



Lukas Lohnauer, BSc

# **Einfluss von Anbauteilen und Umgebungsbedingungen auf Real Drive Emission Ergebnisse**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplomingenieur  
Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

## **Technischen Universität Graz**

Vorstand

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Martin Opetnik BSc  
Institut für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik

Graz, Oktober 2019



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik  
Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder



## Vorwort

Seit meiner Kindheit waren Fahrzeuge und deren Technik dahinter ein großes Thema für mich. Daher war es keine schwere Entscheidung, meinen Bildungsweg technisch auszurichten. Nach meiner Bachelorarbeit an einem 1-Zylinder Forschungsmotor und meiner beruflichen Tätigkeit neben dem Studium in der mechanischen Entwicklung bei der AVL List GmbH war klar, dass ich auch meine Masterarbeit in diesem Bereich verfassen möchte. Meine Wahl fiel dabei auf das „Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik“ im Fachbereich Emissionen.

An dieser Stelle möchte ich mich daher zuallererst bei Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing Dr. techn Stefan Hausberger bedanken. Er ermöglichte mir dieses spannende Thema und stand jederzeit mit Rat und Tat zur Seite.

Meinen Betreuern Herrn Dipl.-Ing. Claus Uwe Matzer und Herrn Dipl.-Ing Martin Opetnik danke ich ebenfalls für die ausgezeichnete Unterstützung. Bei verschiedensten Problemstellungen nahmen sich die Beiden immer Zeit und gaben die richtigen Denkanstöße. Herzlichen Dank für die Geduld und außerordentlich gute Betreuung.

Weiters möchte ich mich bei allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Institutes, die an der Umsetzung dieser Arbeit beteiligt waren, danken.

Auch meinen Bürokollegen möchte ich für spannende und lustige Stunden großen Dank aussprechen.

Am wichtigsten war jedoch die Unterstützung meiner Familie. In jeder noch so schwierigen und stressigen Phase standen sie mir zur Seite, fanden immer aufbauende Worte und gaben mir den notwendigen Rückhalt. Herzlichen Dank!

# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT</b> .....	<b>III</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....	<b>X</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XII</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>2</b>
2.1 LEISTUNGSBILANZ DES KRAFTFAHRZEUGES .....	2
2.2 FAHRWIDERSTANDSKRÄFTE .....	3
2.2.1 Rollwiderstandskraft $F_R$ .....	4
2.2.2 Steigungswiderstand $F_{St}$ .....	4
2.2.3 Beschleunigungswiderstandskraft $F_a$ .....	4
2.2.4 Luftwiderstandskraft $F_L$ .....	5
2.3 ABGASZUSAMMENSETZUNG UND REDUKTIONSMÖGLICHKEITEN .....	5
2.3.1 Hauptbestandteile .....	6
2.3.2 Nebenbestandteile bzw. Schadstoffe .....	7
2.4 ABGASGESETZGEBUNG .....	8
2.4.1 $CO_2$ – Grenzwerte für PKW .....	9
2.4.2 Fahrzyklen .....	9
2.5 EMISSIONSMESSTECHNIK .....	11
2.5.1 PEMS – Portable Emission Measurement System .....	11
2.6 KÄLTEANLAGEN UND FEUCHE LUFT .....	13
2.6.1 Prozesskette einer PKW Klimaanlage: .....	13
2.6.2 Kälteanlagen .....	14
2.6.3 Feuchte Luft .....	16
<b>3 AUFGABENSTELLUNG</b> .....	<b>20</b>
<b>4 MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN UND AUSWERTUNG DER AUSROLLVERSUCHE (COAST-DOWN-TESTS)</b> .....	<b>21</b>
4.1 VERSUCHSFAHRZEUG .....	21
4.2 AUSROLLVERSUCHE (COAST-DOWN-TESTS) .....	22
4.2.1 Allgemeines .....	22
4.2.2 Richtlinien für einen korrekten Ausrollversuch .....	22
4.2.3 Ausrollstrecke .....	23
4.2.4 Wetterstation .....	23
4.2.5 Datenaufzeichnung des Ausrollversuches .....	24
4.3 UNTERSUCHTE FAHRZEUGKONFIGURATIONEN .....	25
4.4 DATENAUFBEREITUNG UND AUSWERTUNG DER AUSROLLVERSUCHE .....	28
4.4.1 Aufbereitung der VBOX-Daten .....	29
4.4.2 Ermittlung des Fahrwiderstandpolynoms .....	30
4.4.3 Umgebungskorrektur des Fahrwiderstandpolynoms .....	34
4.4.4 Windkorrektur des Fahrwiderstandpolynoms .....	35
4.4.5 Zusammenfassung der Korrekturen .....	37
4.5 VERGLEICH UND ANALYSE DER ERGEBNISSE DER FAHRZEUGKONFIGURATIONEN .....	38
4.6 UMRECHNUNG AUF RADARBEIT .....	46
4.7 UNTERSCHIED DER AUSWERTUNG ZUR EU NORM .....	47
<b>5 SIMULATIVE UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISVERGLEICH</b> .....	<b>49</b>
5.1 SIMULATIONSSOFTWARE PHEM .....	49
5.1.1 Inputdaten für die Simulation mit PHEM .....	50
5.2 SIMULATIONSERGEBNISSE VON RDE UND WLTC .....	52
5.3 SIMULATION EINES HBEFA DURCHSCHNITTSFAHRZEUGES .....	55
5.3.1 Herleitung der Simulationsparameter HBEFA .....	55
5.3.2 Vergleich der hergeleiteten Simulationsparameter .....	59
5.3.3 Simulationsergebnisse .....	59
5.4 NEBENVERBRAUCHERLEISTUNG .....	60
5.4.1 MAC - Tool .....	61

---

5.4.2	<i>Leistungskennfeld PKW-Klimaanlage</i> .....	62
5.4.3	<i>Berechnung der gesamten Nebenverbraucherleistung</i> .....	63
5.5	<b>RDE FAHRTEN INKLUSIVER NACHSIMULATION MIT KORREKTURFAKTOREN</b> .....	64
5.5.1	<i>Datenaufbereitung für die Simulation</i> .....	65
5.5.2	<i>Simulationsergebnisse der RDE Fahrten</i> .....	68
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE</b> .....	<b>70</b>
<b>7</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK</b> .....	<b>72</b>
	<b>LITERATUR</b> .....	<b>73</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>74</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>76</b>

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

## Lateinische Formelzeichen

$a$	$\text{m/s}^2$	Beschleunigung
$a_{\text{ausroll}}$	-	Koeffizient aus NEDC
$b_{\text{ausroll}}$	-	Koeffizient aus NEDC
$A$	$\text{m}^2$	Fläche, Oberfläche, Querschnittsfläche
$c = \delta q_{\text{rev}}/dT$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	spezifische Wärmekapazität
$c_p ; c_v$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	spezifische isobare; isochore Wärmekapazität
$c_{pl}$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	spezifische isobare Wärmekapazität Luft
$c_{pd}$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	spezifische isobare Wärmekapazität Luft
$c_w$	-	Luftwiderstandsbeiwert
$c_w$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Spezifische Wärmekapazität des Wassers
$c_{w\_HBEFA}$	-	Luftwiderstandsbeiwert HBEFA
$c_{w\_i}$	-	Luftwiderstandsbeiwert der Konfiguration „i“
$c_{w\_RDE\_DB}$	-	Luftwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Dachbox
$c_{w\_RDE\_FT}$	-	Luftwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Fahrradträger
$c_{w\_RDE\_SK}$	-	Luftwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Standardkonfiguration
$c_{w\_SK}$	-	Luftwiderstandsbeiwert Standardkonfiguration
$c_{w\_WLTC}$	-	Luftwiderstandsbeiwert WLTC
$CO_2$	$[\text{g/h}]$	$CO_2$ -Emissionen
$CO_{2\_norm}$	-	Normierte $CO_2$ -Emissionen
$d$	$\text{m}$	Durchmesser
$E_{CO_2}$	$\text{g/km}$	Durchschnittliche $CO_2$ Emissionen
$e$	-	Massenfaktor
$E_{CO_2}$	$[\text{g/km}]$	Grenzwert $CO_2$
$F_L$	$\text{N}$	Luftwiderstandskraft
$F_N$	$\text{N}$	Radlast
$F_R$	$\text{N}$	Rollwiderstandskraft
$F_{St}$	$\text{N}$	Steigungswiderstand
$F_{w\_ges}$	$\text{N}$	Gesamtfahrwiderstand
$F_{w\_Stg}$	$\text{N}$	Steigungswiderstand
$F_{w\_Luft\_Roll}$	$\text{N}$	Luft- und Rollwiderstand
$F_{w\_Poly1}$	$\text{N}$	Fahrwiderstandspolynom
$F_Z$	$\text{N}$	Zugkraft
$f_{r0}, f_{r1}$	-	Rollwiderstandsbeiwert
$f_{r0\_RDE\_DB}$	-	Rollwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Dachbox
$f_{r0\_i}$	-	Rollwiderstandsbeiwert der Konfiguration „i“
$f_{r0\_RDE\_FT}$	-	Rollwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Fahrradträger
$f_{r0\_RDE\_SK}$	-	Rollwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Standardkonfiguration
$f_{r0\_SK}$	-	Rollwiderstandsbeiwert Standardkonfiguration
$g$	$\text{m/s}^2$	örtliche Fallbeschleunigung
$h$	$\text{J/kg}$	spezifische Enthalpie
$h''$	$\text{J/kg}$	spezifische Enthalpie des Dampfes
$h_d$	$\text{J/kg}$	spezifische Enthalpie des Dampfes
$h_l$	$\text{J/kg}$	spezifische Enthalpie der Luft
$h_{1+x}$	$\text{J/kg}$	spezifische Enthalpie der gesättigten feuchten Luft

$h_{e1+x}$	J/kg	spezifische Enthalpie des abgeführten Eises
$h_{w1+x}$	J/kg	spezifische Enthalpie des abgeführten Wassers
$H$	J	Enthalpie
$J$	kgm <sup>2</sup>	Massenträgheitsmoment
$k$	-	Steigung
$k_{cw\_Dachox}$	-	Korrekturfaktor für Fahrt mit Dachbox
$k_{cw\_i}$	-	Korrekturfaktor Luftwiderstandsbeiwert der Konfiguration „i“
$k_{cw\_hoher\_Druck}$	-	Korrekturfaktor für Fahrt mit Sommerreifen hoher Druck
$k_{cw\_Fahrradträger}$	-	Korrekturfaktor für Fahrt mit Fahrradträger
$k_{cw\_PEMS}$	-	Korrekturfaktor für Fahrt mit PEMS im Kofferraum
$k_{fr0\_Dachbox}$	-	Korrekturfaktor für Fahrt mit Dachbox
$k_{fr0\_Fahrradträger}$	-	Korrekturfaktor für Fahrt mit Fahrradträger
$k_{fr0\_hoher\_Druck}$	-	Korrekturfaktor für Fahrt mit Sommerreifen hoher Druck
$k_{fr0\_i}$	-	Korrekturfaktor Rollwiderstandsbeiwert der Konfiguration „i“
$k_{fr0\_PEMS}$	-	Korrekturfaktor für Fahrt mit PEMS im Kofferraum
$k_u$	-	Korrekturfaktor Umgebung
$m_F$	kg	Fahrzeugmasse
$m_{rot}$	kg	Rotierende Massen
$m_l$	kg	Masse Luft
$m_d$	kg	Masse Dampf
$M$	N·m	Drehmoment
$M$	kg	Referenzmasse
$M_0$	kg	Durchschnittsfahrzeuggewicht
$n$	1/min	Drehzahl
$n_{idle}$	1/min	Leerlaufdrehzahl
$n_{norm}$	-	Normierte Drehzahl
$n_{rated}$	1/min	Nenn Drehzahl
$p$	bar, Pa	Druck
$p_i$	bar, Pa	Partialdruck der Komponente i
$p_d$	bar	Dampfdruck
$p_{d'}$	bar	Dampfdruck bei Sättigung
$P_a$	(k)W	Beschleunigungsleistung
$P_e$	(k)W	effektive Leistung
$P_{e\_norm}$	-	normierte Leistung
$P_{e\_rated}$	(k)W	Nennleistung
$P_{FW}$	(k)W	Leistung der äußeren Fahrwiderstände
$P_K$	(k)W	Kraftstoffleistung
$P_L$	(k)W	Luftwiderstandsleistung
$P_N$	(k)W	Radnabenleistung
$P_{NV\_norm}$	-	normierte Nebenverbraucherleistung
$P_{NV\_rated}$	(k)W	Nebenverbraucherleistung
$P_R$	(k)W	Rollwiderstandsleistung
$P_{rated}$	(k)W	Nennleistung
$P_S$	(k)W	Schlupfverlustleistung
$P_{St}$	(k)W	Steigungsleistung
$P_{TV}$	(k)W	Triebstrangverluste
$q_{ab}$	J/kg	spezifische abgeführte Wärme(menge)
$Q$	J	Wärme

$r_0$	kJ/kg	spezifische Verdampfungswärme bei 0°C
$r_{\text{dyn}}$	mm	dynamischer Radradius
$R_0$	N	Geschwindigkeitsunabhängiger Rollwiderstandskoeffizient
$R_1$	N/(m/s), N/(km/h)	Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandskoeffizient
$R_2$	N/(m/s) <sup>2</sup> , N/(km/h) <sup>2</sup>	Luftwiderstand
$R_{\text{aero}}$		Luftwiderstand
$R_l$	J/(kgK)	spezifische Gaskonstante der Luft
$R_d$	J/(kgK)	spezifische Gaskonstante des Dampfes
$R_{\text{roll}}$		Rollwiderstand
$t$	°C	Celsius-Temperatur
$T$	K	thermodynamische Temperatur
$\ddot{u}$	-	Übersetzung
$v_F$	m/s, km/h	Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{\text{Wind}}$	m/s, km/h	Windgeschwindigkeit
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen
$w$	J/kg	spezifische Arbeit
$W$	J	Arbeit
$x = m''/m$	-	Dampfziffer, Dampfgehalt
$x = m_d/m_l$	-	absolute Feuchte

### Konstanten

$g_n = 9,8067$	m/s <sup>2</sup>	Normfallbeschleunigung
$R_m = N_A \cdot k_B = 8,3145$	J/(mol·K)	allgemeine (molare) Gaskonstante

### Griechische Formelzeichen

$\alpha$	°	Steigungswinkel, Windwinkel
$\varepsilon$	-	Leistungszahl
$\eta_T$	-	Triebstrangwirkungsgrad
$\eta_e$	-	effektiver Motorwirkungsgrad
$\lambda_A$	-	Antriebsschlupf
$\rho_L$	kg/m <sup>3</sup>	Luftdichte
$\varphi = p_d/p_a$	-	relative Feuchte
$\psi$	°	resultierende Windwinkel
$\omega_{\text{rad}}$	s <sup>-1</sup>	Radwinkelgeschwindigkeit

### Weitere Indices und Abkürzungen

AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
ab	abgeführt(e Wärme)
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
d	Dampf
DIN	Deutsches Institut für Normung
etc.	Et cetera
EU	Europäische Union
FID	Flammenionisationsdetektor

---

GPS	Global Positioning System
H <sub>2</sub> O	Wasserdampf
HBEFA	Handbook Emission Faktors for Road Transport
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road Transport
HC	Kohlenwasserstoffe
i	fortlaufende Nummerierung/Bezeichnung
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
NDUV	Nichtdispersiver Ultraviolett Analysator
NDIR	Nichtdispersiver Infrarot-Analysator
NEDC	New European Driving Cycle
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
NV	Nebenverbraucher
ÖNORM	Österreichische Norm
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
PEMS	Portable Emission Measurement System
PHEM	Passenger car and Heavy-duty Emission Model
RDE	Real Driving Emissions
SCR	Selective Catalytic Reduction
TU-Graz	Technische Universität Graz
u.A.	Unter Anderem
WLTC	Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure
z.B.	zum Beispiel

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Lukas Lohnauer

Graz, am 10. Oktober 2019

---

## Zusammenfassung

Dass Kraftfahrzeuge (speziell mit Diesel- und Ottokraftstoff) im öffentlichen Straßenverkehr Emissionen erzeugen, ist allseits bekannt. Dass verschiedenste Umgebungseinflüsse (z.B. Wind, Temperatur, ect.) und verschiedene Aufbauten wie z.B. eine Dachbox, ein Fahrradträger oder ein herkömmlicher Anhänger den Kraftstoffverbrauch und somit auch die Emissionen erhöhen, ist auch kein Geheimnis. Jedoch konnte die Größenordnung solcher Einflüsse bisher nur geschätzt werden, da derzeit gemessene oder berechnete Faktoren nur begrenzt vorhanden sind.

Im Zuge dieser Arbeit wird auf diese Einflüsse, welche die realen Fahrzeugemissionen erhöhen, eingegangen. Dazu wurden mit einem Fahrzeug mit verschiedenen Konfigurationen sogenannte Coast-Downs (=Ausrollversuche) durchgeführt und anschließend auf die Fahrwiderstände geschlossen.

Mit den ermittelten Fahrwiderständen können Korrekturfaktoren für die jeweiligen Fahrzeugkonfigurationen ermittelt werden. Mit diesen Korrekturfaktoren ist es möglich, Emissionen, welche zum Beispiel bei einer Fahrt mit Dachbox entstehen, mit Hilfe der Software PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) zu simulieren. Die Simulationen wurden anhand einer RDE-Route (Real Driving Emissions) und dem WLTC (Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycle) durchgeführt.

Weiters wurden für das HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport) die durchschnittlichen Fahrwiderstände einer repräsentativen Fahrzeugflotte auf Basis der Coast-Down-Ergebnisse aktualisiert, da die bisherigen Korrekturfaktoren weitgehend auf Schätzungen beruhten.

Auch die Nebenverbraucherleistung eines Fahrzeuges spielt für die Emissionen eine Rolle. Vor allem für die Simulation ist es wichtig zu wissen, wie viel Kilowatt die Nebenverbraucher in Anspruch nehmen. Dazu wurde ein Berechnungstool erstellt.

Abschließend wurden RDE-Fahrten mit einer Dachbox und mit einem Fahrradträger (inkl. 2 Fahrrädern) durchgeführt und nachsimuliert. Bei einer RDE-Fahrt werden die Emissionen direkt mit dem PEMS (Portable emissions measurement system) gemessen.

Ziel dieser Arbeit war es, Korrekturfaktoren für diverse Fahrzeugaufbauten und Umgebungseinflüsse zu erforschen. Die in dieser Arbeit ermittelten Korrekturfaktoren sind aussagekräftig, da die Ergebnisse der realen, gemessenen Emissionen der RDE Fahrten mit den simulierten Emissionen aus PHEM übereinstimmen.

## Abstract

It is well known that motor vehicles (especially with diesel and petrol) generate emissions on public roads. It is no secret that various environmental influences (e.g. wind, temperatures, etc.) and various equipment such as a roof box, a bicycle rack or a conventional trailer increase fuel consumption and emissions. However, the magnitude of such influences could only be estimated so far, as there are currently no measured or calculated factors.

In the course of this work these influences, which increase the real vehicle emissions, will be discussed. For this purpose, so-called coast-downs (= roll-out tests) were carried out with a vehicle with different configurations and then the driving resistances were determined.

With the determined driving resistances correction factors for the respective vehicle configurations can be determined. With these correction factors it is possible to simulate emissions which occur, for example, when driving with a roof box, with the help of the PHEM (Passenger car and Heavy-duty Emission Model) software. The simulations were carried out using an RDE-route (Real Driving Emissions) and the WLTC (Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycle).

Furthermore, for the HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport) the average driving resistances of a representative vehicle fleet were updated on the basis of the coast-down results, since the previous correction factors were based mainly on estimations.

The auxiliary consumer performance of a vehicle also plays a role in emissions. For the simulation in particular, it is important to know how many kilowatts the auxiliary consumers occupy. A calculation tool was created for this purpose.

Finally, RDE trips with a roof box and a bicycle rack (incl. 2 bicycles) were carried out and simulated. During an RDE ride, the emissions are measured directly with the PEMS (Portable Emissions Measurement System).

The aim of this work was to investigate correction factors for various vehicle equipment and environmental influences. These correction factors determined in this thesis are meaningful, as the results of the real, measured emissions of the RDE trips coincide with the simulated emissions from PHEM.

## 1 Einleitung

Schlagworte wie „Klimaerwärmung“ oder „Treibhausgase“ sind allen ein Begriff. Dass der Verkehrssektor wesentlich dazu beiträgt, ist auch keine Überraschung. Die Verkehrsnachfrage nimmt trotzdem stetig zu und die Emissionsgrenzwerte werden laufend herabgesetzt, um die steigende Nachfrage zu kompensieren. Von 1990 bis 2017 ist eine Zunahme der Treibhausgase von 74% nur im Verkehrssektor zu verzeichnen. Allein im Jahr 2017 stiegen die CO<sub>2</sub> – Emissionen um 3,2% im Vergleich zum Vorjahr (Abbildung 1-1).

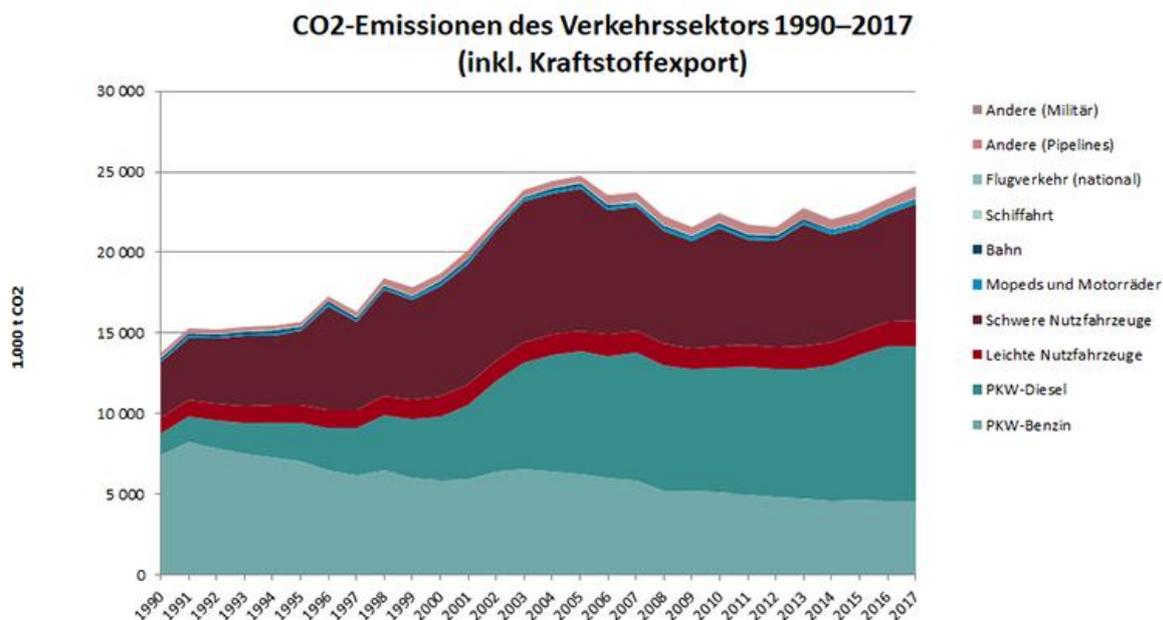


Abbildung 1-1: Steigerung der CO<sub>2</sub> – Emissionen ab 1990 [1]

Um zukünftig sinnvolle Maßnahmen zur Senkung der Emissionen zu finden, ist es grundsätzlich wichtig zu wissen, welche Menge an Schadstoffen und Emissionen von einer Durchschnittsflotte in einem bestimmten Zeitraum zustande kommt. Da es nicht möglich ist, die Abgase aller Fahrzeuge im Straßenverkehr zu messen, werden dafür Simulationen eingesetzt. Diese Simulationen liefern für Standardfahrzeuge und Standardumgebungsbedingungen sehr gute Ergebnisse. Allerdings kommt jeder Fahrzeughalter und jede Fahrzeughalterin in die Lage, z.B. bei Regen oder Seitenwind oder auch mit einem Anhänger oder einer Dachbox zu fahren. Dann steigt logischerweise der Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs und es entstehen mehr Emissionen. Wie groß die Emissionssteigerung durch solche Einflüsse ist, ist derzeit wenig erforscht. Korrekturfaktoren für etwaige Fahrzeugaufbauten und Umgebungseinflüsse wurden bis dato abgeschätzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Korrekturfaktoren ermittelt. Der Ablauf gliedert sich in einen experimentellen und einen theoretischen Teil. Im experimentellen Teil wird auf sogenannte Coast-Downs (Ausrollversuche) und RDE (Real Drive Emissions) Fahrten eingegangen. Die Coast-Downs wurden mit einem Versuchsfahrzeug in 16 verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Im theoretischen Teil werden diese Ausrollversuche ausgewertet und Fahrwiderstände ermittelt sowie Emissionssimulationen durchgeführt. Abschließend wird ein Vergleich zwischen den realen, gemessenen Emissionen und den simulierten/berechneten Emissionen gezogen. Um die Thematik besser verstehen zu können, wird am Anfang der Arbeit kurz auf die theoretischen Grundlagen eingegangen.

## 2 Theoretische Grundlagen

In den theoretischen Grundlagen dieser Arbeit wird auf die zu überwindenden Fahrwiderstände und auf Emissionskomponenten eingegangen. Weiters wird kurz die derzeitige Abgasgesetzgebung, die Emissionsmesstechnik und das Thema „Kälteanlagen und Feuchte Luft“ behandelt.

### 2.1 Leistungsbilanz des Kraftfahrzeuges

Damit sich ein Fahrzeug in Bewegung versetzen kann, muss sich die abgegebene Motorleistung im Gleichgewicht mit den zu überwindenen Fahrwiderständen (auf das Fahrzeug wirkende Leistung der Kräfte in Längsrichtung) und den inneren Verlusten befinden. Die Fahrwiderstände spiegeln die Leistungen der äußeren Verluste wieder. [2]

- Rollwiderstandsleistung  $P_R$
  - Steigungsleistung  $P_{St}$
  - Beschleunigungsleistung  $P_a$
  - Luftwiderstandsleistung  $P_L$
  - Triebstrangverluste  $P_{TV}$
  - Schlupfverlustleistung  $P_S$
- } = Leistung der äußeren Fahrwiderstände  $P_{FW}$
- } = Leistung der inneren Fahrwiderstände

In Gleichung (2-1) wird die Hauptgleichung des Kraftfahrzeugs als Leistungsbilanz formuliert.  $P_e$  ist die effektive Leistung.

$$P_e = P_{TV} + P_N = P_{TV} + P_S + P_{FW} = P_{TV} + P_S + P_R + P_{St} + P_a + P_L \quad (2-1)$$

Die Radnabenleistung  $P_N$  ist die Summe von  $P_S$  und  $P_{FW}$ . Mit dem Triebstrangwirkungsgrad  $\eta_T$ , dem Antriebsschlupf  $\lambda_A$ , dem dynamischen Radradius  $r_{dyn}$ , der Radwinkelgeschwindigkeit  $\omega_{rad}$  und der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_F$  gilt:

$$P_N = P_e * \eta_T \quad \text{und} \quad P_{TV} = P_N * \frac{1-\eta_T}{\eta_T} \quad \text{sowie}$$

$$P_N = P_{FW} * \frac{1}{1-\lambda_A} \quad \text{und} \quad P_S = P_N * \lambda_A \quad (2-2)$$

$$\text{mit} \quad \lambda_A = \frac{r_{dyn} * \omega_{rad} - v_F}{r_{dyn} * \omega_{rad}}$$

Die Gleichung (2-1) kann mit Hilfe der Gleichungen (2-2) und der Kraftstoffleistung  $P_K$  sowie dem effektivem Motorwirkungsgrad  $\eta_e$  umgeformt werden zu:

$$P_K = \frac{P_e}{\eta_e} = \frac{1}{\eta_e * \eta_T} * \frac{1}{1 - \lambda_A} * (F_R + F_{St} + F_a + F_L) * v_F \quad (2-3)$$

Die benötigte Kraftstoffleistung  $P_K$  hängt somit von der Fahrwiderstandsleistung  $P_{FW}$  ab. Diese ergibt sich aus dem Produkt der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_F$  und der Zugkraft  $F_Z$ . Es gilt:

$$P_{FW} = F_Z * v_F \quad \text{mit}$$

$$F_Z = M_M * \ddot{u}_T * \eta_T * \frac{1}{r_{dyn}} \quad \text{und} \quad (2-4)$$

$$F_Z = F_R + F_{St} + F_a + F_L$$

$F_Z$  ist definiert als Zugkraft, welche in den Reifenaufstandsflächen der angetriebenen Räder wirkt. Zugleich ist sie proportional zu dem Produkt aus Motormoment  $M_M$  und Antriebsstranggesamtübersetzung  $\ddot{u}_T$ . Weiters hat  $F_Z$  den gleichen Betrag wie die Summe der einzelnen Fahrwiderstandskräfte, allerdings mit umgekehrtem Vorzeichen. Diese **Fahrwiderstandskräfte** sind die wesentliche Grundlage dieser Masterarbeit. Abbildung 2-1 gibt eine Übersicht der Kräftebilanz und des Leistungspfades. [2]

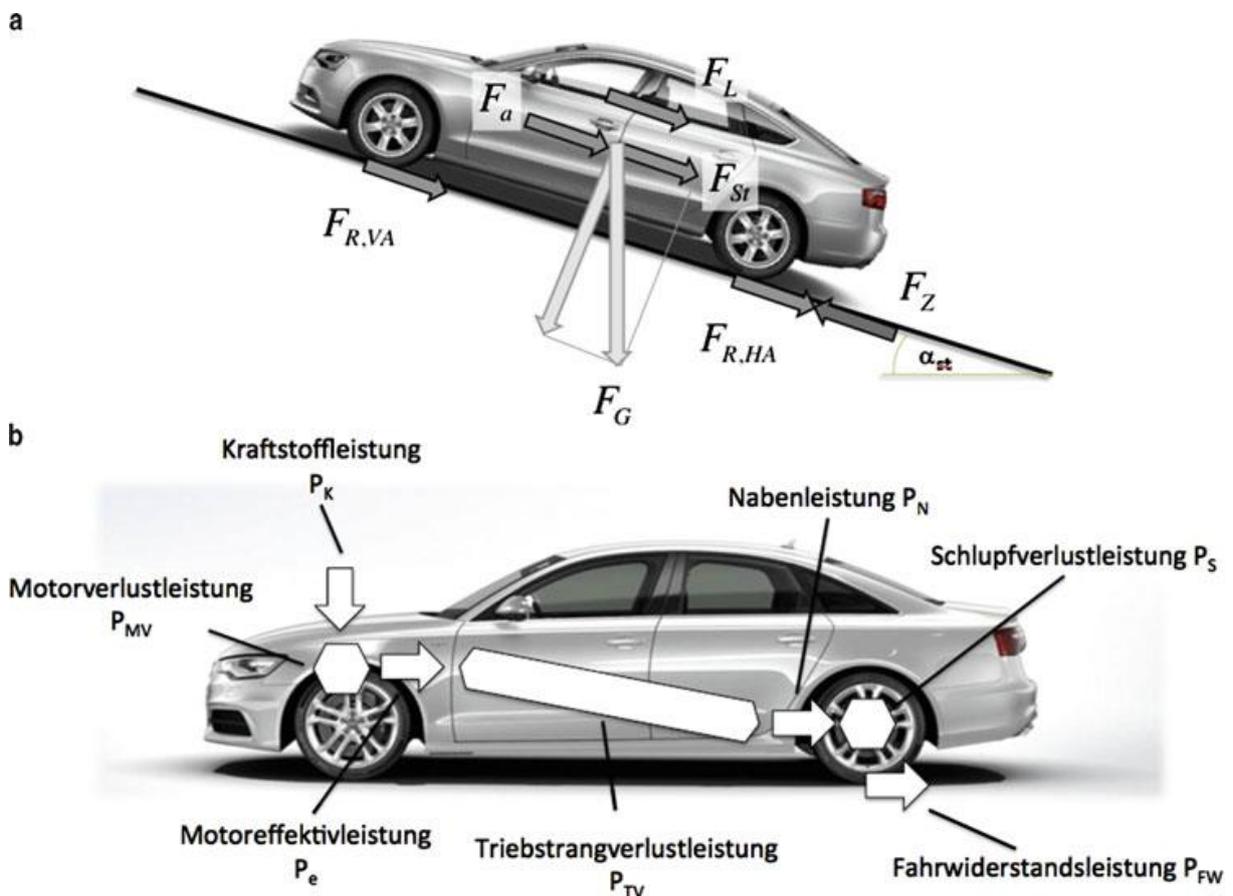


Abbildung 2-1 a) Kräftebilanz und b) Leistungspfad von Tank zu Fahrbahn [2]

## 2.2 Fahrwiderstandskräfte

### 2.2.1 Rollwiderstandskraft $F_R$

Der Rollwiderstand resultiert aus der Verformung des Rades bzw. des Reifens und der Fahrbahn. Auf befestigtem Untergrund ist die Verformung der Fahrbahn vernachlässigbar klein, auf nicht befestigten Wegen jedoch sehr groß. Da in dieser Masterarbeit alle Messungen auf öffentlichen und asphaltierten Straßen durchgeführt wurden und Abschätzungen von Flottenemissionen nur den Verkehr auf asphaltierten Straßen berücksichtigen, ist es ausreichend, nur die Verformung des Reifens zu berücksichtigen. Die Hauptanteile sind die innere Reibung des Reifenwerkstoffes und die Gleit- und Reibvorgänge an der Berührungsfläche mit der Fahrbahn. Zusätzlich kommt die Dämpfungsarbeit hinzu. Diese ist zwar erwünscht, erhöht jedoch den Widerstand. Für die Rollwiderstandskraft in Abhängigkeit des Rollwiderstandbeiwertes  $f_R$  und der Radlast  $F_N$  gilt:

$$F_R = f_r * F_N. [2] \quad (2-5)$$

Der Rollwiderstand ist abhängig von verschiedenen Parametern. Großen Einfluss hat zum Beispiel der Reifendruck und die Querprofilierung. Außerdem kann bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 130 km/h der Widerstand konstant angenommen werden. Beispiele für den Beiwert: 0,001 bis 0,002 für ein Stahlrad auf einer Stahlschiene, 0,01 bis 0,02 für Luftreifen auf festen Untergründen und 0,05 bis 0,35 auf Erd- oder Ackerwegen. [2]



Abbildung 2-2 Rollwiderstand in Abhängigkeit der Geschwindigkeit [2]

### 2.2.2 Steigungswiderstand $F_{St}$

Jener Widerstand, welchen ein Fahrzeug beim Befahren einer Steigung überwinden muss, nennt sich Steigungswiderstand. Mit dem Steigungswinkel  $\alpha$ , der Fahrzeugmasse  $m_F$  und der Erdbeschleunigung  $g$  gilt:

$$F_{St} = m_F * g * \sin \alpha. [2] \quad (2-6)$$

### 2.2.3 Beschleunigungswiderstandskraft $F_a$

Bei instationärer Fahrt treten Trägheitskräfte infolge von Verzögerungen und Beschleunigungen auf. Im Falle von Beschleunigungen müssen diese überwunden werden. Sie setzen sich aus dem translatorischen und rotatorischen Anteil zusammen. Rotierende Teile sind Zahnräder, Getriebewellen, Achsgetriebe, Kardanwelle, Gelenkwellen und die Räder. Für den rein translatorischen Teil des Beschleunigungswiderstandes gilt das Produkt von Masse  $m_F$  und Beschleunigung  $a$  mit  $i$  rotatorischen Massen und den Massenträgheitsmomenten  $J_i$ . [2]

$$F_a = m_F * a + \sum_i (J_i * \omega_i) = e * m_F * a \quad (2-7)$$

Faktor  $e$  wird als Massenfaktor bezeichnet und ist vom Triebstrang des Fahrzeugs abhängig. Bei PKW werden Werte zwischen 1,04 für den direkten Gang bis 1,4 für den ersten Gang angenommen. [2]

#### 2.2.4 Luftwiderstandskraft $F_L$

Bewegt sich ein Fahrzeug in der Atmosphäre, so muss es das umgebende Fluid verdrängen. Dieses wird somit in Bewegung versetzt. Es entsteht aufgrund der fluidinternen Reibung ein Widerstand. Der Widerstand wirkt durch „actio = reactio“ auf das Fahrzeug. Durch die Strömungsverluste ist der Luftwiderstand ein irreversibler Energieverlust. Die Luftwiderstandskraft lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$F_L = c_w * A_x * \frac{\rho_L}{2} * (v_F - v_{Wind})^2. [2] \quad (2-8)$$

Die Dichte  $\rho_L$  ist die Dichte des umgebenden Fluids. Falls ein Gegenwind vorhanden ist, wird er mit  $v_{Wind}$  berücksichtigt. Die beiden wichtigsten Parameter für den Luftwiderstand sind zum einen die Querschnittsfläche bzw. die Schattenfläche  $A_x$  des Fahrzeugs und zum anderen der von der Fahrzeugaußenkontur abhängige Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$ . Richtwerte für die Fläche sind z.B.  $\sim 2\text{m}^2$  für Kleinwagen bis zu  $\sim 3\text{m}^2$  für SUV's oder Kleinbusse.  $c_w$  – Werte reichen von 0,22 (Limousinen) bis zu 0,4 (Klein- und Sportwagen). [2]

### 2.3 Abgaszusammensetzung und Reduktionsmöglichkeiten

Da die Abgaszusammensetzung in der Fachliteratur bereits ausreichend gut beschrieben ist, wird hier nur ein kurzer Überblick dargestellt. Welche Möglichkeiten es zur Abgasreduktion gibt, wird bei den jeweiligen Komponenten kurz erwähnt aber nicht genauer darauf eingegangen.

