



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**

**DIPLOMARBEIT**

**Entwicklung von Betriebsstrategien für 48 Volt Hybridfahrzeuge**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

**Univ. Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer**

und

**Assoc. Prof. Dr. techn. Peter Hofmann**

**E315**

**Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik**

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Christoph Steindl, BSc**



## Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

Herrn Christoph Steindl, Matrikelnummer: 011 25 546 wird folgende Aufgabe gestellt:

### „Entwicklung von Betriebsstrategien für 48 Volt Hybridfahrzeuge“

Es ist ein vorhandenes Simulationsmodell eines 48 Volt Hybrid-Fahrzeuges an die spezielle Aufgabenstellung zu adaptieren bzw. zu erweitern und Simulationsrechnungen zur Betriebsstrategieentwicklung hinsichtlich Absenkung von Kraftstoffverbrauch und Partikelemissionen durchzuführen.

Fokus der Untersuchung soll die Analyse des Trade Off Verhaltens von Verbrauch und Partikelanzahlemissionen sowie das Potential eines P2-Hybrids gegenüber einem P0-Hybrid sein. Zielfahrzeug ist ein Kompaktklasse Fahrzeug mit saugrohreinspritzendem Ottomotor (MPFI).

Schwerpunkte:

- Adaption eines Längsdynamikmodells in *GT-SUITE* für P0- und P2-Hybride
- Entwicklung von Betriebsstrategien für beide Topologien
- Gewichtung der Betriebsstrategien jeweils für Absenkung des Verbrauchs sowie Absenkung der Partikelanzahlemissionen
- Aufzeigen Trade Off Verhalten
- Aufzeigen Potential eines P2-Hybrids gegenüber einem P0-Hybrid

Die Ergebnisse der Arbeit sind vertraulich zu behandeln und dürfen nur mit schriftlicher Genehmigung des Institutsvorstandes weitergegeben bzw. veröffentlicht werden.

Ein gebundenes Exemplar und eine Version der Diplomarbeit auf Datenträger sind am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien abzugeben.

Dauer: März 2018 - Oktober 2018

Kennzahl: E 066445

Die Ergebnisse der Arbeit sind vertraulich zu behandeln und dürfen nur mit schriftlicher Genehmigung des Institutsvorstandes weitergegeben bzw. veröffentlicht werden.

Die Benutzung der Versuchseinrichtungen des Institutes hat in den Dienststunden und unter Anleitung des Betreuers zu erfolgen. Dabei dürfen alle Arbeiten nur unter besonderer Beachtung der geltenden Sicherheitsvorschriften durchgeführt werden.

Einverstanden:



Christoph Steindl, BSc

Betreuer am Institut:

---

Assoc. Prof. Dr. Peter Hofmann

---

Prof. Dr. Bernhard Geringer

Institutsvorstand

Februar 2019

B19003

## Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

### Entwicklung von Betriebsstrategien für 48 Volt Hybridfahrzeuge

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 15.02.2019



Christoph Steindl, BSc

#### Sperrvermerk:

Ich weise darauf hin, dass die Diplomarbeit vertrauliche Informationen und unternehmensinterne Daten beinhaltet. Daher ist eine Veröffentlichung oder Weitergabe von Inhalten an Dritte ohne die vorherige Einverständniserklärung des Instituts für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik nicht gestattet.

# Vorwort

An dieser Stelle möchte ich all jenen Personen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen meines Studiums und meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Geringer für das Ermöglichen dieser Arbeit. Ebenso danke ich besonders Herrn Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Hofmann für seine Ratschläge und stete Unterstützung.

Ausdrücklich möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik für die freundliche Aufnahme als Diplomand, die wertvollen Hilfestellungen und das produktive, nie langweilige Arbeitsumfeld bedanken.

Mein herzlicher Dank gebührt maßgeblich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglichten und mich fortwährend in jedweder Form dabei unterstützt haben. Ebenso möchte ich mich herzlich bei meiner Freundin, die mich während der Erstellung dieser Diplomarbeit wesentlich unterstützt hat, bedanken.

Wien, im Februar 2019

Christoph Steindl

## Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit ist ein vorhandenes Längsdynamikmodell eines 48 Volt Hybrid-Fahrzeuges der Kompaktklasse mit einem saugrohreinspritzenden Ottomotor (MPFI) in *GT-SUITE* an die spezielle Aufgabenstellung in einem P0-Hybrid adaptiert worden. Anschließend erfolgte der Umbau des Längsdynamikmodells des P0-Hybrid zu einem P2-Hybrid. Für beide Topologien sind unterschiedliche Betriebsstrategien mit den Betriebszielen Absenkung des Verbrauchs sowie Absenkung der Partikelanzahlmissionen entwickelt und in die Längsdynamikmodelle implementiert worden. Bei der Betriebsstrategie des P0-Hybrid handelt es sich um eine regelbasierte Betriebsstrategie. Für den P2-Hybrid ist eine optimierungsbasierte Betriebsstrategie entwickelt worden. Die beiden verschiedenen Betriebsstrategien sind dahin gehend entworfen worden, dass sie die Möglichkeit zur unterschiedlichen Gewichtung jeweils für Absenkung des Verbrauches sowie Absenkung der Partikelanzahlmissionen besitzen. Zusätzlich zur simulativen Ermittlung des Kraftstoffverbrauches mittels der Längsdynamikmodelle ist ein Partikelanzahlmodell mithilfe der Software *MATLAB-Simulink* entwickelt worden. Die Längsdynamikmodelle und das Partikelanzahlmissionsmodell wurden für den relevanten Betriebsbereich anhand von Messdaten, welche am Motorenprüfstand ermittelt worden sind, abgestimmt.

Im Anschluss an die Modellbildung und die Entwicklung der Betriebsstrategie wurden mit den Modellen des P0-Hybrid und des P2-Hybrid jeweils Kaltstart- und Warmstartuntersuchungen anhand des Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle (WLTC) durchgeführt. Bei beiden Hybridtopologie wurden Parameter, die die Gewichtung der Betriebsstrategie beeinflussen, variiert. Die Ziele der Untersuchungen sind das Trade Off Verhalten zwischen der Reduktion des Kraftstoffverbrauches und der Reduktion der Partikelanzahlmissionen und das Potential eines P2-Hybrid gegenüber einem P0-Hybrid aufzuzeigen.

Es wird anhand der Kalt- und Warmstartuntersuchungen erläutert, welchen Einfluss ein kalter bzw. betriebswarmer Zustand des Verbrennungsmotor am Beginn des Fahrzyklus auf die Potentiale zur Absenkung des Kraftstoffverbrauches und zur Absenkung der Partikelanzahlmissionen jeweils des P0- und des P2-Hybrid haben. Dabei sind für die jeweilige Hybridtopologie verschiedene Varianten der Gewichtung der Betriebsstrategie betrachtet worden. Abschließend erfolgt ein Vergleich zwischen den beiden Hybridtopologien hinsichtlich der Reduktion des Kraftstoffverbrauches und der Absenkung der Partikelanzahlmissionen sowohl für den Kalt- als auch den Warmstart.

## Abstract

In the presented thesis, an existing simulation model of a 48 volt hybrid vehicle of the compact car category with a multi-point fuel injection engine (MPFI) in *GT-SUITE* was adapted in consideration of the specific tasks of a P0 hybrid. Subsequently the simulation model of the P0 hybrid was transformed into the simulation model of the P2 hybrid. For both hybrid topologies, different energy management strategies with the operating objectives of reducing fuel consumption and reducing particle number emissions were developed and implemented in the simulation models. The energy management strategy of the P0 hybrid is a rule-based energy management strategy. For the P2 hybrid, an optimization-based energy management strategy was developed. The two different energy management strategies were designed in consideration to vary the weighting of the energy management strategy between the two operating objectives. In addition to the simulative determination of fuel consumption by means of the simulation models, a particle number emission model was developed. The simulation models and the particle number emission model were validated for the relevant operating range, based on measurement data which was determined on the engine test bench.

After the modelling and the development of the energy management strategy, there were cold start and warm start investigations with the models of the P0 and the P2 hybrid performed, using the Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle (WLTC). For both hybrid topologies, parameters that affect the weighting of the energy management strategy were varied. The objectives of the investigations are to demonstrate the trade-off behaviour between the reduction of fuel consumption and the reduction of the particle number emissions and the potential of a P2 hybrid compared to a P0 hybrid.

It is shown which influence has a cold or a warm condition of the internal combustion engine at the beginning of the test cycle on the potentials to reduce the fuel consumption and to reduce the particle number emissions, respectively for the P0 hybrid and the P2 hybrid. For these investigation, different variants of the weighting of the energy management strategy for the different hybrid topologies were considered. Finally, the two hybrid topologies were compared with each other in terms of reducing fuel consumption and reducing particle number emissions respectively for a cold and a warm start of the combustion engine.

# Abkürzungsverzeichnis

A-ECMS	Adaptive ECMS
BEV	Battery Electric Vehicle
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
C-Segment	Fahrzeugsegment der Kompaktklasse
DP	Dynamische Programmierung
ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy
ECU	Engine Control Unit
E-Anfahrt	Elektrische Anfahrt
E-Fahrt	Elektrische Fahrt
EM	Elektrische Maschine
HCU	Hybrid Control Unit
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HV-Batterie	Hochvolt Batterie
LPA	Lastpunktanhebung
LPV	Lastpunktverschiebung
MBC	Model Based Calibration
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle
mHEV	Micro Hybrid Electric Vehicle
MPFI	Multi-Point Fuel Injection
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Particulate Matter
PMP	Pontrjaginsche Maximumprinzip



PN	Particle Number
RBF-Netz	Radiale-Basisfunktionen-Netz
RDE	Real Driving Emissions
RSG	Riemen Starter Generator
SOC	State of Charge
SUV	Sport Utility Vehicle
TC	Transient Control
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WLTC	World Harmonized Light Vehicle Test Cycle
WLTP	World Harmonized Light Vehicle Test Procedure

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Stand der Technik .....	3
2.1 Saugrohreinspritzender Ottomotor (MPFI) .....	3
2.1.1 Kraftstoffverbrauch .....	3
2.1.2 Partikelemissionen .....	4
2.2 Definition und Klassifizierung von Hybridkonzepten .....	5
2.2.1 Grundstrukturen.....	6
2.2.2 Elektrifizierungsgrad .....	8
2.3 Hybridfunktionen von 48 V Mild-Hybrid Fahrzeugen .....	9
2.3.1 Rekuperation .....	10
2.3.2 Lastpunktverschiebung (LPV) .....	11
2.3.3 Elektrische Fahrt.....	13
2.3.4 Start-Stopp .....	14
2.3.5 Coasting .....	14
2.4 Betriebsstrategien .....	15
2.4.1 Betriebsstrategie mit deterministischen Regeln.....	20
2.4.2 Numerische, nicht prädiktive ECMS .....	24
3. Modellbildung und Validierung.....	34
3.1 Untersuchte Hybridantriebsstränge.....	34
3.1.1 Basisfahrzeug.....	35
3.1.2 P0-Topologie .....	35
3.1.3 P2-Topologie .....	36
3.2 Längsdynamikmodelle .....	37
3.2.1 Fahrzyklus .....	39
3.2.2 Basisfahrzeug.....	39
3.2.3 P0-Topologie .....	45
3.2.4 P2-Topologie .....	53
3.2.5 Validierung .....	62
3.3 Partikelanzahlemissionsmodell .....	65

3.3.1 Aufbau .....	65
3.3.2 Validierung .....	67
4. Untersuchungen zur Absenkung CO <sub>2</sub> - und PN-Emissionen .....	69
4.1 P0-Topologie.....	69
4.2 P2-Topologie.....	83
5. Bewertung und Vergleich der P0- mit der P2-Topologie.....	96
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	102
7. Literaturverzeichnis .....	104

# 1. Einleitung

Aufgrund der immer restriktiveren Grenzwerte der Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO<sub>2</sub>-Emissionen) im Verkehrsbereich liegt der Fokus der Forschung und Entwicklung auf der Absenkung eben dieser Emissionen. In der EU ist seit 2012 der durchschnittliche Flottenverbrauch reglementiert. Seit 2015 gilt laut der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 für Personenkraftwagen (Pkw) ein Grenzwert von 130 g CO<sub>2</sub>/km basierend auf der Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) Testprozedur. Eine weitere Absenkung des Grenzwertes erfolgt ab dem Jahr 2020/2021 auf 95 g CO<sub>2</sub>/km nach NEFZ Testprozedur. Nach dem Vorschlag der Europäischen Kommission 2017/0293 (COD) haben sich das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union darauf geeinigt, dass mit dem Jahr 2030, basierend auf den Messungen nach dem World Harmonized Light Vehicle Test Procedure (WLTP), eine weitere Absenkung um 37,5 % gegenüber den Flottenwerten von 2021 erfolgen soll.

Erschwerend zur Einhaltung der zukünftig niedrigeren Grenzwerte für den durchschnittlichen Flottenverbrauch kommen die Trends der Kunden, weg von Dieselmotoren im Pkw sowie hin zu größeren und schwereren Fahrzeugen wie z.B. SUV (Sports Utility Vehicle), dazu [1]. Die genannten Entwicklungen führen dazu, dass die für 2030 anvisierten Grenzwerte nicht mehr nur durch eine alleinige Weiterentwicklung der Verbrennungskraftmaschine (VKM) wie z.B. Reduktion der Reibungsverluste erreicht werden können. Ein wesentliches Verbesserungspotential zur Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen liegt im Einsatz der Hybridtechnologie im Antriebstrang von Automobilen. Im preissensitiven Fahrzeugsegment der Kompaktklasse (C-Segment) stellt das 48 V Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV) eine kostengünstige Option zur Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber einem teureren Full-Hybrid Electric Vehicle (HEV) dar.

Aktuell sind saugrohreinspritzende Ottomotoren (MPFI) von der europäischen Gesetzgebung hinsichtlich der Begrenzung der Partikelemissionen in Form der Partikelanzahl (PN) und der Partikelmasse (PM) ausgenommen. Jedoch hat sich in einer vorangegangenen Untersuchung am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien an einem nach Euro 5 zertifizierten MPFI-Ottomotor gezeigt, dass eben diese VKM, insbesondere bei der Kaltstartuntersuchung im World Harmonized Light Vehicle Test Cycle (WLTC), bei hohen Lasten und großen Drehmomentgradienten einen erhöhten Ausstoß an Partikel aufweist. Durch den gezielten Einsatz der Kombination, bestehend aus der Elektrischen Maschine (EM) und der VKM im 48 V MHEV, besteht zusätzlich zur Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auch die Möglichkeit zur Absenkung der Partikelanzahlemissionen.

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus der Untersuchung mittels Simulation auf der Analyse des Trade Off Verhaltens von Verbrauch und Partikelanzahlemissionen eines

48 V MHEV mit einer P0- bzw. P2-Topologie. Weiters soll das Potential eines P2-Hybrids gegenüber einem P0-Hybrid aufgezeigt werden. Zielfahrzeug ist ein Kompaktklassefahrzeug mit einem MPFI-Ottomotor. Für die Ermittlung der Verbräuche wird für die beiden Hybridtopologien jeweils ein Fahrzeuglängsdynamikmodell in der Software *GT-SUITE* erstellt. Dabei liegt bei der Erstellung der Fahrzeuglängsdynamikmodelle besonders der Fokus auf der möglichst genauen Abbildung der für das Hybridkonzept wesentlichen Komponenten, um eine möglichst realitätsnahe Bewertung der Ergebnisse zu gewährleisten. Zur Ermittlung der Partikelanzahlemissionen wird mithilfe der Software *MATLAB-Simulink* ein statistisches Modell des Partikelanzahlstromes in Abhängigkeit von Parametern, die Einfluss auf die Entstehung von Partikel haben, erstellt. Dieses Modell wird mit Daten der Partikelanzahlströme aus der vorangegangenen Untersuchung mit dem MPFI-Ottomotor am Motorenprüfstand nach dem WLTP angelernt. Um die Eigenschaften der beiden Hybridtopologien mithilfe der Simulation zu bewerten, werden jeweils sowohl Kaltstart- als auch Warmstartuntersuchungen nach dem WLTP durchgeführt. Dabei werden bei beiden Hybridtopologien in der Betriebsstrategie Parameter, die Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch bzw. die Partikelanzahlemissionen haben, variiert. Im Anschluss werden die Auswirkungen der Parametervariation auf den Kraftstoffverbrauch und die Partikelanzahlemissionen untersucht.

## 2. Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zum näheren Verständnis von 48 Volt Hybridfahrzeugen dargestellt. Bei dieser Form von Hybridfahrzeugen wird eine VKM mit einem elektrischen Antriebssystem mit einer Spannungslage von 48 Volt kombiniert. In den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit kam die Kombination bestehend aus einem freisaugenden Ottomotor mit einer Saugrohreinspritzung und einer permanenterregten Synchronmaschine zum Einsatz. Daher beschränken sich alle nachfolgenden Betrachtungen auf diese beiden Antriebssysteme und deren Eigenschaften beim Einsatz in einem 48 V MHEV des C-Segmentes. Diese Konfiguration eines Hybridfahrzeuges wird speziell im Hinblick auf deren Potentiale bezüglich der Kraftstoffeinsparung und der Reduktion der Partikelanzahlemissionen beleuchtet.

### 2.1 Saugrohreinspritzender Ottomotor (MPFI)

Freisaugende Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung werden wegen der geringeren Kosten gegenüber direkteinspritzenden Ottomotoren in Fahrzeugen im preissensitiven C-Segment verbaut. In den nachfolgenden Unterkapiteln wird auf deren Eigenschaften hinsichtlich des Einsatzes in einem 48 V MHEV eingegangen. An dieser Stelle wird für eine genauere und tiefergehende Beschreibung von MPFI-Ottomotoren auf entsprechende Fachliteratur wie beispielsweise [2] verwiesen.

#### 2.1.1 Kraftstoffverbrauch

In der Abbildung 1 ist ein typisches Verbrauchskennfeld eines MPFI-Ottomotors ersichtlich. Dieses Kennfeld ist ein statisches Kennfeld und wurde im betriebswarmen Zustand der VKM vermessen.

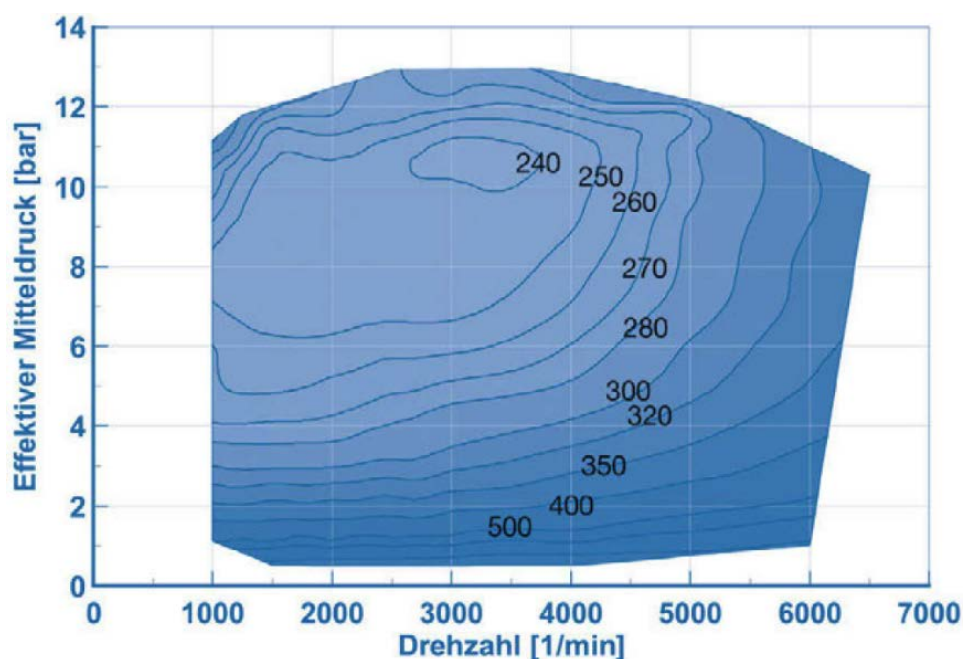


Abbildung 1: Verbrauchskennfeld MPFI-Ottomotor [3]

Es ist erkennbar, dass sich das Minimum des spezifischen Kraftstoffverbrauches und somit der maximale Wirkungsgrad von MPFI-Ottomotoren im mittleren Drehzahlbereich bei hohen Lasten befindet. Zum Teillastbereich hin steigt der spezifische Kraftstoffverbrauch stark an. Wesentliche Ursachen hierfür sind zunehmende Drosselverluste beim MPFI-Ottomotor, sowie der im Verhältnis zum abgegebenen Nutzmoment zunehmende Anteil der Reibung [4]. Im realen Betrieb bei einem Fahrzeug mit konventionellem Antrieb wird die VKM im Durchschnitt im unteren Teillastbereich mit geringen Wirkungsgraden betrieben. Deswegen ist ein wesentlicher Ansatz zur Kraftstoffeinsparung die Vermeidung des Betriebes der VKM im Teillastbereich durch den gezielten Einsatz von bestimmten Hybridfunktionen wie z.B. die Lastpunktanhebung oder rein elektrisches Fahren. Auf diese Hybridfunktionen und deren Kraftstoffeinsparungspotential wird im nachfolgenden Kapitel 2.4 näher eingegangen.

