



Stefan Present, BSc

# **Entwicklung einer generischen Hybridstrategie zur Emissionssimulation**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplomingenieur  
Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

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

Zweitbetreuer  
Dipl.-Ing. Gérard Silberholz  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, Oktober 2020



## Vorwort

Erste persönliche Erfahrungen mit dem Institut durfte ich bereits während der Verfassung meiner Bachelorarbeit machen, wobei ich schon früh das angenehme und kollegiale Arbeitsklima zu schätzen lernte. Während meines Masterstudiums konnte ich mein Wissen und meine Interessen im umfassenden Themengebiet der Motor- und Antriebstechnik vertiefen. Dabei besuchte ich nicht nur die Pflichtlehrveranstaltungen bezüglich konventioneller Antriebe, sondern versuchte meine Sichtweise hinsichtlich alternativer, zukunftsorientierter Antriebskonzepte zu erweitern. Natürlich spielt in diesem Zusammenhang die Frage nach Emissions- und CO<sub>2</sub>-Reduktion eine entscheidende Rolle, weshalb ich mich erneut an Hr. Prof. Hasusberger bezüglich eines Masterarbeitsthemas wendete. In einem ersten Gespräch wurde mir das Thema „Entwicklung einer generischen Hybridstrategie zur Emissionssimulation“ grob vorgestellt, dem ich mich, ob seiner hohen Relevanz, sowohl aktuell als auch in naher Zukunft und den herausfordernden theoretischen Hintergründe unbedingt widmen wollte.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger für das Anvertrauen dieses durchaus fordernden, aber interessanten Themas, sowie das rege Interesse am Fortschritt der Arbeit danken. Die Thematik stellte mich vor viele Herausforderungen, die jedoch durch die exzellente Betreuung, welche durch regelmäßige Meetings (die aufgrund des vorgeschriebenen Lockdowns durch die COVID-19-Pandemie über WebEx weitergeführt wurden), sowie persönliche und fachliche Hilfestellungen geprägt war, überwunden werden konnten. In diesem Zusammenhang möchte ich mich im Besonderen bei Dipl.-Ing. Gérard Silberholz für viele anregende Diskussionen sowie fachliche Inputs und die somit ausgezeichnete Betreuung bedanken, wobei mir immer ermöglicht wurde, meine eigenen Ideen und Ansätze in die Thematik einzubringen und zu verfolgen.

Ein großer Dank gilt auch Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Dippold für die außerordentlich rasche Implementierung der Regelstrategie in die Simulationsumgebung sowie die fortlaufende Unterstützung während der Evaluierungsarbeiten. Des Weiteren möchte ich mich bei Dipl. Ing. Claus Uwe Matzer, BSc, für die zahlreichen fachlichen Auskünfte bei aufgetretenen Fragen sowie bei Dipl. Ing. Silke Lipp, BSc, für die reibungslose Organisation des Messfahrzeugs und des Messablaufs bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern, Geschwistern, Verwandten und Freunden bedanken, die mir während meines Studiums in jeder erdenklichen Art und Weise den Rücken gestärkt haben. Ein besonderer Dank gilt hierbei meinen Eltern Helga und Arno. Ihr habt immer an mich geglaubt und mir die Chance, ein Studium zu absolvieren, erst ermöglicht. Das werde ich euch nie vergessen und stets dankbar dafür sein.

# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT</b> .....	<b>III</b>
<b>FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>VI</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....	<b>X</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XII</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2 MOTIVATION ZUM BAU VON HEV</b> .....	<b>3</b>
2.1 CO <sub>2</sub> - GESETZGEBUNG IN EUROPA .....	3
<b>3 HYBRIDE ANTRIEBSSTRUKTUREN</b> .....	<b>6</b>
3.1 ANTRIEBSMANAGEMENT .....	6
3.2 BETRIEBSZUSTÄNDE IN HYBRIDFAHRZEUGEN .....	7
3.2.1 Start/Stopp bzw. Lastpunktanhebung im Stillstand .....	8
3.2.2 Regeneratives Bremsen .....	8
3.2.3 Lastpunktanhebung (LPA) .....	10
3.2.4 Rein elektrischer Betrieb .....	11
3.2.5 Boosten .....	12
3.2.6 Reiner VKM-Betrieb .....	12
3.2.7 Klassifizierung der Regelstrategien .....	13
<b>4 REGELSTRATEGIE</b> .....	<b>14</b>
4.1 RAHMENBEDINGUNGEN DER REGELSTRATEGIEENTWICKLUNG .....	15
4.2 METHODIK DER REGELSTRATEGIE .....	17
4.2.1 Leistungsaufteilung .....	17
4.2.2 Äquivalenter Gesamtenergiebedarf .....	19
4.2.3 Ergebnis der Regelstrategie .....	28
4.3 SIMULATIONSMODELL PHEM .....	31
4.3.1 Simulation von HEV .....	32
4.3.1.1 Batterie und Leistungselektronik .....	34
4.3.2 Plausibilisierung der PHEM-Implementierung .....	36
<b>5 SIMULATION IN PHEM</b> .....	<b>41</b>
5.1 SENSITIVITÄTSANALYSE .....	41
5.1.1 Berechnungsschrittweite .....	43
5.1.2 Äquivalenzfaktor $s_{\text{äquiv}}$ .....	45
5.1.3 EM-Wirkungsgrade .....	50
5.1.4 SOC-Faktoren .....	53
5.1.5 VKM - Sperrparameter .....	58
5.1.6 VKM - Startenergie .....	59
5.2 PERFORMANCE DER REGELSTRATEGIE .....	61
5.2.1 Ergebnisse PKW-Modell .....	61
5.2.2 Ergebnisse LKW-Modell .....	63
<b>6 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN</b> .....	<b>67</b>
6.1 VERSUCHSFAHRZEUG UND MESSPROGRAMM .....	67
6.2 MESSUNG AM ROLLENPRÜFSTAND .....	70
6.3 MESSUNG IM REALEN STRAßENVERKEHR .....	71
6.4 VIRTUELLE ABBILDUNG DES MESSFAHRZEUGS .....	72
6.4.1 Kennfeldjustierung mittels Stationärpunktmessung .....	73
6.5 ERGEBNISSE DER MESSUNG UND SIMULATION IN PHEM .....	77
6.5.1 Korrigierter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Verbrauch .....	83
<b>7 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK</b> .....	<b>85</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>86</b>

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>87</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>89</b>

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

### Lateinische Formelzeichen

$a$	$\text{m/s}^2$	Beschleunigung
$a$	–	Exponent der Korrekturfunktion
$A_{\text{Quersch.}}$	$\text{m}^2$	Querschnittsfläche
$c_w$	–	Luftwiderstandsbeiwert
$E_{EM}$	$\text{kWh}$	Energiebedarf der E-Maschine
$E_{EM\text{veline}}$	$\text{kWh}$	Energiebedarf der E-Maschine aus der Veline
$E_{ges\text{äquiv.}}$	$\text{kWh}$	äquivalenter Gesamtenergiebedarf
$E_{VKM}$	$\text{kWh}$	Energiebedarf der VKM
$E_{VKM\text{schlepp}}$	$\text{kWh}$	Schleppenergie zur Überwindung der Reibung
$E_{VKM\text{start}}$	$\text{kWh}$	benötigte Energie zum Starten der VKM
$FC$	$\text{kg/h}$	Kraftstoffverbrauch
$FC_{\text{norm}}$	$\text{kg}/(\text{h norm})$	normierter Kraftstoffverbrauch
$FC_{\text{SOCcorr}}$	$\text{kg/h}$	korrigierter Kraftstoffverbrauch
$F_{r0}$	–	Rollwiderstandskoeffizient
$F_{r1}$	$\text{s/m}$	Rollwiderstandskoeffizient
$F_{r4}$	$(\text{s/m})^4$	Rollwiderstandskoeffizient
$F_{x,max}$	$\text{N}$	maximale Bremskraft
$F_z$	$\text{N}$	Radaufstandskraft
$F_{z,max}$	$\text{N}$	maximale Radaufstandskraft
$g$	$\text{m/s}^2$	örtliche Fallbeschleunigung
$H_u$	$\text{kWh/kg}$	Heizwert
$i_{\text{Achse}}$	–	Achsübersetzung
$I_{\text{Batt}}$	$\text{A}$	Batteriestrom
$i_{\text{Gang}}$	–	Getriebeübersetzung
$I_{\text{Getriebe}}$	$\text{kgm}^2$	Massenträgheitsmoment des Getriebes
$I_{\text{Motor}}$	$\text{kgm}^2$	Massenträgheitsmoment der VKM
$I_{\text{räder}}$	$\text{kgm}^2$	Massenträgheitsmoment der Räder
$I_{VKM\text{rot}}$	$\text{kgm}^2$	Massenträgheitsmoment der rotatorischen Massen
$K_{\text{Batt}}$	$\text{Ah}$	Kapazität der Batterie
$l_h$	$\text{m}$	horizontaler Abstand vom Hinterrad zum Fahrzeugschwerpunkt
$l_v$	$\text{m}$	horizontaler Abstand vom Vorderrad zum Fahrzeugschwerpunkt
$m$	$\text{kg}$	Gesamtmasse
$m_{\text{Beladung}}$	$\text{kg}$	Gewicht der Beladung
$M_{EM}$	$\text{Nm}$	Drehmoment der E-Maschine
$m_{\text{Fzg.}}$	$\text{kg}$	Fahrzeugmasse
$m_{\text{rot}}$	$\text{kg}$	rotatorische Massen
$M_{\text{soll}}$	$\text{Nm}$	gefordertes Antriebsmoment
$M_{VKM}$	$\text{Nm}$	Drehmoment der VKM
$n$	$\text{U/min}$	Momentandrehzahl der VKM / EM
$n_{\text{idle}}$	$\text{U/min}$	Leerlaufdrehzahl der VKM
$n_{\text{norm}}$	–	normierte Drehzahl der VKM / EM
$n_{\text{rated}}$	$\text{U/min}$	Nenn Drehzahl der VKM / EM
$p(\text{SOC})$	–	SOC - Korrekturfunktion

$P_{Batt}$	kW	Batterieleistung
$P_{Batt,max}$	kW	maximal entnehmbare Batterieleistung
$P_{Beschl.}$	kW	Beschleunigungsleistung
$P_e$	kW	allgemeine effektive Leistung der VKM / EM
$P_{iEM}$	kW	E-Motorleistung
$P_{eEM}$	kW	effektive E-Motorleistung
$P_{e ges}$	kW	gesamte Antriebsleistung
$P_{elEM}$	kW	elektrischer Leistungsbedarf der E-Maschine
$P_{schlepp}$	kW	Schlepplleistung
$P_{e soll}$	kW	geforderte Antriebsleistung
$P_{eVKM}$	kW	effektive Verbrennungsmotorleistung
$P_{evoll}$	kW	Vollastleistung
$P_{Getr.}$	kW	Getriebeleistung
$P_{iBatt}$	kW	Batterieleistung
$P_{eBatt}$	kW	effektive Batterieleistung
$P_{Luftw.}$	kW	Luftwiderstand
$P_{Nebenagg.}$	kW	Nebenverbraucherleistung
$P_{norm}$	–	Normierte Leistung der VKM / EM
$P_{rated}$	kW	Nennleistung der VKM
$P_{Rollw.}$	kW	Rollwiderstand
$P_{steig.}$	kW	Steigungswiderstand
$R_i$	$\Omega$	Innenwiderstand der Batterie
$R_0$	N	Rollwiderstandskoeffizient
$R_1$	Ns/m	Rollwiderstandskoeffizient
$R_2$	Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Rollwiderstandskoeffizient
$r_{Rad}$	m	Reifenradius
$SOC_t$	–	SOC zum Zeitpunkt t
$SOC_{t-1}$	–	SOC zum Zeitpunkt t-1
$SOC_{high}$	–	obere SOC-Grenze
$SOC_{low}$	–	untere SOC-Grenze
$SOC_{max}$	–	maximaler SOC
$SOC_{low}$	–	minimaler SOC
$SOC_{tag.}$	–	Zielwert für den SOC
$U_{Batt}$	V	Batteriespannung
$S_{\text{äquiv.}}$	–	Äquivalenzfaktor für elektrische Energie
$t$	s	Zeiteinheit
$t_{VKMlock}$	s	Mindestzeitdauer in der sich der VKM-Zustand nicht ändern darf
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$v_{rel}$	m/s	relative Anströmgeschwindigkeit

### Konstanten

$g = 9,8067$	m/s <sup>2</sup>	Normfallbeschleunigung
$H_u = 11.8$	kWh/kg	Heizwert Diesel

## Griechische Formelzeichen

$\alpha$	rad	Steigung der Fahrbahn
$\eta_{Batt}$	–	Wirkungsgrad der Batterie
$\eta_{EM}$	–	Wirkungsgrad der E-Maschine
$\eta_{Getr.}$	–	Getriebewirkungsgrad
$\rho_{Luft}$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der Luft
$\mu$	–	Reibwert
$\omega$	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

## Operatoren und Bezeichnungen

$\sum$	Summe
$\Delta$	Differenz zweier Größen

## Weitere Indices und Abkürzungen

Ø	Durchschnitt
BAT	Battery file
BMS	Battery Management System
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CVS	Constant Volume Sampling
DRI	Driving Cycle file
E-Motor	Elektromotor
ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy
ECU	Engine Control Unit
EFM	Exhaust Flow Meter
EM	Elektrische Maschine
EMS	Energy Management System
ERMES	European Research Group on Mobile Emission Sources
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EU	Europäische Union
EV	Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FEV	Electro motor full load curve file
FLD	Full Load and Drag Curve file
ges.	gesamt
GPS	Global Positioning System
HC	Kohlenwasserstoffe
HEV	Hybrid Electric Vehicle
i	Laufvariable (1, 2, ..., n),
i.d.R.	in der Regel
ICE	Internal Combustion Engine
IUFV	Inrets Urbain Fluide Courte
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
KFZ	Kraftfahrzeug
Li-Ion	Lithium-Ion
LKW	Lastkraftwagen

---

LnFz	Leichte Nutzfahrzeuge
LPA	Lastpunktanhebung
MAP/MEP	Emission Map file
max.	maximal
MCU	Motor Control Unit
MEV	Electro motor map file
min.	minimal
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
NORM	normiert
OBD	On-Board-Diagnostik
OEM	Original Equipment Manufacturer
ppm	Parts per million
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
RDE	Real Driving Emissions
rel.	relativ
RWC	Real World Cycle
SOC	State of Charge
STE	Control curve for electro motor file
TCU	Transmission Control Unit
u.U.	unter Umständen
u.v.m	und viele mehr
VEH	Vehicle and engine specifications-File
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WLTC	Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

## **Eidesstattliche Erklärung**

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

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

Stefan Present

Graz, Oktober 2020

## Zusammenfassung

Eine zunehmende Elektrifizierung im Transportsektor ist aufgrund der immer strikter werdenden gesetzlichen Emissions- und CO<sub>2</sub>-Vorgaben unausweichlich. Die Hybridtechnologie bietet hierbei eine gute Möglichkeit, konventionelle Antriebe weiter zu nutzen und gleichzeitig an alternativen Antrieben zu forschen, um einen fließenden Übergang zu einer kompletten Elektrifizierung realisieren zu können. Die hohe Flexibilität durch zwei vorhandene Antriebskomponenten (VKM und E-Maschine) erlaubt den OEMs viele Freiheiten, wie der Vortrieb des Fahrzeugs realisiert werden soll. Entsprechend herausfordernd ist eine akkurate, virtuelle Abbildung von Hybridfahrzeugen, um zuverlässig Emissionen und Verbrauch bestimmen zu können.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer möglichst allgemein gültigen, generischen Hybridstrategie und teilt sich dabei grob in drei Teile. Der erste Teil beinhaltet eine Betrachtung der aktuellen ökologischen und gesetzlichen Situation und die damit verbundenen Motivationen zum Bau elektrifizierter Antriebe. Des Weiteren werden die theoretischen Grundlagen bezüglich des hybriden Antriebsmanagements erläutert, um die Vielzahl an möglichen Betriebsweisen und Funktionen hybrider Antriebe besser verstehen zu können.

Der anschließende Hauptteil beschäftigt sich mit der Entwicklung der Regelstrategie an sich. Hierbei wird zuerst, basierend auf mehreren Vereinfachungen, die Regelstrategie anhand eines Referenzfahrzeugs erarbeitet. Anschließend erfolgt die Implementierung in eine Längsdynamik-Simulationssoftware sowie die Durchführung weiterer Untersuchungen. Dazu zählen eine Sensitivitätsanalyse, um die Empfindlichkeit der Regelstrategie gegenüber Parametervariationen evaluieren zu können, sowie ein Vergleich der Performance (Verbrauchsergebnisse und Rechenzeit) gegenüber dem alten Hybridmodell. Weiters wird die Anwendbarkeit des Modells auf unterschiedliche Fahrzeugsegmente (PKW, LKW) untersucht.

Im letzten Schritt wird das Modell mit der Betriebsweise eines real vermessenen Plug-In-Hybrid verglichen. Das Messprogramm umfasst hierbei sowohl RDE Messungen im realen Straßenverkehr als auch Messungen am Rollenprüfstand in unterschiedlichen Betriebsmodi. Von primärem Interesse sind hierbei die Messung von Strom und Spannung zur Bestimmung des elektrischen Verbrauchs sowie die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs bei der Bewältigung unterschiedlicher Fahrzyklen. Diese Untersuchungen liefern wichtige Informationen über die Performance der Regelstrategie im Vergleich zur Betriebsweise eines modernen PHEV. Um das Fahrzeug dabei möglichst akkurat virtuell abbilden zu können, wurden zusätzlich Stationärpunkte am Rollenprüfstand gemessen, mit deren Hilfe das generische EM-Kennfeld besser an das Messfahrzeug angepasst wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass das neue Modell den Kraftstoffverbrauch gegenüber dem alten Modell noch weiter verringert sowie vor allem die Simulationszeiten deutlich reduziert. Darüber hinaus zeigt der Vergleich mit einem realen PHEV eine großteils sehr gute Übereinstimmung der Betriebsweisen und lässt damit auf eine repräsentative virtuelle Abbildung eines realen Fahrverhaltens durch das Modell schließen.

## Abstract

An increase in electrification regarding the transport sector is inevitable due to the increasingly strict emission and CO<sub>2</sub> legislations. Hybrid technology offers a good trade-off between using conventional drivetrains and developing alternative drivetrains in order to be able to achieve a smooth transition to complete electrification. The high flexibility through two main drive components (ICE and E-machine) allows OEMs a lot of freedom in how the propulsion of the vehicle is realized. Thus, an accurate, virtual representation of hybrid vehicles is very challenging but necessary task to be able to reliably determine emissions and fuel consumption.

This thesis deals with the development of a generally applicable, generic hybrid strategy and is roughly divided into three parts. The first part includes an overview of the current ecological and legal situation and the associated motivations for building electrified vehicles. Furthermore, the theoretical fundamentals regarding hybrid drive management are explained in order to better understand the multitude of possible operating modes and functions of hybrid drivetrains.

The following main part deals with the development of the hybrid control strategy itself. First, the control strategy is developed using a reference vehicle as well as several simplifications. This is followed by the implementation of the strategy in a longitudinal-dynamics-simulation-software and further investigations including a sensitivity analysis as well as a comparison of the performance (fuel consumption and computing time) compared to the old hybrid model. The sensitivity analysis is important to investigate the sensitivity of the control strategy (and thus the quality of the results) to parameter variations. Furthermore, the applicability of the model to other vehicle segments (cars, trucks) is examined.

As a last step, the model is compared to the operating mode of a real, measured PHEV. The measuring program includes both RDE measurements in real road traffic and measurements on the chassis dynamometer including different operating modes. The measurement of current and voltage to calculate the electrical energy consumption as well as the determination of the fuel consumption when coping with different driving cycles are of primary interest. These investigations provide important information about the performance of the control strategy compared to the operating mode of a modern PHEV. Additionally, stationary points were measured on the chassis dynamometer to be able to optimally adapt the electric motor map ensuring accurate simulations of the energy consumption.

The results show that the new model provides further fuel consumption reduction compared to the old model and, above all, significantly reduces the simulation times. Moreover, the comparison with a real PHEV shows that the operating modes match very well under a large number of investigated driving conditions and thus approves a representative virtual illustration of real driving behaviour by the model.

## 1 Einleitung

Klimawandel und Klimapolitik erhielten in den letzten Jahren einen erheblichen Aufmerksamkeitszuwachs seitens der Öffentlichkeit. Der Ausstoß an Treibhausgasen trägt dabei zu erheblichen Teilen an der globalen Erderwärmung bei. Besonders in der Kritik steht in letzter Zeit der Transportsektor, der noch immer von konventionell betriebenen VKM dominiert wird und sowohl einen absoluten als auch prozentuellen Zuwachs an CO<sub>2</sub>-Emissionen seit 1990 verzeichnet (siehe Abbildung 1-1).

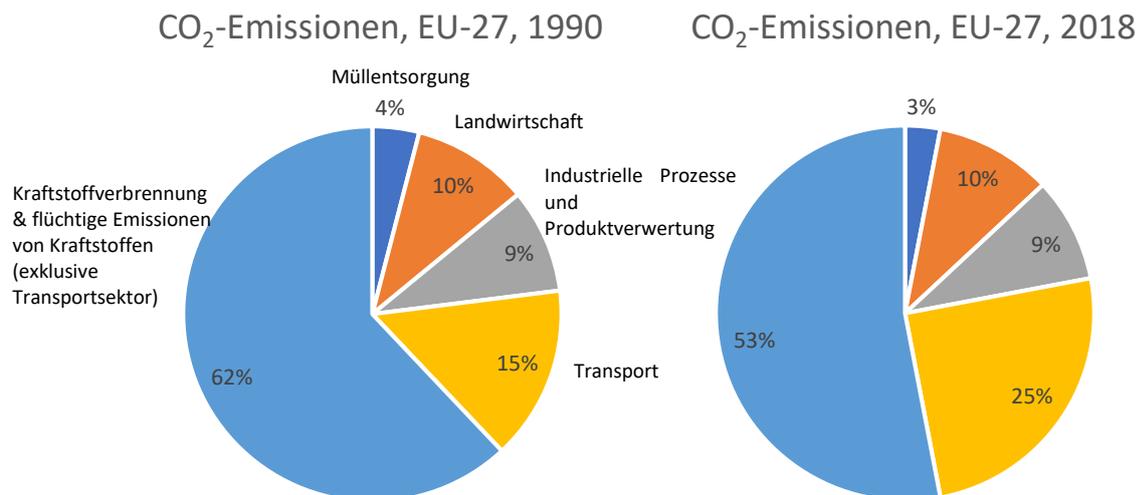


Abbildung 1-1: Vergleich der sektoriellen CO<sub>2</sub>-Emissionen in Europa zwischen 1990 und 2018 [14]

Um dem Klimawandel entgegen zu wirken werden nicht nur in Europa, sondern weltweit sehr ambitionierte Klimaziele verfolgt. Im Falle des Transportsektors äußern sich diese Vorgaben in einer starken Forcierung hin zu alternativen Antriebskonzepten, insbesondere der Elektrifizierung. Natürlich steht außer Frage, dass ein Umstieg auf alternative Antriebe sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht nur schrittweise erfolgen kann. Ein politisch erzwungenes, verfrühtes Ende der VKM würde Europa eines der wichtigsten Standbeine für Investitionen in neue Technologien entziehen [1]. Hybride Antriebsstrukturen bieten hierfür einen guten Kompromiss zwischen Nutzung bestehender Technologien (VKM) und Entwicklung alternativer Antriebe (Elektrifizierung). Die Hybridtechnologie eignet sich dabei nicht nur als Übergangslösung um rasch Emissionen und CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren, sondern bietet in gewissen Bereichen auch langfristige Potentiale. Vor allem im LKW-Bereich werden hybride Antriebsstrukturen als langfristige Lösung gesehen, da sie die Vorteile der VKM (hohe Reichweite) mit den Vorteilen der Elektrifizierung (lokal emissionsfreies Fahren) kombinieren. Eine Umsetzung rein elektrisch betriebener LKW für den Langstreckentransport ist mit der derzeitig zur Verfügung stehenden Batterietechnologie wohl auch in näherer Zukunft kaum großflächig umsetzbar.

Neben den soeben erwähnten Vorteilen bieten HEV aufgrund von mindestens zwei vorhandenen Antriebsquellen hohe Flexibilität, allerdings liegt in dieser Freiheit gleichzeitig die große Herausforderung beim Design effizienter Hybridsysteme. Eine optimale Ausnutzung der Einsparungspotentiale ist eng mit der hinterlegten Regelstrategie, welche die Leistung zwischen VKM und E-Maschine aufteilt, verbunden. Jeder Fahrzeughersteller verfolgt dabei

unterschiedliche Ansätze sowie Prioritäten bei der Wahl der optimalen Leistungsaufteilung. Diese Tatsache macht eine allgemein gültige Abbildung von Hybridfahrzeugen auf simulativer Ebene zu einer großen Herausforderung.

Aufgrund der zu erwartenden hohen Relevanz hybrider Antriebe in den nächsten Jahren ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung, Implementierung und Validierung einer generischen Hybridstrategie in PHEM, um Emissionen und Verbrauch zuverlässig und effizient simulieren zu können. Die Strategie ist generell auf alle HEV-Architekturen anwendbar, allerdings vorerst in PHEM auf parallele Hybride eingeschränkt. Alle in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sowie angegebenen Ergebnisse beziehen sich somit nur auf parallele HEV-Architekturen.

Hierbei wurde zunächst die Regelstrategie anhand eines Referenzfahrzeugs erarbeitet und in Excel einer ersten Validierung unterzogen. Anschließend erfolgte die Implementierung der Regelstrategie in PHEM, mit dessen Hilfe weitere Untersuchungen/Anpassungen vorgenommen wurden. Von besonderer Bedeutung bezüglich einer umfassenden Bewertung der Regelstrategie waren dabei:

- Simulationszeiten
- Simulationsergebnisse, -genauigkeit
- Anwendbarkeit der Regelstrategie auf unterschiedliche Fahrzeuge / Fahrzyklen
- Empfindlichkeit der Regelstrategie gegenüber Parametervariationen
- Vergleich der Regelstrategie zu einem real vermessenen Fahrzeug

## 2 Motivation zum Bau von HEV

Das Substantiv Hybrid wird laut Duden mit den Begriffen „Mischung, Gebilde aus zwei oder mehreren Komponenten“ assoziiert. Ein Hybridfahrzeug ist demzufolge ein Fahrzeug, das mindestens zwei Energieformen zur Realisierung des Vortriebs zur Verfügung hat. Typischerweise verwendet man hierzu einen Verbrennungsmotor in Kombination mit einer E-Maschine [2]. Die Integration einer zusätzlichen Antriebskomponente ist mit erheblichem technologischem Aufwand und Kosten verbunden. Dieser zusätzliche Aufwand wird jedoch durch den gebotenen Mehrwert hybrider Antriebsstrukturen aufgewogen. Dazu zählen insbesondere:

- Verbesserung im Bereich Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch (und damit implizit CO<sub>2</sub>-Ausstoß), indem der Elektromotor einen Teil oder den gesamten Leistungsbedarf der VKM emissionsfrei ersetzt.
- Bereitstellung zusätzlicher Funktionalitäten (z.B. Start-Stopp) sowie subjektiv wahrnehmbarer Verbesserungen wie geringere Geräuschemissionen oder bessere Fahrdynamik durch zusätzliche Bereitstellung von elektrischem Antriebsmoment. Diese Funktionen bieten dem Kunden einen Mehrwert, wodurch die Hybridtechnologie besser angenommen wird als z.B. ein weiterentwickeltes Abgasnachbehandlungssystem, welches nur Emissionen reduziert und eventuell sogar negative Auswirkungen auf den Verbrauch haben kann [3], [2].

Neben den soeben erwähnten technologischen und wirtschaftlichen Aspekten kann die Gesetzgebung meist noch größeren Einfluss auf die Forcierung neuer bzw. Verwerfung alter Technologien Einfluss nehmen [3]. Aus diesem Grund sollen im nächsten Kapitel kurz die Grundlagen der europäischen CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung sowie geplante Entwicklungsziele diskutiert werden.

### 2.1 CO<sub>2</sub> - Gesetzgebung in Europa

Im internationalen Vergleich verfolgt Europa sehr ambitionierte Klimaziele. Die EU-Gesetzgebung legt ab dem Jahr 2021 einen CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 95 [g/km] als Flottenmittelwert beim PKW fest. Dieser Grenzwert ist der geringste weltweit. Im Vergleich dazu erlaubt die USA 121 [g/km], China 117 [g/km] und Japan 105 [g/km] [1]. Der europäische Grenzwert ist aufgrund der beschränkten technischen sowie wirtschaftlich sinnvollen Verbesserungsmöglichkeiten konventioneller Antriebe ohne die Einführung alternativer Antriebe praktisch nicht mehr erreichbar. Hierbei erkennt man bereits erste Tendenzen den Schritt weg vom Verbrennungsmotor und hin zu alternativen Antrieben forcieren zu wollen. Weitere Anreize werden ersichtlich, wenn man die gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Transportsektor betrachtet. Tabelle 2-1 zeigt hierzu die zukünftigen CO<sub>2</sub>-Vorgaben für PKW und leichte Nutzfahrzeuge.

Bei Überschreitung der Flottenzielwerte sind Strafzahlungen je Gramm CO<sub>2</sub> über dem Flottenzielwert zu zahlen. Darüber hinaus wird die technologische Innovation durch mehrere Anreizsysteme gefördert. Darunter fallen unter anderem eine Mehrfachanrechnung besonders sparsamer Fahrzeuge mit CO<sub>2</sub>-Emissionen unter 50 [g/km]. Zu diesen Fahrzeugen zählen z.B. Elektrofahrzeuge sowie Plug-In-Hybride, da der geladene Strom in der Gesetzgebung als CO<sub>2</sub>-neutral angerechnet wird. Darüber hinaus werden weitere Innovationen zur CO<sub>2</sub>-Einsparung, die nicht im Prüfverfahren quantifiziert werden können, positiv angerechnet (z.B. Abwärmenutzung) [1], [4].

Tabelle 2-1: Rahmenbedingungen der CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung für PKW und leichte Nutzfahrzeuge ab dem Jahr 2021 bzw. 2020 [1], [4]

	Maßnahmen	PKW	Leichte Nutzfahrzeuge
		Ziel 2021	Ziel 2020
Gewichtsbasierter Flottenzielwert	Hersteller erhält individuellen Wert auf Basis des mittleren Gewichts der gesamten Flotte	95g/km CO <sub>2</sub> (EG) Nr. 443/2009 in Verbindung mit Verordnung (EU) Nr. 333/2014  Berechnungsformel (in g/km): $CO_2 [g/km] = 95 + a(M-M_0)$  $a = 0.0333$ $M = \text{Leergewicht des Pkw in kg}$ $M_0 = 1392 \text{ kg } (\emptyset\text{-Gewicht})$	147g/km CO <sub>2</sub> (EU) Nr. 510/2011 in Verbindung mit Verordnung (EU) Nr. 253/2014  Berechnungsformel (in g/km): $CO_2 [g/km] = 147 + a(M-M_0)$  $a = 0,096$ $M = \text{Leergewicht des LNfz in kg}$ $M_0 = 1706 \text{ kg } (\emptyset\text{-Gewicht})$
Strafzahlungen	Bei Verfehlung der Flottenzielwerte muss eine Strafe gezahlt werden.	95€ je Gramm CO <sub>2</sub> /km über dem Flottenzielwert pro PKW.	Analog zu PKW
Gestaffelte Einführung	zunehmender Anteil von Fahrzeugen, die die neuen Vorgaben erfüllen müssen	Anteil der Neuwagenflotte, die den Zielwert einhalten müssen: - 2020: 95% - 2021: 100%	Anteil der Neuwagenflotte, die den Zielwert einhalten müssen: - 2020: 100%
Mehrfachanrechnung	Mehrfache Anrechnung von Fahrzeugen mit niedrigem CO <sub>2</sub> - Wert für den Flottenzielwert.	PKW mit CO <sub>2</sub> -Emissionen geringer als 50 g/km werden im Jahr - 2020: 2-fach - 2021: 1,67-fach - 2022: 1,33-fach und danach einfach angerechnet mit Limitierung auf 7,5 g/km im Zeitraum von 2020 bis 2023	Keine Mehrfachanrechnung
Öko-Innovation	Technologien mit CO <sub>2</sub> - Einsparpotential, die im gesetzlichen Testverfahren (NEFZ) nicht abbildbar sind bzw. deren Wirkungen nicht gemessen werden können	Ökoinnovationen können bis maximal 7 g CO <sub>2</sub> /km auf den Flottendurchschnitt angerechnet werden. Beispiele sind Solardächer, LED-Lichter, Segelmodus etc.	Analog zu PKW

Weitere Grenzwertverschärfungen sind bereits als prozentuelle Reduktion gegenüber dem Neuzulassungsjahr 2020 mit -15 [%] und -37,5 [%] für die Jahre 2025 und 2030 beschlossen. Da nach 2020 vom NEDC auf den WLTP als Typprüfzyklus für CO<sub>2</sub> umgestellt wird, muss erst das WLTP Ergebnis für das Jahr 2020 erhoben werden, bevor absolute Zielwerte festgesetzt werden können. Die Vorgaben bezüglich schwerer Nutzfahrzeuge gestalten sich etwas komplizierter. Hierfür wurde herstellerübergreifend ein Basiswert in [g/t-km] in einem Monitoring vom 1. Juli 2019 bis 30. Juni 2020 erhoben. Ausgehend von diesem Wert müssen alle Hersteller bis 2025 eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von 15 [%] bzw. bis 2030 eine Reduktion von 30 [%] erreichen. Ausgewertet werden die CO<sub>2</sub>-Werte je nach Fahrzeuggruppe, wobei sich je nach Mix der Fahrzeuge unterschiedliche absolute Grenzwerte für die einzelnen Hersteller ergeben können [5].

Der Schritt hin zu höherer Elektrifizierung ist aus umwelttechnischer Sicht notwendig, allerdings können überambitionierte Gesetzesvorgaben auch kontraproduktiv sein. Die derzeitigen Grenzwerte für 2020 sind mit konventionellen Antrieben bereits nicht mehr erreichbar. Der damit notwendige, rasche Technologiesprung treibt die Preise der neuen Fahrzeuge in die Höhe. Dies würde dazu führen, dass eine Vielzahl der Kunden weiter mit ihrem alten Auto weiterfahren und sich damit der Schritt hin zu neuen Technologien verzögert. Darüber hinaus ist die derzeitige Automobilindustrie der wichtigste finanzielle Faktor, um in neue Technologien zu investieren [1]. Somit bietet die Hybridtechnologie einen guten Kompromiss zwischen einer weiteren effizienten Nutzung konventioneller Antriebe und der Erforschung alternativer Antriebe, um schrittweise den Übergang zu rein elektrischen Antrieben (EVs, FCEVs) zu ermöglichen. Die angeführten Aspekte sind natürlich nur einige von vielen, die in dieser Thematik berücksichtigt werden müssen und sollen verdeutlichen, wie umfassend (sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht) weitere Betrachtungen berücksichtigt werden müssen.

### 3 Hybride Antriebsstrukturen

HEV gibt es in unterschiedlichen Hybridisierungsgraden sowie unterschiedlichen Anordnungen / Kopplungen der Energieträger untereinander. Geringe Hybridisierungsgrade bieten nur eingeschränkte Funktionen wie z.B. Start-Stopp, regeneratives Bremsen oder elektrisches Boosten. Voll- bzw. Plug-In-Hybride bieten zusätzliche Funktionen wie z.B. rein elektrisches Fahren, sind jedoch auch mit deutlich höheren Kosten und technologischem Aufwand verbunden [3], [6].

Die verwendete Antriebsarchitektur hat ebenfalls großen Einfluss auf die Anzahl der Freiheitsgrade des Systems. Serielle Hybride haben z.B. Vorteile, da die VKM unabhängig von der Betriebsweise der E-Maschine im Bestpunkt betrieben werden kann. Allerdings ist kein direkter Durchtrieb der VKM an die Räder möglich, weshalb sehr viele Einzelverluste durch die mehrmalige Energieumwandlung anfallen. Im Falle des Parallelhybrids sind zwar die Lastpunkte der beiden Maschinen über die Drehzahl miteinander gekoppelt, allerdings erlaubt diese Architektur eine freie Wahl der Betriebsweise zwischen rein elektrisch, rein VKM oder Hybridbetrieb [3]. Neben rein serieller bzw. paralleler Architektur gibt es auch Kombinationsformen, auf die an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen wird.

Für diese Arbeit sind vor allem der Voll- bzw. Plug-In-Hybrid in paralleler Architektur relevant, da diese aufgrund der zuvor angeführten Charakteristika bevorzugt im PKW-Bereich ausgeführt werden. Die möglichen Betriebszustände sowie die hinterlegte Betriebsstrategie bilden dabei wichtige Rahmenbedingungen für die Betriebsweise und sollen daher nachfolgend genauer erläutert werden.

#### 3.1 Antriebsmanagement

Das Antriebsmanagement eines Fahrzeugs hat grundsätzlich die Aufgabe, sämtliche Funktionen der vorhandenen Komponenten in Abhängigkeit des Fahrerwunsches sowie weiterer Randbedingungen zu koordinieren. In konventionellen Antrieben, mit nur einer primären Energiequelle, wird der Fahrerwunsch über Betätigung des Brems- bzw. Gaspedals direkt in Aktionen der jeweiligen Controller weitergeleitet. Die ECU steuert dabei beispielsweise die notwendige Kraftstoffmenge in Abhängigkeit des geforderten Wunschkraftmoments [7], [2].

Neben dieser untergeordneten Controller, die jeweils einen Teil der Aktuatoren ansteuern, brauchen HEV ein übergeordnetes Kontrollorgan, welches die geforderte Leistung zustandsabhängig auf die beiden Antriebsquellen aufteilt. Dieser Controller wird als EMS (Energy Management System) bezeichnet und berücksichtigt nicht nur den Leistungswunsch des Fahrers, sondern auch diverse Randbedingungen des Antriebsstrangs sowie der einzelnen untergeordneten Controller um sicherzugehen, dass z.B. der Batterieladezustand (SOC) sowie die Temperatur innerhalb der vorgegebenen Grenzen bleibt [7]. Vor allem im Falle der häufig verwendeten Li-Ion Batterietechnologie ist aus Lebensdauergründen eine exakte Überwachung des SOC von großer Bedeutung. Eine Überladung bzw. Tiefenentladung würde zu einer erheblichen Reduktion der Batterie Lebensdauer führen und muss daher tunlichst vermieden werden [3].

Nach welchem Hauptkriterium das EMS die Leistung zwischen VKM und E-Maschine aufteilt kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen, wie z.B.: [3]

- Minimierung des Kraftstoffverbrauchs (häufigste Zielgröße)
- Minimierung einer bestimmten Abgaskomponente, wie z.B.  $\text{NO}_x$  (kann in bestimmten Situationen sinnvoll sein)
- Erhöhung von Fahrdynamik / Fahrspaß u.v.m.....

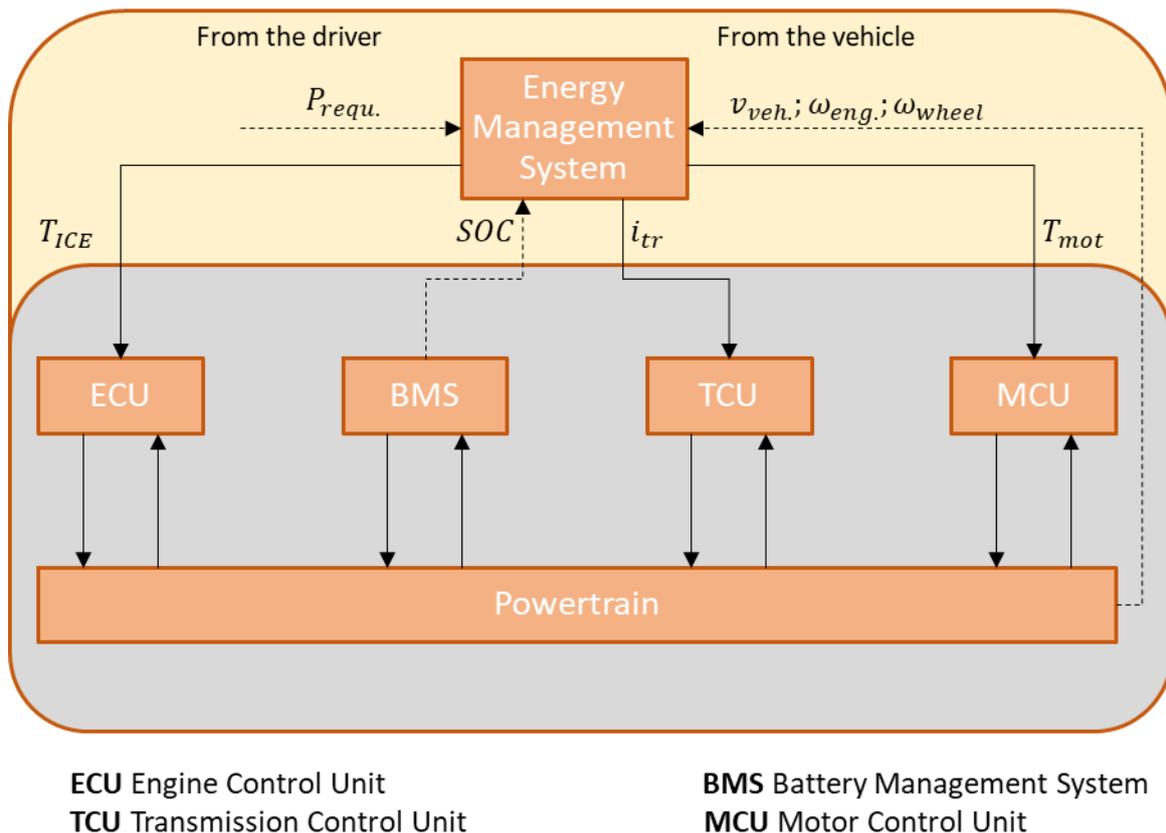


Abbildung 3-1: Controller-Architektur in HEV / PHEV [7]

### 3.2 Betriebszustände in Hybridfahrzeugen

Das EMS bzw. die Betriebsstrategie ermöglichen je nach Randbedingungen sowie festgelegtem Hauptkriterium unterschiedliche Leistungsaufteilungen und damit unterschiedliche Betriebszustände. Diese Betriebszustände umfassen neben der freien Wahl der Energiequellen zum Antreiben (verbrennungsmotorisch, elektrisch, oder Kombination) auch die Möglichkeit der Rückgewinnung elektrischer Energie sowie eine Start-Stopp-Funktion [3]. In Abbildung 3-2 sind die für einen Parallelhybrid möglichen Betriebszustände zusammengefasst.



