

Masterarbeit

Korrekturfunktionen für CO₂ zum Ausgleich von Variabilitäten bei PKW- Rollenmessungen

David Leitner, BSc

Eingereicht am Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik der Technischen Universität Graz

Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Helmut Eichlseder

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Stefan Hausberger

Graz, 20. Mai 2014



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



Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit bildet den Abschluss meines Studiums Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau an der Technischen Universität Graz.

Durch meine berufliche Tätigkeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik im Fachbereich Emissionen bekam ich einen Einblick in den viel diskutierten Themenbereich Verkehr und Emissionen. Um mich noch weiter in diese Thematik zu vertiefen, besuchte ich die Vorlesungen „Schadstoffbildung und Emissionsminimierung“ und „Umweltauswirkungen des Verkehrs“. Die Problemstellung dieser Masterarbeit ermöglichte mir sowohl meine Kenntnisse im Bereich PKW-Emissionen als auch mein Interesse an Prüfstandstechnik zu verbinden.

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder bedanken. Er gab mir die Möglichkeit sowohl am Institut beruflich tätig zu sein als auch meine Masterarbeit verfassen zu dürfen.

Besonderer Dank gilt meinem betreuenden Professor Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger für seine Denkanstöße als auch für seine fachliche Betreuung meiner Masterarbeit. Ebenso möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Blassnegger und Herrn Gerald Nöhrer für die tatkräftige Unterstützung während meiner Masterarbeit bedanken.

Bei meinen Kollegen am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik möchte ich mich ebenfalls bedanken. Besonders hervorheben möchte ich dabei Dipl.-Ing. Werner Stadlhofer und Dipl.-Ing. Antonius Kies, die aufgrund ihres Fachwissens wertvolle Diskussionspartner darstellten.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für die Unterstützung während des Studiums bedanken. Ein ganz besonderer Dank gilt dabei meiner langjährigen Freundin, die mir die ganze Studienzeit über den nötigen Rückhalt gab.

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	IV
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	VII
ZUSAMMENFASSUNG	VIII
ABSTRACT	IX
1 EINLEITUNG	1
1.1 PROBLEMSTELLUNG	1
1.2 ZIELDEFINITION	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	3
2.1 FAHRZYKLEN	3
2.1.1 NEDC	3
2.1.2 WLTC	3
2.2 BESTIMMUNG DER EIGENVERLUSTE	5
2.2.1 NEDC	7
2.2.2 WLTP	8
2.3 VORKONDITIONIERUNG UND KONDITIONIERUNG	9
2.3.1 NEDC	9
2.3.2 WLTC	9
2.4 ERMITTLUNG DER ÄQUIVALENTEN SCHWUNGMASSE	9
2.4.1 NEDC	9
2.4.2 WLTC	10
2.5 FAHRZEUG-WILLANSLINIEN	11
2.5.1 Erstellung der Fahrzeug-Willanslinien	11
2.5.2 Einfluss der Motordrehzahl auf die Fahrzeug-Willanslinie	13
2.5.3 Fahrzeug-Willanslinien zur Korrektur der Generatorleistung	15
2.5.4 Fahrzeug-Willanslinien im NEDC und WLTC	16
2.6 LADESTRATEGIEN IN BORDNETZEN	17
3 KORREKTURFUNKTIONEN	20
3.1 KORREKTUR DER LADEBILANZ	20
3.1.1 Variante A	21
3.1.2 Variante B	22
3.1.3 Variante C	24
3.1.4 Gegenüberstellung der Variante	26
3.2 KORREKTUR VON GESCHWINDIGKEITSABWEICHUNGEN	27
3.2.1 Korrektur der Geschwindigkeitsabweichung	28
3.2.2 Korrektur der zurückgelegten Strecke	29
3.3 KORREKTUR DER SIMULIERTEN FAHRWIDERSTÄNDE	31
3.3.1 Korrektur der Fahrwiderstände	31
3.4 KORREKTUR DER STARTTEMPERATUR	34
3.5 KOMBINATION DER KORREKTURFUNKTIONEN	38
4 ERGEBNISSE	40
4.1 BEWERTUNG DER VARIANTEN ZUR KORREKTUR DER LADEBILANZ	40
4.2 KORREKTUR DER CO ₂ -WERTE MITTELS KORREKTURFUNKTIONEN	45
4.2.1 Fahrzeug 1	45
4.2.2 Fahrzeug 2	48
4.2.3 Fahrzeug 3	49
4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse	52
5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	53
LITERATUR	55
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	56
TABELLENVERZEICHNIS	58

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

a	m/s^2	Beschleunigung
A	m^2	Stirnfläche
A_0	N	Eigenverlustkoeffizient
A_1	Ns/m	Eigenverlustkoeffizient
A_2	Ns^2/m^2	Eigenverlustkoeffizient
a_{ist}	m/s^2	Momentanbeschleunigung
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
E	J	Energie
f	Hz	Frequenz
f_{Roll}	-	Rollwiderstandsbeiwert
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
I	A	Elektrischer Strom
m	kg	Masse
m_{KFZ}	kg	Fahrzeugmasse
n	U/min	Motordrehzahl
P	W	Leistung
p	%	Statistische Genauigkeit
R	Ω	Widerstand
R_0	N	Fahrwiderstandskoeffizient
R_1	Ns/m	Fahrwiderstandskoeffizient
R_2	Ns^2/m^2	Fahrwiderstandskoeffizient
s	m	Strecke
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
U	V	Elektrische Spannung
v	m/s	Geschwindigkeit
W	Ws	Arbeit

Griechische Formelzeichen

η_{Antrieb}	-	Antriebsstrangwirkungsgrad
η_{Gen}	-	Generatorwirkungsgrad
$\eta_{\text{Mot-Gen}}$	-	Übertragungswirkungsgrad Motor-Generator
ρ	$[\text{kg/m}^3]$	Dichte

Operatoren und Bezeichnungen

\sum	Summe
Δ	Differenz zweier Größen

Weitere Indices und Abkürzungen

ΔB	Abweichungen vom Soll-Ladezustand der Batterie
ΔE_{REESS}	Prozentuelle Änderung des Ladezustandes
ΔR	Abweichung von den Fahrwiderständen
Δs	Abweichung von der Sollstrecke
ΔT	Abweichung von der Solltemperatur
Δv	Abweichung von der Zielgeschwindigkeit
AGM	Absorbent Glass Mat
Batt	Batterie
CD	Coast down, Ausroller
HC	Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CVS	Constant Volume Sampling
D _F	Dilution Factor, Verdünnungsfaktor
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECE	Economic Commission for Europe, Europäische Wirtschaftskommission
E _{Fuel}	Zugeführte Kraftstoffenergie
Entladen	Batterie entladen
ERMES	European Research on Mobile Emission Sources
EU	Europäische Union
EV	Eigenverluste
extra high	Extra high speed-Phase im WLTC
FC	Kraftstoffverbrauch
F _L	Kraft zum Überwinden des Luftwiderstands
FMEP	Friction mean effective pressure, Reibmitteldruck
F _{Roll}	Kraft zum Überwinden des Rollwiderstands
Fwdst	Fahrwiderstand
Fzg	Fahrzeug
GEN	Generator
high	High speed-Phase im WLTC
I	Innen
ist	Messwert

k	Steigung
KFZ	Kraftfahrzeug
k_{Willans}	Willansfaktor
L	Luft
Laden	Batterie laden
Leer_max	Leergewicht des voll ausgestatteten Fahrzeugs
low	Low speed-Phase im WLTC
medium	Medium speed-Phase im WLTC
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
neg	negativ
PKW	Personenkraftwagen
pos	positiv
RCB	REESS Charge Balance
REESS	Rechargeable Electric Energy Storage System
Ref	Referenz
rot	rotatorisch
stda	Standardabweichung
Schlepp	Schleppbetrieb
SOC	State of Charge
soll	Sollwert
Start	Testbeginn
TUG	Technische Universität Graz
UN	United Nations, Vereinte Nationen
v	Verlust
Veh	Vehicle, Fahrzeug
WLTC	Worldwide harmonized Light duty Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

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.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

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 marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Zusammenfassung

Als Teil eines Projektes am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz hat diese Arbeit das Ziel, Korrekturfunktionen für den ab 2017 in Kraft tretenden Fahrzyklus WLTC (Worldwide harmonized Light duty Test Cycle) zu finden. Diese Korrekturfunktionen sollen Abweichungen von Soll-Werten bei Rollenmessungen erfassen und diese in äquivalente Änderungen des Kraftstoffverbrauchs umrechnen. Konkret sollen Korrekturfunktionen zu den Abweichungen von der Zielgeschwindigkeit, der Temperatur zu Testbeginn, den Fahrwiderständen und der Ladebilanz der Batterie gefunden werden.

In einem ersten Schritt wurden die Auswirkungen von Variabilitäten der einzelnen Größen auf den Kraftstoffverbrauch untersucht. Dazu wurden Testfahrzeuge auf der Rolle gemessen. Um den Einfluss einzelner Größen auf den Kraftstoffverbrauch beurteilen zu können, wurden die Rahmenbedingungen variiert und die Änderung der CO₂-Emissionen dokumentiert. Dabei zeigte sich, dass beispielsweise eine Abweichung von der Zielgeschwindigkeit im WLTC die CO₂-Emissionen in zweierlei Hinsicht beeinflusst. Einerseits führen Geschwindigkeitsabweichungen zu Differenzen bei der gemessenen Radleistung. Andererseits weicht die im Fahrzyklus zurückgelegte Strecke von jener Strecke ab, die unter Einhaltung der Zielgeschwindigkeit erreicht werden würde.

Da die Geschwindigkeit direkt die Radleistung beeinflusst, können diese Abweichungen mit sogenannten „Fahrzeug-Willanslinien“ korrigiert werden. Diese Linien beschreiben den Zusammenhang zwischen der Radleistung und den CO₂-Emissionen. Aus einer Änderung der Radleistung kann mit Hilfe der Steigung der Willanslinie die Änderung in den CO₂-Emissionen berechnet werden. Um die eingestellten Fahrwiderstände auf der Rolle zu überprüfen, kann nach einem WLTC das Fahrzeug analog zu Ausrollversuchen auf der Straße ausgerollt werden. Unterscheiden sich die auf der Rolle ermittelten Fahrwiderstände von denen, die auf der Straße ermittelt wurden, so kann dieser Unterschied in eine Differenz der Radleistung umgerechnet und anschließend mit der Willanslinie korrigiert werden. Zusätzlich wird im WLTC auch die Ladebilanz der Batterie berücksichtigt. Dazu wird die der Batterie zugeführte Arbeit der abgeführten gegenübergestellt. Herrscht ein Ungleichgewicht, kann der gemessene Verbrauchswert mit Hilfe von motorspezifischen Willansfaktoren korrigiert werden. Eine wesentliche Einflussgröße spielt auch die Öl- und Kühlwassertemperatur bei Testbeginn. Da diese im WLTC zwischen 23°C ±2°C liegen soll, beeinflusst eine Variation der Starttemperatur u.a. das Reibungsverhalten im gesamten Antriebsstrang und damit auch die erzielbaren CO₂-Emissionen im Fahrzyklus. Auf Basis der durchschnittlichen Mehrverbräuche von Diesel- und Benzinfahrzeugen, konnte eine lineare Funktion gefunden werden, die abhängig von der Starttemperatur den gemessenen CO₂-Wert korrigiert.

Unter Anwendung aller oben genannten Korrekturfunktionen können somit die gemessenen Verbrauchswerte hinsichtlich ihrer Abweichungen korrigiert werden. Die Korrekturfunktionen führen zu einer deutlichen Angleichung der gemessenen Verbräuche. Die Vergleichbarkeit von Messungen kann dadurch deutlich gesteigert werden. Es können somit auch Verbrauchspotentiale objektiv beurteilt werden, weitgehend unabhängig von Fahrer-, Temperatur- oder Prüfstandseinflüssen.

Abstract

This master thesis has the objective to find correction functions for the WLTC (Worldwide harmonized Light duty Test Cycle) which come into force in 2017. The aim is to develop correction functions for deviations against target speed, road load, SOC (State Of Charge) and temperature at cycle start.

Initially vehicles were tested on the chassis dynamometer to investigate the impact of deviations on CO₂. A Variation of the test conditions led to changes in CO₂ emissions. The tests showed that deviations against target speed influence the fuel consumption in two different ways. Firstly speed deviations cause differences in wheel power and secondly the driven distance deviates from the target distance. Coast downs after the tests can be used to show the gap between the target and the simulated road loads.

Deviations which directly influence the power at the wheel (speed deviations, road load settings) can be corrected with vehicle Willans lines. These lines can be computed from the chassis dynamometer tests from the four phases of the WLTC by plotting the average CO₂ emission [g/s] over the average wheel power [kW] of the phase. The gradient of this line gives the “Willans coefficient”. It describes the additional CO₂ emissions due to an additional power demand. The SOC correction follows the same way but instead of the computed Vehicles Willans coefficient generic engine related Willans functions are used.

The temperature at cycle start has a big influence on the friction losses during the warm up phase. Due to the fact that the warm up strategies may vary between makes and models the idea was to find a linear equation which describes the percentage additional CO₂ emissions depending on the difference between temperature at cycle start and target temperature.

The application of the correction functions for all the described deviations leads to better repeatability of CO₂ values for every tested vehicle. So the usage of correction functions is a proper way to increase the repeatability of measurements. Also tests beside the type approval test with typically larger deviations can be corrected. Correction functions also allow an objective view on e.g. fuel saving technologies by correcting driver, temperature or dynamometer influences.

1 Einleitung

Mit 2017 soll in der EU eine neue Vorschrift zur Emissionsmessung bei PKW am Rollenprüfstand in Kraft treten. Dieses sogenannte WLTP (Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure)-Verfahren umfasst eine Reihe neuer Vorschriften, unter deren Berücksichtigung in Zukunft Verbrauch und Abgasemissionen eines Fahrzeuges am Prüfstand ermittelt werden müssen. Im WLTP enthalten ist auch ein neuer Fahrzyklus, der sogenannten WLTC (Worldwide harmonized Light duty Test Cycle). Dieser Zyklus soll den derzeit gültigen NEDC (New European Driving Cycle) ersetzen. Für den WLTC vorgesehen sind auch Korrekturfunktionen, die Abweichungen vom Sollwert, auch wenn sie innerhalb der Toleranzen liegen, korrigieren. So wird z.B. auch die über den Zyklus der Batterie zu- und abgeführte elektrische Arbeit berechnet. Im Falle einer nicht ausgeglichenen Ladebilanz der Batterie wird der gemessene CO₂-Wert korrigiert.

1.1 Problemstellung

Um den Aufwand beim Messen in Grenzen zu halten und um ungültige Messungen zu vermeiden gibt es bei jedem Fahrzyklus Toleranzgrenzen, innerhalb derer ein bestimmter Wert liegen muss, damit die Messung trotzdem noch gültig ist. Im WLTC gibt es u.a. Toleranzgrenzen für die Fahrgeschwindigkeit, Öl- und Kühlwassertemperatur bei Testbeginn und den Ladezustand der Batterie. Zusätzlich sollen noch eventuelle Abweichungen von den ermittelten Fahrwiderständen auf der Rolle gemessen und korrigiert werden. Innerhalb der Toleranzgrenzen kann der Kraftstoffverbrauch jedoch beeinflusst werden. Daher sind für den WLTC Korrekturfunktionen vorgesehen, um die Abweichungen durch derartige Beeinflussungen zu minimieren. Die Herausforderung liegt darin, die Abweichungen vom Soll-Wert in äquivalente Änderungen des CO₂-Wertes umzurechnen.

1.2 Zieldefinition

Ziel dieser Arbeit ist es, Korrekturfunktionen zu entwickeln, die den auf der Rolle gemessenen Verbrauchswert korrigieren, falls Abweichungen hinsichtlich

- Geschwindigkeit
- Fahrwiderständen
- Ladebilanz der Batterie
- Öl- und Kühlwassertemperatur bei Testbeginn

aufgetreten sind.

Dazu werden in Kapitel 2 einige theoretische Grundlagen zur Leistungsmessung erklärt. Weiters werden die grundlegenden Unterschiede zwischen NEDC und WLTC hinsichtlich Vorkonditionierung und Rollenkalibrierung beschrieben. Außerdem wird näher darauf eingegangen, wie die Abweichung einer Messgröße in eine äquivalente Änderung des Kraftstoffverbrauchs umgerechnet werden kann. Im Zuge dessen werden die Konstruktion und der Einsatz von sogenannten Fahrzeug-Willanslinien erklärt.

Im dritten Kapitel wird auf die einzelnen Korrekturfunktionen im Detail eingegangen. Es werden die Ursachen von jeweiligen Abweichungen sowie deren Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch erklärt. Die Berechnung der Abweichungen, sowie deren Korrektur ist ebenso Bestandteil dieses Kapitels. Außerdem enthält es eine Beschreibung zur Vorgehensweise bei der Anwendung der Korrekturfunktionen.

Das vierte Kapitel zeigt welchen Einfluss die Abweichungen auf den gemessenen Verbrauch haben anhand von vier gemessenen Fahrzeugen auf der PKW-Rolle. Außerdem zeigt es die Verbesserungen, die durch die Anwendung von Korrekturfunktionen erzielt werden können.

Den Abschluss bildet das fünfte Kapitel. Dieses Kapitel fasst die gesammelten Ergebnisse noch einmal zusammen, stellt Vor- und Nachteile der Korrekturfunktionen gegenüber und gibt einen kurzen Überblick über weitere Korrekturfunktionen, die im WLTC implementiert werden können.

2 Theoretische Grundlagen

Einleitend ein Überblick zu den Rahmenbedingungen (Kalibrierung, Vorkonditionierung, Ermittlung der Fahrzeugmassen) beim WLTP und NEDC sowie den grundsätzlichen Zusammenhängen zwischen Leistung und Verbrauch, die später die Basis einiger Korrekturfunktionen bilden.

2.1 Fahrzyklen

Die Messdaten für die vorliegende Arbeit wurden durch Messungen am Rollenprüfstand gewonnen. Als Fahrzyklus diente dabei neben dem NEDC auch der WLTP, da die Korrekturfunktionen später auf diesen Zyklus aufbauen sollen.

2.1.1 NEDC

Der NEDC (New European Driving Cycle) oder im Deutschen als NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) bezeichnet dient seit 1996 als Prüfzyklus für die Typengenehmigung von PKW. Kritiker bemängeln, dass seine Charakteristik nur wenig dem realen Fahrbetrieb ähnelt:

- Häufige Leerlaufphasen
- Sanfte Beschleunigungsphasen, daher niedriglastige Fahrweise
- Kaum Autobahnanteil (Maximalgeschwindigkeit von 120km/h muss nur 10s lang gefahren werden)

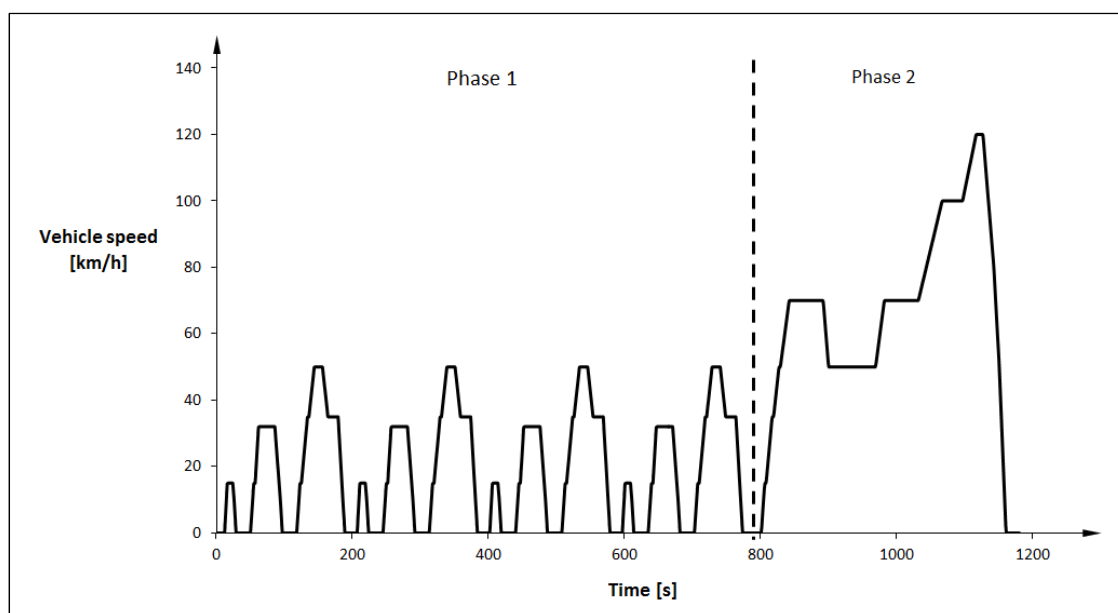


Abbildung 2-1: New European Driving Cycle (NEDC)

2.1.2 WLTC

Für 2017 hat das Europäische Parlament die Einführung des WLTP geplant. In diesem neuen Vorschriftenpaket zur Typengenehmigung ist auch ein neuer Fahrzyklus enthalten. Der WLTC ist ein transienter Fahrzyklus und wurde auf Basis realer Fahrdaten erstellt. Dadurch soll das reale Fahrverhalten am Prüfstand besser abgebildet werden können [1].

Um die Fahrbarkeit des Fahrzyklus für alle Fahrzeuge zu garantieren, werden fahrzeugspezifisch Leistung, Gewicht und Höchstgeschwindigkeit berücksichtigt [1]:

- Spezifische Fahrzyklen in Abhängigkeit vom Verhältnis Leistung/Leergewicht und Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs(Tabelle 1).
- Der Fahrzyklus wird nach unten skaliert nach einer vorgeschriebenen mathematischen Methode, sollte das Fahrzeug mit einem unverhältnismäßig hohen Vollgasanteil gefahren werden müssen, um dem Geschwindigkeitsverlauf folgen zu können.
- Gangwechsellpunkte werden ebenfalls nach einer vorgeschriebenen Methode individuell auf das Fahrzeug abgestimmt um die Fahrbarkeit unter realen Bedingungen zu garantieren.

Tabelle 1: Klassifizierung der Testfahrzeuge im WLTP

	Verhältnis Leistung/Leergewicht	Höchstgeschwindigkeit
Class 1	≤ 22 W/kg	
Class 2	> 22 und ≤ 34 W/kg	
Class 3a	> 34 W/kg	< 120 km/h
Class 3b	> 34 W/kg	≥ 120 km/h

Alle konventionellen europäischen PKW fallen in die Klasse 3b. Der dazugehörige Fahrzyklus kann in vier Phasen eingeteilt werden und weist einige charakteristische Unterschiede zum NEDC auf:

- Längere Zykluszeit (1800s zu 1181s im NEDC)
- Höhere Beschleunigungen, damit generell höherlastiger
- Weniger Leerlaufphasen

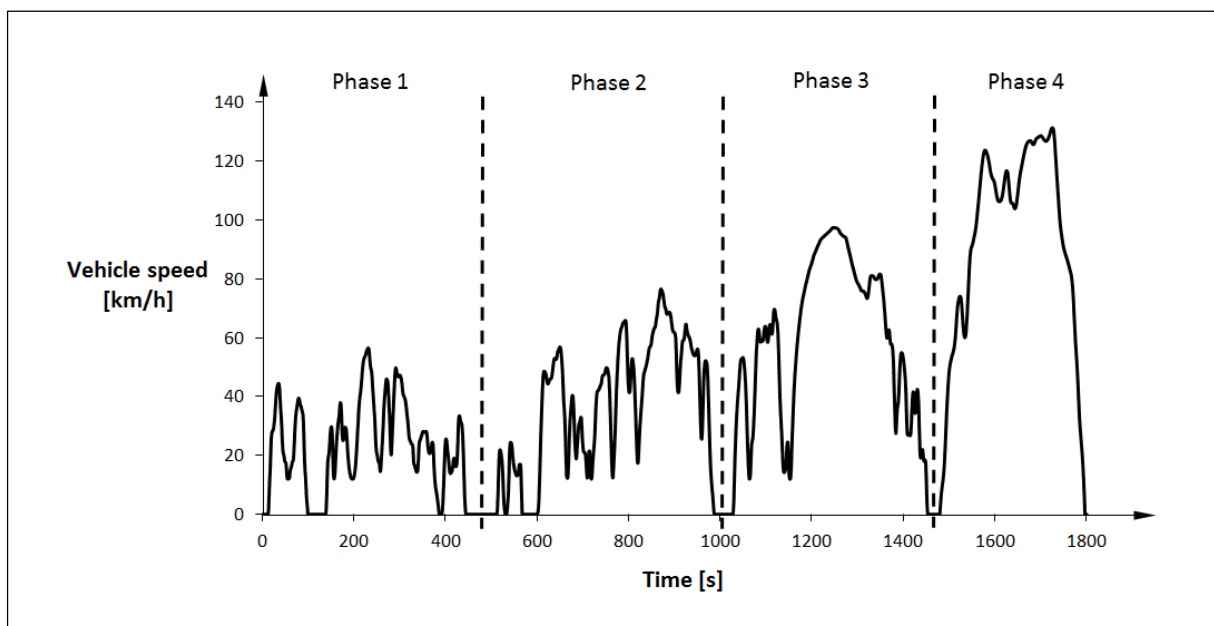


Abbildung 2-2: WLTC (Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle) für Fahrzeuge der Klasse 3b

Tabelle 2: Phasen im WLTC für Fahrzeuge der Klasse 3b

		Phasenlage	Phasendauer	Höchstgeschwindigkeit
Phase 1	Low Phase	0-589s	589s	56,5 km/h
Phase 2	Medium Phase	590-1022s	433s	76,6 km/h
Phase 3	High Phase	1023-1477s	455s	97,4 km/h
Phase 4	Extra High Phase	1478-1800s	323s	131,3 km/h

In Summe bringt die Einführung des WLTP als Standardprüfverfahren zur Typengenehmigung von PKW sowohl für die Hersteller als auch für die Kunden Vorteile [1]:

- Reale Fahrbedingungen werden im WLTC besser repräsentiert als im NEDC, damit ergeben sich genauere Informationen für den Kunden hinsichtlich Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch
- Durch den realitätsnäheren Fahrzyklus helfen die auf den Fahrzyklus hin optimierten Spritsparmaßnahmen auch im realen Fahrbetrieb den Kraftstoffverbrauch zu senken
- Durch globale Implementierung des WLTP-Prüfverfahrens können die Kosten für die Autohersteller gesenkt werden (falls dies erfolgt).