### 2.1.2 Partikelemissionen

Bei der unvollständigen Verbrennung von Kraftstoff-Luft-Gemischen entstehen Feststoffe in Form von Partikeln. Sie entstehen, in der Abhängigkeit vom eingesetzten Brennverfahren und Motorbetriebszustand, hauptsächlich aus einer Aneinanderkettung von Kohlenstoffteilchen (Ruß) mit einer sehr großen spezifischen Oberfläche. Die Partikel-Emissionen sind sehr stark vom Luftverhältnis  $\lambda$  abhängig. Ruß entsteht lokal bei diffuser Verbrennung von sehr stark angereichertem Kraftstoff-Luft-Gemisch ( $\lambda < 0,4$ ) bei hohen Verbrennungstemperaturen von bis zu 2 000 K. Daneben kann auch bei inhomogener Gasphase in lokalen Zonen mit einem hohen Anteil an Kraftstoff im Kraftstoff-Luft-Gemisch Ruß gebildet werden [2], [3], [4].

In den folgenden Betriebsbereichen und Betriebszuständen der VKM kommt es zu einer deutlichen Anreicherung des Kraftstoff-Luft-Gemisches und somit zu einem erhöhten Ausstoß an Partikeln:

- Beschleunigung
- Volllast
- Kaltstart/Warmlauf

#### Beschleunigung

Im Falle eines schnellen Beschleunigungsvorganges wird bei einem MPFI-Ottomotor die Drosselklappe sehr rasch geöffnet. Dies hat einen rapiden Anstieg des Saugrohrdruckes und eine damit einhergehende höhere Wandfilmbildung des Kraftstoffes zur Folge [5]. Ohne einer Kompensation des erhöhten Wandfilmanteiles durch eine sogenannte Beschleunigungsanreicherung

würde es bei einer raschen Änderung der Last zu einem überstöchiometrischen Kraftstoff-Luft-Gemisch im Zylinder kommen.

### **Vollast**

Für die Erzielung der maximalen Leistung eines Ottomotors wird ein kraftstoffreiches Kraftstoff-Luft-Gemisch im Bereich von  $\lambda = 0,8$  bis  $0,9$  benötigt. Bei  $\lambda = 0,8$  bis  $0,9$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass Reaktionspartner aufeinandertreffen, am größten. Dies bedingt eine schnellere Verbrennung und somit die Umsetzung der maximal möglichen Arbeit [2].

### **Kaltstart/Warmlauf**

Für die Partikelanzahlemissionen spielen die Brennraumtemperatur und somit die Temperatur der brennraumumgebenden Bauteile eine wesentliche Rolle. Wegen schlechter Bedingungen für die Verbrennung muss das Kraftstoff-Luft-Gemisch beim Kaltstart und beim Warmlauf angereichert werden. Die Ursachen dafür sind nach [5]:

- eine gestiegene Speicherfähigkeit des kalten Schmiermittels in den Brennraumspalten und an den Brennraumwänden
- ein Mehreintrag von flüssigem Kraftstoff in den Zylinder
- geringere Nachoxidationen aufgrund niedrigerer Wand- und Gastemperaturen

Hinsichtlich der Absenkung der Partikelanzahlmissionen ist es sinnvoll, die zuvor genannten Betriebszustände zu vermeiden. Ansätze zur Vermeidung ebendieser Betriebszustände durch Hybridfunktionen werden im Kapitel 2.4 näher vorgestellt.

## **2.2 Definition und Klassifizierung von Hybridkonzepten**

Die unterschiedlichen Hybridkonzepte können grundsätzlich anhand der Anordnung der Hauptkomponenten im Antriebsstrang (VKM, E-Maschine, Generator, Batterie und Getriebe) eingeteilt werden. Daraus ergeben sich folgende Grundstrukturen [6]:

- Serieller Hybridantrieb
- Paralleler Hybridantrieb
- Leistungsverzweigter Hybridantrieb

Eine weitere Möglichkeit der Einteilung der Hybridkonzepte besteht darin, sie anhand ihres Elektrifizierungsgrades zu unterscheiden. Die Einteilung erfolgt nach [6] wie folgt:

- Micro-Hybrid
- Mild-Hybrid
- Full-Hybrid
- Plug-In-Hybrid



## 2.2.1 Grundstrukturen

### Serieller Hybridantrieb

Bei diesem Hybridkonzept sind das verbrennungsmotorische und das elektrische Antriebssystem in Serie angeordnet. Dabei besteht zwischen der VKM und der Antriebsachse keine mechanische Verbindung. Die VKM dient ausschließlich dazu, die erste, generatorisch arbeitende EM anzutreiben. Diese wandelt die mechanische Energie der VKM in elektrische Energie um und versorgt somit die Batterie und die zweite, motorisch arbeitende EM [6], [7].

### Paralleler Hybridantrieb

Beim Parallel-Hybrid verlaufen der elektrische und der verbrennungsmotorische Antriebspfad parallel zueinander. Dabei wird die Leistung zum Vortrieb der beiden Systeme mechanisch überlagert. Gegenüber dem seriellen Hybridantrieb besteht eine direkte mechanische Verbindung zwischen der VKM und den anzutreibenden Rädern. Durch die parallele Anordnung der EM kann diese je nach Notwendigkeit zu- oder abgeschaltet werden. Dies ermöglicht einen rein elektrischen, konventionellen oder gemischten Betrieb [6], [7].

Im Parallel-Hybrid kann die EM an unterschiedlichen Positionen im Antriebsstrang angeordnet werden. Für die Nomenklatur hat sich ein Bezeichnungsschema durchgesetzt und wird üblicherweise mit P0-, P1-, P2-, P3- oder P4-Hybrid angegeben. Dabei steht das P für Parallel und die Zahl gibt den Einbauort der EM an, siehe Abbildung 2 [6].

P0: Die EM ist als Riemen-Starter-Generator (RSG) ausgeführt und ist mittels eines Riemens in den Nebenantrieb der VKM integriert. Die übertragbare Leistung, das übertragbare Drehmoment, die mögliche Rekuperation und die Hybridfunktionalität sind begrenzt. Es besteht keine Möglichkeit einer rein elektrischen Fahrt (E-Fahrt). Ein Vorteil der P0-Topologie liegt darin, dass bei einer Adaption eines konventionell angetriebenen Fahrzeuges die VKM an ihrer Originalposition bleiben kann [8].

P1: Hierbei ist die EM drehfest mit der Kurbelwelle der VKM vor der Anfahrkupplung verbunden. Die P1-Topologie besitzt dieselben Hybridfunktionalitäten wie die P0-Topologie. Jedoch kann der Durchmesser der EM größer gewählt werden. Dies ermöglicht eine drehmomentstärkere EM und wirkt sich dadurch positiv hinsichtlich der Drehmomentenunterstützung aus. Diese Art von Hybridtopologie ist herausfordernder, weil für die EM ein zusätzlicher Platz zwischen der VKM und dem Getriebe benötigt wird [8]. Allerdings kann bei der P1-Topologie der Riementrieb entfallen.

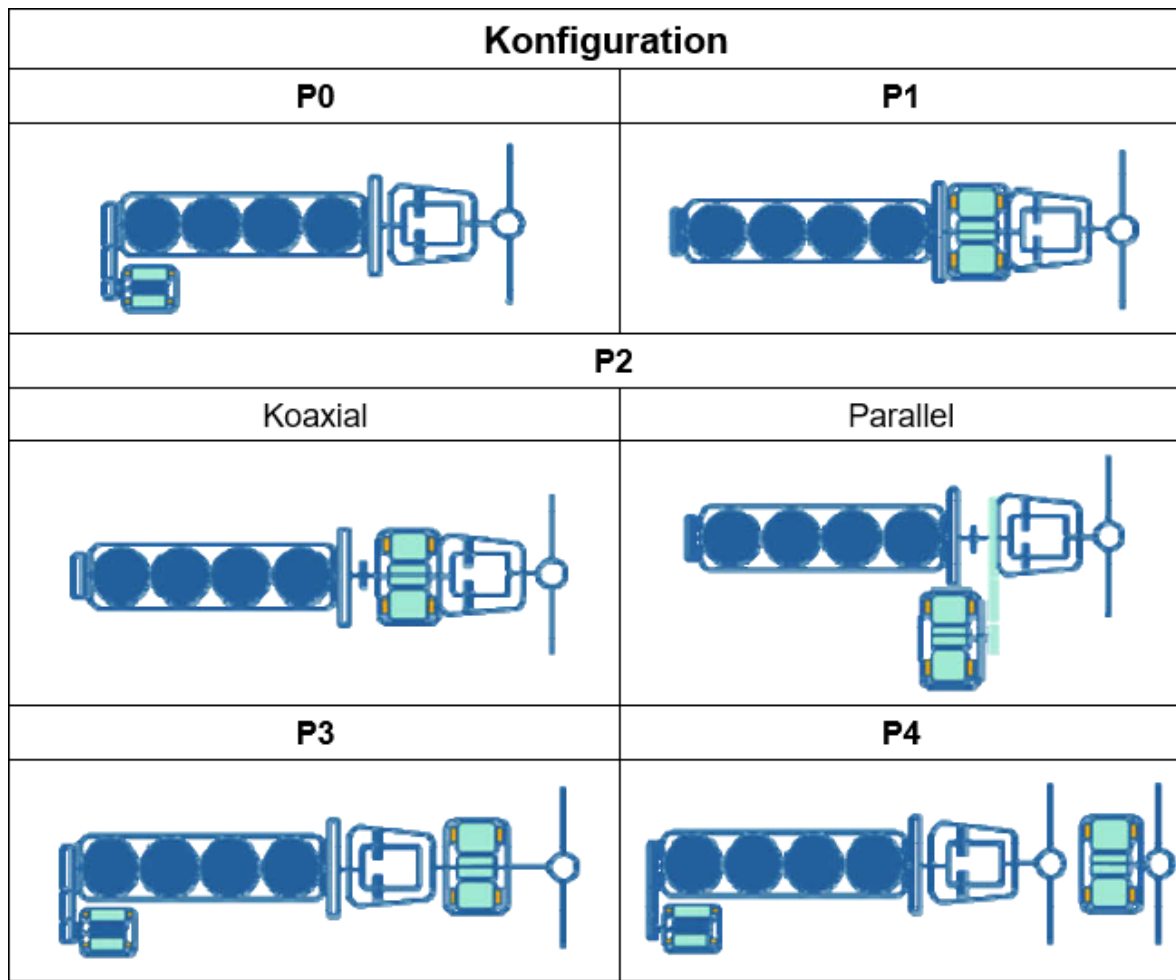


Abbildung 2: Parallel Hybridtopologien [8]

**P2:** Die EM ist zwischen der VKM und dem Getriebe positioniert. Durch eine zusätzliche Trennkupplung  $K_0$  zwischen der EM und der VKM kann die VKM vom Antriebsstrang abgekoppelt werden. Durch die Möglichkeit zur Abkoppelung der VKM vom restlichen Antriebsstrang sind die rein elektrische Fahrt sowie die Rekuperation in einem wesentlich effizienteren Rahmen, ohne Einbußen des Schleppmoments des Verbrennungsmotors, möglich [7], [8]. Wie in der Abbildung 2 ersichtlich, ist bei der P2-Topologie in der parallelen Ausführung die EM seitlich montiert und über ein Zwischengetriebe mit der Getriebeeingangswelle verbunden. Durch die zusätzliche Übersetzung im Zwischengetriebe kann EM als Hochdrehzahlkonzept ausgeführt werden. Bei der koaxialen Variante der P2-Topologie ist die EM mit der Getriebeeingangswelle verbunden. Aufgrund der kürzeren Baulänge der parallelen P2-Topologie wird diese bei Fahrzeugen mit Vorderradantrieb eingesetzt. Die koaxiale P2-Topologie kommt in Fahrzeugen mit Hinterradantrieb zum Einsatz, weil dort die Baulänge des Antriebsstranges eine geringere Rolle spielt. Zwischen der koaxialen und parallelen Variante der P2-Topologie besteht nur eine geringe Kostendifferenz [9].

**P3:** Bei der P3-Topologie befindet sich die EM zwischen dem Getriebe und dem Differential. Hierbei muss die Leistung bei der E-Fahrt und Rekuperation nicht mehr

durch das Getriebe geleitet werden. Jedoch unterliegt die EM der Getriebeausgangsdrehzahl und damit einem wesentlich breiteren Drehzahlbereich. Die EM im Antriebsstrang kann im Gegensatz zur P0-, P1- und P2-Topologie nicht zum Start der VKM verwendet werden. Deshalb wird eine zusätzliche EM zum Starten der VKM benötigt [7], [8].

P4: In der Abbildung 2 ist ersichtlich, dass die EM und die VKM ihre Leistung auf unterschiedliche Achsen abgeben. Diese Art der Topologie wird oft dazu verwendet, um eine elektrische Hinterachse in Kombination mit der VKM an der Vorderachse und somit einen Allradantrieb zu realisieren. Dabei sind die beiden Antriebseinheiten nur durch den Leistungsfluss über die Fahrbahn miteinander gekoppelt. Jedoch um die Vorteile eines voll funktionalen Hybridfahrzeugs zu nutzen, kann die P4-Topologie mit einer P0-Topologie kombiniert. Daraus ergibt sich die sogenannte P04-Topologie [7], [8].

### **Leistungsverzweigter Hybridantrieb**

Bei dieser Variante des Hybridantriebes wird die zu übertragende mechanische Leistung in einen mechanischen und einen elektrischen Pfad aufgeteilt. Zum Antrieb des Fahrzeuges werden die aufgeteilten Leistungen wieder zusammengeführt. Die Aufteilung der Leistungen ermöglicht eine vom Fahrzustand unabhängige Wahl des Betriebspunktes der VKM. Dadurch kann der mechanische Pfad der Leistung mit einem sehr hohen Wirkungsgrad betrieben werden. Zusätzlich hat diese Aufteilung den wesentlichen Vorteil gegenüber dem seriellen Hybrid, dass nur ein Teil der Leistung über den elektrischen Pfad fließt und somit geringere Verluste entstehen. Jedoch ist das System eines leistungsverzweigten Hybrid komplexer aufgebaut und bedarf eines höheren Steuerungs- und Regelaufwandes. Zur Leistungsaufteilung wird meist ein sogenanntes stufenloses Getriebe verwendet [8].

## **2.2.2 Elektrifizierungsgrad**

### **Micro-Hybrid:**

Der Micro-Hybrid (mHEV) weist im Vergleich mit einem konventionell angetriebenen Fahrzeug nur geringe Modifikationen auf. Für die Start-Stopp-Funktion wird der konventionelle Anlasser durch einen leistungsfähigeren oder durch einen RSG ersetzt. Weiters kann im Gegensatz zu reinen Start-Stopp-Systemen beim Bremsen die Verzögerungsenergie teilweise rekuperiert werden [6].

### **Mild-Hybrid:**

Im Vergleich zum Micro-Hybrid kommen beim Mild-Hybrid (MHEV) leistungsfähigere Komponenten zum Einsatz. Mild-Hybridssysteme werden oft als paralleler Hybridantrieb ausgeführt. Es können die typischen Hybridfunktionen Start-Stopp-Funktion, rekuperatives Bremsen, Lastpunktverschiebung und Boosten

limitiert genutzt werden. Je nach Topologie des parallelen Hybridantriebes ist der Mild-Hybrid auch in der Lage kurze Strecken rein elektrisch zurückzulegen. Der Vorteil hinsichtlich der Kraftstoffeinsparung ist abhängig von der Leistung der eingesetzten EM und der Größe der Hochvolt-Batterie (HV-Batterie). Im Mild-Hybrid kommen HV-Batterien mit einem Spannungsbereich von 48-150 V zum Einsatz [6], [10].

### **Full-Hybrid:**

In einem Full-Hybridfahrzeug (HEV) können alle Hybridfunktionen uneingeschränkt genutzt werden. Es ist daher möglich, dass Full-Hybridfahrzeuge wahlweise rein elektrisch, nur mit der VKM oder kombiniert betrieben werden können. Im Vergleich zum Mild-Hybrid wird die elektrische Antriebsleistung nochmals erhöht und die HV-Batterie hat einen höheren Spannungsbereich von ca. 200-400 V. Durch die uneingeschränkte Nutzung der Hybridfunktionen kann der Verbrauchsvorteil weiter gesteigert werden. Full-Hybridfahrzeuge können als serielle, parallele oder leistungsverzweigte Hybridantriebe ausgeführt werden [6], [10].

### **Plug-In-Hybrid:**

Der Plug-In-Hybrid (PHEV) zeichnet sich durch eine HV-Batterie mit einer größeren Kapazität, welche über das externe Stromnetz geladen werden kann, aus. Plug-In-Hybride weisen eine höhere rein elektrische Reichweite als ein Full-Hybrid auf und bieten die Möglichkeit des autarken Betriebs wie ein Full-Hybrid. Daher stellen PHEV eine Mischform zwischen einem Full-Hybridfahrzeug und einem Batterieelektrischen Fahrzeug (BEV) dar [6].

In der vorliegenden Arbeit werden die Untersuchungen für ein Mild-Hybridfahrzeug mit einem MPFI-Ottomotor und einer Spannungslage der HV-Batterie von 48 V, einerseits mit einer P0-Topologie und andererseits mit einer P2-Topologie, bei der die EM parallel angeordnet ist, durchgeführt. Daher liegt der Fokus der nachfolgenden Betrachtungen ausschließlich auf den zuvor genannten Varianten eines 48 V MHEV. Die beiden untersuchten Hybridtopologien werden im Kapitel 3.1 näher vorgestellt.

## **2.3 Hybridfunktionen von 48 V Mild-Hybrid Fahrzeugen**

Hinsichtlich der Reduzierung des Kraftstoffverbrauches und der Absenkung der Partikelanzahlemissionen bei einem MPFI-Ottomotor bietet die Elektrifizierung des Antriebes neue, beziehungsweise erweiterte Antriebsstrang- und Fahrzeugfunktionen. In der Tabelle 1 sind die unterschiedlichen Funktionen und deren Potentiale für die P0- und P2- Topologie angeführt.

Tabelle 1: Hybridfunktionen nach Topologie – in Anlehnung an [8]

Hybridfunktion	Topologie	
	P0	P2
Rekuperation	+	++
Lastpunktverschiebung	+	+
Elektrisches Fahren	-	+
Start-Stopp	+	++
Coasting	0	+

Im Folgenden werden die oben genannten Funktionen und deren Spezialfälle eines 48 V MHEV in P0- und P2-Anordnung, hinsichtlich eines kraftstoffeffizienteren und/oder Partikelanzahlemissionen ärmeren Betriebes, gegenüber einem Fahrzeug mit konventionellem Antrieb betrachtet.

### 2.3.1 Rekuperation

Unter der Rekuperation wird die teilweise Rückgewinnung der kinetischen Energie des Fahrzeugs beim Bremsvorgang verstanden. Im Unterschied zu einem Fahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang kann bei einem Hybridfahrzeug das Fahrzeug über ein generatorisches Drehmoment der EM verzögert werden. Bei der Rekuperation wird die kinetische Energie des Fahrzeuges in elektrische Energie umgewandelt und im elektrischen Energiespeicher zwischengespeichert. Die so gewonnene Energie kann dann später für andere Hybridfunktionen zur Kraftstoffeinsparung eingesetzt werden. Die Höhe der durch die Rekuperation erreichbaren Kraftstoffeinsparung ist einerseits vom Anteil und andererseits vom späteren Einsatz der rekuperierten Energie abhängig. Wesentlich für die Höhe des Anteils sind eine leistungsstarke EM und Batterie, eine intelligente Regelung zur Einhaltung der Batteriegrenzen sowie ein rekuperatives Bremssystem, welches rein rekuperatives Bremsen bis zu niedrigen Geschwindigkeiten ermöglicht. Weiters ist für eine hohe Rekuperationsenergie von Vorteil, wenn die VKM durch Abkopplung mittels einer Trennkupplung während der Rekuperation nicht mitgeschleppt werden muss. Diese Abkopplung ist bei der P2-Topologie darstellbar, aber im Gegensatz dazu bei der P0-Topologie konzeptbedingt nicht möglich. Deswegen ist das Rekuperationspotential der P2-Topologie gegenüber der P0-Topologie signifikant höher. Dies ermöglicht ein höheres Kraftstoffeinsparungspotential durch den erhöhten Einsatz von elektrischer Energie zur Substitution der von der VKM abgegebenen mechanischen Energie eines 48 V MHEV in P2 Ausführung. Der Einsatz von der aus der Rekuperation gewonnen elektrischen Energie kann je nach Fokus der Betriebsstrategie auf die Anforderungen immer zu einer Kraftstoffersparnis und/oder zu einer Absenkung der Partikelanzahlemissionen

führen. Im Falle, dass das aktuell maximal mögliche Drehmoment der EM für die vom Fahrer gewünschte Verzögerung nicht ausreicht, muss zusätzlich mit der mechanischen Reibbremse verzögert werden. Das aktuell maximal mögliche Drehmoment der EM hängt im Wesentlichen von der Auslegung der EM hinsichtlich Leistung und Drehzahl ab. Wegen der Koordination zwischen den zwei Verzögerungssystemen ist eine zusätzliche Regelung notwendig, welche die gewünschte Bremsverzögerung zwischen der EM und der Reibbremse aufteilt, sowie ein Bremssystem, das eine Bremspedalbetätigung des Fahrers ermöglicht, ohne dabei auf den hydraulischen Bremskreis zu wirken [6], [7], [10].