Würde das Gemisch aus Kraftstoff und Luft vollständig und ideal verbrennen, so würde nur Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) entstehen. Da aber in der Realität keine optimalen Verbrennungsbedingungen im Brennraum herrschen und im Kraftstoff auch andere Bestandteile vorkommen, entstehen toxische Nebenprodukte. In Abbildung 2-3 sind die wesentlichsten Abgasbestandteile anteilmäßig aufgelistet. [3]

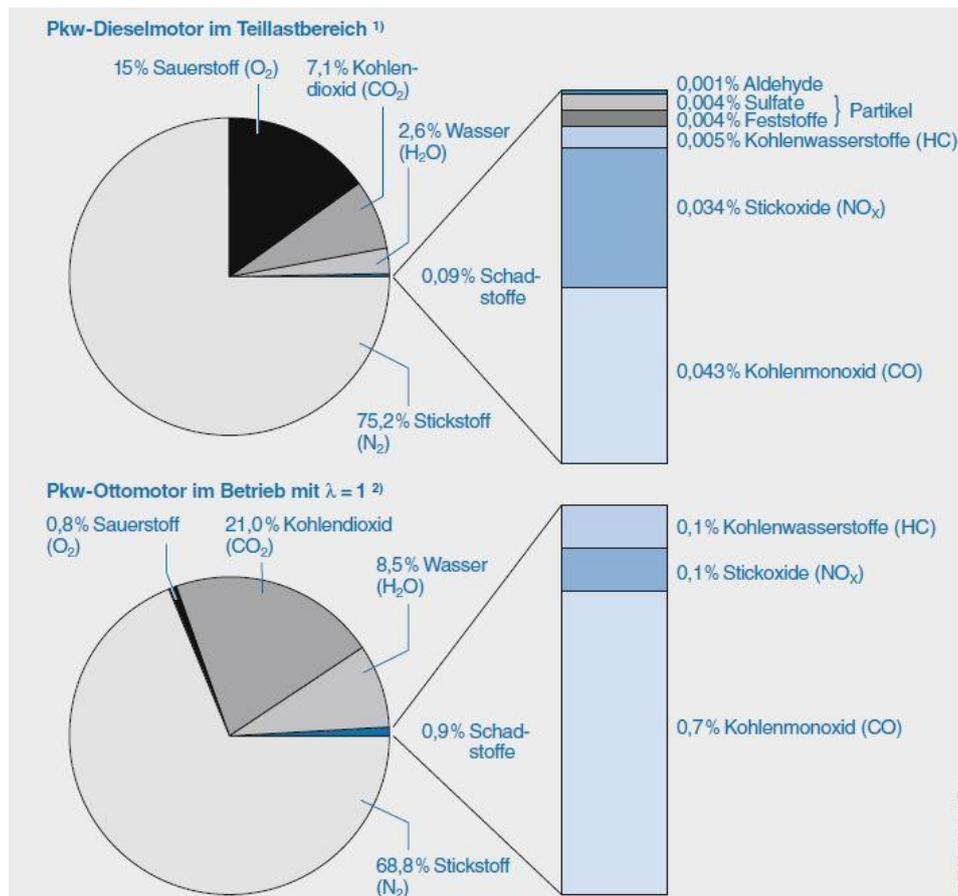


Abbildung 2-3 Typische Rohabgaszusammensetzung von Diesel- und Ottomotor [3]

### 2.3.1 Hauptbestandteile

Diese Abgase sind für alle Lebewesen unschädlich und werden daher mit Ausnahme von CO<sub>2</sub> nicht limitiert.

- **Wasser H<sub>2</sub>O**

Wasserstoff ist im Kraftstoff chemisch gebunden. Bei der Verbrennung entsteht Wasserdampf, welcher beim Abkühlen zum größten Teil kondensiert. [3]

- **Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>**

Kohlenstoff ist ebenso im Kraftstoff gebunden und wird bei vollständiger Verbrennung zu Kohlenstoffdioxid. Die Menge des entstandenen CO<sub>2</sub>'s ist direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch. Somit lassen sich diese Emissionen nur direkt über den Kraftstoffverbrauch reduzieren. Da Kohlenstoffdioxid ein natürlicher Bestandteil in der Atmosphäre ist, wird es nicht als Schadstoff angesehen, jedoch ist es ein Mitverursacher des Treibhauseffektes und trägt zum Klimawandel bei. Somit werden die Maßnahmen zur CO<sub>2</sub> Reduktion immer bedeutender. [3]

- **Stickstoff N<sub>2</sub>**

Stickstoff ist mit 78% der Hauptbestandteil unserer Luft in der Atmosphäre. N<sub>2</sub> ist ein

Inertgas, somit ist es nicht an der Verbrennung beteiligt. [3]

### 2.3.2 Nebenbestandteile bzw. Schadstoffe

Die Nebenbestandteile belaufen sich zwar auf nur knapp 1%, sie sind jedoch stark gesundheitsschädlich und daher streng limitiert.

- **Kohlenstoffmonoxid CO**

Kohlenstoffmonoxid entsteht hauptsächlich bei unvollständiger Verbrennung eines „fetten“ Luft – Kraftstoff – Gemisches. Jedoch kann es auch in geringen Maßen bei einem „mageren“ Gemisch durch etwaige lokale, fette Zonen (Inhomogenität) auftreten. Kohlenmonoxid ist farb- und geruchlos. Kommt es zur Einatmung, verringert es die Sauerstoffaufnahme des Blutes, da sich CO besser als Sauerstoff an das Hämoglobin bindet. Es kommt somit zur Vergiftung des Körpers. [3]

CO kann entweder innermotorisch durch eine vollständige Verbrennung oder durch einen Oxidationskatalysator im Abgasstrang reduziert werden.

- **Kohlenwasserstoffe HC**

„Kohlenwasserstoffe“ steht für einen Sammelbegriff. Darunter fallen alle chemischen Verbindungen die Kohlenstoff C und Wasserstoff H eingehen können. HC-Emissionen sind, wie NO<sub>x</sub>, auf eine unvollständige Verbrennung zurückzuführen. Dabei können mehr als 1000 verschiedene HC-Verbindungen emittiert werden. Kohlenwasserstoffe gelten teilweise als krebserregend und manche Bindungen können durch einen unangenehmen Geruch wahrgenommen werden. [3]

Die Reduktion erfolgt auch mittels Oxidationskatalysator im Abgasstrang.

- **Stickoxide NO<sub>x</sub>**

Stickoxide ist ein Überbegriff für Verbindungen aus Sauerstoff und Stickstoff. Sie bilden sich bei allen Verbrennungen mit Luft (vorallem bei hohen Temperaturen und Luftüberschuss) als Folge von Nebenreaktionen. Bei Verbrennungsmotoren entsteht hauptsächlich Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub> und Stickstoffmonoxid NO. [3]

Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub> ist farb- und geruchlos und wandelt sich mit der Zeit in der Luft in NO um. NO<sub>2</sub> ist ein rotbraunes und stechend riechendes giftiges Gas und kann zur Schleimhautreizung führen. Weiters sind Stickoxide mitverantwortlich für sauren Regen (führt zu Waldschäden) und Smog-Bildung. [3]

Innermotorisch kann die NO<sub>x</sub>-Bildung mittels einer Abgasrückführung (AGR) vermindert werden (Verbrennungstemperatur sinkt). Für die Abgasnachbehandlung haben sich zwei Systeme etabliert. Der Stickoxidspeicherkatalysator und die NO<sub>x</sub>-Reduktion mittels SCR-Verfahren (selective catalytic reduction).

- **Partikel und Ruß**

Bei der unvollständigen Verbrennung entstehen Feststoffe in Form von Partikeln und Ruß. Es handelt sich dabei um Kohlenstoffteilchen an denen sich flüssige oder feste Stoffe (z.B. unverbrannte oder teilverbrennte HC's, Schwefel- und

Stickstoffverbindungen, Wasser, Schwermetalle) anlagern. Die Gefahr verbirgt sich hinter der Größe der Partikel. Partikel mit Größen unter 1 µm gelangen ungefiltert durch die menschlichen Atemwege bis zum Lungenbereich. Diese kleinen Partikel können als Träger für krebserregende Stoffe fungieren. [3]

Durch eine hohe Verbrennungstemperatur und Luftüberschuss können die Partikel innermotorisch minimiert werden. In der Abgasnachbehandlung kann mit Partikelfiltern nachgeholfen werden.

## 2.4 Abgasgesetzgebung

Da die Verkehrsnachfrage von Jahr zu Jahr steigt, ist es nachzuvollziehen, die Luftbelastungen durch den Verkehr mittels Grenzwerten zu reduzieren. Derzeit sind die Abgasnormen Euro 6c und Euro 6d-Temp gültig. Ab 2020 gilt Euro 6d. In diesen sogenannten „Euro-Normen“ sind Grenzwerte der Emissionskomponenten festgelegt. Diese unterscheiden sich je nach Euro-Norm und Fahrzeugtyp (PKW, Motorräder, LKW usw.).

Die Tabelle 2-1 zeigt den Verlauf der Abgasnormen seit Euro 5a im Jahr 2009 für PKW innerhalb der EU.

Tabelle 2-1 Verlauf der Abgasnormen seit 2009 für PKW in der EU [4]

	Normreihe	Euro 5a	Euro 5b	Euro 6b	Euro 6c	Euro 6d-Temp	Euro 6d
	Typisierung	09/2009	09/2011	09/2014		09/2017	1/2020
	Neuzulassung	1/2011	1/2013	09/2015	09/2018	09/2019	1/2021
	Fahrzyklus	NEDC			WLTC		
<b>Otto</b>							
<b>THC</b>	[mg/km]	100	100	100	100	100	100
<b>NMHC</b>	[mg/km]	68	68	68	68	68	68
<b>NO<sub>x</sub></b>	[mg/km]	60	60	60	60	60	60
<b>CO</b>	[mg/km]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
<b>PM</b>	[mg/km]	5	5	5	5	5	5
<b>PN</b>	[/km]	-	-	6*10 <sup>11</sup>	6*10 <sup>11</sup>	6*10 <sup>11</sup>	6*10 <sup>11</sup>
<b>Diesel</b>							
<b>HC</b>	[mg/km]	-	-	-	-	-	-
<b>NO<sub>x</sub></b>	[mg/km]	180	180	80	80	80	80
<b>HC + NO<sub>x</sub></b>	[mg/km]	230	230	170	170	170	170
<b>CO</b>	[mg/km]	500	500	500	500	500	500
<b>PM</b>	[mg/km]	5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
<b>PN</b>	[/km]		6*10 <sup>11</sup>				

Erläuterung der bisher nicht erwähnten Emissionen:

THC: „Total Hydrocarbons“ ist die Summe von NMHC und Methan

NMHC:	Nichtmethankohlenwasserstoffe
PM:	Partikelmasse
PN:	Partikelanzahl

#### 2.4.1 CO<sub>2</sub> – Grenzwerte für PKW

2012 wurden zum ersten Mal Grenzwerte für CO<sub>2</sub> bei PKW festgelegt. Die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen  $E_{CO_2}$  neuer Personenkraftwagen müssen im Flottendurchschnitt folgende Vorgaben nach Gleichung (2-9) einhalten: [5]

$$E_{CO_2} = 130 + 0,0457 * (M - M_0) \quad [\text{g/km}] \quad (2-9)$$

- M** Referenzmasse für die Typprüfungsmessung am Rollenprüfstand in Kilogramm (entspricht Fahrzeugleergewicht + 100kg)
- M<sub>0</sub>** 1327 kg bis 2015, danach wird sie aus dem Durchschnittsfahrzeuggewicht aller, in der EU neu zugelassenen PKW der letzten 3 Kalenderjahre berechnet.

Der Term  $M - M_0$  ist notwendig, damit auch bei steigendem Fahrzeugleergewicht alle Hersteller die Grenze von 130 g/km einhalten können. Ab 2021 liegt der Zielwert bei 95 g/km. [5]

#### 2.4.2 Fahrzyklen

Um die Emissionen festzustellen, werden auf einem Rollenprüfstand bestimmte Fahrzyklen nachgefahren und dabei die Abgase gemessen. Bis Euro 6b galt der Prüfzyklus NEDC (New European Driving Cycle), danach wurde der WLTC (Worldwide Harmonized Light-duty Vehicle Test Cycle) eingeführt. Der NEDC Zyklus ist 11,007 km lang und dauert 1180 Sekunden bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca 33,6 km/h. Erlaubt sind maximale Beschleunigungen von ca 1 m/s<sup>2</sup>. Da der NEDC ein sehr moderates Fahrverhalten darstellt und keinem realen Fahrverhalten entspricht, wurde der WLTC eingeführt. Mit 23,253 km und 1800 Sekunden ist er deutlich länger und auch die Durchschnittsgeschwindigkeit ist mit 46,3 km/h höher. Durch maximale Beschleunigungen von 1,6 m/s<sup>2</sup> ist ein wesentlich dynamischeres Fahren möglich. In Abbildung 2-4 wird der Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit der Zeit beider Zyklen dargestellt. [4]

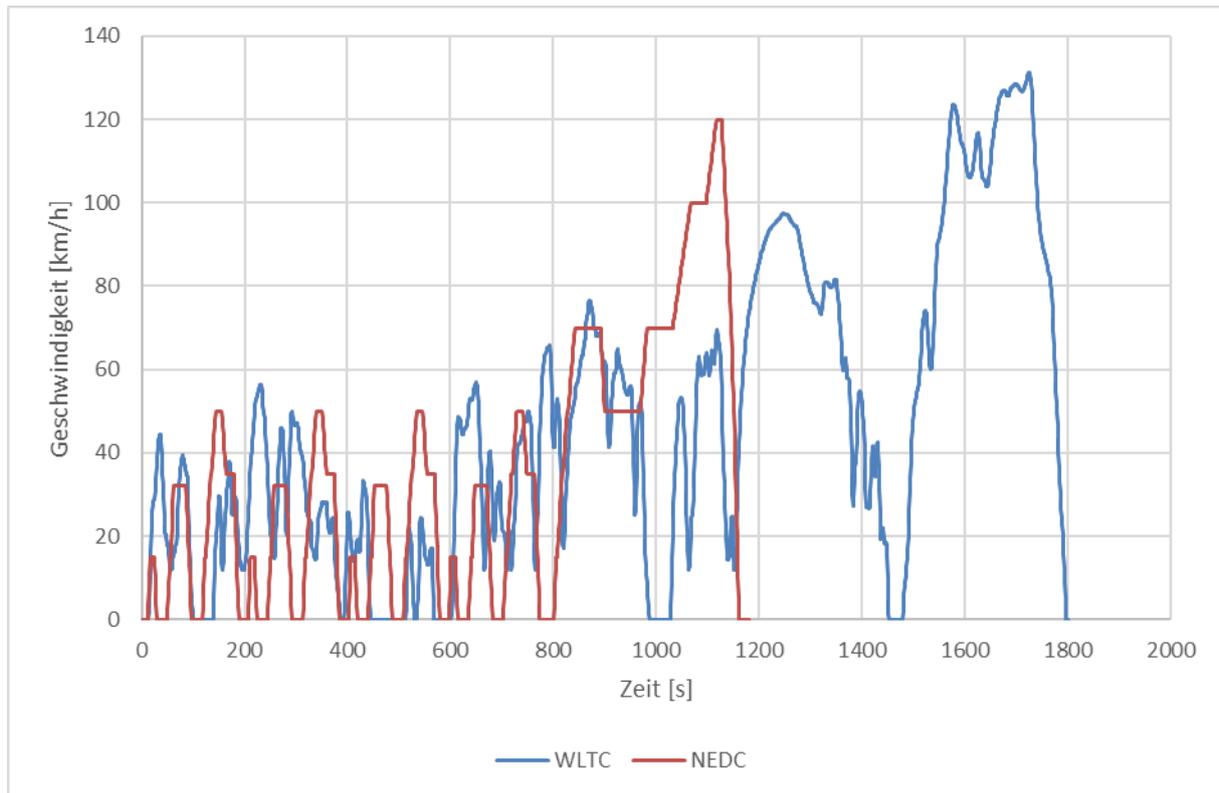


Abbildung 2-4 Vergleich von WLTC und NEDC

Als Ergänzung zum WLTC trat in Europa am 1. September 2017 die RDE (Real Driving Emissions) Regelung in Kraft. Bei RDE-Messungen werden Emissionen, wie beispielsweise  $\text{NO}_x$ , oder auch die Partikelanzahl, im Straßenverkehr im realen Fahrbetrieb und unter realen Umweltbedingungen gemessen. Dabei misst das Portable Emission Measuring System (PEMS) den Schadstoffausstoß. Mit zusätzlichen Messsystemen werden aber auch die zugehörigen Parameter des Fahrzeugs und der Umgebungsbedingungen (GPS, Geschwindigkeit, Höhenmeter und Temperatur) gemessen. Um eine gültige RDE-Fahrt zu absolvieren, muss eine Vielzahl an Randbedingungen eingehalten werden. Die folgende Tabelle 2-2 zeigt einen kurzen Auszug aus den Richtlinien.

Tabelle 2-2 Auszug aus den Richtlinien für RDE Fahrten [4]

Faktoren	Stadt	Land	Autobahn
Geschwindigkeit	$\leq 60$ km/h	$> 60$ & $\leq 90$ km/h	$> 90$ km/h
Mindestdistanz	16 km	16 km	16 km
Gesamtdauert	90 – 120 Minuten		
Geschw. $> 100$ km/h	-	-	$\geq 5$ min
Höhenmeterdifferenz	$< 1200$ m / 100 km		

## 2.5 Emissionsmesstechnik

Die Emissionsmesstechnik wird in verschiedenen Bereichen der Fahrzeugbranche verwendet. Die gemessenen Abgase geben unter anderem einen Einblick in innermotorische Vorgänge und dienen damit zur Motoren- und Verbrennungsentwicklung. Die wohl wichtigste Aufgabe ist jedoch die Kontrolle der Emissionen zur Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte. Emissionen können am Motorprüfstand, am Rollenprüfstand und im realen Straßenverkehr gemessen werden. Für diese Masterarbeit wurde nur eine Messung im realen Fahrbetrieb mit einem PEMS durchgeführt, daher wird nur auf dieses System näher eingegangen.

### 2.5.1 PEMS – Portable Emission Measurement System

Das verwendete PEMS wurde von der AVL List GmbH entwickelt. Es wird in ein Gas-PEMS und ein PN-PEMS unterteilt. Im Anschluss folgt ein Überblick über die beiden Messsysteme. Eine detaillierte Beschreibung würden den Rahmen sprengen, daher verweise ich auf die Product Guides von der AVL.

#### 2.5.1.1 AVL Gas PEMS

Das Gas PEMS ermöglicht eine Emissionsmessung und Emissionsaufzeichnung am Auspuffende mit einer Frequenz von bis zu 5 Hz. Dabei handelt es sich um die gasförmigen Emissionen wie NO, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, und HC. [7]

Grundlegendes Funktionsprinzip: [7]

- Durch eine beheizte Entnahmeleitung wird ein Rohabgasstrom zum Gerät geführt
- An einem beheizten Filter werden die Partikel aus dem Rohabgas entfernt
- Am Filter wird der Strom in zwei Teilströme geteilt. Ein Teilstrom gelangt zum FID (Flammenionisationsdetektor), der andere zum NDUV- und NDIR-Analysator und zum O<sub>2</sub>-Sensor (NDUV = Nichtdispersiver Ultraviolett Analysator, NDIR = Nichtdispersiver Infrarot-Analysator)
- Der FID misst die THC- und die CH<sub>4</sub>-Konzentration. Dieser Analysator wurde bei dieser Masterarbeit nicht verwendet
- Im NDUV wird NO und NO<sub>2</sub> gemessen
- CO und CO<sub>2</sub> wird beim NDIR gemessen und O<sub>2</sub> am Sauerstoffsensor
- Danach werden die Massenströme wieder zusammengeführt
- Es handelt sich bei den gemessenen Werten um die druckkompensierten Konzentrationen der Abgaskomponenten in ppm oder Vol.-%.

Abbildung 2-5 stellt das Funktionsprinzip des Gas-PEMS grafisch dar.

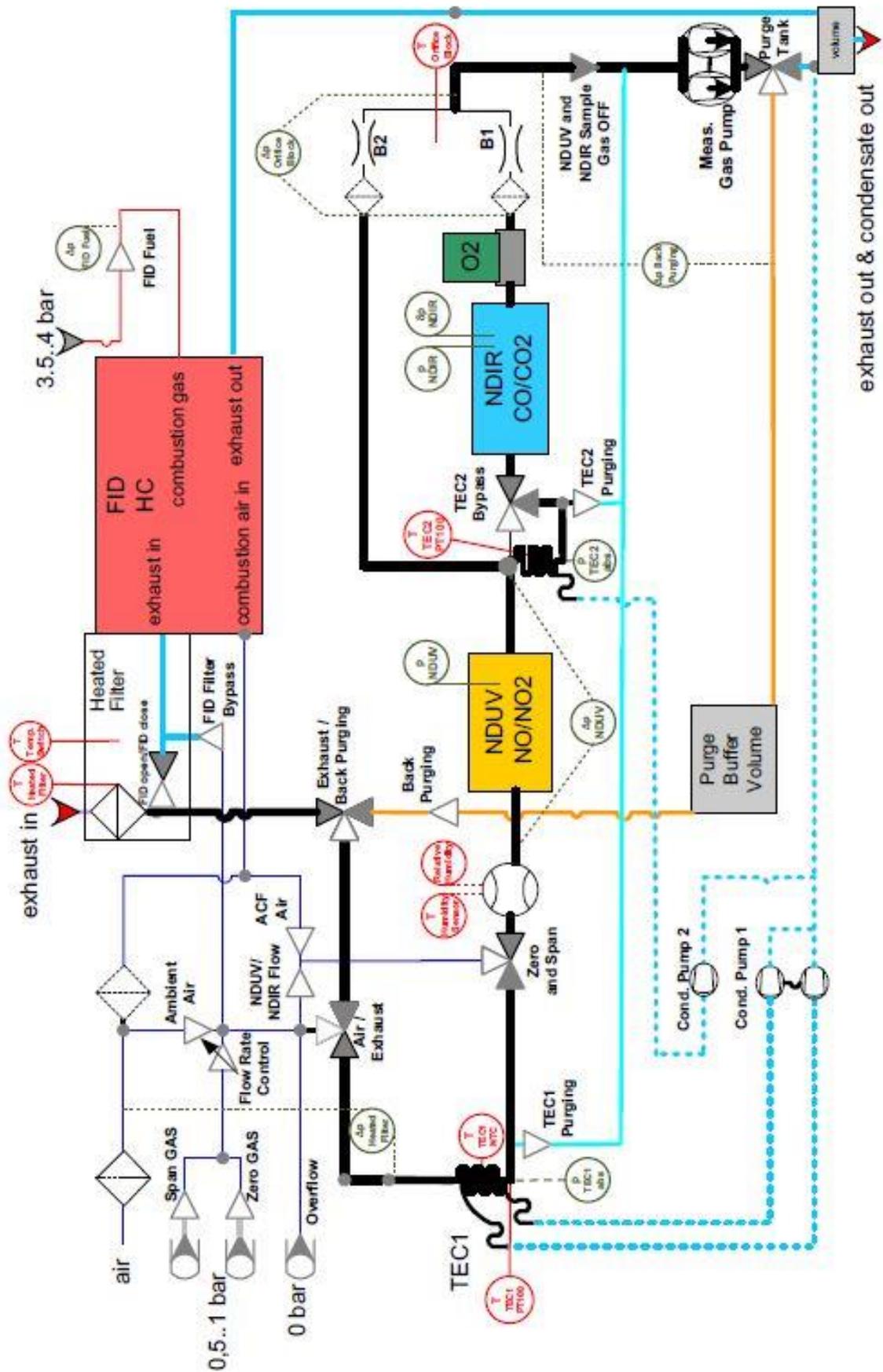


Abbildung 2-5 Funktionsprinzip des Gas PEMS [7]

### 2.5.1.2 AVL PN PEMS

Das PN-PEMS ermöglicht eine Emissionsmessung und -aufzeichnung am Auspuffende mit einer Frequenz von bis zu 5 Hz. Dabei handelt es sich um die Anzahl an ausgestoßenen Partikeln. [7]

Grundlegendes Funktionsprinzip: [7]

- Entnahme von Rohabgas bei einer Verdünnungsrate von 10
- Konstanter Fluss des Rohabgases über die Sensoreinheit
- Partikelkonzentration in verdünntem Abgas wird in der Sensoreinheit gemessen und zeitlich aufgelöst.
- Der Sensor funktioniert nach dem Prinzip der Diffusionsaufladung. Partikel werden durch ein unipolares Diffusionsladegerät ionisiert (Effekt der Koronaentladung).

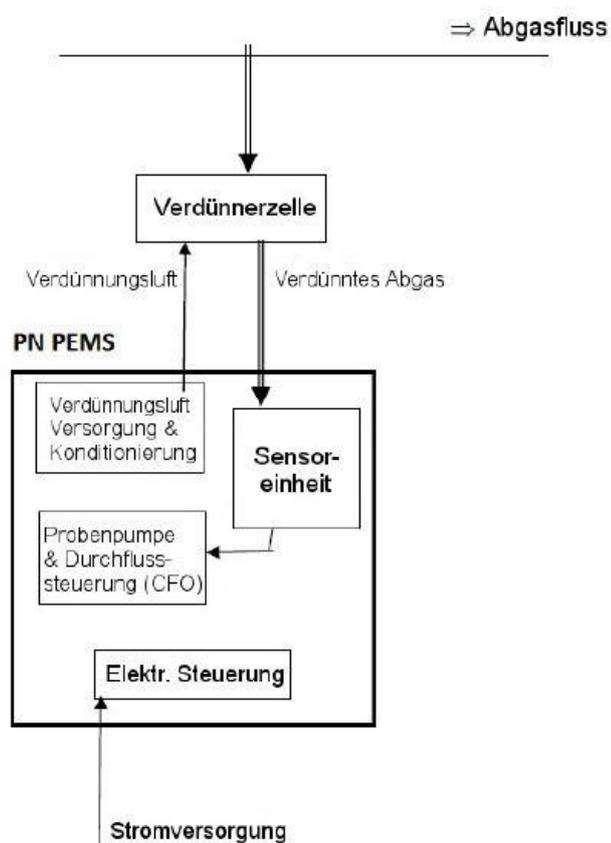


Abbildung 2-6 Funktionsprinzip des PN PEMS [7]

## 2.6 Kälteanlagen und feuchte Luft

Da sich ein Teil der Masterarbeit mit der Leistung von PKW Klimaanlage beschäftigt, wird auf die Grundlagen von Kälteanlagen und feuchter Luft eingegangen.

### 2.6.1 Prozesskette einer PKW Klimaanlage:

Abbildung 2-7 zeigt eine Prinzipskizze einer typischen PKW Klimaanlage. Der blaue Prozess betrifft nur die Umgebungsluft, welche an den in der Skizze genannten Komponenten vorbei bis in den Fahrgastraum strömt. In der Realität ist die Umgebungsluft immer feuchte Luft. Der rote Kreislauf bildet den Kälteprozess der Klimaanlage ab.