2.2 Bestimmung der Eigenverluste

Im folgenden Kapitel werden die wesentlichen Unterschiede zwischen NEDC und WLTP bei der Einstellung der Fahrwiderstände auf der Rolle beschrieben. Bevor das Fahrzeug überhaupt auf die Rolle gestellt wird, müssen zuerst die Fahrwiderstände bestimmt werden. Auf einer ebenen Fahrbahn muss das Fahrzeug folgende Fahrwiderstände überwinden [2]:

- Rollwiderstand
- Luftwiderstand
- Beschleunigungswiderstand
- Schlupf

Der Schlupf ist im NEDC und im WLTC gering und wird daher im Allgemeinen vernachlässigt. Da das Fahrzeug am Rollenprüfstand nicht bewegt wird, muss der Luftwiderstand von der Rolle simuliert werden. Der Luftwiderstand wird berechnet aus [8]:

$$F_L = \frac{1}{2} * c_w * \rho_L * A * v^2 \quad (2-1)$$

Der Rollwiderstand ist abhängig von der Kombination Reifen-Fahrbahn. Außerdem steigt er mit zunehmender Belastung, Geschwindigkeit und abnehmendem Reifendruck. Auf einer ebenen Fahrbahn setzt sich der Rollwiderstand aus Fahrzeuggewicht und dem Rollwiderstandsbeiwert f_{Roll} zusammen [8]:

$$F_{Roll} = m_{KFZ} * g * f_{Roll} \quad (2-2)$$

Der Rollwiderstandsbeiwert f_{Roll} wird oft auch als geschwindigkeitsabhängiges Polynom dargestellt.

Der Beschleunigungswiderstand wird auf dem Prüfstand durch Schwungmassen, die an der gebremsten Rolle gekuppelt sind, simuliert. Der Roll- und der Luftwiderstand werden nicht berechnet, sondern durch Ausrollversuche auf einer ebenen Fahrbahn empirisch bestimmt. Dabei wird das betriebswarme Fahrzeug auf eine definierte Geschwindigkeit gebracht (z.B. 120 km/h). Anschließend wird ausgekuppelt und das Fahrzeug rollt unter Vermeidung von Lenk- und Bremsvorgängen aus. Dabei stellt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen der Verzögerungskraft und den Fahrwiderständen ein. Während des Ausrollvorgangs werden die Geschwindigkeit und die Zeit gemessen. Dadurch lassen sich die Beschleunigungen in jedem Zeitpunkt berechnen. Die Beschleunigung multipliziert mit der Fahrzeugmasse (die rotatorischen Massen werden ebenfalls berücksichtigt) ergibt die Summe aus Roll- und Luftwiderstand [2].

$$(m_{\text{KFZ}} + m_{\text{Beladung}} + m_{\text{rot}}) * a_{\text{KFZ}} = F_{\text{Roll}} + F_L \quad (2-3)$$

Da Roll- und Luftwiderstand geschwindigkeitsabhängige Größen sind, werden diese über der Fahrgeschwindigkeit aufgetragen. Die Fahrwiderstandskurve kann mit einem Ausgleichspolynom 2. Ordnung mathematisch beschrieben werden.

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

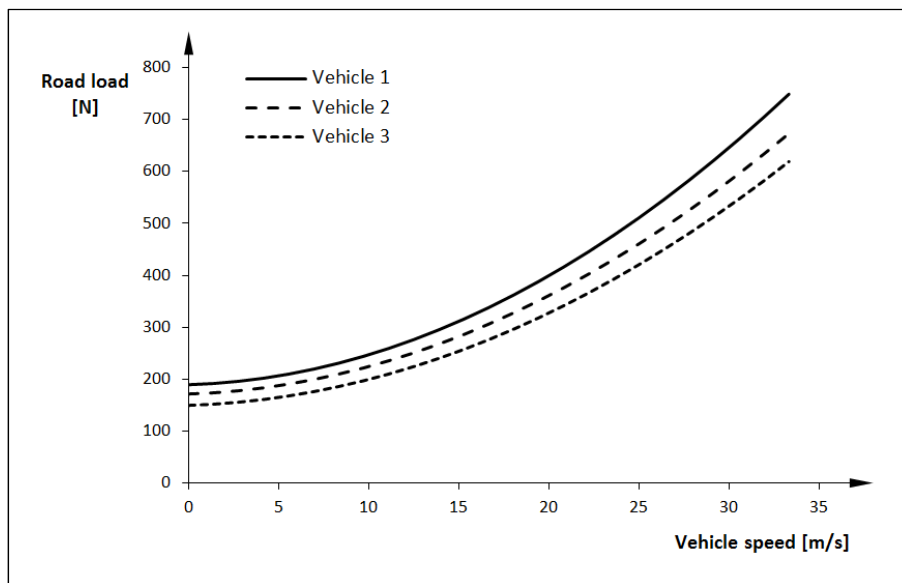


Abbildung 2-3: Fahrwiderstände der am Prüfstand vermessenen Fahrzeuge

Damit auf der PKW-Rolle die Fahrwiderstände der Straße dargestellt werden können, muss die Rolle entsprechend dem ermittelten Fahrwiderstandspolynom gebremst werden. Die Rolle selbst stellt aber auch schon einen Widerstand dar. Reibungs- und Übertragungsverluste von der Rolle bis zur Bremse sowie der Rollwiderstand zwischen Rolle und Rad müssen vom Motor überwunden werden. Diese Eigenverluste werden mittels eines Loss-Runs am Prüfstand ermittelt und ebenfalls als Polynom abgebildet. Die Vorgehensweise mit dem Fahrzeug auf der Rolle ist dabei analog zu einem Ausrollversuch auf der Straße. Das Fahrwiderstandspolynom wird aber bei NEDC und WLTP auf unterschiedliche Art und Weise bestimmt.

2.2.1 NEDC

Die Bestimmung der Eigenverluste von Fahrzeug und Rolle kann im NEDC durch iteratives Durchführen von Loss runs vorgenommen werden. Die Vorgehensweise beim Loss run ist gleich wie bei einem Ausrollversuch, nur dass das Fahrzeug während der Ausrollphase nicht von der Rollenbremse gebremst wird. Bevor die Loss runs durchgeführt werden können, muss das Fahrzeug warmgefahren werden, um alle reibungsrelevanten Bauteile auf ein einheitliches Temperaturniveau zu bringen [2]. Zur Bestimmung der Eigenverluste durch einen Loss run muss zu Beginn ein Geschwindigkeitsbereich definiert werden, innerhalb dessen die Zeit und die Geschwindigkeit gemessen werden. Auf Basis dieser Daten werden dann die Eigenverluste berechnet. Bei den am Institut durchgeführten Loss runs bzw. Coast downs wurde der Geschwindigkeitsbereich zwischen 20 und 120 km/h herangezogen

Beim NEDC ist das Fahrzeug auf eine Geschwindigkeit zu bringen, die mehr als 10km/h über der Prüfgeschwindigkeit V (120km/h) liegt. Danach ist das Getriebe in Leerlaufstellung zu bringen. Gemessen wird die Verzögerungszeit t_1 des Fahrzeugs von der Geschwindigkeit $V_2=V+\Delta V$ bis $V_1=V-\Delta V$, wobei $\Delta V \leq 5\text{km/h}$ ist. Diese Prüfung ist so oft zu wiederholen, dass die statistische Genauigkeit (p) für den Mittelwert $\leq 2\%$ ist [3].

$$p = \frac{t * s}{\sqrt{n} * \frac{100}{T}} \leq 2\% \quad (2-5)$$

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(T_i - T)^2}{n - 1}} \quad (2-6)$$

Tabelle 3: Koeffizient t in Abhängigkeit der Anzahl n der durchgeführten Coast downs

n	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
t	3,2	2,8	2,6	2,5	2,4	2,3	3,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
$\frac{t}{\sqrt{n}}$	1,6	1,25	1,06	0,94	0,85	0,77	0,73	0,66	0,64	0,61	0,59	0,57

$$P = \frac{M * V * \Delta V}{500 * T} \quad (2-7)$$

Die momentane Fahrwiderstandskraft errechnet sich aus der momentanen Leistung dividiert durch Geschwindigkeit.

$$F_{EV(t)} = \frac{P(t)}{V(t)} \quad (2-8)$$

Damit können die Fahrwiderstandskräfte über der Geschwindigkeit aufgetragen werden. Mittels einer Regressionsanalyse lässt sich dieser Zusammenhang in Form eines Polynoms beschreiben.

$$F_{EV} = A_0 + A_1 * v + A_2 * v^2 \quad (2-9)$$

Die von der Bremse aufzubringende Bremskraft ist die Differenz zwischen dem Fahrwiderstandspolynom und dem Polynom der Eigenverluste.

$$F_{Bremse} = (R_0 - A_0) + (R_1 - A_1) * v + (R_2 - A_2) * v^2 \quad (2-10)$$

2.2.2 WLTP

Zur Bestimmung der Eigenverluste im WLTP muss das Fahrzeug zu Beginn warmgefahren werden. Danach werden von der Rollensteuerung automatisiert drei Loss runs durchgeführt. Die auf der Rolle einzustellenden Koeffizienten berechnen sich aus der Differenz von Soll-Werten (aus der Straßenmessung) und den gemessenen Verlustkoeffizienten aus der jeweils vorangegangenen Messung. Die endgültigen Koeffizienten werden durch Subtraktion der mittleren Verlustkoeffizienten der letzten beiden Loss runs von den Soll-Werten berechnet [1].

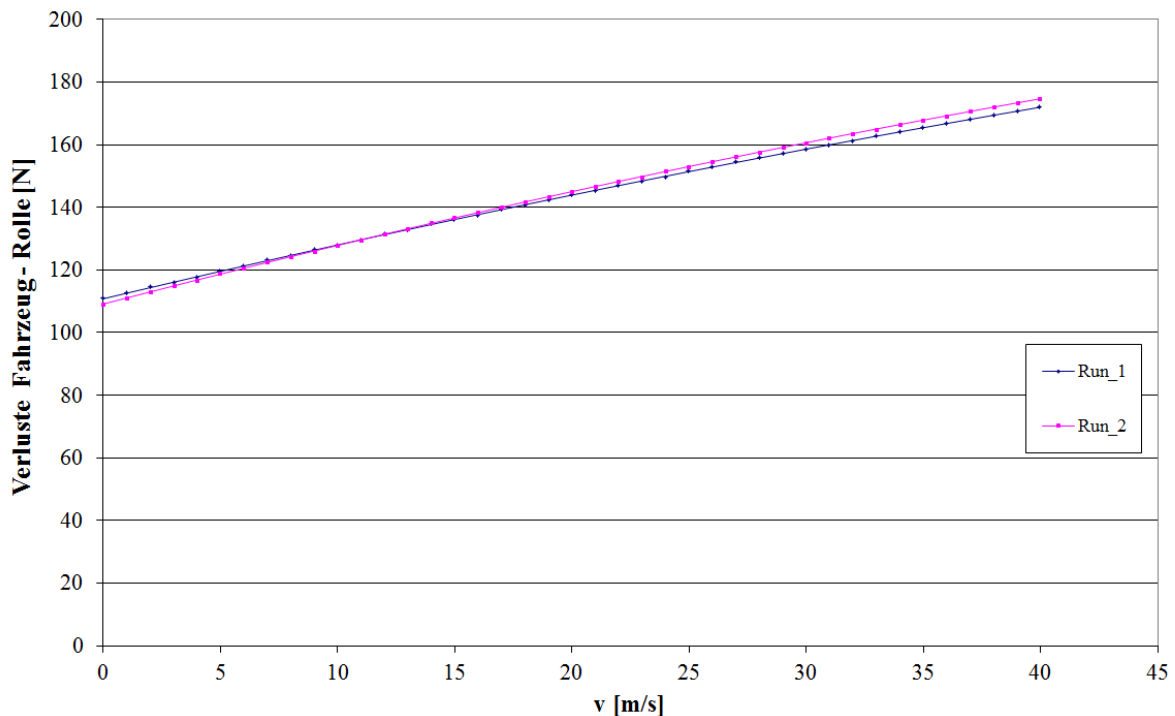


Abbildung 2-4: Typisches Loss run-Diagramm eines PKWs

Aus den berechneten Fahrwiderstandskräften in den jeweiligen Geschwindigkeitspunkten können mit Hilfe einer Regressionsanalyse die Verlustkoeffizienten A_0 , A_1 und A_2 berechnet werden. Die Darstellung der Eigenverluste folgt analog Formel (2-9). Die von der Bremse aufzubringende Bremskraft errechnet sich analog Formel (2-10).

Eigenverluste haben einen wesentlichen Einfluss auf die im Fahrzyklus wirkende Bremskraft der Rollenbremse. Eine genaue Bestimmung dieser Kräfte ist wichtig, damit die Summe aus Eigenverlusten und der von der Rolle simulierten Fahrwiderständen gleich den Fahrwiderständen aus den Straßenmessungen sind.

$$F_{EV(v)} + F_{Bremse(v)} = F_{Fwdst(v)} \quad (2-11)$$

Sind die ermittelten Eigenverluste größer als die tatsächlich wirkenden Eigenverluste, so wird die Rolle während der Messung zu wenig gebremst. Das Fahrzeug muss daher weniger Leistung aufbringen und der Verbrauch sinkt. Um derartige Effekte zu verhindern, ist die exakte Angabe der Eigenverluste von Rolle und Fahrzeug eine wesentliche Voraussetzung.

2.3 Vorkonditionierung und Konditionierung

Eine wesentliche Einflussgröße auf die Wiederholbarkeit von Rollenmessungen ist das Temperaturniveau zu Testbeginn. Alle relevanten Bauteile von Rolle und Fahrzeug müssen zu Testbeginn ein einheitliches Temperaturniveau aufweisen.

2.3.1 NEDC

Im Hinblick auf die Partikelmessung muss bei Selbstzündungsmotoren mindestens 6 Stunden und maximal 36 Stunden vor der Prüfung die 2. Phase des NEDC-Fahrzyklus dreimal gefahren werden (Abbildung 2-1). Auf Wunsch der Hersteller können Fahrzeuge mit Fremdzündungsmotor die 1. Phase des NEDC einmal und die 2. Phase zweimal fahren. Danach müssen Fahrzeuge mit Kompressionszündungs- und Fremdzündungsmotor in einem Raum bei einer relativ konstanten Temperatur zwischen 293 und 303 K konditioniert werden. Das Fahrzeug muss dabei mindestens 6 Stunden konditioniert werden, auf jeden Fall so lange, bis die Temperatur des Motoröls und die der Kühlflüssigkeit (wenn vorhanden) auf ± 2 K der Raumtemperatur entspricht [3].

2.3.2 WLTC

Bevor das Fahrzeug den Vorkonditionierzyklus fährt, muss die Batterie vollständig geladen werden. Die Batterie darf bis zum Start des Typprüfzyklus nicht mehr geladen werden. Als Vorkonditionierzyklus soll der WLTC der jeweiligen Fahrzeugklasse gefahren werden. Auf Wunsch des Herstellers bzw. der Weisungsbefugten können zusätzliche WLTCs gefahren werden, um für Fahrzeug und Rolle stabile Bedingungen sicherzustellen. Anschließend wird das Fahrzeug konditioniert. Der Raum zum Konditionieren soll eine Temperatur von 296 K aufweisen. Die Toleranz des aktuellen Temperaturwertes beträgt ± 3 K, bezogen auf den Mittelwert der letzten 5 Minuten und soll keine systematischen Abweichungen vom Set Point zeigen. Die aktuelle Temperatur soll konstant mit einer Frequenz von mindestens 1 Hz gemessen werden.

Laut WLTC-Vorschrift muss das Testfahrzeug mindestens 6 und maximal 36 Stunden konditioniert werden. Die Motorhaube kann während der Konditionierung offen oder geschlossen sein. Nach der Konditionierung müssen die Temperaturen von Motoröl und Kühlwasser (wenn vorhanden) innerhalb ± 2 K von der Zieltemperatur (296 K) liegen. Wenn keine anderen Bestimmungen für das Testfahrzeug bestehen, kann dieses mit Hilfe von Ventilatoren gekühlt werden. Es ist darauf zu achten, dass die Ventilatoren so platziert werden, dass eine gleichmäßige Kühlung von Antriebsstrang, Motor und Abgasnachbehandlungssystem gewährleistet wird.

2.4 Ermittlung der äquivalenten Schwungmasse

Die Fahrzeugmasse ist ein wesentlicher Einflussfaktor auf den Roll- und den Beschleunigungswiderstand. Da das Gewicht des Fahrzeugs in der Praxis sehr variabel ist, ist bei Typprüfzyklen genau festgelegt, mit welcher Fahrzeugmasse das Fahrzeug auf der Straße ausgerollt werden muss. Auf dem Rollenprüfstand steht das Fahrzeug still, die Trägheit des Fahrzeugs muss daher durch entsprechende Schwungmassen an der Rolle simuliert werden. Ist eine Simulation der Trägheit mittels Schwungmasse nicht möglich, so muss die Beschleunigungsleistung durch den Elektromotor dargestellt werden [2].

2.4.1 NEDC

Die für die Typprüfung relevante Bezugsmasse des Fahrzeugs errechnet sich aus der Masse des fahrbereiten Fahrzeuges (Tank zu 90% gefüllt, inkl. aller betriebsnotwendigen Flüssigkeiten und Fahrer) abzüglich der Pauschalmasse des Fahrers von 75 kg (68 kg + 7 kg

Gepäck) und zuzüglich einer Pauschalmasse von 100 kg. Am Rollenprüfstand wird die Fahrzeugmasse entweder durch elektrisches Bremsen der Rolle oder durch Aufbringen von Schwungmassen berücksichtigt [3].

Tabelle 4: Äquivalente Schwungmasse für den NEDC in Abhängigkeit der Bezugsmasse (Auszug) [3]

Bezugsmasse des Fahrzeugs (Pr) (kg)	Äquivalente Schwungmassen I (kg)
480 < Pr ≤ 540	510
540 < Pr ≤ 595	570
595 < Pr ≤ 650	625
650 < Pr ≤ 710	680
710 < Pr ≤ 765	740
765 < Pr ≤ 850	800
850 < Pr ≤ 965	910
965 < Pr ≤ 1 080	1 020
1 080 < Pr ≤ 1 190	1 130
1 190 < Pr ≤ 1 305	1 250
1 305 < Pr ≤ 1 420	1 360
1 420 < Pr ≤ 1 530	1 470
1 530 < Pr ≤ 1 640	1 590
1 640 < Pr ≤ 1 760	1 700
1 760 < Pr ≤ 1 870	1 810
1 870 < Pr ≤ 1 980	1 930
1 980 < Pr ≤ 2 100	2 040
2 100 < Pr ≤ 2 210	2 150

Im NEDC erfolgt keine Berücksichtigung der rotatorischen Massen der nicht angetriebenen Räder und Achsen.

2.4.2 WLTC

Als Ausgangsbasis zur Bestimmung der Bezugsmasse des Fahrzeuges wird im WLTP die Leermasse des vollausgestatteten Fahrzeuges herangezogen. Eine repräsentative Zuladung und eine Zusatzmasse von 25 kg werden hinzuaddiert [1].

$$m_{KFZ} = m_{Leer_max} + 25 \text{ kg} + m_{Zuladung} \quad (2-12)$$

$$m_{Zuladung} = 0,15 * (m_{Gesamt_max} - m_{Leer_max} - 25 \text{ kg}) \quad (2-13)$$

Die rotatorischen Massen der nicht angetriebenen Räder können mit einem geeigneten Verfahren entweder gemessen oder berechnet werden. Alternativ können sie auch als Prozentsatz der Gesamtmasse angenommen werden. Für ein mit permanentem Allradantrieb ausgestattetes Fahrzeug können die rotatorischen Massen mit 3% des Leergewichts angenommen werden. Bei front- oder heckgetriebenen Fahrzeugen werden die rotatorischen Massen mit 1,5% vom Leergewicht angenommen. Die gesamte Schwungmasse errechnet sich damit aus der Fahrzeugmasse und der rotatorischen Massen.

$$m_{Gesamt} = m_{KFZ} + m_{rot} \quad (2-14)$$

Kann der Prüfstand die errechnete Schwungmasse nicht abbilden, so darf die nächsthöhere

Schwungmassenklasse gewählt werden. Diese darf jedoch nicht mehr als 10 kg über der errechneten Schwungmasse liegen [1].

2.5 Fahrzeug-Willanslinien

Um den Zusammenhang zwischen Leistung und Verbrauch bei Rollenmessungen darzustellen, können sogenannte „Fahrzeug-Willanslinien“ verwendet werden. Willans-Linien beschreiben den Energieverbrauch (g/s) eines Motors über der Leistung für eine konstante Drehzahl. Die Fahrzeug-Willanslinien sind eine Abwandlung, in der die Drehzahlen üblicherweise nicht konstant sind. Dies ist bei der Interpretation zu beachten. Anstelle des Energieverbrauchs werden hier die CO₂-Emissionen verwendet, wenn diese zu korrigieren sind.

2.5.1 Erstellung der Fahrzeug-Willanslinien

Bei der Erstellung dieser Linien wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Bestimmen der Fahrwiderstände des Fahrzeuges durch Ausrollversuche auf der Straße.
2. Fahrzeug auf den Rollenprüfstand stellen und Fahrwiderstände auf der Rolle einstellen.
3. Messen des Testfahrzeugs auf der Rolle. Geschwindigkeit und Kraftstoffverbrauch müssen sekundlich aufgezeichnet werden.
4. Mit Hilfe der gemessenen Daten kann mit der Erstellung der Willanslinien begonnen werden. Auf der x-Achse wird der Mittelwert der gesamten Achsleistungen pro Phase aufgetragen. Die Achsleistung berechnet sich aus dem gemessenen Geschwindigkeitsverlauf und den Fahrwiderständen. Generell setzt sich die Achsleistung zusammen aus dem Beschleunigungswiderstand, dem Luftwiderstand und dem Rollwiderstand, wobei die Fahrwiderstände mit dem Straßenlastpolynom abgebildet werden.

$$P_{Achse_ist(t)} = (m_{KFZ} * a_{ist(t)} + R_0 + R_1 * v_{ist(t)} + R_2 * v_{ist(t)}^2) * v_{ist(t)} \quad (2-15)$$

5. Auf der y-Achse wird der Mittelwert des sekundlichen CO₂-Ausstosses pro Phase aufgetragen. Alternativ kann auch der durchschnittliche Kraftstoffmassenstrom pro Phase abgebildet werden.
6. Für jede Phase im Fahrzyklus ergibt sich ein Punkt im Diagramm. Die Regressionsgerade durch diese Punkte ergibt die Fahrzeug-Willanslinie.
7. Zusätzlich lässt sich die Schleppleistung von Motor und Antriebsstrang bestimmen. Dazu muss die Linie bis zum Kraftstoffnullpunkt extrapoliert werden.

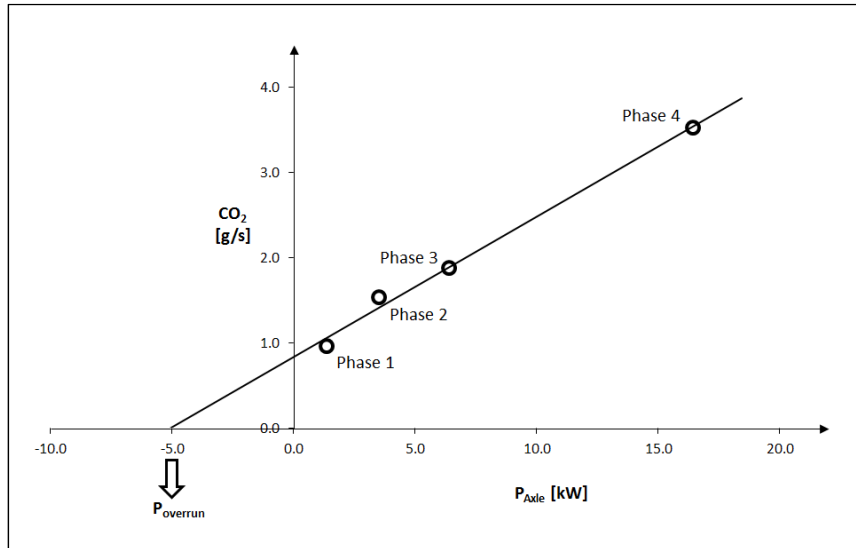


Abbildung 2-5: Prinzipdarstellung einer Fahrzeug-Willanslinie aus den Rollenmessungen

Die mathematische Beschreibung der Regressionsgerade ist die gesuchte Fahrzeug-Willanslinie.

$$CO_2 \left[\frac{g}{s} \right] = k * P_{Axle} + d \quad (2-16)$$

Der Koeffizient „d“ gibt die CO₂-Emissionen bei null Achsleistung an. Die Ableitung der Gleichung (2-16) ergibt die Änderung des CO₂-Wertes bei einer Variation der Achsleistung.

$$\Delta CO_2 \left[\frac{g}{s} \right] = k * \Delta P_{Axle} \quad (2-17)$$

Der Faktor „k“ ist die Steigung der Willanslinie und wird im Weiteren als Willansfaktor bezeichnet. Er beschreibt die Änderung des Verbrauchs bei einer Änderung der zu- oder abgeführten Leistung. Die Einheit des Willansfaktor ist [(g/s)/kW]. Diese Einheit kann weiter umgeformt werden zu [g/kWs]. Wird also der Willansfaktor mit der Leistung [kW] multipliziert, ergibt das die Verbrauchsänderung in [g/s]. Wird die Arbeit [kWs] auf der x-Achse aufgetragen, wird die Änderung des Verbrauchs in [g] abgebildet.