Abbildung 3-2: Übersicht der Betriebszustände eines Parallelhybrid [6]

Die Nachfolgenden Kapitel sollen insbesondere Eindrücke vermitteln unter welchen Bedingungen welche Betriebszustände sinnvoll umgesetzt werden können/sollen.

### 3.2.1 Start/Stopp bzw. Lastpunktanhebung im Stillstand

Hybridfahrzeuge bieten eine sehr gute Basis zur Umsetzung von Start-Stopp-Systemen, da bereits ab geringen Hybridisierungsgraden (Mild-Hybrid) die notwendigen elektrischen Komponenten für ein zuverlässiges Starten der VKM vorhanden sind [6]. Vor allem im Stadtverkehr bzw. im Stau gibt es häufig Stillstandsphasen, in denen das Start-Stopp System durch Abschalten der VKM Verbrauch und Emissionen reduzieren kann. Ein Abschalten erfolgt jedoch nur, wenn bestimmte Randbedingungen erfüllt sind, die vom Steuergerät überprüft werden. Wird das Fahrzeug angehalten, wird überprüft ob [6]

- kein Gang eingelegt ist,
- das Bremspedal betätigt, bzw. die Kupplung nicht getreten ist,
- der Motor eine bestimmte Temperatur hat,
- der elektronische Batteriesensor genügend Energie für den Startvorgang meldet.

Die Deaktivierung des Start-Stopp Systems bei geringen Motortemperaturen ist ein wirkungsvolles Mittel, um Kaltstartemissionen bzw. schlechte Konvertierungsraten und damit verbundene hohe Emissionen durch geringe Temperaturen des Abgasnachbehandlungssystems zu vermeiden. Sobald die Kupplung betätigt wird bekommt der Starter das Signal die VKM wieder zu starten [6], [3].

Wichtig zu beachten sind die höheren Anforderungen an den Starter. Das Start-Stopp System ist eine abgasrelevante Komponente und muss daher den OBD-Bestimmungen (On-Bord-Diagnose) entsprechen und eventuell auftretende Fehler müssen im Fehlerspeicher hinterlegt werden. Darüber hinaus ist aufgrund der häufigen Startvorgänge eine zyklenfeste Batterie notwendig, die ebenfalls in der Lage sein muss, im Stillstand die Leistung für eventuell benötigte Nebenverbraucher (Klimaanlage, Lenkhilfpumpe etc.) bereitzustellen [6].

Wird dringend Energie zum Nachladen der Batterie benötigt (bei sehr geringem SOC) besteht die Möglichkeit im Stillstand durch erhöhte Auslastung der VKM diese Energie bereitzustellen. Dabei wird i.d.R. die Drehzahl bzw. das Moment der VKM beschränkt, um eine zu hohe Geräuschentwicklung bzw. ein zu heißes Abgas im Stillstand zu begrenzen [3].

### 3.2.2 Regeneratives Bremsen

In herkömmlichen Fahrzeugen wird die kinetische Energie des Fahrzeugs bei einer gewünschten Verzögerung über die mechanische Bremse und/oder die Motorbremswirkung der VKM in Wärme umgewandelt. In Hybridfahrzeugen kann diese, ansonsten für das Fahrzeug verlorene Energie, in elektrische Energie zum Laden der Batterie umgewandelt und damit sinnvoll genutzt werden. Das Rekuperationspotential ist dabei primär abhängig von: [3]

- Maximale Ladeleistung / Kapazität der Batterie
- Maximale Leistung des Elektromotors
- Maximal auf einer Achse übertragbare Kräfte

Je nachdem welche Achse gebremst wird kommt es zu einer Zu- oder Abnahme der Radaufstandskraft. Die zur Berechnung der Radkräfte notwendigen Abstände und Kräfte sind in Abbildung 3-3 illustriert. An dieser Stelle sei kurz angemerkt, dass die folgenden Ausführungen für eine exakte Betrachtung notwendig wären, allerdings in PHEM vereinfacht keine Limitierung der Längskraft am Rad erfolgt.

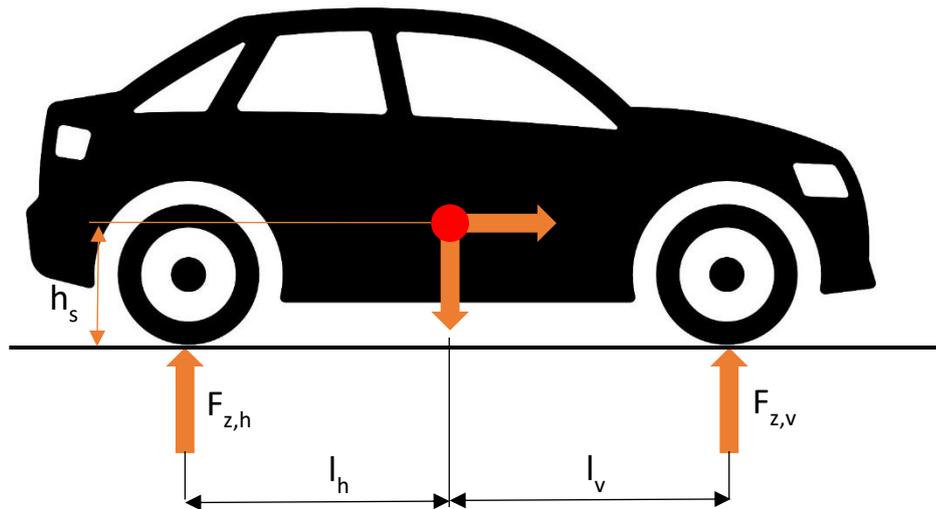


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines Fahrzeugs zur Bestimmung der Radaufstandskräfte [8]

Die Radaufstandskräfte ergeben sich folglich zu:

$$F_{z,v} = \frac{m_{Fzg.} * (g * l_h - a * h_s)}{l_h + l_v} \quad (3-1)$$

$$F_{z,h} = \frac{m_{Fzg.} * (g * l_v - a * h_s)}{l_h + l_v} \quad (3-2)$$

Die maximale Bremskraft ergibt sich aus der Radaufstandskraft und dem Reibwert, welcher zur Charakterisierung des Kontaktes zwischen Reifen und Fahrbahn dient:

$$F_{x,max} = F_{z,max} * \mu \quad (3-3)$$

Durch Multiplikation der Bremskraft mit der Fahrzeuggeschwindigkeit erhält man die maximale Leistung, die zum Laden der Batterie zur Verfügung steht. Um die tatsächlich zugeführte Ladung und damit den aktuellen Ladezustand bestimmen zu können, müssen natürlich die Wirkungsgrade der E-Maschine sowie der Batterie berücksichtigt werden [8].

Zusätzlich zu den bereits angeführten Einschränkungen kann das Rekuperationspotential durch weitere sicherheits- sowie komforttechnische Aspekte reduziert werden, wie z.B. eine Begrenzung in fahrdynamisch kritischen Situationen [3].

Grundsätzlich versucht man möglichst viel Bremsenergie über einen Generatorbetrieb der E-Maschine abzubilden, da diese Energie „gratis“ zur Verfügung steht. Kommt es jedoch zu einer Übersteigerung der im jeweiligen Betriebspunkt maximal möglichen Ladeleistung bzw. werden radselektive Regeleinriffe, beispielsweise durch das ESP, benötigt, wird ein Teil der Bremsanforderung von der mechanischen Bremse übernommen [3]. Gleiches gilt, wenn die Batterie bereits voll geladen ist und damit keine weitere Energie eingespeichert werden kann.

### 3.2.3 Lastpunktanhebung (LPA)

Verbrennungsmotoren haben grundsätzlich die Charakteristik, in der Teillast geringere Wirkungsgrade und damit höhere Verbräuche aufzuweisen. Dafür verantwortlich sind unter anderem die in der Teillast anteilmäßig höheren Reibungsverluste. Besonders ausgeprägt ist der geringe Teillastwirkungsgrad bei Benzinmotoren mit homogener Verbrennung aufgrund der zusätzlich auftretenden, sehr hohen Drosselverluste durch die Drosselklappe. In Hybridfahrzeugen besteht nun die Möglichkeit von der VKM ein höheres Moment als für den Antrieb notwendig zu fordern und damit den Verbrauch durch den Betrieb bei höherer Last zu senken [3], [2].

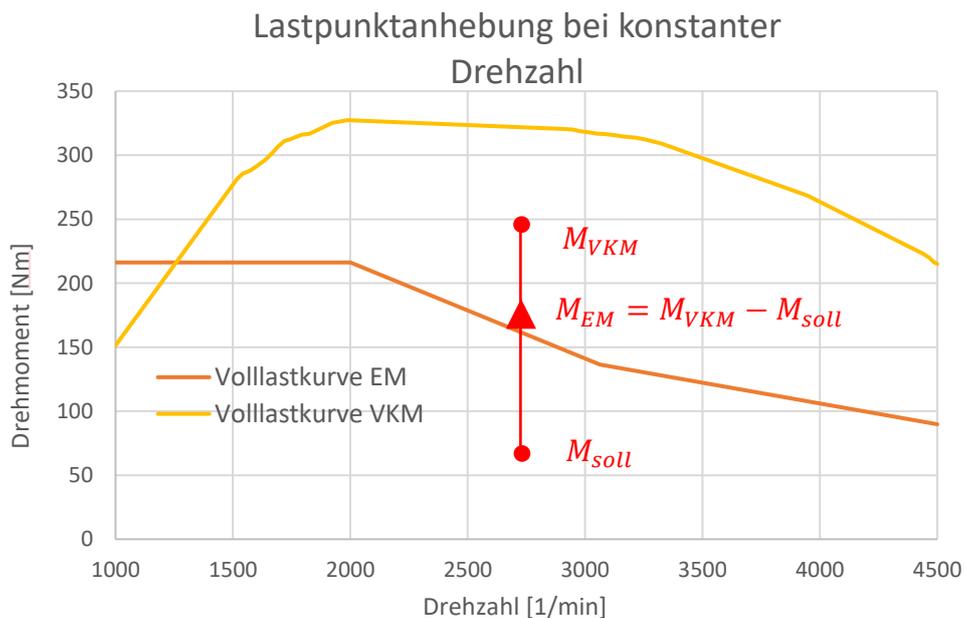


Abbildung 3-4: Prinzipschaubild einer LPA bei konstanter Drehzahl [9]

Das überschüssige Moment wird verwendet, um über einen Generatorbetrieb der E-Maschine die Batterie zu laden. Dadurch ergibt sich in bestimmten Betriebspunkten eine „win-win-Situation“, da sowohl der Verbrauch reduziert als auch elektrische Energie für zukünftig elektrisches Fahren generiert werden kann.

Die Entscheidung ob eine Lastpunktanhebung sinnvoll ist kann von der Betriebsstrategie auf Basis verschiedener Situationen getroffen werden:

- LPA ist energetisch sinnvoll: Wenn durch eine LPA der Kraftstoffverbrauch reduziert werden kann und gleichzeitig der Batterieladezustand eine weitere Ladung zulässt
- Wenn dringend Strom zum Nachladen der Batterie benötigt wird (bei geringem SOC)

Wichtig bei der energetischen Bewertung des Einsparungspotentials ist die Betrachtung der gesamten Wirkungsgradkette. Ausgehend vom Betriebspunkt der VKM müssen für eine LPA die Wirkungsgrade von Generator, Batterie beim Laden und Entladen sowie der elektrischen Maschine in die Betrachtung einfließen. Damit kann ein virtueller Kraftstoffverbrauch bestimmt werden, um zu entscheiden, in welchen Betriebspunkten eine LPA im Vergleich zu einem reinen VKM-Betrieb ohne LPA sinnvoll ist [2].

### 3.2.4 Rein elektrischer Betrieb

Hybridfahrzeuge mit hohem Hybridisierungsgrad (Vollhybrid, Plug-In-Hybrid) bieten die Möglichkeit rein elektrisch zu fahren. Hierbei wird die gesamte geforderte Antriebsleistung durch den E-Motor abgedeckt. Unabhängig der Betrachtung der Betriebsstrategie, ob ein rein elektrischer Betrieb sinnvoll ist, muss in einem ersten Schritt überprüft werden, ob die E-Maschine überhaupt in der Lage ist, das geforderte Antriebsmoment alleine aufzubringen. Dazu müssen folgende Randbedingungen eingehalten werden: [3]

- Der E-Motor kann unter Berücksichtigung der Volllastgrenzen das geforderte Antriebsmoment bereitstellen
- Der Ladezustand ist hoch genug und erlaubt dadurch einen motorischen Betrieb der E-Maschine,
- Die Batterie & Leistungselektronik können die geforderte Entladeleistung abdecken.

Sind diese Punkte erfüllt ist grundsätzlich ein rein elektrischer Betrieb möglich.

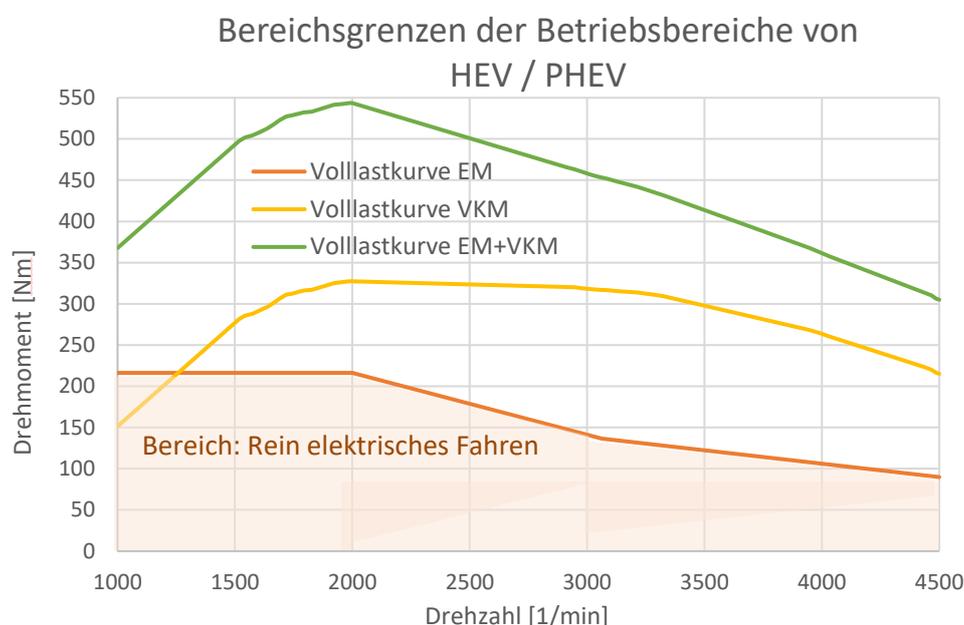


Abbildung 3-5: Betriebsbereiche für Voll- und Plug-In HEV [9]

Die Entscheidung ob bzw. wann rein elektrisch gefahren wird kann auf unterschiedliche Weise getroffen werden. Beispielsweise kann, wie bereits bei der LPA erwähnt, eine Entscheidung auf Basis einer energetischen Betrachtung mehrerer Betriebspunkte erfolgen. Im konkreten Fall des rein elektrischen Fahrens gibt es in der Literatur auch Ansätze in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und Leistungsanforderung. So wird z.B. bis 50 [km/h] und einer geforderten Antriebsleistung von  $\leq 40$  [kW] rein elektrisch gefahren, um hohe Verbräuche der VKM in der Teillast zu vermeiden. Steigt die Geschwindigkeit bzw. die Lastanforderung oder sinkt der SOC zu stark ab wird auf Hybridbetrieb / reinen VKM-Betrieb umgestellt. Prädiktive Informationen (z.B. GPS-Signal, bekanntes Streckenprofil etc.) können ebenfalls einen großen Einfluss auf die Wahl der Betriebsweise haben [2].

### 3.2.5 Boosten

Unter Boosten versteht man prinzipiell eine Betriebsweise, bei der sowohl von der E-Maschine als auch von der VKM Leistung abgegeben wird. Notwendig wird der Boost-Betrieb, wenn die geforderte Antriebsleistung nicht von einem Aggregat allein aufgebracht werden kann. Darüber hinaus gibt es noch weitere Betriebspunkte, in denen das zusätzliche Antriebsmoment der E-Maschine positive Auswirkungen haben kann. Beispielsweise kann das bereits vom Stillstand voll abrufbare Drehmoment der E-Maschine genutzt werden, um das Ansprech- und Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs zu verbessern. Natürlich muss hierbei wie immer auf den Ladezustand der Batterie Rücksicht genommen werden [2], [3].

Alternativ zur Verbesserung des Fahrverhaltens kann das zusätzliche Drehmoment der E-Maschine auch genutzt werden, um die Drehmomentanforderung an die VKM zu reduzieren. Hierbei kann eine Kraftstoffeinsparung durch Reduzierung der Lastanforderung auf einen Betriebspunkt mit geringerem Verbrauch erzielt werden [3].

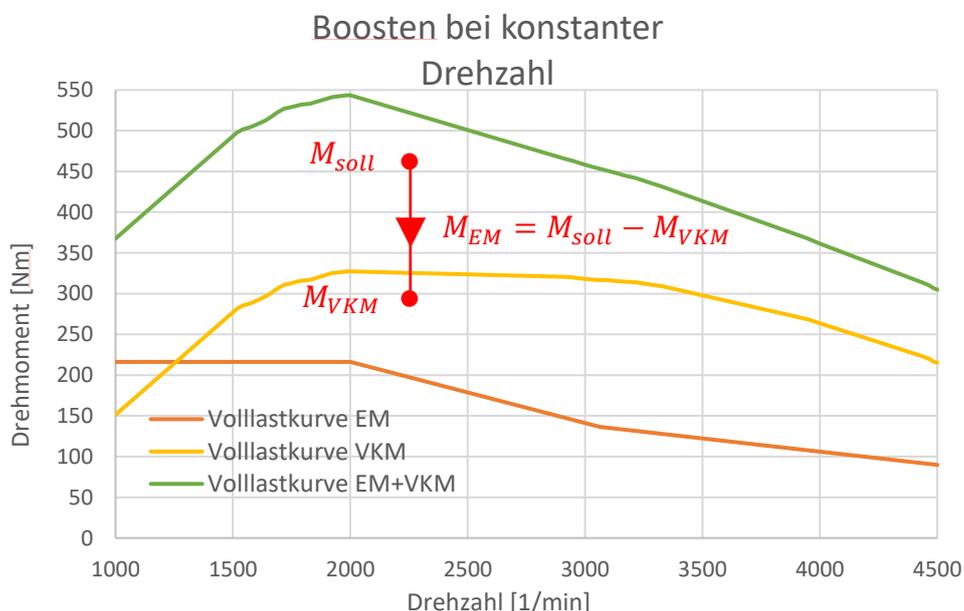


Abbildung 3-6: Prinzipschaubild für einen Boostvorgang bei konstanter Drehzahl [9]

### 3.2.6 Reiner VKM-Betrieb

Hierbei wird das Fahrzeug rein über den Verbrennungsmotor angetrieben. Eine Art des reinen VKM-Betriebes wurde bereits in Kapitel 3.2.3 behandelt, indem die VKM ein höheres Moment als das geforderte Antriebsmoment bereitstellt, um die Batterie nachzuladen. Daneben besteht natürlich auch die Betriebsmöglichkeit, exakt das für den gewünschten Fahrzustand notwendige Antriebsmoment über die VKM zu realisieren. Zusammenfassend bestimmen folgende Aspekte ob ein reiner VKM-Betrieb notwendig / sinnvoll ist: [3]

- Eine Abgabe elektrischer Leistung ist aufgrund eines zu geringen Ladezustandes nicht möglich
- Ein reiner VKM-Betrieb wird aus energetischer Sicht von der Regelstrategie gewählt (z.B. bei Konstantfahrt auf der Autobahn mit 130 [km/h])

### 3.2.7 Klassifizierung der Regelstrategien

Die Aufgabe der Regelstrategie ist die sekundliche Festlegung des Betriebszustandes, wobei primär unterschieden werden muss, ob der zu absolvierende Fahrzyklus bekannt oder unbekannt ist [3]. Ganz allgemein lassen sich zwei Hauptstrategiegruppen zur Regelung von Hybridfahrzeugen klassifizieren:

- Regelbasierte Strategien: Diese Strategien treffen Entscheidungen anhand festgesetzter Regeln und eignen sich besonders gut für Echtzeitanwendungen, da keine zukünftigen Informationen benötigt werden.
- Modellbasierte Strategien: Diese Strategien nutzen die Information über zukünftige Fahranforderungen, um ein globales Optimum zu finden [7].

Regelstrategien, die auf Fahrzyklusdaten zugreifen können, sind in der Lage eine optimale Betriebsweise einzustellen, um in diesem Zyklus beispielsweise den Verbrauch oder eine bestimmte Emissionskomponente zu minimieren. In realen Fahrzeugen kann neben dem Fahrprofil, über die Eingabe von Start- Zielkoordinaten (inklusive hinterlegtem Höhenprofil), auch der Einfluss der aktuellen Verkehrslage (z.B. Stop and Go, freie Fahrt etc.) in der Betriebsweise berücksichtigt werden [3]. Dies geschieht in heutigen Premiumfahrzeugen beispielsweise über Abstandssensoren, die aus dem Fahrverhalten des Vorderfahrzeugs Rückschlüsse auf die Verkehrssituation zulassen. Diese Informationen können genutzt werden, um die Regelstrategie an die Verkehrssituation anzupassen und sich damit einer optimalen Betriebsweise anzunähern [2].

Trotz dieser zusätzlichen Informationen können viele Faktoren nicht berücksichtigt werden, da diese im Vorhinein einfach nicht zur Verfügung stehen. Dazu zählen beispielsweise Informationen über zukünftige Fahrprofile, die idealerweise in der aktuellen Betriebsweise berücksichtigt werden sollten (z.B. SOC am Ende der aktuellen Fahrt anheben, um für anschließende Bergfahrt genügend elektrische Energie zur Verfügung zu haben). Aus diesem Grund werden für diese Echtzeitanwendungen vermehrt nicht-prädiktive bzw. regelbasierte Steueransätze gewählt, die auf Basis der festgelegten Entscheidungslogik die Betriebsweise vornehmen und Online-Fahrzeugdaten unterstützend berücksichtigen [7].

Im Falle der simulativen Abbildung von Hybridfahrzeugen muss der Fahrzyklus vorgegeben werden, wodurch es möglich ist, für verschiedene Fahrzyklen optimale Betriebsstrategien abzuleiten. Eine solche Regelstrategie zählt zu den prädiktiven bzw. modellbasierten Strategien. Durch Auswertung einer Kostenfunktion kann für einen bestimmten Fahrzyklus eine optimale Strategie, beispielsweise zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs, abgeleitet werden [7]. Diese Ergebnisse können anschließend mit den Rollen- und RDE-Messungen eines Hybridfahrzeugs verglichen werden, um die Potentiale einer optimalen Strategie zu evaluieren (z.B. Kraftstoffeinsparungspotenzial). Zusätzlich können die Erkenntnisse der Simulation in der Entwicklung, Dimensionierung von Antriebskomponenten, sowie Verbesserung der real umgesetzten Regelstrategie herangezogen werden [3].

Der nun folgende Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und Validierung einer solchen Regelstrategie.

## 4 Regelstrategie

Die im Zuge der Untersuchungen dieser Arbeit umgesetzte Regelstrategie beruht auf der sogenannten „Equivalent Consumption Minimization Strategy“ (kurz ECMS). Diese Strategie zählt zu den modellbasierten Ansätzen und führt ein globales Optimierungsproblem (z.B. Minimierung des Gesamtverbrauchs) in ein lokales Optimierungsproblem über, welches für jeden Zeitschritt die optimale Leistungsaufteilung zwischen Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor bestimmt. Dieser Ansatz ist somit mathematisch deutlich weniger aufwändig und erlaubt eine praktische Anwendung, da der Ansatz nicht ausschließlich von Informationen über zukünftige Fahrsituationen abhängt. Damit lässt sich mit deutlich geringerem Aufwand eine nahe am globalen Optimum liegende Betriebsweise realisieren. Für die Funktion legt die ECMS dem Lade- bzw. Entladeverhalten des Hybridfahrzeugs folgende Annahmen zugrunde: [7]

Die Strategie setzt die Annahme voraus, dass über den Zyklus der SOC am Ende annähernd dem SOC am Beginn entspricht. Ist dies nicht der Fall, kann die Energiedifferenz über ein post-processing korrigiert werden, um wieder auf SOC-Neutralität zu kommen. Dies führt für kleine SOC-Abweichungen zu einem fast gleichen Verbrauch als wenn die Strategie direkt auf SOC-Neutralität hin parametrisiert wird (siehe Kapitel 5.1.2). Die Batterie wirkt also im Prinzip wie ein auffüllbarer Energiespeicher, welcher über den gesamten Zyklus gesehen gleich viel elektrische Energie abgibt wie aufnimmt. Absolut gesehen kommt dadurch die gesamte Antriebsenergie aus dem Kraftstoff, da die entnommene elektrische Energie (Kraftstoffeinsparung) durch Rekuperation bzw. Kraftstoffeinsatz (Mehrverbrauch) wieder rückgespeichert wird [7]. Abbildung 4-1 illustriert dieses grundlegende Konzept der ECMS.

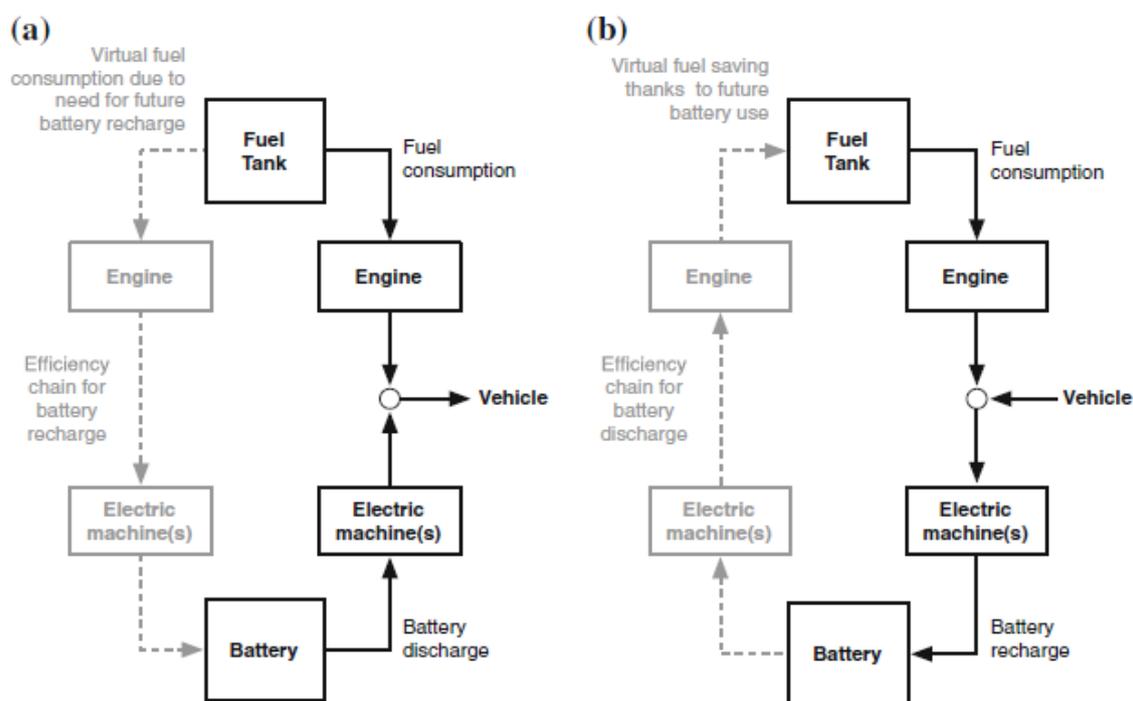


Abbildung 4-1: Energiepfade während entladen (a) und laden (b) in einem Parallelhybrid [7]

Eine Abgabe von elektrischer Energie (a) führt momentan zu einer Kraftstoffeinsparung, allerdings muss diese Energie später durch erhöhten Kraftstoffeinsatz wieder rückgespeichert werden (strichlierter Pfad). Analog führt eine Aufladung der Batterie (b) durch Kraftstoffeinsatz zu einem momentanen Mehrverbrauch, der wiederum zu einem späteren

Zeitpunkt durch Abgabe von elektrischer Energie wieder ausgeglichen werden muss (strichlierter Pfad). Für beide Fälle wird i.d.R. eine mittlere Wirkungsgradkette für Laden bzw. Entladen angenommen, da man im Vorhinein nicht weiß, unter welchen Bedingungen zukünftig Strom rückgespeichert bzw. entnommen wird [7].

Die ECMS beruht also auf der Berücksichtigung dieser elektrischen Energie zusätzlich zum aktuell realen Verbrauch, um einen äquivalenten Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch zu bestimmen. Dieser Energieverbrauch wird für unterschiedliche Lastaufteilungen zwischen Elektromotor und Verbrennungsmotor bestimmt. Schlussendlich wählt man jene Lastaufteilung, bei der dieser Wert sein Minimum annimmt [7].

## 4.1 Rahmenbedingungen der Regelstrategieentwicklung

Auf Basis der soeben vorgestellten ECMS wurde eine Regelstrategie abgeleitet und in einem ersten Schritt in Excel implementiert. Für die Entwicklung und erste Validierung der Strategie war es notwendig bestimmte Rahmenbedingungen vorzugeben, die an dieser Stelle näher erläutert werden sollen.

### Fahrzyklus

Der den Untersuchungen zugrunde gelegte Fahrzyklus ist ein sogenannter „Real World Cycle“ (kurz RWC). Das dargestellte Geschwindigkeitsprofil lässt schnell erkennen, dass es sich bei dem Zyklus um einen realitätsnahen Fahrzyklus handelt, der aus drei Teilen besteht. Einem Stadt-, Überland- und Autobahnanteil. Die Untersuchung anhand eines RWC Zyklus hat mehrere Vorteile verglichen mit z.B. einem synthetischen Fahrprofil wie dem NEDC:

1. Lange Testdauer bzw. Testlänge. Damit kann eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrsituationen über die Zyklusdauer dargestellt und deren Einfluss auf die Regelstrategie untersucht werden.
2. Realistisches Beschleunigungsverhalten sowie Steigungsprofil. Beide Parameter haben erheblichen Einfluss auf den Leistungsbedarf. Verbunden mit der hohen Dynamik des Zyklus erlaubt dies eine Untersuchung der optimalen Lastaufteilung an einer Vielzahl an unterschiedlichen Lastpunkten.

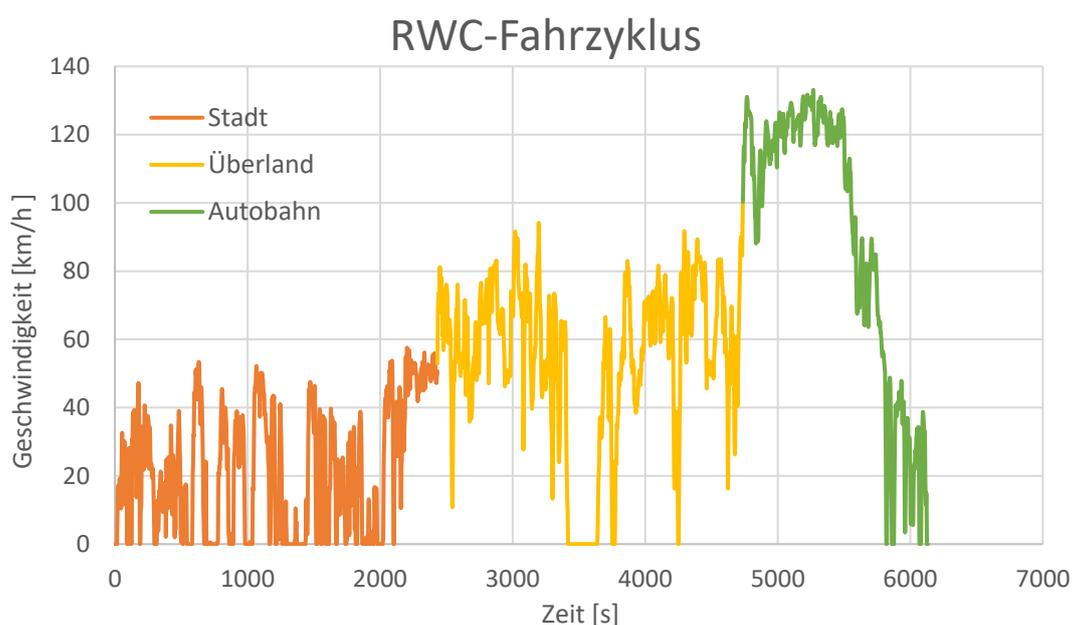


Abbildung 4-2: Geschwindigkeitsprofil des RWC-Fahrzyklus

Das verwendete Fahrprofil beruht auf einer für RDE-Fahrten am Institut verwendeten Fahrstrecke. Damit der Zyklus als RDE-konform gilt müssen eine Reihe von Randbedingungen eingehalten werden. So werden z.B. die Testdauer und -länge, sowie die Anteile an Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt in gewissen Grenzen vorgegeben. Des Weiteren unterliegen z.B. auch die Beschleunigungen während des Testzyklus gewissen Bestimmungen, um sowohl den Einfluss des Fahrstils als auch die Möglichkeit der Verfälschung durch untypisches Fahrverhalten zu mindern [10]. Damit ist sichergestellt, dass das Fahrprofil repräsentativ für ein reales, durchschnittliches Fahrverhalten ist.

### Fahrzeug

Als Versuchsfahrzeug für die Basisuntersuchungen wurde ein durchschnittlicher Diesel-Hybrid PKW herangezogen. Nachfolgende Tabelle umfasst die wichtigsten Daten hinsichtlich VKM, Elektromotor sowie Batterie.

Tabelle 4-1: Fahrzeugdaten des Ø Diesel-Hybrid PKW

Diesel HEV	
Motordaten VKM	
Kraftstoff	Diesel
Nenndrehzahl [1/min]	3672
Leerlaufdrehzahl [1/min]	755
Nennleistung [kW]	98.47
Motordaten Elektromotor	
Nenndrehzahl [1/min]	2865
Nennleistung [kW]	35
Batteriedaten	
Batterietechnologie	Li-Ion
Batteriegröße [kWh]	1.5
Batteriespannung [V]	250
Innenwiderstand [ $\Omega$ ]	0.095
Kapazität [Ah]	5.93
SOC-Bereich	0.3 - 0.7
Fahrzeug	
Masse [kg]	1746.32
Beladung [kg]	297.4
Getriebe	6 Gang

Die Validierung bezüglich der Anwendbarkeit der Regelstrategie auf andere Fahrzeuge (Benzin-Hybrid PKW bzw. LKW-Hybrid) erfolgt nach Implementierung der Strategie im Simulationsprogramm PHEM (siehe Kapitel 5.1 bzw. 5.2.2).

### Lastkollektiv

Um die Regelstrategie erstellen zu können, ist die Kenntnis über die geforderte Antriebsleistung sowie die Drehzahl, bei der die Motoren betrieben werden, notwendig. Um die Antriebsleistung exakt bestimmen zu können, müssen möglichst alle real auftretenden Leistungsanteile berücksichtigt werden. Dazu zählen insbesondere Roll-, Luft-, Beschleunigungs- und

Steigungswiderstand, Verluste im Antriebsstrang und der Leistungsbedarf der Nebenverbraucher [8]. Zur Bestimmung der Drehzahl muss zudem eine Schaltlogik für die Gangwahl hinterlegt werden.

Aufgrund der aufwändigen Berechnung wurde für eine erste Überprüfung der Regelstrategie der Leistungsbedarf und die Drehzahl aus einer PHEM Simulation des Fahrzeugs mit dem bisher implementierten Hybridmodell als konstant vorgegeben. Eine genaue Erläuterung der Methodik in PHEM zur Berechnung der Antriebsleistung und Drehzahl folgt in Kapitel 4.3.

## 4.2 Methodik der Regelstrategie

Auf Basis der zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen kann nun die Methodik (dargestellt in Abbildung 4-3) umgesetzt werden.



Abbildung 4-3: Methodik der Regelstrategie

Wie bereits erwähnt wird die geforderte Antriebsleistung sowie die Drehzahl zu jedem Zeitpunkt als bereits gegebene Konstante aus einer Referenzsimulation vorgegeben und somit der erste Schritt an dieser Stelle nicht weiter erläutert.

### 4.2.1 Leistungsaufteilung

Nachdem die erforderliche Antriebsleistung und Drehzahl bestimmt wurden muss entschieden werden, wie die Leistung zwischen Elektromotor und VKM aufgeteilt wird. Zu diesem Zweck wird die in Abbildung 4-4 dargestellte Methodik für jeden Zeitschritt durchgeführt. Anzumerken ist, dass an dieser Stelle keine Einschränkungen der Leistungsvariation bezüglich diverser Batterieparameter wie z.B. aktuellem SOC vorgenommen werden. Diese Parameter werden im nächsten Schritt bei der Berechnung des äquivalenten Energiebedarfs berücksichtigt.

Das genaue Vorgehen bezüglich der Leistungsaufteilung sieht wie folgt aus:

- 1) Auf Basis der festgelegten Drehzahl wird die Leistung des Elektromotors in einer bestimmten %-Abstufung von -100 [%] bis +100 [%] der jeweiligen Volllast (falls der E-Motor die Antriebsleistung nicht allein abdecken kann) bzw. der Antriebsleistung (sonstiger Fall) variiert. Die Volllast ist dabei aus den hinterlegten, motorspezifischen Volllastkurven in Abhängigkeit der Drehzahl bekannt. Dieser Ansatz garantiert, dass der E-Motor über den gesamten, bei der jeweiligen Drehzahl zur Verfügung stehenden, Leistungsbereich evaluiert wird.
- 2) Nachdem die EM-Leistungen festgelegt wurden können die VKM-Leistungen als Differenz zur gesamten Antriebsleistung bestimmt werden.

$$Pe_{VKM} = Pe_{ges} - Pe_{EM} \quad (4-1)$$

- 3) Anschließend erfolgt eine Überprüfung, ob sich beide Motoren für die jeweiligen Leistungsaufteilungen im zulässigen Bereich befinden.

Die VKM-Leistung muss zwischen der Schlepp- und Vollastkurve liegen

$$Pe_{schlepp} \leq Pe_{VKM} \leq Pe_{voll}. \quad (4-2)$$

Die EM-Leistung muss im Leistungsbereich zwischen Generator- und Motorbetrieb liegen

$$Pe_{voll.}^- \leq Pe_{EM} \leq Pe_{voll.}^+ \quad (4-3)$$

Ist eine der in Gleichung (4-2) und (4-3) definierten Bedingungen nicht erfüllt, wird diese Leistungskombination im nächsten Schritt nicht weiter berücksichtigt.

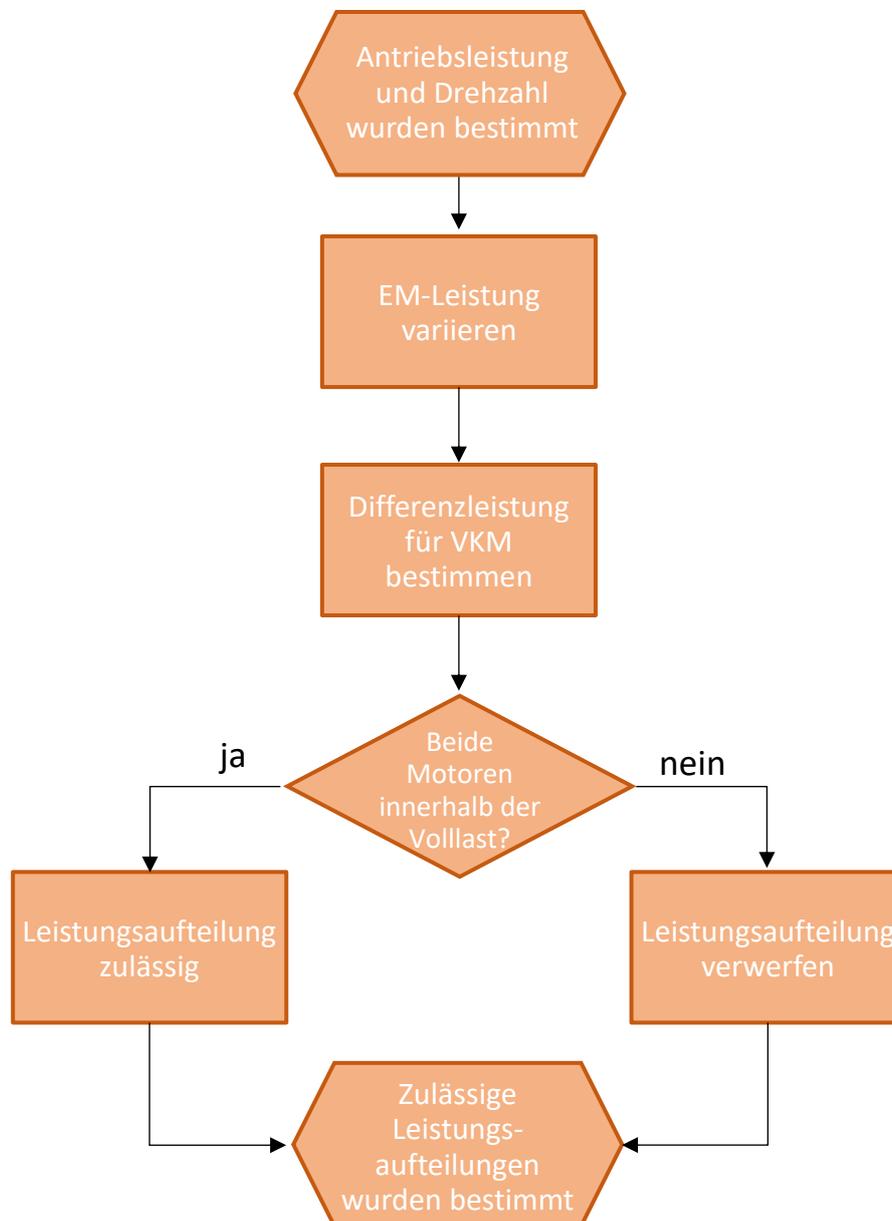


Abbildung 4-4: Methodik zur Bestimmung der zulässigen Leistungsaufteilungen

### 4.2.2 Äquivalenter Gesamtenergiebedarf

Nach durchgeführter Definition der zulässigen Leistungsaufteilungen wird der äquivalente Gesamtenergiebedarf für jede dieser Leistungskombinationen berechnet. Dieser Schritt beinhaltet die eigentliche Regelstrategie auf Basis der ECMS.

