

Diplomarbeit

# **SIMULATION UND MESSUNG EINES HYBRID-PKWS IN BEZUG AUF ÖKONOMISCHEN FAHRSTIL**

**Autor:**

**Stephan Smode**

**Eingereicht am Institut für Verbrennungskraftmaschinen  
und Thermodynamik der Technischen Universität Graz**

**Vorstand:**

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Helmut Eichlseder**

**Betreuer:**

**Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Stefan Hausberger**

**Dipl.-Ing. Antonius Kies**

**Graz, 15.10.2013**



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



## Vorwort

Als erstes möchte ich mich bei Herrn Prof. Helmut Eichlseder dafür bedanken, dass ich meine Diplomarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik verfassen konnte. Durch sein kompetentes und leidenschaftliches Vortragen hat es Prof. Eichlseder stets geschafft, die Begeisterung für das Thema Motoren- und Fahrzeugtechnik bei mir noch weiter zu steigern.

Ein großer Dank gebührt Herrn Prof. Stefan Hausberger, dem Leiter des Fachbereiches für Emissionen, für die Möglichkeiten die er mir eröffnet hat. Durch sein ehrliches, freundliches, unkompliziertes Wesen und durch seine große fachliche Kompetenz hat er mich ständig dazu motiviert mein Bestes zu geben. Danke für die großartige Unterstützung!

Ebenso gebührt Herrn Dipl.-Ing. Anton Kies und Herrn Dipl.-Ing. Raphael Luz ein großer Dank. Vor allem haben sie jede Frage, die ich an sie gerichtet habe, umgehend beantwortet und damit einen wichtigen Beitrag zur unterbrechungsfreien Erstellung dieser Arbeit geleistet. Danke für die Unterstützung und die Zeit die ihr euch genommen habt!

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Gerald Nöhner und den Testfahrern (Anton, Barbara, David und Jakob) für die große Hilfe beim praktischen Teil dieser Arbeit bedanken.

Nicht zuletzt danke ich allen Mitarbeitern des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik für das angenehme Arbeitsklima. Ich habe mich vom ersten Tag an bei euch wohl gefühlt!

Auf jeden Fall bin ich meiner Familie zu großem Dank verpflichtet, besonders meinem Vater und meinen Großeltern. Danke für die Unterstützung, den Rückhalt und so vieles mehr!

Meiner langjährigen Freundin möchte ich ebenfalls meinen Dank ausdrücken. Danke für die immerwährende Unterstützung und die unzähligen liebevollen sowie fröhlichen Momente mit dir!

Ebenso danke ich meinen Freunden und Studienkollegen, jedoch vor allem einer bestimmten Person. Auch wenn uns die Wege manchmal trennen bleiben wir immer in Verbindung. Danke!

Abschließend möchte ich diese Arbeit dir, Paul (†), widmen...

Du bist in Gedanken immer bei mir...

Danke, dass ich so viel von dir lernen durfte!

*„Das Schicksal macht keine Fehler!“  
(Bernd Fritsch)*

---

**INHALT**

<b>VORWORT</b> .....	<b>2</b>
<b>ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>4</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....	<b>9</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>10</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>11</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>12</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>13</b>
2.1 HYBRID PWK.....	13
2.1.1 Varianten von Hybrid-Fahrzeugen .....	14
2.1.2 Komponenten von Hybrid-Fahrzeugen .....	16
2.2 PHEM.....	20
2.2.1 PHEM Grundversion.....	20
2.2.2 HEV-PHEM Erweiterung.....	22
2.3 GESETZLICHE VORSCHRIFTEN ZU VERBRAUCHS- UND CO <sub>2</sub> -EMISSIONSERMITTLUNG FÜR HYBRID-ELEKTRO-FAHRZEUGE .....	35
2.3.1 Messung von Hybrid-Elektro-Fahrzeugen, laut UN/ECE Nr. 101 .....	36
2.3.2 Prüfung von Hybridfahrzeugen.....	37
<b>3 SIMULATION DER ECO-DRIVE ANFORDERUNGEN FÜR HEV-PKW</b> .....	<b>41</b>
3.1 FAHRZYKLEN .....	41
3.1.1 Auswahl der Fahrzyklen.....	41
3.1.2 Fahrzyklen Anpassung .....	45
3.2 FAHRZEUGSIMULATION MIT ANGEPASSTEN FAHRZYKLEN.....	50
3.2.1 Fahrzeugauswahl und PHEM-Modell.....	50
3.2.2 ECO-Drive Anforderungen .....	54
<b>4 FAHRVERSUCHE MIT HEV-PKW</b> .....	<b>56</b>
4.1 ONBOARD-EMISSIONSMESSGERÄT .....	56
4.1.1 Messaufbau im VW Jetta Hybrid.....	58
4.2 TESTSTRECKEN UND FAHRSTILE.....	60
4.3 ERGEBNISSE AUS DEN MESSUNGEN .....	63
<b>5 HEV SIMULATION MIT REALEN FAHRZYKLEN</b> .....	<b>66</b>
5.1 FAHRZYKLEN ERSTELLUNG UND FAHRZEUGMODELL VALIDIERUNG BZW. ANPASSUNG .....	66
5.1.1 Erstellung der Zyklen .....	66
5.1.2 PHEM-Fahrzeugmodell Anpassungen .....	67
5.2 VERGLEICH DER VERBRAUCHSERGEBNISSE AUS DEN MESSUNGEN UND DEN SIMULATIONEN .....	72
5.2.1 Simulationsergebnisse mit einer ausgeglichenen Batterieladebilanz.....	75
5.3 ECO-DRIVE SCHULUNG .....	77
<b>6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK</b> .....	<b>78</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>80</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>82</b>
<b>FORMELVERZEICHNIS</b> .....	<b>84</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>85</b>

## Abkürzungen

a	Acceleration; Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
AC	Alternating Current; Wechselstrom
Acc	Accelerate; beschleunigen
AG	Achsgetriebe
a <sub>neg50</sub>	Perzentilwert P <sub>50</sub> der negativen Beschleunigung
a <sub>pos50</sub>	Perzentilwert P <sub>50</sub> der positiven Beschleunigung
A <sub>quer</sub>	Querschnittsfläche des Fahrzeuges [m <sup>2</sup> ]
ARTEMIS	Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems
AUX	Auxiliaries; Nebenaggregate
Bat	Battery; Batterie
br100	Starkes Bremsen
brHybrid	Schwaches Bremsen
C	Kraftstoffverbrauch [L/100km]
C <sub>0</sub>	Korrigierter Kraftstoffverbrauch [L/100km]
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CVT	Continuous Variable Transmission
c <sub>w</sub>	Luftwiderstandsbeiwert [-]
DC	Direct Current; Gleichstrom
Dec	Decelerate; verzögern
DRI	Drive cycle; Fahrzyklus
EG	Europäische Gemeinschaft
Elkos	Elektrolytkondensatoren
EM	E-Maschine

---

EMO	E-Maschine
ERMES	European Research on Mobile Emission Sources
EU	Europäische Union
EV	Electric Vehicle; Elektrofahrzeug
EVT	Electrical Variable Transmission
F1, F2, F3, F4	Erster, zweiter, dritter und vierter Testfahrer
FC	Fuel Consumption; Kraftstoffverbrauch
FID	Flammen Ionisations Detektor
FLD	Full Load Drag Curve; Volllastkurve
$F_r$	Rollwiderstandskoeffizient [-]
FTP	Federal Test Procedure
G	Getriebe
g	Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ]
g100	Starkes Beschleunigen
g40	Beschleunigen mit maximal 40-prozentiger Gaspedalstellung
gHybrid	Schwaches Beschleunigen
GPS	Global Positioning System
HA	Hybridantrieb
HC	Kohlenwasserstoffe
HEV	Hybrid Electric Vehicle; Hybrid-Elektrofahrzeug
I	Stromstärke [A]
I	Massenträgheitsmoment [ $kgm^2$ ]
$i_{Achse}$	Achsübersetzung [-]
ICE	Internal Combustion Engine; Verbrennungskraftmaschine
$i_{Gang}$	Getriebeübersetzung [-]
$I_{Mot}$	Massenträgheitsmoment des Motors [ $kgm^2$ ]
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz

k	Kilo ( $10^3$ )
K	Kupplung
$K_e$	Effizienzfaktor
$K_{fuel}$	Koeffizient zur Korrektur des Kraftstoffverbrauchs [(L/100km)/Ah]
KSG	Kurbelwellen-Starter-Generator
L/100km	Kraftstoffverbrauch in Liter pro 100 km
Li-Ion	Lithium Ionen
LPI	Load Point Increase; Lastpunktanhebung
MAP	Motorkennfeld
max	Maximal
$m_{Beladung}$	Masse der Fahrzeugbeladung [kg]
Mes	Messung
$m_{Fzg}$	Fahrzeugmasse [kg]
min	Minimal
$m_{Kraftstoff}$	Kraftstoffmasse [kg]
$m_{Rot}$	Äquivalente rotatorische Masse [kg]
n	Drehzahl [ $min^{-1}$ ] oder Anzahl
NDIR	Nichtdispersiver Infrarot Analysator
NDUV	Nichtdispersiver Ultraviolett Analysator
NEDC	New European Drive Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NFZ	Nutzfahrzeug
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
NVH	Noise, Vibration, Harshness; Geräusch, Vibration, Rauheit

---

OW	Obere Warngrenze
P	Leistung [W]
P <sub>B</sub>	Leistung zum Überwinden des Beschleunigungswiderstandes [W]
PEMS	Portable Emission Measurement System
PHEM	Passenger Car and Heavy Duty Emission Model
PKW	Personenkraftwagen
P <sub>L</sub>	Leistung zum Überwinden des Luftwiderstandes [W]
PM	Particulate Matter; Feinstaub
PN	Particle Number; Partikelanzahl
P <sub>R</sub>	Leistung zum Überwinden des Rollwiderstandes [W]
P <sub>S</sub>	Leistung zum Überwinden des Steigungswiderstandes [W]
Q	Batterieladebilanz [Ah]
R	Widerstand [ $\Omega$ ]
r <sub>Räder</sub>	Dynamischer Raddurchmesser [m]
RRC	Rolling Resistance Coefficient; Rollwiderstandskoeffizienten
SCR	Selective Catalytic Reduction; Selektive katalytische Reduktion
Sim	Simulation
Sim/Mes	Verhältnis zwischen den Ergebnissen der Simulation und Messung
SOC	State Of Charge; Batterieladezustand
STE	Steuerkennlinie für die E-Maschine in PHEM
t	Time; Zeit [s]
TU	Technische Universität
U	Spannung [V]
UN	United Nations; Vereinte Nationen
UN/ECE	Economic Commission for Europe; Wirtschaftskommission für Europa
UNO	United Nations Organizations; Organisation der Vereinten Nationen
USA	United States of America; Vereinigte Staaten von Amerika
UW	Untere Warngrenze

$v$	Velocity; Geschwindigkeit [m/s]
$v'$	Relativgeschwindigkeit des Fahrzeuges zur anströmenden Luft [m/s]
VEH	Vehicle; Fahrzeug
VKM	Verbrennungskraftmaschine
$v_{\text{roll}}$	Geschwindigkeit ohne Stillstandsdauern berechnet
VW	Volkswagen
W	Energie [Wh]
$\Delta E_{\text{batt}}$	Batterieladebilanz [J]
$\eta$	Wirkungsgrad
$\rho$	Dichte der Luft [ $\text{kg/m}^3$ ]
$\phi$	Durchschnitt, Mittelwert

## Eidesstattliche Erklärung



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

### EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

### STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....  
date

.....  
(signature)

## Zusammenfassung

Als Teil eines Projektes am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz hat diese Arbeit das Ziel, den Einfluss des Fahrverhaltens auf den Kraftstoffverbrauch eines Hybrid-PKW darzustellen. Anders formuliert ist es die Intention die Anforderungen und Ergebnisse einer möglichst kraftstoffsparenden Fahrweise abzubilden.

Einleitend wird auf die Grundlagen des Themas Hybridfahrzeuge, das verwendete Simulationsprogramm inklusive einer Erweiterung zur Simulation von HEV und die gesetzlichen Bestimmungen zur Emissionsermittlung in der Typprüfung von Hybrid-Elektrofahrzeugen eingegangen. Im ersten Schritt wird eine Vorsimulation eines Hybrid-PKW durchgeführt, mit dem erzielten Resultat der Darstellung von Anforderungen an die Fahrweise. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse werden Zyklen und Fahrweisen definiert, um die Emissionen bzw. Verbräuche in Echtzeit bei Messfahrten mit einem realen Hybrid-PKW zu ermitteln. Damit werden unter anderem die Ergebnisse aus der Vorsimulationen verifiziert. Mit Hilfe der Ergebnisse und Erkenntnisse aus diesen Messfahrten wird das aus den Vorsimulationen bestehende Fahrzeugmodell weiter angepasst. Die Einflüsse der einzelnen Anpassungen auf den Kraftstoffverbrauch werden schrittweise bestimmt, um schließlich einen Vergleich zwischen den real ermittelten und simulierten Ergebnissen aufzuzeigen. Mit Hilfe dieses letztendlichen Simulationsmodells wird der Verbrauch mit einer ausgeglichenen Batterieladebilanz berechnet und somit SOC unabhängige Verbrauchsergebnisse dargestellt.

Als eine wesentliche Erkenntnis lässt sich zeigen, dass das Bremsverhalten einen bedeutend größeren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat als das Beschleunigungsverhalten. Dies zeigt sich durch die anfängliche Simulation und bestätigt sich ebenfalls aus den Ergebnissen der Messfahrten. Desweiteren hat die Fahrweise einen erheblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Bestätigt wird diese Aussage dadurch, dass bei den Messfahrten die mit demselben Hybrid-PKW auf derselben Strecke, jedoch mit unterschiedlichen Fahrweisen durchgeführt, der Kraftstoffverbrauch zwischen einer normalen und einer ökonomischen Fahrweise im Durchschnitt um in etwa ein Viertel verringert wird. Zu beachten ist jedoch, dass diese Verbrauchsergebnisse mit einer nicht ausgeglichenen Ladebilanz der Batterie ermittelt sind und somit zum Beispiel bei der ökonomischen Fahrweise mehr Energie aus der Batterie entnommen als zugeführt wird. Deswegen ist der Kraftstoffverbrauch aus den Simulationen für eine ausgeglichene Batterieladebilanz dargestellt, um das Ergebnis von dem Einfluss der SOC-Werte unabhängig zu machen. Dadurch werden die Ergebnisse vergleichbar und entsprechen der Methode zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs aus der Typprüfung von Hybrid-Elektrofahrzeugen. Folgend zeigt sich, dass sich die Verbrauchsunterschiede zwischen den Fahrweisen auf geringere Unterschiede reduzieren. Das Ergebnis mit einer ausgeglichenen Batterieladebilanz bestätigt die Aussage noch weiter, dass die Fahrweise einen erheblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat. Es zeigt sich, dass die SOC-Anfangswerte und SOC-Veränderungen speziell bei kurzen Fahrten einen enormen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch eines HEV haben und deswegen bei der Auswertung von Messfahrten bzw. Simulationen von großer Bedeutung sind. Das resultierende Simulationsmodell kann ebenfalls als ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit angesehen werden. Dieses Modell wird mit den Ergebnissen der realen Fahrten angepasst bzw. verglichen und bietet somit die Möglichkeit zur weiteren Verwendung. Eine entscheidende Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass man möglichst nicht über die maximale Generatorleistung der E-Maschine bremsen sollte um einen geringen Verbrauch mit einem HEV-PKW zu erzielen. Die erlangten Erkenntnisse dieser Arbeit bestätigten sich aus den Ergebnissen weiterer Messfahrten, welche während einer zum Abschluss durchgeführten Informationsveranstaltung stattfanden.

## Abstract

As part of a project at the Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics at Graz University of Technology, this thesis has the objective to present the impact on fuel consumption of a hybrid electric vehicle by the way of driving it. In other words the intention of this work is to illustrate the requirements and results of an economic way of driving.

Initially basics about hybrid vehicles, the selected simulation program, an expansion to make it possible to simulate HEV and legal regulations for determination of fuel consumption of hybrid electric vehicle are elucidated. To point out requirements to the way of driving, an introductory simulation of a hybrid vehicle is implemented. Based on these results drive cycles and different ways of driving are defined, for the reason to measure emissions and fuel consumption of an existing hybrid electric vehicle. On basis of the achieved results and knowledge the existing simulation model is verified and adapted. The influence of every adjustment on the fuel consumption is gradually shown, as well as a comparison of fuel consumption between measured and finally achieved simulation results. With the help of this final simulation model, the fuel consumptions based on a zero energy balance of the battery is calculated. With the objective that this specific fuel consumption results are independent from any SOC-values.

As one of the results can be seen, that the behavior of the driver regarding breaking has a much greater impact on fuel consumption than acceleration. This fact was shown by the initial simulations and is also confirmed by the results from road tests. Furthermore it can be shown that the way of driving has an important impact on fuel consumption. Test runs performed with a hybrid vehicle on the same track with different driving behaviors shows that the fuel consumption between a normal and an economic driving style is reduced on an average of twenty-five-percent. Attention should be paid to the fact that this consumption values are determined by an unbalanced battery energy flow. It means for example that with an economic driving style more energy is taken from the battery than supplied. Therefore the simulated fuel consumption results are calculated for a zero energy balance of the battery, to make these results comparable and SOC independent. A balanced SOC-level is also required in the legal regulations to the measurement of the emissions and fuel consumption of hybrid electric vehicle. Thereby the fuel consumption regresses to minor differences between the different types of driving behaviors. This output with a balanced electric energy clarified the conclusion that the behavior of a driver has a wide influence on fuel consumption. It is also shown that the SOC initial values and changes have a huge impact, especially in short test cycles, on the fuel consumption of an HEV and this is why they are of great importance for evaluation of measured as also simulated outcomes. Another result of this work is the vehicle simulation model, which has been validated and adjusted with outcomes of real road tests. In general, a key finding is that you should not break over the point of maximum generator power, in order to achieve less fuel consumption with a hybrid electric vehicle. Based on an additional field campaign the knowledge gained from this study is confirmed in reality.

# 1 Einleitung

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit war die Darstellung des ECO-Drive Potentials eines Hybrid-Elektrofahrzeuges. Mit der zu Grunde liegenden Frage, welchen Einfluss hat die Fahrweise auf den Kraftstoffverbrauch eines Hybrid PKWs, beziehungsweise wie man mit einem Hybrid PKW fahren muss, um eine möglichst ökonomische und somit auch ökologische Fahrweise zu erzielen.

Um eine Antwort auf diese Frage mit wissenschaftlichen Methoden geben zu können, wurde im ersten Schritt ein Simulationsmodell eines Hybrid-PKW aufgestellt, um den Einfluss verschiedener Fahrweisen auf den Kraftstoffverbrauch im Vorhinein darstellen zu können. Des Weiteren wurden diese Ergebnisse durch Messungen mit einem realen Fahrzeug überprüft und dadurch Potentiale aufgezeigt, um das Simulationsmodell besser an die Realität anzunähern.

Als Teil eines A3-Projektes, waren bereits Erkenntnisse aus einem vorhergehenden Projekt mit einem Hybrid-Bus am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik vorhanden, doch stellte sich die Frage welchen Einfluss die Änderungen positiver und/oder negativer Beschleunigungsverhalten des Fahrers speziell bei einem Hybrid-PKW auf den Verbrauch hat. Als weiterer Nutzen zeigte sich, dass das aus der Arbeit entstandene Simulationsmodell sehr gut dafür verwendet werden kann einen durchschnittlichen Hybrid-PKW zu simulieren um damit zukünftige Aufgaben zu bewerkstelligen.

In dieser Arbeit werden zuerst die allgemein erforderlichen Grundkenntnisse zum Thema Hybridisierung im Fahrzeugbereich, die Arbeitsweise und die erforderlichen Eingabeparameter des verwendeten Simulationsprogrammes näher behandelt. Des Weiteren wird auf die gesetzlichen Grundlagen zur Ermittlung des Verbrauches eingegangen, um die Ergebnisse der Simulationen und die der mit einem Versuchsfahrzeug durchgeführten Messfahrten richtig auszuwerten bzw. interpretieren zu können. Ein vor den Messungen erstelltes Simulationsmodell, auf Basis veröffentlichter Herstellerangaben evaluiert mit dem NEDC Normverbrauch, ermöglichte es Voraussagen zu treffen und dementsprechende Fahrweisen bzw. Fahrzyklen für die Messfahrten zu definieren. Bei diesen Fahrten, mit einem sich am Markt befindlichen Hybrid-PKW, wurden die CO<sub>2</sub>-Konzentration und somit der Kraftstoffverbrauch onboard in Echtzeit gemessen. Diese Messfahrten fanden mit verschiedenen Fahrern und unterschiedlichen Fahrweisen statt, um eine größere Aussagekraft der Resultate zu erzielen. Mit Hilfe dieser Ergebnisse wird das Simulationsmodell weiter angepasst und die Einflüsse dieser Anpassung aufgezeigt. Zum Abschluss wird auf die erzielten Erkenntnisse bezüglich des ECO-Drive Potentials eines Hybrid PKWs eingegangen, Schlussfolgerungen und ein Ausblick gezeigt.

## 2 Theoretische Grundlagen

Einleitend ein kurzer Überblick zu den Begrifflichkeiten die mit dem Thema Hybridisierung in Personenkraftwagen einhergehen, den Grundlagen zu dem verwendeten Simulationsprogramm und den gesetzlichen Bestimmungen zur Verbrauchsermittlung von Elektrohybrid-PKW, welcher die Basis zum Verständnis dieser Arbeit bildet.

### 2.1 Hybrid PKW

Auf den folgenden Seiten befinden sich eine kurze Beschreibung der wichtigsten Komponenten eines Hybrid-PKW, sowie eine Auflistung der verschiedenen Ausführungsarten der zur Verfügung stehenden Einzelkomponenten. Die dadurch entstehenden Möglichkeiten diverser Hybridarchitekturen bzw. diverse Kombinationen dieser Komponenten zu realisieren, birgt ein großes Potential für zukünftige Entwicklungen in sich.

Hybrid, das vom lateinischen Wort „Hybrida“ für Mischling abstammt, bedeutet laut Duden so viel wie Mischung bzw. Gebilde aus zwei oder mehreren Komponenten. Durch die Europäische Gemeinschaft (EG) wird ein Hybridfahrzeug als, ein Fahrzeug mit mindestens zwei verschiedenen bordeigenen Energiewandlern und zwei verschiedenen bordeigenen Energiespeichersystemen zum Zweck des Fahrzeugantriebes, definiert. [2] An der aktuellen Marktsituation kann man erkennen, dass Hybrid-Elektrofahrzeuge, die sich durch die Verwendung chemisch gespeicherter Energie in Form von Benzin oder Diesel, umgewandelt in einem Verbrennungsmotor, in Kombination mit elektrischer bzw. chemischer Energie gespeichert in Batterien, umgesetzt in einer E-Maschine, die einzige in Serie befindliche Technologiekombination darstellen. Da in dieser Arbeit konkret auf Hybrid-Elektrofahrzeuge eingegangen wird, eine Definition dieser aus der UN/ECE Regelung Nr. 83:

*„Hybrid-Elektrofahrzeug (HEV)“ ein Fahrzeug, das aus beiden nachstehenden fahrzeugeigenen Energiequellen mit Energie für den mechanischen Antrieb versorgt wird:*

- a) einem Betriebskraftstoff,*
- b) einem elektrischen Energiespeicher-System*  
(z. B. Batterie, Kondensator, Schwungrad/Generator usw.);“ [13]

Die nachfolgende Abbildung (**Abbildung 1**) liefert eine Gegenüberstellung der wichtigsten Faktoren von Fahrzeugen mit rein verbrennungsmotorischem („mit VKM“) bzw. mit rein elektromotorischem („mit Elektromotor“) Antrieb. Daraus ergeben sich die möglichen Vor- bzw. Nachteile sowie Herausforderungen einer Kombination beider Antriebsarten (Hybridfahrzeug).

Fahrzeug	mit VKM	mit Elektromotor
Größe, Gewicht und Preis der Energiequelle	+++ (Tank)	--- (Batterie)
Tank-/ Aufladezeit, bzw. Reichweite	++	--
Wirkungsgrad des Antriebes (Motor, Getriebe, Rückgewinnung der Bremsenergie,...)	-	++
Lokale Emissionen	--	++

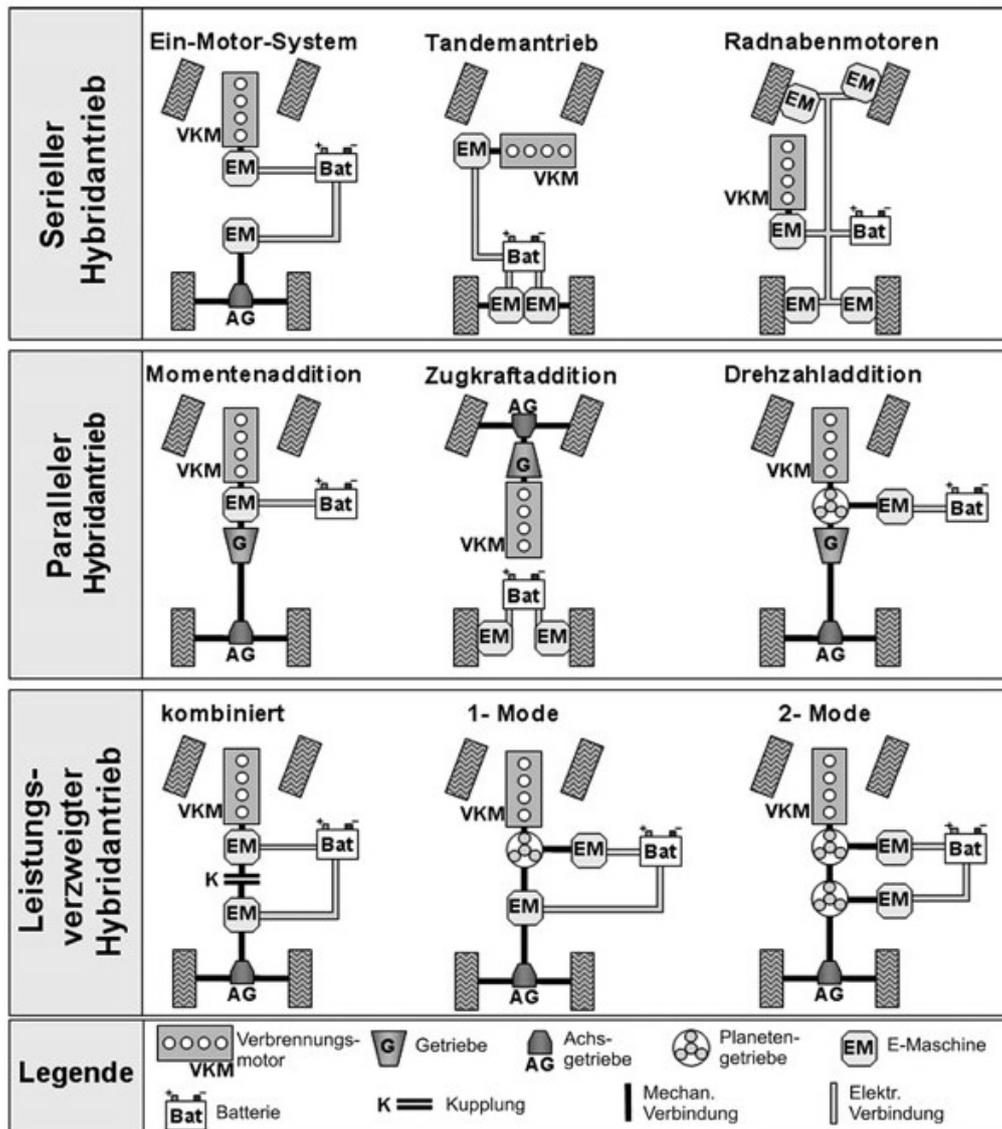
**Abbildung 1:** Gegenüberstellung PKW-Antrieb mit VKM und mit Elektroantrieb [1]

### 2.1.1 Varianten von Hybrid-Fahrzeugen

Der nachfolgende Text zu den Grundlagen von Hybrid-PKWs wurde aus [6] entnommen.

Ein Hybridfahrzeug bietet unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten von Verbrennungsmotoren, Getrieben, E-Maschinen bzw. Generatoren, Batterien, mechanischen und elektrischen Verbindungen. In **Abbildung 2** ist eine grundlegende Gliederung von Hybridantrieben (HA) in die folgenden Typen dargestellt. [6], S. 17 ff

- **Serielle HA:** Hier besteht keine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungskraftmaschine und der Antriebsachse. Die VKM ist lediglich mit einem Generator zur Stromerzeugung verbunden. Das Fahrzeug wird immer durch den Elektromotor angetrieben.  
Bsp.: Audi A1 E-tron, Fisker Karma
- **Parallele HA:** Ein direkter mechanischer Antrieb durch den VKM ist möglich, der elektrische Zweig ist parallel dazu zu- oder abschaltbar. Das Fahrzeug kann rein elektrisch, konventionell durch den VKM oder aus einer Kombination von beiden betrieben werden.  
Bsp.: Mercedes-Benz S400 Hybrid, VW Jetta Hybrid
- **Leistungsverzweigte HA** (oder gemischthybride Antrieb): Es ist ebenfalls ein rein elektrischer oder rein verbrennungsmotor-betriebener Vortrieb möglich. Durch den Einsatz leistungsverzweigter Getriebe (Planetengetriebe oder elektrisch leistungsverzweigter Getriebe) kann der mechanische Aufwand an Getriebekomponenten im Vergleich zu Automatikgetrieben verringert werden. Einen Sonderfall stellt der kombinierte Hybridantrieb, siehe in **Abbildung 2** links unten, dar. Dieser ermöglicht durch die Verwendung von zwei E-Maschinen und einer Kupplung einen seriellen sowie parallelen Betrieb.  
Bsp.: Toyota Prius



**Abbildung 2:** Grundstrukturen von Hybridarchitekturen [6]

Von diesen Grundstrukturen unabhängig kann je nach Grad der Hybridisierung bzw. Elektrifizierung zwischen folgenden Hybridvarianten unterschieden werden.

Hier angeführt die Bezeichnung, technische Merkmale und dazu passende Beispiele: [6], S.19

- **Micro-Hybrid:** Start/Stop-Automatik; Bremsenergieerückgewinnung  
Bsp.: Als Teil des „EfficientDynamics“ Programmes von BMW ab ca. 2007 oder „Ecomotive“ von Seat
- **Mild-Hybrid:** Kurbelwellen-Starter-Generator; Start/Stop-Automatik; Rekuperation; Boosten; Generatorbetrieb; eingeschränkt elektrisches Fahren bei niedrigen Geschwindigkeiten  
Bsp.: Honda Insight, Mercedes-Benz S400 Hybrid
- **Full-Hybrid:** Dieselben Technologien wie ein Mild-Hybrid, jedoch mit höherer rein elektrischer Reichweite, unter anderem durch die Verwendung einer Trennkupplung zum Verbrennungsmotor oder dem Einsatz mehrerer E-Maschinen  
Bsp.: Toyota Prius; VW Jetta Hybrid

- **Plug-In-Hybrid:** Gleiche Funktionen wie bei einem Full-Hybrid, jedoch mit zusätzlicher externer Lademöglichkeit der mit höherem Energiespeichervermögen ausgestatteten Batterie (z.B. laden an Steckdose oder Batterieladestation); somit ist eine höhere rein elektrische Reichweite erreichbar, jedoch nur in Kombination mit einem Verbrennungsmotor bzw. Range Extender. Im Gegensatz zu einem Pure- bzw. All-Electric Vehicle, welcher nur durch E-Maschinen, ohne jeglicher Verwendung von VKMs, angetrieben wird. Bsp.: Chevrolet Volt bzw. Opel Ampera, Toyota Prius Plug-in Hybrid, BMW i3 als Range Extender (geplante Markteinführung 2014)

## 2.1.2 Komponenten von Hybrid-Fahrzeugen

Ein Überblick zu den grundlegenden Einzelkomponenten, die für die Verwendung in Hybrid-Fahrzeugen in Frage kommen, welche bereits in **Abbildung 2** angeführt sind. [6], S. 101 ff

### 2.1.2.1 VKM oder Brennstoffzelle

Maschinen die chemisch gebundene Energie in Kraftstoffen in mechanische oder elektrische Energie umwandeln.

- **Verbrennungskraftmaschinen:** Ottomotor, Dieselmotor, Zweitaktmotor, Rotationskolbenmotor, Stirlingmotor oder Gasturbine.
- **Brennstoffzelle**

### 2.1.2.2 E-Maschine

Elektromaschinen dienen zur Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie.

- **Elektromaschinen:** Gleichstrommaschine, Drehstrommaschine, Asynchronmaschine, Synchronmaschinen, Permanenterrgte Synchronmaschine, Geschaltete Reluktanzmaschine, Permanenterrgte Transversalflussmaschine.

In **Tabelle 1** sind die in Frage kommenden E-Maschinenbauformen hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile bezüglich elektrischem Wirkungsgrad, Regel- bzw. Steuereigenschaften, Geräusentwicklung und Kosten aufgelistet. Die Bewertung erfolgt dabei mit einer Skala von „Sehr gut“ (++) bis „Sehr schlecht“ (--).

