



Sebastian Hansmann, Bsc

Entwicklung einer simulationsbasierten Hybrid-Emulation am Zweirad-Rollenprüfstand

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur
Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer/in

Assoc.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roland Kirchberger
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer/in

Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Schmidt
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz

Graz, März 2019

Vorwort

Diese Masterarbeit entstand am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, im Forschungsbereich Konstruktion und Auslegung im Zuge des COMET-Forschungsprojekts ECO Powerdrive 2. Mein erster Dank gilt dem Institutsvorstand Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Eichlseder und dem Leiter des Forschungsbereichs Herrn Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roland Kirchberger, für die Möglichkeit diese Masterarbeit schreiben zu dürfen.

Weiter gilt mein Dank meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Schmidt, und den Herren Dipl.-Ing. Paul Rieger und Dipl.-Ing. Christian Zinner, die mich von Beginn der Masterarbeit an begleitet haben. Auch all meinen Kollegen im Forschungsbereich gilt mein Dank, speziell Herrn Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Schacht, für die Unterstützung im Laufe meiner Masterarbeit.

Mein größter Dank gilt natürlich meinen Eltern, die mir die Möglichkeit geboten haben, meinen schulischen Werdegang zu gehen und diesen durch ein Studium abzuschließen.

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	IX
ZUSAMMENFASSUNG	1
ABSTRACT	2
1 EINLEITUNG	3
2 GRUNDLAGEN UND AUSGANGSBASIS	5
2.1 GRUNDLEGENDE GESETZGEBUNG	5
2.1.1 Einteilung von Fahrzeugen der Kategorie L in der Europäischen Union.....	5
2.1.2 Fahrzyklus WMTC	6
2.1.3 Widerstandsparameter laut Homologationsvorschrift der Kategorie L3e, Unterkategorie 3-2 für die Messung am Rollenprüfstand.....	7
2.1.4 Messverfahren für Fahrzeuge mit reinem Verbrennungsmotor der Kategorie L3e, Unterkategorie 3-2 für Euro 5.....	8
2.1.5 Messverfahren für Hybridfahrzeuge (OVC HEVs) mit Betriebsartenschalter für eine Prüfung nach Typ 1	9
2.1.6 Emissionsgrenzwerte Kategorie L3e, Unterkategorie 3-2 in der Euro 4- und Euro 5-Gesetzgebung 10	
2.2 BERECHNUNGS-GRUNDLAGEN	11
2.2.1 Widerstandsberechnung eines einspurigen Fahrzeuges auf Basis längsdynamischer Betrachtungen	11
2.2.2 Berechnung von Fahrwiderständen eines Motorrads auf Basis eines Ausrollversuches auf der Prüfstandrolle unter Homologationsbedingungen	14
3 HYBRID-EMULATION.....	16
3.1 UMRECHNUNG DER MOMENTEN-VORGABE IN EINE ÄQUIVALENTE STEIGUNG	17
3.2 AUSGANGSBASIS FÜR DIE EMULATION	18
3.2.1 Versuchsfahrzeug	18
3.2.2 Hybrid-Konzept.....	19
3.2.3 Längsdynamiksimulation.....	22
3.2.4 Prüfstand.....	29
3.3 VALIDIERUNGEN UND AUSWIRKUNGEN DER ZIELDEFINITIONEN	37
3.4 DEFINITION UND AUFBEREITUNG DER AUSGANGSDATEN DER LDS FÜR DIE PRÜFSTANDSTEUERUNG	39
3.4.1 Definition der benötigten Parameter für die Rollensteuerung	39
3.5 HYBRID-EMULATION MIT EINFACHER BERECHNUNG DER STEIGUNGSVORGABE	40
3.6 ANPASSUNGEN DER PRÜFSTANDVORGABEN FÜR DIE HYBRID-EMULATION	41
3.6.1 Berücksichtigung der Position der E-Maschine im Antriebsstrang des Hybridkonzeptes und der Emulation über die Prüfstandrolle	43
3.6.2 Anpassung durch Zugkraft-Vergleich	44
3.6.3 Anpassung der restlichen Differenzen.....	53
3.6.4 Aufbereitung für die Parametertabelle.....	54
3.6.5 Praktische Umsetzung der allgemeinen Ablaufstruktur bis zur übergebenen Parametertabelle ..	59
3.7 METHODIK ZUR REALISIERUNG DER HYBRID-EMULATION.....	59
3.7.1 Phase der Anpassungsdaten-Ermittlung	61
3.7.2 Phase der Versuchsdurchführung	63
3.7.3 Phase der Messdatenaufbereitung	64
3.8 BETRACHTETE ALTERNATIVE ANPASSUNGSMÖGLICHKEITEN.....	66
3.8.1 Unterscheidung zwischen notwendigem Antrieb durch die Rolle und nötigem EMa-Moment der Simulation zur Erreichung konstanter Geschwindigkeiten im E-Betrieb	66
4 AUSGEFÜHRTE HYBRIDEMULATION.....	68
4.1 VERSUCHSMATRIX	68
4.2 ANGEWANDTE KONFIGURATIONEN IN DER SIMULATION, IN DER METHODIK UND AM ROLLENPRÜFSTAND 68	
4.2.1 Simulationsparameter	69

4.2.2	<i>Anpassungsparameter</i>	69
4.2.3	<i>Prüfstandparameter</i>	69
4.3	ERGEBNISSE DER MESSFAHRTEN	72
4.3.1	<i>Anpassungsdaten-Ermittlung</i>	72
4.3.2	<i>Versuchsdurchführung</i>	75
4.3.3	<i>Messdatenaufbereitung</i>	78
4.4	BEURTEILUNG DER MESSERGEBNISSE	82
4.4.1	<i>Anpassungsdaten-Ermittlung</i>	82
4.4.2	<i>Versuchsdurchführung</i>	83
4.4.3	<i>Messdatenaufbereitung</i>	83
4.4.4	<i>Beobachtete Variablenverzögerung während der Emulationsentwicklung</i>	84
5	AUSBlick UND MÖGLICHE WEITERENTWICKLUNGEN	86
6	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	87
7	TABELLENVERZEICHNIS	90
8	LITERATUR	93
9	ANHÄNGE	95
9.1	TECHNISCHE DATEN DES VERSUCHSFAHRZEUGES	95
9.2	PRÜFSTANDPARAMETER	96
9.3	VERBRÄUCHE DER SIMULATION ZUR PRÜFSTANDROLLE ÜBER DIE ZYKLUSTEILE	97
9.3.1	<i>SOC-Startbedingung: 0%</i>	97
9.3.2	<i>SOC-Startbedingung: 25%</i>	97
9.3.3	<i>SOC-Startbedingung: 100%</i>	97
9.3.4	<i>Reiner VKM-Betrieb</i>	97
9.4	EMISSIONS- UND VERBRAUCHSAUSWERTUNGEN DER MESSFAHRTEN NACH EURO 4-GESETZGEBUNG ..	98
9.4.1	<i>SOC-Startbedingung: 0%, Kaltstart</i>	98
9.4.2	<i>SOC-Startbedingung: 0%, Warmstart</i>	98
9.4.3	<i>SOC-Startbedingung: 25%, Kaltstart</i>	99
9.4.4	<i>SOC-Startbedingung: 25%, Warmstart</i>	100
9.4.5	<i>SOC-Startbedingung: 100%, Kaltstart</i>	101
9.4.6	<i>SOC-Startbedingung: 100%, Warmstart</i>	101
9.4.7	<i>Rein VKM-Betrieb, Kaltstart</i>	102
9.4.8	<i>Rein VKM-Betrieb, Warmstart</i>	103

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

a	m/s^2	Beschleunigung
a	m	Horizontaler Abstand des Schwerpunktes zur Vorderachse
A	m^2	Fläche, Oberfläche, Querschnittsfläche
a_{ri}	-	Rollwiderstandsbeiwert eines Reifens
b	m	Horizontaler Abstand des Schwerpunktes zur Hinterachse
b_e	g/kWh	effektiver spezifischer Kraftstoffverbrauch
C, C_A, C_B	g/km	CO ₂ -Ausstoß
c_d	-	Luftwiderstandsbeiwert
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
D_{av}	km	Durchschnittliche Reichweite zwischen 2 Batterieladungen
D_e	km	elektrische Reichweite
F	N	Kraft
F_a	N	Beschleunigungswiderstandskraft
F_d	N	Drag Force - Luftwiderstandskraft
F_L	N	Luftwiderstand
$F_{R,H}$	N	Rollwiderstand an der Hinterachse
$F_{R,V}$	N	Rollwiderstand an der Vorderachse
F_{St}	N	Steigungswiderstand
F_{Stg}	N	Steigungswiderstand
F_t	N	Tangentialkraft
$F_{W_{HR}}$	N	Widerstandskraft am Hinterrad
F_x	N	Kraft in x-Richtung
F_z	N	Kraft in z-Richtung
F_{Zug}	N	Zugkraft
g	m/s^2	örtliche Fallbeschleunigung
h	m	Höhe des Schwerpunktes
m	kg	Masse
$m_{\text{äqu}}$	kg	äquivalente Masse
$m_{\text{äquiv}}$	kg	äquivalente Masse
M	Nm	Drehmoment
M, M_A, M_B	l/100 km	Kraftstoffverbrauch; im Zustand A und B
$M_{E,HR}$	Nm	elektrisches E-Moment am Hinterrad
n	-	Anzahl der Räder pro Achse
p	bar, Pa	Druck
P	$(\text{k})\text{W}$	Leistung
r_{HR}	m	Radius des Hinterrads
R	-	Ergebnisvariable
t	sec	Zeit
v	m/s	Geschwindigkeit
v_w	m/s	Windgeschwindigkeit
v_x	m/s	Geschwindigkeit in x-Richtung
w_1, w_2, w_3	-	Wichtungsfaktoren

x	m	Koordinate
y	m	Koordinate
z	m	Koordinate

Griechische Formelzeichen

α	$^{\circ}$; rad	Winkel
β	$^{\circ}$; rad	Winkel
η	–	Wirkungsgrad
ρ	kg/m ³	Dichte

Konstanten

$g = 9,86$	m/s ²	Fallbeschleunigung
------------	------------------	--------------------

Operatoren und Bezeichnungen

\sum	Summe
Δ	Differenz zweier Größen
\cdot	zeitliche Ableitung
$f(\dots)$	Funktion abhängig von ...
$sign$	Vorzeichenfunktion

Weitere Indices und Abkürzungen

1, 2, 3, ...	Zustandsindex
A, B	Zustandsindex
CAN	Controller Area Network
CG	Center of Gravity
CH ₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CVS	Constant Volume Sampling
DF	Deterioration Factor (dt.: Verschlechterungsfaktor)
DIN	Deutsches Institut für Normung
E	elektrisch
Elektr.	elektrisch
EMa	E-Maschine
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
f	frontseitig
FC	Fuel Consumption
ges	gesamt
h	Höhe des Schwerpunkts über dem Boden
HC	Kohlenwasserstoffe
HCU	Hybrid Control Unit
HR	Hinterrad
i	Laufvariable (1, 2, ..., k), innere
ISO	International Organization for Standardization
k	Kilo (10 ³); Anzahl der Komponenten
korr	korrigiert
L	Light

LDS	Längsdynamiksimulation
max	maximal
min	minimal
NMHC	Non-Methan-Kohlenwasserstoffe
NO	Stickstoffmonoxid
NO _x	Stickoxide
OVC HEV	Off Vehicle Charging Hybrid Electric Vehicle
PID	Proportional-Integral-Differential
Prim	Primär
PS	Pferdestärke
r	rückseitig
ref	Referenz
ROZ	Research Oktanzahl
SA	Sonderausstattung
Sek	Sekundär
Sim	Simulation
SOC	State of Charge
THC	Totale Kohlenwasserstoffe
U	Umdrehungen
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
VKM	Verbrennungskraftmaschine
wid	Widerstand
WMTC	Worldwide harmonized Motorcycle Testing Cycle

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 wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

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

Sebastian Hansmann, BSc

Graz, 19.03.2019

Zusammenfassung

Die fortlaufend sinkenden Grenzwerte der Abgasemissionsgesetzgebung rechtfertigen Überlegungen, auch im Zweiradsektor Hybrid-Fahrzeuge zu realisieren. Im Zuge dessen wurde die dieser Masterarbeit zugrunde liegende Längsdynamiksimulation eines Hybrid-Zweiradfahrzeuges aufgebaut, die auf einem Hybridkonzept einer BMW F800GT beruht. Ziel dieser Masterarbeit ist es, eine Methodik zu entwickeln, die eine Emulation des Hybrid-Konzeptes auf der Prüfstandrolle unter Verwendung eines rein VKM-betriebenen Serienfahrzeuges ermöglicht. Die Emulation wurde durch die Vorgabe einer zum E-Maschinen-Moment des Hybrid-Konzeptes äquivalenten Steigung umgesetzt. Als Randbedingungen wurden der Betrieb des Rollenprüfstands im Homologationsbetrieb und die unveränderte Verwendung der LDS und deren Berechnungsstrukturen bzw. Eingangparameter definiert. Einzige Ausnahme ist die Gangwahl nach der Betriebsstrategie, die von der Vorgabe aus der Gesetzgebung abweicht. Ziel der Emulation ist die Validierung und Bewertung der LDS und deren Betriebsstrategie.

Die direkte Vorgabe des E-Maschinen-Moments als äquivalente Steigung auf dem Rollenprüfstand reicht nicht aus, was durch den Vergleich der resultierenden Geschwindigkeiten im reinen emulierten E-Betrieb ersichtlich ist. Darauf aufbauend wurde eine Anpassung der Steigungsvorgabe getroffen, die im Wesentlichen aus zwei Teilen besteht. Der erste Teil vergleicht die Zugkraftdarstellung in der LDS und am Rollenprüfstand, die unterschiedlich ausfallen, und passt diese aneinander an. Der zweite Schritt nimmt die nach dem ersten Schritt noch existierenden Geschwindigkeitsunterschiede und passt diese durch einen Differenzmoment-Vergleich an, der durch eine zweistufige empirische Messreihe realisiert wird. Nach dieser Anpassung stimmen die Vorgabegeschwindigkeiten für die Prüfstandrolle im reinen E-Betrieb ausreichend gut mit den erreichten Geschwindigkeiten auf der Prüfstandrolle überein.

Die Durchführung von Messfahrten am Rollenprüfstand unter verschiedenen SOC-Startbedingungen und einer Messung der reinen VKM-Basis als Referenz erlauben eine anschließende Beurteilung. Die Beurteilung gliedert sich dabei einerseits in die fahrtechnischen Realisierungen, andererseits in die Beurteilung der LDS und der Hybridstrategie, bzw. deren Eingangparameter, und der getätigten Anpassungen. Es konnte gezeigt werden, dass die Emulation funktioniert. Die auf der Prüfstandrolle vorgegebenen Verläufe für den Fahrer konnten nicht ausreichend genau nachgebildet werden. Die Auswertung der erhaltenen Werte zeigen Differenzen zwischen der LDS und dem Realzustand auf der Prüfstandrolle auf. Es wurden auch Kritikpunkte an der Betriebsstrategie gefunden und auch die Anpassungsmethodik selbst im Zuge der Emulation zeigt Potential zur Weiterentwicklung auf.

Abstract

Continuously decreasing limits of the exhaust emission legislation justify considerations to realize hybrid vehicles also for two-wheeler-vehicles. Following these upcoming conditions, a longitudinal dynamics simulation of a hybrid two-wheeled vehicle was developed to simulate a hybrid concept of a two-wheeler vehicle. This master thesis is based on this simulation and implements a hybrid concept of a BMW F800GT. The main goal of this master thesis is to develop a methodology that enables an emulation of the hybrid concept on the test bench using a purely ICE-driven production vehicle. The emulation is implemented by specifying a gradient equivalent to the electric motor torque of the hybrid concept. The boundary conditions define the use of homologation parameters at the test bench and the unchanged use of the longitudinal dynamics simulation and its calculation structures and input parameters. The only exception is the gear selection according to the selection of the operating strategy of the hybrid concept, which deviates from the legal requirements. The goal of the emulation is to validate and evaluate the longitudinal dynamics simulation and its operating strategy.

The direct specification of the electric machine torque as an equivalent gradient on the test bench is not sufficient, which is evident from the comparison of the resulting speeds in purely emulated electric mode. Building on this, an adaption was made to the gradient specification, which essentially consists of two parts. The first part compares the traction force representation in the longitudinal dynamics simulation and the test bench, which turns out differently, and adapts them to each other. The second step takes the speed differences still existing after the first step and adapts them by a difference torque comparison, which is realized by a two-stage empirical measurement series. After this correction, the present speeds for the test bench in pure electric mode are sufficiently close to the speeds achieved on the test bench.

Measurements were carried out under different SOC initial conditions, which allow subsequent assessments. The evaluation is divided on the one hand into the realization of driver specifications, on the other hand into the evaluation of the longitudinal dynamics simulation, their implemented hybrid strategy and input parameters, and the corrections made. It could be shown that the emulation works. But the results also are not sufficiently precise in terms of driving technique, concerning the evaluation which shows differences between the longitudinal dynamics simulation and the real condition on the test bench. Criticisms of the operational strategy were also found, and the corrections made in course of the emulation methodology itself show potential for further development.

1 Einleitung

Aufgrund neuer Gesetzgebungen, die weiter sinkende Emissionsgrenzwerte und Verbrauchseinschränkungen auch für das Motorrad fordern, werden Überlegungen hinsichtlich einer möglichen Hybridisierung des Motorrads sinnvoll. Neben dem Entstehen von rein elektrisch angetriebenen Motorrädern, stellt sich hier immer noch die Frage der möglichen Reichweiten, die mit einer Ladung gefahren werden können. Vor allem das Thema Packeging, das aufgrund des begrenzten Bauraums eines Motorrads ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklungsanstrengungen ist, spielt bei der Größendefinition der Akkumulatoren mit hinein. Gleiches gilt aber auch für die mögliche Realisierung eines Hybrid-Motorades, da auch hier ein Akkumulator und ein weiterer Antriebsmotor notwendig sind.

Auf Basis solcher Fragestellungen wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen der TU Graz im Zuge einer Bachelorarbeit und weiterführend durch einen Mitarbeiter des Institutes, Herrn Dipl.-Ing. Paul Rieger im Rahmen des COMET-Forschungsprojekts ECO Powerdrive 2, eine Längsdynamiksimulation eines Hybrid-Konzeptes für ein Motorrad aufgebaut, das erste Abschätzungen hinsichtlich möglicher Verbesserungen verschiedener Prüfkriterien erlauben soll. Da die Simulation aber nur den Kraftstoffverbrauch, aber keinen Ansatz der Emissionsentstehung während einer Fahrt berechnet, ist eine praktische Umsetzung dieser LDS bzw. dessen Hybridstrategie in einem realen Umfeld gewünscht. Um aber keinen Prototypen bauen zu müssen und somit die Möglichkeit eines schnellen Komponentenwechsels des Hybrid-Konzeptes vorzubehalten, wäre es wünschenswert eine solche Hybrid-Messfahrt mit einem serienmäßigen, rein durch ein VKM angetriebenes Versuchsfahrzeug durchführen zu können, wobei die E-Maschine des Hybriden emuliert werden müsste.

Diesem Gedanken folgend, definiert sich das Hauptziel dieser Masterarbeit als die Entwicklung einer Methodik zur Emulation eines Motorrad-Hybrid-Konzeptes am Rollenprüfstand auf Basis einer LDS des Hybrid-Konzeptes mit einem serienmäßigen, rein VKM betriebenes Versuchsmotorrad. Die Emulation geschieht dabei durch die Vorgabe einer Steigung am Rollenprüfstand, der das Antriebs- bzw. Bremsmoment der E-Maschine des Hybriden emulieren soll. Eine weitere Vorgabe für die Arbeit ist, dass die Prüffahrt am Rollenprüfstand unter Homologationsbedingungen geschehen soll, d.h. die implementierten Widerstände der Gesetzgebung folgen, die für das Hybrid-Konzept definiert sind. Einzig der Schaltverlauf darf von der Gesetzgebung abweichen, da das Verhalten der Betriebsstrategie des Hybriden hinsichtlich optimierten Kraftstoffverbrauchs begutachtet werden soll. Gleichzeitig soll die LDS unangetastet bleiben, d.h. es dürfen keine Eingriffe in dessen Berechnungsstruktur getätigt werden, um z.B. die Widerstandsberechnung zu modifizieren um etwaige Anpassungen auf die Versuchsdurchführung durchzuführen. Dementsprechend soll eine Methodik entstehen, die modular an die LDS angehängt werden kann, um folgend auf dem Rollenprüfstand vergleichbare Messfahrten im Hybridmodus durchführen zu können. Die erhaltenen Ergebnisse würden erste Abschätzungen auch hinsichtlich Emissionsverläufe verschiedener Hybrid-Strategien erlauben und gleichzeitig die Berechnungen der LDS validieren.

Ein weiteres Ziel dieser Masterarbeit ist es die erarbeitete Methodik für erste Messfahrten am Rollenprüfstand einzusetzen und somit eine erste Plausibilisierung der Methodik und eine erste Abschätzung der verwendeten LDS und Hybrid-Strategie zu erhalten. Der Vergleich wird hierbei vor allem für verschiedene SOC-Startbedingungen und im Vergleich zu einer reinen VKM-Fahrt durchgeführt.

Der definierten Zielsetzung folgend werden vorab in Kapitel 2 für diese Masterarbeit relevante Grundlagen dargestellt, die auch die gesetzliche Ausgangsbasis dieser Arbeit zeigen. Ebenfalls wird auf einige Berechnungen eingegangen, die im Zuge des weiteren Verlaufs dieses Dokuments benötigt werden.

Im Kapitel 3 wird auf die erarbeitete Hybrid-Emulation eingegangen. Beginnend mit der zur Verfügung stehenden Ausgangsbasis werden die nötigen Übergabevariablen und eine allgemeine Ablaufstruktur der Übergabe von der LDS an den Rollenprüfstand gezeigt. Zur praktischen Umsetzung dieser Ablaufstruktur wurde ebenfalls eine Methodik erarbeitet und im Anschluss dargestellt.

Im Kapitel 4 wird die Hybrid-Emulation bzw. die erarbeitete Methodik im Zuge einer definierten Versuchsmatrix angewandt. Es werden die Konfigurationen und die erhaltenen Ergebnisse dargestellt und abschließend beurteilt.

Kapitel 5 soll mögliche Ausblicke und Weiterentwicklungen ansprechen, auf denen fortlaufend aufgebaut werden könnte.

Abschließend liegt noch ein Anhang bei, der die Daten der Verbrauchs- und Emissionsauswertung der Versuchsfahrten auflistet.

2 Grundlagen und Ausgangsbasis

Bevor mit der Darstellung der Methodik der Hybrid-Emulation auf dem Rollenprüfstand begonnen werden kann, werden einige grundlegende Themen angesprochen, die einerseits die betroffene Gesetzgebung hinsichtlich Homologation betrifft, weiter auf Berechnungsmethoden eingehen, die in dieser Masterarbeit verwendet werden. Am Ende dieses Kapitels wird das für diese Masterarbeit zur Verfügung stehende Versuchsfahrzeug dargestellt.

2.1 Grundlegende Gesetzgebung

Die für den Verkauf bzw. für das In-Verkehr-Bringen notwendige umfassende Typengenehmigung von Fahrzeugen fordert die Einhaltung von Grenzwerten in definierten Prüfbedingungen. Der genaue Ablauf solcher Prüfungen und die zu verwendenden technischen Einrichtungen sind in den jeweiligen Verordnungen der Länder genau vorgeschrieben. [1]

Für diese Arbeit wird folgend kurz auf die Kategorisierung der Fahrzeuge in der Europäischen Union und den in dieser Arbeit herangezogenen Fahrzyklus eingegangen. Für nähere Informationen bezüglich Testkriterien für die betroffene Kategorie und die Prüfungssituation für Hybridfahrzeuge wird auf die Veröffentlichungen [2] und [3] verwiesen.

Der Fokus im Zuge dieser Arbeit wird auf die EURO 4-Gesetzgebung gelegt.

2.1.1 Einteilung von Fahrzeugen der Kategorie L in der Europäischen Union

Die Europäische Union definiert die Kategorie L (für „Light“) der Fahrzeugklassifizierungen nach der EU-Vorschrift Nr. 168/2013 für Zwei-, Drei-Rad und Quad-Fahrzeuge mit mehreren Unterkategorien. Die Unterteilung erfolgt dabei nach Anzahl der Räder, Hubraum der Verbrennungsmotoren, der Maximalgeschwindigkeit, der maximalen Leistung und der Masse des Fahrzeuges. Tabelle 2.1 zeigt einen Auszug der für diese Masterarbeit relevanten Unterkategorie.

Kategorie	Typ	Räder	Verdichtungs- hub [cm ³]	Leistung [kW]	Leistungsgewicht [kW/kg]
L3e-A1	Kraftrad niedriger Leistung	2	≤ 125	≤ 11	≤ 0,1
L3e-A2	Kraftrad mittlerer Leistung			≤ 35	≤ 0,2
			Nicht von Fahrzeug größer doppelter Leistung abgewandelt		
Le3-A3	Kraftrad hoher Leistung		Alle sonstigen Fahrzeuge der Kategorie L3e		

Tabelle 2.1: Relevanter Fahrzeugtyp mit Unterklassen nach Verordnung (EU) Nr. 168/2013 [3]

Das zu Grunde liegende Versuchsfahrzeug, das in Kapitel 3.2.1 dargestellt wurde, fällt laut den genannten Definitionen somit in die Kategorie L3e

2.1.2 Fahrzyklus WMTC

Für die Ermittlung der Emissionswerte nach Grenzwerten der Euro 4, für die Kategorie L3e, ist als relevanter Fahrzyklus der überarbeitete WMTC („Worldwide harmonized Motorcycle Testing Cycle“) definiert. In diesem überarbeiteten Zyklus wird für die Kategorie L3 nochmals nach maximaler Fahrzeuggeschwindigkeit und Hubraum des Verbrennungsmotors unterschieden. Somit ergibt sich eine weitere Unterteilung wie in Tabelle 2.2 dargestellt. [4]

Unterklassen-Kriterien	Unterkategorie	Testzyklus
$130 \leq v_{\max} < 140 \text{ km/h}$	Unterkategorie 3-1	<u>Überarbeiteter WMTC:</u> Teil 1 im kalten Zustand, gefolgt vom Teil 2 im warmen Zustand. Teil 3 mit reduzierter Geschwindigkeit im warmen Zustand
$v_{\max} \geq 140 \text{ km/h}$ oder Motorhubraum $> 1500 \text{ cm}^3$	Unterkategorie 3-2	<u>Überarbeiteter WMTC:</u> Teil 1 im kalten Zustand, gefolgt vom Teil 2 und weiter Teil 3 im jeweils warmen Zustand.

Tabelle 2.2: Kriterien der Unterkategorisierung der Klasse L3 [4]

Die zweite Zeile ($v_{\max} \geq 140 \text{ km/h}$) in Tabelle 2.2 entspricht den Kriterien des hier verwendeten Versuchsfahrzeuges. Somit ist der WMTC nach der Kategorie L3e und der Unterkategorie 3-2 zu wählen. Abbildung 2.1 zeigt den vorgeschriebenen Geschwindigkeitsverlauf für die definierte Kategorie, wobei für das Versuchsfahrzeug dieser Arbeit auf den Verlauf ohne Geschwindigkeitsreduzierung in hohen Lastbereichen, in Rot dargestellt, zurückgegriffen wird. [4]

Der Verlauf der Schaltvorgänge bzw. der zu fahrenden Gänge ist laut Homologationsvorschrift ebenfalls definiert und in Veröffentlichung [2] unter Anlage 9 des Anhangs 2 näher erläutert. Die Berechnung basiert auf der besten Korrelation zwischen Schaltdrehzahlen und technischen Daten des betroffenen Fahrzeuges, realisiert durch das Verhältnis von normierten Drehzahlen zum Leistungs-Masse-Verhältnis des Fahrzeuges. Der Schaltverlauf ist eher drehzahl- als geschwindigkeitsabhängig. [2]

Zu erwähnen ist, dass sich aufgrund der verschiedenen Massen des Versuchsfahrzeuges und des Hybrid-Konzeptes und der Massenabhängigkeit des Gangverlaufes, unterschiedliche Schaltverläufe über den WMTC für das Versuchsfahrzeug und das Hybrid-Konzept ergeben.

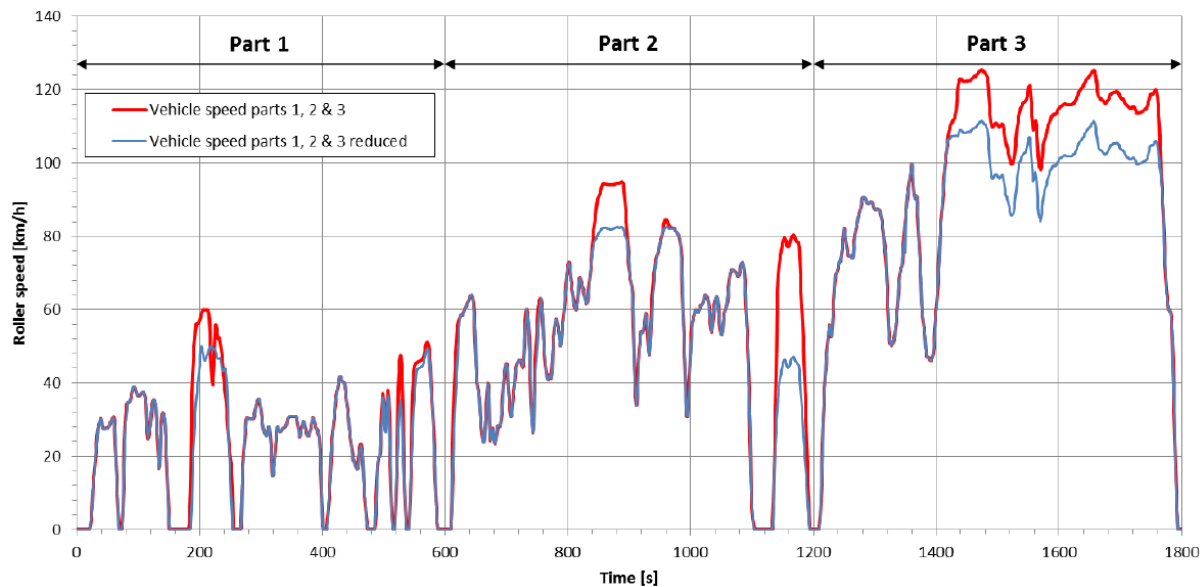


Abbildung 2.1: WMTC Stufe 3 für Fahrzeuge der Kategorien L3e, L4e, L5e-A, L7e-A, L7e-B und L7e-C [5]

2.1.3 Widerstandsparameter laut Homologationsvorschrift der Kategorie L3e, Unterkategorie 3-2 für die Messung am Rollenprüfstand

Für die Prüfung eines Fahrzeuges am Rollenprüfstand gibt die Gesetzgebung die Widerstandsparameter für die Prüffahrt vor, abhängig von der Referenzmasse des Fahrzeuges inkl. Fahrer. Für diese Referenz- bzw. Bezugsmasse wird eine äquivalente Schwungmasse definiert und der Rollwiderstand des Vorderrades (F_0) sowie ein Luftwiderstandskoeffizient, der quadratisch von der Geschwindigkeit in km/h abhängt (F_2), festgelegt. Tabelle 2.3 zeigt für die beiden in dieser Arbeit relevanten Massen die äquivalente Schwungmasse und die Widerstandsparameter. In Formel (1) wird die dazugehörige Widerstandsgleichung dargestellt. [2]

Konfiguration	Fahrzeugmasse + Fahrer = m_{ref} [kg]	Bezugsmasse [kg]	Äquivalente Schwungmasse [kg]	F_0 [N]	F_2 [N/(km/h) ²]
Rein VKM	214+75 = 289	285 < m_{ref} ≤ 295	290	25,5	0,0244
Hybrid	244+75 = 319	285 < m_{ref} ≤ 295	320	28,2	0,0248

Tabelle 2.3: Widerstandsparameter laut Homologationsvorschrift für die Kategorie L für das Versuchsfahrzeug und die Hybridkonfiguration. [2]

$$F_{Wid. Prüfstand} = F_0 + F_2 \cdot v^2 \quad (1)$$

2.1.4 Messverfahren für Fahrzeuge mit reinem Verbrennungsmotor der Kategorie L3e, Unterkategorie 3-2 für Euro 5

Für diese Fahrzeugkategorie sind verschiedene Tests zur Homologation notwendig. In dieser Arbeit wird der Fokus auf den „Typ 1-Test“ gelegt. Im „Typ 1-Test“ sind die Vorbereitungen des Leistungsprüfstandes, der Kraftstoff-, Abstell- und Betriebsbedingungen in vorgegebenen Abfolgen vorgeschrieben. Der Test ist zur Bestimmung der Masse der Emissionen von Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid, Stickoxiden, Kohlendioxid und gegebenenfalls Partikeln sowie für den Kraftstoff-/Energieverbrauch und die elektrische Reichweite definiert. Während der Prüfung wird dabei der Motor mehrmals gestartet und das Fahrzeug nach einem definierten Zyklus (im Fall der Euro 4 und der hier relevanten Klassifizierung: WMTC Phase 3, Unterkategorie 3-2) am Rollenprüfstand betrieben. Ein proportionaler Anteil der verdünnten Abgasemissionen wird laufend unter einer Probeentnahmerichtung mit konstantem Volumen und veränderlicher Verdünnung (CVS) aufgefangen, um eine anschließende Analyse des gesammelten Volumens durchführen zu können. Wenn möglich ist die Bestimmung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs für die 3 Teile des WMTC getrennt durchzuführen. [2]

2.1.4.1 CO₂-Emissions und Kraftstoff-Verbrauchs-Analyse in der Kategorie L3e, Unterkategorie 3-2

Die Masse des vom Fahrzeug emittierten Kohlendioxids soll aus der CO₂-Konzentration des während der Prüfung vom Abgassystem ausgestoßenen und verdünnt abgesaugten Gasgemisches des Gesamtvolumen, der Dichte des Kohlenmonoxids und der Fahrstrecke berechnet werden. Eine detaillierte Beschreibung ist in [2], Seite 43 ff, nachlesbar.

Bei Ottokraftstoffen wird mittels einer Kohlenstoffbilanz der Kraftstoffverbrauch (FC) in Liter pro 100 km berechnet. Dafür werden die gemessenen Kohlenwasserstoff-, Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidemissionen herangezogen. Eine detaillierte Beschreibung ist wieder [2] auf den Seiten 211 ff zu entnehmen.

In der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Simulation wird der Kraftstoffverbrauch aus einem gemessenen Verbrauchskennfeld ermittelt und daraus die CO₂-Emissionen vereinfacht berechnet. [4]

2.1.4.2 Gewichtung der Zyklen-Teile für den WMTC

Bei der Bewertung der erhaltenen Emissionsdaten aus einer Homologationsfahrt mit dem WMTC ist zu beachten, dass die einzelnen Teile des Zyklus unterschiedlich gewichtet werden. D.h., dass die erhaltenen Emissionsergebnisse der Zykusteile mit Wichtungsfaktoren multipliziert werden müssen. [1]

Die durchschnittlichen Ergebnisse der einzelnen Teile des WMTC, werden als $R1$, $R2$ und $R3$ dargestellt. Das Endergebnis R wird abhängig von der Fahrzeugkategorie bzw. den dort definierten Gewichtungsfaktoren für die Emissionen (mg/km) und den Kraftstoffverbrauch (Liter/100 km) nach folgender Gleichung berechnet. [4]

$$R = R1 \cdot w1 + R2 \cdot w2 + R3 \cdot w3 \quad (2)$$

Für die Euro 4-Gesetzgebung und die Kategorie L3e mit dem WMTC Phase 3-2 sind in Tabelle 2.4 in der unteren Zeile definierte Gewichtungsfaktoren w_1 bis w_3 gültig. [3]

Fahrzeugklasse	Name der Fahrzeugklasse	Prüfzyklus	Gleichung	Wichtungsfaktoren
L3e	Zweirädrige Krafträder mit und ohne Beiwagen $v_{\max} < 130 \text{ km/h}$	WMTC Stufe 3	2-53	$w_1 = 0,5$ $w_2 = 0,5$
L4e	Zweirädrige Krafträder mit und ohne Beiwagen $v_{\max} \geq 130 \text{ km/h}$		2-54	$w_1 = 0,25$ $w_2 = 0,5$ $w_3 = 0,25$

Tabelle 2.4: Gewichtungsfaktoren für Euro 5 der Klassen L3e und L4e [3]

2.1.5 Messverfahren für Hybridfahrzeuge (OVC HEVs) mit Betriebsartenschalter für eine Prüfung nach Typ 1

Bei Hybrid-Elektrofahrzeugen mit der Möglichkeit einer externen Aufladung (OVC HEV) und einem Betriebsartenschalter, sind zwei Prüfungen in folgenden Zuständen A und B durchzuführen.

Zustand A entspricht dabei einer Prüfung mit voll aufgeladenem elektrischem Energiespeicher. Zustand B berücksichtigt eine Prüfung mit einem elektrischen Energiespeicher, der die Mindestladung aufweist (maximale Entladung). Die Formeln (3) und (4) zeigen die Berechnungsmethode, nach der der Kraftstoffverbrauch und der CO_2 -Ausstoß berechnet werden. Die Variable M steht dabei für den berechneten Kraftstoffverbrauch in $l/100 \text{ km}$ und C für den berechneten CO_2 -Ausstoß in g/km .

$$M = \frac{(D_e \cdot M_A + D_{av} \cdot M_B)}{(D_e + D_{av})} \quad (3)$$

$$C = \frac{(D_e \cdot C_A + D_{av} \cdot C_B)}{(D_e + D_{av})} \quad (4)$$

D_eelektrische Reichweite laut Anlage 3.3 des Anhang VII aus [3]

D_{av} durchschnittliche Strecke zwischen 2 Batterieladungen laut Anhang VII aus [3]

C_A, M_Aerhaltene Werte des Zustands A

C_B, M_Berhaltene Werte des Zustands B

Eine genauere Beschreibung der Verfahren ist unter [2], Seite 225 ff & 234 ff zu finden. [4].

In beiden Tests muss der Betriebsschalter des Hybriden nach der in Tabelle 2.5 definierten Stellung der dritten Spalte („Reiner Elektro-, reiner Verbrennungs-Hybridbetrieb“) geschaltet sein.

Hybridarten →	Reiner Elektro-Hybridbetrieb	Reiner Verbrennungs-Hybridbetrieb	Reiner Elektro-, Reiner Verbrennungs-, Hybridbetrieb	Hybrid-Modus n ¹ Hybrid-Modus m ¹
Batterieladezustand	Schalter in Stellung	Schalter in Stellung	Schalter in Stellung	Schalter in Stellung
Zustand A – voll aufgeladen	Hybrid	Hybrid	Hybridart mit höchstem Stromverbrauch ²	
Zustand B - Mindestladung	Kraftstoffbetrieb	Kraftstoffbetrieb	Hybridart mit höchstem Kraftstoffverbrauch ³	Hybrid

Tabelle 2.5: Bezugstabelle zur Bestimmung von Zustand A oder B in Abhängigkeit der verschiedenen Konzepte von Hybridfahrzeugen und der Stellung des Hybrid-Betriebsartenstellers [4]

Auf eine Erläuterung der Verfahren zur Messung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von OVC HEVs mit Betriebsartschalter, die für die Zustände A und B unterschiedliche Varianten zulassen, wird hier verzichtet und auf die Veröffentlichungen [2] und [6] verwiesen.

2.1.6 Emissionsgrenzwerte Kategorie L3e, Unterkategorie 3-2 in der Euro 4- und Euro 5-Gesetzgebung

Es wird hier kurz ein Überblick über die gültigen Grenzwerte der Fahrzeugkategorie L3e, Unterkategorie 3-2 der Euro 4 in Tabelle 2.6 und der ab dem Jahr 2020 gültigen Euro 5 für dieselbe Fahrzeugkategorie in Tabelle 2.7 gegeben.

Die Verschärfung der Emissions-Grenzwerte liegt einerseits in der Senkung der Grenzwerte von CO, THC und NO_x, sowie der Einführung von Grenzwerten für die Emissionsbestandteile NMHC (Non-Methan-HC) und der Partikelmasse

¹ z. B. Sport-, Spar- und Stadtfahrbetrieb, außerstädtischer Fahrbetrieb

² Hybridart mit höchstem Stromverbrauch: Die Hybridart, bei der unter allen wählbaren Hybridarten bei der Prüfung im Zustand A gemäß Anhang 10 Nummer 4 der UNECE-Regelung Nr. 101 der meiste Strom verbraucht wird, was anhand der Herstellerangaben in Absprache mit dem technischen Dienst nachzuweisen ist.

³ Hybridart mit höchstem Kraftstoffverbrauch: Die Hybridart, bei der unter allen wählbaren Hybridarten bei der Prüfung im Zustand B gemäß Anhang 10 Nummer 4 der UNECE-Regelung Nr. 101 der meiste Kraftstoff verbraucht wird, was anhand der Herstellerangaben in Absprache mit dem technischen Dienst nachzuweisen ist.

Emissions-Regelungsstufe	Kategorie	Zyklus-hub	Antriebsklasse	Umsetzungsdatum	
				Bauart-zulassung neue Fahrzeugtype	Erste Registrierung existierender Typen
Euro 4	L3e, 3-2	2 & 4	SI/CI/Hybrid	01.01.2016	01.01.2017
CO [g/km]	THC [g/km]	NO _x [g/km]	Test-Zyklus	Kaltstart	Haltbarkeits-Distanz [km]
1,14	0,17	0,09	WMTC, Stufe 2	ja	35.000

Tabelle 2.6: Emissionsgrenzwerte für Kategorie L3e-Fahrzeuge der Unterkategorie 3-2 der Regelstufe Euro 4

Emissions-Regelungs-stufe	Kategorie		Zyklus-Hub		Antriebs-Klasse	Umsetzungsdatum	
						Bauart-zulassung neue Fahrzeugtype	Erste Registrierung existierender Typen
Euro 5	L1e-B bis L7e		2 & 4		SI/SI-Hybrid	01.01.2020	01.01.2021
CO [g/km]	THC [g/km]	NMHC [g/km]	NO _x [g/km]	PM [g/km]	Test-Zyklus	Kaltstart	Haltbarkeits-Distanz [km]
1	0,1	0,068	0,06	0,0045	WMTC, Stufe 2	ja	35.000

Tabelle 2.7: Emissionsgrenzwerte für Kategorie L3e-Fahrzeuge der Unterkategorie 3-2 der Regelstufe Euro 5

2.2 Berechnungs-Grundlagen

Folgende Grundlagen zeigen Berechnungen verschiedenster Thematiken, die für die folgenden Kapitel vorausgesetzt werden.

2.2.1 Widerstandsberechnung eines einspurigen Fahrzeuges auf Basis längsdynamischer Betrachtungen

Betrachtet man die Längsdynamik eines Fahrzeuges vereinfacht über eine Steigung β so lässt sie sich wie in Abbildung 2.2 vereinfacht darstellen.