Die Berechnung des Energiebedarfs erfolgt nach Gleichung (4-4).

$$E_{ges\,äquiv.} = E_{VKM} + E_{EM} * \{p(SOC) + s_{äquiv.}\} + E_{VKM\,start} \quad (4-4)$$

$E_{ges\,äquiv.}$	äquivalenter Gesamtenergiebedarf [kWh]
$E_{VKM}$	Energiebedarf der VKM [kWh <sub>Kraftstoffenergie</sub> ]
$E_{EM}$	Energiebedarf der EM [kWh <sub>elektr. Energie</sub> ]
$p(SOC)$	Funktion zur Berücksichtigung des SOC [-]
$s_{äquiv.}$	Äquivalenzfaktor für die elektrische Energie [-]
$E_{VKM\,start}$	benötigte Energie zum Starten der VKM [kWh]

Im Zuge der ersten Implementierung der Regelstrategie in Excel wurden einige Parameter mithilfe vereinfachter Ansätze berechnet. Die Hintergründe zur Berechnung sowie eine Validierung, dass vorgenommene Vereinfachungen trotzdem zu akkuraten Ergebnissen und damit zu einer ersten aussagekräftigen Überprüfung der Regelstrategie führen, werden im Folgenden erläutert.

#### Energiebedarf der VKM $E_{VKM}$ sowie der E-Maschine $E_{EM}$

Die Bestimmung des Energiebedarfs beruhte im Rahmen der Methodikentwicklung auf der am IVT „Veline-Ansatz“ genannten Methode<sup>1</sup>. Dieser Ansatz approximiert den Zusammenhang zwischen der abgegebenen effektiven Leistung und dem zugehörigen Energieverbrauch der Motoren über eine Gerade. Somit kann nach Aufstellen der Geradengleichung der Energieverbrauch für beliebige Leistungsaufteilungen berechnet werden. Der Hauptvorteil dieser Methode liegt darin, dass nicht für jeden Betriebspunkt aus dem 3D-Kennfeld interpoliert werden muss und gleichzeitig die Energieverbräuche mit entsprechender Genauigkeit berechnet werden können.

Um die Velines für VKM und E-Maschine aufstellen zu können, wurden zuerst die Energieverbräuche für die gegebenen Betriebspunkte aus den Simulationsergebnissen der Referenzsimulation berechnet.

Der Energiebedarf der VKM basiert auf der im Kraftstoff gespeicherten chemischen Energie und wird nach Gleichung (4-5) berechnet.

---

<sup>1</sup> In späteren Anwendungen der Regelstrategie in der Simulationssoftware PHEM kann der Verbrauch entsprechend Leistung und Drehzahl aus dem Motorkennfeld interpoliert werden.

$$E_{VKM} = FC * H_u * \Delta t \quad (4-5)$$

$FC$	Kraftstoffverbrauch [kg/h]
$H_u$	Heizwert Diesel [kWh/kg]
$\Delta t$	zeitliche Auflösung der Simulationsergebnisse in 1 [Hz]

Der Heizwert wurde aus der Literatur mit einem konstanten Wert von 11.8 [kWh/kg] angenommen. Der Kraftstoffverbrauch wird in PHEM aus dem hinterlegten normierten Verbrauchskennfeld interpoliert und nach folgender Formel entnormiert.

$$FC = FC_{norm} * P_{rated} \quad (4-6)$$

$FC_{norm}$	normierter Kraftstoffverbrauch [kg/h norm]
$P_{rated}$	Nennleistung der VKM [kW]

Der so berechnete Energieverbrauch hat die Einheit [kWs], da eine zeitliche Auflösung von 1 [Hz] zugrunde gelegt wird. Somit muss der Wert aus Gleichung (4-5) durch den Umrechnungsfaktor 3600 [s/h] dividiert werden, um auf den sekundlichen Energieverbrauch in [kWh] zu kommen.

Der Energiebedarf der E-Maschine berechnet sich für motorischen Betrieb nach Gleichung (4-7) und für generatorischen Betrieb nach Gleichung (4-8).

$$E_{EM}^+ = P_{iBatt} * \frac{1}{\overline{\eta_{EM}^+} * \overline{\eta_{Batt}^+}} * \Delta t \quad (4-7)$$

$$E_{EM}^- = P_{iBatt} * \overline{\eta_{EM}^-} * \overline{\eta_{Batt}^-} * \Delta t \quad (4-8)$$

$E_{EM}^+$	abgegebene Energie [kWh]
$E_{EM}^-$	rückgespeicherte Energie [kWh]
$P_{iBatt}$	Batterieleistung [kW]
$\overline{\eta_{EM}^+}$	mittlerer E-Motor-Wirkungsgrad bei Leistungsaufnahme
$\overline{\eta_{Batt}^+}$	mittlerer Batteriewirkungsgrad bei Leistungsaufnahme
$\overline{\eta_{EM}^-}$	mittlerer E-Motor-Wirkungsgrad bei Leistungsabgabe
$\overline{\eta_{Batt}^-}$	mittlerer Batteriewirkungsgrad bei Leistungsabgabe

Die angegebenen mittleren Wirkungsgrade für Batterie und E-Maschine können aus den sekundlichen Ergebnissen für Batterieleistung und effektiver mechanischer Leistung der E-Maschine aus der Referenzsimulation berechnet werden.

$$\overline{\eta_{EM}^+} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{eEM_i}}{P_{iBatt_i}} \quad \text{für } P_{eEM_i} > 0 \quad (4-9)$$

$$\overline{\eta_{EM}^-} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{iBatt_i}}{P_{eEM_i}} \quad \text{für } P_{eEM_i} < 0 \quad (4-10)$$

$$\overline{\eta_{Batt}^+} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{eBatt_i}}{P_{iBatt_i}} \quad \text{für } P_{eEM_i} > 0 \quad (4-11)$$

$$\overline{\eta_{Batt}^-} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{iBatt_i}}{P_{eBatt_i}} \quad \text{für } P_{eEM_i} < 0 \quad (4-12)$$

Die Batteriewirkungsgrade berücksichtigen dabei die Lade- bzw. Entladeverluste. Die E-Motor- Wirkungsgrade berücksichtigen die Verluste in der E-Maschine durch die Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie und vice versa. Auf die Vorgänge in der Batterie sowie auf die Berechnung der Batterieleistungen wird genauer in Kapitel 4.3.1.1 eingegangen.

An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass eine Berechnung der mittleren Wirkungsgrade nur möglich ist, da die entsprechenden Daten aus der Referenzsimulation vorhanden waren. Für die spätere Implementierung der Regelstrategie in PHEM müssen diese Werte im Vorhinein geschätzt bzw. auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden, da im Vorhinein nicht bekannt ist, unter welchen Bedingungen Strom geladen bzw. entnommen wird (vgl. Abbildung 4-1).

Wie bereits bei Gleichung (4-5) erläutert erhält man durch dividieren der Gleichungen (4-7) & (4-8) durch 3600 [s/h] den Energieverbrauch der E-Maschine in [kWh].

Nachdem die Energieverbräuche für die vorgegebenen Leistungen berechnet wurden können die Veline-Linien für VKM und E-Maschine erstellt werden.

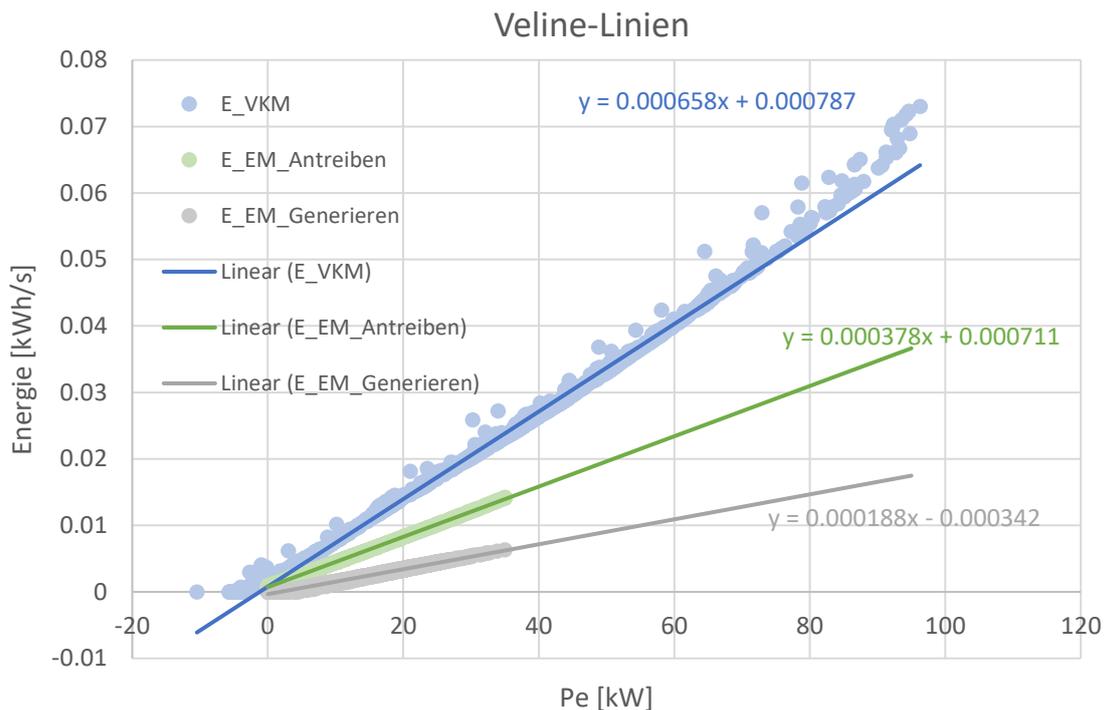
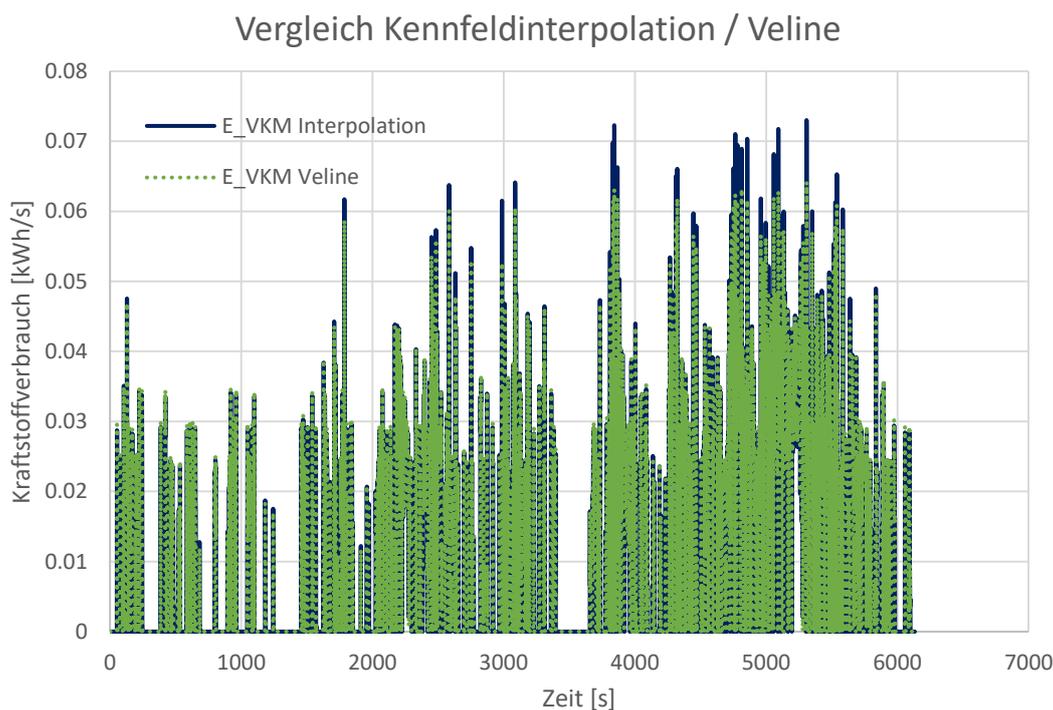


Abbildung 4-5: Veline-Linien der Referenzsimulation

Betrachtet man Abbildung 4-5 erkennt man, dass die Punkte der E-Maschine sowohl für motorischen (grün) als auch für generatorischen (grau) Betrieb annähernd auf einer Geraden liegen. Daraus folgt, dass auch wenn die E-Maschine durch die neue Regelstrategie bei anderen Leistungen betrieben wird, die Gerade in sehr guter Näherung durch dieselbe Gleichung beschrieben wird. Folglich liefert eine Berechnung der EM-Energien über die Ausgleichsgerade der Referenzsimulation sehr akkurate Ergebnisse.

Im Vergleich zur E-Maschine erkennt man für die VKM (blau) eine deutlich größere Streuung der Punkte speziell zu höheren Lasten hin, wodurch die Ausgleichsgerade stärker von den tatsächlichen Betriebspunkten der VKM abhängt. Aus diesem Grund wurde die Genauigkeit des Veline-Ansatzes im Vergleich zu einer Energiebestimmung mittels Kennfeldinterpolation für die gegebene Leistungsaufteilung verglichen.



Ansatz	$\Sigma E_{VKM}$	Abweichung
	[kWh]	[%]
Veline	53.36	0.21
Kennfeldinterpolation	53.24	

Abbildung 4-6: Vergleich des Verbrauchs zwischen Interpolation und Veline-Ansatz

Die Kennfeldinterpolation wurde im sogenannten „Engine Only“ Modus in PHEM durchgeführt. Durch Vorgabe von Leistung und Drehzahl wird dabei der Verbrauch direkt aus dem Kennfeld interpoliert. Aus dem sekundlichen Verlauf erkennt man, was bereits aus der Streuung der Punkte in Abbildung 4-5 zu vermuten war. Bei geringen bis mittleren Leistungen stimmen die beiden Ansätze sehr gut überein. Nur bei sehr hohen Leistungen weicht die Ausgleichsgerade und damit der errechnete Kraftstoffverbrauch stärker vom realen Verbrauch ab. Dennoch bleibt, wie man aus angegebener Tabelle entnehmen kann, die Abweichung des über den gesamten Zyklus aufsummierten Kraftstoffverbrauchs vernachlässigbar gering.

p(SOC) sowie Äquivalenzfaktor  $S_{\text{equiv}}$

Um ein Überschreiten der definierten SOC-Grenzen zu vermeiden wird eine Korrekturfunktion  $p(\text{SOC})$  nach Gleichung (4-13)<sup>2</sup> berücksichtigt [7].

$$p(\text{SOC}) = 1 - \left( \frac{\text{SOC}(t) - \text{SOC}_{\text{targ.}}}{(\text{SOC}_{\text{high}} - \text{SOC}_{\text{low}})/2} \right)^a \quad (4-13)$$

$\text{SOC}(t)$	SOC zum Zeitpunkt t [-]
$\text{SOC}_{\text{targ.}}$	Zielwert für den SOC [-]
$\text{SOC}_{\text{high}}$	obere SOC-Grenze [-]
$\text{SOC}_{\text{low}}$	untere SOC-Grenze [-]
$a$	Exponent zur Beeinflussung des Funktionsverlaufs [-]

Die Funktion beschreibt eine Korrekturfunktion zur Berücksichtigung der Abweichung des tatsächlichen SOC zu einem Zeitpunkt t von einem definierten Zielwert ( $\text{SOC}_{\text{targ.}}$ ). Stimmen  $\text{SOC}(t)$  und  $\text{SOC}_{\text{targ.}}$  überein hat die Funktion den Wert 1 und somit keinen Einfluss. Für  $\text{SOC}(t) < \text{SOC}_{\text{targ.}}$  wird  $p(\text{SOC}) > 1$ , wodurch elektrische Energie mit sinkendem SOC energetisch immer teurer und damit ein Verbrauch an elektrischer Energie immer unwahrscheinlicher wird. Umgekehrt nimmt die Korrekturfunktion für  $\text{SOC}(t) > \text{SOC}_{\text{targ.}}$ , Werte  $< 1$  an. Dadurch wird mit steigendem SOC elektrische Energie energetisch immer günstiger und damit ein Entladen der Batterie wahrscheinlicher [7].

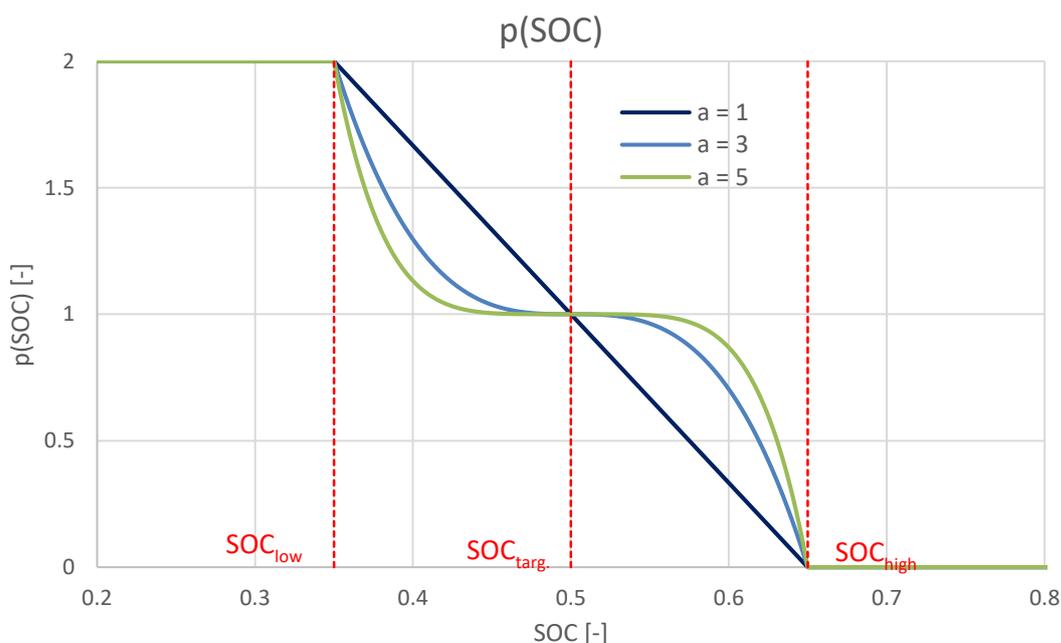


Abbildung 4-7: Korrekturfunktion zur Berücksichtigung des SOC [7]

<sup>2</sup> Gleichung ist nur gültig für ungerade, positive Exponenten

Bei Erreichen von  $SOC_{high}$  nimmt  $p(SOC)$  den Wert 0 an, wodurch elektrische Energie praktisch „gratis“ zur Verfügung steht und damit ein Entladen der Batterie sichergestellt ist. Wird hingegen  $SOC_{low}$  erreicht, nimmt  $p(SOC)$  den Wert 2 an, wodurch elektrische Energie „doppelt so teuer“ und damit eine Entladung sehr unwahrscheinlich wird. Sollte trotzdem weiter Energie aus der Batterie entnommen werden, wird spätestens ab dem minimal zulässigen SOC eine weitere Entnahme durch zusätzlich definierte Bedingungen unterbunden.

Die Form der Korrekturfunktion wird über den Exponenten vorgegeben. Je höher der Exponent, desto breiter ist der Bereich um  $SOC_{targ.}$  in dem  $p(SOC)$  den Wert 1 annimmt. Dadurch hat die Funktion erst bei größeren Abweichungen von  $SOC_{targ.}$  einen Einfluss und erlaubt eine breitere Variation des SOC über den Zyklus. Ein kleiner Exponent nimmt bereits bei kleinen Abweichungen von  $SOC_{targ.}$  einen Wert ungleich 1 an und regelt somit die Betriebsweise strikter um  $SOC_{targ.}$

Der Äquivalenzfaktor  $s_{äquiv.}$  dient dazu, um die elektrische Energie äquivalent zu einer potentiellen Kraftstoffeinsparung bzw. einem potentiellen Mehrverbrauch bewerten zu können.

Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, liegt der ECMS die Annahme zugrunde, dass der SOC am Beginn sowie am Ende des Zyklus annähernd ident ist. Diese Voraussetzung ist notwendig, um das Kraftstoffeinsparungspotential einer hybriden Betriebsweise fair mit einer reinen VKM Betriebsweise vergleichen zu können. Das Erfüllen dieser Voraussetzung ist die große Herausforderung der Regelstrategie und wird über eine sinnvolle Vorgabe eines über den Zyklus konstanten Äquivalenzfaktors erreicht. Dieser Faktor ist dabei von mehreren Parametern abhängig, insbesondere von: Fahrzyklus, Fahrzeug und  $SOC_{start}$ .

Wird  $s_{äquiv.}$  zu hoch gewählt, ist die elektrische Energie zu teuer und das Potential des Hybridsystems kann nicht voll ausgeschöpft werden. Ein zu geringer Wert führt zu einer verstärkten elektrischen Betriebsweise und damit zu einer zu starken Entleerung der Batterie. Zusammenfassend bedeutet das, dass die Regelstrategie speziell an einzelne Fahrzyklen angepasst werden kann. Wird ein definierter  $s_{äquiv.}$  für ein deutlich anderes Fahrprofil verwendet funktioniert die Regelstrategie trotzdem, allerdings werden die Einsparungspotentiale nicht voll ausgeschöpft [7].

#### Startenergie der VKM: $E_{VKM\_start}$

Die benötigte Energie zum Starten der VKM setzt sich nach Gleichung (4-14) aus zwei Anteilen zusammen. Einem Anteil zur Beschleunigung der rotatorischen Massen (1), sowie einem Anteil zur Überwindung der inneren Reibung (2).

$$E_{VKM\_start} = \left[ \overbrace{\frac{I_{VKM\_rot} * \omega^2}{2}}^{(1)} + \overbrace{E_{VKM\_schlepp} * (-1)}^{(2)} \right] * \frac{1}{\eta_{EM}^+ * \eta_{Batt}^+} \quad (4-14)$$

$I_{VKM\_rot}$	Massenträgheitsmoment der rotatorischen Massen [kgm <sup>2</sup> ]
$\omega$	momentane Winkelgeschwindigkeit [rad/s]
$E_{VKM\_schlepp}$	Schleppenergie zur Überwindung der Reibung [kWh]

Da die benötigte Startenergie durch die E-Maschine aufgebracht wird, müssen wie bereits in Gleichung (4-7) die mittleren Wirkungsgrade für E-Maschine und Batterie berücksichtigt werden. Anteil (1) hat aufgrund der verwendeten SI-Einheiten noch die Einheit [Ws]. Aus diesem Grund muss dieser Anteil noch durch 1000 [W/kW] und 3600 [s/h] dividiert werden. Die aktuelle Drehzahl sowie das Massenträgheitsmoment des Motors sind beides bekannte Parameter. Die Schleppenergie zur Überwindung der Reibung wird bei der aktuellen Drehzahl aus der hinterlegten Schleppkurve nach folgender Formel berechnet.

$$E_{VKM_{schlepp}} = \frac{P_{schlepp}}{2} * \Delta t \quad (4-15)$$

$P_{schlepp}$  Schleppleistung bei aktueller Drehzahl [kW]

Der Grund für die Halbierung der Schleppleistung liegt darin, dass ein lineares Hochschleppen der VKM von  $P_{schlepp} = 0$  auf  $P_{schlepp}$  bei aktueller Drehzahl angenommen wird. Folglich muss im Mittel über den gesamten Schleppvorgang nur die halbe Schleppleistung von der E-Maschine aufgebracht werden. Wiederum ist eine Division durch 3600 [s/h] notwendig, um Einheitenkonformität zu gewährleisten.

Nun muss noch definiert werden wann die Startenergie in Gleichung (4-4) berücksichtigt werden muss. Zu diesem Zweck wurde folgender Entscheidungsansatz entwickelt:

- 1) Betrachtet man eine Leistungsaufteilung in der die VKM eingeschaltet werden muss, wird die Startenergie aus Gleichung (4-14) berücksichtigt.
- 2) Um generell ein zu häufiges Ein- und Ausschalten der VKM und den damit verbundenen hohen Verschleiß während des Startvorganges zu vermindern, wird ein Sperrparameter  $t_{vkm\_lock}$  definiert. Dieser Parameter regelt nach welcher Zeitspanne  $\Delta t$  sich nach einer Zustandsänderung der Zustand der VKM erneut ändern darf.

$$t < t_{VKM_{lock}} \rightarrow \text{Zustand der VKM darf sich nicht ändern}$$

Folglich wird die Startenergie nur berücksichtigt, wenn sich der Zustand der VKM ändern darf und diese für die betrachtete Leistungskombination tatsächlich eingeschaltet werden muss. Eine Ausnahme ergibt sich hinsichtlich der gesamten Leistungsanforderung. Ist der Elektromotor nicht in der Lage die gesamte Antriebsenergie allein aufzubringen darf / muss eine eventuell ausgeschaltete VKM eingeschaltet werden auch wenn  $t < t_{vkm\_lock}$ .

In Abbildung 4-8 wird die gerade beschriebene Methodik nochmals übersichtlich in Form eines Flow-Diagramms zusammengefasst.

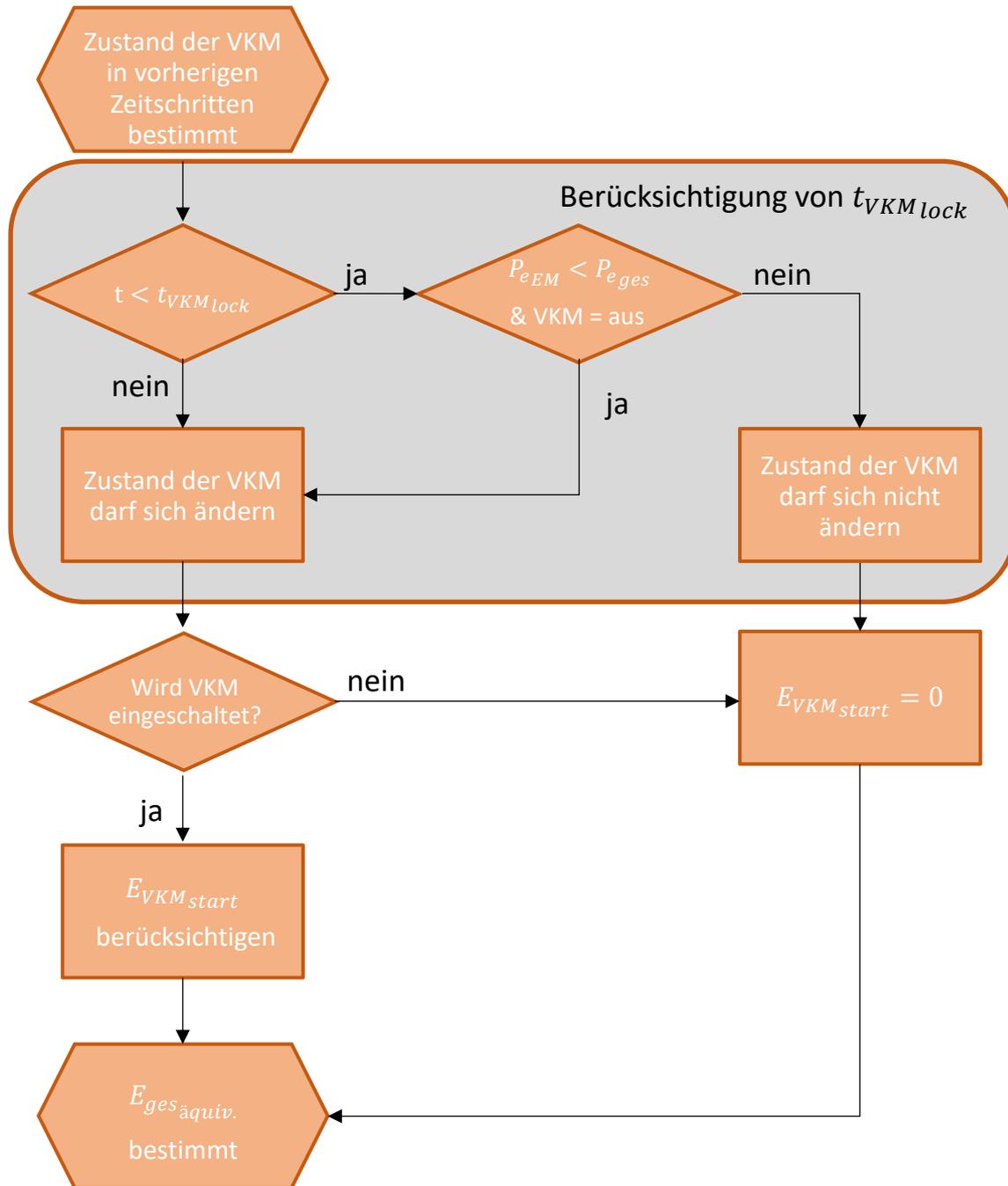


Abbildung 4-8: Methodik zur Berücksichtigung der VKM-Startenergie

### 4.2.3 Ergebnis der Regelstrategie

Nachdem jene Leistungsaufteilung, die zu einem minimalen Gesamtenergiebedarf führt, gewählt wurde, kann der tatsächliche Kraftstoffverbrauch sowie Emissionen der VKM bzw. Energieverbrauch der E-Maschine und damit auch der aktuelle SOC bestimmt werden.

Der tatsächliche Kraftstoffverbrauch kann unter Verwendung des Energieverbrauchs aus der Veline sowie des konstanten Heizwertes durch Umstellen der Gleichung (4-5) berechnet werden.

$$FC = \frac{E_{VKM}}{H_u} \quad (4-16)$$

Die verbrauchte bzw. rückgespeicherte Energie aus der Batterie wird ebenfalls aus der Veline berechnet. Hierbei sind zwei Punkte zu beachten:

- 1) In der für das Aufstellen der Veline verwendeten Batterieleistung ist der Lade,- bzw. Entladewirkungsgrad bereits implizit enthalten. Gleichermaßen ist der E-Motor Wirkungsgrad bereits in der effektiven Leistung enthalten. Folglich dürfen die mittleren Wirkungsgrade in Gleichung (4-7) & (4-8) nicht gesondert berücksichtigt werden.
- 2) Die VKM-Startenergie wird für den Fall, dass die VKM eingeschaltet wurde, in voller Höhe dem Energieverbrauch der E-Maschine zugerechnet.

$$E_{EM} = \begin{cases} E_{EM_{veline}} + E_{VKM_{start}} & \text{falls VKM eingeschaltet wurde} \\ E_{EM_{veline}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (4-17)$$

Anschließend kann der SOC über ein vereinfachtes Batteriemodell bestimmt werden.

$$SOC_t = SOC_{t-1} - \frac{\overbrace{\Delta SOC}^{E_{EM}}}{K_{Batt} * U_{Batt}} \quad (4-18)$$

$SOC_t$	SOC zum Zeitpunkt t [-]
$SOC_{t-1}$	SOC zum Zeitpunkt t-1 [-]
$K_{Batt}$	Kapazität der Batterie [Ah]
$U_{Batt}$	Batteriespannung bei 50 % SOC [V]

Die verwendete Batteriekapazität wurde für jeden Zeitschritt als Konstante vorgegeben und kann aus Tabelle 4-1 entnommen werden. Die Batteriespannung wird aus dem in Abbildung 4-13 dargestellten Spannungsverlauf bei einem SOC von 50% ebenfalls als Konstante angenommen.

Nach Bestimmung des aktuellen SOC kann die Regelstrategie für den nächsten Zeitschritt und analog für den gesamten Zyklus ausgewertet werden.

Anschließend werden noch die Ergebnisse der Regelstrategie für das in Tabelle 4-1 spezifizierte Fahrzeug sowie den in Abbildung 4-2 dargestellten Fahrzyklus diskutiert. Die eingestellten Parameter bezüglich der Korrekturfunktion ( $p(\text{SOC})$ ) und der verwendete Äquivalenzfaktor für  $\Delta\text{SOC} = 0$  sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Tabelle 4-2: Eingestellte Parameter für  $\emptyset$  Diesel-HEV

Parameter			
p(SOC)			
$\text{SOC}_{\text{start}}$	0.5	$\text{SOC}_{\text{targ.}}$	0.5
$\text{SOC}_{\text{max}}$	0.7	$\text{SOC}_{\text{low}}$	0.35
$\text{SOC}_{\text{high}}$	0.65	$\text{SOC}_{\text{min}}$	0.3
a	3		
weiter Parameter			
$S_{\text{äquiv.}}$	3.5	$\overline{\eta_{\text{Batt}}^-}$	0.98
$t_{\text{vkm\_lock}} [\text{s}]$	3	$\overline{\eta_{\text{EM}}^+}$	0.85
$\overline{\eta_{\text{Batt}}^+}$	0.98	$\overline{\eta_{\text{EM}}^-}$	0.85

Um die Regelstrategie zu bewerten eignet sich besonders die Betrachtung des SOC-Verlaufs. Abbildung 4-9 zeigt hierfür den SOC sowie das sekundliche Geschwindigkeitsprofil, um die ausgewählte Betriebsweise als Funktion des Fahrprofils (und damit der Lastanforderung) evaluieren zu können.

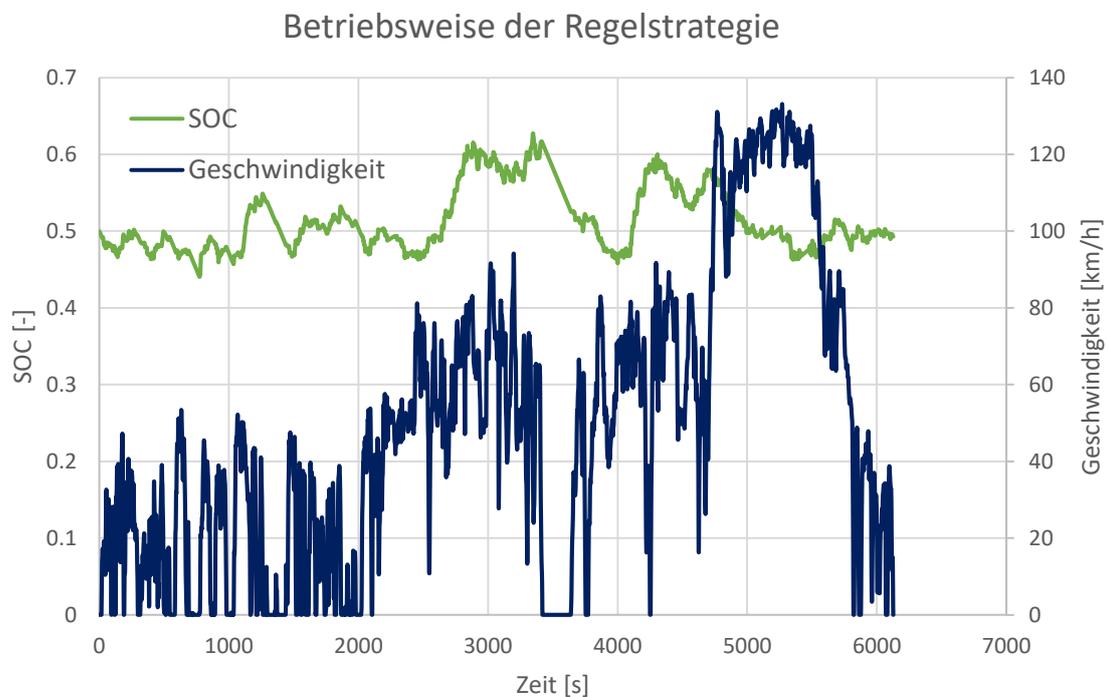


Abbildung 4-9: Betriebsweise und Geschwindigkeitsprofil des Referenzfahrzeugs

Im Stadtbereich (erste ca. 2000 [s]) erkennt man eine ausgewogene Betriebsweise zwischen VKM und EM. Je nach Beschleunigungs- sowie Leistungsanforderung wird entweder rein elektrisch oder kombiniert angetrieben. Ein reiner VKM-Betrieb ist aufgrund des bei geringer Last vorliegenden niedrigen Wirkungsgrades eher unwahrscheinlich bzw. wird durch LPA in Gebiete geringeren Gesamtenergiebedarfs verschoben. Hierbei wird der mit höherer Leistung einhergehende höhere Energiebedarf der VKM durch die rückgespeicherte Energie der E-Maschine aufgewogen. Nach dem Übergang in die Überlandfahrt (ab ca. 2500 [s]) wird der SOC etwas stärker angehoben. Dies sind Punkte, in denen die VKM aufgrund der höheren Last einen besseren Wirkungsgrad aufweist als im Stadtgebiet und zusätzlich Leistungsreserven zum Nachladen der Batterie zur Verfügung hat (geringerer Energiebedarf durch LPA). Natürlich findet man auch in diesem Bereich Lastpunkte vor, die rein elektrisch oder kombiniert abgedeckt werden können. Das Absenken des SOC bei Stillstand des Fahrzeugs (bei ca. 3500 [s]) ist auf den Leistungsbedarf der Nebenverbraucher zurückzuführen. Um bei langer Stillstandszeit eine vollständige Entleerung der Batterie durch die Nebenverbraucher zu vermeiden, würde ab einer bestimmten unteren SOC-Grenze die VKM wieder gestartet werden. Sobald der Autobahnteil beginnt, wird primär verbrennungsmotorisch gefahren. Für die vorkommenden Beschleunigungsvorgänge treibt die E-Maschine unterstützend an, was man an dem langsam sinkenden SOC erkennen kann. Ebenfalls ausschlaggebend für den leicht sinkenden SOC sind die Nebenverbraucherleistungen. Darüber hinaus wird in diesem Bereich, aufgrund der bereits vorliegenden hohen Auslastung der VKM, keine LPA ausgeführt bzw. steht bei Autobahnfahrt tendenziell wenig Energie durch Rekuperation gratis zur Verfügung. Sobald gegen Ende des Zyklus der Stadtteil erneut beginnt stellt sich wieder ein ausgewogener Betrieb, wie bereits am Beginn beschrieben, ein.

Nachdem eine logische Betriebsweise des Fahrzeugs durch die neue Regelstrategie plausibilisiert wurde gilt es nun diesen Ansatz in das Simulationsprogramm zu implementieren, um weitere Validierungen durchführen zu können.

### 4.3 Simulationsmodell PHEM

Wie bereits in den vorigen Kapiteln erwähnt, wurde die Regelstrategie auf Basis einiger Ergebnisse des alten Hybridmodells entwickelt. Aus diesem Grund sollen hier kurz die Grundlagen sowie die Hintergründe zu den implementierten Modellen erläutert werden.

Das verwendete Simulationsprogramm PHEM wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik entwickelt und dient zur Ermittlung von Verbrauch und Emissionen auf Basis der Längsdynamik. Dafür berechnet PHEM, unter Vorgabe des zu absolvierenden Fahrzyklus, die sekundlich benötigte Antriebsleistung zur Überwindung der Fahrwiderstände. Um dabei möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten werden möglichst alle real auftretenden Widerstände nach Gleichung (4-19) berücksichtigt. [8]

$$P = P_{Rollw.} + P_{Luftw.} + P_{Beschl.} + P_{Steig.} + P_{Getr.} + P_{Nebenagg.} \quad (4-19)$$

$$P_{Rollw.} = m * g * (F_{r0} + F_{r1} * v + F_{r4} * v^4) * v \quad (4-20)$$

$$P_{Luftw.} = c_w * A_{Quersch.} * \frac{\rho_{Luft}}{2} * v_{rel}^3 \quad (4-21)$$

$$P_{Beschl.} = (m_{Fahrzeug} + m_{Beladung} + m_{rot}) * a * v \quad (4-22)$$

$$P_{Steig.} = m * g * \sin \alpha * v \quad (4-23)$$

$$P_{Getr.} = P_e * (1 - \eta_{Getr.}) \quad (4-24)$$

$F_{r0} \dots F_{r4}$	experimentell bestimmte Rollwiderstandskoeffizienten
$v$	Geschwindigkeit des Fahrzeugs [m/s]
$c_w$	Luftwiderstandsbeiwert [-]
$A_{Quersch.}$	Querschnittsfläche des KFZ [m <sup>2</sup> ]
$v_{rel}$	Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und anströmender Luft [m/s]
$\alpha$	Steigung der Fahrbahn [rad]

Die rotatorische Masse in Gleichung (4-22) kann dabei nach folgender Formel berechnet werden.

$$m_{rot} = \frac{I_{räder}}{r_{Rad}^2} + I_{Motor} * \left( \frac{i_{Achse} * i_{Gang}}{r_{Rad}} \right)^2 + I_{Getriebe} * \left( \frac{i_{Achse}}{r_{Rad}} \right)^2 \quad (4-25)$$

Die benötigte Leistung der Nebenaggregate wird aus Erfahrung bzw. aus der Literatur als konstanter Wert vorgegeben (z.B. 5 [kW] bei laufender Klimaanlage) [8].

Die sekundliche Drehzahl wird aus der Achs- und Getriebeübersetzung sowie unter Berücksichtigung des hinterlegten Gangschaltmodells berechnet. Damit sind alle Betriebspunkte (Leistung und Drehzahl) bestimmt und es können Emissionen und Verbrauch aus den hinterlegten Kennfeldern interpoliert werden [8].

Abbildung 4-10 zeigt das grundlegende Funktionsschema des Simulationsmodells.

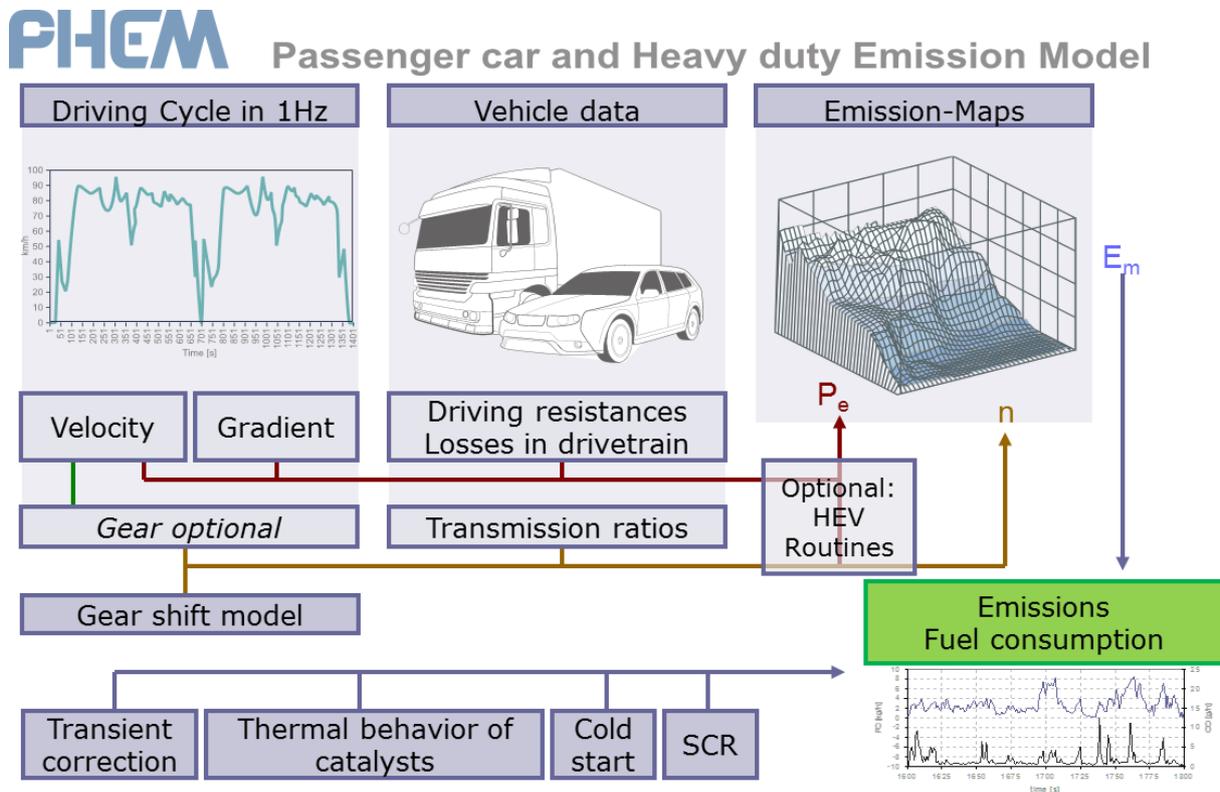


Abbildung 4-10: Funktionsschema PHEM [8]

#### 4.3.1 Simulation von HEV

Das in PHEM zur HEV Simulation hinterlegte Modell basiert auf einem Parallelhybrid und ist in Abbildung 4-11 schematisch dargestellt.