	Gleichstrom- maschine	Synchron- maschine		Asynchron- maschine	Transversal- flussmaschine	SR-Ma- schine
		fremd err.	perm. err.			
Leistungsdichte	-	o	++	+	+	+
Wirkungsgrad	-	+	++	o	+	+
Regel-/Steuerbarkeit	++	+	+	o	+	+
Geräusch	-		++	+		-
Thermische Überlast- fähigkeit	-	+	o	++		++
Kosten der Maschine	-	-	-	+	-	++
Kosten des Gesamt- systems	+	o	o	++	-	+
Stand der Technik	++	-	++	++	-	o
Sicherheit	-	++	-	++	+	++

**Tabelle 1:** Vergleich von Elektromaschinen [6]

Je nach Art und Ort der Platzierung im Gesamtfahrzeugpackage, bestehen mehrere Integrationsmöglichkeiten des Elektromotors:

- **Radnabenantrieb:** E-Maschine befindet sich in der Felge
- **Radnaher Antrieb:** Übersetzungsgetriebe zwischen E-Maschine und Antriebsrad
- **Tandem Antrieb:** Zwei Elektromotoren für eine Achse zu einer Einheit gekoppelt
- **Achsantrieb:** Ein Elektromotor treibt über ein Differential die Antriebsräder an
- **Getriebeintegration:** E-Maschine zwischen VKM und Getriebe, meist bei Mildhybrid-Fahrzeugen

### 2.1.2.3 Leistungselektronik

Elemente zur aufgabengerechten Wandlung und Schaltung von elektrischen Kenngrößen, z.B.: um die Gleichspannung aus der Batterie in Wechselspannung für die Elektromaschine zu wandeln.

- **Leistungselektronik** (Stromrichter): DC-DC-Konverter, AC-DC-Wandler oder Gleichrichter genannt, DC-AC-Wandler oder Inverter (Wechselrichter) bezeichnet
- **Halbleiter-Elemente**, zum Schalten von hohen Strömen, z.B.: Abschalten bei hohen Strömen, d.h. auch im Kurzschlussfall

### 2.1.2.4 Getriebe:

- **Vorgelegegetriebe:** Handschaltgetriebe, automatisierte Schaltgetriebe oder Doppelkupplungsgetriebe
- **Automatikgetriebe**
- **Stufenlose Getriebe:** CVT (Continuous Variable Transmission), EVT (Electrical Variable Transmission)
- **Leistungsverzweigte Planetengetriebe Getriebe**

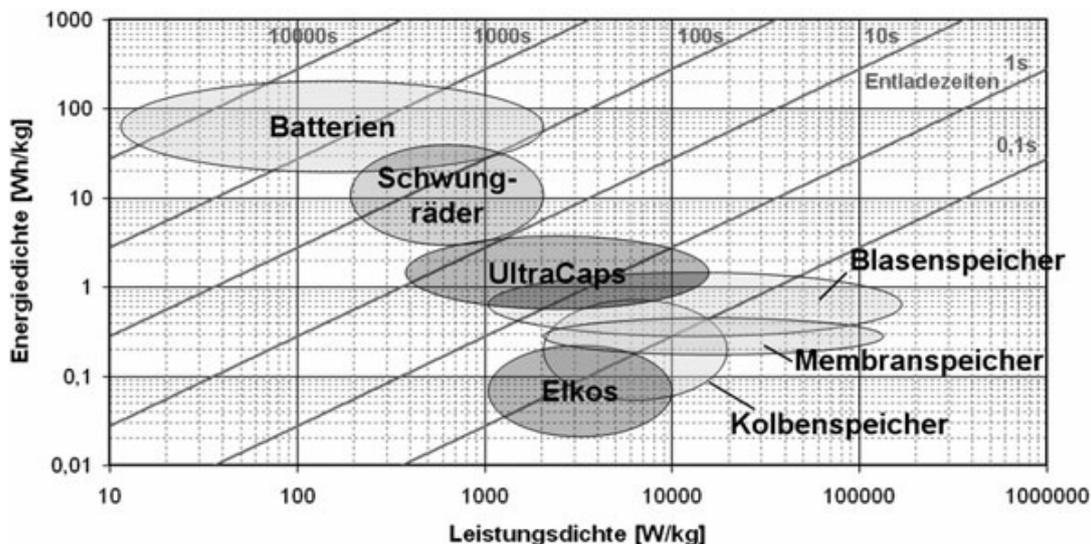
Wie bereits zuvor erwähnt wird vorwiegend bei Mildhybrid-Fahrzeugen eine E-Maschine zwischen VKM und Getriebe integriert. Dabei kann der E-Motor die Primärmasse des Zweimassen-Schwungrades ersetzen und bei Verwendung einer Trennkupplung ein rein elektrisches Fortbewegen ermöglicht werden. Bsp.: Kurbelwellen-Starter-Generator (KSG) oder die direkte Integration der E-Maschine in das Getriebe.

### 2.1.2.5 Energiespeicher

Energiespeicher sind Elemente zur Speicherung und späteren bedarfsgerechten Abgabe von Energie. Wie bereits in **Abbildung 1** und in **Abbildung 3** zu erkennen ist, stellt die Energiespeicherung derzeit eine große Herausforderung und ebenfalls einen großen Kostenfaktor der Hybridisierung von Kraftfahrzeugen dar. Eines der Kernziele in der Entwicklung eines modernen, hybriden Antriebstrangs ist es den geeigneten Kompromiss zwischen hohen Energiedichten bzw. Leistungsdichten bei gleichzeitig geringer Masse und Volumen in Abhängigkeit von Lebensdauer, temperaturbedingter Eigenschaften, Umweltverträglichkeit sowie Lade- und Entladeeigenschaften unter ständiger Berücksichtigung der Kosten zu schaffen. Mögliche Formen der Energiespeicherung sind in **Tabelle 2** dargestellt und in **Abbildung 3** miteinander in Bezug auf realisierbaren Leistungs- und Energiedichten verglichen.

Art der Speicherung	Beispiele
Elektrisch	- Elektrochemisch: Blei-Säure, NiCd, NiMH, Li-Ion - Induktiv: Supraleiter - Elektrostatisch: Supercaps
Chemisch	Diesel, Benzin, Methanol, Propan, Methan, Wasserstoff, usw.
Pneumatisch	Druckspeicher
Hydraulisch	Druckspeicher
Thermisch	Latentwärmespeicher
Hydropneumatisch	Blasenspeicher, Kolbenspeicher, Membranspeicher
Mechanisch	- Kinetisch: Schwungrad - Statisch-Potentiell: Federspeicher

**Tabelle 2:** Formen von Energiespeicherung [6]



**Abbildung 3:** Leistungs- und Energievergleich von Energiespeichern [6]

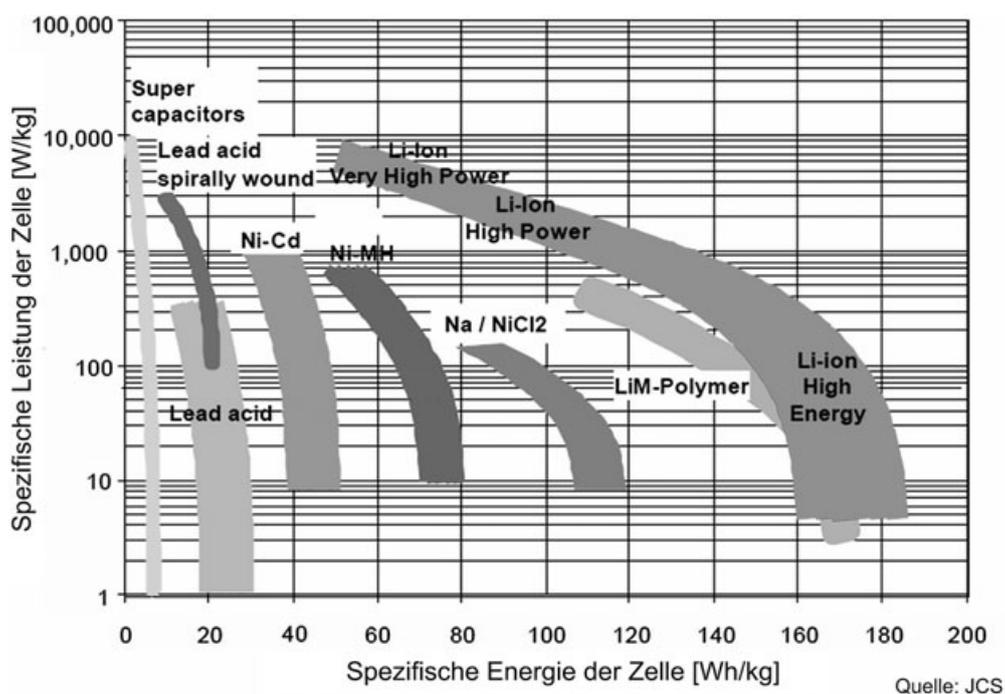
Elkos

Elektrolytkondensatoren

Ebenfalls wegen der zuvor erwähnten Herausforderungen muss beachtet werden, dass nicht jede Form der Energiespeicherung in PKWs zur Anwendung kommen kann. Als Traktionsbatterien für Mild-, Full- oder Plug-In-Hybride, um elektrisches Fahren, Boosten oder Regenerieren zu ermöglichen, kommen derzeit elektrochemische Systeme, vor allem NiMH bzw. vermehrt Lithium-Ionen Batterien und neuerdings auch elektrochemische Doppelschichtkondensatoren (Superkondensatoren), zum kurzzeitigen Abdecken von Leistungsspitzen, zur Anwendung.

Lithium-Ionen Batterien mit ihren hohen Leistungs- und Energiedichten, siehe **Abbildung 4**, erweitern die Möglichkeit des rein elektrischen Fahrens, doch ist ein aufwendigeres Batterie Management System (Überwachung, Schutz, elektrische bzw. thermische Regelung, aktives oder passives Zell-Balancing) erforderlich.

Durch die Hybridisierung kann das derzeitige Problem der geringen Reichweiten rein elektrischer Fahrzeuge, im Vergleich zu rein Benzin oder Diesel betriebenen Fahrzeuge, kompensiert werden.



**Abbildung 4:** Leistungs- und Energievergleich von verschiedenen Batterietypen [6]

## 2.2 PHEM

Das Emissions-Simulationsprogramm PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) kalkuliert den Kraftstoff-Verbrauch und die emittierten Emissionen von Kraftfahrzeugen mit Hilfe eines Fahrzeuglängsdynamik-Modells in Kombination mit zuvor am Prüfstand ermittelten Motor-Emissionskennfeldern. Als Eingabeparameter des Programmes dienen Fahrzyklen (sekundlicher Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit) und die jeweiligen Fahrzeugdaten, wie z.B.: Masse, Luftwiderstandsbeiwert, Getriebeübersetzungen, das Motorkennfeld, usw., siehe **Tabelle 3**. Aus dem Fahrzeuglängsdynamik-Modell wird die erforderliche Motorleistung zur Bewältigung der Fahrwiderstände und aus weiteren physikalischen Zusammenhängen die Motordrehzahl kalkuliert. Damit können die Emissionen aus den ermittelten Motorkennfeldern, in denen die Verbräuche bzw. Emissionen über der Drehzahl aufgetragen sind, berechnet werden. Mit Hilfe dieses Ansatzes können eine Vielzahl von Fahrzuständen dargestellt werden, aber auch verschiedenste Arten und Kombinationen von Motoren, Antriebssträngen und Fahrzeugarchitekturen simuliert werden. So ist es zum Beispiel möglich diverse Motorkennfelder und Vollastkurven des Verbrennungsmotors in Kombination mit verschiedenen Fahrweisen, d.h. in Bezug auf Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungsverlauf oder veränderter Wahl der Getriebestufen darzustellen. Außerdem können unterschiedliche Beladungen, Energie benötigende Zusatzaggregate, aber vor allem auch zukünftige Anwendungen (z.B. Konzepte) und im speziellen auch durch eine Hybrid-Erweiterung, Emissionen bzw. Verbräuche hybrider elektrifizierte Antriebskonzepte simuliert werden. Welche für diese Arbeit von besonderer Bedeutung ist, da in der HEV-Erweiterung die Batterie, die Elektromaschine und die gesamten Komponenten beeinflussende Betriebsstrategie mitsimuliert werden.

Auf Grund einer großen Datenbank an bereits gemessenen Fahrzeugen und Motoren, können zusätzlich die Emissionen im Straßennetz berechnet werden. Aus dieser Datenbank kann ein jeweils für die Abgaskategorien EU0 bis EU6, mit Otto- oder Diesel-Kraftstoff betriebenes Durchschnittsauto generiert werden. Diese umfangreiche Emissions-Datenbank resultierte aus einer großen Anzahl von nationalen und internationalen Projekten des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, z.B. aus dem ARTEMIS EU-Projekt mit Messungen von 102 Fahrzeugen und anschließenden Erweiterungen durch die Ergebnisse verschiedener internationaler Messungskampagnen. Angemerkt sei ebenfalls, dass ständig Erweiterungen durchgeführt werden um am aktuellen Stand der Technik zu bleiben. Was sich während der Erstellungszeit dieser Arbeit als durchaus nützlich erwiesen hat. [4]

### 2.2.1 PHEM Grundversion

Hierbei geht es um die Erläuterung der Funktionsweise der Grundversion von PHEM, dies bedeutet die Erklärung des Vorganges zur Simulation von rein VKM betriebenen Kraftfahrzeugen. Veranschaulicht ist der Simulationsvorgang in **Abbildung 5**. Die Eingabedaten für die Berechnung sind das Fahrprofil, d.h. der sekundliche Geschwindigkeitsverlauf und die Steigung über der Zeit (inkl. optionaler Gangvorgabe), die Fahrzeugdaten inklusive Reifenspezifikationen sowie Emissions-Kennfelder. Daraus wird die Motorleistung zu Überwindung der Fahrwiderstände und Antriebsstrangverluste sekundlich berechnet. Da der Verlauf der Motordrehzahl mit Hilfe der Achs- und Getriebeübersetzung ermittelt wird, ist die Modellierung des Schaltverhaltens des Fahrers erforderlich, d.h. bei welchen Drehzahlen oder Geschwindigkeiten erfolgt der Schaltvorgang. Durch die damit kalkulierte Motorleistung und Motordrehzahl können Verbrauch und Emissionen sekundlich aus dem Motorkennfeld interpoliert werden. Es ergeben sich als Summe der sekundlichen Werte, die Emissions- und in weiterer Folge die Kraftstoffverbrauchswerte für einen Fahrzyklus.

Um die Realität noch genauer abbilden zu können, ist die PHEM Berechnung durch optionale Rechenmodule erweiterbar (Dynamikkorrektur des Motorkennfeldes, Thermisches Verhalten des Katalysators, Kalt-Start Verhalten oder der Simulation von SCR Systemen). [5]

## PHEM Passenger car and Heavy duty Emission Model

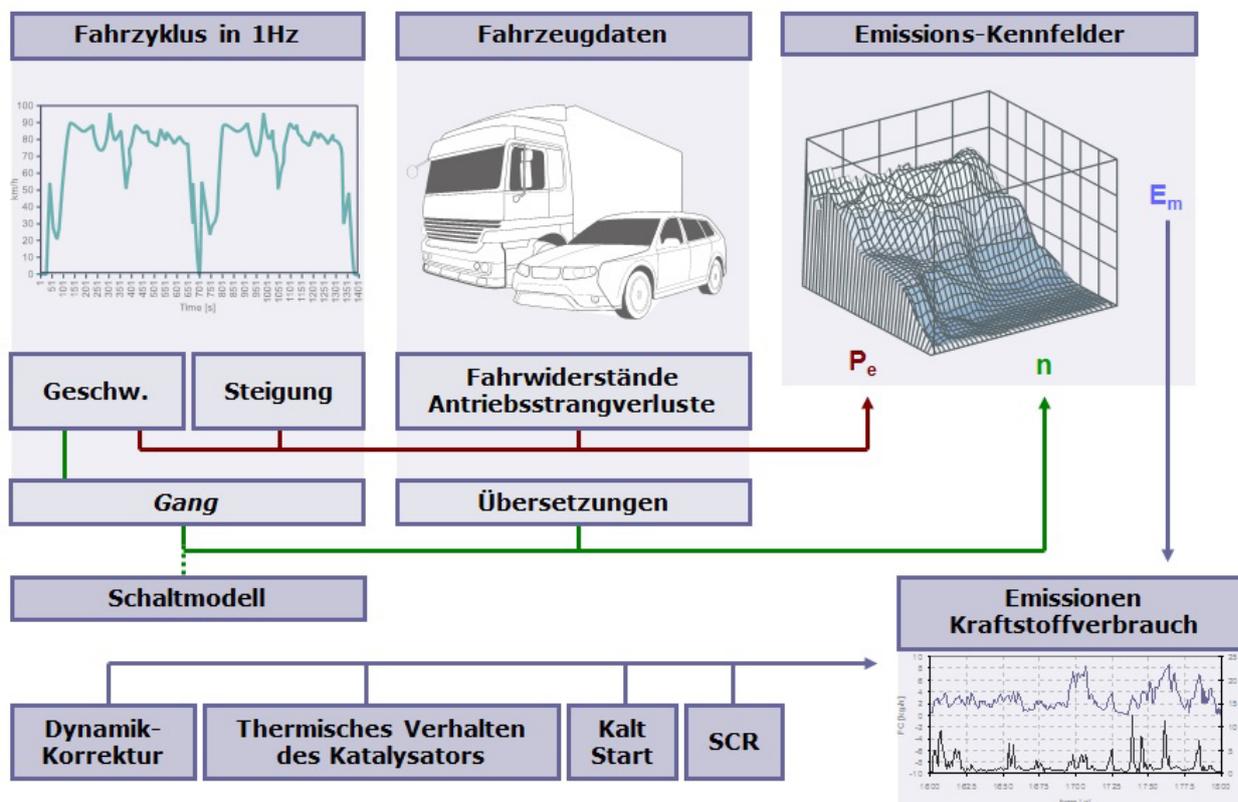


Abbildung 5: Schema der Emissionsberechnung in PHEM [5]

Nachfolgend eine Auflistung der Eingabeparameter der PHEM-Grundversion, aufgeteilt in die jeweiligen Funktionsmodule des Rechenprogramms. Diese Module sind, mit ihren Abkürzungen der englischen Übersetzung in Klammer: die Fahrzeugdaten (**VEH**), das Motorkennfeld bzw. Emissions-Kennfeld (**MAP**), die Vollast- und Schleppkurve (**FLD**) und der Fahrzyklus (**DRI**). Außerdem gibt es noch weitere Module zur Berücksichtigung des Abgassystems (**EXS**) und eine Transiente Korrektur (**TRS**), welche die stationären Emissionswerte der Motorkennfelder auf die transienten Fahrzyklen transformiert. So kann sich zum Beispiel durch die Trägheit des Turboladers und den Effekten resultierend aus der Gaslaufzeit ein Unterschied zwischen den stationären und dynamischen Emissionswerten ergeben. In dieser Arbeit wurden, aus zeitlichen Gründen und wegen der geringen Einflüsse auf das Ergebnis, die EXS- und TRS-Module nicht verwendet. [4], S. 19 f

<i>Module</i>	<i>Eingabeparameter</i>	
<b>VEH</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fahrzeugmasse inkl. Zuladung</li> <li>- Reduzierte Radmassen</li> <li>- Dynamische Raddurchmesser</li> <li>- Luftwiderstandsbeiwert</li> <li>- Stirnfläche (Querschnittsfläche)</li> <li>- Seitenwind</li> <li>- Rollwiderstandsbeiwerte</li> <li>- Motornennleistung</li> <li>- Motornendrehzahl</li> <li>- Leerlaufdrehzahl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Motormassenträgheit</li> <li>- Anzahl der Getriebestufen</li> <li>- Übersetzungsverhältnisse der Getriebestufen</li> <li>- Getriebemassenträgheit</li> <li>- Zeit der Zugkraftunterbrechung</li> <li>- Schaltparameter</li> <li>- Getriebeverlustrfaktor</li> <li>- Zusatzverbraucher (z.B.: Klimaanlage, Radio,...)</li> </ul>
<b>MAP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Normierte Verbrennungsmotor-Drehzahl</li> <li>- Transiente Korrekturfaktoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissionen über normierte Verbrennungsmotor-Drehzahl (NOx, CO, HC, PM, PN, NO)</li> </ul>
<b>FLD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Normierte effektive Motorleistung an der Kurbelwelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Normierte effektive Schleppleistung an der Kurbelwelle</li> </ul>
<b>DRI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geschwindigkeit, Steigung und optionale Gangvorgabe über der Zeit</li> </ul>	
<b>EXS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Thermisches Verhalten des Abgassystems</li> </ul>	
<b>TRS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transiente Korrekturwerte</li> </ul>	

**Tabelle 3:** Eingabeparamater PHEM-Grundversion

### 2.2.2 HEV-PHEM Erweiterung

Die Erweiterung der Grundversion von PHEM durch einen Elektro-Hybrid (HEV) Teil, ermöglicht es erst hybride Antriebsstrukturen zu simulieren. Dies geschieht durch das Einbeziehen von weiteren Funktionsmodulen, welche die Batterie (**BAT**) inklusive dem Anfangs-Ladezustand, die E-Maschine (**EMO**) und die Steuerstrategie (**STE**) abbilden. Die wichtigsten Eingabeparameter der HEV-PHEM-Erweiterung sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

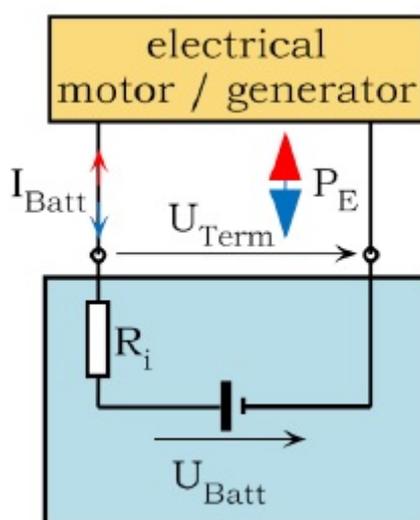
<i>Module</i>	<i>Eingabeparameter</i>
<b>BAT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Batterie-Zellen Ladekurve (Spannung abhängig vom Ladezustand)</li> <li>- Batterie-Zellen-Entladekurve (Spannung abhängig vom Ladezustand)</li> <li>- Physikalisch bzw. chemisch erlaubte maximale SOC-Grenzen</li> <li>- Nominelle Zell-Kapazität</li> <li>- Anzahl der Zellen in Serie geschalten</li> <li>- Innenwiderstand bei einer Temperatur von 20°C</li> <li>- Umgebungstemperatur</li> <li>- Maximal erlaubte Betriebstemperatur</li> </ul>

<b>EMO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leistungsdaten für Antrieb und Generieren</li> <li>- Wirkungsgradkennfeld in Abhängigkeit der Leistung und Drehzahl</li> </ul>
<b>STE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fahrzeuggeschwindigkeitsgrenzen für rein elektrisches Fahren</li> <li>- SOC-Grenzen, zum Schutz der Batterie</li> <li>- Steuerkennlinie für die Betriebswahl des HEV</li> </ul>

**Tabelle 4:** Eingabeparamater HEV-PHEM-Erweiterung

### 2.2.2.1 Batterie Modul (BAT):

Das Modell zum Simulieren des elektrischen und thermischen Batterieverhaltens basiert auf einem Paper zur Modellierung von NiMH-Batterien, welches an der TU Graz veröffentlicht wurde. [11] Es liefert unter Berücksichtigung der spezifischen Lade- und Entladekurven von Lithium Ionen Zellen, adäquate Ergebnisse für diesen Batterietyp. Mit den in folgenden Formeln angeführten Zusammenhängen lassen sich die Verluste beim Laden und Entladen der Batterien wie folgt berechnen:



**Abbildung 6:** Grundlegender Aufbau des Batteriemodells [11]

$I_{Batt}$ [A]	Stromstärke der Batterie
$P_E$ [W]	Batterieleistung
$R_i$ [ $\Omega$ ]	Innenwiderstand
$U_{Batt}$ [V]	Summe der in Serie geschalteten Zellspannungen
$U_{Term}$ [V]	Klemmspannung der Batterie
electrical motor / generator	E-Maschine

**Formel 1:** Maximale Batterieleistung [11]

$$P_E = U_{Term} \times I_{Batt}$$

**Formel 2:** Klemmspannung an der Batterie [11]

$$U_{Term} = U_{Batt} - I_{Batt} \times R_i$$

Durch das Zusammenfassen von **Formel 1** und **Formel 2**, kann man die Stromstärke, laut **Formel 3**, ohne Kenntnis von  $U_{term}$ , berechnen:

**Formel 3:** Stromstärke der Batterie [11]

$$I_{Batt} = \frac{U_{Batt}}{2 \times R_i} \pm \sqrt{\left(\frac{U_{Batt}}{2 \times R_i}\right)^2 - \frac{P_E}{R_i}}$$

Die maximale Leistung die aus der Batterie entnommen werden kann, siehe **Formel 4:**

**Formel 4:** Maximale Batterieleistung mit  $U_{Batt}$  [11]

$$P_E \leq \left(\frac{U_{Batt}}{4 \times R_i}\right)^2$$

Somit kann aus der Batteriespannung, dem Innenwiderstand und der maximalen Batterieleistung die entnommene oder zugeführte Leistung aus der Batterie ( $P_{Batt}$ ) berechnet werden:

**Formel 5:** Entnommene oder zugeführte Batterieleistung [5]

$$P_{Batt} = P_E + I_{Batt}^2 \times R_i$$

Die Grundlagen zur Berechnung des thermischen Verhaltens der Batterie und der Ablauf der Simulation sind hier nicht näher beschrieben, da es den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde bzw. ein thermisches Modell nicht zur Anwendung kam. Eine genaue Beschreibung der thermischen Berechnung und der Simulation der Batterie ist in [11] zu finden.

### 2.2.2.2 Steuerkennlinie der Hybrid-Betriebsstrategie (STE)

Eines der größten Herausforderungen bei der Erstellung eines Hybrid-PKW Simulationsmodells ist die Steuerstrategie realitätsgetreu abzubilden. Der Grund hierfür liegt in der großen Anzahl von Einzelkomponenten und den daraus resultierenden Freiheitsgraden. Je nach Fahrerwunsch muss eine Steuereinheit die Wahl zwischen den zur Verfügung stehenden Komponenten treffen bzw. diese richtig miteinander kombinieren und vordefinierte Ziele beachten (z.B.: hohe Wirkungsgrade oder minimaler Schadstoffausstoß). Die Effekte der Effizienzsteigerung durch die Hybridisierung sind in der Bremsenergieerückgewinnung, Lastpunktanhebung der VKM zur Erhöhung des Wirkungsgrades (jedoch sind diese stark vom Batterieladezustand abhängig) und im Abstellen der VKM bei Stillstand begründet.

Ein am IVT entwickelter Ansatz zur Bestimmung der Betriebsstrategie mit Hilfe einer Steuerkennlinie, basiert auf der Betrachtung der Wirkungsgradketten des Antriebes und auf einer ausgeglichenen Batterieladebilanz für beliebige Fahrzyklen. Dies bedeutet es muss während eines Zyklus, am besten über eine längere Strecke, gleichviel Energie in die Batterie geladen werden, wie zuvor aus der Batterie entnommen wurde. [8]

Die nachfolgenden zwei Zustände werden deshalb als energetisch sinnvoll erachtet, um einen minimalen Kraftstoffverbrauch zu erzielen:

„• *Elektrisch Fahren bzw. Assistieren: wenn dabei mehr Kraftstoff eingespart wird, als zuvor oder danach für das Generieren dieser elektrischen Energie aufgewendet wurde*

• *Generieren von elektrischer Energie durch Lastpunktanhebung am VKM: wenn dabei weniger Kraftstoffmehrverbrauch auftritt, als davor oder danach durch elektrisch Fahren bzw. Assistieren gespart werden kann.*“ [8], S.13

Diese Bedingungen werden durch den Effizienzfaktor  $K_e$ , siehe **Formel 6**, ausgedrückt:

**Formel 6:** Effizienzfaktor  $K_e$  [8]

$$K_e = \frac{W_{\text{elektrisch}}}{\Delta m_{\text{Kraftstoff}}}$$

$K_e$  [kWh/kg]

Effizienzfaktor

$W_{\text{elektrisch}}$  [kWh]

Entnommene bzw. eingespeiste elektrische Energie der Batterie

$\Delta m_{\text{Kraftstoff}}$  [kg/s]

Differenz des Kraftstoffverbrauches zum reinen VKM Betrieb

**Formel 7:** Effizienzfaktor für Assistieren,  $K_{e\_assistieren}$

$$K_{e\_assistieren} = \frac{W_{\text{elektr. entnommen}}}{\Delta m_{\text{Kraftstoff\_weniger}}}$$

**Formel 8:** Effizienzfaktor für Generieren,  $K_{e\_generieren}$

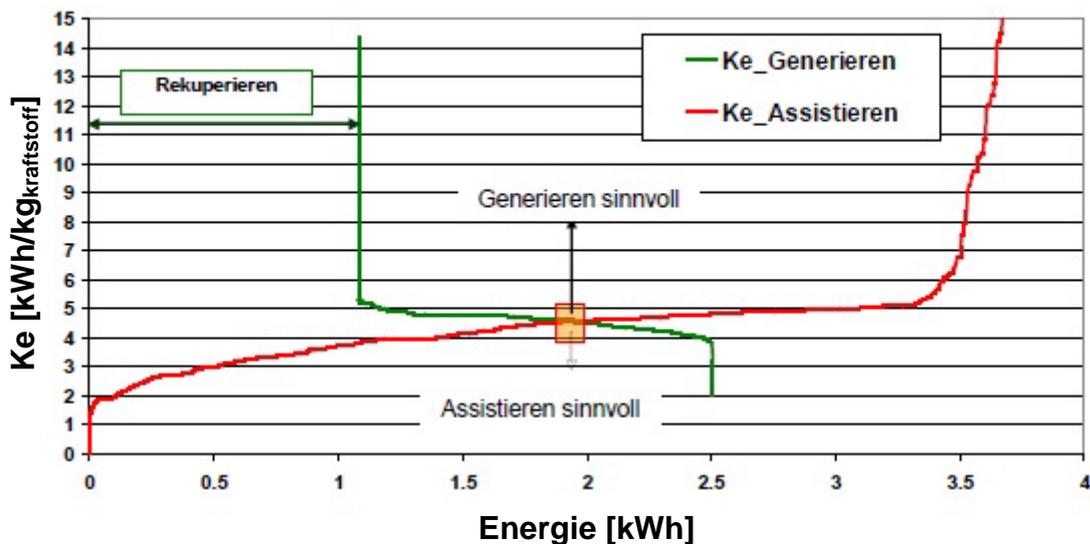
$$K_{e\_generieren} = \frac{W_{\text{elektr. eingespeist}}}{\Delta m_{\text{Kraftstoff\_mehr}}}$$

Zur Erstellung der Steuerkennlinien, werden geeignete Zyklen mit dem Hybridfahrzeug simuliert, jedoch mit drei verschiedenen idealisierten Konfigurationen, die keine Begrenzung durch die Batteriekapazität haben. Geeignete Zyklen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass es sich um möglichst reale Fahrstrecken bzw. reale Fahrweisen abbildende Zyklen handelt.

Die drei Fahrzeug-Konfigurationen zur Erstellung des  $K_e$ -Kennfeldes lauten:

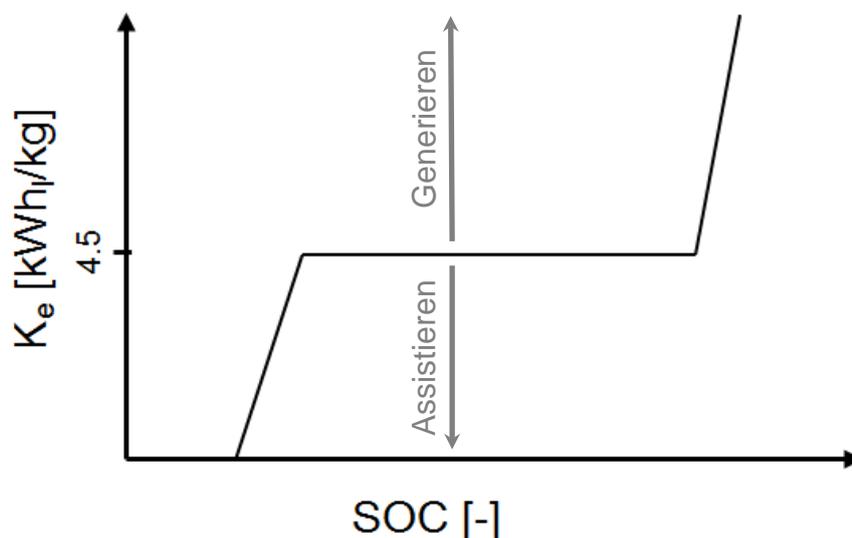
- **Immer nur Generieren:** Fortwährendes generieren mit der maximalen elektrischen Energie, die durch die E-Maschine erzeugt werden kann und niemals Assistieren.
- **Immer nur Assistieren:** Der umgekehrte Fall zu „Immer nur Generieren“, d.h. alleiniges Entnehmen von Energie aus der Batterie, um das Fahrzeug durch den E-Motor zu unterstützen.
- **Reiner VKM-Betriebe** , um die Kraftstoffdifferenz ( $\Delta m_{\text{Kraftstoff}}$ ) berechnen zu können.