Tabelle 5: Einheit der y-Achse in Abhängigkeit von der Einheit der x-Achse

x-Achse	Willansfaktor k	y-Achse (FC oder CO ₂)
Leistung [kW]	$\left[\frac{g}{s \cdot kW} \right]$	$\left[\frac{g}{s} \right]$
Arbeit [kWs]	$\left[\frac{g}{kWs} \right]$	[g]

Auf der y-Achse in Abbildung 2-5 wird der Verbrauch oder aber auch in Masse an CO₂ aufgetragen. Hier beziehen sich alle im Zuge dieser Arbeit genannten Verbrauchsangaben auf die CO₂-Emissionen. Diese können mit Hilfe der CO₂-Bilanz in äquivalente Kraftstoffverbräuche umgerechnet werden [2].

$$m_{\text{Kraftstoff}} = \frac{m_{\text{CO}_2} * \frac{12}{44} + m_{\text{CO}} * \frac{12}{28} + m_{\text{C}_1\text{H}_{1,85}} * \frac{12}{13,85}}{m\%_{\text{C-Kraftstoff}}} \quad (2-18)$$

Die innere Arbeit des Motors wird in mechanische Arbeit an den Rädern umgeformt. Die Differenz aus innerer Arbeit und effektiver Nutzarbeit an den Rädern geht als Reibungs- und Ladungswechselarbeit verloren. In ihr ist nicht nur die Arbeit zur Überwindung der Reibung enthalten, sondern auch alle Hilfseinrichtungen die nötig sind, um den Motor zu betreiben. Dazu zählen u.a. Ventiltrieb, Generator, mechanischer Lader etc. Die Schleppleistung von Motor und Antriebsstrang wird durch Nullsetzen der Regressionsgeraden berechnet.

$$P_{\text{Schlepp}} = -\frac{d}{k} \quad (2-19)$$

Es lassen sich somit Abweichungen der Größen, wie sie in Gleichung 2-15 vorkommen (Geschwindigkeit, Fahrwiderstand) korrigieren. Dazu wird die Abweichung zur Sollgröße in eine Leistungsdifferenz umgerechnet. Durch Multiplikation dieser Differenz mit dem Willansfaktor kann die Änderung im Kraftstoffverbrauch bestimmt werden.

2.5.2 Einfluss der Motordrehzahl auf die Fahrzeug-Willanslinie

Am Motorprüfstand werden die Willanslinien bei konstanter Drehzahl ermittelt. Dies ist am Rollenprüfstand nicht möglich, da jedes Fahrzeug je nach Getriebe und Fahrzyklus unterschiedliche mittlere Drehzahlen pro Phase aufweist. Die durch Rollenmessungen ermittelte Fahrzeug-Willanslinie stellt somit ein Schnitt durch ein Motorkennfeld dar.

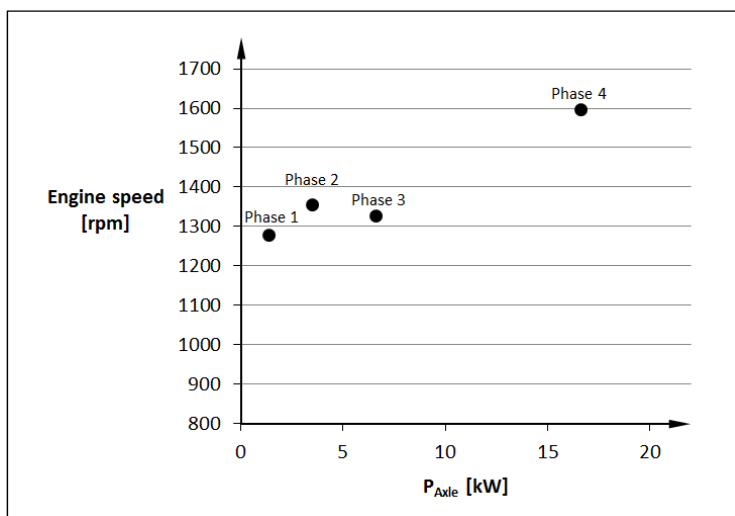


Abbildung 2-6: Mittlere Drehzahl und mittlere Achsleistung im WLTC für Fahrzeug 1

Änderungen des Fahrwiderstandes haben keinen Einfluss auf die Motordrehzahl, sondern beeinflussen nur die Leistung am Rad (unter der Annahme, dass der Schlupf konstant bleibt). Treten aber Abweichungen gegenüber der Zielgeschwindigkeit auf, so ändert sich nicht nur die Radleistung, sondern auch die Drehzahl. Aus diesem Grund muss auch der Einfluss von Drehzahländerungen auf die Steigung der Fahrzeug-Willanslinie und damit auf die CO₂-Emissionen untersucht werden. Dazu wurde mit Fahrzeug 1 (Fahrzeugdaten siehe S.40) zweimal der WLTC gefahren. Bei der ersten Messung wurde versucht die Zielgeschwindigkeit wie sie im WLTC definiert ist möglichst genau einzuhalten. Bei der zweiten Messung lautete die Vorgabe die Zielgeschwindigkeit während des gesamten Fahrzyklus um 2 km/h zu unterschreiten.

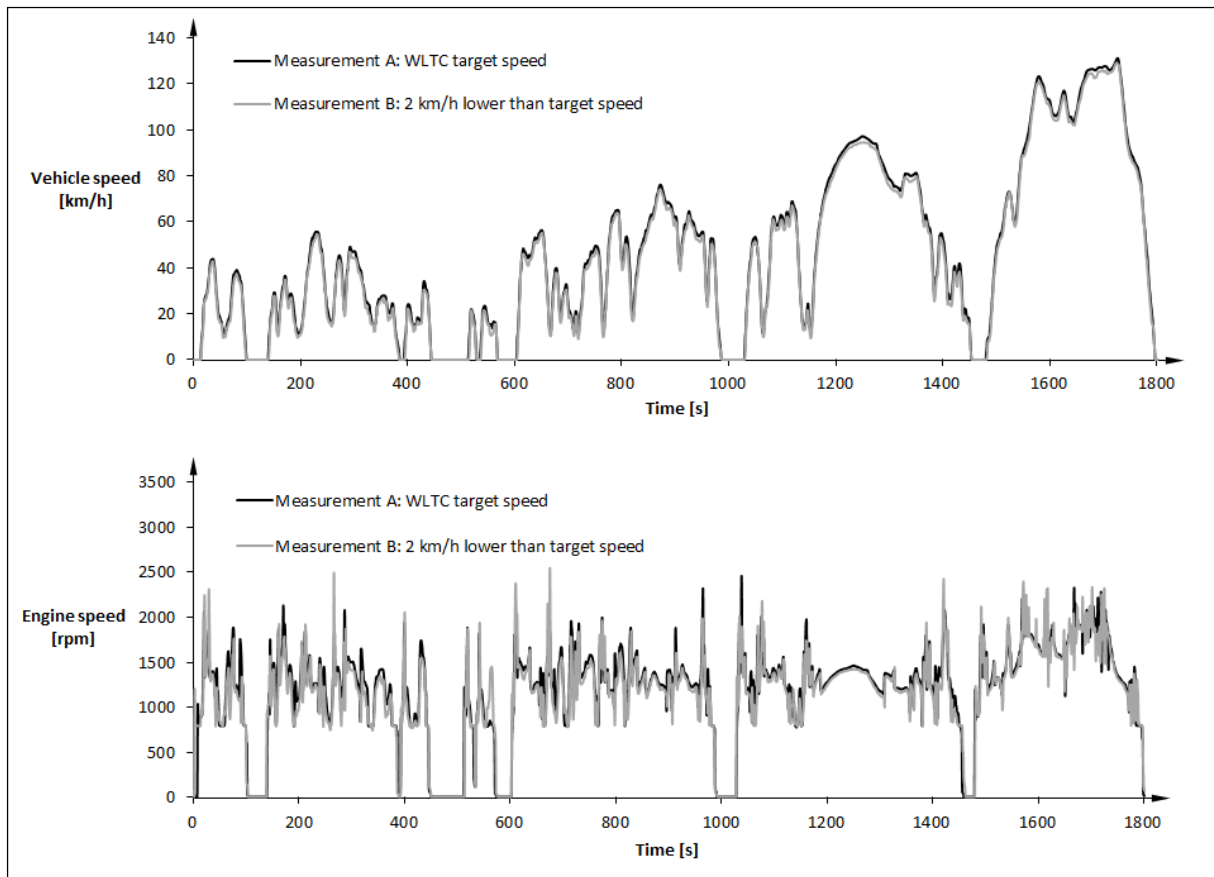


Abbildung 2-7: Geschwindigkeits- und Drehzahlverlauf von Messung A und B

Durch die niedrigere Fahrgeschwindigkeit bei Messung B sind die geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstände geringer und die Leistung an der Achse ist niedriger als bei Messung A. Da die Schaltpunkte bei beiden Messungen die gleichen waren, sinken bei Messung B auch die mittleren Drehzahlen.

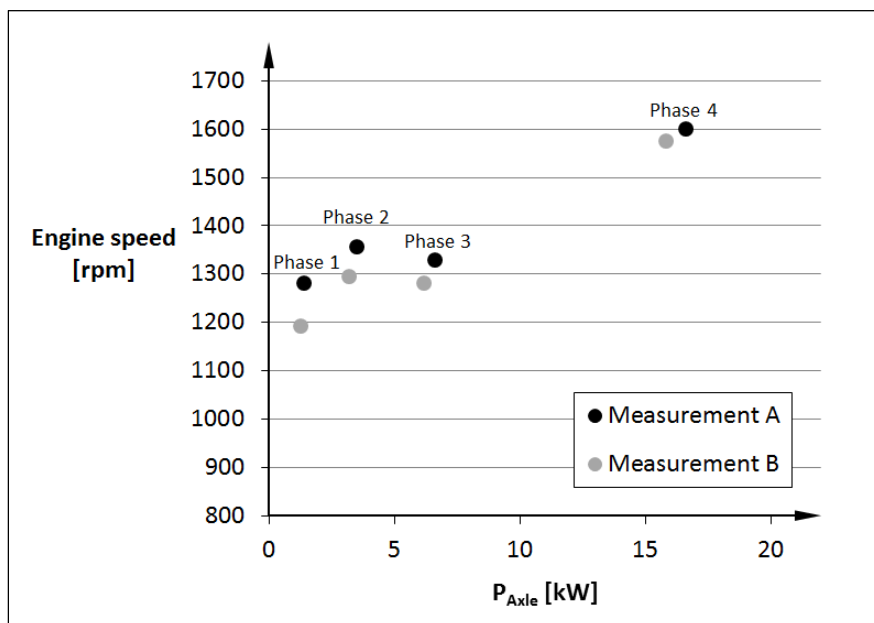


Abbildung 2-8: Mittlere Drehzahl und mittlere Achsleistung im WLTC bei Messung A und B

Die in Abbildung 2-8 dargestellten Ergebnisse der Messungen A und B lassen einen deutlichen Einfluss der Drehzahl auf die CO₂-Emissionen vermuten. Die Fahrzeug-Willanslinien aus beiden Messungen sind jedoch beinahe ident. Der Unterschied in den Steigungen zwischen Messung A und B liegt bei 0,1%. Daraus kann geschlossen werden, dass die Drehzahldifferenzen aufgrund von unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten bei Rollenmessung kaum einen Einfluss auf die Steigung der Fahrzeug-Willanslinie haben. Eine Korrektur hinsichtlich Drehzahländerungen ist somit nicht notwendig.

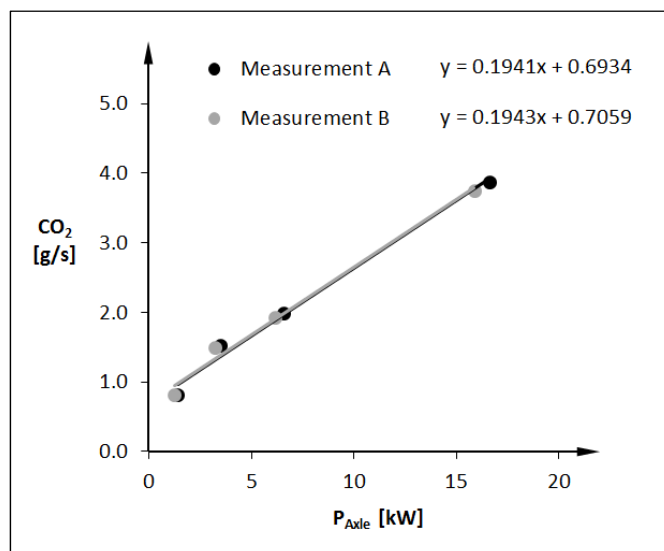


Abbildung 2-9: Fahrzeug-Willanslinien aus Messung A und B

2.5.3 Fahrzeug-Willanslinien zur Korrektur der Generatorleistung

Die Willanslinie kann auch dazu genutzt werden, um den Einfluss der Generatorleistung auf den Kraftstoffverbrauch zu bestimmen. Dazu wird auf der x-Achse nicht die Achsleistung aufgetragen, sondern die Motorleistung. Diese setzt sich zusammen aus der Achsleistung und der Generatorleistung unter Berücksichtigung der jeweiligen Wirkungsgrade.

$$P_{Mot}(t) = \frac{P_{Achs}(t)}{\eta_{Antrieb}} + \frac{P_{Gen}(t)}{\eta_{Gen} * \eta_{Mot-Gen}} \quad (2-20)$$

Mit Hilfe dieser Willanslinie kann der Mehrverbrauch aufgrund der Generatorleistung bestimmt werden. Die Schwierigkeit bei der Anwendung dieses Verfahrens liegt in der Annahme geeigneter Wirkungsgrade für den Antriebsstrang. Diese sind nicht nur von den angetriebenen Achsen abhängig (Front, Heck, Allrad), sondern auch vom Getriebe (manuell, Automatik). Weiters ist zu beachten, dass die Wirkungsgrade im Antriebsstrang temperaturabhängig sind. Um diese Einflüsse zu umgehen, könnte auf „echte“ Willanslinien zurückgegriffen werden, da nur die Leistung, nicht aber die Motordrehzahl vom Generator beeinflusst wird. Diese Willanslinien können aber durch Rollentests nicht bestimmt werden.

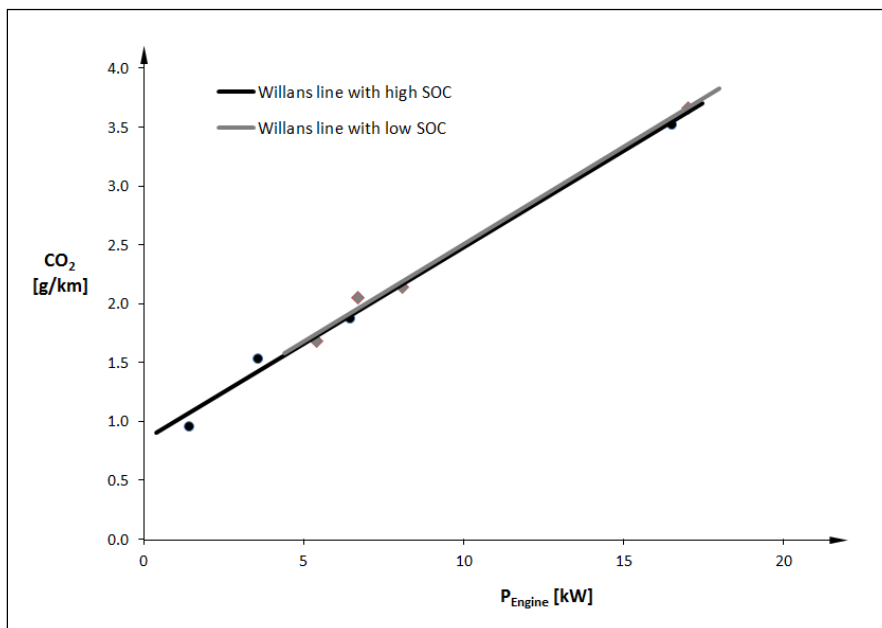


Abbildung 2-10: Vergleich der Willanslinie bei voller und bei leerer Batterie

In Abbildung 2-10 sind die Willanslinien eines Fahrzeuges bei unterschiedlichen Ladezuständen der Batterie zu Testbeginn dargestellt. Obwohl die Motorleistung als auch die CO_2 -Emissionen pro Phase in beiden Fällen verschieden sind, besitzen beide Willanslinien idente Steigungen. Damit kann der Einfluss auf den Verbrauch durch die leere Batterie einfach durch Multiplikation der zusätzlichen Generatorleistung mit der Steigung der Willanslinie berechnet werden.

2.5.4 Fahrzeug-Willanslinien im NEDC und WLTC

Der große Vorteil der Willans-Funktionen liegt darin, dass sie sehr stabil sind und einfach angewandt werden können. Untersuchungen im Zuge dieser Arbeit zeigten, dass Fahrzeug-Willanslinien gleiche Steigungen bei gleichen Motorkonzepten (Diesel, Benzin) besitzen.

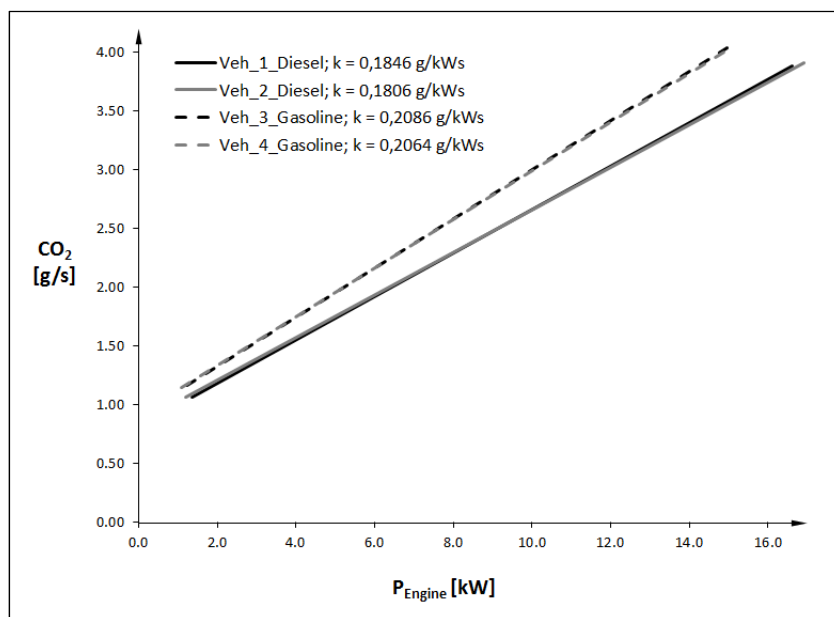


Abbildung 2-11: Vergleich der Willansfaktoren für Diesel- und Benzinmotoren auf Basis von WLTC-Messungen

Der NEDC besteht nur aus zwei Phasen, die Anwendung einer Willanslinie ist aber auch in diesem Fall möglich. Der Vergleich der Willanslinie eines WLTC und eines NEDC zeigt, dass beide in etwa den gleichen Willansfaktor besitzen, sich in der Lage jedoch deutlich unterscheiden. Dies liegt einerseits daran, dass der NEDC einen deutlich höheren Leerlaufanteil besitzt. Dadurch wird die durchschnittliche Achsleistung pro Phase gesenkt. Außerdem besitzt der NEDC deutlich weniger Hochgeschwindigkeitsphasen als der WLTC, wodurch er deutlich niedriglastiger ist.

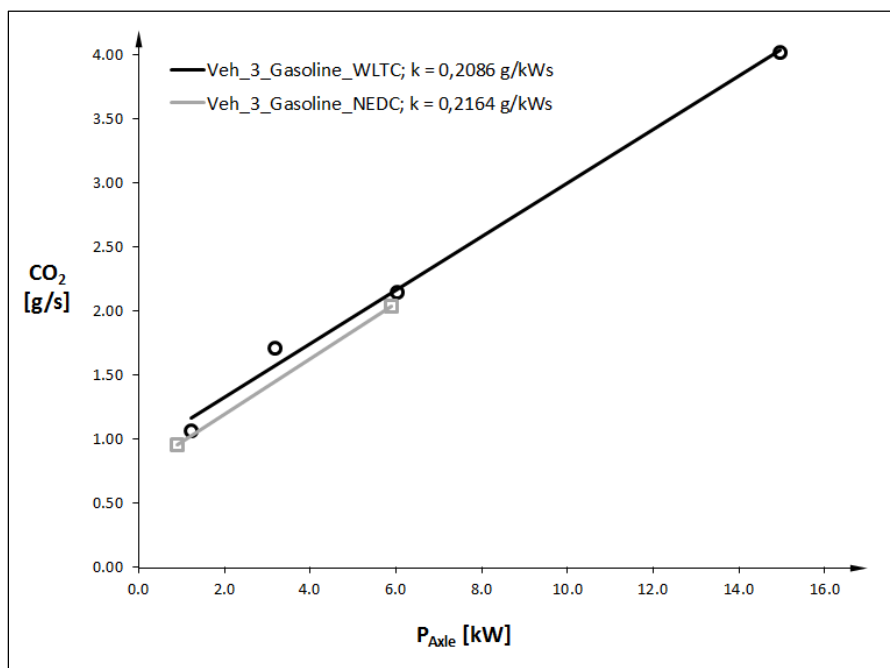


Abbildung 2-12: Vergleich der Willansfaktoren für WLTC und NEDC

2.6 Ladestrategien in Bordnetzen

Das Energiemanagement in einem modernen PKW spielt eine sehr große Rolle im Hinblick auf Verbrauch und Emissionen. Die zunehmende Elektrifizierung der Nebenaggregate (z.B. elektrische Wasserpumpe,) sowie diverse Energiesparsysteme (Start/Stop, Bremsenergieerückgewinnung etc.) führen bei konventionellen PKW zu immer komplexeren Bordnetzsystemen. Das Bordnetz eines Kraftfahrzeugs besteht grundsätzlich aus vier Komponenten:

- Energiewandler (Generator)
- Energiespeicher (Batterie)
- Energieverbraucher
- Leitungen zum Energietransport

Der Energiewandler (Generator) wandelt mechanische Energie in elektrische Energie um und speichert diese in der Batterie oder versorgt die Verbraucher mit Strom. Ist der Generatorstrom größer als der Verbraucherstrom, können alle Verbraucher mit Strom versorgt werden. Mit der Stromdifferenz kann zusätzlich die Batterie geladen werden. Ist der Generatorstrom kleiner als der Verbraucherstrom wird die Batterie entladen um die elektrische Versorgung der Verbraucher sicherzustellen. Aufgrund der gestiegenen Sicherheits- und Komfortansprüche steigt auch die Zahl der elektrischen Verbraucher und damit der Strombedarf im Bordnetz. Die Nennleistung der Generatoren bewegt sich zwischen 1 kW (Kleinwagen) und 3 kW (Oberklasse). Das ist deutlich niedriger als die Summe der

Leistungen aller Verbraucher. Daher muss die Batterie den Generator unterstützen, falls dieser zu wenig Strom liefert [4].

Die Verbraucher lassen sich in vier Gruppen einteilen [4]:

- Dauerverbraucher (Zündung, elektr. Kraftstoffpumpe)
- Langzeitverbraucher (Scheinwerfer, Autoradio)
- Kurzzeitverbraucher (Blinkleuchten, Scheibenheizung)
- Ruhestromverbraucher (Starter, Diebstahlwarnanlage)

Durch das Zusammenspiel von Generator und Batterie muss zu jeder Zeit die elektrische Versorgung aller Verbraucher gewährleistet werden. Wird während eines Fahrzyklus auf der Rolle die Batterie mehr geladen als entladen, so hat der Generator den Ladezustand der Batterie erhöht. Im umgekehrten Fall wird der Energiegehalt der Batterie gesenkt, d.h. ein Teil der gesamten verbrauchten Energie wurde von der Batterie bereitgestellt. In beiden Fällen ergeben sich unter sonst identen Bedingungen unterschiedliche Kraftstoffverbräuche. Um daher den Einfluss des Ladezustandes der Batterie zu neutralisieren und Test miteinander vergleichen zu können, ist eine Korrektur des Ladezustandes erforderlich.

Die erzielbaren Verbräuche im WLTP-Typprüfzyklus sind wesentlich vom Ladezustand der Batterie abhängig. Unabhängig vom Ladezustand der Batterie muss immer ausreichend Energie zur Versorgung der Nebenverbraucher im Bordnetz bereitstehen. Außerdem muss nach dem Abstellen des Motors immer so viel Energie vorhanden sein, um die Ruhestromverbraucher (z.B. Diebstahlwarnanlage, Standheizung) mit Strom versorgen zu können und ein Starten des Motors zu ermöglichen.

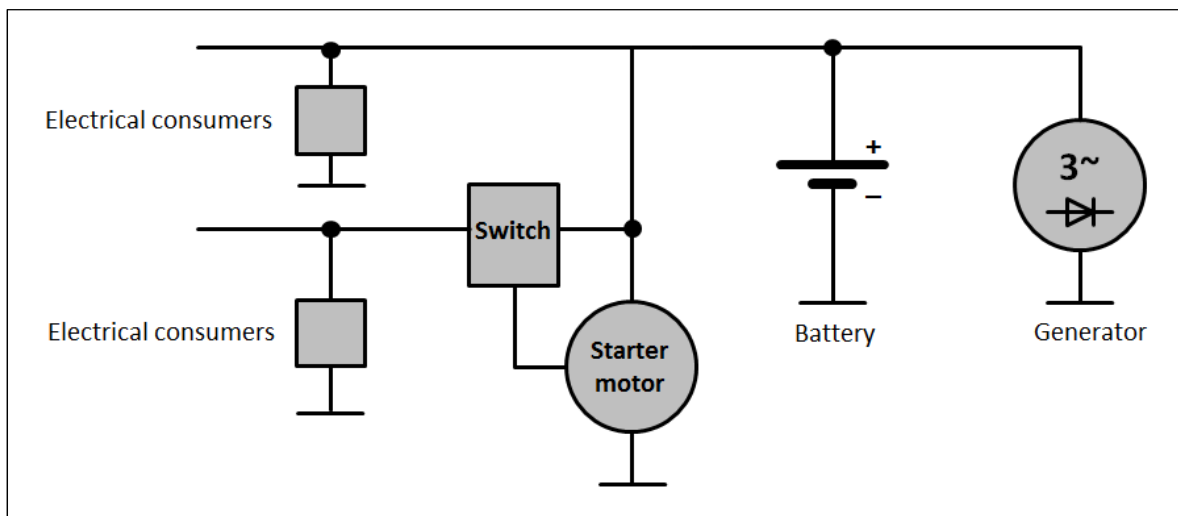


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung eines PKW-Bordnetzes (nach [4], S.10)

Der Generator erzeugt Strom und speist ihn in das elektrische Bordnetz ein. Bei hohen Verbraucherströmen oder Stadtfahrten (niedriges Drehzahlniveau und Leerlaufphasen) reicht der Generatorstrom nicht aus, um alle Verbraucher zu versorgen. Die Bordnetzspannung sinkt auf das Niveau der Batteriespannung und die Batterie wird entladen um die fehlende Stromdifferenz auszugleichen. Ist der Ladezustand der Batterie ausreichend hoch, so lädt der Generator die Batterie nur in Schubphasen oder beim Bremsen. Das Laden in Schubphasen hat keinen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch, da sich der Leistungsfluss umkehrt und Motor und Generator von den Rädern angetrieben werden.