Sowohl die VKM als auch der Elektromotor werden über die hinterlegten Kennfelder sowie Vollast- und Schleppkurven charakterisiert. Diese Files enthalten folgende Informationen:

- Vollastkurve, Schleppkurve
  - Verbrauchskennfeld
  - Vollastkurven für Antreiben und Generieren
  - Wirkungsgradkennfeld bzw. elektrische Leistung
- Die ersten beiden Punkte sind der VKM zugeordnet, die letzten beiden der E-Maschine.

Über diese Daten können der elektrische Energiebedarf bzw. der Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Lastpunktes bestimmt werden. Zusätzlich wird zwischen VKM und E-Maschine eine Kupplung modelliert, um die beiden Antriebsaggregate mechanisch trennen zu können. Im Falle einer Rekuperation kann damit die VKM abgekuppelt und durch Vermeidung der Schleppverluste das Rekuperationspotential erhöht werden.

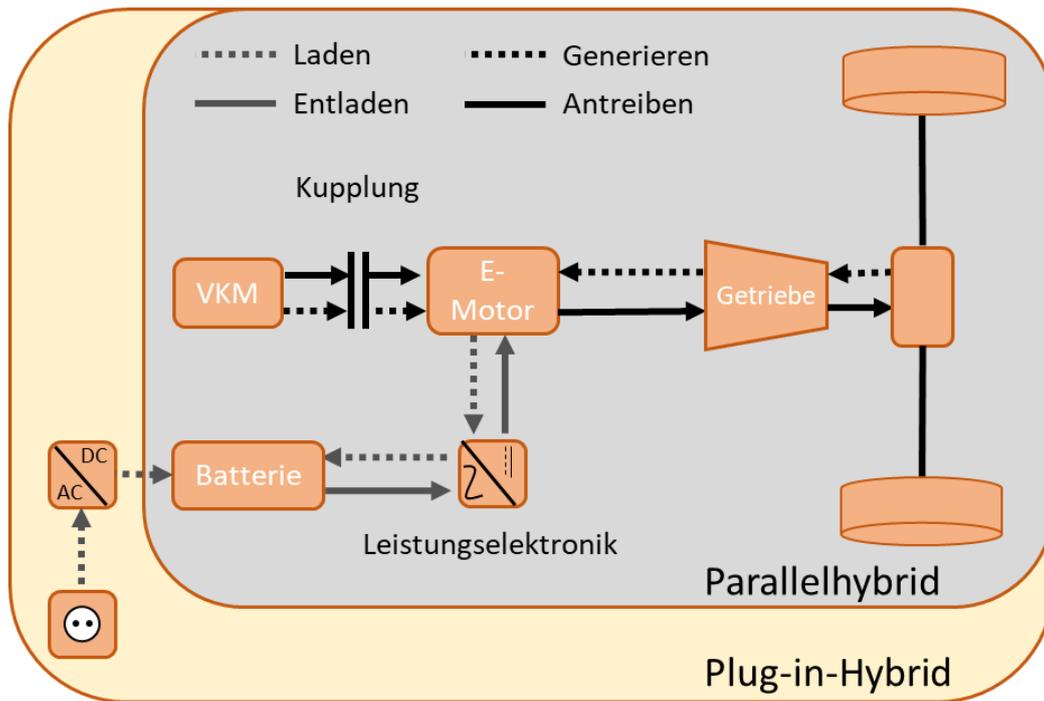


Abbildung 4-11: Systemlayout des Parallel-HEV in PHEM

Alle fahrzeugrelevanten Daten der Modelle werden in einem eigenen File hinterlegt. Darunter fallen z.B. Daten zur korrekten Berechnung der rotatorischen Massen, der Drehzahl, des Leistungsbedarfs u.v.m. Die wichtigsten Daten sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4-3: Fahrzeugspezifische Kenndaten zur Simulation in PHEM

PHEM-Fahrzeugdaten	
Allgemeine Daten	
Fahrzeugmasse [kg]	Anströmfläche [m <sup>2</sup> ]
Beladung [kg]	Luftwiderstandsbeiwert [-]
Reduzierte Radmasse [kg]	Fahrwiderstände
Raddurchmesser [m]	
Daten VKM	
Nennleistung [kW]	Leerlaufdrehzahl [1/min]
Nenndrehzahl [1/min]	Massenträgheitsmoment [kgm <sup>2</sup> ]
Daten E-Motor	
Nennleistung [kW]	Massenträgheitsmoment [kgm <sup>2</sup> ]
Nenndrehzahl [1/min]	
Getriebe	
Getriebeübersetzungen [-]	Massenträgheitsmoment [kgm <sup>2</sup> ]
Achsübersetzung [-]	Faktor für Getriebeverluste [-]
Sonstige Parameter	
Parameter für Gangschaltmodell	
Leistung der Nebenverbraucher [kW]	

Heutzutage werden aufgrund des besseren Wirkungsgrades sowie der günstigen Beschaffungsmöglichkeit vorwiegend Drehstrommaschinen als E-Motor verwendet. Aus diesem Grund müsste im Modell eine Leistungselektronik zwischen Batterie (Gleichspannung) und E-Maschine (dreiphasige Wechselspannung) berücksichtigt werden. Diese wird jedoch nicht exakt über ein eigenes Modell abgebildet, sondern ist als zusätzlicher, lastabhängiger Wirkungsgrad bereits implizit im EM-Kennfeld enthalten. Neben der Umrichtung übernimmt die Leistungselektronik eine Regelfunktion bezüglich Spannungshöhe, Amplitude und Phasenlage [8].

Neben Leistung und Drehzahl wurden vor allem Ergebnisse des Batteriemodells (Batterieleistung, Wirkungsgrade, etc.) für die Entwicklung der Strategie benötigt. Deshalb soll dieses Modell nachfolgend näher erläutert werden.

#### 4.3.1.1 Batterie und Leistungselektronik

Das Batteriemodell ist eine der wichtigsten Komponenten des HEV-Modells und berechnet folgende Daten: [3]

- Aktueller SOC (State of Charge)
- Batteriespannung
- Batteriestrom
- Maximale Lade- und Entladeleistung

Vor allem die korrekte Berechnung des SOC ist bei der verwendeten Li-Ion Batterietechnologie von großer Bedeutung, da dieser erheblichen Einfluss auf die Lebensdauer der Batterie hat. Sowohl ein zu hohes Laden als auch ein zu tiefes Entladen hat negative Einflüsse auf die Batterielebensdauer, weshalb der zulässige SOC-Hub meist auf unter 50 [%] beschränkt ist [3].

Um den aktuellen SOC berechnen zu können, wird ausgehend vom Startwert der zu- bzw. abgeführte elektrische Strom integriert (Lade- bzw. Entladewirkungsgrade sind dabei zu berücksichtigen).

Die nachfolgenden Gleichungen wurden aus Literaturquelle [8] entnommen.

$$SOC_t = SOC_0 - \frac{\int_0^t I_{Batt} dt}{K_{Batt}} \quad (4-26)$$

$SOC_t$	SOC zum Zeitpunkt t [-]
$SOC_0$	SOC am Beginn [-]
$I_{Batt}$	abgebener (+), bzw. rückgespeicherter (-) Strom [A]
$K_{Batt}$	Kapazität der Batterie [Ah]

Die Kapazität der Batterie ist hierbei aus Herstellerangaben bekannt, während die Stromstärke aus Gleichung (4-28) bestimmt wird.

Die Batterieleistung wird über ein Batteriemodell mit mehreren parallel geschalteten Zellen berechnet und ergibt sich dabei aus dem elektrischen Leistungsbedarf der E-Maschine zuzüglich der Verluste in der Batterie.

$$P_{Batt} = P_{elEM} + I_{Batt}^2 * R_i \quad (4-27)$$

$P_{elEM}$  elektrischer Leistungsbedarf der E-Maschine [W]

$I_{Batt}$  Batteriestrom [A]

$R_i$  Innenwiderstand der Batterie [ $\Omega$ ]

Der elektrische Leistungsbedarf wird aus dem hinterlegten Kennfeld berechnet. Der Innenwiderstand der Batterie ist aus den Batteriekenndaten bekannt. Der Strom ergibt sich für das gegebene Schaltbild (siehe Abbildung 4-12) aus einer quadratischen Gleichung:

$$I_{Batt} = \frac{U_{Batt}}{2 * R_i} \pm \sqrt{\left(\frac{U_{Batt}}{2 * R_i}\right)^2 - \frac{P_{elEM}}{R_i}} \quad (4-28)$$

Damit ergibt sich auch die maximale Leistung, die der Batterie entnommen werden kann.

$$P_{Battmax} \leq \frac{U_{Batt}^2}{4 * R_i} \quad (4-29)$$

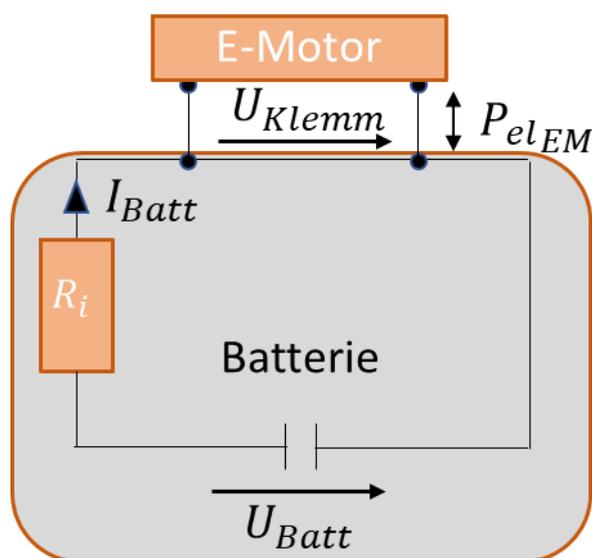


Abbildung 4-12: Schaltbild des Batteriemodells [8]

Somit muss für die Bestimmung der Batterieleistung sowie der maximal entnehmbaren Leistung und der Stromstärke nur noch die Batteriespannung definiert werden. Die Spannung ist grundsätzlich abhängig von SOC, Temperatur und der Stromstärke selbst. Darüber hinaus gibt es leichte Spannungsunterschiede, je nachdem ob die Batterie geladen oder entladen wird [8]. Für eine vollständig korrekte Darstellung des Batterieverhaltens müssten somit all diese Faktoren berücksichtigt werden. Aus Gründen der einfachen Anwendbarkeit wird in PHEM eine vereinfachte Spannungskurve in Abhängigkeit des SOC durch ein Polynom vom Grad 6 beschrieben (siehe Abbildung 4-13). Die Koeffizienten des Polynoms werden dabei aus Messungen bestimmt.

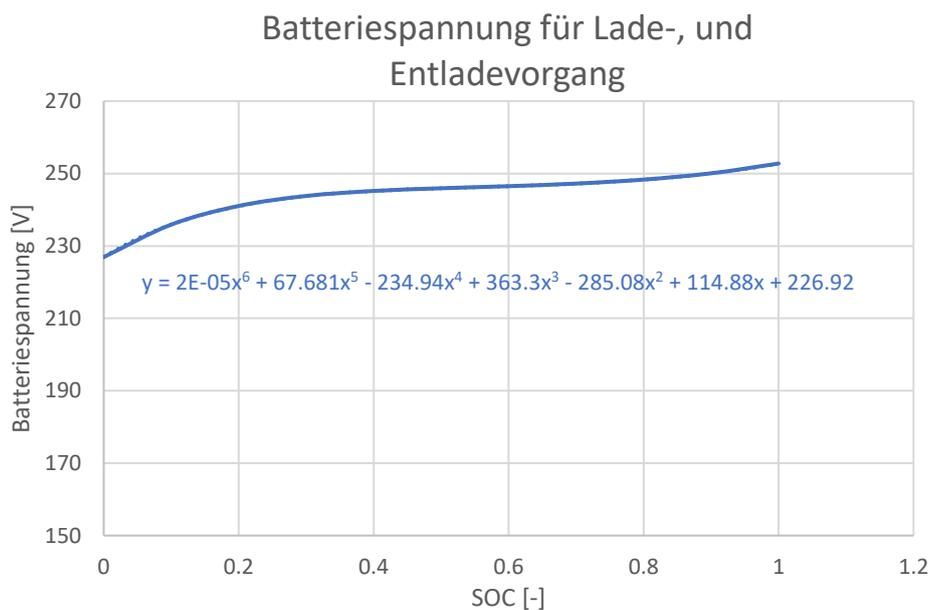


Abbildung 4-13: Batteriespannung in Abhängigkeit des SOC

#### 4.3.2 Plausibilisierung der PHEM-Implementierung

Um zu verifizieren, dass keine Fehler beim Übertragen der Regelstrategie in PHEM vorgefallen sind, wurden die Ergebnisse der PHEM-Simulation mit den Ergebnissen in Excel verglichen. Natürlich werden diese nicht exakt übereinstimmen, da in Excel einige Vereinfachungen vorgenommen wurden. Dennoch sollten beide Ansätze ähnliche Tendenzen bezüglich der Betriebsweise aufweisen, um sichergehen zu können, dass die Regelstrategie in beiden Fällen nach den gleichen Kriterien die Leistungsaufteilung vornimmt. In Tabelle 4-4 sind die wichtigsten Unterschiede bezüglich der Berechnung in beiden Ansätzen zusammengefasst.

Tabelle 4-4: Berechnungsunterschiede zwischen Excel und PHEM

		Implementierungsunterschiede	
		Excel	PHEM
1	Fix vorgegebene Drehzahl und Leistung		Leistung und Drehzahl werden von der Regelstrategie beeinflusst, je nachdem ob die VKM betrieben oder abgekuppelt wird
2	Vereinfachte Berechnung von Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energie über „Veline-Ansatz“		Exakte Berechnung von Kraftstoffverbrauch und elektrischer Energie über Kennfeldinterpolation
3	Elektrischer Energieverbrauch wird anhand der effektiven Leistung berechnet		Elektrischer Energieverbrauch wird anhand der Batterieleistung berechnet
4	Annahme konstanter Batteriespannung		Batteriespannung = $f(\text{SOC})$
5	Vereinfachte Berechnung des tatsächlichen SOC		Exakte Berechnung des SOC über zu- und abgeführte Ladungsmenge
6	Annahme, dass Batterie die geforderte Leistung immer liefern kann		Berücksichtigung der maximalen Lade- bzw. Entladeleistung je nach Betriebspunkt

Die ersten drei Punkte haben besonders großen Einfluss auf die Wahl der optimalen Leistungsaufteilung.

Ad 1.)

Die VKM kann je nach Betriebspunkt abgekuppelt oder mit der E-Maschine mechanisch verbunden sein. Ist die VKM abgekuppelt, reduziert sich der Leistungsbedarf um die Beschleunigungsleistung der VKM, da die rotatorischen Massen nicht mitbeschleunigt werden müssen. Umgekehrt muss die Beschleunigungsleistung der VKM bei eingekuppeltem Motor berücksichtigt werden. Diese Fallunterscheidung wird in PHEM berücksichtigt, in Excel jedoch nicht, da dort nur die gesamte Antriebsleistung als konstant vorgegeben wurde. Wird nun beispielsweise ein Betriebspunkt in Excel betrachtet, der in der Referenzsimulation rein elektrisch gefahren wird, bleibt die Beschleunigungsleistung unberücksichtigt, auch wenn durch die Leistungsvariation die VKM Leistung abgibt. Dies führt in einigen Betriebspunkten zu unterschiedlichen optimalen Leistungsaufteilungen der beiden Varianten.

Ad 2.)

Wie bereits in Abbildung 4-6 dargestellt liefert der Veline-Ansatz sehr exakte Ergebnisse, wenn man den Kraftstoffverbrauch über den gesamten Zyklus betrachtet. Abbildung 4-5 illustriert wiederum, dass die einzelnen Werte je nach Betriebspunkt mehr oder weniger stark von der Ausgleichsgeraden abweichen. Diese Tatsache führt zu Unterschieden in den sekundlich berechneten Energieverbräuchen und kann damit wiederum die optimale Leistungsaufteilung zu anderen Werten verschieben.

Ad 3.)

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben wird über den Veline-Ansatz der Energieverbrauch als Funktion der effektiven Motorleistung berechnet. Somit wird, je nachdem ob der E-Motor Leistung abgibt (positive Leistung) oder aufnimmt (negative Leistung), der Energieverbrauch bestimmt. Im Falle der E-Maschine wird in PHEM der Energieverbrauch jedoch in Abhängigkeit der Batterieleistung bestimmt. Hierbei kommt es in einem kleinen Bereich (bei geringen mechanischen Leistungen) zu Unterschieden der beiden Ansätze (siehe orange markierter Bereich).

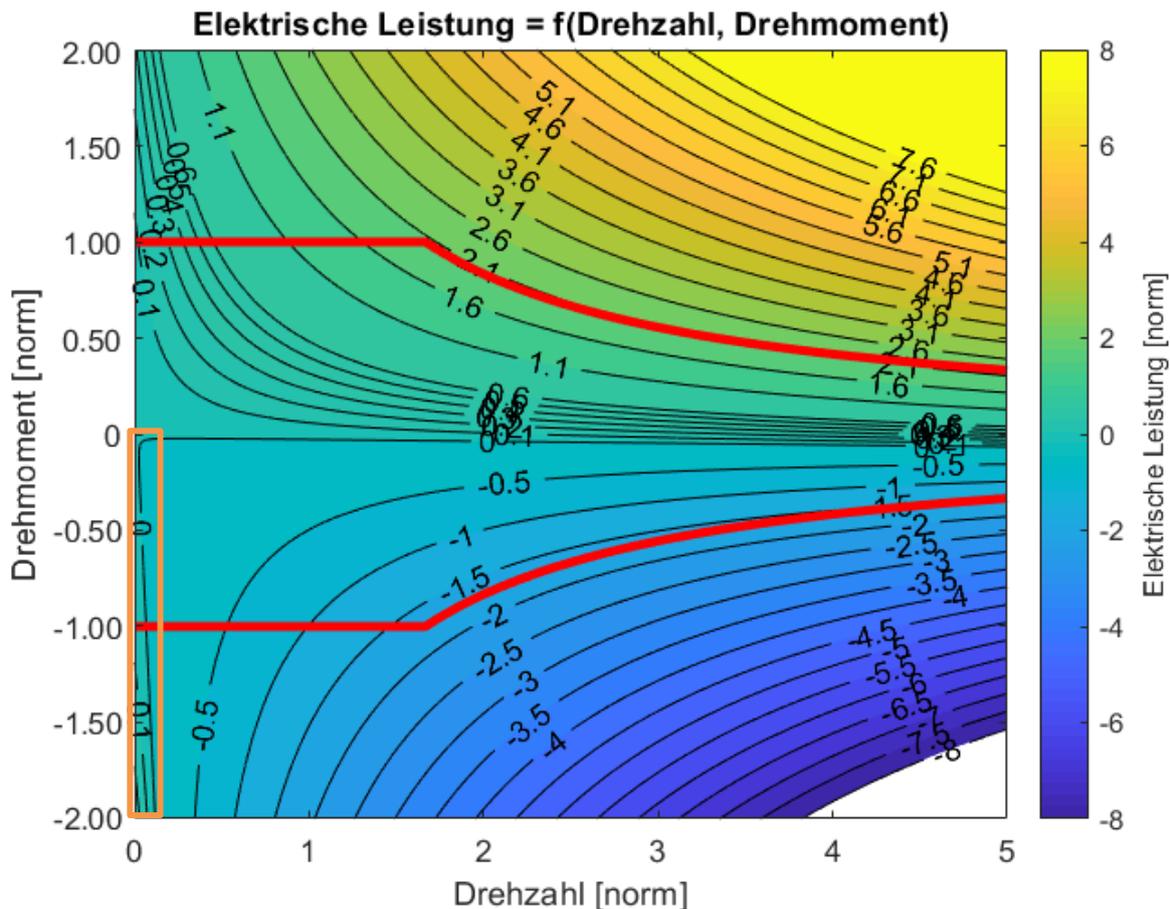


Abbildung 4-14: Normiertes Kennfeld der E-Maschine

Im markierten Bereich stimmen die Vorzeichen der effektiven Leistung (Drehmoment) nicht mit denen der elektrischen Leistung überein. Dies ist der Fall, da in diesem Bereich die Nebenverbraucher sowie Verluste in der Batterie mehr Energie aus der Batterie ziehen als mechanisch über die Kurbelwelle zugeführt wird. Dadurch wird bei geringen negativen effektiven Leistungen (je nach Drehzahl bis ca. -2.5 [kW]) trotzdem Energie aus der Batterie entnommen. Dieser Effekt wurde in Excel nicht abgebildet und stellt somit eine weitere Unterscheidungsquelle zur Simulation in PHEM dar.

Die zusätzlich angeführten Punkte resultieren hauptsächlich in kleinen Rechenungenauigkeiten, deren Größenordnung jedoch weitgehend vernachlässigbar ist. Die Annahme konstanter Batteriespannung hat nur einen geringen Einfluss, da die Spannung im verwendeten SOC-Bereich (0.35 – 0.65) nur sehr gering variiert (siehe Abbildung 4-13). Ebenso führt die nicht ganz exakte Berechnung des SOC über Gleichung (4-18) zu verhältnismäßig akkuraten Ergebnissen.

Tabelle 4-5 zeigt eine Gegenüberstellung der berechneten Energieverbräuche der beiden Ansätze. Die Leistungspunkte wurden so gewählt, dass die beiden Antriebsaggregate an einigen Punkten über den gesamt zur Verfügung stehenden Leistungsbereich verglichen werden.

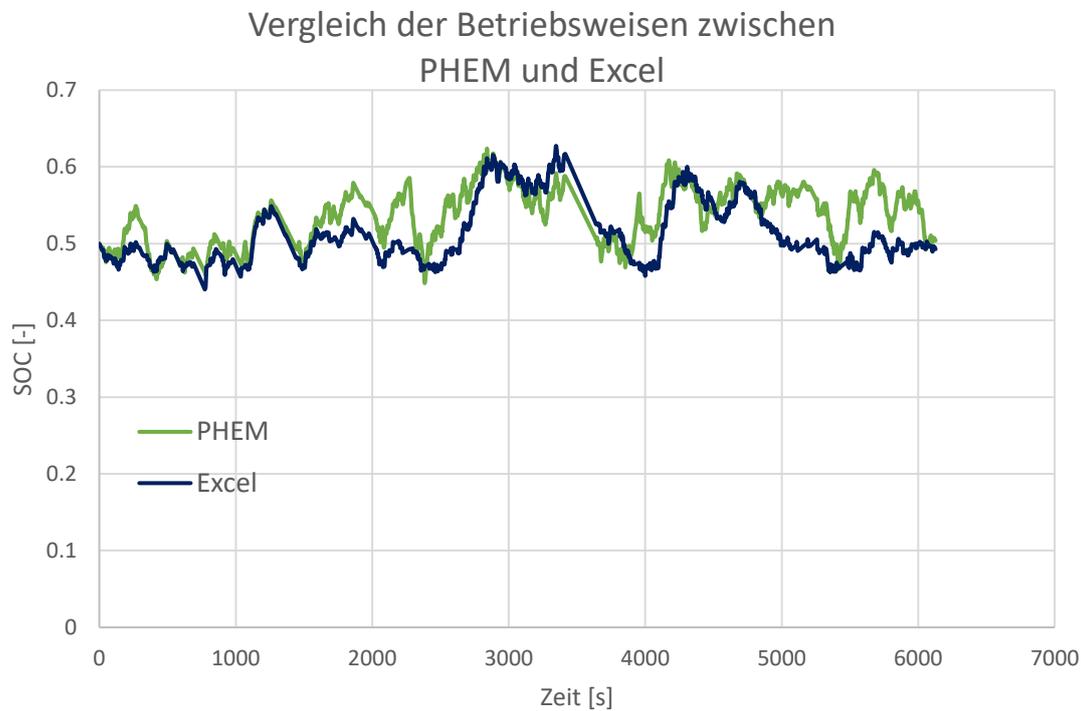
Tabelle 4-5: Vergleich der Energieverbräuche zwischen Simulation und Excel anhand einiger Referenzpunkte

	Leistung [kW]	Energiebedarf [Wh]		Abweichung	
		PHEM	Excel	[%]	[Wh]
EM	-25.00	-3.208	-3.251	-1.344	0.043
	-15.00	-1.900	-1.849	2.695	-0.051
	-5.00	-0.396	-0.447	-12.927	0.051
	0.00	0.848	0.998	-17.663	-0.150
	5.00	3.587	3.615	-0.780	-0.028
	15.00	8.689	8.778	-1.029	-0.089
	25.00	14.365	14.276	0.619	0.089
	30.00	17.209	17.022	1.087	0.187
VKM	5.00	4.515	4.190	7.202	0.325
	25.00	17.646	17.745	-0.559	-0.099
	50.00	33.368	34.289	-2.759	-0.921
	75.00	50.890	50.212	1.331	0.677

Die zum größten Teil sehr geringen Abweichungen der beiden Ansätze lassen darauf schließen, dass einerseits der Veline-Ansatz akkurate Ergebnisse liefert und andererseits die zur Berechnung notwendigen Formeln richtig in PHEM implementiert wurden. Die prozentual etwas höheren Abweichungen bei geringen Leistungen der E-Maschine lassen sich durch die Ausführungen unter Ad 3.) sowie durch die vorhandenen Rechenungenauigkeiten erklären. Absolut gesehen sind jedoch auch diese Abweichungen verhältnismäßig gering.

Neben den Zyklusergebnissen liefert auch eine Betrachtung der sekundlichen Ergebnisse Aufschlüsse über die richtige Implementierung (siehe Abbildung 4-15). Hierbei erkennt man eine gute Übereinstimmung der Betriebsweisen über weite Teile der Zykluslänge. Die teilweise vorhandenen Unterschiede (vor allem im Bereich ab ca. Sekunde 4800) sind auf die Vereinfachungen und damit einhergehenden Rechenungenauigkeiten in Excel zurückzuführen. Für eine bessere Erklärung ist unter der Abbildung die je nach Ansatz gewählte Leistungsaufteilung für einen Referenzzeitschritt angegeben. Hierbei sieht man, dass die Energiewerte für beide Methoden gut korrelieren, aber trotzdem die kleinen Rechenungenauigkeiten zu großen Unterschieden in der Betriebswahl führen können. So wird bei der gewählten Leistungsaufteilung in Excel elektrische Energie mit 2.235 [kW] generiert. Im Falle von PHEM ist dieser Betrag mit 15.647 [kW] deutlich höher.

Diese Unterschiede in der elektrischen Leistung führen zu anderen SOC-Niveaus, wodurch die Korrekturfunktion größeren Einfluss auf die Betriebsweise nimmt und den SOC am Ende des Zyklus wieder angleicht.



Leistungsaufteilung [kW]		Energiebedarf [kWh]	
EM	VKM	PHEM	Excel
-2.24	24.44	0.0170	<b>0.0166</b>
-15.65	37.85	<b>0.0160</b>	0.0168

Abbildung 4-15: Vergleich der Betriebsweisen zwischen Simulation und Excel

## 5 Simulation in PHEM

Nachdem die korrekte Funktionsweise der Regelstrategie überprüft wurde, gilt es nun die Anwendbarkeit für verschiedene Fahrzeuge und Fahrzyklen zu untersuchen, sowie die Empfindlichkeit der Strategie gegenüber Parametervariationen genauer zu beleuchten. Ziel ist es, die Anzahl der vom Benutzer individuell vorzugebenden Parameter möglichst gering zu halten, um eine einfache Anwendbarkeit des Modells für Personen zu garantieren, die nicht im Detail mit dem Ansatz und den Hintergründen vertraut sind. Zu diesem Zweck werden in der nachfolgenden Sensitivitätsanalyse die Einflüsse verschiedener Parameterwerte untersucht und falls möglich allgemein gültige Werte fixiert.

### 5.1 Sensitivitätsanalyse

Tabelle 5-1 zeigt eine Übersicht bezüglich empfohlener Simulationsparameter. Die Zahlenwerte können dabei fahrzeug- und zyklusübergreifend übernommen werden, vorausgesetzt die verwendete Technologie (z.B. Batterietechnologie) ist ident.

Tabelle 5-1: Allgemeine Parameter zur Simulation von HEV / PHEV

SOC Kennwerte	HEV	PHEV	$\eta$		Schrittweite	SOC	VKM lock
	[-]	[-]	[%]		[%]	Exponent a	[s]
SOC <sub>min</sub>	0.30	0.15	$\overline{\eta_{EM}^+}$	0.85	10	3	P
SOC <sub>low</sub>	0.35	0.20	$\overline{\eta_{EM}^-}$	0.85			
SOC <sub>start</sub>	P	P	$\overline{\eta_{Batt}^+}$	0.98			
SOC <sub>high</sub>	0.65	0.80	$\overline{\eta_{Batt}^-}$	0.98			
SOC <sub>max</sub>	0.70	0.85					
SOC <sub>targ.</sub>	0.50	0.50 <sup>3</sup>					

Die angegebenen SOC-Kennwerte wurden für die heutzutage nahezu ausschließlich verwendete Li-Ion Batterietechnologie definiert. Der maximal bzw. minimal zulässige SOC ergibt sich aus Lebensdauergründen bzw. Angaben der Batteriehersteller. Batterien in PHEV haben typischerweise höhere Kapazitäten und einen damit verbundenen größeren, nutzbaren SOC-Bereich. Die definierten Grenzwerte der Korrekturfunktion (SOC<sub>high</sub> bzw. SOC<sub>low</sub>) wurden möglichst hoch bzw. niedrig gewählt, um den SOC-Hub bestmöglich auszunutzen, ohne dabei die zulässigen Grenzwerte zu überschreiten. Eine zu starke Einschränkung des SOC-Hubes würde die Betriebsmöglichkeiten und damit das Potential des HEV deutlich einschränken. Der Start-SOC (SOC<sub>start</sub>) soll natürlich als Parameter individuell eingestellt werden, um die Performance des HEV in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden SOC-Levels untersuchen zu können. In der Realität ist der SOC<sub>start</sub> in den seltensten Fällen bekannt, da dieser von vielen unbekanntenen Faktoren abhängt, die z.T. von der Vorgeschichte des Fahrzeugs bestimmt werden:

- Fahrprofil der zuletzt zurückgelegten Strecke
- Fahrweise des Fahrers

<sup>3</sup> Anpassung für die Abbildung spezieller Betriebsweisen bei PHEV (beispielsweise: Charge Depletion Mode, oder Charge Sustaining Mode) möglich

- Gewählter Betriebsmodus (Eco, Sport etc.)
- SOC-Stand
- ....

All diese Faktoren beeinflussen die Betriebsweise und damit den SOC, der am Beginn der nächsten Fahrt zur Verfügung steht. Einzig beim Plug-In-Hybrid kann bei Vorhandensein einer entsprechenden Lademöglichkeit der SOC auf ein bestimmtes Level gehoben und damit der Einfluss der Fahrzeugvorgeschichte ausgeglichen werden. Im Falle des vorgeschriebenen Ziel-SOC ( $SOC_{\text{targ.}}$ ) spielen ebenfalls die vorhandenen Ungewissheiten eine entscheidende Rolle. Da häufig das zu absolvierende Fahrprofil, die Fahrdauer sowie Informationen über künftige Fahrten (z.B. spontaner Ausflug in die Berge) nicht bekannt sind, wird der Regelstrategie ein allgemeiner Ziel-SOC von 0.5 vorgegeben. Dadurch soll sichergestellt werden, dass zukünftig je nach Fahrsituation sowohl elektrische Energie entnommen als auch Verzögerungsenergie eingespeichert werden kann. Darüber hinaus bietet ein Betrieb im mittleren Bereich des nutzbaren SOC-Hubes Vorteile in Bezug auf die Lebensdauer. Anpassungen können bei der Simulation von PHEV vorgenommen werden, um spezielle Betriebsweisen abzubilden. So kann z.B. ein geringerer Wert ( $SOC_{\text{targ.}} = 0.2$ ) gewählt werden, um die Batterie zu entladen bzw. möglichst viel elektrisch zu fahren (sog. Charge Depletion Mode).

Die Lade- bzw. Entladewirkungsgrade bewegen sich für Li-Ion Batterien bei nahezu 100 [%], weshalb die angegebenen Werte fahrzeug- und zyklusübergreifend gültig sind. Der E-Motorwirkungsgrad hängt in hohem Maße vom jeweiligen Betriebspunkt und damit von der E-Motorleistung sowie vom Fahrzyklus ab. Die angegebenen Werte repräsentieren Mittelwerte aus mehreren Simulationen unterschiedler Fahrzyklen (siehe Kapitel 5.1.3).

Der Wert für die Schrittweite bezieht sich auf die Berechnungsschrittweite, mit der die EM-Leistung variiert wird. Je feiner die Abstufung, desto mehr Leistungskombinationen werden pro Zeitschritt untersucht, wodurch einerseits die Regelstrategie optimiert wird, andererseits allerdings auch die Simulationszeit rasch ansteigt. Hierbei ist es wichtig einen akzeptablen trade-off zwischen Genauigkeit der Ergebnisse und Simulationszeit zu finden, der mit einer Berechnungsschrittweite von 10 [%] zyklusübergreifend erreicht wird.

Der Einfluss des SOC-Exponenten wurde bereits in Abbildung 4-7 dargestellt und erläutert. Ein SOC-Exponent von 3 liefert einen guten Kompromiss zwischen effizienter Ausnutzung des verfügbaren SOC-Hubes (erlaubt größere SOC-Variation als der deutlich striktere Wert 1) und Erhaltung einer hohen Batterie-Lebensdauer, indem Werte nahe der zulässigen SOC-Grenzen gemieden werden (erlaubt geringere SOC-Variation als der Wert 5).

„VKM lock“ bezieht sich auf die Mindestzeitspanne zwischen Zustandsänderungen der VKM (Ein-Aus bzw. Aus-Ein). Die Vorgabe einer Zeit ist aus betrieblicher Sicht sinnvoll, um den hohen Verschleiß durch häufige Startvorgänge zu verringern und damit das Betriebsverhalten eines realen HEV besser abzubilden.

Die nachfolgenden Kapitel beschäftigen sich mit einer detaillierten Analyse, nach welchen Gesichtspunkten die in Tabelle 5-1 zusammengefassten Werte gewählt wurden bzw. welchen Einfluss die als Parameter gekennzeichneten Faktoren auf die Betriebsweise sowie den Kraftstoffverbrauch haben.

Die Einflüsse der Parametervariationen werden repräsentativ an einem Diesel-HEV mit den in Tabelle 4-1 zusammengefassten Spezifikationen durchgeführt und untersucht. Um den Einfluss der Parameter je nach Charakteristik des Fahrzyklus (Dynamik, Länge, etc.) zu untersuchen, werden die Ergebnisse anhand zweier gegensätzlicher Fahrzyklen dargestellt:

- RWC (dynamisches, realitätsnahes Fahrprofil; lange Zyklusdauer)
- NEDC (wenig dynamisches Fahrprofil, kurze Zyklusdauer)

### 5.1.1 Berechnungsschrittweite

Die Berechnungsschrittweite repräsentiert den größten Hebel zur Beeinflussung der Simulationsdauer und ist von entsprechend großer Bedeutung, um das Modell wirtschaftlich effizient einsetzen zu können. Tabelle 5-2 beinhaltet den Kraftstoffverbrauch sowie die zugehörigen Simulationszeiten als Funktion der eingestellten Berechnungsschrittweite. Man erkennt deutlich, dass die Regelstrategie unabhängig von der gewählten Schrittweite nahezu exakt gleiche Verbrauchswerte liefert. Im Falle des RWC ist kein Unterschied feststellbar. Im Falle des NEDC beträgt der maximale Unterschied (zwischen Schrittweite 1 [%] und 10 [%]) nur 0.08 [g/km]. Dies entspricht einer Abweichung von 0.17 [%] bezogen auf den gesamten Kraftstoffverbrauch und ist somit ebenfalls vernachlässigbar.

Betrachtet man die Simulationszeiten wird das Potential einer richtig gewählten Schrittweite deutlich. Vor allem der Schritt von 1 [%] (201 Leistungskombinationen je Zeitschritt) auf 10 [%] (21 Leistungskombinationen je Zeitschritt) erlaubt eine deutliche Reduktion der Simulationszeit. Eine weitere Reduktion auf 20 [%] ergibt eine weitere Halbierung der Rechenzeiten. Gleichzeitig führt jedoch eine zu grobe Abstufung zu immer größeren Unterschieden in der Betriebsweise, weshalb eine Schrittweite > 20 [%] nicht empfohlen wird.

Tabelle 5-2: Einfluss der Berechnungsschrittweite auf Kraftstoffverbrauch und Simulationszeit

	Schrittweite [%]	Kraftstoffverbrauch	Zyklusdauer	Simulationsdauer	
		[g/km]	[mm:ss]	[mm:ss]	[%] der Zyklusdauer
RWC	20	48.97	102:07	00:35	0.57
	10	48.97		00:58	0.95
	1	48.96		08:08	7.96
NEDC	20	45.80	19:40	00:09	0.76
	10	45.75		00:14	1.19
	1	45.83		01:35	8.05

Neben den Zyklusergebnissen sind natürlich auch die sekundlich aufgelösten Simulationsergebnisse von Interesse, da aus diesen die Einflüsse der Parameter auf die exakte Betriebsweise abgeleitet werden können. Abbildung 5-1 zeigt den SOC-Verlauf in Abhängigkeit der Berechnungsschrittweite.

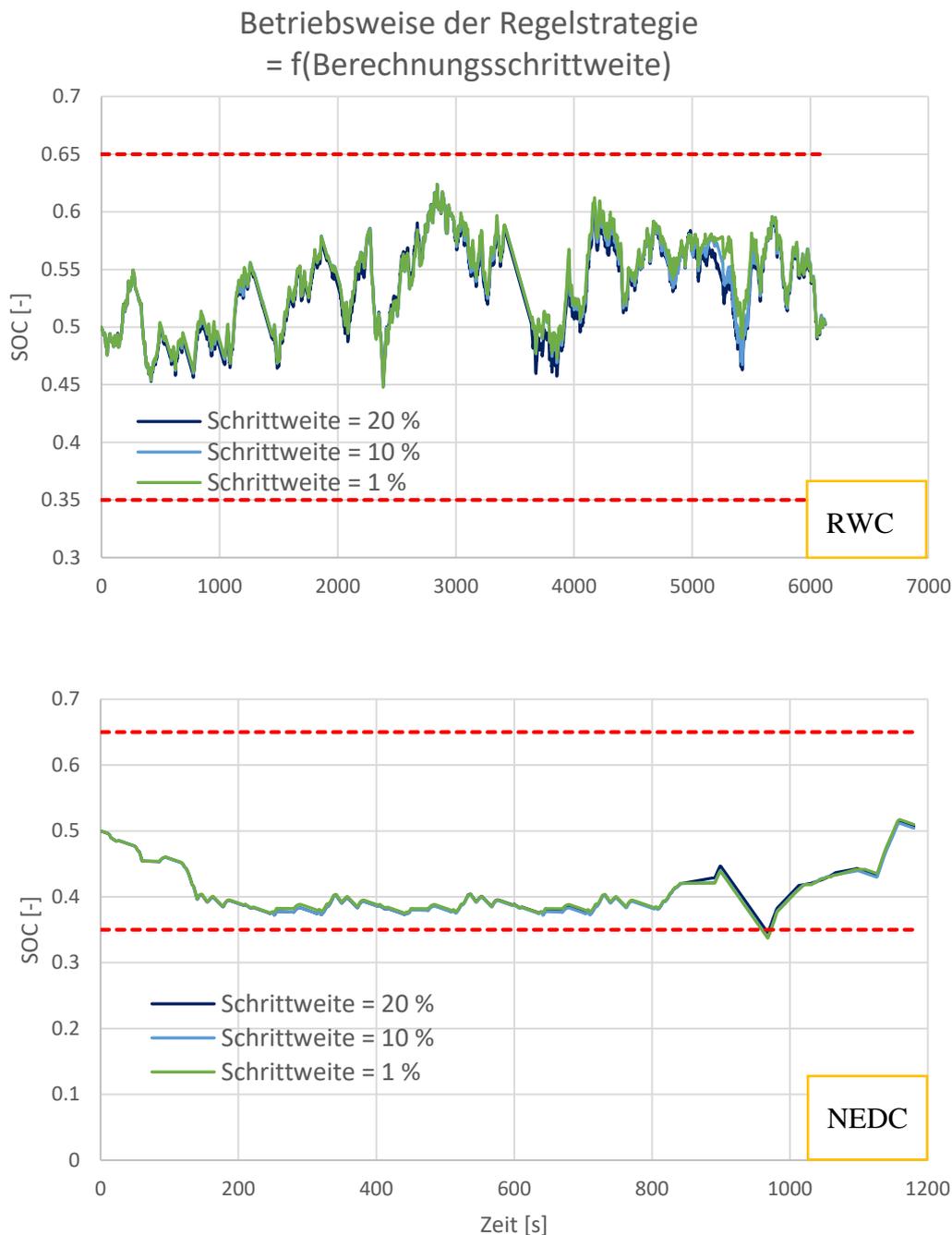


Abbildung 5-1: Einfluss der Berechnungsschrittweite auf die Betriebsweise

Bei Betrachtung der beiden Abbildungen erkennt man deutlich, dass sowohl für den realitätsnahen RWC als auch den wenig dynamischen NEDC die Betriebsweisen für die gewählten Berechnungsschrittweiten sehr gut übereinstimmen. Im Falle des RWC lassen sich z.T. noch etwas größere Abweichungen mit zunehmender Schrittweite erkennen, da die vielen Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge mehr Raum für unterschiedliche Betriebspunkte bieten, die mit größerer Abstufung nicht so genau aufgelöst werden können. Das stufenförmige Fahrprofil des NEDC lässt hingegen wenig Spielraum für stark abweichende Betriebsweisen zu, weshalb die Unterschiede entsprechend geringer sind.