Mit **Formel 6** werden die gesamten sekundlichen  $K_e$ -Werte berechnet und die entnommene bzw. eingespeiste elektrische Energie der Batterie bestimmt. Die für reinen Assistier-Betrieb berechneten  $K_e$ -Werte (**Formel 7**) werden aufsteigend über der kumulierten erzeugten Energie aufgetragen. Die  $K_e$ -Werte für den reinen Generier-Betrieb (**Formel 8**) werden, aufgetragen über die kumulierte erzeugte elektrische Energie, abfallend sortiert. Der Schnittpunkt dieser zwei erzeugten Kurven, siehe exemplarisch dargestellt in **Abbildung 7**, liefert den Grenzwert beider Betriebsmodi, d.h. oberhalb dieses Schnittpunktes ist Generieren sinnvoll und unterhalb Assistieren, siehe **Abbildung 8**, da in diesem Punkt eine ausgeglichene Batterieladebilanz herrscht.



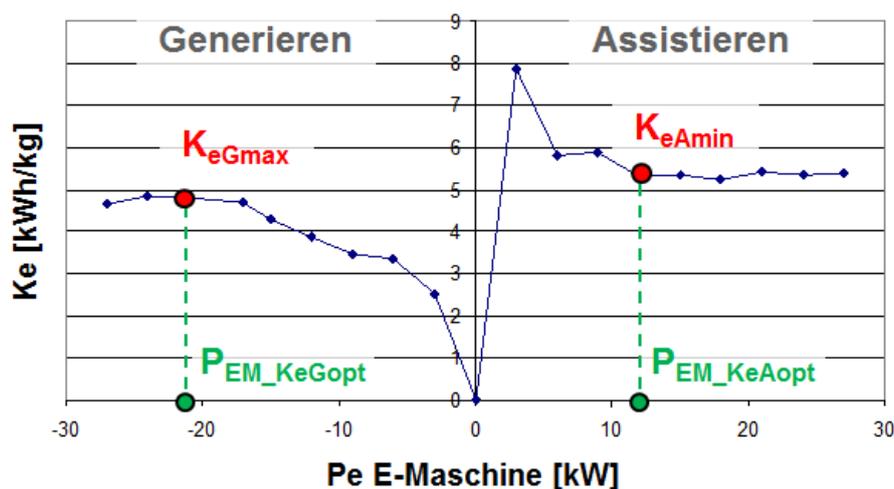
**Abbildung 7:**  $K_e$ -Werte für STE-Kennlinie [8], S.15

Beim Erzeugen des STE-Steuerkennfeldes (**Abbildung 8**) ist darauf zu achten, dass die Linie am linken Rand abfällt, da ab einem für die Batterie sinnvollen SOC-Limit nur mehr Energie generiert werden soll bzw. zu wenig Energie zum Assistieren vorhanden ist. Der Anstieg an der rechten Seite der Linie ist mit dem umgekehrten Effekt zu erklären, d.h. hier soll möglichst viel Assistiert und keine Energie mehr Generiert werden.



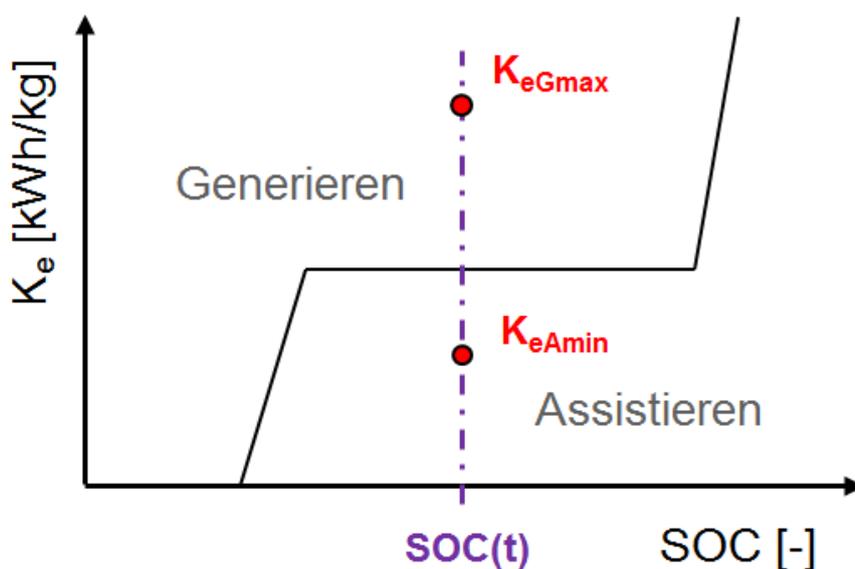
**Abbildung 8:** STE-Steuerkennfeld

Um aus dieser Steuerlinie den Betriebsmodus für einen aktuellen Zeitpunkt zu bestimmen, werden während der Simulation sekundlich  $K_e$ -Werte für unterschiedliche E-Maschinen Leistungen berechnet (dargestellt durch die blauen Punkte in **Abbildung 9**). Realisiert wird dies indem für bestimmte E-Maschinen-Leistungen die Energie die in oder aus der Batterie fließt, durch die Kraftstoffdifferenz (im Vergleich zu reinem VKM-Betrieb) dividiert wird. Damit kann eine optimale E-Maschinenleistung, d.h. bei Generieren möglichst große  $K_e$ -Werte und beim Assistieren möglichst kleine  $K_e$ -Werte, eingestellt werden und in weiterer Folge optimale Verbräuche erzielt werden.



**Abbildung 9:** Sekundliche  $K_e$ -Bestimmung

Die in **Abbildung 9** angeführten Werte  $K_{eGmax}$  und  $K_{eAmin}$  stellen die jeweiligen energieeffizientesten Punkte dar. Mit diesen Werten wird in dem STE-Steuerkennfeld die Betriebsstrategie für einen bestimmten Batterieladezustand bestimmt. Der Abstand zwischen den Punkten und der Linie ist ausschlaggebend für die Betriebswahl, da der Punkt mit größerem Abstand zur Linie den verbrauchseffizienteren der Beiden darstellt. Beispielhaft dargestellt in der **Abbildung 10** bedeutet dies, dass zu diesem Zeitpunkt Generiert wird. Mit dieser Vorgehensweise werden außerdem die optimalen E-Maschinen Leistungen bestimmt, dargestellt in **Abbildung 9** durch  $P_{EM\_KeGopt}$  für das Generieren und  $P_{E\_KeAopt}$  für das Assistieren durch die E-Maschine.



**Abbildung 10:** Bestimmung der Betriebsstrategie

### 2.2.2.3 Rechenvorgang der HEV-Erweiterung

An dieser Stelle erfolgt ein Überblick in den sekundlich stattfindenden Programmablauf der HEV-Erweiterung und auf den folgenden Seiten eine genauere Beschreibung der einzelnen Schritte.

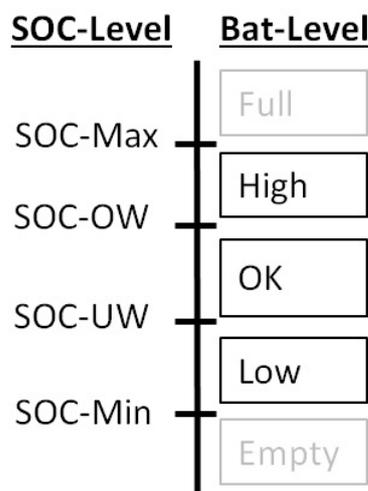
Sekundlicher Ablauf der Berechnung:

- (1) Bestimmung des Fahrzeugzustandes
- (2) Auswahl eines Ganges durch ein Schaltmodell
- (3) Überprüfung welche Betriebsmodi möglich sind
- (4) Vorauswahl des Betriebsmodus
- (5) Auswahl des Betriebsmodus nach  $K_e$ -Betriebsstrategie

(Die nun folgenden eingeklammerten und in einer anderen Schriftart angeführten Bezeichnungen, finden sich in den nun folgenden Abbildungen und Flussdiagrammen der Aufzählungspunkte (4) und (5) wieder. Im Allgemeinen werden bereits erwähnte Abkürzungen nicht nochmals bei den Erklärungen zu den Abbildungen angeführt.)

#### (1) Zur Bestimmung des Fahrzeugzustandes, erfolgen die nachstehenden Überprüfungen:

- Batterie Ladezustands-Level Check (Abbildung 11); (Bat-Lvl)



**Abbildung 11:** Batterie-Ladezustandslevel

SOC-Max [%]	maximal zulässiger Batterieladezustand, im Batteriemodell
SOC-OW [%]	obere SOC-Warngrenze der Betriebsstrategie
SOC-UW [%]	untere SOC-Warngrenze der Betriebsstrategie
SOC-MIN [%]	minimal zulässiger Batterieladezustand, im Batteriemodell

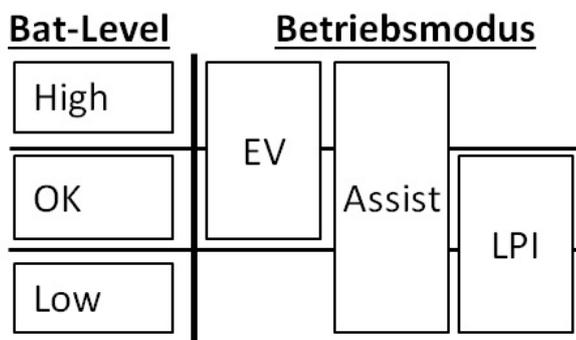
- Befindet sich die VKM in der Einschaltunterbrechung, damit kurzzeitige Ein- und Ausschaltvorgänge vermieden werden oder das Ausschalten bei niedrigen Batterieladezuständen vermieden wird. (ICElock = On, Off oder NoLock)  
 („ICElock = Off“ bedeutet, dass die VKM eingeschaltet ist und nicht ausgeschaltet werden darf.  
 „ICElock = On“ bedeutet, dass die VKM ausgeschaltet ist und nicht eingeschaltet werden darf.  
 „NoLock“ bedeutet, dass es keine Ein- oder Ausschaltvorgaben bezüglich der VKM gibt.)
- Liegt die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit unter- oder oberhalb definierter Geschwindigkeitsgrenzen. Es können zwei Grenzen hinterlegt werden, eine unter der primär elektrisch gefahren wird ( $v < v_{EVu}$ ) und eine zweite oberhalb der kein elektrisches Fahren erlaubt ist ( $v > v_{EVo}$ );
- Fahrzustand, es wird geprüft wie sich der Fahrzustand im Vergleich zum vorhergehenden Zeitschritt geändert hat. Die in Frage kommenden Zustände sind neben Fahrt mit etwa konstanter Geschwindigkeit (Cruise) und Stillstand (Stopped) auch Beschleunigung (Acc) bzw. Verzögerung (Dec); (VehState)
- Ja- oder Nein-Abfrage (True / False) ob sich der Fahrzeugzustand seit dem letzten Zeitschritt geändert hat; (StateChange)
- Hybridmodus des vorherigen Zeitschrittes, d.h. wurde Assistiert (Assist), der Lastpunkt angehoben (LPI), nur die VKM benützt (ICEonly) oder rein elektrisch gefahren (EV); (LastHEVmode)
- VKM Betriebsmodus des vorherigen Zeitschrittes, d.h. war dieser ausgeschaltet (ICEStopped), im Leerlauf (Idle), Last- (Load) oder Schleppbetrieb (Drag); (LastEngState)

## (2) Auswahl einer adäquaten Getriebestufe durch ein Schaltmodell

In dem in PHEM hinterlegten Schaltmodell werden die Schaltpunkte, d.h. bei welcher Motordrehzahl geschaltet wird, für einen durchschnittlichen Fahrer abgebildet. Die Schaltdrehzahl ist abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit, der benötigten Antriebsleistung, spezifischen Fahrzeugdaten und wird außerdem durch eine Vielzahl hinterlegter Kriterien auf Plausibilität überprüft. Die Entwicklung dieser Schaltstrategie erfolgte am IVT mit Hilfe von Auswertungen realer Fahrten.

### (3) Überprüfung der möglichen Betriebsmodi

Der in Frage kommende Betriebsmodus ist abhängig vom aktuellen Batterieladezustand (siehe **Abbildung 12**) und von den weiteren Abfragen aus **Abbildung 13**. Diese zielen darauf ab, in wie weit der E-Motor die erforderliche Leistung aufbringen kann, die VKM zusätzliche Leistung benötigt bzw. in welchem Zustand sich die VKM befindet.



**Abbildung 12:** Betriebsmodi in Abhängigkeit vom Batterie-Ladezustand

Wie in **Abbildung 12** veranschaulicht, kann rein elektrischer Betrieb (EV) nur bei mittleren (OK) und hohen (High) Batterieladezuständen (SOC-Level) erfolgen. Eine Lastpunktanhebung der VKM (LPI) kann nicht bei hohen Batterieladezuständen durchgeführt werden, damit für etwaige Bremsenergieerückgewinnungen Reserven vorhanden sind. Jedoch ist Assistieren (Assist) bei hohem, mittlerem und niedrigem (Low) SOC-Level möglich. Weitere Bedingungen die an dieser Stelle überprüft werden sind in **Abbildung 13** aufgelistet. Es kann nur mit der VKM assistiert oder eine Lastpunktanhebung durchgeführt werden, wenn dieser nicht ausgeschaltet ist. Darüber hinaus ist das Vermögen rein elektrischen Fahrens durch die E-Maschinenleistung und die zuvor erwähnten Geschwindigkeitsgrenzen beschränkt.

EV	$Pe < Pe_{EM\_max}$ und $v < E_{vo}$	<b>EVcrit</b> = $Pe > 90\% * Pe_{EM\_max}$
Assist	ICElock $\neq$ Off	<b>NeedBoost</b> = $Pe > Pe_{ICE\_max}$
LPI	ICElock $\neq$ Off	

**Abbildung 13:** Weitere Abfragen zur Ermittlung möglicher Betriebsmodi

$Pe$ [W]	erforderliche Antriebsleistung
$Pe_{EM\_max}$ [W]	maximale E-Maschinenleistung
$Pe_{ICE\_max}$ [W]	maximale Verbrennungskraftmaschinenleistung

#### (4) Vorauswahl des Betriebsmodus, zum Erkennen unumgänglicher Betriebszustände

Wie in Abbildung 14 ersichtlich ist wird zuerst eine Vorauswahl des Betriebsmodus getroffen. Falls die erforderliche Antriebsleistung nur durch die Kombination von VKM und E-Maschine erreicht werden kann, muss geboostet werden oder falls kein rein elektrischer Betrieb möglich ist, muss mit dem Verbrennungsmotor gefahren werden. Aus diesem Grund repräsentieren die grün hinterlegten Rechtecke, in Abbildung 14 einen gewählten Betriebsmodus, der ohne weitere Überprüfungen ausgeführt wird.

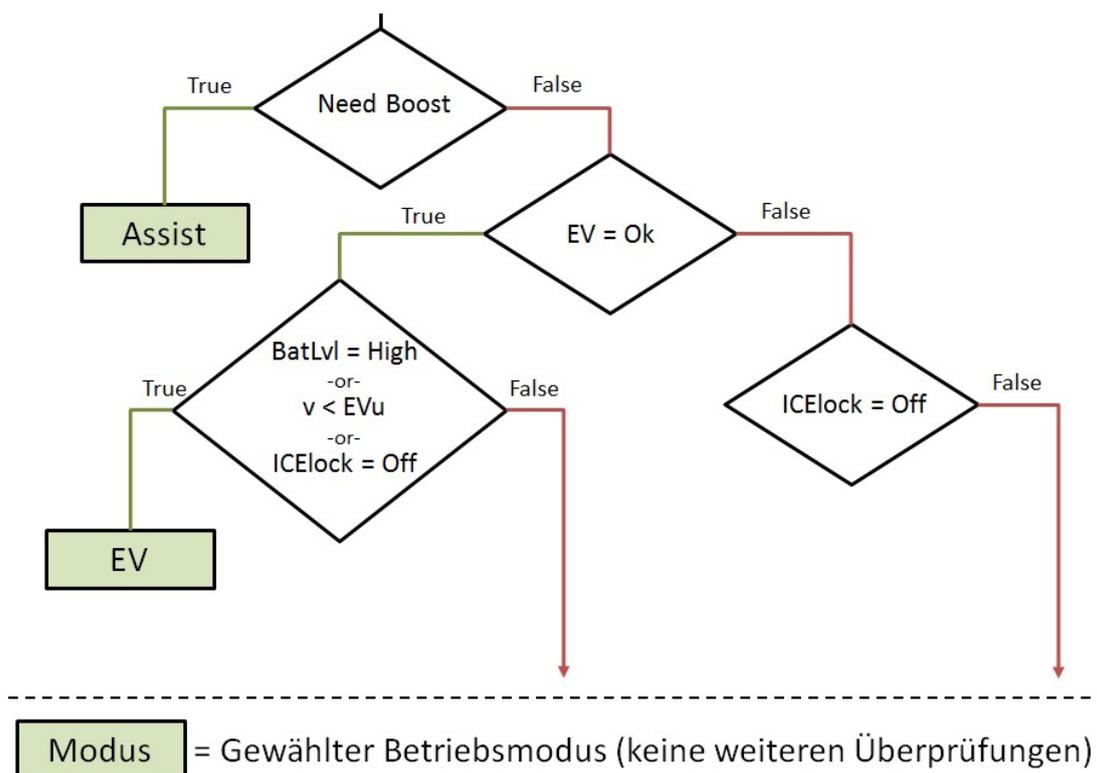
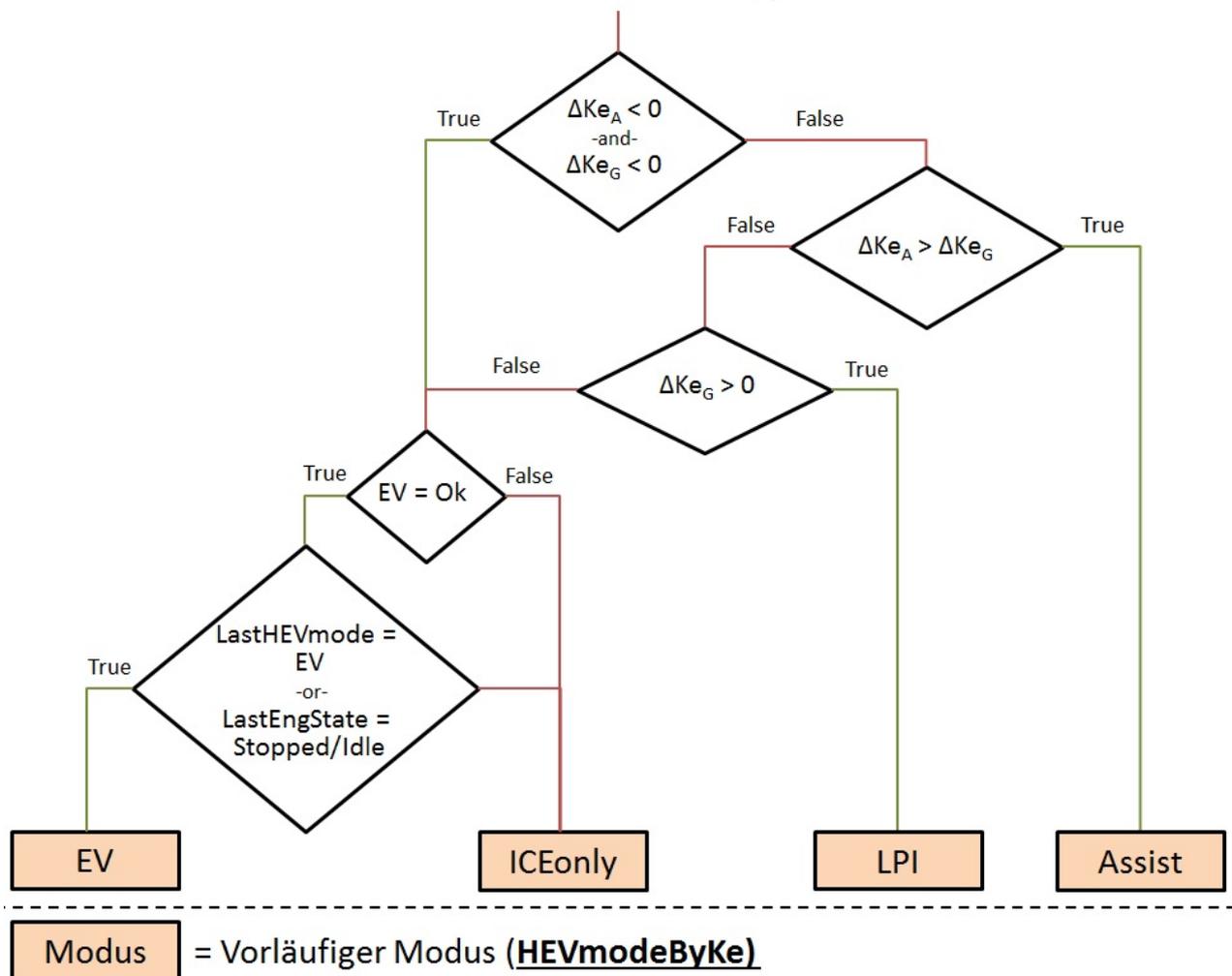


Abbildung 14: Betriebsmodus Vor-Auswahl

#### (5) Bestimmung des Betriebsmodus nach der $K_{eG/A}$ -Betriebsstrategie (siehe 2.2.2.2), falls Assistieren oder rein elektrisches Fahren durch die Vorauswahl ausgeschlossen worden sind.

Um den energieeffizientesten Zustand zu bestimmen, muss als Kalkulationsbasis der Kraftstoffverbrauch bei reinem VKM-Betrieb berechnet werden. Falls eine Lastpunktanhebung (LPI) oder Assistieren (Assist) in Frage kommen, müssen die jeweiligen  $K_e$ -Werte für veränderliche E-Maschinen-Leistungen generiert werden. Um damit in Kombination mit der zuvor bestimmten STE-Steuerkennlinie, die optimale Betriebsstrategie auszuwählen, siehe **Abbildung 15**, **Abbildung 16** und **Abbildung 17**. Des Weiteren werden durch die optimal gewählten  $K_e$ -E-Maschinen Werte, die Wirkungsgrad optimale E-Maschinenleistung bestimmt (siehe **Abbildung 9**). Mit Hilfe dieser E-Maschinenleistung und der gesamt benötigten Antriebsleistung, wird die aufzubringende VKM-Leistung berechnet.



**Abbildung 15:** Auswahl der Betriebsstrategie nach Ke-Faktoren (1/2)

$$\Delta Ke_A = Ke_{STE} - Ke_A \text{ [kWh/kg]}$$

Differenz aus  $Ke_{STE}$  und  $Ke_A$  zur Bestimmung des Betriebszustandes

$$Ke_A \text{ [kWh/kg]}$$

Ke-Wert für Assistieren und optimalen E-Maschinenzustand

$$Ke_{STE} \text{ [kWh/kg]}$$

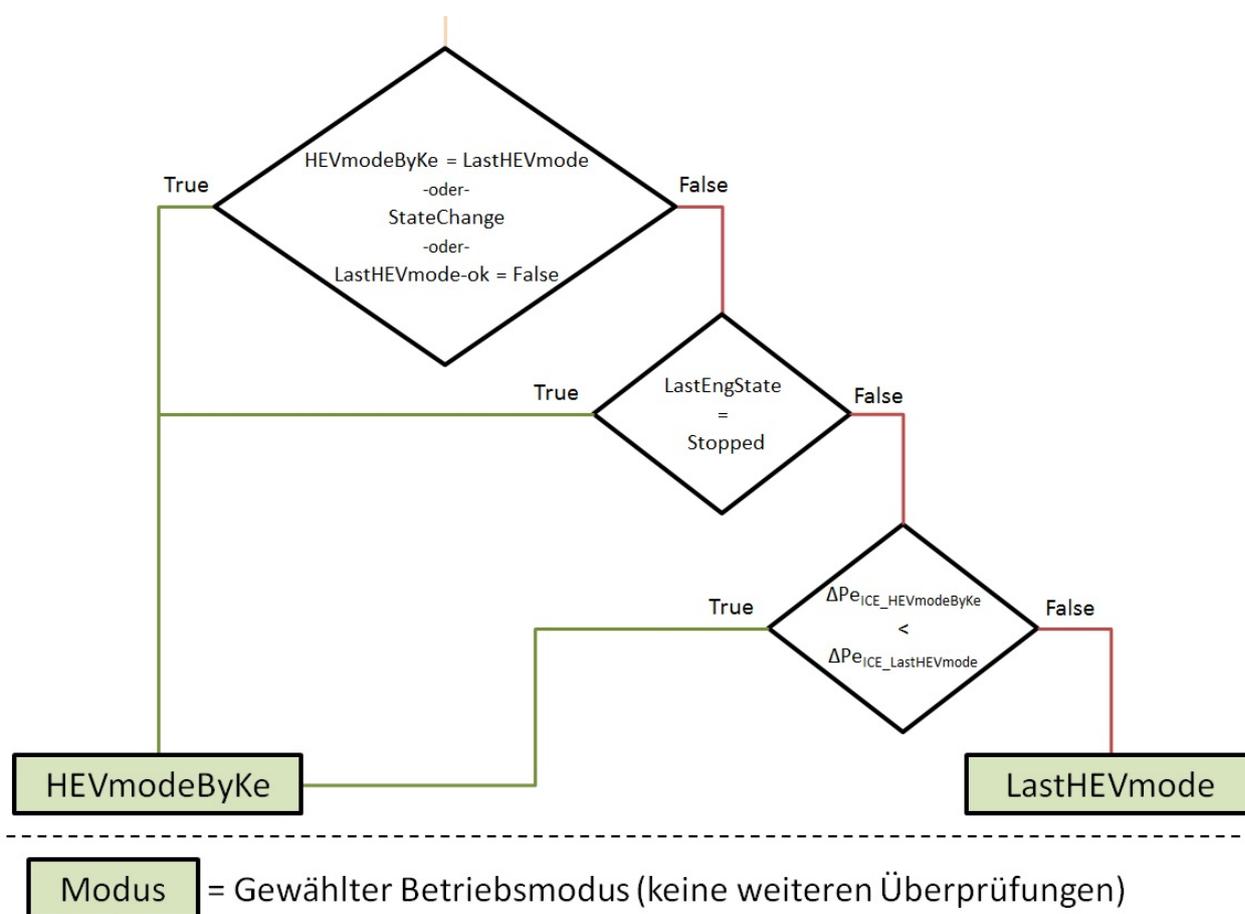
Ke-Wert aus STE-Steuerkennlinie

$$\Delta Ke_G = Ke_G - Ke_{STE} \text{ [kWh/kg]}$$

Differenz aus  $Ke_{STE}$  und  $Ke_G$  zur Bestimmung des Betriebszustandes

$$Ke_G \text{ [kWh/kg]}$$

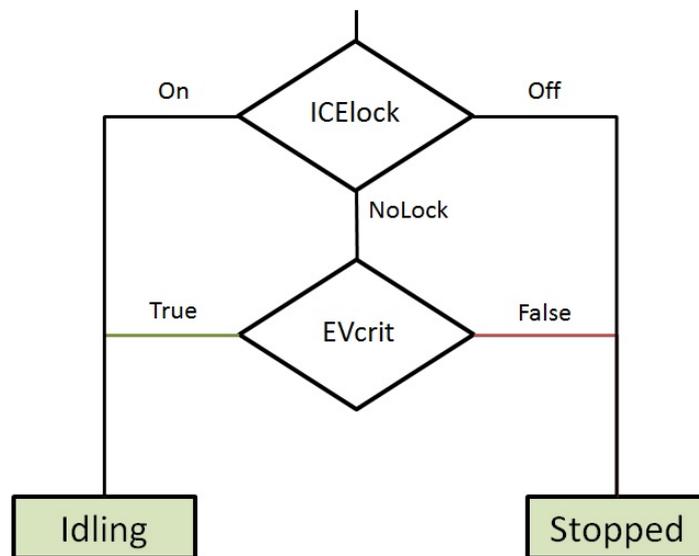
Ke-Wert für Generieren und optimalen E-Maschinenzustand



**Abbildung 16:** Auswahl der Betriebsstrategie nach Ke-Faktoren (2/2)

HEVmodeByKe	Ausgewählter Hybridmodus durch $K_e$ -Faktoren
$\Delta P_{e_{ICE\_HEVmodeByKe}}$ [W]	Differenz aus der VKM-Leistung bestimmt durch den $K_e$ -Wert und der VKM-Leistung des letzten Zeitschrittes
$\Delta P_{e_{ICE\_LastHEVmode}}$ [W]	Differenz der VKM-Leistung mit beibehaltenem Betriebsmodus im Vergleich zum letzten Zeitschritt
LastHEVmode-ok = False	Hybridmodus aus dem vorhergehenden Zeitschrittes kann nicht ausgeführt werden

Die Abfrage  $\Delta P_{e_{ICE\_HEVmodeByKe}} < \Delta P_{e_{ICE\_LastHEVmode}}$  aus **Abbildung 16** dient zur Phlegmatisierung der VKM, d.h. durch das Herabsetzen von Drehmomentspitzen durch die E-Maschine werden die Anforderungen an die Verbrennungskraftmaschine reduziert und diese kann mit einer geringen Dynamik betrieben werden.



---

**Modus** = Gewählter Betriebsmodus (keine weiteren Überprüfungen)

**Abbildung 17:** Bestimmung des VKM-Zustandes bei rein elektrischem Betrieb

Falls der VKM nicht zum Antrieb benötigt wird, fällt die Entscheidung ob dieser auf Leerlaufdrehzahl betrieben oder ausgeschaltet wird (**Abbildung 17**).

## 2.3 Gesetzliche Vorschriften zu Verbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Emissionsermittlung für Hybrid-Elektro-Fahrzeuge

Als Abschluss der theoretischen Grundlagen wird auf die Verbrauchsangabe in der EG für verschiedene Arten von Hybridfahrzeugen eingegangen. Es werden die jeweiligen Testbedingungen zur Messung des Verbrauchs bzw. der CO<sub>2</sub>-Emission und des Weiteren die Unterschiede bei der Durchführung dieser Messungen im Vergleich zu Fahrzeugen, die nur mit einem Verbrennungsmotor angetrieben werden, beschrieben. Die Herstellerangaben des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO<sub>2</sub>-Emissionen beziehen sich häufig auf die Verordnung der EG“ VO (EG) 715/2007“ [2], in der nur die Emissionsgrenzen für die Abgasnormen Euro 5 und 6 beschrieben bzw. festgelegt sind, aber nicht die Durchführungsbestimmungen zur Prüfung selbst. Diese sind in den Regelungen der UN/ECE Nr. 83 [13] und Nr. 101 [14] festgelegt worden, welche unter anderem für Verbrennungsmotor-Fahrzeuge oder Hybrid-Elektro-Fahrzeuge gültig sind. Beschrieben sind die Vorschriften zur Messung der CO<sub>2</sub>-Emission und des Kraftstoffverbrauchs und/oder der Messung des Stromverbrauchs und der elektrischen Reichweite. Des Weiteren beziehen sich diese Regelungen auch auf die Messung von reinen Elektrofahrzeugen der Klassen M1 (PKW bis 3.5 t) und N1 (NFZ bis 3.5 t), welche jedoch an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden.

Der nachfolgende Text bezieht sich auf die zwei bereits oben erwähnten Quellen [13] und [14].

Es wurde die UN/ECE Regelung Nr. 101 [14] als Grundlage für diese Zusammenfassung verwendet, mit einigen wenigen Verweisen auf die UN/ECE Nr. 83 [13]. Deswegen nachfolgend ein kurzer Auszug der Regelung Nr. 101 mit den Abschnitten, die sich ausschließlich auf Hybrid-Elektro-Fahrzeuge beziehen:

- S. 6, Abschnitt 5.4 – 5.5. Beschreibung der Prüfungen für Fahrzeuge mit Hybrid-Elektro-Antrieb. Dies beinhaltet eine kurze Einleitung zur Prüfung allgemein und zur Festlegung der Einheiten und max. erlaubten Abweichung der Ergebnisse zur Typgenehmigung. Zum Beispiel ist hier festgelegt, dass die CO<sub>2</sub>-Emission in Gramm pro Kilometer, der Verbrauch in Liter je 100 km und die elektrische Reichweite in Kilometer anzugeben ist.
- S. 27 ff, Anhang 3. Hauptmerkmale des Fahrzeugs mit Hybrid-Elektro-Antrieb und Angaben über die Durchführung der Prüfungen. Beinhaltet anzuführende Angaben zum Fahrzeug, wie zum Beispiel Marke, Typ, Masse, ob reiner Elektrobetrieb möglich ist, die elektrische Reichweite, Daten zum Verbrennungsmotor, Angaben zur Energiespeicherung, zur elektrischen Maschine oder zur Radaufhängung des Fahrzeuges. Ebenfalls ist eine Zeichnung zur Zuordnung der Hybridarchitektur anzufügen.
- S. 54 ff, Anhang 8. Verfahren zur Messung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, des Kraftstoffverbrauchs und des Stromverbrauchs von Fahrzeugen mit Hybrid-Elektro-Antrieb.
- S.67 Anlage 1. Ladezustandskurve des elektrischen Energiespeichers während der Prüfung für **extern aufladbare Hybrid-Elektro-Fahrzeuge**. Nähere Beschreibung auf den folgenden Seiten.
- S. 68 Anlage 2. Verfahren zur Messung der Ladebilanz der Batterie eines **nicht extern aufladbaren Hybrid-Elektro-Fahrzeugs**. In dieser Anlage werden erforderlichen Messausrüstung bzw. Geräte und das Messverfahren beschrieben. So muss zum Beispiel die Messung des Batteriestroms gleichzeitig mit dem Zyklus beginnen und auch wieder enden.