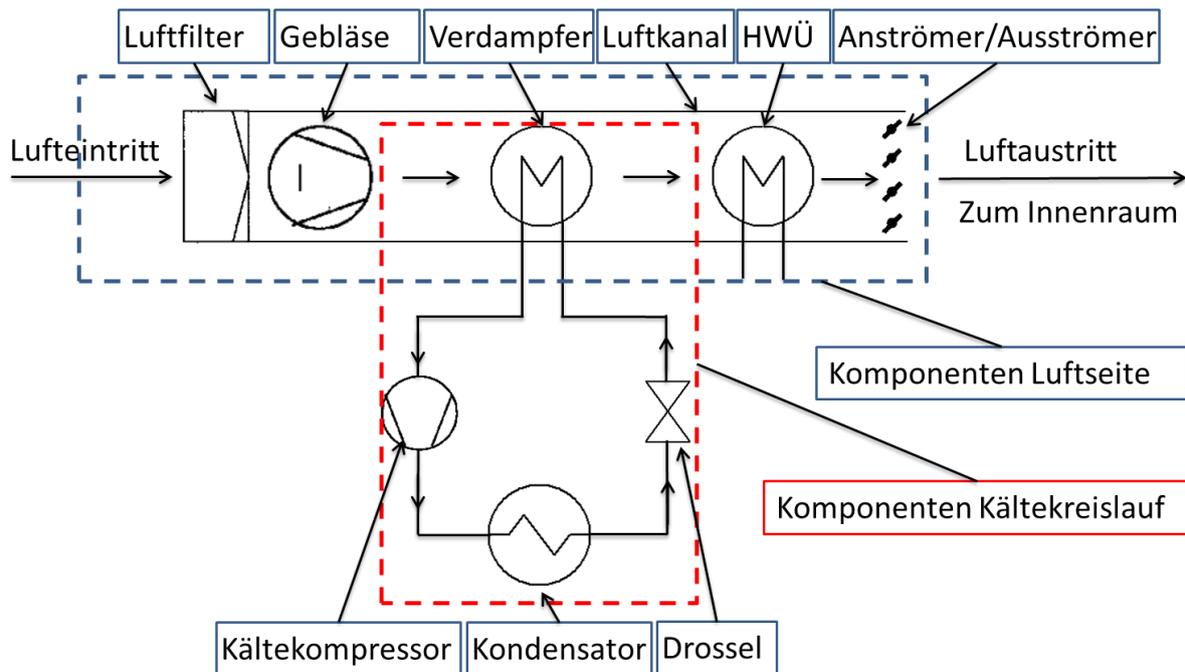


Abbildung 2-7 Prozesskette einer PKW Klimaanlage

## 2.6.2 Kälteanlagen

Am häufigsten werden sogenannte Kompressionskälteanlagen verwendet. Im Prinzip ist es eine Umkehrung von Dampfkraftanlagen mit folgenden Unterschieden: [6]

- Andere Arbeitsmedien als Wasser
- Im Gegensatz zur Dampfkraftanlage mit einer Speisepumpe benötigt man eine Turbine. Der Arbeitsgewinn einer Turbine ist jedoch zu gering, daher wird eine Drossel verwendet.

Das Schema einer Kompressionskältemaschine wird in Abbildung 2-8 dargestellt.

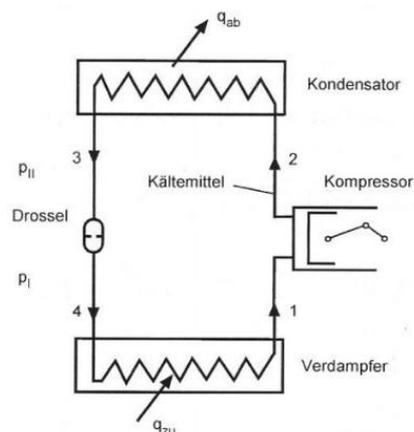


Abbildung 2-8 Schema einer Kompressionskälteanlage

Dazu passend werden in Abbildung 2-9 der ideale und der reale Kreisprozess im TS-Diagramm dargestellt. [6]

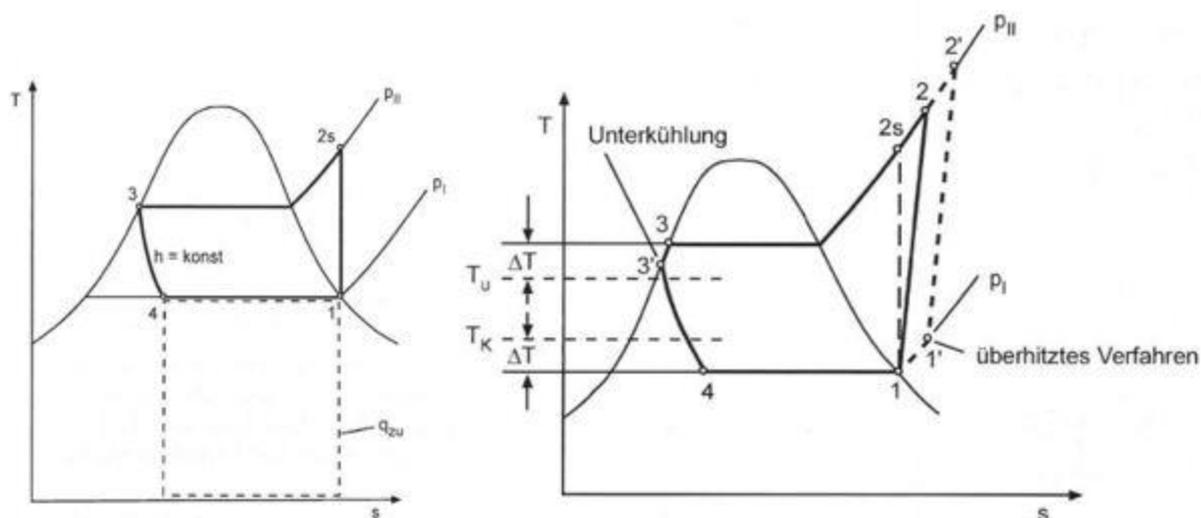


Abbildung 2-9 idealer und realer Kreisprozess einer Kompressionskältemaschine

Folgende Formeln beschreiben den idealen Kreisprozess:

**1-2s** Kompressor: isentrope Kompression, Arbeit ist als Aufwand zu betrachten.

$$w = h_{2s} - h_1 \quad (2-10)$$

$w$  ..... Kompressorarbeit [J]

$h_{2s}$  ..... spezifische Enthalpie im Punkt 2s [J/kg]

$h_1$  ..... spezifische Enthalpie im Punkt 1 [J/kg]

**2s-3** Kondensator: isobare Wärmeabfuhr

$$q_{ab} = h_{2s} - h_3 \quad (2-11)$$

$q_{ab}$  ..... spezifische abgeführte Wärmemenge [J/kg]

$h_3$  ..... spezifische Enthalpie im Punkt 3 [J/kg]

**3-4** Adiabate Drosselung:

$$h_3 = h_4 \quad h_3 = h'(p_{II}) \quad h_4 = h' + x_4 * r \quad \text{bei } p_I \quad (2-12)$$

$h_4$  ..... spezifische Enthalpie im Punkt 4 [J/kg]

$h'(p_{II})$  ..... Enthalpie des Wassers bei  $p_{II}$  [J/kg]

$p_{II}$  ..... Druck 2 [bar]

**4-1** Verdampfer: Die Wärme dient als Nutzeffekt

$$q_{zu} = h_1 - h_4 \qquad h_1 = h''(p_1) \qquad (2-13)$$

$q_{zu}$  ..... spezifische zugeführte Wärmemenge [J/kg]

$h''(p_1)$  ..... Enthalpie des Dampfes [J/kg]

Die Leistungszahl  $\varepsilon$  (Wirkungsgrad bei Kälteanlagen) lässt sich aus dem Quotienten der zugeführten Wärmemenge  $q_{zu}$  und der Arbeit  $w$  berechnen.

$$\varepsilon = \frac{q_{zu}}{w} \qquad (2-14)$$

Folgende Unterschiede treten vom Idealprozess zum tatsächlichen realen Prozess auf: [6]

- Der Kompressor arbeitet nicht adiabat und reibungsfrei. Dies kann durch den isentropen Wirkungsgrad berücksichtigt werden
- Um im Wärmetauscher Wärme übertragen zu können, ist ein Temperaturunterschied notwendig. Dadurch werden die Prozessstemperaturgrenzen erweitert und die Leistungszahl verringert sich.
- Der Austritt aus dem Verdampfer ist meist überhitzt und aus dem Kondensator meist leicht unterkühlt.

**2.6.3 Feuchte Luft**

Das Gemisch Luft und Wasserdampf kommt in der Natur am häufigsten vor und es ist auch das technisch Wichtigste. Die beiden Komponenten verhalten sich so, als wären sie alleine in einem Raum. Somit gilt das Daltonsche Gesetz: Der Gesamtdruck  $p$  ist die Summe der Partialdrücke (trockene Luft  $p_1$  und Wasserdampf  $p_d$ ). [6]

$$p = p_1 + p_d \qquad (2-15)$$

In einem Gemisch kann sich nur die Menge des Dampfes ändern, nicht jedoch die Menge der trockenen Luft. Für die trockene Luft gilt die ideale Gasgleichung. [6]

$$p_1 * V = m_1 * R_1 * T \qquad (2-16)$$

$p_1$  ..... Druck [bar]

$V$  ..... Volumen [m<sup>3</sup>]

$m_1$  ..... Masse [kg]



Durch einsetzen der Formeln aus (2-20) ergibt sich für die feuchte Luft pro kg trockener Luft: [6]

$$h_{1+x} = c_{pl} * t + x * (r_0 + c_{pd} * t) \quad (2-21)$$

$c_{pl}$  ..... spezifische Wärmekapazität der trockenen Luft [J/kgK]

$c_{pd}$  ..... spezifische Wärmekapazität des Dampfes [J/kgK]

$r_0$  ..... spezifische Verdampfungswärme bei 0°C [J/kg]

Der Index „1+x“ steht für den Bezug auf ein Kilogramm trockener Luft. Steigt die Feuchtigkeit über die Sättigung hinaus an, treten zwei Fälle ein: [6]

Fall 1: Es entsteht Eis oder Kondenswasser, welches abgeführt/ausgeschieden wird.

- Enthalpie der gesättigten feuchten Luft:

$$h_{1+x'} = c_{pl} * t + x' * (r_0 + c_{pd} * t) \quad (2-22)$$

- Enthalpie des abgeführten Eises:

$$h_{e_{1+x}} = -(x - x') * (q_{s0} - c_e * t_e) \quad (2-23)$$

$q_{s0}$  ..... spezifische Schmelzwärme des Eises bei 0°C [J/kg]

$c_e$  ..... spezifische Wärmekapazität des Eises [J/kgK]

- Enthalpie des abgeführten Wassers

$$h_{w_{1+x}} = (x - x') * c_w * t_w \quad (2-24)$$

$c_w$  ..... spezifische Wärmekapazität des Wassers [J/kg]

Fall 2: Wasser bleibt in Form von Schnee oder Nebel im Gemisch erhalten und durchläuft die Temperaturänderung mit.

- Bei Wasser

$$h_{1+x} = h_{1+x'} + (x - x') * c_w * t \quad (2-25)$$

- Bei Eis

$$h_{1+x} = h_{1+x'} - (x - x') * (q_{s0} - c_e * t) \quad (2-26)$$

Abschließend ist noch zu erwähnen, dass das hx-Diagramm nach Mollier (1923) für Berechnungen sehr hilfreich ist. [6]

### 3 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit war es, Emissionseinflüsse von diversen Fahrzeugaufbauten, wie zum Beispiel von Fahrradträgern oder Dachboxen, zu ermitteln. Dazu kommt, dass nicht immer perfekte Umgebungsbedingungen herrschen und somit auch Einflüsse von z.B. Seitenwind, Temperatur, Wetter etc. relevant sind. Um diese Einflüsse darzustellen, werden mittels Ausrollversuchen Faktoren ermittelt, welche die Steigerung der Fahrwiderstände widerspiegeln. Zur Verdeutlichung folgt ein vereinfachtes Beispiel:

**Ausrollversuch 1:** Fahrzeug führt Ausrollversuch durch, Fahrwiderstände werden ermittelt

$$FW_1 = X \quad \begin{array}{ll} FW_1 & \text{..... Fahrwiderstände 1} \\ X & \text{..... Wert der Fahrwiderstände 1} \end{array}$$

**Ausrollversuch 2:** Gleiches Fahrzeug, allerdings mit Fahrradträger am Dach, führt Ausrollversuch durch, Fahrwiderstände werden ermittelt

$$FW_2 = Y \quad \begin{array}{ll} FW_2 & \text{..... Fahrwiderstände 2} \\ Y & \text{..... Wert der Fahrwiderstände 2} \end{array}$$

Die Fahrwiderstände der Fahrt mit Fahrradträger sind logischerweise höher.

$$K = Y/X \quad \begin{array}{ll} K & \text{..... Faktor für die Fahrwiderstandssteigerung durch} \\ & \text{einen Fahrradträger} \end{array}$$

K gilt nun als Korrekturfaktor, welcher die Steigerung der Fahrwiderstände bei Fahrt mit Fahrradträger widerspiegelt. Diese Faktoren von Aufbauten und Umgebungsbedingungen spielen für zukünftige Simulationen, speziell für RDE Simulationen, eine Rolle. Dadurch kann anschließend relativ leicht eine Aussage zur Steigerung der verursachten Emissionen gemacht werden.

Anschließend soll in dieser Masterarbeit ein Vergleich der Einflüsse auf RDE- und WLTC Simulationen durchgeführt werden.

Abschließend sollen zur Kontrolle RDE-Fahrten mit diversen Aufbauten durchgeführt und nachsimuliert werden. Im Zuge dieser Simulationen ist die Leistung der Nebenverbraucher eines PKW's relevant. Daher wurde ein am IVT (Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik) vorhandenes Berechnungstool überarbeitet und weiterentwickelt. Stimmen die gemessenen Emissionen mit den Simulierten überein, sind diese Korrekturfaktoren gültig.

## 4 Messtechnische Untersuchungen und Auswertung der Ausrollversuche (Coast-Down-tests)

Um Fahrwiderstände ermitteln zu können, sind Ausrollversuche durchzuführen. Dabei muss die Geschwindigkeit über die Zeit aufgezeichnet werden. In diesem Kapitel wird das Versuchsfahrzeug mit den verschiedenen Konfigurationen vorgestellt, der Ausrollversuch mit dazugehöriger Datenauswertung beschrieben und zusätzlich die Radarbeit berechnet.

### 4.1 Versuchsfahrzeug

Alle Messungen, Ausrollversuche und RDE-Fahrten etc. wurden mit einem BMW 218d Gran Tourer, Baujahr 2018, durchgeführt.



Abbildung 4-1 Versuchsfahrzeug BMW 218d

Die Tabelle 4-1 listet die Daten des Versuchsfahrzeuges auf.

Tabelle 4-1 Fahrzeugdaten

Hersteller und Model	BMW 218d Gran Tourer
Baujahr	2018
Zylinderanzahl	4
Hubraum	1995 ccm
Leistung bei 4000 U/min	110 kW
Drehmoment bei 1750 U/min	330 Nm
Antriebsart	Frontantrieb
Getriebe	6-Gang Schaltgetriebe
Kraftstoff	Diesel
Abgasklasse	Euro 6d-Temp
Abgasnachbehandlung	Speicherkat., SCR, Dieselpartikelfilter

Eigengewicht	1520 kg
Kilometerstand	10000 km

## 4.2 Ausrollversuche (Coast-Down-tests)

### 4.2.1 Allgemeines

Um einen Ausrollversuch durchzuführen, muss das Fahrzeug auf mindestens 120 km/h beschleunigt werden. Danach wird im Neutralgang und unbelastetem Kupplungspedal bis unter 20 km/h ausgerollt. Während des gesamten Ausrollvorganges muss der zeitliche Verlauf der Geschwindigkeit aufgezeichnet werden.

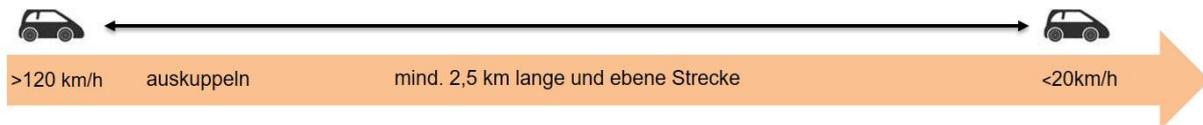


Abbildung 4-2 Prinzipskizze eines Ausrollversuches

### 4.2.2 Richtlinien für einen korrekten Ausrollversuch

Um einen Ausrollversuch korrekt durchzuführen, muss eine Vielzahl an Anforderungen erfüllt werden. Im Folgenden werden nur die wichtigsten Eigenschaften diskutiert. Für detaillierte Informationen wird auf die Verordnung (EU) 2017/1151 verwiesen.

Neben den Daten des Fahrzeugs müssen auch weitere Daten bekannt sein bzw. gewisse Anforderungen erfüllt werden. Im Optimalfall hat man ein gesperrtes Testgelände mit einer möglichst geraden Strecke, die komplett eben und flach ist. Zusätzlich herrscht kein Umgebungswind und die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit etc.) liegen bei Normbedingungen. Da Normbedingungen in freiem Gelände nur schwer erreicht bzw. für längere Zeit erhalten bleiben, muss anschließend eine Korrektur der Fahrwiderstände durchgeführt werden. Darauf wird in späteren Kapiteln eingegangen. Die Norm bzw. Bezugsbedingungen werden in Kapitel 4.4.3 beschrieben.

#### Zu den Anforderungen:

Umgebungsbedingungen:

- Umgebungstemperatur zwischen 5 °C und 35 °C
- Sind die Umgebungswindgeschwindigkeiten im arithmetischen Mittel durchschnittlich unter 2 m/s, muss keine Windkorrektur durchgeführt werden.

Prüfstrecke:

- Straßenoberfläche muss eben, flach, trocken und sauber sein
- Keine Hindernisse oder Windschutzwände, welche die Messung beeinflussen könnten
- Längsneigung max.  $\pm 1$  %
- Ausrollversuch sollte in beide Fahrtrichtungen möglich sein
- Die Länge wird nicht vorgegeben, allerdings erwies sich eine Strecke von mindestens 2,5 km als sinnvoll, da der Ausrollversuch sonst in Geschwindigkeitsbereiche aufgeteilt werden muss (z.B. von 120 km/h bis 70 km/h und anschließend von 70 km/h bis 20

km/h)

Fahrzeug:

- Muss der Produktionsserie entsprechen
- Kilometerstand zwischen 10000 km und 80000 km
- Reifen nicht älter als 2 Jahre, 200 km eingefahren, 100 % bis 80 % der Profiltiefe muss vorhanden sein

Aufzeichnungen:

- Mindestens drei Ausrollversuche in jede Richtung
- Geschwindigkeitsverlauf und Ausrollzeit
- Temperatur, Druck, Feuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung

### 4.2.3 Ausrollstrecke

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bedarf es einer Recherche für die geeignetste Ausrollstrecke im Bundesland Steiermark. Da kein gesperrtes Testgelände zur Verfügung steht, wird auf öffentliche Straßen zurückgegriffen. Nach Durchsichtung von digitalen Karten wurden mögliche Strecken abgefahren und erste Ausrollversuche durchgeführt. Letztendlich fiel die Wahl auf die Bundesstraße B69 zwischen Gosdorf und Diepersdorf.

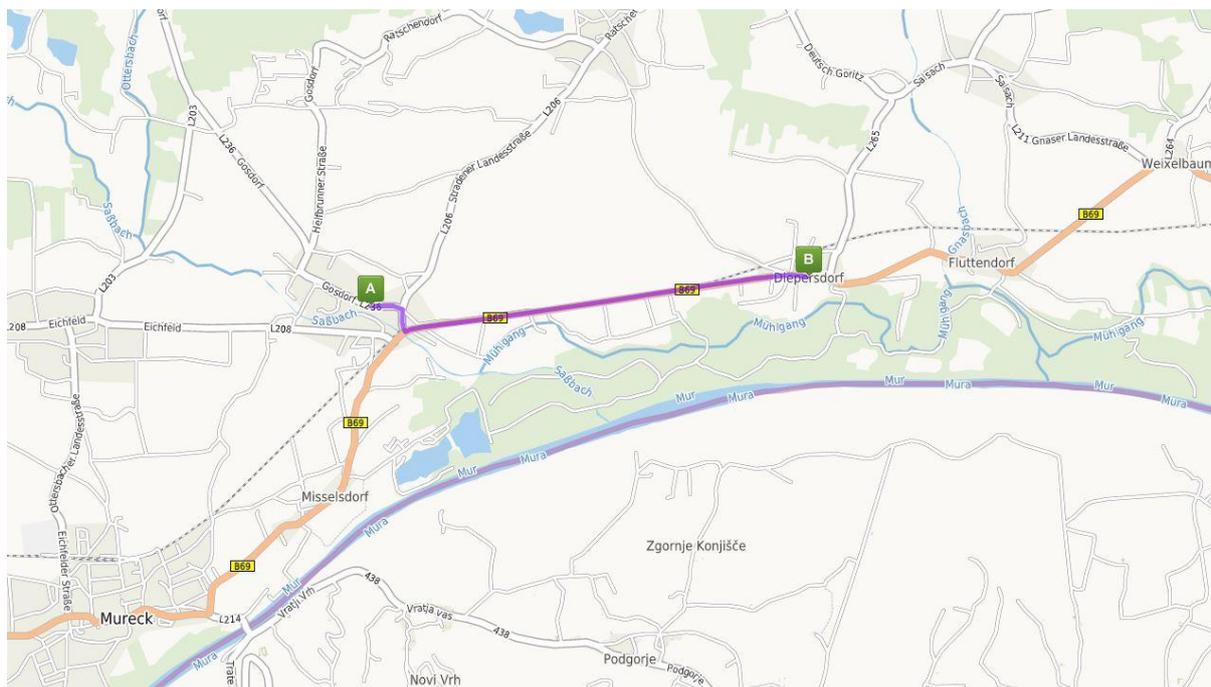


Abbildung 4-3 Ausrollstrecke Gosdorf – Diepersdorf [9]

Die Bundesstraße verläuft genau neben einer Eisenbahnstrecke und ist somit gerade, flach und eben. Nördlich und Südlich der Straße befinden sich nur vereinzelt Häuser und Bäume.

### 4.2.4 Wetterstation

Da die Wetterdaten zur Auswertung der Ausrollversuche benötigt werden, wurde in Gosdorf in der Wiese neben dem Bahnhofparkplatz eine Renkforce WH2315 Funk-Wetterstation

aufgestellt. Damit konnten die notwendigen Daten aufgezeichnet und anschließend mit der dazugehörigen Software ausgewertet werden. Das Aufzeichnungsintervall kann von 30 Sekunden bis zu 24 Stunden eingestellt werden.

Folgende Daten waren relevant und wurden aufgezeichnet:

- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit
- Temperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Luftdruck



Abbildung 4-4 Wetterstation

#### 4.2.5 Datenaufzeichnung des Ausrollversuches

Zur permanenten Aufzeichnung der Bewegung des Fahrzeuges wurde von der Firma RACELOGIC das VBOX Automotive Produkt VBIISX5 verwendet.



Abbildung 4-5 VBOX VBIISX5

Folgende Daten wurden in 5Hz Schritten aufgezeichnet:

- GPS-Koordinaten (Longitude, Latitude)
- Geschwindigkeit [km/h]
- Fahrtrichtung [ $^{\circ}$  Abweichung zu Norden]
- Höhenlage [m]

Abbildung 4-6 zeigt die aufgezeichnete Geschwindigkeit von insgesamt elf Ausrollversuchen. Dieser Verlauf zeigt die unbearbeiteten Rohdaten, welche die VBOX liefert.

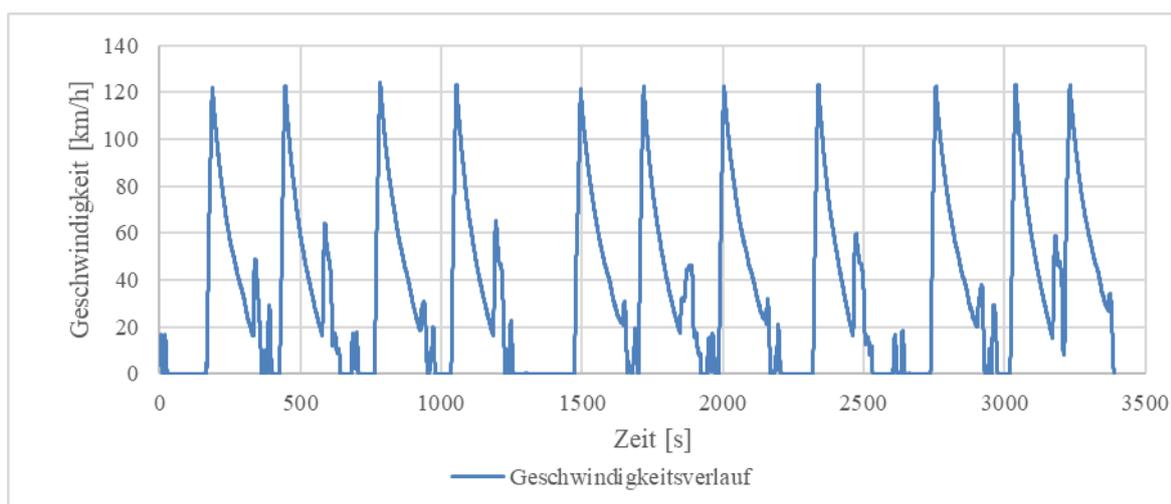


Abbildung 4-6 Beispielhafte Rohdaten der VBOX mehrerer Ausrollversuche hintereinander

### 4.3 Untersuchte Fahrzeugkonfigurationen

Insgesamt wurden mit 16 verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen Ausrollversuche durchgeführt. Folgende Tabelle 4-2 zeigt die Unterschiede. Die Abkürzung WR steht für Winterreifen und SR für Sommerreifen. Bei **allen** Fahrten, außer den Druckeinflussmessungen, wurde immer mit Sommerreifen und Standarddruck gefahren. Die Bezeichnung „Standardkonfiguration“ bei Fahrt Nummer 4 bedeutet, dass mit Sommerreifen und normalem Druck und ohne jegliche Aufbauten oder anderen Einflüssen gefahren wurde. Auf diese Fahrt wird in späteren Abschnitten referenziert.

Tabelle 4-2 Fahrzeugkonfigurationen

NR.	Variation/Benennung	Einflussart	Zusatzbeladung	Straßenzustand/ Wetter
1	WR Standarddruck	Druckeinfluss Winterreifen	120 kg	trocken
2	WR hoher Druck			
3	WR niedriger Druck			
4	Standardkonfiguration	Druckeinfluss Sommerreifen	-	
5	SR hoher Druck			
6	SR niedriger Druck			
7	Dachbox	Einfluss von Aufbauten	120 kg inkl. Dachbox	
8	Fahrradträger		120 kg inkl. Träger+Fahrräder	
9	Anhänger		120 kg Fahrzeug + 100 kg Anhänger	
10	PEMS im Kofferraum		-	
11	PEMS auf Anhängerkupplung			
12	Ohne Beladung	Einfluss Gewicht	-	
13	Nasse Fahrbahn	Einfluss Nässe	120 kg	nass
14	Regen			
15	Standardkonfiguration	Einfluss Wind	120 kg inkl. Träger+Fahrräder	windig
16	Fahrradträger			

Werden in den folgenden Abschnitten die Begriffe „Standarddruck, hoher Druck und niedriger Druck“ verwendet, ist von folgenden Drücken auszugehen:

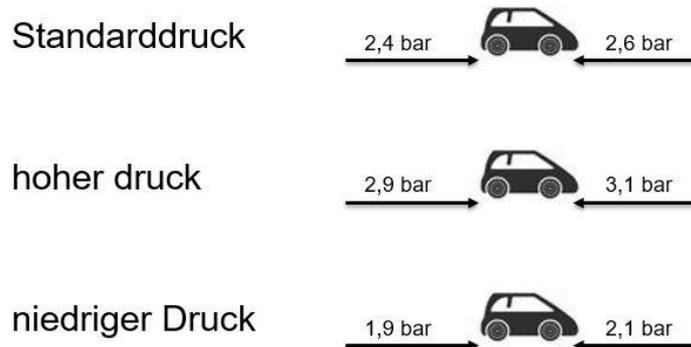


Abbildung 4-7 Druckkonfigurationen

Bei RDE-Fahrten ist immer das PEMS im Kofferraum bzw. auf der Anhängerkupplung montiert. Da die Fahrwiderstände für zukünftige RDE-Simulationen ermittelt werden, wurde bei allen Ausrollversuchen ohne PEMS (Alle außer Nummer 10 und 11) eine Zusatzbeladung von 120 kg, welche dem Gewicht des PEMS mit allen dazugehörigen Geräten entspricht, gewählt. Eine Ausnahme bildet Versuch Nr. 12, welcher gezielt mit weniger Beladung durchgeführt wurde. In Abbildung 4-8 sind die Abgasleitungen vom Auspuffende zum PEMS nicht angeschlossen, da es um den Einfluss des geöffneten Kofferraumdeckels sowie der montierten Rohre auf den Luftwiderstand geht.



Abbildung 4-8 PEMS im Kofferraum

Abbildung 4-9 zeigt die zweite Möglichkeit, das PEMS am Fahrzeug zu montieren (Nr. 11). Hierbei wird eine Grundplatte an der Anhängerkupplung montiert, an welche das PEMS angeschraubt wird. Der Kofferraum ist wie in Abbildung 4-8 gleich weit offen, da ebenso die Schläuche und Leitungen in den Kofferraum gelangen müssen.



Abbildung 4-9 PEMS auf der Anhängerkupplung

Um den Einfluss des Gewichts auf den Fahrwiderstand zu untersuchen, wurde ein Versuch ohne Beifahrer und Zusatzgewicht durchgeführt. Das Fahrzeug war somit um 220 kg leichter. Vor jedem Versuch wurde vollgetankt, um Schwankungen des Gewichts so gering wie möglich zu halten.

Ein Ausrollversuch mit Fahrradträger und Fahrrädern und zusätzlichem Windeinfluss war ursprünglich nicht geplant, da sich aber der Wind im Laufe des Tages verstärkte, wurden diese Daten als zusätzliche Konfiguration erfasst (Nr. 16). Bei den Wind-Fahrten (Nr. 15 und 16) lag die Windgeschwindigkeit zwischen 20 km/h und 25 km/h.



Abbildung 4-10 Fahrradträger mit zwei Fahrrädern

Abbildung 4-10 zeigt, an welcher Position die Fahrräder am Fahrzeug montiert wurden. Bei dem Anhänger in Abbildung 4-11 handelt es sich um einen handelsüblichen, leichten, geschlossenen Planenanhängler, welcher beim Fachmarkt OBI für einen Tag gemietet wurde. Dieser Anhänger wurde zusätzlich mit 100 kg beladen.



Abbildung 4-11 Konfiguration „Anhänger“

Die Dachbox in Abbildung 4-12 wurde leer und zentral am Fahrzeugdach montiert.



Abbildung 4-12 Dachbox

#### 4.4 Datenaufbereitung und Auswertung der Ausrollversuche

Im Zuge der Masterarbeit wurde auf Basis einer vorhandenen Vorlage des IVT zur Auswertung von Ausrollversuchen in Excel ein Tool erstellt, um die Fahrwiderstände mit allen Korrekturen möglichst einfach zu ermitteln. Dazu müssen folgende Daten bekannt sein:

- Fahrzeugmasse, Fahrzeugleermasse, äquivalente Masse der Räder aufgeteilt in angetriebene und nicht angetriebene Räder



Abbildung 4-13 Fahrzeugmassenmessung mit Wiegezellen

Die Fahrzeugmasse wurde mit den in Abbildung 4-13 ersichtlichen Wiegezellen

ermittelt. Die äquivalente Masse der Räder entspricht bei PKW 3 % der Fahrzeugmasse. [5]

- Der Winkel zwischen Verlauf der Ausrollstrecke und Norden ist für die Windkorrektur notwendig. Dieser wurde anhand der GPS-Daten der VBOX ermittelt.
- Die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung) müssen mit der Wetterstation aufgezeichnet werden.
- Sekündliche Auflösung des Geschwindigkeitsverlaufes beim Ausrollen, sekundliche Auflösung der Steigung der Strecke

#### 4.4.1 Aufbereitung der VBOX-Daten

Für jede Fahrzeugkonfiguration gibt es einen Verlauf der Ausrollversuche wie in Abbildung 4-6 dargestellt. Diese Daten (Zeit, Geschwindigkeit und GPS-Daten) müssen von 5 Hz auf 1 Hz umgerechnet werden und in einzelne Ausrollversuche aufgeteilt werden. Somit entstehen 5 einzelne Ausrollverläufe in Ost-Richtung und 5 Weitere in West-Richtung.

Da der Streckenverlauf natürlich nicht zu 100 % eben ist und in Summe auf ca. 2.6 km Länge einen Höhenunterschied von ungefähr 6 m aufweist, wurde ein Steigungskennfeld für eine sekundliche Steigungskorrektur der Ausrollversuche erstellt.