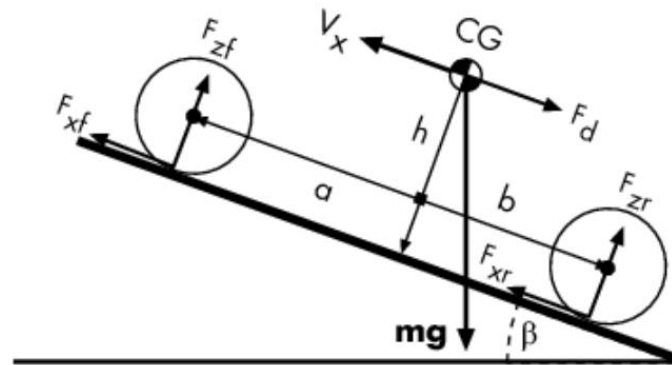


Abbildung 2.2: Vereinfachte Darstellung der wirkenden Kräfte eines Fahrzeuges unter Bewegung in seine Längsrichtung [7]

Die verwendeten Variablen werden in Tabelle 2.8. aufgelistet und erklärt. Die Darstellung bzw. Berechnung der längsdynamischen Kräfte beruht auf einem in der Software Matlab zur Verfügung stehenden Standard-Block, einem sogenannten Simscape, für einen Fahrzeugkörper („Vehicle Body“). Nähere Informationen können der Hilfe-Funktion des genannten Simscapes in Matlab entnommen werden. Die Spezifikation des Programms ist in Verweis [7] zu finden.

Variable	Einheit	Beschreibung
m	kg	Masse des gesamten Fahrzeuges
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
v_x	m/s	Geschwindigkeit in x-Richtung
v_w	m/s	Windgeschwindigkeit in x-Richtung
ρ	kg/m ³	Dichte der Luft
A	m ²	Projizierte Anströmfläche des Fahrzeuges in x-Richtung
c_d	-	Luftwiderstandsbeiwert
a_{ri}	-	Rollwiderstandsbeiwert eines Reifens
β	rad	Steigungswinkel
a	m	Abstand der Vorderachse zum Schwerpunkt in x-Richtung
b	m	Abstand der Hinterachse zum Schwerpunkt in x-Richtung
h	m	Höhe des Schwerpunktes über dem Boden
n	-	Anzahl der Räder pro Achse
CG	-	„Centre of Gravity“ (dt: „Schwerpunkt“)
F_{xf}	N	Rollwiderstand in x-Richtung am Vorderrad
F_{xr}	N	Rollwiderstand in x-Richtung am Hinterrad
F_{xi}	N	Rollwiderstand in x-Richtung eines Rades
F_d	N	Luftwiderstand des Fahrzeuges
F_{Stg}	N	Steigungswiderstand des Fahrzeuges
F_{zf}	N	Aufstandskraft des Fahrzeuges auf der Vorderachse
F_{zr}	N	Aufstandskraft des Fahrzeuges auf der Hinterachse
F_{zi}	N	Aufstandskraft des Fahrzeuges an einem Reifen

Tabelle 2.8: Variablendefinition der Widerstandsbetrachtungen in der Längsdynamik eines Fahrzeuges [7]

Stellt man nun für die in Abbildung 2.2 dargestellte Situation ein dynamisches Kräftegleichgewicht in x-Richtung auf, erhält man die in Formel (5) dargestellte Beziehung.

$$m \cdot \dot{v}_x = F_x - F_d - F_{Stg} \quad (5)$$

Dabei sind die einzelnen Komponenten wie folgt in den Formeln (6) bis (8) definiert. Man beziehe sich dabei auf Abbildung 2.2 und Tabelle 2.8.

$$F_x = n \cdot (F_{xf} + F_{xr}) \quad (6)$$

$$F_d = \frac{1}{2} A \cdot c_w \cdot \rho_L \cdot (v_x - v_w) \cdot \operatorname{sgn}(v_x - v_w) \quad (7)$$

$$F_{Stg} = m \cdot g \cdot \sin \beta \quad (8)$$

Erstellt man nun das Momenten-Gleichgewicht um den Auflagepunkt der Vorderachse, durch den in der Darstellung der Abbildung 2.2 die Kräfte F_{xf} und F_{zf} wirken, erhält man das Gleichgewicht laut Formel (9). Das System sei dabei linksdrehend.

$$\sum M_f = 0 = -h \cdot F_d - h \cdot F_{Stg} - a \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta + (a + b) \cdot F_{zr} - h \cdot m \cdot \dot{v}_x \quad (9)$$

Dasselbe wird nun für den Aufstandspunkt auf der Hinterachse durchgeführt und man erhält die Gleichung (10).

$$\sum M_r = 0 = -h \cdot F_d - h \cdot F_{Stg} - b \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta - (a + b) \cdot F_{zf} - h \cdot m \dot{v}_x \quad (10)$$

Die nun erhaltenen Gleichungen der dynamischen Momenten-Gleichgewichte lassen sich nun explizit für F_{zf} und F_{zr} darstellen. Ersichtlich ist das Ergebnis in der Formel (11) für das Gleichgewicht um den vorderen Achsauflagepunkt und in Formel (12) für den hinteren Achsauflagepunkt.

$$F_{zr} = \frac{h \cdot (F_d + F_{Stg} + m \cdot \dot{v}_x) + a \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta}{(a + b)} \quad (11)$$

$$F_{zf} = \frac{-h \cdot (F_d + F_{Stg} + m \cdot \dot{v}_x) + b \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta}{(a + b)} \quad (12)$$

Durch die nun erhaltenen Gleichungen werden die Achsbelastungen des Luftwiderstandes und damit der Fahrgeschwindigkeit, der auftretenden Beschleunigung (Lastwechsel bei den Achsen) und der zu fahrenden Steigung abhängig gemacht. Bezieht man nun die Berechnung des Rollwiderstands pro Achse nach Gleichung (13) mit ein, ist somit auch dieser von den gerade genannten Größen abhängig. Für die Erläuterung der Rollwiderstandsberechnung wird auf die Veröffentlichungen [8] und [9] verwiesen.

$$F_{xi} = a_{ri} \cdot F_{zi} \quad (13)$$

Die Gleichungen (5) bis (8) und (11) bis (13) stellen nun die Basis für die Berechnungen in der Längsdynamik in der hier zu Grunde liegenden LDS dar. Als Beispiel stellt Abbildung 2.3 die wirkenden Kräfte für stationäre Geschwindigkeits-Zustände dar. Herangezogen wurden hierfür die in der linken oberen Ecke dargestellten Parameter.

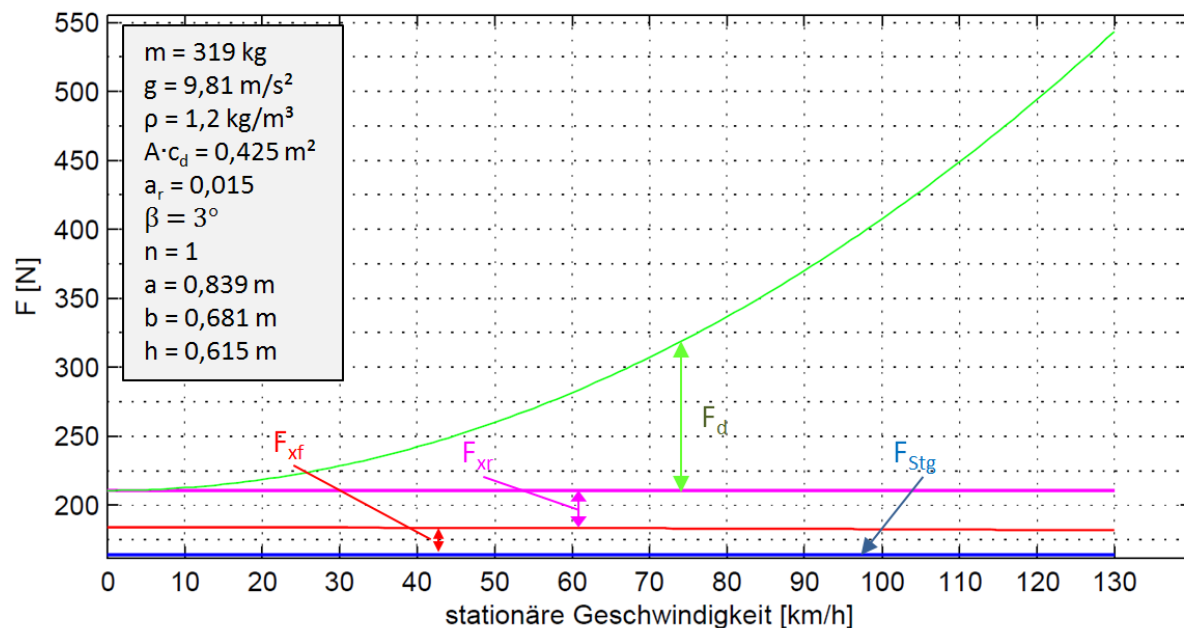


Abbildung 2.3: Darstellung der Widerstände anhand eines Beispiels aus der längsdynamischen Betrachtung

2.2.2 Berechnung von Fahrwiderständen eines Motorrads auf Basis eines Ausrollversuches auf der Prüfstandrolle unter Homologationsbedingungen

Das Fahrverhalten eines Fahrzeuges in seine Längsrichtung hängt von seiner Antriebsleistung, seiner Bremsleistung und den auftretenden Verlusten ab. Lässt man ein Motorrad ohne Hilfe eines Antriebs oder ohne Betätigung einer mechanisch oder elektrisch realisierten Bremse auf einer definierten Fahrstrecke bzw. auf einem definierten Untergrund und einer Startgeschwindigkeit ungleich 0 ausrollen, so unterliegt es nur mehr den auftretenden Widerstandskräften und wird durch diese abgebremst. Kennt man den Geschwindigkeitsverlauf des Ausrollvorgangs, kann mit Hilfe des dynamischen Kräftegleichgewichts Rückschluss auf die auftretenden Widerstände gemacht werden. Der Ausrollversuch selbst wird je nach Widerstandsbetrachtung den Anforderungen angepasst. So kann ein Versuch auf ebener Fahrbahn auf Asphalt unter freien Umweltbedingungen stattfinden, der das reale Verhalten des Versuchsfahrzeuges auf der Straße abbildet. Ebenfalls kann aber auch ein Versuch auf einer Prüfstandrolle unter definierter Vorgabe des Rollenwiderstands durchgeführt werden. Dies hätte z.B. den Vorteil die restlich auftretenden Widerstände am Hinterrad ermitteln zu können. [9]

Ein Ausrollversuch auf Asphalt unter Umweltbedingungen ist in der Veröffentlichung [10] durchgeführt und dargestellt worden. In dieser Masterarbeit relevant ist jedoch der Ausrollversuch auf einer Prüfstandrolle unter Verwendung der Widerstandsparameter laut Homologationsgesetzgebung (siehe Kapitel 2.1.3). Die Widerstände, die während einer Fahrt auftreten werden somit durch die Prüfstandrolle dargestellt. Diese berücksichtigt den Rollwiderstand am Vorderrad, einen quadratisch von der Geschwindigkeit abhängigen Widerstand, der dem Luftwiderstand gleichgesetzt werden kann, und den Beschleunigungswiderstand. Nicht durch die Rollensteuerung berücksichtigt wird der effektiv am Hinterrad des Fahrzeuges auftretende Widerstand, der durch die Rollarbeit des Hinterreifens und die Widerstände bzw. die Verluste des beteiligten Antriebsstrangs verursacht werden. Somit lässt sich das dynamische Gleichgewicht nach Gleichung (14) aufstellen.

$$m_{\text{äquiv}} \cdot \frac{\Delta v(t)}{\Delta t} = F_0 + F_2 \cdot v_{[km/h]}^2(t) + F_{W_{HR}}(t) \quad (14)$$

Dabei wird der Beschleunigungswiderstand auf der linken Gleichungsseite durch die auf der Rolle definierte äquivalente Fahrzeugmasse $m_{\text{äquiv}}$ berücksichtigt, der konstante Anteil des Vorderreifens am Widerstand durch F_0 und der quadratische Widerstandsanteil durch F_2 dargestellt. $F_{W_{HR}}$ entspricht somit dem noch fehlenden Widerstand, der am Hinterrad auftritt und auch den beteiligten Antriebsstrang berücksichtigt. Dieser Widerstand am Hinterrad kann nun durch Lösung des Gleichungssystems zunächst abhängig von der Zeit ermittelt werden. Durch den bekannten Verlauf von $v(t)$ kann auch das $F_{W_{ges}}$ bzw. das $F_{W_{HR}}$ von der Geschwindigkeit abhängig gemacht werden.

3 Hybrid-Emulation

Das grundlegende Ziel der Hybrid-Emulation am Rollenprüfstand ist die Validierung der Längsdynamiksimulation (LDS), und eine Emissions- und Verbrauchsbewertung des Hybridkonzeptes. Abbildung 3.1 zeigt die Zieldefinition graphisch. Dabei bildet die LDS die Basis und beinhaltet das Hybrid-Konzept und somit auch die Betriebsstrategie. Auf dem Rollenprüfstand soll nun das Hybrid-Konzept mit einem Serienfahrzeug gefahren werden. Dabei wird die E-Maschine des Hybrid-Konzeptes durch eine Steigungsvorgabe emuliert. Auf Basis dieser Messdaten kann dann das Ziel der Hybrid-Emulation erreicht werden und ein Abgleich der Simulation mit realen Bedingungen erfolgen.

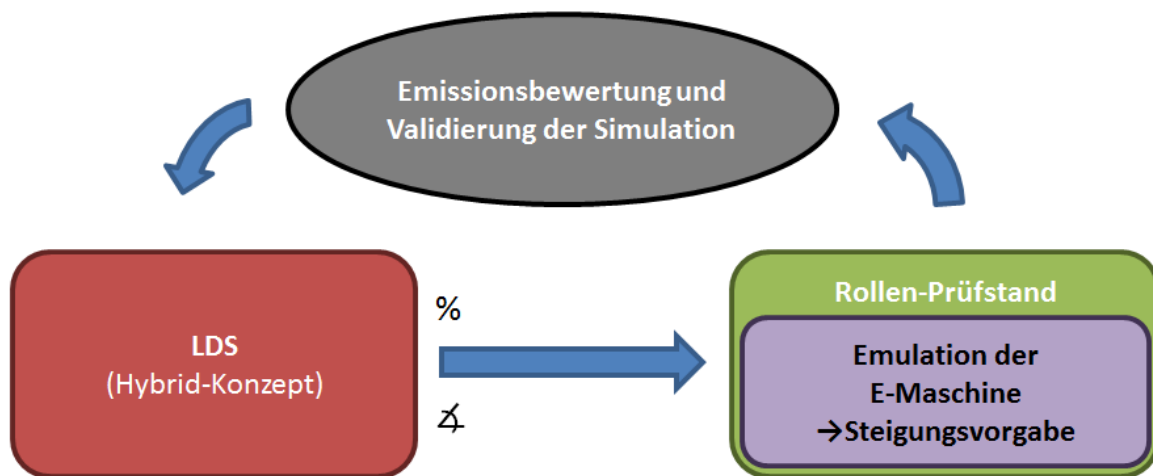


Abbildung 3.1: Grundlegende Zieldefinition der Hybrid-Emulation

Wie aber in diesem Kapitel gezeigt wird, ist eine direkte Übergabe der Steigungsvorgabe, die aus der Momenten-Vorgabe der E-Maschine des Hybrid-Konzeptes errechnet wird, an den Rollenprüfstand nicht ausreichend, um die Geschwindigkeiten laut Simulations-Vorgabe zu erreichen. Somit muss, wie in Abbildung 3.2 gezeigt, eine Anpassung der Steigungsvorgabe durchgeführt werden.

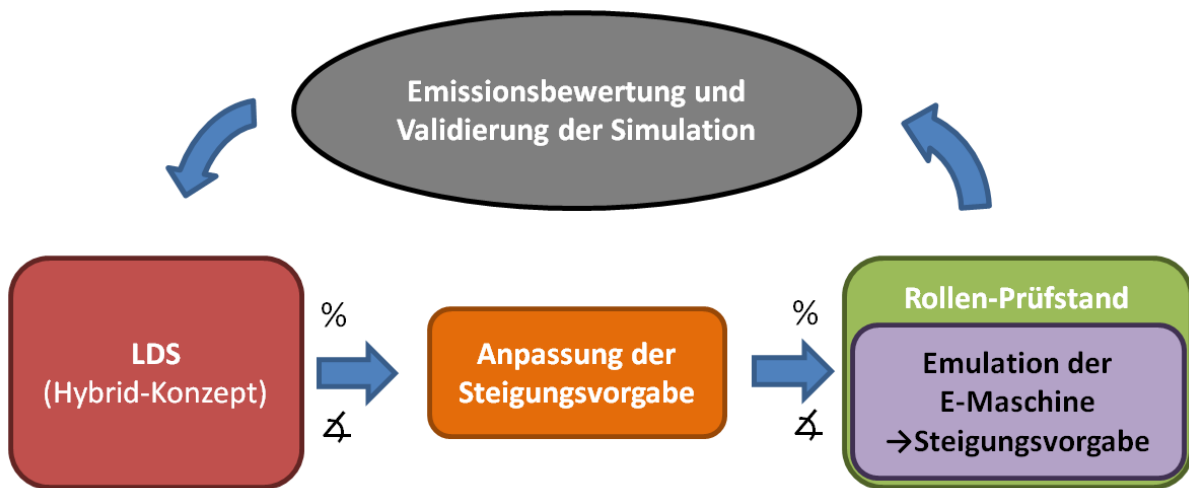


Abbildung 3.2: Grundlegendes Ziel der Hybrid-Emulation

Diese Situation definiert das Hauptziel dieser Masterarbeit. Es sollen Anpassungen gefunden werden, die eine Emulation des Hybrid-Konzeptes und dessen Betriebsstrategie auf dem Rollenprüfstand erlauben.

3.1 Umrechnung der Momenten-Vorgabe in eine äquivalente Steigung

Um das Moment der E-Maschine des Hybrid-Konzeptes auf dem Rollenprüfstand darstellen zu können, wird das Moment in eine äquivalente Steigung umgerechnet. Wird von der E-Maschine ein positives Moment, d.h. ein Antriebsmoment generiert, wird das in der emulierten Darstellung als negative Steigung, d.h. als Gefälle dargestellt. Umgekehrt wird ein auf den Reifen aufgebrachtes Bremsmoment durch die E-Maschine des Hybrid-Konzeptes (durch Rekuperation) in eine positive Steigung, somit einem emulierten Anstieg der Fahrbahn umgeformt. Folgend werden die Schritte der Umrechnung dargestellt. Es wird dabei begleitend auf die vereinfachten Darstellungen in Abbildung 3.3 verwiesen.

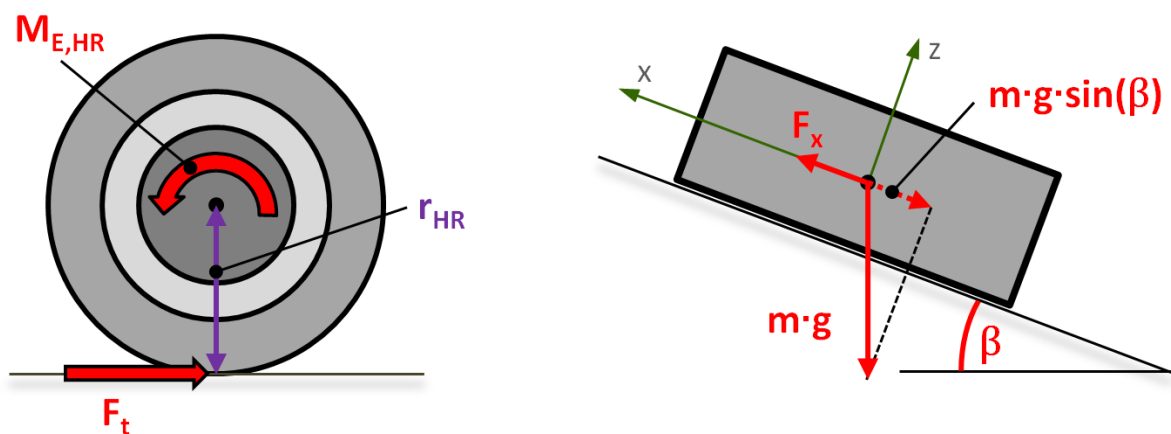


Abbildung 3.3: Vereinfachte Darstellung der Prinzipien hinter der Steigungsberechnung der E-Moment-Emulation

Das durch die E-Maschine erzeugte Moment M_{EMa} , wird über die Übersetzungen und Wirkungsgrade des Antriebsstrangs auf das Hinterrad übertragen (siehe Abbildung 3.28). Dieses auf das Hinterrad wirkende E-Moment ($M_{E,HR}$), kann über den Reifenradius r_{HR} in eine tangentielle Antriebskraft am Radaufstandspunkt umgerechnet werden, wie in Formel (15) dargestellt. Diese tangentielle Kraft ist in Abbildung 3.3 auf der linken Seite vereinfacht dargestellt.

$$M_{E,HR} = F_t \cdot r_{HR} \quad (15)$$

Betrachtet man nun eine allgemeine Masse, die vereinfacht reibungsfrei einem Gefälle ausgesetzt ist, wirkt ein Sinus-Anteil der senkrecht wirkenden Kraft aus der Eigenmasse entlang der Bewegungsrichtung x . Ist der Steigungswinkel β , wie in der Abbildung 3.3 gezeigt, positiv definiert, wirkt die Kraft in x -Richtung negativ. Bei einem auftretenden Gefälle, d.h. einem negativen Winkel β , wirkt F_x in positive x -Richtung.

$$F_x = -m \cdot g \cdot \sin \beta \quad (16)$$

Setzt man nun die aus dem Gefälle kommende Kraft F_x der nötigen Antriebskraft am Reifen gleich, die als tangentielle Kraft F_t zuvor definiert wurde, erhält man die in Gleichung (17) ersichtliche Beziehung.

$$\frac{M_{E,HR}}{r_{HR}} = -m \cdot g \cdot \sin \beta \quad (17)$$

Wird der Winkel β explizit dargestellt, erhält man die Beziehung der nötigen Steigung, um ein definiertes E-Moment am Hinterrad darstellen zu können (Gleichung (18)).

$$\beta = \arcsin\left(\frac{-M_{E,HR}}{m \cdot g \cdot r_{HR}}\right) \quad (18)$$

Zu berücksichtigen ist noch, dass β laut Gleichung (18) noch als Radiant dargestellt ist. Um eine Angabe der Steigung in % zu erhalten, ist noch die Formel (19) zu berücksichtigen.

$$\beta [\%] = \tan(\beta [rad]) \cdot 100 \quad (19)$$

3.2 Ausgangsbasis für die Emulation

Die Ausgangsbasis für die zu entwickelnde Emulations-Methodik bildet, neben dem zur Verfügung stehenden serienmäßigen Versuchsfahrzeug, die Längsdynamiksimulation und der Rollenprüfstand. Folgend werden diese kurz beschrieben.

3.2.1 Versuchsfahrzeug

Als Versuchsfahrzeug steht eine BMW F800GT zur Verfügung, wie sie in Abbildung 3.4 abgebildet ist. Diese wurde auch in der LDS implementiert. Die BMW F 800 GT ist ein sportliches, dynamisches und tourentaugliches Motorrad für idyllische Alleen, kurvige Alpenpässe und endlose Highways.[11]

Tabelle 9.1 zeigt die technischen Daten der BMW im Anhang. Das Fahrzeug fällt in der Europäischen Gesetzgebung in die Fahrzeugkategorie L3e, Unterkategorie 3-2. [2].



Abbildung 3.4: BMW F 800 GT [11]

3.2.2 Hybrid-Konzept

Das auf Basis der BMW F800 GT erstellte Hybrid-Konzept, wurde in vorhergehenden Arbeiten definiert und ist in den Veröffentlichungen [4], [12] und [13] genauer erläutert. Hier wird nur kurz auf den Aufbau des Konzepts eingegangen.

3.2.2.1 Aufbau des Antriebsstrangs

Für die Hybriddarstellung wurde ein paralleler Plug-In Hybridantriebsstrang verwendet, wie er vereinfacht in Abbildung 3.5 dargestellt ist.

In dieser Anordnung ist die Kupplung nach der VKM, vor dem Getriebeeingang und vor der E-Maschine platziert. Die E-Maschine greift parallel zur VKM auf die Getriebeeingangswelle ein. [14] Somit summieren sich die Drehmomente der VKM und der E-Maschine auf der Getriebeeingangswelle

In dieser Konfiguration besitzt die VKM keinen separaten E-Starter. Die Start/Stopp-Funktion wird durch die E-Maschine realisiert.

Der Hybridisierungsgrad wurde in vorherigen Untersuchungen festgelegt, die sich mit dem Energie- bzw. Leistungsbedarf eines konventionellen Fahrzeuges (L3e 3.2, BMW F 800 GT) im WMTC, mit dem Fokus auf Hybridisierung und dem homologierten Kraftstoffverbrauch [4], sowie mit der Bestimmung des minimalen Kraftstoffverbrauchs mittels dynamischer Programmierung in Kombination mit einer Rückwärtssimulation [13] beschäftigen.

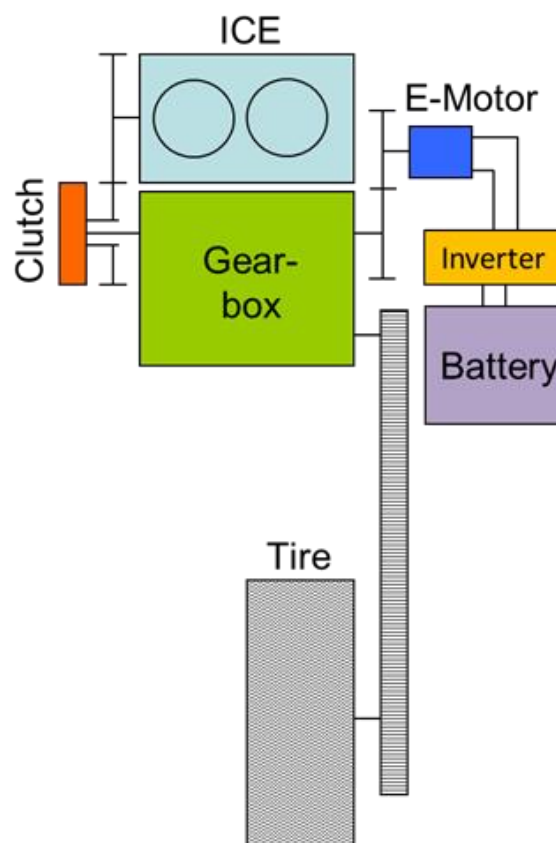


Abbildung 3.5: Antriebsstrangaufbau der hybridisierten-F 800 GT [12]

3.2.2.1.1 Verbrennungskraftmaschine

Die im Hybrid dargestellte Verbrennungskraftmaschine entspricht dem konventionellen Antriebsaggregat aus der seriengetreuen BMW F 800 GT, wie er im Kapitel 3.2.1 dargestellt ist. Dabei handelt es sich bezüglich Verbrauch um eine der Besten ihrer Klasse, das sich auf die hohe Effizienz bzw. den geringen Verbrauch über ein breites Drehzahlband zurückführen lässt. [12]

3.2.2.1.2 Kupplung

Bei der Kupplung wird von einer konventionellen Kupplung ausgegangen, mit dem einzigen Unterschied, dass die Ansteuerung nicht per Hand des Fahrers, sondern durch die Hybrid Control Unit (HCU) vorgenommen wird.

3.2.2.1.3 Getriebe:

Als Basis dient das konventionelle 6-Gang-Schaltgetriebe der BMW F 800 GT. Die Unterschiede der Hybrid-Konfiguration zum konventionellen Getriebe liegen grundsätzlich am zweiten Momenten-Eingang an der gegenüberliegenden Seite der Eingangswelle, welcher durch die E-Maschine mit einer Primärübersetzung besetzt wird.

3.2.2.1.4 E-Motor und Inverter:

Die Auswahl des verwendeten E-Motors basiert auf den Veröffentlichungen [4] und [13], die einerseits Rücksicht auf den nötigen Leistungsbedarf einer WMTC-Fahrt nehmen und andererseits die beste Konfiguration bzw. Kombination bezüglich Verbrauch und Kosten mit einbeziehen. Die in den genannten Veröffentlichungen dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei der Betrachtung des hochlastigen WMTC-Bereichs (3. Teil) für den Antrieb eine durchschnittliche Leistung von 10 kW notwendig ist. Bei der Untersuchung hinsichtlich des Verbrauchs und der Kosten der besten Konfiguration bzw. Kombination der Hybrid-Komponenten ergab die Kombination aus einer 10 kW-E-Maschine mit einer Batterie mit 2 kWh Kapazität die besten Ergebnisse. Abbildung 3.6 zeigt dabei den Einfluss von Energiespeichervariationen, bei konstanter E-Maschinen-Leistung, auf den Kraftstoffverbrauch.

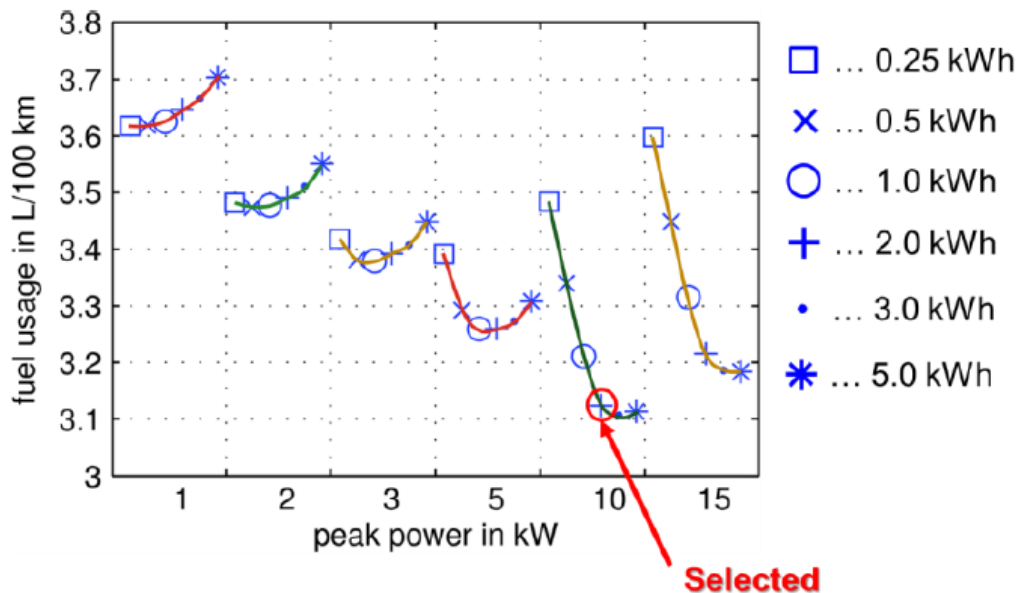


Abbildung 3.6: Einfluss von Energiespeichervariationen bei konstanter E-Maschinen-Leistung auf den Kraftstoffverbrauch. [12]

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde ein E-Motor mit einer Leistung von 10 kW gewählt. Das maximale Drehmoment dieses Motor liegt bei 22 Nm. [12]

3.2.2.1.5 Batterie:

Die Dimensionierung der verwendeten Antriebsbatterie basiert auf den Veröffentlichungen [4] und [13], die einerseits den nötigen Energiespeicher einer WMTC-Fahrt berücksichtigen und andererseits Rücksicht auf die beste Konfiguration bzw. Kombination bezüglich Verbrauch und Kosten berücksichtigen. Aus diesen Arbeiten geht hervor, dass für das Durchfahren eines ganzen WMTC-Zyklus im rein elektrischen Betriebsmodus ein Energiespeicher von minimal 2 kWh erforderlich ist. Bei der Betrachtung von Verbrauch und Kosten der besten Konfiguration bzw. Kombination der Hybrid-Komponenten ergab, wie im Unterkapitel zuvor schon erwähnt, die Kombination aus einem 10 kW-E-Maschine mit einer Batterie mit 2 kWh Kapazität die besten Ergebnisse, wie es in Abbildung 3.6 gezeigt wird. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde eine Speicherkapazität von 2 kWh gewählt. [12]

3.2.2.2 Resultierende Masse der Hybrid-Konfiguration

Da die Hybrid-Konfiguration auf dem in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Versuchsfahrzeuges aufbaut, kann von dessen Masse als Basis ausgegangen werden. Diese Masse beträgt 214 kg (DIN Leergewicht, fahrfertig 90 % betankt, ohne SA). Betrachtet man das Hybridkonzept nach Abbildung 3.5 sind wesentliche Zusatz-Komponenten die E-Maschine (inkl. Inverter) und die Batterie. Auf Basis der Definitionen in den Veröffentlichungen [4] und [13] werden die Leistungsdichte der E-Maschine und Energiedichte der Batterie übernommen. Die E-Maschine weist eine Leistungsdichte von 1 kW/kg und somit eine Masse von 10 kg bei 10 kW an Leistung auf. Für die Batterie wurde eine Energiedichte von 100 Wh/kg herangezogen. Setzt man dieser die gewählte Speicherkapazität von 2 kWh gegenüber, ergibt sich für die Batterie eine Masse von 20 kg. Im Zuge der Homologationsvorschrift zur Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen ([3]) wird noch ein Fahrer mit 75 kg eingerechnet. Somit lautet die Masse der Hybrid-Konfiguration im fahrbereiten Zustand 244 kg. Inklusive Fahrer ergibt das in Summe 319 kg.

3.2.3 Längsdynamiksimulation

Die im Zuge dieser Masterarbeit verwendete Längsdynamiksimulation basiert auf einer bereits aufgebauten dynamischen LDS die in der Entwicklungsumgebung von Matlab und Simulink, inkl. SimDriveline erstellt wurde. In diesem Kapitel wird nun ein grober Überblick über die Funktionen der einzelnen Bestandteile der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Simulation gegeben. Diese Simulation wurde für die beiden Veröffentlichungen [4] und [12] durch Herrn Dipl.-Ing. Paul Rieger an der TU Graz weiter verfeinert und für die in den beiden Veröffentlichungen dargestellten Untersuchungen herangezogen.

Die verwendete LDS wird in vereinfachter Variante in Abbildung 3.7 dargestellt. Diese Abbildung dient als Basis der groben Funktionserklärung der einzelnen Simulationsblöcke bzw. -komponenten im weiteren Verlauf dieses Kapitels. Der Datenaustausch zwischen den einzelnen Blöcken in Abbildung 3.7 erfolgt dabei durch ein Datenbussystem (geschlossene Linien) bzw. durch physikalische Verbindungen, die mit Hilfe punktierter Linien dargestellt ist. Durch physikalische Verbindungen werden Drehzahlen und Drehmomente zwischen den Komponenten transportiert bzw. übergeben. Für detailliertere Informationen und Darstellungen sei auf die Veröffentlichungen [4] und [12] verwiesen.

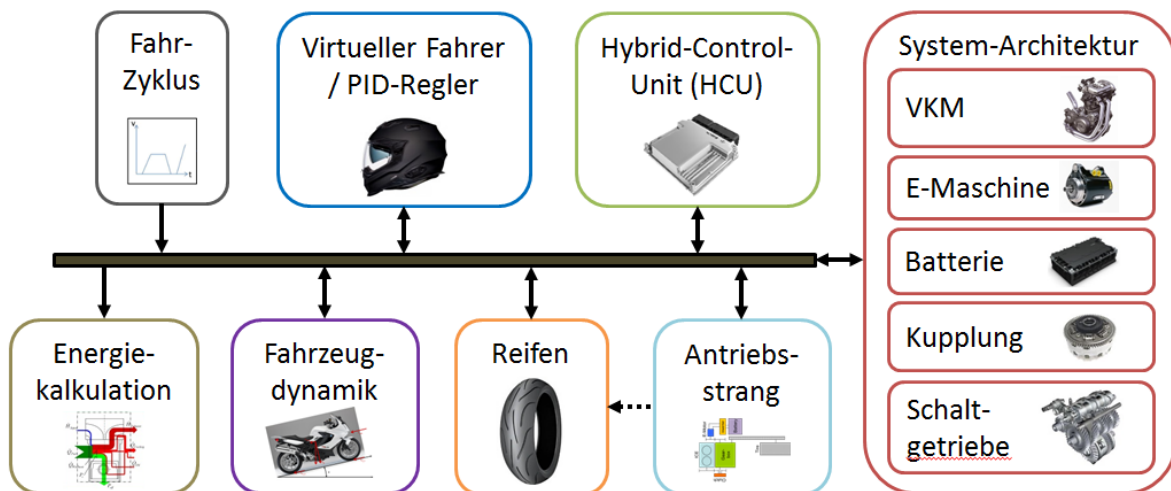


Abbildung 3.7: Vereinfachte Darstellung der Gesamtfahrzeugsimulation

Die vereinfachte Darstellung (Abbildung 3.7) ist in 8 Teilbereiche untergliedert und umfasst:

- den Fahrzyklus
- den Virtuellen Fahrer (PID-Regler)
- die Hybrid-Control-Unit (HCU)
- die System-Architektur
- den Antriebsstrang
- den Reifen
- die Fahrzeugdynamik, sowie
- die Energiekalkulation

Folgend wird grob auf die Komponenten eingegangen.

3.2.3.1 Fahrzyklus

Die für die Simulation notwendige Vorgabe eines Fahrprofils wird im Fahrzyklus vorgegeben. Folgende Größen werden dabei vom Modul Fahrzyklus an den Datenbus übergeben:

- Sollgeschwindigkeit des Fahrzeuges als Funktion der Zeit
- Eingelegter Gang als Funktion der Zeit
- Fahrbahnsteigung

3.2.3.2 Virtueller Fahrer bzw. PID-Regler

Der „virtuelle Fahrer bzw. PID-Regler“ hat die Aufgabe in dem vorhandenen dynamischen System den Sollgeschwindigkeitsverlauf einzuhalten. Der geschlossene Regelkreis sollte dabei möglichst einer realen Fahrer-Fahrzeug-Paarung entsprechen. Der Regler vergleicht dabei die vom „Fahrzyklus“ zur Verfügung gestellte Soll-Geschwindigkeit mit der von Simulationsblock „Fahrzeugdynamik“ ausgegebenen Ist-Geschwindigkeit, dessen Differenz die Regelgröße darstellt und vom „virtuellen Fahrer“ möglichst gering gehalten werden muss. Das Fahrermodell ist ein Regler ohne Vorsteuerung, d.h. das vorausschauende Fahren eines realen Fahrers wird nicht abgebildet. Wie in Abbildung 3.8 ersichtlich erhält der Regler neben dem Fahrzyklus und der Fahrzeugdynamik auch Informationen aus der HCU. Die Ausgänge des virtuellen Fahrers werden den Blöcken HCU und der Systemarchitektur zur Verfügung gestellt.

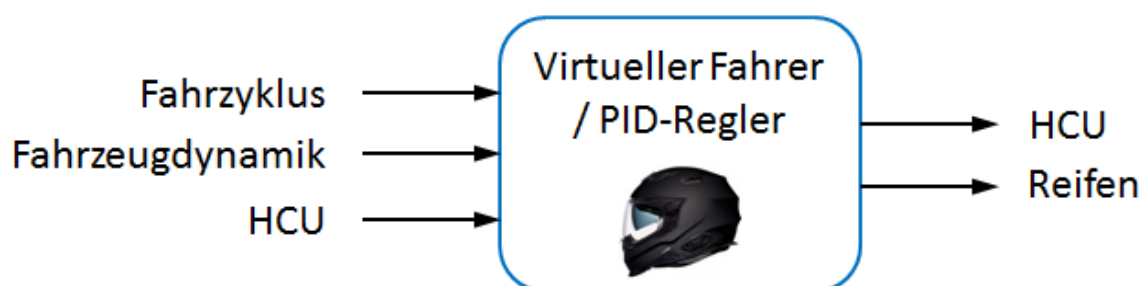


Abbildung 3.8: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge Virtueller Fahrer/PID-Regler

3.2.3.3 Hybrid Control Unit

Die „Hybrid Control Unit“ (HCU) dient zur Darstellung der Betriebsstrategie des Fahrzeuges. In diesem Block wird unter Berücksichtigung der Leistungsgrenzen und thermischen Grenzen der jeweiligen Komponenten der effizienteste Betriebsmodus ausgesucht. Somit erfüllt die HCU folgende Aufgaben:

- Bestimmung der abrufbaren Momente der VKM und des E-Motors
- Festlegung des Betriebsmodus
- Ansteuerung der Kupplung
- Ansteuerung des Getriebes
- Aufteilung des benötigten Antriebs- bzw. Bremsmomentes zwischen VKM, E-Motor und Betriebsbremse

Eingangsinformationen erhält die HCU von fast allen in Abbildung 3.7 dargestellten Teilkomponenten, mit Ausnahme der Energiekalkulation. Die erarbeiteten Informationen des Blocks werden an den virtuellen Fahrer und die Systemarchitektur weitergegeben, wie in Abbildung 3.9 dargestellt.