### 2.3.2 Lastpunktverschiebung (LPV)

Wie eingangs im Kapitel 2.2.2 erläutert, liegt bei Fahrzeugen mit einem parallelen Hybridantrieb eine Drehzahlkopplung zwischen der VKM und EM vor. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit der weitreichenden Entkopplung der vom Fahrer gewünschten Lastanforderung im Antriebsstrang von der Lastanforderung an die VKM [6]. Dabei kann die VKM über die EM zusätzlich zur gewünschten Lastanforderung zum Vortrieb be- oder entlastet werden. Der so gewonnene Freiheitsgrad der Lastanforderung an die VKM ermöglicht verschiedene Arten, den Betriebspunkt der VKM zu verschieben. Jedoch ergeben sich aus dem Einsatz der unterschiedlichen Arten der Lastpunktverschiebung Zielkonflikte zwischen der Absenkung des Kraftstoffverbrauches und der Partikelanzahlemissionen. Für einen akzeptablen Kompromiss ist eine intelligente Betriebsstrategie mit einer entsprechenden Wichtung der Anforderungen notwendig [6]. Bei der Lastpunktverschiebung gibt es die Möglichkeit der Lastpunktanhebung, der Lastpunktabsenkung und dem Spezialfall der Phlegmatisierung. Die beiden erstgenannten Arten der Lastpunktverschiebung sind in der Abbildung 3 dargestellt.

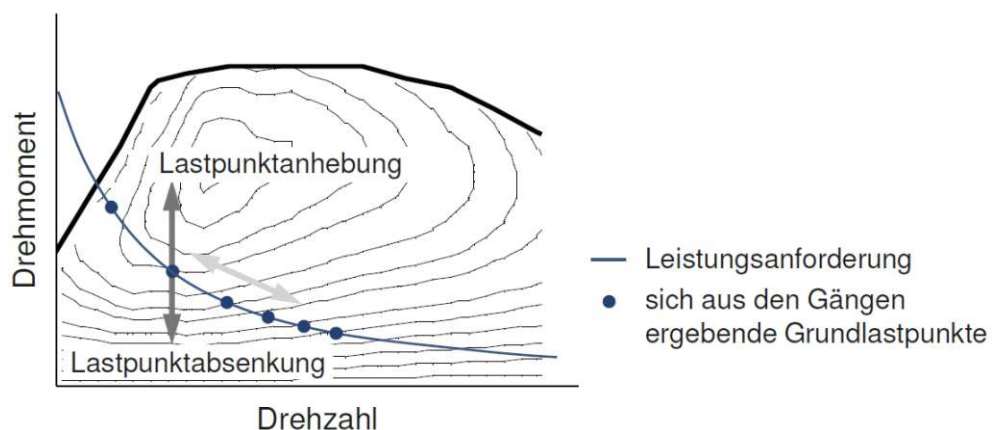


Abbildung 3: Lastpunktverschiebung beim parallelen Hybridantriebsstrang [7]



## **Lastpunktanhebung**

Ein wesentlicher Vorteil zur Kraftstoffeinsparung von Hybridfahrzeugen ist die Lastpunktanhebung. Bei der Lastpunktanhebung wird die VKM zusätzlich zur Last durch die Fahrenforderung mit einem generatorischen Drehmoment der EM belastet. Dadurch wird der Betriebspunkt der VKM bei gleichzeitiger Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie angehoben. Dabei erfolgt eine Verschiebung des Betriebspunktes der VKM mit einem schlechten Teillastwirkungsgrad, siehe Kapitel 2.1.1, hin zu einem Betriebspunkt mit einer höheren Drehmomentanforderung an die VKM bei einem höheren Wirkungsgrad. Zusätzlich von Vorteil ist neben der Steigerung des Wirkungsgrades der VKM die Erzeugung von elektrischer Energie. Diese kann in anderen Fahrsituationen, in denen die VKM in sehr ungünstigen Bereichen betrieben wird, wieder für elektrische Fahrt und/oder Lastpunktverschiebung eingesetzt werden. Durch den gezielten Einsatz der Kombination aus der Lastpunktanhebung und elektrischen Fahrt lässt sich der gesamte Antriebswirkungsgrad steigern [7].

Im Kaltstart/Warmlauf der VKM kommt es wegen der Lastpunktanhebung durch eine erhöhte Lastanforderung an die VKM zu einem erhöhten Ausstoß an Partikeln. Dies ist durch eine Anreicherung des Kraftstoff-Luft-Gemisches sowie durch ungünstigere Bedingungen für die Gemischaufbereitung und Verbrennung bedingt, wie eingangs im Kapitel 2.1.2 erläutert. Im betriebswarmen Zustand der VKM spielen die höheren Drehmomentanforderungen durch die Lastpunktanhebung bezüglich der Partikelanzahlemissionen eine untergeordnete Rolle. Auf die Betrachtung der einzelnen Auswirkungen der Lastpunktanhebung hinsichtlich der Kraftstoffeinsparung und Reduktion der Partikelanzahlemissionen wird im Kapitel 4 im Rahmen der Untersuchung detailliert eingegangen.

## **Lastpunktabsenkung**

Unter der Lastpunktabsenkung wird die Verschiebung des Betriebspunktes der VKM mit höheren Lastanforderungen hin zu einem Betriebspunkt mit einer geringeren Lastanforderung an die VKM verstanden. Die dabei entstehende Differenz zwischen der vom Verbrennungsmotor abgegebenen mechanischen Energie und der zum Vortrieb gewünschten mechanischen Energie wird durch die Umwandlung der in der Batterie zwischengespeicherten elektrischen Energie in mechanische Energie mit Hilfe der EM abgedeckt [6]. Die Lastpunktabsenkung wird in der Regel dann angewendet, wenn die gewünschte Leistungsanforderung des Fahrers an den Antriebsstrang zu einem Betrieb der VKM nahe an der Volllast führen würde. Zum Erreichen der maximal möglichen Leistung wird an der Volllast das Kraftstoff-Luft-Gemisch sehr stark angereichert, siehe Kapitel 2.1.2. Durch die Lastpunktabsenkung können Betriebspunkte nahe der Volllast vermieden werden.

Somit kann einerseits der Wirkungsgrad der VKM gesteigert und andererseits der Ausstoß an Partikel gesenkt werden.

### **Phlegmatisierung**

Die Phlegmatisierung ist ein Spezialfall der Lastpunktverschiebung und dient primär zur Absenkung der Rohemissionen der VKM. Dabei wird bei der durch den Fahrer gewünschten rapiden Änderung der vom Antriebsstrang abzugebenden Leistung die Dynamik der VKM reduziert. Dies erfolgt durch die Abdeckung der raschen Drehmomentenänderungen mittels der EM, während die VKM langsamer an das neue Wunschmoment nachgeführt wird. Bei MPFI-Ottomotoren liegt der Vorteil in der Vermeidung einer Kraftstoffanreicherung bei kurzen Beschleunigungsvorgängen (Beschleunigungsanreicherung). Dies ist besonders vorteilhaft zur Absenkung von hohen Partikelemissionen bei kaltem Brennraum [6].

### **2.3.3 Elektrische Fahrt**

Ein weiterer wesentlicher Vorteil des Hybridantriebs ist das emissionsfreie, elektrische Fahren. Der Vorteil zur Kraftstoffeinsparung beruht auf der Tatsache, dass der Wirkungsgrad der VKM sehr stark von der Last abhängt. Bei der E-Fahrt können durch den gezielten Einsatz von elektrischer Energie zum Vortrieb wirkungsgradungünstige Betriebspunkte der VKM vermieden werden [6]. Wie im Kapitel 2.1.1 bereits erläutert, treten diese Betriebspunkte mit niedrigen Wirkungsgraden der VKM vor allem im Bereich der Teillast auf. Bei der E-Fahrt wird das vom Fahrer zum Vortrieb gewünschte Drehmoment von der EM bereitgestellt. Dabei wird die EM mit der in der Batterie gespeicherten elektrischen Energie versorgt. Jedoch ist diese beschränkt und folglich daraus ist die elektrische Reichweite limitiert [10]. Wenn der Ladezustand der Batterie auf einen bestimmten Schwellwert absinkt oder eine höhere Lastanforderung durch den Fahrer erfolgt, wird die VKM zum Antrieb des Fahrzeuges sowie zum Laden der Batterie in einem höheren, wirkungsgradgünstigeren Bereich betrieben [6]. Die E-Fahrt kann nur dann sinnvoll zur Kraftstoffverbrauchseinsparung eingesetzt werden, wenn sich die VKM mit Hilfe einer Trennkupplung vom restlichen Antriebsstrang abkoppeln lässt. Damit müssen von der EM nicht noch zusätzlich zur gewünschten Antriebsleistung auch die Schleppverluste der VKM überwunden werden. Die Funktion der E-Fahrt ist unter anderen beim P2-Hybrid sinnvoll einsetzbar, siehe Tabelle 1. Jedoch im Gegensatz dazu macht die Anwendung der E-Fahrt beim P0-Hybrid keinen Sinn.

Ein lokales Optimum hinsichtlich Schadstoff- und Lärmemissionen kann dadurch erreicht werden, wenn bei einem 48 V MHEV die Möglichkeit für eine E-Fahrt besteht. Jedoch muss dabei bedacht werden, dass sich der Schadstoffausstoß auf die Bereiche, an denen die VKM läuft und die Batterie nachlädt, verlagert [6].



Nach [9] kann der Antrieb mit der EM des 48 V MHEV anhand der benötigten Antriebsleistung und dem Geschwindigkeitsbereich wie folgt unterteilt werden:

- Elektrisches Fahren: rein elektrischer Betrieb des Fahrzeuges im definierten Geschwindigkeitsbereich
- Elektrisches Kriechen: rein elektrischer Antrieb des Fahrzeuges bei geringen Geschwindigkeiten
- Segeln: elektrisch unterstützte Konstantfahrt im definierten Geschwindigkeitsbereich mit abgekoppelter VKM

### 2.3.4 Start-Stopp

Fahrzeuge mit einem konventionellen Antrieb werden im Speziellen in einem Stadtzyklus häufig im Leerlauf betrieben. Die Phasen des Leerlaufs und dem damit verbundenen so genannten Leerlaufverbrauch haben einen signifikanten Anteil am Kraftstoffverbrauch im Fahrzyklus. Grundsätzlich wird durch eine Start-Stopp-Funktion die VKM im Fahrzeugstillstand abgestellt und führt somit zu einer Einsparung des Leerlaufverbrauches. Bei MHEV ist es zusätzlich möglich, in Bremsphasen beim Unterschreiten einer bestimmten Geschwindigkeit die VKM abzuschalten. Durch diese Maßnahme kann der Kraftstoffverbrauch zusätzlich reduziert werden. Eine wesentliche Voraussetzung für das Abschalten der VKM ist, dass die Nebenverbraucher anderwärtig versorgt werden können. Bei 48 V MHEV ist dies möglich, weil diese relativ großen Batterien und elektrifizierte Nebenverbraucher eingebaut haben [10].

Im Hinblick auf die Partikelanzahlemissionen kann es von Nachteil sein, dass im Speziellen während des Warmlaufes die VKM häufig an- bzw. abgeschaltet wird. Beim Startvorgang der VKM im kalten Zustand kommt es wegen der zusätzlichen Kraftstoffanreicherung, um ein zündfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch im Zylinder zu erhalten, zu einer kurzzeitigen Spitze der Partikelanzahlemissionen. Darauf wird in den Kaltstartuntersuchungen im Kapitel 4 eingegangen.

### 2.3.5 Coasting

In bestimmten Fahrsituationen wie z.B. eine Annäherung an eine Zone mit niedrigerer zulässiger Höchstgeschwindigkeit, an eine Kurve oder eine Kreuzung/Ampel fordert der Fahrer weder eine wesentliche noch eine besondere Beschleunigung an. Die Coasting-Funktion ermöglicht in solchen Phasen das Ausrollen des Fahrzeugs ohne Antrieb und bei abgekoppelter VKM. Je nach Konzept kann die VKM auch abgestellt werden. Analog zur Start-Stopp-Funktion kann die VKM nur dann abgeschaltet werden, wenn eine ausreichend große Batterie vorhanden ist und die Nebenverbraucher elektrifiziert sind. Durch diese Maßnahme bei abgestellter VKM kann nach [11] im Durchschnitt der reale

Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeuges des C-Segment im urbanen Umfeld um 8 % und außerstädtisch um 5 % gesenkt werden. An dieser Stelle sei besonders darauf hingewiesen, dass in Fahrzyklen wie z.B. dem WLTC die oben geschilderten Fahrsituationen nur in geringem Ausmaß vorkommen. Daher ist im Vergleich die anhand des Fahrzyklus ermittelte Kraftstoffverbrauchseinsparung deutlich geringer als die unter realen Bedingungen ermittelte Kraftstoffverbrauchseinsparung, wie in [11]. Aus diesem Grund kann die Coasting-Funktion als Realfahrfunktion bezeichnet werden.

## 2.4 Betriebsstrategien

Grundsätzlich hat im Betrieb eines Fahrzeuges die Erfüllung der vom Fahrer gewünschten Leistungsanforderung oberste Priorität. In einem Fahrzeug mit einem konventionellen Antriebsstrang wird diese Leistungsanforderung nur durch die VKM aufgebracht. Im Gegensatz dazu besitzen z.B. parallele Mild-Hybridfahrzeuge durch den Einsatz einer EM zusätzliche Freiheitsgrade im Betrieb der beiden Antriebssysteme, welche durch eine intelligente Regelung festgelegt werden müssen. Diese herausfordernde Aufgabe übernimmt die Betriebsstrategie von Hybridfahrzeugen. Sie trifft Entscheidungen bezüglich der Wahl der Betriebspunkte der beiden Energiewandler und regelt somit das Zusammenspiel eben dieser [6], [12]. Die Integration einer solchen Betriebsstrategie in einem HEV ist in der Abbildung 4 schematisch dargestellt.

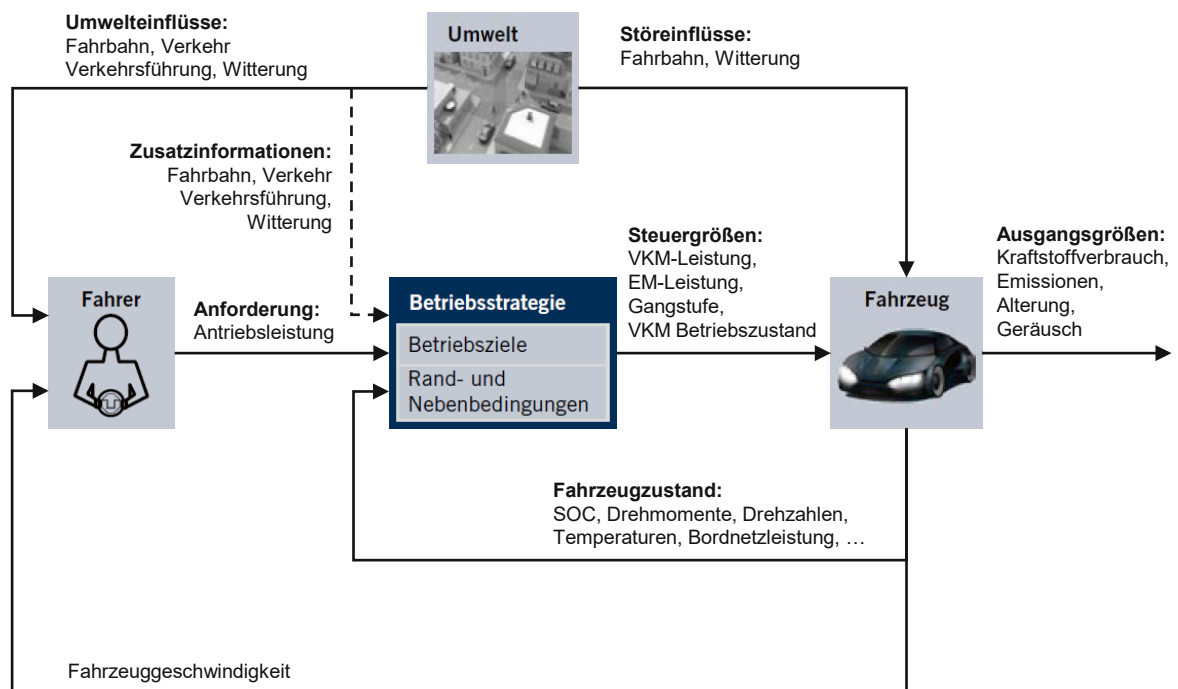


Abbildung 4: Einbettung der Betriebsstrategie in das Signalflussmodell eines HEV [12]

Die Hauptaufgabe der Betriebsstrategie besteht darin, den für den aktuellen Zustand bestmöglichen Betrieb der VKM und EM hinsichtlich der Erreichung der vorher definierten Betriebsziele unter Einhaltung bestimmter Rand- und Nebenbedingungen zu ermöglichen. Dabei werden Entscheidungen hinsichtlich der Wahl zwischen den verschiedenen Betriebsmodi und den zum Einsatz kommenden Hybridfunktionen getroffen. Daraus folgen wiederum die Leistungsaufteilung zwischen der VKM und der EM in Verbindung mit der Wahl des Betriebszustandes der VKM. Optional kann bei Vorliegen eines automatischen oder halbautomatischen Getriebes in der Betriebsstrategie die zusätzliche Aufgabe der Wahl der Gangstufe implementiert sein. Im Folgenden wird dies nicht weiter betrachtet, weil im zu untersuchenden Fahrzeug ein manuelles Schaltgetriebe verbaut ist und somit die Wahl des Ganges vom Fahrer vorgegeben wird.

Der Fokus der meisten Betriebsstrategien liegt explizit auf der Minimierung des Kraftstoffverbrauchs. Daneben existieren weitere multikriterielle Ansätze, die weitere Betriebsziele, wie z.B. die Reduktion der Emissionen, verfolgen [12]. Beispielhaft hierfür sei der Ansatz in [13] genannt, der neben der Verbrauchssenkung auch die Senkung der NO<sub>x</sub>-Emissionen in einem MHEV mit Dieselmotor zum Ziel hat. In dieser Arbeit werden Betriebsstrategien mit den Zielen zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs und der Partikelanzahlemissionen entwickelt und implementiert.

Wie bereits vorher angeklungen ist, unterliegt die Leistungsaufteilung zwischen der VKM und der EM bestimmten Rand- und Nebenbedingungen. Diese ergeben sich aus den physikalischen Komponenteneigenschaften, wie z.B. Drehzahl-, Drehmoment- oder Ladezustandsbegrenzungen. Ergänzend kommt bei der Umsetzung im Realfahrzeug die Beachtung des Fahrkomforts hinzu. Folglich sollten unter anderem kurze Ein- und Ausschaltintervalle der VKM vermieden werden [12].

Aktuell existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen Ansätzen für Betriebsstrategien. Diese können wie in [7], [14], [15] und [16] anhand ihrer zum Einsatz kommenden Methode bzw. Funktionsweise eingeteilt werden. An dieser Stelle sei der Vollständigkeit halber die weitere Möglichkeit zur Einteilung der Ansätze für Betriebsstrategien anhand bestimmter Kriterien nach [15], wie z.B. kausal/nicht kausal oder optimal/suboptimal, genannt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird kein Gebrauch von dieser kriterienorientierten Einteilungsmöglichkeit gemacht. Die Einteilung nach der Funktionsweise ist in der Abbildung 5 dargestellt.

Die optimierungsbasierten Ansätze zeichnen sich durch eine online im Fahrzeug stattfindende Berechnung der optimalen Ansteuerung aus [7]. Dabei verwenden sie mathematische Lösungsmethoden. Hierfür sind die Dynamische Programmierung (DP) und die Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) beispielhafte Verfahren mit einer wesentlichen Bedeutung in der praktischen Anwendung [12]. Dagegen werden bei den regelbasierten Methoden die

Entscheidungen anhand von zuvor definierten Regeln und Gesetzmäßigkeiten getroffen [7]. Zwei häufig verwendete Vertreter der regelbasierten Ansätze sind die mit deterministischen und auf Fuzzy-Logik basierenden Strukturen. Wie in der Abbildung 5 ersichtlich, dienen einigen regelbasierten Ansätzen die Lösungen der optimierungsbasierten Ansätze als Ausgangspunkt, um Parameter zu generieren [12].