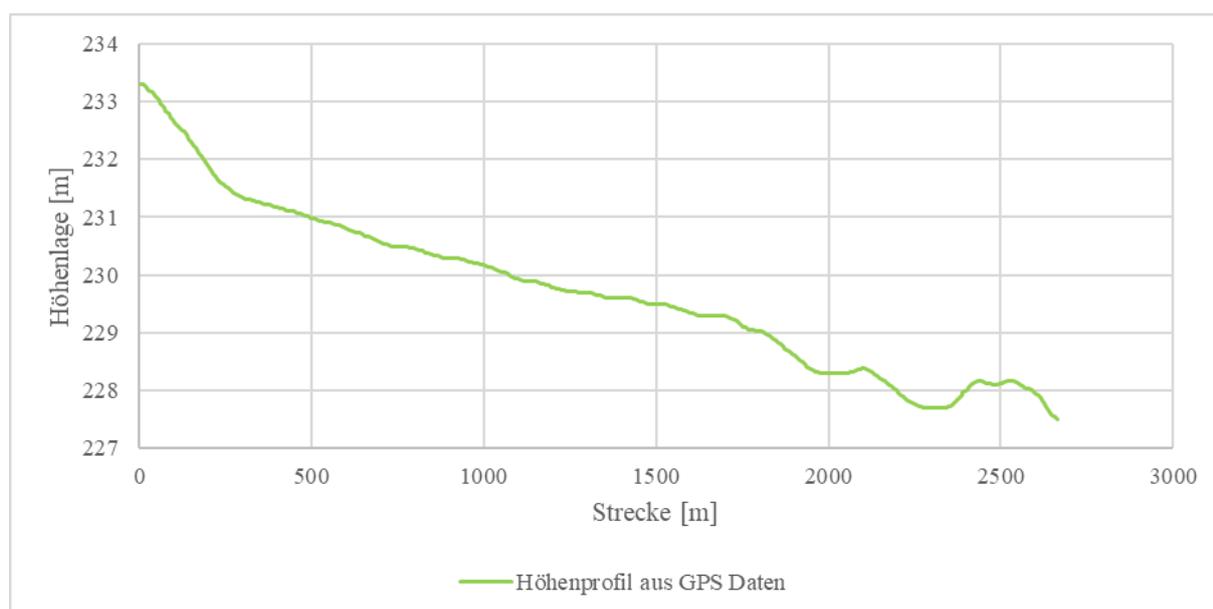


Abbildung 4-14 Höhenprofil bei Fahrt von Ost nach West

Dazu erfolgt eine Unterteilung der Strecke von 2,64 km in insgesamt 369 GPS-Punkte. Das entspricht einem Intervall von ca. 7 m. Jedem Punkt ist auch die Höhenlage zugeordnet. Die Distanz und der Höhenunterschied zwischen zwei GPS-Punkten kann mit den Koordinaten einfach ausgerechnet werden. Mittels Division von Höhenunterschied und Distanz erhält man die Steigung zwischen den beiden Punkten. Rechnet man alle 369 Punkte durch, kann man einen Steigungsverlauf wie in Abbildung 4-15 erstellen. Zusätzlich wurde eine Glättung durchgeführt (Mittelwert aus fünf Punkten, zwei vor und zwei nach einem gewählten Punkt). Für die Richtung von West nach Ost muss nur das Vorzeichen der Steigung aller Punkte geändert werden.

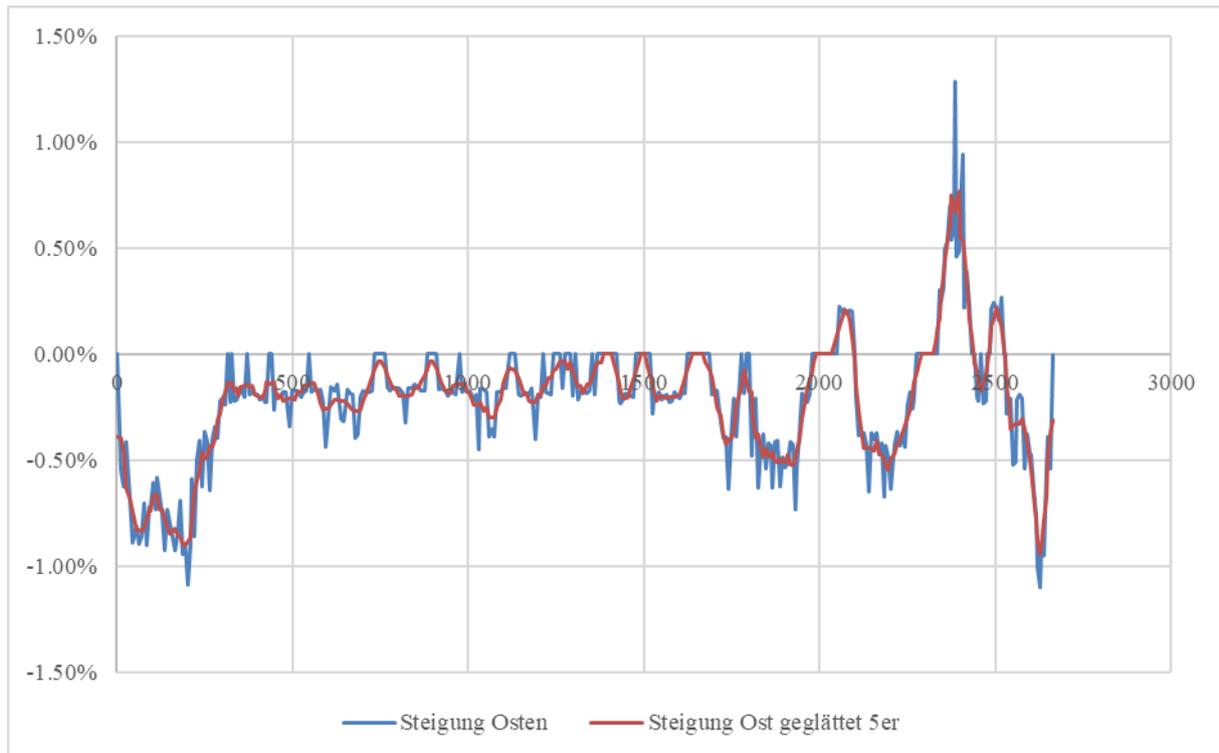


Abbildung 4-15 Steigungsverlauf der Strecke

Man kann nun jedem der 369 GPS Punkte eine Steigung zuordnen und ein Steigungskennfeld erstellen. Da aus den VBOX-Daten zu jedem sekundlichen Schritt die Geschwindigkeit und die GPS-Position bekannt ist, kann auch jedem sekundlichen Schritt des Fahrzeugs zusätzlich die Steigung zugeordnet werden. Dazu wird über eine Interpolation auf das Steigungskennfeld zugegriffen.

Beispiel:

Zufällig gewählter Zeitpunkt des Ausrollversuchs bei:

$$t = 10 \text{ s}$$

$$v = 101,62 \text{ km/h}$$

$$\text{Longitude} = 15,8252851 \text{ [}^\circ\text{]}$$

aus Steigungskennfeld die ähnlichsten Koordinaten suchen:

$$\text{Longitude} = 15,825212 \text{ [}^\circ\text{]} \quad \text{Steigung} = 0,24\%$$

$$\text{Longitude} = 15,8253 \text{ [}^\circ\text{]} \quad \text{Steigung} = 0,16\%$$

Steigung für den gewählten Punkt durch lineare Interpolation ermitteln: **Steigung=0,174 %**

#### 4.4.2 Ermittlung des Fahrwiderstandspolynoms

Geschwindigkeit und Steigung für jede Sekunde des Ausrollversuchs sind nun bekannt, somit kann das Auswertungstool für die Fahrwiderstände und das Fahrwiderstandspolynom angewendet werden. Es werden jeweils 5 Fahrten in Ost- und Westrichtung in das Auswertungstool eingelesen. Automatisch werden die Beschleunigung  $a$ , der Gesamtfahrwiderstand  $F_{w\_ges}$  und der Steigungswiderstand  $F_{w\_Stg}$ , welche das Fahrzeug erfährt, für jeden sekundlichen Schritt

berechnet. Die Differenz aus Gesamtfahrwiderstand und Steigungswiderstand ergibt den Fahrwiderstand  $F_{w\_Luft\_Roll}$ , welcher sich aus Kombination von Luft- & Rollwiderstand (und inneren Widerständen) zusammensetzt. Die Variable „ $k$ “ steht für die Steigung.

$$F_{w\_ges} = (m_F + m_{rot}) * a \quad (4-1)$$

$$F_{w\_Stg} = m_F * g * k \quad (4-2)$$

$$F_{w\_Luft\_Roll} = F_{w\_ges} - F_{w\_Stg} \quad (4-3)$$

Aus Gleichung (4-3) lässt sich nach der sekundlichen Berechnung eine Punktwolke des Fahrwiderstandes darstellen. Durch diese Punktwolke wird ein Polynom 2. Grades (**das Fahrwiderstandspolynom  $F_{w\_Poly}$** ) gelegt.

$$F_{w\_Poly} = R_0 + R_1 * v + R_2 * v^2 \quad (4-4)$$

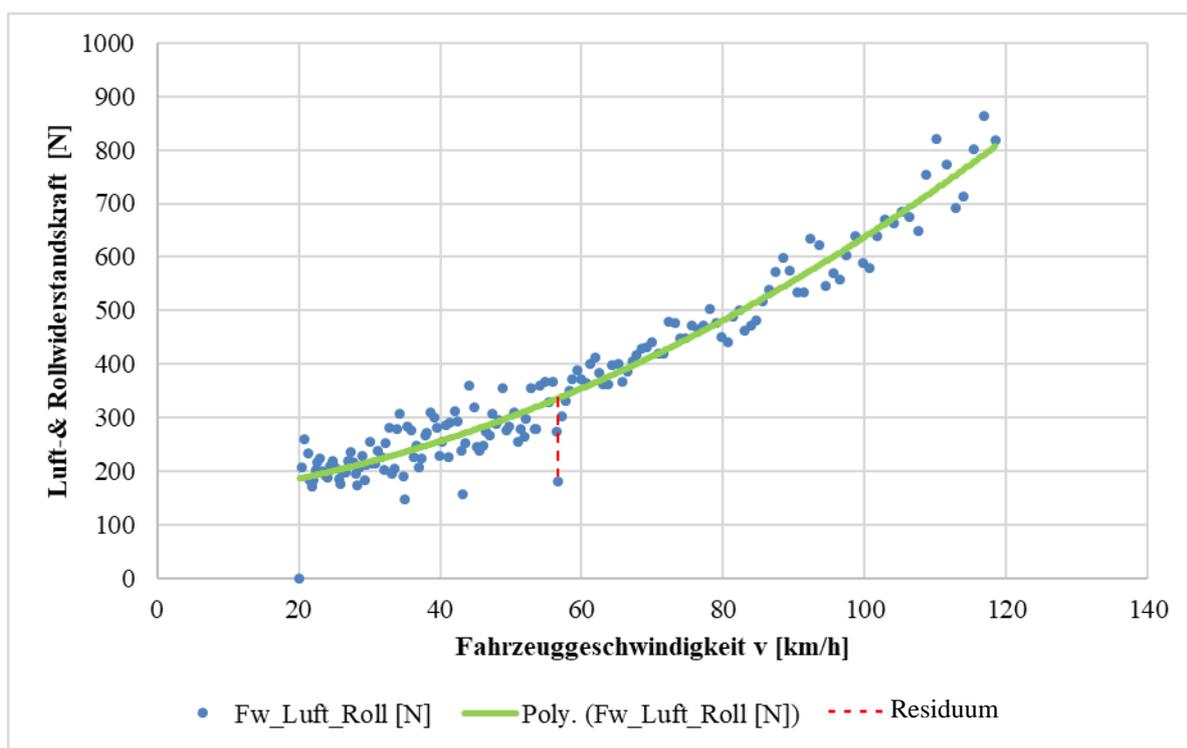


Abbildung 4-16 Schematische Punktwolke und Polynom von  $F_{w\_Luft\_Roll}$

Das Polynom berührt logischerweise nicht jeden Punkt der Punktwolke, sondern bildet eine Art Durchschnittskurve. Nun wird der Abstand eines jeden Punktes zur Kurve (Residuum) quadriert und aufsummiert. Die Residuenquadratsumme wird mittels Excel-Solver so klein wie möglich gehalten, indem die Widerstandsbeiwerte  $R_0$ ,  $R_1$  und  $R_2$  variiert werden. Diese Methode nennt sich „**Regressionsanalyse nach Methode der Mindestquadrate**“. Aus den Beiwerten  $R_0$ ,  $R_1$  und  $R_2$  kann nun auf die Fahrwiderstandsbeiwerte geschlossen werden.

$f_{R0}$  ..... Rollwiderstandsbeiwert [-]

$$f_{R0} = \frac{R_0}{m_F * g} \quad (4-5)$$

$f_{R1}$  ..... Rollwiderstandsbeiwert [-]

$$f_{R1} = \frac{R_1}{m_F * g} \quad (4-6)$$

$c_w$  ..... Luftwiderstandsbeiwert [-]

$$c_w = \frac{2 * R_2}{\rho * A} \quad (4-7)$$

$m_f$  ..... Fahrzeugmasse [kg]

$g$  ..... Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$\rho$  ..... Luftdichte [kg/m<sup>3</sup>]

$A$  ..... Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]

$R_0$  ..... geschwindigkeitsunabhängiger Rollwiderstandskoeffizient [N]

$R_1$  ..... geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandskoeffizient [N/(m/s)]

$R_2$  ..... Luftwiderstandskoeffizient [N/(m/s)<sup>2</sup>]

Laut [3] ist  $R_1$  Null zu setzen, wenn das Fahrzeug ein repräsentatives Fahrzeug einer Fahrwiderstandsmatrix-Familie (Straße) ist. Somit sind nur  $R_0$  und  $R_2$  mit der Regressionsanalyse nach Methode der Mindestquadrate zu berechnen [16]. Die Rollwiderstandsbeiwerte werden von der Fahrzeugmasse befreit, um spätere Simulationen mit anderen Testmassen zu ermöglichen.

Es ist notwendigerweise zu kontrollieren, ob etwaige „Ausreißer“ oder „Besonderheiten“ bei den insgesamt zehn Ausrollversuchen vorliegen. Weicht eine Fahrt stark von den anderen ab, wird diese nicht in die Berechnung miteinbezogen. Abbildung 4-17 zeigt beispielhaft fünf Ausrollversuche in Ost-Richtung. Die erste Ost-Fahrt (Ost\_1) weist einen deutlichen Unterschied zu den anderen Kurven auf und sollte somit nicht in die Berechnung einfließen. Die Ursache für diese Abweichung kann nicht mit hundertprozentiger Sicherheit bestimmt werden. Möglich ist, dass bei dieser Fahrt überdurchschnittlich viel Gegenverkehr und somit auch lokal mehr Gegenwind vorhanden war. Um eine zusätzliche Kontrolle durchzuführen, macht es Sinn, die Fahrwiderstandspunktwolken der verschiedenen Fahrten zu vergleichen. Dies wird in Abbildung 4-18 dargestellt.

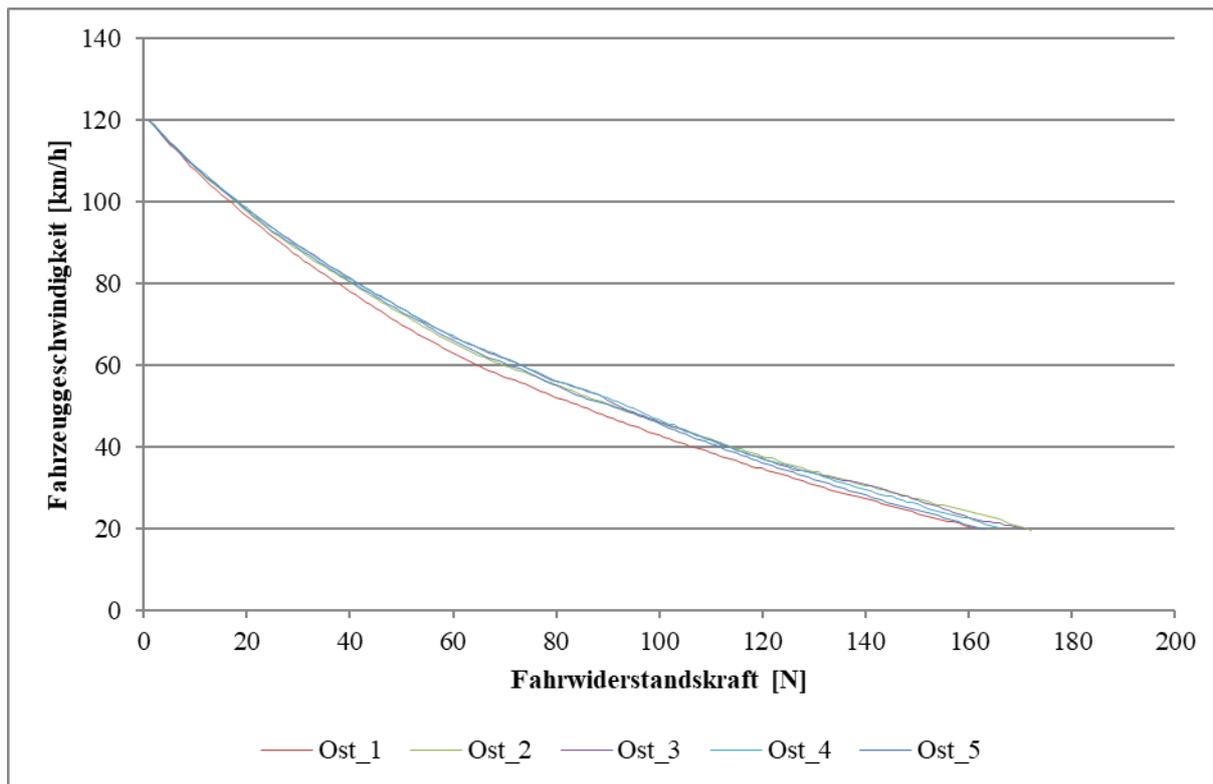


Abbildung 4-17 Darstellung „Ausreißer“

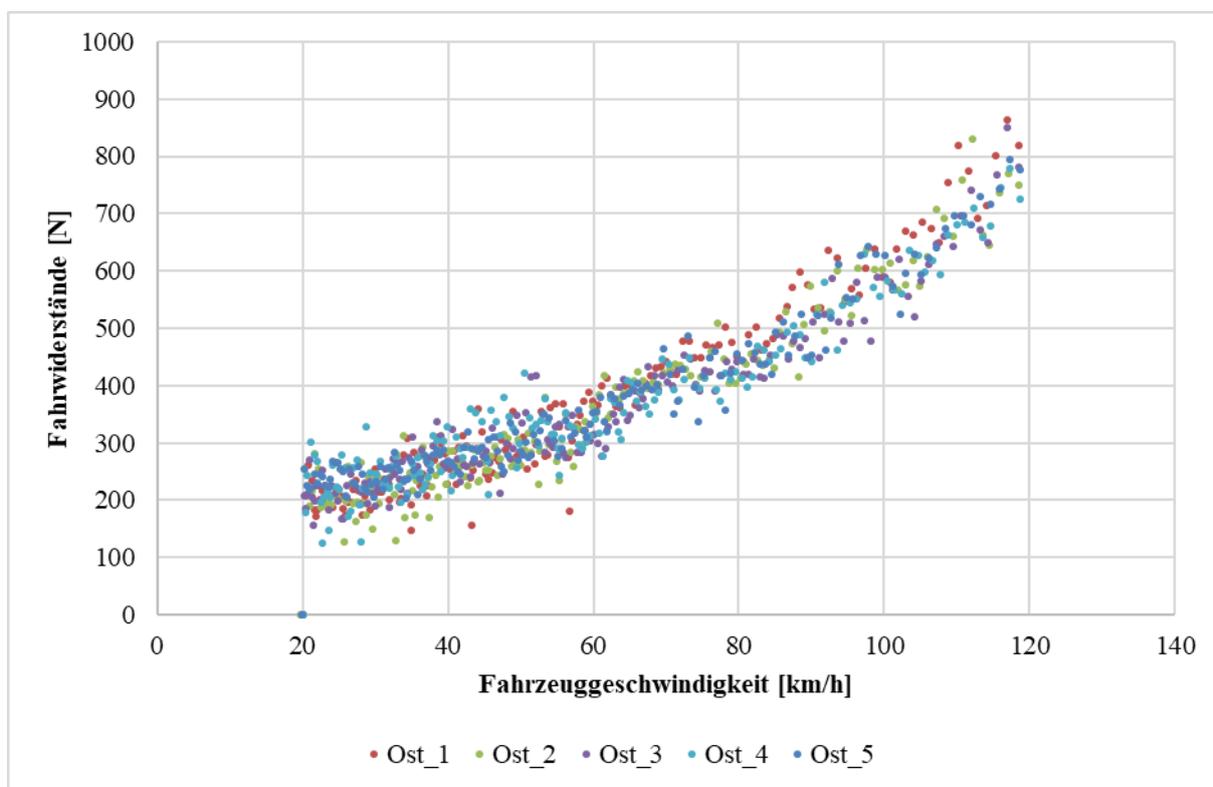


Abbildung 4-18 Punktelwolken der Fahrten

Da  $R_0$  und  $R_2$  iterativ bestimmt werden, kann nicht mit voller Sicherheit gesagt werden, dass in  $R_2$  nur der Anteil des Luftwiderstandes  $R_{aero}$  steckt. Es kann auch ein kleiner Teil des

Rollwiderstandes  $R_{\text{Roll}}$  enthalten sein. Es wird daher der Anteil des Luft- bzw. des Rollwiderstandes am Gesamtfahrwiderstand  $R_{\text{ges}}$  mittels Verhältnisangaben (basierend auf NEDC-Gesetz) berechnet. Es wird der Anteil des Rollwiderstandes am Gesamtwiderstand aus der Fahrzeugmasse berechnet, daraus kann anschließend der Anteil des Luftwiderstandes am Gesamtwiderstand berechnet werden. [10]

$$\frac{R_{\text{Roll}}}{R_{\text{ges}}} = a_{\text{ausroll}} + m_{\text{F}} + b_{\text{ausroll}} \quad (4-8)$$

$$\frac{R_{\text{Aero}}}{R_{\text{ges}}} = a_{\text{ausroll}} + m_{\text{F}} + b_{\text{ausroll}} \quad (4-9)$$

$a_{\text{ausroll}}$  und  $b_{\text{ausroll}}$  sind Koeffizienten aus dem NEDC Gesetz. Diese Koeffizienten sind geschwindigkeitsabhängig. In der Tabelle 4-3 sind die Werte der Koeffizienten bei verschiedenen Geschwindigkeiten und die Verhältnisse bei bestimmter Fahrzeugmasse ersichtlich.

Tabelle 4-3 Koeffizienten und Widerstandsverhältnisse bei bestimmter Fahrzeugmasse

m_Fzg [kg]	v [m/s]	$R_{\text{aero}}/R_{\text{ges}}$	$R_{\text{roll}}/R_{\text{ges}}$	$a_{\text{ausroll}}$	$b_{\text{ausroll}}$
1905	20 km/h	0,042	0,958	7,24E-05	0,82
	40 km/h	0,157	0,843	1,59E-04	0,54
	60 km/h	0,297	0,703	1,96E-04	0,33
	80 km/h	0,418	0,582	1,85E-04	0,23
	100 km/h	0,509	0,491	1,63E-04	0,18
	120 km/h	0,561	0,439	1,57E-04	0,14

Die Verhältnisse werden in weiterer Folge auch bei der Korrektur der Umgebungsbedingungen verwendet. Um der Vorschrift entsprechende Ergebnisse zu erhalten, fehlt noch die Korrektur der Umgebungseinflüsse. Das wird im folgenden Kapitel erläutert.

#### 4.4.3 Umgebungskorrektur des Fahrwiderstandspolynoms

Zunächst erfolgt die Korrektur der Abweichung von der momentanen Umgebungstemperatur und Luftdichte bezüglich den Bezugsbedingungen bzw. Normbedingungen. Diese Normbedingungen entsprechen folgenden Daten:

- Bezugstemperatur  $t_{\text{bez}} = 20^\circ\text{C}$
- Bezugsluftdruck  $p_{\text{bez}} = 1000 \text{ mbar}$
- Relative Bezugsluftfeuchtigkeit  $\phi_{\text{bez}} = 0 \text{ \% rel. Luftfeuchtigkeit}$
- Die Bezugsluftdichte  $\rho_{\text{bez}} = 1.188 \text{ kg/m}^3$  ergibt sich aus exakter Luftdichteberechnung mit feuchter Luft.

Diese Korrektur findet in 20 km/h Schritten und nach Formel (4-10) statt.

$$k_u = \frac{R_{\text{Roll}}}{R_{\text{ges}}} * (1 + 0,00864 * (t_{\text{mess}} - t_{\text{bez}})) + \frac{R_{\text{Aero}}}{R_{\text{ges}}} * \frac{\rho_{\text{bez}}}{\rho_{\text{mess}}} \quad (4-10)$$

Passend zur Tabelle 4-3 werden die Korrekturfaktoren beispielhafter Messbedingungen in Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-4 Beispielhafte Messbedingungen

Messung/ Berechn.	Einheit	Bezugsbed.	Messbed.
t	[°C]	20	14
T	[°K]	293.15	287.15
p <sub>Luft</sub>	[mbar]	1000	990.3
ρ <sub>Luft</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	1.188	1.196
φ	[%]	0	41.9
v <sub>w</sub>	[km/h]	0	2.8
Windrtg.	[°]	0	34.6

Tabelle 4-5 Korrekturfaktoren für die Messbedingungen

Geschwindigkeit [km/h]	Korrekturfaktor k <sub>u</sub>
20	0.950
40	0.955
60	0.961
80	0.967
100	0.971
120	0.973

#### 4.4.4 Windkorrektur des Fahrwiderstandspolynoms

Herrscht bei einem Ausrollversuch ein Umgebungswind, werden die Ergebnisse dadurch beeinflusst und müssen daher korrigiert werden. Diese Korrektur findet auf Basis eines Papers von Steve Windsor mit dem Titel „Real World Drag Coefficient – Is It Wind Averaged Drag?“ [11] statt. Ein Fahrzeug hat das Minimum des cw-Wertes bei 0 ° resultierendem Windwinkel. Selbst bei nur kleinen Winkeln, von z.B. 5 °, kann der cw-Wert um bis zu 10 % steigen. Da Fahrzeuggeschwindigkeit, Windgeschwindigkeit und Windrichtung bekannt sind, kann der resultierende Winkel nach Formel (4-11) berechnet werden. [11]

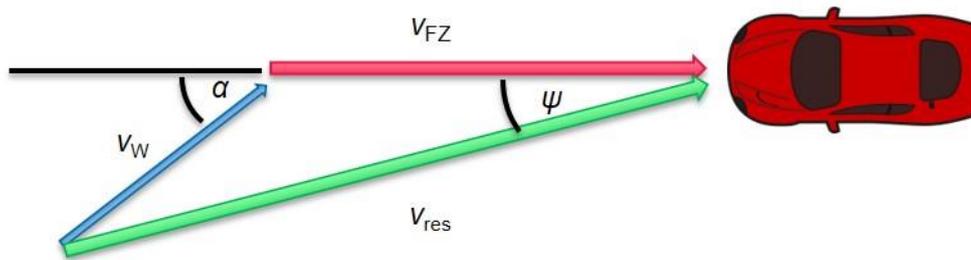
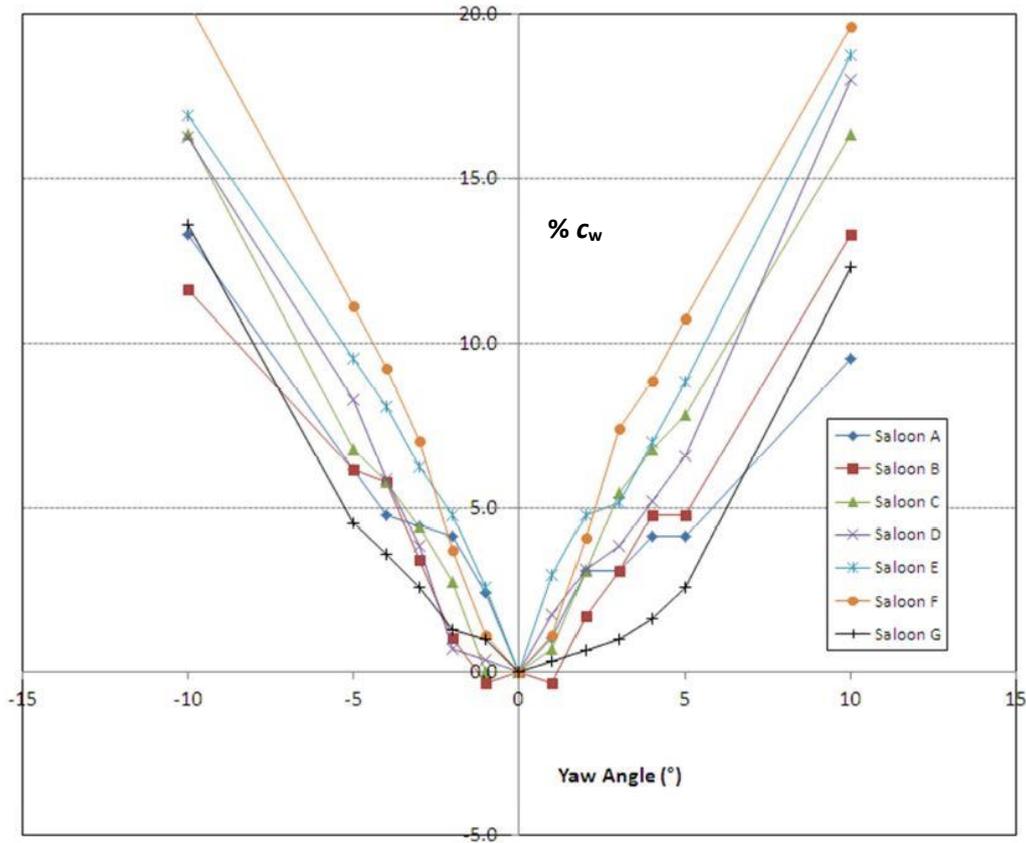


Abbildung 4-19 Resultierende Windwinkel  $\psi$

$$\psi = \arctan \frac{v_w * \sin(\alpha)}{v_{FZ} + v_w * \cos(\alpha)} \quad (4-11)$$

$\psi$	.....	Resultierender Fahrtwindwinkel [°]
$\alpha$	.....	Windwinkel des Umgebungswindes [°]
$v_w$	.....	Windgeschwindigkeit [km/h]
$v_{FZ}$	.....	Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]
$v_{res}$	.....	Resultierende Fahrtwindgeschwindigkeit [km/h]

Anschließend wurde aus Abbildung 4-20 eine Durchschnittskurve in Excel abgebildet, auf welche bei verschiedenen resultierenden Winkeln zugegriffen wird um die dazugehörige prozentuelle Abweichung des  $c_w$ -Wertes zu erhalten. Der Fahrwiderstandsbeiwert  $R_2$  beim Fahrwiderstandspolynom wird also um den % $c_w$ -Faktor minimiert, da der tatsächliche Luftwiderstand ohne Umgebungswind kleiner sein muss als mit.

Abbildung 4-20  $c_w$  – Erhöhung bei resultierendem Winkel [11]

Die „Saloon“ Kurven in dem Diagramm beschreiben verschiedene Fahrzeugkategorien, welche allerdings nicht veröffentlicht wurden. Die Ermittlung der  $\%c_w$ -Werte erfolgt wie bei der Umgebungskorrektur in 20 km/h Schritten. Dies wird für das gleiche Beispiel wie bei den anderen Korrekturen in Tabelle 4-6 gezeigt.

Tabelle 4-6 Steigerung des  $c_w$ -Wertes in Prozent in Abhängigkeit des Anströmwinkels

$\psi$ [°]	$v$ [km/h]	$c_w$ [%]
5.28	20	7.92
2.77	40	4.15
1.87	60	2.81
1.42	80	2.13
1.14	100	1.71
0.95	120	1.43

#### 4.4.5 Zusammenfassung der Korrekturen

Da alle Korrekturen ermittelt sind, wird das Fahrwiderstandspolynom in 20 km/h Schritten neu berechnet und die Fahrwiderstandsbeiwerte  $R_0$  und  $R_2$  werden wieder mit der „Regressionsanalyse nach Methode der Mindestquadrate“ neu iteriert.

Tabelle 4-7 Beispiel mit allen Korrekturen in einem Ausrollversuch

v [km/h]	$F_{W\_Poly}$ ohne Korr. [N]	$F_{W\_Poly}$ mit WK [N]	$F_{W\_Poly}$ mit WK & UK [N]	$F_{W\_Poly}$ neu iteriert [N]
20	214.5	213.4	202.7	201.9
40	261.0	258.6	247.0	247.1
60	338.6	334.7	321.8	322.0
80	447.1	441.9	427.3	427.0
100	586.6	580.1	563.2	563.2
120	757.1	749.3	729.2	728.8

Die Spalte „FW ohne Korr.“ zeigt das Fahrwiderstandspolynom ohne jegliche Korrektur. Diese Werte stammen aus den sekundlichen Daten des Fahrwiderstandspolynoms. Von Spalte 2 auf 3 wird die Windkorrektur durchgeführt und anschließend in Spalte 4 zusätzlich die Umgebungskorrektur. Durch diese Werte des Fahrwiderstandspolynoms wird wieder eine gemittelte Kurve gelegt und wie zuvor erwähnt, mit der Regressionsanalyse neu iteriert. Somit erhält man neue Werte für  $R_0$  und  $R_2$ . Zieht man einen Vergleich der Widerstandswerte von vor und nach den Korrekturen, ist erkennbar, dass die Ergebnisse ohne Korrekturen deutlich verfälscht wären.