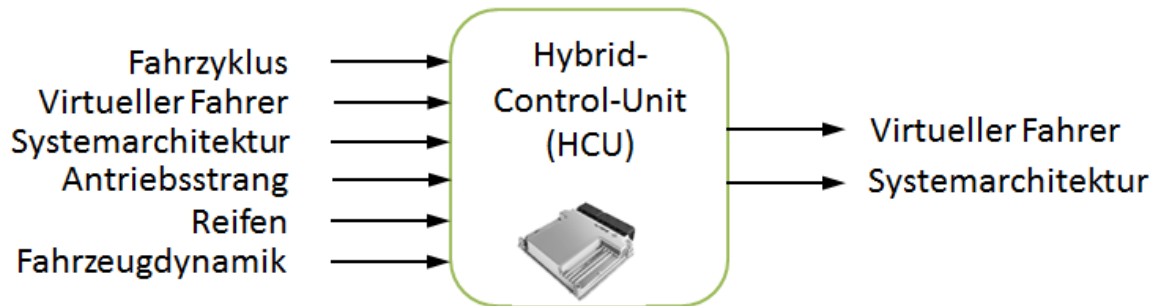


Abbildung 3.9: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge Hybrid-Control-Unit

3.2.3.4 Systemarchitektur

Die Systemarchitektur stellt alle Komponenten des Systems bzw. des Antriebsstrangs je nach Bedarf energetisch und physikalisch dar. Die vorhandenen Eingänge des Blocks sind wie die der HCU von allen anderen Teilkomponenten außer der Energiekalkulation besetzt. Die Ausgänge der Systemarchitektur werden der HCU und dem Antriebsstrang zur Verfügung gestellt. In Abbildung 3.10 erkennbar, sind die berücksichtigten Komponenten dargestellt, welche folgend kurz beschrieben werden. Ebenfalls sieht man die Verknüpfungen zu den Ein- und Ausgängen des System-Architektur-Blocks

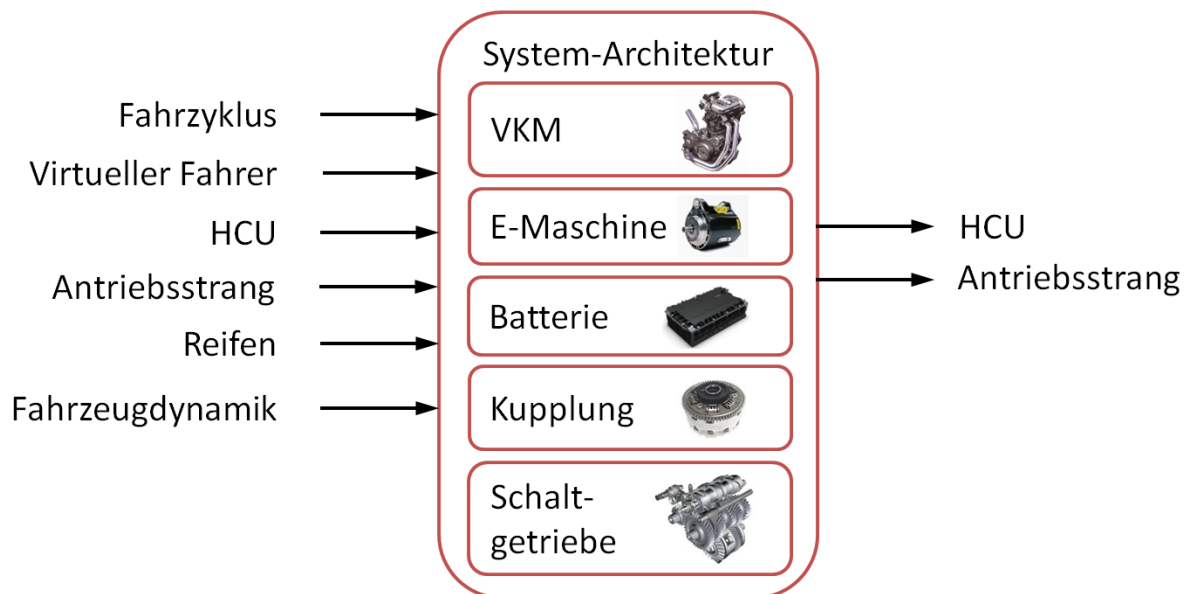


Abbildung 3.10: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge System-Architektur

3.2.3.4.1 VKM

Das VKM-Modul der Simulation ist ein kennfeldbasiertes Modell, bei dem das Sollmoment aus der HCU in ein tatsächliches Drehmoment umgewandelt wird. Definiert wird das Modell durch folgende Daten:

- Verbrauchskennfeld
- Volllastmomentkennlinie
- Schleppmomentkennlinie

3.2.3.4.2 E-Motor

Das Verhalten der E-Maschine, der Leistungselektronik und des dazugehörigen Steuergerätes wird durch das Modul „E-Motor“ dargestellt. Dabei sind folgende Daten charakterisierend:

- Dauervolllastkennlinie der E-Maschine
- Wirkungsgradkennfeld der E-Maschine
- Wirkungsgradkennfeld der Leistungselektronik

3.2.3.4.3 Batterie

Im Modul „Batterie“ wird die Logik der Batterie dargestellt, die ein Teil der System-Architektur ist. Folgende Größen werden hier berechnet und an den Datenbus weitergeleitet:

- Ladezustand (SOC)
- Klemmenspannung
- Verlustleistung

3.2.3.4.4 Kupplung

In der zu Grunde liegenden Simulation (Vorwärtssimulation) wird die Kupplung als vordefinierter Funktionsblock (SimDriveline) abgebildet. Die folgenden Zustände/Prozesse werden in diesem Modell berechnet:

- Öffnungsprozess
- Freilauf
- Unterschiedliche Schließprozesse
- Starten der VKM mittels EMA im Stillstand
- Losfahren mit der VKM
- Starten der VKM aus dem E-Modus heraus

Angesteuert wird die Kupplung durch die HCU. [12]

3.2.3.4.5 Schaltgetriebe

Ausgegangen wird von dem konventionellen 6-Gang-Schaltgetriebe der BMW F 800 GT und dessen Gang-Übersetzungen. In der Simulation werden die Schaltvorgänge durch ein Zeitverzögerungsglied und einer Logik, die einem semiautomatischen Getriebe folgt, dargestellt. Angesteuert wird der Schaltgetriebe-Block von der HCU, die ausgehend vom aktuellen Gang pro Zeitschritt nur einen Gang hoch oder hinunter schalten kann.

3.2.3.5 Antriebsstrang

Im Modul „Antriebsstrang“ erfolgt eine Starrkörpersimulation des Antriebsstrangs, bei dem alle wesentlichen rotatorischen Massen über den Drallsatz berücksichtigt werden. Dies geschieht unter der Verwendung einer zusätzlichen Bibliothek in Simulink namens „SimDriveline“, welche Blöcke zur Darstellung von Drehmomentquellen, Übersetzungen, rotatorische Massenträgheiten, Kupplungen, Getriebe und Sensoren für Drehzahl und Drehmoment zur Verfügung stellt. Eine Übersicht über die Ein- und Ausgänge bzw. deren Verknüpfungen zu den anderen Blöcken, ersichtlich in Abbildung 3.7, gibt Abbildung 3.11. Zu beachten ist dabei die Übergabe physikalischer Größen an den Reifen-Block, in der Abbildung durch eine punktierte Linie dargestellt

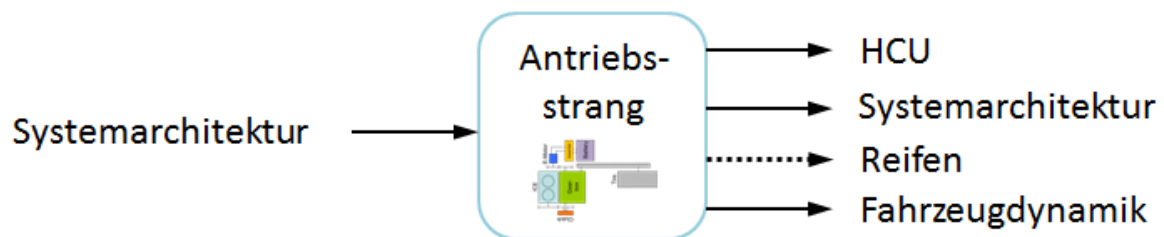


Abbildung 3.11: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge Antriebsstrang

3.2.3.6 Reifen

Die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn wird in der Simulation durch ein Längskraft-Schlupfmodell dargestellt. Auch hier wird ein Block aus der „SimDriveline“ herangezogen, welcher die übertragbare Längskraft, in Abhängigkeit des anliegenden Drehmomentes und der Drehzahl am Rad, der Radlast sowie der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit, berechnet. Für eine genauere Beschreibung wird auf die Hilfe-Funktion von MATLAB Simulink verwiesen. Einen Überblick über die Ein- und Ausgänge bzw. deren Verknüpfungen bietet Abbildung 3.12. Auch hier ist die Übergabe physikalischer Größen punktiert dargestellt.



Abbildung 3.12: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge Reifen

3.2.3.7 Fahrzeugdynamik

Der Fahrzeugdynamik-Block berechnet die Ist-Geschwindigkeit und die dynamische Achslastverlagerung des Fahrzeuges in Abhängigkeit der Fahrwiderstände und der Reifenlängskräfte. Die Reifenlängskräfte werden dabei vom Reifenmodell zur Verfügung gestellt. Die Fahrwiderstände werden berechnet, wobei nur der translatorische Beschleunigungswiderstand berücksichtigt wird. Der rotatorische Anteil des Beschleunigungswiderstandes wird bereits im Antriebsstrangmodell berechnet und von diesem beigesteuert. Die Achslastverteilung wird aus einem statischen Anteil, einem dynamischen Anteil und einem durch Luftkräfte bedingten Anteil berechnet. Ein grober Überblick über Ein- und Ausgänge des Fahrzeugdynamik-Blocks gibt Abbildung 3.13

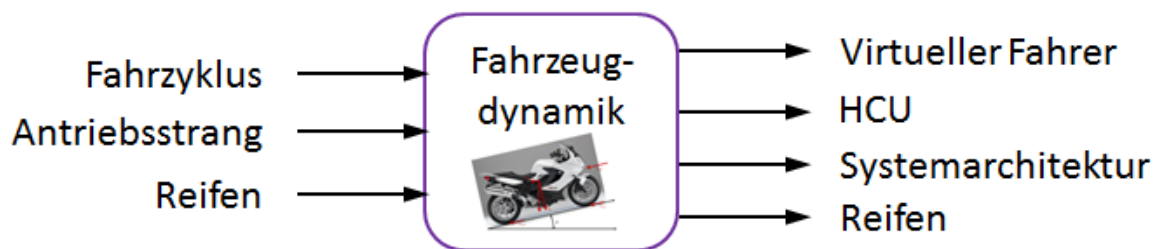


Abbildung 3.13: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge Fahrzeugdynamik

3.2.3.8 Energiekalkulation

Im Energiekalkulations-Block werden mit Hilfe relevanter Eingangsdaten verschiedene Energie- und Leistungsverläufe erstellt, die hauptsächlich zur Beurteilung bzw. Auswertung von Strategien und Zuständen dienen. Der Block dient somit nur als Ausgabeeinheit an den Matlab Workspace und greift selbst nicht in den Simulationsablauf ein. Betrachtet werden dabei folgende Größen und Komponenten:

- Kraftstoffverbrauch
- Verbrennungsmotor
- E-Maschine
- Batterie
- Summenbetrachtung

3.2.3.9 Darstellung der praktischen Durchführung einer Simulation

Das Ziel dieser Masterarbeit, die Entwicklung einer Methodik, die eine Übergabe des E-Maschinen-Moments auf die Prüfstandrolle über eine Steigungsvorgabe ermöglicht, verlangt bei der praktischen Umsetzung den Eingriff in die bestehende Berechnungs-Umgebung der LDS (ohne Auswirkungen auf die Berechnungsstruktur des Hybrid-Konzeptes!). Um spätere Methodik-Erklärung zu erleichtern wird hier kurz die Ausgangssituation der Berechnungsumgebung der LDS gezeigt, welche in Abbildung 3.14 gezeigt wird.

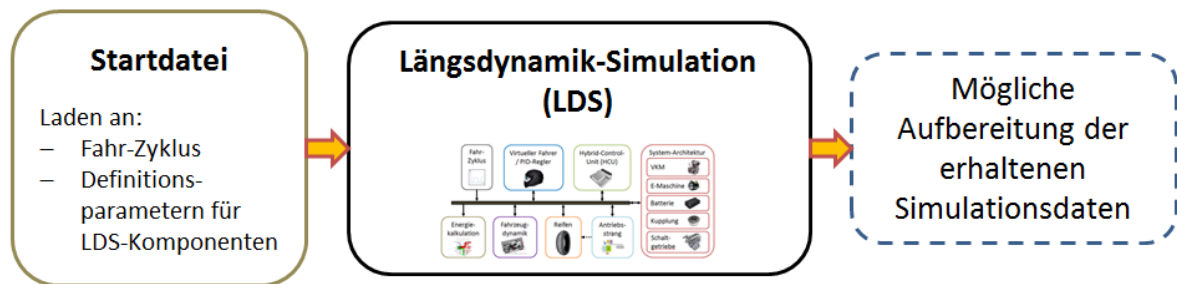


Abbildung 3.14: Vereinfachte Darstellung der Ablaufstruktur der zu Grunde liegenden LDS

Die verwendete „Start-Datei“ ist im Matlab-Umfeld realisiert. Sie definiert verschiedene Parameter und Vorgabevariablen für die „Längsdynamik-Simulation“. Zu diesen Größen zählen unter anderem der zu simulierende Fahrzyklus, verschiedene Kennfelder für Komponenten der LDS, sowie Stellparameter, mit deren Hilfe Simulationswege bzw. Strategieentscheidungen getroffen werden können.

Die darauf folgende „Längsdynamik-Simulation“, die im Umfeld von Simulink verwirklicht ist, greift auf die von der „Start-Datei“ im Workspace von Matlab definierten Parameter und Vorgaben zurück und simuliert den zu fahrenden Prüfzyklus. Die Ausgänge der Simulation werden wieder im Workspace abgelegt.

Anschließend können alle erhaltenen Daten aus der LDS mit Hilfe verschiedener Programme ausgewertet bzw. weiterverarbeitet werden.

3.2.4 Prüfstand

In diesem Kapitel wird nun der zur Verfügung stehende Rollenprüfstand näher erläutert. Dabei wird zuerst auf die vorhandene Aufbaustruktur und den für die in dieser Masterarbeit verwendeten Messaufbau eingegangen. Weiter werden noch die einzelnen Komponenten der Strukturen kurz erläutert. Für detailliertere Beschreibungen der einzelnen Komponenten wird in den jeweiligen Unterkapiteln auf eine Informations-Quelle verwiesen. Die dargestellten Messsysteme dienen vor allem der Anwendung der Methodik bzw. sind für die getätigten Messfahrten relevant sind. Auf diese Messungen wird folgend im Kapitel 4 eingegangen.

3.2.4.1 Struktur des Rollenprüfstands und der Messaufbauten

Die schematische Gesamtstruktur des Prüfstands mit den verwendeten Messsystemen wird in Abbildung 3.15 dargestellt. Der linke blau hinterlegte Teilbereich stellt dabei den Kontrollraum bzw. die Prüfwarte dar, der weiße Bereich den Prüfstand selbst. Betrachtet man die Grundelemente des gesamten Prüfstands erkennt man die Prüfstandrolle, mit allen dazugehörigen Steuerungen, die in der Abbildung grün und grau hinterlegt sind. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil sind die Abgas-Absaugungs- und -Messeinheiten, die durch die CVS-Anlage, die Beutelspeicher für die Homologations-Auswertungen und die AVL AMA i60 repräsentiert werden. Die verwendeten Messsysteme am Fahrzeug selbst sind in blau, rot sowie in orange dargestellt. In der Prüfstandswarte laufen die Informationen in dem Prüfstandkontrollprogramm Tornado zusammen.

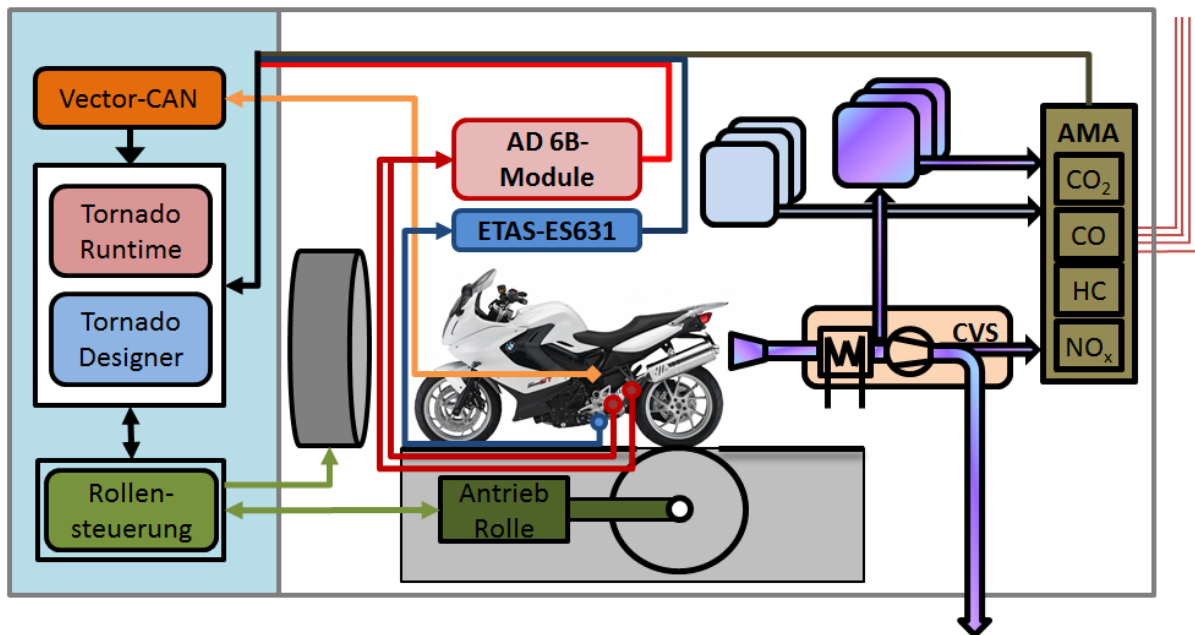


Abbildung 3.15: Schematische Struktur-Darstellung des Rollenprüfstandes und der verwendeten Messsysteme

3.2.4.2 Rollenprüfstand Zöllner AVL

Der Rollenprüfstand selbst ist von Zöllner AVL und ist grob in zwei Bereiche gegliedert. Einerseits ist dies die Rolle als Bauteil selbst, inkl. aller Antriebe, Bremsen und Steuereinheiten, sowie vorhandener Messeinrichtungen an den genannten Bestandteilen (in Abbildung 3.15 unter dem Motorrad grau hinterlegt und grün als „Antrieb Rolle“ definiert). Der zweite Block bildet die Rollensteuerung, die mit den Antriebseinheiten und der Prüfstandsteuerung kommuniziert (ebenfalls grün in der Prüfstandswarte). Eine weitere Verbindung der Rollensteuerung geht zum Fahrtwindgebläse, das vor dem Motorrad, grau hinterlegt, positioniert ist und somit von dort aus mitgesteuert wird.

3.2.4.2.1 Prüfstandrollen-Antrieb mit Brems- und Messeinrichtungen

Die vereinfachte Struktur der Prüfstandrolle mit ihrem Antrieb, der Bremseinrichtung und der verbauten Kraftmessung ist in Abbildung 3.16 dargestellt.

Der Antrieb beinhaltet dabei eine pendelnd gelagerte Gleichstrom-Maschine, die dazugehörige Leistungselektronik, eine mechanische Scheibenbremse und einen hochgenauen DMS-Aufnehmer, der über einen Hebelarm von der Gleichstrom-Maschine die Abstützung des Motors bildet. [15] Über die Kraftmessung des DMS-Aufnehmers kann somit über das Abstützmoment des Motors und das dazugehörige Momenten-Gleichgewicht auf die Tangentialkraft, die auf der Rolle auftritt, rückgeschlossen werden.

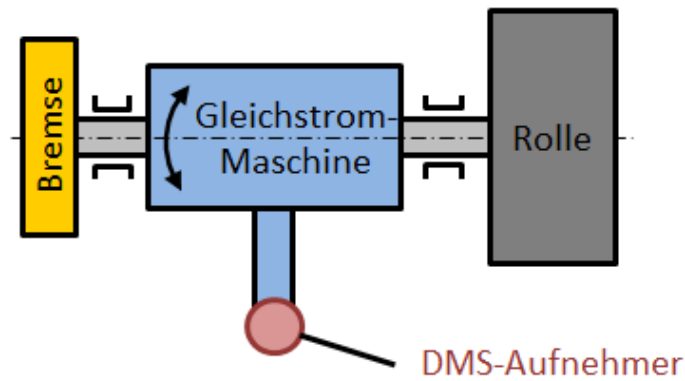


Abbildung 3.16: Vereinfachte Darstellung der Prüfstandrolle mit Antrieb, Bremse und Kraftmessung

3.2.4.2.2 Rollensteuerung

Die Rollensteuerung erfüllt die Aufgabe der Regelung des Rollenantriebs, der Verwaltung und Verarbeitung der erhaltenen Daten aus den verbauten Messsystemen der Rolleneinheit und auch sicherheitsrelevante Funktionen, die unter anderen auch die Bremsung der Rolle etc. verwalten. Neben den bereits erwähnten Verknüpfungen zur Rolleneinheit und zur Prüfstandsteuerung Tornado, regelt die Rollensteuerung auch das Fahrtwindgebläse, das sich vor dem Versuchsfahrzeug befindet. [15]

Die verwendete Steuerungssoftware ermöglicht dabei verschiedene Varianten der Antriebsgestaltung, die entweder nach konstanter Antriebskraft, konstanter Fahrgeschwindigkeit oder nach einer definierten Straßensimulation abläuft. In der Straßensimulation können dabei verschiedene Widerstandsparameter konstanter, linearer und nichtlinearer Natur vorgegeben werden. Auch die Vorgabe von Steigungen ist möglich, wodurch auch die Masse des Fahrzeuges definiert werden muss.

3.2.4.2.3 Fahrtwindgebläse

Das von der Rollensteuerung mitgesteuerte Fahrtwindgebläse stammt von WITT & SOHN, Typ P-N8L5/V1.5/900/GD/4, das bei einem maximalen Luftstrom von 48.000 m³/h eine maximale Fahrtwindgeschwindigkeit von 160 km/h erreicht und dabei +/1 10% von der Rollengeschwindigkeit abweichen kann. [15]

3.2.4.3 CVS-Anlage

Die am Rollenprüfstand vorhandene CVS-Anlage (Constant Volume Sampling) entstand im Zuge einer Diplomarbeit von Herrn Hans Knapp im Jahre 1990 [16]. Sie war ursprünglich als mobile Anlage ausgelegt, wurde aber im Zuge von Modernisierungen als fester Bestandteil der Prüfstandtechnik inkludiert. Neben anderen Teilen wurde im Zuge dieser Modernisierungen die Steuerung durch eine moderne SPS-Steuerung ersetzt und in die Prüfstandsteuerung eingebunden. [1]

Durch die getätigten Modernisierungen kann die Anlage als offenes oder geschlossenes System betrieben werden. In beiden Fällen wird der konstant abgesaugte Volumenstrom genutzt um die Beutelbefüllung (Homologationsauswertungen) und eine kontinuierliche Abgas-Analyse zu versorgen. Von der Anlage wird auch die Beutel-Analyse nach einer Homologationsfahrt ermöglicht, indem die Beutelinhalte der Analyse bereitgestellt werden. Auch die Reinigung und Evakuierung der Beutel und des Systems wird durch die Anlage sichergestellt. Für nähere Informationen wird auf die Masterarbeit [1] verwiesen.

3.2.4.4 AVL-AMA i60

Um eine Abgasanalyse des entnommenen verdünnten Abgases vornehmen zu können, ist das Analysegerät AVL AMA i60 D1 (1 stream diluted) am Prüfstand eingebunden. Abbildung 3.17 zeigt einen Beispiel-Messschrank. Das am Rollenprüfstand eingesetzte Gerät verfügt über Analysatoren zur Identifizierung folgender Komponenten:

- CO₂
- CO
- THC
- CH₄
- NO, NO_x



Abbildung 3.17: AVL AMA i60 [17]

Die möglichen Messbereiche der Analysatoren hängen von den zur Verfügung stehenden Kalibriergasen ab. Diese Kalibriergase werden bei dem verwendeten Rollenprüfstand über ein im Prüfstandgebäude integriertes, für alle Prüfstände zur Verfügung gestelltes, Gaselager bereitgestellt. Die momentane Auslegung ist für stark verdünnte Abgase gedacht, was sicherstellt, dass durch die sichere Lage des Taupunktes des verdünnten Abgases unter der Umgebungstemperatur, kein Wasser auskondensieren kann und die gemessenen Abgaskomponenten-Konzentrationen verfälscht. Für nähere Informationen über die Anlage bzw. deren Verhalten, insbesondere über das Kondensationsverhalten des zu analysierenden Gasgemisches, sei auf die Arbeit [1] und die Gerätebeschreibung der AVL AMA i60 [17] verwiesen.

3.2.4.5 Verwendete Messsysteme am Fahrzeug

Am Fahrzeug wurden einige Mess- und Auslese-Systeme verbaut, die folgend kurz dargestellt werden. Es ist zu erwähnen, dass der Kraftstoffverbrauch über die ausgelesenen CAN-Daten gemessen wird. Laut Rückschlüssen aus Veröffentlichung [18] fällt diese Auswertung ausreichend genau aus und verhindert ebenfalls einen möglichen Einfluss eines weiteren verbauten Kraftstoffmesssystems am Motorrad auf das Verhalten des Kraftstoffsystems.

3.2.4.5.1 Vector VN1630A

Zur Auslesung des CAN-Buses am Versuchsfahrzeug wurde das Lesegerät der Firma Vector Informatik GmbH des Typs VN1630A aus der VN1600 Interface Familie verwendet, wie es in Abbildung 3.18 gezeigt wird.



Abbildung 3.18: Vector VN1630A [19]

Die VN1600 Interface Familie stellt eine flexible und kosteneffiziente Lösung für CAN-, LIN-, K-Line- und J1708-Anwendungen dar. Eine ausgezeichnete Performance mit minimalen Latenzzeiten und hoher Zeitstempelgenauigkeit ist ebenso gewährleistet. Durch die Multi-Application-Funktionalität unterstützt die VN1600 Interface Familie den gleichzeitigen Betrieb von z. B. CANoe und CANape auf einem Kanal. Die Aufgaben reichen von einfachen Busanalysen über komplexe Restbussimulationen bis hin zu Diagnose-, Kalibrier- und Reprogrammieraufgaben oder auch LIN 2.1 Compliance-Tests. Auch eigene Applikationen können mit der XL Driver Library programmiert werden. [19]

Für weitere und detailliertere Informationen wird auf das Handbuch des Gerätes ([19]) verwiesen.

3.2.4.5.2 Temperatur-Sensorik

Die Messung der Temperaturen im Abgasstrang, einmal vor und einmal nach dem Katalysator findet durch eine Typ K-Messanordnung statt. Die verwendeten Thermoelemente auf NiCr-Ni-Basis verwenden den sogenannten Seebeck-Effekt, mit dessen Hilfe ein Potentialunterschied aufgrund einer vorhandenen Temperatur-Differenz ausgegeben wird. Da nur die Temperaturdifferenz gemessen werden kann, muss eine Referenztemperatur herangezogen werden, die sogenannte Kaltmessstelle. Im verwendeten Messsystem wird dies

durch eine elektronische Kaltstellenkompensation im Schaltkreis des Messgerätes ersetzt. Das Messsystem wird durch eine Zweipunkt-Kalibrierung linear kalibriert. [20]

Die Aufbereitung des erhaltenen Potentialunterschieds wird durch AD 6B-Module realisiert und danach durch die Prüfstandkontrollsoftware Tornado interpretiert.

3.2.4.5.3 ETAS ES631

Die Messung der Lambda-Werte im Abgasstrang des Versuchsfahrzeugs, nach dem Katalysator, wird durch das Lambda-Modul ES631.1 der Firma ETAS GmbH realisiert. Es gehört zur Familie der ES600-Module für den Fahrzeug- und Laboreinsatz. Es sind universelle Lambda-Präzisions-Messgeräte, die in Verbindung mit Lambdasonden Abgasmessungen bei Otto-, Diesel- und Gasmotoren ermöglichen. Abbildung 3.19 zeigt ein Beispiel der ES63x-Serie und die Rückseite des ES631.1.



Abbildung 3.19: Allgemeine Darstellung und Frontansicht ETAS ES63x.1 (beispielhaft das ES636.1) mit Rückansicht ETAS ES631.1 [21]

Das ES631.1 (zwei Kanäle) tastet den Pumpstrom ab und berechnet daraus den Sauerstoffgehalt im Abgas sowie die Werte und Kehrwerte der Größen Lambda und Luft-Kraftstoffverhältnis. Für die Umrechnungen können anwendungsspezifische Kennlinien hinterlegt werden. Der Algorithmus, den die ES63x-Module zur Regelung des Pumpstroms verwenden, kann sondenspezifisch angepasst werden. Die Module steuern und regeln unter anderem die Sondenheizung und überwachen die Sondentemperatur und den Innenwiderstand der Sonde. [21]

Für nähere Informationen über das Gerät bzw. das Messsystem wird auf das Betriebshandbuch von ETAS ([21]) verwiesen.

3.2.4.5.4 Ladezustandsregelung der Fahrzeugbatterie im Versuchsfahrzeug

Da im emulierten E-Betrieb auf der Prüfstandrolle der VKM des Versuchsfahrzeugs nicht gestartet wird und vor allem während der Methodik-Entwicklung oft und für lange Zeit im E-Betrieb gefahren wird, ist sicher zu stellen, dass die serienmäßig verbaute Batterie über die Zyklen nicht versagt. Gelöst wurde dies durch den Saito ProCharger XL der auch während einer Messfahrt die Batterieladung kontrolliert und gegebenenfalls lädt. Abbildung 3.20 zeigt das Gerät im montierten Zustand.



Abbildung 3.20: Foto Saito ProCharger XL mit der Batterieklemmung

3.2.4.6 KS Tornado

Bei der verwendeten Rollensteuerung des zur Verfügung stehenden Rollenprüfstands handelt es sich um die Software „Tornado“ der Firma Kristl, Seibt & Co. Verwendet wird die Version 3.3 mit dem Built 235.173.40.0. Im Zuge dieser Masterarbeit kann nicht auf den vollen Umfang der Einstellungsmöglichkeiten dieses Programms eingegangen werden. Es sollen jedoch einige für die Hybridemulation wichtige Parameter und Einstellungen dargestellt werden. Für detailliertere Informationen wird auf Unterlagen der Firma Kristl, Seibt & Co verwiesen.

Grundsätzlich sind für die Bedienung am Prüfstand zwei Programm-Teile relevant. Einerseits Tornado Designer und andererseits Tornado Runtime. Ersteres dient dabei zur Definition und Bereitstellung von Variablen, Prüfprogrammen, Berechnungen, Definitionen von Darstellungen, etc. Hier werden unter anderem auch die Parametertabellen geladen, die die Übergabevariablen aus der Simulation beinhalten und somit als Grundlage für die Bedienung der Messfahrt dienen. Auch werden hier nötige Treiber für die verwendeten Messsysteme und anderen Eingänge definiert und geladen. Tornado Runtime dient dann als Darstellungs- und Steuerungseinheit. Hier werden neben verschiedenen Befehlseinheiten der kooperierenden Programme und den eingehenden Messdaten, auch das Fahrerleitsystem für den Fahrer am Versuchsfahrzeug dargestellt.

3.2.4.6.1 Tornado Designer

Es folgt ein kurzer Überblick der für die Hybrid-Emulation relevanten Parameter, Vorgabemöglichkeiten und Befehle.

Variablen

Hier werden grundsätzlich alle in der Steuerung und Messdatenaufbereitung verwendeten Variablen definiert.

Befehlsprogramme

Hier können Befehle oder Befehlsprogramme definiert werden, die auf Anfrage abgearbeitet werden können. Diese Befehle werden meist an kooperierende Systeme geschickt, die dann diverse Vorgänge ausführen sollen

Fahrerleitsystem

Hier werden die Parameter definiert, die dem Fahrer dann während der Messfahrt graphisch aufbereitet angezeigt werden.

Messdatenspeicherformate

Hier wird definiert, welche Daten bzw. Parameter der Messdatenspeicherung beigefügt werden. Dies können grundsätzlich alle in Tornado Designer definierten Variablen sein, unabhängig ob es sich um systemeigene oder von kooperierenden Systemen importierten Daten handelt.

Parametertabelle

Unter diesem Reiter werden die Parametertabellen geladen, die als Bedatungsbasis von außen dient. Im Zuge der Hybrid-Emulation werden hier die Vorgabedaten von der LDS kommend für die definierten Fahrzyklen importiert.

Für die Hybrid-Emulation wurden dabei eigene Parametertabellen definiert, da neben den üblichen Variablen wie v-Verlauf inkl. Toleranzen und Gangverlauf, auch der VKM-Aktivierungszustand und die Steigungsvorgabe übergeben werden muss.

Prüfprogramm

Im Prüfprogramm wird der Ablauf einer Prüfung definiert, inkl. der Steuerung aller beteiligten Systemkomponenten des gesamten Prüfstands. Dieses Programm wird bei der Durchführung der Messung aufgerufen und abgearbeitet.

3.2.4.6.2 Tornado Runtime

Die Konfiguration von Tornado Runtime richtet sich grundsätzlich nach der Anforderung an die Messfahrten. Dementsprechend kann die Anzeige des Programms angepasst und verschiedenste Inhalte dargestellt werden. Zu erwähnen ist, dass in diesem Programm der Bereitschaftszustand der kooperierenden Systeme am Rollenprüfstand gesteuert werden kann bzw. dargestellt wird. Auch das Prüfprogramm selbst und damit auch meist das Fahrerleitsystem werden von hier aus gestartet und bei Gegebenheit auch wieder deaktiviert.



Abbildung 3.21: Konfiguration Tornado Runtime für die Hybrid-Emulation während einer Messfahrt.

Abbildung 3.21 zeigt die Konfiguration des Programms für die Hybrid-Emulation, während einer Messfahrt. Im oberen Bereich findet man die Kontrolleinheiten der Systempartner, im linken mittleren Bereich das laufende Prüfprogramm und über den rechten unteren Bereich das laufende Fahrerleitsystem, das auch dem Fahrer zur Verfügung steht.

3.3 Validierungen und Auswirkungen der Zieldefinitionen

Die zu Grunde liegende Simulation zieht zur Berechnung verschiedener Größen (wie Fahrwiderstände, mechanische Verluste etc.) vorab zu definierende Eingangsparameter heran. Diese Eingangsparameter können empirisch durch Messungen ermittelt werden, oder es kann auf Erfahrungs- oder Literaturwerte zurückgegriffen werden. Zur Absicherung der getroffenen Eingangsparameter muss die Simulation unter realen Bedingungen validiert werden. Je nach Zielsetzung der geplanten Untersuchungen kann diese Validierung durch unterschiedlich definierte Realbedingungen durchgeführt werden.

Im Zuge dieser Masterarbeit und der verwendeten LDS bestehen 2 Möglichkeiten an Realbedingungen, mit deren Hilfe die Simulation über eine Messfahrt validiert werden kann (in Abbildung 3.22 graphisch dargestellt):

a) Prüfstandrolle unter Verwendung von Homologationsparametern

In diesem Fall wird als Realzustand der Rollenprüfstand mit vorgegebenen Homologationsparametern und Umfeld-Bedingungen nach der Gesetzgebung gesehen auf dem die Messfahrt zur Simulationsvalidierung durchgeführt wird.

b) Straßenfahrt unter Umweltbedingungen

Hier wird der Realzustand über eine ausgewählte asphaltierte Straße unter auftretenden Umgebungsbedingungen definiert. Die hier erhaltenen Messdaten werden zur Validierung der Simulation herangezogen.

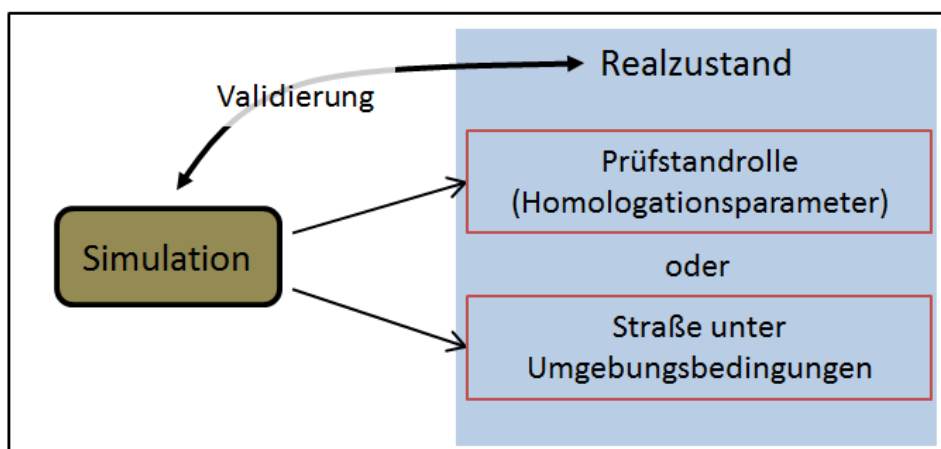


Abbildung 3.22: Validierungswege der verwendeten LDS

Je nach definiertem Realzustand werden im Zuge der Simulationsvalidierung die Eingangsparameter der Simulation so angepasst, dass die Resultate der Simulation mit den Ergebnissen aus den Messungen im Realzustand übereinstimmen. Als alternativer Validierungsweg zur Anpassung der Eingangsparameter, kann auch in die Berechnungsstruktur der Simulation eingegriffen werden und somit die Ergebnisse der Simulation angepasst werden. Diese beiden Validierungswege sind in Abbildung 3.23 dargestellt. Als Beispiel für den genannten alternativen Weg, wird eine Anpassung der ursprünglichen Widerstände durch einen nachgeschalteten zusätzlichen Anpassungsblock der Widerstände im oberen Teil der Abbildung gezeigt. Dadurch könnten die Eingangsparameter hinsichtlich der ursprünglichen Bedatung und der Validierungsanpassung getrennt werden.

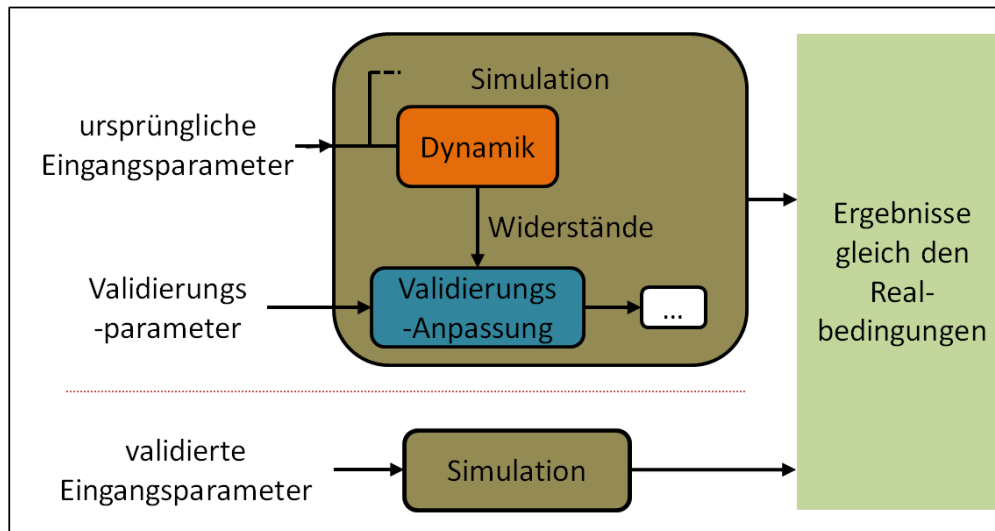


Abbildung 3.23: Möglichkeiten des Validierungseingriffs in die LDS

Als Randbedingungen der Zieldefinition dieser Masterarbeit wurde aber definiert, dass die Eingangsparameter und die Struktur der LDS nicht geändert werden dürfen. Einzig eine Anpassung der Parameter auf den Realzustand der Straße unter Umgebungsbedingungen wäre im erlaubten Rahmen, da die verwendeten Eingangsparameter der LDS diese Situation darstellen sollen. Ein weiterer Ansatz wäre bei Möglichkeit die Anpassung der Parameter im Realzustand, wie es grundsätzlich am Prüfstand möglich wäre. Dies würde aber ebenfalls der definierten Randbedingung dieser Masterarbeit widersprechen, die die Vorgabe der Homologationsparameter für den Rollenprüfstand fordert.

Die zu erarbeitende Anpassung der Steigungsvorgabe nach Abbildung 3.2 soll noch dazu so gestaltet werden, dass sie unabhängig von Validierungsanpassungen der Simulation funktioniert. Diesen Gesichtspunkten folgend wurde auf eine Validierung der LDS verzichtet und die gegebenen Daten bzw. Eingangsparameter für die Simulation herangezogen.

3.4 Definition und Aufbereitung der Ausgangsdaten der LDS für die Prüfstandsteuerung

Bevor nun auf die zu treffenden Anpassungen zwischen der LDS und dem Rollenprüfstand eingegangen wird, werden noch die nötigen Eingangsgrößen für die Emulation auf der Prüfstandrolle definiert. Vergleicht man diese mit den möglichen Ausgangsgrößen der LDS erhält man die grundlegende Zieldefinition der Aufbereitung für die Rolle.

3.4.1 Definition der benötigten Parameter für die Rollensteuerung

Die Prüfstandsteuerung, bzw. Software Tornado Designer wird mit Parametertabellen bedatet (siehe Kapitel 3.2.4.6), die die nötigen Eingangsgrößen zur Definition des Fahrzyklus-Verlaufs beinhalten. Die für eine Messfahrt im Zuge einer Hybrid-Emulation notwendigen Eingangsgrößen sind in Tabelle 3.1 aufgelistet, welche über die Parametertabelle (csv-Datei) übergeben werden.

Alle in Tabelle 3.1 aufgelisteten Variablen stehen auch dem Fahrerleitsystem des Prüfstands zur Verfügung. Die letzte Größe, der Steigungsverlauf zur Emulation der E-Maschine dient

zusätzlich als Antriebs- bzw. Verzögerungsvariable, der an die Rollensteuerung weiter gegeben wird. Vergleichen Sie dazu auch Abbildung 3.15, in dem die Prüfstandstruktur dargestellt ist. Als Ausgangsgrößen der LDS dienen die in Tabelle 3.2 aufgelisteten Parameter.

Parameter	Einheit
Zeit	Sekunden
Geschwindigkeitsvorgabe	km/h
Untere Toleranzgeschwindigkeit	km/h
Obere Toleranzgeschwindigkeit	km/h
Gangverlauf über den Fahrzyklus	-
Verlauf VKM-Zündung AUS/EIN	0/1
Steigungsverlauf zur E-Maschinen-Emulation	% Steigung

Tabelle 3.1: Eingangparameter für die Prüfstandsteuerung

Parameter	Einheit
Zeit	Sekunden
Geschwindigkeitsvorgabe	km/h
Gangverlauf über den Fahrzyklus	-
Kupplungszustand	0/1
Verlauf VKM-Zündung Ein/Aus	0/1
Verlauf E-Maschinen-Moment	Nm

Tabelle 3.2: Ausgangparameter der LDS für die Hybrid-Emulation

Diese Größen müssen teils speziell für Tornado aufbereitet werden, wobei hier auf die einzelnen Bereiche der folgenden Anpassungserklärungen verwiesen wird.

3.5 Hybrid-Emulation mit einfacher Berechnung der Steigungsvorgabe

Als erster Lösungsansatz wird hier die direkte Übergabe der aus der LDS erhaltenen Datenverläufe für einen definierten Fahrzyklus an die Prüfstandrolle gezeigt. Es wurden nur die Umwandlung des E-Maschinen-Moments in eine äquivalente Steigung vorgenommen und notwendige Aufbereitungen für die Parametertabelle des Prüfstands berücksichtigt. Der definierte Zyklus entspricht einer Variation an konstanten Geschwindigkeiten. Simuliert wurde eine rein elektrische Fahrt, um das Verhalten der Steigungsumsetzung auf der Rolle zu beobachten. Die erhaltenen Verläufe sind in Abbildung 3.24 dargestellt.