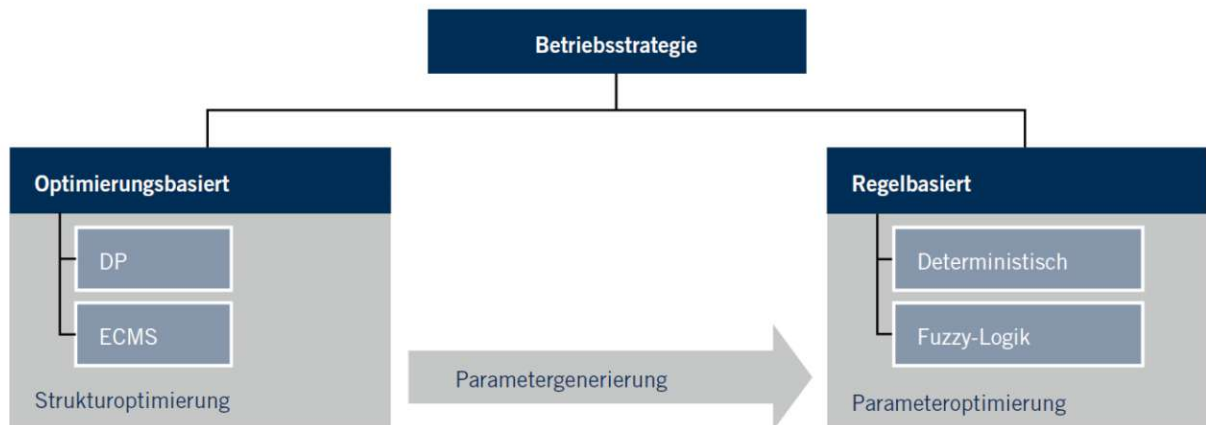


Abbildung 5: Klassifizierung von Betriebsstrategien [12]

Die Tabelle 2 verschafft einen guten Überblick über die einzelnen Eigenschaften der unterschiedlichen Betriebsstrategieansätze. Nachfolgend werden die für den Einsatz in einem HEV wesentlichen Eigenschaften der in der Tabelle 2 dargestellten Betriebsstrategien kurz erläutert. Weitere Details zu den verschiedenen Betriebsstrategien finden sich in [7], [15], [16] und [17].

Wie in Tabelle 2 ersichtlich, können nach [12] die verschiedenen Arten der optimierungsbasierten Betriebsstrategien jeweils in einen analytischen und einen numerischen Lösungsansatz unterteilt werden. Bei den numerischen Lösungsansätzen werden für die Ermittlung der optimalen Ansteuerung benötigten Berechnungsgrößen Maschinenkennfelder der jeweiligen Größe zum Nachsehen verwendet. Im Gegensatz dazu werden bei den analytischen Lösungsansätzen die benötigten Größen anhand einer analytischen Approximation ermittelt. Bei der analytischen Approximation werden die Maschinenkennfelder durch Näherungsfunktionen ersetzt [12]. Dadurch können bei der Berechnung im Betrieb die benötigten Größen direkt durch die zugehörige Näherungsfunktion ermittelt werden. Im Vergleich dazu müssen bei den numerischen Lösungsansätzen für die Ermittlung der benötigten Größe mehrere Schritte durchlaufen werden. Am Anfang wird im jeweiligen Maschinenkennfeld der zu bestimmenden Größe nachgesehen und anschließend für den gewünschten Betriebspunkt zwischen den benachbarten Punkten im Maschinenkennfeld interpoliert. Wegen der geringeren Anzahl an durchzuführenden Arbeitsschritten zur Ermittlung der benötigten Größen der Optimierungsrechnung ergibt sich für die analytischen Lösungsansätze eine geringere Berechnungsdauer und somit ein wesentlicher Vorteil gegenüber den numerischen

Lösungsansätzen. Jedoch sind bei den analytischen Lösungsansätzen die Abhängigkeit der Lösungsgüte von der Wahl der Näherungsfunktion und der wegen der analytischen Beschreibung aller Komponenten und Betriebsziele höhere Aufwand bei einer Adaption oder Erweiterung des Ansatzes von großem Nachteil.

Tabelle 2: Wertende Gegenüberstellung ausgewählter Betriebsstrategieansätze für parallele Hybridfahrzeugarchitekturen [12]

	Optimierungsbasiert					Regelbasiert	
	DP		ECMS			Deterministisch	Fuzzy-Logik
	Numerisch	Analytisch	Numerisch		Analytisch		
			Nicht-prädiktiv	Prädiktiv	Prädiktiv		
Lösungsgüte	++	+	○	+	○	--	--
Berechnungsdauer	--	○	○	○	+	++	+
Onlinefähigkeit	--	-	+	○	+	++	++
Anpassbarkeit	+	○	+	+	○	-	--
Erweiterbarkeit	+	-	+	+	-	-	--

Weiters ist in der Tabelle 2 ersichtlich, dass grundsätzlich die regelbasierten Strategien aufgrund des einfacheren Aufbaus einen geringeren Rechenbedarf aufweisen. Dadurch sind sie sehr gut onlinefähig und eignen sich besonders gut für den Einsatz in HEV. Weiters zeichnen sie sich durch eine robuste Struktur sowie eine gute Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen aus. Den zuvor genannten Vorteilen nachteilig steht die nicht optimale Lösungsgüte gegenüber. Der wesentliche Grund dafür ist die sehr starke Abhängigkeit der Lösungsgüte von der Auslegung der Regeln. Ein weiterer Nachteil ist die starre Struktur der regelbasierten Betriebsstrategien. Dadurch muss bei einer Änderung der Antriebskomponenten oder die Erweiterung um zusätzliche Betriebsziele ein sehr hoher Aufwand zur Änderung betrieben werden. Bei einer umfangreicheren Änderung oder Adaption kann es dazu kommen, dass die Betriebsstrategie neu erstellt werden muss [12].

Die Regelung der Leistungsaufteilung zwischen den unterschiedlichen Energiewandlern in einem HEV mit Hilfe eines Fuzzy-Logik-Reglers kann echtzeitfähig umgesetzt werden. Daneben weist die Regelung auf Basis der Fuzzy-Logik ein

robustes Verhalten in der Handhabung ungenauer Eingangsgrößen sowie einer relativ einfachen Priorisierung verschiedener Betriebsziele auf [12]. Gegen eine Umsetzung in einem HEV sprechen die aufwändige Anpassung an verschiedene Fahrzeugarchitekturen und die teils mit sehr hohem Aufwand verbundene Erweiterung bei Implementierung von zusätzlichen Betriebszielen. Aus den beiden zuletzt genannten Gründen wird der Ansatz mit der Fuzzy-Logik im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt.

Im Hinblick auf die Umsetzbarkeit einer Betriebsstrategie in einem HEV und der Regelung des Zusammenspiels mehrerer Hybridfunktionen zur Erreichung der Betriebsziele eines HEV zeichnet sich die ECMS als vielversprechender Ansatz aus. Wesentliche Vorteile der ECMS gegenüber regelbasierten Ansätzen sind die Anpassbarkeit an verschiedene Fahrzeugarchitekturen, die einfache Erweiterbarkeit um zusätzliche Betriebsziele und die unkomplizierte Möglichkeit zur Implementierung von Prädiktionsdaten. In Anbetracht der künftig verschärften legislativen CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung, einer steigenden Anzahl unterschiedlicher HEV-Derivate und zunehmender Ausstattungsvarianten gewinnen diese Eigenschaften weiter an Bedeutung [12].

Die konventionelle DP verfolgt einen numerischen Lösungsansatz. Dabei wird das Optimierungsproblem in eine Abfolge kleinerer Teilprobleme unterteilt. Voraussetzung für das Unterteilen in kleinere Teilprobleme ist die Möglichkeit zur Diskretisierung der Zeit als auch der Zustands- und Steuergrößen. Wenn das Fahrprofil a priori bekannt ist, dann gewährt bei entsprechender Wahl der Diskretisierungsschrittweite die DP das Auffinden der optimalen Ansteuerung [12]. Wegen der optimalen Lösungsgüte wird die DP oft zur Ermittlung der Referenzlösung herangezogen, wie z.B. in [7]. Aufgrund der langen Berechnungsdauer ist ein echtzeitfähiger Einsatz der konventionellen DP nicht möglich. Für die DP gibt es teilanalytische Ansätze und eine damit verbundene kürzerer Berechnungsdauer. Jedoch sind auch diese nur bedingt einsatzfähig in einem HEV. In weiterer Folge kommt die DP wegen des erheblich nachteiligen Grundes hinsichtlich der Berechnungszeit für die in dieser Arbeit verwendeten Ansätze der Betriebsstrategien nicht in Frage und wird deswegen nicht weiter betrachtet.

### **Auswahl der Betriebsstrategien**

Die Komplexität des Algorithmus eines Hybridsteuergerätes (HCU Hybrid Control Unit), welcher die Regeln bei einer Betriebsstrategie mit deterministischen Regeln beinhaltet, für MHEV mit P0-Topologie ist gegenüber einem MHEV mit P2-Topologie deutlich geringer. Dies ist durch die geringe Anzahl an möglichen Freiheitsgraden bedingt. Deshalb ist für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung mit dem Modell eines MHEV mit der P0-Topologie wegen des einfacheren Aufbaus und der Umsetzung eine auf deterministische Regeln basierende Betriebsstrategie entwickelt und im Fahrzeugmodell implementiert worden.



Auf die auf deterministische Regeln basierende Betriebsstrategie wird im Kapitel 2.4.1 genauer eingegangen.

Aufgrund der höheren Komplexität wegen der zusätzlichen Möglichkeit durch die Hybridfunktion der E-Fahrt bei einem MHEV mit P2-Topologie steigt der Aufwand zur Erstellung und Applikation der notwendigen Regeln für eine auf deterministischen Regeln basierende Betriebsstrategie. Im Gegensatz dazu sind der Ablauf und die damit verbundene Grundstruktur der ECMS für jede Art von Fahrzeugarchitektur gleich. Weiters besteht die Möglichkeit der einfachen Umsetzung der Erweiterbarkeit um zusätzliche Betriebsziele. Daher zeichnet sich die ECMS als vielversprechender Ansatz einer im Fahrzeug umsetzbaren Betriebsstrategie aus und wird in der numerischen, nicht prädiktiven Form in dieser Arbeit adaptiert und in das Modell des MHEV mit der P2-Topologie implementiert. Eine genaue Betrachtung der zuvor genannten Form der ECMS erfolgt im Kapitel 2.4.2.

### 2.4.1 Betriebsstrategie mit deterministischen Regeln

Bei den auf deterministischen Regeln basierenden Betriebsstrategien werden die Entscheidungen anhand von vorab definierten Regeln und Kriterien getroffen. Die Regeln sind meist als Zustandsautomaten und/oder in Form von Kennfeldern umgesetzt, welche die Entscheidungen entweder direkt in Abhängigkeit verschiedener Eingangsgrößen beinhalten und/oder in denen Größen und Grenzwerte hinterlegt sind, anhand derer die Entscheidungen getroffen werden [14].

Nach [7] können die Betriebsstrategien in verschiedene Kategorien, wie folgt, eingeteilt werden:

- auf Intuition und einfachen Zusammenhängen basierende Ansätze
- auf Effizienzanalysen basierende Ansätze
- Ansätze über spezifische Kosten und Ersparnisse
- Ansätze mit aus optimalem Betriebsverhalten abgeleiteten Regeln
- Ansätze über Offlinelösung des Optimalsteuerungsproblems

Für das Modell des MHEV mit der P0-Topologie ist ein auf Effizienzanalysen basierender Ansatz ausgewählt worden. Die anderen, oben angeführten Ansätze und deren Anwendungen werden in [7] ausführlich beschrieben. Der Ansatz, der verfolgt worden ist, hat eine Maximierung des Gesamtwirkungsgrades des Antriebsstranges beim Laden und einen nachfolgenden, effizienten Einsatz der beim wirkungsgradoptimalen Laden und der Rekuperation gewonnenen Energie sowie eine Reduktion der Partikelanzahlemissionen zum Ziel.

Daraus folglich wird die gesamte Betriebsstrategie in eine Ladestrategie und eine Entladestrategie unterteilt. Die nachfolgende Beschreibung des Ansatzes dient als

Grundlage für die Umsetzung in deterministische Regeln für die Betriebsstrategie, siehe Kapitel 3.1.2.

Die Ladestrategie des MHEV mit der P0-Topologie in der vorliegenden Arbeit ist an die Überlegungen für eine bedarfs- und wirkungsgradorientierten Ladestrategie in [18] angelehnt. In [18] sind die Überlegungen für ein Full-Hybridfahrzeug mit einer P2-Topologie angestellt worden. Es konnten in der Untersuchung in [18] mit diesem Ansatz vielversprechende Gesamtwirkungsgrade der Ladewirkungsgradkette über einen weiten Bereich von 36 % realisiert werden. Die Basis einer effizienten Ladestrategie ist die Auffindung des Gesamtwirkungsgradoptimums des Antriebsstranges mit Hilfe einer Analyse der Gesamtwirkungsgradkette. Der Ladewirkungsgrad mittels Lastpunktanhebung  $\eta_{LPA}$  kann analog zu [18] nach folgender Gleichung 1 beschrieben werden.

$$\eta_{LPA} = \eta_{ES} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{VKM,Diff} = \frac{P_{ES,Laden}}{(P_{Chem} - P_{Chem,FW})} \quad (1)$$

$\eta_{ES}$  ... Wirkungsgrad des Energiespeichers

$\eta_{EM}$  ... Wirkungsgrad der elektrischen Maschine

$\eta_{VKM,Diff}$  ... differentieller Wirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschine

$P_{ES,Laden}$  ... Leistung zum Laden des Energiespeichers

$P_{Chem}$  ... chemische Leistung des insgesamt verbrauchten Kraftstoffs

$P_{Chem,FW}$  ... chemische Leistung des für das Fahrerwunschloment verbrauchten Kraftstoffs

Aus der Gleichung 1 geht hervor, dass der Ladewirkungsgrad für Lastpunktverschiebung  $\eta_{LPA}$  eine Funktion von Drehzahl, Fahrerwunschloment und Lastpunktanhebungsmoment (LPA-Moment) ist. Die Bordnetzleistung ist hier vorerst nicht berücksichtigt worden. Jedoch hat sie einen Einfluss auf die zur Verfügung stehende elektrische Energie in der Batterie und der damit verbundenen herausnehmbaren Leistung. Aus diesem Grund wird die benötigte Bordnetzleistung in der Implementierung im Modell berücksichtigt, siehe Kapitel 3.2 und führt im Gegensatz zu einer nicht Berücksichtigung zu einer früheren Ladeanforderung in der Ladestrategie. Wie eingangs im Kapitel 2.3.2 erwähnt, ist bei einem Betriebspunkt, der durch die Drehzahl und dem Fahrerwunschloment klar definiert ist, nur eine Variation der zusätzlichen Lastanforderung möglich. Daher kann bei Kenntnis der Wirkungsgrade der Antriebsstrangkomponenten ein Ladewirkungsgradkennfeld für ein bestimmtes Fahrerwunschloment in Abhängigkeit der Drehzahl und des Lastpunktanhebungsmomentes ermittelt werden. In der Abbildung 6 ist ein solches Ladewirkungsgradkennfeld exemplarisch dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das maximale LPA-Moment bei niedrigen Drehzahlen durch die Vollast des Verbrennungsmotors und bei höheren



Drehzahlen durch das maximale, generatorische Moment der EM begrenzt wird. Weiters ist, wie eingangs erwähnt, zu erkennen, dass der maximale Ladewirkungsgrad nicht in einem singulären Punkt erreicht wird, sondern in einem weiten Bereich über der Drehzahl und dem LPA-Moment identifiziert werden kann [18]. Eine weitere Erkenntnis ist, dass der Ladewirkungsgrad bei konstant gehaltener Drehzahl und mit steigendem LPA-Moment stufenweise abnimmt. Dies lässt sich nach [18] durch eine mit steigendem Moment überproportionale Verschlechterung des differentiellen Wirkungsgrades der VKM und des Wirkungsgrades des Energiespeichers begründen. In [18] ist gezeigt worden, dass der maximale Ladewirkungsgrad bei verschiedenen Fahrerwunschkomenten bereits bei geringeren LPA-Momenten erreicht werden kann. Dies beruht nach [18] auf den Tatsachen, dass in diesen Betriebspunkten die elektrische Maschine bereits einen hohen Wirkungsgrad erreichen kann und die Verlustleistung im Energiespeicher wegen der kleinen Ladeleistung noch gering ist.

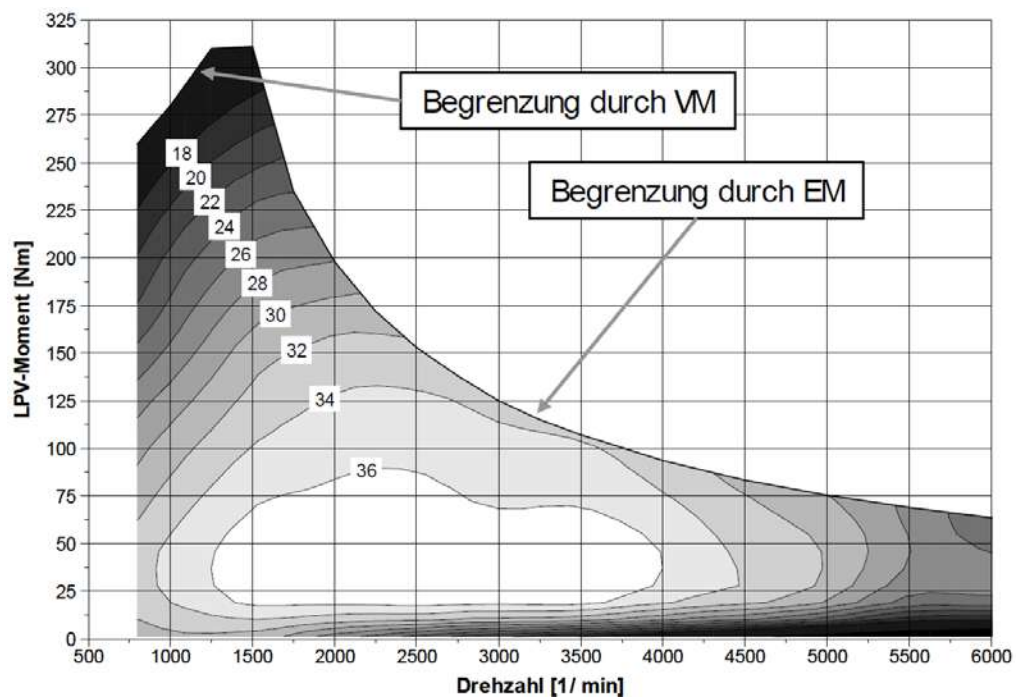


Abbildung 6: Ladewirkungsgrad für Lastpunktverschiebung bei einem Fahrerwunschkoment von  $M_{FW} = 100 \text{ Nm}$  [18]

Ausgehend vom Ladewirkungsgradkennfeld kann für ein bestimmtes Fahrerwunschkoment und einer bestimmten Drehzahl der maximale Wirkungsgrad und das dazugehörige Lastpunktanhebungsmoment ermittelt werden. Aus den so ermittelten Lastpunktanhebungsmomenten mit dem maximal möglichen Ladewirkungsgraden in Abhängigkeit von der Drehzahl und des Fahrerwunschkomentes kann ein so genanntes Ladekennfeld erstellt werden. Aus diesem Ladekennfeld kann beim Vorliegen einer Ladeanforderung durch die Betriebsstrategie im vorliegenden Betriebspunkt das wirkungsgradoptimale LPA-Moment für ein wirkungsgradorientiertes Laden ermittelt werden. Eine

Ladeanforderung durch die Betriebsstrategie erfolgt dann, wenn ein vorher definierter Grenzwert des Ladezustandes der Batterie (SOC State of Charge) unterschritten wird. Anschließend bei Überschreiten eines vorher definierten Grenzwertes des SOC ist der Ladevorgang abgeschlossen und die Ladeanforderung durch die Betriebsstrategie erlischt. Zusätzlich kann die Batterie durch Rekuperation geladen werden. Die Hybridfunktion Rekuperation ist so ausgelegt, dass so viel kinetische Energie des Fahrzeuges wie möglich durch Anlegen des maximal möglichen generatorischen Momentes der EM rückgewonnen werden kann. Die Betriebsstrategie übernimmt bei der Rekuperation die Aufteilung des zur Verzögerung benötigten Drehmoments zwischen der EM und der mechanischen Reibbremse.

Die Entladestrategie erfolgt ebenfalls wirkungsgradorientiert. Hierbei wird die zur Verfügung stehende elektrische Energie gezielt zur Lastpunktabenkung eingesetzt. Dadurch kann die VKM in einem wirkungsgradgünstigeren Bereich betrieben werden. Die Höhe der eingesetzten elektrischen Energie zur Lastpunktabenkung und die damit verbundene direkte Kraftstoffeinsparung hängt von der Menge der zur Verfügung stehenden elektrischen Energie und vom Betrieb der VKM im Fahrzyklus ab. Das Kraftstoffeinsparungspotential ist dann am größten, wenn die VKM bei hohen Drehmomenten betrieben wird und in Kombination dazu sehr viel kinetische Energie des Fahrzeuges rekuperiert werden kann. Wegen des Zusammenhangs zwischen der Höhe der eingesetzten elektrischen Energie zur Lastpunktabenkung und dem gefahrenen Fahrzyklus kann die Kenntnis über einen verbrauchsoptimalen Einsatz der elektrischen Energie zur Lastpunktabenkung nur a posteriori erlangt werden. Aus diesem Grund muss die verbrauchsoptimale Höhe der eingesetzten elektrischen Energie zur Lastpunktabenkung iterativ bestimmt werden. Weiters hat die Gültigkeit für das gefundene Optimum nur für den untersuchten Fahrzyklus Bestand.