- S. 69, Anhang 9. Verfahren zur Messung der elektrischen Reichweite von Fahrzeugen, die nur mit Elektroantrieb oder mit Hybrid-Elektro-Antrieb betrieben werden, und der Gesamtreichweite von Fahrzeugen mit Hybrid-Elektro-Antrieb. Beinhaltet die Beschreibung der Messung, der Prüfbedingungen zur Ermittlung der elektrischen Reichweite, sowie Parameter, Einheiten und Messgenauigkeiten.

### 2.3.1 Messung von Hybrid-Elektro-Fahrzeugen, laut UN/ECE Nr. 101

Es werden folgende Unterscheidungen von Hybridfahrzeugen getroffen, je nach Art der Aufladung und möglicher Wahl der Betriebsart:

Aufladung des Fahrzeugs	extern aufladbar		nicht extern aufladbar	
Betriebsartschalter	ohne	mit	ohne	mit

**Abbildung 18:** Arten von Hybrid-Elektro-Fahrzeugen [14], S.54

„Aufladung des Fahrzeugs“ bezieht sich darauf, ob die Traktionsbatterie eines Fahrzeuges von außen an einer Steckdose aufladbar ist und nicht rein durch Nutzbremmung oder Lastpunktverschiebung im Verbrennungsmotor Energie in den elektrischen Speicher eingespeist wird.

Ein „Betriebsartschalter“ ermöglicht es dem Fahrer selbst zu wählen, welche Betriebsstrategie des Antriebsstrangs man zum Fahren auswählt, z.B. rein elektrisches Fahren, ohne Betrieb des Verbrennungsmotors. Die Möglichkeiten sind laut einer Tabelle auf Seite 59 in [14]: Reiner Elektrobetrieb, reiner Kraftstoffbetrieb, Hybridbetrieb, Hybridarten wie Sport-, Spar-, Stadtfahrbetrieb oder außerstädtischer Fahrbetrieb.

I.)	Nicht extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug mit Betriebsartschalter Bsp.: Honda CR-Z, Toyota Prius III, VW Jetta Hybrid ([14], S.65)
II.)	Nicht extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug ohne Betriebsartschalter ([14], S.63)
III.)	Extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug ohne Betriebsartschalter ([14], S.54)
IV.)	Extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug mit Betriebsartschalter ([14], S.57) Bsp.: Toyota Prius Plug-in Hybrid, Volvo V60 Plug-in Hybrid

**Tabelle 5:** Übersicht Hybrid-Elektro-Varianten

Bei diesen vier Arten (**Tabelle 5**) von Hybridtypen ist auf die Bauart der Getriebe zu achten (siehe 2.3.1.1). Nach [14], S. 54, Absatz 1.4, Anhang 8, sind die Schaltpunkte für den Zyklus je nach Getriebeart zu wählen.

### 2.3.1.1 Wahl der Gangstufen

- **Handschaltgetriebe:** Vorgeschriebene Schaltpunkte des NEDC
- **Spezielle Schaltstrategie:** Handschaltgetriebe, bei dem nicht die vorgeschriebenen Schaltpunkte des NEDC verwendet werden, sondern nach den Vorgaben einer Schaltanzeige am Armaturenbrett geschaltet wird. Bsp: Schaltpunktanzeige im Fiat 500.
- **Automatikgetriebe:** Laut [13], S.75, Anhang 4A, sind Fahrzeuge mit automatischem Getriebe in der höchsten Fahrstufe („D“) zu prüfen. Das Gaspedal soll so betätigt werden, dass es dem Getriebe möglich ist „normal“ zu schalten und das Fahrzeug möglichst konstant beschleunigt wird. Falls die Beschleunigung in Fahrstufe „D“ nicht ausreicht, ist nach den Schaltpunkten eines Handschaltgetriebes zu schalten, ansonsten soll der Wahlhebel immer in Stufe „D“ verbleiben.

### 2.3.2 Prüfung von Hybridfahrzeugen

Der nun folgende Teil bezieht sich auf die Vorgehensweisen und Unterschiede bei der Prüfung je nach Hybridfahrzeugtyp.

#### 2.3.2.1 I.) Nicht extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug mit Betriebsartschalter [14], Anhang 8, S.65 ff

Diese sind nach den Vorschriften für Fahrzeuge, die nur mit einem Verbrennungsmotor betrieben werden zu prüfen, jedoch ist die Energiebilanz der Batterie in die Ergebnisse miteinzubeziehen. Generell müssen die Fahrzeuge im Hybridmodus betrieben werden. Sind jedoch mehrere Hybridarten über den Betriebsartschalter wählbar, ist die Prüfung in derjenigen Betriebsart durchzuführen, die nach dem Drehen des Zündschlüssels automatisch eingestellt wird. Es ist je nach Getriebebauart darauf zu achten, ob die vorgeschriebene Gangvorgabe des NEDC genutzt werden muss oder nicht (siehe 2.3.1.1). Die Ergebnisse sind für den ersten (Stadt) und zweiten (außerstädtischen) Teil des NEDC, mit entsprechender Vorkonditionierung des Fahrzeugs, getrennt zu bestimmen. Die Ergebnisse der Prüfung Kraftstoffverbrauch C (l/100 km) und CO<sub>2</sub>-Emission M (g/km) werden durch die Betrachtung der Batterieladebilanz ( $\Delta E_{\text{batt}}$ ) auf die Werte C<sub>0</sub> und M<sub>0</sub> korrigiert. Diese Werte entsprechen der ausgeglichenen Ladebilanz ( $\Delta E_{\text{batt}} = 0$ ), die mit Hilfe der Korrekturkoeffizienten  $K_{\text{fuel}}$  und  $K_{\text{CO}_2}$  berichtigt werden. Wie in Anhang 8, Anlage 2 beschrieben, soll die Ladebilanz Q [Ah] der Batterie durch Integration der direkt am Batteriekabel gemessenen Stromwerte [A] bestimmt werden. Die dafür mindestens zu erfüllenden Genauigkeiten des Stromwandlers sind 0,5 % des Messwerts oder 0,1 % des Höchstwerts der Skala und eine Mindestabtastrfrequenz von 5 Hz. Außerdem soll mit derselben Frequenz die Temperatur an der Messstelle erfasst werden, um einen eventuellen Drift auszugleichen. Aus der Ladebilanz (Q), der gesamten Speicherkapazität ( $E_{\text{TEbatt}}$ ) und der Nennspannung ( $V_{\text{batt}}$ ) der Batterie kann man in weiterer Folge die Änderung des Energieinhaltes  $\Delta E_{\text{batt}}$  mit der auf der nächsten Seite angeführten **Formel 9** bestimmen.

**Formel 9:** Veränderung des Energieinhaltes der Batterie [14], S. 65, 6.3.2

$$\Delta E_{batt} = \Delta SOC \times E_{TEbatt} \cong 0.0036 \times |\Delta Ah| \times V_{batt} = 0.0036 \times Q \times V_{batt} \quad (1)$$

$\Delta E_{batt}$ [MJ]	Batterieladebilanz
$\Delta SOC$ [%]	Batterie Ladezustandsänderung
$E_{TEbatt}$ [MJ]	Gesamt-Batterieenergiekapazität
$Q$ [Ah]	Batterieladebilanz
$V_{batt}$ [V]	Batterienennspannung

Der Faktor 0.0036 ergibt sich aus der Umrechnung von [V] [Ah] = [Wh] auf [MJ] mit: 1 [Wh] = 3600 [Ws] = 3600 [J] und [MJ] =  $10^6$  [J]  $\rightarrow$  1 [Wh] = 0,0036 [MJ].

Des Weiteren sind die Korrekturkoeffizienten ( $K_{fuel}$ ,  $K_{CO_2}$ ) durch eine Reihe von Messungen vom Hersteller für den ersten und zweiten Teil des Zyklus getrennt zu bestimmen. Es sollte mindestens eine Messung mit  $Q_i < 0$  und mindestens eine mit  $Q_j > 0$  vorhanden sein. Falls dies nicht möglich ist, können die Werte extrapoliert werden. Hier wird nur auf die Vorgaben zur Bestimmung des Korrekturkoeffizienten für den Kraftstoffverbrauch näher eingegangen, es sei jedoch angemerkt, dass sich der Koeffizient zur Korrektur der  $CO_2$ -Emission ( $K_{CO_2}$ ) auf gleiche Weise bestimmen lässt, siehe [14], Seite 66, Abschnitt 6.3.5.2, 6.3.6.1.

**Formel 10:** Kraftstoffkorrekturkoeffizient [14], S. 65, 6.3.3.2

$$K_{fuel} = \frac{(n \times \sum Q_i \cdot C_i - \sum Q_i \times \sum C_i)}{(n \times \sum Q_i^2 - (\sum Q_i)^2)} \quad (2)$$

Der Koeffizient ist in vier wesentlichen Ziffern anzugeben (Bsp.: 0.1234; 12.34; 1.234)

$K_{fuel}$ [(L/100km)/Ah]	Koeffizient zur Korrektur des Kraftstoffverbrauchs
$n$ [-]	Anzahl der Messungen, jeweils nur für den Teilzyklus
$Q_i$ [Ah]	während i-ter Messung gemessene Ladebilanz
$C_i$ [L/100km]	während i-ter Messung gemessener Kraftstoffverbrauch

Der korrigierte Wert für den Kraftstoffverbrauch wird wie folgt berechnet.

**Formel 11:** Korrigierter Kraftstoffverbrauch [14], S. 66, 6.3.4.1

$$C_0 = C - K_{fuel} \times Q \quad (3)$$

$C_0$ [L/100km]	Korrigierter Kraftstoffverbrauch
$C$ [L/100km]	der während der Prüfung gemessene Kraftstoffverbrauch
$Q$ [Ah]	die während der Prüfung gemessene Ladebilanz

Jedoch gibt es auch drei Ausnahmen, unter denen die gemessenen und unkorrigierten Werte für den Kraftstoffverbrauch und die Kohlendioxidemission verwendet werden dürfen:

„1) wenn der Hersteller nachweisen kann, dass zwischen der Ladebilanz und dem Kraftstoffverbrauch kein Zusammenhang besteht,

2) wenn  $\Delta E_{batt}$  immer einer Batterieladung entspricht,

3) wenn  $\Delta E_{batt}$  immer einer Batterieentladung entspricht und  $\Delta E_{batt}$  bis zu 1 % des Energieinhalts des verbrauchten Kraftstoffs beträgt (wobei unter verbrauchtem Kraftstoff der Gesamtkraftstoffverbrauch während eines Zyklus zu verstehen ist)“ [14]

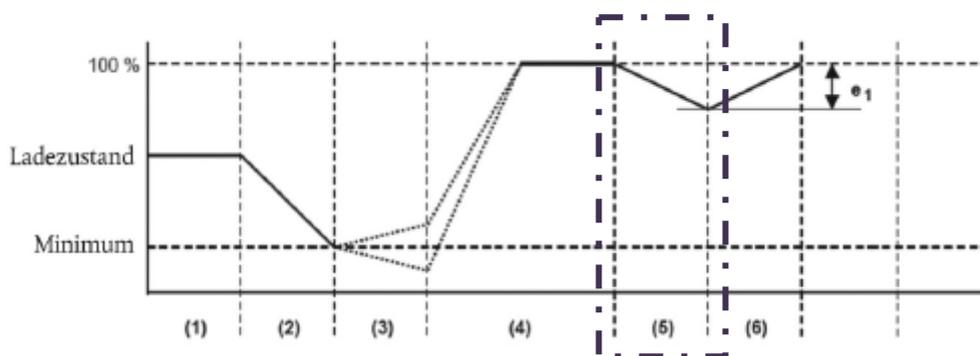
### 2.3.2.2 II.) Nicht extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug ohne Betriebsartschalter [14], Anhang 8, S.63 ff

Diese sind nach den Vorschriften für Fahrzeuge, die nur mit einem Verbrennungsmotor betrieben werden, zu prüfen. Auch hier muss je nach Getriebeart auf die richtige Gangwahl geachtet werden (siehe 2.3.1.1). Ansonsten ist die Vorgehensweise zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs dieselbe wie bei „nicht extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug mit Betriebsartschalter“. Siehe Beschreibung 2.3.2.1, I.).

### 2.3.2.3 III.) Extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug ohne Betriebsartschalter [14], Anhang 8, S.54 ff

Es sind zwei Prüfungen mit Zustand A und Zustand B durchzuführen:

- *Zustand A*: Die Prüfung ist mit voll aufgeladenem elektrischem Energiespeicher durchzuführen, siehe **Abbildung 19**. Als Ausgangspunkt ist exemplarisch der Zustand (1) angeführt, anschließend sind mehrere Punkte vor und nach der Prüfung abzarbeiten. Beginnend damit, die Batterie zu entladen (2), das Fahrzeuges zu konditionieren (3), das Aufladen der Batterie bis zu ihrem Maximum (4), **der eigentlichen Messung des Fahrzeuges** (5) und abschließendem aufladen der Batterie wieder bis zu ihrem Maximum (6).

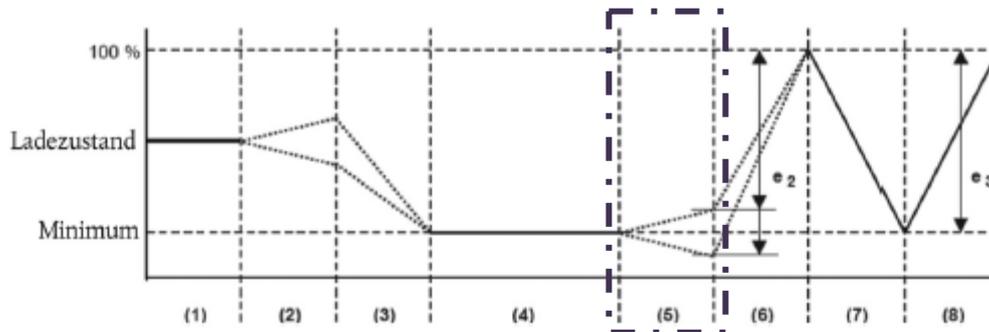


**Abbildung 19:** Ladezustandskurve Zustand A [14], S.67

— · — · Bereich der Fahrzeugmessung

- $e_1$ : Stromverbrauch für den Zustand A, dieser entspricht der aus dem Stromnetz entnommenen Ladeenergie in Wh.

- *Zustand B*: Die Prüfung ist mit einem elektrischen Energiespeicher durchzuführen, der die Mindestladung aufweist, siehe **Abbildung 20**. Ausgehend vom Anfangszustand (1), einer anschließenden Vorkonditionierung des Fahrzeuges (2), dem Entladen der Batterie (3) und einer für mindestens sechs Stunden dauernden Abkühlphase des Fahrzeuges bei 20°C bis max. 30°C (4), beginnt die eigentliche Messung des Fahrzeugs mit der maximal zulässigen Entladung (5). Zum Abschluss wird die Batterie geladen, entladen und nochmals auf das Maximum geladen, siehe (6), (7) und (8).



**Abbildung 20:** Ladezustandskurve Zustand B [14], S.67

— · — · Bereich der Fahrzeugmessung

- $e_2$ : aus dem Stromnetz entnommene Ladeenergie in Wh.
- $e_3$ : aus dem Stromnetz entnommene Ladeenergie in Wh
- $e_4 = e_2 - e_3$ : Stromverbrauch für den Zustand B

Eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise zum Konditionieren des Fahrzeuges, dem Prüfverfahren und zu den Ergebnissen bezüglich CO<sub>2</sub>-Emission, Kraftstoffverbrauch und Stromverbrauch ist in [14] ab Seite 54 ff zu finden.

#### 2.3.2.4 IV.) Extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug mit Betriebsartschalter

Es sind dieselben zwei Prüfungen A und B, mit dem jeweiligen Batterieladezustand wie bei extern aufladbaren Fahrzeugen ohne Betriebsartschalter durchzuführen (siehe 2.3.2.3, III.). Mit dem Unterschied, dass der Betriebsartschalter in Zustand A auf Hybridbetrieb oder auf die Betriebsart mit dem höchsten Stromverbrauch zu stellen ist, und in Zustand B entweder auf Hybridbetrieb, reinen Kraftstoffbetrieb oder auf der Hybridart mit dem höchsten Kraftstoffverbrauch. Siehe [14], Anhang 8, Seite 63 ff.

Eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise zum Konditionieren des Fahrzeuges, dem Prüfverfahren und zu den Ergebnissen bezüglich CO<sub>2</sub>-Emission, Kraftstoffverbrauch und Stromverbrauch ist ab S. 58 ff in [14] zu finden.

## 3 Simulation der ECO-Drive Anforderungen für HEV-PKW

### 3.1 Fahrzyklen

Einführend eine kurze Beschreibung der verwendeten Fahrzyklen, da diese einer der benötigten Eingabeparameter einer Fahrzeugsimulation sind und des Weiteren in dieser Arbeit einer Modifikation unterzogen werden. Durch diese Anpassung des Geschwindigkeitsverlaufes ändern sich die erforderlichen bzw. erzeugten Leistungen am Rad eines PKWs, mit der in weiterer Folge die Leistung am Getriebe erhalten wird. Dieses Kapitel bildet den ersten Schritt zum Verständnis, wie möglichst ökonomisches Fahren mit einem Hybrid-PKW erzielt werden kann, d.h. dem ECO-Drive Potential. Am Ende dieses Abschnittes wird auf die erlangten Erkenntnisse eingegangen, da diese die Basis der nachfolgenden realen Fahrzeugmessungen darstellen.

#### 3.1.1 Auswahl der Fahrzyklen

Die in dieser Arbeit angewandten Fahrzyklen teilen sich in offizielle Zyklen, welche aus den Gesetzgebungen entnommen sind, und auf reale Messfahrten basierende Zyklen auf.

##### 3.1.1.1 Offizielle Fahrzyklen

- **NEFZ** (Neuer Europäischer Fahrzyklus) oder im Englischen als **NEDC** (New European Drive Cycle) bezeichnet. Ursprünglich aus dem Jahre 1970, wird dieser immer noch zur Verbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Emissionsermittlung für die Typengenehmigung von PKW in Europa heran gezogen.

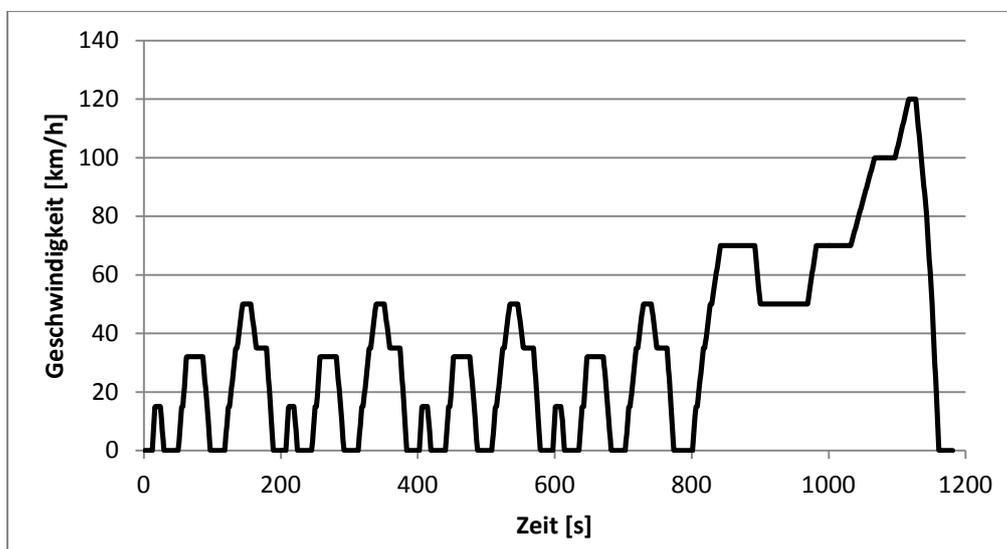
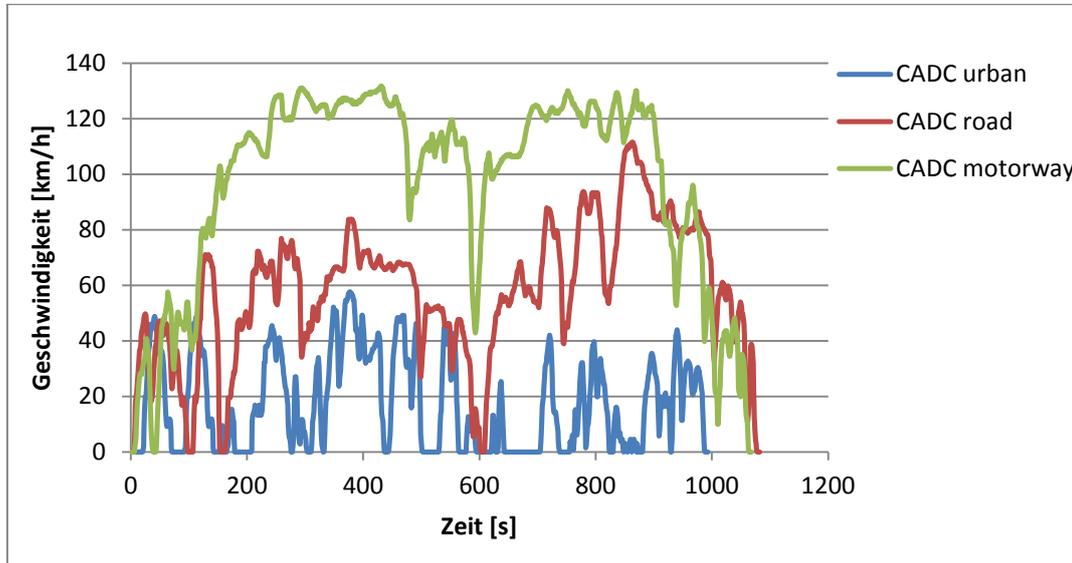


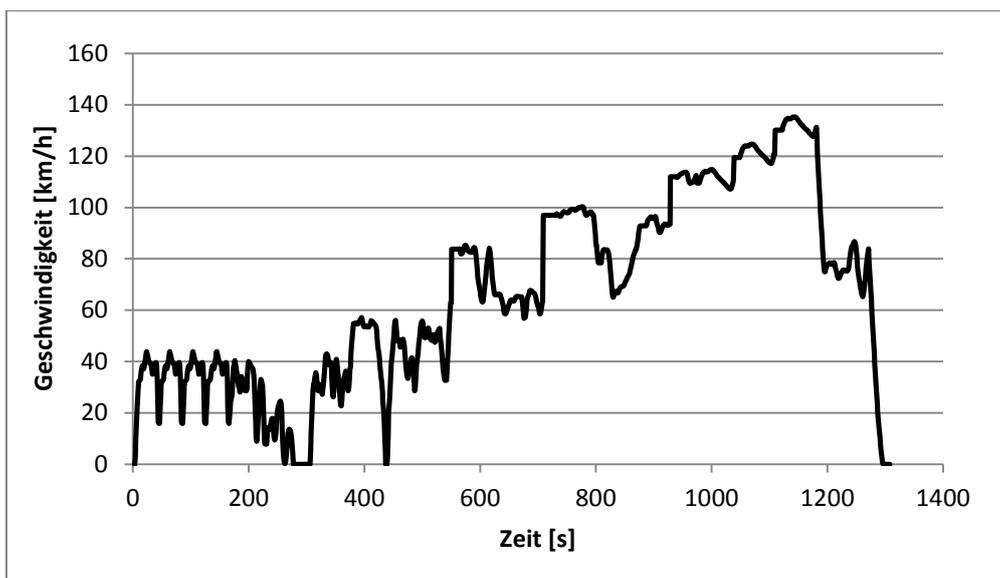
Abbildung 21: New European Drive Cycle (NEDC)

- **CADC** (Common Artemis Driving Cycle) ist ein “real world drive cycle” mit der Unterteilung in drei Bereiche, Urban, Road und Motorway. “Real world drive cycle“ bedeutet, dass damit der Realität entsprechende dynamischere Fahrweisen abgebildet werden. Hervorgegangen aus dem EU-Projekt ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) wird er für viele Abgasmess-Kampagnen verwendet.



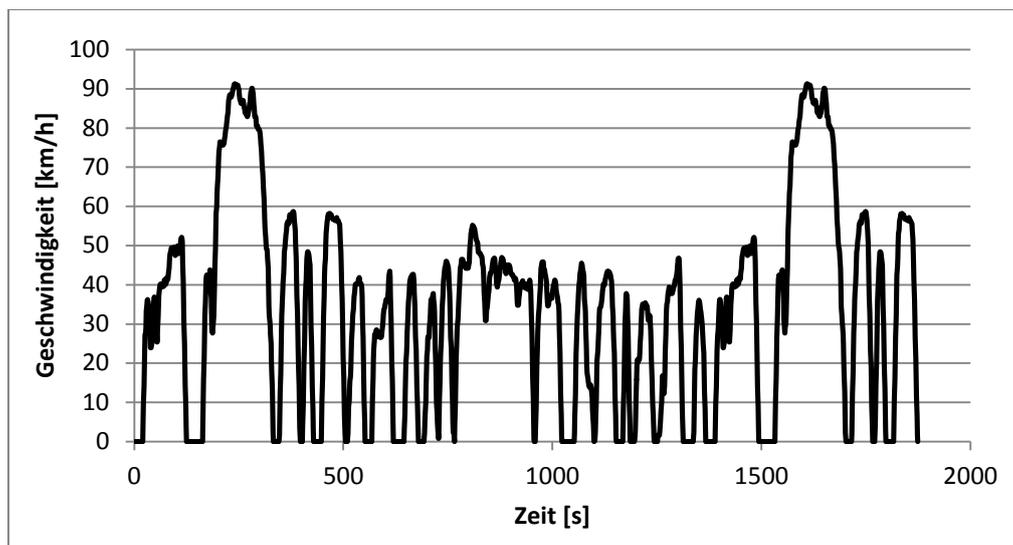
**Abbildung 22:** Common Artemis Driving Cycle (CADC)

- **ERMES** (European Research on Mobile Emission Sources) ist seit 2009 eine Gruppe bestehend aus europäischen Forschungseinrichtungen, Behörden und Verbänden, mit dem Ziel der kooperativen Forschung im Bereich Emissions Modellierung. Da das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz eine Forschungseinrichtung dieser Gruppe ist, wurde daraus der abgebildete Zyklus verwendet.



**Abbildung 23:** ERMES-Zyklus

- **FTP 75** (Federal Test Procedure) aus dem Jahr 1975 zur Bestimmung der Abgasemissionen und des Kraftstoffverbrauches von Personenkraftwagen in den USA. Dieser Zyklus ist realen Fahrbedingungen nachempfunden.



**Abbildung 24:** Federal Test Procedure (FTP 75)

### 3.1.1.2 Fahrzyklen basierend auf realen Messfahrten

Aus einer vorangegangenen Diplomarbeit am IVT wurden eine Teststrecke und sechs darauf basierende Zyklen (**Tabelle 7**) für diese Arbeit übernommen [3]. Die Beschreibung dieser Strecke befindet sich anschließend in dem Kapitel zu den durchgeführten Fahrzeugmessungen (Kapitel 4). Die Zyklen wurden aus Fahrten mit einem konventionellen Diesel-PKW (Bezeichnung: „Konvent“) und einem Elektrohybrid-PKW (Bezeichnung: „Hybrid“) ermittelt. Die Fahrer wurden angehalten drei verschiedene Fahrstile, normal, aggressiv und ökonomisch, anzuwenden (siehe **Tabelle 6**). Die Ergebnisse der daraus resultierenden Messfahrten wurden mit einem Verfahren, aus einer an der TU Graz durchgeführten Dissertation, auf repräsentative Teilstrecken reduziert. Diese jeweilige Teilstrecke überschreitet keine zulässige Abweichung von definierten Beurteilungsgrößen, wie zum Beispiel der durchschnittlichen Motorleistung, Stillstandsauer oder dem Kraftstoffverbrauch. Als Ergebnis beträgt die durchschnittliche Abweichung aller Beurteilungsgrößen im Vergleich zur gesamten Messfahrdauer weniger als vier Prozent und die Dauer von acht Minuten wird von keinem Zyklus überschritten.

<i>Fahrstil</i>	<i>Erklärung</i>
normal	Fahrer sollte seinen üblichen Fahrstil anwenden
aggressiv	Fahrer wurde mit der Vorgabe, das Ziel in möglichst kurzer Zeit zu erreichen auf die Teststrecke geschickt
ökonomisch	Fahrer sollte versuchen, den Kraftstoffverbrauch möglichst niedrig zu halten, mit zum Beispiel sehr vorausschauender Fahrweise

**Tabelle 6:** Fahrstile der Zyklen [3], S.21

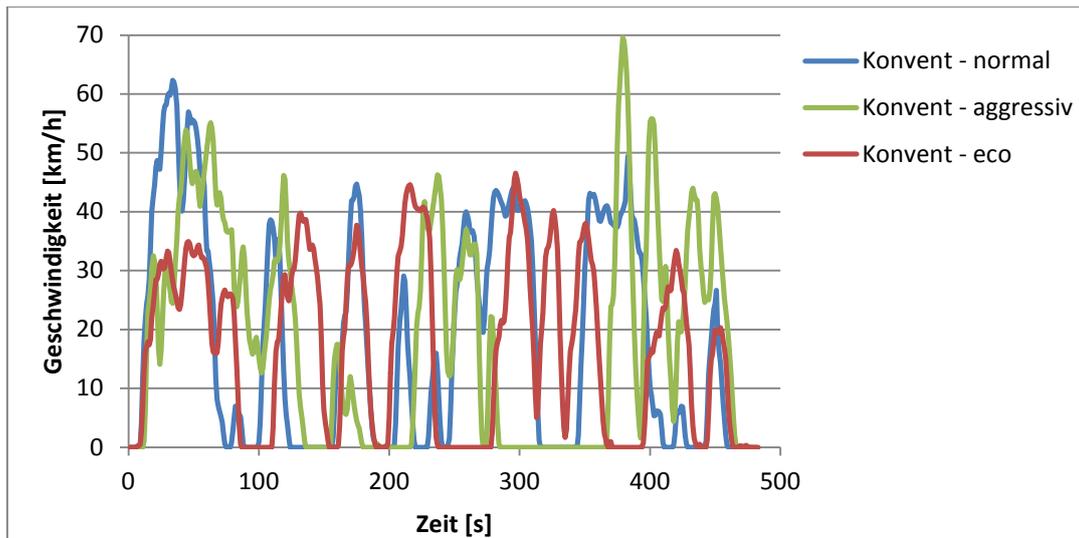


Abbildung 25: „Konvent“ Zyklen

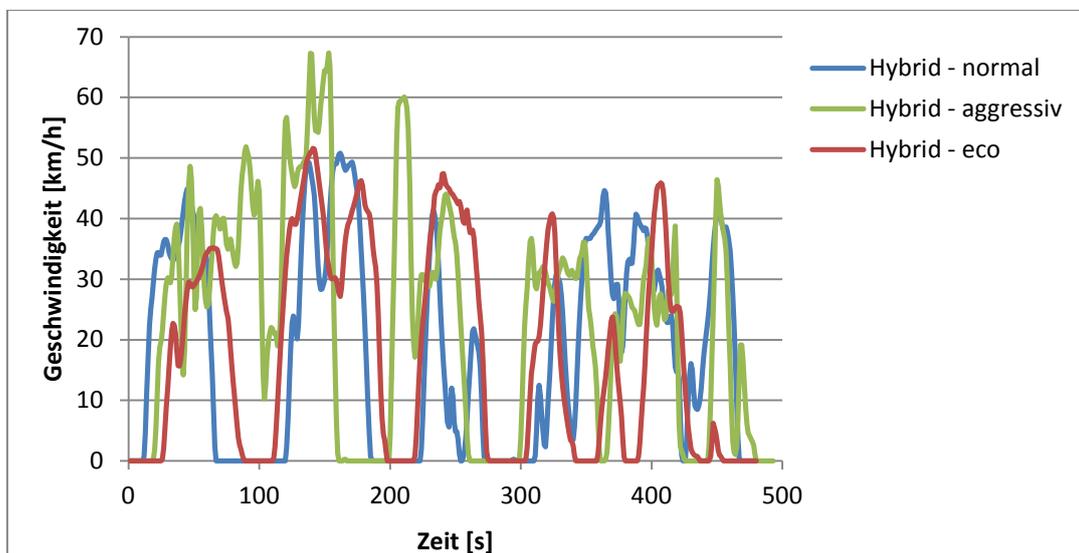


Abbildung 26: „Hybrid“ Zyklen

Zyklusbezeichnung	Messfahrzeug	Fahrstil	Strecke	$a_{neg50}$	$a_{pos50}$
[-]	[-]	[-]	[km]	[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]
Konvent - normal	Diesel-PKW	normal	2.46	-0.47	0.54
Konvent - aggressiv	Diesel-PKW	aggressiv	2.46	-0.59	0.60
Konvent - eco	Diesel-PKW	ökonomisch	2.28	-0.41	0.44
Hybrid - normal	Hybrid-PKW	normal	2.43	-0.39	0.50
Hybrid - aggressiv	Hybrid-PKW	aggressiv	2.93	-0.41	0.52
Hybrid - eco	Hybrid-PKW	ökonomisch	2.33	-0.40	0.43

Tabelle 7: Zyklen auf Basis realer Messfahrten

$a_{neg50}$

Perzentilwert P<sub>50</sub> der negativen Beschleunigung

$a_{pos50}$

Perzentilwert P<sub>50</sub> der positiven Beschleunigung

### 3.1.2 Fahrzyklen Anpassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Tool erstellt, dessen Grundlage eine Längsdynamikrechnung ist, mit Hilfe dieser eine Anpassung der Geschwindigkeitsverläufe von Fahrzyklen, an frei wählbare maximale Getriebe Ausgangs- und Eingangsleistungen, möglich ist. Auf diese Weise kann der Einfluss des Fahrverhaltens, in Bezug auf negatives und positives Beschleunigungsverhalten des Fahrers, auf den Kraftstoffverbrauch abgebildet werden. Der Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch zeigt sich zum Beispiel dadurch, dass sobald die maximale negative Grenzleistung der E-Maschine durch zu starkes Abbremsen unterschritten wird, diese Energie aus der Überschreitung durch die konventionelle Bremse vernichtet wird. D.h. die E-Maschine kann die hohen erzeugten Bremsleistungen nicht zur Gänze in elektrische Energie umwandeln und dadurch gehen die über die E-Maschinen-Leistungsgrenze auftretenden Energien durch Umwandlung in Wärme, in der konventionellen Bremse, verloren. Des Weiteren lässt sich der Einfluss diverser auftretender Beschleunigungs- und Bremsleistungen auf den Verbrauch darstellen.