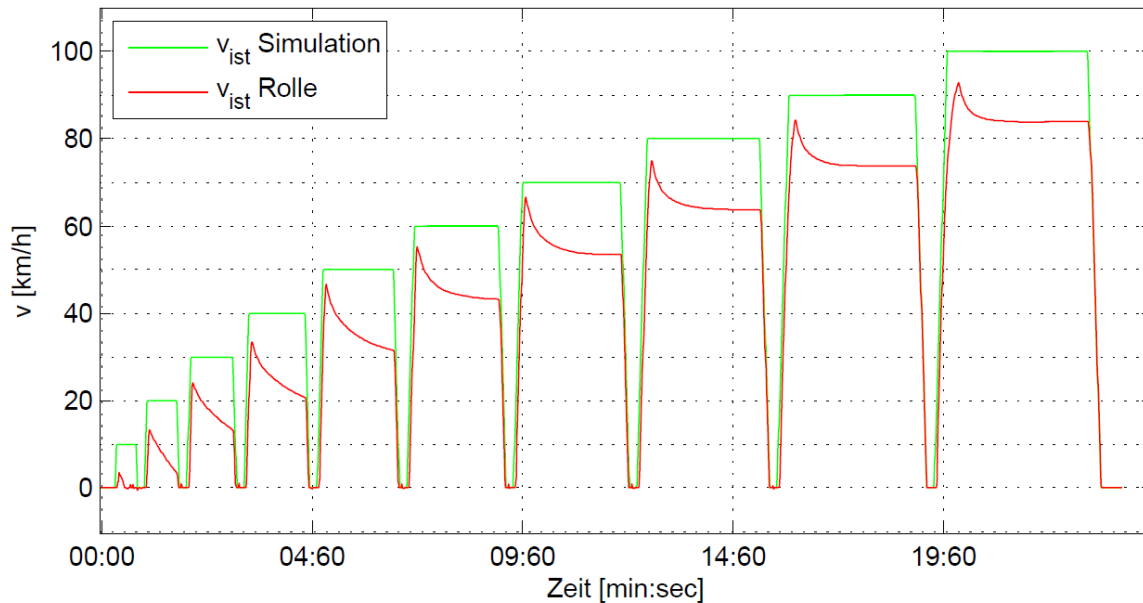


Abbildung 3.24: v-Differenz Soll-Vorgabe laut Simulation zu Ist-Zustand auf der Prüfstandrolle nach einfacher Steigungsvorgabe

Gut zu erkennen ist, dass der erreichte Ist-Zustand auf der Prüfstandrolle (durch den roten Verlauf dargestellt) nicht mit der Vorgabe aus der Simulation übereinstimmt (dargestellt durch den grünen Verlauf). Somit ist eine direkte Übertragbarkeit des Antriebsmomentes der E-Maschine aus der Simulation auf den Rollenprüfstand, emuliert durch die Steigungsänderung, mit den gegebenen Randbedingungen nicht realisierbar.

Betrachtet man den Verlauf des erreichten Ist-Zustandes in Abbildung 3.24, so wird bei geringen Geschwindigkeiten aufgrund der ersichtlichen zu geringen Dauer an konstant vorgegebener Geschwindigkeit kein stationärer Geschwindigkeitszustand erreicht. Betrachtet man die Differenzen des Ist-Zustandes zum Soll-Zustand am Ende der Phasen mit stationären Geschwindigkeiten, lässt sich jedoch trotzdem eine Tendenz erkennen. Bei einer stationären Geschwindigkeitsvorgabe von 100 km/h erreicht man auf der Prüfstandrolle rein elektrisch emuliert eine Ist-Geschwindigkeit im stationären Fall von gerundet 84 km/h, d.h. eine Differenz von annähernd 16 km/h. Am Ende der stationären Vorgabe von 20 km/h beträgt diese Differenz bei annähernd erreichten 4 km/h ebenfalls ca. 16 km/h, wobei hier noch keine stationäre Geschwindigkeit im Ist-Zustand erreicht wurde. Aufgrund des noch relativ steilen Verlaufs der Ist-Geschwindigkeit bei der 20 km/h-Vorgabe, lässt sich eine noch größere Differenz im stationären Fall erahnen. Somit ist tendenziell eine Differenzgeschwindigkeit in stationären Geschwindigkeitszuständen zu erkennen, die mit steigender Geschwindigkeit geringer wird. Die erarbeitete Methodik der Anpassungen zielt darauf ab, diese Differenzen zu korrigieren und eine Darstellung der Soll-Geschwindigkeiten im E-Betrieb bzw. durch die Emulation unterstützten Hybrid-Betrieb auf der Rolle zu erreichen.

3.6 Anpassungen der Prüfstandvorgaben für die Hybrid-Emulation

Es werden nun die getroffenen Anpassungen zur Realisierung der Hybrid-Emulation auf der Prüfstandrolle in einer allgemeinen Ablaufstruktur dargestellt und die einzelnen Bestandteile näher erläutert. Sie dient als Zielvorlage für die folgende Methodik, bzw. erleichtert die Erklärungen einzelner Methodik-Bestandteile.

Abbildung 3.25 zeigt den gesamten Weg an Übergabegrößen zum Rollenprüfstand stark vereinfacht. Ausgehend von einem definierten Fahrzyklus, wird in der LDS dieser Zyklus mit dem zu Grunde liegenden Hybridkonzept simuliert. Die erhaltenen Ausgangsgrößen der LDS, die durch den Bedarf an Eingangsgrößen für den Rollenprüfstand bzw. die Hybrid-Emulation auf der Rolle definiert sind, korrigiert und dem Rollenprüfstand zur Verfügung gestellt. Dies entspricht auch dem Verlauf in Abbildung 3.2 von der LDS auf den Prüfstand.



Abbildung 3.25: Vereinfachte Darstellung der grundlegenden Ablaufstruktur

Betrachtet man den Weg an Übergabegrößen etwas genauer, lässt sich die Struktur auf die in Abbildung 3.26 dargestellte Weise verfeinern. Um die LDS durchführen zu können müssen neben dem zu definierenden Fahrzyklus, wie in Abbildung 3.25 dargestellt, auch weitere Eingangsparameter zur Verfügung gestellt werden. Nach der Simulation werden die für den Rollenprüfstand zur Hybrid-Emulation benötigten Eingangsgrößen (wurden in Kapitel 3.4.1 bzw. Tabelle 3.1 erläutert) nach dem Schema in Abbildung 3.26 korrigiert bzw. modifiziert.

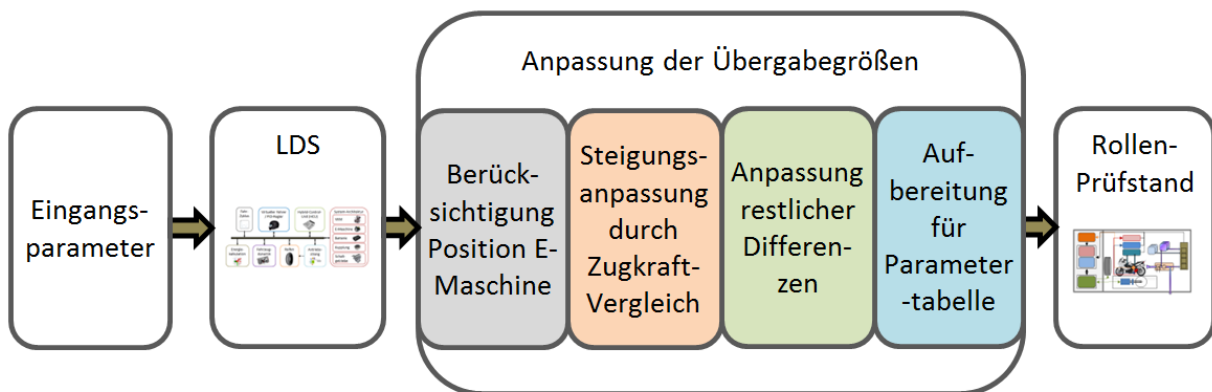


Abbildung 3.26: Genauere Darstellung der allgemeinen Ablaufstruktur

Geht man näher auf die Anpassung der Übergabegrößen in Abbildung 3.26 ein, lassen sich schon die einzelnen Anpassungsbestandteile nach Abbildung 3.27 erkennen. Die Eingänge der Anpassungen entsprechen den zuvor genannten LDS-Ausgängen für die Emulation und sind für den der LDS vorgegebenen Fahrzyklusverlauf über die Zeit definiert:

- E-Maschinen-Momentes ($M_{EMa}(t)$)
- Ist-Verlauf an Geschwindigkeit aus der Simulation ($v_{ist\ Sim}(t)$)
- Gangverlauf der in der Simulation realisiert wurde ($Gang_{ist\ Sim}(t)$)
- Verlauf der Kupplungsbetätigung laut Simulation ($Kupplung_{ist\ Sim}(t)$)
- Verlauf des Signals VKM-Zündung Ein/Aus, welches den VKM-Start und die VKM-Abstellung darstellt ($Zünd.\ Ein/Aus_{ist\ Sim}(t)$)

Die getätigten Anpassungen lassen sich grob in 4 Bereiche unterteilen, wobei nicht immer alle Eingangsgrößen der Anpassung angegriffen werden.

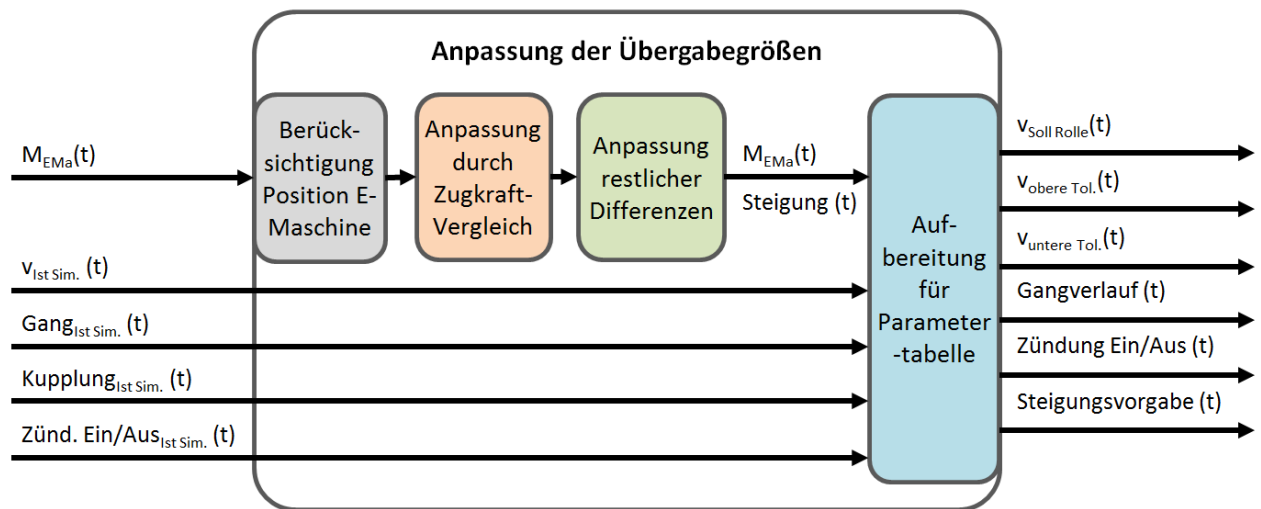


Abbildung 3.27: Allgemeine Darstellung der Anpassung an Übergabegrößen von der LDS an die Prüfstandrolle

3.6.1 Berücksichtigung der Position der E-Maschine im Antriebsstrang des Hybridkonzeptes und der Emulation über die Prüfstandrolle

Die Position der E-Maschine, wie sie in der Darstellung des Hybrid-Konzeptes in Abbildung 3.5 gezeigt wird, erlaubt keine direkte Umrechnung des E-Maschinen-Moments auf die Steigungsvorgabe für den Rollenprüfstand. Abbildung 3.24 zeigt die vorhandenen Übersetzungen durch das Getriebe und die Sekundärübersetzung bis zum Hinterrad, die mit dem Hinterradradius mit einbezogen werden müssen. Ebenfalls werden die in der Simulation verwendeten Wirkungsgrade des beteiligten Antriebsstrangs und der Schlupf am Hinterrad berücksichtigt. Der Schlupf muss auch berücksichtigt werden, da am Prüfstand das E-Maschinen-Moment über die Prüfstandrolle emuliert wird und damit der auftretende Schlupf kompensiert werden muss, um eine Ausgangsleistung am Getriebeeingang richtig darstellen zu können. Da der Schlupf in der LDS laufend berechnet wird, wird auf diesen zurückgegriffen.

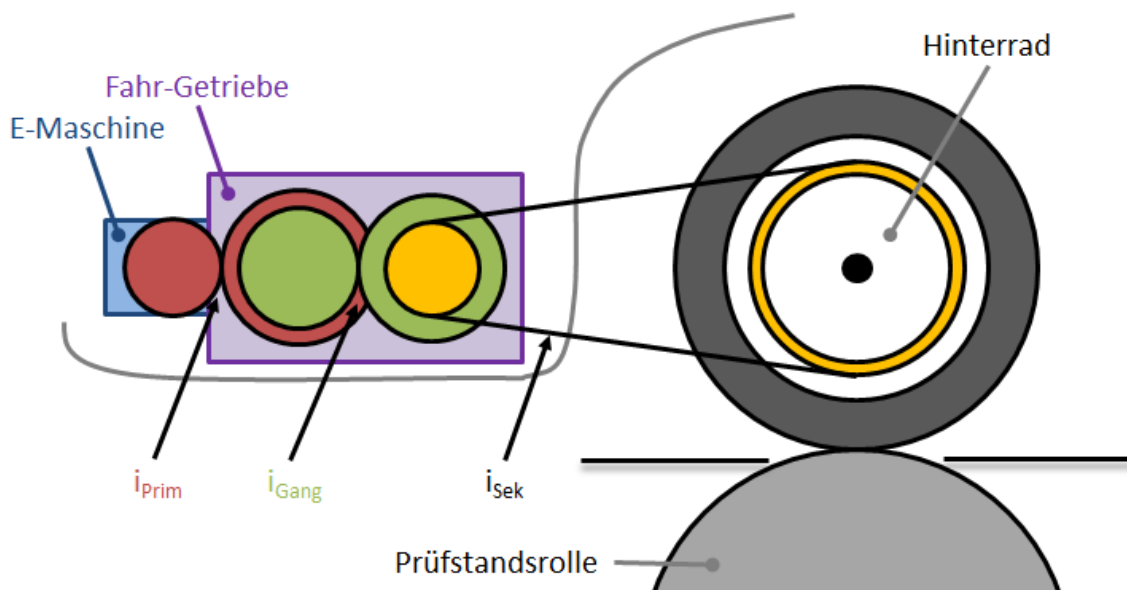


Abbildung 3.28: Vereinfachte Darstellung des Antriebsstrangs der E-Maschine auf die Prüfstandrolle

Folgende Übersetzungen werden, wie in Abbildung 3.28 dargestellt, berücksichtigt:

- Primärübersetzung der E-Maschine auf die Eingangswelle – $i_{\text{Prim,EMa}}$
- Übersetzungen der Getriebestufen – i_{Gang}
- Sekundärübersetzung des Getriebeausgangs auf das Hinterrad - i_{Sek}

Jede dieser Übersetzungen wird ein Wirkungsgrad von $\eta = 0,98$ zugewiesen, dessen Wert von der LDS übernommen wurde.

3.6.2 Anpassung durch Zugkraft-Vergleich

Einer der markanten Unterschiede zwischen der LDS und dem Rollenprüfstand ist die Berechnung bzw. Darstellung der Widerstände des Fahrzeuges. Die LDS berechnet diese auf Basis der in der Längsdynamik definierten Gleichungen, deren Verläufe über die Geschwindigkeit von den zu definierenden Eingangsparametern abhängen, wie in Kapitel 2.2.1 ersichtlich. Die Prüfstandrolle definiert die zu berücksichtigenden Widerstände nach der Homologationsgesetzgebung über konstante Parameter, die auf Basis der Masse des Fahrzeuges definiert wurden (nähere Informationen im Kapitel 2.1.3). Laut Zieldefinition dieser Masterarbeit darf die Berechnungsstruktur der Widerstände in der LDS, sowie die Eingangsparameter laut Homologationsgesetzgebung für den Rollenprüfstand nicht abgeändert werden. Dies lässt eine Differenz der Summe an Widerstandswerten über die Geschwindigkeit erahnen, der in den folgenden Unterkapiteln genauer erläutert wird. Die hier erläuterte Anpassung kompensiert auftretende Kraftunterschiede über die Geschwindigkeit bezüglich der beiden Betrachtungssituationen.

3.6.2.1 Widerstandsbetrachtung der Simulation

In der Simulation werden die Widerstände auf Basis längsdynamischer Betrachtungen berechnet. Die Herleitung der Widerstände ist in Kapitel 2.2.1 dargestellt, gleich wie die graphische Darstellung der dazugehörigen Basis (Abbildung 2.3). Die Simulation berücksichtigt somit folgende Widerstände:

- Luftwiderstand – F_L
- Rollwiderstand Vorderrad – $F_{R,V}$
- Rollwiderstand Hinterrad – $F_{R,H}$
- Steigungswiderstand – F_{St}
- Beschleunigungswiderstand - F_a

Da die in der Versuchsmatrix dieser Arbeit definierten Fahrzyklen alle in der Ebene, d.h. ohne Steigung im Wegverlauf stattfinden, wird die Kraft F_{St} keinen Beitrag zum Widerstand in der Simulation leisten. Für die weiteren Betrachtungen und Darstellungen wird F_{St} nicht berücksichtigt. Somit wird auch eine mögliche Verwechslung mit der auf der Rolle relevanten Antriebs- bzw. Verzögerungskraft vermieden. Grundsätzlich ist eine zyklenbedingte Steigungsvorgabe aber möglich, da diese der Emulationssteigung einfach aufsummiert wird. Betrachtet man nun den stationären Geschwindigkeitszustand (der die Beschleunigungskraft ausschließt), in dem laut Interpretation der Abbildung 3.24 die stärksten Unterschiede vermutet werden, lässt sich die Summe der Widerstände für das Hybrid-Konzept über v wie in Abbildung 3.29 darstellen (vgl. auch Kapitel 2.2.1). Diese Summe der Widerstände entspricht laut der Definition in der Längsdynamik der benötigten Zugkraft im jeweiligen stationären Geschwindigkeits-Zustand. Tabelle 3.3 listet dabei die verwendeten Parameter der Widerstandsberechnungen auf.

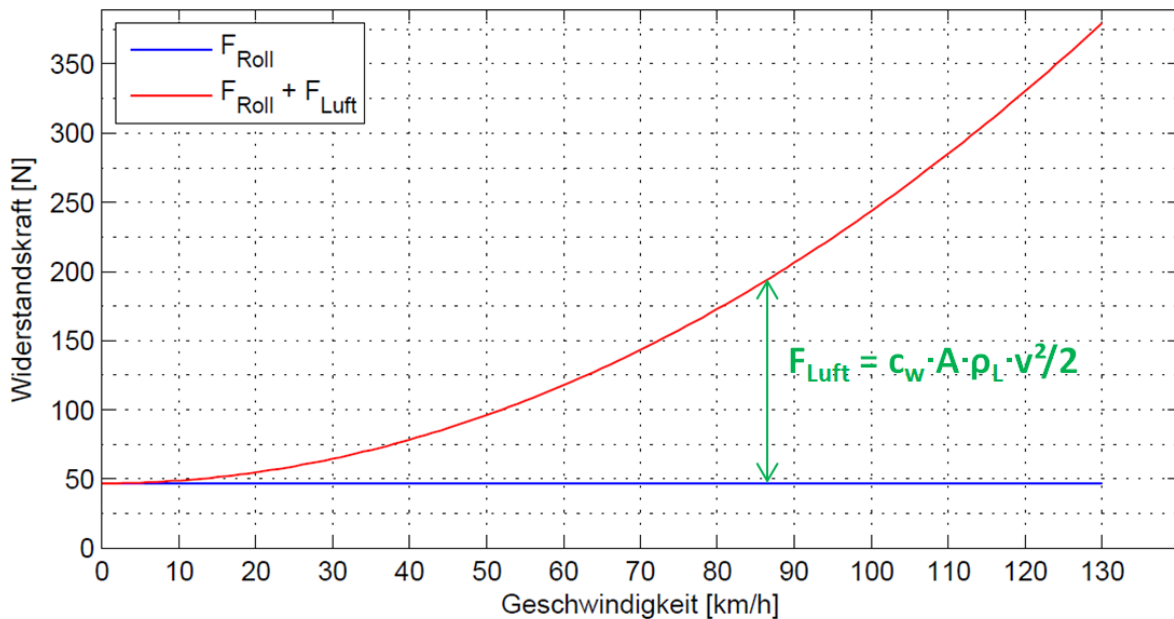


Abbildung 3.29: Widerstandskräfte über die stationäre Geschwindigkeit laut dem Einspurmodell der Längsdynamik

Parameter	Verwendete Größen in der LDS
Masse (m)	319 kg
Anzahl der Räder pro Achse (n)	1
Horizontaler Abstand des SP zur Vorderachse (a)	0,839 m
Horizontaler Abstand des SP zur Hinterachse (b)	0,681 m
Höhe des SP über dem Boden (h)	0,615 m
Frontale Anströmfläche · Luftwiderstandsbeiwert ($A \cdot c_w$)	0,425 m ²
Rollwiderstandsbeiwert Vorderachse (a_{rv})	0,015
Rollwiderstandsbeiwert Hinterachse (a_{rh})	0,015
Dichte der Luft (ρ_L)	1,2 kg/m ³

Tabelle 3.3: In der zugrunde liegenden LDS verwendete Parameter zur Widerstandsberechnung des Dynamik-Blocks

3.6.2.2 Widerstandsbetrachtung auf dem Rollenprüfstand

Auf dem Rollenprüfstand wird in der Rollensteuerung der Widerstand über Parameter definiert, die ein Polynom als Widerstandssumme über die Geschwindigkeit heranziehen. Diese Parameter werden über die Homologationsgesetzgebung definiert und sind von der Masse des Fahrzeuges abhängig. Nähere Informationen bezüglich der Gesetzgebung werden im Kapitel 2.1.3 dargestellt bzw. sind unter anderen in der Veröffentlichung [2] zu finden. Gehen wir nun vom zu Grunde liegenden Hybridkonzept aus, stellt Tabelle 3.4 nochmals die relevanten Parameter dar. Die Masse von 75 kg entspricht der laut Homologationsgesetzgebung definierten Fahrer Masse.

	Fahrzeugmasse + Fahrermasse = Referenzmasse [kg]	Äquivalente Trägheitsmasse [kg]	F0 [N]	F2 [N/(km/h) ²]
Serienfahrzeug	214 + 75 = 289	290	25,5	0,0244
Hybridfahrzeug	244 + 75 = 319	320	28,2	0,0248

Tabelle 3.4: Definierte Konstanten zur Widerstandsdarstellung laut Homologationsvorschrift für die Fahrzeugkategorie L

$$F_{Wst, Homol} = F_0 + F_2 \cdot v^2 \quad (20)$$

Die Widerstandskurve über v wird mit der Gleichung (20) dargestellt, wobei die Geschwindigkeit in km/h eingesetzt wird. Vom Hybridfahrzeug ausgehend, kann der in Abbildung 3.30 dargestellte Verlauf an benötigter Zug-Kraft zum Erreichen stationärer Geschwindigkeitszustände errechnet werden.

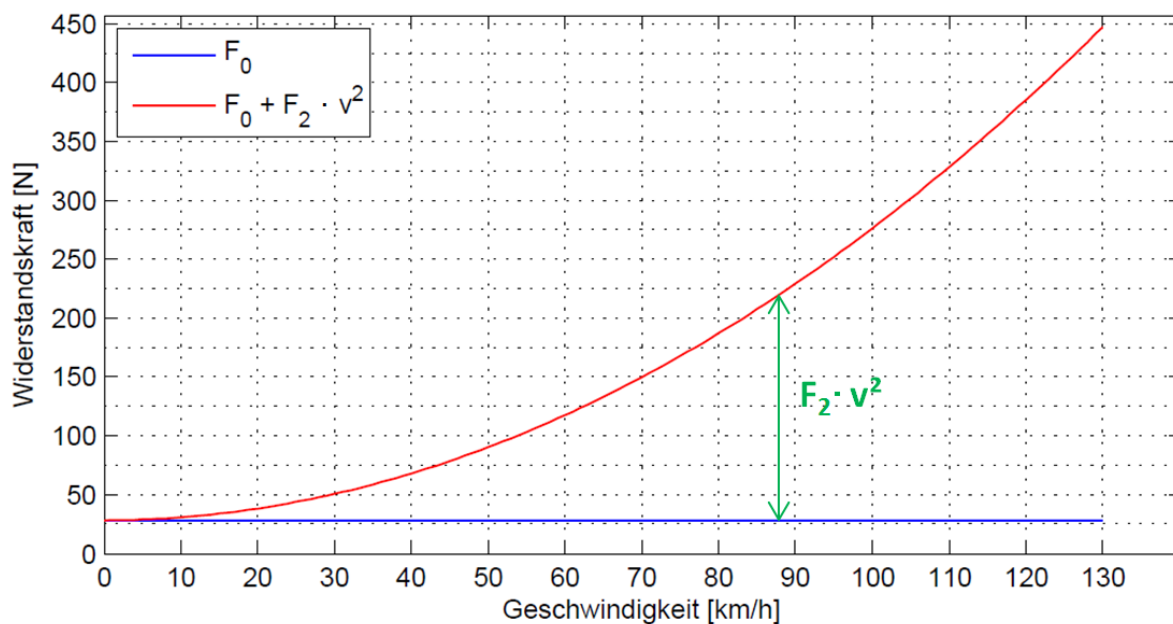


Abbildung 3.30: Widerstandskraft über die Geschwindigkeit laut Homologations-Vorschrift für das Hybrid-Konzept

3.6.2.3 Vergleich der Widerstandsbetrachtungen laut Simulation und laut Rollenprüfstand

Um annähernd gleiche fahrdynamische Voraussetzungen zwischen der LDS und dem Rollenprüfstand zu schaffen, müssen die Widerstandskräfte deckungsgleich verlaufen. Legt man nun die beiden Widerstandsbetrachtungen der Simulation und des Rollenprüfstands übereinander, ergibt sich die Situation in Abbildung 3.31.

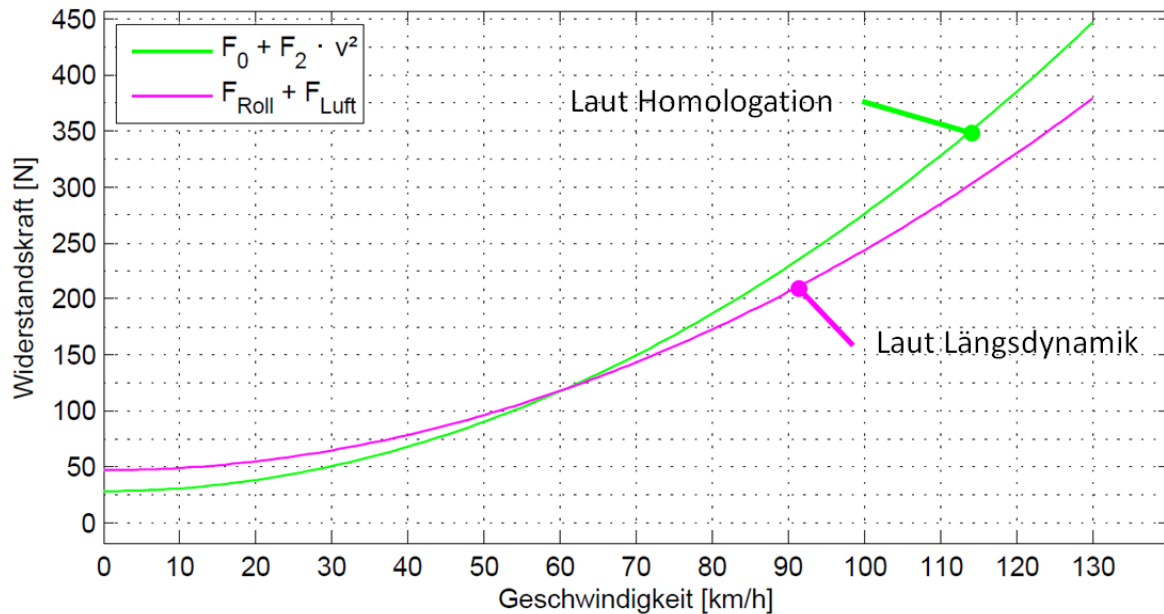


Abbildung 3.31: Vergleich der Widerstandskräfte laut der Homologationsgesetzgebung zur Berechnung nach dem Einspurmodell aus der Längsdynamik

Es ist zu erkennen, dass die Kurven nicht gleich verlaufen. Wie bereits erwähnt, dürfen laut der Zieldefinition dieser Masterarbeit, die Eingangs-Parameter der Simulation und der Prüfstandrolle auch hinsichtlich der Widerstände nicht direkt verändert werden. Somit müssen die aus der Simulation erhaltenen Antriebskräfte, dahingehend korrigiert werden, dass die Unterschiede im F_{Zug} -Vergleich in Abbildung 3.31 kompensiert werden.

3.6.2.4 Anpassung der Widerstandsdifferenzen über stationäre Geschwindigkeitszustände

Bei der Darstellung der Widerstände laut Homologation fällt auf, dass die Parameterdefinition über Bereiche an Referenzmassen eines Fahrzeuges definiert ist. Somit ist hier schon je nach realem Gewicht ein Fehler zu erwarten. Im Zuge dieser Masterarbeit wurde die in Abbildung 3.32 dargestellte Methodik zur Anpassung der F_{Zug} -Verläufe über stationäre Geschwindigkeiten erarbeitet.

Als erster Schritt muss der auftretende Widerstand am Hinterrad berücksichtigt werden, da dieser in der konstanten Widerstandsdefinition F_0 laut Gesetzgebung nicht berücksichtigt wird ([2]). Begründet wird dies, durch das reale Auftreten des Widerstands am Hinterrad beim Antrieb rein durch fahrzeugeigene Antriebsquellen. Somit muss dieser nicht als Widerstand auf der Rolle abgebildet werden. Passiert der Antrieb aber wie bei der Hybrid-Emulation durch die Prüfstandrolle, so muss der real auftretende Widerstand am Hinterrad kompensiert werden.

Wie in Abbildung 3.32 erkennbar, gibt es mehrere Möglichkeiten den Widerstand am Hinterrad zu ermitteln. Eine detaillierte Erklärung der einzelnen Varianten und deren mögliche Umsetzung in hinsichtlich dieser Masterarbeit wird eigens in Kapitel 3.6.2.5 gezeigt.

Rechnet man nun den Rollwiderstand des Hinterrads zur nötigen Zugkraft laut der Homologationsgesetzgebung bei stationären Geschwindigkeitszuständen hinzu, ergibt sich der in Abbildung 3.32 symbolisch dargestellte Zugkraft-Vergleich, unterhalb der Ermittlung des Widerstands am Hinterrad. Der nötige Antrieb über die Rolle wird somit um den zu überwindenden Rollwiderstand am Hinterrad erhöht. Nach dieser ersten Anpassung ist dennoch eine Differenz zwischen den beiden Verläufen erkennbar. Diese Differenz scheint wie in Abbildung 3.32 im untersten Zugkraftdiagramm ersichtlich von der Geschwindigkeit abzuhängen. Diese noch bestehende Differenz lässt mehrere Begründungen zu. Die Homologationsvorschrift ist grundsätzlich von der Fahrzeugmasse abhängig definiert worden. Dies gilt auch für den Parameter des quadratischen Widerstandsanteils F_2 , der somit für eine Vielzahl an Fahrzeugen gleich ausfällt.

Der Luftwiderstand nach Definition der Längsdynamik, in Formel (21) dargestellt, ist von zwei fahrzeugspezifischen konstanten Faktoren abhängig, die sich für einzelne Fahrzeuge stark unterschiedlich ausprägen können. Neben der projizierten Querschnittsfläche A des Fahrzeuges, ist vor allem der c_w -Wert von starken fahrzeugspezifischen Unterschieden behaftet, da sie die Aerodynamik des Fahrzeuges widerspiegelt. [9]

Somit lassen sich die Unterschiede im quadratischen Verlauf erklären.

$$F_L = A \cdot c_w \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (21)$$

Es wurde jedoch auch erkannt, dass die bestehende Differenz nicht rein quadratisch ist. $F(v)$ nach Abbildung 3.32 beinhaltet in der Konfiguration dieser Masterarbeit auch einen konstanten Anteil. Um aber einen vollständigen Angleich der Zugkraft-Verläufe zu erhalten, wird zur Anpassung der restlichen Zugkraft-Differenz die vollständige Differenz herangezogen und der von der LDS kalkulierten Antriebskraft aufgerechnet und somit ein vollständiger Angleich erreicht.

In Summe wird somit im Zuge der Zugkraft-Anpassung das Antriebsmoment bzw. die Antriebskraft der E-Maschine des Hybriden um den Widerstand am Hinterrad und um die restliche F_{Zug} -Differenz über v erhöht.

3.6.2.5 Ermittlung des Widerstands am Hinterrad

Die Ermittlung dieses Widerstands am Hinterrad kann auf verschiedene Varianten erfolgen, was stark von der zur Verfügung stehender Messtechnik bzw. Situation am Rollenprüfstand abhängt. Abbildung 3.32 zeigt dabei einige Varianten.

Vorab ist zu entscheiden, ob der Widerstand des Antriebsstrangs mit berücksichtigt werden soll, der real auf der Rolle mit hinein spielt. Der linke grüne Strang der Widerstandsermittlung am Hinterrad der Abbildung 3.32 geht von einem demontierten Sekundärriemen bei der Messung aus, berücksichtigt den Antriebsstrang somit nicht. Der rechte rote Strang inkludiert den Antriebsstrang durch einen montierten Sekundärriemen. Die Rollwiderstandsermittlung selbst erlaubt mehrere Varianten, die folgend kurz dargestellt werden sollen. Möglich sind die Ermittlung durch einen Ausrollversuch auf dem Rollenprüfstand, die Ermittlung des Widerstands durch die auf den auf der Rolle verbauten DMS-Aufnehmer oder es wird der Widerstand aus der LDS herangezogen, der theoretisch nach den Gesetzen der Längsdynamik berechnet wird.

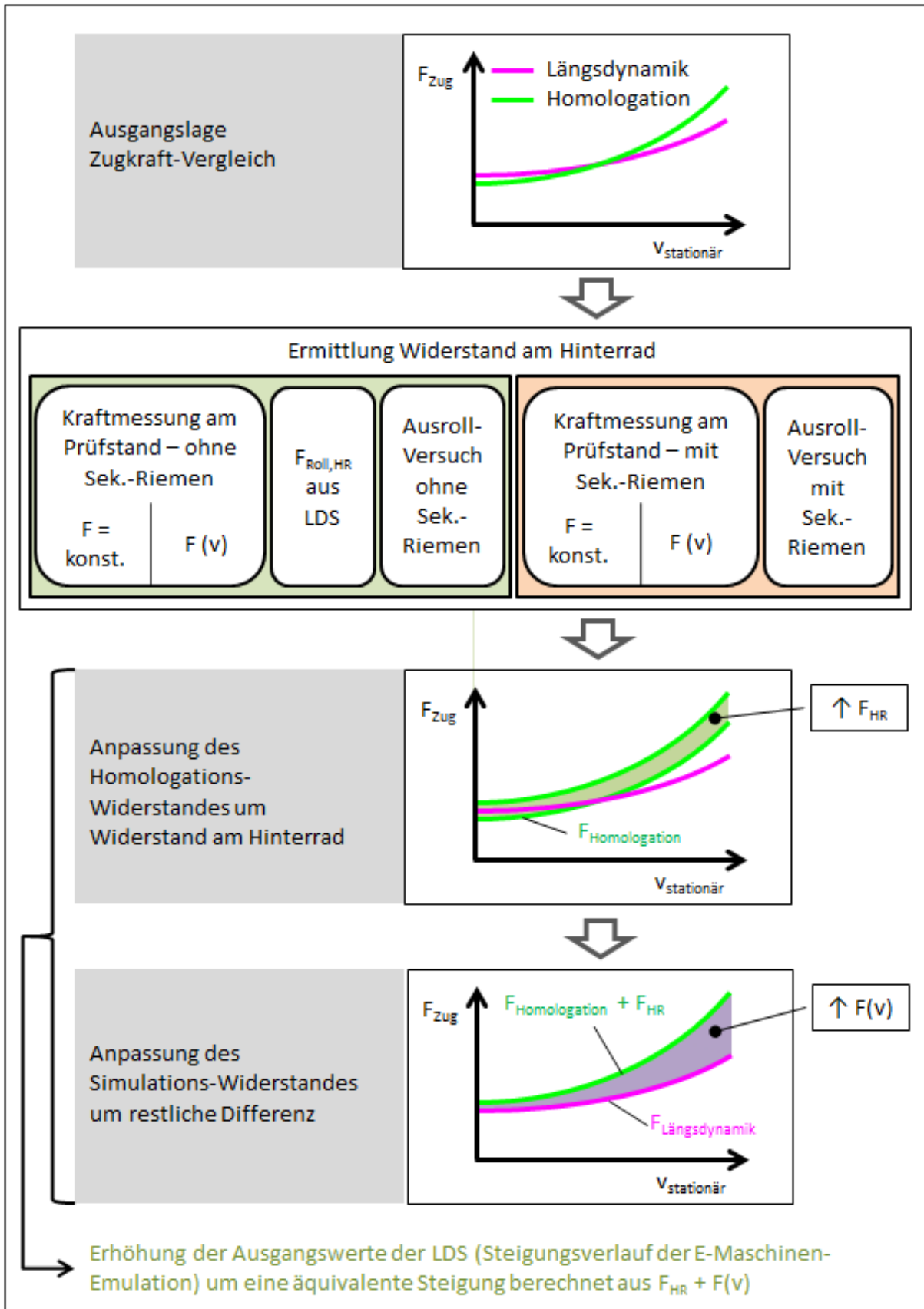


Abbildung 3.32: Methodik zur Zugkraft-Anpassung zwischen LDS und Homologationsgesetzgebung

3.6.2.5.1 Findung des Widerstands am Hinterrad durch vorhandenen DMS-Aufnehmer am Rollenprüfstand:

Die Darstellung der Widerstände auf der Rolle wird durch die pendelnd gelagerte E-Maschine der Prüfstandrolle realisiert und über den Rollenkörper auf den Reifen übertragen. Im reinen E-Betrieb der Hybrid-Emulation wird nun auch der Antrieb des Fahrzeuges rein durch die E-Maschine des Rollenprüfstands realisiert. Betrachtet werden nun der stationäre Geschwindigkeitszustand und alle auftretenden Kräfte für die gefahrene Geschwindigkeit, die im Gleichgewicht liegen. Die Antriebskraft und die laut Homologationsgesetzgebung definierten Zustände werden über die E-Maschine geregelt, was zu einer verbleibenden Kraft des Widerstandes am Hinterrad führt, der am Rad selbst effektiv auftritt, wie es in Abbildung 3.33 gezeigt ist. Diese Kraft wird über die pendelnde Lagerung des E-Maschinen-Rollen-Strangs am Hebelarm der E-Maschine abgestützt und kann über den DMS-Aufnehmer gemessen werden. Somit lässt sich auf die Widerstandskraft am Hinterrad rückschließen welche durch die Rollensteuerung berechnet und über die Prüfstandsteuerung ausgegeben wird.

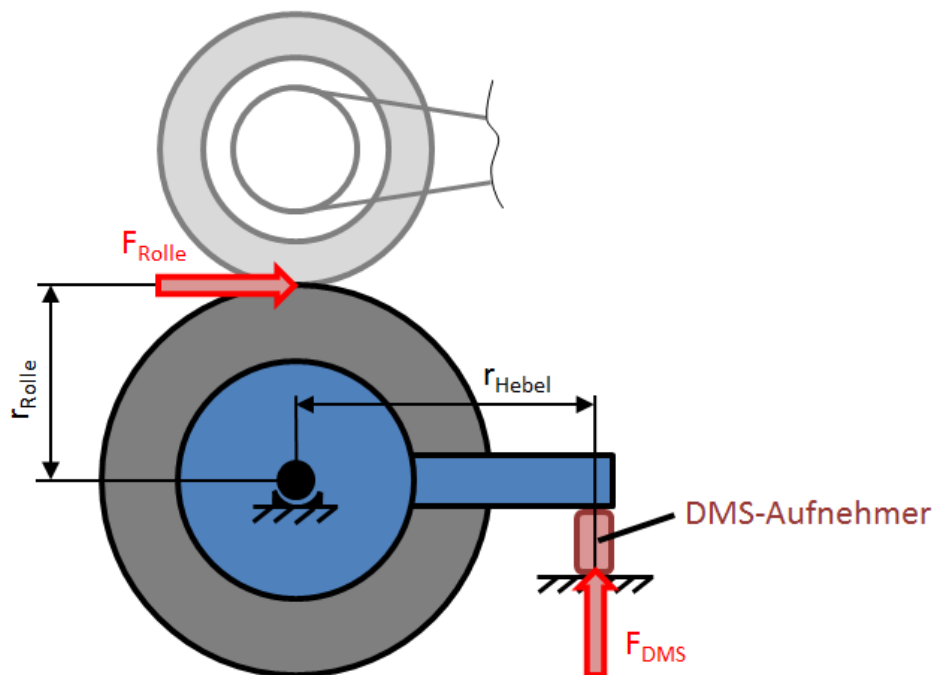


Abbildung 3.33: Vereinfachte Darstellung der auftretenden Kräfte aus dem Abstützmoment des Antriebs auf der Rolle im stationär bewegten Zustand.

Im Zuge der Emulationsentwicklung konnten einige Effekte hinsichtlich der erhaltenen Werte vom DMS-Aufnehmer erkannt werden. Bei der Vorgabe einer konstanten Geschwindigkeit im reinen emulierten E-Betrieb (Antrieb durch Steigungsvorgabe für die Prüfstandrolle) schwanken die von der Rollensteuerung erhaltenen Werte für F_{Rolle} um bis zu 4 km/h um einen Mittelwert. Diese Mittelwerte für verschiedene stationäre Geschwindigkeiten (weiter F_{KMD} genannt) schwanken ebenfalls um bis zu 7 km/h bei gleicher Geschwindigkeit über verschiedene Messungen. Tabelle 3.5 zeigt für je 2 Messungsbeispiele die gemittelten Werte F_{KMD} über verschiedene stationäre Geschwindigkeiten. Dabei wurde der Sekundärriemen des Fahrzeuges bei 2 gezeigten Messungen demontiert. Nun ist zu klären, ob diese Schwankungen von der Prüfstandrolle bzw. dem DMS-Aufnehmer kommen, oder durch das montierte Fahrzeug verursacht werden. Hierfür wurde dem Rollenprüfstand unter gleichen

Widerstandsparametern wie in den Messungen der Tabelle 3.5 bei nicht montiertem Fahrzeug ein konstantes Gefälle vorgegeben. Die für 3 Messungen erhaltenen Ergebnisse vom mittleren Wert des DMS-Aufnehmers bei stationären Geschwindigkeiten wird in Tabelle 3.6 aufgelistet. Dabei ist zu erkennen, dass die Kräfte nur max. 2,55 % voneinander abweichen. Somit sind die Differenzen aus Tabelle 3.5 im Fahrzeug zu finden. Dies lässt sich jedoch darin begründen, dass unterschiedliche Betriebszustände der beteiligten Komponenten des Fahrzeuges durchaus eine Schwankung des Widerstands zulassen. Betroffen sind der hintere Reifen, der Riemen des Sekundärtriebs, die Getriebeausgangs- und Getriebeeingangswelle. Die Kupplung zur VKM ist geöffnet, jedoch entstehen durch das beinhaltete Öl je nach Betriebstemperatur leichte Scherkräfte, die ebenfalls einen leichten Einfluss haben können. Auch im Getriebe befindet sich Öl, dessen Betriebstemperatur eine veränderte Viskosität hervorruft. Da die VKM in dieser Phase der Datenermittlung nicht gestartet wird, kann eine Aufwärmphase bis zum Betriebszustand einige Zeit in Anspruch nehmen.