Allgemein kommt man zu dem Schluss, dass eine Schrittweite von 10 [%] auf der einen Seite akzeptable Simulationszeiten und auf der anderen Seite eine, unabhängig vom gewählten Fahrzyklus, ausreichend hohe Anzahl an Leistungskombinationen überprüft, um eine nahe am Optimum liegende Betriebsweise zu garantieren. Bei sehr großem Simulationsvolumen kann die Schrittweite auch auf 20 [%] erhöht werden, um die Rechenzeit zu begrenzen.

### 5.1.2 Äquivalenzfaktor $s_{\text{äquiv}}$

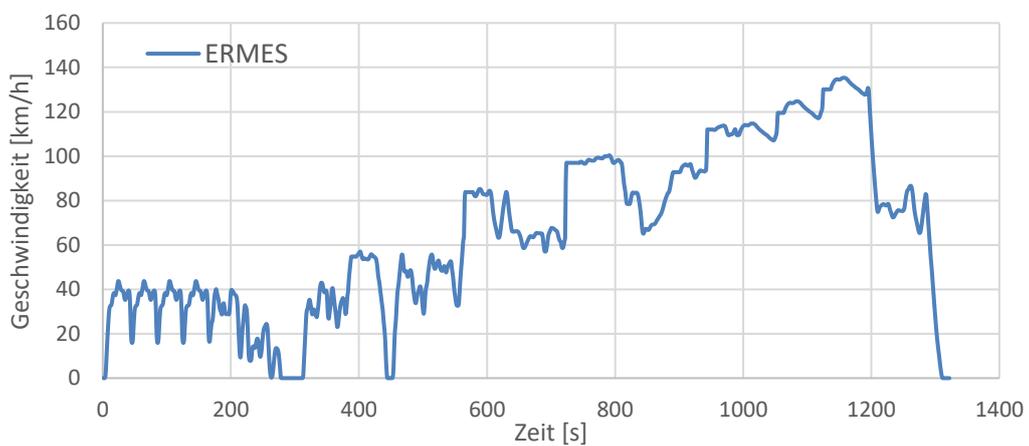
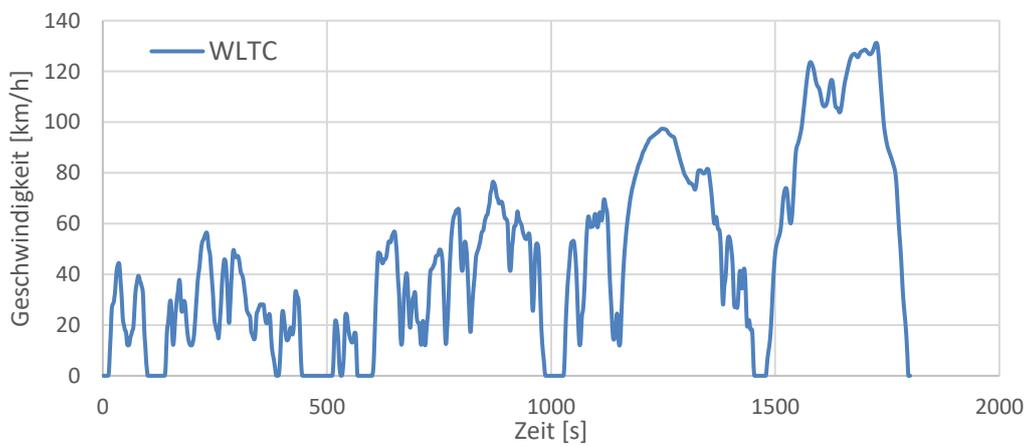
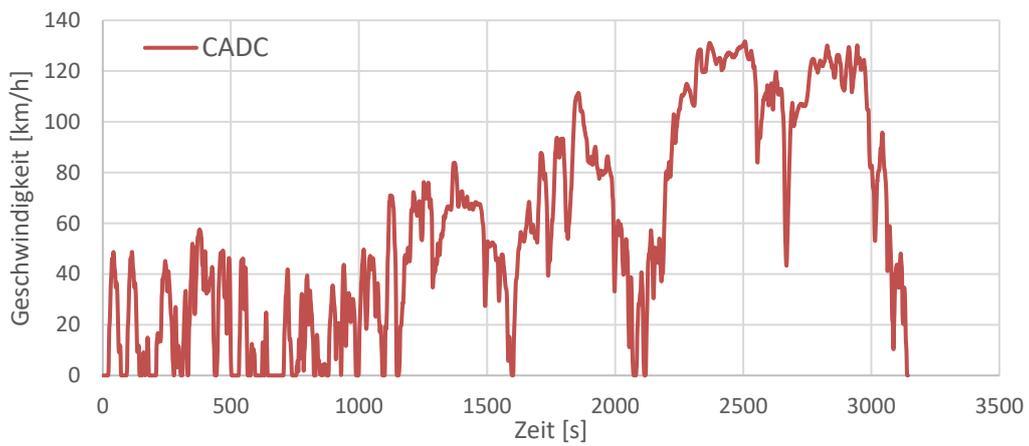
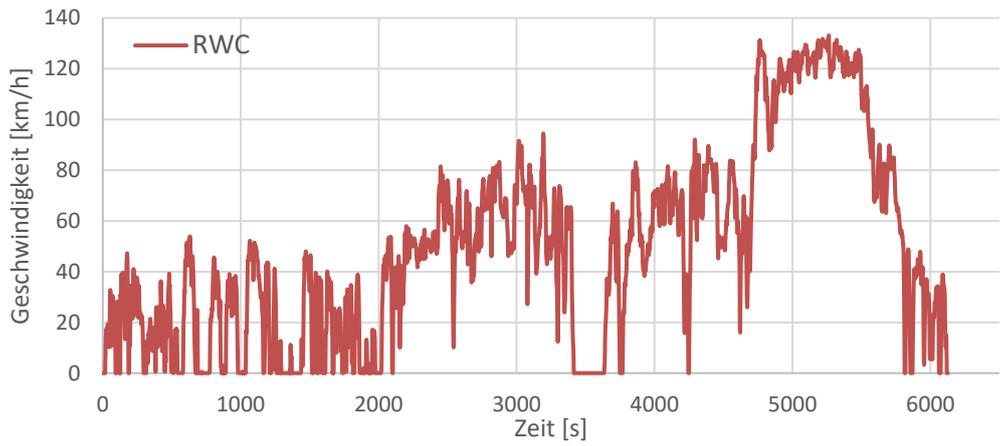
Der Äquivalenzfaktor bietet zusammen mit der Korrekturfunktion ( $p(\text{SOC})$ ) das größte Potential zur Beeinflussung der Betriebsweise. Da der Äquivalenzfaktor primär vom Fahrzeug sowie vom gewählten Fahrzyklus abhängt, wird die Analyse an dieser Stelle um weitere Fahrzyklen sowie ein Benzin-HEV erweitert. Dies soll den Einfluss verschiedener Zyklen sowie Antriebstechnologien auf den Äquivalenzfaktor umfassend darstellen. Tabelle 5-3 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Kenndaten des zusätzlich untersuchten Benzin-HEV.

Tabelle 5-3: Fahrzeugdaten eines Ø Benzin-HEV

Benzin HEV	
Motordaten VKM	
Kraftstoff	Benzin
Nenndrehzahl [1/min]	5247
Leerlaufdrehzahl [1/min]	706
Nennleistung [kW]	82
Motordaten Elektromotor	
Nenndrehzahl [1/min]	2865
Nennleistung [kW]	29
Batteriedaten	
Batterietechnologie	Li-Ion
Batteriegröße [kWh]	1.5
Batteriespannung [V]	250
Innenwiderstand [ $\Omega$ ]	0.095
Kapazität [Ah]	5.93
SOC-Bereich	0.3 - 0.7
Fahrzeug	
Masse [kg]	1347.73
Beladung [kg]	160.14
Getriebe	6 Gang

Verglichen mit den Daten des Diesel-HEV liegen die Unterschiede primär bei den beiden Antriebsaggregaten (geringere Leistung und höhere Nenndrehzahl des Benzinmotors sowie Unterschiede in den Gradienten der VKM-Kennfelder) sowie der geringeren Fahrzeugmasse. Die Batteriespezifikationen sind unverändert zum Diesel-HEV.

Zur besseren Assoziierung der in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse in Abhängigkeit der Zykluscharakteristik, sind nachfolgend die Fahrprofile der untersuchten Zyklen dargestellt.



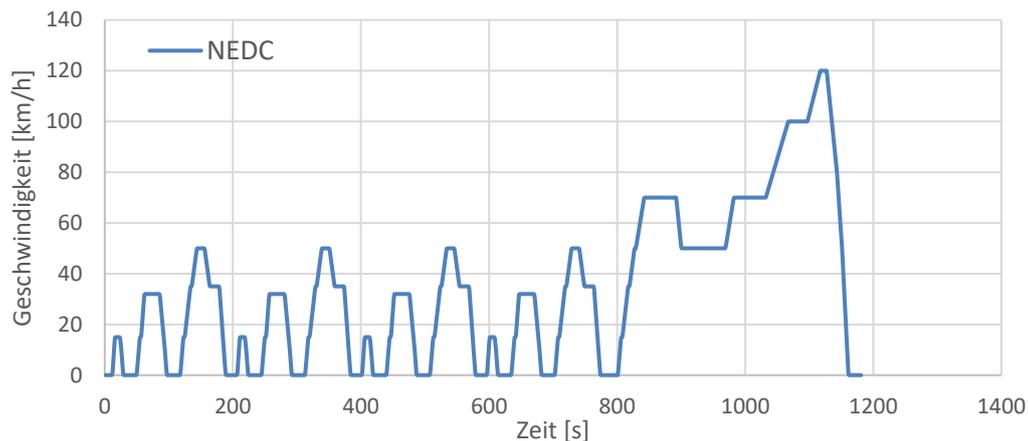


Abbildung 5-2: Geschwindigkeitsprofile der untersuchten PKW-Fahrzyklen

Neben der Dauer unterscheiden sich die Zyklen vor allem in der Dynamik des Fahrprofils. Hierbei beschreibt der NEDC mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 34 [km/h] und seinem stufenförmigen Profil den Extremfall eines wenig dynamischen Zyklus. Die übrigen Zyklen umfassen mehrere Fahrsituationen und sind damit besser geeignet, um ein reales Fahrverhalten zu repräsentieren. Der WLTC liegt dabei mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 47 [km/h] zwischen dem NEDC und dem ERMES mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 66 [km/h]. Die höchste Dynamik weisen der CADC und der RWC auf, die jeweils einen Drittel Mix aus Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt darstellen. Der CADC repräsentiert das durchschnittliche Fahrverhalten im europäischen Straßenverkehr, während der RWC das Fahrprofil einer Route beschreibt welche am Institut für RDE-Messungen verwendet wird.

Wie bereits in früheren Kapiteln erläutert muss der Äquivalenzfaktor individuell an Fahrzeug und Zyklus angepasst werden, um die Betriebsweise so zu regeln, dass annähernd SOC-Neutralität ( $SOC_{\text{Ende}} - SOC_{\text{Anfang}} \approx 0$ ) erreicht wird. Eine exakte Bestimmung des Faktors würde pro Fahrzeug und Zyklus mehrere Simulationen benötigen und ist daher mit großem Zeitaufwand verbunden. Zusätzlich erschwert dieser Iterationsprozess die einfache Anwendung des Modells, da der Bediener die Teilergebnisse richtig interpretieren und den Äquivalenzfaktor entsprechend anpassen muss. Aus diesen Gründen gibt es in PHEM die Möglichkeit, den SOC am Ende des Zyklus auf SOC-Neutralität zu korrigieren. Dadurch reicht es aus den Äquivalenzfaktor so einzustellen, dass der SOC am Ende annähernd jenem am Anfang entspricht, wodurch der Simulationsaufwand deutlich reduziert wird.

Die Methode der SOC-Korrektur beruht auf dem bereits erwähnten Veline-Ansatz. Durch das Annähern der Verbrauchspunkte über eine Gerade erhält man eine konstante Verbrauchsdifferenz (Steigung der Geraden) in Abhängigkeit der Leistung (siehe Abbildung 5-3).

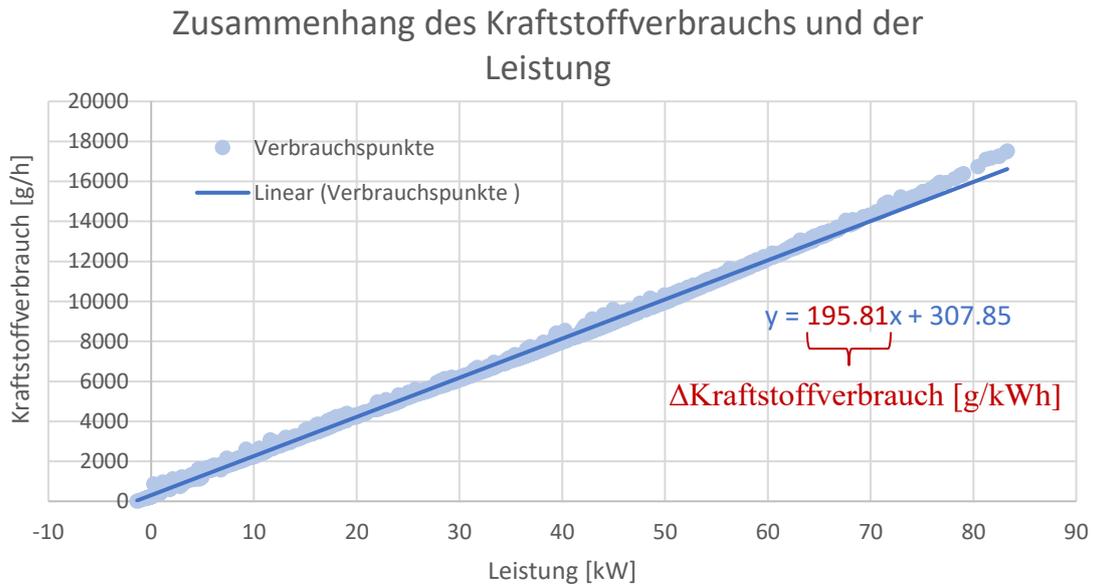


Abbildung 5-3: Verbrauchspunkte in Abhängigkeit der Leistung für ein Diesel HEV im RWC

Über den bekannten SOC-Unterschied zwischen Anfang und Ende der Simulation sowie der Batteriespannung und der Batteriekapazität kann eine Differenzenergie berechnet werden.

$$\Delta E = \Delta SOC * U_{Batt} * K_{Batt} \quad (5-1)$$

Diese Energie kann sowohl positiv als auch negativ sein. Ein positiver Wert bedeutet, dass über den Zyklus zu viel elektrische Energie erzeugt wurde ( $SOC_{\text{Ende}} > SOC_{\text{Anfang}}$ ). Demzufolge hätte die VKM weniger Leistung abgeben müssen (bzw. die EM mehr), wodurch der Kraftstoffverbrauch nach unten korrigiert werden muss. Umgekehrt bedeutet eine negative Energie, dass die VKM zu wenig geleistet hat um  $\Delta SOC = 0$  zu erreichen, weshalb der Kraftstoffverbrauch nach oben korrigiert wird. Zusätzlich muss die gesamte Wirkungsgradkette der elektrischen Antriebsseite bei der Korrektur berücksichtigt werden, da der Mehrverbrauch bzw. die Kraftstoffeinsparung durch elektrische Energie substituiert wurde.

$$FC_{SOC_{corr.}} = FC - \Delta E * \Delta FC * \frac{1}{\eta_{EM}^- * \eta_{Batt}^-} \quad (5-2)$$

$FC_{SOC_{corr.}}$	korrigierter Kraftstoffverbrauch [g/h]
$\Delta E$	Differenzenergie [Ws]
$\Delta FC$	konstante Kraftstoffdifferenz aus der Ausgleichsgeraden [g/kWh]

Diese Verbrauchskorrektur ermöglicht eine genaue, SOC-neutrale Verbrauchsbestimmung, ohne den Äquivalenzfaktor mühsam über mehrere Iterationen exakt bestimmen zu müssen.

Die in Tabelle 5-4 dargestellten Werte des Äquivalenzfaktors regeln die Betriebsweise des Fahrzeugs je nach Zyklus so, dass näherungsweise SOC-Neutralität ( $SOC_{\text{Ende}} - SOC_{\text{Anfang}} \approx 0$ ) erreicht wird.

Tabelle 5-4: Wertebereich des Äquivalenzfaktors in Abhängigkeit von Fahrzeug und Zyklus

	Zyklus	$S_{\text{äquiv}}$	$\Delta SOC$		$FC_{SOC_{\text{corr.}}}$		$\Delta FC$
		[-]	[-]		[g/km]		[g/km]
Diesel HEV	RWC	3.3 - 3.8	-0.056	0.028	48.93	49.08	0.15
	NEDC	2.1 - 2.8	-0.032	0.03	45.63	45.47	-0.16
	WLTC	2.7 - 3.1	-0.02	0.094	45.43	45.26	-0.17
	CADC	2.6 - 3.0	-0.025	0.022	49.59	49.56	-0.03
	ERMES	2.7 - 3.2	-0.031	0.026	47.02	47.02	0
Benzin HEV	RWC	4.0 - 4.5	-0.015	0.018	43.96	44.09	0.13
	NEDC	2.3 - 2.8	-0.038	0.039	42.28	42.33	0.05
	WLTC	3.0 - 3.2	-0.041	0.081	40.69	40.77	0.08
	CADC	3.1 - 3.4	-0.043	0.037	45.64	45.64	0
	ERMES	2.9 - 3.1	-0.041	0.038	43.02	42.76	-0.26

Die linken Werte in den Spalten für  $\Delta SOC$  und  $FC_{SOC_{\text{corr.}}}$  repräsentieren die Ergebnisse bei der jeweils unteren Bereichsgrenze des Äquivalenzfaktors. Die rechten Werte stehen für die Ergebnisse bei der oberen Bereichsgrenze. Die Bereiche wurden dabei in einem kleinen Fenster um  $\Delta SOC = 0$  angegeben, in denen die Betriebsunterschiede über den gesamten Zyklus so klein sind, sodass die SOC-Korrektur am Ende fast idente Verbrauchswerte liefert. Dabei ist zu beachten, dass die angegebenen Grenzen nur Richtwerte darstellen und kleine Abweichungen nach oben bzw. unten keine radikalen Änderungen der Ergebnisse bedeuten und damit ebenfalls zulässig sind, um akkurate Ergebnisse zu erhalten. Bei Betrachtung der Größenordnung der Äquivalenzfaktoren fallen mehrere Dinge auf:

- Der gegenüber den anderen Zyklen deutlich längere RWC benötigt einen höheren Äquivalenzfaktor
- Die Bandbreite in denen sich der SOC am Ende in einem entsprechend kleinen Fenster befindet ist stark vom jeweiligen Zyklus abhängig. So reagiert beispielsweise der WLTC deutlich empfindlicher auf Anpassungen des Äquivalenzfaktors als der NEDC

Die letzte Spalte beinhaltet die Unterschiede im Kraftstoffverbrauch der beiden Bereichsgrenzen. Hierbei liegen die Verbrauchsunterschiede im korrigierten Kraftstoffverbrauch unter 0.26 [g/km], was einer prozentualen Ungenauigkeit von  $< 1$  [%] bezogen auf den gesamten Kraftstoffverbrauch entspricht. Damit ist sichergestellt, dass alle Äquivalenzwerte in den angegebenen Bereichen akkurate Zyklusergebnisse liefern.

Zwischen den beiden Fahrzeugen ergibt sich für alle Zyklen (in guter Näherung auch für den RWC) eine Schnittmenge und damit eine entsprechend ähnliche Größenordnung des Äquivalenzfaktors. Als allgemeiner Startwert zur Simulation von HEV-PKW werden daher zyklusabhängig folgende Werte empfohlen:

- RWC / RDE:  $S_{\text{äquiv.}} \approx 3.5$
- Restliche Zyklen:  $S_{\text{äquiv.}} \approx 3$

Natürlich kann die Güte dieser Werte bei stark unterschiedlichen Fahrzeugen deutlich abweichen. Dazu zählen z.B. größere Unterschiede in der Motorisierung (Leistungsbereiche etc.) oder auch der Batteriespezifikationen. Die untersuchten Fahrzeuge verfügen über dieselbe Batterietechnologie (Batteriespannung, Batteriekapazität, Wirkungsgradkennfeld etc.). Die Verwendung anderer Batterien (Herstelltoleranzen, Materialien, Kenndaten etc.) kann beispielsweise zu deutlichen Unterschieden im Wirkungsgrad und damit zu einer anderen Betriebsweise durch die Regelstrategie führen. In solchen Fällen müssen die Ergebnisse genau überprüft und der Äquivalenzfaktor bzw. die mittleren Wirkungsgrade (siehe Kapitel 5.1.3) u.U. entsprechend angepasst werden.

Anzumerken sei an dieser Stelle noch, dass es sich bei den untersuchten Zyklen um ausgewogene Fahrprofile bezüglich Beschleunigung, Verzögerung und Steigung handelt. Somit ist eine Regelung um einen bestimmten SOC-Wert gut realisierbar. Betrachtet man hingegen einseitige Fahrprofile (z.B. reine Bergauffahrt), ist dies nicht möglich bzw. nicht sinnvoll und die Regelstrategie muss möglicherweise an diese Spezialfälle angepasst werden.

### 5.1.3 EM-Wirkungsgrade

Tabelle 5-5 zeigt die mittleren Wirkungsgrade der elektrischen Antriebsseite je nach Zyklus für die in Tabelle 5-4 angegebenen Bereiche des Äquivalenzfaktors. Auf Basis der dargestellten Werte ist ersichtlich, dass die Wirkungsgrade zyklusunabhängig in einem sehr engen Bereich liegen. Diese Erkenntnis in Kombination mit der Tatsache, dass die Regelstrategie generell nur einen mittleren Wirkungsgrad für alle Lade- bzw. Entladevorgänge berücksichtigt und daher bereits mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet ist, erlaubt eine einheitliche Wirkungsgraddefinition.

Tabelle 5-5: Mittlere Wirkungsgrade der elektrischen Antriebsseite

Zyklus	$\overline{\eta}_{EM}^+$	$\overline{\eta}_{EM}^-$	$\overline{\eta}_{Batt}^+$	$\overline{\eta}_{Batt}^-$
	[-]	[-]	[-]	[-]
RWC	0.882	0.837	0.981	0.986
NEDC	0.854	0.835	0.989	0.986
WLTC	0.868	0.829	0.984	0.987
CADC	0.878	0.833	0.982	0.986
ERMES	0.892	0.840	0.976	0.986
<b>Mittelwert</b>	<b>0.875</b>	<b>0.835</b>	<b>0.983</b>	<b>0.986</b>
<b>Gewählte Wirkungsgrade</b>	<b>0.85</b>	<b>0.85</b>	<b>0.98</b>	<b>0.98</b>

Wie bereits erwähnt liegen die Batteriewirkungsgrade moderner Li-Ion Batterien lastpunktunabhängig nahe an 100 [%] und werden daher im Mittel mit 98 [%] angenommen. Der Einfluss unterschiedlicher EM-Wirkungsgrade ist in Tabelle 5-6 dargestellt, wobei sich die Auswertung auf einen realistischen, mittleren Wirkungsgradbereich von 80 – 90 [%] beschränkt.

Tabelle 5-6: Einfluss des mittleren EM-Wirkungsgrades auf den Kraftstoffverbrauch

	$\overline{\eta}_{EM}$	$\overline{\eta}_{Batt}$	FC	FC <sub>SOC<sub>corr.</sub></sub>
	[-]	[-]	[g/km]	[g/km]
<b>RWC</b>	0.8		49.05	49.01
	0.85	0.98	49.06	48.98
	0.9		49.14	49.09
<b>NEDC</b>	0.8		45.28	45.33
	0.85	0.98	45.99	45.61
	0.9		45.51	45.66

Für den RWC ergeben sich sowohl für den korrigierten als auch den nicht korrigierten Kraftstoffverbrauch praktisch keine Unterschiede für die untersuchten EM-Wirkungsgrade. Für den NEDC ergibt sich ein maximaler Unterschied zwischen dem Verbrauch bei  $\overline{\eta}_{EM} = 0.8$  und  $\overline{\eta}_{EM} = 0.85$  von ca. 1.5 [%], bezogen auf den gesamten Kraftstoffverbrauch und ist damit ebenfalls vernachlässigbar.

Betrachtet man den sekundlich aufgelösten SOC-Verlauf in Abbildung 5-4, erkennt man vor allem beim RWC zu Beginn (Stadtteil) Unterschiede in der Betriebsweise. Hierbei fährt das Fahrzeug bei einem Wirkungsgrad von 90 [%] verstärkt elektrisch, da die benötigte Antriebsenergie zum Großteil rein elektrisch abgedeckt werden kann und die elektrische Energie natürlich energetisch günstiger ist als bei geringerem Wirkungsgrad. Gleichzeitig wird aber auch das Generieren bei hohem Wirkungsgrad energetisch günstiger, wodurch im Falle des Lastpunktanhebens die VKM mehr Leistung abgibt (damit steigt hier der Verbrauch), um mehr elektrische Energie zu generieren. Dies ist vor allem der Fall, wenn die Leistung der VKM ausreicht, um die Lastanforderung abzudecken und zusätzlich Leistung zum Nachladen der Batterie bereitstellen kann (z.B. rot markierter Bereich). Das verstärkte Nachladen der Batterie durch LPA ist auch im NEDC im rot markierten Bereich zu erkennen (Bereich in dem auf 120 [km/h] beschleunigt wird).

In Summe gleichen sich die leicht unterschiedlichen Betriebsweisen für verschiedene EM-Wirkungsgrade über den Zyklus gesehen aus, wodurch nahezu idente Verbrauchswerte erzielt werden (vgl. Tabelle 5-6).

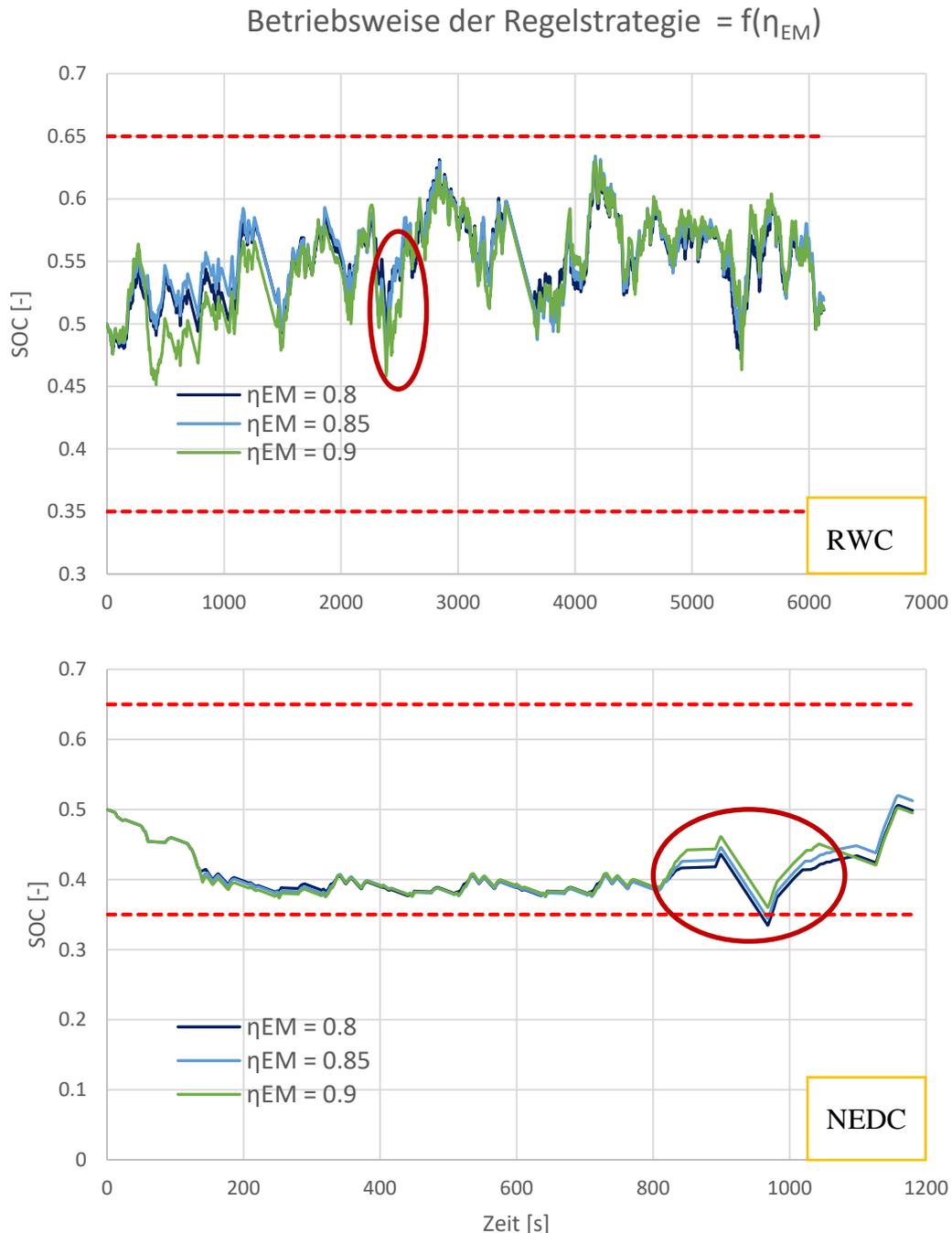


Abbildung 5-4: Einfluss unterschiedlicher EM-Wirkungsgrade auf die Betriebsweise

Diese Untersuchung bestätigt somit die Güte der Wahl eines mittleren EM-Wirkungsgrades von 85 [%]. Dieser Wert kann für ähnliche Batterietechnologien, die ein vergleichbares Wirkungsgradkennfeld hinterlegt haben, als Standardwert für die E-Maschine verwendet werden. Bei stark unterschiedlichen Wirkungsgradkennfeldern muss der Wert entsprechend angepasst werden. Hierzu wird empfohlen, einen beliebigen Zyklus für eine Referenzsimulation zu verwenden und aus den Simulationsergebnissen den mittleren Wirkungsgrad zu berechnen. Dieser Wert kann anschließend in guter Näherung für alle mit diesem Kennfeld gerechneten Zyklen verwendet werden.

### 5.1.4 SOC-Faktoren

Einige SOC-Faktoren wurden in Kapitel 5.1 bereits fixiert und die Gründe dafür erläutert. Dieses Kapitel beschränkt sich auf eine genaue Betrachtung ausgewählter Faktoren und umfasst eine Untersuchung der Einflüsse unterschiedlicher Start-SOC, Target-SOC, sowie SOC-Exponenten.

#### Start-SOC

Je nach Vorgeschichte des Fahrzeugs wird eine neue Fahrt bzw. ein neuer Zyklus am Rollenprüfstand mit unterschiedlichem  $SOC_{start}$  begonnen. Somit ist dieser Parameter eine häufig geänderte Stellgröße und der Einfluss unterschiedlicher Werte auf die Ergebnisse von entsprechendem Interesse. An dieser Stelle wird das Verhalten der Regelstrategie anhand dreier Extremfälle untersucht:

- $SOC_{start} = SOC_{low} = 0.35$
- $SOC_{start} = SOC_{targ.} = 0.5$
- $SOC_{start} = SOC_{high} = 0.65$

Tabelle 5-7: Einfluss des Start-SOC auf den Kraftstoffverbrauch

	$SOC_{start}$	FC	$\Delta FC$	$FC_{SOC_{corr.}}$
	[-]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
<b>RWC</b>	0.35	49.67	0.69	49.03
	0.5	48.97		
	0.65	48.36	0.62	48.96
<b>NEDC</b>	0.35	50.34	4.59	45.57
	0.5	45.75	4.39	45.62
	0.65	41.39		

Jede Simulation wurde dabei mit einem  $SOC_{targ} = 0.5$  durchgeführt.

Bei Betrachtung der Spalte 2 erkennt man deutliche Empfindlichkeitsunterschiede bezüglich des Start-SOC zwischen den beiden Zyklen. Beim RWC liegt der Unterschied für den unkorrigierten Kraftstoffverbrauch im Mittel bei  $\pm 0.65$  [g/km]. Im Falle des NEDC ist der Unterschied mit  $\pm 4.45$  [g/km] im Mittel deutlich höher. Der Grund dafür lässt sich anhand der sekundlichen Daten sehr gut erkennen.

Beim RWC führt die Regelstrategie, aufgrund der hohen Dynamik des Zyklus und der damit verbundenen großen Freiheit an einstellbaren Leistungsaufteilungen, zu einer raschen Angleichung des SOC. Somit sind die anfänglichen Unterschiede die einzigen Ursachen für den unterschiedlichen Verbrauch, die über den gesamten Zyklus gesehen jedoch kaum ins Gewicht fallen. Im Falle des NEDC wird durch das stufenförmige, z.T. repetitive Fahrprofil der SOC über weite Bereiche annähernd konstant gehalten. Entsprechend groß ist der anfängliche SOC-Unterschied und damit auch der Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Hinzu kommt, dass durch die geringe Dynamik des NEDC die SOC-Angleichung länger dauert und damit die unterschiedliche Betriebsweise prozentual größere Anteile über den gesamten Zyklus einnimmt.

Allgemein lässt sich damit aussagen, dass der Einfluss des Start-SOC mit zunehmender Dynamik und Länge des Testzyklus abnimmt.

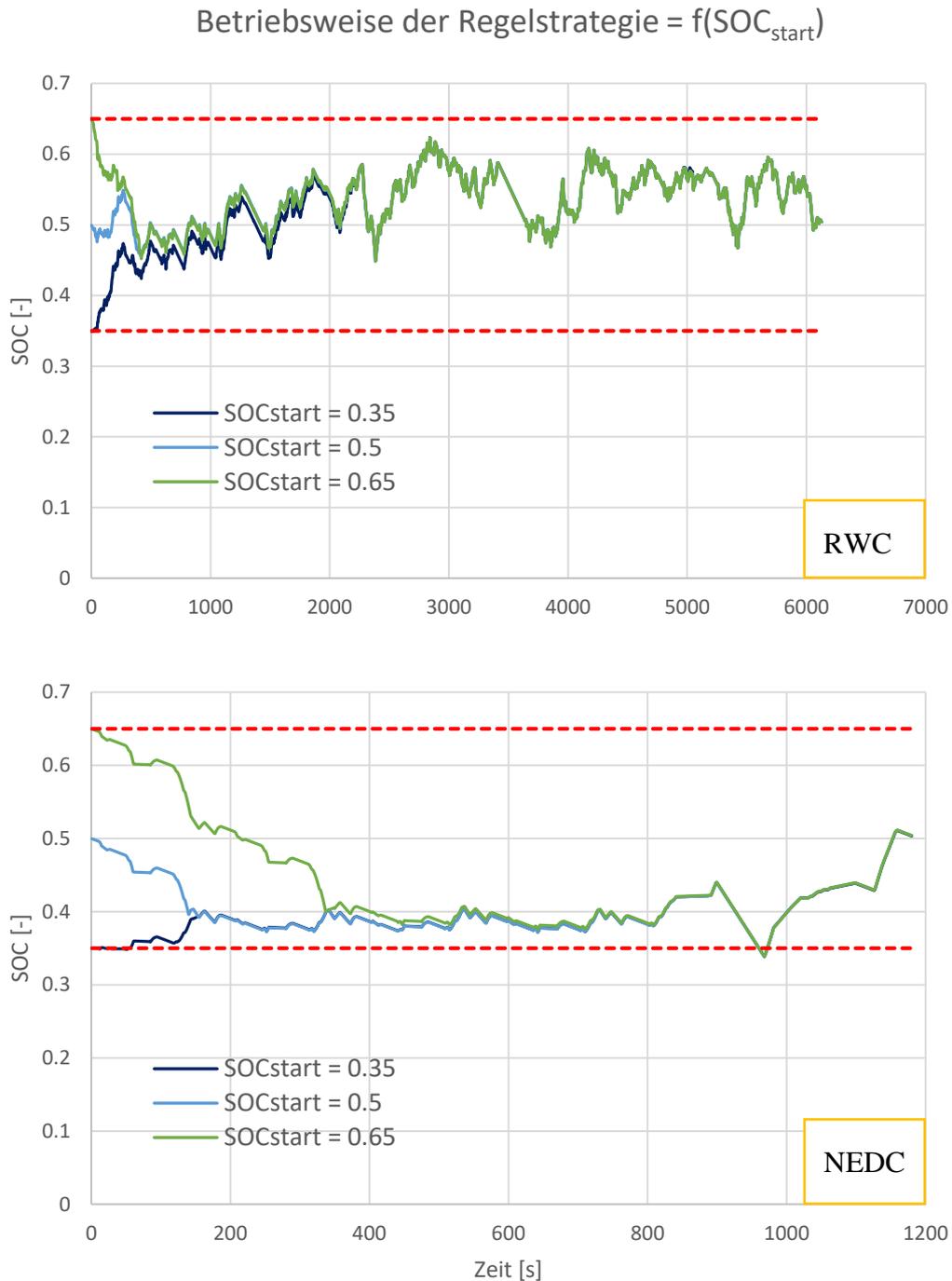


Abbildung 5-5: Einfluss des Start-SOC auf die Betriebsweise

### Target-SOC

Wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt kann es in speziellen Fällen sinnvoll sein, den Target-SOC zu verändern, um besondere Betriebsweisen abzubilden. Dazu zählen beispielsweise das Entleeren der Batterie bei PHEV, da diese extern wieder geladen werden können. Abbildung 5-6 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Kombinationen aus Target- und Start-SOC auf die Betriebsweise.

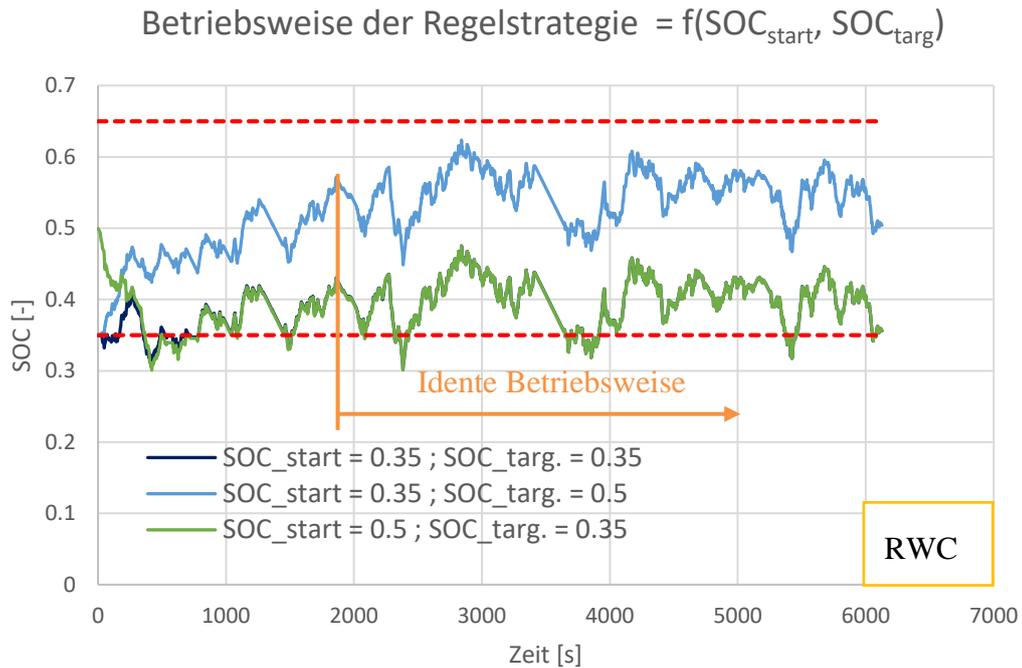


Abbildung 5-6: Einfluss unterschiedlicher Target- und Start-SOC auf die Betriebsweise

Stimmen  $\text{SOC}_{\text{start}}$  und  $\text{SOC}_{\text{targ.}}$  nicht überein kommt es am Beginn zu einem Ausgleichvorgang durch die Regelstrategie, der je nach Zyklus und Wert der beiden Parameter unterschiedlich lange dauern kann (vgl. grüner zu hellblauer Verlauf). Sobald dieser Vorgang abgeschlossen ist und der SOC denselben Abstand vom jeweiligen  $\text{SOC}_{\text{targ.}}$  hat, führt die Regelstrategie erwartungsgemäß zu einer identen Betriebsweise. Der Einfluss der beiden Parameter auf den Kraftstoffverbrauch ist in Tabelle 5-8 zusammengefasst.

Tabelle 5-8: Einfluss unterschiedlicher Target- und Start-SOC auf den Kraftstoffverbrauch

	$\text{SOC}_{\text{start}}$	$\text{SOC}_{\text{targ.}}$	FC	$\text{FC}_{\text{SOC}_{\text{corr.}}}$
	[-]	[-]	[g/km]	[g/km]
RWC	0.35	0.35	49.05	49.02
	0.35	0.5	49.67	49.03
	0.5	0.35	48.44	49.03

Hierbei erkennt man, dass durch die SOC-Korrektur die Information über das Einsparungspotential bzw. den Mehrverbrauch durch eine entsprechende Wahl der Parameter verloren geht. Um somit die Performance des HEV in Abhängigkeit der Parameterwahl vergleichen zu können, ist es notwendig, den unkorrigierten Kraftstoffverbrauch heranzuziehen. Diese Betrachtung ermöglicht beispielsweise die Beurteilung des Einsparungspotentials bei Entleerung einer zu Beginn vollen Batterie ( $\text{SOC}_{\text{start}} = 0.65$ ,  $\text{SOC}_{\text{targ.}} = 0.35$ ), im Vergleich zu einer Betriebsweise, in der der SOC im mittleren Bereich gehalten wird ( $\text{SOC}_{\text{targ.}} = 0.5$ ).

### SOC-Exponent a

Wie in Tabelle 5-9 zu sehen ist, hat der SOC-Exponent zyklusübergreifend kaum Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch.