Vor der Korrektur

$$R_0 = 189,5 \quad \text{N}$$

$$R_2 = 0,510 \quad \text{N/(m}^2/\text{s}^2)$$

Nach der Korrektur

$$R_0 = 177,7 \quad \text{N}$$

$$R_2 = 0,495 \quad \text{N/(m}^2/\text{s}^2)$$

Umgerechnet auf  $f_{r0}$  und  $c_w$ :

$$f_{r0} = 0,01014$$

$$c_w = 0,347$$

$$f_{r0} = 0,00951$$

$$c_w = 0,337$$

Die gesamte Datenaufbereitung (Kapitel 4.4) wird für jede Fahrzeugkonfiguration durchgeführt. In den folgenden Kapiteln werden die Widerstandsbeiwerte verglichen und die wesentlichen Unterschiede der Ausrollversuche erklärt.

## 4.5 Vergleich und Analyse der Ergebnisse der Fahrzeugkonfigurationen

Tabelle 4-8 Übersicht Widerstandsbeiwerte

Konfiguration	$R_0$ [-]	$R_2$ [-]	$F_{W\_Poly}$ bei 120 km/h [N]
WR Standarddruck	195.6	0.502	753.2
WR hoher Druck	177.8	0.501	734.0

Konfiguration	$R_0$ [-]	$R_2$ [-]	$F_{w\_Poly}$ bei 120 km/h [N]
WR niedriger Druck	208.3	0.534	802.1
Standardkonfiguration	174.9	0.453	678.7
SR hoher Druck	168.8	0.451	670.4
SR niedriger Druck	181.4	0.498	734.2
Dachbox	184.2	0.578	826.6
Fahrradträger	179.4	0.737	998.0
Anhänger	187.0	0.917	1205.9
Fahrradträger mit Wind	189.6	0.821	1101.8
Standardkonfiguration mit Wind	179.9	0.525	763.7
Nasse Fahrbahn	216.9	0.507	780.3
Regen	217.9	0.530	806.1
Ohne Beladung	148.9	0.483	685.7
PEMS auf Anhängerkupplung	176.0	0.496	726.6
PEMS im Kofferraum	177.7	0.495	728.1

In Tabelle 4-8 ist eine Übersicht der errechneten Widerstandsbeiwerte aller Konfigurationen zu sehen. Im Anschluss werden die Kurven der Fahrwiderstandspolynome in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt und miteinander verglichen. Diese Kurven stellen somit die Widerstandsbeiwerte  $R_0$  und  $R_2$  dar.  $R_0$  ist in den Kurven bei einer Geschwindigkeit von 0 km/h erkennbar und  $R_2$  gibt die Krümmung vor. Alle Polynome in einem Diagramm darzustellen, wäre zu unübersichtlich, daher findet eine „Kategorisierung“ statt. Es werden alle Kategorien auf die Standardkonfiguration (Sommerreifen und normaler Reifendruck) referenziert, um einen besseren Überblick zu gewähren. Gelegentlich treten bei manchen Verläufen Unregelmäßigkeiten auf. Die Begründungen dazu sind nur Annahmen und können nicht mit hundertprozentiger Sicherheit getroffen werden.

In Abbildung 4-21 ist zu erkennen, dass jede Winterreifenkonfiguration höhere Fahrwiderstände als die Standardkonfiguration aufweist. Besonders ist allerdings, dass die Fahrt mit hohem Reifendruck einen steileren Verlauf besitzt. Sie ist nicht nahezu parallel verschoben, sondern weist einen stärkeren Anstieg auf. Das kann an verschiedenen Ursachen liegen. Die Kurve fällt im mittleren Bereich stärker ab, also könnte es möglich sein, dass in diesem Bereich mehr Gegenverkehr oder größere Fahrzeuge wie z.B LKW's im Gegenverkehr unterwegs waren. Auch lokale Windböen könnten einen Einfluss haben. Weiters ist es auch möglich, dass sich das Reifenprofil durch den hohen Druck anders verhält. Grundsätzlich ist jedoch zu sagen, dass Winterreifen eindeutig höhere Fahrwiderstände aufweisen als Sommerreifen. Außerdem ist zu erwähnen, dass mit steigendem Reifendruck die Fahrwiderstandskraft sinkt.

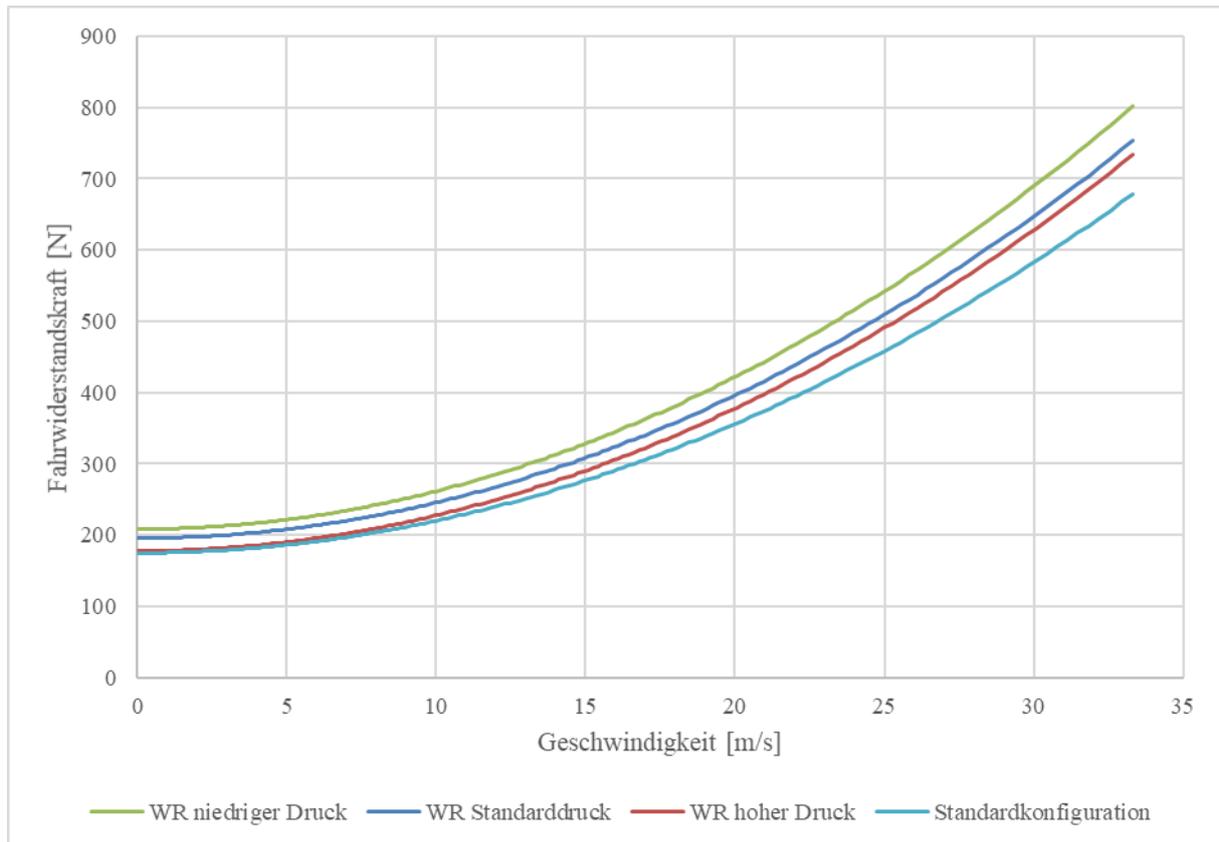


Abbildung 4-21 Druckeinfluss Winterreifen

Der Einfluss des Reifendrucks auf Sommerreifen wird in Abbildung 4-22 gezeigt. Normaler und hoher Reifendruck weisen keine großen Unterschiede auf. Ähnlich wie beim Winterreifen hat der Sommerreifen mit niedrigem Druck einen steileren Verlauf als der Sommerreifen mit normalem Druck. Allerdings ist dieser Effekt beim Sommerreifen stärker ausgeprägt als beim Winterreifen. Im Prinzip können ähnliche Einflussarten wie beim Winterreifen der Auslöser sein. Die Ergebnisse waren so zu erwarten, dass der hohe Reifendruck weniger Fahrwiderstände verursacht und der niedrige Reifendruck höhere Fahrwiderstände verursacht.

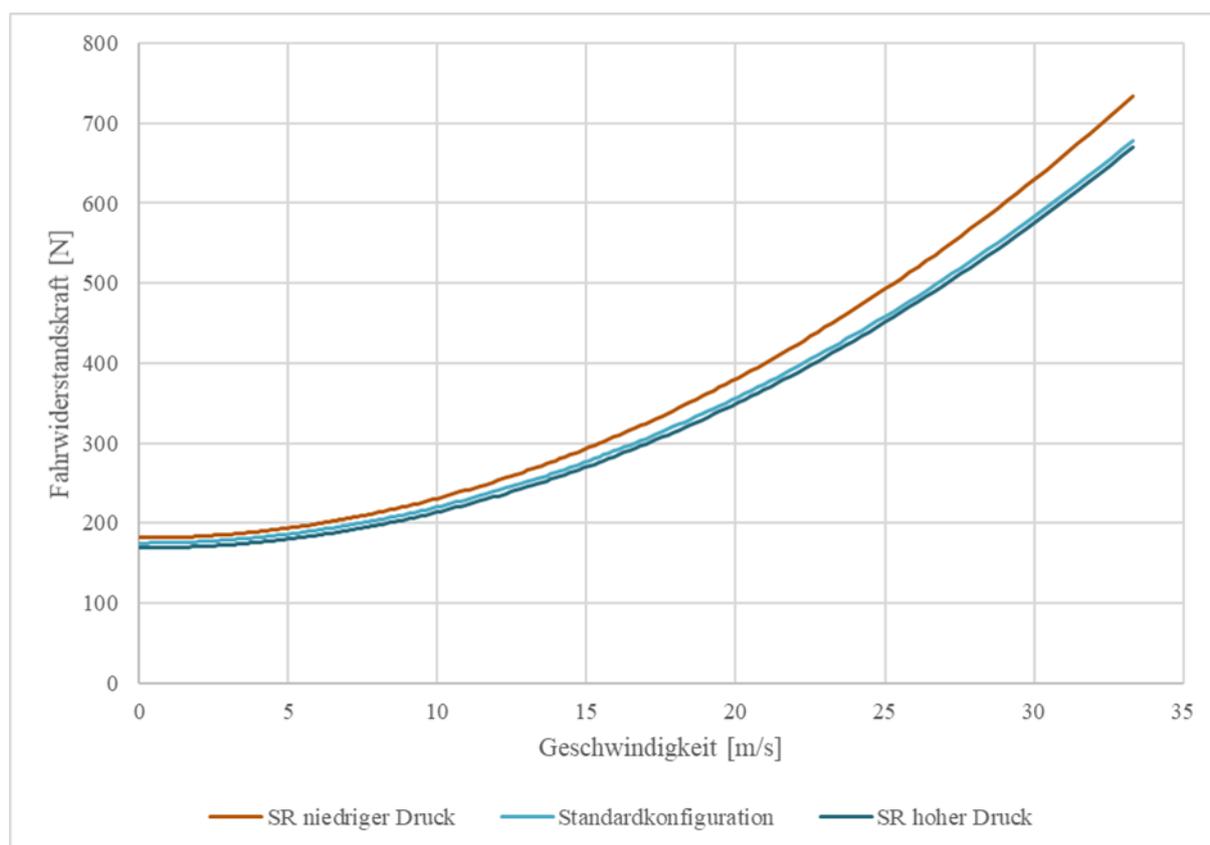


Abbildung 4-22 Druckeinfluss Sommerreifen

Einen deutlichen Unterschied macht die Fahrbahnbeschaffenheit bezüglich des Wetters aus. Abbildung 4-23 verdeutlicht die erhöhten Fahrwiderstände, wenn die Fahrbahn nass ist, bzw. wenn es regnet. Regen verursacht nicht nur eine höhere Rollreibung, vor allem im höheren Geschwindigkeitsbereich sind Steigerungen des Widerstandes eindeutig erkennbar. Das lässt sich vermutlich auf die Aufprallenergie der Tropfen auf das Fahrzeug zurückführen.

Vergleicht man die Standardkonfiguration mit der Konfiguration „ohne Beladung“ ist ein deutlich niedrigerer Rollwiderstand zu erkennen. Da bei hohen Geschwindigkeiten der – von der Masse wenig beeinflusste – Rollwiderstand dominiert, geht der Unterschied zur Standardkonfiguration mit steigender Geschwindigkeit stark zurück. Die Messdaten zeigen für das wenig beladene Fahrzeug einen etwas höheren Luftwiderstand als für die Standardkonfiguration, so dass der Gesamtwiderstand ab ca. 30m/s bei wenig Beladung höher als bei Standardkonfiguration wird. Abgesehen von Messunsicherheiten könnte die Ursache für den Unterschied im Luftwiderstand in der etwas geringeren Bodenfreiheit bei höherer Beladung liegen, was den  $C_w \cdot A$  Wert tendenziell senkt.

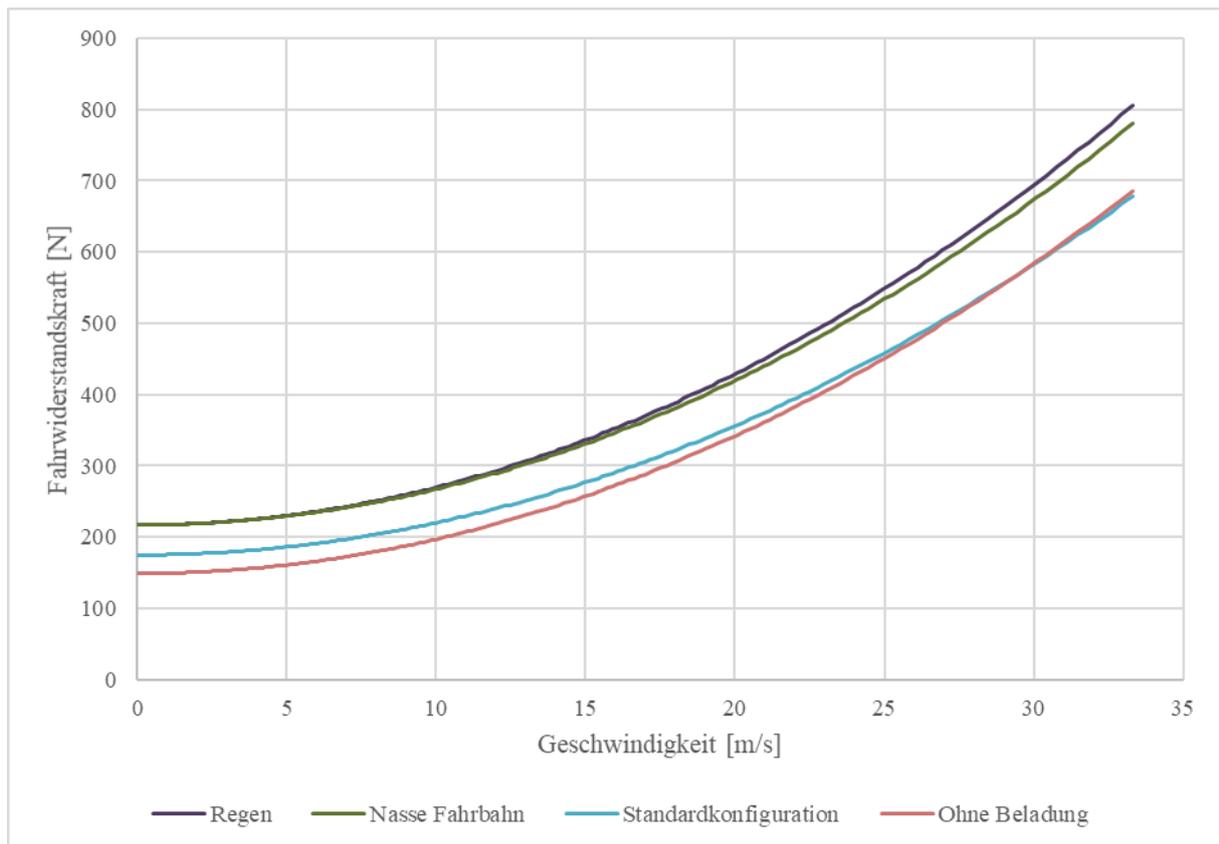


Abbildung 4-23 Einfluss Nässe und Beladung

Wie weiter oben erwähnt, wurden zur Analyse des Windeinflusses zwei Konfigurationen gemessen. Zum einen die Standardkonfiguration und zum anderen eine Fahrt mit Fahrradträger und zwei Fahrrädern am Dach. Die Rollreibung (ersichtlich bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten) ist bei allen vier Kurven nahezu ident. Je höher die Fahrgeschwindigkeit und somit auch der Luftwiderstand wird, desto mehr driften die Kurven auseinander. Bei beiden Fahrten herrschte ungefähr der gleiche Seitenwind mit ca 22 km/h. Es ist zu sehen, dass die Steigerung durch den Seitenwind kaum mit der Fahrzeugkonfiguration zusammenhängt, da bei beiden Arten eine ungefähr gleich große Steigerung zu sehen ist. (Durch die blauen Doppelpfeile verdeutlicht)

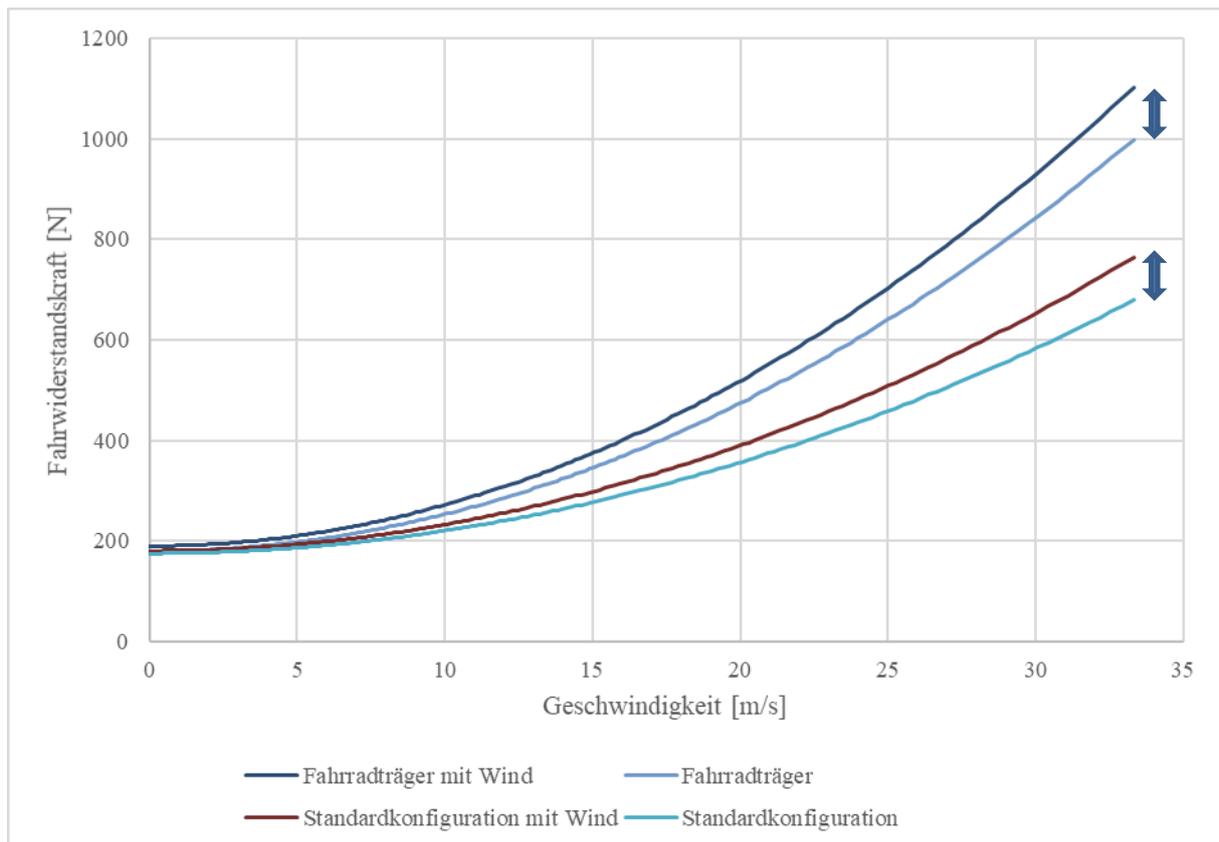


Abbildung 4-24 Windeinfluss

Da das PEMS entweder auf der Anhängerkupplung oder im Kofferraum aufgebaut werden kann, galt es die Unterschiede auf den Fahrwiderstand zu ermitteln. In Abbildung 4-25 ist ersichtlich, dass nahezu kein Unterschied zwischen den beiden Arten herrscht. Das liegt vermutlich daran, dass der Kofferraum bei beiden Aufbauarten gleich weit offen ist und das den Haupteinfluss ausmacht. Ist das PEMS auf der Anhängerkupplung montiert, steht es optimal im Windschatten des Fahrzeuges und hat keinen weiteren Einfluss auf den Fahrwiderstand.

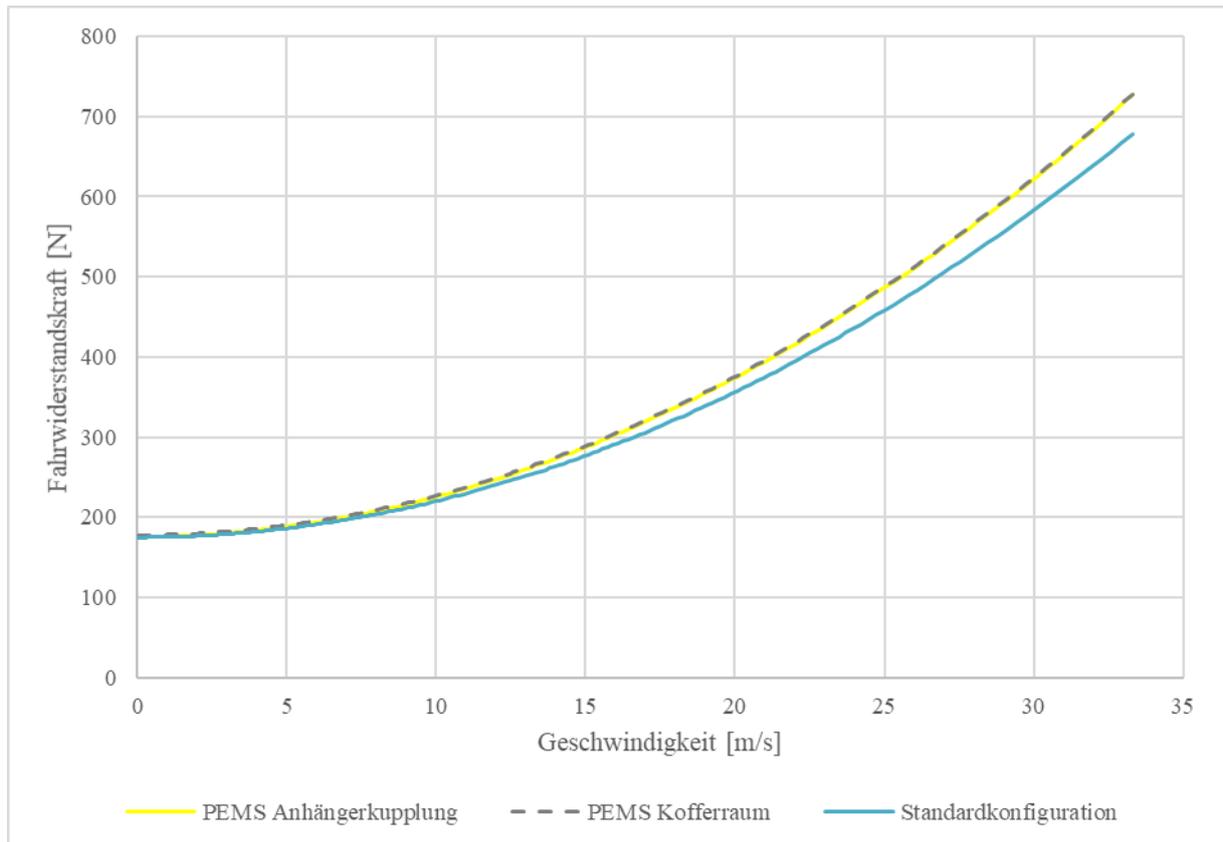


Abbildung 4-25 Einfluss des PEMS

Im nächsten Diagramm werden die Einflüsse der verschiedenen Fahrzeugaufbauten miteinander verglichen. Die Unterschiede betreffen hauptsächlich den Luftwiderstand. Besonders hervorzuheben ist, dass bei hohen Geschwindigkeiten der Fahrwiderstand bei der Fahrt mit Anhänger nahezu doppelt so groß wie bei der Standardkonfiguration ist.

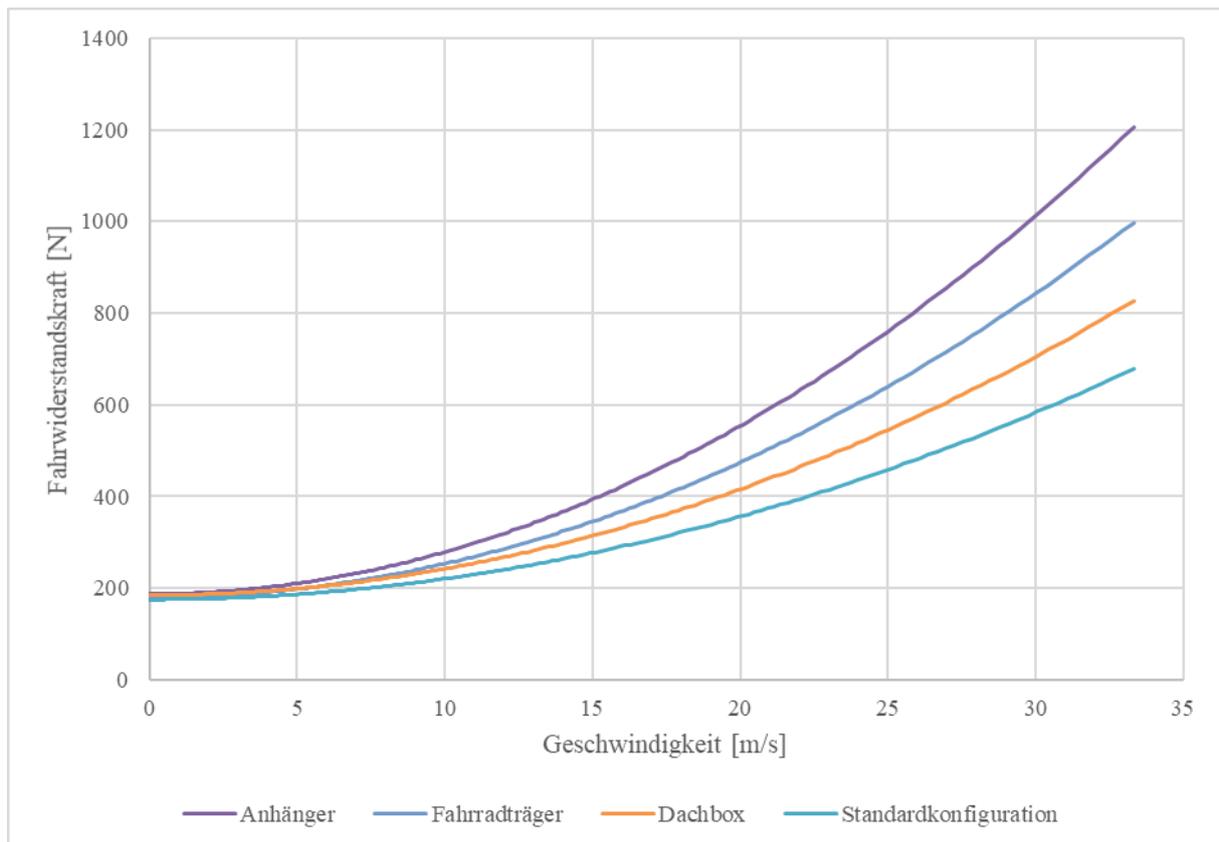


Abbildung 4-26 Einfluss der Aufbauten

Im letzten Diagramm dieses Abschnittes soll nocheinmal kurz auf die Windkorrektur eingegangen werden. Um darzustellen, dass die Windkorrektur sehr genau ist, werden sechs Fahrten zum Vergleich herangezogen. Drei Fahrten betreffen die Standardkonfiguration und die weiteren drei Fahrten den Fahrradträger. Bei den Ausrollversuchen zum Windeinfluss wurde logischerweise keine Windkorrektur in der Datenauswertung angewandt. Führt man jetzt zur Kontrolle die Windkorrektur durch, müssten die Kurven der Fahrten mit Wind deckungsgleich mit den Fahrten ohne Wind sein. In Abbildung 4-27 ist zu sehen, dass dies auch der Fall ist.

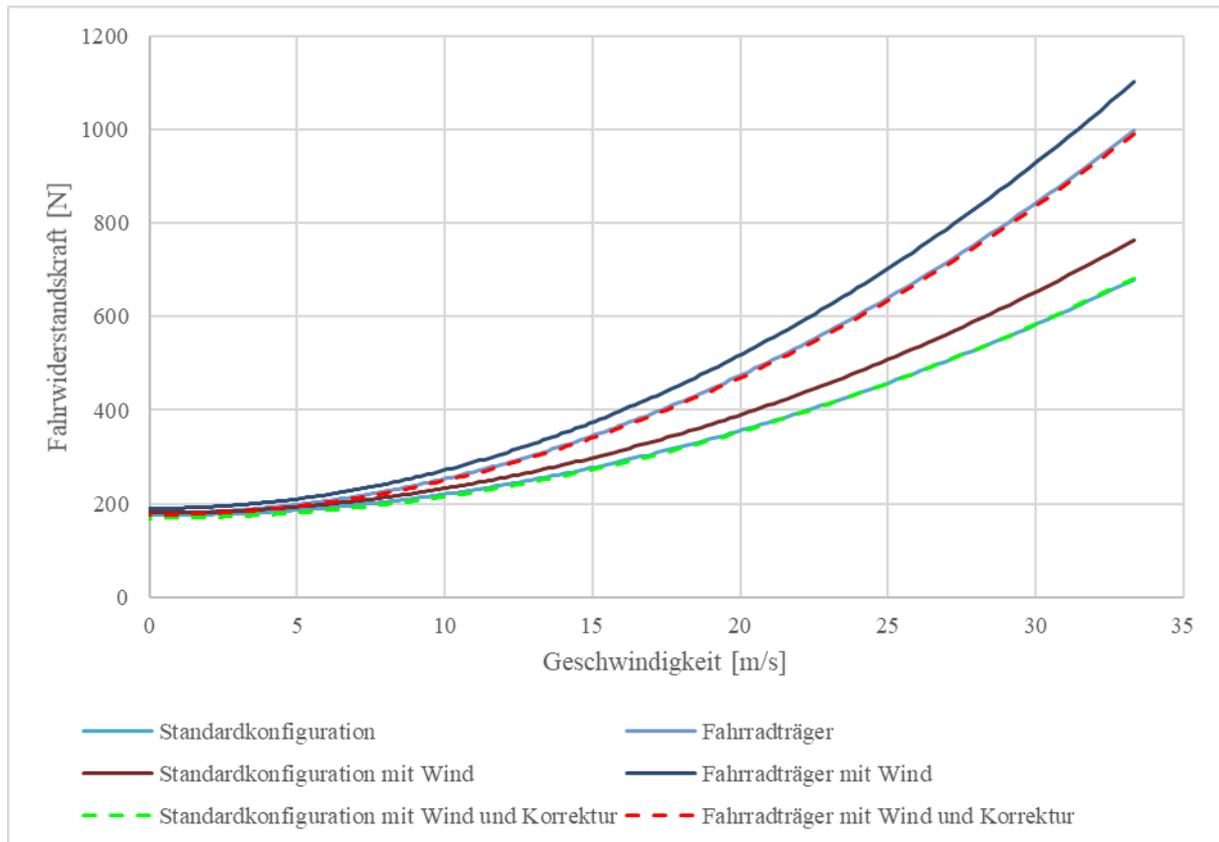


Abbildung 4-27 Kontrolle der Windkorrektur

## 4.6 Umrechnung auf die Radararbeit

Einen interessanten Einblick geben auch die Unterschiede der verschiedenen Konfigurationen bezüglich der positiven Radararbeit. Als Fahrzyklus wurde dazu eine RDE Fahrt herangezogen. Aus den vorhandenen Daten Zeit, Geschwindigkeit und Steigung, konnte man sich sekundlich die Beschleunigung des Fahrzeuges ausrechnen. Anschließend wurde sekundlich die Summe aus dem Fahrwiderstandspolynom mit den Widerstandsbeiwerten  $R_0$  und  $R_2$  und der Widerstandskraft von Steigungs- und Beschleunigungswiderstand berechnet. Ist die Summe davon ein positiver Wert, war das Fahrzeug am Beschleunigen. Ist die Summe negativ, befand sich das Fahrzeug in einem eines Bremsvorgang. Um die positive Radararbeit zu erhalten, wurden alle positiven Werte mit der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Geschwindigkeit multipliziert. In den folgenden Diagrammen ist ein Vergleich der Radararbeiten von den verschiedenen Konfigurationen dargestellt. Um es vergleichbar darzustellen, werden alle Konfigurationen auf die Standardkonfiguration referenziert. Die Ergebnisse sind der Größe nach sortiert und in zwei Diagramme aufgeteilt, da es in Einem zu unübersichtlich wäre.