Stationäre Geschwindigkeit [km/h]		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
F_{KMD} [N] ohne Riemen	Messung 1	30	34	35	37	37	37	37	37	37	37	36	36	36
	Messung 2	25	29	30	31	31	31	32	32	32	33	33	33	33
F_{KMD} [N] mit Riemen	Messung 1	50	49	50	52	52	52	51	50	49	51	50	-	-
	Messung 2	58	56	57	59	60	58	57	56	57	57	56	-	-

Tabelle 3.5: Mittelwerte des DMS-Aufnehmers bei montiertem und nichtmontiertem Sekundärriemen des Versuchsfahrzeugs für stationäre Geschwindigkeiten über je 2 Messungen.

Nach der Darstellung in Abbildung 3.33 müsste bei fehlendem Fahrzeug die resultierende Kraft F_{Rolle} 0 N betragen. Hier ist laut den erhaltenen Messwerten für stationäre Geschwindigkeiten ein Offset ersichtlich. Die Auswirkungen dieses Offset werden in Kapitel 4.4 kurz diskutiert.

Gefällevorgabe [%]		1	1,5	2	3	4	5
Messung 1	Resultierende Geschwindigkeit [km/h]	29,7	39,1	46,5	58,5	68,5	77,1
	Mittelwert F_{KMD} [N]	18,8	19,2	19,4	19	18,9	19,1
Messung 2	Resultierende Geschwindigkeit [km/h]	29,9	39,3	46,7	58,7	68,6	77,2
	Mittelwert F_{KMD} [N]	18,8	19,1	19,1	19,1	19,2	19,6
Messung 3	Resultierende Geschwindigkeit [km/h]	29,9	39,3	46,7	58,7	68,8	77,2
	Mittelwert F_{KMD} [N]	19	19,6	19,4	19,4	19,3	19,5

Tabelle 3.6: Mittelwerte des DMS-Aufnehmers für stationäre Geschwindigkeiten nach Gefällevorgabe ohne Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand

Aufgrund der bestehenden Möglichkeit an Schwankungen der Werte wurde die Ermittlung des Widerstands am Hinterrad durch diesen Ansatz vorerst nicht weiter verfolgt.

3.6.2.5.2 Ermittlung des Widerstands am Hinterrad durch einen Ausrollversuch auf dem Rollenprüfstand:

In Kapitel 2.2.2 wurde bereits die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Widerstände aus einem Ausrollversuch am Rollenprüfstand erläutert. Die grundlegende Gleichung (Formel (14)) wird folgend nochmals dargestellt. In Tabelle 3.7 werden die verwendeten Variablen inkl. deren Werte aufgelistet.

Variable	Beschreibung	Wert des Versuchsfahrzeugs
F_0	Parameter für konstanten Anteil am Widerstand laut Homologationsgesetzgebung	28,2 N
F_2	Parameter für den quadratisch von der Geschwindigkeit abhängigen Anteil am Widerstand laut Homologationsgesetzgebung	$0,0248 \text{ N} \frac{\text{h}^2}{\text{km}^2}$
$m_{\text{äquiv}}$	Äquivalente Masse des Hybrid-Konzeptes nach der Homologationsgesetzgebung	320 kg

Tabelle 3.7: Zur Auswertung des Ausrollversuches herangezogene Variablen

Der zusätzlich auftretende Widerstand $F_{W_{HR}}$ entspricht dabei dem real auftretenden Widerstand am Hinterrad, inkl. der Widerstände des beteiligten Antriebsstrangs.

$$m_{\text{äquiv}} \cdot \frac{\Delta v(t)}{\Delta t} = F_0 + F_2 \cdot v_{[\text{km/h}]}^2(t) + F_{W_{HR}}(t)$$

$F_{W_{HR}}$ wird dabei von t abhängig ermittelt, und kann durch $v(t)$ auf die Geschwindigkeit umgelegt werden. Der Widerstand kann weiter auch als Konstante über v durch Mittelung über v oder v -Bereiche definiert werden.

3.6.2.5.3 Fazit:

Fasst man die Methoden der Widerstandsermittlung am Hinterrad zusammen und berücksichtigt man die auftretenden Effekte bzw. Probleme, kommen nun für diese Masterarbeit nur mehr folgende Varianten in Frage:

- Verwendung des berechneten Rollwiderstands am Hinterrad laut LDS
- Ermittlung des Rollwiderstands durch einen Ausrollversuch
 - ohne montiertem Sekundärriemen des Versuchsfahrzeug-Antriebsstrangs
 - mit montiertem Sekundärriemen des Versuchsfahrzeug-Antriebsstrangs

Für die realisierte Methodik wurde die Ermittlung aus einem Ausrollversuch mit montiertem Sekundärriemen herangezogen.

3.6.3 Anpassung der restlichen Differenzen

Nach Anwendung der ersten beiden Anpassungsblöcke nach Abbildung 3.27 ist ein weiterer Anpassungsschritt nötig, der noch bestehende Geschwindigkeitsdifferenzen im stationären Geschwindigkeitszustand im E-Betrieb der Hybrid-Emulation auf dem Rollenprüfstand ausgleicht. Die Differenzen können dabei positiv oder negativ ausfallen. Die Anpassung basiert auf der Findung des nötigen Differenzmoments um die resultierenden stationären Differenzgeschwindigkeiten auszugleichen. Gleichung (22) bis (24) zeigen die Grundlage der Anpassung. Begonnen wird mit der allgemeinen Darstellung eines Differenzmomentes und dessen Bezug auf die Kraftdifferenzen auf der Rolle:

$$\Delta M_{Korr} = M_{Soll} - M_{Ist} = F_{Zug,Soll} \cdot r_{Rolle} - F_{Zug,Ist} \cdot r_{Rolle} \quad (22)$$

Der Radius der Prüfstandrolle r_{Rolle} beträgt 0,254 m. Die Zugkraft auf der Rolle ist laut der Homologationsgesetzgebung eingestellt und ist laut Formel (1) aus Kapitel 2.1.3 definiert. Setzt man nun diese Widerstände für F_{Zug} ein, erhält man die Gleichung (23) bzw. zusammengefasst die Gleichung (24), wobei hier die Geschwindigkeiten v_{Soll} und v_{Ist} in km/h definiert sind.

$$\Delta M_{Korr} = (F_0 + F_2 \cdot v_{Soll}^2) \cdot r_{Rolle} - (F_0 + F_2 \cdot v_{Ist}^2) \cdot r_{Rolle} \quad (23)$$

$$\Delta M_{Korr} = r_{Rolle} \cdot F_2 \cdot (v_{Soll}^2 - v_{Ist}^2) \quad (24)$$

Bei der praktischen Durchführung dieser Anpassung, reichten diese nicht immer zur vollständigen Kompensation der Differenzgeschwindigkeit im stationären Geschwindigkeitszustand zwischen der Vorgabe und dem Ist-Zustand auf der Rolle aus. Die Gründe dieses Verhaltens konnten im Zuge dieser Masterarbeit nicht mehr gefunden werden.

Dem folgend wurde vereinfacht eine zweiphasige Anpassungsfolge erarbeitet, die die Differenzminimierung verbessert. Der Ablauf ist in Abbildung 3.34 dargestellt. Als erster Schritt bzw. in der ersten Phase werden aufgrund einer Messfahrt mit stationären Geschwindigkeitszuständen die resultierenden Differenzgeschwindigkeiten Δv_1 ermittelt. Auf Basis dessen wird nach Formel (24) das erste Anpassungsmoment bzw. weiter die äquivalente Steigung-Anpassung ermittelt. Eine zweite Versuchsfahrt bildet die Grundlage für die zweite Phase. Treten hier wieder nennenswerte Geschwindigkeitsdifferenzen auf, wird das erhaltene Δv_2 herangezogen um das Δv_1 der ersten Phase zu korrigieren. Das nun finale Δv dient als Basis für die finale Anpassung nach Formel (24).

Sollten nach der ersten Phase die Differenzen ausreichend klein ausfallen, kann auf die zweite Phase verzichtet werden und direkt die Anpassung durchgeführt werden. Zum besseren Verständnis folgt ein Beispiel: Beträgt Δv_1 bei einer definierten stationären Soll-Geschwindigkeit 10 km/h und Δv_2 nach der zweiten Messfahrt bei der gleichen stationären Soll-Geschwindigkeit 2,3 km/h, so beträgt das finale Δv 12,3 km/h. Genauso kann dies aber auch bei einem negativen Δv_2 angewandt werden. So beträgt das Δv bei einem Δv_2 von -2,3 km/h final 7,7 km/h.

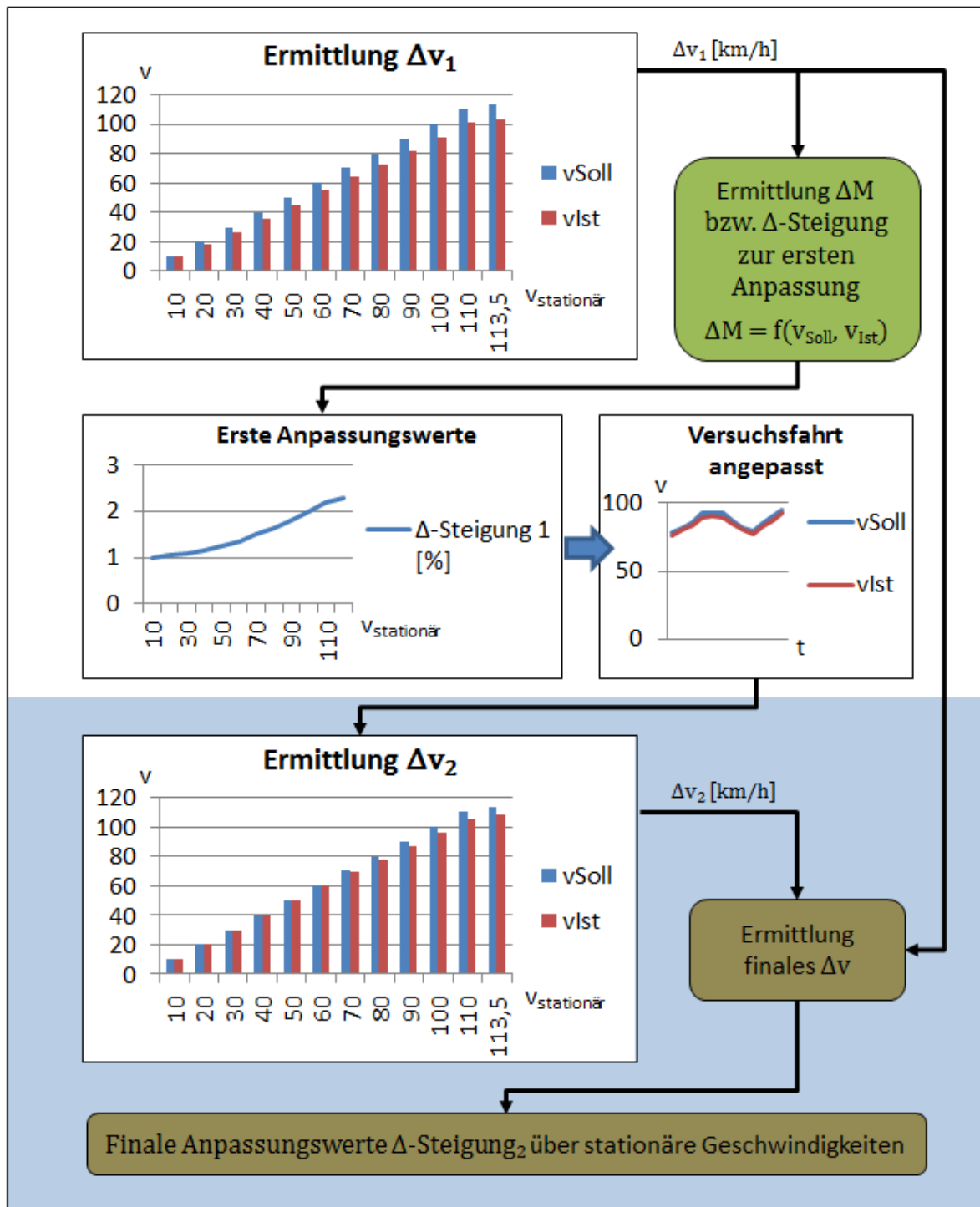


Abbildung 3.34: Vereinfachte Darstellung des Anpassungs-Prozesses aufgrund resultierender Differenzgeschwindigkeiten.

3.6.4 Aufbereitung für die Parametertabelle

Der letzte Anpassungsblock in Abbildung 3.27 betrifft die Aufbereitung der Daten für den Prüfstand bzw. für die Parametertabellen (Tornado), mit deren Hilfe die Daten übergeben werden. Dieser Block lässt sich grundsätzlich unterteilen in

- nötige Anpassungen zur Realisierung der Emulation auf der Prüfstandrolle
- Anpassungen zur Erhaltung bzw. Erhöhung der Fahrbarkeit in den Versuchsfahrten

3.6.4.1 Nötige Anpassungen zur Realisierung der Emulation am Prüfstand

Es folgen nötige Anpassungen der Übergabedaten hinsichtlich einer realisierbaren Kommunikation von Prüfstandkomponenten und einer definierten Nomenklatur des Fahrerleitsystems

3.6.4.1.1 Kommunikation zwischen Prüfstandsteuerung und Rollensteuerung

Die gegebene hardware- und softwaretechnische Situation am zur Verfügung stehenden 2-Rad-Rollenprüfstand (strukturell dargestellt in Abbildung 3.15), bedingt einen Engpass in der Datenübertragung zwischen der Prüfstandsteuerung (Tornado) und Rollensteuerung. Dieser Engpass ist durch eine begrenzte Datenübertragungsrate max. 2 Hz definiert.

Bei einer Homologationsfahrt auf reiner VKM-Basis reicht diese Übertragungsrate vollkommen aus. Bei der Hybrid-Emulation werden jedoch im Sekundentakt Steigungswerte an die Rollensteuerung übergeben und auch von dieser an die Prüfstandsteuerung rückgemeldet. Somit entsteht ein Potential der Übertragungsüberlastung, die bei falscher Handhabung zu einem erheblichen Datenstau führen kann und somit starke Verzögerungen in der Realisierung der Steigungsvorgabe verursacht. Selbst ein Abbruch der Steigungsvorgabe ist nicht mehr zeitgetreu möglich, da der Abbruchbefehl selbst nicht gleich übertragen werden kann. Dieses Potential der Überlastung ist von einigen Faktoren abhängig, auf die teilweise Einfluss genommen werden kann:

1. Von der Übertragung anderer Befehle als zur Steigungsvorgabe, die unabhängig von der Steigungsvorgabe und parallel zu dieser übertragen werden.
2. Von der Senderate des Befehls an die Rollensteuerung, die von der Prüfstandsteuerung generiert wird.
3. Von der Datengröße der übertragenen Befehle

Punkt 1 ist nicht direkt beeinflussbar und Punkt 2 ist über eine passende Einstellung der Variablenweitergabe in Tornado an die Rollensteuerung kontrollierbar. Punkt 3 kann durch die hier erläuterten Anpassungen der Aufbereitungen für die Parametertabelle realisiert werden. Ziel dabei ist es die Datenmenge pro Befehl klein zu halten, was durch eine Rundung der Steigungswerte auf eine Kommastelle umgesetzt wird.

In der LDS wird die Steigung auf mehrere Kommastellen genau berechnet, was aber in der Umsetzung auf der Prüfstandrolle nicht erforderlich ist. Begründet wird dies teils in der langen Strecke der Übergabegröße von der LDS bis hin zur E-Maschine des Rollenprüfstands und den hier auftretenden Verzögerungen.

3.6.4.1.2 Umbenennung der Gangvorgaben für das Fahrerleitsystem

Aufgrund der Hybrid-Emulation bzw. des zu Grunde liegenden Hybridkonzeptes, wie es in Kapitel 3.2.2.1 dargestellt ist, können verschiedene Kombinationen zwischen offener und geschlossener Kupplung mit der möglichen Gangwahl auftreten.

Das Fahrerleitsystem der Prüfstandsteuerung (Tornado), in der zur Verfügung stehenden Version, bietet hier einige Möglichkeiten der Darstellung, die das Folgen für den Fahrer am Prüfstand erleichtern. Tabelle 3.8 zeigt dabei die für die Hybrid-Emulation relevanten Kombinationsmöglichkeiten.

Nummerischer Code	Anzeige im Fahrerleitsystem	Bedeutung
0	L	Kein Gang eingelegt
1	1	1. Gang, geschlossene Kupplung
2	2	2. Gang, geschlossene Kupplung
3	3	3. Gang, geschlossene Kupplung
4	4	4. Gang, geschlossene Kupplung
5	5	5. Gang, geschlossene Kupplung
6	6	6. Gang, geschlossene Kupplung
-1	K1	1. Gang, geöffnete Kupplung
-2	K2	2. Gang, geöffnete Kupplung
-3	K3	3. Gang, geöffnete Kupplung
-4	K4	4. Gang, geöffnete Kupplung
-5	K5	5. Gang, geöffnete Kupplung
-6	K6	6. Gang, geöffnete Kupplung
104	K	Kein Gang eingelegt, geöffnete Kupplung
-104	K	Kein Gang eingelegt, geöffnete Kupplung

Tabelle 3.8: Möglichkeiten der Ganganzeige im Fahrerleitsystem von Tornado (Version 3.3)
[22]

Demensprechend müssen die Gang- und Kupplungsvorgaben für die Parametertabellen umgeschrieben werden. Tabelle 3.9 zeigt in den ersten beiden Zeilen die Eingangswerte dieser Anpassung und in der letzten Zeile die resultierenden Ausgaben für die Parametertabelle.

Gang	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Kupplungszustand	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
Vorgabe Fahrerleitsystem	-1	-2	-3	-4	-5	-6	1	2	3	4	5	6

Tabelle 3.9: Umwandlungsvorgabe der Gangzahl und des Kupplungszustandes für das Fahrerleitsystem

3.6.4.2 Anpassungen auf Fahrbarkeit

Da in der Simulation große Sprünge mancher Größen-Verläufe leichter durchführbar sind (z.B. Gang-Verlauf, oder das Ein-/Ausschalten der VKM), da sie von einer automatisierten Hybrid-Konzeption ausgeht, auf der Prüfstandrolle aber in rein VKM-betriebenes Serienfahrzeug zum Einsatz kommt, muss vor der Realisierung auf der Prüfstandrolle sichergestellt werden, dass den Vorgaben aus der LDS durch den Fahrer am

Versuchsfahrzeug gefolgt werden kann. Dementsprechend sind einige Anpassungsfiler notwendig. Ebenfalls müssen Eigenheiten der Prüfstandrolle hinsichtlich der Emulations-Realisierung berücksichtigt werden, die auf die Fahrbarkeit der Zyklus-Vorgabe Einfluss haben.

3.6.4.2.1 Abänderung möglicher sprunghafter höherzahliger Gangwechsel zur Verbesserung der Fahrbarkeit

Eine automatisierte Schaltvorrichtung eines realisierten Hybridmotorrades, das von der HCU angesteuert wird, lässt ein höheres Potential bezüglich geringer Schaltzeiten und höherer Gangzahlen die in kürzerer Zeit geschaltet werden können vermuten. Im Zuge der Emulation werden die Gangwechsel jedoch durch den Fahrer realisiert.

Die Anpassung lässt einen maximal einfachen Gangwechsel pro Sekunden-Schritt zu und gleicht die folgenden Verläufe bestmöglich der Vorgabe an. Abbildung 3.35 zeigt ein Bsp. Aus den realisierten Versuchen.

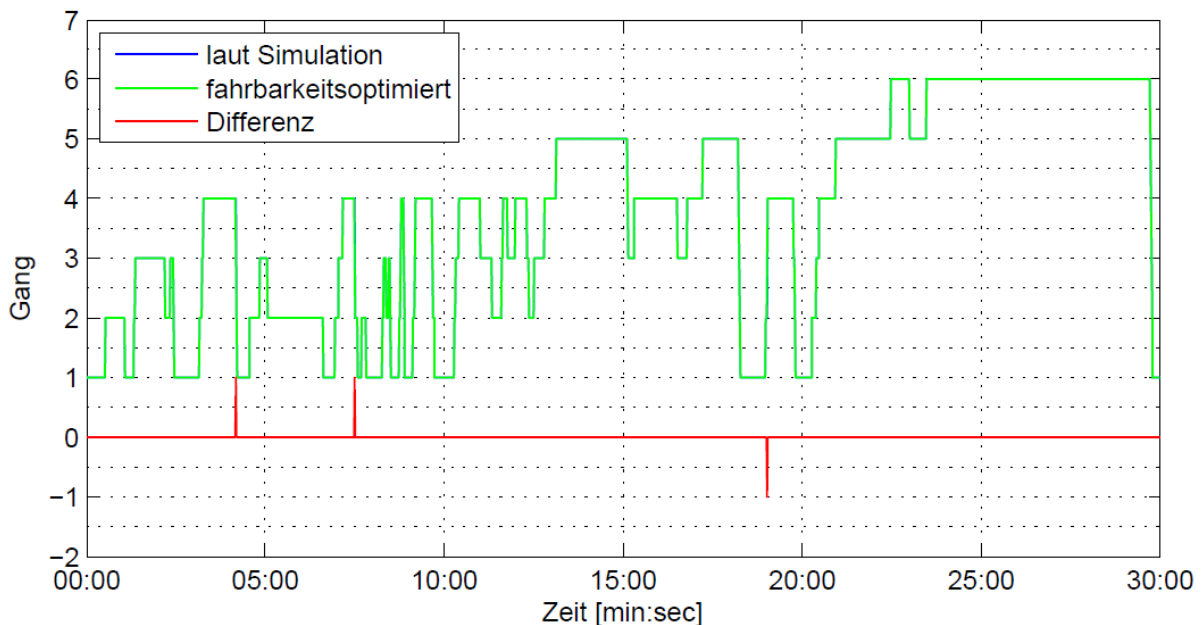


Abbildung 3.35: Gangverlauf laut Simulation und fahrbarkeitsoptimiert über gesamten rein elektrischen WMTC

Das Beispiel zeigt drei Anpassungs-Stellen, deren Eingriff eine Differenz von einem Gang für je eine Sekunde verursacht. Die Eingriffshäufigkeit hängt stark von der Simulations-Reife hinsichtlich der Realitätsnähe ab.

3.6.4.2.2 Abänderung möglicher nicht realisierbarer Änderungen des VKM-Zündung Ein/Aus-Signals

Betrachtet man das Startverhalten des Verbrennungsmotors hinsichtlich der Leistung des zur Verfügung stehenden Startermotors, lässt die in dieser Arbeit zugrunde liegende Hybridauslegung mit ihrem 10 kW E-Motor ein höheres Startpotential als ein Startermotor

des serienmäßigen Versuchsfahrzeuges vermuten. Dieses höhere Startpotential lässt kürzere Startzeiten voraussetzen. Ebenfalls spielt hier die Automatisierung des Vorgangs in einem Hybrid-Fahrzeug im Vergleich zur Emulation mit einem rein VKM-betriebenen Fahrzeug eine Rolle. Hier muss das Hochfahren des Bordcomputers nach jedem Kill des Motors hinsichtlich der erneuten Startbereitschaft berücksichtigt werden.

Die Summe dieser Betrachtungen lässt eine Abänderung des Signals der VKM-Zündung Ein/Aus veranlassen. Dabei werden alle Verlaufs-Änderungen, die kürzer als 4 Sekunden dauern herausgenommen.

Auch nimmt das Signal Zündung Ein/Aus Einfluss auf den Kupplungszustand, da im Hybridkonzept beim Starten der VKM die Kupplung geschlossen werden muss. Bei der Emulation bleibt die Kupplung dabei offen.

3.6.4.2.3 Anfahrtsverzögerungen bei rein elektrisch emulierter Beschleunigung

Wird rein elektrisch weggefahren, d.h. nicht die VKM des Versuchsfahrzeuges verwendet, ist eine Anpassung hinsichtlich einer auftretenden Anfahrtsverzögerung auf der Prüfstandrolle nötig. Der Effekt ist in Abbildung 3.36 auf der linken Seite dargestellt und verursacht in der darauffolgenden Beschleunigungsphase ein Abkappen der durch die Gefällevorgabe zur Verfügung gestellten Beschleunigungsleistung und einen zu späten Beschleunigungsbeginn, was zu große Geschwindigkeitsdifferenzen führt.

Korrigiert wird dies durch das Vorhalten eines kleinen Gefälles mit kontinuierlich steigendem Betrag vor der eigentlichen Anfahrtsrampe, wie es in Abbildung 3.36 auf der rechten Seite gezeigt wird. Realisiert wurde ein 3-sekündiges Vorhalten des Gefälles von 1%, 1.5% und 2% (blaue Kurve in Abbildung 3.36). Wichtig ist auch, dass die darauffolgenden Werte des Gefälles nicht mehr unter dem des letzten Wertes der Anfahrtsrampe liegen (2%), was zu einer erneuten Verzögerung führen würde.

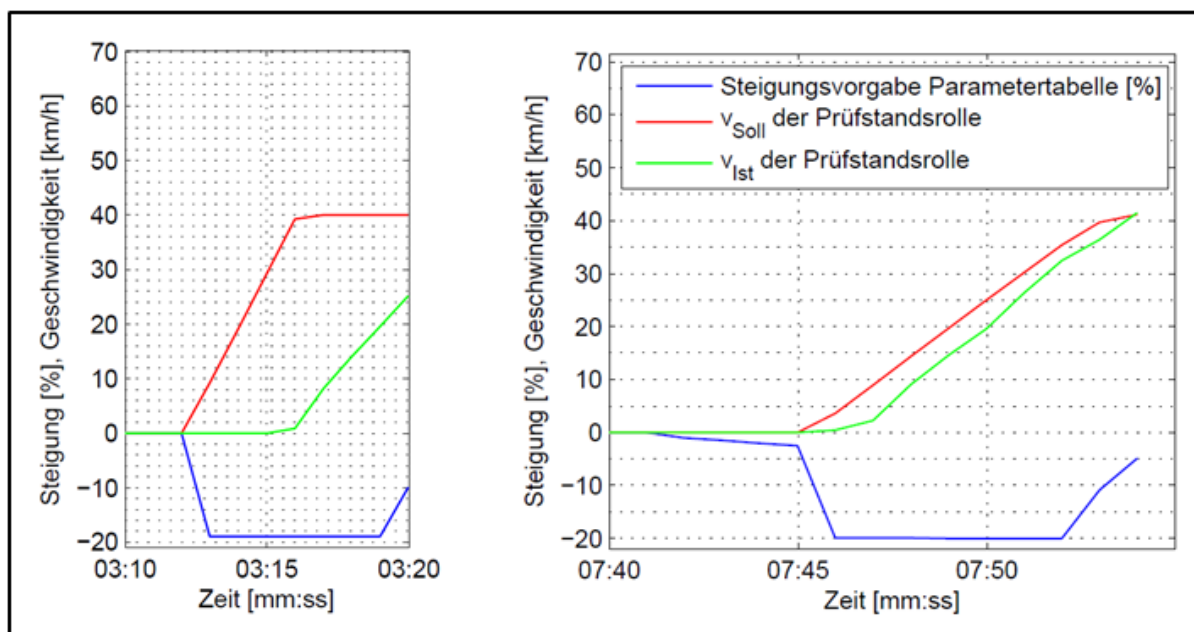


Abbildung 3.36: Geschwindigkeits- und Steigungsvorgaben-Verläufe hinsichtlich Anfahrtsverzögerung und deren Lösung

3.6.5 Praktische Umsetzung der allgemeinen Ablaufstruktur bis zur übergebenen Parametertabelle

Die bisherigen Betrachtungen der Ablaufstruktur zeigen systematisch aufgeschlüsselte Wege der Übergabegrößen. Aufgrund der praktischen Realisierung der Berechnungen im Zuge der Simulation können jedoch einige Berechnungsschritte der Anpassung mit dem bestehenden Ablauf der Simulation kombiniert und dadurch teils vorgezogen werden. Die Berechnungsstruktur der LDS wird im Kapitel 3.2.3.9 kurz dargestellt.

Die Einbringung der Anpassungen in die bestehende Berechnungsabfolge zeigt Abbildung 3.37. Es wird mit der Startdatei begonnen, in der neben dem bisher schon erwähnten Fahrzyklus und den Definitions-Parametern der LDS-Komponenten, nun auch für die Hybrid-Emulation bzw. für die zu treffenden Anpassungen verwendbare Daten definiert und teilweise schon berechnet werden. Vorgegeben werden muss dabei der Widerstand, der am Hinterrad auftritt (siehe Kapitel 3.6.2) und Eingangsgrößen der „Anpassung der resultierenden Differenzgeschwindigkeit“. Mit der Vorgabe des Widerstands am Hinterrad, können alle Anpassungsgrößen des Zugkraft-Vergleichs über stationäre Geschwindigkeiten berechnet werden und der LDS zur Verfügung gestellt werden.

Die LDS selbst (Simulink-Datei) wird um drei Anpassungsschritte erweitert, die das ausgegebene Moment der E-Maschine des Hybriden abändern. Dies beinhaltet die Berücksichtigung der E-Maschinen-Position im Antriebsstrang, die Anpassung aufgrund des Zugkraft-Vergleichs und die Anpassung der restlichen auftretenden Differenzen. Ebenfalls wird das E-Maschinen-Moment in eine äquivalente Steigung umgerechnet. Die Ausgangswerte der LDS werden mit jedem Zeitschritt angepasst und dem Zeitschritt zugeordnet.

Die aus der Simulink-Simulation erhaltenen Ausgangsdaten werden dann mit Hilfe einer Auswertungs-Datei weiter korrigiert bzw. aufbereitet. Die Werte der Steigungsvorgabe werden noch gerundet (Reduktion der Datenmenge) und hinsichtlich der Anfahrtsverzögerung auf der Rolle angepasst. Die Zündungssignal- und Gangverläufe werden auf Fahrbarkeit korrigiert und die Gang- und Kupplungs-Verläufe für das Fahrerleitsystem der Prüfstandsteuerung aufbereitet. Am Ende werden alle Größen gesammelt in die Parametertabelle für den Prüfstand geschrieben.

3.7 Methodik zur Realisierung der Hybrid-Emulation

Um die gezeigt Ablaufstruktur der Anpassungen realisieren zu können, sind wie in den betroffenen Bereichen erklärt wurde, einige vorausfolgende Messungen bzw. Datenermittlungen nötig. Dieser Tatsache folgend wurde eine Methodik definiert, die den gesamten Ablauf, beginnend bei der Ermittlung relevanter empirischer Daten, über die Versuchsdurchführung selbst bis hin zur Auswertung der erhaltenen Daten, klar strukturiert. Die Datenaufbereitung nach den Versuchsfahrten ist dabei sehr spezifisch auf diese Masterarbeit ausgelegt.

Die Aufteilung der Methodik erfolgt in 3 Phasen:

1. Anpassungsdaten-Ermittlung
2. Versuchsdurchführung
3. Messdatenaufbereitung

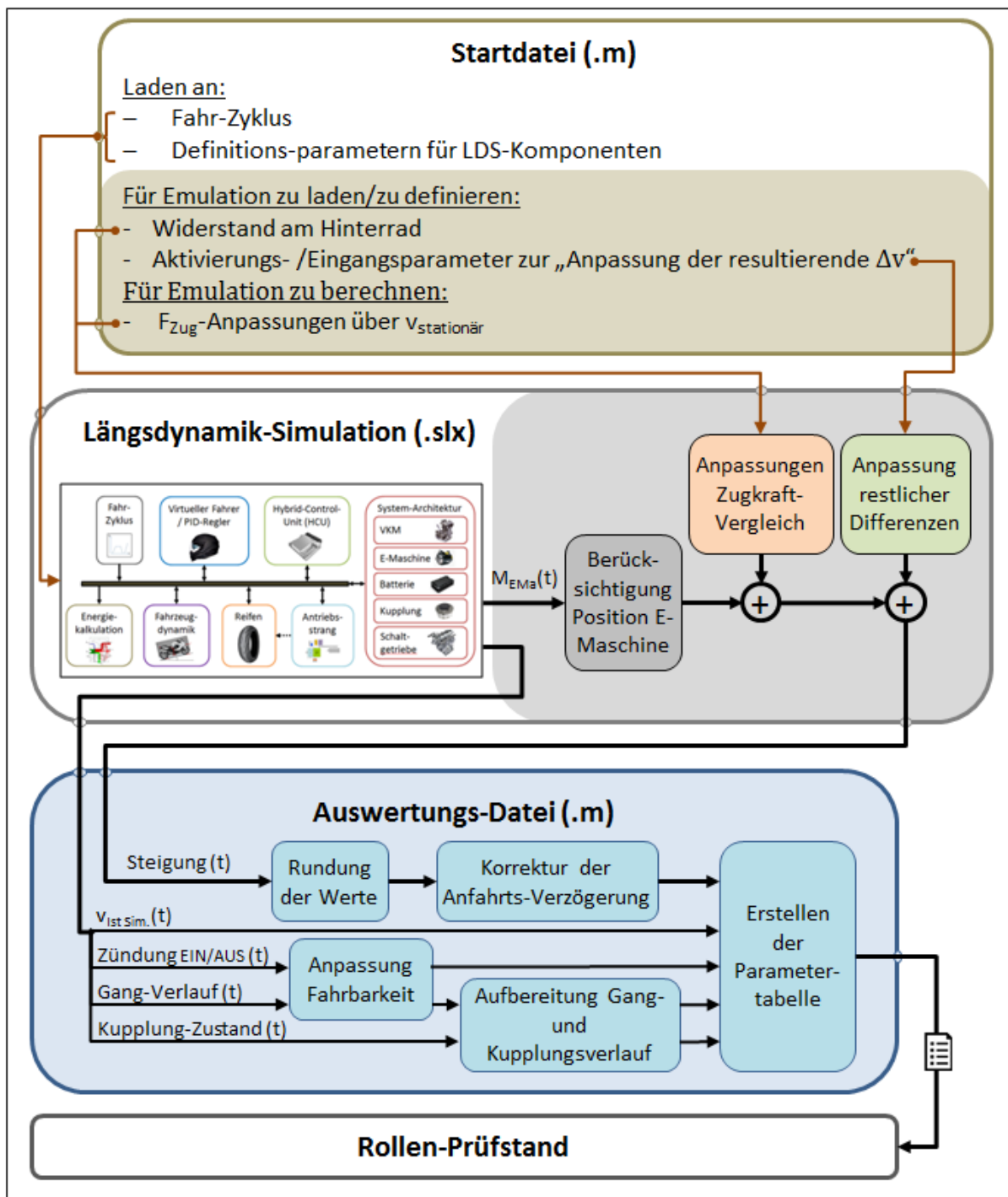


Abbildung 3.37: Vereinfachte Darstellung der praktisch realisierten allgemeinen Ablaufstruktur

Abbildung 3.38 zeigt diese 3 Phasen im Verhältnis zur allgemeinen Ablaufstruktur. Den ersten beiden Phasen kann dabei unterstellt werden, dass sie prinzipiell, mit kleinen Abweichungen, der allgemeinen Ablaufstruktur folgen. Es wird jeweils, wie in Kapitel 3.6 erläutert, eine Längsdynamiksimulation des Hybridfahrzeuges durchgeführt, deren Vorgaben je nach Phase unterschiedlich genau korrigiert und auf dem Rollenprüfstand nachgefahren werden.

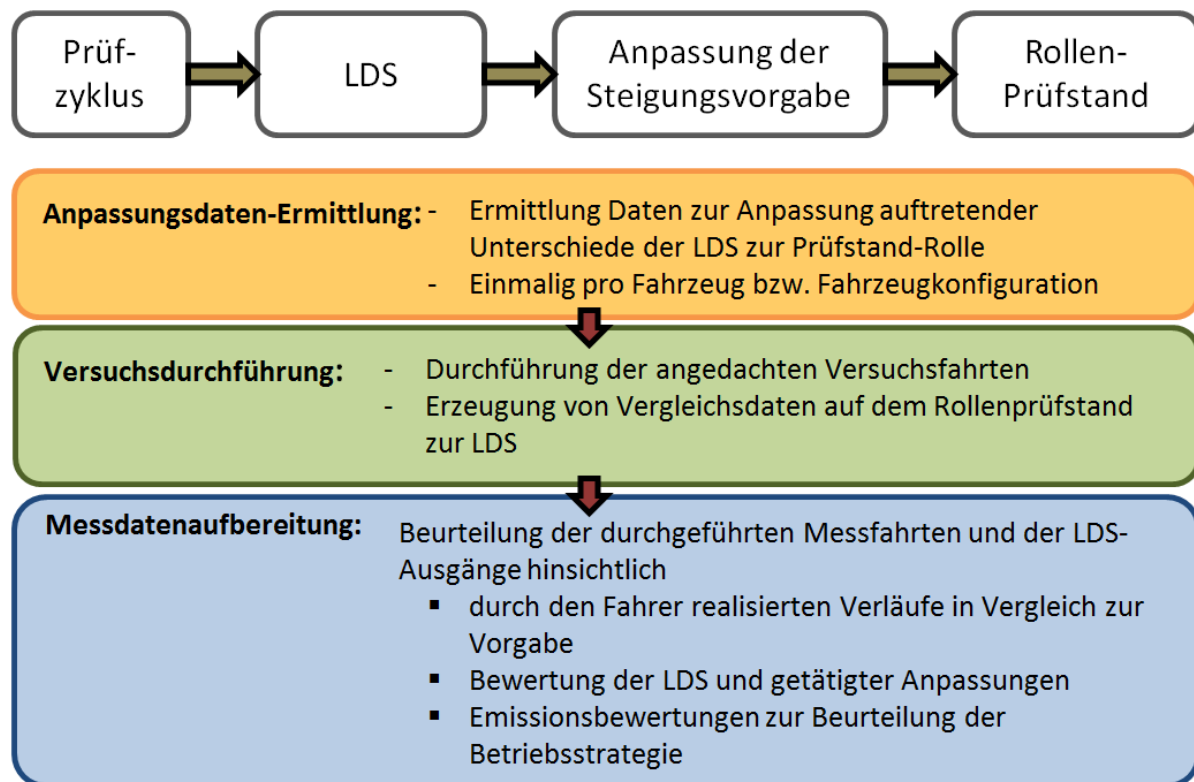


Abbildung 3.38: Überblick der Methodik und ihrer Phasen

3.7.1 Phase der Anpassungsdaten-Ermittlung

Diese erste Phase dient grundsätzlich zur Ermittlung empirischer Daten, die zur Anpassung bzw. Kompensation an Unterschieden zwischen LDS und Rollenprüfstand dienen.

Genauer betrachtet werden in dieser Phase die empirisch zu ermittelnden Größen

- Widerstand am Hinterrad (berücksichtigt Hinterrad plus Antriebsstrang)
- Resultierende Differenzgeschwindigkeit nach der Zugkraft-Anpassung zur „Anpassung restlicher Differenzen“ nach Abbildung 3.27 und Kapitel 3.6.3.

Diese Phase ist nur einmal pro Fahrzeug bzw. Fahrzeugkonfiguration zu durchlaufen und kann folgend für alle weiteren Messfahrten herangezogen werden.

3.7.1.1 Verwendeter Fahrzyklus für die Anpassungsdaten-Ermittlung

Um eine bestmögliche Aussage für die Ermittlung der Differenzgeschwindigkeiten zur weiteren Anpassungen machen zu können, wird ein für diese Phase der Methodik definierter Fahrzyklus verwendet. Dieser fährt stationäre Geschwindigkeiten an, die in 10 km/h-Schritten gestaffelt sind, wie in Abbildung 3.39 dargestellt. Dabei entspricht die magentafarbige Kurve der Soll-Vorgabe für die LDS und die grüne Kurve dem durch reinen E-Antrieb in der LDS realisierten Geschwindigkeitsverlauf. Dieser grüne Verlauf dient als Vorgabe und somit Soll-Zustand für die Prüfstandrolle. Dabei wird die angestrebte Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h rein elektrisch nicht erreicht, sondern pendelt sich bei 113,5 km/h ein.

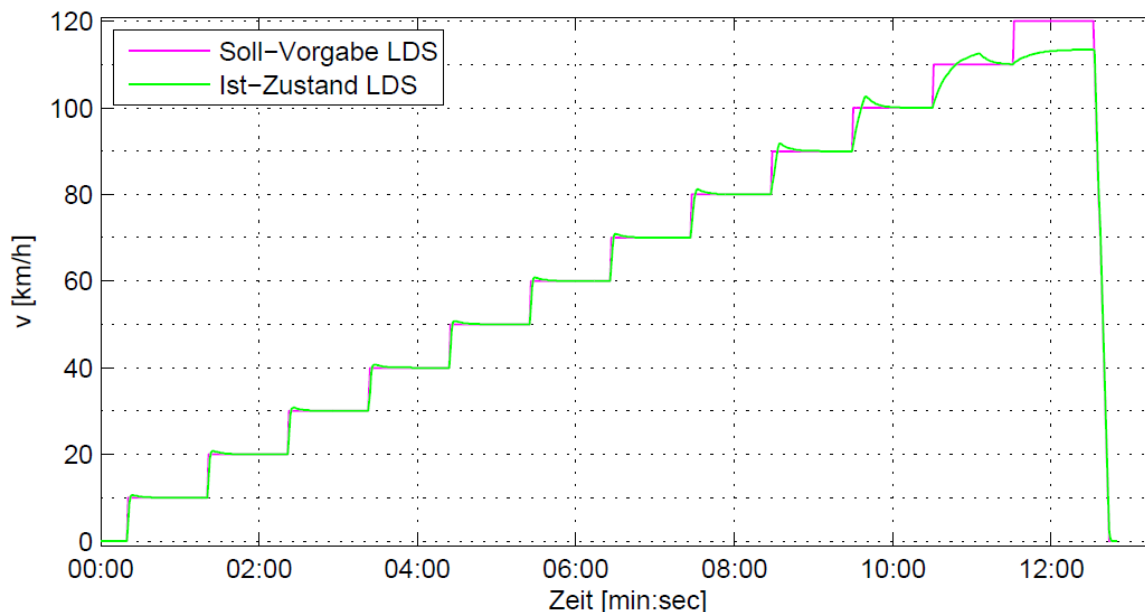


Abbildung 3.39: Geschwindigkeitsverläufe des Zyklus in der Anpassungsdaten-Ermittlung der LDS-Vorgabe und Prüfstandvorgabe

3.7.1.2 Ablauf der Anpassungsdaten-Ermittlung

Abbildung 3.40 zeigt das Vorgehen in der Anpassungsdaten-Ermittlung, wobei der zeitliche Verlauf grundsätzlich von oben nach unten dargestellt wurde. Vollständigkeithalber wird auch nochmals die allgemeine Ablaufstruktur angefügt.