Bei leerer Batterie hingegen wird ein beachtlicher Teil der Motorleistung dazu verwendet, die Batterie möglichst schnell zu laden um bei abgestelltem Motor den Ruhestromverbrauch

abdecken zu können. Außerdem kann bei Kraftfahrzeugen mit Start/Stop-Funktion diese nur dann genutzt werden, wenn dem Starter im Stillstand ausreichend Energie zur Verfügung steht um stets ein Anlassen des Motors zu ermöglichen. Aus diesem Grund lädt der Generator permanent die Batterie, also auch in verbrauchsungünstigen Fahrzuständen. Dies kann zu einem Mehrverbrauch von bis zu 30% im WLTC führen.

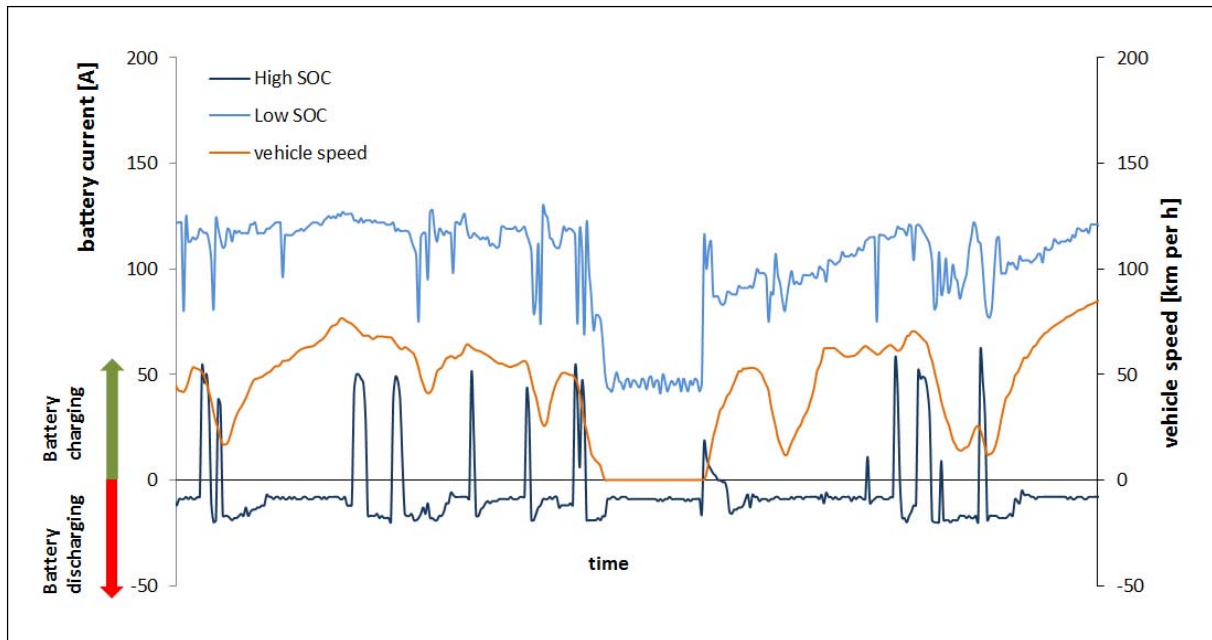


Abbildung 2-14: Batteriestrom in Abhängigkeit des Ladezustandes

Bei hohem Ladezustand der Batterie und geringen Verbraucherströmen, reicht es aus, wenn der Generator die Batterie nur in den Schubphasen auflädt (dunkelblaue Linie). Bei entladener Batterie speist der Generator permanent Strom in die Batterie um die Ladebilanz wieder auszugleichen (hellblaue Linie). Diese Energiemenge muss vom Verbrennungsmotor bereitgestellt werden und resultiert in einem höheren Kraftstoffverbrauch. Um die bei Rollenmessungen erzielten Verbräuche vom Batteriezustand unabhängig zu machen, gilt es die Ladebilanz der Batterie zu bestimmen, diese in eine äquivalente Motorleistung umzurechnen und daraus den Einfluss auf den gemessenen Kraftstoffverbrauch zu bestimmen.

Beim WLTP gibt es Restriktionen hinsichtlich Batterieladezustand und Ladebilanz. Die Batterie soll vor dem Vorkonditionieren voll geladen werden. Danach darf die Batterie bis zum Durchführen der offiziellen Typisierungsmessungen nicht mehr geladen werden. Die Ladebilanz darf für konventionelle Kraftfahrzeuge 0,5% der über den Fahrzyklus zugeführten Kraftstoffenergie nicht überschreiten [1].

$$\Delta E_{REESS} = \frac{0,0036 * RCB * U_{REESS}}{E_{Fuel}} * 100 \leq RCB \text{ Korrekturkriterium} \quad (2-21)$$

Tabelle 6: RCB Korrekturkriterium für verschiedene Fahrzeugklassen [1]

Cycle	WLTC city(low + + medium)	WLTC (low + medium + + high)	WLTC(low + medium + high + + extra high)
RCB correction criteria (%)	1.5	1	0.5

3 Korrekturfunktionen

Um verschiedene Messungen miteinander vergleichen zu können, müssen diese unter den exakt gleichen Voraussetzungen durchgeführt werden. Dies würde einen enormen Messaufwand mit sich bringen. Daher werden Toleranzen definiert, innerhalb denen eine definierte Kenngröße liegen muss, damit die Messung trotzdem noch gültig ist. Dies führt aber dazu, dass innerhalb der Toleranzen die Messgrößen beeinflusst werden können. Beispielhaft soll hier der vorgegebene Geschwindigkeitsverlauf beim WLTC angeführt werden. Geübte Prüfstandsfahrer können durch geschicktes Ausnutzen der Geschwindigkeitstoleranzen nicht nur auf die zurückgelegte Wegstrecke Einfluss nehmen, sondern auch auf die Radleistung.

Mit Hilfe der Korrekturfunktionen soll jede Einflussnahme innerhalb der Toleranzgrenzen auf das Messergebnis minimiert werden. Dazu werden die Größen wie Geschwindigkeit und Fahrwiderstände mit Hilfe von Fahrzeug-Willansfaktoren korrigiert. Auf Basis empirischer Untersuchungen werden auch unterschiedliche Temperaturniveaus bei Testbeginn in äquivalente Verbrauchsänderungen umgerechnet und korrigiert.

Es werden folgende Größen korrigiert:

- Ladebilanz der Autobatterie (ΔB)
- Abweichungen von der Zielgeschwindigkeit (Δv)
- Abweichungen von den ermittelten Fahrwiderständen (ΔR)
- Abweichungen von der Soll-Streckenlänge (Δs)
- Temperatur bei Testbeginn (ΔT)

3.1 Korrektur der Ladebilanz

Um ein Fahrzeug betreiben zu können, müssen eine Vielzahl von Nebenverbrauchern mit elektrischem Strom versorgt werden. Die Bereitstellung dieser elektrischen Energie bei Rollenmessung hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf die erzielbaren Verbräuche. Bei einer durchschnittlichen Leistung von 300W zur Versorgung aller Verbraucher, müssen dafür im WLTC 150 Wh an elektrischer Arbeit zur Verfügung gestellt werden. Unter der Annahme eines Generatorwirkungsgrades von 67% und eines Willansfaktors von 600 g_{CO2}/kWh ergeben sich zur Versorgung der Nebenverbraucher CO₂-Emissionen in Höhe von ca. 6 g/km. Wird ein Teil der notwendigen Energie von der Batterie aufgebracht und diese anschließend nicht wieder aufgeladen, so können deutlich bessere Verbrauchswerte erzielt werden. Um derartige Effekte zu neutralisieren ist es notwendig die Ladebilanz zu berechnen. Dazu werden die in die Batterie zu- und abfließenden Ströme während des Fahrzyklus gemessen. Daraus kann die Ladebilanz der Batterie berechnet werden. Diese wird in eine äquivalente Generatorarbeit umgerechnet. Über generische oder fahrzeugspezifische Willansfaktoren kann daraus die Verbrauchsänderung bestimmt werden.

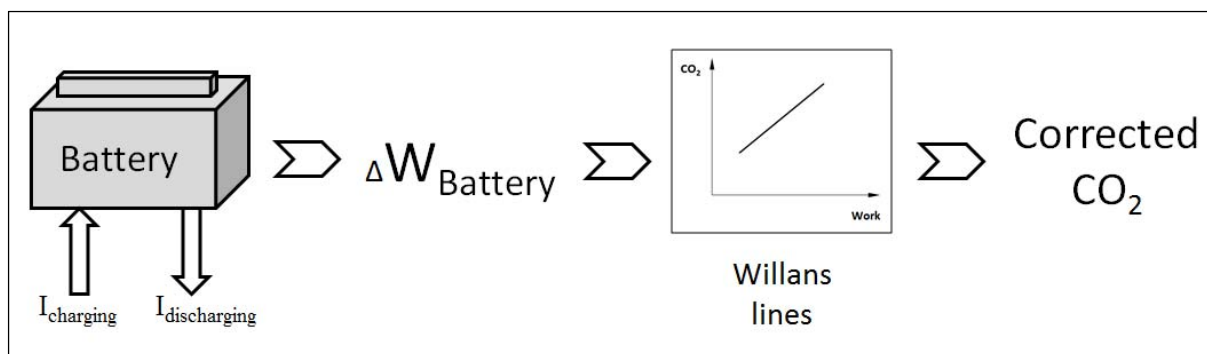


Abbildung 3-1: Vorgehensweise bei der Korrektur der Ladebilanz

Um die Ladebilanz berechnen zu können, ist es notwendig während der Rollenmessung Batteriespannung und –strom sekundlich aufzuzeichnen. Bei den Messungen für die vorliegende Arbeit wurde der Strom zwischen Batterie und Masse mit Hilfe einer Strommesszange gemessen.

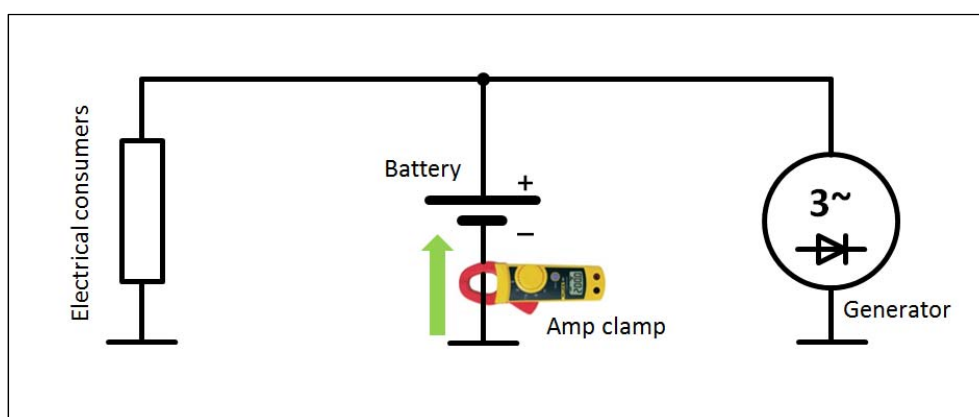


Abbildung 3-2: Prinzipdarstellung der Einbaulage der Strommesszange

Gemäß der Einbaurichtung (grüner Pfeil) der Strommesszange sind positiv gemessene Ströme Ladeströme, Ströme mit negativem Vorzeichen entladen die Batterie.

Die Korrektur der Testresultate für Kraftstoffverbrauch bzw. CO₂-Emissionen soll als Funktion der Energiebilanz ΔE_{REESS} der Batterie dargestellt werden. Die korrigierten Werte sollen eine Fahrt mit ausgeglichener Energiebilanz repräsentieren ($\Delta E_{\text{REESS}} = 0$).

Anhand der Messdaten von vier vermessenen Fahrzeugen wurden verschiedene Varianten zur SOC-Korrektur ausgearbeitet.

3.1.1 Variante A

Variante A ist jene Vorgehensweise, wie sie in [1] beschrieben ist.

Zur Berechnung der Ladebilanz wird aus den gemessenen Strömen die Arbeit pro Phase berechnet.

$$\Delta W_{\text{BattPhase}(i)} = U_{\text{REESS}} * \sum_{t=1}^{t_{\text{Phase}}} I(t) * \frac{1}{f} \quad (3-1)$$

Zur Korrektur der CO₂-Emissionen werden generische Motor-Willansfaktoren verwendet. Diese sind abhängig vom verwendeten Kraftstoff und vom Motorkonzept (Saugmotor, aufgeladener Motor).

Tabelle 7: Willansfaktoren für verschiedene Kraftstoffe und Motorkonzepte [1]

			<i>Naturally aspirated</i>	<i>Supercharged</i>
Positive ignition	Gasoline (E0)	l/kWh	0.264	0.28
		gCO ₂ /kWh	630	668
	Gasoline (E5)	l/kWh	0.268	0.284
		gCO ₂ /kWh	628	666
	CNG (G20)	m ³ /kWh	0.259	0.275
		gCO ₂ /kWh	465	493
	LPG	l/kWh	0.342	0.363
		gCO ₂ /kWh	557	591
	E85	l/kWh	0.367	0.389
		gCO ₂ /kWh	608	645
Compression ignition	Diesel (B0)	l/kWh	0.22	0.22
		gCO ₂ /kWh	581	581
	Diesel (B5)	l/kWh	0.22	0.22
		gCO ₂ /kWh	581	581

Die Änderung der CO₂-Emissionen bzw. des Verbrauchs errechnet sich mit Hilfe der Willansfaktoren aus obiger Tabelle unter Berücksichtigung des Generatorwirkungsgrades.

$$\Delta CO_{2_{Phase(i)}} = \frac{\Delta W_{Batt_{Phase(i)}} * k_{Willans}}{3600 * \eta_{Gen}} \quad (3-2)$$

Generatorwirkungsgrad $\eta_{Gen} = 0,67$

Der Generatorwirkungsgrad ist ebenfalls ein im WLTP definierter Wert ([1], S.189).

Die Gesamtänderung der CO₂-Emissionen ist die Summe der Änderung der vier Phasen im WLTP.

$$\Delta CO_{2_{\Delta B}} = \sum_{i=1}^4 \Delta CO_{2_{Phase(i)}} \quad (3-3)$$

3.1.2 Variante B

Variante A verwendet zur Berechnung der Arbeit eine konstante Batteriespannung. Im realen Fahrbetrieb ist die Spannung nicht konstant. Sie schwankt zwischen 12 und 14 V und ist abhängig von der erforderlichen Leistung im Bordnetz. Ist der Verbraucherstrom größer als der Generatorstrom, kann der Generator nicht alle Verbraucher versorgen. Das Spannungsniveau im Bordnetz sinkt auf das der Batterie und diese unterstützt den Generator zur Versorgung der Verbraucher. Ist der Verbraucherstrom kleiner als der Generatorstrom, so kann mit der Differenz die Batterie geladen werden. Dazu hebt der Generatorregler die

Bordnetzspannung auf über 14V an [5]. Zur Berechnung der Arbeit wird in Variante B daher nicht eine konstante Batteriespannung herangezogen, sondern die während des Fahrzyklus gemessene Bordnetzspannung.

Da das Laden und Entladen der Batterie naturgemäß mit Verlusten behaftet ist, werden auch die Lade- und Entladewirkungsgrade der Batterie berücksichtigt. Diese sind vom Batterietyp abhängig. Bei allen Testfahrzeugen waren Batterien mit AGM-Technologie verbaut. Bei AGM-Batterien (Absorbent Glass Mat) wird der Elektrolyt in einem Glasvlies gebunden, d.h. zwischen den Plus- und Minusplatten befindet sich anstelle der Separatoren eine in einem Glasvlies gebundene Schwefelsäure. Mit diesem Aufbau ergibt sich ein extrem geringer Wasserverlust, womit die Batterie absolut wartungsfrei ist. Der große Vorteil einer AGM-Batterie liegt in der hohen Zyklenfestigkeit. Die Lebensdauer, bezogen auf Lade-/Entladezyklen, ist in etwa doppelt so hoch wie bei einer Standardbatterie. Dadurch eignet sie sich hervorragend für PKW die mit Technologien wie Start/Stopp-Automatik und Bremsenergieerückgewinnung ausgestattet sind [4].

Trotz einer intensiven Literaturrecherche konnten keine verlässlichen Aussagen über die Lade- und Entladewirkungsgrade einer AGM-Batterie gefunden werden. Daher wurde mit Hilfe von Grundlagenformeln der Elektrotechnik eine Abschätzung durchgeführt. Der Innenwiderstand der AGM-Batterie wurde mit 10 mΩ angenommen [4]. Die zu- oder abgeführte Leistung errechnet sich aus Spannung an der Batterie und dem Strom.

$$P_{Batt} = U_{Batt} * I_{Batt} \quad (3-4)$$

Die Verlustleistung ergibt sich aus dem Strom und dem Innenwiderstand der Batterie.

$$P_v = I_{Batt}^2 * R_i \quad (3-5)$$

Daraus können die Lade- und Entladewirkungsgrad berechnet werden.

$$\eta_{Laden} = 1 - \frac{P_v}{P_{Batt}} \quad (3-6)$$

$$\eta_{Entladen} = \frac{P_{Batt}}{P_{Batt} + P_v} \quad (3-7)$$

Aus dem mittleren Ladewirkungsgrad und dem mittleren Entladewirkungsgrad über den Zyklus kann der Wirkungsgrad der Batterie berechnet werden.

$$\eta_{Batt} = \eta_{Laden} * \eta_{Entladen} \quad (3-8)$$

Auf diese Weise wurde für die auf dem Prüfstand vermessenen Testfahrzeuge ein mittlerer Batteriewirkungsgrad von 94% ermittelt.

Bevor die Ladebilanz berechnet werden kann, werden die Lade- und Entladearbeiten unter Berücksichtigung der momentanen Bordnetzspannung berechnet.

$$W_{Batt_Laden\,Phase(i)} = \sum_{t=1}^{t_{Phase}} U_{(t)Phase(i)} * I_{Laden(t)Phase(i)} * \frac{1}{f} \quad (3-9)$$

$$W_{Batt_Entladen\,Phase(i)} = \sum_{t=1}^{t_{Phase}} U_{(t)Phase(i)} * I_{Entladen(t)Phase(i)} * \frac{1}{f} \quad (3-10)$$

Die CO₂-Emissionen werden analog zu Variante A aus der Arbeitsdifferenz berechnet. Die Ladarbeit verringert sich um den Lade- und Entladewirkungsgrad.

$$\Delta W_{BattPhase(i)} = W_{Batt_EntladenPhase(i)} - W_{Batt_LadenPhase(i)} * \eta_{Batt} \quad (3-11)$$

Die Berechnung der CO₂-Änderung pro Phase sowie die Gesamtänderung berechnen sich analog Gleichung (3-2) und Gleichung (3-3).

3.1.3 Variante C

Die im Zuge dieser Masterarbeit ausgearbeitete Variante C unterscheidet sich deutlich von Variante A und B. Die dritte Variante die erarbeitet wurde, arbeitet nicht mit generischen Willanslinien, sondern erstellt diese fahrzeugspezifisch. Außerdem berücksichtigt sie beim Laden der Batterie den momentanen Betriebspunkt des Motors, d.h. dass die Ladeströme in Schubphasen keinen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben. Befindet sich ein Fahrzeug im Schubbetrieb, kehrt sich der Leistungsfluss um und die Räder treiben den Motor an. Die in dieser Phase geleistete Generatorarbeit bleibt bei der Korrektur unberücksichtigt. Die Schleppleistung wird mit Hilfe der fahrzeugspezifischen Willanslinie ermittelt. Da der Einfluss der Generatorleistung auf den Verbrauch untersucht werden soll, muss die Willanslinie auf die Motorleistung bezogen werden. Die Motorleistung setzt sich zusammen aus der Achsleistung und der Generatorleistung unter Berücksichtigung der jeweiligen Wirkungsgrade.

$$P_{Mot(t)} = \frac{P_{Achs(t)}}{\eta_{Antrieb}} + \frac{P_{Gen-pos(t)}}{\eta_{Gen} * \eta_{Mot-Gen}} \quad (3-12)$$

Der Antriebsstrangwirkungsgrad wird in Anlehnung an [7] mit 0,92 angenommen.

Bei der Variante A und B wird jener Generatorwirkungsgrad herangezogen, der im WLTP angegeben wird. Der in Variante C verwendete Generatorwirkungsgrad wurde mit Hilfe eines an der TU Graz vermessenen Generatorkennfeldes ermittelt. Dabei wurde für jeden Messpunkt, bei dem der Generator Strom an die Batterie lieferte, der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Motordrehzahl und Stromstärke berechnet. Bei allen untersuchten Messfahrten ergab dies einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von 0,68%. Bei der Übertragung der Motorleistung auf den Generator treten ebenfalls Verluste auf. Der Übertragungswirkungsgrad zwischen Motor und Getriebe wurde mit 0,98% angenommen. Dies ergibt einen Gesamtwirkungsgrad von 0,67%. Dieser Wert deckt sich mit jenem Wirkungsgrad, wie er bei Variante A und Variante B verwendet wurde.

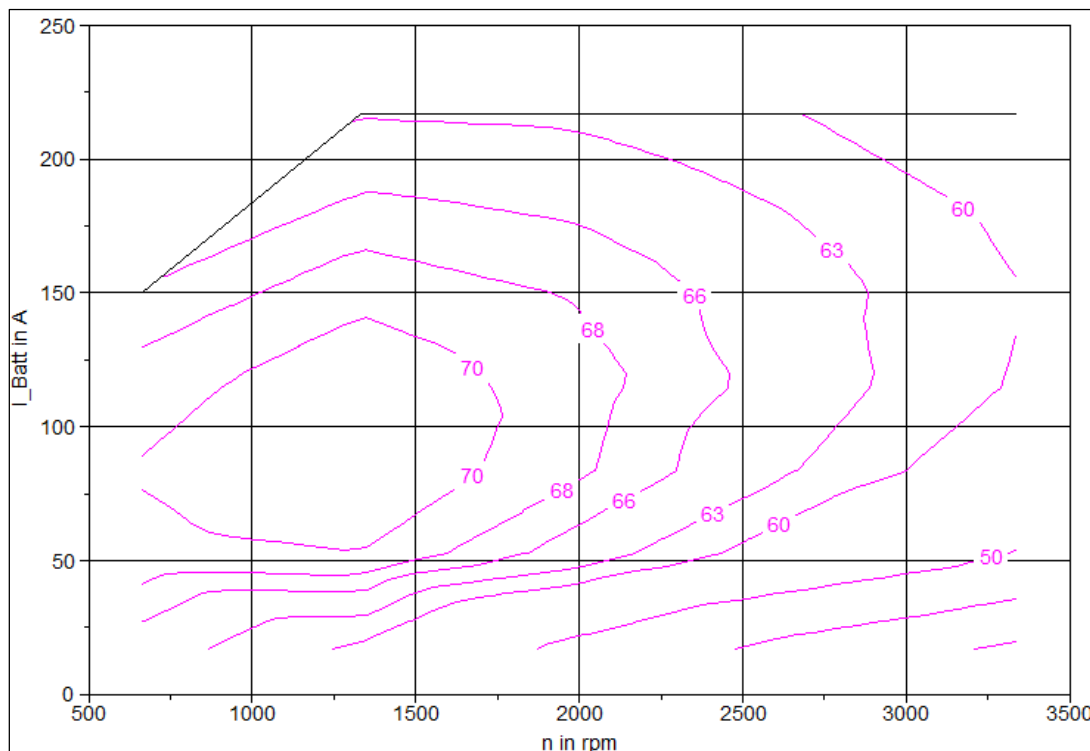


Abbildung 3-3: Kennfeld eines PKW-Generators

Die durchschnittliche positive Generatorleistung pro Phase $P_{Gen-pos(t)}$ wird aus der gemessenen Bordspannung und dem Ladestrom der Batterie berechnet.

$$P_{Gen-pos(t)Phase(i)} = \frac{\sum_1^{t_{Phase(i)}} U_{(t)Phase(i)} * I_{Laden(t)Phase(i)}}{t_{Phase(i)} * 1000} \tag{3-13}$$

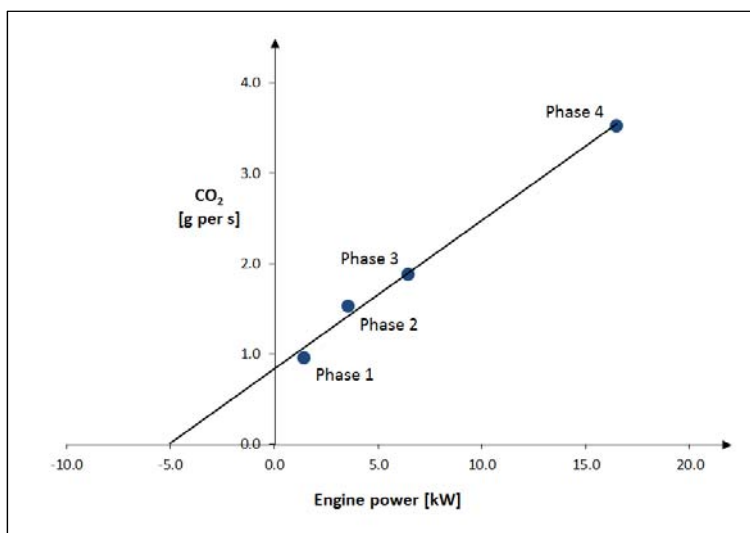


Abbildung 3-4: Fahrzeugspezifische Willanslinie bezogen auf die Motorleistung

Auf der y-Achse werden die durchschnittlichen sekundlichen CO₂-Emissionen pro Phase aufgetragen. Für jede Phase im WLTP-Zyklus kann nun ein Punkt in das Diagramm eingetragen werden. Die Regressionsgerade dieser Punkte ist die Fahrzeug-Willanslinie.