#### 3.1.2.1 Formeln der Zyklus-Anpassung

Die im nun folgenden Kapitel angeführten Formeln dienen zur Erstellung der Längsdynamikrechnung und bilden die Basis der Geschwindigkeitsanpassung von Zyklen, auf dessen Ansatz genauer eingegangen wird.

Die angeführte **Formel 12** beschreibt die zum Antrieb eines Fahrzeuges erforderliche Leistung am Rad, die zum Überwinden der Fahrwiderstände erforderlich ist. Diese Leistung muss bei einem Elektrohybrid-PKW durch die Verbrennungskraftmaschine und/oder die E-Maschine, übertragen durch zwischen Rad und Antriebsmaschine liegende Bauteile, aufgebracht werden. Oder diese Leistung wird im Schubtrieb erzeugt.

**Formel 12:** Leistung die am Rad zur Überwindung der Fahrwiderstände benötigt wird

$$P_{Rad} = P_R + P_L + P_S + P_B$$

$P_R$ [W]	Leistung zum Überwinden des Rollwiderstandes
$P_L$ [W]	Leistung zum Überwinden des Luftwiderstandes
$P_S$ [W]	Leistung zum Überwinden des Steigungswiderstandes
$P_B$ [W]	Leistung zum Überwinden des Beschleunigungswiderstandes

**Formel 13:** Leistung zum Überwinden des Rollwiderstandes  $P_R$  [5], S.62

$$P_R = (F_{r0} + F_{r1} \times v + F_{r4} \times v^4) \times (m_{Fzg} + m_{Beladung}) \times g \times v$$

$F_{r0}, F_{r1}, F_{r4}$ [-]	Rollwiderstandskoeffizienten
$v$ [m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit
$m_{Fzg}$ [kg]	Fahrzeugmasse
$m_{Beladung}$ [kg]	Masse der Fahrzeugbeladung
$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung

**Formel 14:** Leistung zum Überwinden des Luftwiderstandes  $P_L$  [5], S.62

$$P_L = c_w \times A_{\text{quer}} \times \frac{\rho}{2} \times v'^3$$

$c_w$ [-]	Luftwiderstandsbeiwert
$A_{\text{quer}}$ [m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche des Fahrzeuges
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Luft
$v'$ [m/s]	Relativgeschwindigkeit des Fahrzeuges zur anströmenden Luft

**Formel 15:** Leistung zum Überwinden der Steigung  $P_S$  [5], S.61

$$P_S = (m_{\text{Fzg}} + m_{\text{Beladung}}) \times g \times \text{Stg} \times 0.01 \times v$$

$m_{\text{Fzg}}$ [kg]	Fahrzeugmasse
$m_{\text{Beladung}}$ [kg]	Masse der Fahrzeugbeladung
$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
Stg [%]	Fahrbahnsteigung
$v$ [m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit

**Formel 16:** Leistung zum Überwinden des Beschleunigungswiderstandes  $P_B$  [4], S.16

$$P_B = (m_{\text{Fzg}} + m_{\text{Beladung}} + m_{\text{Rot}}) \times a \times v$$

$m_{\text{Fzg}}$ [kg]	Fahrzeugmasse
$m_{\text{Beladung}}$ [kg]	Masse der Fahrzeugbeladung
$m_{\text{Rot}}$ [kg]	äquivalente rotatorische Masse
$a$ [m/s <sup>2</sup> ]	Fahrzeugbeschleunigung
$v$ [m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit

**Formel 17:** Äquivalente rotierende Masse  $m_{Rot}$  [4], S.16

$$m_{rot} = \frac{I_{Räder}}{r_{Räder}^2} + I_{Mot} \times \left( \frac{i_{Achse} \times i_{Gang}}{r_{Räder}} \right)^2 + I_{Getriebe} \times \left( \frac{i_{Achsen}}{r_{Räder}} \right)^2$$

$I_{Räder}$ [ $\text{kgm}^2$ ]	Trägheitsmasse der Räder
$r_{Räder}$ [m]	dynamischer Raddurchmesser
$I_{Mot}$ [ $\text{kgm}^2$ ]	Massenträgheitsmoment des Motors
$i_{Achse}$ [-]	Achsübersetzung
$i_{Gang}$ [-]	Getriebeübersetzung
$I_{Getriebe}$ [ $\text{kgm}^2$ ]	Massenträgheitsmoment des Getriebes

Der erste Teil zur Berechnung der äquivalenten rotierenden Masse ( $m_{Rot}$ ), kann mit

$$M_{equivalent\_rot} = \frac{I_{Räder}}{r_{Räder}^2} = m_{alleRäder} \times 0.5 \text{ [4] ersetzt werden, da die Räder mit ausreichender}$$

Genauigkeit für die Simulation als Zylinder ( $I_{Zylinder} = \frac{m \times r^2}{2}$ ) angenommen werden. [5]

Die Leistung welche am Getriebe für den Vortrieb aufzubringen ist oder für die Rekuperation zur Verfügung steht, wird über die Wirkungsgrade des Getriebes ( $\eta_{Getriebe}$ ) und der Wirkungsgrade der zwischen Getriebe und Rädern befindlichen Differenziale ( $\eta_{Differenziale}$ ) berechnet.

Dies bedeutet falls sich das Fahrzeug im Schubbetrieb befindet, d.h. die Leistung am Rad kleiner Null ( $P_{Rad} < 0$ ) ist, wird die entstehende Leistung am Getriebe mit

$$P_{Getriebe} = P_{Rad} \times \eta_{Differenziale} \times \eta_{Getriebe} \text{ berechnet.}$$

Und falls das Fahrzeug angetrieben werden muss ( $P_{Rad} > 0$ ), wird die aufzubringende Leistung

$$\text{mit } P_{Getriebe} = \frac{P_{Rad}}{(\eta_{Differenziale} \times \eta_{Getriebe})} \text{ berechnet.}$$

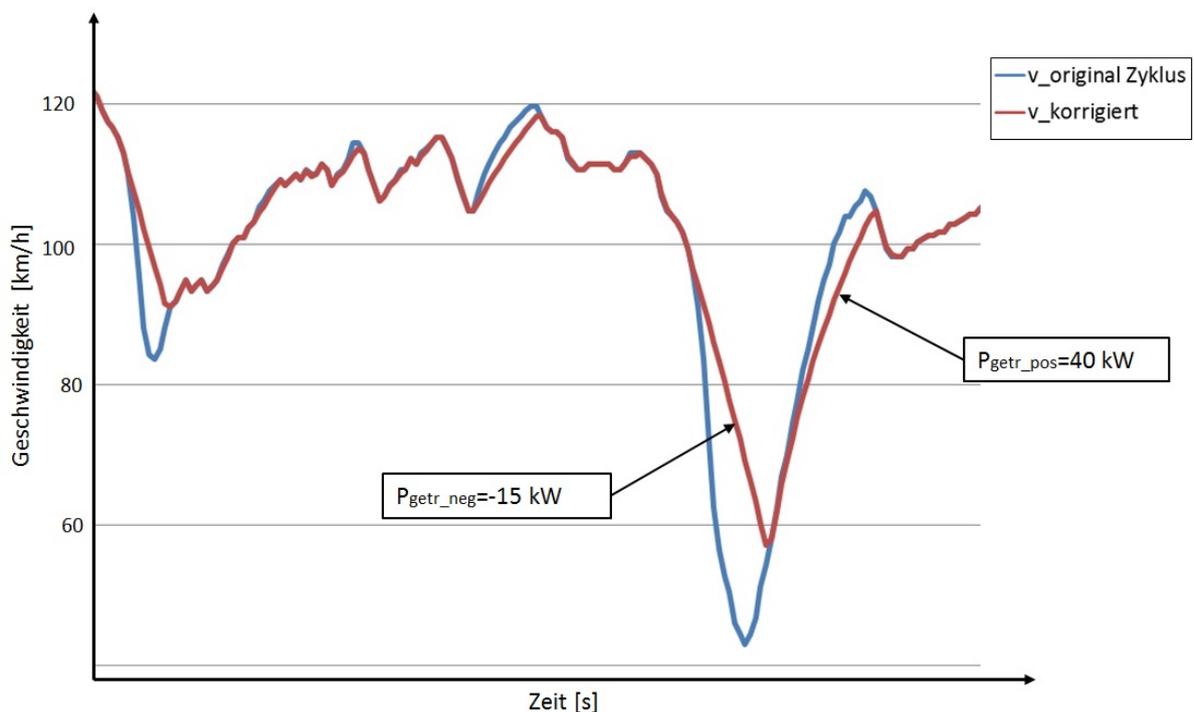
### 3.1.2.2 Vorgehensweise bei der Anpassung von Fahrzyklen an vorgegebenen Getriebeleistungen

Um später mit PHEM die Auswirkung verschiedener positiver und negativer Beschleunigungswerte bei HEV simulieren zu können, dient der originale Zyklus als Grundlage der Berechnung, mit den Werten der Geschwindigkeit, der Steigung und eventuell des Ganges über der Zeit. In dem neuentwickelten Tool wird mittels Längsdynamikrechnung mit den Eingabewerten für die Fahrzeugmasse, der Zuladung, den Strömungswiderstandsbeiwert, der Querschnittsfläche, den Rollwiderstandsbeiwerten, den Getriebedaten, etc. und dem original Zyklus im ersten Schritt die erforderliche Radleistungen errechnet.

Um die Geschwindigkeitsverläufe an eine gewünschte negative und positive Getriebeleistung anzupassen, wird aus der erforderlichen Radleistung ( $P_{Rad} = P_R + P_L + P_S + P_B$ , **Formel 12**) und der in der zur Überwindung des Beschleunigungswiderstandes ( $P_B = (m_{Fzg} + m_{Beladung} + m_{rot}) \times a_t \times v$ , **Formel 16**) enthaltenen Beschleunigung ( $a_t = \frac{v_{t+1} - v_t}{\Delta t}$ ), die erforderliche Geschwindigkeit des nächsten Zeitschrittes kalkuliert. Da in

PHEM ein Zeitschritt genau eine Sekunde beträgt, wird ebenfalls mit dieser Schrittweite gerechnet ( $\Delta t = (t+1) - t$ ). In dem erzeugten Tool werden die Steigungen des Geschwindigkeitsverlaufes an eine minimale und maximale Getriebeleistung und daraus realisierbaren Beschleunigungswerte angepasst. Der Geschwindigkeitsverlauf wird möglichst am originalen Zyklus gehalten. Durch weitere, hier nicht näher angeführte Bedingungen, wird in der Berechnung ein möglichst homogener Verlauf angestrebt. Dies zeigt sich zum Beispiel dadurch, dass große Sprünge innerhalb eines Zeitschrittes, durch Verwendung der originalen Geschwindigkeit des Ausgangszyklus geglättet werden. Falls keine Anpassung notwendig ist, wird die Geschwindigkeit des Ausgangszyklus beibehalten.

In **Abbildung 27** ist beispielhaft ein Ausschnitt (ca. 170 Sekunden) einer Anpassung eines CADC Motorway Zyklus angeführt, dargestellt mit einem VW Jetta Hybrid PHEM-Modell (siehe 3.2.1) und einer resultierenden Leistung am Getriebe ( $P_{Getr}$ ) von minimal -15 kW und einer maximalen Leistung von 40 kW.



**Abbildung 27:** Ausschnitt aus CADC Motorway Zyklus mit Anpassung

$v_{original}$ Zyklus	Geschwindigkeit des original CADC Motorway Zyklus
$v_{korrigiert}$	an Getriebeleistungen angepasste Geschwindigkeit
$P_{getr\_neg}$	vorgegebene Limits für am Getriebe minimal auftretende negative Leistung
$P_{getr\_pos}$	vorgegebene Limits für am Getriebe maximal auftretende positive Leistung

Der zuvor skizzierte Ausschnitt stellt ein Extrem an Geschwindigkeitsabweichung zwischen der angepassten und originalen Geschwindigkeit dar, da an den meisten Stellen die Abweichungen des gesamten Zyklus von geringerem Ausmaß sind. Wie man jedoch gut erkennen kann werden an einigen Punkten geringere Geschwindigkeiten erreicht, da weniger stark gebremst wird, jedoch der Bremsvorgang zum gleichen Zeitpunkt eingeleitet wird. Die höchsten Geschwindigkeitspunkte werden darüber hinaus nicht erreicht, da weniger Leistung zum Beschleunigen abgerufen wird. Ein Grund hierfür liegt darin, dass jeweils der nächstfolgende Zeitschritt berechnet wird und nicht schon vorige Zeitschritte mit angepasst werden. Jedoch bleibt die Dauer der Zyklen unverändert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Geschwindigkeitsverläufe zusätzlich mit einer aufwendigeren Methode angepasst. Dabei wurden die Zyklen durch eine Berechnung vom letzten, hin zum ersten Zeitschritt angepasst und die Geschwindigkeit, mit früher eingeleiteten Bremsungen, über der Strecke kalkuliert. Bei anschließenden Simulationen mit demselben VW Jetta Hybrid PHEM-Modell (siehe 3.2.1) zeigte sich, dass zwischen der ursprünglichen Anpassungsmethode und der weitaus zeitaufwendigeren bzw. fehleranfälligeren Berechnung die Verbrauchsunterschiede vernachlässigbar gering waren. Dieses Ergebnis ist dadurch begründet, dass bei früh eingeleiteten Bremsungen die eventuell zuvor benötigte hohe Leistung, zum Erreichen von Geschwindigkeitsanstiegen, erst gar nicht aufzubringen ist. Diese früher liegenden Punkte werden überhaupt nicht erreicht, da stattdessen die Bremsung eingeleitet wird. Auf Grund dieser geringen Unterschiede wird mit der ursprünglichen, am Anfang dieses Abschnittes näher beschriebenen, Methode gerechnet.

Um die Güte der Anpassung bezüglich der Überschreitungen von erwünschten bzw. vorgegebenen Leistungen zu kontrollieren, wurden 12 Zyklen mit den Daten des ersten Simulationsmodell (siehe 3.2.1) an eine maximale positive Getriebeleistung von 40 kW und eine maximale negative Leistung von -15 kW angepasst. Das Ergebnis dazu ist auf der nächsten Seite in **Tabelle 8** visualisiert. Falls es zu Überschreitungen der Vorgaben kommt, sind diese von sehr kurzer Dauer und haben somit einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Ergebnisse.

<i>Zyklus</i>	<i>Dauer</i>	<i>Überschreitungen</i>	<i>überschritten</i>	<i>max. Wert</i>	<i>min. Wert</i>
[-]	[s]	[s]	[% der Dauer]	[kW]	[kW]
CADC Motorway	1068	9	0.84%	45.8	-
CADC Road	1082	3	0.28%	43.6	-25.1
CADC Urban	993	0	0.00%	-	-
ERMES_V7	1308	1	0.08%	50.3	-
FTP75_5Gang	1874	0	0.00%	-	-
Hybrid_aggressiv	493	3	0.61%	41.1	-
Hybrid_eco	480	0	0.00%	-	-
Hybrid_normal	480	0	0.00%	-	-
Konvent_aggressiv	482	2	0.41%	41	-
Konvent_eco	483	0	0.00%	-	-
Konvent_normal	478	0	0.00%	-	-
NEDC_6Gang	1181	0	0.00%	-	-
<b>Summe</b>	<b>11583</b>	<b>18</b>	<b>0.16%</b>	<b>50.3</b>	<b>-25.1</b>

**Tabelle 8:** Güte der Zyklenanpassung

Überschreitungen	Summe der Zeitschritte in denen die Vorgaben bezüglich der aufzutretenden maximalen neg. und pos. Leistungen nicht eingehalten werden
überschritten	prozentueller Anteil der Überschreitungen an der gesamten Zyklusdauer
max. Wert	positiver Maximalwert der auftretenden Überschreitungen
min. Wert	negativer Minimalwert der auftretenden Überschreitungen

## 3.2 Fahrzeugsimulation mit angepassten Fahrzyklen

### 3.2.1 Fahrzeugauswahl und PHEM-Modell

Da sich durch den Aufbau der PHEM HEV-Erweiterung klare Vorteile bei der Simulation von Parallel-Hybrid-Fahrzeugen zeigen, war dies einer der ersten Kriterien bei der Fahrzeugauswahl. Die Vorteile begründen sich zum Beispiel dadurch, dass PHEM auf Stirnradgetriebe ausgelegt ist und diese vorrangig bei Parallel-Hybriden, im Gegensatz zu Leistungsverzweigten Hybriden, zum Einsatz kommen. Nach einer Recherche des, immer noch relativ kleinen, Hybridmarktes stellte sich der VW Jetta Hybrid als optimales Fahrzeug für diese Arbeit heraus (Technische Daten, **Tabelle 9**). Die Gründe hierfür liegen darin, dass es sich um einen Parallelhybrid, der mit einem EU6-Benzinmotor inklusive einem Siebengang-Doppelkupplungsgetriebe und dazwischen liegender E-Maschine handelt. All das in Kombination mit einer Lithium-Ionen-Batterie. Da es sich um ein konventionelles Fahrzeug handelt, das durch ein Hybridmodul (E-Maschine, Leistungselektronik, HV-Batterie) erweitert wurde, zeigten sich hier Parallelen zur Erweiterung der PHEM Grundversion durch den HEV-Teil. Dadurch konnte eine bestmögliche Abbildung der Realität erwartet werden.

<b>Bezeichnung</b>		<b>VW Jetta Hybrid</b>
Hersteller		Volkswagen AG
Modelljahr		2013
<b>Antrieb</b>		
Bauart VKM		Otto-Turbomotor
Einspritzung		Direkteinspritzung
Hubraum	[cm <sup>3</sup> ]	1395
max. Benzinmotor Leistung	[kW]	110
	[min <sup>-1</sup> ]	5000-6000
max. Benzinmotor Drehmoment	[Nm]	250
	[min <sup>-1</sup> ]	1600-3500
Emissionsklasse		EU6
Bauart E-Maschine		wassergekühlte permanenterregte Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten
max. elektr. Antriebsleistung E-Maschine	[kW]	20
max. elektr. Generatorleistung E-Maschine	[kW]	-28
bei Drehzahl	[U/min]	2500
max. E-Motor Drehmoment	[Nm]	150
Hybridart		Parallel-Hybrid
Gesamtsystem Leistung	[kW]	125
bei Drehzahl	[U/min]	5000
Gesamtsystem Drehmoment	[Nm]	250
bei Drehzahl	[U/min]	1000-4500
<b>Getriebe</b>		
Ganganzahl		7-Gang
Bauart Getriebe		Doppelkupplung-Stirnrad
Getriebeübersetzungen		
1. Gang	[-]	3.5
2. Gang	[-]	2.09
3. Gang	[-]	1.34
4. Gang	[-]	0.93
5. Gang	[-]	0.97
6. Gang	[-]	0.78
7.Gang	[-]	0.65
Achsübersetzung		
1. - 4. Gang	[-]	4.44
5. - 7. Gang	[-]	3.23
<b>Fahrzeugdaten</b>		
Leergewicht	[kg]	1505
ad Leergewicht		mit Fahrer (68 kg), 7 kg Gepäck und 90 % Tankfüllung
Tankvolumen	[Liter]	45
cw-Wert	[-]	0.277

Stirnfläche	[m <sup>2</sup> ]	2.2
Lenkung		Elektromechanisch (Zahnstangenlenkung)
<b>Batterie</b>		
Typ		Lithium-Ionen
Nom. Zell Spannung	[V]	3.7
Nom. Zell Kapazität	[Ah]	5
Anzahl der Zellen	[-]	60
Spannung	[V]	222
Energie	[kWh]	1.1
<b>Rein elektrisches Fahren</b>		
E-Mode Taste (rein elektr. Fahren)		ja
max. E-Mode Reichweite	[km]	2
max. E-Mode Geschwindigkeit	[km/h]	70
<b>Kraftstoffverbrauch</b>		
Normverbrauch	[L/100km]	4.1

**Tabelle 9:** Technische Daten VW Jetta Hybrid

(Quellen die sich nicht auf die Herstellerangaben aus [10], [7] beziehen, sind extra angeführt)

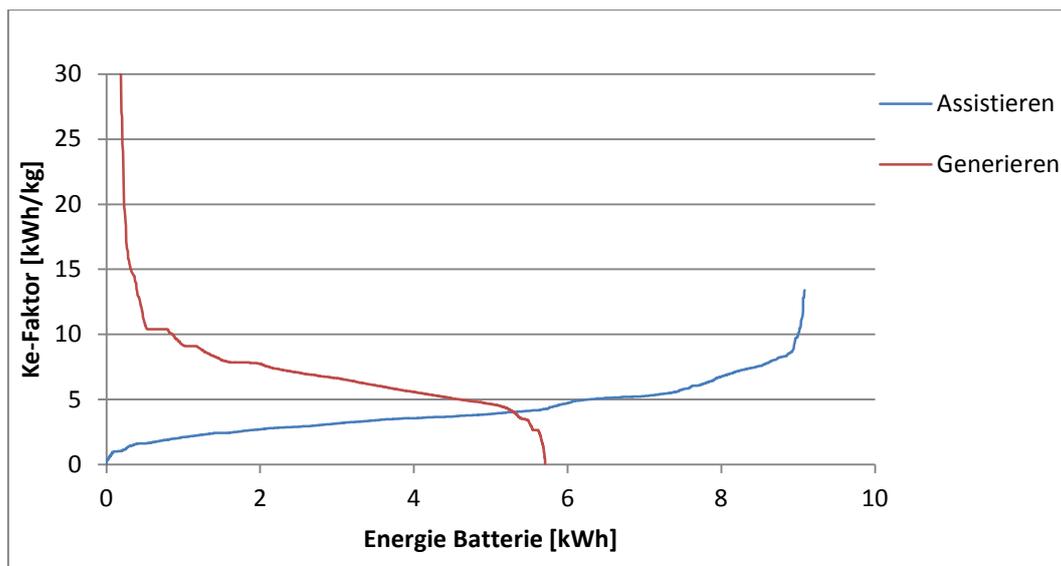
Mit Hilfe dieser in **Tabelle 9** angeführten Werte und weiteren Daten wurde ein PHEM-Simulations-Modell aufgestellt.

Diese weiteren Daten zur Erstellung dieses ersten VW Jetta Hybrid PHEM-Modells sind:

- Motorkennfeld eines durchschnittlichen EU6-Benzinmotors, generiert aus der Datenbank des IVT
- Volllastkurve nachgebildet [12]
- Trägheitsmassen (Motor und Getriebe) aus Erfahrungswerten IVT
- Rollwiderstandsbeiwerte eines Toyota Prius [3]
- Keine Zusatzverbraucher
- Temperaturverhalten der Batterie vernachlässigt
- Mechanische E-Maschinen Generatorleistung: -28 kW
- STE-Hybridsteuerkennlinie nach dem Verfahren laut 2.2.2.2, Steuerkennlinie der Hybrid-Betriebsstrategie (STE) für CADC, ERMES und NEDC Zyklen erzeugt

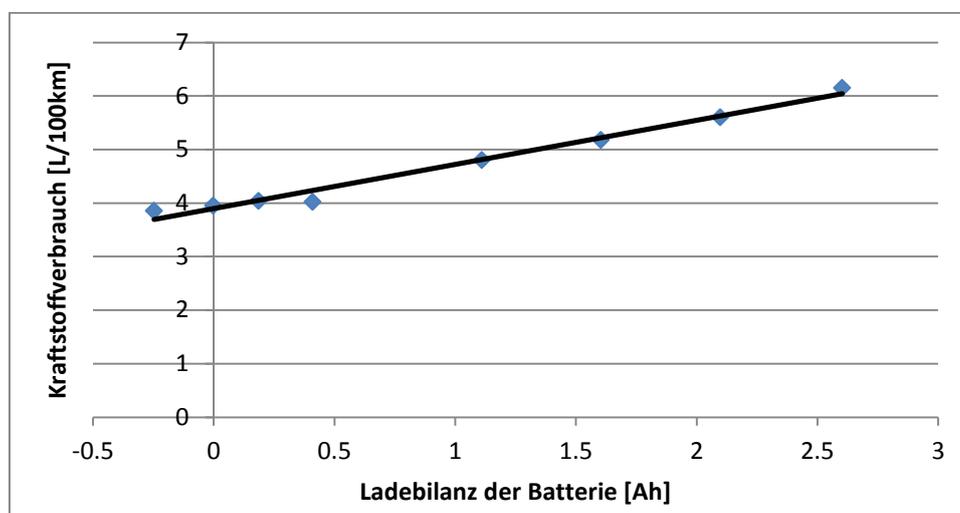
- Zyklus	Einheit	Verbrauch
NEDC	[L/100km]	4.0
CADC	[L/100km]	4.6
ERMES	[L/100km]	4.6
FTP 75	[L/100km]	3.9
NEDC, ERMES und CADC durchgehend simuliert	[L/100km]	4.5

**Tabelle 10:** Simulationsergebnisse mit dem ersten Jetta-PHEM-Modell



**Abbildung 28:** STE-Steuerlinie VW Jetta Hybrid PHEM Modell

Dieses erzeugte Simulationsmodell konnte mit Hilfe der Angabe des Normverbrauchwertes (siehe 2.3) evaluiert werden. Dabei konnte der NEDC-Verbrauchswert mit einer Abweichung geringer als 5 Prozent erreicht werden. Von entscheidender Bedeutung ist dabei, dass sich der Verbrauch auf eine ausgeglichene Ladebilanz der Batterie bezieht (**Formel 10** und **Abbildung 29**). Dazu wurde das Fahrzeug mit acht verschiedenen, mit jeweils 10 Prozent unterschiedlichem, SOC-Startwerten simuliert. Diese Verbrauchswerte sind in **Abbildung 29** als blaue Vierecke aufgetragen, daran wird eine Gerade angeglichen und damit wurde der Verbrauch bei einer ausgeglichenen Ladebilanz berechnet (siehe 2.3.2.1). Dies bedeutet der kalkulierte Wert ist jener bei dem gleich viel Energie der Batterie zugeführt wie entnommen wird und somit der Anfangsbatterieladezustand keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die Batterieladebilanz hat sich als besonders wichtig während der Erstellung dieser Arbeit gezeigt. Auf Grund der Berücksichtigung der Ladebilanz, gestaltet sich die Simulation von Hybridfahrzeugen und vor allem die Auswertung der Ergebnisse erheblich aufwendiger als bei konventionellen PKWs. Die Simulationsergebnisse erstellt mit dem ersten VW Jetta Hybrid-PHEM-Modell sind auf der vorhergehenden Seite in Tabelle 10 dargestellt und beziehen sich ebenfalls auf eine ausgeglichene Batterie-Ladebilanz.

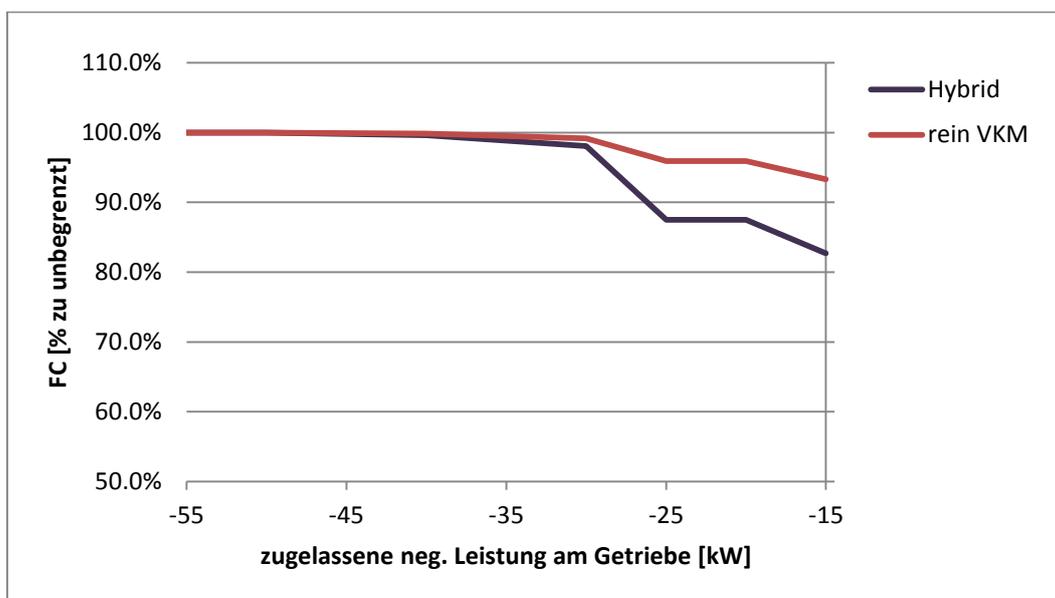


**Abbildung 29:** NEDC-Kraftstoffverbrauch mit erstem Jetta-PHEM-Modell mit acht verschiedenen SOC-Start-Niveaus

### 3.2.2 ECO-Drive Anforderungen

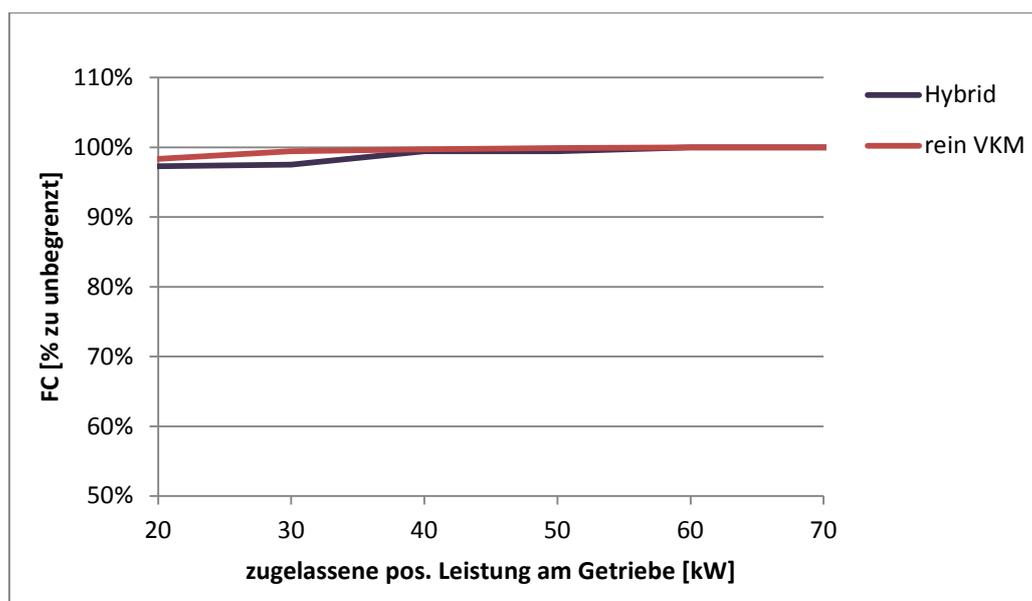
Mit den an Getriebeleistungen angepassten Fahrzyklen und dem erzeugten PHEM-Modell des VW Jetta Hybrid können die Anforderungen an ökonomisches Fahren von Hybridfahrzeugen (ECO-Drive) dargestellt werden. Dazu sind die Ergebnisse der Simulation eines mit aggressiver Fahrweise aufgenommenem Zyklus (**Abbildung 25**) mit verschiedenen angepassten Getriebeleistungen dargestellt. Einmal abgebildet für die resultierenden bzw. bei der Anpassung zugelassenen min. Leistungen am Getriebe von -55 bis -15 kW (**Abbildung 30**) und einmal abgebildet für die positiv max. zugelassenen Leistungen von 20 bis 70 kW (**Abbildung 31**). Die Ordinatenbeschriftungen beziehen sich dabei auf die Verbräuche in den angepassten Zyklen im Verhältnis zu dem Verbrauch im originalen, unangepassten, Zyklus. D.h. wie viel Kraftstoff verbraucht der PKW prozentuell weniger durch die Änderung der Zyklen bzw. des Beschleunigungsverhaltens und dies bezogen auf eine jeweils ausgeglichene Batterie-Ladebilanz. Um den Einfluss der Zyklusanpassung an sich darzustellen, wurde ein VW Jetta Modell ohne Hybridkomponenten simuliert und die Verbrauchsunterschiede ebenfalls auf die Simulation mit den angepassten Zyklen im Vergleich zu dem Verbrauch im originalen Zyklus berechnet.