Als erster Schritt ist die Durchführung eines Ausrollversuches nach Kapitel 2.2.2 und 3.6.2.5 vorgesehen. Dabei wird ein Ausrollversuch auf der Prüfstandrolle mit montiertem Sekundärtrieb des Versuchsfahrzeugs durchgeführt. Der erhaltene Widerstand am Hinterrad über die Geschwindigkeit wird den weiteren Phasen der Abbildung 3.40 bereitgestellt.

Die zweite Phase bzw. der zweite Schritt folgt der allgemeinen Ablaufstruktur unter Vernachlässigung der Anpassung der restlichen v -Differenz nach Kapitel 3.6.3. Vergleicht man die nach der Anpassung vorgegebenen Geschwindigkeitswerte für den Prüfstand mit den auf dem Prüfstand realisierten Ist-Werten, so erhält man die erste Geschwindigkeitsdifferenz Δv_1 über stationäre Geschwindigkeitszustände (siehe dazu im Vergleich Abbildung 3.34 in Kapitel 3.6.3). Analog zu Kapitel 3.6.3 folgt darauf eine weitere Phase zur Ermittlung von Δv_2 .

Nun wurden beide empirisch zu ermittelnden Größen bzw. Verläufe definiert und können an die Versuchsdurchführung weitergegeben werden.

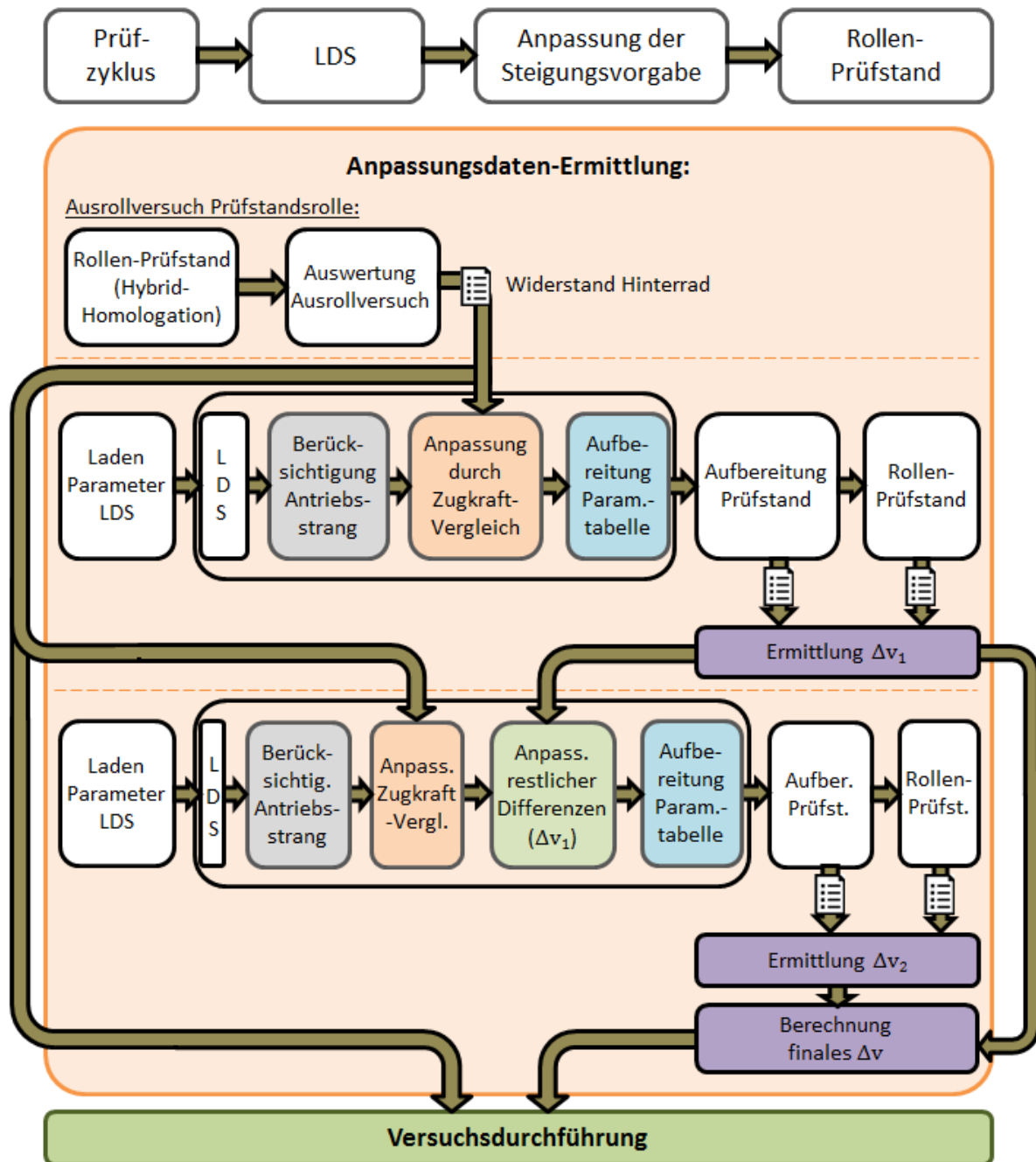


Abbildung 3.40: Vereinfachte Darstellung der Phase der Anpassungsdaten-Ermittlung

3.7.2 Phase der Versuchsdurchführung

In dieser Phase können die eigentlichen Versuche zur Beurteilung der Hybrid-Simulation bzw. dessen Strategie durchgeführt werden. Die vorgegebenen Zyklen können dabei der Homologationsgesetzgebung entsprechen, aber auch vollständig davon unabhängig definiert werden. Der Ablauf folgt vollständig der allgemeinen Ablaufstruktur und ist in Abbildung 3.41 nochmals dargestellt. Die benötigten empirisch ermittelten Eingangsparameter der Versuchsdurchführung stammen von der Anpassungsdaten-Ermittlung

Als Ausgang dieser zweiten Phase der Methodik dienen Daten aus der LDS, der getroffenen Anpassungen (Ausgabe im Zuge der Prüfstandaufbereitung) und der Versuchsfahrten am Rollenprüfstand.

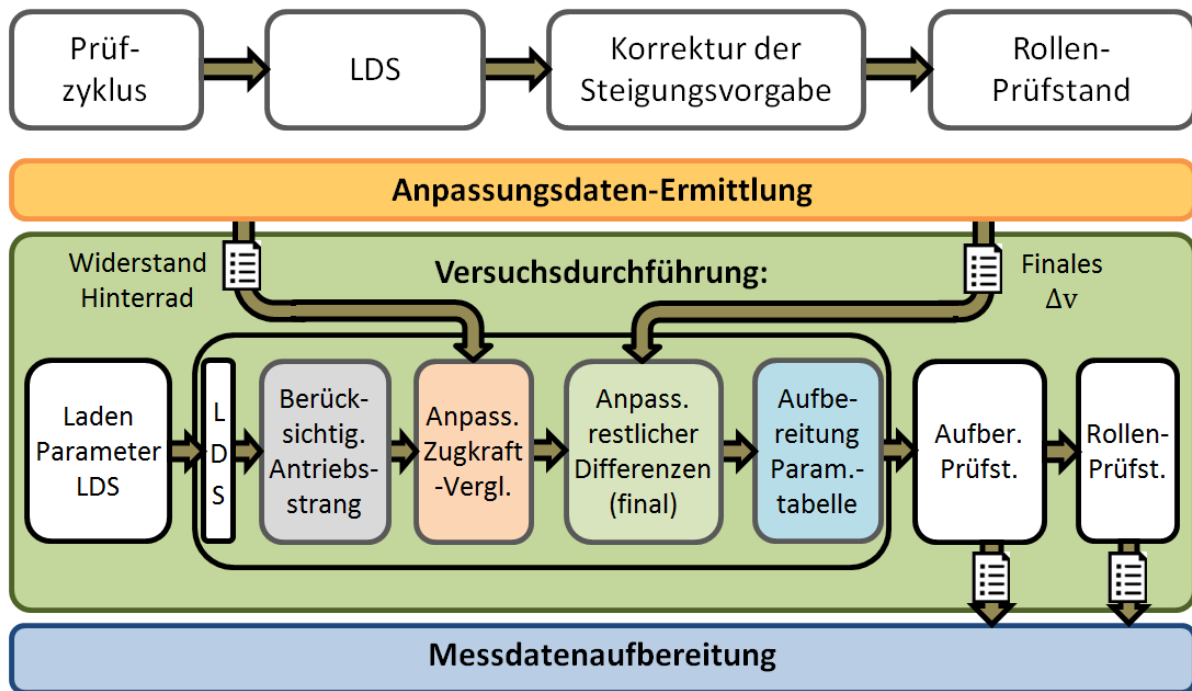


Abbildung 3.41: Vereinfachte Darstellung der Phase der Versuchsdurchführung

3.7.3 Phase der Messdatenaufbereitung

Diese Phase definiert die Auswertung der erhaltenen Daten aus der Versuchsdurchführung und ist grob in 3 Bereiche unterteilt:

1. Beurteilung der durch den Fahrer realisierten Verläufe im Vergleich zu den Vorgaben
2. Beurteilung der LDS und der getätigten Anpassungen
3. Emissionsbewertung zur Beurteilung der Betriebsstrategie

Der dritte Bereich ist vorab kurz gehalten und erlaubt eine erste Abschätzung.

3.7.3.1 Durch den Fahrer realisierte Verläufe im Vergleich zu den Vorgaben

In dieser Beurteilungsgruppe wird untersucht, wie weit die auf dem Rollenprüfstand realisierten Verläufe den Vorgaben entsprechen. Kontrolliert werden grundsätzlich die durch den Fahrer zu realisierenden Verläufe und das Anfahrverhalten der Rollensteuerung.

Die für den Fahrer zu realisierenden Verläufe sind:

- Geschwindigkeit
- Gangverlauf
- Kupplungsbetätigung
- Aktivieren oder Abstellen der VKM

Beim Geschwindigkeitsverlauf wird das größte Δv zwischen v_{Soll} und v_{Ist} der Rolle ermittelt. Laut Gesetzgebung [2] sind dabei max. 3,2 km/h an Geschwindigkeitsabweichung zulässig, mit Ausnahme während eines Gangwechsels, wobei hier größere Differenzen für maximal 2 Sekunden andauern dürfen.

Beim Gang-Verlauf wird einerseits der größte Gangunterschied der Vorgabe im Vergleich zur Realisierung gezeigt, andererseits wie lange dieser gedauert hat. Ebenfalls ist die längste Dauer eines Gangunterschiedes von Interesse.

Bei der Kupplungsbetätigung und bei der Aktivierung bzw. Deaktivierung der VKM wird auch die längste Zeit an Unterschieden ermittelt. Als Referenz für den Kupplungsverlauf der Messung wird der Kupplungsstatus aus dem Steuergerät der BMW herangezogen. Bei der VKM-Deaktivierung wird ein Vergleich einer Motordrehzahl gleich 0 U/min angestellt.

Hinsichtlich der Steigungsvorgabe werden nur die Anfahrtsphasen von 0 km/h geprüft, um die Umsetzung der Leistungsfreigabe ab 0 km/h zu kontrollieren. Die Verzögerung der Steigungsweiterleitung, beginnend von der Parametertabelle und endend bei der Rückmeldung an Tornado ist in Abbildung 4.17 des Kapitels 4.4 dargestellt.

3.7.3.2 Beurteilungskriterien der LDS und der getätigten Anpassungen

Zur Beurteilung der LDS wird der Kraftstoffverbrauch über die Zykleteile herangezogen. Dabei wird der Verbrauch pro Weeinheit der Zykleteile herangezogen und zwischen der LDS und den Versuchsfahrten verglichen.

Auch von Interesse sind die Zug- bzw. Antriebskräfte auf der Prüfstandrolle im Vergleich zur Simulation inkl. der getätigten Anpassungen. Damit kann in den Phasen des reinen emulierten E-Betriebs im Zyklus eine Abschätzung der Anpassungswirkungen getätigt werden. Vorgegangen wird nach den Betrachtungen der Formeln (25) und (26).

$$F_{Antieb,Rolle} = F_0 + F_2 \cdot v^2 + m_{\dot{a}qu} \cdot \dot{v} + F_{Rolle} \quad (25)$$

$$F_{Antieb,Sim.korr.} = F_{Zug,Sim} + F_{HR} + F(v) \quad (26)$$

In der Formel (25) summiert sich die Antriebskraft auf der Rolle im dynamischen Zustand. Die laut Gesetzgebung definierten Widerstände F_0 , $F_2 \cdot v^2$ (v in km/h) und der Beschleunigungswiderstand mit der äquivalenten Masse des Hybrid-Konzepts (\dot{v} im m/s²) werden noch durch den auftretenden Widerstand am Hinterrad, ermittelt über den DMS-Aufnehmer der Prüfstandrolle (F_{Rolle} , erläutert in Kapitel 3.6.2.5.1), ergänzt. Die Formel (26) addiert zu der Zugkraft aus der Simulation, die die Antriebskraft am Hinterrad darstellt, noch die korrigierenden Kräfte aus der Zugkraft-Anpassung und der Anpassung restlicher Differenzen dazu. Theoretisch müssten die beiden Antriebskräfte im emulierten E-Betrieb den gleichen Wert ergeben.

3.7.3.3 Beurteilung der Betriebsstrategie

Die dritte Gruppe dient zur Beurteilung der in der LDS beinhalteten Betriebsstrategie des Hybrid-Konzeptes. Dabei wird eine Beurteilung der Emissionen laut Gesetzgebung nach [2] durchgeführt, wie sie in Kapitel 2.1.4 und 2.1.5 kurz erläutert wurden. Im Falle des hier verwendeten Hybrid-Konzeptes entspricht der Zustand A der Prüfung mit SOC-Startbedingung von 100% und der Zustand B der Prüfung mit SOC-Startbedingung von 0%. Durch die Simulation konnte bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h (70% der maximalen rein elektrischen Geschwindigkeit) eine elektrische Reichweite von 34 km ermittelt werden. Die durchschnittliche Strecke zwischen 2 Batterieladungen liegt laut Definition der Gesetzgebung bei 10 km.

Ebenfalls werden die Emissionen aller getätigten Messfahrten aufgeteilt auf die einzelnen Teile des WMTC untersucht und verglichen. Weiter wird der Temperaturverlauf um den Katalysator dazu in Verbindung gebracht und ein Vergleich mit dem SOC-Verlauf des Hybrid-Konzepts laut LDS angestellt.

3.8 Betrachtete alternative Anpassungsmöglichkeiten

3.8.1 Unterscheidung zwischen notwendigem Antrieb durch die Rolle und nötigem EMa-Moment der Simulation zur Erreichung konstanter Geschwindigkeiten im E-Betrieb

Alternativ zur in Kapitel 3.6.2 gezeigten Anpassung auf Basis des Zugkraft-Vergleichs, kann die hier vorgestellte Herangehensweise betrachtet werden. Sie wurde im Zuge der Methodenentwicklung berücksichtigt, aber aufgrund schlechterer Ergebnisse im direkten Vergleich zur verwendeten Strategie nicht weiter verfolgt. Vollständigkeitshalber soll sie hier erwähnt werden.

Abbildung 3.42 zeigt dabei die Grundstruktur der Methode. Diese beruht im Wesentlichen auf dem Vergleich des stationären Gefälle-Geschwindigkeits-Verhältnisses, einerseits der LDS und andererseits auf dem Rollenprüfstand.

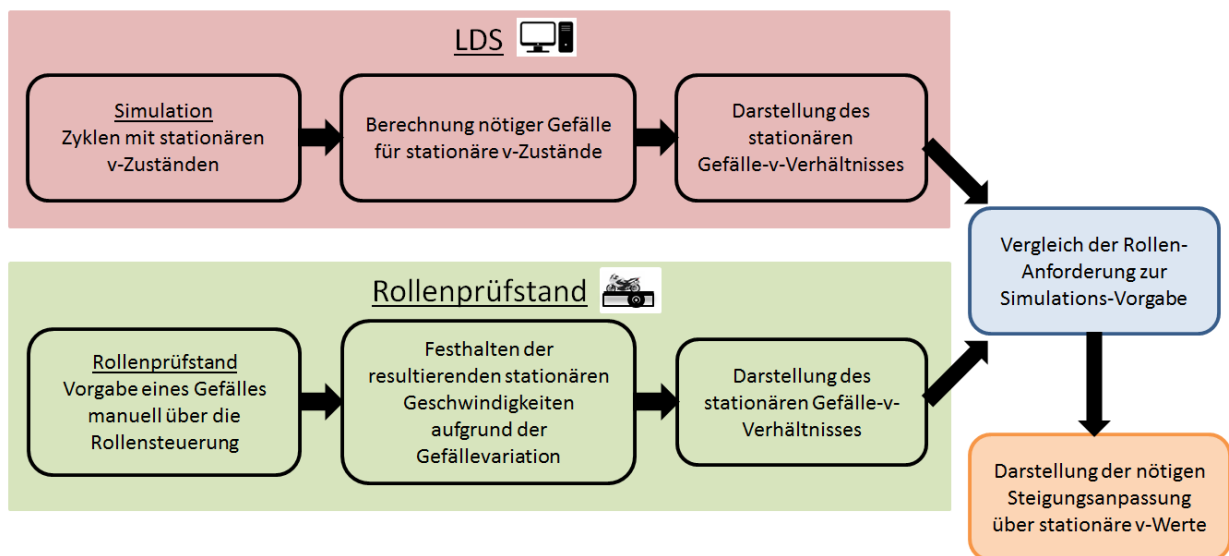


Abbildung 3.42: Vereinfachte Darstellung der Steigungsanpassung auf Basis resultierende v-Differenz

In der LDS wird ein Zyklus mit stationären Geschwindigkeitszuständen simuliert, mit dessen Hilfe die nötigen Steigungen bzw. die nötigen Gefälle für unterschiedliche stationäre Geschwindigkeiten dargestellt werden können. In Abbildung 3.42 ist dies im roten Verfahrensweg dargestellt.

Am Rollenprüfstand werden nun unter nach Homologationsgesetzgebung definierten Parametern stufenweise Gefälle vorgegeben und somit die daraus resultierenden stationären Geschwindigkeiten festgehalten. Diese Daten werden nun ebenfalls als Gefälle-Verlauf über stationären Geschwindigkeiten dargestellt.

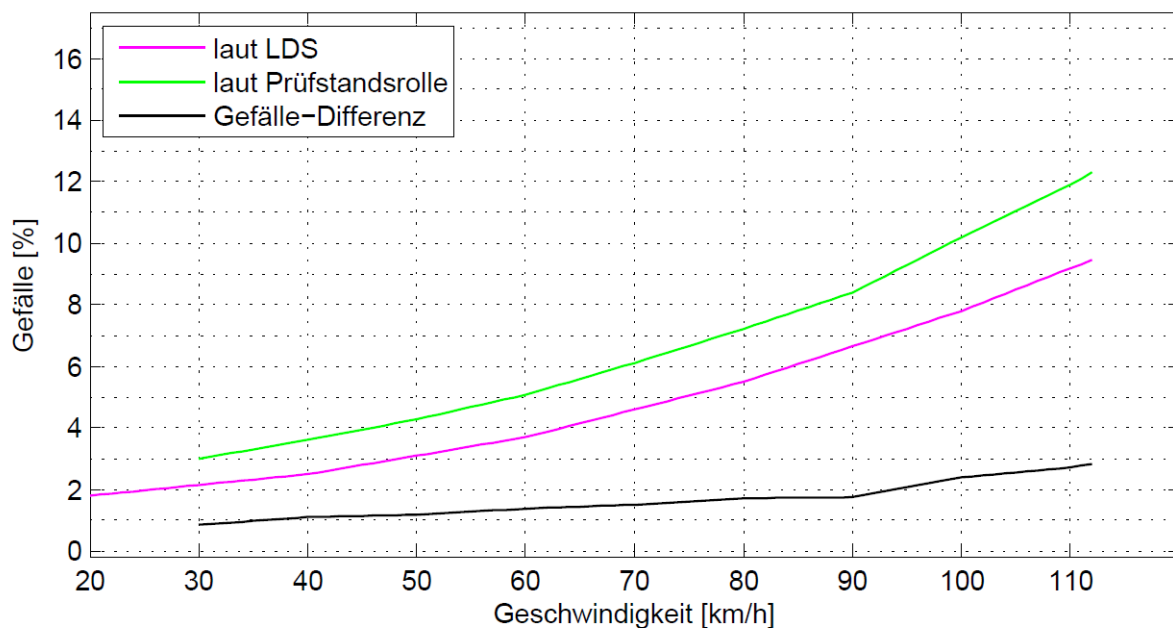


Abbildung 3.43: Nötige Gefälle-Vorgabe zur Erreichung stationärer Geschwindigkeiten der LDS und der Prüfstandsrolle

Vergleicht man nun diese beiden, aus der LDS und vom Rollenprüfstand erhaltenen, Kurven über stationäre Geschwindigkeiten, erhält man die nötigen Werte an Gefälle-Anpassungen über stationäre Geschwindigkeiten. Abbildung 3.43 zeigt die Verläufe für die in dieser Arbeit verwendete LDS und den gegebenen Rollenprüfstand unter den Parametern der Homologationsvorschrift für das zu Grunde liegende Hybrid-Konzept. Das erhaltene Differenzgefälle (schwarze Kurve) kann direkt für den Angleich der Steigungsvorgabe aus der LDS auf die Prüfstandsrolle herangezogen werden.

Die Werte in Abbildung 3.43 werden aber nicht für Geschwindigkeiten unter 20 bzw. 30 km/h angezeigt. Dies liegt darin, dass auf dem Rollenprüfstand ein Losfahren bei geringer Steigungsvorgabe in dieser Phase der Methodenentwicklung nicht realisierbar war. Die Ursache wurde nicht näher erläutert, hängt aber sehr wahrscheinlich mit den bestehenden Situationen hinsichtlich Anfahrtsphänomene auf der Prüfstandsrolle zusammen.

Gesagt werden kann auch, dass die erhaltenen Anpassungsergebnisse in größeren Differenzen bei stationären Geschwindigkeitszuständen als die der Zugkraft-Anpassung endeten und somit ebenfalls weitere Anpassungsmaßnahmen benötigt hätten.

4 Ausgeführte Hybridemulation

Am Ende dieser Masterarbeit wurden die entwickelte Ablaufstruktur und die dazugehörige Methodik auf definierte Versuchsfahrten angewendet. In diesem Kapitel sollen diese Messungen und deren Ergebnisse dargestellt werden.

4.1 Versuchsmatrix

Die Methodik wird auf den Prüfzyklus WMTC 3-2 angewandt, der für die Fahrzeugklasse des Versuchsfahrzeuges bzw. des Hybrid-Konzepts nach EURO 4-Gesetzgebung relevant ist. Geschaltet wird nach Betriebsstrategie, da in erster Linie die Betriebsstrategie des Hybrid-Konzepts beurteilt werden soll. Die möglichen SOC-Startbedingungen für die Zyklen werden mit 0 %, 25 % und 100 % definiert, um der laut Gesetzgebung geringsten und höchsten Batterieladung zu entsprechen (0 % und 100 %).

Die Betriebsstrategie des Hybridkonzepts definiert in der verwendeten Ausführung ein unteres SOC-Limit der Batterie zur Verwendung der Lastpunkt-Verschiebung von 25 %. D.h. fällt nach dem eventuell vorab nötigen Überschreiten dieser Grenze (bei Startbedingungen unter diesem Wert) der SOC-Verlauf darunter, wird der VKM zugeschaltet bzw. nicht mehr abgestellt. Das obere SOC-Limit zur Entscheidung keine Lastpunkt-Verschiebung durchzuführen liegt bei 35 %. Der SOC-Startwert von 25 % ermöglicht somit einen Vergleich des Energie- bzw. Kraftstoffverbrauchs bei annähernd gleicher Start- und Endladung der Antriebsbatterie im Vergleich zur reinen VKM-angetriebenen Fahrt.

SOC-Initial:	Hybrid-Konzept						Reine VKM	
	0 %		25 %		100 %		Kalt	Warm
WMTC, 3-2 Schalten nach Betriebsstrategie	Kalt	Warm	Kalt	Warm	Kalt	Warm		

Tabelle 4.1: Realisierte Versuchsmatrix im Zuge der Versuchsdurchführung

Tabelle 4.1 zeigt einen Überblick über die getätigten Versuche bzw. dessen Startbedingungen. Erkennbar ist auch, dass für jeden Startzustand des Systems ein Kalt- und ein Warmstart durchgeführt wurden. Die Simulation kann keinen Kaltstart darstellen, somit sind nur direkte Vergleiche mit warmen Startbedingungen möglich.

4.2 Angewandte Konfigurationen in der Simulation, in der Methodik und am Rollenprüfstand

Hier sollen kurz die Konfigurationen aller Komponenten der Methodik dargestellt werden. Es wurden grundsätzlich die in dieser Masterarbeit definierten Randbedingungen der Erhaltung an Homologationsbedingungen (mit Ausnahme des Schaltverlaufs) und der definierten Parametrisierung der LDS eingehalten.

4.2.1 Simulationsparameter

In Tabelle 4.2 werden überblicksmäßig nochmals die angewandten Parameter der Simulation und Vorgaben an diese für die Phasen der Anpassungsdaten-Ermittlung und Versuchsdurchführung dargestellt, die durch die Start-Datei der LDS vorgegeben werden. Hervorzuheben ist in der Anpassungsdaten-Ermittlung der Speicher an elektrischer Antriebsenergie der unendliche Kapazitäten vorgibt. Dadurch können ohne Einschränkungen Messungen hinsichtlich ausreichender Antriebsleistung durch die Steigungsvorgabe durchgeführt werden.

Parameter und Vorgaben	Anpassungsdaten-Ermittlung	Versuchsdurchführung
Schaltstrategie	Vorgabe durch den eigens definierten Zyklus	Schalten nach der Betriebsstrategie des Hybrid-Konzepts
Fahrzyklus	Eigens definiert	WMTC, 3-2
Operationsstrategie	Rein elektrischer Antrieb ohne Berücksichtigung der Akkumulator-Kapazität (unendlicher Speicher)	Hybrid-Strategie, ausgelegt auf minimalen Kraftstoffverbrauch.
SOC-Startbedingung	Unendlicher Speicher	0 %, 25 % und 100 %

Tabelle 4.2: Definition der wählbaren Simulationsparameter und -Vorgaben für die am Prüfstand durchgeführte Anpassungsdaten-Ermittlung und Versuchsdurchführung

4.2.2 Anpassungsparameter

Die getroffenen Parameterdefinitionen der Anpassungen folgen der Darstellung der allgemeinen Ablaufstruktur und der erarbeiteten Methodik laut Kapitel 3.7. Kurz nochmals erwähnt wird, dass die Ermittlung des auftretenden Widerstands am Hinterrad auf der Prüfstandrolle durch einen Ausrollversuch auf der Rolle unter Aufbringung der Fahrparameter laut Homologationsgesetzgebung für das Hybrid-Konzept durchgeführt wurde. Dabei wurde ein konstanter Wert des Widerstands als Durchschnitt bei geringen Geschwindigkeiten herangezogen, um etwaige Schwankungen der Auswertung des Ausrollversuchs zu kompensieren.

4.2.3 Prüfstandparameter

Der Prüfstandaufbau folgt der Darstellung in Kapitel 3.2.4, wo der Aufbau und die verbaute Sensorik näher erläutert werden. Abbildung 4.1 zeigt die reale Situation am Rollenprüfstand mit der verbauten Messtechnik. Es ist gut der Bildschirm mit dem gezeigten Fahrerleitsystem erkennbar, der dem Fahrer zur Verfügung steht.

Die Widerstandsdefinition der Prüfstandrolle folgt der Homologationsgesetzgebung und berücksichtigt das Hybrid-Konzept mit einer Referenzmasse von 319 kg. Die genaue Auflistung und Definition sind Kapitel 2.1.3 zu entnehmen.



Abbildung 4.1: Prüfstandaufbau des Versuchsfahrzeugs und der verbauten Messtechnik

Die Bedatung von Tornado Designer folgt dem Inhalt in Tabelle 9.2 im Anhang. Wie bereits in Kapitel 3.2.4.6.1 erwähnt dient dies nur einem kleinen Überblick für die Hybrid-Emulation relevanter Parameter und Vorgaben. Bei dem Messdatenspeicherformat werden nicht alle mitgezeichneten Daten erwähnt, sondern nur einige wichtige aufgezeigt.

4.2.3.1 Anfahren von 0 km/h ohne VKM-Unterstützung durch reine Gefällevorgabe

Der in Tabelle 9.2 erst genannte Befehl zur Freischaltung der Leistung ab 0 km/h für die Rollensteuerung war notwendig, da die Rollensteuerung eine sicherheitstechnische Sperre der Leistungsfreigabe im Stillstand inkludiert hat.

Ohne diese Freischaltung war ein Anfahren im rein elektrisch emulierten Betrieb nicht möglich und konnte nur durch eine vorab in Bewegung gesetzte Rolle umgangen werden. Da aber während eines laufenden Zyklus nicht manuell auf die Rollensteuerung eingegriffen werden kann und die Zyklen meist mehrere Anfahrphasen haben, konnte dies nur durch den Befehl „SOVR K0“ von Tornado an die Rollensteuerung gelöst werden.

4.2.3.2 Fahrerleitsystem

In Abbildung 4.2 wird das Fahrerleitsystem gezeigt, das dem Fahrer zur Verfügung steht. Wie zu sehen, werden ihm der Geschwindigkeits- (blaue Kurve) und Gangverlauf (rote Pfeilmarkierungen auf der blauen Kurve) vorgegeben, wobei im Gangverlauf auch der Kupplungszustand enthalten ist. So ist bei vorhandenem „K“ vor der Ganganzeige eine geöffnete Kupplung vorgegeben.

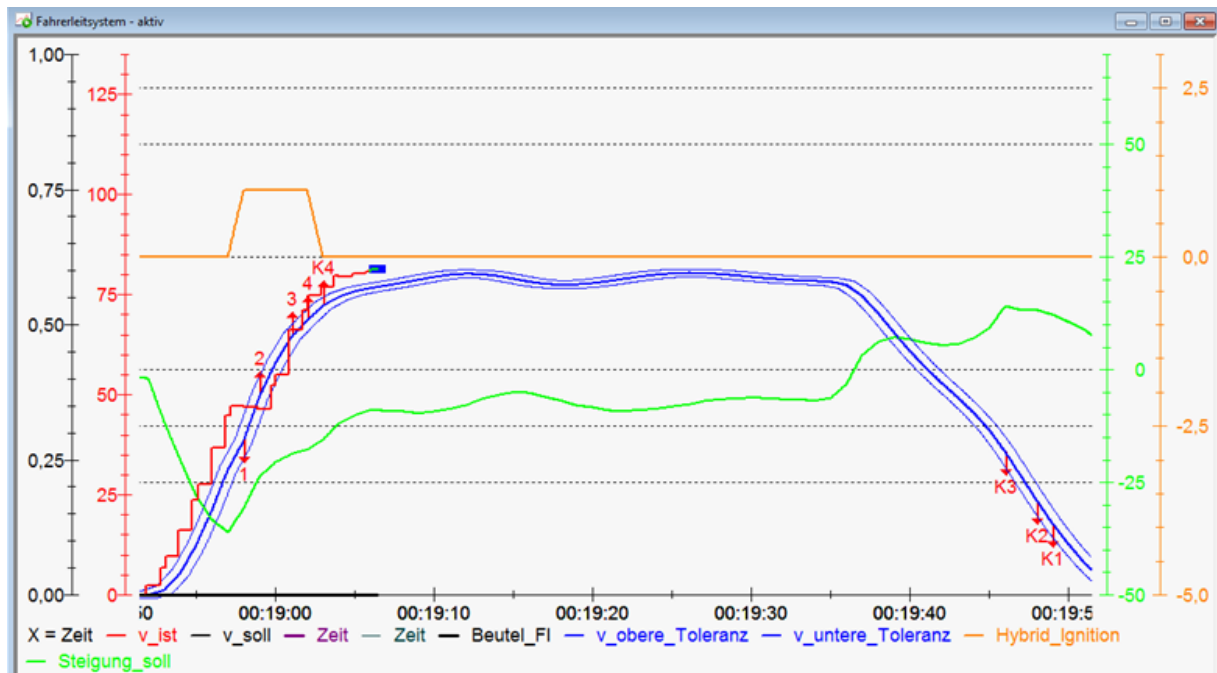


Abbildung 4.2: Fahrerleitsystem für eine aktive Messfahrt

Die grüne Linie zeigt den Verlauf der Steigung, damit sich der Fahrer auf eventuelle Unterstützungen oder zusätzliche Belastungen durch die Rolle einstellen kann. Zuletzt ist noch der Verlauf der VKM-Aktivität, als orange Linie dargestellt, zu erkennen. Diese zeigt mit 1 die Aktivierung und 0 die Deaktivierung der VKM. Die Achsenbeschriftungen des Steigungs- und VKM-Zündungs-Verlaufs befinden sich auf der rechten Seite des Fahrerleitsystems.

4.2.3.3 Aufwärmphase am Prüfstand

Neben der Sicherstellung, dass alle getroffenen Parametereinstellungen eingehalten werden, war auch eine Aufwärm-Prozedur notwendig. Dies gewährleistete eine möglichst genaue Reaktion der Rollensteuerung und schloss Abweichungen, vor allem beim Antrieb durch die Prüfstandrolle, bestmöglich aus.

Am Beginn wurde eine Warmlaufphase der Rollensteuerung genutzt, die eine konstante Geschwindigkeit von vorgegebenen 70 km/h für definierte 10 min hielt, wobei keine Belastung auf der Rolle durch das Motorrad anlag. Darauf folgend wurde der Zyklus der Anpassungsdaten-Ermittlung bzw. ein rein elektrischer WMTC-Zyklus gefahren, in dessen Ablauf sich anfängliche Verzögerungen im dynamischen Antrieb durch die Rolle wesentlich verbessern.

4.3 Ergebnisse der Messfahrten

Folgend werden die einzelnen Stufen der Methodik aus Kapitel 3.7 und deren erhaltenen Ergebnisse dargestellt. Die Gliederung folgt dabei auch der Methodik-Struktur.

4.3.1 Anpassungsdaten-Ermittlung

Wie in Kapitel 3.7.1 erläutert, werden in der Anpassungsdaten-Ermittlung die beiden Anpassungsgrößen des Widerstands am Hinterrad und der finalen Geschwindigkeitsdifferenz für die Anpassung restlicher Differenzen ermittelt.

4.3.1.1 Ausrollversuch BMW F800 GT

Die Vorgehensweise ist in Kapitel 2.2.2 und in Kapitel 3.6.2.5.2 angeführt. Der getätigte Ausrollversuch mit dem Versuchsfahrzeug mit montiertem Sekundärriemen wurde unter Homologationsbedingungen auf der Prüfstandrolle unter den Konstanten F_0 und F_2 für die Widerstandsdefinition der Prüfstandrolle durchgeführt.

Das Fahrzeug wurde mit Hilfe des Verbrennungsmotors auf 130 km/h beschleunigt. Das Ziel war das Ausrollen im Neutral-Gang, um die Widerstände ab der Getriebeausgangswelle mit zu berücksichtigen. Grund der Gangwahl ist das Ausschließen des vermuteten restlichen Reibmomentenübertrags in der Kupplung, auch wenn diese geöffnet ist. Unter der Annahme, dass bei dem hier zugrunde liegenden Hybrid-Konzept die Trennung der Kupplung vollständig passiert, wurde vereinfachend der Widerstand zwischen Eingangs- und Ausgangswelle des Schaltgetriebes vernachlässigt.

Der Ausrollversuch wurde dreimal hintereinander durchgeführt, um Vergleichswerte zu erhalten. Die erhaltenen Geschwindigkeitsverläufe sind in Abbildung 4.3 dargestellt und zeigen eine gute Übereinstimmung über alle drei Ausroll-Verläufe.

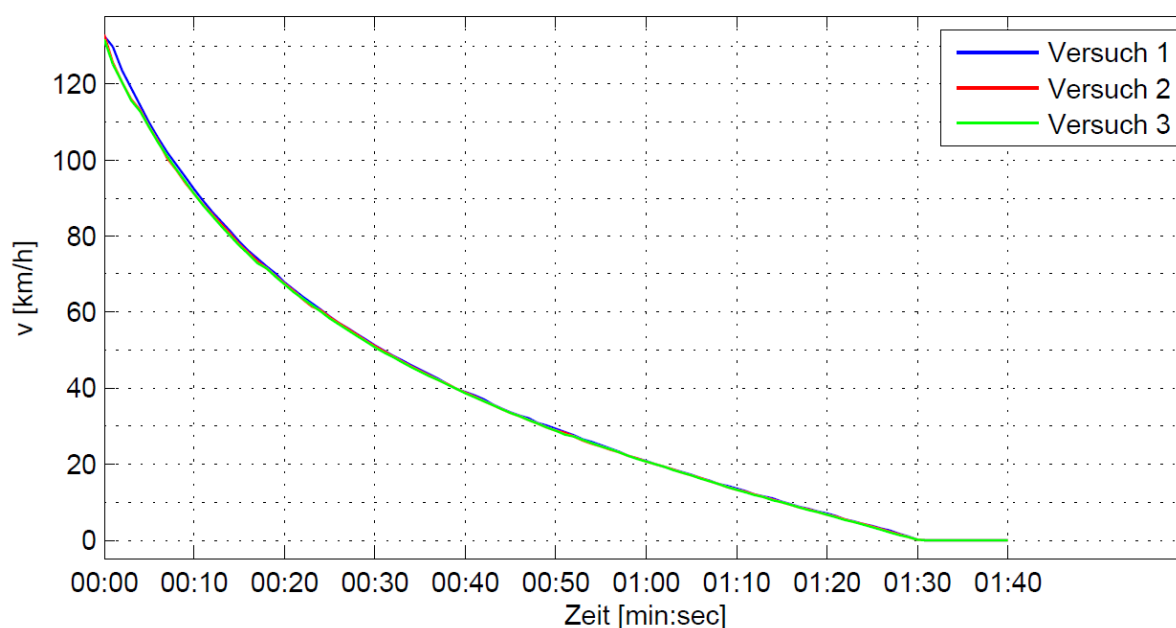


Abbildung 4.3: Geschwindigkeitsverläufe der Ausrollversuche aus der Anpassungsdaten-Ermittlung

Nimmt man diesen Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit als Basis für die Auswertung des in Kapitel 2.2.2 und 3.6.2.5 erläuterten dynamischen Kräftegleichgewichts, erhält man den in Abbildung 4.4 dargestellten, numerisch berechneten Verlauf.

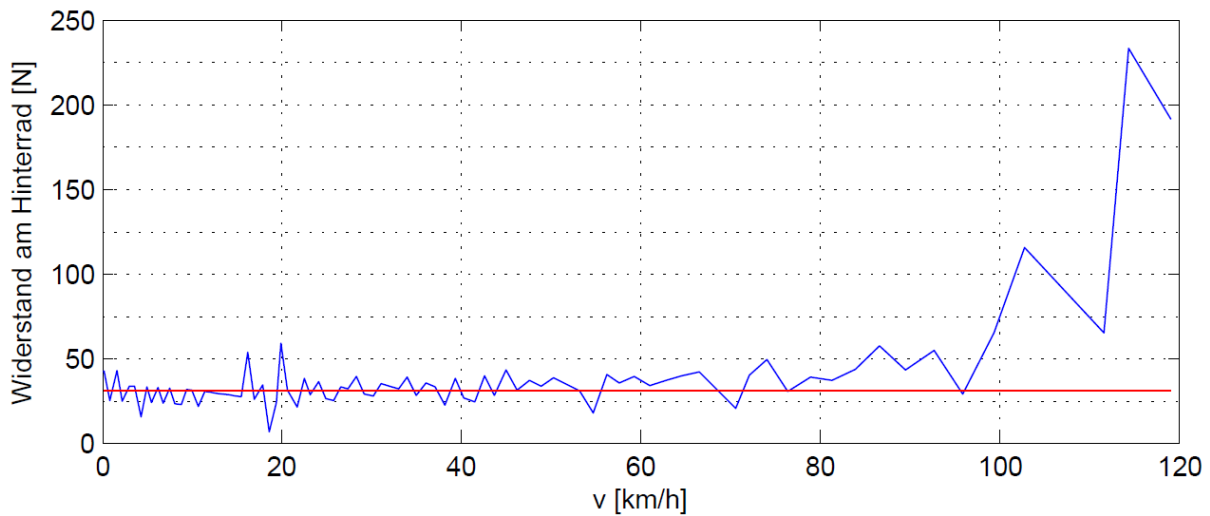


Abbildung 4.4: Ausgewerteter Widerstandsverlauf am Hinterrad über die Geschwindigkeit auf Basis der Ausrollversuche

Man erkennt bei der berechneten blauen Kurve eine Abhängigkeit des Widerstands von der Geschwindigkeit, vor allem mit höheren Geschwindigkeiten. Jedoch sind auch die Schwingungen zu erkennen, die die genaue Festlegung des Verlaufs schwierig gestaltet. Begründet sind diese Schwingungen vermutlich in der Auflösung der Geschwindigkeitsaufzeichnung über den Ausrollversuch. Vereinfacht wurde hier ein konstanter Widerstand herangezogen, der aus dem Durchschnitt der Geschwindigkeiten bis 70 km/h definiert wurde und 31,1 N beträgt.