Die Extrapolation der Willanslinie bis zum Kraftstoffnullverbrauch ermöglicht eine gute Abschätzung der mechanischen Verlustleistung von Motor und Generator. Die Steigung der Willanslinie kann als Maß dafür herangezogen werden, wieviel Mehr- oder Minderausstoß an CO₂ der Generator verursacht.

$$k_{Willans} = \frac{\Delta CO_2}{\Delta P_{Engine}} \quad (3-14)$$

Die Generatorleistung ist dann verbrauchsneutral, wenn die von den Rädern abgegebene Leistung, vermindert um den Wirkungsgrad des Antriebsstrangs, größer ist als die Schleppleistung des Motors. Befindet sich das Fahrzeug im Schubbetrieb wird kein Kraftstoff eingespritzt und die vom Generator geleistete Arbeit zum Laden der Batterie verursacht keinen Mehrverbrauch.

$$W_{Batt_Entladen} = \sum_{t=1}^{t_{Phase(i)}} U_{(t)} * I_{Entladen(t)} * \frac{1}{f} \quad (3-15)$$

Die Ladearbeit des Generators berechnet sich analog zur Entladearbeit der Batterie.

$$W_{Batt_Laden} = \sum_{t=1}^{t_{Phase(i)}} U_{(t)} * I_{Laden(t)} * \frac{1}{f} \quad (3-16)$$

Die Ladebilanz berechnet sich aus der Differenz der zugeführten, nicht im Schubbetrieb geleisteten Ladearbeit und der Entladearbeit.

$$\Delta W_{Batt} = W_{Batt_Entladen} - W_{Batt_Laden} * \left(1 - \frac{t_{Laden_Schub}}{t_{Laden}}\right) \quad (3-17)$$

Der Klammerausdruck ist dabei jener Zeitanteil, indem sich der Motor nicht im Schubbetrieb befindet. Die Verbrauchsänderung berechnet sich aus der Steigung der Willanslinie (Abbildung 3-4) und der Ladebilanz der Batterie.

$$\Delta CO_{2_{Phase(i)}} = k_{Willans} * \Delta W_{Batt_Phase(i)} \quad (3-18)$$

Die gesamte Verbrauchsänderung über den Zyklus errechnet sich analog Formel (3-3).

3.1.4 Gegenüberstellung der Variante

Während Variante A und B sehr ähnlich aufgebaut sind, unterscheidet sich Variante C deutlich von A und B. Variante C wurde im Hinblick darauf entwickelt, große Differenzen in der Ladebilanz zu korrigieren. Diese kommen beim WLTP-Typprüfzyklus nicht vor, da der Ladebilanzwert 0,5% der während der Messung zugeführten Kraftstoffenergie nicht überschreiten darf.

Variante C weist folgende Vor- und Nachteile gegenüber Variante A und B auf:

Vorteile:

- Berücksichtigung von intelligenten Ladestrategien des Generators, da nur die Generatorarbeit bei positiver Motorleistung in die Berechnung mit einfließt
- Willanslinie wird individuell für jedes Fahrzeug erstellt

Nachteile:

- Annahme von Wirkungsgraden ist immer mit Unsicherheiten behaftet
- Antriebsstrangwirkungsgrad nicht konstant über den gesamten Zyklus (Warmlaufphase), außerdem abhängig von der verwendeten Technologie (Automatik / manuelles Getriebe, Front- / Heck- / Allradantrieb)
- Insgesamt aufwendiger als Variante A und B

Eine Gegenüberstellung der beschriebenen Varianten sowie die erzielbaren Resultate sind in Kapitel 4 zusammengefasst.

3.2 Korrektur von Geschwindigkeitsabweichungen

Bei Emissionsmessungen auf der Rolle sind die Fahrer angehalten die vorgegebene Geschwindigkeit möglichst genau einzuhalten. Da der vorgegebene Geschwindigkeitsverlauf von den Fahrern nicht exakt nachgefahren werden kann, gibt es einen Toleranzbereich in dem die aktuelle Geschwindigkeit liegen muss. Die oberen und unteren Toleranzgrenzen sind beim WLTP Fahrzyklus folgendermaßen definiert:

- Die obere Toleranzgrenze ist 2 km/h höher als die höchste vorgegebene Geschwindigkeit innerhalb ± 1 s vom aktuellen Zeitpunkt.
- Die untere Toleranzgrenze ist 2 km/h niedriger als die niedrigste vorgegebene Geschwindigkeit innerhalb ± 1 s vom aktuellen Zeitpunkt.

Größere Abweichungen sind nur dann zulässig, wenn sie nicht länger als eine Sekunde dauern und nicht öfter als zehnmal pro Test vorkommen [1].

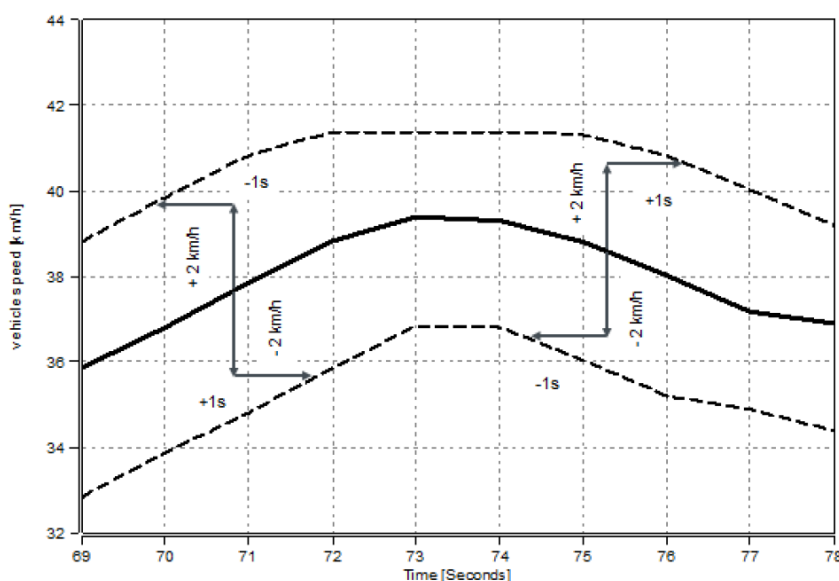


Abbildung 3-5: Geschwindigkeitstoleranzen im WLTP-Fahrzyklus [1]

Innerhalb der Toleranzgrenzen können die Prüfstandsfahrer die Messung beeinflussen. Bewegen die Prüfstandsfahrer das Fahrzeug nahe der unteren Geschwindigkeitsgrenze verringern sich die geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstände die das Fahrzeug überwinden muss und der Verbrauch sinkt. Andererseits kann durch eine hohe Geschwindigkeit in Schubphasen die Fahrdistanz erhöht werden. Da Verbräuche üblicherweise auf Distanzen bezogen werden (l/100km oder g/km) beeinflusst dies ebenfalls die Verbrauchswerte. Um das Ausnutzen dieser Toleranzbreiten zu unterbinden, ist es daher notwendig die gemessenen Leistungen an der Achse auf Sollwerte zu korrigieren und den Verbrauch auf eine einheitliche Bezugstrecke beziehen.

Die von der Bremse aufzubringende Bremskraft ist die Differenz zwischen dem Fahrwiderstandspolynom und dem Polynom der Eigenverluste.

$$F_{Bremsse} = (R_0 - A_0) + (R_1 - A_1) * v + (R_2 - A_2) * v^2 \quad (3-19)$$

Das Fahrwiderstandspolynom wird durch Ausrollversuche auf der Straße ermittelt. Die Eigenverluste werden mittels Loss runs auf der PKW-Rolle bestimmt. Da R_0 bis R_2 bzw. A_0 bis A_2 konstante Werte sind, ist die Bremskraft nur eine Funktion der Geschwindigkeit. Jede Abweichung vom vorgegebenen Geschwindigkeitsverlauf nimmt damit direkt Einfluss auf die Bremsleistung und damit auch auf die erforderliche Motorleistung.

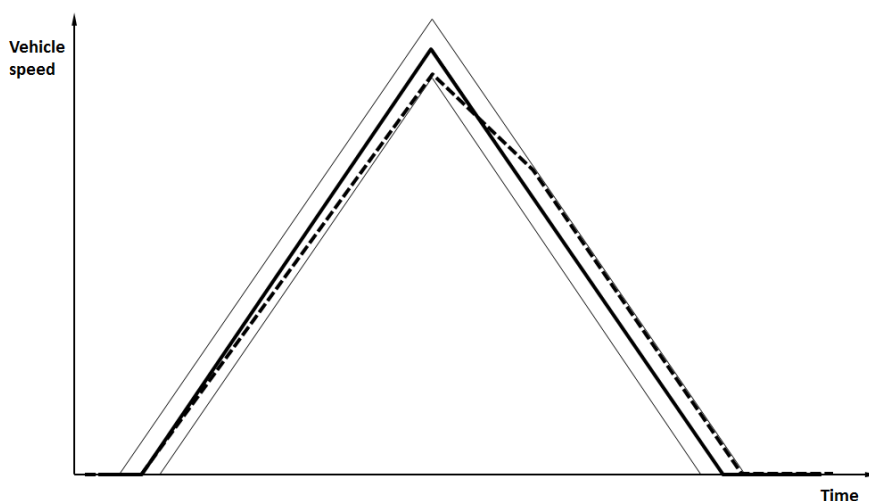


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung verschiedener Geschwindigkeitsverläufe

In Abbildung 3-6 sind zwei verschiedene Geschwindigkeitsverläufe dargestellt. Die dünnen Linien stellen schematisch die Toleranzgrenzen dar. Die durchgezogene Linie stellt einen Geschwindigkeitsverlauf dar, bei dem genau der Zielgeschwindigkeit gefolgt wird. Die strichlierte Linie stellt einen sehr verbrauchsünstigen Fahrstil dar. In der Beschleunigungsphase wird das Fahrzeug sanft beschleunigt und nur bis zur unteren Geschwindigkeitstoleranz bewegt. Dies führt zu einer geringeren Antriebsleistung an der Achse und damit zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch. In der Verzögerungsphase wird das Fahrzeug nahe der oberen Geschwindigkeitstoleranz bewegt. Dadurch legt das Fahrzeug in der Schubphase eine größere Strecke zurück. Da die Kraftstoffmenge bzw. die CO_2 -Emissionen auf eine Strecke bezogen werden ($[\text{g}/\text{km}]$ bzw. $[\text{l}/100\text{km}]$) wird dadurch ebenfalls ein geringerer Verbrauch erzielt.

3.2.1 Korrektur der Geschwindigkeitsabweichung

Abweichungen gegenüber der Zielgeschwindigkeit werden mit Hilfe der Fahrzeug-Willanslinie korrigiert. Die Willanslinie wird aus den Messdaten erstellt. Die Vorgehensweise wird in Kapitel 2.5 erklärt. Aus der mathematischen Beschreibung der Willanslinie können der Willansfaktor k_{Willans} und die Schleppleistung P_{Schlepp} (Gleichung 2-19) des Fahrzeuges berechnet werden.

Die momentanen Abweichungen von der Zielgeschwindigkeit werden in äquivalente Leistungsdifferenzen an der Achse umgerechnet. Die Leistung an der Achse setzt sich zusammen aus den Fahrwiderständen und dem Beschleunigungswiderstand. Die Beschleunigung wird aus dem Geschwindigkeitsverlauf berechnet [6].

$$a_{soll(t=i)} = \frac{v_{t=i+1} - v_{t=i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (3-20)$$

Die Berechnung von $a_{ist(t)}$ erfolgt analog zur obigen Gleichung, sofern die Ist-Beschleunigung nicht vom Rollenprüfstand mitgemessen wird [6].

$$P_{Achse_soll(t)} = (m_{KFZ} * a_{soll(t)} + R_0 + R_1 * v_{soll(t)} + R_2 * v_{soll(t)}^2) * v_{soll(t)} \quad (3-21)$$

$$P_{Achse_ist(t)} = (m_{KFZ} * a_{ist(t)} + R_0 + R_1 * v_{ist(t)} + R_2 * v_{ist(t)}^2) * v_{ist(t)} \quad (3-22)$$

Die Arbeit an der Achse ist definiert als Leistung multipliziert mit der Zeit. Zu beachten ist, dass nur jene Leistungen betrachtet werden, die auch einen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben. Dementsprechend werden nur Leistungen addiert, die größer sind als die Schleppleistung. Ist die momentane Leistung kleiner als die Schleppleistung, befindet sich das Fahrzeug im Schubbetrieb und es wird kein Kraftstoff eingespritzt.

$$W_{Achse_soll} = \sum_{t=1}^{t_{Test}} P_{Achse_soll(t)} * \frac{1}{f} \quad \text{wenn } P_{Achse_soll(t)} \geq P_{Schlepp} \quad (3-23)$$

$$W_{Achse_ist} = \sum_{t=1}^{t_{Test}} P_{Achse_ist(t)} * \frac{1}{f} \quad \text{wenn } P_{Achse_ist(t)} \geq P_{Schlepp} \quad (3-24)$$

Je kleiner die Differenz dieser beiden Arbeiten ist, desto besser wurde dem vorgegebenen Geschwindigkeitsverlauf gefolgt. Mit Hilfe der Willanslinie kann die Differenz der beiden Arbeiten in eine äquivalente Verbrauchsänderung umgerechnet werden.

$$\Delta W_{Achse} = W_{Achse_soll} - W_{Achse_ist} \quad (3-25)$$

$$\Delta CO_{2_Achse} = \Delta W_{Achse} * k_{Willans} \quad (3-26)$$

Mit dieser Korrektur werden nur Geschwindigkeitsabweichungen berücksichtigt, wenn die momentane Achsleistung größer Null ist. In Schubphasen ist die Achsleistung kleiner Null und es wird kein Kraftstoff eingespritzt. Durch Ausnutzen der Geschwindigkeitstoleranzen können die Prüfstandsfahrer auch in diesen Phasen den Verbrauch merklich beeinflussen. Durch eine Korrektur der zurückgelegten Strecke kann dieser Einfluss neutralisiert werden.

3.2.2 Korrektur der zurückgelegten Strecke

Die Nichteinhaltung der Zielgeschwindigkeit führt nicht nur zu einer Änderung der Leistungen an der Achse, sondern beeinflusst auch die zurückgelegte Wegstrecke. In Schubphasen kann durch das Bremsverhalten der Fahrer gezielt Einfluss auf die zurückgelegte Strecke genommen werden. Der Motor befindet sich in diesen Phasen meistens im Schleppbetrieb, d.h. es wird kein Kraftstoff eingespritzt. Somit können die Fahrer die Fahrdistanz beeinflussen, ohne dass dies Auswirkungen auf die verbrauchte Kraftstoffmenge [g] hätte. Um dem entgegenzuwirken müssen deshalb die gemessenen Emissionen [g] auf eine jene Distanz bezogen werden, die unter Einhaltung der Zielgeschwindigkeit erreicht werden würde.

$$s_{soll} = v_{soll} * t \quad (3-27)$$

$$CO_2 \left[\frac{g}{km} \right] = \frac{CO_{2_absolut} [g]}{s_{Soll} [km]} \quad (3-28)$$

Um den Einfluss von Ausrollphasen im Schleppbetrieb zu verdeutlichen, wurden mit Fahrzeug 1 eine Abwandlung der ersten Phase des NEDC nachgefahren. In den Schubphasen wurden jedoch zwei unterschiedliche Strategien verfolgt. Bei der ersten Fahrt war der Geschwindigkeitsverlauf exakt einzuhalten und damit musste in Schubphasen auch gebremst werden. Bei der zweiten Fahrt hatte der Prüfstandsfahrer die Vorgabe, in Schubphasen das Fahrzeug möglichst lange auszurollen. Die Geschwindigkeitstoleranzen waren dabei nicht zu berücksichtigen.

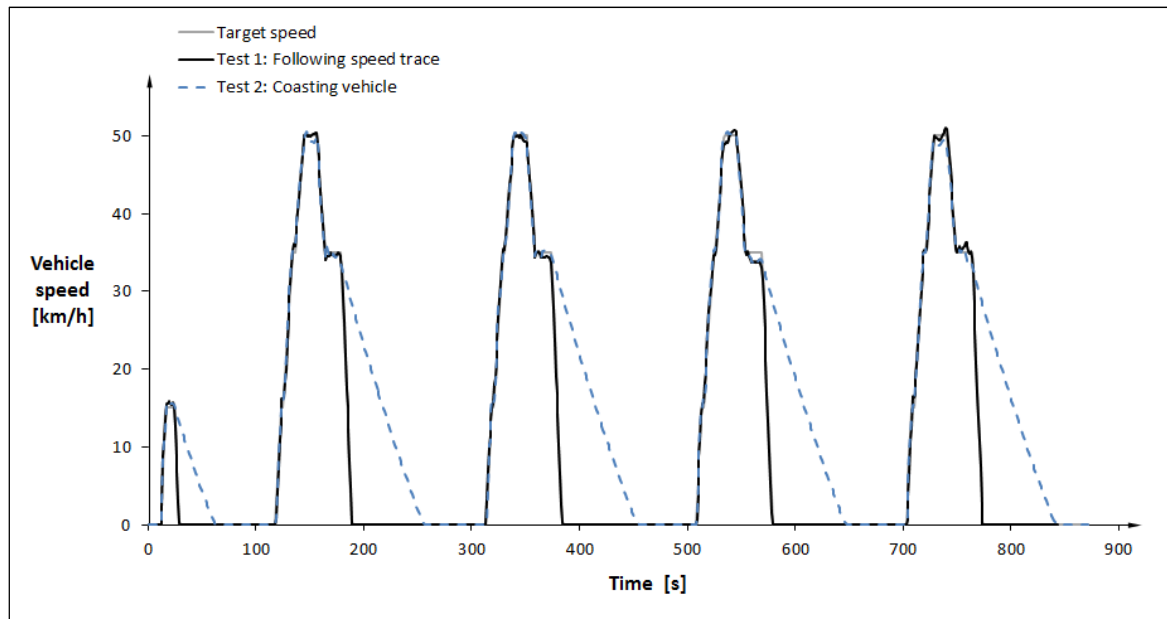


Abbildung 3-7: Geschwindigkeitsverläufe von Test 1 und Test 2

Trotz der annähernd gleichen emittierten Menge an CO_2 [g], war die CO_2 -Emission in [g/km] bzw. der Verbrauch in [l/100km] von Test 2 um mehr als ein Drittel niedriger. Werden die beiden gemessenen CO_2 -Werte hinsichtlich des Ladezustandes der Batterie, der Geschwindigkeit und der Strecke korrigiert, so können die Unterschiede in den Emissionen der beiden Tests auf ein Minimum reduziert werden.

Tabelle 8: Überblick der Ergebnisse von Test 1 und 2

	Messergebnisse			Korrekturen			Korrigiertes Ergebnis	
	CO_2	Ist-Strecke	CO_2 -Emission	ΔB	Δv	Soll-Strecke	Δs	CO_2 -Emission
	[g]	[km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[km]	[g/km]	[g/km]
Test 1	433,1	2,646	163,7	4,1	-0,4	2,653	54,9	170,3
Test 2	434,4	3,889	111,7	8,7	-4,2	2,653	-0,4	167,8

In der Praxis sind derartige Unterschiede in der zurückgelegten Strecke natürlich nicht möglich, da den Prüfstandsfahrern bei der Wahl der Fahrgeschwindigkeit durch die Geschwindigkeitstoleranzen Grenzen gesetzt sind. Das Beispiel soll aber verdeutlichen wie wichtig es ist, CO₂-Emissionen auf eine einheitliche Basis zu beziehen um etwaige Fahrereinflüsse ausschließen zu können.

Alle anderen Messungen am Rollenprüfstand wurden unter möglichst genauer Einhaltung der Geschwindigkeitsvorgaben durchgeführt. Trotzdem traten signifikante Unterschiede in der zurückgelegten Strecke auf. Eine Korrektur der CO₂-Werte ist daher keinesfalls zu vernachlässigen.

Tabelle 9: Differenz zwischen der gefahrenen Strecke und Zielstrecke im WLTC am Beispiel von Fahrzeug 1

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Summe	Ab- weichung	Korrektur der CO ₂ -Emission
	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[%]	[g/km]
Test-Nr.							
Strecke bei v_{soll}	3,095	4,756	7,162	8,254	23,266		
Messung 1	3,091	4,752	7,130	8,231	23,205	-0,26	-0,38
Messung 2	3,098	4,741	7,148	8,232	23,219	-0,20	-0,29
Messung 3	3,079	4,745	7,146	8,237	23,206	-0,26	-0,40
Messung 4	3,103	4,766	7,147	8,236	23,253	-0,06	-0,07
Messung 5	3,078	4,751	7,145	8,235	23,209	-0,25	-0,39
Messung 6	3,082	4,766	7,204	8,230	23,281	0,06	0,03
Messung 7	3,064	4,743	7,147	8,244	23,198	-0,29	-0,50
Messung 8	3,046	4,741	7,172	8,251	23,209	-0,24	-0,48
Messung 9	3,106	4,748	7,145	8,240	23,239	-0,12	-0,15

3.3 Korrektur der simulierten Fahrwiderstände

Um bei Rollenmessungen aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten, ist es notwendig die auf der Straße ermittelten Fahrwiderstände möglichst exakt nachzubilden. Auch die Bestimmung der Eigenverluste von Fahrzeug und Rolle ist von großer Bedeutung. Sowohl die Ermittlung als auch das Einstellen dieser Fahrwiderstände unterliegen Unsicherheiten. Dies kann dazu führen, dass die Rolle von der Bremse zu sanft oder zu stark abgebremst wird und dadurch die gemessenen Verbrauchswerte verfälscht werden.

3.3.1 Korrektur der Fahrwiderstände

Eine Möglichkeit zur Kontrolle der eingestellten Fahrwiderstände ist, mit dem Testfahrzeug unmittelbar nach der Messfahrt einen oder mehrere Coast downs auf der Rolle durchzuführen.

Analog zum Loss run werden Geschwindigkeit und Zeit gemessen und daraus das Fahrwiderstandspolynom berechnet. Dazu werden innerhalb des aufgezeichneten Geschwindigkeitsverlaufs (20-120 km/h) Referenzgeschwindigkeiten im Abstand von 10 km/h definiert. Mit Hilfe der gemessenen Zeit zwischen den Referenzpunkten kann für jede Referenzgeschwindigkeit die dazugehörige Fahrwiderstandskraft berechnet werden.

$$F_j = -\frac{1}{3,6} * (m_{KFZ} + m_{rot}) * \frac{2 * \Delta v}{\Delta t_j} \quad (3-29)$$

Stimmt das Polynom aus der Straßenmessung mit der Ausrollkurve aus dem Coast down überein, so wurden die Fahrwiderstände von der Rolle richtig simuliert. Stimmen die beiden Kurven nicht überein, so können mit Hilfe der Fahrzeug-Willanslinie diese Unterschiede korrigiert werden.

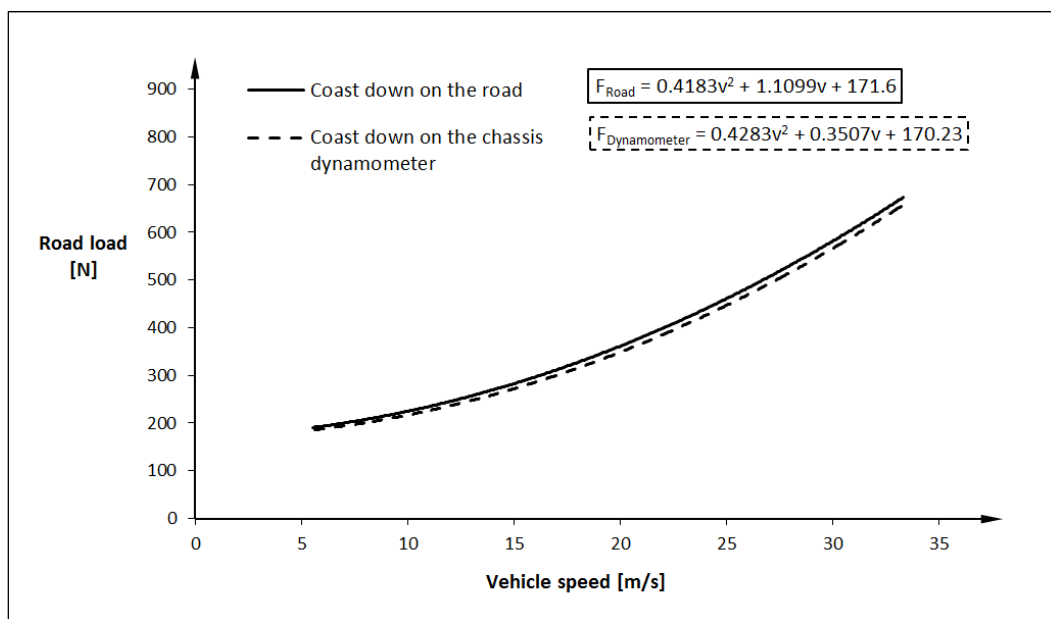


Abbildung 3-8: Unterschiedliche Ausrollkurven auf der Straße und am Prüfstand

Der Coast down soll unmittelbar nach dem Testzyklus durchgeführt werden. Je länger mit dem Coast down gewartet wird, desto mehr kühlen Rolle und Fahrzeug aus und die Ausrollkurve ist nicht mehr repräsentativ für die Bedingungen während des WLTC.

Aus dem vorgegebenen Fahrwiderstandspolynom und dem Geschwindigkeitsverlauf kann die Soll-Achsheistung berechnet werden.

$$P_{Achse_soll}(t) = (R_0 + R_1 * v_{ist} + R_2 * v_{ist}^2 + m_{KFZ} * a_{ist}) * v_{ist} \quad (3-30)$$

Die tatsächliche Achsheistung berechnet sich aus den Fahrwiderstandskoeffizienten, die aus dem Coast down nach dem Test ermittelt werden.

$$P_{Achse_ist}(t) = (R_{0_CD} + R_{1_CD} * v_{ist} + R_{2_CD} * v_{ist}^2 + m_{KFZ} * a_{ist}) * v_{ist} \quad (3-31)$$

Zur Berechnung der Arbeit werden jene Leistungen herangezogen, die größer als die Schleppleistung sind.

$$W_{Fwdst_soll} = \sum_{i=1}^{t_{Test}} P_{Fwdst_soll(t)} * \frac{1}{f} \quad \text{wenn } P_{Fwdst_soll(t)} \geq P_{Schlepp} \quad (3-32)$$

$$W_{Fwdst_ist} = \sum_{i=1}^{t_{Test}} P_{Fwdst_ist(t)} * \frac{1}{f} \quad \text{wenn } P_{Fwdst_ist(t)} \geq P_{Schlepp} \quad (3-33)$$

Durch Multiplikation mit der Steigung der Willanslinie kann die Arbeitsdifferenz in eine äquivalente Verbrauchsdifferenz umgerechnet werden.

$$\Delta W_{Fwdst} = W_{Fwdst_soll} - W_{Fwdst_ist} \quad (3-34)$$

$$\Delta CO_{2_Fwdst} = \Delta W_{Fwdst} * k_{Willans} \quad (3-35)$$

Entscheidenden Einfluss auf die Korrektur spielt auch die Zeit zwischen der Messung und den Coast downs. Ein Coast down unmittelbar nach dem Test führt zu den niedrigsten Fahrwiderstandskoeffizienten während mit größerem zeitlichem Abstand zwischen Test und Coast down die Ausrollzeit kürzer wird und die Fahrwiderstände steigen (Abbildung 3-9). Der Grund liegt darin, dass Rolle und Fahrzeug nach dem Test zunehmend auskühlen und dadurch die Reibungswiderstände steigen.