In **Abbildung 30** sind verschiedene Bremsverhalten durch die Änderung der auftretenden negativen Leistungen im Zyklus dargestellt. Die positiven Leistungen wurden dabei nicht verändert. Man kann erkennen, dass sich in dem Bereich der maximal rekuperierbaren E-Maschinen Leistung, d.h. der Bereich um -28 kW, das höchste Kraftstoffsparpotential ausbildet. In den umgebenden Bereichen liegt die Kraftstoffersparnis vor allem an den geringeren Geschwindigkeiten, d.h. an der Zyklusanpassung selbst. Der Grund für den steileren Anstieg der Kurve des Hybrid-PKW's (violette Kurve in **Abbildung 30**) ist, dass sobald die maximale negative Grenzleistung der E-Maschine durch zu starkes Abbremsen unterschritten wird diese Energie aus der Überschreitung durch die konventionelle Bremse vernichtet wird. Das heißt sobald zu stark gebremst wird, geht Energie durch Umwandlung in Wärme verloren und diese wird nicht in elektrische Energie transformiert. Diese Wärme kann somit zu keinem späteren Zeitpunkt für den Antrieb genutzt werden.



**Abbildung 30:** Auf negative Leistung begrenzter Konvent aggressiv Zyklus mit dem ersten Jetta-PHEM-Modell

Durch die Verringerung der benötigten positiven Leistung, d.h. durch weniger starkes Beschleunigen, ist kein so großes Kraftstoffsparpotential wie durch weniger starkes Bremsen zu erzielen (**Abbildung 31**). Der verminderte Kraftstoffverbrauch zeigt sich hier fast ausschließlich durch den veränderten Zyklus an sich, den daraus resultierenden niedrigeren Geschwindigkeiten und somit geringeren benötigten Leistung. Die größte Abweichung zwischen den Kurven in **Abbildung 31** kann dadurch erklärt werden, dass bei niedrigeren geforderten Antriebsleistungen alleine oder zu einem größeren Teil durch die E-Maschine angetrieben werden kann. Die Kraftstoffersparnis resultiert hier aus dem besseren Wirkungsgrad des elektrischen Antriebszweiges, gegenüber dem der VKM.



**Abbildung 31:** Positive Leistung begrenzter Konvent aggressiv Zyklus mit dem ersten Jetta-PHEM-Modell

Als Schlussfolgerung aus den angeführten Simulationen sei erwähnt, dass das Bremsverhalten des Fahrerers einen weitaus größeren Einfluss auf den Verbrauch eines Hybrid-Elektrofahrzeuges hat, als das Beschleunigungsverhalten. Um einen niedrigen Verbrauch zu erzielen sollte also möglichst am Punkt maximaler Generatorleistung der E-Maschine, ohne Verwendung der konventionellen Bremse, gebremst werden.

## 4 Fahrversuche mit HEV-PKW

Hier werden die aus dem vorhergehenden Kapitel erzielten Schlussfolgerungen, bezüglich der Simulation der ECO-Drive Anforderungen von HEV-PKW, durch reale Messfahrten verifiziert oder gegebenenfalls falsifiziert. Dazu diente die reale Vorlage des Simulationsmodells als Versuchsfahrzeug, in diesem Fall ein VW Jetta Hybrid aus dem Jahr 2013. Dieses Hybridfahrzeug wurde mit Onboard-Emissionsmessgeräten ausgestattet und mit verschiedenen Fahrern auf Messfahrten geschickt. Dabei wurden auf zwei Teststrecken unterschiedliche zuvor definierte Fahrweisen vollzogen, um daraus die Einflüsse dieser Fahrweisen auf den Kraftstoffverbrauch zu eruieren. Die ersten drei Messfahrten wurden auf einer ca. 83 km langen Strecke von Graz nach Mixnitz und wieder zurück, inklusive einem Stadt-, Überland- und Autobahnteil, mit drei verschiedenen Fahrweisen durchgeführt (Bezeichnung: „Mixnitzrunde“). Weitere Messfahrten wurden mit vier Fahrern und jeweils fünf unterschiedlichen Fahrweisen auf einer Strecke im Raum Graz (**Abbildung 37**) vorgenommen (Bezeichnung: „Stadtrunde“). Die durchgeführten Messfahrten sind in **Tabelle 11** angeführt. Es wird im ersten Schritt die Funktionsweise der verwendeten Messgeräte beschrieben, desweiteren die Teststrecken inklusive der angewandten Fahrweisen erläutert und zum Abschluss die Ergebnisse interpretiert.

<i>Teststrecken- bezeichnung</i>	<i>Durchschnittliche Streckenlänge</i>	<i>Durchschnittliche Einzelfahrdauer</i>	<i>Anzahl der Fahrer</i>	<i>Anzahl der Fahrstile pro Fahrer</i>
	[km]	[min]	[-]	[-]
Mixnitzrunde	82.6	93.2	1	3
Stadtrunde	6.1	17.7	4	5
<i>Summe</i>	<i>Σ absolvierter Messkilometer: 369 km</i>	<i>Σ Messfahrten- dauer: 634 min</i>	<i>Σ Fahrer: 5</i>	<i>Σ Einzelmessfahrten: (1x3+4x5=) 23</i>

**Tabelle 11:** Durchgeführte Messfahrten mit VW Jetta Hybrid

### 4.1 Onboard-Emissionsmessgerät

Die gasförmigen Abgasemissionen des Versuchsfahrzeuges werden direkt während der Fahrt mit Hilfe eines PEMS-Systems (PEMS = Portable Emission Measurement System) gemessen. Dazu werden die Messsysteme im Fahrzeug installiert und der Abgasstrom zeitaufgelöst in Gramm pro Sekunde auf CO<sub>2</sub>-, CO-, NO-, NO<sub>2</sub>- und HC-Emissionen analysiert. Die gesamten Onboard-Messsysteme werden energieautark, d.h. durch eine zusätzliche Batterie, betrieben. Dadurch wird eine Beeinflussung des Energiehaushaltes des Hybrid-PKWs bzw. eine Verfälschung der Ergebnisse durch die Messtechnik ausgeschlossen. Für die Messung der gasförmigen Komponenten wird das SEMTECH-DS System der Firma Sensors benutzt. Dieses besitzt einen beheizten Teil, der die Entnahmeleitung von der Messgassonde, einen beheizten Filter und den FID (Flammen-Ionisations-Detektor) zur Bestimmung der Kohlenwasserstoffe beinhaltet. Die Beheizung auf mindestens 180 °C ist notwendig, um Kondensation von Kohlenwasserstoffen zu verhindern. Ein Teilstrom des Messgases wird zur Trocknung über einen Kühler geführt und anschließend dem NDIR Analysator (Nicht-Dispersiver-Infrarot-Analysator) zur Bestimmung der CO- und CO<sub>2</sub>- Konzentration, dem elektrochemischen O<sub>2</sub>- Analysator und der NDUV-Messbank (Nicht-Dispersive-Ultraviolett-Messbank) zur Bestimmung von NO und NO<sub>2</sub> zugeführt.

Die Trocknung ist notwendig, da diese Messgeräte nicht mit feuchtem Abgas betrieben werden können. Neben dem eigentlichen Analysesystem werden darüber hinaus Daten aus einem GPS-System (Fahrzeuggeschwindigkeit), einem Abgasmassensensor und einem zusätzlichen Sensor zur Erfassung der atmosphärischen Daten gesammelt. Ein im Messsystem angeordneter portabler Computer verwaltet das Gesamtsystem und führt die Daten aus den unterschiedlichen Quellen zusammen.



**Abbildung 32:** Portables Emissions-Messsystem SEMTECH-DS  
(Quelle: <http://www.environmental-expert.com>)

### Daten des SEMTECH-DS der Firma SENSORS

Analysatoren:

- NDIR (nichtdispersiver Infrarot-Analysator) zur Analyse von CO und CO<sub>2</sub>
- FID (Flammen-Ionisations-Detektor) zur Analyse von HC
- NDUV (nichtdispersiver Ultraviolett Analysator) zur Analyse von NO und NO<sub>2</sub>

Elektrische Leistungsaufnahme:

- 840 W während des Aufwärmens
- 360 W im Messbetrieb

Aufzeichnungsrate:

- 1 Hz

#### 4.1.1 Messaufbau im VW Jetta Hybrid



**Abbildung 33:** Messaufbau (1/4): Heckansicht VW Jetta Hybrid



**Abbildung 34:** Messaufbau (2/4): Messstrecke ab Auspuff (Rohr) und Verbindungen zu den Analysatoren im Inneren (Leitungen)



**Abbildung 35:** Messaufbau (3/4): Messtechnik auf der Rücksitzbank und im Kofferraum (Fotografiert durch die fahrerseitige hintere Scheibe)



**Abbildung 36:** Messaufbau (4/4): Fahrerperspektive nach hinten

## 4.2 Teststrecken und Fahrstile

Es wurde, wie zu Beginn dieses Kapitels bereits erwähnt, auf zwei verschiedenen Strecken getestet. Die erste Strecke führt von Graz nach Mixnitz („Mixnitzrunde“) und die zweite befindet sich innerhalb des Grazer Stadtgebietes („Stadtrunde“).

### - **Mixnitzrunde:**

Der Ausgangs- und Endpunkt dieser Runde ist die Inffeldgasse in Graz, in der sich ein Teil des Campus der TU Graz inklusive dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik befindet, und führt bis nach Mixnitz. Diese Strecke beinhaltet Abschnitte im Stadtgebiet sowie Überland- und Autobahnfahrten, mit einer durchschnittlichen Länge von 82.6 km. Es wurden mit einem Fahrer drei verschiedene Fahrweisen angewendet. Diese sind in Anlehnung an **Tabelle 6**, eine Fahrt mit dem üblichen Fahrstil des jeweiligen Fahrers (normal), einer möglichst spritsparenden (eco) und eine mit den Gesetzen konformen jedoch möglichst schnellen Fahrt (aggressiv). Darüber hinaus haben nicht steuerbare Begebenheiten, wie zum Beispiel das Verkehrsaufkommen während der Fahrt ebenfalls einen Einfluss auf die zurückgelegte Strecke und die dafür benötigte Zeit (siehe **Tabelle 12**). Dies wurde in den Auswertungen berücksichtigt. Ein Beispiel hierzu ist, dass eine durch eine Baustelle verursachte und über zehn minütige Stillstandsdauer, mit ausgeschalteter Zündung, nicht in die Ergebnisse miteinging.

<i>Messfahrt</i>	<i>Streckenlänge</i>	<i>Dauer</i>
[-]	[m]	[s]
Mixnitz normal	82224	5233
Mixnitz eco	82615	5831
Mixnitz aggressiv	82965	5709
<b>Durschnitt der Einzelfahrten</b>	<b>82601</b>	<b>5591</b>

**Tabelle 12:** Streckenlängen und Dauer der Mixnitzrunden

### - **Stadtrunde:**

Auf Grund der guten Lage und dem niedrigen Verkehrsaufkommen ist der Startpunkt dieser Runde die Hamerlinggasse in Graz und führt auf den Hauptverkehrsstraßen rund um den Grazer Schlossberg und über den Grazer Hauptbahnhof wieder an den Ausgangspunkt zurück. Somit wird nur im Stadtgebiet und der damit einhergehenden maximal erlaubten Geschwindigkeit von 50 km/h, auf dieser ca. 6 km langen Strecke, gefahren (siehe **Abbildung 37**). Die Anzahl der Fahrstile wurde auf fünf erhöht, um den Einfluss der Fahrweise auf den Verbrauch noch genauer abbilden zu können. (siehe **Tabelle 13**). Diese Fahrweisen wurden von vier verschiedenen Fahrern vollzogen (Bezeichnung der Fahrer: F1 bis F4), weshalb sich hier eine Summe von zwanzig Einzelmessfahrten ergab.

<i>Fahrstile</i>	<i>Erklärung</i>
normal	Üblicher Fahrstil des jeweiligen Fahrers
g100-br100	Fahren mit maximal möglichem Beschleunigen und Bremsen
g40-br100	Verringerte Gaspedalbetätigung (maximal 40 %), jedoch möglichst starkes Bremsen
g100-brHybrid	Maximal mögliches Beschleunigen in Kombination mit bremsen möglichst am Punkt maximaler Generatorleistung der E-Maschine (weitere Erklärung in Abbildung 38)
g-brHybrid	Fahrweise mit möglichst geringem Verbrauch

**Tabelle 13:** Die fünf Fahrstile für die Messfahrten der Stadtrunde

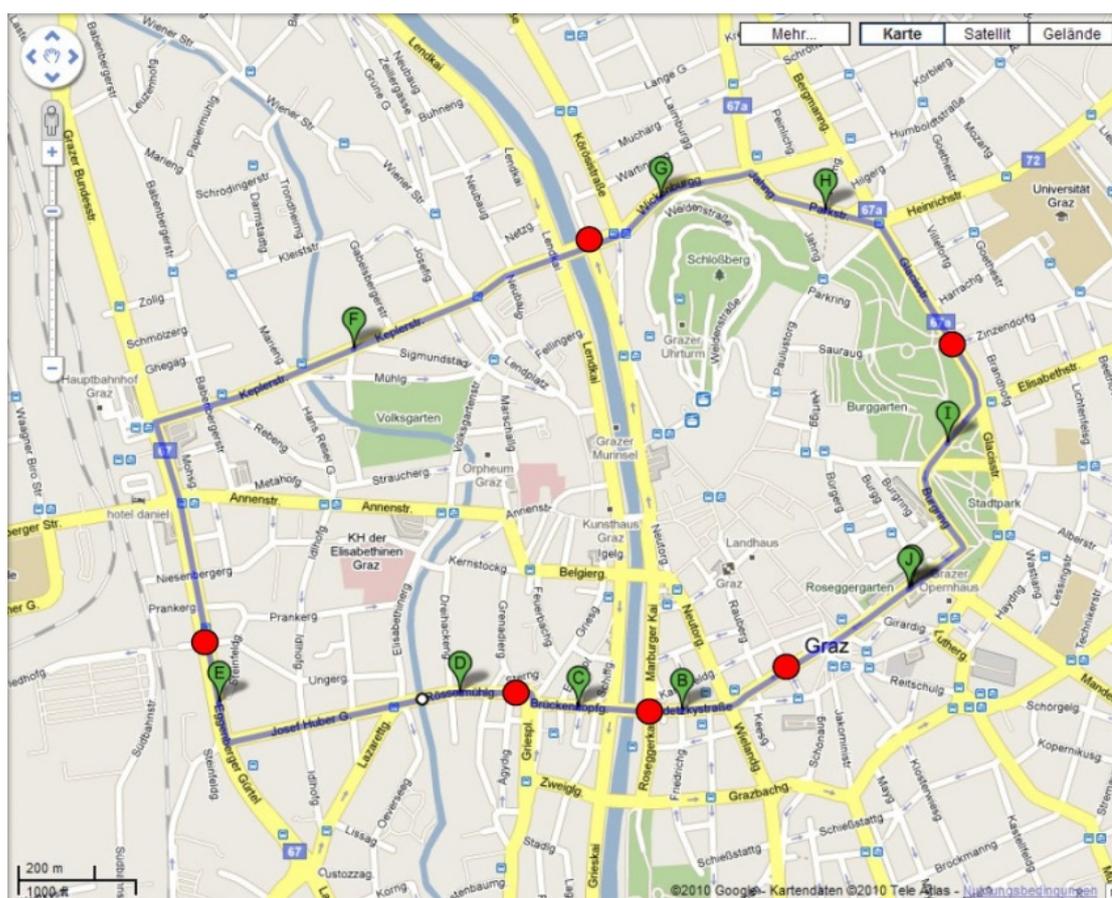


Abbildung 37: Strecke der Grazer Stadtrunde [3], S.19

<i>Fahrer</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>
	<i>Fahrstil</i>	<i>Streckenlänge [m]</i>		
normal	6058	6092	6091	6091
g100-br100	6014	6036	6030	6068
g40-br100	6054	6042	6018	6014
g100-brHybrid	6062	6091	6200	6049
g-brHybrid	6027	6043	6113	6031
<b>φ Streckenlänge je Fahrer</b>	<b>6043</b>	<b>6061</b>	<b>6090</b>	<b>6050</b>
<b>φ Streckenlänge</b>	<b>6061</b>			

Tabelle 14: Streckenlänge der Stadtrunden

Fahrer \ Fahrstil	F1	F2	F3	F4	$\phi$ Einzelfahrdauer je Fahrstil
	<i>Dauer [s]</i>				
normal	964	1021	1219	1092	<b>1074</b>
g100-br100	919	1081	1133	994	<b>1032</b>
g40-br100	1062	1020	1112	1153	<b>1087</b>
g100-brHybrid	959	885	1146	1045	<b>1009</b>
g-brHybrid	993	1104	930	1457	<b>1121</b>
<b><math>\phi</math> Einzelfahrdauer je Fahrer</b>	<b>979</b>	<b>1022</b>	<b>1108</b>	<b>1148</b>	-
<b><math>\phi</math> Einzelfahrdauer</b>	<b>1064</b>				

**Tabelle 15:** Dauer der Stadtrunden

Angemerkt sei, dass bei einem VW Jetta Hybrid keine konventionelle Motordrehzahlanzeige im Armaturenbrett integriert ist. Stattdessen ist eine Anzeige installiert, die das Verhältnis zwischen der aktuellen Leistung zur Maximal-Leistung angibt (die größere Anzeige auf der linken Seite in Abbildung 38). Beim Beschleunigen repräsentiert der Bereich welcher über „10“ (**Abbildung 38**) hinausgeht, dass die VKM durch die E-Maschine unterstützt wird („BOOST“). Falls gebremst wird, zeigt der grün hinterlegte Bereich an, wie viel Leistung zum Einspeisen von Energie in die Batterie genutzt wird („CHARGE“). Dies bedeutet die zusätzlich im Bild eingezeichnete strichlierte rote Linie repräsentiert den Punkt maximaler Generatorleistung der E-Maschine, bis zu dem keine Vernichtung von Energie durch die konventionelle Bremse auftritt. Bis zu dieser Linie wird ausschließlich durch die E-Maschine gebremst. Durch diese Anzeige wird dem Fahrer das optimale „hybride“, d.h. energieeffizientes, Bremsen erleichtert.



**Abbildung 38:** Anzeigen des VW Jetta Hybrid [Quelle: [www.DieselStation.com](http://www.DieselStation.com)]

### 4.3 Ergebnisse aus den Messungen

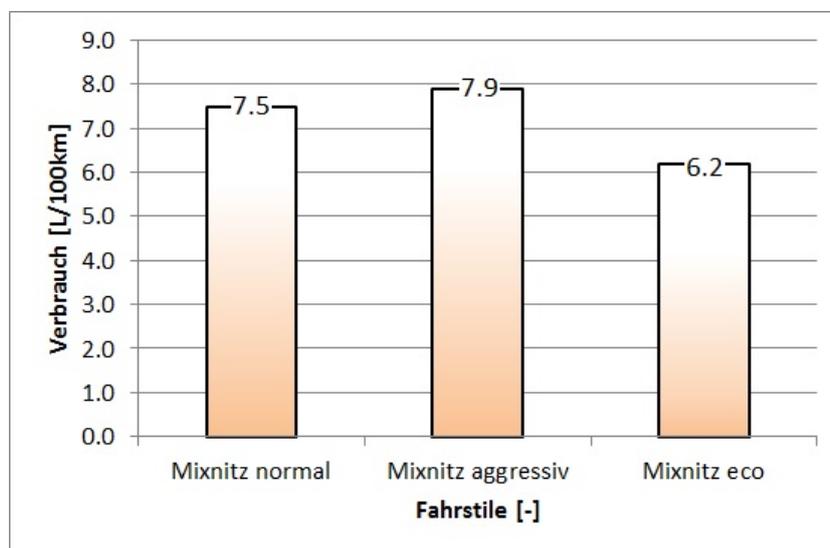
In **Tabelle 16**, **Tabelle 17**, **Abbildung 40** und **Abbildung 41** sind die Auswertungen der Messfahrten, durchgeführt mit einem VW Jetta Hybrid mit den oben beschriebenen Fahrstilen und Teststrecken, angeführt. Die Strecken und Fahrweisen sind in Kapitel 4.2 erläutert und die technischen Daten des PKWs in **Tabelle 9** aufgelistet. Diese Ergebnisse beziehen sich auf eine nicht ausgeglichene Batterieladebilanz. Da es auf Grund der Komplexität des Fahrzeuges nicht möglich war die Energieflüsse der Batterie auszuzeichnen, war es auch nicht möglich die Ergebnisse für eine ausgeglichene Batterieladebilanz auszurechnen. Jedoch sind die Verbrauchsergebnisse mit ausgeglichener Batterieladebilanz für ein, durch die realen Messfahrten, angepasstes Simulationsmodell am Ende von Kapitel 5 dargestellt.

Messfahrt	CO <sub>2</sub> Ausstoß	$\phi v_{roll}$
[-]	[g/km]	[km/h]
Mixnitz normal	167.8	60.2
Mixnitz aggressiv	176.5	57.3
Mixnitz eco	138.5	54.9

**Tabelle 16:** CO<sub>2</sub>-Ausstoß und mittlere Geschwindigkeit der Mixnitzrunde

$\phi v_{roll}$  [km/h]

mittlere Geschwindigkeit ohne Stillstandsdauern berechnet



**Abbildung 39:** Kraftstoffverbrauch auf den Mixnitzrunden, mit den jeweiligen Fahrstilen

Der Verbrauch in Liter pro 100 Kilometer wird pro Einfahrt aus dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß, der jeweiligen Streckenlänge und der Tatsache, dass bei der Verbrennung von 0.446 Liter Benzin im Motor ein Kilogramm CO<sub>2</sub> emittiert wird, berechnet.

Fahrer Fahrstil	F1		F2		F3		F4	
	CO <sub>2</sub>	$\phi$ v <sub>roll</sub>						
	[g/km]	[km/h]	[g/km]	[km/h]	[g/km]	[km/h]	[g/km]	[km/h]
normal	172	31.3	176	26.7	204	27.4	211	28.0
g100br100	236	32.9	290	28.0	196	28.9	219	30.3
g40br100	231	29.5	235	31.3	191	28.0	200	28.6
g100brHybrid	198	29.1	207	32.0	165	27.5	144	28.0
g-brHybrid	155	29.6	117	26.1	129	28.3	140	21.8
<b><math>\phi</math> je Fahrer</b>	<b>199</b>	<b>30.5</b>	<b>205</b>	<b>28.8</b>	<b>177</b>	<b>28.0</b>	<b>183</b>	<b>27.4</b>

**Tabelle 17:** CO<sub>2</sub>-Ausstoß und mittlere Geschwindigkeit der Stadtrunden

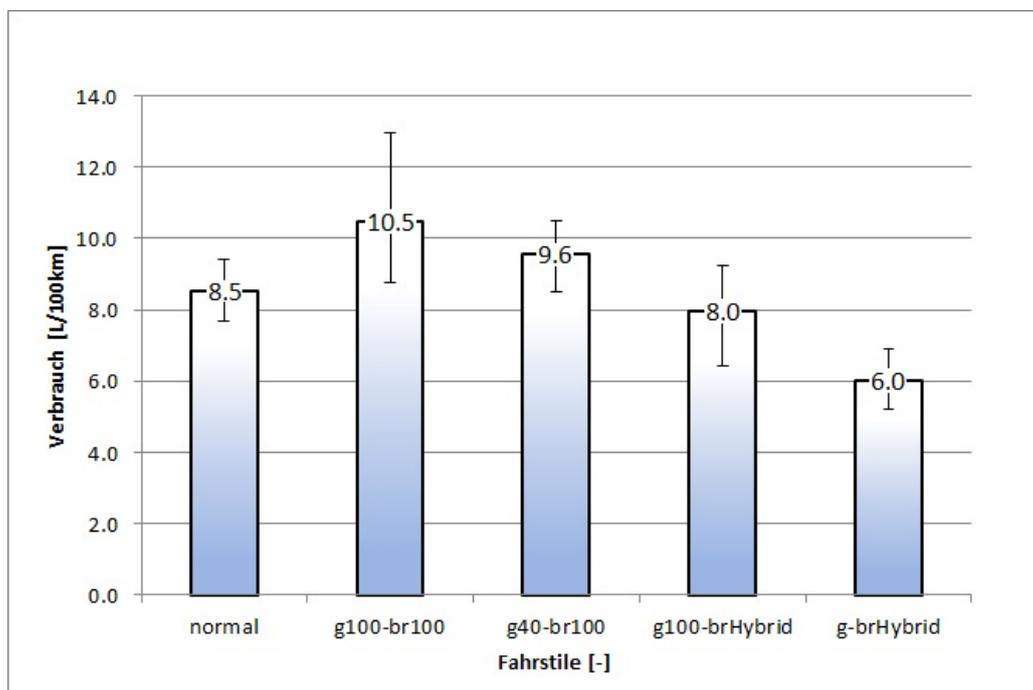
CO<sub>2</sub> [g/km]

CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Gramm pro Kilometer je Messfahrt

$\phi$  v<sub>roll</sub> [km/h]

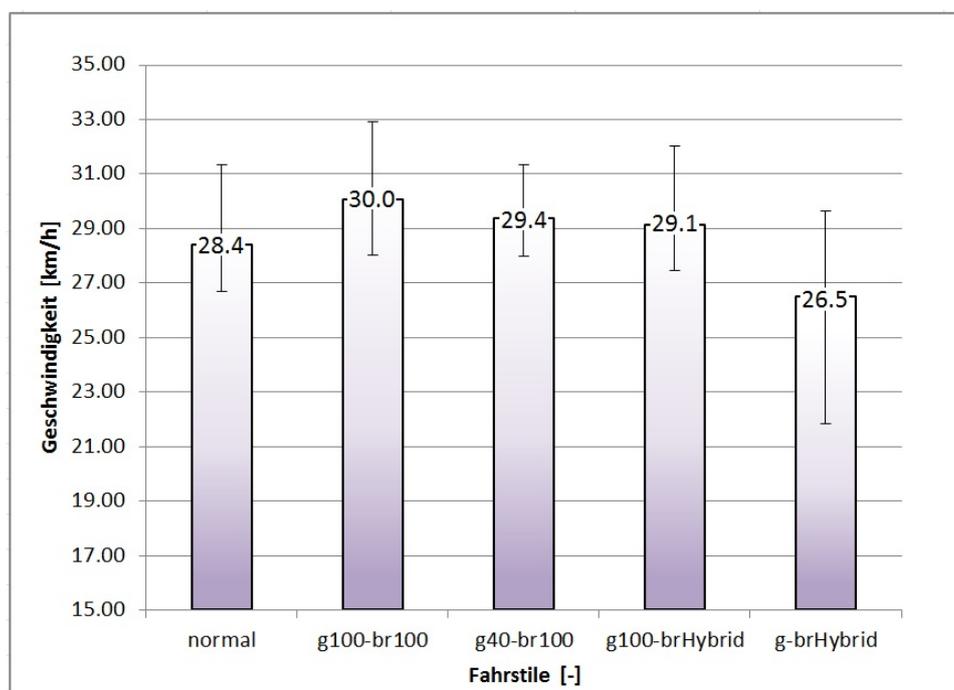
mittlere Geschwindigkeit ohne Stillstandsdauern berechnet

Der Verbrauch in Liter pro 100 Kilometer wird pro Einzelfahrt aus dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß (**Tabelle 17**), der jeweiligen Streckenlänge (**Tabelle 14**) und der Tatsache, dass bei der Verbrennung von 0.446 Liter Benzin im Motor ein Kilogramm CO<sub>2</sub> emittiert wird, berechnet. Dies bedeutet, es wird der Kraftstoffverbrauch auf 100 km aus einer jeweils ca. 6.1 km langen Stadtstrecke berechnet.



**Abbildung 40:** Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch auf den Stadtrunden, dargestellt für die verschiedenen Fahrweisen

In **Abbildung 41** sind die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der Stadtrunden (berechnet ohne der jeweiligen Stillstandsauer), inklusive den größten Abweichungen, für den jeweiligen Fahrstil dargestellt. Diese Geschwindigkeiten sind ohne die jeweiligen Stillstandsauern berechnet, damit die Testbedingungen der Messfahrten (z.B. Ampelschaltungen) die Ergebnisse weniger stark beeinflussen.



**Abbildung 41:** Durchschnittliche Geschwindigkeit der Stadtrunden, berechnet ohne der jeweiligen Stillstandsauer, dargestellt für die verschiedenen Fahrweisen

Wie in **Abbildung 39** und **Abbildung 40** ersichtlich hat die Fahrweise einen erheblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass sich diese Angaben nicht auf eine ausgeglichene Batterieladebilanz beziehen. D.h. der Ladezustand der Batterie hat ebenfalls einen Einfluss auf das Ergebnis. So wird zum Beispiel bei sehr ökonomischer Fahrweise fortlaufend Energie aus der Batterie für den Vortrieb benötigt. Diese muss jedoch auch wieder erzeugt werden. Diese Tatsache fällt bei kürzeren Strecken stärker ins Gewicht, da hier weniger Fahrzustände zum Ausgleichen der Batterieladebilanz auftreten. Der SOC-Stand der Batterie kann sich bei längeren Fahrten eher wieder ausgleichen, da hier zum Beispiel Energie zum Laden der Batterie durch die VKM erzeugt wird. Aus diesem Grund ergeben sich bei der längeren Mixnitrunde, im Vergleich zur weitaus kürzeren Stadtrunde, keine dermaßen großen Verbrauchsunterschiede zwischen den einzelnen Fahrstilen (siehe **Abbildung 39**). Des Weiteren kann man in **Abbildung 40** erkennen, dass hybrides Bremsen, d.h. Bremsen möglichst an der maximalen Generatorleistung der E-Maschine ohne Vernichtung von Energie durch die konventionelle Bremse, den CO<sub>2</sub>-Ausstoss bzw. den Verbrauch senkt. Ein Grund hierfür ist, dass diese Energie zu einem späteren Zeitpunkt zum Vortrieb genutzt werden kann. Ein weiterer Grund ist, dass durch die höheren Geschwindigkeiten am Ende einer Bremsung für das neuerliche Beschleunigen weniger Energie benötigt wird (unter der Voraussetzung, dass nicht bis zum Stillstand gebremst wurde). Diese Erkenntnisse werden unter anderem aus dem Vergleich der Fahrweisen „g100-br100“ und „g100-brHybrid“ ersichtlich, da hier eine Verbrauchsreduktion von ca. 24 % erzielt wurde. Dies kann nur in Kombination mit vorrauschauendem Fahren erreicht werden und führt zu keinen erheblichen Unterschieden der durchschnittlichen Fahrtdauern, bezogen auf die jeweiligen Fahrstile (siehe **Tabelle 15**).

## 5 HEV Simulation mit realen Fahrzyklen

Um die Realitätsgetreue des in Kapitel 3.2 erzeugten HEV-PHEM-Modells in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch zu bestimmen, werden die realen Messfahrten aus Kapitel 4 nachsimuliert. Dazu werden die Fahrzyklen aus den GPS-Daten der durchgeführten Fahrten erstellt, da diese als eine der Eingabeparameter für die Simulation mit PHEM dienen. Des Weiteren wird das bestehende Fahrzeug-Modell an die Gegebenheiten der Testbedingungen angepasst und weitere geringfügige Änderungen vorgenommen, um die Realität noch genauer abzubilden. Folgende Anpassungen sind nachfolgend dargestellt:

- Verbrauchsergebnisse der Simulation der gemessenen Stadtrunden mit dem ersten VW Jetta PHEM-Modell, welches an den Normverbrauch aus der Typprüfung angepasst wurde (siehe 3.2.1).
- Simulationsergebnisse durch erste Anpassungen des Modells an die Testbedingungen während den realen Messungen (Masse,  $c_w$ -Wert und Rollwiderstandskoeffizienten; siehe 5.1.2).
- Weitere Anpassungen des Fahrzeugmodells (Motorkennfeld, E-Maschine, Zusatzverbraucher; siehe 5.1.2).
- Vergleich der Verbrauchsergebnisse aus den Messungen und der Simulation mit diesem geänderten Modell. Dabei werden die SOC-Werte aus den realen Messfahrten für die Auswertung der Simulationsergebnisse herangezogen.
- Korrektur der Verbrauchsergebnisse aus der Simulation der Stadtrunden für eine ausgeglichene Batterieladebilanz über den jeweiligen Zyklus mit der Methode aus 2.3.2.1 (welche ebenfalls in 3.2.1 dargestellt ist). Damit kann der Einfluss des Batterie-Anfangsladestandes heraus gerechnet werden.