4.3.1.2 Ermittlung Δv_1 der Anpassungsdaten-Ermittlung

Auf Basis der zweiten Phase bzw. Zeile in Abbildung 3.40 wurde Δv_1 im rein emulierten E-Betrieb ermittelt. Der Graph in Abbildung 4.5 zeigt dabei die erhaltenen Soll- und Ist-Geschwindigkeiten in den stationären Geschwindigkeitsbereichen der Messfahrt graphisch und Tabelle 4.3 fasst die Werte nochmals zusammen.

v_{Soll} [km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	113,5
v_{Ist} [km/h]	25,4	39,5	47	53,8	61,4	69	78	87	96,1	105,5	114,8	119,4
Δv_1 [km/h]	15,4	19,5	17	13,8	11,4	9	8	7	6,1	5,5	4,8	5,9

Tabelle 4.3: Geschwindigkeiten Erhebung Δv_1 der Anpassungsdaten-Ermittlung

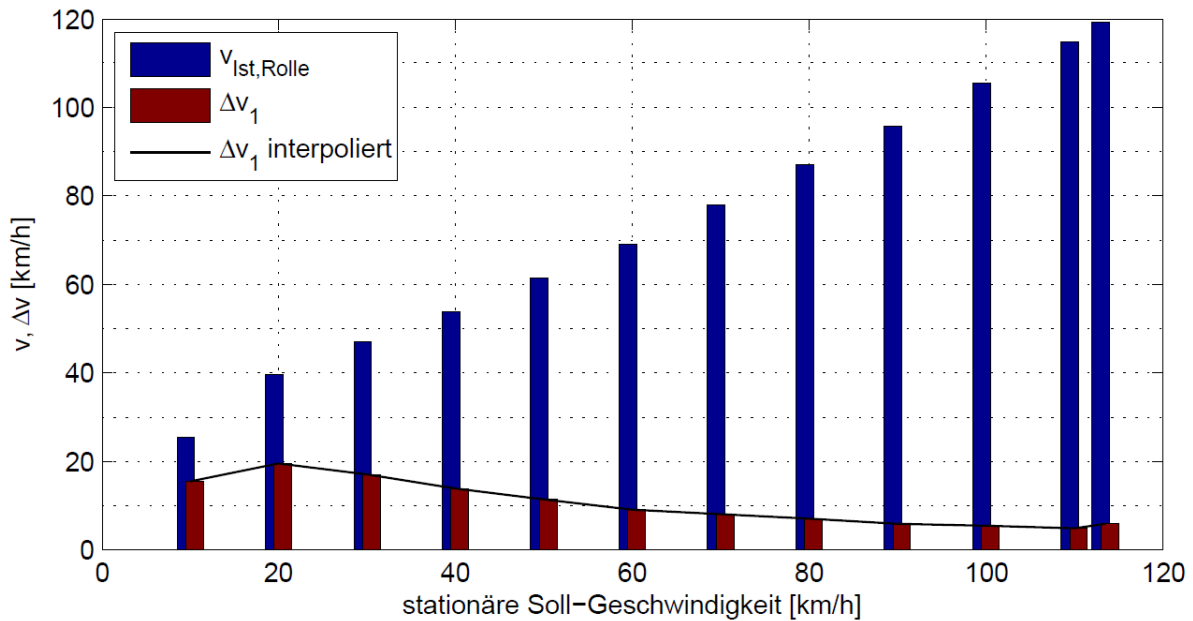


Abbildung 4.5: Geschwindigkeitsverläufe der Erhebung von Δv_1 der Anpassungsdaten-Ermittlung

Zu erkennen ist, dass die resultierenden Geschwindigkeiten höher liegen als die Soll-Vorgabe. Dies kann grundsätzlich auch umgekehrt ausfallen. Das erhaltene Δv_1 wird im Zuge der dritten Zeile der Abbildung 3.40 für einen erneuten Durchlauf verwendet

4.3.1.3 Ermittlung Δv_2 der Anpassungsdaten-Ermittlung

Nach einer erneuten Messfahrt resultierte dies in den Geschwindigkeitszuständen der Abbildung 4.6 bzw. in Tabelle 4.4.

v_{Soll} [km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	113,5
v_{Ist} [km/h]	13	18,9	25,2	34,9	45,3	56,8	66,9	77,3	88,1	98,2	108,2	112,7
Δv_2 [km/h]	3	-1,1	-4,8	-5,1	-4,7	-3,2	-3,1	-2,7	-1,9	-1,8	-1,8	-0,8

Tabelle 4.4: Geschwindigkeiten Erhebung Δv_2 der Anpassungsdaten-Ermittlung

Die Differenzen sind wesentlich geringer, größtenteils sogar ins Negative gewandert. Bei hohen Geschwindigkeiten ist die Differenz schon ausreichend klein, da aber in Summe ein weiterer Anpassungsschritt nötig ist, wird auch in diesen Geschwindigkeitsbereichen nochmals angeglichen.

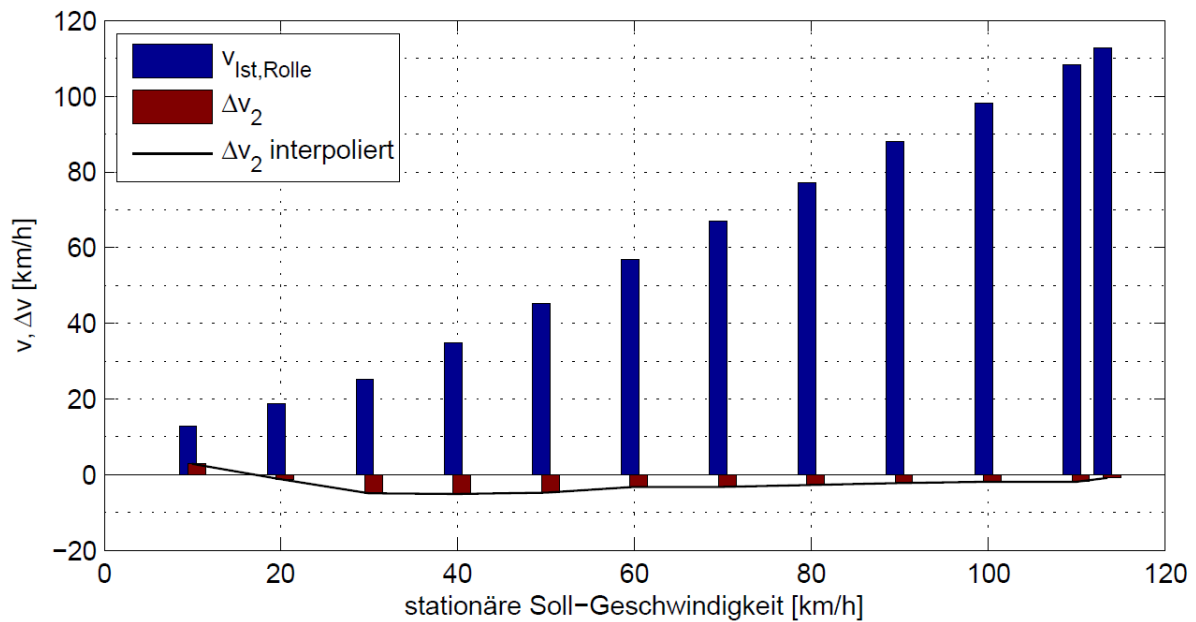


Abbildung 4.6: Geschwindigkeitsverläufe der Erhebung von Δv_2 der Anpassungsdaten-Ermittlung

4.3.1.4 Ermittlung finales Δv der Anpassungsdaten-Ermittlung

Nach der Methodik in Abbildung 3.40 wird nun aus dem erhaltenen Δv_1 und Δv_2 ein finales Δv berechnet. Die dazugehörigen Werte werden in Tabelle 4.5 dargestellt.

v_{Soll} [km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	113,5
Δv_1 [km/h]	15,5	19,5	17	13,8	11,4	9	8	7	6,1	5,6	4,8	5,9
Δv_2 [km/h]	3	-1,1	-4,8	-5,1	-4,7	-3,2	-3,1	-2,7	-1,9	-1,8	-1,8	-0,8
Finales Δv [km/h]	18,5	18,4	12,2	8,7	6,7	5,8	4,9	4,3	4,2	3,8	3	5,1

Tabelle 4.5: Geschwindigkeiten Erhebung finales Δv der Anpassungsdaten-Ermittlung

Somit sind der Widerstand am Hinterrad und die nötigen Differenz-Geschwindigkeiten für die Versuchsdurchführung gefunden.

4.3.2 Versuchsdurchführung

Als Geschwindigkeitsvorgabe dient der WMTC-Zyklus der Untergruppe 3-2. Da die Methodik der Hybrid-Emulation aber die Simulationsverläufe des Hybridkonzepts darstellen soll, werden die Ist-Zustände der LDS als Vorgabe für den Prüfstand herangezogen. Abbildung 4.7 bis Abbildung 4.9 zeigen dabei die Geschwindigkeitsverläufe laut WMTC und laut LDS in verschiedenen Betriebsstrategien und Startbedingungen für den Akkumulator des Hybrid-Konzepts.

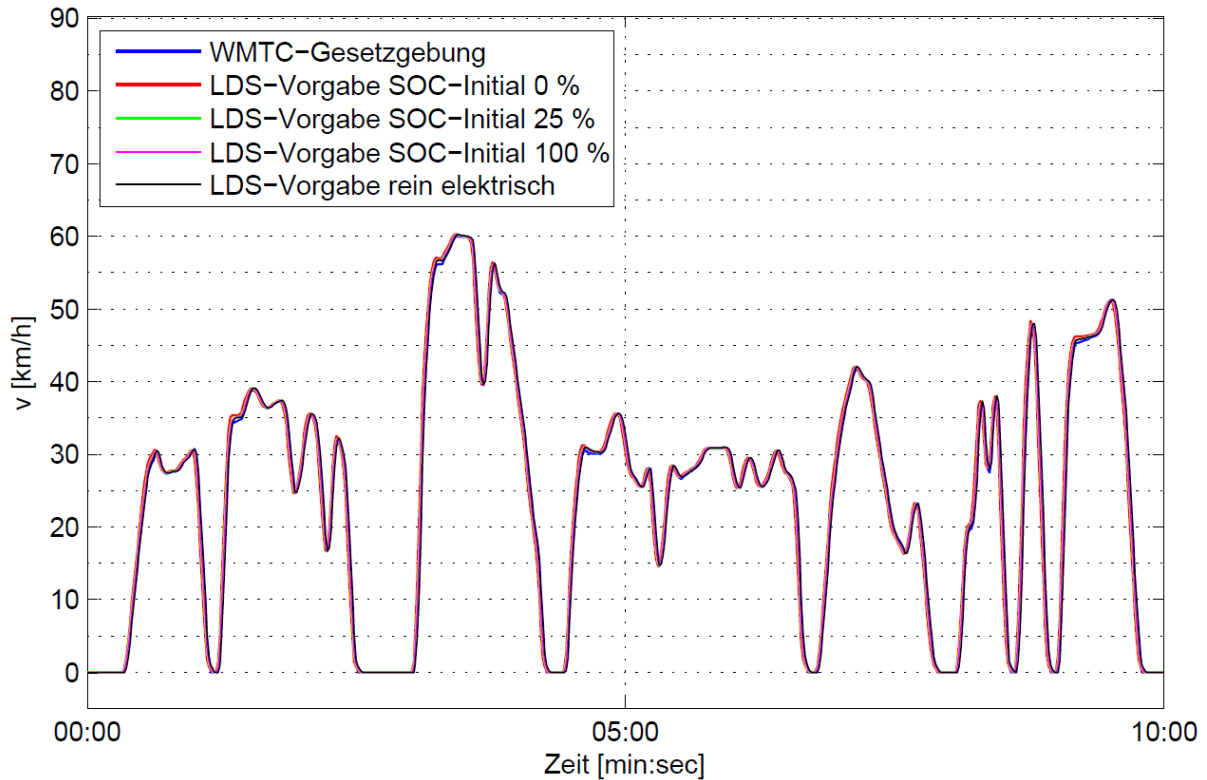


Abbildung 4.7: Geschwindigkeitsverläufe der Soll-Vorgaben aus der WMTC-Gesetzgebung und der LDS für den Rollenprüfstand über den Zyklus-Teil 1

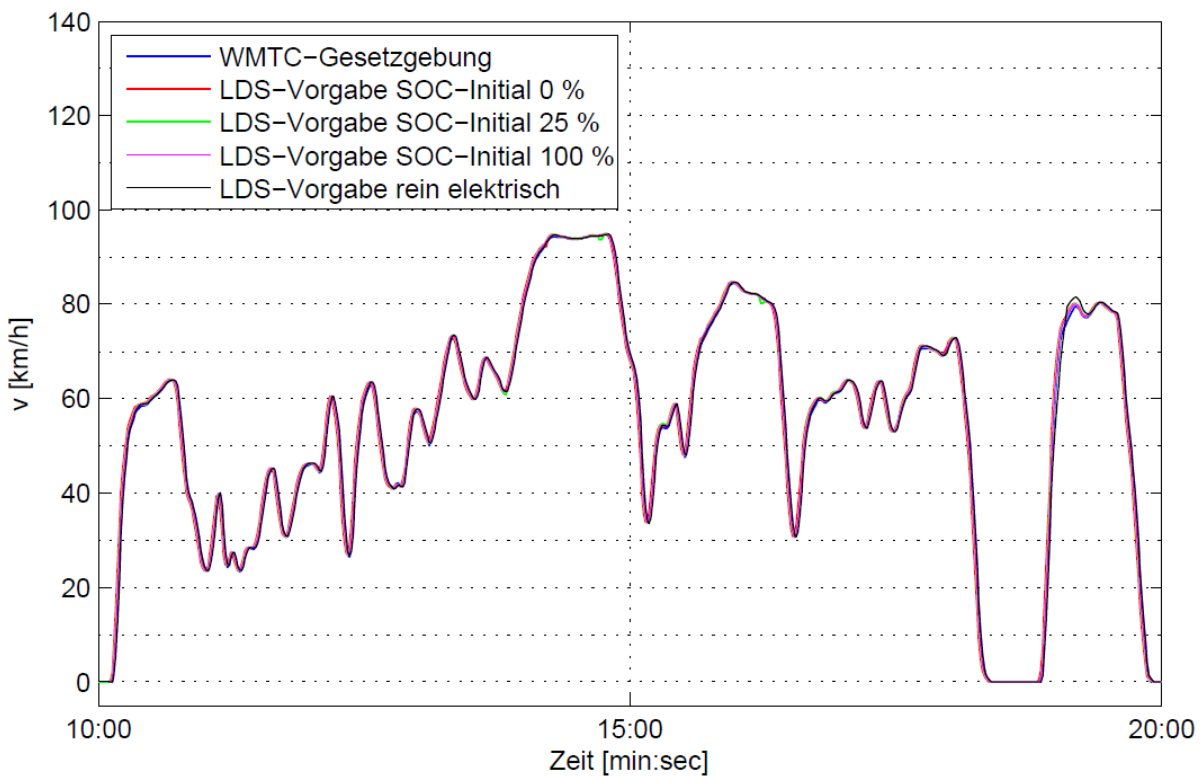


Abbildung 4.8: Geschwindigkeitsverläufe der Soll-Vorgaben aus der WMTC-Gesetzgebung und der LDS für den Rollenprüfstand über den Zyklus-Teil 2

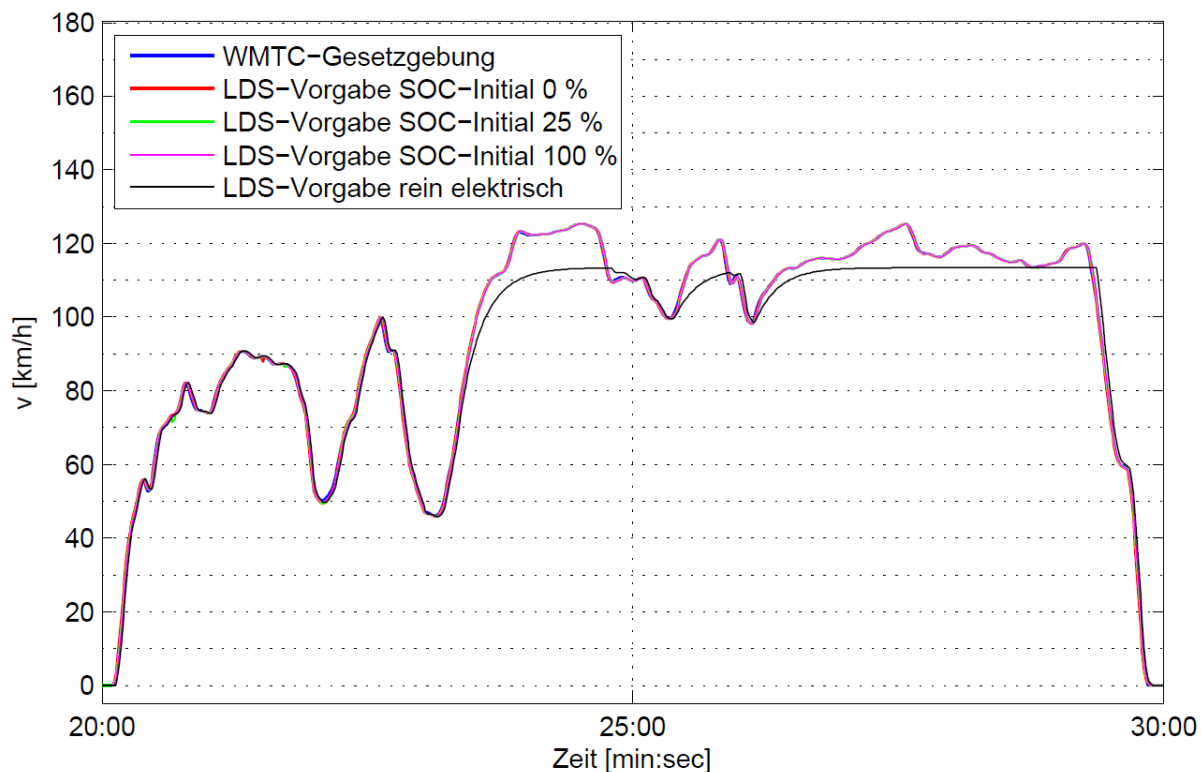


Abbildung 4.9: Geschwindigkeitsverläufe der Soll-Vorgaben aus der WMTC-Gesetzgebung und der LDS für den Rollenprüfstand über den Zyklus-Teil 3

Die Vorgaben für den Prüfstand bzw. die erreichten Geschwindigkeiten der LDS stimmen größtenteils gut mit der WMTC-Vorgabe für die LDS überein. Es fallen in den ersten beiden Phasen nur kleine Unterschiede auf, die meist in Umschaltvorgängen zwischen rein elektrischem und Hybridbetrieb begründet sind. Der größte Unterschied ist im dritten Teil des Zyklus zu erkennen. Hier fällt die maximal erreichbare Geschwindigkeit im reinen E-Modus auf, die sich bei ca. 113,5 km/h ergibt. Im Hybrid-Modus unterstützt hier die VKM zur Erreichung der vorgegebenen Geschwindigkeit.

Der Verlauf der VKM-Aktivierung wird beispielhaft in Abbildung 4.10 für einen markanten Bereich herausgenommen, die weiter in der Beurteilung der Messergebnisse diskutiert werden soll.

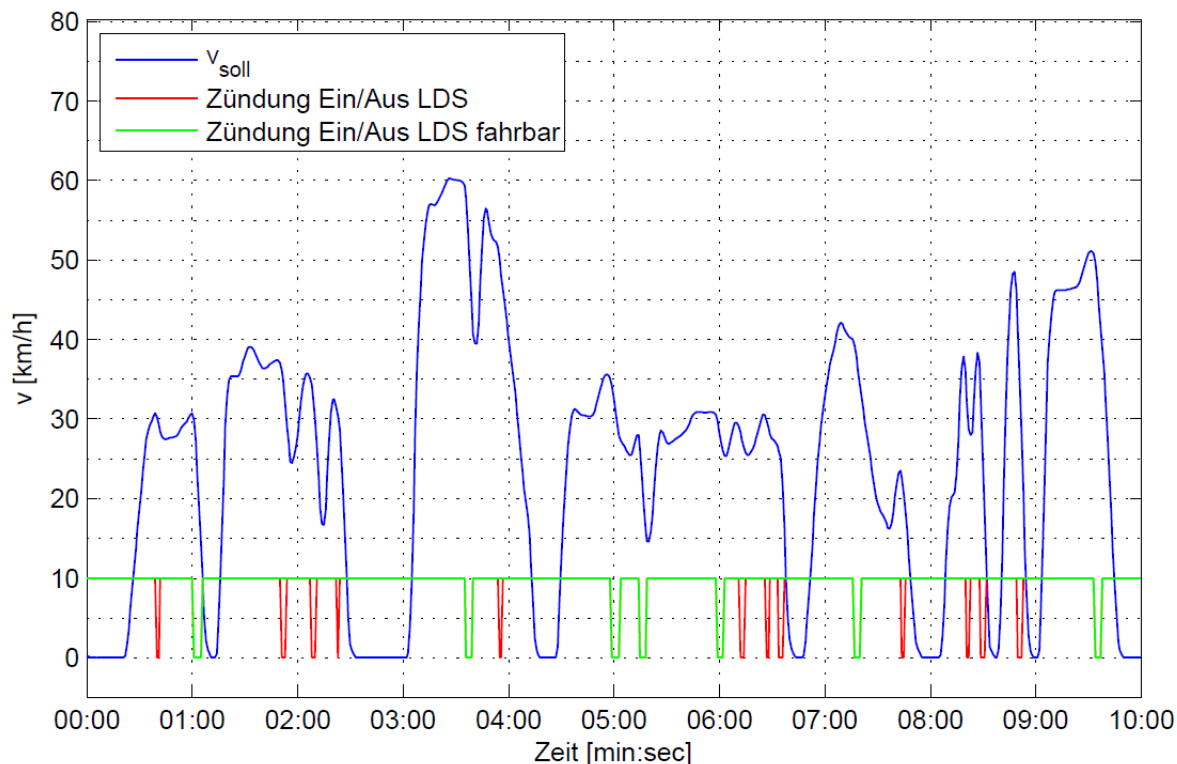


Abbildung 4.10: Geschwindigkeits- und VKM-Aktivitäts-Vorgabe für die Prüfstandrolle, SOC-Startbedingung 0 %, Zyklusteil 1

4.3.3 Messdatenaufbereitung

Die erhaltenen Ergebnisse werden nach dem in Kapitel 3.7.3 erläuterten Gesichtspunkten ausgearbeitet und dargestellt. Komplette Verläufe werden in den Anhang verlegt, um eine übersichtliche Darstellung zu erhalten.

4.3.3.1 Durch den Fahrer realisierte Verläufe im Vergleich zu den Vorgaben

Bei der Auswertung der einzelnen Differenzgeschwindigkeiten der Soll-Vorgaben zu den erreichten Ist-Geschwindigkeiten sind mehrfach Überschreitungen der gesetzmäßig definierten Grenzen entstanden. Als Beispiele werden in Abbildung 4.11 ein schlechtes Ergebnis und in Abbildung 4.12 das beste Ergebnis der Versuchsreihe gezeigt.

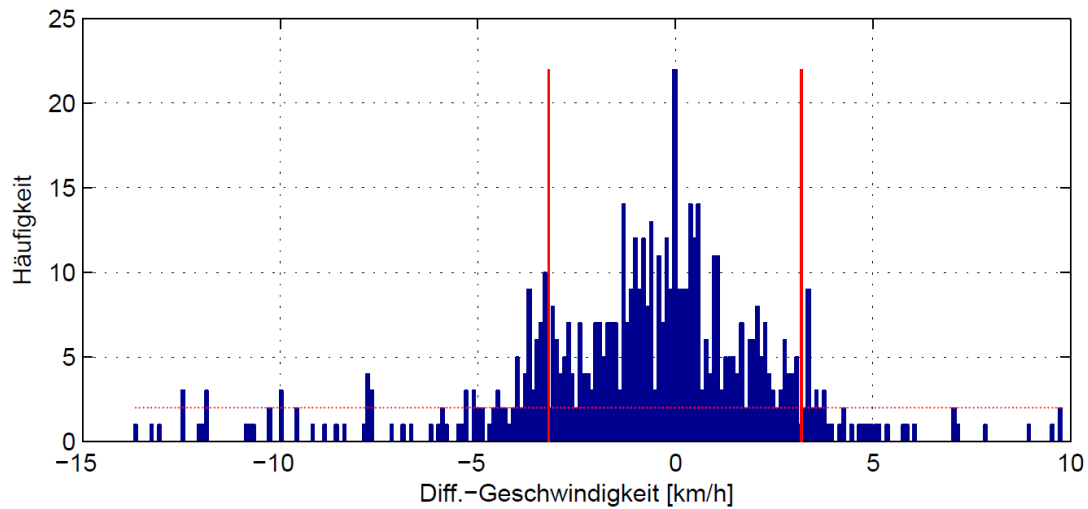


Abbildung 4.11: Häufigkeit an Differenzgeschwindigkeiten der Vorgabe zum Ist-Verlauf am Rollenprüfstand, Zyklusteil 3, SOC-Startbedingung 100 %, warme VKM-Startbedingung

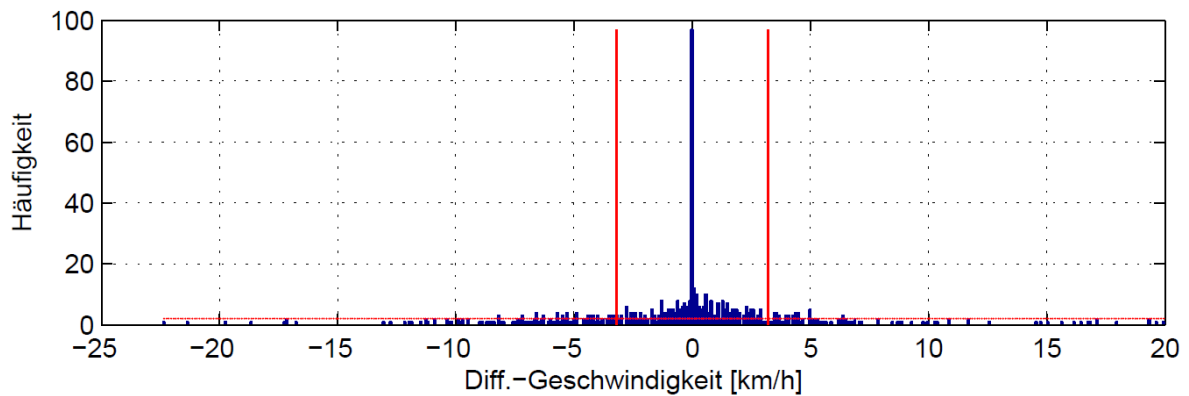


Abbildung 4.12: Häufigkeit an Differenzgeschwindigkeiten der Vorgabe zum Ist-Verlauf am Rollenprüfstand, Zyklusteil 1, SOC-Startbedingung 0 %, warme VKM-Startbedingung

Die Ergebnisse des Gangverlaufs, der Kupplungsbetätigung und der Aktivierung bzw. Deaktivierung der VKM sind in Tabelle 4.6 aufgelistet.

	SOC-Start 0%		SOC-Start 25%		SOC-Start 100%		Rein VKM	
	Kalt	Warm	Kalt	Warm	Kalt	Warm	Kalt	Warm
Größte Gangdifferenz	3	2	4	3	2	2	2	2
Dauer größte Gangdifferenz [s]	1	1	1	2	2	2	2	2
Längste Dauer einer Gangdifferenz [s]	6	10	24	9	7	7	3	4
Längste Kupplungsbetätigungs-Differenz [s]	3	6	3	4	3	3	-	-
Längste Differenz VKM-Aktivierung [s]	4	5	5	4	4	4	-	-

Tabelle 4.6: Differenzen der realisierten Gangverläufe zu den Vorgaben am Rollenprüfstand

Das Anfahren von 0 km/h im reinen E-Betrieb funktionierte bei fast allen Fahrten ohne markante Verzögerungen. Ausnahme bildet die Startbedingung von 100 % im kalten Startzustand der VKM, die in Abbildung 4.13 dargestellt ist. Hier ist eine Verzögerung von 5 Sekunden ersichtlich.

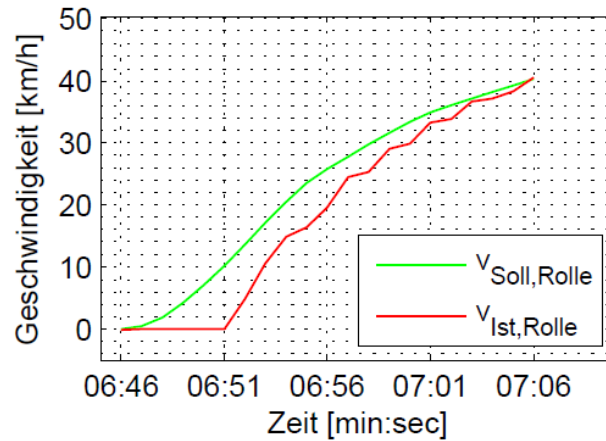


Abbildung 4.13: Geschwindigkeitsverläufe einer Anfahrtsverzögerung im Zuge einer Messfahrt bei SOC-Startbedingung 100 % und Kaltstart.

4.3.3.2 Beurteilungsdaten der LDS und der getätigten Anpassungen

Die erhaltenen Kraftstoffverbräuche über die gefahrenen Versuche werden mit den Daten aus der Simulation miteinander in Tabelle 4.7 verglichen. Die Aufteilung der Verbräuche über die einzelnen Zyklusteile ist im Anhang ersichtlich. Die Simulation kann dabei nur einen warmen Betriebszustand realisieren.

	SOC-Start 0 %		SOC-Start 25 %		SOC-Start 100 %		Rein VKM	
	Kalt	Warm	Kalt	Warm	Kalt	Warm	Kalt	Warm
Simulation [ml/km]	-	39,93	-	29,30	-	13,51	-	-
Rollenprüfstand [ml/km]	34,084	33,175	31,415	30,152	14,185	13,836	46,770	45,259

Tabelle 4.7: Kraftstoffverbräuche der LDS und der Prüfstandmessungen über den gesamten Zyklus und über alle SOC-Startbedingungen

Betrachtet man den Verlauf der Antriebskraft auf der Rolle und die korrigierte Antriebskraft aus der Simulation nach dem Schema in Kapitel 3.7.3.2 im reinen E-Betrieb, so lässt sich der 1. und 2. Teil des Zyklus bei SOC-Startbedingung von 100 % in der Abbildung 4.14 und der Abbildung 4.15 vergleichen. Im 2. Zyklusteil ab Minute 18:54 wird die VKM gestartet.

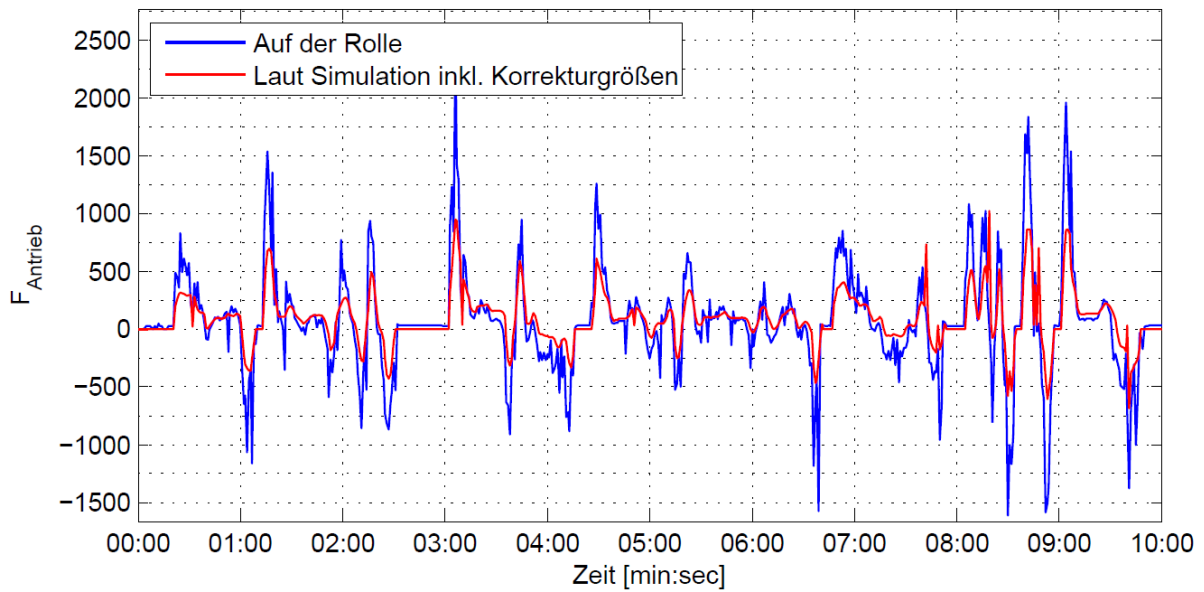


Abbildung 4.14: Antriebskraftvergleich Simulation zum Rollenprüfstand, SOC-Startbedingung 100 %, Zyklusteil 1

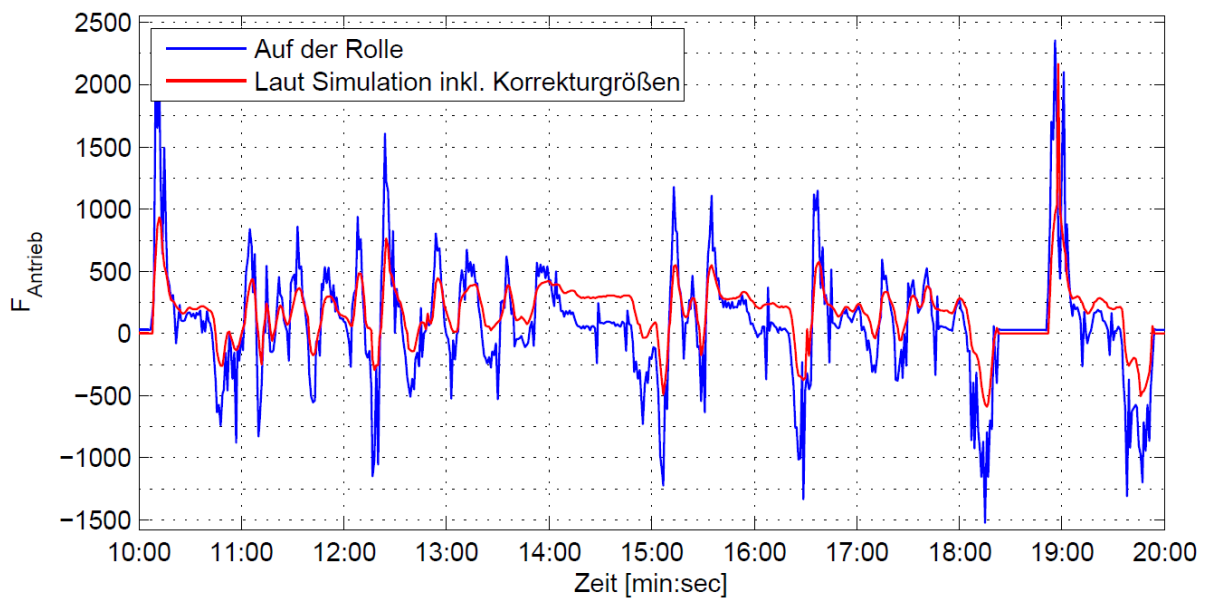


Abbildung 4.15: Antriebskraftvergleich Simulation zum Rollenprüfstand, SOC-Startbedingung 100 %, Zyklusteil 2

4.3.3.3 Beurteilungsdaten der Betriebsstrategie

Nach der Berechnung der Gleichungen (3) und (4) in Kapitel 2.1.5 werden die in Tabelle 4.8 dargestellten Werte berechnet.

	Teil 1	Teil 2	Teil 3	gesamt
CO ₂ [g/km]	36,43	11,59	62,99	42,36
Kraftstoffverbrauch [l/100 km]	1,53	0,53	2,81	1,88

Tabelle 4.8: CO₂-Ausstoß und Kraftstoffverbrauch für ein extern aufladbares Hybrid-Elektrofahrzeug (OVC HEV) mit Betriebsschalter nach [3], Anhang VII

Die Auswertungen nach den Emissionsbestandteilen und Zyklusteilen für die einzelnen SOC-Startbedingungen sind in der Anlage für die Euro 4-Gesetzgebung dargestellt. Ebenfalls wurde der Treibstoffverbrauch nach den Daten des Steuergeräts des Versuchsfahrzeuges und nach der Kohlenstoff-Bilanz gegenübergestellt.

4.4 Beurteilung der Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die erhaltenen Daten aus Kapitel 4.3 analysiert und diskutiert. Vorab wird jedoch kurz auf das dargestellte Offset der gemittelten resultierenden Kraft F_{KMD} in Kapitel 3.6.2.5.1 bei nicht montiertem Fahrzeug auf der Prüfstandrolle eingegangen. In der Anpassung der Prüfstands-Vorgabe werden zur Anpassung durch Zugkraft-Vergleich nicht direkt die von dem DMS-Aufnehmer erhaltenen Daten herangezogen. Es ist jedoch schon zu hinterfragen, wie stark sich dieses Offset im Wesentlichen auf die Regelung der Prüfstandrolle auswirkt. Gehen wir von Spitzenwerten der Antriebskraft während einer Emulations-Fahrt aus, wie sie beispielhaft in Abbildung 4.14 und Abbildung 4.15 dargestellt wird, so erhalten wir Werte teils über 2000 N. Im Verhältnis dazu liegt das Offset von gerundet 20 N bei 1 %. Ebenfalls werden in den folgenden Anpassungs-Schritten der Emulationsmethodik nach dem Zugkraft-Vergleich bestehende Differenzen korrigiert, sodass auf die Darstellung des E-Antriebs in Emulations-Fahrten kein wesentlicher Einfluss zu erwarten ist.

4.4.1 Anpassungsdaten-Ermittlung

Die Anpassungsdaten-Ermittlung ist stark von der Messung bzw. Definition des Widerstands am Hinterrad abhängig. Je nachdem wie genau dieser gemessen und ausgewertet werden kann, hat dies einen Einfluss auf die Anpassung der restlichen Differenzen. Vor allem das ersichtliche Offset der Rückmeldung des DMS-Aufnehmers der Prüfstandrolle ist hier zu berücksichtigen. Die Anpassung der restlichen Differenzen könnte hier vermutlich verringert werden, jedoch konnte in dieser Masterarbeit nicht mehr erörtert werden, wieso diese zweistufig ausfallen muss um ausreichend genaue Resultate zu erreichen. Das erreichte Ergebnis zur Darstellung der E-Maschine des Hybriden durch die Hybrid-Emulation ist ausreichend genau, da die erwarteten Geschwindigkeiten im rein emulierten E-Betrieb auf der Prüfstandrolle auch im dynamischen Betrieb auf wenige km/h Differenz erreicht werden.

4.4.2 Versuchsdurchführung

Bewertet man die Soll-Vorgabe aus der Simulation bzw. der nachgeschalteten Anpassungen, lässt sich aussagen, dass die erkannten Differenzen als relativ klein zu erachten sind und die Verläufe des Hybrid-Konzepts gut den WMTC-Vorgaben folgen. Ausnahme bildet hier die erreichbare Höchstgeschwindigkeit im E-Betrieb. Ausgelegt wurde die E-Maschine nach dem Ziel, einen WMTC-Zyklus rein elektrisch fahren zu können, was aber laut LDS nicht geschafft wird.

Ebenfalls fällt auf, dass die Betriebsstrategie über den Zyklus, wie in Abbildung 4.10 für den 1. Zyklusteil der SOC-Startbedingung von 0 % zeigt, häufig ein kurzes Abstellen der VKM vorgibt. Im Zuge der Fahrbarkeitsanpassung des VKM-Zündungssignals werden dabei viele dieser kurzen VKM-Kills herausgefiltert. Hier ist zu hinterfragen, inwiefern dies hinsichtlich des Ziels eines minimalen Kraftstoffverbrauchs real Sinn macht. Vor allem in kalten Phasen des VKM-Betriebszustands sind solche kurzen Sprünge hinsichtlich der Abgasemissionen kritisch zu betrachten.

4.4.3 Messdatenaufbereitung

Hinsichtlich der Beurteilung der durch den Fahrer realisierten Verläufe im Vergleich zu dessen Vorgaben kann gesagt werden, dass die gesetzlichen Abweichungstoleranzen nicht eingehalten wurden. Die Geschwindigkeitsdifferenzen liegen häufig über der vorgegebenen maximalen Differenz laut Gesetzgebung (in der Abbildung 4.11 und der Abbildung 4.12 mit einem senkrechten roten Strich gekennzeichnet). Auch die Anzahl bzw. auch die Dauer (Auflösung der Daten beträgt 1 Sekunde) der Differenzen über den erlaubten Werten überschreiten oft 2 Sekunden. Es lag keine einzige Fahrt bzw. kein einziger Zyklusteil der Fahrten unter den vorgegebenen Grenzen. Als Begründung dieser Situation lässt sich die komplexe Aufgabenstellung für den Fahrer durch die Hybrid-Emulation und die geringe Erfahrung des Fahrers dieser Masterarbeit finden. Hier ist mit etwas Übung mit Sicherheit eine wesentliche Verbesserung erreichbar.

Dasselbe gilt für die maximalen Gangdifferenzen und die am längsten andauernden Gangdifferenzen. Die bei einer SOC-Startbedingung von 25 % auftretende längste Differenzdauer lässt auf das Übersehen eines Schaltpunktes im Zuge der Messfahrt schließen. Die Differenzen der Kupplungsbetätigung und VKM-Aktivierung lassen sich mit etwas Übung auf maximal 2 Sekunden reduzieren. Hier spielt aber auch der Gedanke des Antriebsstrangschutzes des Versuchsfahrzeuges auf dem Prüfstand mit hinein. Genauer gesagt wird versucht, nach der Gaswegnahme kurz zu warten, bis die Leerlaufdrehzahl erreicht wurde, bevor man den Motor abstellt.

Die Ursache der in Abbildung 4.13 gezeigten Anfahrtsverzögerung im rein emulierten E-Betrieb kann nicht durch den Fahrer beeinflusst werden. Sie trat über die getätigten Fahrversuche nur einmal auf und ist durch die internen Regelungen der E-Maschine zu begründen. Die getätigte Anfahrtsanpassung reichte in diesem einen Fall nicht aus.

Die Kraftstoffverbräuche sind in Tabelle 4.7 für den jeweils gesamten Zyklus und in der Tabelle 9.3, Tabelle 9.4, Tabelle 9.5 und Tabelle 9.6 für die einzelnen Zyklusteile in ml/km dargestellt. Da die Simulation die VKM nur im warmen Betriebszustand simuliert, können zur Beurteilung der LDS nur die Messwerte aus den Warmstart-Fahrten herangezogen werden. Bei der SOC-Startbedingung von 0 % liegen die Abweichungen weit über 2 %, bei den Startbedingungen 25 und 100 % knapp über 2 % und sind somit nicht ausreichend klein. Hier ist zu untersuchen, wie weit die Werte durch die Emulation bzw. die Übergabeanpassungen

beeinflusst worden sind, bevor weiter auf die LDS-Berechnungen eingegangen wird. Im Vergleich der einzelnen Hybrid-Fahrten zum reinen VKM-Betrieb, liegen die Werte des VKM-Betriebs immer deutlich höher. Die Differenzen zwischen den Werten der Simulation zum Prüfstand korrelieren beim Vergleich der einzelnen Zyklusteile mit dem Leistungsbedarf der Bereiche. Bei höherem Bedarf im dritten Teil sind durchwegs auch höhere Differenzen zu finden. Weiter ist in diesen Teilen des Zyklus ein erhöhter VKM-Einsatz gegeben, da die SOC-Werte bereits niedrig sind und um die maximalen Geschwindigkeiten zu erreichen.

Der Antriebskraftvergleich der Simulation inkl. der getätigten Anpassungen mit der Prüfstandsituation zeigt Unterschiede in den dynamischen Ausschlägen. Die Verlaufstendenzen stimmen aber gut überein. Einzig im 2. Zyklusteil sind zwei Plateaus mit einer ersichtlichen Differenz erkennbar.