Im Hinblick auf ein zusätzliches Ziel der Betriebsstrategie, wie z.B. die Reduktion der Partikelanzahlemissionen, können aufbauend auf den oben beschriebenen Ansatz zur Kraftstoffverbrauchsreduktion weitere Regeln für die Entladestrategie definiert werden. Die Regeln und die damit verbundenen, verschiedenen Hybridfunktionen können sich je nach Priorisierung der Betriebsziele in der jeweiligen Situation überstimmen. In dieser Arbeit geht der Ansatz zur Absenkung der Partikelanzahlemissionen aus der Überlegung zur Vermeidung von Betriebspunkten mit erhöhtem Partikelausstoß hervor. In den Betriebszuständen der VKM wie der Beschleunigung, der Vollast und dem Kaltstart/Warmlauf kommt es zu einem erhöhten Partikelausstoß der VKM, siehe Kapitel 2.1.2.

Folgende Hybridfunktionen kommen zur Vermeidung eben dieser Betriebspunkte der VKM zum Einsatz:

- Lastpunktabsenkung
  - Ablasten bei Kaltstart/Warmlauf
  - Ablasten an der Volllast
- Phlegmatisierung

Die genaue Auslegung aller deterministischen Regeln und deren Umsetzung in der Betriebsstrategie erfolgt im Kapitel 3.1.2.

## 2.4.2 Numerische, nicht prädiktive ECMS

Erstmals ist die Equivalent Consumption Minimization Strategy in [19] vorgestellt worden. Seitdem ist sie von einigen Autoren [20], [21], [22], [23] und [24] aufgefasst und weiterentwickelt worden.

Die ECMS basiert auf den beiden Grundgedanken, dass in einem autarken HEV die gesamte zum Antrieb eingesetzte Energie im Endeffekt vom Kraftstoff stammt und die Batterie nur als Zwischenspeicher verwendet wird. Jede aus der Batterie entnommene elektrische Energie während einer Entladephase muss zu einem späteren Zeitpunkt wieder unter Einsatz von Kraftstoff in der VKM oder durch Rekuperation der Batterie in einer Ladephase zugeführt werden [16]. Das Funktionsprinzip der ECMS ist in der Abbildung 7 dargestellt.

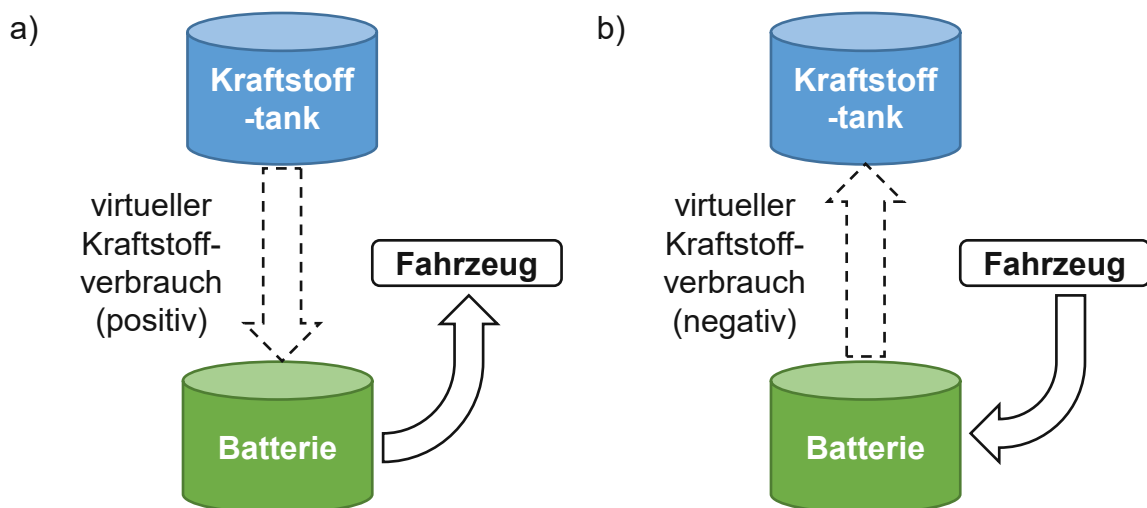


Abbildung 7: Energiepfad während a) dem Entladen und b) dem Laden, nach [25]

Bei der ECMS wird der Ansatz verfolgt, dass mit Hilfe von Äquivalenzfaktoren eine Gleichwertigkeit zwischen dem tatsächlichen Kraftstoffverbrauch der VKM und der eingesetzten elektrischen Energie hergestellt wird. Dabei stellt die elektrische Energie, je nachdem ob gerade eine Ladephase oder eine Entladephase der

Batterie vorliegt, einen zukünftigen, virtuellen Kraftstoffverbrauch oder eine zukünftige, virtuelle Kraftstoffeinsparung dar.

Im Fall des Entladens der Batterie, siehe Abbildung 7a, wird die in der Batterie gespeicherte, elektrische Energie mittels der EM in mechanische Energie umgewandelt und dient zum Antrieb des Fahrzeuges. Die zukünftige Zufuhr von elektrischer Energie durch Einsatz von Kraftstoff kann als positiver, virtueller Kraftstoffverbrauch angesehen werden und führt in der Bilanzierung des äquivalenten Kraftstoffverbrauchs zu einem Anstieg.

Im Fall des Ladens der Batterie, siehe Abbildung 7b, wird mit Hilfe der EM die aus dem Antriebsstrang zugeführte mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt und wird für einen späteren Einsatz in der Batterie zwischengespeichert. Die spätere Entnahme von elektrischer Energie zum Vortrieb kann als negativer, virtueller Kraftstoffverbrauch angesehen werden und führt in der Bilanzierung des äquivalenten Kraftstoffverbrauchs zu einer Kraftstoffverbrauchseinsparung.

Die Bilanzierung des momentanen, äquivalenten Kraftstoffmassenstromes zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t$  erfolgt nach der folgenden Gleichung 2 [25].

$$\dot{m}_{KS,\ddot{a}qu}(t) = \dot{m}_{VKM}(P_{VKM}(t)) + \dot{m}_{EM,\ddot{a}qu}(P_{EM}(t)) \quad (2)$$

$\dot{m}_{KS,\ddot{a}qu}$  ... äquivalenter Kraftstoffmassenstrom

$\dot{m}_{VKM}$  ... Kraftstoffmassenstrom der VKM

$\dot{m}_{EM,\ddot{a}qu}$  ... äquivalenter Kraftstoffmassenstrom der EM

$P_{VKM}$  ... Leistung der VKM

$P_{EM}$  ... Leistung der EM

Der momentane Kraftstoffmassenstrom der VKM  $\dot{m}_{VKM}$  zum Zeitpunkt  $t$  kann anhand Gleichung 3 ermittelt werden.

$$\dot{m}_{VKM}(t) = \frac{P_{VKM}(t)}{\eta_{VKM}(t)H_U} \quad (3)$$

$\eta_{VKM}$  ... Wirkungsgrad der VKM

$H_U$  ... unterer Heizwert des Kraftstoffes

In ähnlicher Weise ergibt sich der momentane, äquivalente Kraftstoffmassenstrom der EM  $\dot{m}_{EM,\ddot{a}qu}$  zum Zeitpunkt  $t$  nach der Gleichung 4 [25]. Dabei wird bei der Berechnung zwischen dem Fall des Ladens ( $P_{EM}(t) < 0$ ) und des Entladens ( $P_{EM}(t) > 0$ ) mit den beiden dazugehörigen Äquivalenzfaktoren  $s(t)$  unterschieden.

$$\dot{m}_{EM,\ddot{a}qu}(t) = \begin{cases} s_{Entladen}(t) \frac{P_{EM}(t)}{\eta_{Batt}(P_{EM})\eta_{EM}(P_{EM})H_U}, & P_{EM}(t) > 0 \\ s_{Laden}(t)\eta_{Batt}(P_{EM})\eta_{EM}(P_{EM}) \frac{P_{EM}(t)}{H_U}, & P_{EM}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$s_{Entladen}$  ... Äquivalenzfaktor für den Fall des Entladens

$s_{Laden}$  ... Äquivalenzfaktor für den Fall des Ladens

$\eta_{VKM}$  ... Wirkungsgrad der Batterie

Die beiden Äquivalenzfaktoren  $s_{Laden}$  und  $s_{Entladen}$  repräsentieren die jeweilige Wirkungsgradkette für die Umwandlung der chemischen Energie des Kraftstoffes in elektrische Energie und genauso umgekehrt. Die Wirkungsgrade des elektrischen Pfades sind von den Betriebspunkten, in denen die elektrische Energie der Batterie zugeführt oder entnommen wird, abhängig. Folglich sind daher die beiden Äquivalenzfaktoren ebenso von den Betriebspunkten abhängig und ändern sich für jeden Betriebspunkt. Jedoch sind in der Regel die zukünftigen Betriebspunkte nicht bekannt. Aus diesem Grund kann in guter Näherung von konstanten Werten für die Äquivalenzfaktoren ausgegangen werden. Nach [16] können diese konstanten Äquivalenzfaktoren als die durchschnittlichen Gesamtwirkungsgrade des elektrischen Pfades für einen bestimmten Fahrzyklus interpretiert werden.

Grundsätzlich hat eine Betriebsstrategie mit der ECMS die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs in dem eingesetzten HEV zum Hauptziel. In [26] wird gezeigt, dass sich durch die ECMS das globale Problem der Minimierung des gesamten Kraftstoffverbrauchs in ein lokales Problem der Minimierung des momentanen, äquivalenten Kraftstoffmassenstroms  $\dot{m}_{KS,\ddot{a}qu}$  überführen lässt. Im Betrieb erfolgt die Lösung des lokalen Problems zu jedem Zeitschritt. Dabei wird der momentane, äquivalente Kraftstoffmassenstrom für die unterschiedlichen, physikalisch möglichen Aufteilungen der Drehmomente zwischen der VKM und der EM anhand der Gleichung 2 berechnet. In weiterer Folge wird die Aufteilung der Drehmomente, die den minimalsten Wert des momentanen, äquivalenten Kraftstoffmassenstroms aufweist, ausgewählt. Der zuvor beschriebene, generelle Ablauf des ECMS Ansatzes kann weiter nach [16] in vier wesentliche Teilschritte unterteilt werden, siehe Abbildung 8.

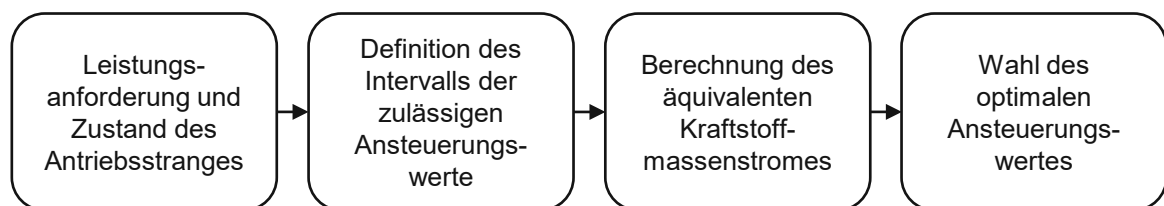


Abbildung 8: Ablauf der ECMS, nach [16]

Diese Teilschritte lauten wie folgt:

- 1) Eingang der momentanen Lastanforderung durch den Fahrer sowie des Zustandes des Antriebsstranges anhand der Größen wie z.B. angeforderte Leistung, aktuelle Drehzahl der VKM, aktuelle Drehzahl der EM, etc. und Bestimmung der möglichen Ansteuerung der EM unter Berücksichtigung der Erfüllung der physikalischen Limits der Antriebsstrangkomponenten wie z.B. maximales Drehmoment, maximales Stromlimit
- 2) Diskretisierung des Intervalls des Drehmoments der EM  $[M_{EM,min}(t), \dots, M_{EM,max}(t)]$  mit einer finiten Anzahl an Ansteuerungsmöglichkeiten
- 3) Berechnung des äquivalenten Kraftstoffmassenstroms in Abhängigkeit der jeweiligen Ansteuerungsmöglichkeit des Drehmomentes der EM
- 4) Auswahl des Ansteuerungswertes des Drehmomentes der EM  $M_{EM}(t)$  mit dem minimalsten äquivalenten Kraftstoffmassenstrom

Beruhend auf der Tatsache, dass es sich bei der ECMS um einen Ansatz zur Aufsuchung des lokalen Minimums des äquivalenten Kraftstoffmassenstroms handelt, kann mit der ECMS nur eine suboptimale Lösung des globalen Problems gefunden werden. Jedoch kann mit diesem Ansatz das globale Problem sehr gut approximiert werden [16]. Wesentliche Vorteile der ECMS, die für einen Einsatz in einem HEV sprechen, sind nach [16] ein geringerer Rechenbedarf im Gegensatz zur Lösung des globalen Problems mit der DP und eine gute Eignung hinsichtlich der Echtzeitfähigkeit, weil der Ansatz nicht explizit auf Informationen über zukünftige Betriebszustände aufbaut.

Für die ECMS muss vorab ein initialer Wert für die Äquivalenzfaktoren als Ausgangspunkt gewählt werden. Es kann mit einem Paar der Äquivalenzfaktoren  $s_{Laden}$  und  $s_{Entladen}$  mit konstanten Werten das instantane Minimum des äquivalenten Kraftstoffmassenstromes gefunden werden [16]. Wie bereits erwähnt, können sich die Äquivalenzfaktoren für die unterschiedlichen Betriebspunkte, wegen der Abhängigkeit von den momentanen Wirkungsgraden des elektrischen Pfades, unterscheiden. Die Werte der Äquivalenzfaktoren haben wiederum einen großen Einfluss auf die Effizienz des Betriebes und somit der Strategie sowie auf den Ladezustand der Batterie. In Gleichung 4 ist ersichtlich, dass unter der Annahme desselben Betriebspunktes bei der Wahl von zu hohen Werten der Äquivalenzfaktoren  $s_{Laden}$  und  $s_{Entladen}$  der äquivalente Kraftstoffmassenstrom der EM höher im Gegensatz zur optimalen Wahl ist. In weiterer Folge führt das im Fall des Entladens, wegen des positiven virtuellen Kraftstoffmassenstromes, zu einem höheren äquivalenten Kraftstoffmassenstrom und im Fall des Ladens, wegen des negativen virtuellen Kraftstoffmassenstromes, zu einem niedrigeren äquivalenten



Kraftstoffmassenstrom, siehe Gleichung 2. Darauf basierend fällt die Entscheidung der Betriebsstrategie bei zu hoch gewählten Werten der Äquivalenzfaktoren immer zu Gunsten der Aufteilung der Leistung zwischen der VKM und der EM, bei der die Batterie geladen wird, aus. Ausgehend von dieser Entscheidung kommt es im Fahrzyklus dazu, dass die Batterie fortwährend geladen wird und nur eine geringe Menge an elektrischer Energie entnommen wird. Vice versa erfolgt bei der Wahl von zu niedrigen Werten der Äquivalenzfaktoren die Entscheidung der Betriebsstrategie dahingehend, dass mehr elektrische Energie eingesetzt und im Vergleich dazu weniger elektrische Energie erzeugt wird, wegen der geringeren Kraftstoffkosten im Fall des Entladens und der höheren Kraftstoffkosten im Fall des Ladens. Diese Tatsache führt zu einem niedrigen Ladezustand der Batterie. Es ist ersichtlich, dass bei der Wahl sowohl von zu niedrigen als auch zu hohen Werten der Äquivalenzfaktoren im Vergleich zu den optimalen Werten im Betrieb eines autarken HEV keine Ladungsausgeglichenheit der Batterie hergestellt werden kann. Zusätzlich besteht bei einer falschen Wahl die Gefahr, dass die zur Erreichung einer bestimmten Lebensdauer der Batterie definierten Ladezustandsgrenzen nicht eingehalten werden. In weiterer Konsequenz führt dies zu einer unerwünschten, rascheren Alterung der Batterie. Auf den Erkenntnissen über die Wahl der Werte der Äquivalenzfaktoren fußend, kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Auswahl des optimalen Paares an Äquivalenzfaktoren zur Erreichung der optimalen Lösung in den unterschiedlichsten Betriebspunkten die größte Herausforderung der ECMS ist.

Die ursprüngliche Ausführung der ECMS nach [19] geht von zwei Äquivalenzfaktoren aus. In [27] wurde gezeigt, dass der ECMS Ansatz und der Ansatz nach dem Pontrjaginschen Minimumprinzip (PMP) äquivalent sind. Im Gegensatz zur ECMS ist für einen optimalen Betrieb mit dem Ansatz nach dem PMP nur ein Äquivalenzfaktor notwendig. Jedoch ist für den Ansatz nach dem PMP die a priori Kenntnis des Fahrzyklus zum Erhalt der optimalen Lösung des Problems zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs notwendig. Aus der Äquivalenz der PMP und der ECMS resultiert die Möglichkeit zur Umsetzung der ECMS mit nur einem Äquivalenzfaktor. Dies reduziert den Aufwand zur Auffindung von zwei optimalen Parametern zu nur einem Parameter. Eine ECMS mit nur einem Äquivalenzfaktor kann als Echtzeitimplementierung des PMP bezeichnet werden. Diese Form der ECMS wird wegen des Vorteils, dass nur ein Äquivalenzfaktor adaptiert werden muss, in der Adaptiven-ECMS (A-ECMS) eingesetzt, siehe nachfolgender Abschnitt. Für eine detaillierte Beschreibung des PMP sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur wie z.B. [16] verwiesen.

Um der Abhängigkeit der Äquivalenzfaktoren vom aktuellen Betriebspunkt Rechnung zu tragen, können die Äquivalenzfaktoren mit verschiedenen Methoden

an die aktuelle Situation angepasst werden. Es wird dann von der Adaptive-ECMS (A-ECMS) gesprochen.

Nach [16] gibt es die folgenden Methoden zur Adaption der Äquivalenzfaktoren der ECMS:

- **Adaption basierend auf der Vorhersage des zukünftigen Fahrprofils [28],[29], [30]:**  
Hierbei erfolgt im ersten Schritt eine Vorhersage des zukünftigen Geschwindigkeitsprofils. Im zweiten Schritt erfolgt basierend auf dem vorhergesagten, zukünftigen Geschwindigkeitsprofil eine Anpassung der beiden Äquivalenzfaktoren. Die optimalen Werte der Äquivalenzfaktoren können mit Optimierung basierend auf einer Verschiebung des Prädiktionshorizontes (receding-horizon-Konzept) gefunden werden.
- **Adaption basierend auf einer Mustererkennung der entsprechenden Fahrsituation [31], [32], [33]:**  
Diese Methode basiert auf der Tatsache, dass die Äquivalenzfaktoren in Fahrsituationen mit ähnlichen statistischen Eigenschaften einander ähnlich sind. Aufbauend auf diesem Sachverhalt wird zuerst mit einem Algorithmus, welcher zur Erkennung der Fahrsituation dient, ermittelt, um welche Art von Fahrsituation es sich handelt. Anschließend wählt dieser Algorithmus aus einer zuvor ermittelten Datenbank die am besten zu der aktuellen Fahrsituation passenden Äquivalenzfaktoren aus. Die zuvor genannte Datenbank besteht aus vorab ermittelten, optimalen Äquivalenzfaktoren für die verschiedenen Fahrzyklen, wie z.B. Stadt-, Autobahnzyklus.
- **Adaption basierend auf dem Feedback des Ladezustands der Batterie [34], [35], [36]:**  
Die Äquivalenzfaktoren werden anhand des Feedbacks des aktuellen Ladezustands der Batterie und deren Abweichung vom Sollwert des Ladezustands adaptiert. Der Sollwert des Ladezustandes kann konstant sein oder z.B. in Abhängigkeit der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit variiert werden. Durch die Abhängigkeit von der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit kann die kinetische Energie des Fahrzeugs für einen zukünftigen Rekuperationsvorgang berücksichtigt werden. In weiterer Konsequenz kann dadurch ein unnötiges Laden der Batterie bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten verhindert werden. Das Ziel dieser Methode ist, den Ladungserhalt zu garantieren. Dabei kann der SOC innerhalb von bestimmten Grenzen um den Sollwert variieren.

Für die spätere Umsetzung der ECMS in dieser Arbeit ist die Entscheidung zu Gunsten der Adaption der Äquivalenzfaktoren anhand des Feedbacks des Ladezustands gefallen. Die Entscheidung stützt sich auf den wesentlichen Vorteilen



dieser Methode gegenüber den anderen beiden Methoden. Diese sind nach [16] eine einfache Implementierung, die Robustheit und der geringe, benötigte Rechenaufwand. Der fundamentale und entscheidende Vorteil hinsichtlich einer Implementierung in einem HEV ist die Robustheit dieser Methode der A-ECMS und ist unter anderem in der Untersuchung in [37] belegt worden. Dabei kommt in dieser Untersuchung eine ECMS mit nur einem Äquivalenzfaktor zum Einsatz. Es konnte für unterschiedliche Fahrzyklen gezeigt werden, dass sowohl bei der Wahl eines zu niedrigen als auch eines zu hohen Äquivalenzfaktors durch die instantane Adaption anhand des Feedbacks des SOC die Kraftstoffverbrauchswerte nahe dem Ergebnis der ECMS mit einem optimalen, konstanten Äquivalenzfaktor erreicht werden. Deswegen wird im Folgenden ausschließlich auf die Methode zur Anpassung basierend auf dem Feedback des Ladezustands der Batterie genauer eingegangen.