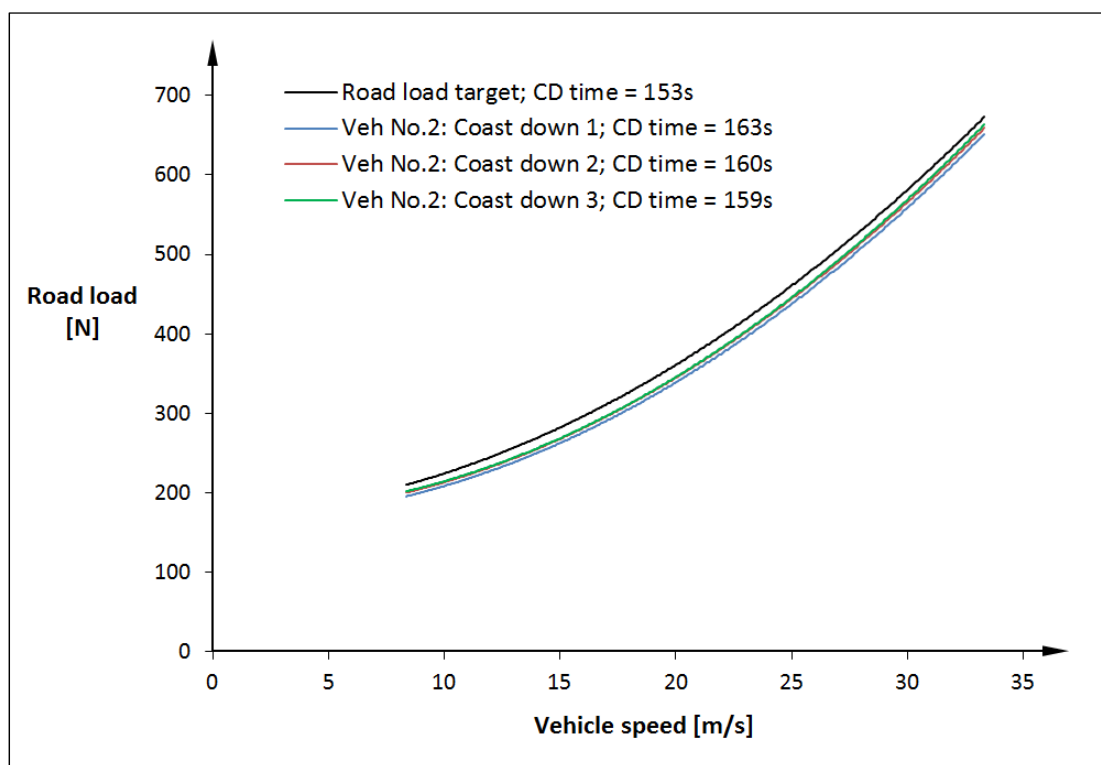


Abbildung 3-9: Ausrollkurven von drei aufeinander folgenden Coast downs nach einem WLTC im Vergleich zur Soll-Ausrollkurve

Bei allen Messungen, bei denen auch die Fahrwiderstände untersucht wurden, wurden unmittelbar nach der Messung 3 Coast downs durchgeführt und jeweils die Zeit gemessen, die das Fahrzeug benötigte, um von 120 km/h auf 20 km/h auszurollen. Die Lage der Coast downs zueinander war unabhängig vom Fahrzeug immer gleich. Die Ausrollkurve des Coast downs, der unmittelbar nach dem WLTC durchgeführt wurde, lag immer etwas tiefer als die

beiden beinahe identen Kurven des zweiten und dritten Coast downs. Zur Korrektur der Fahrwiderstände wurde der Coast down mit der mittleren Ausrollzeit herangezogen.

3.4 Korrektur der Starttemperatur

Wesentliche Einflussgrößen auf den Kraftstoffverbrauch im WLTC-Fahrzyklus sind sowohl die Raumtemperatur als auch die Öltemperatur des Motors. Die Raumtemperatur beeinflusst über die Dichte die Masse der angesaugten Luftmenge und ist somit eine wichtige Stellgröße für die Verbrennung. Außerdem kondensiert bei kaltem Motor der Kraftstoff an den Brennraumwänden und sorgt so für schlechtere Verbrennungsbedingungen. Wird ein Fahrzeug mit kaltem Motor gestartet, treten aufgrund der hohen Zähigkeit von Motoröl, Schmieröl und Getriebeöl hohe Reibleistungen im Motor und im Antriebsstrang auf, die vom Motor aufgebracht werden müssen. All diese Faktoren führen zu einem erhöhten spezifischen Kraftstoffverbrauch in der Warmlaufphase.

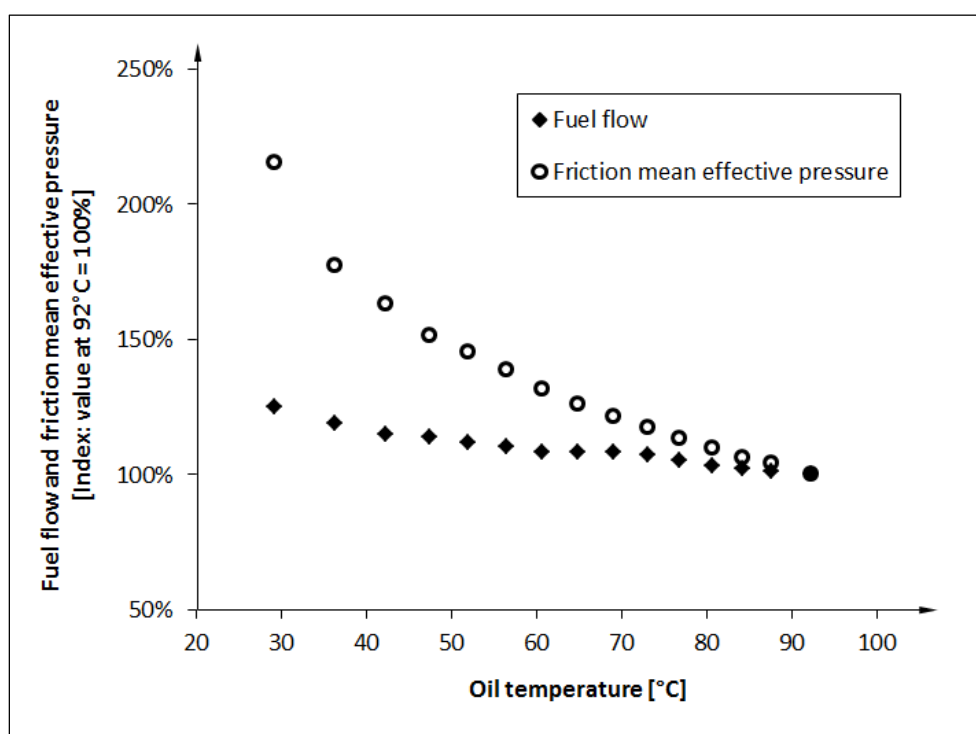


Abbildung 3-10: Kraftstoffverbrauch und Reibmitteldruck über der Öltemperatur eines 2-Liter Dieselmotors bei 2 bar Mitteldruck und 2000 U/min

Dementsprechend kann durch eine höhere Raumtemperatur während der Konditionierung ein niedrigerer Kraftstoffverbrauch im anschließenden Testzyklus auf dem Rollenprüfstand erzielt werden, da die Warmlaufphase des Fahrzeugs verkürzt wird. Die Raumtemperatur ist beim WLTP-Typprüfzyklus mit 23°C definiert, wobei eine Abweichung von $\pm 2^\circ\text{C}$ erlaubt ist [1]. Werden die Toleranzen ausgenutzt und das Testfahrzeug nahe der oberen Toleranzgrenze konditioniert, ist bereits eine signifikante Verbrauchsreduzierung im anschließenden Prüfzyklus erkennbar. Eine Korrekturfunktion soll daher helfen den Einfluss einer abweichenden Starttemperatur auf den Verbrauch im Typprüfzyklus zu eliminieren.

Da es am PKW-Rollenprüfstand nicht möglich ist mit vertretbarem Aufwand Motor- und Getriebeöltemperatur sekundlich zu erfassen und das Reibungsverhalten aller relevanten Bauteile von Motor und Antriebsstrang zu untersuchen, war es notwendig einen einfacheren Ansatz zu wählen. Dazu wurde mit einem Testfahrzeug mehrmals der WLTP-Typprüfzyklus

mit Kaltstart bei unterschiedlichen Temperaturniveaus gefahren. Da das Fahrzeug vor jedem Test mindestens acht Stunden konditioniert wurde, entsprach die Motorstarttemperatur der Raumtemperatur bei Testbeginn.

Tabelle 10: Einfluss der Starttemperatur auf den Mehrverbrauch im WLTC

	Öltemperatur bei Testbeginn	Kraftstoffverbrauch	Mehrverbrauch gegenüber Warmstart
	[°C]	[l/100km]	[%]
WLTC Kaltstart	28,6	5,58	6,4
WLTC Kaltstart	28,6	5,55	5,9
WLTC Kaltstart	24,7	5,61	7,0
WLTC Kaltstart	24,5	5,58	6,5
WLTC Kaltstart	22,4	5,61	7,1
WLTC Kaltstart	22,7	5,64	7,7
WLTC Kaltstart	11,7	5,80	10,6
WLTC Warmstart	90,0	5,24	0,0

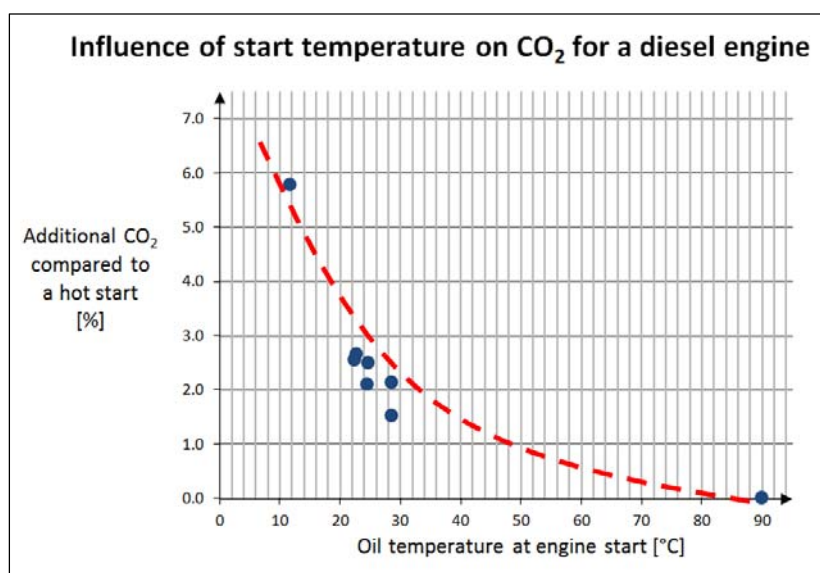


Abbildung 3-11: Einfluss der Starttemperatur auf den Mehrverbrauch im WLTC

Wie anhand von Abbildung 3-11 zu erkennen ist, besteht ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem Zusatzverbrauch und der Starttemperatur. Der prozentuelle Mehrverbrauch in Abhängigkeit der Öltemperatur bei Motorstart kann näherungsweise in einer Logarithmus-Funktion abgebildet werden. Diese Funktion ist abhängig von Kraftstoffart, Hubraum, Fahrzeugmasse etc. und daher von Fahrzeug zu Fahrzeug verschieden. Um einen besseren

Einblick in das Warmlaufverhalten von Fahrzeugen zu bekommen, war es daher notwendig die Daten mehrerer Fahrzeuge heranzuziehen. Diesel- und Benzinfahrzeuge wurden dabei getrennt untersucht, um eventuelle Einflüsse der Kraftstoffart erkennen zu können. Pro Fahrzeug wurden jeweils ein Prüfzyklus mit Kaltstart und einer mit einem Warmstart bei 23°C Raumtemperatur durchgeführt. Warmstart bedeutet, dass das Fahrzeug vor der Messung in einen betriebswarmen Zustand gebracht wurde, d.h. die Motoröltemperatur ca. 90°C betrug. Anschließend wurde aus den gemessenen CO₂-Werten der prozentuelle Mehrverbrauch bei Kaltstart gegenüber Warmstart berechnet.

Tabelle 11: Einfluss der Starttemperatur auf den Mehrverbrauch im WLTC bei Benzinfahrzeugen

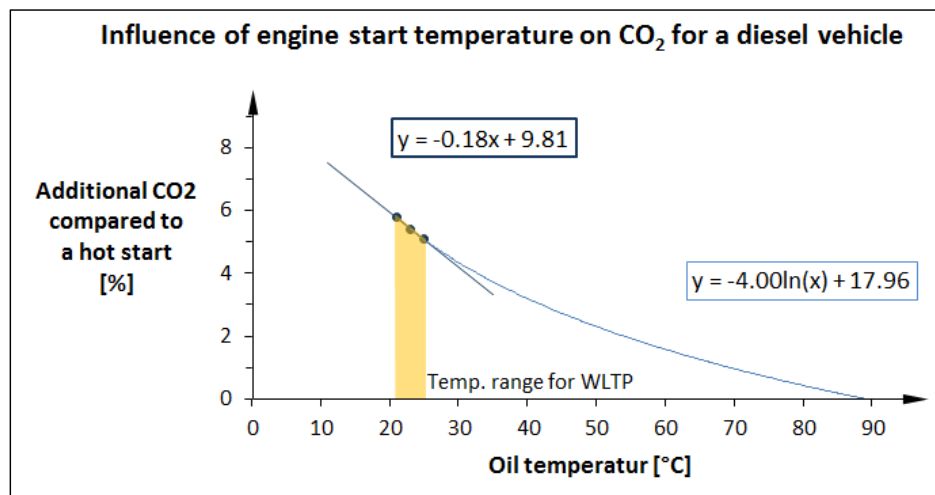
Benzinfahrzeuge	Hubraum	Leergewicht	Emissionsstandard	Mehrverbrauch bei Kaltstart (23°C) geg. Warmstart (90°C)
	[ccm]	[kg]		[%]
Fzg. B1	1339	1343	Euro 5	5,60
Fzg. B2	1984	1505	Euro 5	8,86
Fzg. B3	1197	1040	Euro 5	4,95
Fzg. B4	1390	1142	Euro 5	5,60
Fzg. B5	1997	1700	Euro 5	3,88
Fzg. B6	1364	1410	Euro 5	3,54
Fzg. B7	1368	1170	Euro 5	7,83
Fzg. B8	1390	1290	Euro 5	4,93
Mittelwert				5,65

Tabelle 12: Einfluss der Starttemperatur auf den Mehrverbrauch im WLTC bei Dieselfahrzeugen

Dieselfahrzeuge	Hubraum	Leergewicht	Emissionsstandard	Mehrverbrauch bei Kaltstart (23°C) geg. Warmstart (90°C)
	[ccm]	[kg]		[%]
Fzg. D1	1560	1318	Euro 5	6,18
Fzg. D2	1995	1565	Euro 5	3,70
Fzg. D3	1968	1276	Euro 5	7,08
Fzg. D4	1968	1542	Euro 5	6,17
Fzg. D5	1995	1580	Euro 5	4,61
Fzg. D6	2993	2150	Euro 6	4,25
Fzg. D7	2993	1810	Euro 6	5,48
Fzg. D8	1598	1204	Euro 5	8,16
Mittelwert				5,70

Die berechneten Mittelwerte für Diesel- und Benzinfahrzeugen zeigen, dass der prozentuelle Mehrverbrauch unabhängig vom Kraftstoff ist. Die folgende Vorgehensweise gilt daher für Diesel- und Benzinfahrzeuge gleichermaßen.

Im nächsten Schritt wird mit Hilfe einer logarithmischen Funktion der Zusammenhang zwischen Mehrverbrauch und Starttemperatur beschrieben. Im WLTP-Typprüfzyklus ist ein Kaltstart vorgeschrieben. Die Raumtemperatur und damit die Motorstarttemperatur muss innerhalb von 23°C±2°C liegen. Die Logarithmus-Funktion kann daher vereinfacht werden, indem sie im besagten Temperaturbereich linearisiert wird. Dazu werden mit Hilfe der Logarithmus-Funktion die Mehrverbräuche bei 21, 23 und 25°C berechnet. Durch diese Punkte wird anschließend eine Ausgleichsgerade gelegt. Die Steigung der Geraden beschreibt den prozentuellen Mehrverbrauch an CO₂ in Abhängigkeit der Temperatur.

Abbildung 3-12: Zusätzlicher CO₂-Austoss im Vergleich zu einem Warmstart

Wie oben bereits erwähnt sind sich Diesel- und Benzinfahrzeuge im Mittel bezüglich dem Warmlaufverhalten ähnlich, d.h. dass sich bei gleicher Abweichung der Solltemperatur auch gleiche prozentuelle Mehrverbräuche sowohl für Diesel als auch für Benzin ergeben. Die Gleichung zur Berechnung des Mehrverbrauchs lautet:

$$\Delta CO_2[\%] = 0,18 * (t_{Test} - t_{Ref}) \quad (3-36)$$

Der korrigierte CO₂-Verbrauch errechnet sich aus dem gemessenen Verbrauch und dem Mehrverbrauch aus Formel (3-36).

$$CO_{2\text{ korrigiert}} = CO_{2\text{ Messung}} * \left(1 + \frac{\Delta CO_2[\%]}{100}\right) \quad (3-37)$$

Bevor eine Temperaturkorrektur durchgeführt werden kann, muss zuvor der gemessene Verbrauch hinsichtlich Batterieladezustand, Achsleistung und Rollwiderstand korrigiert werden. Da sich der Mehrverbrauch relativ zum gemessenen Verbrauch bezieht, beeinflusst jeder dieser Effekte, sofern er nicht vorher korrigiert wurde, die Temperaturkorrektur.

3.5 Kombination der Korrekturfunktionen

Die Korrekturfunktionen von Ladezustand, Temperatur, Fahrwiderständen und Achsleistung beschreiben die absolute CO₂-Änderung in [g]. Die Korrektur der zurückgelegten Strecke erfolgt mittels Division der CO₂-Änderung durch die Soll-Strecke. Die Reihenfolge mit der die Korrekturen durchgeführt werden, ist ebenfalls von Bedeutung. Zur Korrektur der Fahrgeschwindigkeit (Δv) und der Fahrwiderstände (ΔR) wird fahrzeugspezifisch der Willansfaktor berechnet. Dazu werden die CO₂-Emissionen bzw. der Kraftstoffverbrauch benötigt. Um Einflüsse der Generatorleistung zu vermeiden, müssen die Verbrauchswerte bereits bezüglich der Ladebilanz korrigiert sein. Deshalb ist es notwendig, die Ladebilanz-Korrektur an den Anfang der Korrekturkette zu stellen.

Der gemessene Verbrauch bildet die Ausgangsbasis bei der Temperatur-Korrektur. Um Einflüsse von Abweichungen der Geschwindigkeit, der Fahrwiderstände oder der Ladebilanz zu vermeiden, muss dieser gemessene Verbrauch bereits mit allen anderen Funktionen korrigiert sein. Unter Berücksichtigung der oben angeführten Punkte ergibt sich eine Reihenfolge, mit welcher die Korrekturfunktionen anzuwenden sind.

1. Fahrzeug auf der Rolle messen
2. Kraftstoffverbrauch [g] oder CO₂-Emissionen [g] bestimmen
3. Ladebilanz-Korrektur berechnen (ΔB) und gemessenen Verbrauch korrigieren (CO_{2_ΔB})
4. Willans Linie erstellen (mit korrigiertem Verbrauch CO_{2_ΔB})
5. Abweichungen gegenüber der Zielgeschwindigkeit berechnen (Δv)
6. Abweichungen gegenüber den Soll-Fahrwiderständen berechnen (ΔR)
7. Abweichungen gegenüber der Referenztemperatur berechnen (ΔT)
8. Summe der Einzelkorrekturen und des gemessenen Verbrauchs bilden und auf Soll-Strecke beziehen.

Bei zukünftigen Anwendungen der Korrekturfunktionen, kann die Korrektur der Fahrwiderstände mit der Korrektur der Geschwindigkeit kombiniert werden. In dieser Arbeit werden beide Korrekturen separat durchgeführt, um den Einfluss der einzelnen

Abweichungen besser erkennen zu können. Die Ist-Leistung an der Achse kann mit den Fahrwiderständen aus dem Coast down nach der Rollenmessung und der Ist-Geschwindigkeit berechnet werden.

$$P_{Achse_ist(t)} = (R_{0_CD} + R_{1_CD} * v_{ist} + R_{2_CD} * v_{ist}^2 + m_{KFZ} * a_{ist}) * v_{ist} \quad (3-38)$$

Aus der Zielgeschwindigkeit und den Fahrwiderständen aus der Ausrollkurve auf der Straße kann die Soll-Leistung ermittelt werden.

$$P_{Achse_soll(t)} = (R_0 + R_1 * v_{soll} + R_2 * v_{soll}^2 + m_{KFZ} * a_{soll}) * v_{soll} \quad (3-39)$$

Die Differenz aus Ist- und Soll-Leistung multipliziert mit dem Fahrzeug-Willansfaktor ergibt somit die Verbrauchsänderung aufgrund von Geschwindigkeits- und Fahrwiderstandsabweichungen.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dargestellt, die mit den in Kapitel 3 erarbeiteten Korrekturfunktionen erzielt worden sind. Zur Validierung der Korrekturfunktionen wurden insgesamt drei Fahrzeuge auf dem Rollenprüfstand vermessen. Bei einigen Messungen wurden ganz gezielt Toleranzgrenzen einzelner Parameter überschritten, um auch das Verhalten der Korrekturfunktionen bei größeren Abweichungen untersuchen zu können.

Tabelle 13: Eckdaten der vermessenen Fahrzeuge

	Kraftstoff	Hubraum [l]	Leistung [kW]	Emissionsklasse	Fahrzeugleergewicht [kg]
Fahrzeug 1	Diesel	2,0	120	Euro 5	1565
Fahrzeug 2	Diesel	2,0	120	Euro 6	1570
Fahrzeug 3	Benzin	1,4	88	Euro 5	1393

4.1 Bewertung der Varianten zur Korrektur der Ladebilanz

In Kapitel 3.1 wurden drei mögliche Varianten zur Korrektur der Ladebilanz ausgearbeitet. In Zukunft soll nur eine dieser Varianten verwendet werden. Um herauszufinden welche dieser Ansätze die besten Ergebnisse liefert, wurden die gemessenen CO₂-Werte von Fahrzeug 2 und Fahrzeug 3 mit allen drei Varianten korrigiert. Um eine objektive Beurteilung der einzelnen Varianten zu ermöglichen, wurden die Messergebnisse im Vorhinein schon mit den übrigen Korrekturfunktionen korrigiert. Die in diesem Kapitel angeführten CO₂-Werte sind also schon hinsichtlich Geschwindigkeits-, Temperatur- und Fahrwiderstandsabweichungen korrigiert.

Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, wurde jede Messung in die vier Phasen des WLTC unterteilt und für jede Phase einzeln die CO₂-Werte korrigiert. Um den Einfluss einer stark positiven Ladebilanz untersuchen zu können, wurden mit jedem Fahrzeug zwei Tests mit niedrigem Batterieladezustand durchgeführt. Dazu wurden während der Konditionierphase diverse Verbraucher (Licht, Radio) eingeschaltet. Die Batterie wurde nur soweit entladen um ein problemloses Anlassen des Motors zu ermöglichen.

Ein negativer Wert in der Ladebilanz bedeutet, dass der Batterie mehr Energie zugeführt als abgeführt wurde. In diesem Fall wird der CO₂-Wert nach unten korrigiert, da ein Teil der im Kraftstoff enthaltenen chemischen Energie als elektrische Energie im System gespeichert wurde.

Tabelle 14: Vergleich der unterschiedlichen Varianten zur Korrektur der Ladebilanz für Fahrzeug 2

	Mes- sung	Phase	Variante A			Variante B			Variante C			Anmerkung	
			Lade- bilanz	Pro Phase	Ge- samt	Lade- bilanz	Pro Phase	Ge- samt	Lade- bilanz	Pro Phase	Ge- samt		
			[kWh]	[g/km]	[g/km]	[kWh]	[g/km]	[g/km]	[kWh]	[g/km]	[g/km]		
Fahrzeug 2	1	1	0,054	10,1	2,6	0,054	10,2	2,6	0,059	11,3	3,4		
		2	0,022	2,7		0,023	2,8		0,030	3,7			
		3	0,022	1,8		0,022	1,8		0,031	2,6			
		4	0,005	0,3		0,003	0,2		0,015	1,1			
	2	1	0,049	9,3	2,5	0,050	9,4	2,5	0,056	10,8	3,4		
		2	0,023	2,8		0,023	2,8		0,029	3,6			
		3	0,020	1,6		0,020	1,6		0,028	2,3			
		4	0,009	0,7		0,008	0,6		0,021	1,5			
	3	1	-0,508	-95,3	-27,3	-0,585	-109,8	-31,4	-0,559	-107,7	-29,8	Ladebilanz außerhalb der WLTP- Limits	
		2	-0,343	-41,9		-0,402	-49,1		-0,353	-44,3			
		3	-0,183	-14,8		-0,207	-16,8		-0,191	-15,9			
		4	-0,059	-4,2		-0,066	-4,6		-0,061	-4,4			
	4	1	0,052	9,7	1,7	0,053	9,9	1,6	0,059	11,5	2,3		
		2	0,026	3,1		0,026	3,2		0,033	4,2			
		3	0,015	1,2		0,015	1,2		0,021	1,8			
		4	-0,025	-1,8		-0,028	-2,0		-0,024	-1,8			
5	1	-0,514	-96,5	-25,2	-0,592	-111,2	-29,1	-0,569	-108,2	-27,3	Ladebilanz außerhalb der WLTP- Limits		
	2	-0,290	-35,4		-0,340	-41,5		-0,298	-36,9				
	3	-0,156	-12,6		-0,177	-14,3		-0,162	-13,3				
	4	-0,050	-3,5		-0,056	-3,9		-0,052	-3,7				

Bei Messung 3 und 5 mit Fahrzeug 2 wurde die Batterie vor Messbeginn entladen. Damit liegt der Ladezustand zwar außerhalb der WLTP-Toleranz, es konnte damit aber das Verhalten der Korrekturfunktionen bei großen Abweichungen untersucht werden. Bei leerer Batterie nimmt mit zunehmender Zyklusdauer der Stromfluss zur Batterie ab. In der 4. Phase des WLTC ist die Batterie beinahe wieder voll geladen und daher der Einfluss der Generatorarbeit auf den Verbrauch am geringsten.