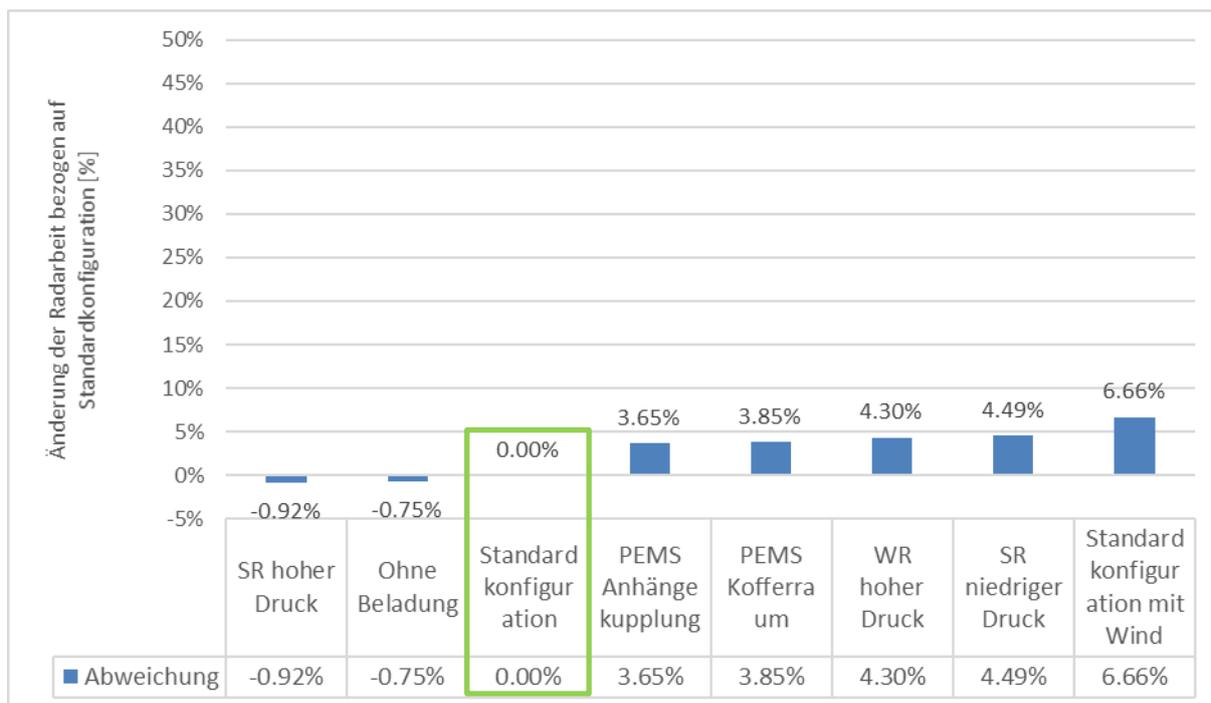


Abbildung 4-28 Einfluss auf die Radararbeit der verschiedenen Konfigurationen Teil 1

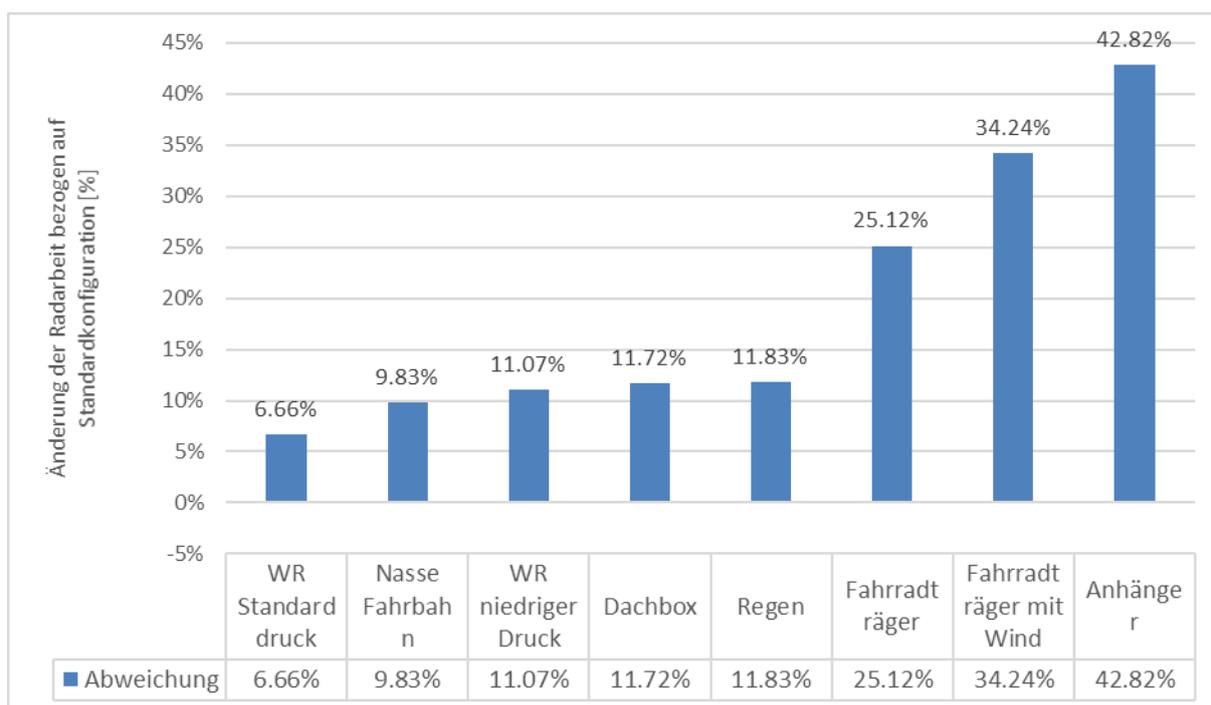


Abbildung 4-29 Einfluss auf die Radararbeit der verschiedenen Konfigurationen Teil 2

### 4.7 Unterschied der Auswertung zur EU Norm

Die in dieser Arbeit angewandte Methode zur Durchführung und Auswertung der Ausrollversuche weicht leicht von der EU Norm 1151 ab.

Eine stationäre Anemometrie (für Windbedingungen) ist nur unter bestimmten

Windgeschwindigkeitsgrenzen zu verwenden. Diese Grenzen wurden teilweise überschritten. Eine On-Board-Anemometrie war allerdings aus Kosten- und Aufwandsgründen nicht möglich.

Laut EU-Norm ist die Ausrollzeit in 10km/h Intervallen zu messen. Die Ausrollzeit ist einer Bezugsgeschwindigkeit zuzuordnen. Es wird somit die Zeit zwischen +5 km/h bis -5 km/h dieser Bezugsgeschwindigkeit gemessen (Bsp.: Bezugsgeschwindigkeit 30 km/h, Ausrollzeit zwischen 35 km/h und 25 km/h messen). Anschließend soll anhand dieser Daten das Fahrwiderstandspolynom berechnet werden. Da auf diese Art keine sekundliche Steigungskorrektur möglich ist, wurde sie nicht angewandt. Stattdessen wurde mit der Methode dieser Arbeit das Fahrwiderstandspolynom in sekundlichen Schritten und nicht in Intervallschritten ermittelt. Speziell die sekundliche Steigungskorrektur ist ein Vorteil gegenüber der EU-Norm.

Um zu ermitteln, wie groß die Abweichung der Fahrwiderstände zwischen den beiden Methoden ist, wurde aus Testzwecken auf die Steigungskorrektur verzichtet. Vergleicht man dann die Fahrwiderstände  $R_0$  und  $R_2$  der beiden Methoden bei verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen, können Abweichungen im Bereich von 0 % bis 3,5 % festgestellt werden. Da dieser Unterschied so gering ist, wurde die Methode der EU-Norm nicht angewandt, da man sonst zusätzlich auf die sekundliche Steigungskorrektur verzichten müsste.

## 5 Simulative Untersuchungen und Ergebnisvergleich

Im folgenden Kapitel wird ein RDE-Zyklus und ein WLTC-Zyklus mit den Fahrwiderständen der 16 Fahrzeugkonfigurationen mit dem Programm PHEM nachsimuliert. Damit kann ein Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche die verschiedenen Einflussarten verursachen, stattfinden. Bevor die Ergebnisse präsentiert werden, wird die Funktionsweise der Simulationssoftware erklärt.

### 5.1 Simulationssoftware PHEM

„PHEM“ steht für „Passenger car and Heavy duty Emission Modell“. Diese Software wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz entwickelt und wird stets weiterentwickelt. Mit PHEM ist es möglich, basierend auf einem Längsdynamikmodell Schadstoffemissionen und den Kraftstoffverbrauch durch Eingabe von Motorleistung und -drehzahl zu simulieren. Das Simulationsprogramm errechnet unter Eingabe von **Fahrwiderständen**, Fahrzeugmassen, Steigung und der Fahrzeuggeschwindigkeit die sekundlich benötigte Antriebsleistung. Die sekundliche Drehzahl wird über Geschwindigkeit, Gang und Getriebe- und Achsübersetzung berechnet. Sind die Motordrehzahl und die Motorleistung ermittelt, können Verbrauch und Emissionen aus den Emissionskennfeldern berechnet werden. Zuvor müssen jedoch Emissionskennfelder erstellt werden. Aus [5] ist zu entnehmen, dass die Emissionen und der Verbrauch in Kennfeldern über Motorleistung und Motordrehzahl vorgegeben werden. In Abbildung 5-1 wird das Funktionsprinzip von PHEM grafisch dargestellt.

Da von den Fahrzeugherstellern kaum Emissionskennfelder zur Verfügung gestellt werden, müssen diese selbst erstellt werden. Der Aufwand, jeden Motor auszubauen und am Motorprüfstand zu vermessen, wäre immens, daher gibt es andere Möglichkeiten. Emissionskennfelder können von Rollenprüfstandsmessungen abgeleitet werden. Dazu werden die Leistung und die Drehzahl gemessen oder berechnet und die entsprechenden sekundlich gemessenen Emissionen in ein Kennfeld gerastert.

Bei RDE-Fahrten ist in den meisten Fällen die Radleistung nicht bekannt. Da es trotzdem notwendig ist, ein Emissionskennfeld erzeugen zu können, wurde am IVT die CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolationsmethode entwickelt. Die Berechnung der aktuellen Leistung ist mittels Nennleistung, Motordrehzahl und CO<sub>2</sub> möglich. Diese Verknüpfung ist in einem generischen Kennfeld hinterlegt. Daraus kann wiederum mittels Drehzahl und CO<sub>2</sub> die erforderliche Leistung berechnet werden. Für diese Masterarbeit war die CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolationsmethode der notwendige Ansatz für die Kennfelderstellung. Für genauere Informationen zu PHEM sei auf [12] verwiesen.

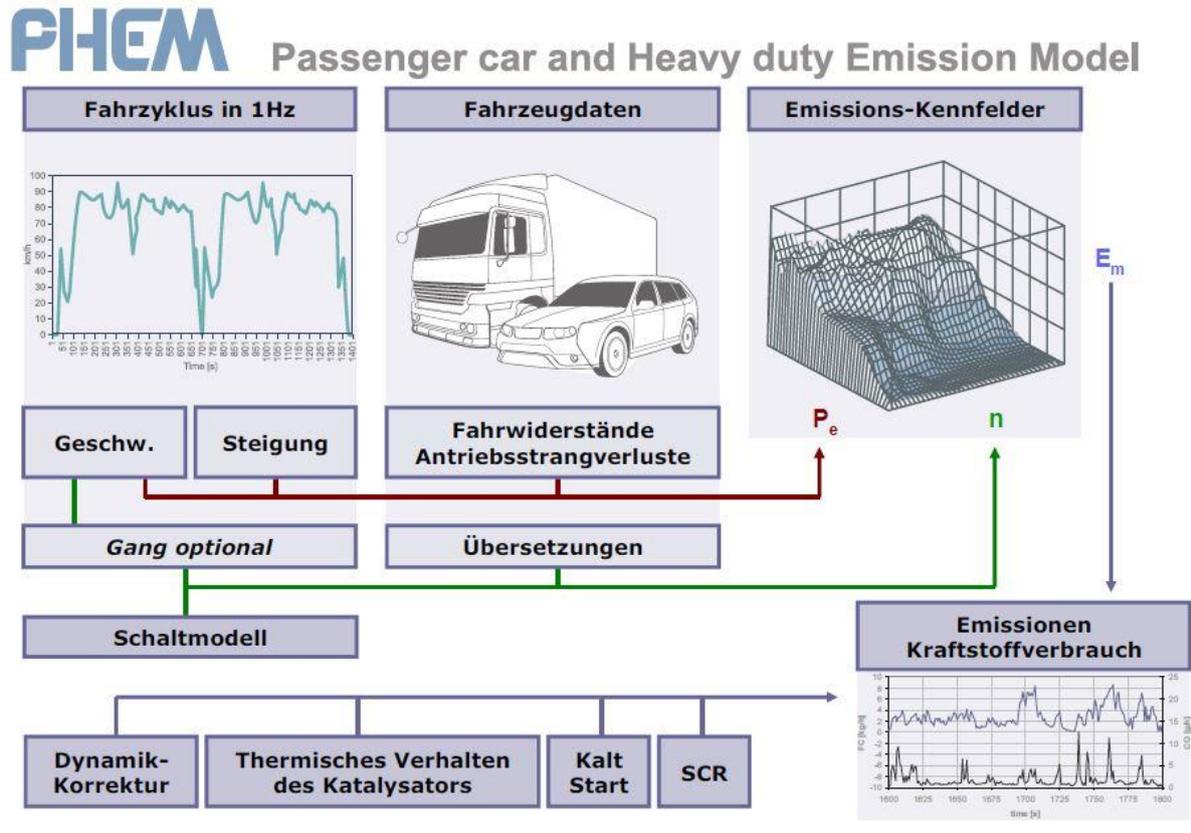


Abbildung 5-1 Funktionsprinzip von PHEM

### 5.1.1 Inputdaten für die Simulation mit PHEM

Im Wesentlichen lässt sich ein Simulations-file aus folgenden Bausteinen zusammenstellen. Es handelt sich um das VEH-, MAP-, FLD- und DRI-File. Tabelle 5-1 gibt eine Übersicht über die notwendigen Eingabeparameter.

Tabelle 5-1 Inputdaten für PHEM

Input-File	Abkürzung	Eingabeparameter	
Fahrzeugdaten	VEH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeugmasse</li> <li>• Beladung</li> <li>• red. Rädermasse</li> <li>• dyn Reifendurchmesser</li> <li>• cw - Wert</li> <li>• Querschnittsfläche</li> <li>• Nebenverbraucherleistung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rollwiderstandsbeiwerte</li> <li>• Nennleistung</li> <li>• Nenndrehzahl</li> <li>• Leerlaufdrehzahl</li> <li>• Getriebeübersetzung</li> <li>• Schaltmodellparameter</li> <li>• Getriebe &amp; Motorträgheit</li> </ul>
Kennfeld	MAP	Emissionskennfeld	
Volllastkurve	FLD	Beinhaltet Volllastkurve und Schleppkurve (normiert)	
Fahrzyklus	DRI	Fahrzyklus mit Steigung (Zeit, Geschw, und Steigungsverlauf)	
	NPI	Zusätzlich zu DRI-Daten Drehzahl und Emissionen aus Messung	

Die wichtigsten Parameter für die Simulationen in dieser Masterarbeit sind die Parameter des Fahrwiderstandes. Genaugenommen betrifft es den Luftwiderstandsbeiwert und den Rollwiderstandsbeiwert.

Der Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  wird aus Gleichung (4-5) ermittelt.

Der Rollwiderstandsbeiwert  $f_{r0}$  wird aus Gleichung (4-7) ermittelt.

Die Nebenverbraucherleistung ist in diesem Abschnitt noch nicht relevant. Wichtig ist, dass für jede Simulation die gleiche Leistung angenommen wird, damit die Emissionsergebnisse sinnvoll vergleichbar sind. Es werden somit Defaultwerte angenommen und normiert.

Die Vollastlinie stammt aus den Motordaten von [13]. Da die Schleppkurven von Fahrzeugen meist unbekannt sind, finden auch dafür Defaultwerte Anwendung. Diese beiden Kurven werden ebenso normiert. Der Vorteil der Normierung ist, dass man Motoren mit verschiedenen Leistungen aber ähnlicher Technologie miteinander vergleichen kann. Folgende Formeln werden für die Normierung verwendet:

$$P_{e\_norm} = \frac{P_e}{P_{rated}} \quad (5-1)$$

$$n_{norm} = \frac{n - n_{idle}}{n_{rated} - n_{idle}} \quad (5-2)$$

$$CO_{2\_norm} = \frac{CO_2}{P_{rated}} \quad (5-3)$$

$P_{e\_norm}$	.....	normierte Motorleistung [kW]
$P_e$	.....	aktuelle effektive Motorleistung [kW]
$P_{rated}$	.....	Nennleistung [kW]
$n$	.....	aktuelle Motordrehzahl [1/min]
$n_{rated}$	.....	Nenndrehzahl [1/min]
$n_{idle}$	.....	Leerlaufdrehzahl [1/min]
$CO_{2\_norm}$	.....	normierte CO <sub>2</sub> – Emission [g/h]
$CO_2$	.....	gemessene CO <sub>2</sub> – Emission [g/kW <sub>rated</sub> h]

Abbildung 5-2 zeigt die Vollast- und Schleppkurve zur Simulation des Versuchsfahrzeuges (BMW 218d).

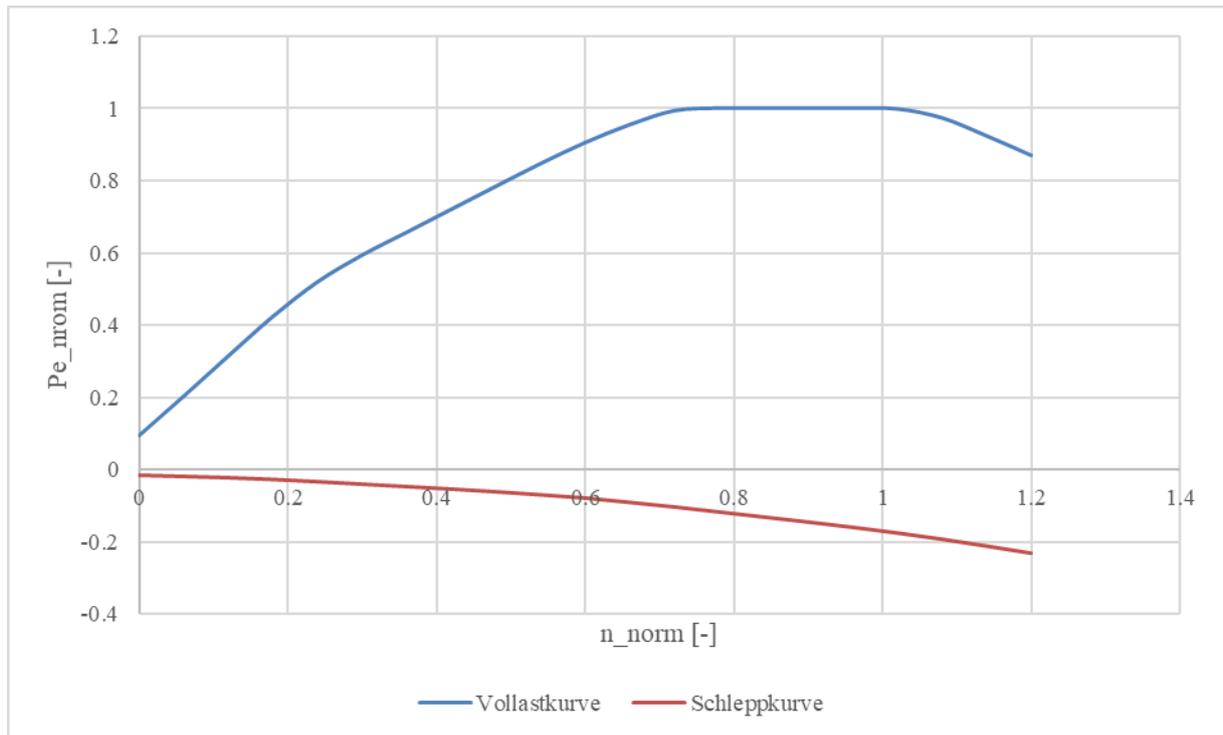


Abbildung 5-2 Vollast- &amp; Schleppkurve

## 5.2 Simulationsergebnisse von RDE und WLTC

Alle 16 Fahrzeugkonfigurationen wurden exakt gleich in einem WLTC- und einem RDE-Zyklus simuliert. Die einzigen Unterschiede bei der Simulation waren die aus den Ausrollversuchen ermittelten Werte von  $c_w$  und  $f_{r0}$ .

Die beiden folgenden Diagramme zeigen Unterschiede der Fahrzeugkonfigurationen bezüglich des  $\text{CO}_2$  Ausstoßes in  $[\text{g}/\text{km}]$  und eine prozentuelle Steigerung/Verminderung im Vergleich zur Standardkonfiguration. Abbildung 5-3 gilt für den RDE Zyklus und Abbildung 5-4 für den WLTC Zyklus.

Die beiden Diagramme sehen anfangs sehr ähnlich aus. Wirft man einen genaueren Blick darauf, ist zu erkennen, dass der WLTC im nahezu gesamten Bereich (bis auf die beiden letzten Konfigurationen) mehr  $\text{CO}_2$  verursacht als der RDE Zyklus. Allerdings steigen die Abweichungen der  $\text{CO}_2$ -Emissionen in den höheren Bereichen der Fahrwiderstände weniger stark an als beim RDE Zyklus. Um dieses Verhalten beschreiben zu können, müsste man auf die Dynamik der beiden Zyklen eingehen. Das ist allerdings nicht Teil dieser Arbeit und wird daher auch nicht näher erläutert.

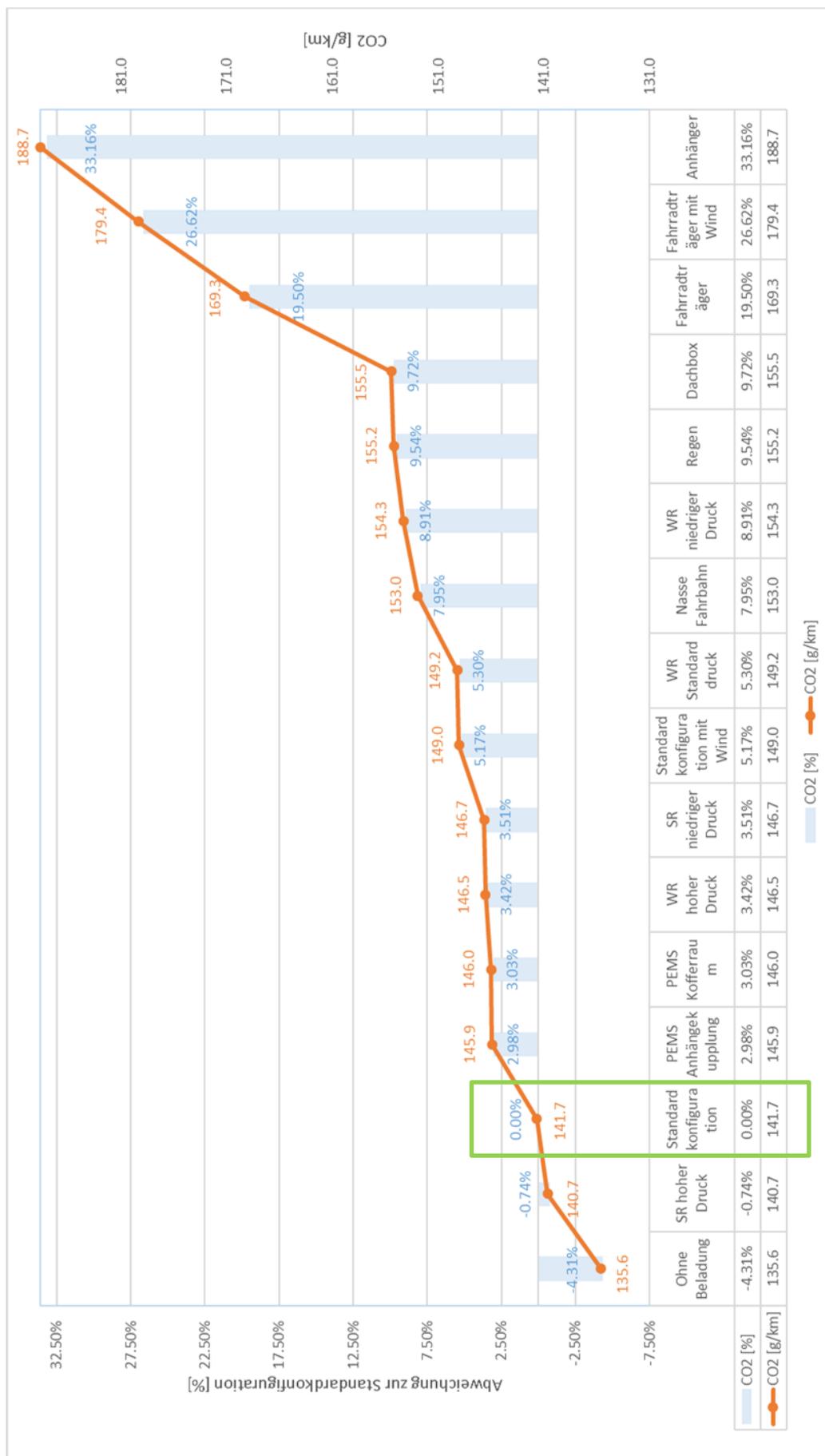


Abbildung 5-3 CO<sub>2</sub> Vergleich der Simulationsergebnisse mit RDE-Zyklus

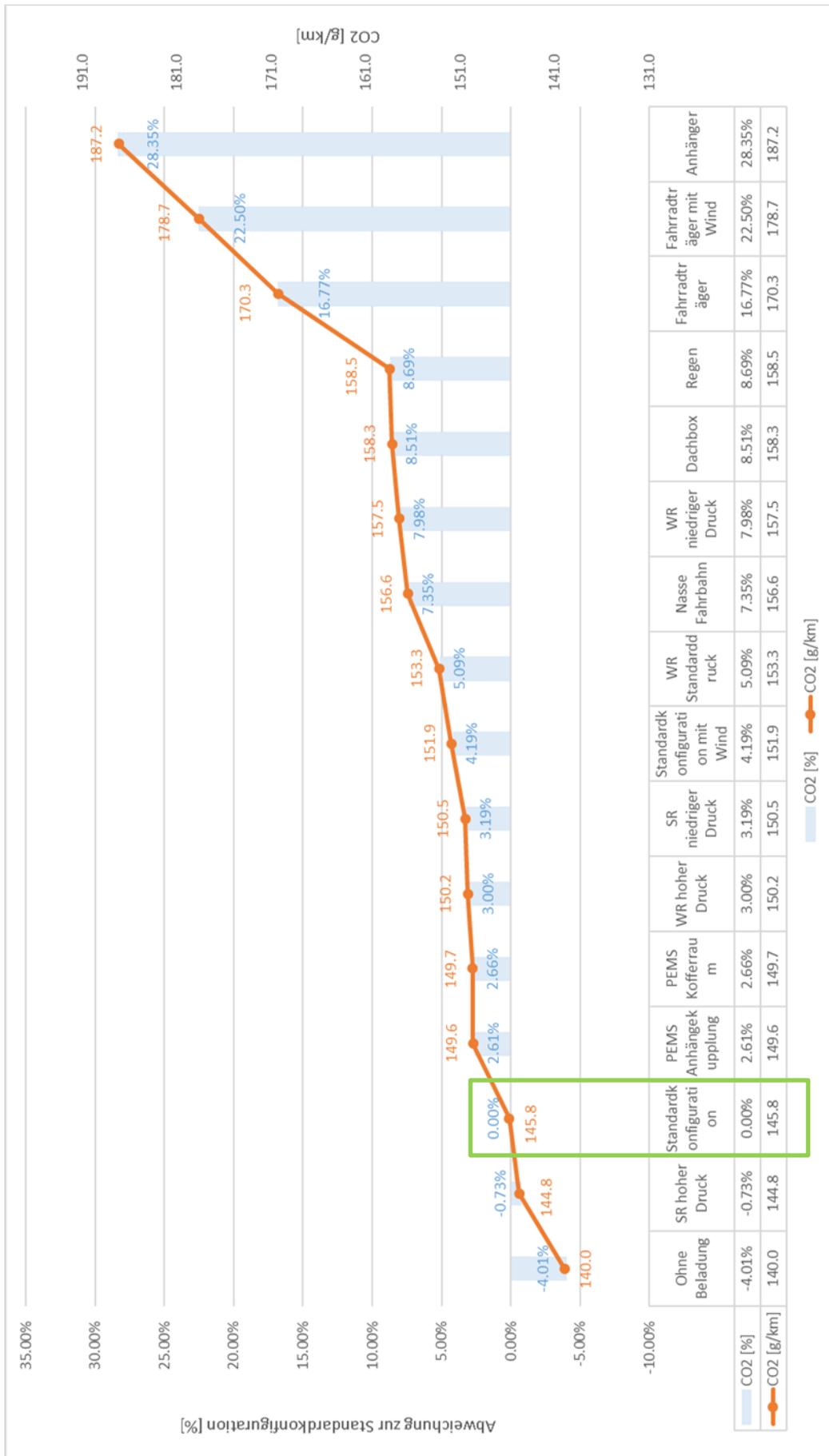


Abbildung 5-4 CO<sub>2</sub> Vergleich der Simulationsergebnisse mit WLTC-Zyklus

### 5.3 Simulation eines HBEFA Durchschnittsfahrzeuges

„HBEFA“ bedeutet „Handbook of Emission Factors for Road Transport“ und ist im Wesentlichen ein Emissions – Inventurmodell. Es wird verwendet für Emissionsabschätzungen des Verkehrs für verschiedenste Situationen. Da nicht jedes Fahrzeug gemessen werden kann, werden die Emissionen auf Basis von Messungen mit statistischen, geschätzten und berechneten Faktoren abgeleitet. Das HBEFA dient hierbei als Datenbank, welche Emissionsfaktoren für alle gängigen Straßenfahrzeugkategorien (PKW, Nutzfahrzeuge, LKW, usw.) für eine hohe Vielfalt an Verkehrssituationen bereitstellt. Die Emissionsfaktoren sind außerdem von folgenden Parametern abhängig:

- Straßenkategorien (Autobahn, Hauptstraße, ...)
- Verkehrsbelastung (von freier Fahrt bis Stop & Go)
- Fahrbahnsteigung
- Euro-Schadstoffklassen uvm.

Die Emissionsfaktoren entstehen, indem man mit PHEM sogenannte „Durchschnittsfahrzeuge“ simuliert, welche den Flottendurchschnitt repräsentieren sollen. Dabei wird eine Vielzahl an Fahrzyklen mit unterschiedlichsten Fahrsituationen (Stauzyklus, Überlandfahrt, Extremfahrt auf einer Autobahn usw.) miteinbezogen. Jeden Zyklus gibt es dabei mit Steigungen von -6 % bis +6 % in Schritten von 2 %. Wenn anschließend für jeden Zyklus der absolute Emissionswert in g/km (Partikelanzahl in #/km) als Zyklusmittelwert gebildet wird, erhält man die sogenannten Emissionsfaktoren. Danach wird eine Gewichtung durchgeführt, welche das durchschnittliche Emissionsniveau, passend zu den gewählten Regionen oder auch Ländern, darstellt. Um die Simulation möglichst genau durchzuführen, ist vor allem bei der Erstellung der Durchschnittsfahrzeuge ein großer Bereich an Einflüssen zu berücksichtigen. Diese Einflüsse wurden in der Masterarbeit „Messung und Simulation von Otto – PKW Emissionen für das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ [2] von Herrn Dipl. Ing. Opetnik M. untersucht. Speziell die Herleitung der Fahrwiderstandsbeiwerte aus dieser Arbeit ist für die vorliegende Masterarbeit interessant. Es wurden einige Annahmen getroffen, welche nun anhand der Daten der Ausrollversuche berechnet werden können.