Tabelle 5-9: Einfluss des SOC-Exponenten auf den Kraftstoffverbrauch

	SOC Exponent a	FC	FC <sub>SOC<sub>corr.</sub></sub>
	[-]	[g/km]	[g/km]
<b>RWC</b>	1	49.11	49.08
	3	48.96	48.97
	5	48.95	49.07
<b>NEDC</b>	1	47.25	45.44
	3	45.75	45.62
	5	45.06	45.69

Der etwas höhere Kraftstoffverbrauch des NEDC bei einem Exponenten von 1 kann über den SOC-Verlauf erklärt werden (siehe Abbildung 5-7). Hierbei erkennt man einen deutlich reduzierten elektrischen Betrieb über den gesamten Zyklus, um den SOC näher am SOC<sub>targ.</sub> zu halten (grün markierter Bereich). Gleichzeitig wird jedoch unabhängig vom Exponenten nahezu dieselbe elektrische Energie rückgespeichert, da während des Bremsvorgangs von 120 [km/h] auf 0 [km/h] am Ende des Zyklus die gesamte Bremsenergie zur Rekuperation zur Verfügung steht (orange markierter Bereich). Dementsprechend muss bei niedrigen Exponenten mehr Leistung durch die VKM abgedeckt werden, woraus der höhere Verbrauch resultiert. Dieser Unterschied kann jedoch durch die SOC-Korrektur nahezu vollständig kompensiert werden. Im Falle des RWC wird ebenfalls der SOC bei kleineren Exponenten strikter um SOC<sub>targ.</sub> geregelt. Allerdings wird durch die hohe Dynamik des Zyklus sowohl weniger elektrische Energie entnommen als auch weniger elektrische Energie rückgespeichert. Aus diesem Grund gleichen sich die unterschiedlichen Betriebsweisen über den Zyklus aus, woraus ein nahezu identer Kraftstoffverbrauch resultiert.

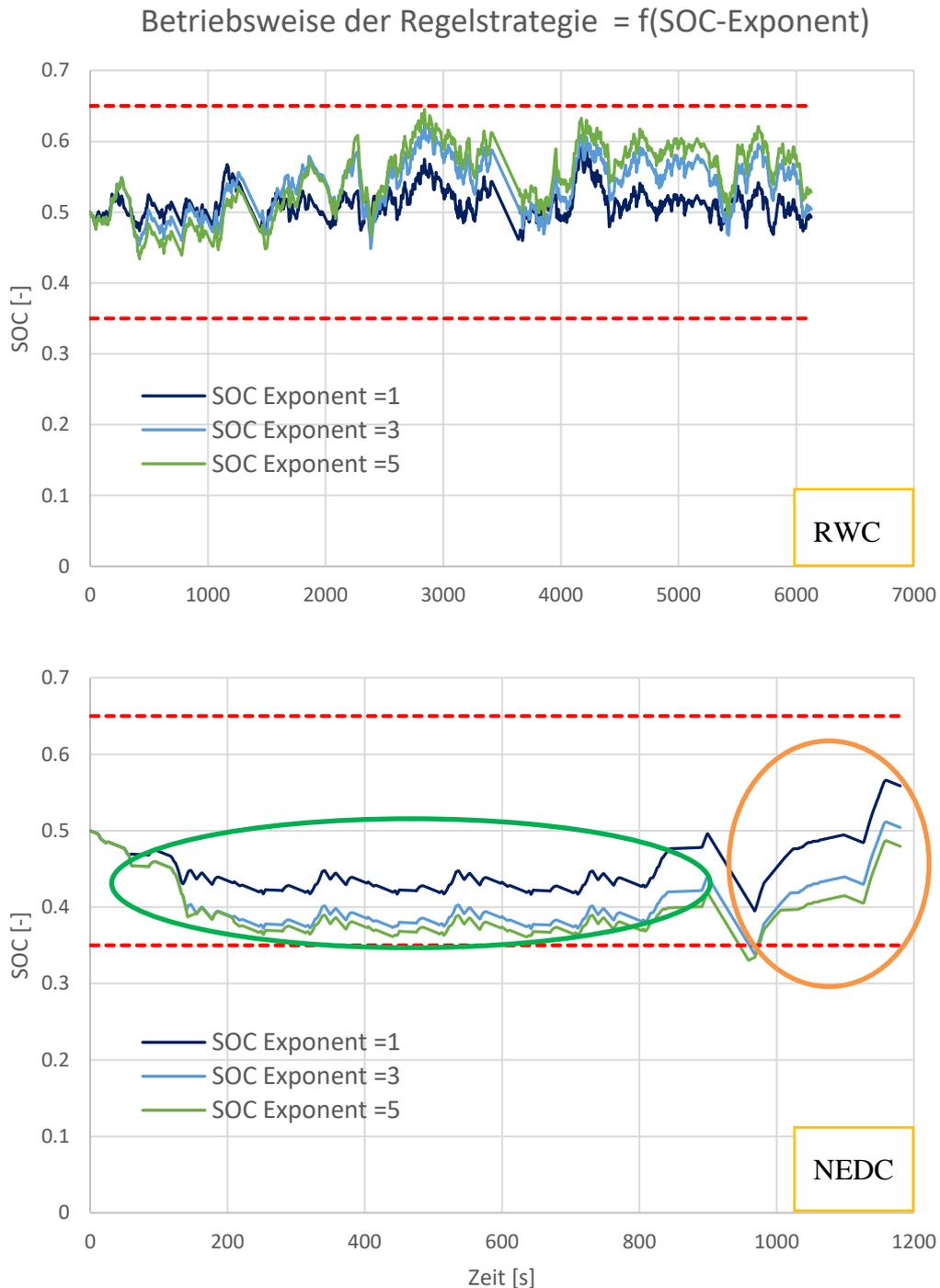


Abbildung 5-7: Einfluss des SOC-Exponenten auf die Betriebsweise

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einfluss des SOC-Exponenten auf den Verbrauch bei dynamischen Zyklen vernachlässigbar ist. Bei wenig dynamischen Zyklen lässt sich der Unterschied über die SOC-Korrektur sehr gut kompensieren. Somit liegt die Wahl des Exponenten rein an der Beurteilung, welche Betriebsweise einem realen HEV am nächsten kommt. Hierfür wird in erster Näherung ein SOC-Exponent von 3 als guter Kompromiss zwischen den beiden Extremen empfohlen. Soll ein reales Messfahrzeug nachsimuliert werden kann/soll der Exponent natürlich entsprechend angepasst werden, um die Betriebsweise bestmöglich abzubilden.

### 5.1.5 VKM - Sperrparameter

Die Zeitspanne, in der die VKM nach einem erfolgten Startvorgang eingeschaltet bleibt, hängt primär vom zu absolvierenden Fahrzyklus (Leistungsanforderung) sowie der Motorisierung des Fahrzeugs (Leistungsangebot) ab. Bei gewissen Konfigurationen kann es vorkommen, dass die VKM häufig ein- bzw. ausgeschaltet wird, was zu einem erhöhten Verschleiß durch die wiederholten Startvorgänge führt und außerdem aus betrieblicher Sicht nicht sinnvoll ist. Aus diesem Grund zeigt folgende Betrachtung den Einfluss unterschiedlicher Sperrzeiten  $t_{VKM\_lock}$  auf die Betriebsweise sowie den Kraftstoffverbrauch.

Tabelle 5-10: Einfluss der VKM-Sperrzeit anhand des RWC

	$t_{VKM\_lock}$	FC	$FC_{SOC_{corr}}$	$\overline{t_{VKM_{on}}}$	$\# VKM_{on}$
	[s]	[g/km]	[g/km]	[s]	[-]
RWC	0	48.92	48.91	9.05	243
	3	48.97	48.96	9.51	235
	5	49.12	49.12	10.72	218

Betrachtet man den Kraftstoffverbrauch, erkennt man eine minimale Verbrauchszunahme mit zunehmender Sperrzeit, dessen Größenordnung jedoch bezogen auf den gesamten Verbrauch vernachlässigbar ist. Der Grund für die geringen Unterschiede wird ersichtlich, wenn man die letzten beiden Spalten in Tabelle 5-10 betrachtet. Spalte 4 repräsentiert die durchschnittliche Betriebsdauer nachdem die VKM eingeschaltet wurde. Spalte 5 gibt an, wie häufig die VKM über den gesamten Zyklus gesehen eingeschaltet wurde. Hierbei erkennt man, dass die Betriebsdauer mit kleinerer  $t_{VKM\_lock}$  abnimmt, aber gleichzeitig die Häufigkeit der Startvorgänge zunimmt. Diese gegensätzlichen Einflüsse auf den Verbrauch führen dazu, dass nahezu keine Unterschiede feststellbar sind. Darüber hinaus sind die Unterschiede so gering, dass auch in der sekundlichen Betriebsweise praktisch keine Veränderung feststellbar ist (siehe Abbildung 5-8).

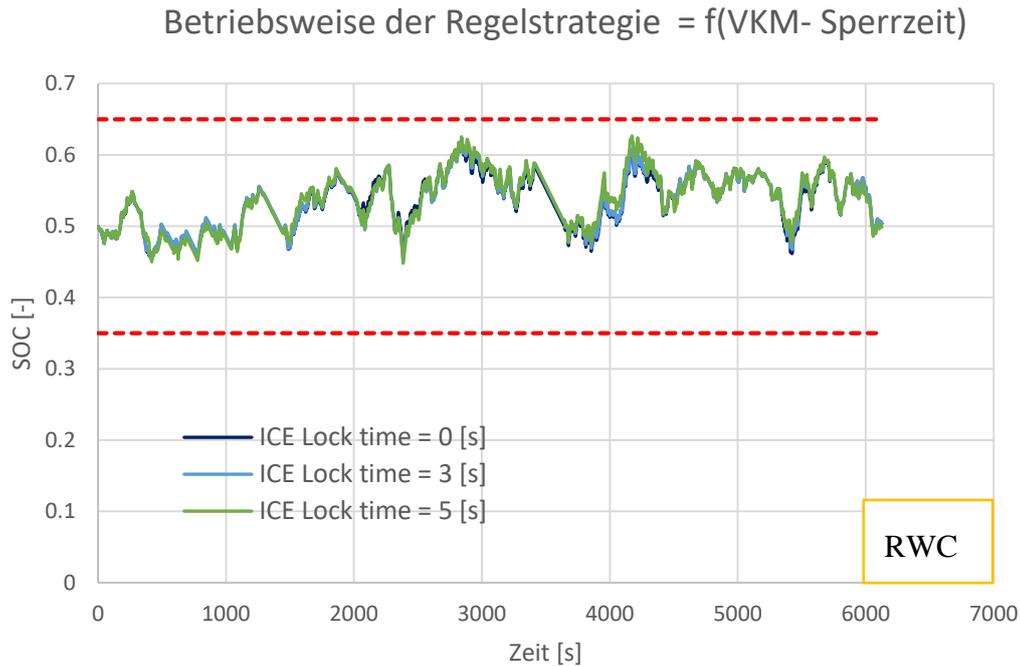


Abbildung 5-8: Einfluss der VKM-Sperrzeit auf die Betriebsweise

### 5.1.6 VKM - Startenergie

Basierend auf den Ergebnissen aus Tabelle 5-10 wird ersichtlich, dass sobald die VKM durch die Regelstrategie eingeschaltet wird, diese im Schnitt für ca. 10 [s] in Betrieb bleibt. Die derzeitige Regelstrategie berücksichtigt dabei die gesamte zum Starten der VKM notwendige Energie in einem Zeitschritt. Diese Energie ist verhältnismäßig hoch und kann somit verhindern, dass potentiell energetisch günstigere Betriebspunkte mit eingeschalteter VKM ausgewählt werden. Um diesem Effekt entgegen zu wirken wird an dieser Stelle die Startenergie durch 10 geteilt (damit soll dargestellt werden, dass die Energie auf die durchschnittliche Betriebszeit von 10 [s] aufgeteilt wird) und der Effekt im Vergleich zur Standardvariante diskutiert.

Die obere Grafik in Abbildung 5-9 zeigt einen Vergleich der beiden Varianten bei identem Äquivalenzfaktor. Hierbei wird deutlich, dass bei geringerer Startenergie die VKM deutlich stärker betrieben wird und das SOC-Level durch LPA entsprechend angehoben wird. Nach Anpassung des Äquivalenzfaktors, sodass beide annähernd auf SOC-Neutralität hin betrieben werden (untere Grafik), verschwinden die Unterschiede zusehends. Der verstärkte VKM-Betrieb wird durch die energetisch bedingte, günstigere elektrische Betriebsweise (geringerer Äquivalenzfaktor) ausgeglichen, wodurch sich die Betriebsweisen stark annähern.

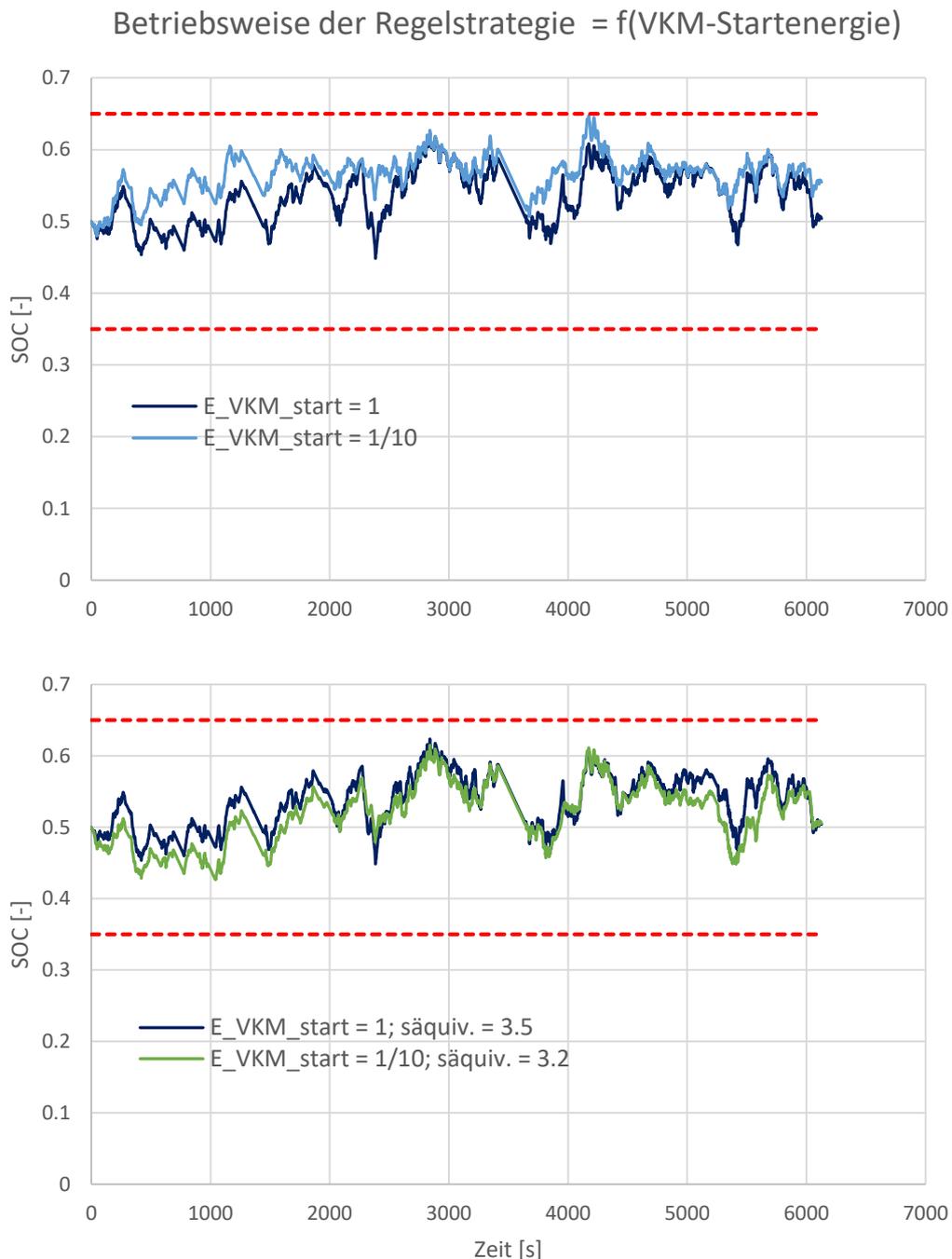


Abbildung 5-9: Einfluss der VKM-Startenergie auf die Betriebsweise

Die bereits vermuteten Einflüsse aus dem SOC-Verlauf werden durch die Daten in Tabelle 5-11 bestätigt. Hierbei sieht man, dass durch die reduzierte Startenergie die VKM, bei annähernd gleicher durchschnittlicher Betriebsdauer, häufiger angeschaltet wird. Entsprechend steigt der Kraftstoffverbrauch leicht um 0.29 [g/km]. Die Wahl eines geringeren Äquivalenzfaktors wirkt diesem Effekt entgegen und führt wiederum zu einem identen Kraftstoffverbrauch. Der korrigierte Verbrauch stimmt für alle Varianten sehr gut überein, wodurch grundsätzlich beide Ansätze zur Simulation herangezogen werden können. Ebenfalls behalten die bereits im Detail erläuterten Einflüsse verschiedener Parameter auf die Regelstrategie ihre Gültigkeit, weshalb diese für die Variante mit reduzierter Startenergie nicht gesondert behandelt werden müssen.

Tabelle 5-11: Einfluss der VKM-Startenergie auf den Kraftstoffverbrauch

	$E_{VKM_{start}}$	$S_{äquiv}$	FC	$FC_{SOC_{corr}}$	$\overline{t_{VKM_{on}}}$	$\# VKM_{on}$
	[s]	[-]	[g/km]	[g/km]	[s]	[-]
<b>RWC</b>	1	3.5	48.97	48.96	9.51	235
	1/10	3.5	49.28	49.05	9.29	266
	1/10	3.2	48.98	48.96	9.17	266

## 5.2 Performance der Regelstrategie

Neben den Einflüssen verschiedener Parameter auf die Regelstrategie ist vor allem die Performance im Vergleich zum alten HEV-Modell von Interesse. Hauptziel war es nämlich ein Modell zu entwickeln, das neben guten Verbrauchswerten auch eine deutliche Reduktion der Simulationszeit erzielen soll. Hierfür soll in nachfolgenden Kapiteln die Performance des neuen Modells dem alten Modell gegenübergestellt werden. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen wird dabei auf eine genaue Erläuterung der Regelstrategie des alten Modells verzichtet und nur die Ergebnisse der beiden Modelle verglichen.

### 5.2.1 Ergebnisse PKW-Modell

Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11 zeigen eine Gegenüberstellung des korrigierten Kraftstoffverbrauchs bzw. der Simulationszeiten für das Ø Diesel-HEV anhand mehrerer Zyklen. Um einen fairen Vergleich zu gewährleisten wurden Parameter, die in beiden Modellen berücksichtigt werden (z.B. SOC-Grenzen,  $SOC_{start}$ , etc.), ident gewählt. Darüber hinaus wird nur der korrigierte Verbrauch verglichen, da die alte Regelstrategie nicht so gut auf SOC-Neutralität parametrisiert werden kann und somit ein aussagekräftiger Vergleich des realen Verbrauchs nicht möglich ist. In Bezug auf die PC-Hardware wurden beide Modelle auf demselben Rechner ausgeführt und dabei alle nicht relevanten Programme geschlossen, wodurch der Rechner die gleichen Ressourcen zur Verfügung hat. Damit wird der Einfluss unterschiedlicher Hardware auf die Simulationsdauer ausgeschlossen und die Zeiten können fair verglichen werden.

Als Referenz wurde das Fahrzeug auch als rein konventioneller Diesel-PKW simuliert, um allgemein die Vorteile der Hybridtechnologie gegenüber konventionellen Antrieben abschätzen zu können. Hierbei erkennt man erwartungsgemäß geringere Verbräuche der Hybridmodelle für alle Zyklen, wobei das Einsparungspotential des alten Modells, vor allem beim ERMES, sehr gering ist.

Vergleicht man die HEV-Modelle untereinander erkennt man einen im Mittel um 6.49 [%] geringeren Verbrauch des neuen Modells. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass der verfolgte Ansatz, in dem jede Sekunde die energetisch günstigste Betriebsweise gesucht wird, auch global zu einem sehr guten Ergebnis führt. Noch viel deutlicher ist jedoch der Vorteil der neuen Regelstrategie hinsichtlich der Simulationsdauer. Hierbei kann die Rechenzeit im Schnitt um rund 90 [%] im Vergleich zum alten Modell reduziert werden. Folglich ist die neue Regelstrategie, neben einem zyklusübergreifend geringeren Verbrauch, auch deutlich effizienter was die Rechenzeiten angeht.

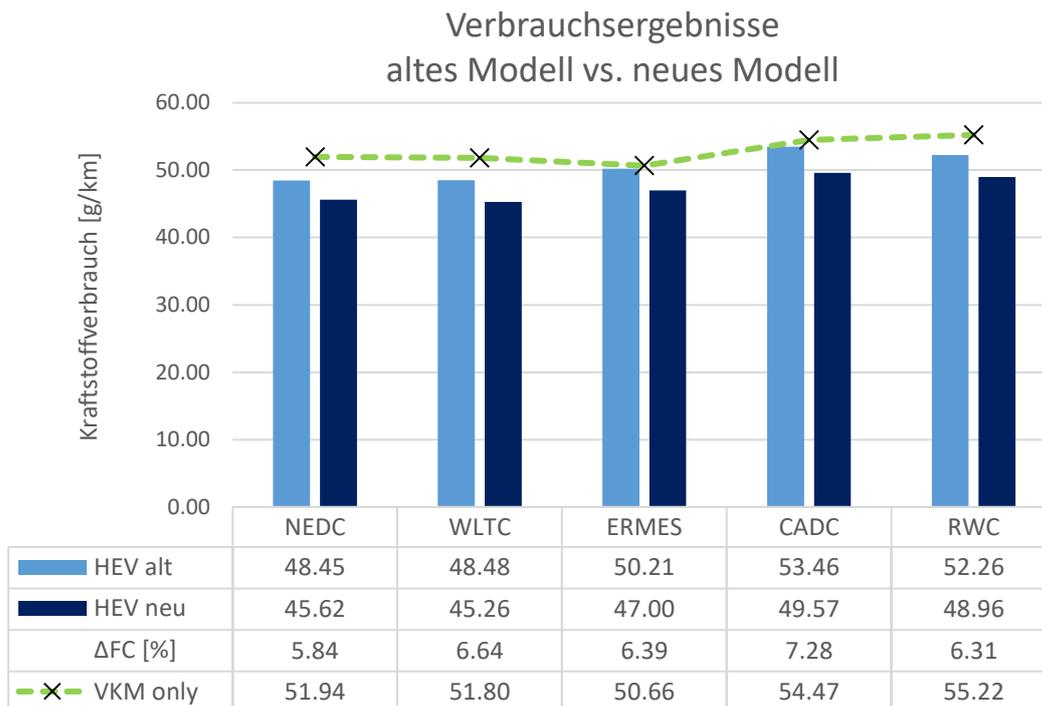


Abbildung 5-10: Vergleich der Verbrauchsergebnisse zwischen neuem und altem PKW-Modell

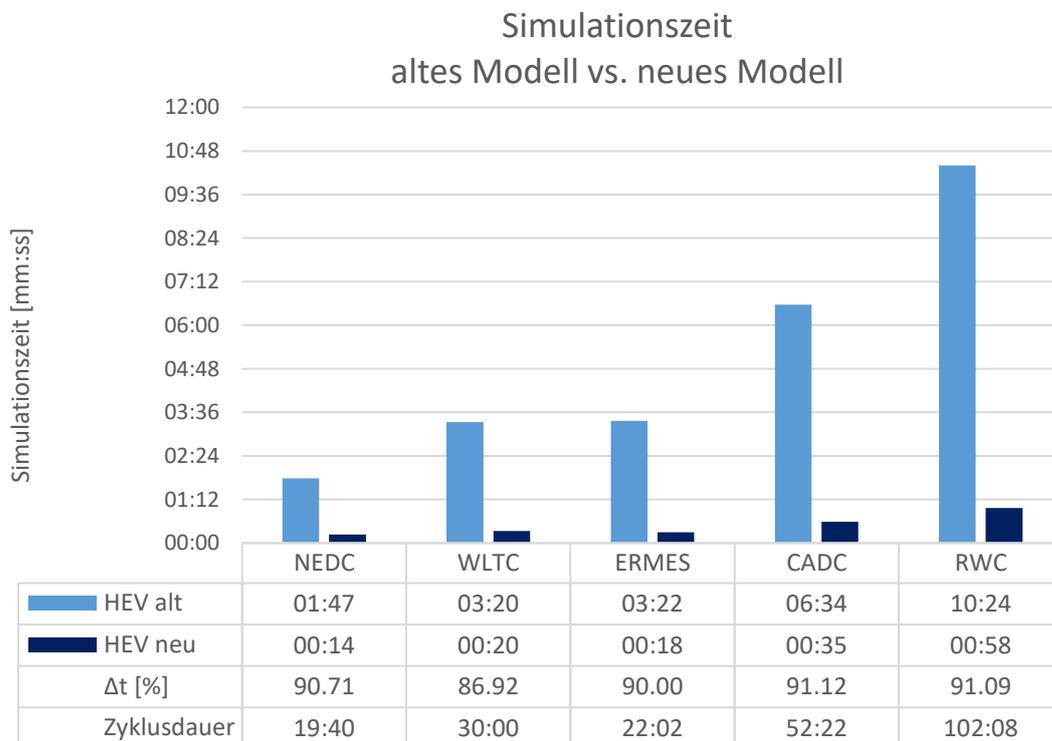


Abbildung 5-11: Vergleich der Simulationszeiten zwischen neuem und altem PKW-Modell

An dieser Stelle sei kurz angemerkt, dass die neue Strategie mit einer Berechnungsschrittweite von 10 [%] simuliert wurde. Eine Wahl von 20 [%] würde die Rechenzeit annähernd halbieren und damit den Zeitvorteil nochmals deutlich erhöhen.

## 5.2.2 Ergebnisse LKW-Modell

Zur Überprüfung der universellen Anwendbarkeit der Regelstrategie wurden neben PKW auch zwei LKW-Fahrzeuge simuliert. In der virtuellen Abbildung von LKW müssen dabei einige Faktoren zusätzlich beachtet bzw. im Modell berücksichtigt werden. Dazu wurden die Eingabedaten mit vorhandenen Referenz-Fahrzeugdaten aus anderen Modellen angepasst. Diese Unterschiede sollen jedoch an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden, da die Performance der Regelstrategie im Vordergrund steht und die Regelstrategie an sich im Vergleich zu den PKW-Modellen unverändert bleibt.

Tabelle 5-12 zeigt eine Übersicht über die Fahrzeugdaten der beiden LKW- Modelle.

Tabelle 5-12: Fahrzeugdaten der untersuchten LKW-Fahrzeuge

Hybrid LKW Klasse 4		Hybrid LKW Klasse 5	
Motordaten VKM		Motordaten VKM	
Kraftstoff	Diesel	Kraftstoff	Diesel
Nenndrehzahl [1/min]	2200	Nenndrehzahl [1/min]	1800
Leerlaufdrehzahl [1/min]	600	Leerlaufdrehzahl [1/min]	600
Nennleistung [kW]	220	Nennleistung [kW]	325
Motordaten Elektromotor		Motordaten Elektromotor	
Nenndrehzahl [1/min]	1435.71	Nenndrehzahl [1/min]	1435.71
Nennleistung [kW]	20 / 100 / 200	Nennleistung [kW]	20 / 100 / 200
Batteriedaten		Batteriedaten	
Batterietechnologie	Li-Ion	Batterietechnologie	Li-Ion
Batteriegröße [kWh]	3.0 / 10	Batteriegröße [kWh]	3.0 / 10
Batteriespannung [V]	700	Batteriespannung [V]	700
Innenwiderstand [ $\Omega$ ]	0.15	Innenwiderstand [ $\Omega$ ]	0.15
Kapazität [Ah]	4.24 / 14.13	Kapazität [Ah]	4.24 / 14.13
SOC-Bereich	0.3 - 0.7	SOC-Bereich	0.3 - 0.7
Fahrzeug		Fahrzeug	
Masse [kg]	7580	Masse [kg]	14450
Beladung [kg]	4400	Beladung [kg]	19300
Getriebe	11 Gang	Getriebe	12 Gang

Beide Fahrzeuge wurden mit drei unterschiedlichen EM-Leistungen sowie zwei Batteriegrößen untersucht, um eine möglichst umfassende Betrachtung zu ermöglichen.

Neben den Unterschieden im Modell werden LKW-Fahrzeuge natürlich anhand anderer Fahrzyklen bewertet als PKW-Fahrzeuge. Der Vollständigkeit halber sind nachfolgend die Fahrprofile der untersuchten Zyklen dargestellt.

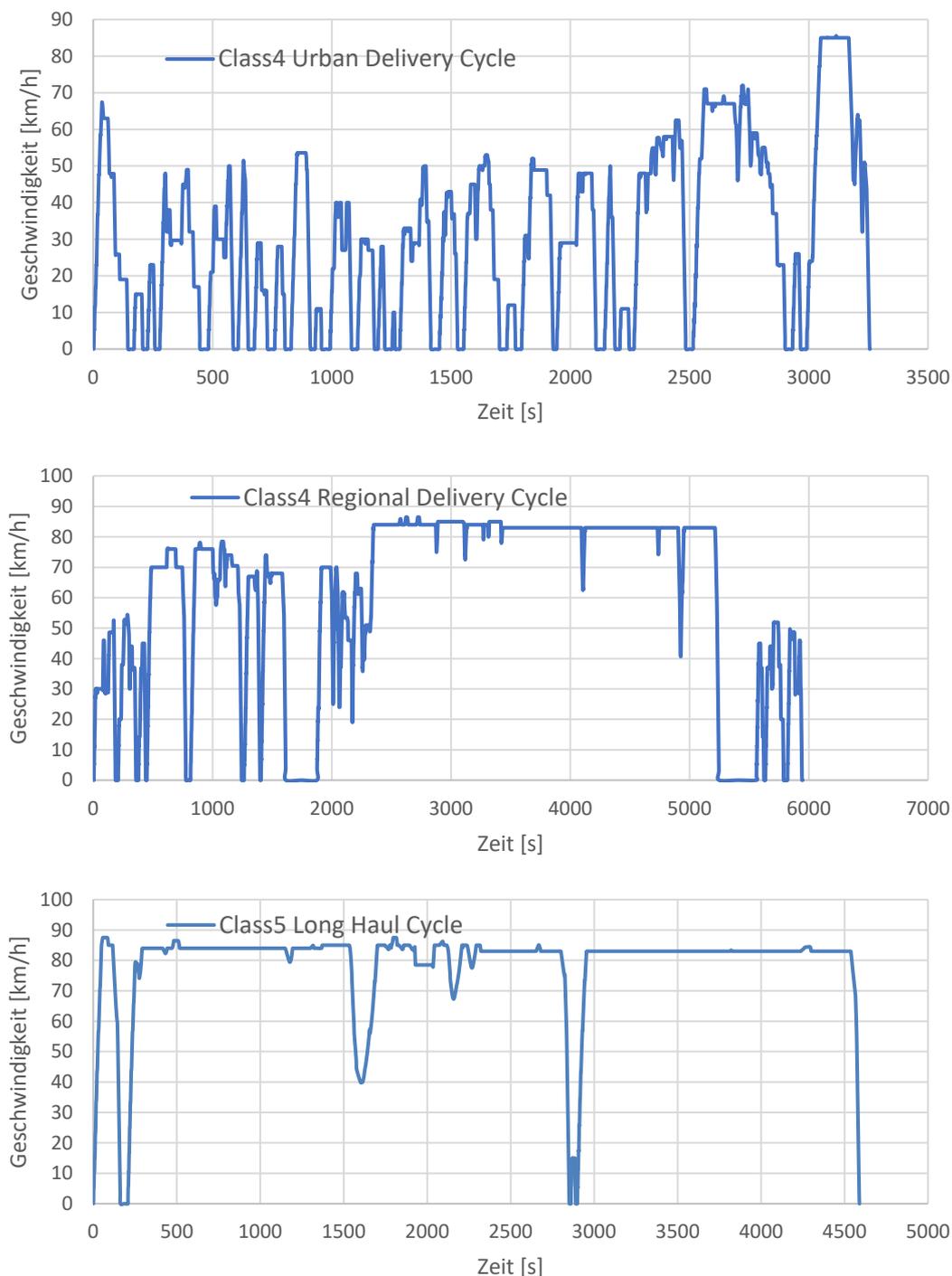


Abbildung 5-12: Geschwindigkeitsprofile der untersuchten LKW-Fahrzyklen

Hierbei werden die LKW-Fahrzeuge je nach Zweck ihres Einsatzes in unterschiedlichen Zyklen untersucht. Darüber hinaus wurde das Fahrprofil an die festgelegte Fahrzeugbeladung angepasst, da ein voll beladener LKW natürlich nicht dieselben Beschleunigungen und Verzögerungen wie ein leerer LKW absolvieren kann.

Nachstehende Tabelle zeigt einen Vergleich des Kraftstoffverbrauchs zwischen der neuen und alten Regelstrategie.

Tabelle 5-13: Vergleich der Regelstrategieperformance für LKW Anwendungen

	Zyklus	S <sub>äquiv</sub>	K <sub>Batt</sub>	Pe <sub>EM</sub>	FC <sub>SOC<sub>corr</sub></sub> [g/km]		ΔFC
		[-]	[Ah]	[kW]	HEV alt	HEV neu	[%]
LKW Klasse 4	Regional Delivery Cycle	≈ 2.5	3	200	170.68	145.27	-14.89
				100	166.70	146.47	-12.14
				20	155.36	153.14	-1.43
			10	200	170.15	143.94	-15.40
				100	163.29	145.05	-11.17
				20	155.36	153.04	-1.50
	Urban Delivery Cycle	≈ 2.5	3	200	141.72	124.11	-12.43
				100	140.77	130.02	-7.64
			10	20	167.78	159.07	-5.19
				200	138.89	123.29	-11.23
LKW Klasse 5	Long Haul Cycle	≈ 2.5	3	200	240.41	211.69	-11.95
				100	224.97	212.53	-5.53
				20	222.14	218.57	-1.61
			10	200	234.37	207.54	-11.45
				100	221.08	210.12	-4.96
			20	222.12	218.47	-1.64	

Der Äquivalenzfaktor in Spalte zwei bezieht sich nur auf die Ergebnisse der neuen Regelstrategie. Natürlich haben, wie bereits beim PKW, der untersuchte Zyklus sowie die Motor- und Batteriespezifikationen Einfluss auf den optimalen Äquivalenzfaktor. Allerdings führt ein Faktor von 2.5 allgemein zu sehr guten Ergebnissen der Regelstrategie und wurde daher fahrzeug- und zyklusübergreifend herangezogen.

Eine Betrachtung der Verbrauchsunterschiede (letzte Spalte) zeigt, dass das neue Modell den Kraftstoffverbrauch z.T. deutlich reduziert. Darüber hinaus liefert die neue Regelstrategie in Bezug auf die Kapazitäts- sowie Leistungsvariation plausible Ergebnisse. Demnach kann ein E-Motor mit höherer Leistung die VKM stärker unterstützen, was in einem geringeren Verbrauch resultiert. Eine hohe EM-Leistung (100, 200 [kW]) in Verbindung mit einer höheren Batteriekapazität führt zu einer weiteren Verbrauchsreduktion, da sich die Batterie nicht so schnell entlädt und damit das Leistungspotential der E-Maschine länger bzw. in mehreren Betriebspunkten ausgenutzt werden kann. Im Falle einer geringen EM-Leistung (20 [kW]) ist der Motor die limitierende Komponente, wodurch eine Kapazitätserhöhung zu kaum zusätzlichen Verbrauchseinsparungen führt.

Diese grundlegenden Plausibilitätsbetrachtungen gelten im Falle des Urban Delivery Cycle auch für das alte Modell. Betrachtet man jedoch die beiden anderen Zyklen erkennt man, dass anscheinend ein E-Motor mit geringerer Leistung zu einem geringeren Verbrauch führt. Um dieses nicht plausible Verhalten zu erklären, wurden die sekundlichen Ergebnisse näher untersucht. Hierbei hat sich gezeigt, dass das alte Modell in wenig dynamischen Zyklen, mit hohem Anteil an Konstantfahrt (Regional Delivery Cycle und Long Haul Cycle), bei höheren EM-Leistungen zum zyklischen Laden und Entladen der Batterie neigt. Dieses Verhalten ist aus verbrauchstechnischer Sicht ungünstig und führt zur dargestellten Verzerrung des Rankings.

Der größte Vorteil der neuen gegenüber der alten Regelstrategie wird in Abbildung 5-13 ersichtlich.

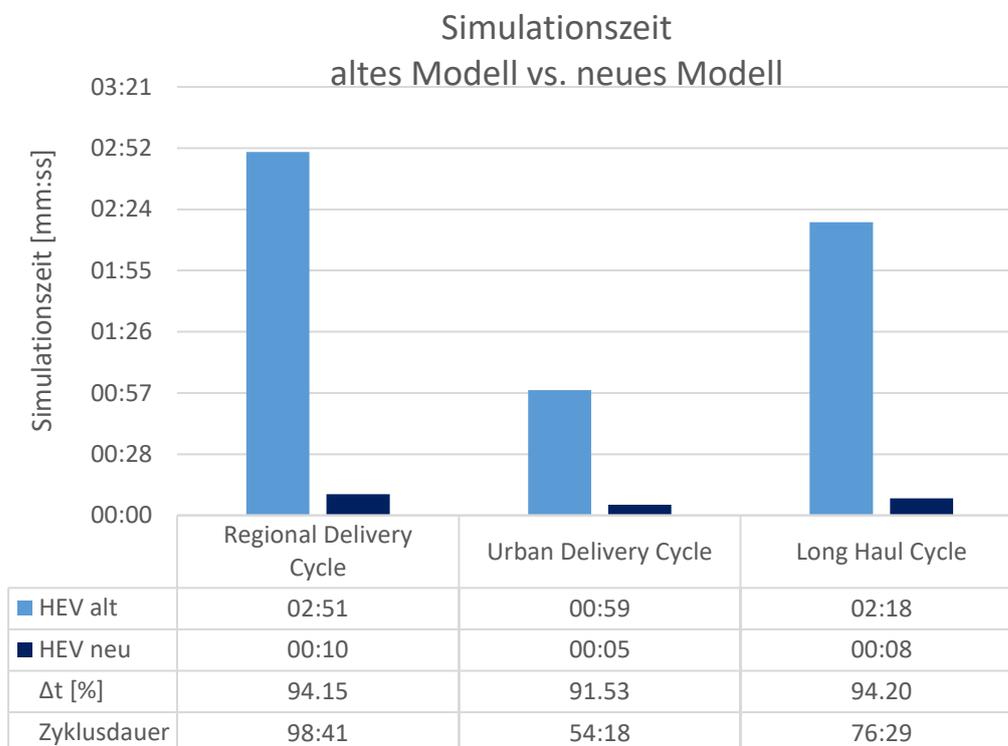


Abbildung 5-13: Vergleich der Simulationszeiten zwischen neuem und altem LKW-Modell

Wie bereits der Vergleich der Simulationszeiten bei PKW-Anwendungen gezeigt hat ist auch hier die Zeitreduktion durch die neue Regelstrategie beträchtlich. Im Schnitt kann die Simulationszeit bei einer gewählten Berechnungsschrittweite von 10 [%] um 93 [%] und damit signifikant reduziert werden. Diese Vorteile in der Rechenzeit, in Kombination mit den verbesserten Verbrauchsergebnissen, lassen somit auf eine sehr gute Performance der Regelstrategie auch für LKW-Anwendungen schließen.

## 6 Experimentelle Untersuchungen

Neben der rein virtuellen Evaluierung und Optimierung der Regelstrategie wurde auch ein reales PHEV sowohl im realen Straßenverkehr als auch am Rollenprüfstand vermessen. Die Erkenntnisse aus den Messdaten sollen weitere Aufschlüsse über potentielle Verbesserungsmöglichkeiten des Modells aufzeigen, um Fahrzeuge noch besser simulativ abbilden zu können.

### 6.1 Versuchsfahrzeug und Messprogramm

Bei dem untersuchten Fahrzeug handelt es sich um einen VW Passat GTE (PHEV), der nach der aktuell gültigen Abgasnorm (Euro 6d-TEMP) zertifiziert ist. Nachfolgende Tabelle fasst die wichtigsten Parameter des Fahrzeugs zusammen. Die angegebenen Werte wurden dabei direkt vom Fahrzeug (z.B. Reifenlabel), von Herstellerangaben bzw. dem Zulassungsschein entnommen. Jene Kenndaten, die nicht zur Verfügung standen (orange Werte), wurden von segmentähnlichen Fahrzeugen übernommen oder aus den Messdaten abgeleitet bzw. berechnet.

Tabelle 6-1: Fahrzeugdaten des Messfahrzeugs [11]

VW Passat GTE	
Motordaten VKM	
Motorart	4-Zylinder-Ottomotor
Hubraum [l]	1.395
Nenndrehzahl [1/min]	5000
Leerlaufdrehzahl [1/min]	706
Nennleistung [kW]	115
Motordaten Elektromotor	
Nenndrehzahl [1/min]	2865
Nennleistung [kW]	55
Batteriedaten	
Batterietechnologie	Li-Ion
Batteriegröße [kWh]	13
Batteriespannung [V]	350
Innenwiderstand [ $\Omega$ ]	0.12
Kapazität [Ah]	37.14
SOC-Bereich [-]	0.15 - 0.85
Fahrzeug	
DIN Leergewicht <sup>4</sup> [kg]	1685
Länge / Breite / Höhe [mm]	4889 / 1832 / 1516
Querschnittsfläche <sup>5</sup> [m <sup>2</sup> ]	2.36
c <sub>w</sub> Wert [-]	0.3
Bereifung	235 / 45 R18
Getriebe	6 Gang DSG

<sup>4</sup> Masse ohne Fahrer mit 90% der Flüssigkeiten

<sup>5</sup> Wurde aus den gegebenen Fahrzeugabmessungen des Herstellers berechnet

Im Falle der beiden Motoren mussten die Werte für die Leerlaufdrehzahl der VKM bzw. die Nenndrehzahl der EM aus Erfahrung bzw. Referenzwerten abgeschätzt werden. Ebenfalls gut erkennbar ist, dass bezüglich der Batterie nur die Batteriegröße (angegebener Wert wird als nutzbare Energie angenommen) zur Verfügung stand. Der Innenwiderstand bzw. der nutzbare SOC-Bereich wurden von segmentähnlichen Fahrzeugen übernommen. Die Batteriespannung wurde aus den gemessenen Spannungsverläufen bei den untersuchten Zyklen abgeleitet. Hierbei repräsentiert der angegebene Wert eine mittlere Spannung bei 50 [%] SOC. Die Kapazität wurde anschließend aus der mittleren Spannung und der bekannten Batteriegröße nach Gleichung (6-1) berechnet.

$$K_{Batt} = \frac{E_{Batt}}{U_{Batt}} \quad (6-1)$$

Auf weitere notwendige Parameter wie beispielsweise Kennfelddaten und Vollastgrenzen der Antriebsaggregate wird in Kapitel 6.4 näher eingegangen.