### Adaption basierend auf dem Feedback des Ladezustands der Batterie

Bei dieser Art der Adaption erfolgt die Anpassung des Äquivalenzfaktors in nichtprädiktiver Form. Für die Anpassung wird der aktuelle SOC der Batterie als Regelgröße zurückgeführt und ermöglicht so eine dynamische Regelung. Der Aufbau dieses Regelkreises ist in der Abbildung 9 ersichtlich. Mit der Rückkopplung des aktuellen Ladezustandes der Batterie wird die Regeldifferenz  $\Delta\text{SOC}$  zwischen dem Referenzzustand des SOC der Batterie  $\text{SOC}_{\text{ref}}$  und dem aktuellen SOC der Batterie  $\text{SOC}(t)$  gebildet. Anschließend wird ausgehend von einem initialen Wert des Äquivalenzfaktors  $s_0$  im Regler der Äquivalenzfaktor in Abhängigkeit von  $\Delta\text{SOC}$  basierend auf einer Gesetzmäßigkeit im zeitlichen Verlauf der Fahrt angepasst.



Abbildung 9: Regelkreis zur Adaption des Äquivalenzfaktors basierend auf dem Feedback des SOC der Batterie

Grundsätzlich wird bei diesem Ansatz der folgende Grundgedanke verfolgt. Bei einem zu hohen Ladezustand wird über die Anpassung der Äquivalenzfaktor verkleinert und somit der Einsatz der elektrischen Energie günstiger. Bei einem sinkenden Ladezustand erfolgt eine Erhöhung des Äquivalenzfaktors. Dadurch wird die Verwendung der elektrischen Energie teurer und es wird elektrische Energie nachgeladen.

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze für die zur Anpassung verwendeten Gesetzmäßigkeiten. Dabei unterscheiden sie sich im Wesentlichen

durch den zum Einsatz kommenden Regler und dessen Auslegung. Die Einteilung kann wie folgt vorgenommen werden:

- Kontinuierliche Anpassung
  - Linearer P-Regler [21], [38]
  - Nichtlinearer P-Regler [39], [40]
  - Linearer PI-Regler [34], [41]
  - Nichtlinearer PI-Regler [42], [43]
- Diskrete Anpassung [22]

Die einfachste Möglichkeit zur Adaption stellt der P-Regler sowohl mit einem linearen als auch nichtlinearen Regelgesetz dar. Für die Beschreibung der Regeldifferenz wird in [44] vorgeschlagen, den normierten Ladezustand  $x_{SOC}$  als Regeldifferenz zu verwenden. Die Definition des normierten Ladezustandes erfolgt gemäß der Gleichung 5.

$$x_{SOC}(t) = \frac{SOC(t) - SOC_{ref}}{(SOC_{max} - SOC_{min})/2} \quad (5)$$

$SOC_{max}$  ... maximal zulässiger Ladezustand der Batterie

$SOC_{min}$  ... minimal zulässiger Ladezustand der Batterie

Aufbauend darauf kann in Anlehnung an [44] das Regelgesetz des P-Reglers mit der Gleichung 6 beschrieben werden. Mit der Funktion  $f_p(x_{SOC})$  kann je nach Wahl des Exponenten  $a$  ein linearer oder ein nichtlinearer P-Regler entworfen werden, siehe Gleichung 7.

$$s(t) = s_0 \cdot f_p(x_{SOC}) \quad (6)$$

$$\text{mit } f_p(x_{SOC}) = 1 - \frac{x_{SOC}(t)^a}{2} \quad (7)$$

$s_0$  ... Initialwert des Äquivalenzfaktors

$f_p(x_{SOC})$  ... Bestrafungsfunktion bei einer Ladungsabweichung

$a$  ... Exponent der Bestrafungsfunktion

In diesem Zusammenhang wird die Funktion  $f_p(x_{SOC})$  als Bestrafungsfunktion bei einer Ladungsabweichung verstanden und wird nach dem eingangs erwähnten Grundgedanken zur Anpassung des Äquivalenzfaktors entsprechend definiert. In der Abbildung 10 ist die Bestrafungsfunktion exemplarisch für einen Referenzladezustand  $SOC_{ref} = 0,5$  und für einen zulässigen Bereich des Ladezustands  $(SOC_{max} - SOC_{min}) = 0,2$  für einen linearen P-Regler mit  $a = 1$  (blaue, strichlierte Linie) und für einen nichtlinearen P-Regler mit einer kubischen Funktion mit  $a = 3$  (grüne Volllinie) dargestellt. Besonders zu erwähnen ist, dass es bei dem linearen P-Regler bereits bei einer geringen Abweichung vom Referenzladezustand

zu einem Regeleinriff kommt. Dadurch wird vom linearen P-Regler nur eine geringe Abweichung vom Referenzladezustand zugelassen. In weiterer Konsequenz führt dies zu einer nicht vollständigen Ausnutzung des für die Entnahme an elektrischer Energie zulässigen Bereiches des Ladezustands der Batterie. Die Batterie kann nur in bedingter Weise als Zwischenspeicher fungieren. Hingegen für eine Ausschöpfung des Potentials ist nach [36] ein möglichst konstanter Wert des Äquivalenzfaktors notwendig. Folglich ermöglicht ein nichtlinearer P-Regler mit einer kubischen Funktion als Grundlage eine bessere Nutzung der Batterie als Zwischenspeicher unter Einhaltung der Ladungsausgeglichenheit. Dabei bleibt der Äquivalenzfaktor in einem Bereich um den Referenzladezustand nahezu konstant und steigt bzw. fällt erst mit Annäherung an die definierten Grenzen des nutzbaren Bereiches des Ladezustandes der Batterie.

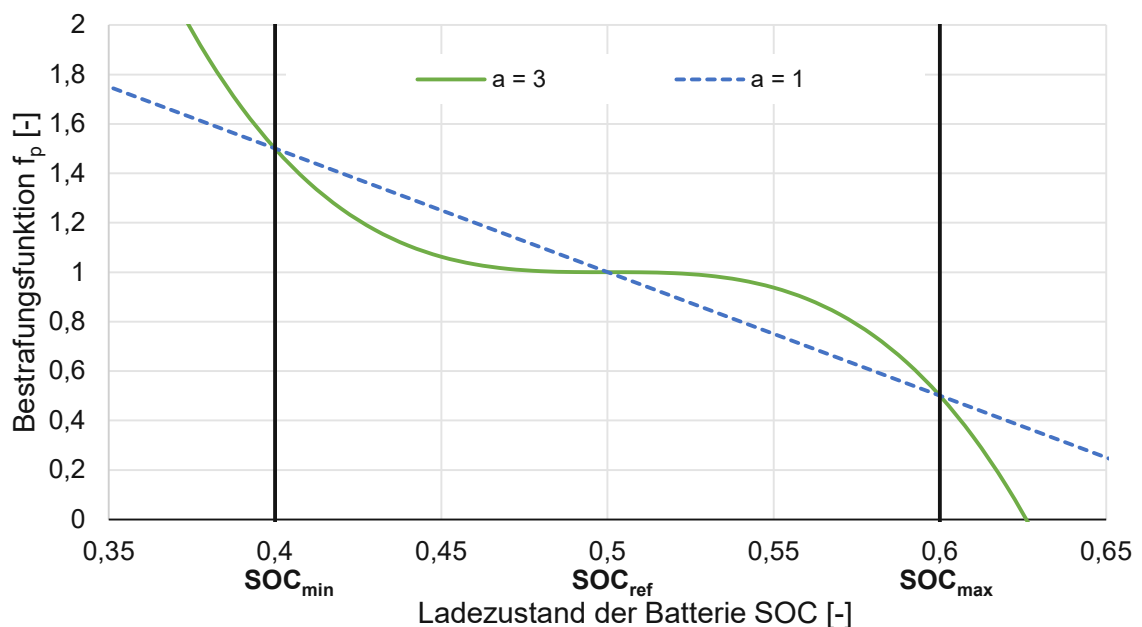


Abbildung 10: Vergleich zwischen der Bestrafungsfunktion des linearen P-Reglers mit der Bestrafungsfunktion des kubischen P-Reglers bei einer Ladezustandsabweichung

Eine Erweiterung des einfachen P-Reglers stellt der PI-Regler dar. Hierbei wird der P-Regler um einen zusätzlichen integralen Term erweitert. Nach [37] können mit dem PI-Regler bessere Ergebnisse hinsichtlich des Erreichens des Referenzladezustands am Ende des Fahrzyklus erreicht werden. Die Begründung dafür ist, dass der integrale Term zusätzlich die Differenz des Ladezustands über die Zeit hinweg ausgleicht. Jedoch wirkt sich beim PI-Regler die zusätzliche Implementierung eines integralen Terms nachteilig in Bezug auf den Applikationsaufwand aus, weil ein zusätzlicher Parameter im Vergleich zum P-Regler eingestellt werden muss. Das Regelgesetz des PI-Reglers kann in Anlehnung an [43] mit der Gleichung 8 und Gleichung 7 beschrieben werden.

$$s(t) = s_0 \cdot [f_p(x_{SOC}) + K_I \cdot \int_0^t x_{SOC} d\tau] \quad (8)$$

$K_I$ ... Integrationsfaktor

Eine weitere Möglichkeit zur besseren Ausnutzung des nutzbaren Bereiches des Ladezustandes der Batterie stellt nach [22] der Ansatz der diskreten Anpassung des Äquivalenzfaktors dar. Hierbei erfolgt die Anpassung aufgrund einer Abweichung des Ladezustandes der Batterie in regelmäßigen Abständen. Dadurch wird der Äquivalenzfaktor über einen gewissen Zeitraum konstant gehalten. Nach [22] lässt diese Tatsache eine deutlich größere Variation des Ladezustands zu und wirkt sich somit positiv auf den Kraftstoffverbrauch aus.

Im Rahmen dieser Arbeit ist anhand der Literaturrecherche für die Anwendung im P2-Hybrid die kontinuierliche A-ECMS mit einem PI-Regler ausgewählt worden, weil sie im Stande ist eine sowohl robuste als auch quasi optimale Lösung des Problems zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs zu liefern.

### 3. Modellbildung und Validierung

Die anhand des Partikelanzahlemissionsmodells ermittelten Partikelanzahlemissionen und die mit Hilfe der Längsdynamikmodelle simulierte Kraftstoffverbräuche dienen im Rahmen dieser Arbeit zur virtuellen Entwicklung und Bewertung der unterschiedlichen Betriebsstrategien der untersuchten Hybridtopologien mit der jeweiligen Gewichtung der Zielgrößen Kraftstoffverbrauch und Partikelanzahlemissionen.

Eingangs werden in diesem Kapitel die für die simulative Untersuchung verwendeten Hybridantriebsstränge sowie die verwendeten Längsdynamikmodelle und deren Modellierung vorgestellt. Die Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen bilden die aus einer vorangegangenen Untersuchung am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien vorhandenen Simulationsmodelle des Basisfahrzeuges und des P0-Hybridfahrzeuges. Das Modell des P0-Hybridfahrzeuges ist im Laufe der vorliegenden Arbeit an die entsprechenden Randbedingungen adaptiert worden. Daraufauf folgt im Kapitel 3.3 auf das in dieser Arbeit entwickelte Partikelanzahlemissionsmodell eingegangen.

Die zur Bedatung der wesentlichen Komponenten des Fahrzeugmodells notwendigen Größen, Kennlinien und Kennfelder wurden bis auf die Daten des Verbrennungsmotors vom Projektpartner zur Verfügung gestellt. Die benötigten Daten des Verbrennungsmotors sind aus Messungen, die am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien durchgeführt wurden, bekannt.

#### 3.1 Untersuchte Hybridantriebsstränge

Alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Hybridantriebsstränge basieren auf dem Alfa Romeo Giulietta (Typ 940 FXA1A). Der Alfa Romeo Giulietta entspricht einem Fahrzeug des C-Segmentes. Im Unterschied zu der Konfiguration des Antriebsstranges des Realfahrzeuges kommt in allen Modellen als Verbrennungsmotor der A14XER der Firma Opel zum Einsatz. Das aus der vorangegangenen Untersuchung übernommene Modell des 48 V MHEV mit der P0-Topologie und das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Modell des 48 V MHEV mit der P2-Topologie sind durch eine Erweiterung des vorhandenen Modells des Basisfahrzeuges mit einem konventionellen Antriebsstrang entstanden. Deshalb wird nachfolgend auch kurz auf die Konfiguration des Antriebsstranges des Basisfahrzeuges eingegangen. Die mechanischen Komponenten des Antriebsstranges des 48 V MHEV mit der P0- und der P2-Topologie sind vom Basisfahrzeug übernommen worden. Aufbauend auf diesen Standardkomponenten ist das Basisfahrzeug virtuell zu einem P0- und P2-Hybridfahrzeug erweitert worden. Dabei erfolgt die Erweiterung anhand eines Baukastenprinzips, sodass die verschiedenen Hybridantriebsstränge möglichst viele Gleichteile besitzen. Daraus resultiert, dass sich das 48 V MHEV mit der P0-Topologie vom 48 V MHEV mit der

P2-Topologie hinsichtlich der Hardware nur durch die Leistung der EM, die Position der EM und die mechanische Kopplung der EM mit dem restlichen Antriebsstrang unterscheiden. Im elektrischen Teil des Antriebsstranges kommt als Standardkomponente eine 48 V Lithium-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von 28 Ah zum Einsatz.

### 3.1.1 Basisfahrzeug

Das Basisfahrzeug dient einerseits als Grundlage für die Erstellung der Modelle der verschiedenen Hybridantriebsstränge und andererseits als Benchmark für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen mit den Modellen des 48 V MHEV mit der P0- sowie der P2-Topologie. Das Basisfahrzeug ist ein Fahrzeug mit einem konventionellen Antriebsstrang und Vorderradantrieb. Die wesentlichen Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs sind die Verbrennungskraftmaschine, die Anfahrkupplung und das Getriebe. Als VKM kommt ein freisaugender MPFI-Ottomotor mit 1,4 L Hubraum der Firma Opel (A14XER) zum Einsatz. Er hat eine Maximalleistung von 74 kW bei 6000 1/min und ein maximales Drehmoment von 130 Nm bei 4000 1/min. Ein weiteres wesentliches Merkmal des Verbrennungsmotors ist seine Zertifizierung nach der Abgasnorm Euro 5. Bei der Anfahrkupplung handelt es sich um eine Einscheiben-Trockenkupplung. Das Getriebe ist ein manuelles Schaltgetriebe mit 6 Gängen. Die weitere Kraftübertragung zu den Rädern an der Vorderachse, ausgehend von der Getriebeausgangswelle, erfolgt über ein Vorderachsdifferential, welches jeweils durch eine Gelenkwelle mechanisch mit einem Vorderrad verbunden ist.

### 3.1.2 P0-Topologie

Der untersuchte Hybridantriebsstrang mit der P0-Topologie ist ähnlich aufgebaut wie die P0-Topologie, die in der [Abbildung 11](#) dargestellt ist.

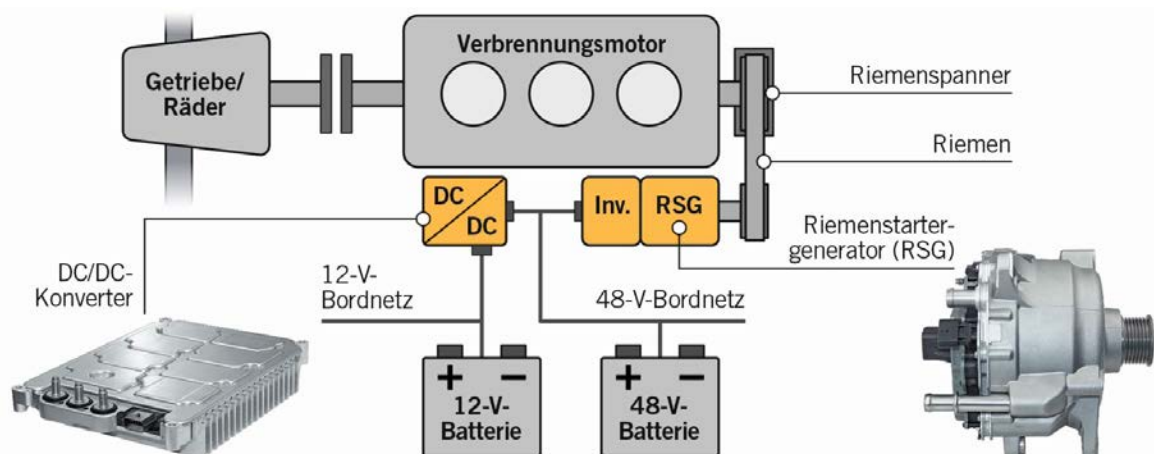


Abbildung 11: Serienapplikation eines 48 V MHEV mit der P0-Topologie [45]



Wie im Kapitel 2.2.1 erwähnt, wird bei einem 48 V MHEV mit der P0-Topologie die EM als RSG ausgeführt und ist mittels eines Riemens in den Nebenantrieb der VKM integriert. Dabei ist ein Übersetzungsverhältnis von der Rotordrehzahl der EM gegenüber der Drehzahl der Kurbelwelle von 3:1 gewählt worden. Im untersuchten 48 V MHEV mit der P0-Topologie kommt eine fremderregte Synchronmaschine mit einer integrierten Leistungselektronik zum Einsatz. Sie hat eine maximale Antriebsleistung von 10 kW und das maximale Antriebsdrehmoment beträgt 43 Nm. Durch die Ausführung der EM als RSG konnte in der P0-Topologie der herkömmliche Ritzelstarter entfallen. Der Einfluss eines dynamischen Verhaltens des 12 V Bordnetzes spielt in den durchgeführten Untersuchungen eine untergeordnete Rolle. Daher ist das gesamte 12V Bordnetz im Gegensatz zu der in der Abbildung 11 ersichtlichen P0-Topologie als Konstantverbraucher des 48 V Bordnetzes ausgeführt.

### 3.1.3 P2-Topologie

Der untersuchte Hybridantriebsstrang mit der P2-Topologie ist als achsparallele Variante ausgeführt. Die ausgeführte Konfiguration der P2-Topologie ist an das in der Abbildung 12 dargestellte Konzept einer achsparallelen P2-Topologie angelehnt.

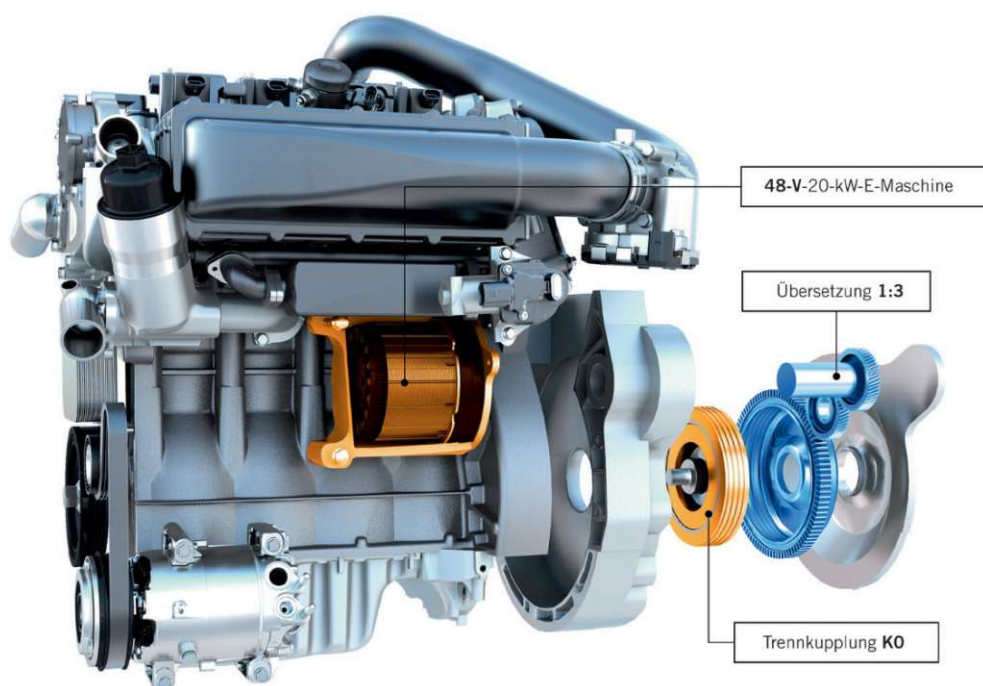


Abbildung 12: achsparallele Ausführung der P2-Topologie [9]

Dabei ist die EM seitlich montiert und über ein Zwischengetriebe mit der Getriebeeingangswelle verbunden. Die EM der P2-Topologie basiert auf der Variante der EM, wie sie in der P0-Topologie eingesetzt wird. Zur annähernden Ausschöpfung des Potentials der P2-Topologie ist die Leistung der EM der P0-Topologie um den Faktor zwei gesteigert worden. Somit hat die EM der



P2-Topologie eine maximale Antriebsleistung von 20 kW und ein maximales Drehmoment von 86 Nm. Das Zwischengetriebe weist zur besseren Vergleichbarkeit der beiden Hybridtopologien wie der Riementrieb der P0-Topologie ein Übersetzungsverhältnis von 3:1 auf. Wegen der Möglichkeit zur Abkopplung der VKM vom restlichen Antriebsstrang und den sich daraus ergebenden Vorteilen, siehe Kapitel 2.2.1, ist eine Trennkupplung zwischen der VKM und dem Zwischengetriebe verbaut. Ein wesentliches Merkmal der eingesetzten Trennkupplung ist eine schnelle Ansteuerzeit. Dadurch kann bei einem durch die Betriebsstrategie gewünschten Wechsel von einem gewünschten Antriebsmodus zu einem anderen eine schnelle Reaktion gewährleistet werden. Der Startvorgang der VKM erfolgt wie bei dem Basisfahrzeug mit einem Ritzelstarter.