### 5.1 Fahrzyklen Erstellung und Fahrzeugmodell Validierung bzw. Anpassung

#### 5.1.1 Erstellung der Zyklen

Es werden die für die Simulation benötigten Zyklen aus dem GPS-Signal der in Kapitel 4 durchgeführten Messfahrten generiert. Zusätzlich wurden die Steigungen zweier Zyklen erzeugt um den Einfluss dieser auf das Ergebnis bestimmen zu können. Dazu werden im ersten Schritt die Höhendaten der Strecken, in einem Abstand von 100 m, aus der Höhen- und Reliefkarte des „Digitalen Atlas Steiermark“ generiert. Diese stellen ein Netz aus Koordinaten, bestehend aus den Breiten- und Längengraden und den dazugehörigen Höhenwerten, dar. Da diese nicht exakt mit den gefahrenen Punkten übereinstimmen, werden die Höhenpunkte aus dem erzeugten Netz auf die Punkte aus den GPS-Aufzeichnungen interpoliert. D.h. es werden zu den befahrenen Breiten- und Längengrad-Koordinaten des GPS-Signals die dazugehörigen Höhenpunkte erzeugt. Anschließend müssen die Steigungen den korrekten Zeitpunkten bzw. Geschwindigkeitswerten des Zyklus zugeordnet werden. Die Steigung wird aus den resultierenden Höhenunterschieden, den Geschwindigkeiten und der zurückgelegten Strecke für jede Sekunde berechnet. Bei der Simulation der Stadtrunden des ersten Fahrers mit seiner normalen Fahrweise mit und ohne Berücksichtigung der Steigung zeigte sich ein Verbrauchsunterschied von ungefähr einem Prozent (Simulation mit dem letztendlichen VW Jetta PHEM-Modell). Dieser Wert bezieht sich auf eine ausgeglichene Ladebilanz der Batterie und zeigt, dass sich in diesem konkreten Fall eine geringe Verbrauchsreduktion durch das Miteinbeziehen der Steigung erzielen lässt. Diese Tatsache ist unter anderem auf die geringen Höhenunterschiede dieser Strecke innerhalb des Stadtgebietes

bzw. auf den gleichen Start- und Endpunkt zurückzuführen. Bei der Simulation der Mixnitzrunde mit dem normalen Fahrstil ergab sich mit und ohne Berücksichtigung der Steigung ein Verbrauchsunterschied von 0.2 Prozent. In diesem Fall ergibt sich eine Verbrauchserhöhung durch die Simulation mit Steigungen. Der angegebene Verbrauchsunterschied bezieht sich ebenfalls auf eine ausgeglichene Batterieladebilanz und ist mit dem letztendlichen VW Jetta PHEM-Modell gerechnet. Auf Grund des großen Aufwandes bei der Zykluserstellung und des geringen Einflusses auf den Kraftstoffverbrauch wird mit Zyklen in denen alle Steigungen gleich Null sind simuliert.

### 5.1.2 PHEM-Fahrzeugmodell Anpassungen

Das bestehende VW Jetta PHEM-Modell aus Kapitel 3.2 wird einigen Anpassungen unterzogen, um damit die Realität besser abbilden zu können. Einer der Gründe der Notwendigkeit einer Anpassung ist, dass es für die Hersteller gewisse Freiräume bei der Bestimmung des Normverbrauchs im Zuge der Typprüfung von PKW gibt und diese weitest möglich ausgenutzt werden. Außerdem werden diese Verbrauchswerte auf einem Rollprüfstand und nicht auf der Straße bestimmt. Die Testbedingungen der Messfahrten und andere Erkenntnisse fließen ebenfalls in das neue PHEM-Modell mit ein.

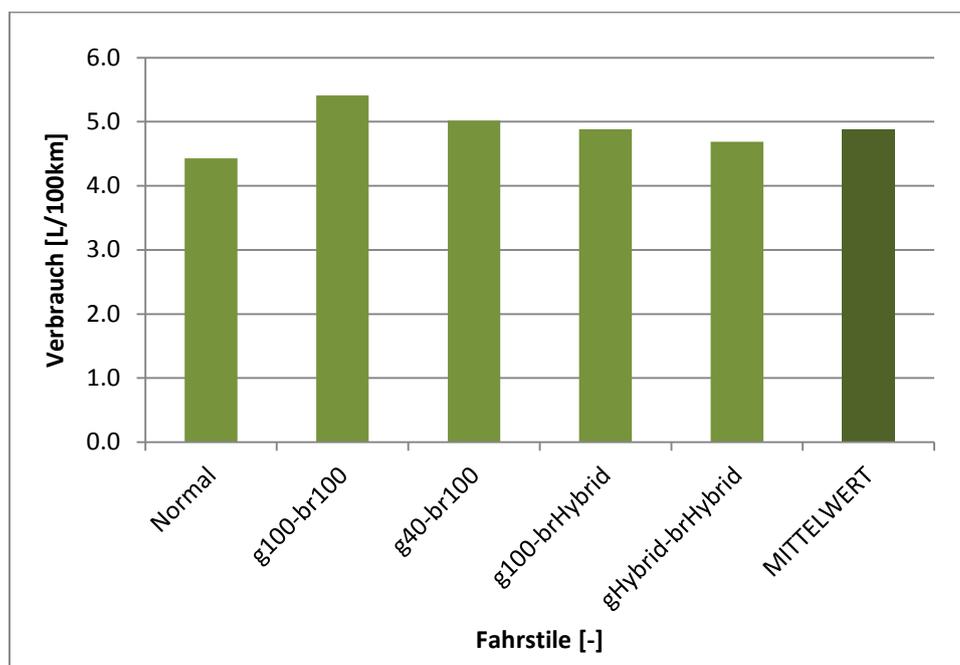
Diese Änderungen im Vergleich zum ursprünglichen VW Jetta PHEM-Modell, welches mit dem NEDC-Verbrauch validiert wurde, sind:

- I. Erhöhung der Fahrzeugmasse auf Grund der Onboard-Messtechnik. Die Gesamtmasse des Fahrzeuges wurde am Beginn der Messfahrten mit nahezu vollem Tank durch eine Fahrzeugwaage bestimmt.  
(Gesamtmasse ohne Fahrer = 1700 kg)
- II. Luftwiderstandserhöhung auf Grund geöffneter Fensterscheiben während der Messfahrten und des im Heckbereich des Fahrzeuges befindlichen Messaufbaus (siehe **Abbildung 33** und **Abbildung 34**).  
(Ursprünglicher  $c_w$ -Wert um 20 % erhöht)
- III. Geänderte Rollwiderstandskoeffizienten, da bei der Typprüfung reibungsarme und mit hohem Luftdruck versehene Reifen verwendet werden. In Realität waren Reifen der Dimension 225/45 R17 am Fahrzeug montiert, welche vermutlich einen höheren Rollwiderstand verursachen. Die Rollwiderstandskoeffizienten sind aus vorangegangenen Messungen des IVT ermittelt.  
(Erster Rollwiderstandskoeffizient um 14 % erhöht)
- IV. Aktualisiertes Motorkennfeld für EU6 Benzin Motor, generiert aus Motorprüfstandsfahrten am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik.
- V. Wirkungsgrad der E-Maschine wurde verschlechtert. Da in der PHEM EMO-Datei (siehe 2.2.2) nicht nur der Wirkungsgrad der E-Maschine alleine anzugeben ist, sondern auch die Wirkungsgrade der Leistungselektronik bzw. der Übertragungswege zwischen der E-Maschine und der Batterie mit einbezogen werden.  
(Wirkungsgrad bei niedrigen Drehzahlen verringert)

- VI. Die Leistung der E-Maschine wird als mechanische Leistung in PHEM eingegeben. Die aus der Literatur entnommene Angabe zur maximalen E-Maschinenleistung bezieht sich auf eine elektrische Leistung [9]. Daher wurde die elektrische Leistung über die Wirkungsgrade im E-Maschinen-Kennfeld in mechanische Leistung umgerechnet und die PHEM Eingabedaten korrigiert.
- VII. Berücksichtigung des Energiekonsums von aktiven Verbrauchern wie zum Beispiel der Lüftung oder der Lenkhilfpumpe. Die Gesamtleistung dieser Verbraucher, die bei der Typprüfung nicht aktiviert sind, wurde mit 200 W angenommen. (Zusatzverbraucher bzw. Nebenaggregate mit 200 W berücksichtigt)

### 5.1.2.1 Einzelne Schritte der Anpassung

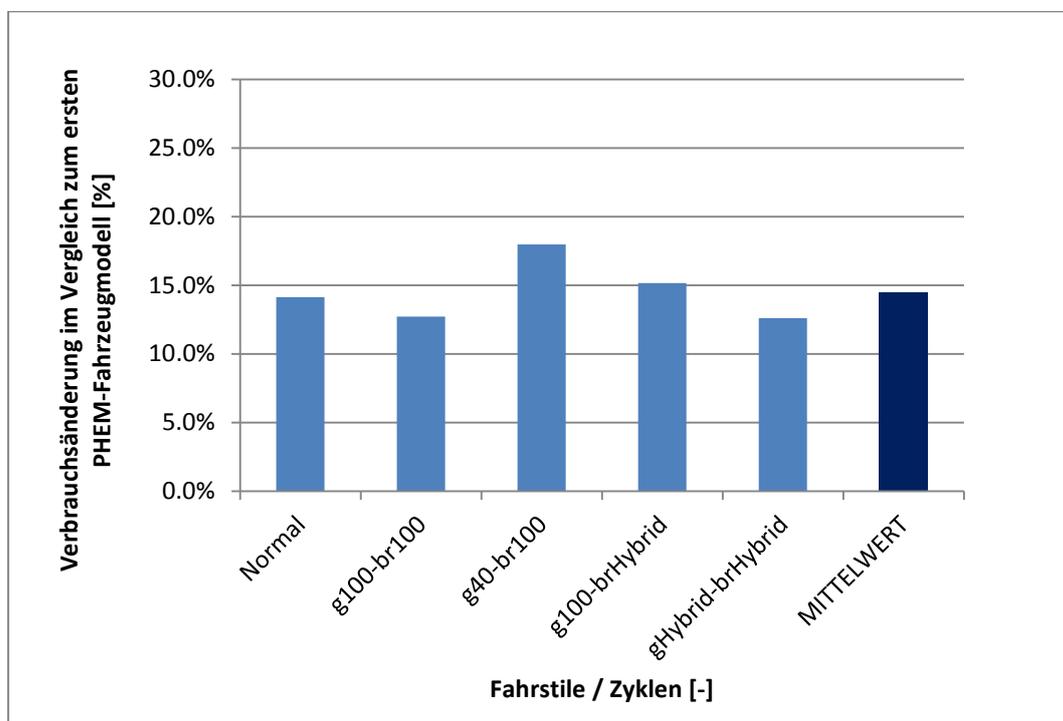
Die Einflüsse der einzelnen Anpassungen werden anhand der Simulation der Fahrten des zweiten Fahrers (F2) aufgezeigt. Zu Anfang sind die Verbrauchsergebnisse, berechnet mit dem ersten Fahrzeugmodell (siehe 3.2.1) und einer ausgeglichenen Labebilanz der Batterie, in **Abbildung 42** dargestellt. Ebenfalls ist der Mittelwert der Verbräuche aus der Simulation der Zyklen dieses Fahrers über die fünf verschiedenen Fahrstile ersichtlich (rechter Balken).



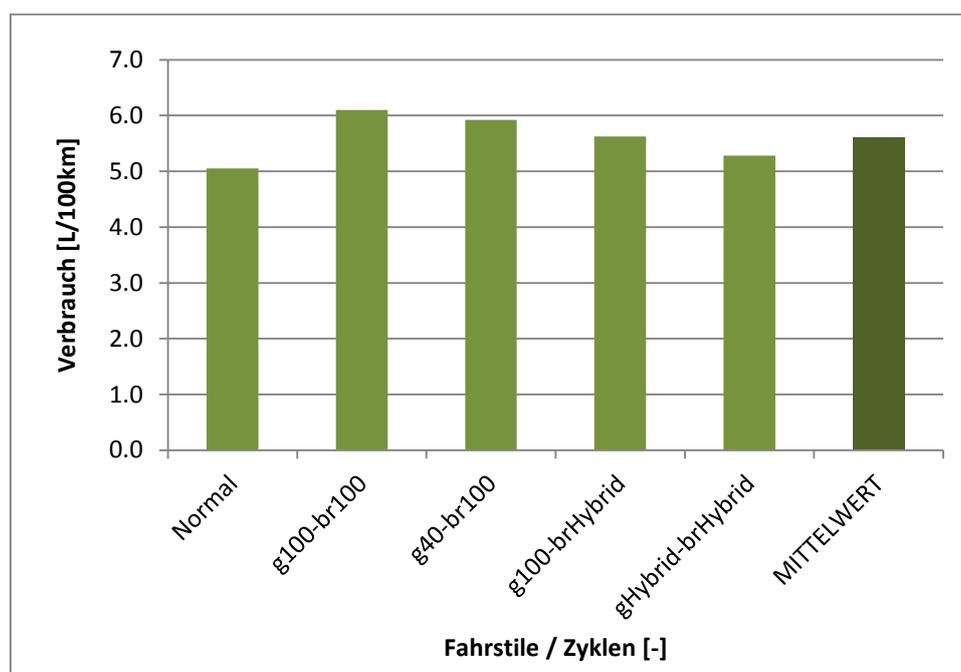
**Abbildung 42:** Kraftstoffverbrauch aus der Simulation der Stadtrunden des zweiten Fahrers mit dem ersten Fahrzeugmodell (3.2.1), auf eine ausgeglichene Batterieladebilanz bezogen

Die Verbrauchswerte aus **Abbildung 42** dienen als Grundlage der Berechnung der prozentuellen Abweichungen der Verbräuche für die nun folgenden Abbildungen. Im nächsten Schritt sind die Ergebnisse der Änderung der Fahrzeugmasse, des  $c_w$ -Wertes und der Rollwiderstandsbeiwerte abgebildet. Diese Änderungen sind in 5.1.2 beschrieben und die Ergebnisse in **Abbildung 43**, inklusive einem Mittelwert über die Zyklen, dargestellt. Die Ordinate zeigt um wie viel sich der Verbrauch durch diese Änderungen im Vergleich zum ersten Modell in Prozent erhöht. Die absoluten Verbrauchswerte durch die Anpassung an die Testbedingungen sind in **Abbildung 44** aufgetragen.

Die Werte aus **Abbildung 42**, **Abbildung 43**, **Abbildung 44**, **Abbildung 45** und **Abbildung 46** sind für eine ausgeglichene Batterieladebilanz berechnet, d.h. auf den Verbrauchswert gerechnet bei dem gleich viel Energie aus der Batterie geladen wie entladen wird.

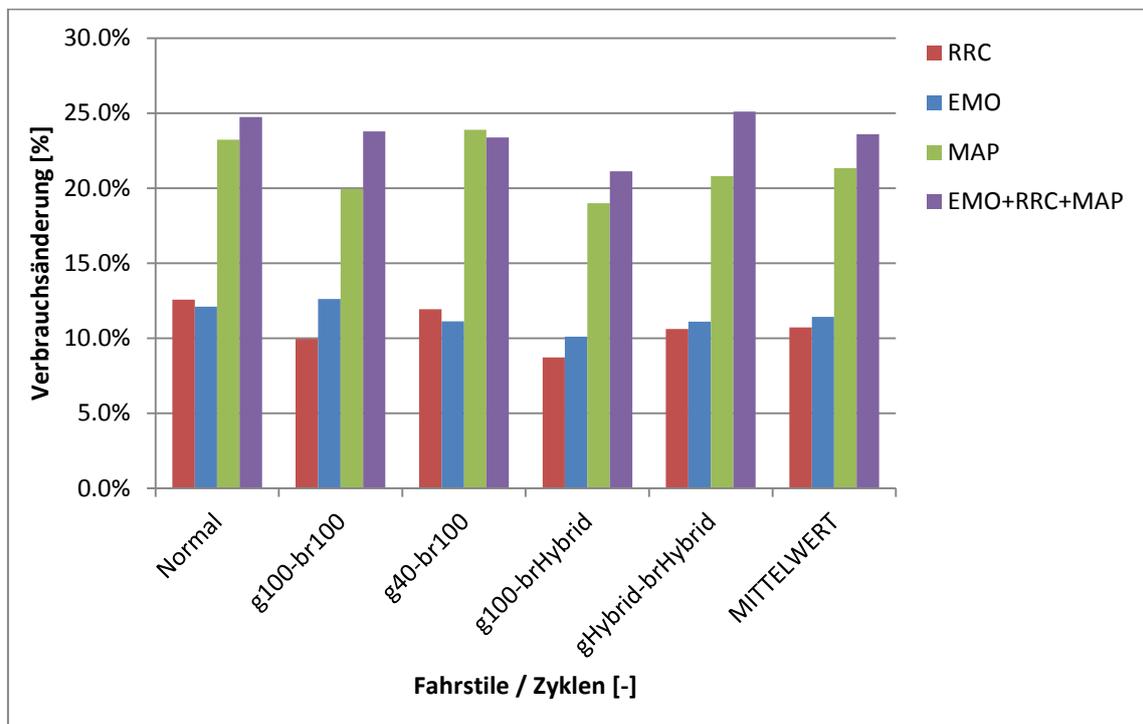


**Abbildung 43:** Änderung des Kraftstoffverbrauchs der Stadtrunden durch Anpassungen an die Messbedingungen im Vergleich zum ersten PHEM-Fahrzeugmodell (Anpassungen: 5.1.2 I, II und III)



**Abbildung 44:** Kraftstoffverbrauch durch Anpassung des Simulationsmodells an die Testbedingungen (Anpassungen: 5.1.2 I, II und III)

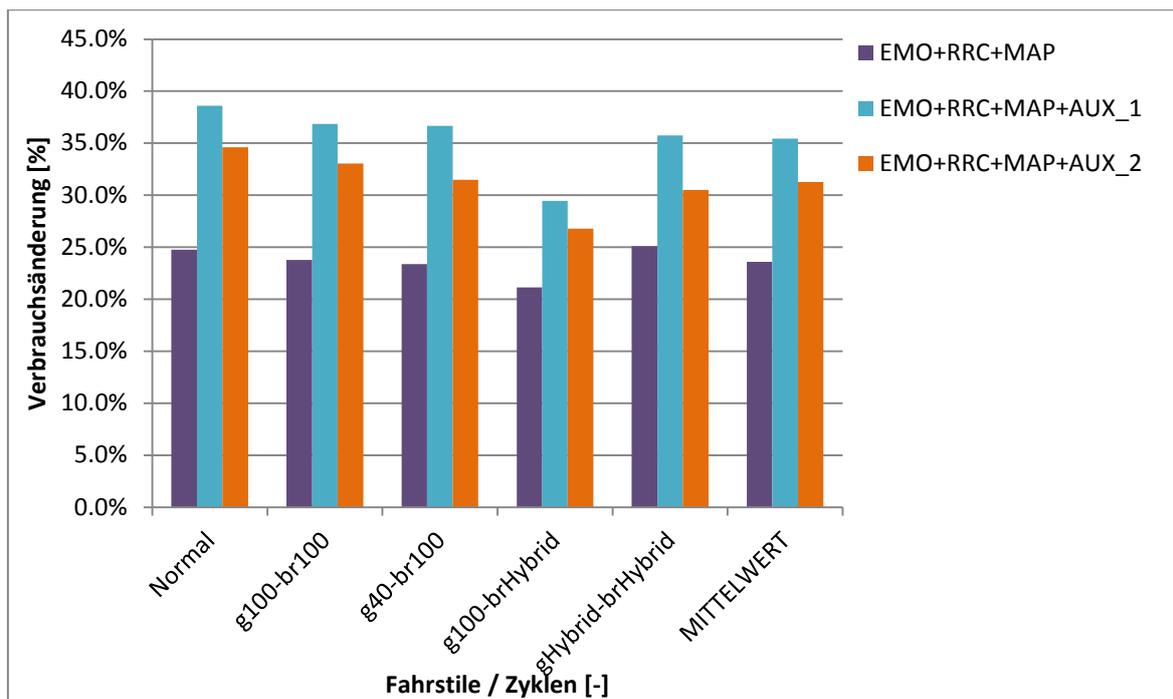
Da mit diesen ersten Anpassungen an die Messbedingungen der Verbrauch in der Simulation noch weit unter denen der Messungen liegt, sind weitere Änderungen notwendig. Diese betreffen die Rollwiderstandskoeffizienten (RRC), das E-Maschinenkennfeld (EMO) und das Motorkennfeld (MAP). Die Ergebnisse sind in **Abbildung 45** dargestellt. Hier bezieht sich die Verbrauchserhöhung auf den Vergleich mit den Werten aus **Abbildung 44**, d.h. wie erhöht sich der Verbrauch nochmals im Vergleich zu dem Modell welches bereits an die Testbedingungen angepasst wurde.



**Abbildung 45:** Verbrauchsänderung durch weitere Anpassung von Rollwiderstandskoeffizienten (RRC), E-Maschinenkennfeld (EMO) und Motorkennfeld (MAP) (Anpassungen: 5.1.2 I, II, III, IV, V und VI)

RRC	Erster Rollwiderstandskoeffizient um 14 % erhöht
EMO	E-Maschinenkennfeld angepasst
MAP	Aktualisiertes Motorkennfeld für EU6 Benzin Motor

Das zuvor als letztendliches VW Jetta PHEM-Modell bezeichnete Simulationsmodell basiert auf den in **Abbildung 43** und **Abbildung 45** gezeigten Änderung inklusive einer Berücksichtigung von elektrischen Verbrauchern. Durch die Variation der zusätzlichen Leistung von 300 W („AUX\_1“) und 200 W („AUX\_2“) werden die Einflüsse der Verbraucher noch genauer aufgezeigt. Letztendlich wird mit den niedrigeren elektrischen Verbrauchern, auf Grund der plausibleren Werte, weiter simuliert bzw. es wird das Modell mit den elektrischen Verbrauchern von 200 W als das letztendliche Modell bezeichnet (siehe **Abbildung 46**).



**Abbildung 46:** Verbrauchsänderung durch weitere Berücksichtigung von elektrischen Verbrauchern, mit folgenden Varianten: (Anpassungen: 5.1.2 I, II, III, IV, V, VI und VII)

EMO+RRC+MAP

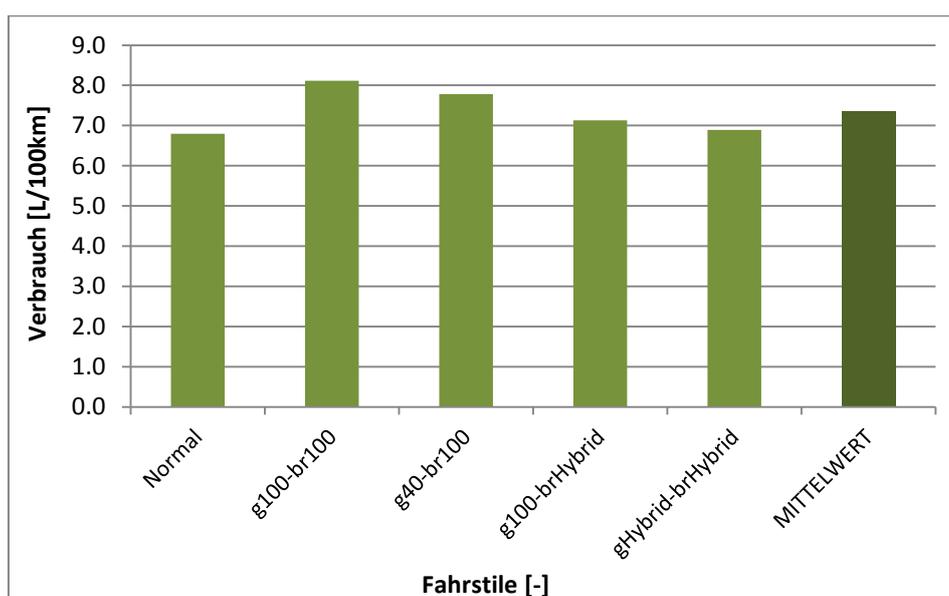
Anpassungen aus **Abbildung 45**

EMO+RRC+MAP+AUX\_1

Anpassungen aus **Abbildung 45** ergänzt um Zusatzverbraucher mit einer Leistung von 300 W

EMO+RRC+MAP+AUX\_2

Anpassungen aus **Abbildung 45** ergänzt um Zusatzverbraucher mit einer Leistung von 200 W (5.1.2 VII)



**Abbildung 47:** Verbrauchswerte der Stadtrunden mit den Fahrstilen des zweiten Fahrers und dem letztendlichen VW Jetta Hybrid Modell (EMO+RRC+MAP+AUX\_2) simuliert

## 5.2 Vergleich der Verbrauchsergebnisse aus den Messungen und den Simulationen

Angeführt ist ein Vergleich der Verbräuche aus den realen Fahrzeugmessungen (4.3) und der Simulation mit PHEM. Dazu werden die erzeugten Fahrzyklen (5.1.1) mit dem VW Jetta Modell des vorhergehenden Abschnittes, mit der Bezeichnung („EMO+RRC+MAP+AUX\_2“ in **Abbildung 46**) nachsimuliert. In diesem Modell sind die Fahrzeugmasse, der  $c_w$ -Wert, die Rollwiderstandsbeiwerte, die E-Maschine, das Motorkennfeld angepasst und elektrische Zusatzverbraucher mit 200 W berücksichtigt. Dieses Modell, an die Typprüfungsbedingungen adaptiert, hat im NEDC-Zyklus einen Verbrauch von 4.73 Liter auf 100 Kilometer, was einer Steigerung von 15 Prozent gegenüber der Herstellerangabe entspricht. Um die Simulation mit der Realität vergleichen zu können werden die Simulationsergebnisse so ausgewertet, dass sie bestmöglich den realen Bedingungen entsprechen. Dazu dienen die jeweils am Anfang und am Ende der Messfahrten abgelesenen Werte der SOC-Ladezustandsanzeige des VW Jetta als Bezugswert zur Auswertung der Simulationsergebnisse. Dazu wird jeder Zyklus mit jedem Fahrer mit jeweils sechs verschiedenen SOC-Anfangszuständen des Simulationsmodells gerechnet und das Ergebnis so ausgewertet, dass es den realen SOC-Werten der jeweiligen Messfahrt entspricht. Die Plausibilität der gewählten SOC-Werte der Auswertung der Simulationsergebnisse kann zum Beispiel dadurch überprüft werden, dass der Anfangsladezustand addiert mit der Summe der Ladezustandsänderungen das gleiche Ergebnisse liefern muss wie die Ladezustandsanzeige am Ende der realen Messfahrten eines Fahrers. Der Grund hierfür ist, dass die Messfahrten eines Fahrers immer unmittelbar hintereinander durchgeführt wurden und damit auch in Realität der Anfangsladezustand addiert mit der Summe der Ladezustandsänderungen dem abschließend angezeigten SOC-Werte entspricht. Dabei ist wichtig, dass es zu keinen nennenswerten Unterbrechungen zwischen den einzelnen Fahrten gekommen ist. Die Ergebnisse der Stadtrunden aus den Messungen bzw. die Ergebnisse dessen Nachbildung mittels Simulationen sind in **Tabelle 18** aufgetragen und die durchschnittlichen Verbrauchswerte der vier Fahrer pro Fahrstil in **Abbildung 48** dargestellt. Des Weiteren sind in dieser Abbildung die Werte, wie nahe die Simulation an die Messfahrtergebnisse herankommt, in Prozent eingetragen.

Die Verbrauchswerte in **Tabelle 18** und **Abbildung 48** beziehen sich jeweils auf eine nicht ausgeglichene Batterieladebilanz. Die Simulationsergebnisse wurden mittels der Batterieladezustände aus der Fahrerinformationsanzeige, während den realen Messfahrten, ausgewertet.

		Verbrauch														
Fahrer	Zyklus	F1			F2			F3			F4			MITTELWERT		
		Mes	Sim	Sim/Mes	Mes	Sim	Sim/Mes									
		[L/100km]	[L/100km]	[%]	[L/100km]	[L/100km]	[%]									
Normal		7.7	7.7	100%	7.9	7.7	98%	9.1	8.7	95%	9.4	8.0	84%	<b>8.5</b>	<b>8.0</b>	<b>94%</b>
g100-br100		10.5	9.0	85%	12.9	7.5	63%	8.8	8.4	96%	9.8	8.0	82%	<b>10.5</b>	<b>8.2</b>	<b>78%</b>
g40-br100		10.3	7.6	73%	10.9	8.8	81%	8.5	8.4	99%	8.9	7.6	85%	<b>9.7</b>	<b>8.1</b>	<b>84%</b>
g100-brHybrid		8.9	6.5	73%	9.2	8.1	88%	7.4	7.7	105%	6.4	6.3	98%	<b>8.0</b>	<b>7.2</b>	<b>90%</b>
g-brHybrid		6.9	6.2	90%	5.2	5.3	102%	5.8	5.4	93%	6.2	5.9	94%	<b>6.0</b>	<b>5.7</b>	<b>94%</b>

**Tabelle 18:** Vergleich der Messung und Simulation der Stadtrunden in Bezug auf den Verbrauch, mit nicht ausgeglichenen Batterieladebilanzen

Mes [L/100km]

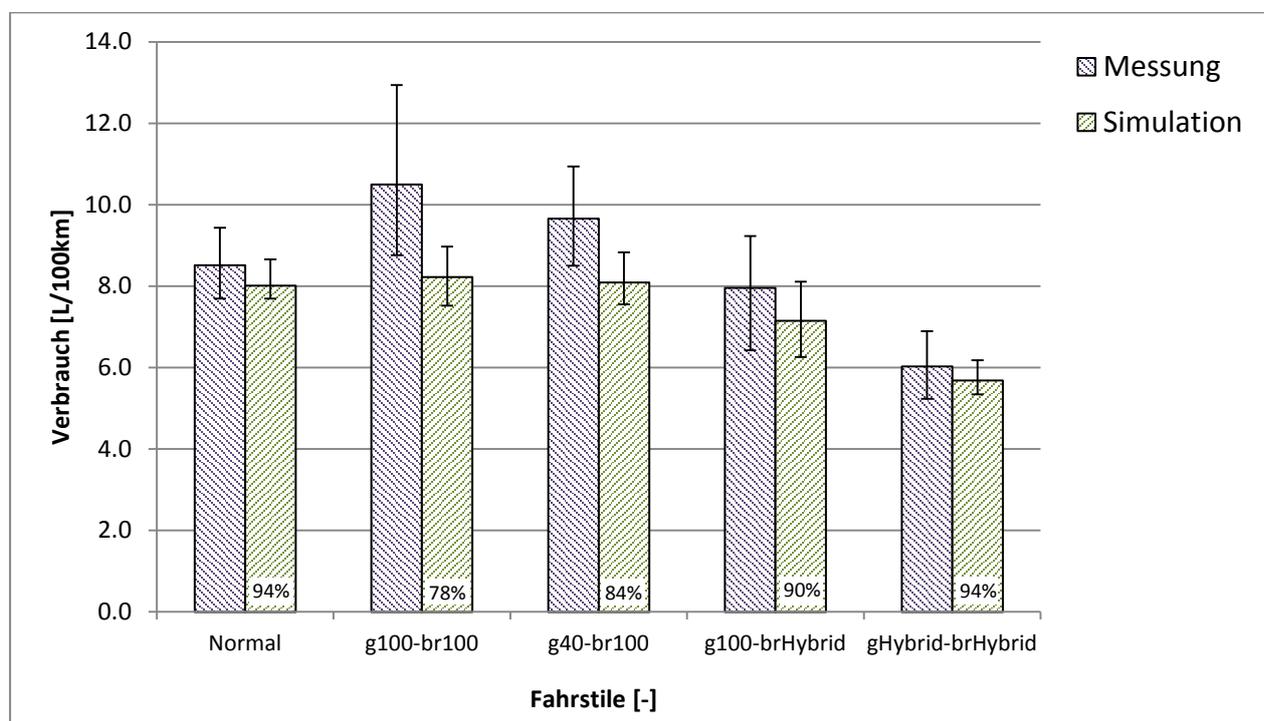
Aus den Messfahrten eruiert Kraftstoffverbrauch

Sim [L/100km]

Aus der Simulation eruiert Kraftstoffverbrauch

Sim/Mes [%]

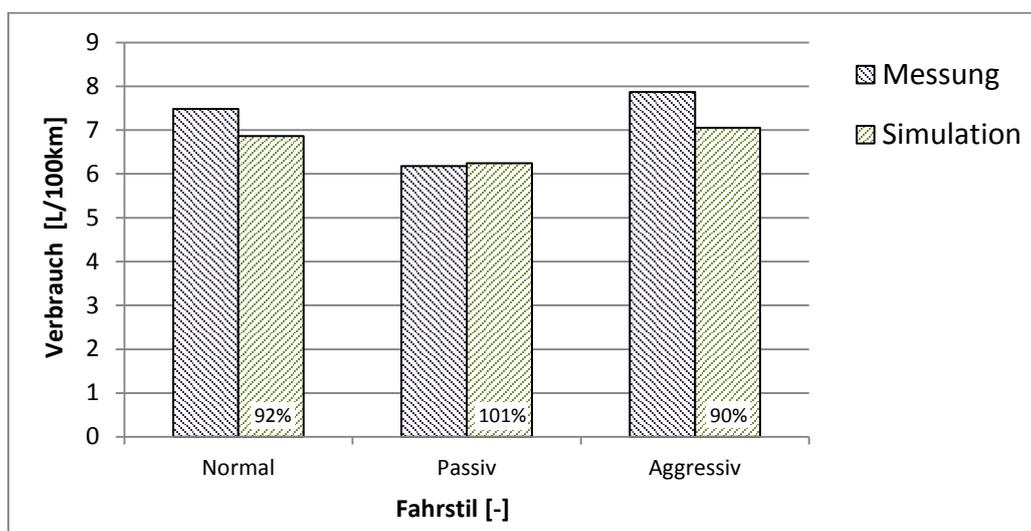
Verhältnis zwischen simulierten und gemessenen Verbrauchswerten



**Abbildung 48:** Vergleich Messung und Simulation der Stadtrunden in Bezug auf den durchschnittlichen Verbrauch der vier Fahrer, mit nicht ausgeglichenen Batterieladebilanzen

Da das PHEM Fahrzeugmodell an Hand der Messergebnisse der Stadtrunden des zweiten Fahrers angepasst wurde, ist es von großem Interesse wie sich das Modell bei der Simulation der Mixnitzrunden verhält. Vor allem da diese Strecke nicht nur einen Stadtteil, sondern auch Überland- und Autobahnfahrten beinhaltet. Die in **Abbildung 49** angeführten Verbräuche stellen den Vergleich zwischen den realen Messergebnissen und den Simulationsergebnissen, ebenfalls ausgewertet mit den SOC-Werten aus den Messfahrten, dar. Des Weiteren sind in dieser Abbildung die Werte, wie nahe die Simulation an die Messfahrtergebnisse herankommt, in Prozent eingetragen.