In dem folgenden Abschnitt wird kurz die Herleitung von Opetnik erklärt und anschließend werden die neuen Faktoren berechnet. Nach der Simulation eines Durchschnittsfahrzeuges mit den neuen Faktoren wird der Unterschied zu den „geschätzten“ Faktoren von Opetnik analysiert.

#### 5.3.1 Herleitung der Simulationsparameter HBEFA

- **Methode HBEFA (durch Opetnik)**

Da im Rahmen dieser Arbeit die Parameter der Fahrwiderstände ermittelt wurden, wird auch nur der Teil, welcher die Fahrwiderstände betrifft, aus genannter Arbeit erwähnt. Für genauere Informationen wird auf [15] verwiesen. Die Basis der Fahrwiderstände bilden die Mittelwerte von WLTC-Low und High, also  $c_{w\_WLTC}$  und  $f_{r0\_WLTC}$ . Diese Werte werden durch Beaufschlagung mehrerer Faktoren erhöht.

$c_w$ -Wert:

- Verwendung von Dachträgern (5 % Jahresanteil) und Anhängern (5 % Jahresanteil)  $K_{Cw\_1}$  (Steigerung geschätzt)
- Seitenwindeffekten  $K_{Cw\_2}$  (Steigerung aus Literaturdaten geschätzt)
- Korrektur von Realumgebungstemperatur vs. Normtemperatur  $K_{Cw\_3}$ .

Verhältnis der Luftdichten bei Normtemperatur 20 °C und Jahresdurchschnittstemperatur 12 °C

Rollwiderstandsbeiwert:

- 6 % Jahresanteil durch Fahrten bei Regen. Der Rollwiderstand bei Regen ist dabei um 30 % erhöht  $K_{Fr_1}$ . (Steigerung geschätzt)
- 30% Jahresanteil für Fahrten mit Winterreifen  $K_{Fr_2}$  (Steigerung geschätzt)
- Verwendung von größeren und breiteren Reifen als beim WLTC. Gilt nur bei Dieselfahrzeugen  $K_{Fr_D}$  (Steigerung um 5 % geschätzt)

Tabelle 5-2 listet die Faktoren mit ihren Werten auf.

Tabelle 5-2 Fahrwiderstand WLTC und Korrekturfaktoren der Luft- und Rollwiderstände aus HBEFA

Bezeichnung	Wert
$c_{w\_WLTC}$	0,30084
$f_{r0\_WLTC}$	0,00894
$f_{r1\_WLTC}$	0,00006652
$K_{Cw_1}$	1,025
$K_{Cw_2}$	1,03
$K_{Cw_3}$	1,028
$K_{Fr_1}$	0,06*0,3
$K_{Fr_2}$	0,3*0,15
$K_{Fr_D}$	1,05

Letztendlich lassen sich der Luftwiderstandsbeiwert und der Rollwiderstandsbeiwert mit den beiden folgenden Formeln berechnen. In der HBEFA-Methode wird die Korrektur des Rollwiderstandsbeiwertes auf  $f_{r0}$  und  $f_{r1}$  angewandt.

$$c_{w\_HBEFA} = c_{w\_WLTC} * K_{Cw_1} * K_{Cw_2} * K_{Cw_3} \quad (5-4)$$

$$c_{w\_HBEFA} = 0,3265$$

$$f_{ri\_HBEFA} = f_{ri\_WLTC} * (1 + K_{Fr_1}) * (1 + K_{Fr_2}) * K_{Fr_D}$$

$$f_{r0\_HBEFA} = 0,00999 \quad (5-5)$$

$$f_{r1\_HBEFA} = 0,0000743$$

- **Methode mit Daten von Ausrollversuchen**

Die Korrekturfaktoren bezüglich Anhänger, Dachbox, Regen und Winterreifen werden auf die gleiche Art und Weise wie bei der HBEFA-Methode berechnet. Die Jahresanteile der Einflüsse bleiben somit in dieser Methode gleich. Jedoch haben die Korrekturfaktoren andere Beträge. Der folgende Abschnitt beschreibt die Ermittlung der Korrekturfaktoren.

### **Korrektur der Jahresdurchschnittsumgebungsbedingungen:**

Um die Korrekturfaktoren der Luftdichte bzw. der Jahresdurchschnittstemperatur zu ermitteln, wurde die Standardkonfiguration zweimal mit verschiedenen Bezugsbedingungen der Umgebungsdaten im Ausrollversuch-Auswertetool durchgerechnet. Einerseits mit den Norm-Bezugsbedingungen und andererseits mit den Jahresdurchschnittsbedingungen als Bezugsbedingungen. Durch Division der unterschiedlichen Widerstandsbeiwerte erhält man die Korrekturfaktoren. Die Tabelle 5-3 stellt die beiden unterschiedlichen Bezugsbedingungen dar.

Tabelle 5-3 Unterschiede der Bezugsbedingungen

Messung/Berechnung	Einheit	Bezugsbedingung Norm	Bezugsbedingung Jahresdurchschnitt
t	[°C]	20	10,4
$p_{\text{Luft}}$	[mbar]	1000	1000
$\rho_{\text{Luft}}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,188	1,221
Luftfeuchtigkeit	%	0	67,2

Die Luftfeuchtigkeit im Jahresdurchschnitt in Deutschland wurde aus den HBEFA 4.1 Daten ermittelt. Für die Durchschnittstemperatur wurde auf [15] zugegriffen.

### **Seitenwindkorrektur:**

Zur Seitenwindkorrektur wurde auf statistische Daten der Ausrollversuche zurückgegriffen. Der durchschnittliche Seitenwind aller durchgeführten Ausrollversuche beträgt ca. 6,2 km/h. Die Fahrzeugkonfiguration „ohne Beladung“ wurde zufällig mit dem gleichen Seitenwind wie der durchschnittliche Seitenwind, also 6,2 km/h, durchgeführt. Um nun einen Korrekturfaktor zu ermitteln, wurde die Ausrollerauswertung der Fahrt „ohne Beladung“ einmal mit Windkorrektur und einmal ohne Windkorrektur durchgeführt. Durch Division der ermittelten Fahrwiderstände kann wiederum auf die Korrekturfaktoren bezüglich Seitenwindes geschlossen werden.

### **Korrektur Anhänger, Dachbox, Regen und Winterreifen:**

Aus  $R_0$  und  $R_2$  der Ausrollversuche wird mit den Formeln (4-5) und (4-7) der Rollwiderstandsbeiwert  $f_{r0}$  und der Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  berechnet. Anschließend wird die Steigerung jedes Ausrollversuchs bezogen auf die Standardkonfiguration, in % berechnet. Somit lässt sich beispielsweise ermitteln, dass die Fahrt bei Regen einen um 24 % höheren Rollwiderstandsbeiwert  $f_{r0}$  und einen um 17 % höheren Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  als bei Standardkonfiguration aufweist. Hierbei sieht man schon den ersten Unterschied zur HBEFA-Methode. Bei HBEFA wird der Einfluss von Regen nur auf den Rollwiderstandsbeiwert beaufschlagt. Dass dieser Einfluss sich aber auch auf den Luftwiderstandsbeiwert niederschlägt, ist somit bestätigt. Dieses Verfahren wird auf jede für das HBEFA notwendige Konfiguration angewandt.

So wie bei dem eben erwähnten Regen-Einfluss, bewirken auch die anderen HBEFA-Einflüsse Veränderungen von Rollwiderstandsbeiwert UND Luftwiderstandsbeiwert. Deshalb werden bei der Ausroll-Methode pro HBEFA-Einflussart beide Korrekturfaktoren ermittelt. Tabelle 5-4 zeigt eine Übersicht der Korrekturfaktoren, welche mit dieser Methode ermittelt wurden. Der letztendliche Korrekturfaktor ist das Produkt aus dem Jahresanteil des jeweiligen Einflusses und der Steigerung der Fahrwiderstandsbeiwerte aus den Ausrollerdaten. (Zur Wiederholung: Steigerung einer Einflussart bezogen auf die Standardkonfiguration)

Beispiel: Berechnung des Anhängers (SK steht für Standardkonfiguration)

$$K_{fr0\_A} = 1 + 5 \% \text{ Jahresanteil} * 6,9 \% \text{ Steigerung zu SK} \quad (5-6)$$

$$K_{fr0\_A} = 1,0035$$

$$K_{Cw\_A} = 1 + 5 \% \text{ Jahresanteil} * 102,2 \% \text{ Steigerung zu SK} \quad (5-7)$$

$$K_{Cw\_A} = 1,0513$$

Tabelle 5-4 Korrekturfaktoren nach Ausrollerdaten

Einfluss	$K_{fr0\_i}$	$K_{Cw\_i}$
Anhänger	$K_{fr0\_A} = 1,0035$	$K_{Cw\_A} = 1,0513$
Dachbox	$K_{fr0\_B} = 1,0027$	$K_{Cw\_B} = 1,0157$
Regen	$K_{fr0\_R} = 1,0144$	$K_{Cw\_R} = 1,0103$
WR (normaler Druck)	$K_{fr0\_W} = 1,0356$	$K_{Cw\_W} = 1,0263$
Jahresdurchschnitt Temp.	$K_{fr0\_T} = 1,0849$	$K_{Cw\_T} = 1,0422$
Seitenwind	$K_{fr0\_S} = 1,0324$	$K_{Cw\_S} = 1,0365$

Die Korrektur des Rollwiderstandsbeiwertes wird nur bei  $f_{r0}$  und nicht auch bei  $f_{r1}$  wie in

der HBEFA-Methode angewandt. Das hat den Grund, dass  $R_1$  und somit auch  $f_{r1}$  bei den Ausrollversuchen 0 gesetzt wurde. Für die anschließenden Simulationen wird bei der Ausroll-Methode für  $f_{r1}$  der unbearbeitete WLTC-Wert eingesetzt, da alle Einflüsse vollständig in  $f_{r0}$  enthalten sind. Mit den Gleichungen (5-8) und (5-9) können nun die neuen Widerstandswerte für die HBEFA Simulation berechnet werden.

$$c_{w\_HBEFA\_neu} = c_{w\_WLTC} * K_{cw\_A} * K_{cw\_B} * K_{cw\_R} * K_{cw\_W} * K_{cw\_T} * K_{cw\_S} \quad (5-8)$$

$$c_{w\_HBEFA\_neu} = 0,3598$$

$$f_{r0\_HBEFA\_neu} = f_{r0\_WLTC} * K_{fr0\_A} * K_{fr0\_B} * K_{fr0\_R} * K_{fr0\_W} * K_{fr0\_T} * K_{fr0\_S} \quad (5-9)$$

$$f_{r0\_HBEFA\_neu} = 0,01058$$

### 5.3.2 Vergleich der hergeleiteten Simulationsparameter

Die Ergebnisse in Tabelle 5-5 zeigen, dass die großteils geschätzten Werte durch die HBEFA-Methode etwas zu niedrig angesetzt waren. Umgerechnet ist der Rollwiderstandsbeiwert  $f_{r0}$  von Opetnik um ca 6 % und der Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  um ca 10 % zu gering. Das sind für eine Schätzung respektable Abweichungen.

Tabelle 5-5 Vergleich der Widerstandsbeiwerte nach Methode

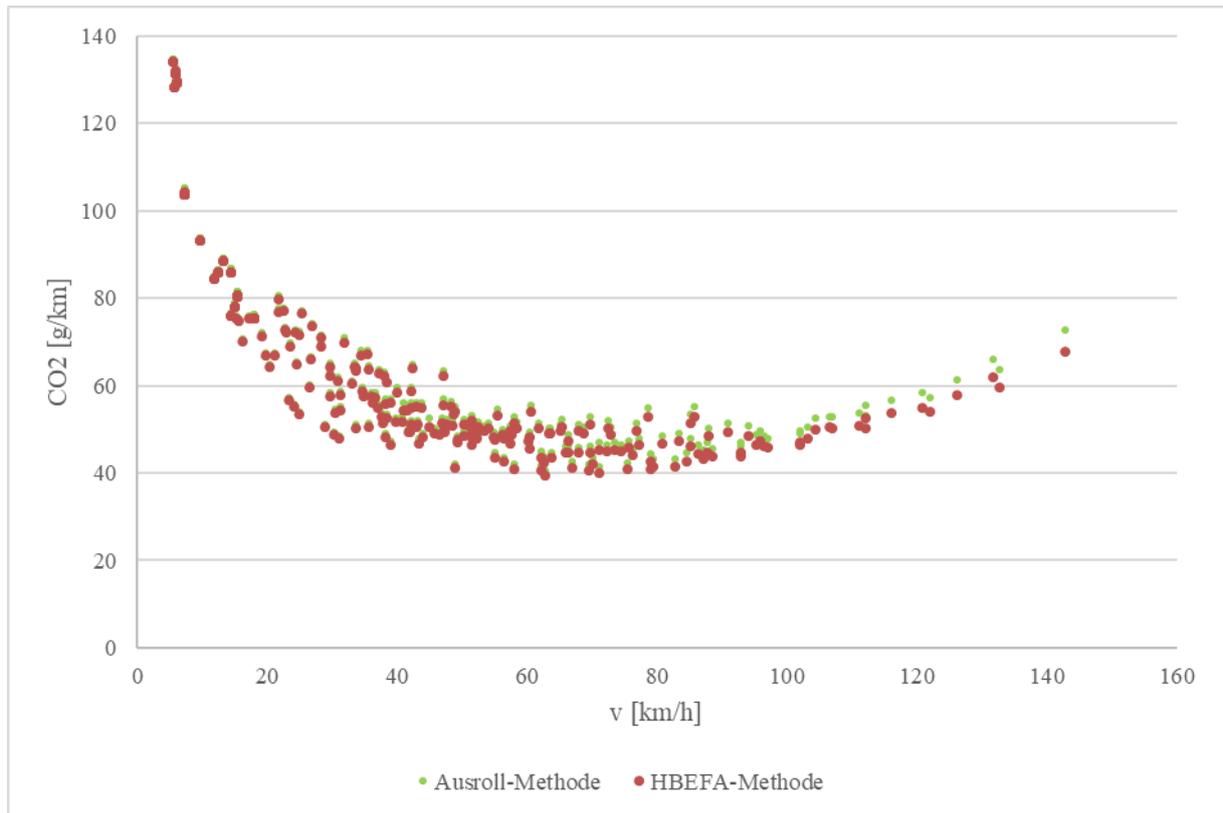
	Methode Ausrollversuch	Methode Opetnik	WLTC
$f_{r0}$	0.01058	0.00999	0.00894
$f_{r1}$	6,652E-5	7,43E-5	6,652E-5
$c_w$	0.3598	0.3265	0.3008

Anschließend wird nun mit den eben ermittelten Widerstandsbeiwerten die exakt gleiche Simulation wie bei der HBEFA-Methode in PHEM durchgeführt.

### 5.3.3 Simulationsergebnisse

Zur Simulation wurden alle Daten (VEH, MAP, FLD, DRI usw.) aus HBEFA 4.1 eines Euro 6d Temp Dieselfahrzeuges entnommen. In Summe wurden über 2000 Zyklen durchsimuliert. Die einzige Variation ist, wie zuvor erwähnt, dass die neu ermittelten Widerstandsbeiwerte  $f_{r0\_HBEFA\_neu}$  und  $c_{w\_HBEFA\_neu}$  im Vehicle-File verwendet wurden. Für  $f_{r1}$  wird der WLTC Wert genommen.

Um die Ergebnisse übersichtlich mit den Simulationsergebnissen der HBEFA-Methode vergleichen zu können, wird nur ein Teil der Fahrzyklen in der CO<sub>2</sub> – Punktwolke dargestellt. Dabei handelt es sich um 335 Fahrzyklen mit der Steigung von 0 % aber mit verschiedenen Durchschnittsgeschwindigkeiten. Das Diagramm zeigt also die CO<sub>2</sub> – Emissionen in [g/km] über die Durchschnittsgeschwindigkeit des jeweiligen Zyklus. Somit ist in Abbildung 5-5 zu sehen, dass mit der Durchschnittsgeschwindigkeit auch die Abweichung steigt.


 Abbildung 5-5 CO<sub>2</sub> Punktwolke

Anschließend ist das Gewichtungstool anzuwenden, um einen Durchschnitt für alle Fahrzyklen zu generieren und letztendlich resultierende Emissionswerte eines durchschnittlichen Euro 6d Temp Diesel Fahrzeuges zu erstellen. Um einen Vergleich ziehen zu können, werden auch die gewichteten Emissionen nach Opetniks Methode dargestellt. In Summe ist somit zu erkennen, dass letztendlich ca. 5,5 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer mehr entstehen, als ursprünglich gedacht.

Methode	CO <sub>2</sub> [g/km]	CO <sub>2</sub> + Kaltst. [g/km]	CO [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [g/km]	NO [g/km]
HBEFA	172.3	179.2	0.015	0.046	0.011	0.0007	4.98E+10	0.034
Ausrollversuch	178.8	186.0	0.015	0.047	0.011	0.0007	5.04E+10	0.035

## 5.4 Nebenverbraucherleistung

Ein wichtiger Parameter für die Simulation mit PHEM (vorallem bei RDE-Fahrten) ist die Nebenverbraucherleistung des zu simulierenden Fahrzeuges. Die Nebenverbraucherleistung ist jene Leistung, welche der Verbrennungsmotor aufbringen muss, um alle anderen Aggregate des Fahrzeuges betreiben zu können. Für das Simulationsprogramm ist diese Leistung als normierte Leistung anzugeben.

$$P_{NV\_norm} = \frac{P_{NV\_rated}}{P_{e\_rated}} \quad (5-10)$$

$P_{NV\_norm}$	.....	normierte Nebenverbraucherleistung [-]
$P_{NV\_rated}$	.....	berechnete Nebenverbraucherleistung [kW]
$P_{e\_rated}$	.....	Nennleistung des Fahrzeuges [kW]

Wie groß diese Nebenverbraucherleistung ist, hängt von vielen Faktoren ab. Den größten Anteil hat jedoch die Klimaanlage. Da im Zuge dieser Arbeit alle RDE Fahrten im Sommer bei ca 30 °C durchgeführt wurden, war es sinnvoll, vor allem die Leistung der Klimaanlage möglichst genau zu ermitteln. Am IVT gab es bereits Projekte, welche sich mit PKW-Klimaanlagen beschäftigten. Daraus entstand das sogenannte MAC-Tool.

#### 5.4.1 MAC - Tool

Unter Vorgabe bestimmter Eingangsparameter wird die Klimaleistung in den verschiedenen Betriebsmodi (Umluftbetrieb, Mischluftbetrieb und reiner Außenluftbetrieb) berechnet. In diesem MAC-Tool wird der Kälteprozess der Kältemaschine und auch der luftseitige Prozess mit allen Besonderheiten wie z.B. feuchte Luft, Abscheidung des Kondenswassers usw. begerechnet. Der gesamte kombinierte Prozess ist in Abbildung 2-7 abgebildet. Die wichtigsten Eingangsparameter zur Anwendung des Tools sind:

- Außenlufttemperatur [°C]
  - Luftfeuchtigkeit [%]
  - Umgebungsdruck
  - Verdampfertemperatur
  - Düsenaustrittsmassenstrom (Fahrerabraum)
- } = gemessene Werte  
} = Erfahrungswerte

Der luftseitige Ablauf wird in Abbildung 5-6 als Prinzipskizze und in Abbildung 5-7 etwas genauer gezeigt.

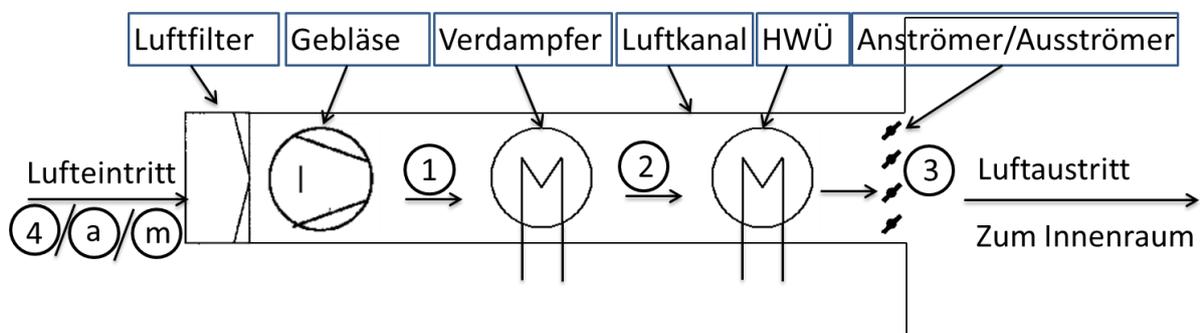


Abbildung 5-6 Prinzipskizze der Luftseite

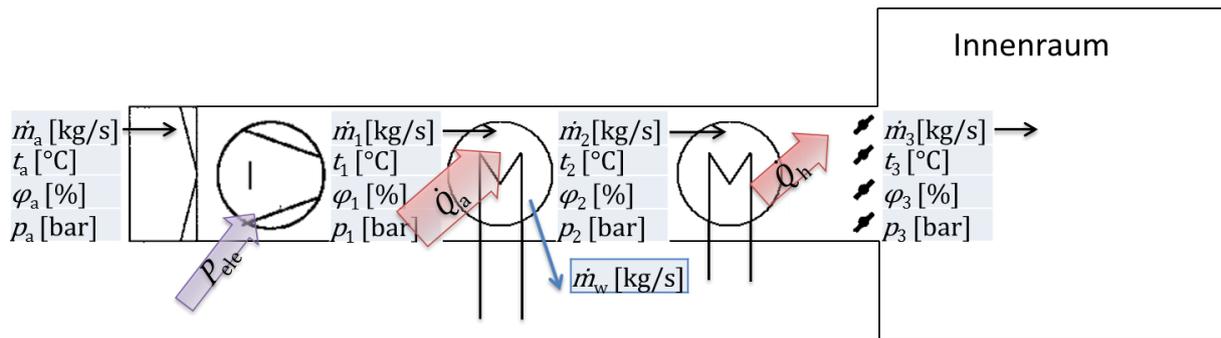


Abbildung 5-7 Prozess der Luftseite

Da eine exakte Berechnung der Klimaleistung nur bei dieser Arbeit gebraucht wird, aber nicht immer notwendig ist und eine Abschätzung/Annäherung reichen würde, wurde im Zuge dieser Arbeit mit Hilfe des MAC-Tools ein Kennfeld erstellt.

#### 5.4.2 Leistungskennfeld PKW-Klimaanlage

Das Kennfeld wurde durch Berechnung mehrerer „Betriebszustände“ ermittelt. Zur Abschätzung der Klimaleistung reicht es, lediglich die Außentemperatur  $t_a$  und die Luftfeuchtigkeit  $\varphi_a$  zu wissen. Sind Parameter wie der Gebläsemassenstrom oder die Verdampfertemperatur bekannt, können diese in dem MAC-Tool geändert werden. Das Kennfeld wird anschließend neu berechnet. Es kann jeweils ein Kennfeld für Außenluftbetrieb, Mischluftbetrieb und Umluftbetrieb erstellt werden. Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 5-8 das Kennfeld bei Außenluftbetrieb dargestellt.

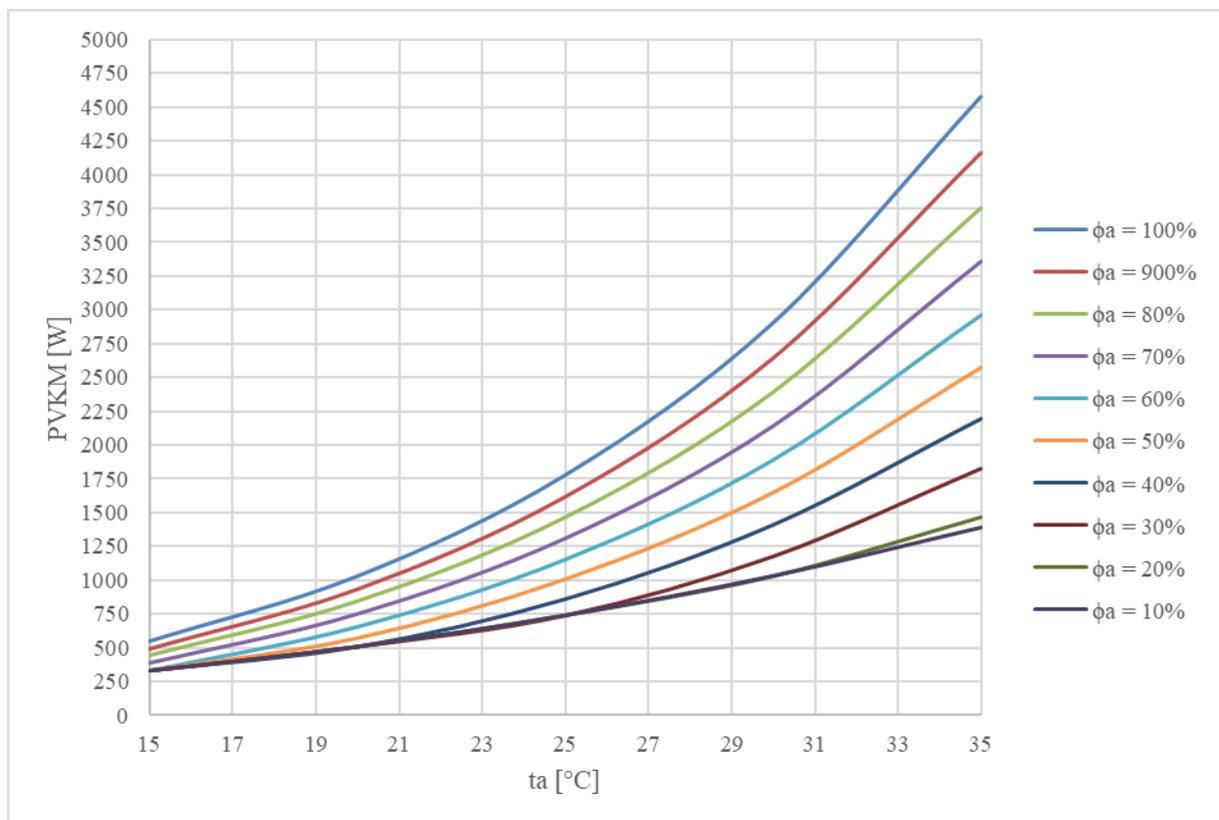


Abbildung 5-8 Klimaleistungskennfeld für Außenluftbetrieb

Durch Berechnen oder Ablesen der Klimaleistung ist erst ein Teil der gesamten Nebenverbraucherleistung bestimmt.

### 5.4.3 Berechnung der gesamten Nebenverbraucherleistung

Im Zuge des HBEFA 4.1 wurden die Nebenverbraucher inklusive Leistung und Anteil an Betriebszeit aufgelistet. Diese Daten wurden im MAC-Tool hinterlegt. Mittels einer 0/1 Abfrage können die jeweiligen Einzelverbraucher an- oder abgewählt werden. Das heißt, möchte man die Nebenverbraucherleistung eines Fahrzeuges wissen, führt man die Klimaberechnung oder Abschätzung durch und wählt in der Liste die jeweiligen Nebenverbraucher, welche im Betrieb waren, an. Die gesamte Nebenverbraucherleistung wird berechnet. In Tabelle 5-6 ist die NV-Liste (NV = Nebenverbraucher) ersichtlich, in welcher beispielhaft einige Verbraucher als aktiv gewählt wurden. (Die Jahresanteile der Betriebszeit der Nebenverbraucher ist hierbei irrelevant, da keine durchschnittliche Nebenverbraucherleistung gewünscht ist, sondern momentane Werte. In der rechten Spalte stehen nur die Leistungen jener NV, welche aktiv waren).

Tabelle 5-6 Auflistung der Nebenverbraucher inklusive der Leistungen

	1= ein/ 0= aus	Nebenverbraucher	[W]	Jahresanteil	aktive NV [W]
1	1	Scheinwerfer	150	25%	150
2	1	Nebelscheinwerfer	100	2%	100
3	0	Elektrische Fensterheber	300	3%	
4	0	Elektrisches Schiebedach	200	0%	
5	1	Heckscheibenheizung	120	5%	120
6	0	Heckscheibenwischer	70	5%	
7	0	Elektrische Sitzverstellung	150	0%	
8	0	Elektrische Spiegelverstellung	20	0%	
9	0	Sitzheizung	400	1%	
10	0	Elektrische Zusatzheizung	1000	2%	
11	0	Frontscheibenheizung	500	1%	
12	0	Elektrische Lenkradheizung	50	1%	
13	0	Scheibenwischer	150	15%	
14	0	Beheizte Scheibenwaschanlage	80	1%	
15	0	Navigationssystem	15	30%	
16	1	Radio	30	90%	30
17	0	Lenkhilfepumpe mechanisch (Folie 8)	38	100%	
18	1	Bremskraftverstärker mechanisch	20	100%	20

	1= ein/ 0= aus	Nebenverbraucher	[W]	Jahresanteil	aktive NV [W]
19	0	Hupe	120	1%	
20	0	Innenleuchten	20	5%	
21	1	Kennzeichenleuchten	20	25%	20
22	0	Steering	16	80%	
23	1	Tagfahrlicht elektrisch	20	100%	20
24	1	Motorsteuergerät elektrisch	250	100%	250
25	1	Airbagsteuergerät elektrisch	20	100%	20
26	1	ABS Steuergerät elektrisch	20	100%	20
27	1	ESB Steuergerät elektrisch	20	100%	20
28	0	Klimaanlage Außenluftbetrieb	1040	40%	
29	0	Klimaanlage Innenluftbetrieb	536	40%	
30	1	Klimaanlage Mischluftbetrieb	773	40%	773.55

## 5.5 RDE Fahrten inklusiver Nachsimulation mit Korrekturfaktoren

Der letzte Teil der Masterarbeit umfasst drei RDE Fahrten in drei unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen. Als Route wurde die am IVT bereits bekannte Ries-Route gewählt.

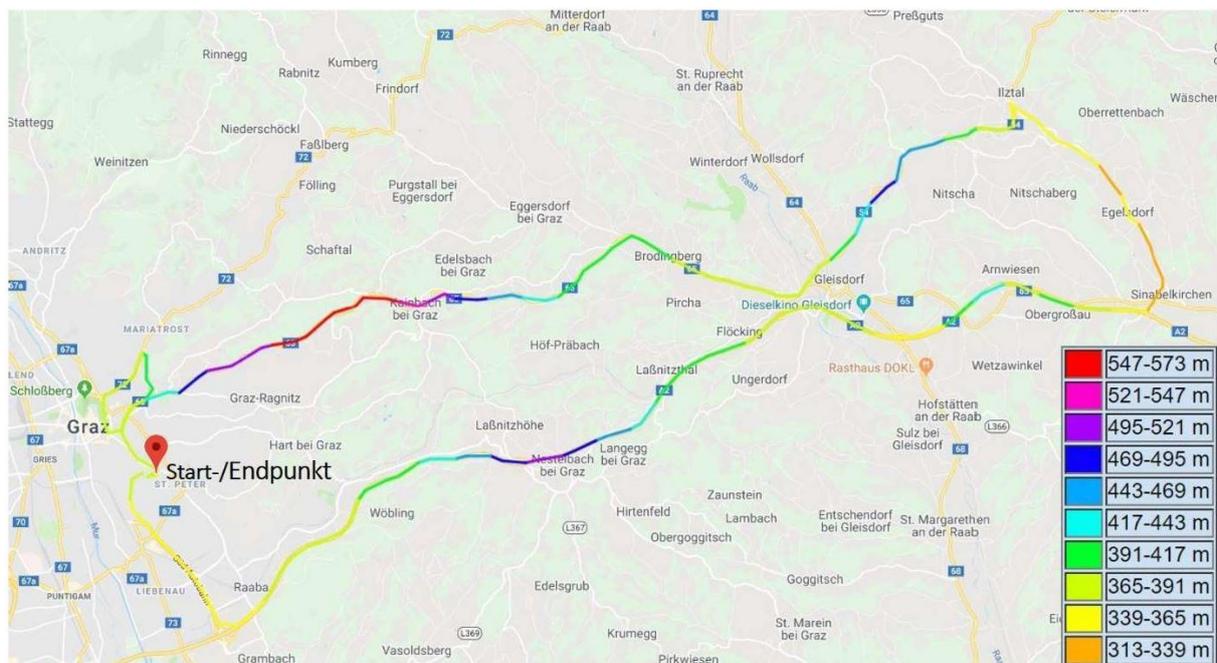


Abbildung 5-9 Streckenverlauf der Ries-Route

Der Zweck dieser Fahrten war es, zu kontrollieren, ob die Korrekturfaktoren, welche durch Ausrollversuche ermittelt wurden, auch richtige Ergebnisse liefern. Wie kann diese Kontrolle durchgeführt werden? Zuerst wird das Fahrzeug auf Standardkonfiguration eingestellt. Das heißt, Luftdruck, Beladung, Tankfüllung usw. müssen kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert werden. Anschließend wird alles Notwendige für eine RDE-Messfahrt eingestellt und das PEMS in den Kofferraum eingebaut. Es werden drei Fahrzeugkonfigurationen vermessen.