Beurteilt man den CO₂-Ausstoß und den Kraftstoffverbrauch nach der Berechnung laut Gesetzgebung für das Hybridkonzept (Gleichungen (3) und (4)), so erkennt man wesentlich geringere Werte im 2. Teil des Zyklus. Aber auch der über den gesamten Zyklus betrachtete Kraftstoffverbrauch von 1,9 l/100 km ist als gering zu erachten. Die Vergleichswerte aus Tabelle 9.6 für den reinen VKM-Betrieb liegen in allen drei Zyklusteilen bei über 4 l/100 km. Betrachtet man die einzelnen Verbräuche der verschiedenen Messfahrten im Kapitel 9.3, erreichen die Verbrauchswerte meist im 3. Zyklusteil bei geringen SOC-Startwerten ähnliche Werte wie im reinen VKM-Betrieb. Dies gilt auch für den SOC-Startwert von 0% im 1. Zyklusteil (Anfahren bereits von Beginn an mit VKM). Der CO₂-Ausstoß nach Gleichung (4) liegt im gesamten Bereich mit 30,65 g/km auch wesentlich geringer als der VKM-Vergleichswert von 113,6 g/km.

Werden nun die Emissionsbestandteile über die einzelnen Hybrid-Messfahrten betrachtet, so fällt auf, dass im gewichteten Zustand die Werte vor allem für NO_x die erlaubten Grenzwerte laut Euro 4-Gesetzgebung überschreiten. Ausnahme sind die Fahrten mit SOC-Startbedingung 100 %. Die Startbedingung von 0 % SOC zeigt auch 2 von 3 Überschreitungen der Grenzwerte. Die Werte liegen höher als bei den anderen beiden SOC-Startbedingungen. Dies lässt sich mit dem noch relativ kalten Motorzustand im 3. Zyklusteil bei hoher Belastung in Verbindung bringen.

Zusammenfassend wirken die Auswertungen nach der Gesetzgebung für das verwendete Hybrid-Konzept hinsichtlich Verbrauch und CO₂-Ausstoß vielversprechend. Betrachtet man die einzelnen Emissionen, ist die Betriebsstrategie in der aktuellen Ausführung zu hinterfragen.

4.4.4 Beobachtete Variablenverzögerung während der Emulationsentwicklung

Im Zuge der Entwicklung der Emulations-Methodik vielen die Verzögerungen der Vorgaben von der Rollensteuerung (bzw. der Parametertabelle als Vorgaben-Eingang am Prüfstand) über die Prüfstandrolle und retour durch die erhaltenen Messdaten, bis hin zum Messdatenschrieb. Diese stellt eine wesentliche Einflussgröße auf die Emulation dar, weshalb in Abbildung 4.16 überblickmäßig der Übergabeweg des zu emulierenden E-Maschinenmoments dargestellt ist. In der Prüfstandsteuerung wird die Steigungsvorgabe nach Kapitel 3.6.4.1.1 hinsichtlich des möglichen Datenengpasses aufbereitet. Nach der Umsetzung der Vorgabe durch die Rollensteuerung über die E-Maschine, kommt über die Rollensteuerung die Rückmeldung der realisierten Steigung an die Prüfstandsteuerung.

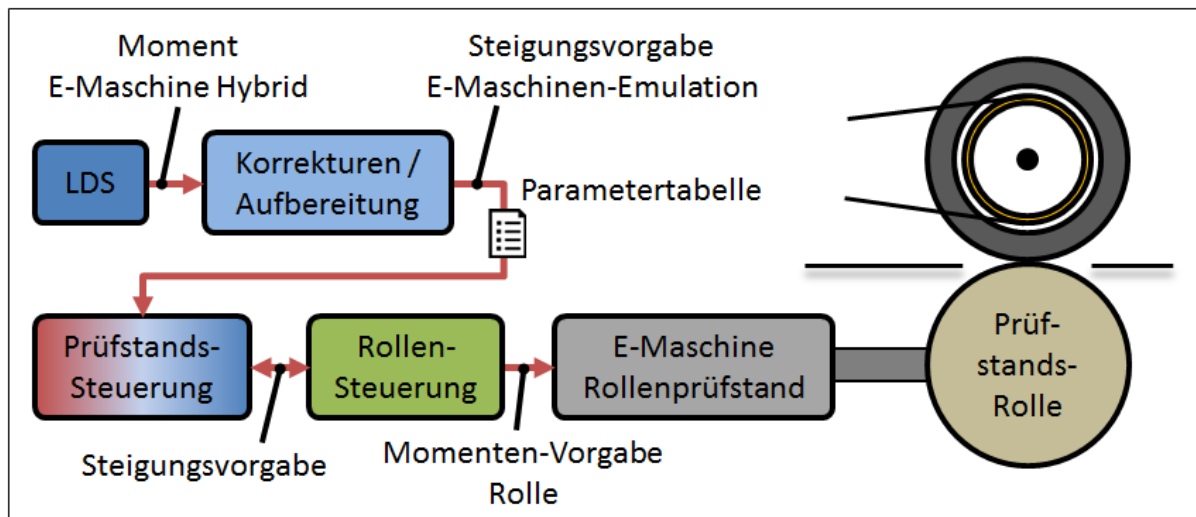


Abbildung 4.16: Vereinfachte Darstellung des Übergabewegs der Steigungsvorgabe hinsichtlich E-Maschinen-Emulation des Hybrid-Konzeptes

Abbildung 4.17 zeigt im Verhältnis zur Vorgabe durch die Parametertabelle die Verläufe für die Steigungs-Weitergabe an die Rollensteuerung und die Rückmeldung dieser an die Prüfstandsteuerung. Die Aufbereitung hinsichtlich Datenübergabe an die Rollensteuerung verursacht eine leichte Verzögerung, die aber teils gegen null geht. Wesentlich größer und stärker schwankend sind die Verzögerungen des restlichen Weges bis zurück zur Prüfstandsteuerung. Leider konnte im Rahmen dieser Masterarbeit nicht mehr festgestellt werden, welche Teile des restlichen Übergabeweges für die Verzögerungen verantwortlich sind und wie diese Beeinflusst werden.

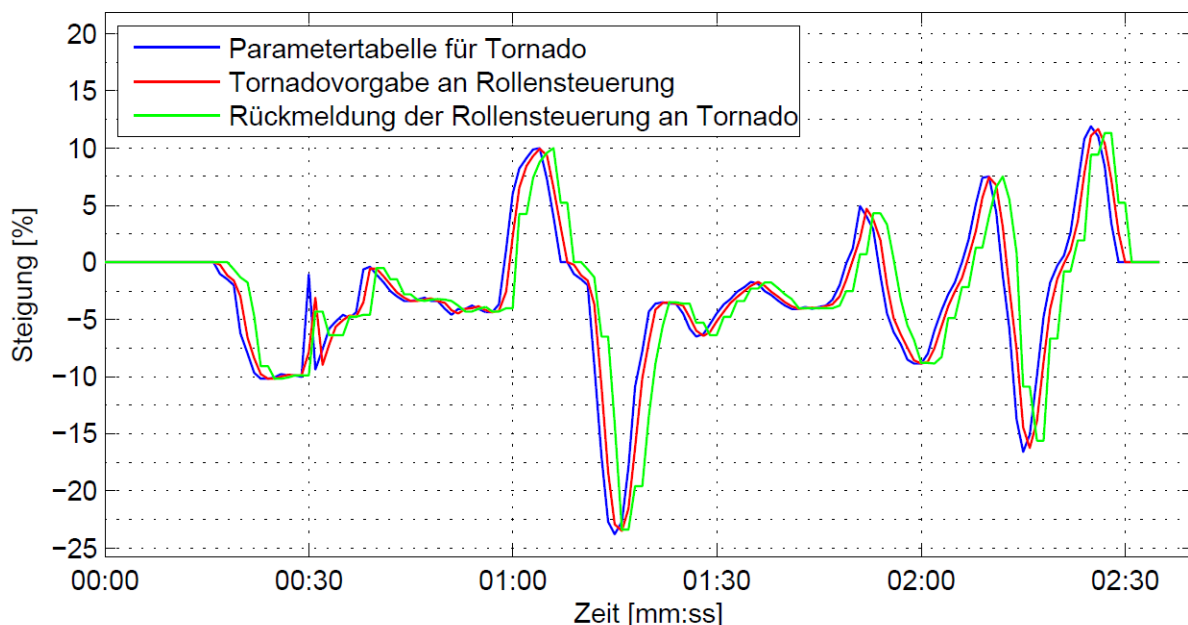


Abbildung 4.17: Steigungsverläufe eines rein elektrisch emulierten WMTC in verschiedenen Punkten des Übergabewegs von der Parametertabelle auf die Rollensteuerung

5 Ausblick und mögliche Weiterentwicklungen

Es kann grundlegend gesagt werden, dass die Anpassungen der LDS-Vorgaben für den Rollenprüfstand hinsichtlich der möglichen Realisierung durch einen Fahrer gut funktionieren. Die Realisierung selbst sollte jedoch durch einen erfahrenen Fahrer erfolgen, der den erhöhten Anforderungen durch reduzierte Motorlasten, Wechsel der Antriebsarten und schnellere Vorgabegrößenwechsel ausreichend gut folgen kann. Der Abgleich der Messergebnisse mit der LDS hat gezeigt, dass ein noch bestehendes Verbesserungspotential existiert, das einerseits in den Anpassungen der Übergabegrößen, andererseits auch in der LDS zu suchen ist. Hier sind auch noch die diskutierten Die Anpassungen müssten hinsichtlich der Anpassung der restlichen Differenz verfeinert und die LDS bezüglich der verwendeten Betriebsstrategie hinterfragt werden. Ebenfalls ist die Messung des Widerstands am Hinterrad zu verfeinern, die einen wesentlichen Einfluss auf die weiteren Anpassungsmaßnahmen der Daten hat.

Eine Möglichkeit der Weiterentwicklung der Messdatenaufbereitung bzw. deren Verfeinerung wäre eine Berücksichtigung der erhaltenen Geschwindigkeitsverläufe vom Prüfstand in einer erneuten Simulation. Dadurch könnten Fahrfehler kompensiert werden.

Die bestehende LDS und deren Betriebsstrategie würde auch die Möglichkeit bieten, die Gangverläufe nach der Homologationsgesetzgebung zu gestalten. Die Strategie würde daraufhin die restlichen Variablen mit dem Ziel des minimalen Kraftstoffverbrauchs angleichen. Eine solche Erweiterung der Versuchsmatrix würde eine weitere Beurteilung der Betriebsstrategie erlauben.

Betrachtet man allgemein das Ziel der Darstellung des Hybriden auf der Prüfstandrolle, ist sicher auch die Variante des Angleichs der LDS-Parameter an die Prüfstandparameter von Interesse. Hier würden die in Kapitel 3.3 zur Verfügung stehenden Wege möglich sein, ohne die LDS wesentlich in der Struktur zu verändern.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: WMTC Stufe 3 für Fahrzeuge der Kategorien L3e, L4e, L5e-A, L7e-A, L7e-B und L7e-C [5]	7
Abbildung 2.2: Vereinfachte Darstellung der wirkenden Kräfte eines Fahrzeuges unter Bewegung in seine Längsrichtung [7].....	12
Abbildung 2.3: Darstellung der Widerstände anhand eines Beispiels aus der längsdynamischen Betrachtung.....	14
Abbildung 3.1: Grundlegende Zieldefinition der Hybrid-Emulation.....	16
Abbildung 3.2: Grundlegendes Ziel der Hybrid-Emulation.....	17
Abbildung 3.3: Vereinfachte Darstellung der Prinzipien hinter der Steigungsberechnung der E-Moment-Emulation.....	17
Abbildung 3.4: BMW F 800 GT [11]	19
Abbildung 3.5: Antriebsstrangaufbau der hybridisierten-F 800 GT [12]	20
Abbildung 3.6: Einfluss von Energiespeichervariationen bei konstanter E-Maschinenleistung auf den Kraftstoffverbrauch. [12].....	21
Abbildung 3.7: Vereinfachte Darstellung der Gesamtfahrzeugsimulation	23
Abbildung 3.8: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge Virtueller Fahrer/PID-Regler .	24
Abbildung 3.9: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge Hybrid-Control-Unit	25
Abbildung 3.10: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge System-Architektur	25
Abbildung 3.11: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge Antriebsstrang.....	27
Abbildung 3.12: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge Reifen.....	27
Abbildung 3.13: Vereinfachte Darstellung Ein- und Ausgänge Fahrzeugdynamik.....	28
Abbildung 3.14: Vereinfachte Darstellung der Ablaufstruktur der zu Grunde liegenden LDS	29
Abbildung 3.15: Schematische Struktur-Darstellung des Rollenprüfstandes und der verwendeten Messsysteme	30
Abbildung 3.16: Vereinfachte Darstellung der Prüfstandrolle mit Antrieb, Bremse und Kraftmessung	31
Abbildung 3.17: AVL AMA i60 [17]	32
Abbildung 3.18: Vector VN1630A [19]	33
Abbildung 3.19: Allgemeine Darstellung und Frontansicht ETAS ES63x.1 (beispielhaft das ES636.1) mit Rückansicht ETAS ES631.1 [21]	34
Abbildung 3.20: Foto Saito ProCharger XL mit der Batterieklemmung	35
Abbildung 3.21: Konfiguration Tornado Runtime für die Hybrid-Emulation während einer Messfahrt.....	37
Abbildung 3.22: Validierungswege der verwendeten LDS	38
Abbildung 3.23: Möglichkeiten des Validierungseingriffs in die LDS	39
Abbildung 3.24: v-Differenz Soll-Vorgabe laut Simulation zu Ist-Zustand auf der Prüfstandrolle nach einfacher Steigungsvorgabe	41

Abbildung 3.25: Vereinfachte Darstellung der grundlegenden Ablaufstruktur.....	42
Abbildung 3.26: Genauere Darstellung der allgemeinen Ablaufstruktur	42
Abbildung 3.27: Allgemeine Darstellung der Anpassung an Übergabegrößen von der LDS an die Prüfstandrolle	43
Abbildung 3.28: Vereinfachte Darstellung des Antriebsstrangs der E-Maschine auf die Prüfstandrolle	43
Abbildung 3.29: Widerstandskräfte über die stationäre Geschwindigkeit laut dem Einspurmodell der Längsdynamik	45
Abbildung 3.30: Widerstandskraft über die Geschwindigkeit laut Homologations-Vorschrift für das Hybrid-Konzept.....	46
Abbildung 3.31: Vergleich der Widerstandskräfte laut der Homologationsgesetzgebung zur Berechnung nach dem Einspurmodell aus der Längsdynamik	47
Abbildung 3.32: Methodik zur Zugkraft-Anpassung zwischen LDS und Homologationsgesetzgebung	49
Abbildung 3.33: Vereinfachte Darstellung der auftretenden Kräfte aus dem Abstützmoment des Antriebs auf der Rolle im stationär bewegten Zustand.....	50
Abbildung 3.34: Vereinfachte Darstellung des Anpassungs-Prozesses aufgrund resultierender Differenzgeschwindigkeiten.....	54
Abbildung 3.35: Gangverlauf laut Simulation und fahrbarkeitsoptimiert über gesamten rein elektrischen WMTC	57
Abbildung 3.36: Geschwindigkeits- und Steigungsvorgaben-Verläufe hinsichtlich Anfahrtsverzögerung und deren Lösung	58
Abbildung 3.37: Vereinfachte Darstellung der praktisch realisierten allgemeinen Ablaufstruktur	60
Abbildung 3.38: Überblick der Methodik und ihrer Phasen	61
Abbildung 3.39: Geschwindigkeitsverläufe des Zyklus in der Anpassungsdaten-Ermittlung der LDS-Vorgabe und Prüfstandvorgabe	62
Abbildung 3.40: Vereinfachte Darstellung der Phase der Anpassungsdaten-Ermittlung	63
Abbildung 3.41: Vereinfachte Darstellung der Phase der Versuchsdurchführung	64
Abbildung 3.42: Vereinfachte Darstellung der Steigungsanpassung auf Basis resultierende v-Differenz.....	66
Abbildung 3.43: Nötige Gefälle-Vorgabe zur Erreichung stationärer Geschwindigkeiten der LDS und der Prüfstandrolle.....	67
Abbildung 4.1: Prüfstandaufbau des Versuchsfahrzeuges und der verbauten Messtechnik....	70
Abbildung 4.2: Fahrerleitsystem für eine aktive Messfahrt	71
Abbildung 4.3: Geschwindigkeitsverläufe der Ausrollversuche aus der Anpassungsdaten-Ermittlung.....	72
Abbildung 4.4: Ausgewerteter Widerstandsverlauf am Hinterrad über die Geschwindigkeit auf Basis der Ausrollversuche.....	73
Abbildung 4.5: Geschwindigkeitsverläufe der Erhebung von Δv_1 der Anpassungsdaten-Ermittlung.....	74

Abbildung 4.6: Geschwindigkeitsverläufe der Erhebung von Δv_2 der Anpassungsdaten-Ermittlung.....	75
Abbildung 4.7: Geschwindigkeitsverläufe der Soll-Vorgaben aus der WMTC-Gesetzgebung und der LDS für den Rollenprüfstand über den Zyklus-Teil 1	76
Abbildung 4.8: Geschwindigkeitsverläufe der Soll-Vorgaben aus der WMTC-Gesetzgebung und der LDS für den Rollenprüfstand über den Zyklus-Teil 2	76
Abbildung 4.9: Geschwindigkeitsverläufe der Soll-Vorgaben aus der WMTC-Gesetzgebung und der LDS für den Rollenprüfstand über den Zyklus-Teil 3	77
Abbildung 4.10: Geschwindigkeits- und VKM-Aktivitäts-Vorgabe für die Prüfstandrolle, SOC-Startbedingung 0 %, Zyklusteil 1	78
Abbildung 4.11: Häufigkeit an Differenzgeschwindigkeiten der Vorgabe zum Ist-Verlauf am Rollenprüfstand, Zyklusteil 3, SOC-Startbedingung 100 %, warme VKM-Startbedingung	79
Abbildung 4.12: Häufigkeit an Differenzgeschwindigkeiten der Vorgabe zum Ist-Verlauf am Rollenprüfstand, Zyklusteil 1, SOC-Startbedingung 0 %, warme VKM-Startbedingung.....	79
Abbildung 4.13: Geschwindigkeitsverläufe einer Anfahrtsverzögerung im Zuge einer Messfahrt bei SOC-Startbedingung 100 % und Kaltstart.	80
Abbildung 4.14: Antriebskraftvergleich Simulation zum Rollenprüfstand, SOC-Startbedingung 100 %, Zyklusteil 1	81
Abbildung 4.15: Antriebskraftvergleich Simulation zum Rollenprüfstand, SOC-Startbedingung 100 %, Zyklusteil 2	81
Abbildung 4.16: Vereinfachte Darstellung des Übergabewegs der Steigungsvorgabe hinsichtlich E-Maschinen-Emulation des Hybrid-Konzeptes	85
Abbildung 4.17: Steigungsverläufe eines rein elektrisch emulierten WMTC in verschiedenen Punkten des Übergabewegs von der Parametertabelle auf die Rollensteuerung	85

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:Relevanter Fahrzeugtyp mit Unterklassen nach Verordnung (EU) Nr. 168/2013 [3]	5
Tabelle 2.2: Kriterien der Unterkategorisierung der Klasse L3 [4]	6
Tabelle 2.3: Widerstandparameter laut Homologationsvorschrift für die Kategorie L für das Versuchsfahrzeug und die Hybridkonfiguration. [2]	7
Tabelle 2.4: Gewichtungsfaktoren für Euro 5 der Klassen L3e und L4e [3]	9
Tabelle 2.5: Bezugstabelle zur Bestimmung von Zustand A oder B in Abhängigkeit der verschiedenen Konzepte von Hybridfahrzeugen und der Stellung des Hybrid-Betriebsartenstellers [4].....	10
Tabelle 2.6: Emissionsgrenzwerte für Kategorie L3e-Fahrzeuge der Unterkategorie 3-2 der Regelstufe Euro 4	11
Tabelle 2.7: Emissionsgrenzwerte für Kategorie L3e-Fahrzeuge der Unterkategorie 3-2 der Regelstufe Euro 5	11
Tabelle 2.8:Variablendefinition der Widerstandsbetrachtungen in der Längsdynamik eines Fahrzeuges [7]	12
Tabelle 3.1: Eingangparameter für die Prüfstandsteuerung	40
Tabelle 3.2: Ausgangparameter der LDS für die Hybrid-Emulation	40
Tabelle 3.3: In der zugrunde liegenden LDS verwendete Parameter zur Widerstandsberechnung des Dynamik-Blocks.....	45
Tabelle 3.4: Definierte Konstanten zur Widerstandsdarstellung laut Homologationsvorschrift für die Fahrzeugkategorie L	46
Tabelle 3.5: Mittelwerte des DMS-Aufnehmers bei montiertem und nichtmontiertem Sekundärriemen des Versuchsfahrzeugs für stationäre Geschwindigkeiten über je 2 Messungen.....	51
Tabelle 3.6: Mittelwerte des DMS-Aufnehmers für stationäre Geschwindigkeiten nach Gefällevorgabe ohne Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand.....	51
Tabelle 3.7: Zur Auswertung des Ausrollversuches herangezogene Variablen.....	52
Tabelle 3.8: Möglichkeiten der Ganganzeige im Fahrerleitsystem von Tornado (Version 3.3) [22]	56
Tabelle 3.9: Umwandlungsvorgabe der Gangzahl und des Kupplungszustandes für das Fahrerleitsystem	56
Tabelle 4.1: Realisierte Versuchsmatrix im Zuge der Versuchsdurchführung	68
Tabelle 4.2: Definition der wählbaren Simulationsparameter und -Vorgaben für die am Prüfstand durchgeführte Anpassungsdaten-Ermittlung und Versuchsdurchführung.....	69
Tabelle 4.3: Geschwindigkeiten Erhebung Δv_1 der Anpassungsdaten-Ermittlung	73
Tabelle 4.4: Geschwindigkeiten Erhebung Δv_2 der Anpassungsdaten-Ermittlung	74
Tabelle 4.5: Geschwindigkeiten Erhebung finales Δv der Anpassungsdaten-Ermittlung.....	75
Tabelle 4.6: Differenzen der realisierten Gangverläufe zu den Vorgaben am Rollenprüfstand	79

Tabelle 4.7: Kraftstoffverbräuche der LDS und der Prüfstandmessungen über den gesamten Zyklus und über alle SOC-Startbedingungen.....	80
Tabelle 4.8: CO ₂ -Ausstoß und Kraftstoffverbrauch für ein extern aufladbares Hybrid-Elektrofahrzeug (OVC HEV) mit Betriebsschalter nach [3], Anhang VII	82
Tabelle 9.1: Technische Daten BMW F 800 GT	95
Tabelle 9.2: Bedatungsparameter und -größen von Tornado Designer für die getätigten Messfahrten	96
Tabelle 9.3: Kraftstoffverbräuche SOC-Startbedingung 0 %	97
Tabelle 9.4: Kraftstoffverbräuche SOC-Startbedingung 25 %	97
Tabelle 9.5: Kraftstoffverbräuche SOC-Startbedingung 100 %	97
Tabelle 9.6: Kraftstoffverbräuche reiner VKM-Betrieb	97
Tabelle 9.7: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 0 % und Kaltstart	98
Tabelle 9.8: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 0 % und Kaltstart...	98
Tabelle 9.9: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 0 % und Kaltstart	98
Tabelle 9.10: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 0 % und Warmstart.....	98
Tabelle 9.11: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 0 % und Warmstart	99
Tabelle 9.12: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 0 % und Warmstart	99
Tabelle 9.13: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 25 % und Kaltstart	99
Tabelle 9.14: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 25 % und Kaltstart	99
Tabelle 9.15: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 25 % und Kaltstart	100
Tabelle 9.16: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 25 % und Warmstart.....	100
Tabelle 9.17: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 25 % und Warmstart	100
Tabelle 9.18: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 25 % und Warmstart	100
Tabelle 9.19: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 100 % und Kaltstart	101
Tabelle 9.20: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 100 % und Kaltstart	101
Tabelle 9.21: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 100 % und Kaltstart	101
Tabelle 9.22: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 100 % und Warmstart.....	101
Tabelle 9.23: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km, SOC-Start 100 % und Warmstart	102
Tabelle 9.24: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 100 % und Warmstart	102
Tabelle 9.25: Emissionsauswertung in mg/km für reinen VKM-Betrieb und Kaltstart.....	102
Tabelle 9.26: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km, reiner VKM-Betrieb und Kaltstart	102
Tabelle 9.27: Treibstoffverbrauchsauswertung für reinen VKM-Betrieb und Kaltstart	103
Tabelle 9.28: Emissionsauswertung in mg/km für reinen VKM-Betrieb und Warmstart	103

Tabelle 9.29: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km, reiner VKM-Betrieb, Warmstart	103
Tabelle 9.30: Treibstoffverbrauchsauswertung für reinen VKM-Betrieb und Warmstart.....	103

8 Literatur

- [1] E. Martens, “CVS Anlage für Zweiräder und Kleinmotoren,” Technische Universität Graz, 2017.
- [2] European Parliament and the Council with regard to environmental and propulsion unit performance requirements, *Deligierte Verordnung (EU) Nr. 134/2014 Der Kommission vom 16. Dezember 2013*. 2013.
- [3] Das Europäisches Parlament und der Rat der europäischen Union, *Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Jänner 2013*. 2013.
- [4] P. W. Rieger, C. Zinner, S. Schmidt, and S. Hausberger, “Analysis of Conventional Motorcycles with the Focus on Hybridization,” *SAE Int.*, no. SAE Technical Paper 2016-32-0091, p. 16, 2016.
- [5] F. Steflitsch, “Literature Research in the Field of Two-Wheeler- , Power- Sport- and Small Engines Graz University of Technology,” Technische Universität Graz, 2017.
- [6] H. Tschöke Hrsg., *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs*. Springer Vieweg, 2015.
- [7] MathWorks, “Simulink.” MathWorks, 2013.
- [8] S. Breuer and A. Rohrbach-Kerl, *Fahrzeugdynamik - Mechanik des bewegten Fahrzeuges*. Springer Vieweg, 2015.
- [9] M. Mitschke and H. Wallentowitz, *Dynamik_der_Kraftfahrzeuge.pdf*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [10] P. Rieger, “Ein methodischer Ansatz für die Integration eines thermischen Modells in eine Gesamtfahrzeugsimulation Paul Rieger,” Technische Universität Graz, 2013.
- [11] BMW Austria Gesellschaft m.b.H., “www.bmw-motorrad.at,” 2018. [Online]. Available: <https://www.bmw-motorrad.at>. [Accessed: 06-Aug-2018].
- [12] P. Rieger *et al.*, “Comparison of Optimal & Real-time Operation Strategy for a Hybrid Electric Motorcycle,” *SAE Int.*, no. SAE Technical Paper 2017-32-0074, p. 15, 2017.
- [13] B. Schweighofer, H. Wegleiter, M. Zisser, P. Rieger, C. Zinner, and S. Schmidt, “Assessment of Minimum Fuel Consumption Operation Strategy for Hybrid Powersport Drive-Trains by Means of Dynamic Programming Method,” *SAE Int.*, no. SAE Technical Paper 2016-32-0015, pp. 1–9, 2016.
- [14] K. Reif, *Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe*, 1. Auflage. 2010.
- [15] AVL-Zöllner GmbH, “Technische Spezifikation TS PR 0274 - AVL-ZÖLLNER Fahrzeug-Rollenprüfstands-System für Abgasmessung an Motorrädern - Typ RPL 508 / 11 S 3 M 1,7 / GPM 40,” 1998.
- [16] H. Knapp, “Konstruktion und Aufbau einer CVS-Anlage,” Technische Universität Graz, 1990.
- [17] “AVL AMA i60, User’s Guide Gerätebeschreibung der Abgasmessanlage,” AT25190, Rev. 02, 2008.
- [18] J. Hiesmayr, “Experimental Investigation and Simulation of Gaseous Emissions and Fuel Consumption in Real World Driving Scenarios for Two-Wheeler-Applications,” 2019.
- [19] Vector Informatik GmbH, “Handbuch VN1600 Interface Familie, Version 2.2, Deutsch.” Vector Informatik GmbH, Ingersheimer Straße 24, D-70499 Stuttgart, p. 63, 2015.

-
- [20] WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, “Einsatz von Thermoelmenten,” -, vol. 40. WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, Alexander-Wiegand-Straße 30, 63911 Klingenberg, Germany, pp. 1–12, 2016.
- [21] Etas Gmbh, “Benutzerhandbuch ETAS ES63x.1 Lambda Modul (2 Chanel).” ETAS GmbH, Borsigstraße 14, 70469 Stuttgart, pp. 1–232, 2016.
- [22] S. Hammer, “AW: Steuerung der Steigung über Tornado und Parametertabelle [E-Mail].” [stefan.hammer@ksengineers.at; 12.03.2018], 2018.

9 Anhänge

9.1 Technische Daten des Versuchsfahrzeuges

BMW F 800 GT	
Einsatzgebiet	Tourenmotorrad
Motor:	
Hubraum	798 cm ³
Zylinderzahl	Zweizylinder-Reihenmotor,
Leistung	66 kW (90 PS) bei 8.000 U/min
Drehmoment	86 Nm bei 5.800 U/min
Kupplung	Mehrscheibenkupplung im Ölbad, mechanisch betätigt
Schaltgetriebe	Klauengeschaltetes Sechsgang-Getriebe im Motorgehäuse integriert
Schaltgetriebeübersetzungen	1. Gang: 2,462 (13/32 Zähne) 2. Gang: 1,750 (16/28 Zähne) 3. Gang: 1,381 (21/29 Zähne) 4. Gang: 1,174 (23/27 Zähne) 5. Gang: 1,042 (24/25 Zähne) 6. Gang: 0,960 (25/24 Zähne)
Primärübersetzung	1,943 (35/68 Zähne)
Sekundärgetriebe	Riementrieb mit Ruckdämpfung
Sekundärgetriebeübersetzung	2,353
Höchstgeschwindigkeit	> 200 km/h
Leergewicht (DIN Leergewicht, fahrfertig 90 % betankt, ohne SA)	214 kg
Reifen vorne	120/70 ZR 17
Reifen hinten	180/55 ZR 17

Tabelle 9.1: Technische Daten BMW F 800 GT

9.2 Prüfstandparameter

Befehlsprogramm	
Empfänger: Zöllner Rolle	Befehl: Freischaltung der Leistung ab 0 km/h
Fahrerleitsystem (Bedatung mit):	
v _{Soll} Obere v-Toleranz Untere v-Toleranz	VKM-Aktivitäts-Zustand (Zündung Ein/Aus) Korrigierte Steigungsvorgabe aus der LDS
Messdatenspeicherformat (Bedatung mit):	
Zeit-Verlauf am Prüfstand v _{Soll} v _{Ist} Drehzahl der Rolle Zugkraft-Verlauf laut DMS-Aufnehmer (F _{Zug,Rolle}) Temperatur vor Katalysator Temperatur nach Katalysator Modus Fahrzeug Aktiv (CAN-Bus BMW) Drosselklappenstellung (CAN-Bus BMW) Gasgriffstellung (CAN-Bus BMW) Einspritzmenge Kraftstoff (CAN-Bus BMW) Kupplungsstatus (CAN-Bus BMW) Gang-Status (CAN-Bus BMW) VKM-Drehzahl (CAN-Bus BMW) Status Öl-Druck (CAN-Bus BMW) Status Zündschlüsselposition (Klemme 15) (CAN-Bus BMW) Status Ansteuerung Starterrelais (Klemme 50) (CAN-Bus BMW)	Status Betätigung Notaus (CAN-Bus BMW) Temperatur außen (CAN-Bus BMW) Temperatur Motoransaugluft (CAN-Bus BMW) Temp. Kühlwasser Motor (CAN-Bus BMW) Batteriespannung (CAN-Bus BMW) Geschwindigkeit Hinterrad (CAN-Bus BMW) Status Schalter Fußbremse (CAN-Bus BMW) Aufsummierte Wegimpulse des Drehzahlsensors am Hinterrad (CAN-Bus BMW) Redundant aufsummierte Wegstrecke des Motorrads (CAN-Bus BMW) Steigung-Vorgabe laut Parametertabelle Steigungs-Rückmeldung der Prüfstandrollen-Steuerung Laufende Abgasmesswerte HC Laufende Abgasmesswerte CO Laufende Abgasmesswerte CO ₂ Laufende Abgasmesswerte CH ₄ Laufende Abgasmesswerte NO _x
Parametertabelle (Bedatung mit):	
Zeitverlauf v _{Soll} [km/h] Obere v-Toleranz Untere v-Toleranz	Gang- und Kupplungsverlauf VKM Zündung Ein/Aus Korrigierte Steigungsvorgabe aus der LDS

Tabelle 9.2: Bedatungsparameter und -größen von Tornado Designer für die getätigten Messfahrten

9.3 Verbräuche der Simulation zur Prüfstandrolle über die Zyklueteile

9.3.1 SOC-Startbedingung: 0%

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Simulation [ml/km]	61,998	24,253	43,311
Rollenprüfstand Kaltstart [ml/km]	67,476	18,38	34,685
Rollenprüfstand Warmstart [ml/km]	61,158	18,511	34,592

Tabelle 9.3: Kraftstoffverbräuche SOC-Startbedingung 0 %

9.3.2 SOC-Startbedingung: 25%

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Simulation [ml/km]	0	19,143	42,758
Rollenprüfstand Kaltstart [ml/km]	0	22,359	45,478
Rollenprüfstand Warmstart [ml/km]	0	20,031	44,522

Tabelle 9.4: Kraftstoffverbräuche SOC-Startbedingung 25 %

9.3.3 SOC-Startbedingung: 100%

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Simulation [ml/km]	0	0,491	24,546
Rollenprüfstand Kaltstart [ml/km]	0	1,397	25,98
Rollenprüfstand Warmstart [ml/km]	0	0,979	25,36

Tabelle 9.5: Kraftstoffverbräuche SOC-Startbedingung 100 %

9.3.4 Reiner VKM-Betrieb

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Rollenprüfstand Kaltstart [ml/km]	63,887	40,745	45,781
Rollenprüfstand Warmstart [ml/km]	55,665	40,054	45,578

Tabelle 9.6: Kraftstoffverbräuche reiner VKM-Betrieb

9.4 Emissions- und Verbrauchsauswertungen der Messfahrten nach EURO 4-Gesetzgebung

9.4.1 SOC-Startbedingung: 0%, Kaltstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
HC [mg/km]	307	79	85
CO [mg/km]	2309	422	406
NO _x [mg/km]	264	211	129
CO ₂ [mg/km]	160177	44222	79827

Tabelle 9.7: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 0 % und Kaltstart

gewichtet	Über alles [mg/km]	DF	Über alles mit DF	Grenzen	Prozent der Grenzen	
					ohne DF	mit DF
HC [mg/km]	138	1,2	165	170	81	97
CO [mg/km]	890	1,3	1156	1140	78	101
NO _x [mg/km]	203	1,2	244	90	226	271
CO ₂ [mg/km]	82112	-	-	-	-	-

Tabelle 9.8: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 0 % und Kaltstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Treibstoffverbrauch [ml] (CAN-Daten)	280	171	544,6
Treibstoffeffizienz [km/l]	14,821	54,419	28,828
Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	13,943	50,9	28,454
Durchschnittliche Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	32,69		

Tabelle 9.9: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 0 % und Kaltstart

9.4.2 SOC-Startbedingung: 0%, Warmstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
HC [mg/km]	244	75	84
CO [mg/km]	1597	330	397
NO _x [mg/km]	340	202	128
CO ₂ [mg/km]	148646	44249	79522

Tabelle 9.10: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 0 % und Warmstart

gewichtet	Über alles [mg/km]	DF	Über alles mit DF	Grenzen	Prozent der Grenzen	
					ohne DF	mit DF
HC [mg/km]	119	1,2	143	170	70	84
CO [mg/km]	664	1,3	863	1140	58	76
NO _x [mg/km]	218	1,2	262	90	242	291
CO ₂ [mg/km]	79167	-	-	-	-	-

Tabelle 9.11: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 0 % und Warmstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Treibstoffverbrauch [ml] (CAN-Daten)	251,4	173,4	545,9
Treibstoffeffizienz [km/l]	16,348	54,037	28,906
Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	15,121	51,049	28,569
Durchschnittliche Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	33,097		

Tabelle 9.12: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 0 % und Warmstart

9.4.3 SOC-Startbedingung: 25%, Kaltstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
HC [mg/km]	4	153	145
CO [mg/km]	0	1503	1141
NO _x [mg/km]	0	245	226
CO ₂ [mg/km]	31	49616	102756

Tabelle 9.13: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 25 % und Kaltstart

gewichtet	Über alles [mg/km]	DF	Über alles mit DF	Grenzen	Prozent der Grenzen	
					ohne DF	mit DF
HC [mg/km]	264	1,2	317	170	155	186
CO [mg/km]	1037	1,3	1348	1140	91	118
NO _x [mg/km]	179	1,2	215	90	199	239
CO ₂ [mg/km]	50505	-	-	-	-	-

Tabelle 9.14: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 25 % und Kaltstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Treibstoffverbrauch [ml] (CAN-Daten)	0	210,6	719,9
Treibstoffeffizienz [km/l]	0	44,729	21,989
Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	0	43,028	21,878
Durchschnittliche Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	31,83		

Tabelle 9.15: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 25 % und Kaltstart

9.4.4 SOC-Startbedingung: 25%, Warmstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
HC [mg/km]	5	245	137
CO [mg/km]	1	1252	1089
NO _x [mg/km]	0	245	230
CO ₂ [mg/km]	31	46097	101184

Tabelle 9.16: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 25 % und Warmstart

gewichtet	Über alles [mg/km]	DF	Über alles mit DF	Grenzen	Prozent der Grenzen	
					ohne DF	mit DF
HC [mg/km]	158	1,2	190	170	93	112
CO [mg/km]	899	1,3	1168	1140	79	102
NO _x [mg/km]	180	1,2	216	90	200	240
CO ₂ [mg/km]	48353	-	-	-	-	-

Tabelle 9.17: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 25 % und Warmstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Treibstoffverbrauch [ml] (CAN-Daten)	0	188,1	701,7
Treibstoffeffizienz [km/l]	0	49,92	2246
Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	0	47,046	22,233
Durchschnittliche Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	33,16		

Tabelle 9.18: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 25 % und Warmstart

9.4.5 SOC-Startbedingung: 100%, Kaltstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
HC [mg/km]	5	73	190
CO [mg/km]	0	363	1371
NO _x [mg/km]	0	9	105
CO ₂ [mg/km]	34	1991	58040

Tabelle 9.19: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 100 % und Kaltstart

gewichtet	Über alles [mg/km]	DF	Über alles mit DF	Grenzen	Prozent der Grenzen	
					ohne DF	mit DF
HC [mg/km]	86	1,2	103	170	50	60
CO [mg/km]	524	1,3	682	1140	46	60
NO _x [mg/km]	31	1,2	37	90	34	41
CO ₂ [mg/km]	15514	-	-	-	-	-

Tabelle 9.20: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 100 % und Kaltstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Treibstoffverbrauch [ml] (CAN-Daten)	0	13,4	412,3
Treibstoffeffizienz [km/l]	0	714,179	38,491
Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	0	823,496	37,791
Durchschnittliche Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	70,50		

Tabelle 9.21: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 100 % und Kaltstart

9.4.6 SOC-Startbedingung: 100%, Warmstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
HC [mg/km]	6	59	158
CO [mg/km]	0	260	1465
NO _x [mg/km]	0	11	100
CO ₂ [mg/km]	212	1427	56685

Tabelle 9.22: Emissionsauswertung in mg/km für SOC-Start 100 % und Warmstart

gewichtet	Über alles [mg/km]	DF	Über alles mit DF	Grenzen	Prozent der Grenzen	
					ohne DF	mit DF
HC [mg/km]	71	1,2	85	170	42	50
CO [mg/km]	496	1,3	645	1140	44	57
NO _x [mg/km]	30	1,2	37	90	34	41
CO ₂ [mg/km]	14938	-	-	-	-	-

Tabelle 9.23: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km, SOC-Start 100 % und Warmstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Treibstoffverbrauch [ml] (CAN-Daten)	0	9,31	402,72
Treibstoffeffizienz [km/l]	0	1021,482	39,432
Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	0	1138,047	38,621
Durchschnittliche Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	72,28		

Tabelle 9.24: Treibstoffverbrauchsauswertung für SOC-Start 100 % und Warmstart

9.4.7 Rein VKM-Betrieb, Kaltstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
HC [mg/km]	246	39	81
CO [mg/km]	2564	295	504
NO _x [mg/km]	61	47	69
CO ₂ [mg/km]	151710	99345	104011

Tabelle 9.25: Emissionsauswertung in mg/km für reinen VKM-Betrieb und Kaltstart

gewichtet	Über alles [mg/km]	DF	Über alles mit DF	Grenzen	Prozent der Grenzen	
					ohne DF	mit DF
HC [mg/km]	101	1,2	122	170	60	72
CO [mg/km]	915	1,3	1189	1140	80	104
NO _x [mg/km]	56	1,2	67	90	62	75
CO ₂ [mg/km]	113603	-	-	-	-	-

Tabelle 9.26: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km, reiner VKM-Betrieb und Kaltstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Treibstoffverbrauch [ml] (CAN-Daten)	262,58	369,96	719,68
Treibstoffeffizienz [km/l]	15,652	24,543	21,843
Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	14,678	22,987	21,867
Durchschnittliche Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	20,680		

Tabelle 9.27: Treibstoffverbrauchsauswertung für reinen VKM-Betrieb und Kaltstart

9.4.8 Rein VKM-Betrieb, Warmstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
HC [mg/km]	109	38	82
CO [mg/km]	980	270	510
NO _x [mg/km]	56	46	75
CO ₂ [mg/km]	139935	97923	103929

Tabelle 9.28: Emissionsauswertung in mg/km für reinen VKM-Betrieb und Warmstart

gewichtet	Über alles [mg/km]	DF	Über alles mit DF	Grenzen	Prozent der Grenzen	
					ohne DF	mit DF
HC [mg/km]	67	1,2	80	170	39	47
CO [mg/km]	507	1,3	660	1140	45	58
NO _x [mg/km]	56	1,2	67	90	62	74
CO ₂ [mg/km]	109927	-	-	-	-	-

Tabelle 9.29: Gewichtete Emissionsauswertung in mg/km, reiner VKM-Betrieb, Warmstart

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Treibstoffverbrauch [ml] (CAN-Daten)	227,11	365,29	716,03
Treibstoffeffizienz [km/l]	17,965	24,966	21,94
Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	16,198	23,33	21,881
Durchschnittliche Treibstoffeffizienz [km/l] (Carbon Balance Method)	21,624		

Tabelle 9.30: Treibstoffverbrauchsauswertung für reinen VKM-Betrieb und Warmstart