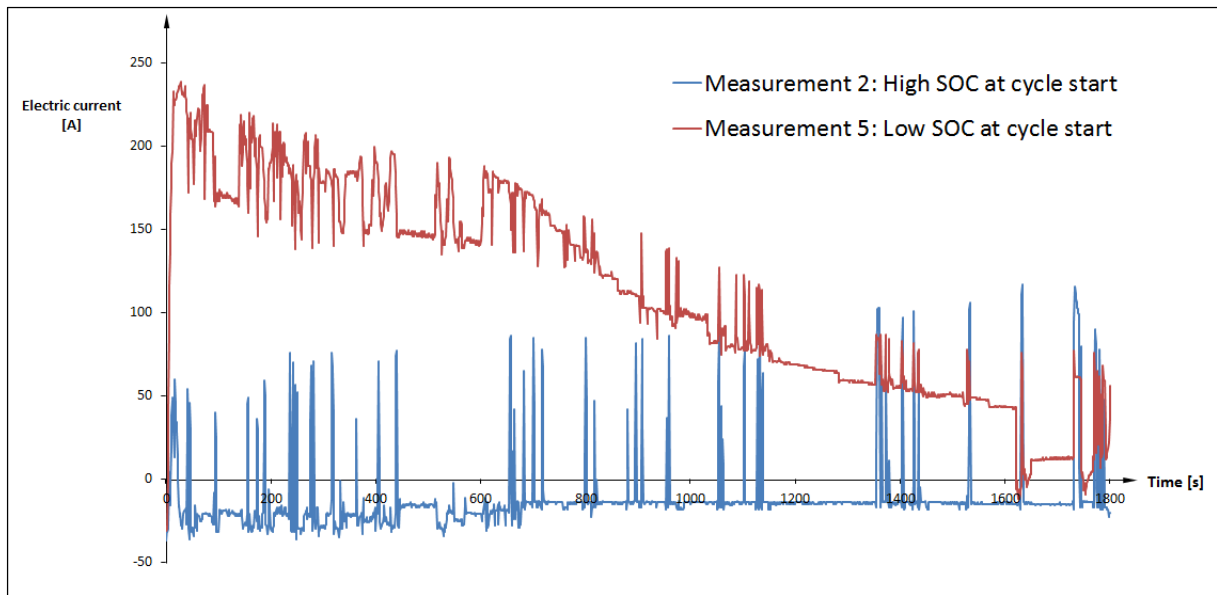


Abbildung 4-1: Stromfluss von und zur Batterie bei leerer und geladener Batterie

Die blaue Linie zeigt den Stromfluss bei voll geladener Batterie zu Testbeginn. Die positiven Peaks treten auf, sobald das Fahrzeug im Schubbetrieb ist und die Batterie geladen wird. Ist die Batterie zu Testbeginn entladen (rote Linie) treten permanent Ladeströme auf. Diese nehmen jedoch im Laufe des Zyklus ab.

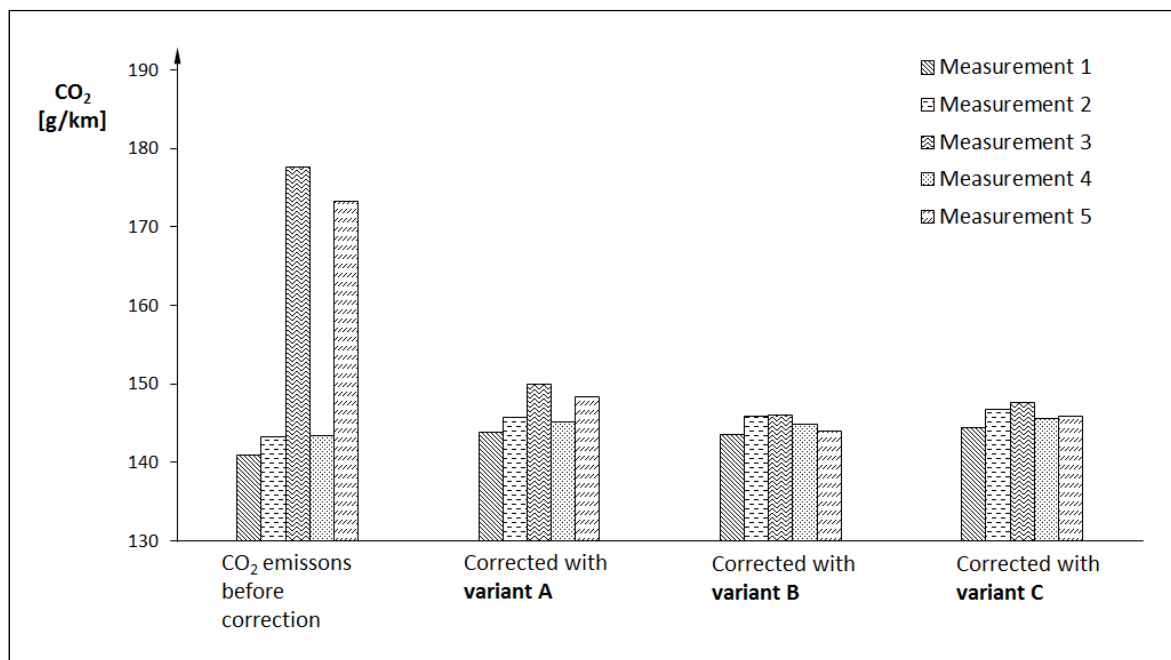


Abbildung 4-2: Gegenüberstellung der Resultate bei verschiedenen Ladebilanz-Korrekturen für Fahrzeug 2

Tabelle 15: Vergleich der unterschiedlichen Varianten zur Korrektur der Ladebilanz für Fahrzeug 3

	Mes- sung	Phase	Variante A			Variante B			Variante C			Anmerkung
			Lade- bilanz	Pro Phase	Ge- samt	Lade- bilanz	Pro Phase	Gesamt	Lade- bilanz	Pro Phase	Ge- samt	
			[kWh]	[g/km]	[g/km]	[kWh]	[g/km]	[g/km]	[kWh]	[g/km]	[g/km]	
Fahrzeug 3	1	1	0,018	3,8	1,3	0,018	3,9	1,3	0,019	4,1	1,6	
		2	0,013	1,8		0,013	1,9		0,015	2,1		
		3	0,011	1,0		0,011	1,0		0,013	1,2		
		4	0,004	0,4		0,004	0,4		0,009	0,8		
	2	1	0,018	3,8	1,5	0,018	3,9	1,5	0,018	4,1	1,9	
		2	0,016	2,2		0,016	2,3		0,019	2,7		
		3	0,014	1,3		0,015	1,4		0,017	1,7		
		4	0,005	0,4		0,005	0,4		0,010	0,8		
	3	1	0,015	3,3	1,3	0,018	3,9	1,6	0,018	4,0	1,8	
		2	0,012	1,7		0,015	2,1		0,016	2,3		
		3	0,012	1,1		0,015	1,4		0,017	1,6		
		4	0,006	0,5		0,008	0,6		0,012	0,9		
	4	1	0,015	3,3	1,3	0,016	3,4	1,4	0,016	3,5	1,6	
		2	0,012	1,7		0,013	1,8		0,014	2,0		
		3	0,012	1,1		0,013	1,2		0,015	1,4		
		4	0,006	0,5		0,006	0,5		0,010	0,8		
	5	1	-0,301	-64,8	-21,1	-0,306	-65,9	-21,8	-0,313	-64,9	-20,6	Ladebilanz außerhalb der WLTP- Limits
		2	-0,215	-30,1		-0,221	-31,0		-0,215	-29,1		
		3	-0,219	-20,4		-0,232	-21,6		-0,231	-20,7		
		4	-0,002	-0,2		-0,002	-0,2		0,014	1,1		
6	1	-0,290	-62,5	-14,9	-0,297	-63,9	-15,3	-0,301	-63,8	-14,9	Ladebilanz außerhalb der WLTP- Limits	
	2	-0,199	-27,9		-0,208	-29,2		-0,196	-27,1			
	3	-0,009	-0,8		-0,009	-0,8		-0,009	-0,8			
	4	-0,021	-1,7		-0,021	-1,7		-0,020	-1,6			

Bei Fahrzeug 3 wurde ebenfalls vor zwei Messungen die Batterie entleert. Absolut gesehen ist der Mehrverbrauch bei leerer Batterie gegenüber Fahrzeug 2 geringer. Dies liegt daran, dass in Fahrzeug 3 eine Batterie mit geringerer Kapazität verbaut war.

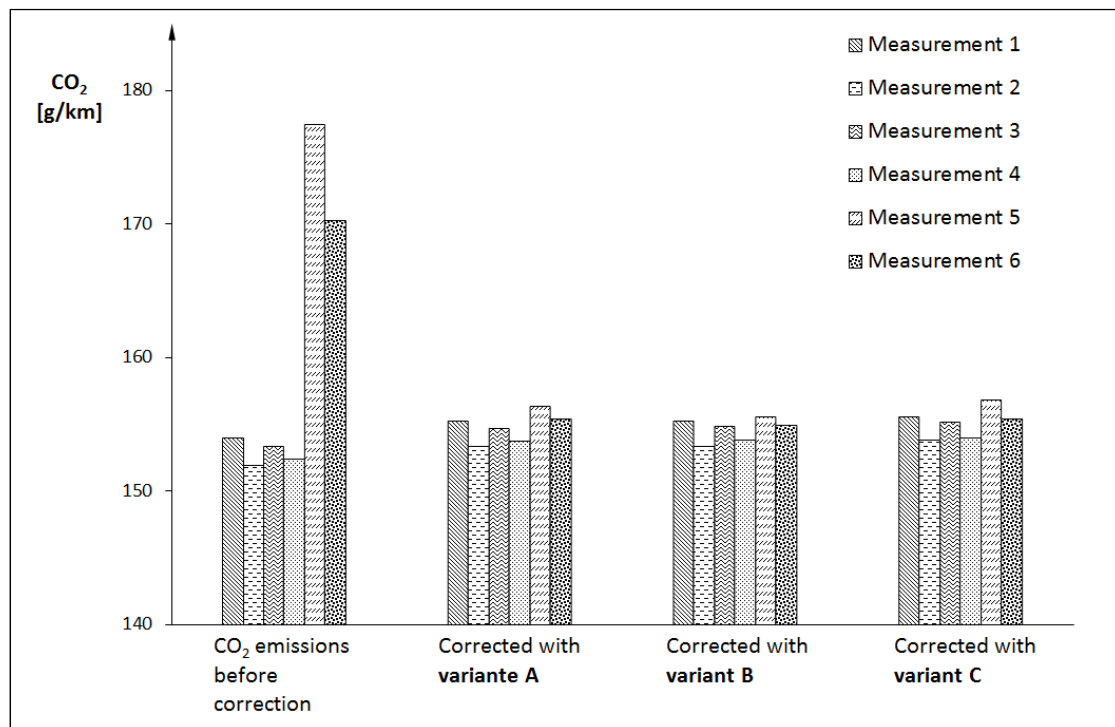


Abbildung 4-3: Gegenüberstellung der Resultate bei verschiedenen Ladebilanz-Korrekturen für Fahrzeug 3

Zur Bewertung der einzelnen Varianten wurden die korrigierten CO₂-Emissionen den einzelnen Varianten gegenübergestellt. Als Kriterium wurden die mit der jeweiligen Variante erreichte Standardabweichung sowie die Spannweite der Ergebnisse herangezogen.

Tabelle 16: Ergebnisse der drei Varianten bei Fahrzeug 2

Fahrzeug 2	Variante A	Variante B	Variante C
	CO ₂	CO ₂	CO ₂
	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Messung 1	143,8	143,5	144,4
Messung 2	145,8	145,5	146,7
Messung 3	150,0	146,0	147,7
Messung 4	145,2	144,9	145,7
Messung 5	148,4	144,0	145,9
Standardabweichung [g/km]	2,2	1,0	1,1
Spannweite [g/km]	6,2	2,5	3,3

Die besten Ergebnisse bei Fahrzeug 2 wurden mit der Variante B erreicht. Die Ergebnisse mit Variante C sind etwas schlechter. Mit Variante A sind sowohl die Spannweite als auch die Standardabweichung deutlich größer als bei den beiden anderen Varianten.

Tabelle 17: Ergebnisse der drei Varianten bei Fahrzeug 4

Fahrzeug 3	Variante A	Variante B	Variante C
	CO ₂	CO ₂	CO ₂
	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Messung 1	155,2	155,2	155,5
Messung 2	153,3	153,3	153,7
Messung 3	154,6	154,8	155,1
Messung 4	153,7	153,7	153,9
Messung 5	156,3	155,5	156,8
Messung 6	155,3	154,8	155,3
Standardabweichung [g/km]	1,0	0,8	1,0
Spannweite [g/km]	3,0	2,2	3,1

Bei Fahrzeug 3 zeigte sich ebenfalls, dass Variante B sowohl bei der Standardabweichung als auch bei der Spannweite die besten Ergebnisse liefert.

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass Variante B gegenüber Variante A und C deutlich bessere Ergebnisse liefert. Die in den nächsten Kapiteln beschriebenen Ergebnisse sind daher hinsichtlich Ladebilanz mit der Variante B korrigiert.

4.2 Korrektur der CO₂-Werte mittels Korrekturfunktionen

Drei Testfahrzeuge dienten zur Entwicklung und Validierung der Korrekturfunktionen. Der Prüfstandsfahrer versuchte bei allen Fahrten der Zielgeschwindigkeit möglichst genau zu folgen. Die Temperatur zu Testbeginn als auch der Ladezustand der Batterie wurden bei einigen Messungen variiert. Die WLTP-Toleranzgrenzen wurden bei einigen Messungen dabei absichtlich verletzt. Dadurch konnte der Einfluss von derartigen Abweichungen deutlicher erkennbar gemacht werden.

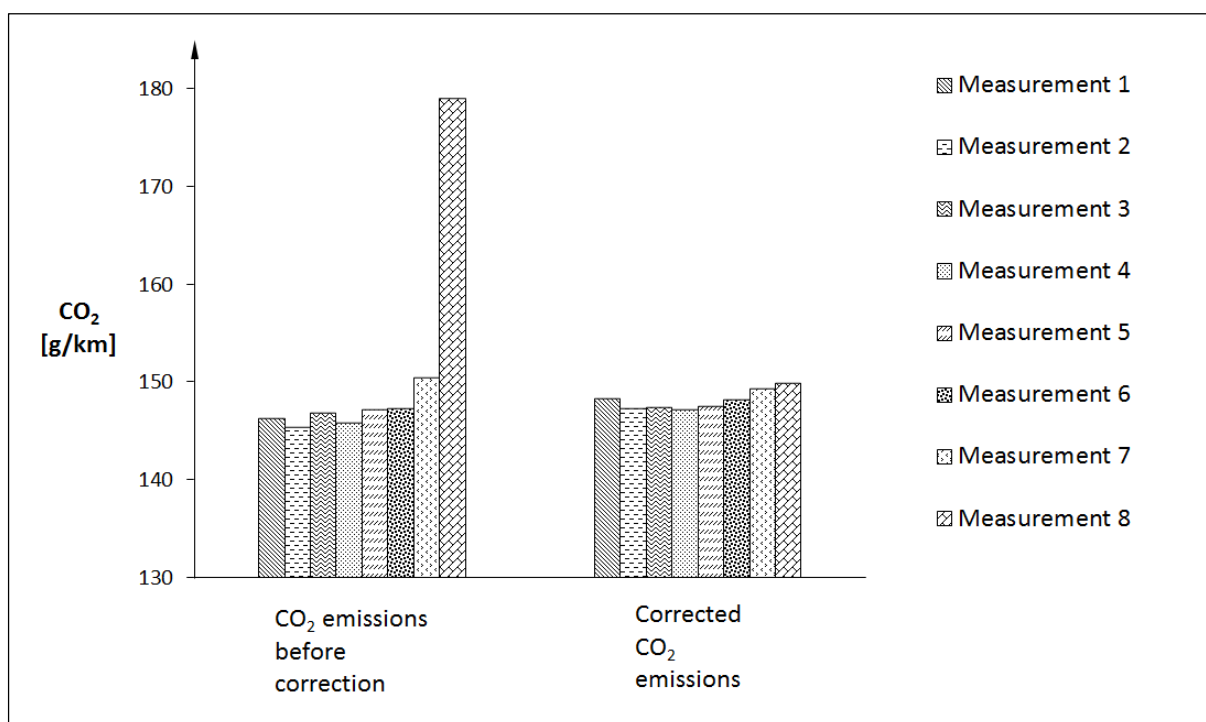
Um den Einfluss der Korrekturfunktionen objektiv bewerten zu können, wurden bei jedem Fahrzeug nur die laut WLTP bzw. NEDC gültigen Tests miteinander verglichen. Als Kenngrößen zur Beurteilung der Verbesserungen wurden die Standardabweichung und die Spannweite vor und nach der Korrektur berechnet.

4.2.1 Fahrzeug 1

Die Methode zur Korrektur der Fahrwiderstände wurde erst im Laufe dieser Masterarbeit entwickelt. Da die Messungen an Fahrzeug 1 bereits abgeschlossen waren und keine Coast downs durchgeführt wurden, konnte eine Korrektur der Fahrwiderstände für dieses Fahrzeug nicht durchgeführt werden.

Tabelle 18: Messergebnisse von Fahrzeug 1 im WLTC und Einflüsse der Korrekturfunktionen

Fahrzeug 1	Anmerkungen	T _{Start}	CO ₂ gemessen	ΔB	Δv	Δs	ΔT	CO ₂ korrigiert
		[°C]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Messung 1	-	29,0	146,3	1,5	-0,7	-0,4	1,6	148,3
Messung 2	-	29,2	145,4	1,4	-0,9	-0,3	1,6	147,3
Messung 3	-	24,3	146,9	2,3	-1,7	-0,4	0,3	147,4
Messung 4	-	24,7	145,8	2,1	-1,0	-0,1	0,5	147,2
Messung 5	-	23,0	147,2	2,1	-1,3	-0,4	0,0	147,6
Messung 6	-	22,7	147,3	2,8	-1,8	0,0	-0,1	148,2
Messung 7	-	12,3	150,5	3,1	-0,8	-0,5	-2,9	149,4
Messung 8	Leere Batt.	24,4	179,0	-26,2	-2,8	-0,5	0,4	150,0

Abbildung 4-4: Vergleich der CO₂-Werte im WLTC von Fahrzeug 1 vor und nach der Korrektur

Mit Fahrzeug 1 wurden auch NEDC-Tests durchgeführt, um die Anwendbarkeit der Korrekturfunktionen auf diesen Zyklus testen zu können. Die Zyklusdauer des WLTC beträgt 1800s während der NEDC mit 1181s deutlich kürzer ist. Dies führt dazu, dass das Warmlaufverhalten im NEDC aufgrund der kürzeren Zyklusdauer einen wesentlich größeren Einfluss hat. Um diesen Umstand zu berücksichtigen wurde die Temperaturkorrekturfunktion auf die kürzere Zyklusdauer angepasst. Der konstante Faktor 0,18 (Formel 3-36) wurde mit dem Verhältnis aus Zyklusdauer im WLTC zu Zyklusdauer im NEDC multipliziert, um den größeren Einfluss des Warmlaufverhaltens zu berücksichtigen.

$$\Delta CO_2[\%]_{NEDC} = 0,274 * (t_{Test} - t_{Ref}) \quad (4-1)$$

Es wurden drei Messungen laut NEDC-Vorschrift durchgeführt. Da nach den Messungen keine Coast downs durchgeführt wurden, konnte eine Korrektur der Fahrwiderstände nicht vorgenommen werden.

Tabelle 19: Messergebnisse von Fahrzeug 1 im NEDC und Einflüsse der Korrekturfunktionen

Fahrzeug 1	Anmerkungen	T _{Start}	CO ₂ gemessen	ΔB	Δv	Δs	ΔT	CO ₂ korrigiert
		[°C]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Messung 9	-	26,2	128,7	6,4	-1,0	-0,6	0,4	133,9
Messung 10	-	25,4	128,9	5,9	-0,8	-0,7	0,1	133,4
Messung 11	-	24,0	129,4	6,1	-1,7	0,0	-0,4	133,4

Trotz der bereits sehr geringen Unterschiede bei den gemessenen CO₂-Werten konnte durch die Anwendung der Korrekturfunktionen die Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen weiter verringert werden.

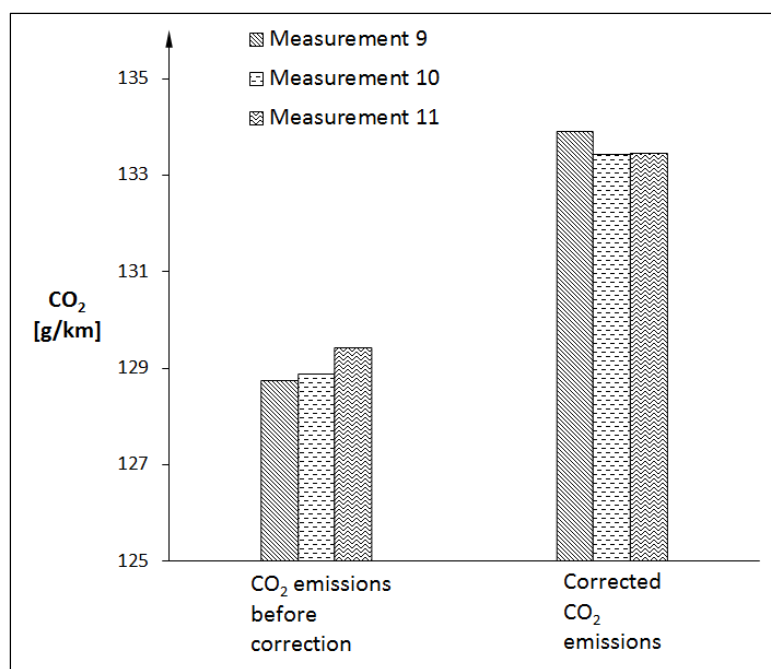


Abbildung 4-5: Vergleich der CO₂-Werte im NEDC von Fahrzeug 1 vor und nach der Korrektur

In erster Linie sollen mit Hilfe der Korrekturfunktionen nur jene Tests korrigiert werden, die innerhalb der vorgeschriebenen Toleranzgrenzen liegen. Tabelle 20 zeigt alle laut WLTP- bzw. NEDC-Toleranzen gültigen Tests. Zur Bewertung der Einflüsse der Korrekturfunktionen dienen die Kenngrößen Standardabweichung und Spannweite der Ergebnisse vor und nach der Korrektur.

Tabelle 20: Standardabweichung und Spannweite der gültigen Tests von Fahrzeug 1

Fahrzeug 1	Messung	CO ₂ gemessen	CO ₂ korrigiert
		[g/km]	[g/km]
WLTC	3	146,9	147,4
WLTC	4	145,8	147,2
WLTC	5	147,2	147,6
WLTC	6	147,3	148,2
Standardabweichung	[g/km]	0,6	0,4
Spannweite	[g/km]	1,5	1,0
NEDC	9	128,7	133,9
NEDC	10	128,9	133,4
NEDC	11	129,4	133,4
Standardabweichung	[g/km]	0,3	0,2
Spannweite	[g/km]	0,7	0,5

Wie aus Tabelle 20 ersichtlich ist, konnten bei Fahrzeug 1 sowohl für den WLTC als auch für den NEDC deutliche Verbesserungen mit Hilfe der Korrekturfunktionen erreicht werden.

4.2.2 Fahrzeug 2

Bei Fahrzeug 2 wurden erstmals auch Coast downs nach der Messung durchgeführt. Dadurch konnte der Einfluss abweichender Fahrwiderstände auf die CO₂-Emissionen untersucht werden.

Tabelle 21: Messergebnisse von Fahrzeug 2 im WLTC und Einflüsse der Korrekturfunktionen

Fahrzeug 2	Anmer- kungen	T _{Start}	CO ₂ gemessen	ΔB	Δv	Δs	ΔR	ΔT	CO ₂ korrigiert
		[°C]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Messung 1		22,0	139,7	2,6	1,1	-1,0	1,4	-0,3	143,5
Messung 2		26,4	140,6	2,5	-0,3	-0,1	2,2	0,9	145,9
Messung 3	Leere Batt.	23,4	177,6	-31,5	-1,9	-0,4	2,1	0,1	146,0
Messung 4		22,0	143,0	1,6	-0,9	-0,1	1,5	-0,3	144,9
Messung 5	Leere Batt.	22,8	173,9	-29,1	-2,2	-0,3	1,7	-0,1	144,0

Bei den Messungen mit Fahrzeug 2 trat der Effekt auf, dass die Ausrollkurven nach dem WLTC immer etwas niedriger lagen als die Soll-Widerstandskurve aus den Straßenwerten. Dadurch werden die CO₂-Emissionen bei allen Tests bezüglich den Fahrwiderständen nach oben korrigiert.

