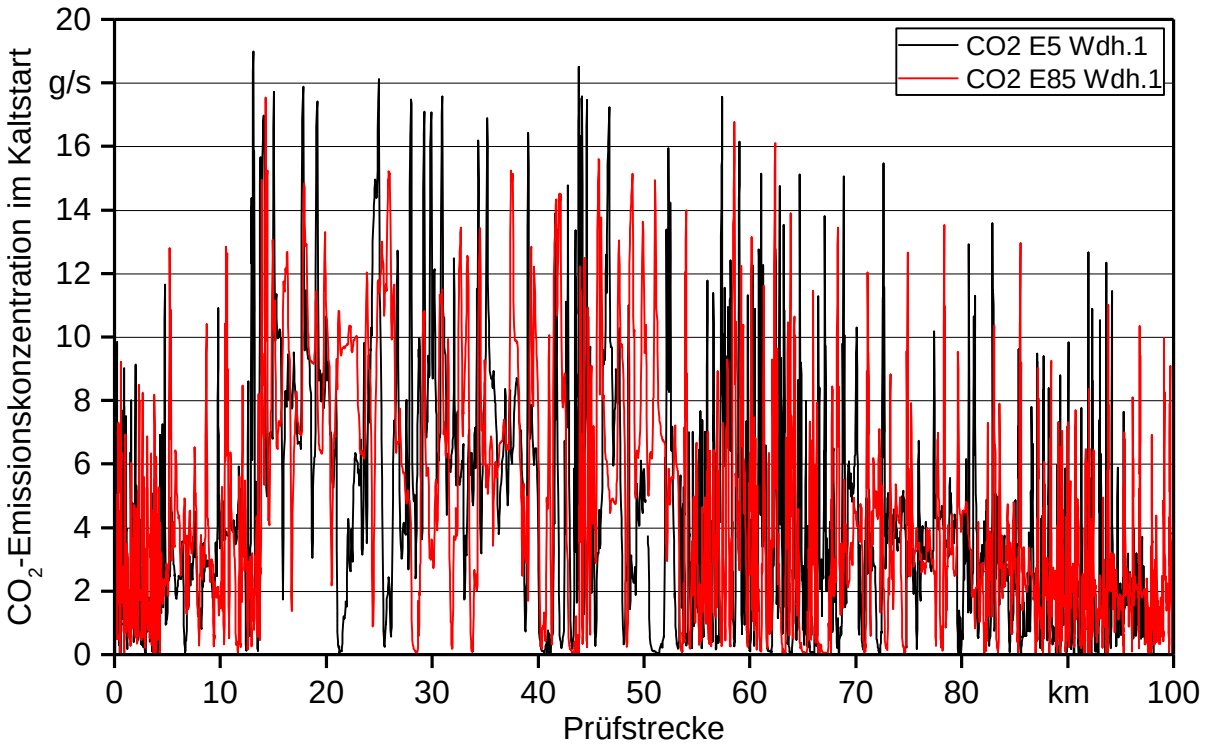


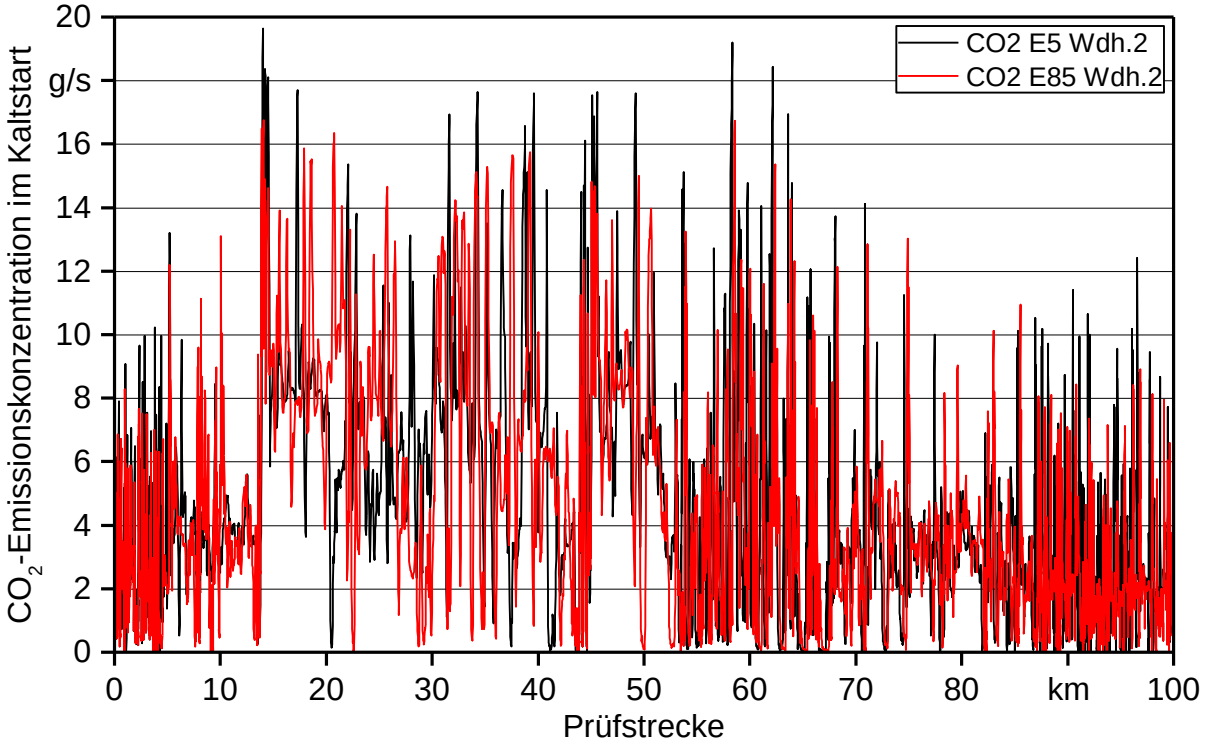

CO E5 Wdh.3
CO E85 Wdh.3
CO-Emissionskonzentration im Kaltstart
5,0
g/s
4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke

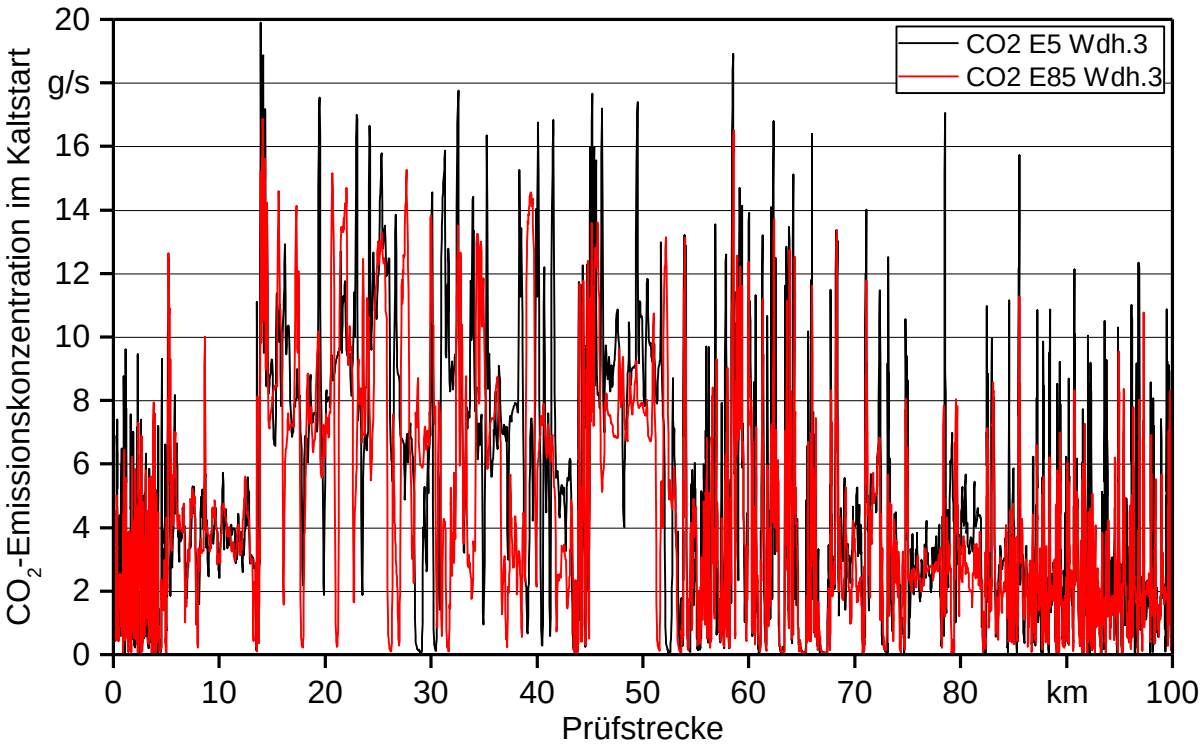

CO E5 Wdh.1
CO E85 Wdh.1
CO-Emissionskonzentration im Warmstart
5,0
g/s
4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke

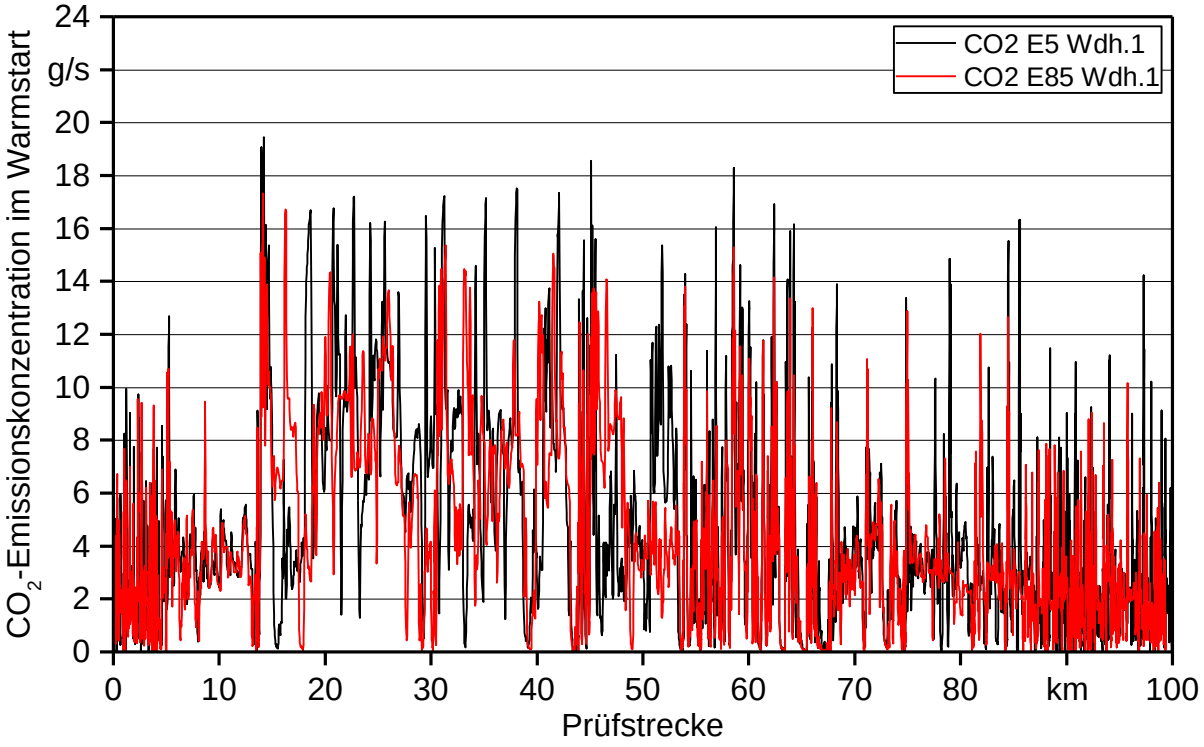

CO E5 Wdh.2
CO E85 Wdh.2
CO-Emissionskonzentration im Warmstart
5,0
g/s
4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke

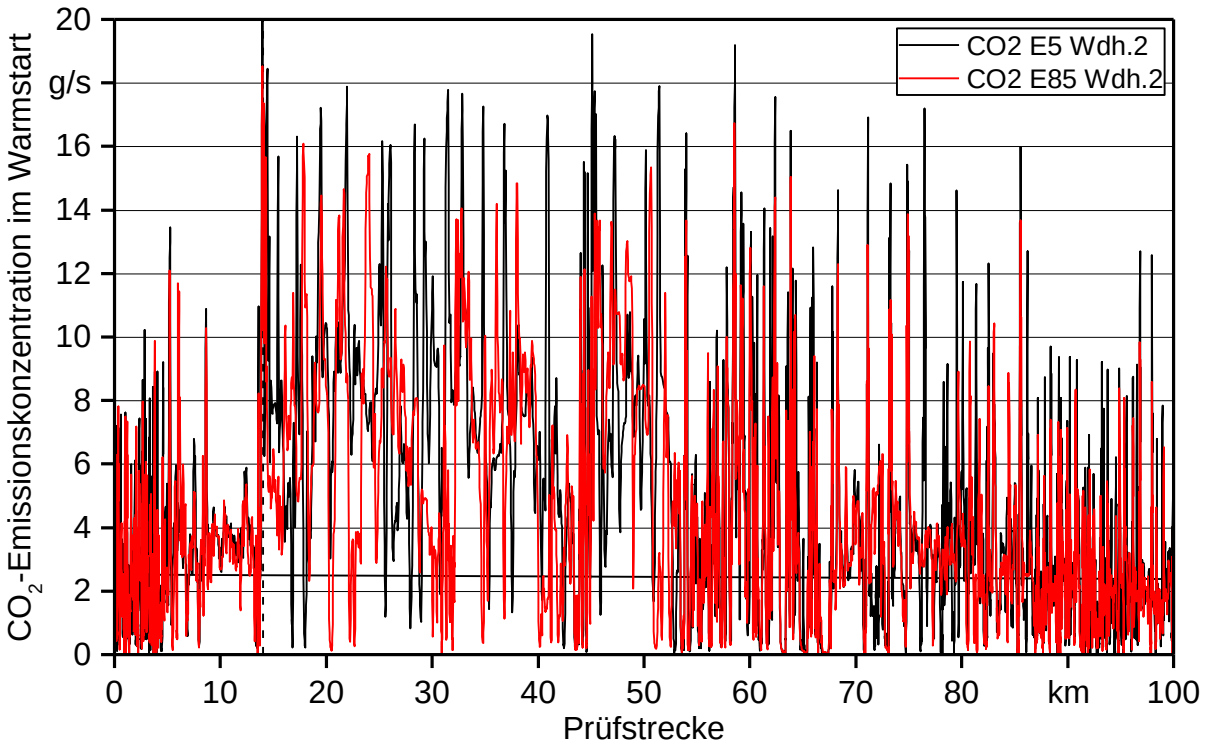

CO E5 Wdh.3
CO E85 Wdh.3
CO-Emissionskonzentration im Warmstart
5,0
g/s
4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke

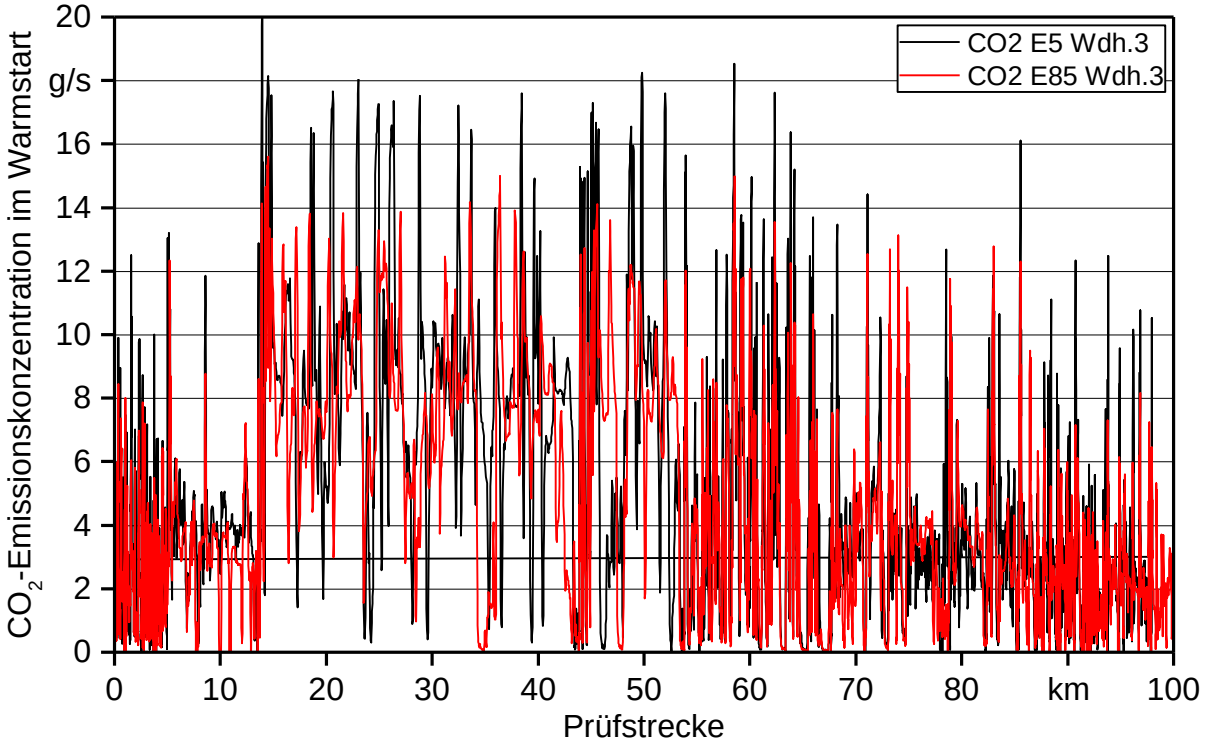

CO2 E5 Wdh.1
CO2 E85 Wdh.1
CO2-Emissionskonzentration im Kaltstart
g/s
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke

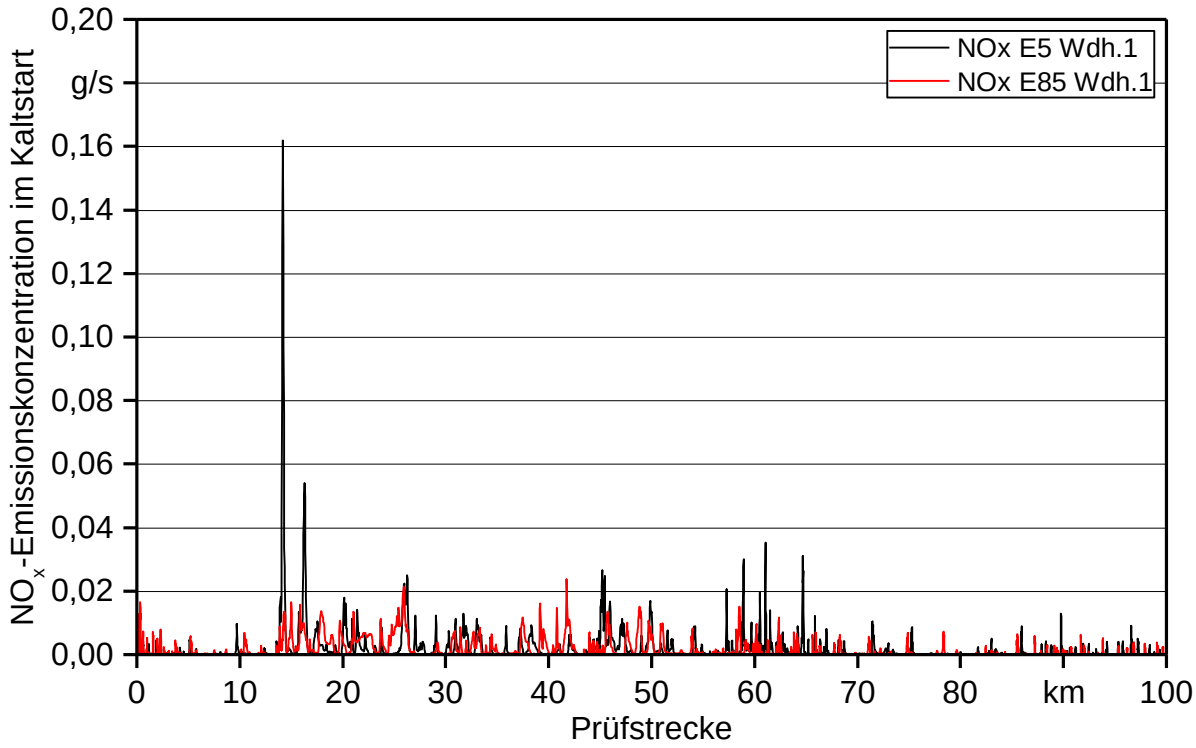

CO2 E5 Wdh.2
CO2 E85 Wdh.2
CO2-Emissionskonzentration im Kaltstart
g/s
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke

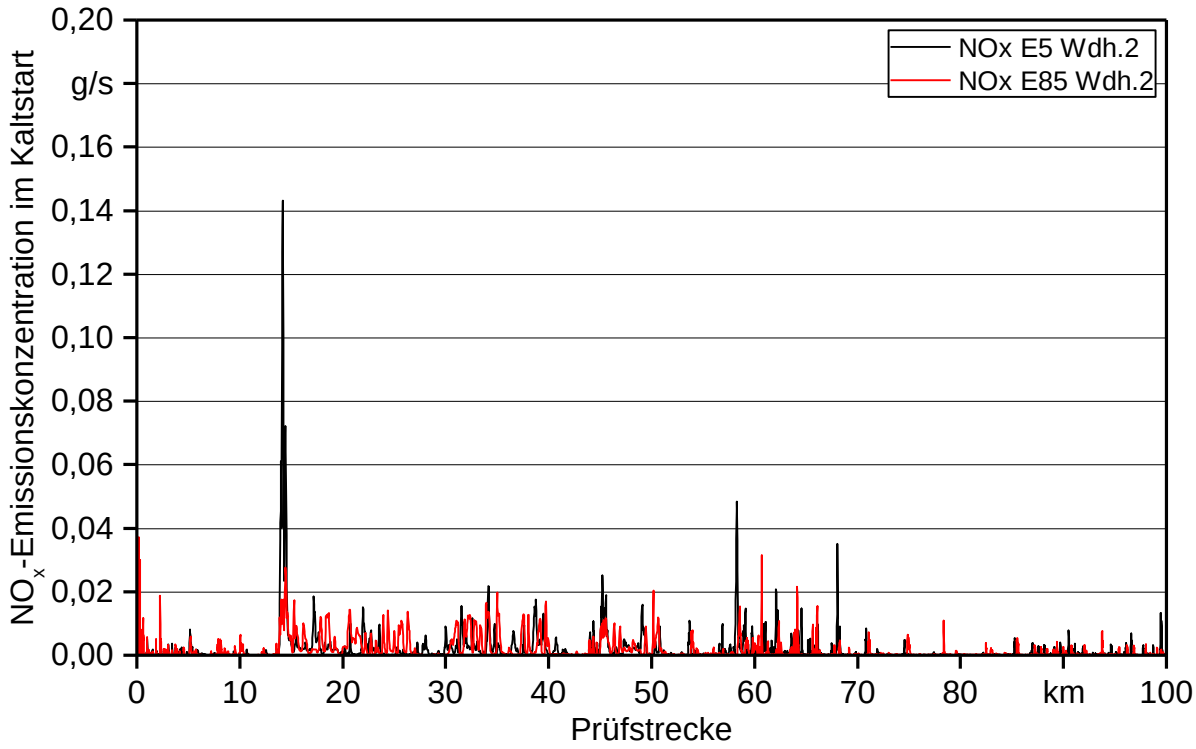

CO2 E5 Wdh.3
CO2 E85 Wdh.3
CO2-Emissionskonzentration im Kaltstart
g/s
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke

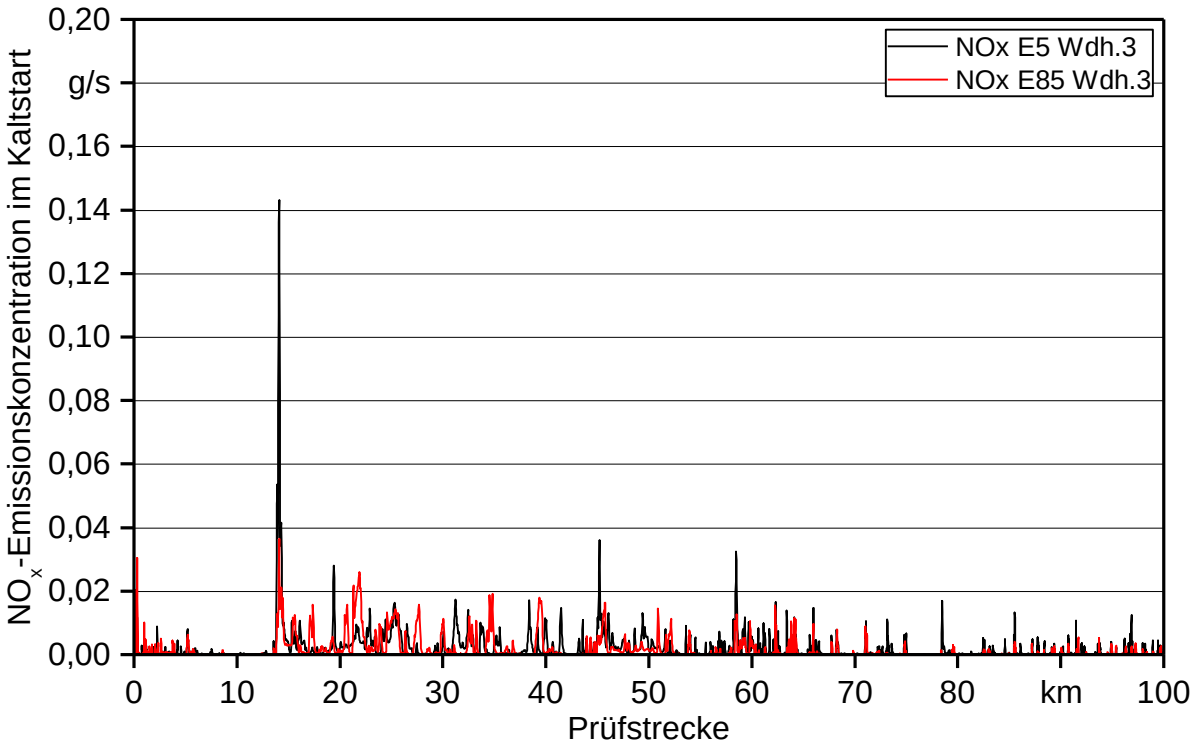

CO2 E5 Wdh.1
CO2 E85 Wdh.1
CO2-Emissionskonzentration im Warmstart
g/s
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke

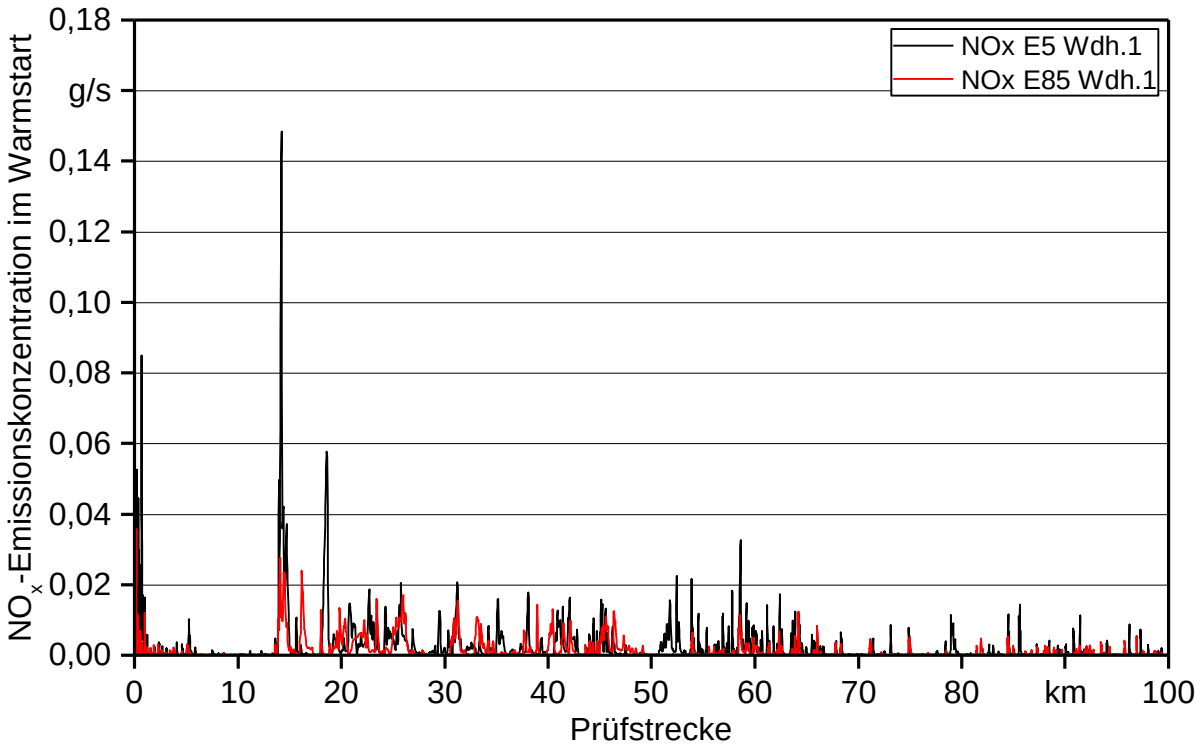

CO2 E5 Wdh.2
CO2 E85 Wdh.2
CO2-Emissionskonzentration im Warmstart
g/s
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke

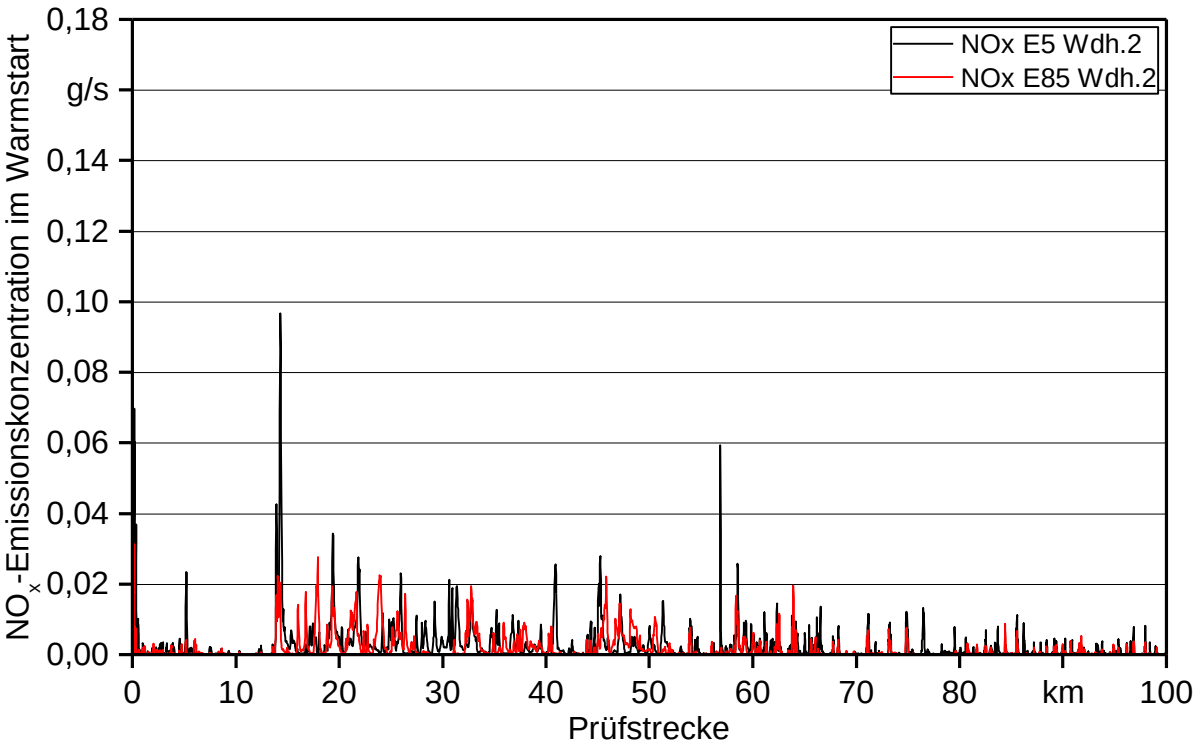

CO2 E5 Wdh.3
CO2 E85 Wdh.3
CO2-Emissionskonzentration im Warmstart
g/s
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke

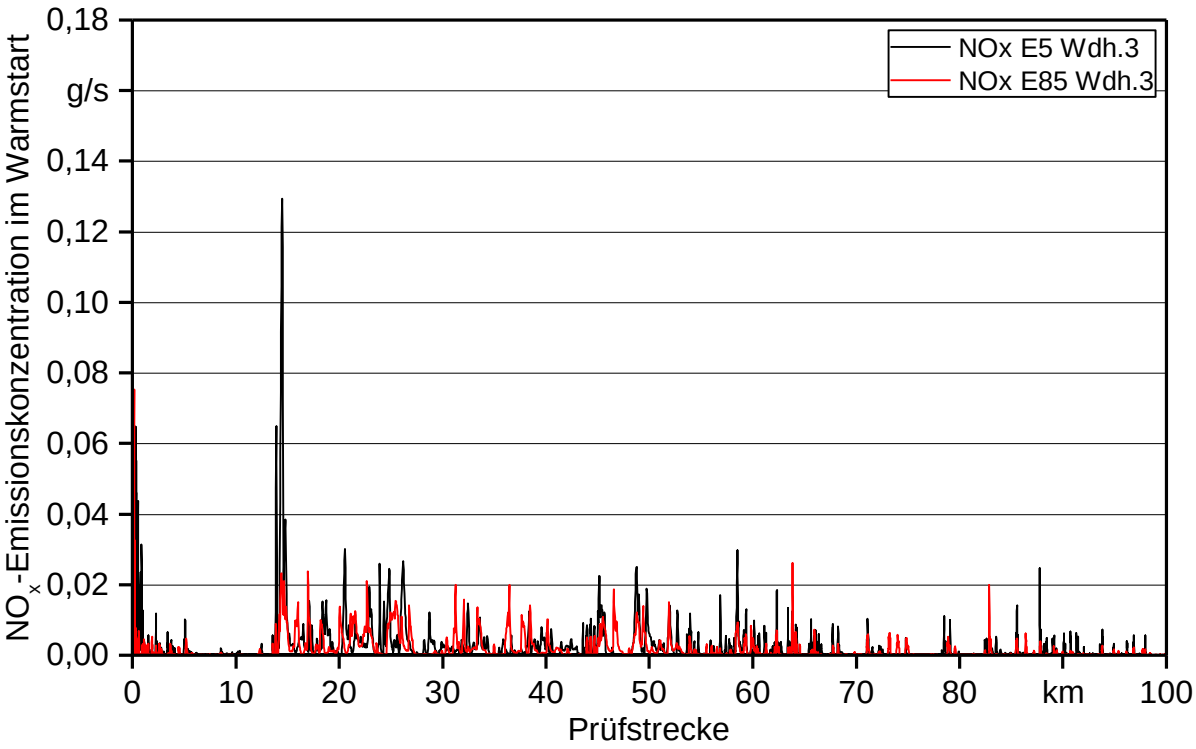

NOx E5 Wdh.1
NOx E85 Wdh.1
0,20
g/s
0,16
0,14
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
NOx-Emissionskonzentration im Kaltstart
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke


NOx E5 Wdh.2
NOx E85 Wdh.2
0,20
g/s
0,16
0,14
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
NOx-Emissionskonzentration im Kaltstart
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke


NOx E5 Wdh.3
NOx E85 Wdh.3
NOx-Emissionskonzentration im Kaltstart
g/s
0,20
0,16
0,14
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke


NOx E5 Wdh.1
NOx E85 Wdh.1
NOx-Emissionskonzentration im Warmstart
g/s
0,18
0,14
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke


NOx E5 Wdh.2
NOx E85 Wdh.2
0,18
g/s
0,14
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
NOx-Emissionskonzentration im Warmstart
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke


NOx E5 Wdh.3
NOx E85 Wdh.3
0,18
g/s
0,14
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
NOx-Emissionskonzentration im Warmstart
0
10
20
30
40
50
60
70
80
km
100
Prüfstrecke