### 3.2 Längsdynamikmodelle

Für eine Bewertung der entwickelten Betriebsstrategien mit der jeweiligen Gewichtung der Zielgrößen Kraftstoffverbrauch und Partikel sind Längsdynamikmodelle für ein Basisfahrzeug, ein 48 V MHEV mit der P0-Topologie sowie ein 48 V MHEV mit der P2-Topologie in der Simulationsumgebung *GT-SUITE v2018* erstellt worden. Im Speziellen wurde der Fokus bei der Erstellung der Modelle auf die Längsdynamik und das Energiemanagement der Hybridantriebsstränge gerichtet. Für die Simulationsmodelle wurde ein vorwärtsgerichteter Modellansatz gewählt. Das Prinzip eines solchen vorwärtsgerichteten Modellansatzes ist in der Abbildung 13 dargestellt.

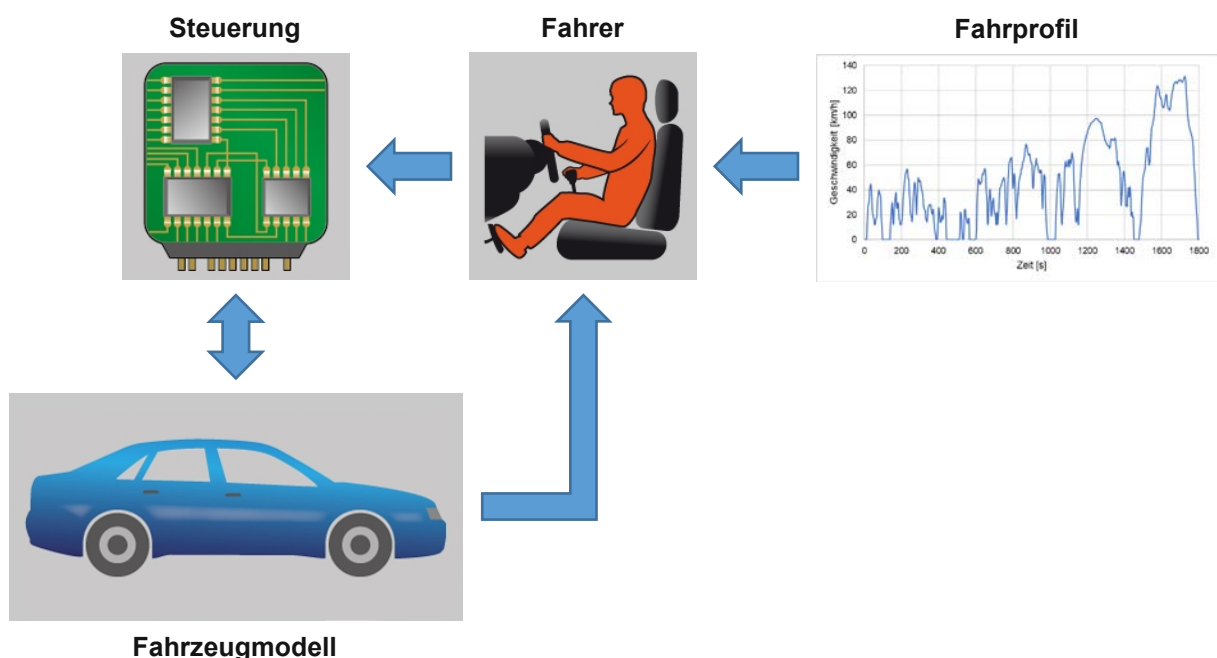


Abbildung 13: Prinzip des vorwärtsgerichteten Modellansatzes

Bei dieser Art des Modellansatzes wird ein zeitabhängiges Geschwindigkeitsprofil vorgegeben. Mithilfe eines Fahrerreglers wird anhand der Regeldifferenz zwischen der aktuellen Geschwindigkeit des Fahrzeuges und der Sollgeschwindigkeit des

Fahrprofils eine notwendige Antriebsleistung an den Rädern berechnet. Durch die im Fahrerregler implementierte Vorausschaufunktion wird ein realitätsnahes Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten des Fahrzeuges ermöglicht. Dabei erhält der Fahrerregler die Information über den zukünftigen Geschwindigkeitsverlauf vom aktuellen Zeitpunkt an für eine vordefinierte Zeitspanne. Mit dieser Information über den zukünftigen Geschwindigkeitsverlauf kann der Fahrerregler die für eine zukünftige Beschleunigung oder Verzögerung notwendige Antriebs- oder Verzögerungsleistung berechnen. In allen in dieser Arbeit verwendeten Längsdynamikmodellen ist für die Vorausschaufunktion des Fahrerreglers eine Zeitspanne von einer Sekunde gewählt worden. In den verwendeten Modellen wird die vom Fahrer gewünschte Antriebsleistung unter Kenntnis des dynamischen Reifendurchmessers in ein Fahrerwunschmoment umgerechnet. Daher kann in weiterer Folge von einem momentengeführten Modell gesprochen werden. In der Steuerung werden Entscheidungen zur Erreichung der Sollgeschwindigkeit des Fahrprofils fußend auf den Informationen zum Fahrerwunschmoment und dem aktuellen Zustand des Fahrzeuges getroffen. Diese Entscheidungen betreffen im Hybridantriebsstrang unter anderem die Drehmomentenaufteilung zwischen der VKM und der EM. Dabei wird von der Steuerung eine Momentenanforderung sowohl an die VKM als auch an die EM gestellt. Diese geben unter Berücksichtigung ihres jeweiligen von der Drehzahl abhängigen maximal möglichen Drehmoments ein Moment ab. Diese Wirkrichtung des Energie- und Informationsflusses entspricht der Wirkrichtung, wie sie im realen Fahrzeug vorgefunden wird. Dadurch kann eine gute Abbildung der Realität sichergestellt werden.

Sämtliche Antriebsstrangkomponenten der in diesem Kapitel vorgestellten Längsdynamikmodelle sind als quasistatische, kennfeldbasierte Modelle ausgeführt. Bei der EM und der Batterie erfolgte keine thermische Komponentenmodellierung. Dadurch ist ein sogenanntes thermisches Derating der jeweiligen Komponente nicht darstellbar. Die Aktuierung der zuvor genannten Komponenten erfolgt immer innerhalb fixer Leistungsgrenzen. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen kann diese Tatsache als zulässig erachtet werden, weil die Grenzpotentiale des jeweiligen untersuchten Antriebsstrangs ermittelt werden können. Jedoch sind diese Modelle der EM und der Batterie so aufgebaut worden, dass bei Vorhandensein der notwendigen Messdaten ein thermisches Derating der Komponenten dargestellt werden kann.

Wie bereits im Kapitel 3.1 erwähnt, bauen die beiden Hybridantriebsstränge auf dem Basisfahrzeug auf. Daher werden im Nachfolgenden die Grundkomponenten der Hybridantriebsstränge anhand des Fahrzeugmodells des Basisfahrzeugs erläutert.

### 3.2.1 Fahrzyklus

Die Bewertung des Kraftstoffverbrauches und der Partikelanzahlemissionen für die unterschiedlichen Hybridtopologien soll basierend auf dem WLTC Klasse 3 Fahrprofil durchgeführt werden. Die Abbildung 14 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf des WLTC Klasse 3.

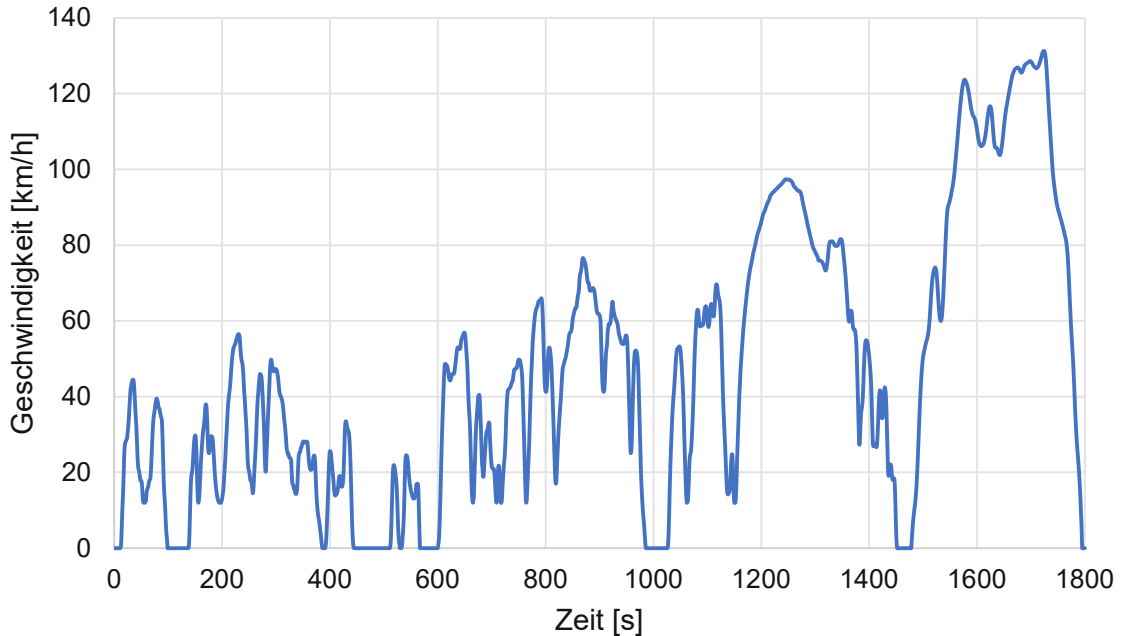


Abbildung 14: Geschwindigkeitsverlauf des WLTC Klasse 3 Fahrprofils

### 3.2.2 Basisfahrzeug

Die wesentlichen Bestandteile des Antriebsstranges des Basisfahrzeuges sind der Verbrennungsmotor, die Anfahrkupplung und das manuelle 6-Gang Schaltgetriebe. Im Basisfahrzeug ist keine Start-Stopp-Funktion, wie im Kapitel 2.3.4 beschrieben, vorgesehen. Deswegen ist in dem Modell des Basisfahrzeuges keine Startvorrichtung der VKM vorgesehen. Die zuvor genannten Hauptkomponenten, die Antriebsstrangsteuerung, der Fahrzeugaufbau, die Reifen, die Fahrzeugachsen, die Bremsen und das Differential wurden durch in *GT-SUITE* vorhandenen Modellvorlagen abgebildet und entsprechend bedatet.

## Fahrzeugaufbau

In der Tabelle 3 sind die für das Längsdynamikmodell relevanten Daten aufgelistet.

Tabelle 3: relevante Fahrzeugdaten des Basisfahrzeuges

Fahrzeugdaten		
Fahrzeugmasse inkl. Fahrer	[kg]	1355
Radstand	[m]	2,634
Dyn. Reifenrollradius	[m]	0,307
Fahrwiderstandskoeffizient (F0)	[N]	98,7
Fahrwiderstandskoeffizient (F1)	[N/(km/h)]	1,2450
Fahrwiderstandskoeffizient (F2)	[N/(km/h) <sup>2</sup> ]	0,0256

Der dynamische Reifenrollradius ist in der Modellierung in erster Näherung als konstant über den ganzen Geschwindigkeitsbereich angenommen worden.

Die Ausrollkurve des Fahrzeuges, welche den Gesamtfahrwiderstand des Fahrzeuges in Abhängigkeit der Geschwindigkeit abbildet, wird im Fahrzeugmodell mit Hilfe der aus der Tabelle 3 bekannten Fahrwiderstandskoeffizienten ermittelt.

## Verbrennungsmotor

Die Abbildung der bereits in Kapitel 3.1.1 erläuterten VKM erfolgt mit einem kennfeldbasierten Motormodell. Mit dieser Art von Motormodell wird kein Dynamikverhalten des Motors berücksichtigt. Es erfolgt bei einer Drehmomentenanforderung an die VKM ein sofortiges Ansprechverhalten und Abgabe des gewünschten Drehmomentes, sofern es innerhalb der Leistungsgrenzen der VKM ist. Im Rahmen dieser Arbeit werden keine dynamischen Effekte betrachtet. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der Kraftstoffverbrauch mit dem kennfeldbasierten Modell hinreichend genau abgebildet werden kann. Alle zur Verfügung gestellten Kennfelder und Kennlinien, die zur Bedatung verwendet worden sind, wurden im betriebswarmen Zustand der VKM vermessen.

Die Abbildung 15 zeigt den im Modell hinterlegten Vollastverlauf des Drehmomentes und der Leistung über der Drehzahl. Es ist der typische Verlauf eines freisaugenden MPFI-Ottomotors ersichtlich. Das maximale Drehmoment liegt bei einer Drehzahl von 4000 1/min und die maximale Leistung liegt bei einer Drehzahl von 6000 1/min an der Kurbelwelle an.

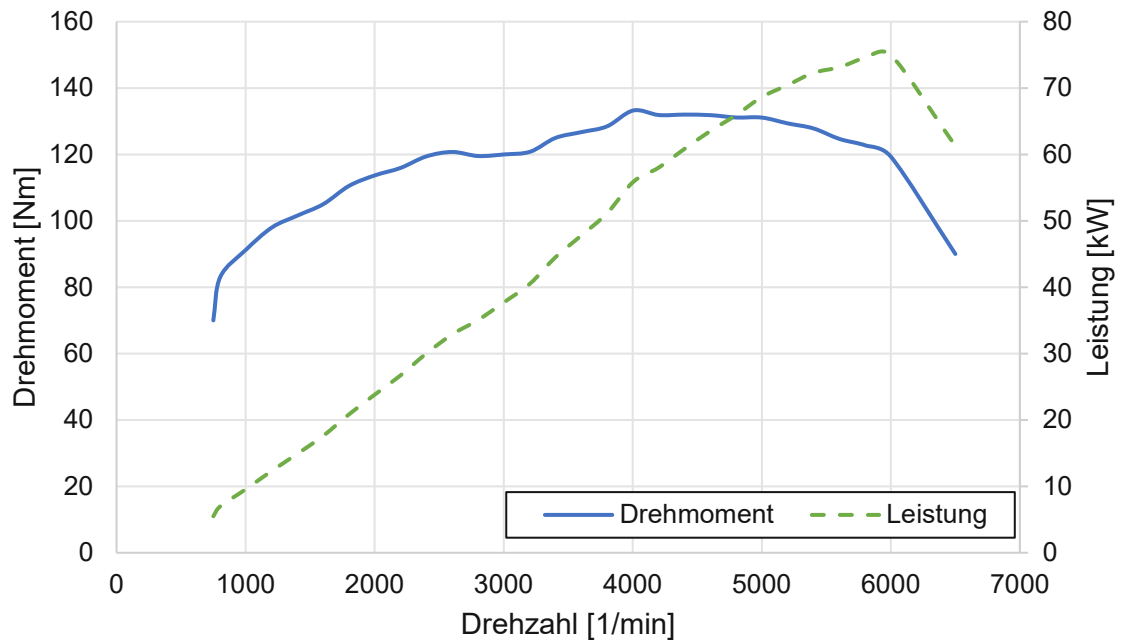


Abbildung 15: Vollastverlauf von Drehmoment und Leistung des freisaugenden MPFI-Ottomotors

Wie im realen Umfeld betätigt während der Verzögerungsphase in der Simulation der Fahrerregler virtuell das Bremspedal bei gleichzeitig eingekuppeltem Verbrennungsmotor. Dadurch wird bei einem Bremsvorgang die Bremswirkung des geschleppten Verbrennungsmotors zu Nutze gemacht. Ein Teil des vom Fahrer gewünschten Verzögerungsmomentes wird durch das Schleppmoment der VKM und der restliche Teil von der mechanischen Bremse aufgebracht. Aus diesem Grund ist eine genaue Abbildung des Schleppmomentes der VKM essentiell. Der Verlauf des Schleppmomentes bei geschlossener Drosselklappe in Abhängigkeit der Drehzahl ist in der [Abbildung 16](#) dargestellt.

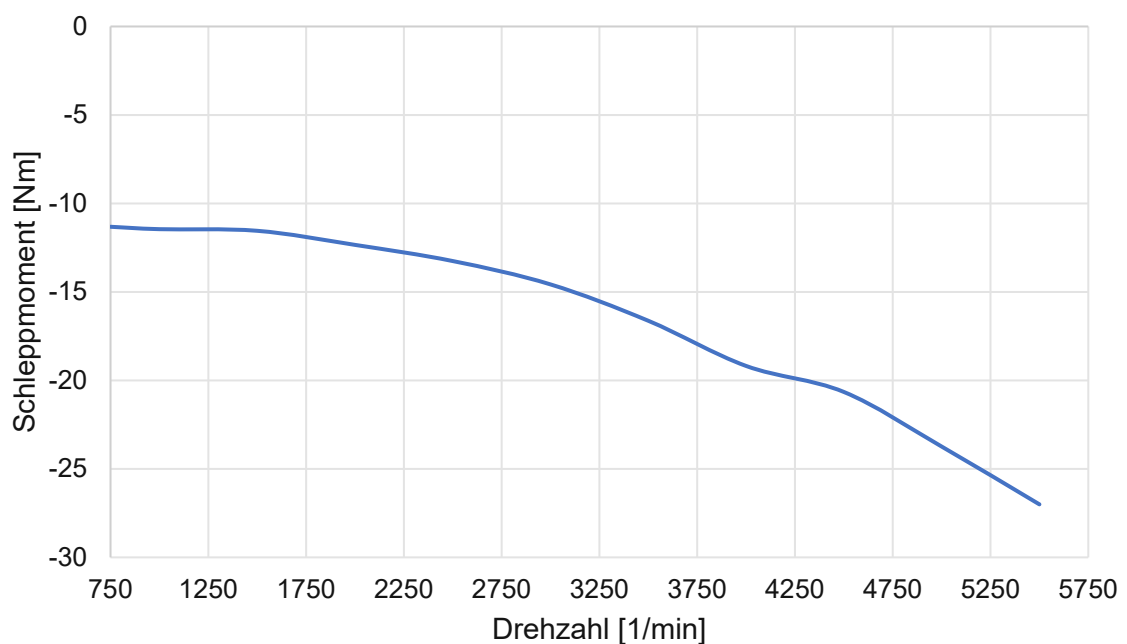


Abbildung 16: Schleppmomentverlauf des freisaugenden MPFI-Ottomotors

Üblicherweise wird das Schleppmoment bis zur Leerlaufdrehzahl vermessen, siehe Abbildung 16. Deswegen ist im Modell der VKM der Schleppmomentverlauf im darunterliegenden Drehzahlbereich extrapoliert worden.

Entscheidend zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs ist die Implementierung eines Verbrauchskennfeldes in das Modell der VKM. Dabei spielt der effektive Wirkungsgrad der VKM eine wesentliche Rolle. Die Gleichung 9 [2] verdeutlicht den Zusammenhang zwischen effektivem Wirkungsgrad und effektivem Kraftstoffverbrauch.

$$b_e = \frac{1}{\eta_e \cdot H_u} \quad (9)$$

$b_e$  ... effektiver spezifischer Verbrauch

$\eta_e$  ... effektiver spezifischer Wirkungsgrad

$H_u$  ... unterer Heizwert des Kraftstoffs

Die Abbildung 17 zeigt den effektiven Wirkungsgrad der VKM in der Abhängigkeit der Drehzahl und des abgegebenen Drehmomentes. Im Bestpunkt der VKM beträgt die Effizienz 36 %. Dieser liegt im mittleren Drehzahlbereich und bei hohen Lasten.