Diese unten angeführten Simulationsergebnisse sind mit demselben letztendlichen VW Jetta PHEM-Modell wie in **Abbildung 48** durchgeführt.



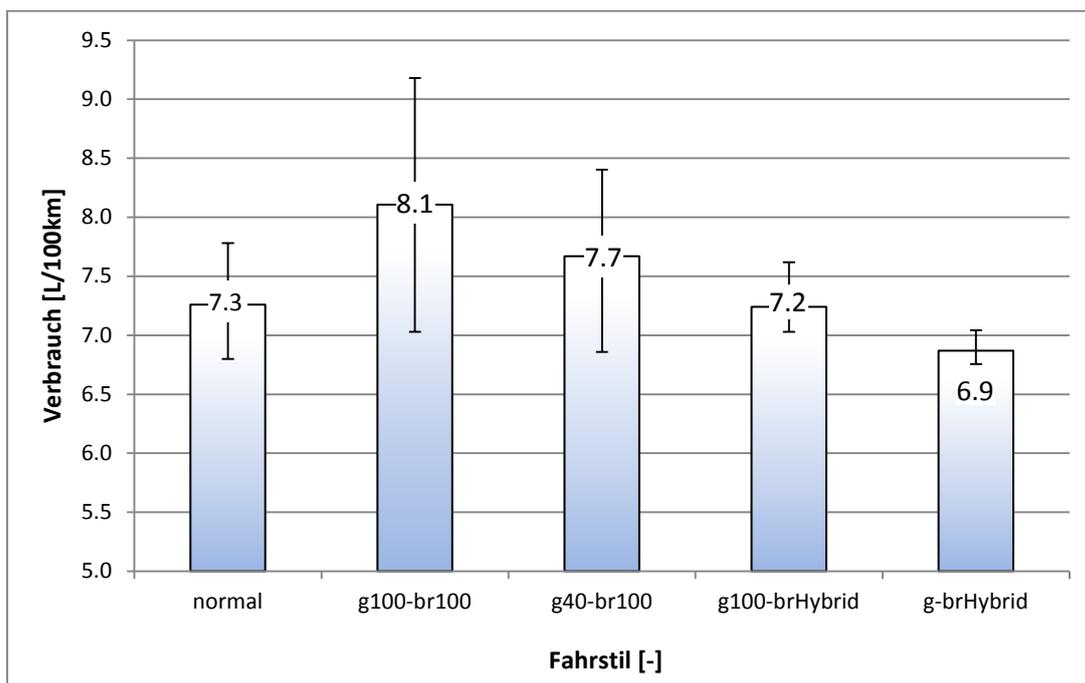
**Abbildung 49:** Vergleich Messung und Simulation der Mixnitzrunden in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch, mit nicht ausgeglichenen Batterieladebilanzen

### 5.2.1 Simulationsergebnisse mit einer ausgeglichenen Batterieladebilanz

In diesem Kapitel sind die Verbräuche aus der Simulation der Stadtrunden mit dem letztendlichen VW Jetta PHEM-Modell, berechnet für eine jeweils ausgeglichene Ladebilanz, in **Tabelle 19** eingetragen. Des Weiteren sind die durchschnittlichen Verbräuche pro Fahrstil und deren größte Abweichungen zu den jeweiligen Einzelmessergebnissen in **Abbildung 50** dargestellt. In diesen Darstellungen erkennt man, welchen erheblichen Einfluss die Fahrweise auf den Kraftstoffverbrauch hat.

Fahrer Fahrstil	F1	F2	F3	F4	$\phi$ Verbrauch je Fahrstil
	Verbrauch mit ausgeglichener Batterieladebilanz [L/100km]				
normal	7.45	6.80	7.78	7.01	<b>7.26</b>
g100-br100	8.10	8.12	9.18	7.03	<b>8.11</b>
g40-br100	6.86	7.78	8.40	7.63	<b>7.67</b>
g100-brHybrid	7.18	7.13	7.62	7.03	<b>7.24</b>
g-brHybrid	7.04	6.89	6.79	6.76	<b>6.87</b>

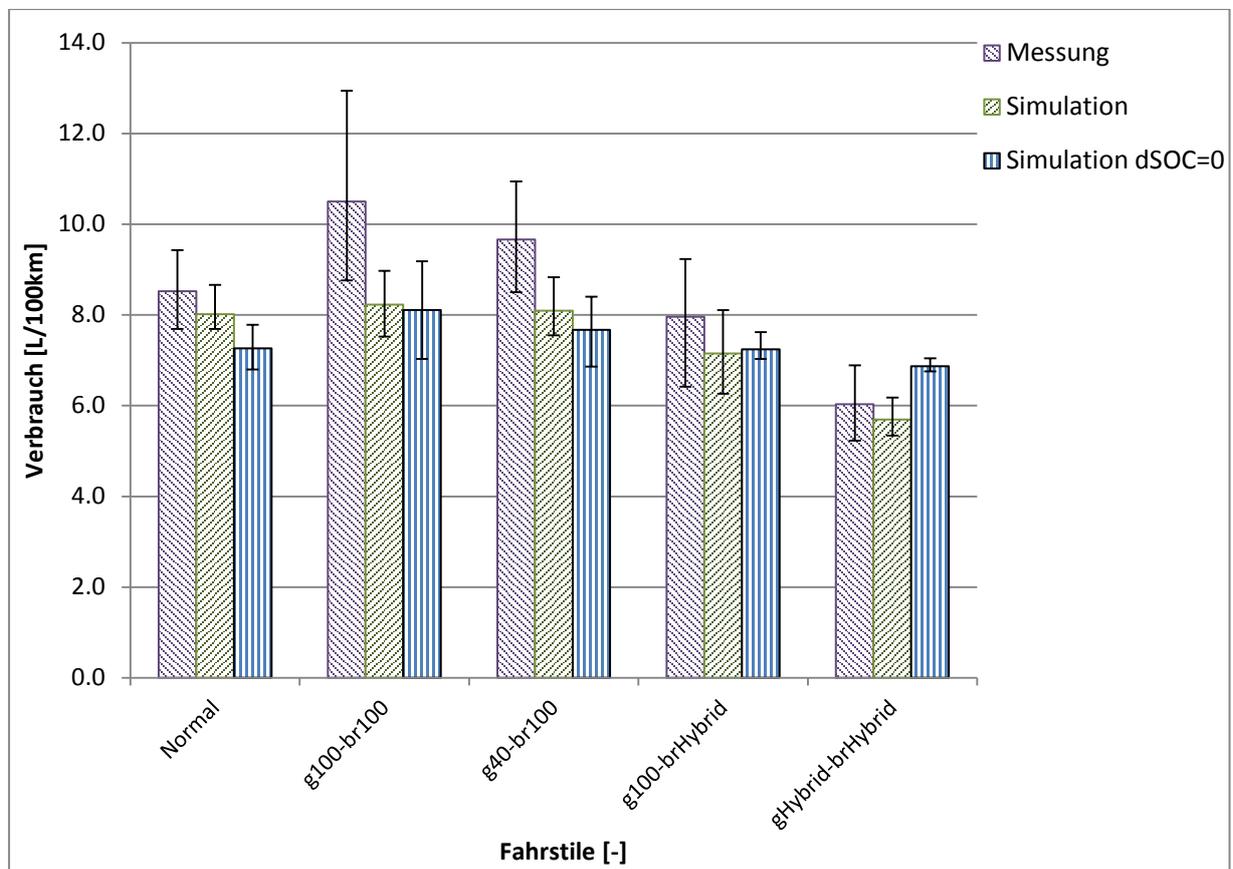
**Tabelle 19:** Kraftstoffverbrauch der simulierten Stadtrunden, berechnet für eine ausgeglichene Batterieladebilanz



**Abbildung 50:** Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch der simulierten Stadtrunden, berechnet für eine ausgeglichene Batterieladebilanz

Aus den Simulationsergebnissen der Stadtrunden in **Abbildung 50** ist ersichtlich welchen Einfluss die Fahrweise auf den Kraftstoffverbrauch mit einer ausgeglichenen Batterieladebilanz hat. Durch eine ökonomische Fahrweise (g-brHybrid) wird hier der Kraftstoffverbrauch um 15 Prozent im Vergleich zu einer aggressiven Fahrweise (g100-br100) reduziert. Dieser Verbrauchsunterschied wäre mit den realen Messergebnissen berechnet für eine ausgeglichene Batterieladebilanz noch höher, da die Simulationsergebnisse der aggressiven Fahrweise um einiges geringer als in Realität sind.

Um den Einfluss der Batterieladebilanz nochmals zu verdeutlichen ist in **Abbildung 51** der Vergleich zwischen den Messergebnissen (Messung), den Simulationsergebnissen ausgewertet nach den SOC-Ständen der Messungen (Simulation) und die Ergebnisse der Simulation mit einer ausgeglichenen Batterieladebilanz (Simulation dSOC=0) dargestellt. Diese sind für die Stadtrunden mit den fünf Fahrstilen, dem jeweiligen Durchschnitt der vier Fahrer und den größten Abweichungen zu den jeweiligen Verbrauchswerten der Einzelfahrten abgebildet.



**Abbildung 51:** Vergleich des Kraftstoffverbrauches zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen ausgewertet mit den realen Batterieladezuständen und den Simulationsergebnissen mit ausgeglichener Batterieladebilanz für die Stadtrunden

### 5.3 ECO-Drive Schulung

Mit den erzielten Erkenntnissen wurde im Rahmen einer Informationsveranstaltung sieben verschiedenen Fahrern die Möglichkeit geboten den Einfluss einer ECO-Drive Fahrweise auf den Kraftstoffverbrauch selbst auszutesten. Es wurde mit einer für den jeweiligen Fahrer normalen und einer hybriden Fahrweise auf einer durchschnittlich 3.1 Kilometer langen Runde, mit dem VW Jetta Hybrid inklusive installiertem PEMS, in der Stadt gefahren. Den Fahrern wurden die folgend angeführten Punkte vor der Fahrt mit der hybriden Fahrweise erklärt.

#### HEV ECO-Drive Prinzipien:

- Das Bremsverhalten hat einen größeren Einfluss auf den Verbrauch als das Beschleunigungsverhalten.
- Falls es die Verkehrssituation zulässt, soll möglichst viel mit der E-Maschine beschleunigt werden.
- Möglichst nicht über der maximalen Generatorleistung der E-Maschine bremsen (siehe dazu 4.2 und im speziellen **Abbildung 38**). Dadurch wird die Bremsenergie nicht durch die konventionelle Bremse vernichtet und möglichst viel Energie durch die E-Maschine rekuperiert, damit diese Energie anschließend wieder zum Antrieb genutzt werden kann.

Es konnte gezeigt werden, dass sich der Verbrauch durch diese Maßnahmen, selbst auf dieser kurzen Strecke, um 13 Prozent durch eine ökonomische gegenüber einer für den Fahrer üblichen Fahrweise reduzieren lässt. Es muss erwähnt werden, dass sich diese Ergebnisse auf eine nicht ausgeglichene Batterieladebilanz beziehen, da bei der Schulung keine Messung der Ströme möglich war. Somit kann zum Beispiel Energie aus der Batterie zum Antrieb entnommen werden, die jedoch nicht zur Gänze wieder eingespeist wird. Mit dieser in Richtung Entladen verschobenen Batterieladebilanz, verringert sich der Kraftstoffverbrauch erheblich. Da jedoch nur Energie aus der Batterie bis zum unteren SOC-Limit entnommen werden kann, kann dieser beträchtliche Verbrauchreduktionseffekt nicht in einem unendlichen Ausmaß genutzt werden.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Um die am Anfang dieser Arbeit gestellte Frage, welchen Einfluss die Fahrweise auf den Kraftstoffverbrauch eines Hybrid PKWs hat, zu beantworten werden die nun folgenden Schlussfolgerungen aus der bestehenden Arbeit gezogen. Wie sich bereits aus den ECO-Drive Anforderungssimulationen zeigte, hat das Bremsverhalten des Fahrers einen weitaus größeren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch eines HEV als das Beschleunigungsverhalten. Beim Bremsen ist dies vor allem auf die Möglichkeit der Rekuperation von Energie durch die E-Maschine zurück zu führen. Beim Beschleunigen lässt sich ebenfalls ein, jedoch geringerer, Verbrauchsvorteil erzielen. Ein Grund hierfür ist, dass bei niedrigen Lasten mehr durch die E-Maschine angetrieben werden kann und die elektrische Antriebsstrecke einen besseren Wirkungsgrad gegenüber der mechanischen Antriebsstrecke, einschließlich der VKM, hat. Diese Erkenntnisse bestätigten sich durch die Auswertungen der realen Messfahrten mit einem Hybrid-PKW. Bei Fahrten auf denselben Strecken mit demselben Hybrid-PKW jedoch mit unterschiedlichen Fahrweisen, konnten erhebliche Unterschiede im Kraftstoffverbrauch aufgezeigt werden. Was die Folgerung zulässt, dass die Fahrweise einen erheblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch eines Hybrid PKWs hat. Als wichtigste ECO-Drive Anforderung, d.h. um ökonomisch mit einem Hybridfahrzeug zu fahren, stellte sich heraus: „Möglichst nicht über der maximalen Generatorleistung der E-Maschine zu bremsen!“. Dadurch wird keine Energie durch die konventionelle Bremse vernichtet und in weiterer Folge in Wärme umgewandelt. Somit kann möglichst viel Energie durch die E-Maschine rekuperiert werden und zu einem späteren Zeitpunkt zum Antrieb ebenfalls durch die E-Maschine genutzt werden.

Des Weiteren zeigte sich, welchen signifikanten Einfluss der SOC-Anfangszustand und die Batterieladezustandsänderung auf den Kraftstoffverbrauch haben. Sowohl bei der Bewertung der Ergebnisse der realen Messfahrten, als auch bei der Auswertung der Simulationsergebnisse. Um vor allem einen objektiven Vergleich zu ermöglichen, müssen die Verbrauchsergebnisse für eine ausgeglichene Batterieladebilanz berechnet werden. Bei der Simulation des HEV PKW zeigte sich, dass auf Grund der PHEM HEV-Erweiterung der Aufwand sowohl bei der Erstellung eines Fahrzeugmodells sowie bei der Auswertung der Ergebnisse um ein vielfaches höher ist als bei der Simulation eines konventionellen PKWs. Dieser höhere Aufwand begründet sich durch die größere Anzahl von Komponenten eines Hybridfahrzeuges, der Komplexität der HEV-Erweiterung und dadurch, dass wie bereits erwähnt die Batterieladebilanz einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Darüber hinaus zeigte sich, dass ein erheblicher Aufwand aufzubringen wäre um das Simulationsmodell noch näher an die Realität heranzuführen. Der Grund hierfür liegt ebenfalls in der Komplexität eines Hybridfahrzeuges und der HEV-Erweiterung von PHEM.

Auf jeden Fall besteht ein großes Potential zur Reduktion von lokalen Emissionen und zur Reduktion des Konsums fossiler Kraftstoffe durch die Elektrifizierung von PKWs. Dies ist mit Hilfe einer ökonomischen Fahrweise weiter optimierbar, was durch diese Arbeit veranschaulicht wurde. Definitiv lassen sich signifikante Verbrauchsreduktionen mit einer ECO-Drive Fahrweise für Hybrid- und ebenfalls für konventionelle PKW erzielen. Anhand der ermittelten Ergebnisse aus den Messfahrten eines HEV mit einer unausgeglichener Batterieladebilanz konnte eine Verbrauchsreduktion um ca. fünfundzwanzig Prozent, zwischen der normalen und der aggressiven Fahrweise, quantifiziert werden. Bei der Simulation mit ausgeglichener Batterieladebilanz ergaben sich geringere, jedoch immer noch deutlich erkennbare Reduktionen des Kraftstoffverbrauchs, durch eine ökonomische Fahrweise. Ein großes Potential ergibt sich zukünftig durch die Verwendung energiereicherer Batterien und durch den Einsatz der Plug-In Technologie. Die Batterien stellen zurzeit den limitierenden Faktor, vor allem aus Kosten- und Gewichtsgründen, der Elektrifizierung dar.

---

Doch bis es zur Lösung dieses Problems bzw. zu erheblichen Weiterentwicklungen kommt, sind Hybridfahrzeuge eine hervorragende Option auf dem Weg zu rein elektrischen Fahrzeugen. Die zuvor erwähnte Möglichkeit der externen Ladung der Traktionsbatterie ermöglicht es vor allem im städtischen Bereich, bereits bei einigen am Markt befindlichen Hybrid-Fahrzeugen, das Problem der geringen Speichervermögen ein wenig zu kompensieren. Realisiert wird dies, indem kürzere Strecken mit einem Plug-In Hybrid rein elektrisch zurückgelegt werden können und am Ziel an der Steckdose oder einer Ladestation wieder aufgeladen werden. Damit kann bereits mit dem jetzigen Stand der Technik, ein erheblicher Beitrag zur Reduktion des Kraftstoffverbrauches erzielt werden. Unabhängig davon ob eine gewisse Strecke mit einem rein VKM betriebenen Fahrzeug, einem Hybrid-PKW oder mit einem reinen Elektrofahrzeug zurückgelegt wird, hat die Fahrweise immer einen erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf des dementsprechenden Fahrzeuges. Der Einfluss der Fahrweise auf den Kraftstoffverbrauch eines Hybrid-PKWs wurde anhand dieser Arbeit aufgezeigt.

## Literaturverzeichnis

- [1] M. Ackerl, *Innovative Fahrzeugantriebe, Vorlesungsskript*, Technische Universität Graz, 2012.
- [2] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, VO (EG) 715/2007 - *Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge*, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:171:0001:0001:DE:PDF>, 2007.
- [3] F. Glauningner, *Messung und Simulation von Hybridfahrzeugen im realen Stadtverkehr*, Technische Universität Graz, 2011.
- [4] S. Hausberger und R. Luz, *User Guide to the PHEM Emission Model, Version 11*, Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics TU Graz.
- [5] S. Hausberger und P. Sturm, *Umweltauswirkungen des Verkehrs, Vorlesungsskript*, Technische Universität Graz, 2011.
- [6] P. Hofmann, *Hybridfahrzeuge*, SpringerWienNewYork, ISBN 978-3-211-89190-2, 2010.
- [7] *Jetta Hybrid Technical Specifications*, Volkswagen Group of America, Inc., 2013.
- [8] R. Luz, H. Stefan und M. Rexeis, *Optimisation tool for Hybrid Electric Recuperation and Operation Strategies, Endbericht des Projektes „HERO“ finanziert im Rahmen der 2. Ausschreibung der Programmlinie a3plus des Forschungs- und Technologieprogramms iv2splus*, Graz, 2011.
- [9] H.-J. Neusser, H. Jelden, K. Bühring und K. Philipp, „DER ANTRIEBSSTRANG DES JETTA HYBRID VON VOLKSWAGEN,“ *Motorentchnische Zeitschrift (MTZ)*, Springer, 2013.
- [10] Porsche Austria GmbH & Co OG, *Der Jetta (Preise, Ausstattungen, Technische Daten)*, Produktmanagement VW PKW, 2013.
- [11] W. Renhart, C. Magele, S. Hausberger und M. Zallinger, *Recent NiMH-battery Modeling Supported by Finite Element Thermal Analysis*, Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering TU Graz, Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz, 2010.
- [12] W. Steiger, *Antriebskonzepte der Zukunft - Die Perspektive von Volkswagen*, DGB Fachtagung „Elektromobilität“, Hannover, 2009.
- [13] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE), *Regelung Nr. 83 - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Emission von Schadstoffen aus dem Motor entsprechend den Kraftstoffordnungen des Motors*, <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/81418/publicationFile/54148/r-83-neu-einschliesslich-ergaenzung-1-zur-aenderungsserie-06.pdf>, 2012.

- [14] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE), *Regelung Nr. 101 - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Personenkraftwagen, die nur mit einem Verbrennungsmotor oder mit Hybrid-Elektro-Antrieb betrieben werden, hinsichtlich der Messung der Kohlendioxidemission und des Kraftstoffverbrauchs...*, <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/44904/publicationFile/59390/r-101-messung-co2-und-kraftstoffverbrauch-pdf.pdf>, 2012.
- [15] M. Zallinger, *Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personenkraftfahrzeugen*, Technische Universität Graz, 2010.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Gegenüberstellung PKW-Antrieb mit VKM und mit Elektroantrieb [1] .....	13
<b>Abbildung 2:</b> Grundstrukturen von Hybridarchitekturen [6].....	15
<b>Abbildung 3:</b> Leistungs- und Energievergleich von Energiespeichern [6].....	18
<b>Abbildung 4:</b> Leistungs- und Energievergleich von verschiedenen Batterietypen [6].....	19
<b>Abbildung 5:</b> Schema der Emissionsberechnung in PHEM [5].....	21
<b>Abbildung 6:</b> Grundlegender Aufbau des Batteriemodells [11] .....	23
<b>Abbildung 7:</b> $K_e$ -Werte für STE-Kennlinie [8], S.15 .....	26
<b>Abbildung 8:</b> STE-Steuerkennfeld.....	26
<b>Abbildung 9:</b> Sekündliche $K_e$ -Bestimmung.....	27
<b>Abbildung 10:</b> Bestimmung der Betriebsstrategie .....	27
<b>Abbildung 11:</b> Batterie-Ladezustandslevel.....	28
<b>Abbildung 12:</b> Betriebsmodi in Abhängigkeit vom Batterie-Ladezustand.....	30
<b>Abbildung 13:</b> Weitere Abfragen zur Ermittlung möglicher Betriebsmodi .....	30
<b>Abbildung 14:</b> Betriebsmodus Vor-Auswahl.....	31
<b>Abbildung 15:</b> Auswahl der Betriebsstrategie nach $K_e$ -Faktoren (1/2).....	32
<b>Abbildung 16:</b> Auswahl der Betriebsstrategie nach $K_e$ -Faktoren (2/2).....	33
<b>Abbildung 17:</b> Bestimmung des VKM-Zustandes bei rein elektrischem Betrieb .....	34
<b>Abbildung 18:</b> Arten von Hybrid-Elektro-Fahrzeugen [14], S.54.....	36
<b>Abbildung 19:</b> Ladezustandskurve Zustand A [14], S.67.....	39
<b>Abbildung 20:</b> Ladezustandskurve Zustand B [14], S.67.....	40
<b>Abbildung 21:</b> New European Drive Cycle (NEDC) .....	41
<b>Abbildung 22:</b> Common Artemis Driving Cycle (CADC).....	42
<b>Abbildung 23:</b> ERMES-Zyklus.....	42
<b>Abbildung 24:</b> Federal Test Procedure (FTP 75).....	43
<b>Abbildung 25:</b> „Konvent“ Zyklen.....	44
<b>Abbildung 26:</b> „Hybrid“ Zyklen .....	44
<b>Abbildung 27:</b> Ausschnitt aus CADC Motorway Zyklus mit Anpassung.....	48
<b>Abbildung 28:</b> STE-Steuerlinie VW Jetta Hybrid PHEM Modell.....	53
<b>Abbildung 29:</b> NEDC-Kraftstoffverbrauch mit erstem Jetta-PHEM-Modell mit acht verschiedenen SOC-Start-Niveaus .....	53
<b>Abbildung 30:</b> Auf negative Leistung begrenzter Konvent aggressiv Zyklus mit dem ersten Jetta-PHEM-Modell .....	54
<b>Abbildung 31:</b> Positive Leistung begrenzter Konvent aggressiv Zyklus mit dem ersten Jetta-PHEM-Modell.....	55
<b>Abbildung 32:</b> Portables Emissions-Messsystem SEMTECH-DS (Quelle: <a href="http://www.environmental-expert.com">http://www.environmental-expert.com</a> ) .....	57

<b>Abbildung 33:</b> Messaufbau (1/4): Heckansicht VW Jetta Hybrid .....	58
<b>Abbildung 34:</b> Messaufbau (2/4): Messstrecke ab Auspuff (Rohr) und Verbindungen zu den Analysatoren im Inneren (Leitungen) .....	58
<b>Abbildung 35:</b> Messaufbau (3/4): Messtechnik auf der Rücksitzbank und im Kofferraum (Fotografiert durch die fahrerseitige hintere Scheibe) .....	59
<b>Abbildung 36:</b> Messaufbau (4/4): Fahrerperspektive nach hinten.....	59
<b>Abbildung 37:</b> Strecke der Grazer Stadtrunde [3], S.19 .....	61
<b>Abbildung 38:</b> Anzeigen des VW Jetta Hybrid [Quelle: www.DieselStation.com].....	62
<b>Abbildung 39:</b> Kraftstoffverbrauch auf den Mixnitzrunden, mit den jeweiligen Fahrstilen ..	63
<b>Abbildung 40:</b> Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch auf den Stadtrunden, dargestellt für die verschiedenen Fahrweisen.....	64
<b>Abbildung 41:</b> Durchschnittliche Geschwindigkeit der Stadtrunden, berechnet ohne der jeweiligen Stillstandsdauer, dargestellt für die verschiedenen Fahrweisen .....	65
<b>Abbildung 42:</b> Kraftstoffverbrauch aus der Simulation der Stadtrunden des zweiten Fahrers mit dem ersten Fahrzeugmodell (3.2.1), auf eine ausgeglichene Batterieladebilanz bezogen.....	68
<b>Abbildung 43:</b> Änderung des Kraftstoffverbrauchs der Stadtrunden durch Anpassungen an die Messbedingungen im Vergleich zum ersten PHEM-Fahrzeugmodell (Anpassungen: 5.1.2 I, II und III).....	69
<b>Abbildung 44:</b> Kraftstoffverbrauch durch Anpassung des Simulationsmodells an die Testbedingungen (Anpassungen: 5.1.2 I, II und III) .....	69
<b>Abbildung 45:</b> Verbrauchsänderung durch weitere Anpassung von Rollwiderstandskoeffizienten (RRC), E-Maschinenkennfeld (EMO) und Motorkennfeld (MAP) (Anpassungen: 5.1.2 I, II, III, IV, V und VI).....	70
<b>Abbildung 46:</b> Verbrauchsänderung durch weitere Berücksichtigung von elektrischen Verbrauchern, mit folgenden Varianten: (Anpassungen: 5.1.2 I, II, III, IV, V, VI und VII).....	71
<b>Abbildung 47:</b> Verbrauchswerte der Stadtrunden mit den Fahrstilen des zweiten Fahrers und dem letztendlichen VW Jetta Hybrid Modell (EMO+RRC+MAP+AUX_2) simuliert...	71
<b>Abbildung 48:</b> Vergleich Messung und Simulation der Stadtrunden in Bezug auf den durchschnittlichen Verbrauch der vier Fahrer, mit nicht ausgeglichenen Batterieladebilanzen .....	73
<b>Abbildung 49:</b> Vergleich Messung und Simulation der Mixnitzrunden in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch, mit nicht ausgeglichenen Batterieladebilanzen .....	74
<b>Abbildung 50:</b> Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch der simulierten Stadtrunden, berechnet für eine ausgeglichene Batterieladebilanz.....	75
<b>Abbildung 51:</b> Vergleich des Kraftstoffverbrauches zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen ausgewertet mit den realen Batterieladezuständen und den Simulationsergebnissen mit ausgeglichener Batterieladebilanz für die Stadtrunden.....	76

## Formelverzeichnis

<b>Formel 1:</b> Maximale Batterieleistung [11].....	24
<b>Formel 2:</b> Klemmspannung an der Batterie [11].....	24
<b>Formel 3:</b> Stromstärke der Batterie [11] .....	24
<b>Formel 4:</b> Maximale Batterieleistung mit $U_{\text{Batt}}$ [11] .....	24
<b>Formel 5:</b> Entnommene oder zugeführte Batterieleistung [5].....	24
<b>Formel 6:</b> Effizienzfaktor $K_e$ [8] .....	25
<b>Formel 7:</b> Effizienzfaktor für Assistieren, $K_{e\_assistieren}$ .....	25
<b>Formel 8:</b> Effizienzfaktor für Generieren, $K_{e\_generieren}$ .....	25
<b>Formel 9:</b> Veränderung des Energieinhaltes der Batterie [14], S. 65, 6.3.2 .....	38
<b>Formel 10:</b> Kraftstoffkorrekturkoeffizient [14], S. 65, 6.3.3.2 .....	38
<b>Formel 11:</b> Korrigierter Kraftstoffverbrauch [14], S. 66, 6.3.4.1 .....	38
<b>Formel 12:</b> Leistung die am Rad zur Überwindung der Fahrwiderstände benötigt wird.....	45
<b>Formel 13:</b> Leistung zum Überwinden des Rollwiderstandes $P_R$ [5], S.62 .....	45
<b>Formel 14:</b> Leistung zum Überwinden des Luftwiderstandes $P_L$ [5], S.62.....	46
<b>Formel 15:</b> Leistung zum Überwinden der Steigung $P_S$ [5], S.61.....	46
<b>Formel 16:</b> Leistung zum Überwinden des Beschleunigungswiderstandes $P_B$ [4], S.16 .....	46
<b>Formel 17:</b> Äquivalente rotierende Masse $m_{\text{Rot}}$ [4], S.16 .....	47

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Vergleich von Elektromaschinen [6].....	16
<b>Tabelle 2:</b> Formen von Energiespeicherung [6] .....	18
<b>Tabelle 3:</b> Eingabeparamater PHEM-Grundversion .....	22
<b>Tabelle 4:</b> Eingabeparamater HEV-PHEM-Erweiterung .....	23
<b>Tabelle 5:</b> Übersicht Hybrid-Elektro-Varianten.....	36
<b>Tabelle 6:</b> Fahrstile der Zyklen [3], S.21.....	43
<b>Tabelle 7:</b> Zyklen auf Basis realer Messfahrten.....	44
<b>Tabelle 8:</b> Güte der Zyklenanpassung .....	50
<b>Tabelle 9:</b> Technische Daten VW Jetta Hybrid (Quellen die sich nicht auf die Herstellerangaben aus [10], [7] beziehen, sind extra angeführt).....	52
<b>Tabelle 10:</b> Simulationsergebnisse mit dem ersten Jetta-PHEM-Modell .....	52
<b>Tabelle 11:</b> Durchgeführte Messfahrten mit VW Jetta Hybrid .....	56
<b>Tabelle 12:</b> Streckenlängen und Dauer der Mixnitzrunden.....	60
<b>Tabelle 13:</b> Die fünf Fahrstile für die Messfahrten der Stadtrunde.....	60
<b>Tabelle 14:</b> Streckenlänge der Stadtrunden.....	61
<b>Tabelle 15:</b> Dauer der Stadtrunden.....	62
<b>Tabelle 16:</b> CO <sub>2</sub> -Ausstoß und mittlere Geschwindigkeit der Mixnitzrunde .....	63
<b>Tabelle 17:</b> CO <sub>2</sub> -Ausstoß und mittlere Geschwindigkeit der Stadtrunden.....	64
<b>Tabelle 18:</b> Vergleich der Messung und Simulation der Stadtrunden in Bezug auf den Verbrauch, mit nicht ausgeglichenen Batterieladebilanzen .....	73
<b>Tabelle 19:</b> Kraftstoffverbrauch der simulierten Stadtrunden, berechnet für eine ausgegliche Batterieladebilanz .....	75