Nach vollständiger Definition aller notwendigen Parameter kann das Fahrzeug virtuell abgebildet und für das in Tabelle 6-2 zusammengefasste Messprogramm untersucht werden. Hierbei wurde versucht eine Vielzahl an unterschiedlichen Fahrsituationen abzubilden, um einen möglichst umfassenden Vergleich zwischen realem und virtuellem Fahrzeugverhalten zu gewährleisten.

Tabelle 6-2: Übersicht über das durchgeführte Messprogramm

Messprogramm			
Fahrzyklus	Startbedingung	Zyklen ID	Bemerkung
WLTC	cold	8254	Hybridmodus, Batterie voll geladen, Ladung halten
WLTC	hot	8255	Hybridmodus, Batterie voll geladen, Ladung nutzen
WLTC	hot	8256	Hybridmodus, Batterie 3/4 voll geladen, Ladung nutzen
WLTC	hot	8257	Hybridmodus, Batterie 1/2 voll geladen, Ladung nutzen
WLTC	hot	8258	Hybridmodus, Batterie 1/2 voll geladen, Ladung halten
ERMES_V9	hot	8259	Hybridmodus, Batterie 1/4 voll geladen, Ladung halten
IUFC + Stop & Go	cold	8260	Hybridmodus, Batterie 1/4 voll geladen, Ladung halten
ERMES_V9	hot	8261	Hybridmodus, Batterie voll geladen, Ladung nutzen
Stationärpunkte		8262	Batteriemodus zur EM-Kennfeldjustierung

RDE	Startbedingung	Bemerkung
1. RDE Fahrt	cold	Batteriemodus, Batterie voll geladen, Licht Auto+Radio+Klima 22°C Auto, Fahrmodus normal, rein elektrischer Betrieb bis Batterie leer
2. RDE Fahrt	intermediate	Hybridmodus, Batterie leer, Licht Auto+Radio+Klima 22°C Auto, Fahrmodus normal, Ladung halten
3. RDE Fahrt	cold	Hybridmodus, Batterie voll geladen, Licht Auto+Radio+Klima 22°C Auto, Fahrmodus eco, Ladung nutzen

Der große Vorteil bei der Vermessung eines PHEV im Vergleich zu einem konventionellen HEV liegt primär in der höheren Anzahl an möglichen Betriebsweisen, die untersucht werden können. Hierbei ist es möglich sowohl rein elektrische als auch hybride Fahrweisen in verschiedenen Betriebsmodi (Eco, Normal, etc.) zu untersuchen. An dieser Stelle sei kurz erwähnt, dass das Fahrzeug nicht ausschließlich zur Evaluierung der Regelstrategie angeschafft wurde, sondern für weitere Projekte verwendet wird. Entsprechend sind nicht alle absolvierten Zyklen, Startbedingungen etc. von gleichem Interesse für diese Arbeit.

Die Startbedingungen haben hauptsächlich Einfluss auf die Temperatur der Katalysatoren am Beginn der Zyklen und damit implizit auf die Konvertierungsraten der jeweiligen Schadstoffe. Da in dieser Arbeit ein allgemeiner Vergleich der Performance (Verbrauch) bei hybridem Betrieb im Vordergrund steht, ist der Kaltstarteinfluss auf Emissionen nicht/kaum von Interesse. Wesentlich bedeutsamer sind hingegen die untersuchten Fahrmodi, welche in der letzten Spalte zusammengefasst wurden. Hierbei sieht man, dass auf der Rolle mehrere dynamische Zyklen mit unterschiedlichen  $SOC_{\text{start}}$  sowie Zielbetrieb (Ladung halten bzw. Ladung nutzen) untersucht wurden. Dies erlaubt eine Aussage, wie gut die Regelstrategie das Verhalten eines realen PHEV in Abhängigkeit des SOC-Levels und der Betriebsart widerspiegelt. Um das Fahrzeug bestmöglich simulativ abbilden zu können, wurde mithilfe von zusätzlich durchgeführten Stationärpunktmessungen das generische EM-Kennfeld an das Fahrzeug angepasst. Genauere Informationen dazu werden in Kapitel 6.4.1 angeführt.

Im Falle der untersuchten RDE-Routen wurden ebenfalls verschiedene Fahrmodi bei unterschiedlichen Ladezuständen der Batterie untersucht. Von vorrangiger Bedeutung sind hierbei die zweite und dritte RDE-Fahrt, da diese im Hybridmodus durchgeführt wurden. Die erste RDE-Fahrt wurde zur Bestimmung der realen, rein elektrischen Reichweite sowie in dieser Arbeit zur Überprüfung der Güte der Kennfeldanpassung verwendet.

Der Vollständigkeit halber ist in Abbildung 6-1 das Fahrprofil des noch nicht behandelten IUFC-Fahrzyklus dargestellt. Dieser beschreibt eine Aneinanderreihung von sich wiederholenden Mikrozyklen und wird primär zur Bestimmung von Kaltstartemissionen herangezogen. Der angehängte Stauzyklus soll eine noch detailliertere Untersuchung dieser Kaltstartemissionen ermöglichen.

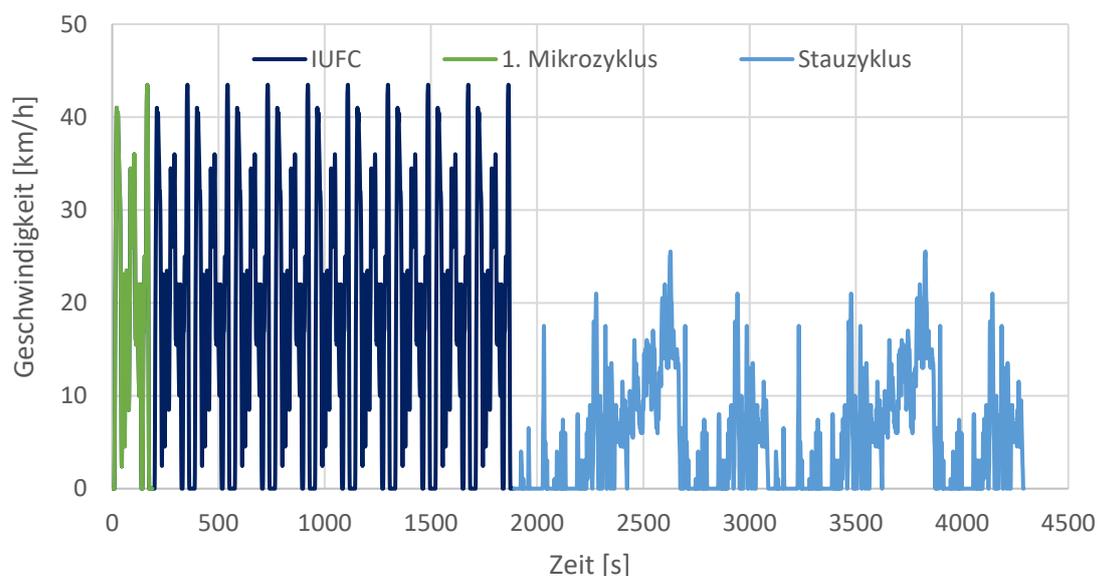


Abbildung 6-1: Geschwindigkeitsprofil des IUFC + Stop & Go Fahrzyklus

## 6.2 Messung am Rollenprüfstand

Abbildung 6-2 zeigt schematisch den am Institut zur Emissionsmessung verwendeten Rollenprüfstand inklusive CVS-Anlage. Die angetriebene Achse des Fahrzeugs befindet sich während der Messung zwischen zwei Rollen, wobei eine Rolle mit einer E – Maschine verbunden ist. Durch Antreiben bzw. Abbremsen der Rolle über die E-Maschine können die in der Realität auftretenden Verluste (Roll-, Luft- und Steigungswiderstände) am Rollenprüfstand dargestellt werden. Die Größe der von der Rolle aufzubringenden Widerstände wird typischerweise über Ausrollversuche ermittelt [8], [12].

Der Beschleunigungswiderstand wurde früher über Schwungmassen, die an die Welle der gebremsten Rolle gekuppelt sind, simuliert (heutzutage erfolgt die Abbildung des Beschleunigungswiderstandes über die E-Maschine). Weitere Widerstände (z.B. Leistungsbedarf der Nebenverbraucher sowie Getriebeverluste) werden durch das Fahrzeug selbst abgebildet und müssen somit nicht extern aufgebracht werden [8], [12].

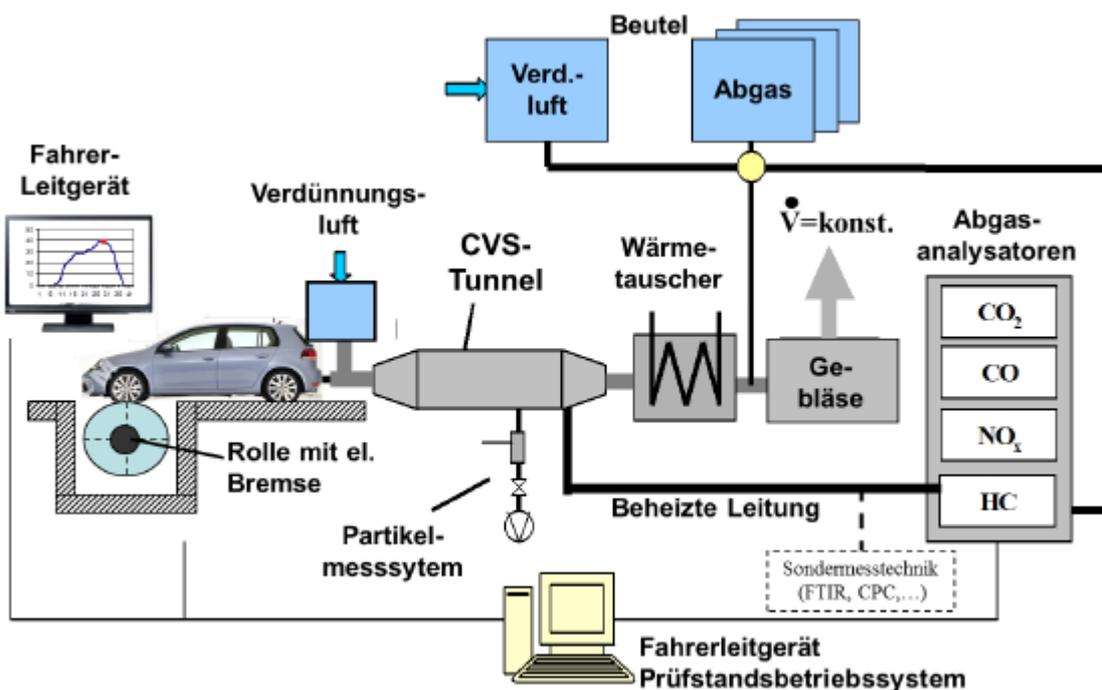


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des PKW-Rollenprüfstands [12]

Zur Bestimmung der einzelnen Emissionen (hier primär CO<sub>2</sub> zur Verbrauchsbestimmung) des Versuchsfahrzeugs wurde das sogenannte CVS-Verfahren verwendet. Hierbei wird das vom PKW emittierte Abgas mit Frischluft zu einem Strom mit konstantem Durchsatz verdünnt, wodurch Kondensation und chemische Reaktionen in der Abgasprobe verringert werden. Des Weiteren wird für eine konsistente Auswertung das verdünnte Abgas über entsprechende Regelmechanismen auf möglichst konstanter Temperatur gehalten [13].

Die Auswertung erfolgt anschließend sowohl in Sekundenschritten direkt aus dem Abgasstrom als auch aus Beuteln, in denen Abgasproben gesammelt werden. Aus den erhaltenen Messwerten werden mithilfe des bekannten Volumenstroms und der Dichte der Abgaskomponenten die Massenanteile der einzelnen Schadstoffe in [g/Test] bzw. [g/km] ermittelt [13]. Zur Bestimmung des elektrischen Verbrauchs wurden Strom und Spannung mittels OBD-Link direkt aus dem Fahrzeug ausgelesen und ebenfalls sekundlich aufgezeichnet.

### 6.3 Messung im realen Straßenverkehr

Neben den Messungen auf der Rolle wurden auch Messungen im realen Straßenverkehr mittels eines sogenannten PEMS (Portable Emission Measurement System) der Firma AVL durchgeführt. Die RDE Fahrten wurden dazu genutzt, um einerseits die rein elektrische Reichweite unter realen Verkehrsbedingungen zu untersuchen und andererseits, um den Einfluss verschiedener Fahrmodi auf den Verbrauch und die Emissionen zu evaluieren.

Abbildung 6-3 zeigt das Testfahrzeug inklusive appliziertem Messaufbau im Kofferraum. Alternativ kann bei Platzmangel bzw. vorhandener Anhängerkupplung das Messsystem auch außerhalb des Fahrzeugs angebracht werden.

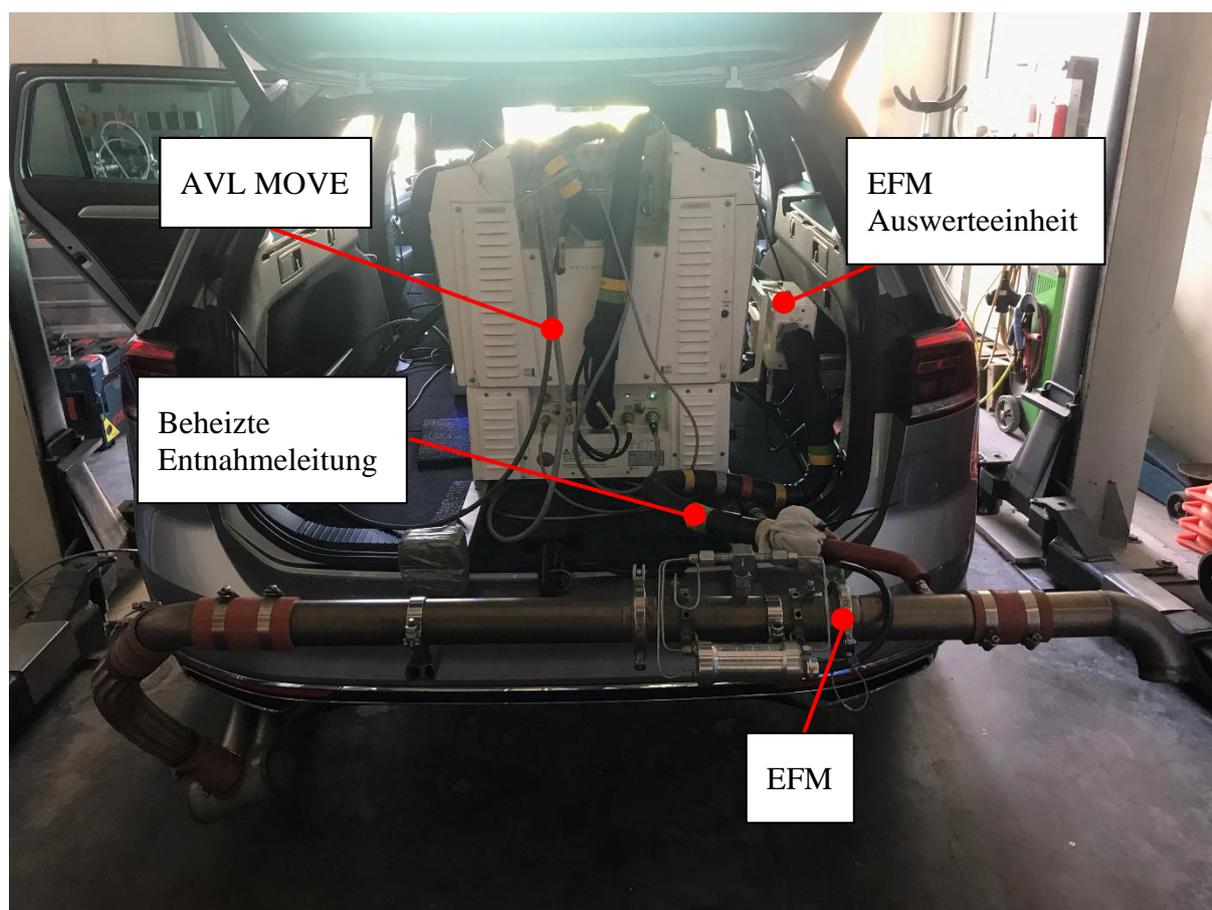


Abbildung 6-3: Testfahrzeug mit eingebautem PEMS

Das Hauptmessgerät (AVL M.O.V.E) ermöglicht, über mehrere verbaute Analysatoren, die Messung der gasförmigen Abgaskomponenten CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub> sowie der Partikelemissionen. Dabei werden die Abgaskomponenten als Konzentration in [ppm] gemessen. Über das EFM (Exhaust Flow Meter), sowie die beheizte Entnahmeleitung, wird zusätzlich der Abgasmassenstrom gemessen, wodurch sich die Abgaskomponenten in der Einheit Masse/Zeit (z.B. [g/s]) bestimmen lassen [12]. Aus dem gemessenen CO<sub>2</sub> sowie der elektrischen Größen, die wiederum mittels OBD-Link ausgelesen wurden, lassen sich der elektrische sowie verbrennungsmotorische Verbrauch bestimmen.

Das System wird während der Messung über externe Akkus mit Strom versorgt, um sicher zu gehen, dass die Messergebnisse nicht durch den sonst erhöhten elektrischen Verbrauch verfälscht werden.

## 6.4 Virtuelle Abbildung des Messfahrzeugs

Neben den in Tabelle 6-1 zusammengefassten Fahrzeugparametern müssen, für eine vollständige virtuelle Abbildung des Fahrzeugs, weitere Kenndaten hinterlegt werden. Eine allgemeine Übersicht, welche Kenndaten benötigt werden, wurde bereits in Kapitel 4.3 präsentiert. Deshalb wird hier nur eine kurze Übersicht über die gewählten Daten/Parameter zur spezifischen Abbildung des Messfahrzeugs gezeigt.

Die notwendigen Fahrzeugparameter (siehe Tabelle 4-3) können aus Tabelle 6-1 entnommen bzw. aus den angegebenen Werten berechnet werden und werden im „VEH-File“ hinterlegt. Die Motor- und Emissionskennfelder der VKM werden über ein generisches Kennfeld des entsprechenden Emissionsstandards (EURO 6d-TEMP) im „MEP-File“ abgebildet. Derselbe Ansatz wird für die Darstellung der Vollast- bzw. Schlepplkurve im „FLD-File“ verwendet. Die Fahrzyklen (Geschwindigkeit und Steigung) werden im „DRI-File“ hinterlegt und stammen direkt aus der Messung.

Um generische Kennfelder und Vollastkurven für verschiedene Fahrzeuge verwenden zu können, arbeitet PHEM mit normierten Werten für Leistung und Drehzahl. Diese Werte werden anschließend durch Umstellen der Gleichung (6-2) und Gleichung (6-3) entnormiert und somit an das jeweilige Fahrzeug angepasst.

$$n_{norm} = \frac{n - n_{idle}}{n_{rated} - n_{idle}} \quad (6-2)$$

$$P_{norm} = \frac{P}{P_{rated}} \quad (6-3)$$

Abbildung 6-4 zeigt die Benutzeroberfläche mit den soeben beschriebenen Files (rot markiert).

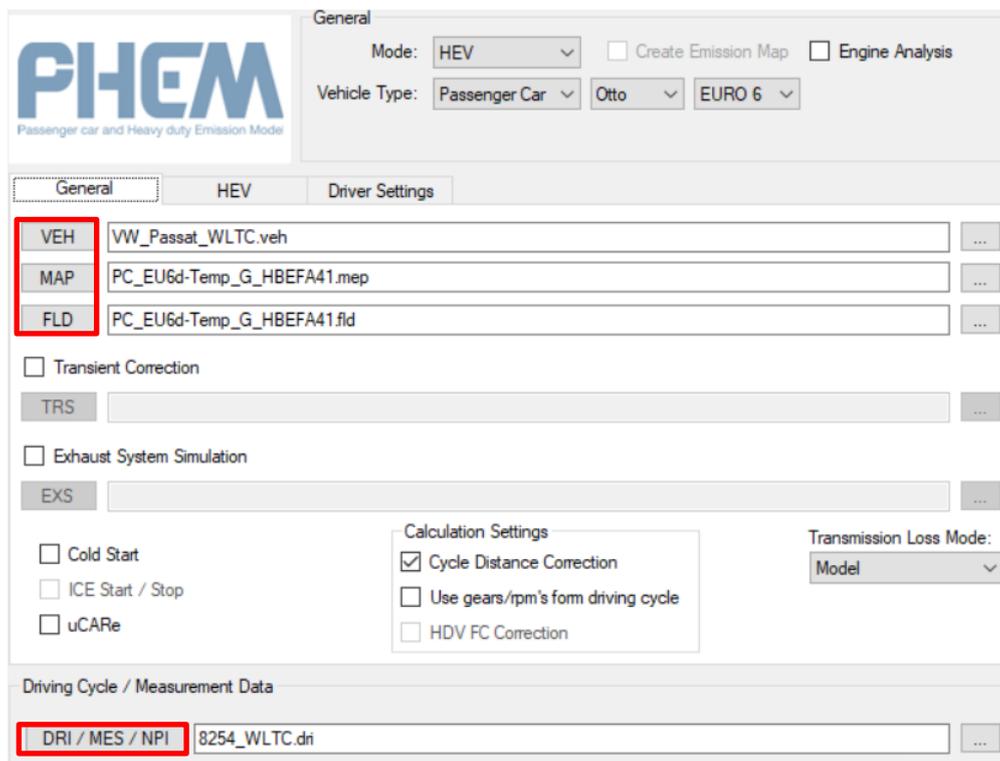


Abbildung 6-4: Benutzeroberfläche in PHEM

Abbildung 6-5 zeigt die weiteren Files zur vollständigen Charakterisierung der elektrischen Antriebsseite. Das „BAT-File“ beinhaltet alle Daten zur Charakterisierung der Batterie (SOC-Grenzen, Kapazität, Spannung = f(SOC) etc.) laut den Daten in Tabelle 6-1. Das „MEV-File“ charakterisiert das EM-Kennfeld, welches über die Stationärpunktmessungen justiert wurde. Das „FEV-File“ bildet die Vollastgrenzen der EM über generische Daten, wie bereits bei der VKM beschrieben, ab.

Von besonderer Bedeutung für die Regelstrategie ist das „STE-File“. Dieses beinhaltet alle SOC-Parameter (bis auf den SOC<sub>start</sub>) sowie den Äquivalenzfaktor und die mittleren Wirkungsgrade zur Berechnung des äquivalenten Gesamtenergiebedarfs.

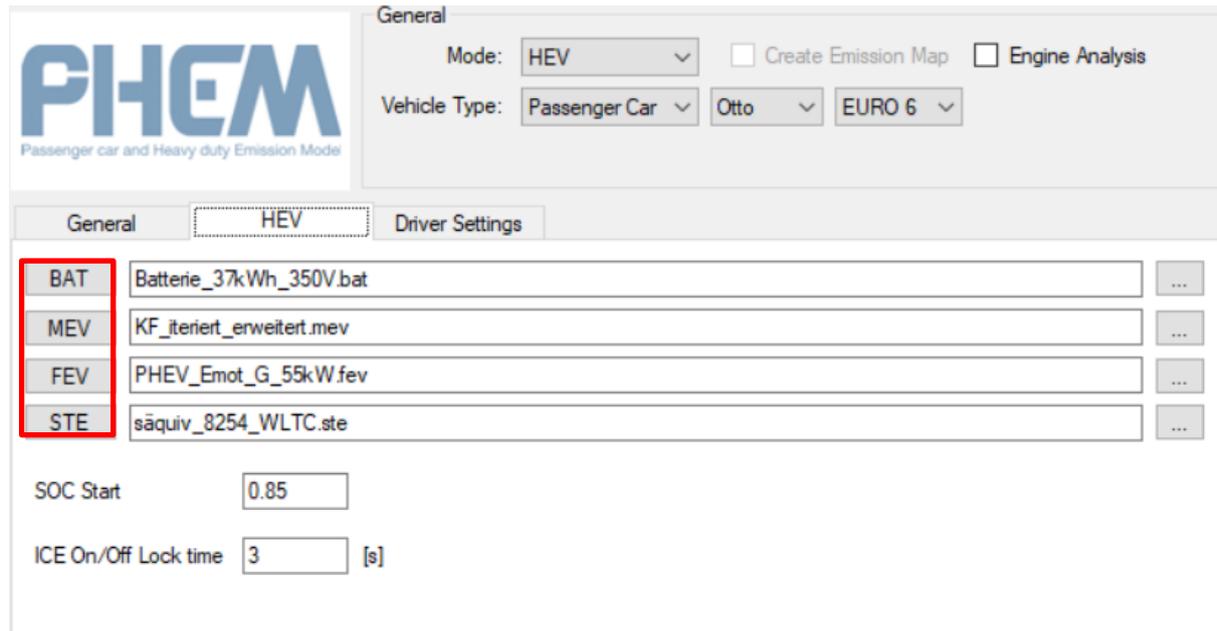


Abbildung 6-5: Benutzeroberfläche der elektrischen Antriebsseite in PHEM

#### 6.4.1 Kennfeldjustierung mittels Stationärpunktmessung

Wie bereits erwähnt wurden mehrere Stationärpunkte im rein elektrischen Betrieb am Rollenprüfstand gemessen. Hierzu wurde der Gang manuell eingelegt und die Geschwindigkeit für 1 – 2 [min] konstant gehalten, um zu garantieren, dass sich die Messgrößen auf ein konstantes Niveau eingependelt haben. Aus den erhaltenen Daten für Spannung und Strom kann die elektrische Leistung im jeweiligen Punkt berechnet werden. Anschließend muss nur noch der zum jeweiligen Messpunkt zugehörige Lastpunkt (Leistung und Drehzahl) im Kennfeld bestimmt werden, um einen Vergleich der elektrischen Leistung mit den Kennfelddaten zu ermöglichen. Die mechanische Leistung kann hierbei nach Gleichung (6-7) mithilfe der am Prüfstand eingestellten Fahrwiderstände bestimmt werden.

$$P_{ges} = R_0 * v + R_1 * v^2 + R_2 * v^3 \frac{1}{\eta_m} \quad (6-4)$$

$R_0 \dots R_2$

Rollwiderstandskoeffizienten

$\eta_m$

mittlerer Wirkungsgrad zur Berücksichtigung der Verluste in einer Zahnradstufe

Die Rollwiderstandskoeffizienten werden experimentell durch Ausrollversuche bestimmt und ergeben die Leistung, die von der Rolle aufgebracht werden muss, um den Fahrwiderstand, bestehend aus Luft- und Rollwiderstand, zu simulieren. Die weiteren Widerstände (Beschleunigungs- und Steigungswiderstand) müssen nicht berücksichtigt werden, da die eingestellte Steigung am Prüfstand und die Beschleunigung bei Konstantfahrt gleich 0 sind. Aufgrund der Methodik für den Ausroller (Getriebe in neutral) ergibt die von der Rolle simulierte Leistung die Leistung an der Getriebeausgangswelle. Der mit 0.98 angenommenen Wirkungsgrad berücksichtigt noch die Verluste einer Zahnradstufe (+ geringe Reibungsverluste), um die effektiv vom Motor aufgebrachte Leistung zu bestimmen.

Die Motordrehzahl in [U/min] kann aus der bekannten Geschwindigkeit, der bekannten Getriebeübersetzung im jeweiligen Gang sowie dem Reifenradius nach folgender Gleichung bestimmt werden.

$$n = \frac{v}{r_{rad}} * i_{Gang} * \frac{60}{2 * \pi} \quad (6-5)$$

Abbildung 6-6 zeigt eine Übersicht über die gemessenen Punkte sowie die zum exemplarischen Kennfeldvergleich herangezogenen Messpunkte. Die verwendeten Punkte wurden hierbei so gewählt, dass ein Vergleich über weite Bereiche des untersuchten Leistungs- und Drehzahlbereichs gewährleistet wird.

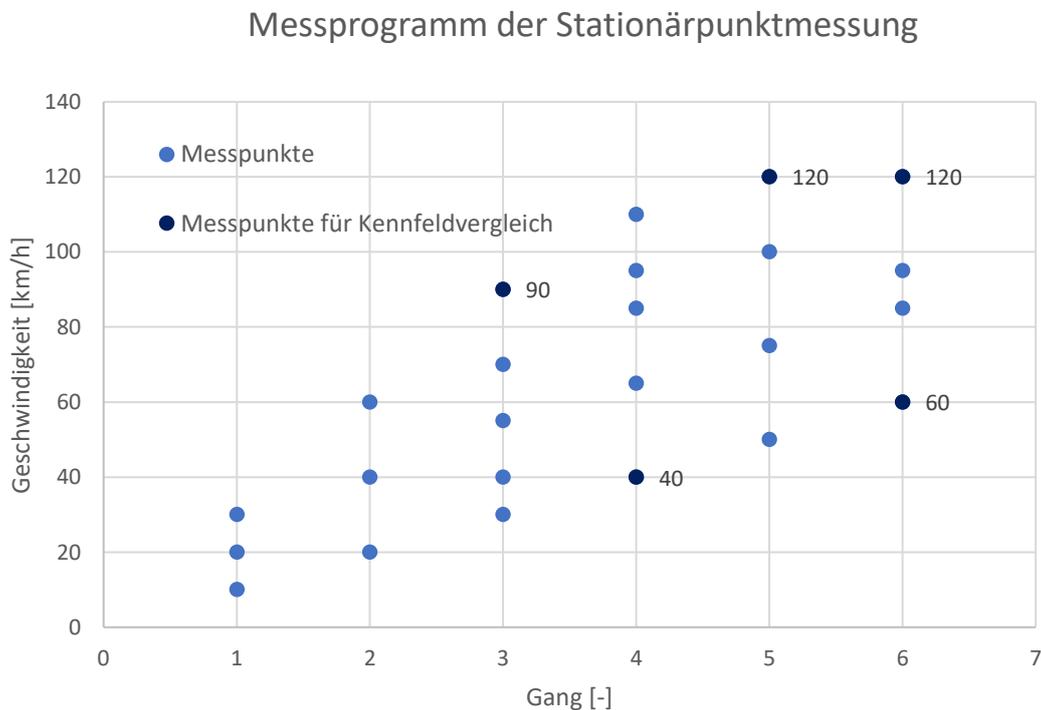


Abbildung 6-6: Übersicht über die durchgeführten Stationärpunktmessungen

Ein Vergleich zwischen Messung und Simulation anhand der ausgewählten Punkte ist in Tabelle 6-3 zusammengefasst.

Tabelle 6-3: Vergleich der elektrischen Leistung anhand ausgewählter Messpunkte

Stationärpunkt		eff. Leistung	Drehzahl	P <sub>el</sub> [kW]		ΔP <sub>el</sub> [%]
Gang	Geschw. [km/h]	[kW]	[U/min]	Messung	Kennfeld	
4	40	1.88	1156.25	3.465	3.158	-8.9%
6	60	4.12	1148.19	5.857	5.256	-10.3%
3	90	9.50	3753.28	11.832	10.562	-10.7%
6	120	18.35	2236.99	21.137	20.221	-4.3%
5	120	19.61	2795.92	23.660	21.392	-9.6%

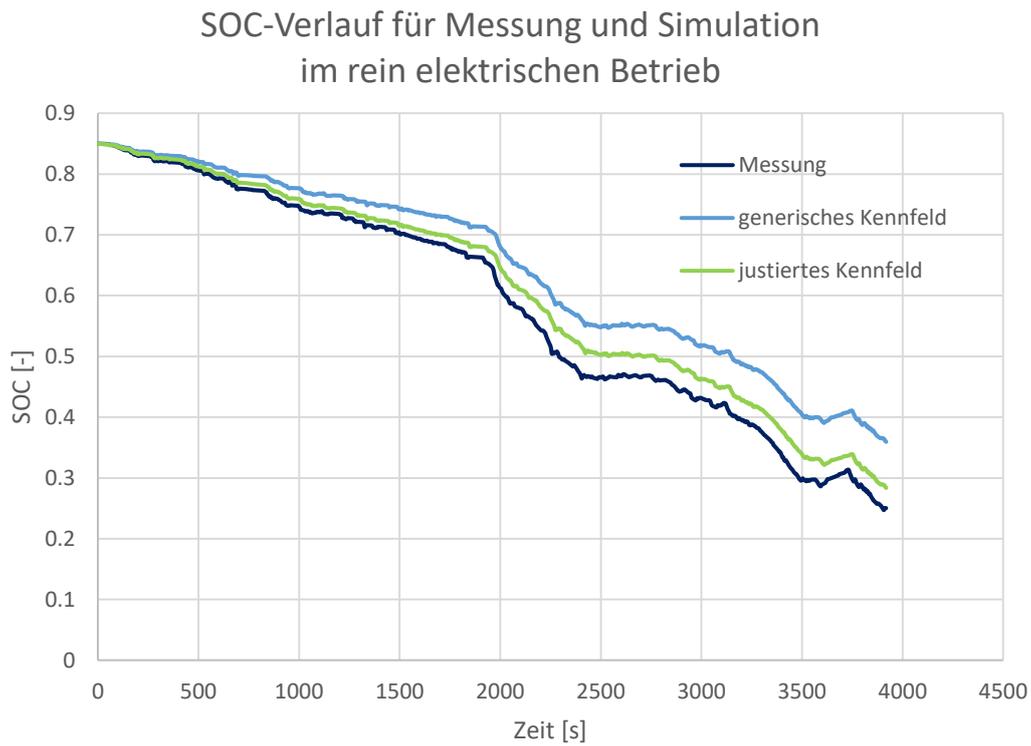
Die elektrische Leistung aus dem Kennfeld kann direkt im jeweiligen Betriebspunkt entnommen werden. Die elektrische Leistung des Messfahrzeugs kann im jeweiligen Betriebspunkt aus den Messdaten nach folgender Gleichung berechnet werden.

$$P_{elEM} = I_{Batt} * U_{Batt} \quad (6-6)$$

Anhand der Werte in obiger Tabelle erkennt man, dass das generische Kennfeld tendenziell einen zu geringen elektrischen Verbrauch gegenüber dem Messfahrzeug aufweist. Aus diesem Grund wurden die positiven Verbrauchswerte des Kennfeldes über einen konstanten Faktor (mittlere Abweichung zwischen Messung und Kennfeld) näher an das reale Fahrzeug angeglichen. Jene Stützstellen, in denen elektrische Energie rückgespeichert wird, wurden nicht verändert, da zu diesen Punkten keine Vergleichswerte aus der Messung vorhanden waren.

Als Vergleichszyklus, um die Güte der Kennfeldanpassung bestimmen zu können, wurde die Messfahrt Ries01 ausgewählt. Der Grund dafür liegt darin, dass diese Messfahrt rein elektrisch gestartet und erst nach vollständiger Entladung der Batterie auf VKM-Betrieb umgeschaltet wurde. Entsprechend kann der elektrische Verbrauch sowohl in der Simulation als auch in der Messung fast ausschließlich auf den rein elektrischen Betrieb zurückgeführt werden und erlaubt somit eine Beurteilung des justierten EM-Kennfeldes. Alle übrigen Zyklen wurden im Hybridmodus absolviert. Folglich ist der elektrische Verbrauch stark von der Leistungsaufteilung und damit der Betriebsweise abhängig. Nachdem der Simulation einige Annahmen zugrunde liegen und die Betriebsweise zwischen Modell und realem Fahrzeug nicht zu 100 [%] übereinstimmen, sind diese Zyklen weniger geeignet, um das justierte EM-Kennfeld zu evaluieren.

Abbildung 6-7 zeigt den SOC-Verlauf bei rein elektrischem Betrieb der Ries01-Route für die Messung und Simulation mit und ohne justiertem Kennfeld. Hierbei erkennt man, dass der elektrische Verbrauch, bei Verwendung des generischen Kennfeldes, um 11.4 [%] geringer ist. Das justierte Kennfeld hat hingegen einen um 3.5 [%] leicht höheren, aber deutlich näher an der Messung liegenden Verbrauch. Auffällig ist jedoch, dass dem SOC-Verlauf nach zu urteilen, der Verbrauch mit justiertem Kennfeld ebenfalls geringer sein sollte. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass der SOC der Messung aufgrund fehlender Informationen nur näherungsweise bestimmt werden konnte und somit nicht exakt der Realität entspricht (genauer hierzu wird im nächsten Kapitel erläutert). Darüber hinaus liegen den Simulationsinputs, aufgrund der bereits beschriebenen Annahmen, implizit enthaltene Ungenauigkeiten zugrunde, weshalb eine genauere Anpassung des Kennfeldes somit nicht sinnvoll ist.



	<b>Energiebedarf</b>	<b><math>\Delta E</math></b>
	<b>[kWh/km]</b>	<b>[%]</b>
Messung	0.180	
generisches Kennfeld	0.161	-11.4%
justiertes Kennfeld	0.186	3.5%

Abbildung 6-7: SOC-Verlauf für Messung und Simulation anhand der rein elektrischen Messfahrt Ries01

## 6.5 Ergebnisse der Messung und Simulation in PHEM

Natürlich wird die Regelstrategie nicht exakt gleiche Verbrauchsergebnisse wie das reale Fahrzeug liefern, da unter anderem die Regelung des Messfahrzeugs nicht exakt mit der Regelung des Modells übereinstimmt. Darüber hinaus ist die Kenntnis über den exakten SOC nicht bekannt, welcher jedoch erheblichen Einfluss auf die Leistungsaufteilung der entwickelten Regelstrategie hat. Um trotzdem einen möglichst fairen und aussagekräftigen Vergleich zu gewährleisten, wurden einige Annahmen getroffen, um den SOC des realen Fahrzeugs näherungsweise zu berechnen.

Wie bereits zu einem früheren Zeitpunkt erwähnt ist die Spannung primär vom SOC abhängig und wurde zusammen mit dem Strom gemessen. Außerdem weiß man, dass der erste Rollenzklus sowie die Ries 01-Route bei voll geladener Batterie gestartet wurden. Für die volle Batterie wurde ein SOC von 0.85 angenommen und über die elektrische Energiebilanz der rein elektrischen Fahrt (Ries 01) plausibilisiert. Somit kann unter Anwendung der folgenden Gleichung der Energieinhalt zu Beginn dieser Messfahrt berechnet werden.

$$E_{EM} = \left\{ \begin{array}{ll} I_{Batt} * U_{Batt} * \overline{\eta_{Batt}^-} & \text{für } I_{Batt} < 0 \\ \frac{I_{Batt} * U_{Batt}}{\overline{\eta_{Batt}^+}} & \text{für } I_{Batt} \geq 0 \end{array} \right\} \quad (6-7)$$

Die mittleren Batteriewirkungsgrade wurden mit einem Wert von 0.98 angenommen und dienen zur Bestimmung der tatsächlich entnommenen bzw. rückgespeicherten Energie.

Durch Anwendung von Gleichung (4-18) kann in weiterer Folge der SOC für jeden Zeitschritt des ersten Rollenzklus bestimmt werden. Aus diesen Informationen sowie der bekannten Spannung am Beginn jedes Zyklus, kann der SOC<sub>start</sub> für jeden Zyklus interpoliert und die weiteren SOC-Werte nach demselben Ansatz berechnet werden. Somit ist der SOC-Verlauf und damit die sekundliche Betriebsweise des Fahrzeugs für jeden Zyklus näherungsweise bekannt.

Im nächsten Schritt wurden die Parameter der Simulation so angepasst, dass annähernd derselbe SOC<sub>Ende</sub> wie in der Messung erreicht wird, wodurch ein aussagekräftiger Vergleich gewährleistet werden soll. Tabelle 6-4 zeigt eine Übersicht über die Verbrauchsunterschiede sowie die Unterschiede bezüglich des  $\Delta$ SOC, während Abbildung 6-8 die Verbrauchsergebnisse übersichtlich darstellt.

Tabelle 6-4: Vergleich des Kraftstoffverbrauchs zwischen Messung und Simulation

Zyklus	Zyklen ID	$\Delta$ soc [-]		$\Delta$ SOC [%]	FC [l/100km]		$\Delta$ FC [%]
		Messung	PHEM		Messung	PHEM	
WLTC	8254	-0.041	-0.043	-3.3%	5.19	4.09	-21.1%
WLTC	8255	-0.110	-0.110	0.2%	3.29	2.87	-12.8%
WLTC	8256	-0.098	-0.093	4.6%	3.26	3.18	-2.5%
WLTC	8257	-0.123	-0.121	1.5%	2.72	2.63	-3.5%
WLTC	8258	-0.042	-0.044	-3.7%	4.29	4.10	-4.4%
ERMES_V9	8259	-0.035	-0.037	-5.8%	5.46	5.21	-4.5%
IUFC + Stop & Go	8260	-0.045	-0.046	-1.5%	7.58	7.84	3.4%
ERMES_V9	8261	-0.090	-0.092	-2.3%	4.88	4.34	-11.2%
Ries01		-0.709	-0.700	1.3%	2.80	2.83	0.8%
Ries02		0.033	0.032	3.4%	6.59	5.92	-10.2%
Ries03		-0.427	-0.429	-0.5%	4.64	3.62	-21.9%

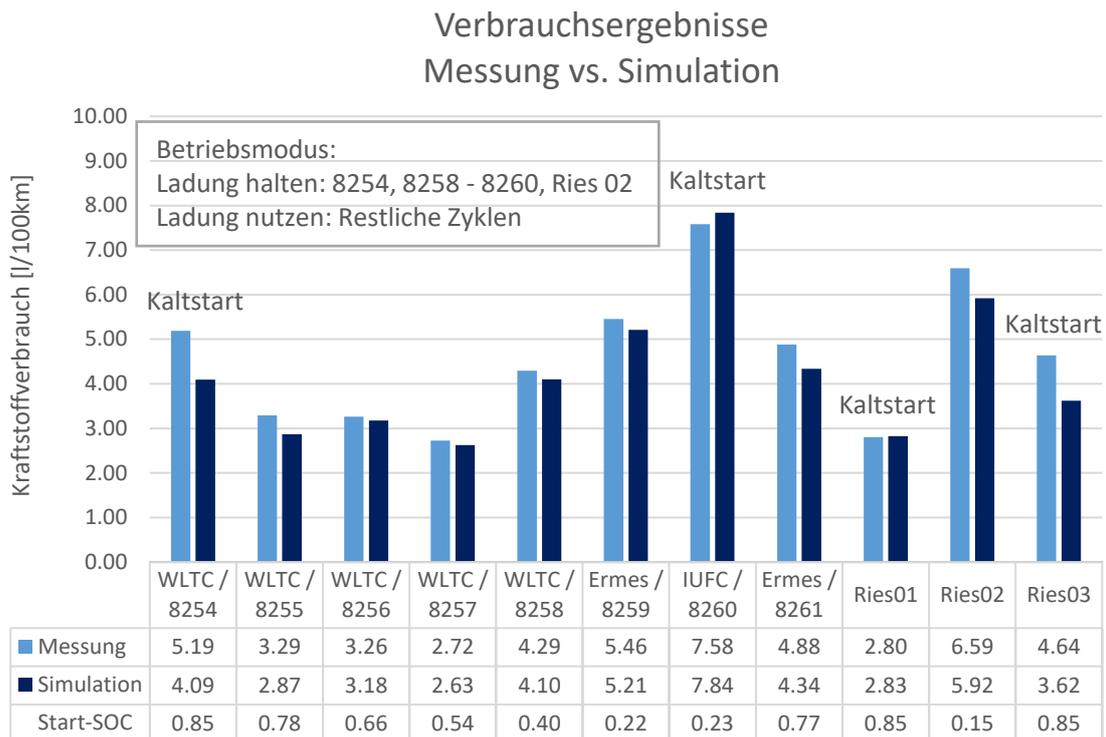


Abbildung 6-8: Vergleich der Verbrauchsergebnisse zwischen Messung und Simulation

Wie man der Tabelle 6-4 entnehmen kann, ist es sehr gut gelungen, die Regelstrategie auf einen bestimmten  $SOC_{\text{Ende}}$  hin anzupassen. Betrachtet man die Verbrauchsergebnisse in Abbildung 6-8, fallen mehrere Dinge auf.