- Standardkonfiguration
- Fahrradträger mit zwei Fahrrädern am Dach
- Dachbox

Sind die Fahrten abgeschlossen und gültig, werden aus den PEMS-Daten Simulationen durchgeführt. Bei den Simulationen sind die Fahrwiderstände im Vehicle-File mit den Korrekturfaktoren anzupassen und die richtige Nebenverbraucherleistung ist einzugeben. Vergleicht man abschließend die gemessenen Emissionen mit den simulierten Emissionen, sollte der Unterschied im Idealfall möglichst gering sein. Es ist noch zu erwähnen, dass bei diesen Messfahrten keine Partikelanzahl gemessen werden konnte, da das PN-PEMS zu diesem Zeitraum nicht verfügbar war. Da aber der Fokus ohnehin auf den CO<sub>2</sub> Emissionen liegt, konnte darauf verzichtet werden.

### 5.5.1 Datenaufbereitung für die Simulation

Bevor die Simulation der drei RDE Fahrten durchgeführt werden kann, bedarf es einer gründlichen Datenaufbereitung. Das FLD-File (Vollastkuve) kann aus den vorigen Simulationsdaten übernommen werden, da sich das Testfahrzeug nicht geändert hat. Das Vehicle File, das Emissionskennfeld und der Fahrzyklus müssen überarbeitet oder erstellt werden.

- **DRI-File:** Zur Erstellung der Fahrzyklen (DRI-File) für jede Konfiguration werden Zeit, Geschwindigkeit, Drehzahl und die Steigung benötigt. Um danach die Simulation mit den gemessenen Daten vergleichen zu können, werden im DRI-File auch die gemessenen Emissionsdaten hinterlegt. Um eine hohe Genauigkeit zu erzielen, wird für jede Fahrt ein eigener Zyklus erstellt.
- **MAP-File:** Aus den drei Fahrten wurde ein gemeinsames Emissionskennfeld mittels der CO<sub>2</sub> Leistungsinterpolationsmethode ermittelt. Bei der Fahrradträger-Fahrt war in den Emissionsdaten gegen Ende der Fahrt eine Regeneration (vermutlich des Dieselpartikelfilters) ersichtlich. Es konnten enorme CO Spitzen, teilweise NO<sub>x</sub> Spitzen und eine erhöhte Abgastemperatur festgestellt werden. Um keine Ergebnisse zu verfälschen, wurde der rote umrahmte Teil wie in Abbildung 5-10 ersichtlich weggeschnitten.

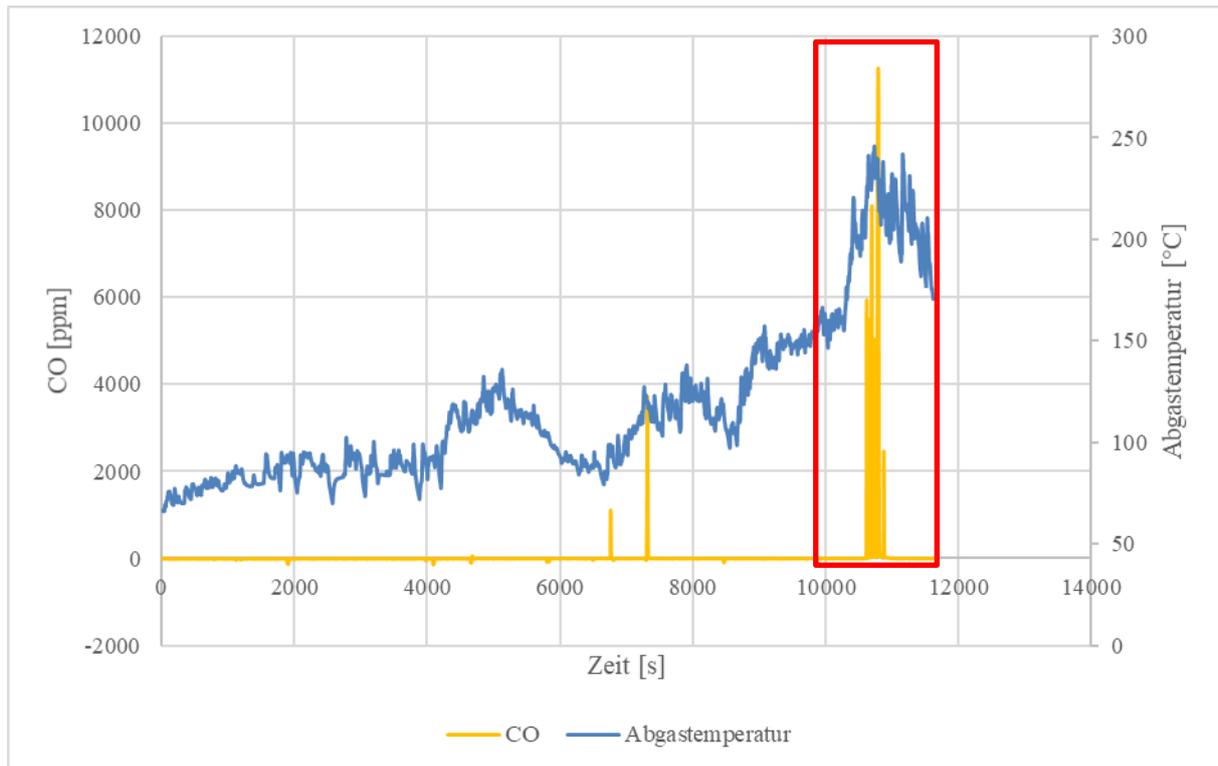


Abbildung 5-10 Darstellung der Regeneration bei der Fahrt mit Fahrradträger

- Vehicle-File:** Für jede RDE-Fahrt ist ein eigenes Vehicle-File notwendig, da die Fahrwiderstände aufgrund der unterschiedlichen Fahrzeugkonfiguration variieren. Um auf die Fahrwiderstände der jeweiligen Konfiguration zu kommen, wird von den  $f_{r0}$ - und  $c_w$ -Werten der Standardkonfiguration ausgegangen und mit Korrekturfaktoren auf die jeweilige Fahrzeugkonfiguration eingestellt. Diese Berechnungsschritte werden in dem folgenden Abschnitt erklärt.

### Korrekturfaktoren der Fahrwiderstände für die RDE-Simulation:

Aus  $R_0$  und  $R_2$  der Ausrollversuche wird auf  $f_{r0}$  und  $c_w$  geschlossen. Jede Konfiguration wird wieder auf die Standardkonfiguration referenziert. Die Formel (5-11) beschreibt den Korrekturfaktor für den Rollwiderstandsbeiwert der Konfiguration „i“ („i“ gilt als Laufvariable für alle Fahrzeugkonfigurationen der Ausrollversuche).

$$k_{fr0,i} = \frac{f_{r0\_SK}}{f_{r0,i}} \quad (5-11)$$

$k_{fr0,i}$ .....	Korrekturfaktor Rollreibung der Konfiguration „i“
$f_{r0\_SK}$ .....	Widerstandsbeiwert Rollreibung der Standardkonfiguration
$f_{r0,i}$ .....	Widerstandsbeiwert Rollreibung der Konfiguration „i“

Das gleiche gilt auch für den Korrekturfaktor des Luftwiderstandsbeiwertes. Dieser ist in Formel (5-12) dargestellt.

$$k_{cw_i} = \frac{c_{w\_SK}}{c_{w_i}} \quad (5-12)$$

$k_{cw_i}$ .....	Korrekturfaktor Luftwiderstand der Konfiguration „i“
$c_{w\_SK}$ .....	Luftwiderstandsbeiwert der Standardkonfiguration
$c_{w_i}$ .....	Luftwiderstandsbeiwert der Konfiguration „i“

Tabelle 5-7 gibt eine Übersicht über jene Korrekturfaktoren, welche für die drei RDE-Fahrten benötigt wurden.

Tabelle 5-7 Korrekturfaktoren der Fahrzeugkonfigurationen

	Standardkonfiguration	Dachbox	Fahrradträger	PEMS im Kofferraum	Sommerreifen hoher Druck
$k_{fro_i}$	1	1,05336	1,0258	1,01596	0,96490
$k_{cw_i}$	1	1,27516	1,62484	1,09263	0,99580

Die Faktoren „PEMS im Kofferraum“ und „Sommerreifen hoher Druck“ treten bei allen drei RDE-Fahrten auf, da das PEMS gezwungenermaßen immer eingebaut war und der Reifendruck auf hohen Druck eingestellt war. Um letztendlich auf den Roll- und Luftwiderstandsbeiwert der jeweiligen Konfiguration zu kommen, gelten die Formeln (5-13) bis (5-18).

- RDE Fahrt Standardkonfiguration

$$f_{r0\_RDE\_SK} = f_{r0\_SK} * k_{fro\_hoher\_Druck} * k_{fro\_PEMS} \quad (5-13)$$

$$c_{w\_RDE\_SK} = c_{w\_SK} * k_{cw\_hoher\_Druck} * k_{cw\_PEMS} \quad (5-14)$$

$f_{r0\_RDE\_SK}$ .....	Rollwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Standardkonfiguration
$f_{r0\_SK}$ .....	Rollwiderstandsbeiwert bei Standardkonfiguration
$k_{fro\_hoher\_Druck}$ .....	Korrekturfaktor für Fahrt mit Sommerreifen hoher Druck
$k_{fro\_PEMS}$ .....	Korrekturfaktor für Fahrt mit PEMS im Kofferraum
$c_{w\_RDE\_SK}$ .....	Luftwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Standardkonfiguration
$c_{w\_SK}$ .....	Luftwiderstandsbeiwert bei Standardkonfiguration
$k_{cw\_hoher\_Druck}$ .....	Korrekturfaktor für Fahrt mit Sommerreifen hoher Druck
$k_{cw\_PEMS}$ .....	Korrekturfaktor für Fahrt mit PEMS im Kofferraum

- RDE Fahrt mit Dachbox

$$f_{r0\_RDE\_DB} = f_{r0\_SK} * k_{fr0\_hoher\_Druck} * k_{fr0\_PEMS} * k_{fr0\_Dachbox} \quad (5-15)$$

$$c_{w\_RDE\_DB} = c_{w\_SK} * k_{cw\_hoher\_Druck} * k_{cw\_PEMS} * k_{cw\_Dachbox} \quad (5-16)$$

$f_{r0\_RDE\_DB}$	.....	Rollwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Dachbox
$k_{fr0\_Dachbox}$	.....	Korrekturfaktor für Fahrt mit Dachbox
$c_{w\_RDE\_DB}$	.....	Luftwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Dachbox
$k_{cw\_Dachbox}$	.....	Korrekturfaktor für Fahrt mit Dachbox

- RDE Fahrt mit Fahrradträger

$$f_{r0\_RDE\_FT} = f_{r0\_SK} * k_{fr0\_hoher\_Druck} * k_{fr0\_PEMS} * k_{fr0\_Fahrradträger} \quad (5-17)$$

$$c_{w\_RDE\_FT} = c_{w\_SK} * k_{cw\_hoher\_Druck} * k_{cw\_PEMS} * k_{cw\_Fahrradträger} \quad (5-18)$$

$f_{r0\_RDE\_FT}$	.....	Rollwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Fahrradträger
$k_{fr0\_Fahrradträger}$	.....	Korrekturfaktor für Fahrt mit Fahrradträger
$c_{w\_RDE\_FT}$	.....	Luftwiderstandsbeiwert RDE – Fahrt mit Fahrradträger
$k_{cw\_Fahrradträger}$	.....	Korrekturfaktor für Fahrt mit Fahrradträger

### Nebenverbraucherleistung:

Die drei RDE Fahrten wurden am selben Tag hintereinander durchgeführt. Da die Umgebungstemperatur von der ersten Messfahrt bis zur letzten von 24 °C auf bis 35°C gestiegen ist, wurde für jede Fahrt einzeln die Nebenverbraucherleistung berechnet. Mit der Temperatur änderte sich auch die Luftfeuchtigkeit und auch die Luftdichte. Weiters ist bei den Fahrten aufgefallen, dass sich auch der Gebläsemassenstrom der Fahrzeugklimaanlage mit steigender Umgebungstemperatur etwas gestiegen ist. Dieser Wert kann bei der NV-Leistungsberechnung jedoch nur geschätzt werden, da von den Herstellern keine Information zu entnehmen ist und der messtechnische Aufwand zu groß wäre.

### 5.5.2 Simulationsergebnisse der RDE Fahrten

In vorigen Abschnitten wurde erwähnt, dass der Unterschied zwischen den gemessenen und simulierten Emissionen möglichst gering sein sollte, wenn die ermittelten Korrekturfaktoren aus den Ausrolleversuchen korrekt sind. Mit PHEM ist es möglich, direkt den Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Daten darzustellen. In Tabelle 5-8 werden die Abweichungen der verschiedenen Emissionen in Prozent angegeben. Im Zuge dieser Masterarbeit gilt dem CO<sub>2</sub> die größte Aufmerksamkeit bei der Simulation. Bei Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Ergebnisse der prozentuellen Abweichungen, lässt sich daraus schließen, dass die Korrektur somit sehr gut funktioniert hat. Ein Unterschied der Simulation zur realen Messung,

welcher zwischen -0,64 % und 2,59 % liegt, ist ein gutes Ergebnis. 600 % Abweichung bei der CO Simulation des Fahrradträgers ist eine sehr hohe Abweichung, jedoch wegen der sehr niederen Basisemissionswerte nicht sehr aussagekräftig. Das Versuchsfahrzeug hat immer wieder kurze CO Spitzen während einer RDE Fahrt. Zwischen den Spitzen sind die CO Emissionen so gering, dass das PEMS Schwierigkeiten hat, diese Daten korrekt aufzuzeichnen. Es werden, laut PEMS teilweise sogar negative Emissionen ausgegeben, was aber unmöglich ist. Das Emissionskennfeld wurde aus allen drei Fahrten erstellt, somit sind auch diese CO Spitzen, die gelegentlich auftreten, enthalten. Bei der Fahrt mit dem Fahrradträger, trat bis auf den Teil mit der Regeneration, welcher weggeschnitten wurde, nahezu keine CO Spitze auf. Das erklärt auch die 600 % Abweichung. Betrachtet man die CO Emissionen in absoluten Werten, wird es noch einmal deutlicher, dass diese 600 % Abweichung nicht sehr aussagekräftig sind.

Absolutwerte CO:	gemessen	simuliert
[g/h]	0,0113	0,0568

Tabelle 5-8 Abweichung der Simulation zu gemessenen Emissionen in %

	ohne Aufbau	Dachbox	Fahrradträger
CO <sub>2</sub> _TP	-0.27 %	2.59 %	-0.64 %
CO_TP	-19.31 %	13.08 %	-599.63 %
NO_TP	11.48 %	15.45 %	8.95 %
NO <sub>x</sub> _TP	12.29 %	14.96 %	8.41 %
MassFlow	1.99 %	3.73 %	1.86 %

Um einen Überblick zu erhalten, in welcher Größenordnung die Emissionen der Fahrzeugkonfigurationen zueinanderstehen, werden Ergebnisse in [g/km] in Tabelle 5-9 dargestellt.

Tabelle 5-9 Emissionswerte der Fahrzeugkonfigurationen der RDE-Fahrten

	CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	Mass Flow [kg/s]
Ohne Aufbau	<b>143.1</b>	0.0055	0.0147	0.0159	0.0197
Dachbox	<b>151.0</b>	0.0339	0.0376	0.0427	0.0195
Fahrradträger	<b>173.5</b>	0.0010	0.0282	0.0351	0.0213

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Abschließend werden in einer Tabelle alle Korrekturfaktoren der verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen der Ausrollversuche bezogen auf die Standardkonfiguration dargestellt. Für den Einfluss des Seitenwindes ist es sinnvoll, den Korrekturfaktor in Abhängigkeit der Seitenwindstärke aus einem Diagramm abzulesen. Jeder Ausrollversuch wurde einmal mit und einmal ohne Windkorrektur ausgewertet, somit konnten Korrekturfaktoren bei verschiedenen Seitenwindgeschwindigkeiten ermittelt werden. Um den Verlauf etwas zu glätten, wurde die Kurve durch eine Trendlinie ersetzt. Die Kurve ist in Abbildung 6-1 ersichtlich. Der Rollwiderstand kann normalerweise mit steigendem Seitenwind nicht zunehmen. Hier hat es eine numerische Ursache, dass ein Teil der  $c_w$ -Steigerung  $f_{r0}$  zugeordnet wird. Tabelle 6-1 zeigt die restlichen Konfigurationen und die dazugehörigen Korrekturfaktoren. Was ist die Kernaussage dieser Korrekturfaktoren? Allgemein gesagt, erhöhen sich die Fahrwiderstände eines Fahrzeuges unter bestimmten Voraussetzungen um diese Faktoren. Fährt ein Fahrzeug zum Beispiel im Winter bei regnerischem Wetter mit einer Dachbox auf Skiurlaub, so sind der Luft- und Rollwiderstand mit den dazugehörigen Faktoren zu multiplizieren. Gemeint sind in diesem Fall die Faktoren von Winterreifen (Luftdruck beachten), Regeneinfluss und Dachboxeinfluss.

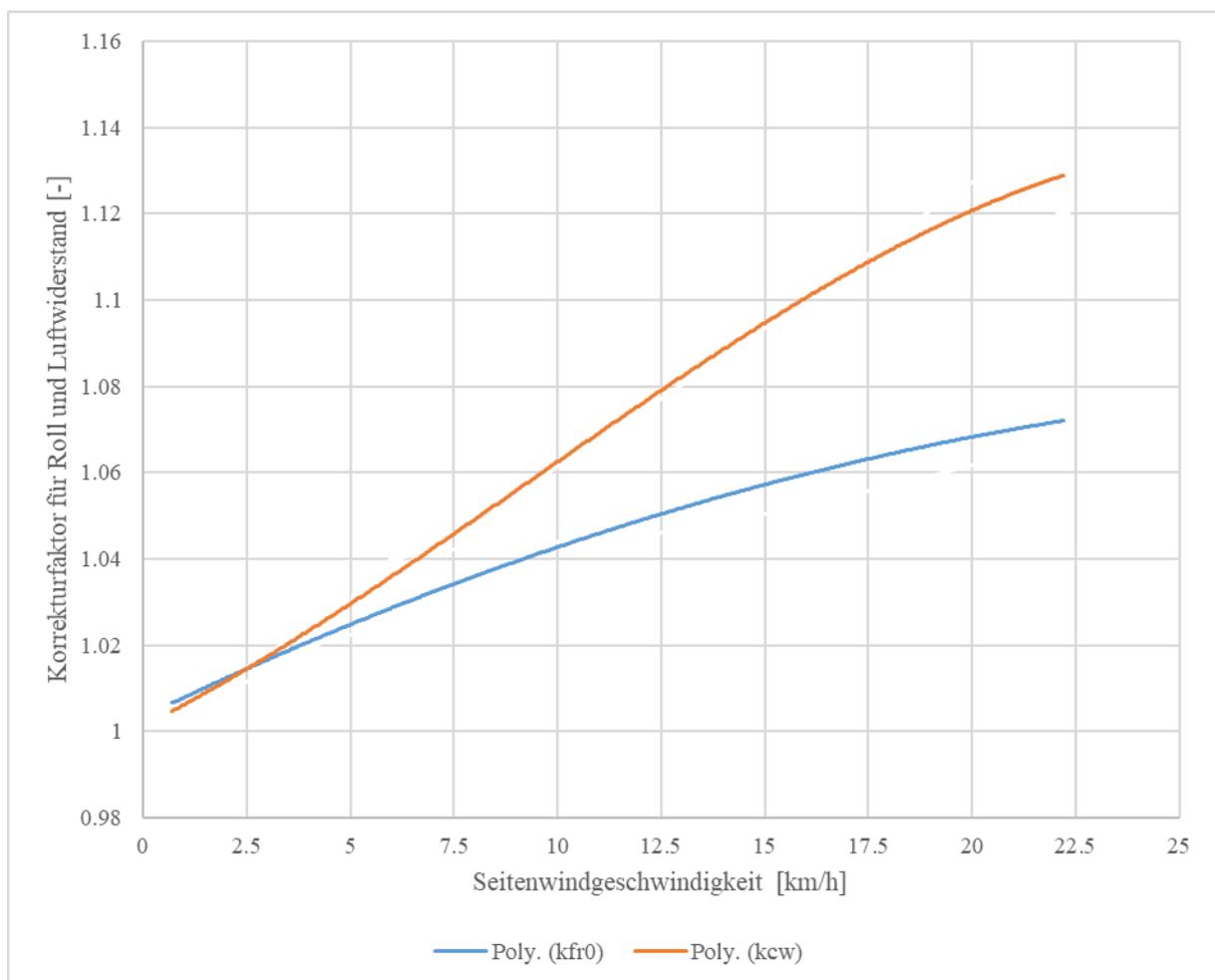


Abbildung 6-1 Roll- und Luftwiderstandskorrekturfaktor bei Seitenwind

Tabelle 6-1 Roll und Luftwiderstandskorrekturfaktoren der Fahrzeugkonfigurationen gegenüber Standardkonfiguration (Sommerreifen, normaler Reifendruck, trocken, ohne Aufbauten)

Konfiguration	$k_{fr0_i}$	$k_{cw_i}$
WR Normaler Druck	1.1187	1.1067
WR Hoher Druck	1.0165	1.1041
WR Niedriger Druck	1.1913	1.1786
Anhänger	1.0691	2.0225
Standardkonfiguration	1.0000	1.0000
Dachbox	1.0534	1.2752
Nasse Fahrbahn	1.2400	1.1184
Regen	1.2406	1.1695
SR Hoher Druck	0.9649	0.9958
SR Niedriger Druck	1.0370	1.0973
Fahrradträger	1.0258	1.6248
Ohne Beladung	0.9627	1.0654
PEMS Anhängerkupplung	1.0064	1.0929
PEMS Kofferraum	1.0160	1.0926

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Anhand der gewonnenen Informationen der Ausrollversuche und Simulationen mit PHEM kann gezeigt werden, dass die Emissionen im realen Straßenverkehr nicht nur von den Fahrstilen und Antriebstechnologien abhängen. Verschiedene Anbauteile und Umgebungsbedingungen haben einen Einfluss, der nicht unterschätzt werden sollte.

Die Daten aus den Ausrollversuchen der verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen liefern plausible Ergebnisse. Die daraus gewonnenen Korrekturfaktoren können durchaus für zukünftige Projekte und Simulationen verwendet werden.

Im Zuge der ermittelten Fahrwiderstände der Ausrollversuche konnten auch die bisherigen Daten eines HBEFA Durchschnittsfahrzeuges aktualisiert werden. Es wurden die geschätzten Daten durch die in dieser Arbeit erforschten Daten ersetzt. Dabei konnte eine Veränderung der Fahrwiderstände von bis zu 10 % im Vergleich zu den bisher geschätzten, mittleren Real-World Bedingungen festgestellt werden.

Durch die Kontrolle der abschließenden RDE-Fahrten und der dazugehörigen Simulation konnte die Erkenntnis erlangt werden, dass die Korrekturfaktoren gut funktionieren. Die gemessenen CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> Emissionen der RDE-Fahrten wurden in der Simulation mit den angewendeten Korrekturfaktoren mit minimalen Abweichungen dargestellt.

Weiterer Bestandteil dieser Arbeit war es die Nebenverbraucherleistung zu ermitteln. Dazu wurde ein bereits entwickeltes Berechnungstool für Klimaanlage überarbeitet und zusätzlich auf Daten des HBEFA zurückgegriffen. Durch die Kombination der beiden Informationsquellen kann die gesamte Nebenverbraucherleistung einfach berechnet werden. Außerdem wurde ein Kennfeld zur schnellen Abschätzung der Klimaleistung entwickelt.

Verbesserungsbedarf wäre bei der Untersuchung des Windeinflusses gegeben. Eine Anemometrie direkt am Fahrzeug würde wesentlich mehr Informationen bei Ausrollversuchen und auch RDE-Fahrten geben als eine stationäre Windmessung.

Vielleicht regt diese Masterarbeit auch zu einem Umdenken auf persönlicher Ebene an. Nimmt man zum Beispiel eine Dachbox nicht sofort ab, oder führt man eine Beladung im Fahrzeug unnütz mit, steigen der Kraftstoffverbrauch und die Emission nicht unwesentlich. Oder auch das Fahren mit Winterreifen bis in die Sommermonate gehört zu all jenen Faktoren, die die Umwelt beeinflussen. Würde jeder in unserer Gesellschaft etwas umdenken, könnte trotzdem viel Gutes für die Umwelt und den Klimawandel getan werden.

## Literatur

- [1] Umweltbundesamt: Verkehr beeinflusst das Klima. Wien.  
[https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen\\_verkehr/verkehr\\_treibhausgase/](https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen_verkehr/verkehr_treibhausgase/) [Zugegriffen: August 2019]
- [2] Schütz, T., Fahrzeugdynamik, Basiswissen für das Studium, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- [3] Reif, K., Dieselmotor-Management im Überblick, einschließlich Abgastechnik, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [4] DELPHI\_2018-2019\_Global\_emissions\_standards\_guide.pdf
- [5] Hausberger, S., Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil 1, Technische Universität Graz, 2018
- [6] Eichlseder, H., Thermodynamik Vorlesung, Technische Universität Graz, 2014
- [7] AVL List GmbH, AVL GAS PEMS UND AVL GAS PEMS IX, Product Guide, 2016
- [8] AVL List GmbH, AVL M.O.V.E PN PEMS iS, Product Guide, 2017
- [9] ÖAMTC Routenplaner, <https://www.oamtc.at/routenplaner/> [Zugegriffen August 2019]
- [10] Schreck, S., Messung und Simulation eines EURO 6 Diesel-PKW mit NSK, Technische Universität Graz, 2018
- [11] Windsor, S, Real World Drag Coefficient – Is It Wind Averaged Drag?, Loughborough UK, 2014
- [12] IVT-TU Graz, PHEM User Guide, Graz, 2017
- [13] Zal, P.: Automobil catalog the complete catalog of cars since 1954, <https://www.automobile-catalog.com/> [Zugegriffen: Mai 2019]
- [14] Opetnik, M., Messung und Simulation von Otto-PKW Emissionen für das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Graz, 2019
- [15] Statista, Durchschnittstemperatur im Jahr 2018 nach Bundesländern (in Grad Celsius), <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/249928/umfrage/temperatur-im-jahr-nach-bundeslaendern/> [Zugegriffen; August 2019]
- [16] Die europäische Kommission, Amtsblatt der Europäischen Union, Verordnung (EU) 2017/1152 vom 1. Juni 2017

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Steigerung der CO <sub>2</sub> – Emissionen ab 1990 [1] .....	1
Abbildung 2-1 a) Kräftebilanz und b) Leistungspfad von Tank zu Fahrbahn [2].....	3
Abbildung 2-2 Rollwiderstand in Abhängigkeit der Geschwindigkeit [2] .....	4
Abbildung 2-3 Typische Rohabgaszusammensetzung von Diesel- und Ottomotor [3].....	6
Abbildung 2-4 Vergleich von WLTC und NEDC .....	10
Abbildung 2-5 Funktionsprinzip des Gas PEMS [7] .....	12
Abbildung 2-6 Funktionsprinzip des PN PEMS [7].....	13
Abbildung 2-7 Prozesskette einer PKW Klimaanlage .....	14
Abbildung 2-8 Schema einer Kompressionskälteanlage.....	14
Abbildung 2-9 idealer und realer Kreisprozess einer Kompressionskältemaschine .....	15
Abbildung 2-10 Enthalpie des Dampfes [6].....	17
Abbildung 4-1 Versuchsfahrzeug BMW 218d.....	21
Abbildung 4-2 Prinzipskizze eines Ausrollversuches .....	22
Abbildung 4-3 Ausrollstrecke Gosdorf – Diepersdorf [9] .....	23
Abbildung 4-4 Wetterstation .....	24
Abbildung 4-5 VBOX VBIISX5 .....	24
Abbildung 4-6 Beispielhafte Rohdaten der VBOX mehrerer Ausrollversuche hintereinander	25
Abbildung 4-7 Druckkonfigurationen .....	26
Abbildung 4-8 PEMS im Kofferraum .....	26
Abbildung 4-9 PEMS auf der Anhängerkupplung .....	27
Abbildung 4-10 Fahrradträger mit zwei Fahrrädern .....	27
Abbildung 4-11 Konfiguration „Anhänger“ .....	28
Abbildung 4-12 Dachbox .....	28
Abbildung 4-13 Fahrzeugmassenmessung mit Wiegezellen .....	28
Abbildung 4-14 Höhenprofil bei Fahrt von Ost nach West .....	29
Abbildung 4-15 Steigungsverlauf der Strecke .....	30
Abbildung 4-16 Schematische Punktwolke und Polynom von $F_{w\_Luft\_Roll}$ .....	31
Abbildung 4-17 Darstellung „Ausreißer“ .....	33
Abbildung 4-18 Punktwolken der Fahrten .....	33
Abbildung 4-19 Resultierende Windwinkel $\psi$ .....	36
Abbildung 4-20 $c_w$ – Erhöhung bei resultierendem Winkel [11].....	37
Abbildung 4-21 Druckeinfluss Winterreifen.....	40
Abbildung 4-22 Druckeinfluss Sommerreifen .....	41
Abbildung 4-23 Einfluss Nässe und Beladung .....	42
Abbildung 4-24 Windeinfluss .....	43

Abbildung 4-25 Einfluss des PEMS.....	44
Abbildung 4-26 Einfluss der Aufbauten .....	45
Abbildung 4-27 Kontrolle der Windkorrektur .....	46
Abbildung 4-28 Einfluss auf die Radararbeit der verschiedenen Konfigurationen Teil 1 .....	47
Abbildung 4-29 Einfluss auf die Radararbeit der verschiedenen Konfigurationen Teil 2.....	47
Abbildung 5-1 Funktionsprinzip von PHEM.....	50
Abbildung 5-2 Vollast- & Schleppkurve .....	52
Abbildung 5-3 CO <sub>2</sub> Vergleich der Simulationsergebnisse mit RDE-Zyklus.....	53
Abbildung 5-4 CO <sub>2</sub> Vergleich der Simulationsergebnisse mit WLTC-Zyklus.....	54
Abbildung 5-5 CO <sub>2</sub> Punktwolke.....	60
Abbildung 5-6 Prinzipskizze der Luftseite.....	61
Abbildung 5-7 Prozess der Luftseite .....	62
Abbildung 5-8 Klimaleistungskennfeld für Außenluftbetrieb .....	62
Abbildung 5-9 Streckenverlauf der Ries-Route .....	64
Abbildung 5-10 Darstellung der Regeneration bei der Fahrt mit Fahrradträger.....	66
Abbildung 6-1 Roll- und Luftwiderstandskorrekturfaktor bei Seitenwind (die Korrektur $k_{fr0}$ dürfte einen etwa linearen, anteiligen Effekt auf den Luftwiderstand beschreiben und nicht eine Änderung des Rollwiderstandes).....	70

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Verlauf der Abgasnormen seit 2009 für PKW in der EU [4] .....	8
Tabelle 2-2 Auszug aus den Richtlinien für RDE Fahrten [4] .....	10
Tabelle 4-1 Fahrzeugdaten .....	21
Tabelle 4-2 Fahrzeugkonfigurationen .....	25
Tabelle 4-3 Koeffizienten und Widerstandsverhältnisse bei bestimmter Fahrzeugmasse .....	34
Tabelle 4-4 Korrekturfaktor Umgebungsbedingungen .....	35
Tabelle 4-5 Steigerung des cw-Wertes in Prozent in Abhängigkeit des Anströmwinkels.....	37
Tabelle 4-6 Übersicht der Korrekturen .....	38
Tabelle 4-7 Übersicht Widerstandsbeiwerte .....	38
Tabelle 5-1 Iputdaten für PHEM.....	50
Tabelle 5-2 Fahrwiderstand WLTC und Korrekturfaktoren der Luft- und Rollwiderstände von Opetnik.....	56
Tabelle 5-3 Unterschiede der Bezugsbedingungen .....	57
Tabelle 5-4 Korrekturfaktoren nach Ausrollerdaten .....	58
Tabelle 5-5 Vergleich der Widerstandsbeiwerte nach Methode .....	59
Tabelle 5-6 Auflistung der Nebenverbraucher inklusive der Leistungen .....	63
Tabelle 5-7 Korrekturfaktoren der Fahrzeugkonfigurationen .....	67
Tabelle 5-8 Abweichung der Simulation zu gemessenen Emissionen in % .....	69
Tabelle 5-9 Emissionswerte der Fahrzeugkonfigurationen der RDE-Fahrten .....	69
Tabelle 6-1 Roll und Luftwiderstandskorrekturfaktoren der Fahrzeugkonfigurationen .....	71