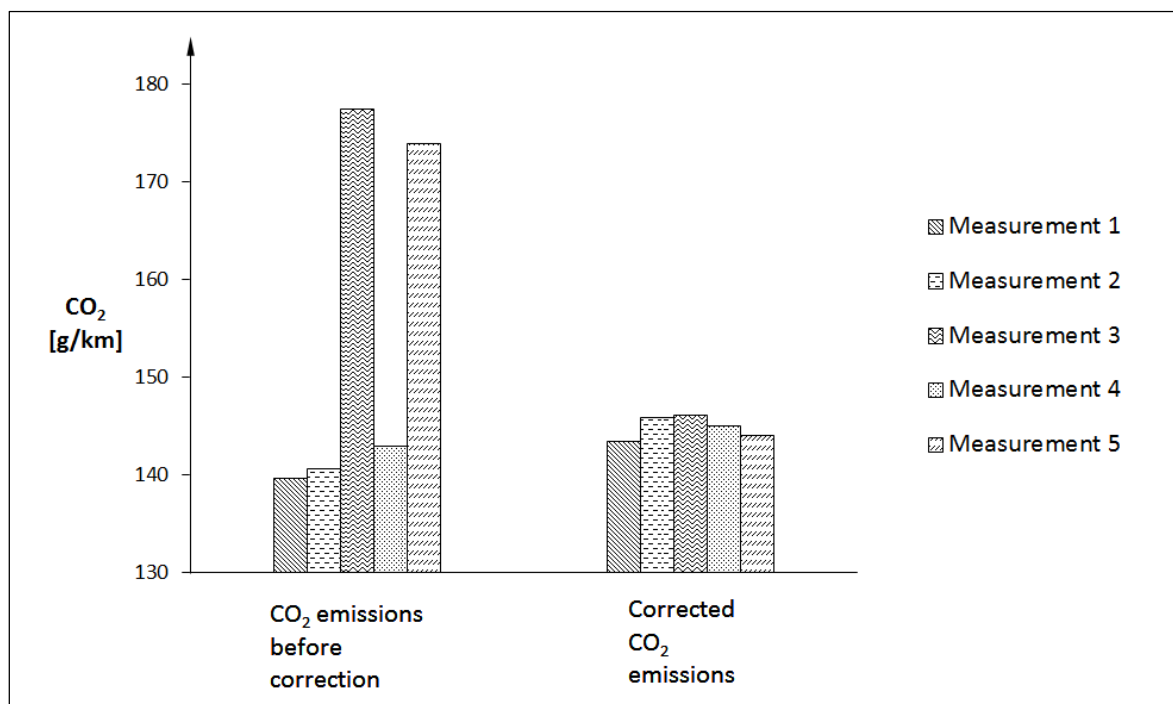


Abbildung 4-6: Messungen von Fahrzeug 2 vor und nach der Korrektur

Tabelle 22: Standardabweichung und Spannweite der gültigen Tests für Fahrzeug 2

Fahrzeug 2	Messung	CO ₂ gemessen	CO ₂ korrigiert
		[g/km]	[g/km]
WLTC	1	139,7	143,5
WLTC	4	143,0	144,9
Standardabweichung	[g/km]	1,6	0,7
Spannweite	[g/km]	3,3	1,4

4.2.3 Fahrzeug 3

Bei Fahrzeug 3 wurde die Vorgehensweise zur Bestimmung der Eigenverluste von Fahrzeug und Prüfstand etwas abgeändert. Normalerweise werden mit dem Fahrzeug auf der Rolle so viele Loss runs durchgeführt, bis sich die Eigenverluste stabilisiert haben (vgl. Kapitel 2.2). Um den Einfluss des Loss run auf die Coast downs nach der Messung untersuchen zu können, wurde bei diesem Fahrzeug ein etwas anderer Weg gewählt. Nach der Konditionierung der Rolle wurde nur ein einziger Loss run durchgeführt und die so ermittelten Eigenverluste von den Fahrwiderständen abgezogen. Dabei zeigte sich, dass die Coast downs nach den Messungen deutlich vom Soll-Fahrwiderstand abwichen. Das bedeutet, dass die Eigenverluste bei einem instabilem Loss run nicht richtig wiedergegeben werden.

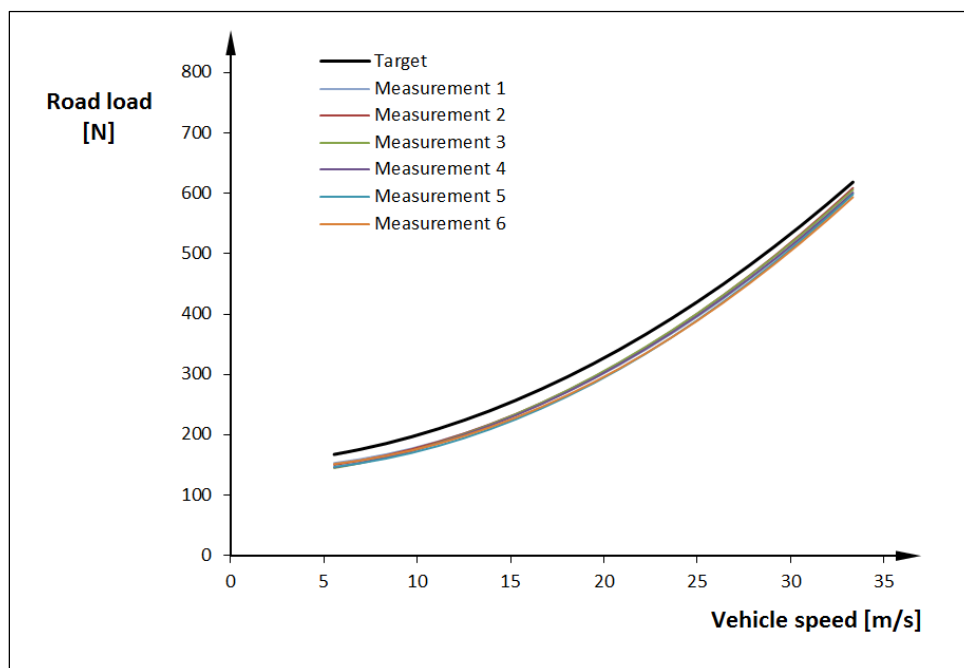


Abbildung 4-7: Ausrollkurven nach den Messungen von Fahrzeug 3

Im Vergleich dazu weisen die Coast downs von Fahrzeug 2 eine viel geringere Streuung auf. Die Fahrwiderstände stimmen generell besser mit den auf der Straße ermittelten Werten überein. Dadurch fällt die Korrektur der Fahrwiderstände niedriger aus (Tabelle 21).

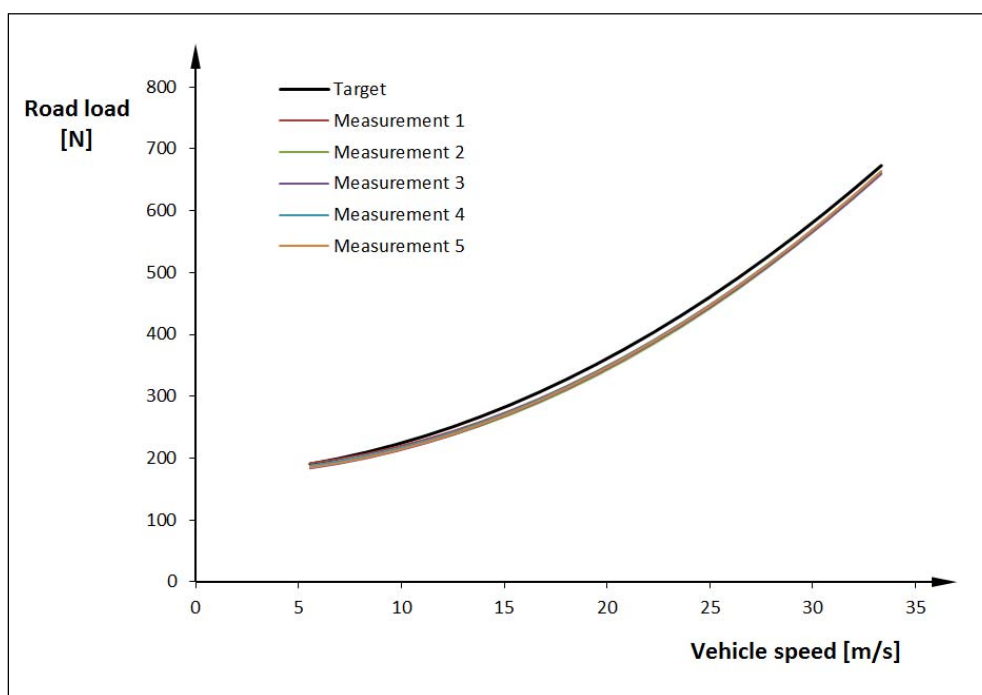


Abbildung 4-8: Ausrollkurven nach den Messungen von Fahrzeug 2

Es müssen daher so lange Loss runs durchgeführt werden, bis sich die Eigenverluste stabilisiert haben. Der Grund für die Variabilitäten liegt darin, dass Rolle und Fahrzeug durch den Warmlauf eine sehr hohe Temperatur aufweisen. Im Laufe der Loss runs sinkt diese auf ein gleichbleibendes Niveau und dadurch nehmen die Eigenverluste konstante Werte an.

Tabelle 23: Messergebnisse von Fahrzeug 3 im WLTC und Einflüsse der Korrekturfunktionen

Fahrzeug 3	Anmerkungen	T _{Start}	CO ₂ gemessen	ΔB	Δv	Δs	ΔR	ΔT	CO ₂ korrigiert
		[°C]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
Messung 1	-	22,5	150,3	1,3	-0,2	0,0	3,9	-0,1	155,7
Messung 2	-	23,2	147,9	1,5	0,7	-0,1	3,2	0,1	153,3
Messung 3	-	25,4	149,9	1,6	-0,8	0,1	3,5	0,6	154,8
Messung 4	-	19,3	150,3	1,4	-0,8	0,0	4,0	-1,0	153,7
Messung 5	Leere Batt.	22,8	174,6	-21,8	-1,5	-0,2	4,6	-0,1	155,5
Messung 6	Leere Batt.	22,4	166,8	-15,3	-1,0	0,0	4,6	-0,2	154,8

Durch dieses absichtlich falsche Vorgehen bei der Bestimmung der Eigenverluste ergeben sich deutlich höhere Korrekturwerte für ΔR. Im Vergleich zu Fahrzeug 2 streuen diese auch mehr. Die in Abbildung 4-7 und 4-8 erkennbaren Unterschiede in den Ausrollkurven führen daher bei der Fahrwiderstandskorrektur zu unterschiedlichen Werten für Fahrzeug 2 und 3.

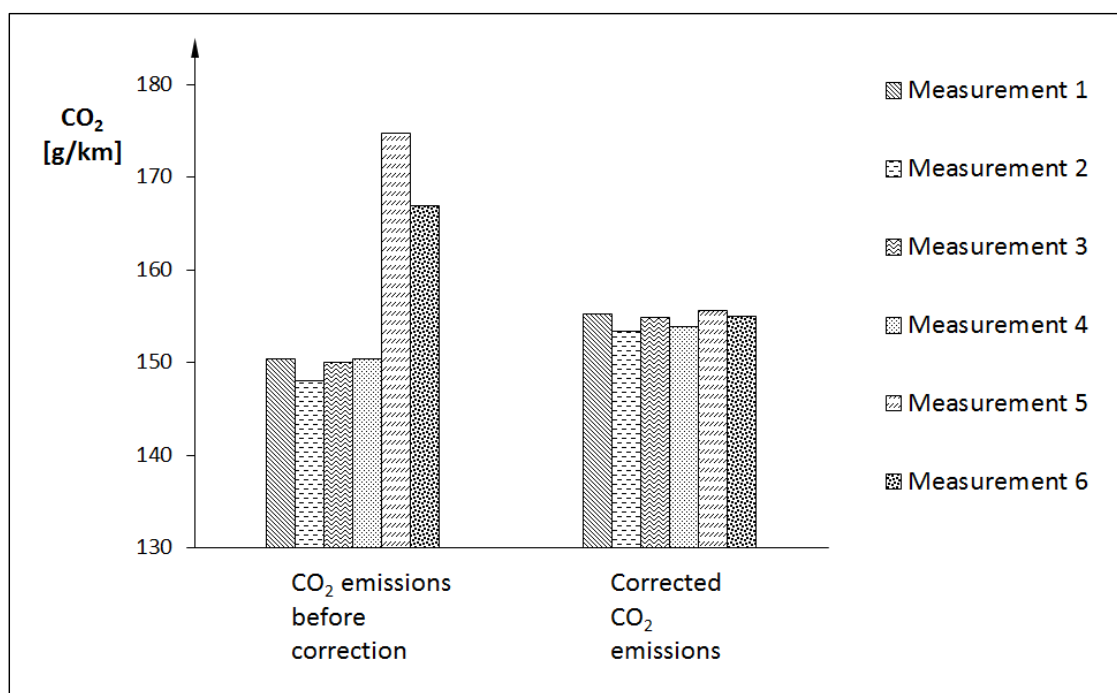


Abbildung 4-9: Messungen von Fahrzeug 3 vor und nach der Korrektur

Tabelle 24: Standardabweichung und Spannweite der gültigen Tests für Fahrzeug 3

Fahrzeug 3	Messung	CO ₂ gemessen	CO ₂ korrigiert
		[g/km]	[g/km]
WLTC	1	150,3	155,2
WLTC	2	147,9	153,3
WLTC	3	149,9	154,8
Standardabweichung	[g/km]	1,0	0,8
Spannweite	[g/km]	2,4	1,9

4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei allen drei gemessenen Fahrzeugen trat der Effekt auf, dass sowohl bei den Abweichungen gegenüber der Zielgeschwindigkeit (Δv) als auch bei der Korrektur der zurückgelegten Strecke (Δs) der Verbrauch nach unten korrigiert wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Geschwindigkeit beim Beschleunigen eher in der oberen Toleranzhälfte lag, während beim Verzögern diese im unteren Toleranzbereich lag.

Bei voll geladener Batterie trat der Effekt auf, dass danach die Ladebilanz im WLTC immer negativ ist, d.h. die CO₂-Emissionen nach oben korrigiert wurden. Dieser Effekt wird jedoch deutlich geringer ausfallen, wenn das Fahrzeug nach WLTP-Vorschrift vorkonditioniert wird, da die Batterie zwischen dem Vorkonditionieren und dem Typprüfzyklus nicht geladen werden darf.

Der Vergleich der gültigen Messungen vor und nach der Korrektur zeigt, dass bei allen drei Fahrzeugen durch die Anwendung der Korrekturfunktionen eine deutliche Angleichung der Ergebnisse auftrat. Dies äußerte sich in geringen Spannweiten und Standardabweichungen nach den Korrekturen. Damit konnte gezeigt werden, dass der Einsatz der entwickelten Korrekturfunktionen ein probates Mittel ist, um Abweichungen bezüglich Geschwindigkeit, Ladezustand der Batterie, Fahrwiderstände und Temperatur zu reduzieren.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Auch wenn sie innerhalb der Toleranzgrenzen liegen, haben Abweichungen bezüglich Geschwindigkeit, Temperatur oder Ladezustand der Batterie einen Einfluss auf die Ergebnisse der Rollenmessungen. Die Toleranzbreite zu verkleinern ist jedoch auch nur zum Teil möglich. Da auch in absehbarer Zeit das Fahrzeug während der Messung von Prüfstandsfahrern gesteuert wird, sind Abweichungen von der Zielgeschwindigkeit nicht zu verhindern. In den meisten Fällen ist es technisch oder messtechnisch nicht möglich einen genauen Sollwert vorzugeben und auf Toleranzen zu verzichten. Mit Hilfe der Korrekturfunktionen ist es möglich jene Abweichungen, die messtechnisch zu erfassen sind, zu korrigieren. Damit kann gewährleistet werden, dass alle Fahrzeuge auf gleiche Bedingungen korrigiert werden. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung, um die CO₂-Emissionen von verschiedenen Fahrzeugen im Prüfzyklus vergleichbar zu machen. Weiters erlauben Korrekturfunktionen eine objektive Beurteilung von Spritsparmaßnahmen an einem Fahrzeug. Wird z.B. mit einem PKW der WLTC einmal mit Start/Stopp System und einmal ohne gefahren, kann nach Anwendung der Korrekturfunktionen der Einfluss dieser Spritsparmaßnahme genau quantifiziert werden, da Beeinflussungen durch Fahrer oder Temperatur reduziert werden können.

Zusammenfassend ergeben sich durch die Anwendung der Korrekturfunktionen folgende Vorteile:

- Die Wiederholbarkeit von Messungen steigt.
- Es können auch Messungen abseits von Typisierungsverfahren und mit größeren Abweichungen korrigiert werden.
- Die Ergebnisse bilden die Realität besser ab.
- Die Hersteller sparen sich die Bemühungen die Toleranzen bei Typisierungsverfahren auszunutzen.

Nachteilig ist, dass die Korrekturfunktionen den Messaufwand erhöhen, da zusätzliche Signale wie Batteriestrom und –spannung gemessen werden müssen. Außerdem müssen zur Korrektur der Fahrwiderstände nach der Messung Coast downs durchgeführt werden. Die Korrektur der Abweichungen stellt einen zusätzlichen Aufwand dar.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Korrekturfunktionen sind nur ein Teil jener Maßnahmen, die vorgesehen sind um die Ergebnisse bei Rollenmessungen noch unabhängiger gegenüber Einflüssen von außen zu machen. Es wird derzeit an einer Erweiterung der Liste an Korrekturfunktionen gearbeitet. Konkret geht es um folgende Punkte:

- Qualität des verwendeten Treibstoffs
- Einlasslufttemperatur und Luftfeuchte
- Einfluss des CVS-Verdünnungsfaktors D_F
- Abweichungen der Gangwechsellpunkte

Eine weitere Aufgabe stellt die Adaptierung dieser Korrekturfunktionen nicht nur für Hybridfahrzeuge, sondern auch für elektrische Fahrzeuge dar. Dies erfordert nicht nur eine Überarbeitung der Ladebilanz-Korrektur inklusive der generischen Willansfaktoren, sondern auch eine Überarbeitung der leistungsbasierten Korrekturfunktionen. Zu beachten ist auch, dass die verwendeten Wirkungsgrade (Lade/Entladewirkungsgrad, Generatorwirkungsgrad) keinesfalls Fixwerte darstellen. Sowohl bei den Energiewandlern (Generator) als auch bei den Energiespeichern (Batterie) sind in den nächsten Jahren Verbesserungen zu erwarten, die in jedem Fall die Wirkungsgrade entscheidend beeinflussen.

Bei den bisherigen Messungen wurde angenommen, dass bei ausreichend langer Konditionierung des Fahrzeuges Raum- und Kühlmitteltemperaturen ident sind. Bei zukünftigen Anwendungen der Temperaturkorrektur empfiehlt es sich die Öl- und Kühlwassertemperatur direkt zu messen.

Die für die Korrektur der Ladebilanz notwendigen Lade- und Entladewirkungsgrade beruhen bei dieser Arbeit auf einer Abschätzung für AGM-Batterien. Um die Ladebilanz-Korrektur auf andere Batterietypen ausweiten zu können, müssen für diese noch genaue Lade- und Entladewirkungsgrade gefunden werden.

Alles in allem konnte gezeigt werden, dass die ausgearbeiteten Korrekturfunktionen imstande sind, Einflüsse von Temperatur, Fahrer, abweichenden Fahrwiderständen und unterschiedlichen Batteriezuständen zu neutralisieren. Dies äußerte sich in einer deutlichen Verbesserung der Standardabweichung als auch der Spannweite zwischen den korrigierten Ergebnisse der einzelnen Messungen.

Literatur

- [1] UNECE, Proposal for a new global technical regulation on the Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP). ECE/Trans/WP.29/2014/27, 2014
- [2] Hausberger, St.: Umweltauswirkungen des Verkehrs. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2011.
- [3] Richtlinie des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen (70/220/EWG), Stand 2007.
- [4] Reif, K.: Batterie, Bordnetze und Vernetzung. 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, ISBN 978-3-8348-1310-7, 2010.
- [5] Reif, K.: Bosch Autoelektrik und Autoelektronik. 6. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, ISBN 978-3-8348-1274-2, 2011.
- [6] ERMES Test Evaluation Tool. Internal Documentation TUG, 2013.
- [7] Haken, K.-L.: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Hanser Verlag, ISBN 9783446435759, 2013.
- [8] BOSCH, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. 25. Auflage, Vieweg Verlag, ISBN 3-528-23876-3, 2003.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: New European Driving Cycle (NEDC)	3
Abbildung 2-2: WLTC (Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle) für Fahrzeuge der Klasse 3b	4
Abbildung 2-3: Fahrwiderstände der am Prüfstand vermessenen Fahrzeuge	6
Abbildung 2-4: Typisches Loss run-Diagramm eines PKWs	8
Abbildung 2-5: Prinzipdarstellung einer Fahrzeug-Willanslinie aus den Rollenmessungen	12
Abbildung 2-6: Mittlere Drehzahl und mittlere Achsleistung im WLTC für Fahrzeug 1	13
Abbildung 2-7: Geschwindigkeits- und Drehzahlverlauf von Messung A und B	14
Abbildung 2-8: Mittlere Drehzahl und mittlere Achsleistung im WLTC bei Messung A und B	14
Abbildung 2-9: Fahrzeug-Willanslinien aus Messung A und B	15
Abbildung 2-10: Vergleich der Willanslinie bei voller und bei leerer Batterie	16
Abbildung 2-11: Vergleich der Willansfaktoren für Diesel- und Benzinmotoren auf Basis von WLTC-Messungen	16
Abbildung 2-12: Vergleich der Willansfaktoren für WLTC und NEDC	17
Abbildung 2-13: Schematische Darstellung eines PKW-Bordnetzes (nach [4], S.10)	18
Abbildung 2-14: Batteriestrom in Abhängigkeit des Ladezustandes	19
Abbildung 3-1: Vorgehensweise bei der Korrektur der Ladebilanz	21
Abbildung 3-2: Prinzipdarstellung der Einbaulage der Strommesszange	21
Abbildung 3-3: Kennfeld eines PKW-Generators	25
Abbildung 3-4: Fahrzeugspezifische Willanslinie bezogen auf die Motorleistung	25
Abbildung 3-5: Geschwindigkeitstoleranzen im WLTP-Fahrzyklus [1]	27
Abbildung 3-6: Schematische Darstellung verschiedener Geschwindigkeitsverläufe	28
Abbildung 3-7: Geschwindigkeitsverläufe von Test 1 und Test 2	30
Abbildung 3-8: Unterschiedliche Ausrollkurven auf der Straße und am Prüfstand	32
Abbildung 3-9: Ausrollkurven von drei aufeinander folgenden Coast downs nach einem WLTC im Vergleich zur Soll-Ausrollkurve	33
Abbildung 3-10: Kraftstoffverbrauch und Reibmitteldruck über der Öltemperatur eines 2-Liter Dieselmotors bei 2 bar Mitteldruck und 2000 U/min	34
Abbildung 3-11: Einfluss der Starttemperatur auf den Mehrverbrauch im WLTC	35
Abbildung 3-12: Zusätzlicher CO ₂ -Austoss im Vergleich zu einem Warmstart	37
Abbildung 4-1: Stromfluss von und zur Batterie bei leerer und geladener Batterie	42
Abbildung 4-2: Gegenüberstellung der Resultate bei verschiedenen Ladebilanz- Korrekturen für Fahrzeug 2	42

Abbildung 4-3: Gegenüberstellung der Resultate bei verschiedenen Ladebilanz-Korrekturen für Fahrzeug 3	44
Abbildung 4-4: Vergleich der CO ₂ -Werte im WLTC von Fahrzeug 1 vor und nach der Korrektur	46
Abbildung 4-5: Vergleich der CO ₂ -Werte im NEDC von Fahrzeug 1 vor und nach der Korrektur	47
Abbildung 4-6: Messungen von Fahrzeug 2 vor und nach der Korrektur	49
Abbildung 4-7: Ausrollkurven nach den Messungen von Fahrzeug 3	50
Abbildung 4-8: Ausrollkurven nach den Messungen von Fahrzeug 2	50
Abbildung 4-9: Messungen von Fahrzeug 3 vor und nach der Korrektur	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifizierung der Testfahrzeuge im WLTP	4
Tabelle 2: Phasen im WLTC für Fahrzeuge der Klasse 3b	5
Tabelle 3: Koeffizient t in Abhängigkeit der Anzahl n der durchgeführten Coast downs	7
Tabelle 4: Äquivalente Schwungmasse für den NEDC in Abhängigkeit der Bezugsmasse (Auszug) [3]	10
Tabelle 5: Einheit der y-Achse in Abhängigkeit von der Einheit der x-Achse	12
Tabelle 6: RCB Korrekturkriterium für verschiedene Fahrzeugklassen [1]	19
Tabelle 7: Willansfaktoren für verschiedene Kraftstoffe und Motorkonzepte [1]	22
Tabelle 8: Überblick der Ergebnisse von Test 1 und 2	30
Tabelle 9: Differenz zwischen der gefahrenen Strecke und Zielstrecke im WLTC am Beispiel von Fahrzeug 1	31
Tabelle 10: Einfluss der Starttemperatur auf den Mehrverbrauch im WLTC	35
Tabelle 11: Einfluss der Starttemperatur auf den Mehrverbrauch im WLTC bei Benzinfahrzeugen	36
Tabelle 12: Einfluss der Starttemperatur auf den Mehrverbrauch im WLTC bei Dieselfahrzeugen	37
Tabelle 13: Eckdaten der vermessenen Fahrzeuge	40
Tabelle 14: Vergleich der unterschiedlichen Varianten zur Korrektur der Ladebilanz für Fahrzeug 2	41
Tabelle 15: Vergleich der unterschiedlichen Varianten zur Korrektur der Ladebilanz für Fahrzeug 3	43
Tabelle 16: Ergebnisse der drei Varianten bei Fahrzeug 2	44
Tabelle 17: Ergebnisse der drei Varianten bei Fahrzeug 4	45
Tabelle 18: Messergebnisse von Fahrzeug 1 im WLTC und Einflüsse der Korrekturfunktionen	46
Tabelle 19: Messergebnisse von Fahrzeug 1 im NEDC und Einflüsse der Korrekturfunktionen	47
Tabelle 20: Standardabweichung und Spannweite der gültigen Tests von Fahrzeug 1	48
Tabelle 21: Messergebnisse von Fahrzeug 2 im WLTC und Einflüsse der Korrekturfunktionen	48
Tabelle 22: Standardabweichung und Spannweite der gültigen Tests für Fahrzeug 2	49
Tabelle 23: Messergebnisse von Fahrzeug 3 im WLTC und Einflüsse der Korrekturfunktionen	51
Tabelle 24: Standardabweichung und Spannweite der gültigen Tests für Fahrzeug 3	52