Zum einen sieht man deutlich die Einsparungspotentiale je nach Betriebsweise des PHEV. So weisen beispielsweise die WLTC Zyklen 8255, 8256 und 8257, in denen die elektrische Energie genutzt wird, deutlich geringere Verbräuche als beispielsweise der WLTC 8254 auf. Ebenfalls einen erwartungsgemäß sehr geringen Verbrauch weist die Ries01-Route auf, welche bis zum Beginn des Autobahnteils rein elektrisch absolviert werden konnte. Jene Zyklen, die hingegen die Ladung halten oder bereits mit sehr geringem SOC gestartet wurden, weisen einen entsprechend höheren Verbrauch auf. Auffallend ist hierbei der sehr hohe Verbrauch des IUFC. Betrachtet man die Randbedingungen dieser Messung, werden die Gründe für den hohen Verbrauch schnell ersichtlich. Der IUFC wurde mit fast leerer Batterie gestartet. Entsprechend schnell wurde die elektrische Energie aufgebraucht und der Großteil des Zyklus musste in reinem VKM-Betrieb absolviert werden. Diese Tatsache, in Verbindung mit den schlechten Wirkungsgraden von Ottomotoren in der Teillast (Stauzyklus), erklärt somit die deutlich höheren Verbrauchswerte. Ein ähnlich hoher VKM-Anteil konnte auch aufgrund des sehr geringen  $SOC_{\text{start}}$  der Ries02-Route beobachtet werden. Der geringere Verbrauch der Ries02-Route kann dabei unter anderem auf die deutlich effizientere Auslastung der VKM zurückgeführt werden.

Zum anderen erkennt man unterschiedlich große Abweichungen im Verbrauch zwischen Messung und Simulation je nach Zyklus und somit der Betriebsart. Auffallend sind hierbei die verhältnismäßig großen Unterschiede im WLTC 8254 sowie in der Ries03-Route. Der Grund dafür liegt darin, dass zwar der SOC am Beginn und Ende gut übereinstimmt, allerdings die Betriebsweise während dieser Zyklen deutlich variiert.

Die Gründe für die Betriebsunterschiede sind wiederum mannigfaltig sowie auf vorhandene Ungenauigkeiten und Annahmen in den Simulationsinputs zurückzuführen. Zu den Unterschieden zählen (um nur einige zu nennen):

- Die bereits erwähnten Annahmen bezüglich nicht bekannter Parameter, wie z.B. Batteriekapazität und Nenn- Leerlaufdrehzahlen der Antriebsaggregate.
- Fehlende Information, nach welchen Kriterien das reale PHEV die Regelung vornimmt. Es wird jedoch angenommen, dass auch die Limitierung bestimmter Schadstoffe in der Regelung eine Rolle spielt, welche im Modell nicht berücksichtigt werden.
- Eventuell vom Messfahrzeug durchgeführtes Thermomanagement bzw. andere Betriebsweisen, um z.B. die VKM und das Abgasnachbehandlungssystem aufgrund des vorliegenden Kaltstarts aufzuheizen.
- Unterschiede zwischen dem verwendeten Gangschaltmodell und dem realen Schaltverhalten. Die gewählten Gänge des DSG konnten während der Messfahrten nicht aufgezeichnet und damit auch der Simulation nicht vorgegeben werden. Entsprechend stimmen die Lastpunkte in den einzelnen Zeitschritten nicht exakt überein.

Um die mit diesen Ungenauigkeiten einhergehenden möglichen Unterschiede näher zu beleuchten, soll eine genauere Untersuchung des WLTC 8254 dienen.

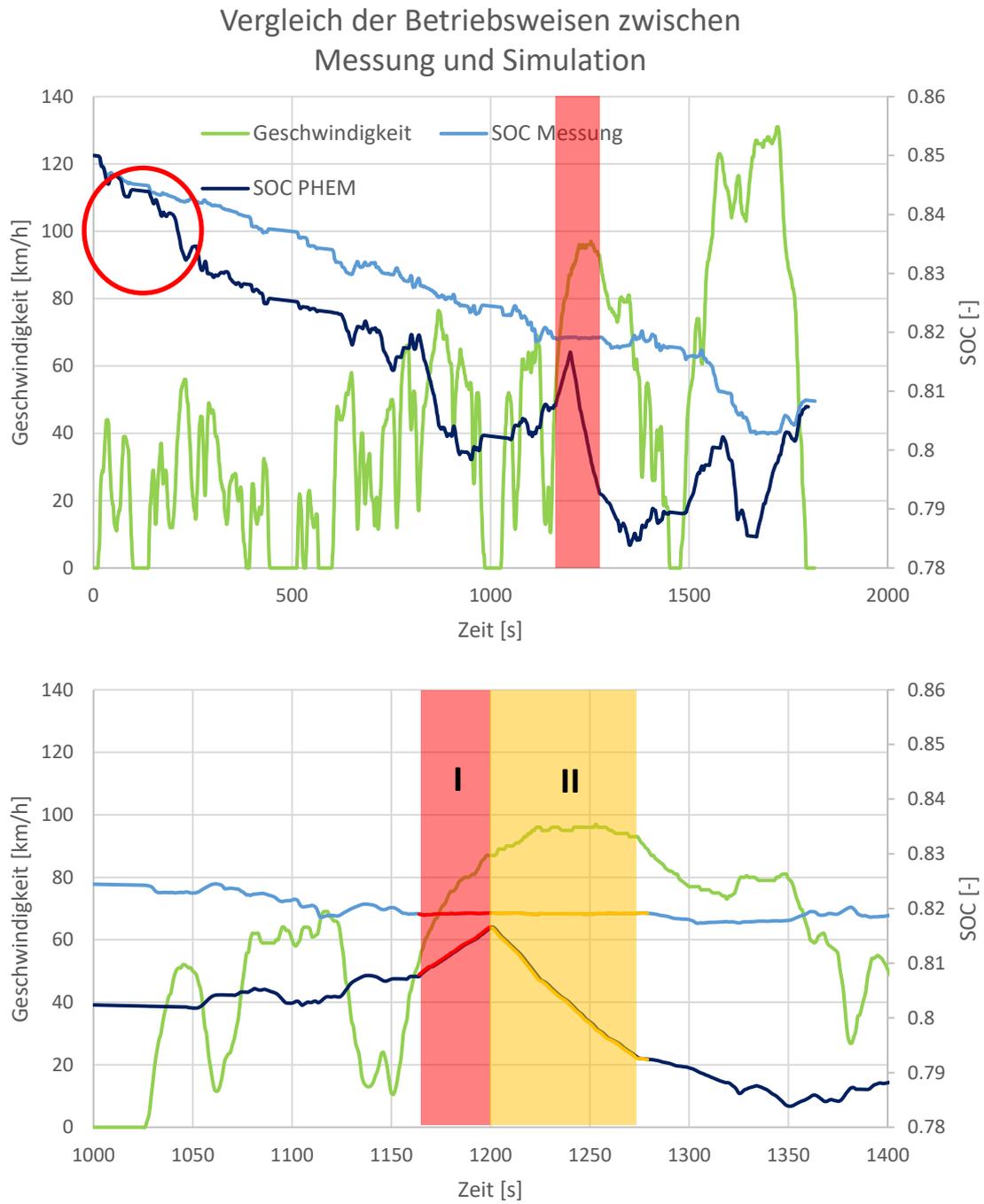
Die obere Grafik in Abbildung 6-9 zeigt den SOC-Verlauf zwischen Messung und Simulation des WLTC 8254. Hierbei erkennt man zu Beginn (rot umrahmter Bereich) einen stärkeren elektrischen Betrieb im Simulationsmodell. Dies ist auf den hohen SOC und damit energetisch günstigen elektrischen Betrieb zurückzuführen. Nach dem anfänglichen Absenken des SOC verhalten sich Modell und Fahrzeug sehr ähnlich, bis es im Modell zu einem wiederholten Anheben und Absenken des SOC kommt. Diese Unterschiede sollen beispielhaft an einer ausgewählten Stelle erläutert werden (siehe markierter Bereich bzw. untere Grafik).

Die angegebenen Werte in unten angeführter Tabelle beziehen sich auf die mittlere Leistungsaufteilung in [%] der benötigten gesamten Antriebsleistung in der jeweiligen Zeitspanne.

Im Bereich I wird im Versuchsfahrzeug von der VKM etwas mehr Leistung abgegeben als für den Vortrieb benötigt wird, wodurch der Leistungsbedarf der Nebenverbraucher kompensiert und damit der SOC annähernd konstant gehalten wird. Im Modell hingegen wird der SOC durch LPA stark angehoben, wobei der Mehrverbrauch an Kraftstoff energetisch durch die rückgespeicherte elektrische Energie aufgewogen wird.

Im Bereich II ändert sich die Betriebsweise im Messfahrzeug kaum. Es wird lediglich ein kleiner Teil der benötigten Antriebsleistung (ca. 20 [%]) von der EM abgedeckt. Das Modell wiederum fährt in diesem Bereich aufgrund des hohen SOC und der vorhandenen Leistungsreserven der EM zu 100 [%] elektrisch.

Der Grund für die gewählte Betriebsweise im Modell ist aus energetischer Sicht nachvollziehbar, was man auch am deutlich geringeren Kraftstoffverbrauch erkennen kann. Um die gewählte Betriebsweise des Messfahrzeugs zu begründen fehlen Informationen über die Regelstrategie. Einige mögliche Gründe für die Unterschiede zum Modell wurden bereits zuvor angeführt.



Bereich	Zeitspanne	$\overline{P_{EM}}$   $\overline{P_{VKM}}$	
	[s]	Messung [% $P_{ges}$ ]	PHEM [% $P_{ges}$ ]
I	1164 - 1200	-22.75   122.75	-89.08   189.08
II	1201 - 1279	19.15   80.85	100.00   00.00

Abbildung 6-9: Exemplarischer Vergleich zwischen Messung und Simulation anhand des WLTC 8254

Diese soeben beschriebenen Unterschiede können, müssen jedoch nicht auftreten, wie man anhand Abbildung 6-10 erkennen kann. Diese Abbildung zeigt exemplarisch den SOC-Verlauf für den WLTC 8256.

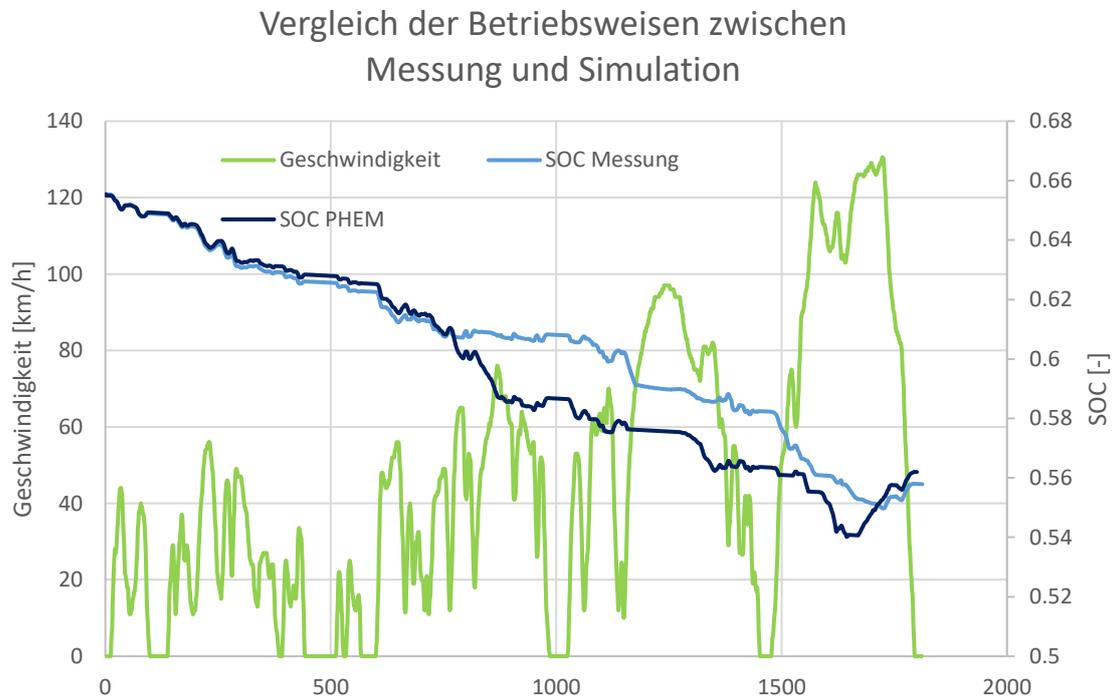


Abbildung 6-10: Exemplarischer Vergleich zwischen Messung und Simulation anhand des WLTC 8256

Hierbei erkennt man, dass die Betriebsweisen bis auf vereinzelte, kleine Unterschiede sehr gut übereinstimmen. Dies ist nicht nur für diesen Zyklus, sondern für den Großteil der übrigen Zyklen der Fall, was man an den sehr geringen Verbrauchsabweichungen zwischen Messung und Simulation erkennen kann.

Abschließend sollen die soeben getätigten Aussagen durch eine Betrachtung des elektrischen Verbrauchs plausibilisiert werden. Hierzu ist in Tabelle 6-5 die entnommene, rückgespeicherte und rekuperierte elektrische Energie exemplarisch für den gut übereinstimmenden WLTC 8256 und den weniger gut übereinstimmenden WLTC 8254 dargestellt.

Tabelle 6-5: Vergleich der elektrischen Energieanteile zwischen Messung und Simulation

Zyklus	E [kWh]		$\Delta E$ [kWh]	$E_{\text{rekup}}$ [% $E_{\text{neg}}$ ]	
	Messung	PHEM		Messung	PHEM
WLTC 8256	$E_{\text{pos}}$	2.09	2.38	0.28	
	$E_{\text{neg}}$	-0.74	-1.10	0.36	
	$E_{\text{rekup.}}$	-0.55	-0.88		75%      80%
WLTC 8254	$E_{\text{pos}}$	1.23	2.11	0.88	
	$E_{\text{neg}}$	-0.60	-1.54	0.94	
	$E_{\text{rekup.}}$	-0.38	-0.88		63%      57%

$E_{\text{pos}}$  steht hierbei für die gesamt über den Zyklus abgegebene elektrische Energie, während  $E_{\text{neg}}$  den rückgespeicherten Energieanteil repräsentiert.  $E_{\text{rekup.}}$  beschreibt den rein durch Rekuperation rückgespeicherten Energieanteil.

Bezüglich des WLTC 8256 bestätigt sich die annähernd idente Betriebsweise. Entsprechend stimmen die jeweils aufsummierten Energieanteile sehr gut überein. Einzig der Anteil an rekuperierter Energie unterscheidet sich stärker. Hierzu konnte jedoch der rekuperierte Anteil im Modell plausibilisiert werden, da der Anteil in beiden Zyklen (welche vom Fahrprofil identisch sind) gleich groß ist. In der letzten Spalte ist der prozentuale Anteil der rekuperierten Energie an der insgesamt rückgespeicherten Energie angegeben. Der rekuperierte Anteil im Modell ist dementsprechend für den WLTC 8254 deutlich geringer, da in diesem Zyklus der SOC stärker gehalten werden soll und damit in Summe mehr Energie (durch LPA) rückgespeichert wurde. Wieso sich die rekuperierten Anteile des Messfahrzeugs unterscheiden kann mehrere Gründe haben:

- Messungenauigkeiten: Darunter fallen leichte zeitliche Verzögerungen zwischen den Messsignalen sowie Messungenauigkeiten der Analysatoren. Hierbei kann es beispielsweise vorkommen, dass ein  $\text{CO}_2$ -Verbrauch ausgegeben wird obwohl in diesem Zeitschritt das Fahrzeug rein elektrisch betrieben wurde.
- Unterschiede in der VKM-Betriebsweise durch den Kaltstart beim WLTC 8254
- ...

Im Falle des WLTC 8254 wird im Modell deutlich mehr elektrische Energie verbraucht aber auch wieder rückgespeichert, um in Summe wieder auf den annähernd gleichen  $\text{SOC}_{\text{Ende}}$  zu kommen. Die größeren Unterschiede in den aufsummierten Anteilen bestätigen die größeren Unterschiede in der Betriebsweise und damit auch die größeren Verbrauchsunterschiede.

Diese Betrachtungen sollen allgemein verdeutlichen, dass es stark situationsabhängig ist, wie gut das Modell ein reales Betriebsverhalten abbildet. Von primärem Einfluss sind hierbei der SOC-Stand und damit auch der Einfluss der Korrekturfunktion ( $p(\text{SOC})$ ) auf die Betriebsweise des Modells sowie die grundlegende Art des Betriebes (Ladung halten, Ladung nutzen). Darüber hinaus liegen dem Modell einige Unsicherheiten und allgemeine Annahmen zugrunde bzw. ist der Regelstrategie nur eine rein energetische Betrachtungsweise hinterlegt. Eventuell im Messfahrzeug auftretende Betriebsunterschiede bei den kalt gestarteten Zyklen werden im Modell somit ebenfalls nicht abgebildet. Trotzdem konnte allgemein eine sehr gute Korrelation zwischen Modell und realer Betriebsweise festgestellt werden.

### 6.5.1 Korrigierter Kraftstoffverbrauch und elektrischer Verbrauch

Um den Vergleich noch fairer zu gestalten und den Einfluss der unterschiedlichen Betriebsweisen etwas zu entkräften, zeigen nachfolgende Auswertungen die SOC-korrigierten Verbräuche. Hierbei wurde die SOC-Korrektur für den Verbrauch der Messungen analog zu den bereits beschriebenen Gleichungen (5-1) & (5-2) durchgeführt. Die für die Berechnung notwendigen mittleren Wirkungsgrade sowie die Verbrauchsdifferenz je [kWh] wurden aus den Simulationsergebnissen der jeweiligen Zyklen übernommen. Zusätzlich zum Kraftstoffverbrauch wird die Untersuchung um einen Vergleich des über den jeweiligen Zyklus aufintegrierten elektrischen Verbrauchs erweitert.

Tabelle 6-6: Vergleich des korrigierter Kraftstoffverbrauchs und elektrischen Verbrauchs zwischen Messung und Simulation

Zyklus	Zyklen ID	FC <sub>SOCcorr.</sub> [l/100km]		ΔFC [%]	E [kWh/km]		ΔE [%]
		Messung	PHEM		Messung	PHEM	
WLTC	8254	5.93	4.93	-16.9%	0.025	0.026	3.3%
WLTC	8255	5.34	5.11	-4.3%	0.065	0.067	3.4%
WLTC	8256	5.10	4.98	-2.3%	0.056	0.057	1.6%
WLTC	8257	4.99	5.08	1.9%	0.069	0.074	7.4%
WLTC	8258	5.06	4.96	-1.8%	0.022	0.023	4.0%
ERMES_V9	8259	6.00	5.83	-2.8%	0.015	0.016	5.2%
IUFC + Stop & Go	8260	9.37	9.69	3.4%	0.041	0.044	7.8%
ERMES_V9	8261	6.28	5.91	-6.0%	0.045	0.048	5.9%
Ries01		6.64	6.95	4.6%	0.109	0.113	3.5%
Ries02		6.42	5.74	-10.5%	-0.006	-0.006	-5.4%
Ries03		6.86	5.95	-13.2%	0.068	0.070	2.3%

Vergleicht man die Verbrauchsergebnisse mit jenen aus Tabelle 6-4 sieht man, dass durch die SOC-Korrektur der Verbrauchsunterschied zwischen Messung und Simulation zyklusübergreifend verbessert wurde. Vor allem die Abweichungen des schlechter abgebildeten WLTC 8254 und der Ries03-Route konnten deutlich reduziert werden. Darüber hinaus erkennt man sowohl an den Ergebnissen in Tabelle 6-6 als auch in Abbildung 6-11 die bereits erwähnte Reduktion des Einflusses durch unterschiedliche Betriebsweisen.

Bezüglich des elektrischen Verbrauchs sei erwähnt, dass es sich bei den dargestellten Werten um die tatsächlichen und somit nicht korrigierten Verbräuche handelt. Hierbei erkennt man, dass neben den gut korrelierenden Kraftstoffverbräuchen auch der elektrische Verbrauch durch die Kennfeldjustierung sehr genau abgebildet werden konnte. Die kleinen Unterschiede zu den Messungen ergeben sich durch die Unterschiede in der Leistungsaufteilung sowie der näherungsweise Berechnung des SOC-Verlaufs der Messung. Durch andere Leistungsaufteilungen wird elektrische Energie bei unterschiedlichen Wirkungsgraden rückgespeichert und entnommen. Diese Unterschiede sind jedoch gering, da die E-Maschine über weite Kennfeldbereiche einen hohen Wirkungsgrad aufweist. Entsprechend ist der Einfluss auf den elektrischen Verbrauch auch bei den weniger gut übereinstimmenden Zyklen (WLTC 8254 und Ries03) gering.

Bezüglich der Absolutwerte der elektrischen Verbräuche ist es sinnvoll, nur gleiche Zyklen untereinander zu vergleichen, da sich die Werte auf die jeweiligen Zykluslängen beziehen und der Anteil an elektrischem Betrieb deutlich unterscheiden kann. Man erkennt hierbei die Vor-

bzw. Nachteile je nach Betriebsweise des Fahrzeugs. So haben z.B. der WLTC 8254 (Ladung halten) sowie WLTC 8258 (sehr geringer SOC<sub>start</sub>) deutlich geringere elektrische Verbräuche als die übrigen WLTC-Zyklen, in denen die elektrische Energie genutzt wird. Dieser geringe elektrische Verbrauch resultiert natürlich in höherem Kraftstoffverbrauch (vgl. Abbildung 6-8), Gleiches gilt für den Ermes 8259, der ebenfalls mit fast leerer Batterie gestartet wurde und somit kaum elektrische Energie nutzen kann. Der negative elektrische Verbrauch der Ries02-Route resultiert daraus, dass die zu Beginn leere Batterie durch Rekuperation und LPA leicht geladen wurde.

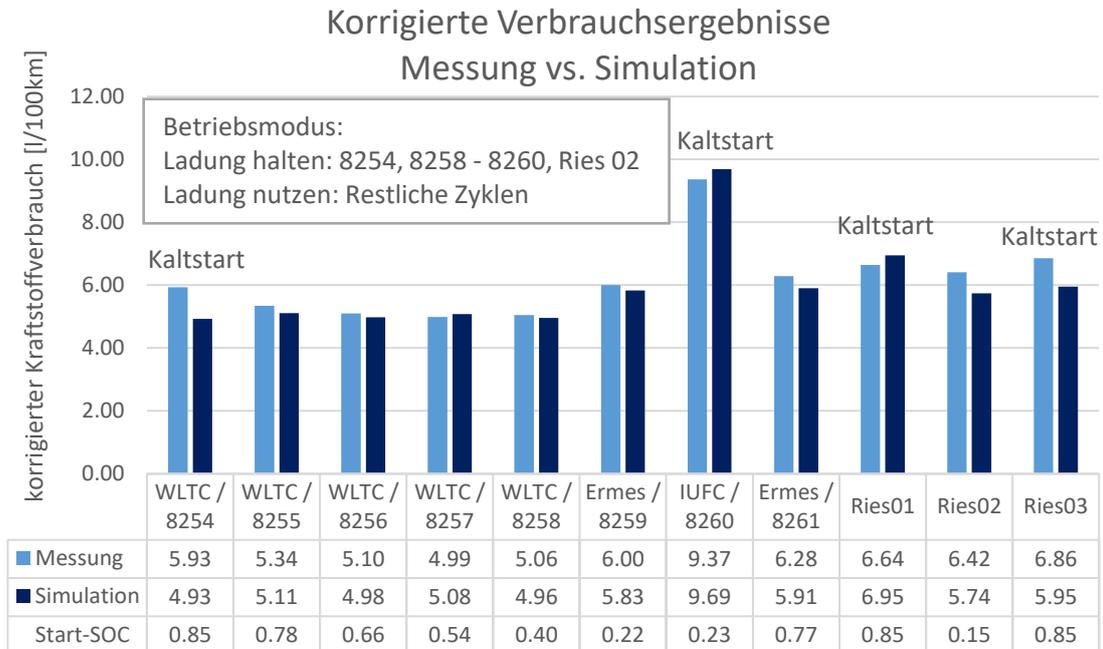


Abbildung 6-11: Vergleich der korrigierten Verbrauchsergebnisse zwischen Messung und Simulation

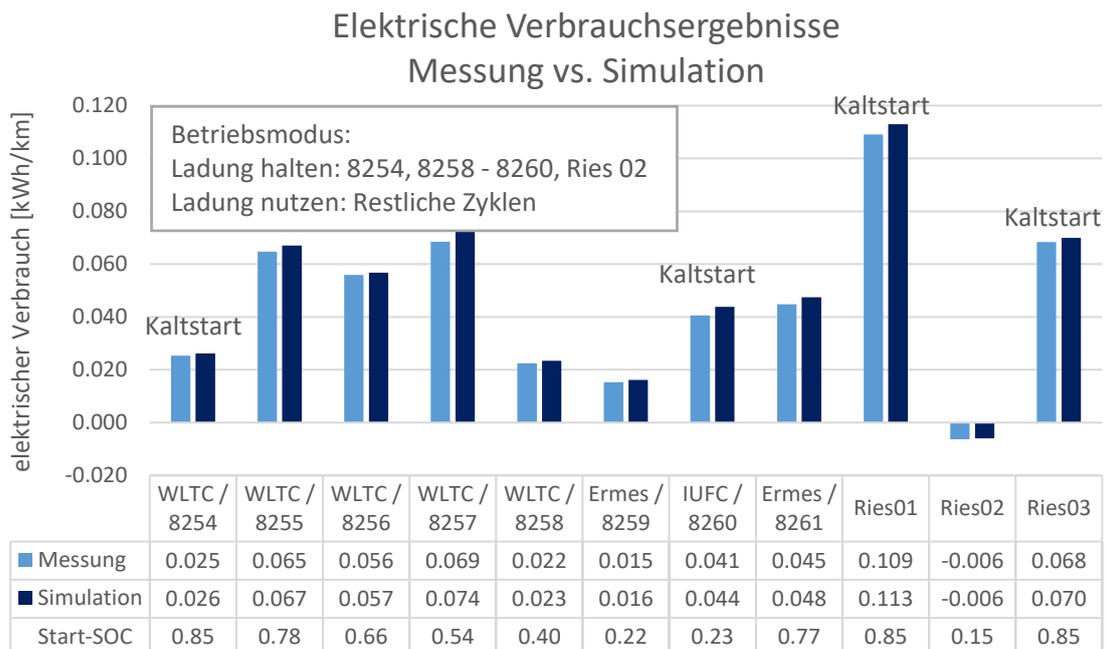


Abbildung 6-12: Vergleich des elektrischen Energieverbrauchs zwischen Messung und Simulation

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Sowohl der Vergleich der alten zur neuen Regelstrategie anhand mehrerer simulierter Zyklen und Fahrzeuge als auch der Vergleich zu einem real vermessenen PHEV bestätigen die gute Performance der entwickelten Regelstrategie. In dieser Arbeit wurde dabei versucht, die Strategie möglichst umfassend zu beleuchten und auf Empfindlichkeit gegenüber Parametervariationen zu überprüfen, um fundierte Aussagen über die Güte und wirtschaftlich sinnvolle Anwendbarkeit treffen zu können. Um dies zu gewährleisten wurde ein breites Spektrum an Fahrzyklen angefangen vom eher statischen NEDC bis hin zu realen Fahrstreckenprofilen an unterschiedlichen Fahrzeugsegmenten (PKW, LKW) untersucht. Hierbei sei angemerkt, dass der Fokus dieser Arbeit (auch aufgrund des Messfahrzeugs) stark hin zu hybridisierten PKW und weniger auf LKW-Anwendungen ausgerichtet war.

Die umfassenden Vergleiche mit der alten Regelstrategie zeigen, dass die primären Zielvorgaben erfüllt werden konnten. Zum einen ist es gelungen die Simulationszeit, mit Rechenzeiteinsparungen über 90 [%], deutlich zu reduzieren. Zum anderen spiegelt die neue Strategie ein realistisches Fahrverhalten mit guten Verbrauchswerten wider. Darüber hinaus war natürlich die einfache Anwendbarkeit des Modells von großem Interesse, um es zukünftig ohne langwierige Einschulungen des Personals verwenden zu können. Durch die durchgeführte Sensibilitätsanalyse konnten viele Parameter fixiert und damit die Zahl an variabel anzupassenden Faktoren reduziert werden, wodurch das Modell auch ohne umfassendes Hintergrundwissen angewendet werden kann.

Der Vergleich mit einem realen PHEV zeigt darüber hinaus die Realitätsnähe der entwickelten Strategie. In vielen Fahrsituationen stimmt die Betriebsweise des Modells, bei entsprechender Anpassung der Modellparameter, erstaunlich gut mit der des realen Fahrzeugs überein. Somit ist die Strategie in der Lage entsprechend aussagekräftige Verbrauchsergebnisse zu liefern. Unter gewissen Fahrsituationen hingegen nehmen die Unterschiede zwischen Modell und realem Fahrzeug zu, wobei die Ursache dafür kaum/schwer zu bestimmen ist, da keine Informationen zur Verfügung standen, nach welchen Kriterien das PHEV die Regelung vornimmt. Hierzu wird empfohlen weitere Fahrzeuge zu vermessen, um überprüfen zu können, ob diese Unterschiede nur bei diesem speziellen Fahrzeug oder generell unter bestimmten Fahrsituationen auftreten. Mit diesen Informationen könnte man das Modell anpassen, um ein reales Betriebsverhalten noch besser abbilden zu können.

Wie bereits erwähnt, lag der Fokus dieser Arbeit primär auf der Realisierung kurzer Rechenzeiten in Verbindung mit guten Verbrauchsergebnissen. Natürlich spielen in der Realität noch weitere Faktoren eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Betriebsweise hybridisierter Fahrzeuge. Hierzu wird empfohlen, die Regelstrategie in Zukunft auch hinsichtlich der limitierten Schadstoffemissionen ( $\text{NO}_x$ , CO etc.) zu untersuchen. Beispielsweise kann zwar eine längere rein elektrische Betriebsweise hinsichtlich eines geringen Verbrauchs günstig sein. Gleichzeitig kann jedoch diese Betriebsweise auch zu einer zu starken Abkühlung des Abgasnachbehandlungssystems und damit verbundenen schlechten Konvertierungsrate beim erneuten Betrieb der VKM führen. Ähnliche Überlegungen können generell in emissionstechnisch ungünstigen Betriebspunkten der VKM von Interesse sein. Solche Faktoren könnten ähnlich den SOC-abhängigen Parametern in der Kostenfunktion integriert und über eine Gewichtung an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden. Eine Berücksichtigung dieser und/oder weiterer Faktoren könnte somit zwar die Verbrauchperformance etwas verschlechtern, aber gleichzeitig eine weitere Annäherung der Regelstrategie an ein reales Betriebsverhalten und damit noch repräsentativere Ergebnisse bedeuten.

## Literaturverzeichnis

- [1] „VDA; Verband der Automobilindustrie,“ [Online]. Available: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nfz/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nutzfahrzeugen.html>. [Zugriff am 24 Juni 2020].
- [2] K. Reif, K. Noreikat und K. Borgeest, *Kraftfahrzeughybridantriebe: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*, Wiesbaden: Vieweg + Teubner-Verlag, 2012.
- [3] P. Hoffman, *Hybridfahrzeuge: Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*, Springer-Verlag, 2014.
- [4] „Umwelt Bundesamt,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/pkw-leichte-nutzfahrzeuge#die-europaische-co2-gesetzgebung>. [Zugriff am 24 Juni 2020].
- [5] „Amtsblatt der Europäischen Union; Verordnung (EU) 2019/1242 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO<sub>2</sub>-Emissionen für neue schwere Nutzfahrzeuge,“ 25 Juli 2019. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242>. [Zugriff am 10 Oktober 2020].
- [6] K. Reif, *Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe mit Brennstoffzellen und alternativen Kraftstoffen*, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2010.
- [7] S. Onori, L. Serrao und G. Rizzoni, *Hybrid Electric Vehicles Energy Management Strategies*, London: Springer-Verlag, 2016.
- [8] S. Hausberger, *Skript Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil 1*, Graz: Technische Universität Graz, 2015.
- [9] S. Winter, „Die Betriebsstrategien der K-net - Hybridfahrzeuge. Bericht für die wissenschaftliche Zwischenevaluierung des Kompetenzwerks K-net KFZ durch die Christian Doppler Forschungsgesellschaft,“ Wien, Technische Universität Wien, 2005.
- [10] M. Rexeis, S. Hausberger, S. Lipp und C. Matzer, *Anforderungen an die RDE Gesetzgebung für PKW und schwere Nutzfahrzeuge*, Graz: Technische Universität Graz, 2016.
- [11] „ADAC-Autotest VW Passat Variant GTE DSG. "adac.de",“ [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/passat/b8-facelift/304134/#technische-daten>. [Zugriff am 17 September 2020].
- [12] J. Blassnegger und S. Lipp, *Laborübung Motor und Umwelt, Kapitel: PKW Rollenprüfstand; PEMS, On Board Messtechnik*, Graz: Technische Universität Graz, 2018.
- [13] H. Eichelseder, *Skript Kolbenmaschinen*, Graz: Technische Universität Graz, 2014.
- [14] „Eurostat: Statistics Explained,“ [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Greenhouse\\_gas\\_emissions,\\_analysis\\_by\\_source\\_sector,\\_EU-27,\\_1990\\_and\\_2018\\_\(Percentage\\_of\\_total\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Greenhouse_gas_emissions,_analysis_by_source_sector,_EU-27,_1990_and_2018_(Percentage_of_total).png). [Zugriff am 24 Juni 2020].

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Vergleich der sektoriellen CO <sub>2</sub> -Emissionen in Europa zwischen 1990 und 2018 [14] .....	1
Abbildung 3-1: Controller-Architektur in HEV / PHEV [7].....	7
Abbildung 3-2: Übersicht der Betriebszustände eines Parallelhybrid [6].....	7
Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines Fahrzeugs zur Bestimmung der Reifenkräfte [8] .....	9
Abbildung 3-4: Prinzipschaubild einer LPA bei konstanter Drehzahl [9].....	10
Abbildung 3-5: Betriebsbereiche für Voll- und Plug-In HEV [9] .....	11
Abbildung 3-6: Prinzipschaubild für einen Boostvorgang bei konstanter Drehzahl [9].....	12
Abbildung 4-1: Energiepfade während entladen (a) und laden (b) in einem Parallelhybrid [7] .....	14
Abbildung 4-2: Geschwindigkeitsprofil des RWC-Fahrzyklus .....	15
Abbildung 4-3: Methodik der Regelstrategie .....	17
Abbildung 4-4: Methodik zur Bestimmung der zulässigen Leistungsaufteilungen.....	18
Abbildung 4-5: Veline-Linien der Referenzsimulation .....	22
Abbildung 4-6: Vergleich des Verbrauchs zwischen Interpolation und Veline-Ansatz .....	23
Abbildung 4-7: Korrekturfunktion zur Berücksichtigung des SOC [7].....	24
Abbildung 4-8: Methodik zur Berücksichtigung der VKM-Startenergie .....	27
Abbildung 4-9: Betriebsweise und Geschwindigkeitsprofil des Referenzfahrzeugs .....	29
Abbildung 4-10: Funktionsschema PHEM [8].....	32
Abbildung 4-11: Systemlayout des Parallel-HEV in PHEM .....	33
Abbildung 4-12: Schaltbild des Batteriemodells [8].....	35
Abbildung 4-13: Batteriespannung in Abhängigkeit des SOC .....	36
Abbildung 4-14: Normiertes Kennfeld der E-Maschine .....	38
Abbildung 4-15: Vergleich der Betriebsweisen zwischen Simulation und Excel .....	40
Abbildung 5-1: Einfluss der Berechnungsschrittweite auf die Betriebsweise .....	44
Abbildung 5-2: Geschwindigkeitsprofile der untersuchten PKW-Fahrzyklen .....	47
Abbildung 5-3: Verbrauchspunkte in Abhängigkeit der Leistung für ein Diesel HEV im RWC .....	48
Abbildung 5-4: Einfluss unterschiedlicher EM-Wirkungsgrade auf die Betriebsweise .....	52
Abbildung 5-5: Einfluss des Start-SOC auf die Betriebsweise.....	54
Abbildung 5-6: Einfluss unterschiedlicher Target- und Start-SOC auf die Betriebsweise.....	55
Abbildung 5-7: Einfluss des SOC-Exponenten auf die Betriebsweise .....	57
Abbildung 5-8: Einfluss der VKM-Sperrzeit auf die Betriebsweise.....	59
Abbildung 5-9: Einfluss der VKM-Startenergie auf die Betriebsweise.....	60

Abbildung 5-10: Vergleich der Verbrauchsergebnisse zwischen neuem und altem PKW-Modell .....	62
Abbildung 5-11: Vergleich der Simulationszeiten zwischen neuem und altem PKW- .....	62
Abbildung 5-12: Geschwindigkeitsprofile der untersuchten LKW-Fahrzyklen .....	64
Abbildung 5-13: Vergleich der Simulationszeiten zwischen neuem und altem LKW-Modell	66
Abbildung 6-1: Geschwindigkeitsprofil des IUFC + Stop & Go Fahrzyklus .....	69
Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des PKW-Rollenprüfstands [12] .....	70
Abbildung 6-3: Testfahrzeug mit eingebautem PEMS .....	71
Abbildung 6-4: Benutzeroberfläche in PHEM .....	72
Abbildung 6-5: Benutzeroberfläche der elektrischen Antriebsseite in PHEM .....	73
Abbildung 6-6: Übersicht über die durchgeführten Stationärpunktmessungen .....	74
Abbildung 6-7: SOC-Verlauf für Messung und Simulation anhand der rein elektrischen Messfahrt Ries01 .....	76
Abbildung 6-8: Vergleich der Verbrauchsergebnisse zwischen Messung und Simulation .....	78
Abbildung 6-9: Exemplarischer Vergleich zwischen Messung und Simulation anhand des WLTC 8254 .....	80
Abbildung 6-10: Exemplarischer Vergleich zwischen Messung und Simulation anhand des WLTC 8256 .....	81
Abbildung 6-11: Vergleich der korrigierten Verbrauchsergebnisse zwischen Messung und Simulation .....	84
Abbildung 6-12: Vergleich des elektrischen Energieverbrauchs zwischen Messung und Simulation .....	84

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Rahmenbedingungen der CO <sub>2</sub> -Gesetzgebung für PKW und leichte Nutzfahrzeuge ab dem Jahr 2021 bzw. 2020 [1], [4].....	4
Tabelle 4-1: Fahrzeugdaten des Ø Diesel-Hybrid PKW .....	16
Tabelle 4-2: Eingestellte Parameter für Ø Diesel-HEV .....	29
Tabelle 4-3: Fahrzeugspezifische Kenndaten zur Simulation in PHEM.....	33
Tabelle 4-4: Berechnungsunterschiede zwischen Excel und PHEM .....	37
Tabelle 4-5: Vergleich der Energiebverbräuche zwischen Simulation und Excel anhand einiger Referenzpunkte.....	39
Tabelle 5-1: Allgemeine Parameter zur Simulation von HEV / PHEV .....	41
Tabelle 5-2: Einfluss der Berechnungsschrittweite auf Kraftstoffverbrauch und Simulationszeit .....	43
Tabelle 5-3: Fahrzeugdaten eines Ø Benzin-HEV .....	45
Tabelle 5-4: Wertebereich des Äquivalenzfaktors in Abhängigkeit von Fahrzeug und Zyklus .....	49
Tabelle 5-5: Mittlere Wirkungsgrade der elektrischen Antriebsseite .....	50
Tabelle 5-6: Einfluss des mittleren EM-Wirkungsgrades auf den Kraftstoffverbrauch .....	51
Tabelle 5-7: Einfluss des Start-SOC auf den Kraftstoffverbrauch.....	53
Tabelle 5-8: Einfluss unterschiedlicher Target- und Start-SOC auf den Kraftstoffverbrauch. ....	55
Tabelle 5-9: Einfluss des SOC-Exponenten auf den Kraftstoffverbrauch .....	56
Tabelle 5-10: Einfluss der VKM-Sperrzeit anhand des RWC .....	58
Tabelle 5-11: Einfluss der VKM-Startenergie auf den Kraftstoffverbrauch.....	61
Tabelle 5-12: Fahrzeugdaten der untersuchten LKW-Fahrzeuge .....	63
Tabelle 5-13: Vergleich der Regelstrategieperformance für LKW Anwendungen .....	65
Tabelle 6-1: Fahrzeugdaten des Messfahrzeugs [11] .....	67
Tabelle 6-2: Übersicht über das durchgeführte Messprogramm .....	68
Tabelle 6-3: Vergleich der elektrischen Leistung anhand ausgewählter Messpunkte .....	75
Tabelle 6-4: Vergleich des Kraftstoffverbrauchs zwischen Messung und Simulation .....	77
Tabelle 6-5: Vergleich der elektrischen Energieanteile zwischen Messung und Simulation ..	81
Tabelle 6-6: Vergleich des korrigierter Kraftstoffverbrauchs und elektrischen Verbrauchs zwischen Messung und Simulation .....	83