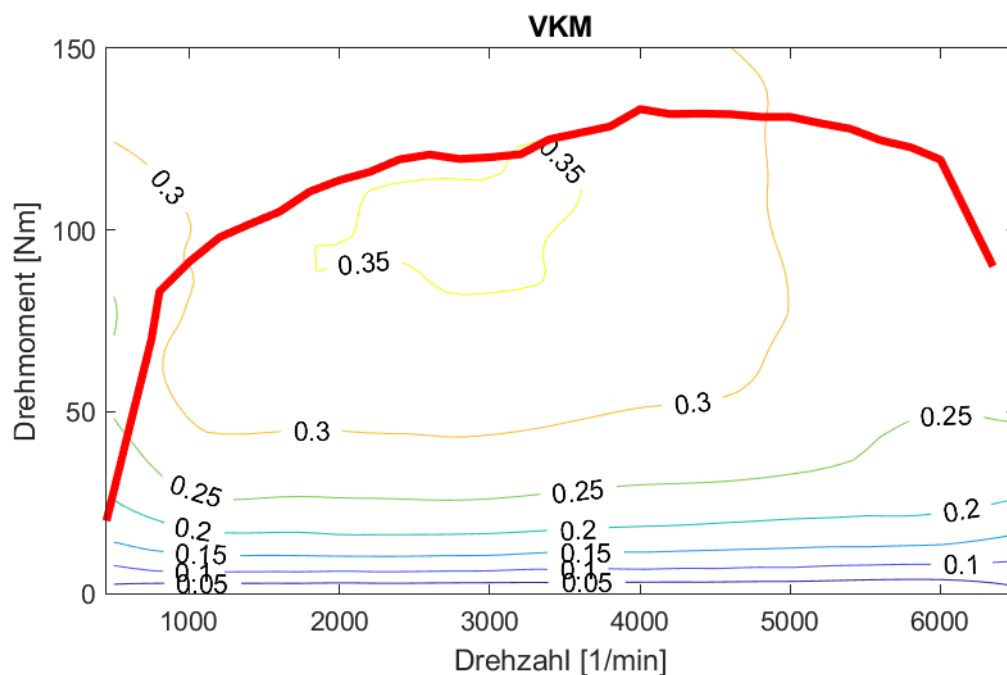


Abbildung 17: effektiver Wirkungsgrad des freisaugenden MPFI-Ottomotors

Zur Abbildung eines Warmlaufverhaltens der VKM für die Kaltstartuntersuchungen ist ein vereinfachtes VKM-Warmlaufmodell erstellt worden. Dabei ist anhand von Messdaten des Kraftstoffmassenstromes und der Kühlmitteltemperatur nach Motorausstritt eine Beziehung zwischen den beiden Größen nach der Gleichung 10 hergestellt worden.

$$T_{KM} = T_{KM,0} + f\left(\int \dot{m}_B dt\right) \quad (10)$$

$T_{KM}$  ... Kühlmitteltemperatur

$T_{KM,0}$  ... initiale Kühlmitteltemperatur

$\dot{m}_B$  ... Kraftstoffmassenstrom

Die Abbildung 18 zeigt den Verlauf der Kühlmitteltemperatur bei einer initialen Kühlmitteltemperatur von 21 °C in Abhängigkeit des kumulierten Kraftstoffverbrauchs. Es ist ersichtlich, dass sich die VKM ab einem kumulierten Kraftstoffverbrauch von etwa 220g in einem betriebswarmen Zustand befindet. Ab diesem Zeitpunkt wird das Warmlaufmodell deaktiviert und der Kühlmitteltemperatur wird ein konstanter Wert zugewiesen. Die Kennlinie der Funktion  $f\left(\int \dot{m}_B dt\right)$  ist als sogenannte Lookup Table in das Modell der VKM implementiert worden. Die so ermittelte Kühlmitteltemperatur dient als Indikator des Betriebszustandes der VKM für die später in dieser Arbeit vorgestellte Betriebsstrategie der beiden Hybridantriebsstränge, siehe Kapitel 3.2.3 und Kapitel 3.2.4. Weiters ist die Kühlmitteltemperatur eine Eingangsgröße des Partikelanzahlmissionsmodell, siehe Kapitel 3.3. Jedoch wird mit diesem Warmlaufmodell der VKM keine temperaturabhängige Reibung abgebildet.

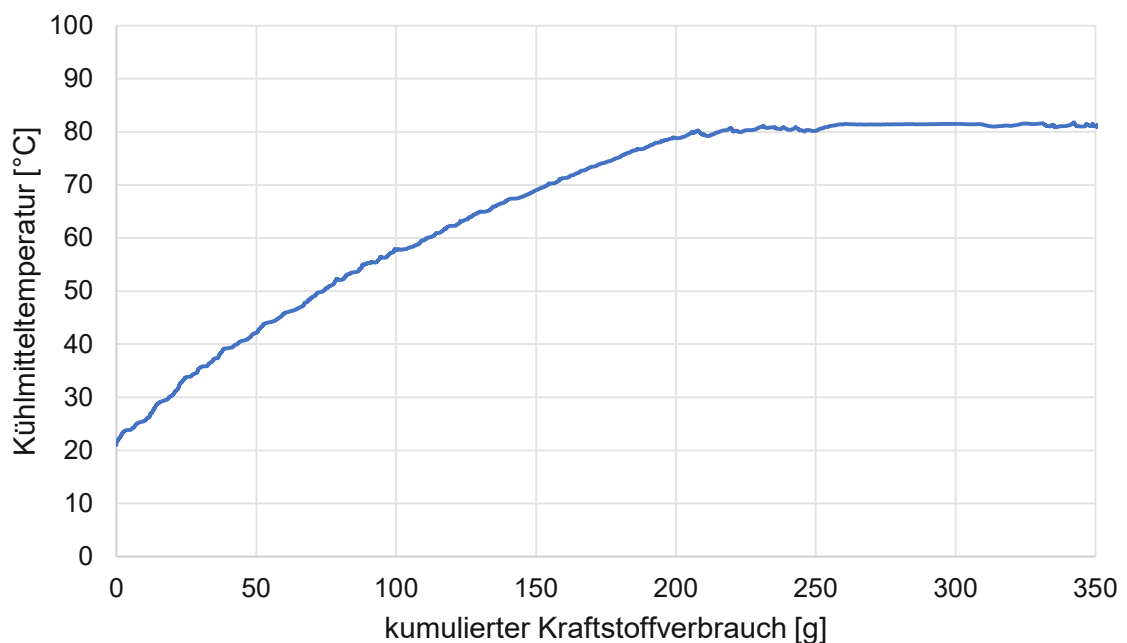


Abbildung 18: Kühlmitteltemperaturverlauf während der Warmlaufphase des freisaugenden MPFI-Ottomotors

### Anfahrkupplung

Eine in *GT-SUITE* vorhandene Modellvorlage einer Einscheibentrockenkupplung wurde zur Modellierung der Anfahrkupplung verwendet. Die



Einscheibentrockenkupplung hat einen mittleren Reibradius von 90 mm und kann ein maximales Drehmoment von 400 Nm übertragen.

### **Manuelles Schaltgetriebe und Differential**

Das Differential ist mit einer Übersetzung von 4,118 und einem Wirkungsgrad von 97 % mit Hilfe einer Modellvorlage der Modellbibliothek von *GT-SUITE* in das Längsdynamikmodell implementiert.

Das manuelle Schaltgetriebe mit 6 Gängen ist mit einer in *GT-SUITE* vorhandenen Modellvorlage für ein manuelles Getriebe abgebildet worden. Die Steuerung des Getriebes erfolgt mittels der Vorgabe eines zeitabhängigen Schaltmusters. Für den Fahrzyklus WLTC erfolgte die Erstellung des zeitabhängigen Schaltmusters mit Hilfe eines in *GT-SUITE* vorhandenen Werkzeuges. Das so erstellte Schaltmuster entspricht der Berechnung der aktuell in Kraft befindlichen Verordnung der europäischen Kommission 2018/1832 und ist in Abbildung 19 dargestellt. In den Stillstandsphasen des Fahrzeuges wird in den Neutralgang (Gang = 0) geschaltet.

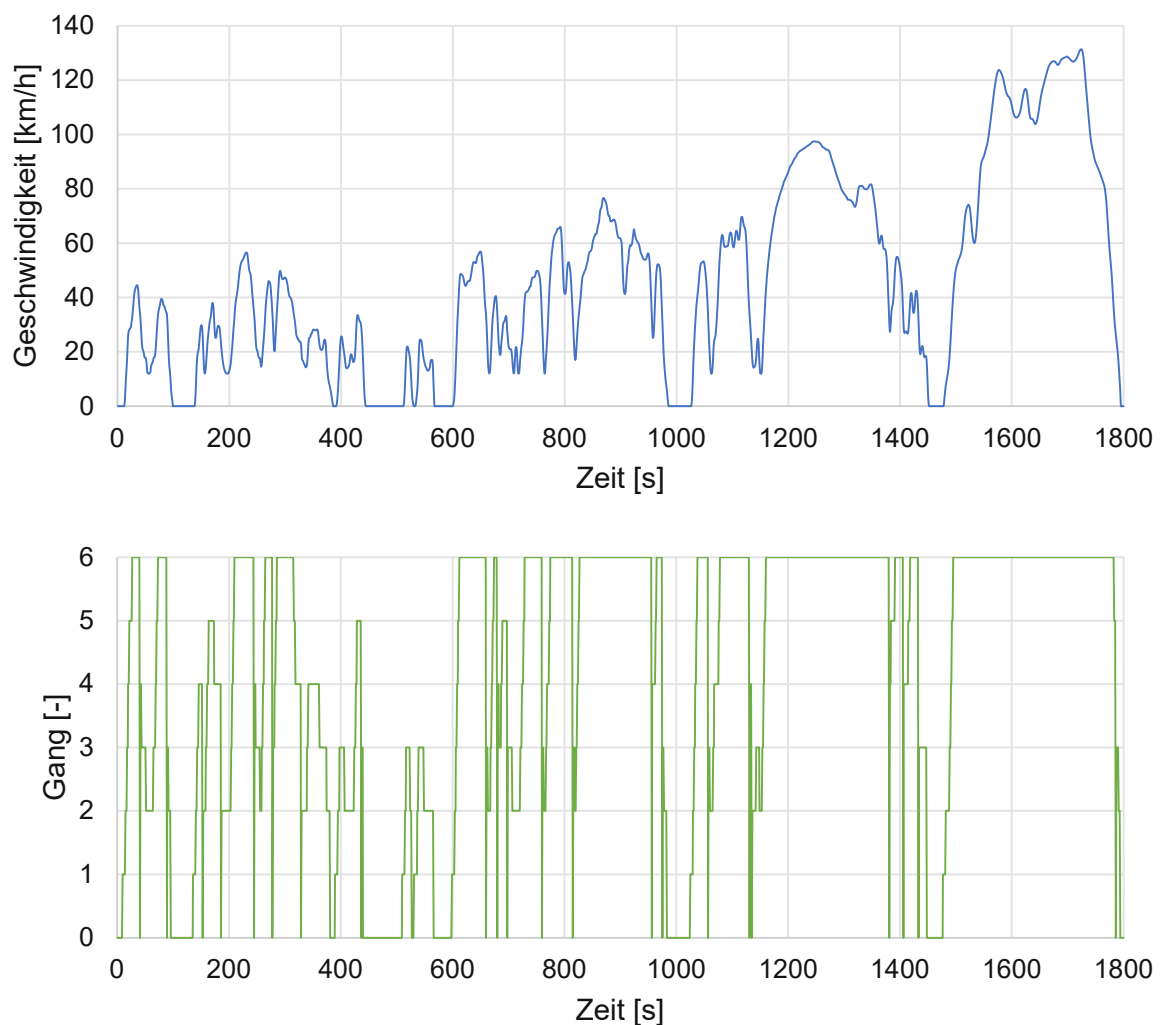


Abbildung 19: Geschwindigkeitsverlauf des WLTC und Schaltvorschrift im WLTC

Die Tabelle 4 schafft einen Überblick über die Übersetzungsverhältnisse der einzelnen Gangstufen des Getriebes. Für den mechanischen Wirkungsgrad der einzelnen Gangstufen ist ein Wert von 97 % angenommen worden.

Tabelle 4: Getriebeübersetzungen

Getriebeübersetzungen	
1.Gang	3,900
2.Gang	2,118
3.Gang	1,484
4.Gang	1,116
5.Gang	0,897
6.Gang	0,767

In der Abbildung 20 ist das Zugkraftdiagramm des Fahrzeuges mit konventionellem Antrieb ohne Berücksichtigung der mechanischen Verluste im Antriebsstrang ersichtlich. Die theoretisch maximale Fahrzeuggeschwindigkeit in der Ebene beträgt in etwa 195 km/h und wird im 5.Gang erreicht.

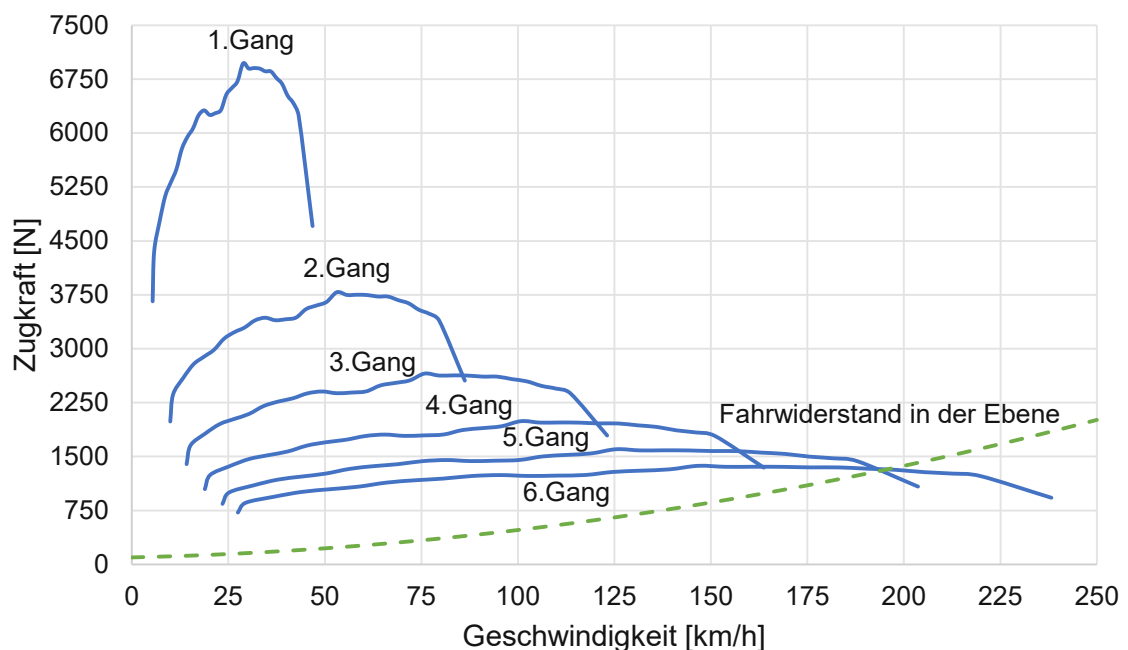


Abbildung 20: theoretisches Zugkraftdiagramm des Basisfahrzeuges

### 3.2.3 P0-Topologie

Als Basis für die Erstellung des Längsdynamikmodells des Hybridantriebsstranges mit der P0-Topologie diente der in Kapitel 3.1.2 vorgestellte Antriebsstrang des Basisfahrzeuges. Die wesentlichen Bestandteile des Hybridantriebsstranges der P0-Topologie sind die VKM, die HV-Batterie, die EM, der Riementrieb, die Anfahrkupplung, das manuelle Schaltgetriebe mit 6 Gängen und das Differential. Einige Hauptkomponenten und deren Implementierung sind in Kapitel 3.2.1 bereits

erläutert worden. Deswegen wird im Nachfolgenden nur auf die Modellierung und Implementierung der vom Basisfahrzeug abweichenden Komponenten des Hybridantriebsstranges mit der P0-Topologie eingegangen.

Wie bereits in Kapitel 3.1.2 angeklungen ist, sind die Verbraucher des 12V Bordnetzes zu einem Konstantverbraucher des 48 V Bordnetzes mit einer durchschnittlichen Leistung von 300 W zusammengefasst und in den elektrischen Teil des Längsdynamikmodells implementiert worden.

### E-Maschine

Die E-Maschine bildet das Kernelement des elektrischen Antriebes. Die maximale Antriebsleistung der EM beträgt  $P = 10 \text{ kW}$ . Sie ist mithilfe einer vorhandenen, kennfeldbasierten Modellvorlage für einen elektrischen Motor/Generator abgebildet worden. Eine zentrale Rolle für die Betrachtung des Einsatzes von Energie im Hybridantriebsstrang spielt die Effizienz der EM. Zur Berücksichtigung der Auswirkung der Batteriespannung auf das Volllastverhalten und den Wirkungsgrad der EM sind jeweils für die Spannungen von  $U = 36 \text{ V}$ ,  $U = 48 \text{ V}$  und  $U = 52 \text{ V}$  die motorische Volllastkennlinie der EM, die generatorische Volllastkennlinie der EM und das Wirkungsgradkennfeld der EM in das Modell der EM implementiert worden. Für Batteriespannungen, welche zwischen den oben angeführten Spannungen liegen, erfolgt eine lineare Interpolation zwischen den Volllastkennlinien der EM und den Wirkungsgradkennfeldern der EM der zwei nächstgelegenen Spannungslagen. Die Abbildung 21 zeigt exemplarisch das Wirkungsgradkennfeld mit der motorischen Volllastkennlinie und der generatorische Volllastkennlinie der als RSG eingesetzten EM bei einer angelegten Spannung von  $U = 48 \text{ V}$ .

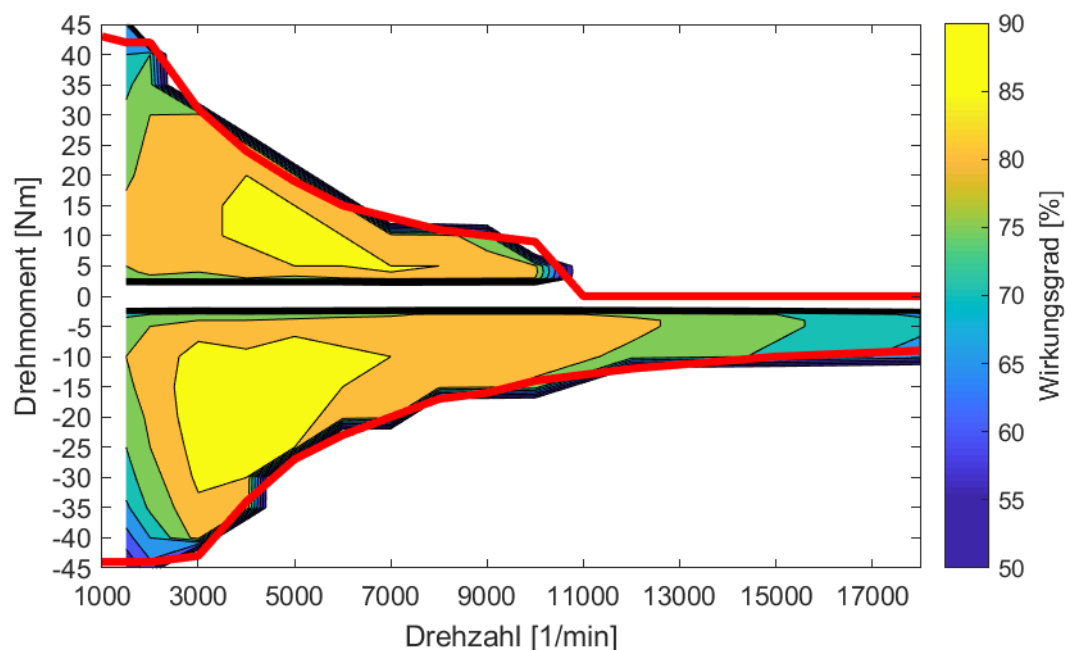


Abbildung 21: Wirkungsgradkennfeld mit der motorischen Volllastkennlinie der EM und der generatorische Volllastkennlinie der EM der P0-Topologie bei  $U = 48 \text{ V}$

Im motorischen Betrieb der EM beträgt das maximale Drehmoment 43 Nm. Der motorische Betrieb der EM wird ab einer maximalen Drehzahl von 10 000 1/min durch die interne Steuerung der EM beschränkt. Sowohl im generatorischen als auch im motorischen Betrieb der EM werden Wirkungsgrade größer 80 % über einen weiten Betriebsbereich erreicht. Im generatorischen Betrieb der EM wird ein maximales Drehmoment von -44 Nm und eine maximale Drehzahl von 18 000 1/min erzielt.

Für eine Unterstützung der VKM mit der EM ab der Leerlaufdrehzahl der VKM und eine Rekuperation bis zum Stillstand sind die Werte der Kenngrößen Drehmoment und Wirkungsgrad durch Extrapolation ausgehend von den zur Verfügung gestellten Daten ermittelt worden.

### Riementrieb

Der Riementrieb ist als ideal steifer Riementrieb mit einem fixen Übersetzungsverhältnis von 3:1 zwischen der Drehzahl der Rotorwelle der EM und der Drehzahl der Kurbellwelle und mit einem Wirkungsgrad von 97 % modelliert worden.

### Batterie mit integrierter Leistungselektronik

Bei der Batterie handelt es sich um eine 48 V Lithium-Ionen-Batterie mit einer nominellen Kapazität von 28 Ah. Die Batterie besteht aus zwei parallel verschalteten Reihenschaltungen mit jeweils 14 Zellen. In der Abbildung 22 sind der Lade- und Entladeverlauf der Spannung sowie der Verlauf des Innenwiderstandes einer Zelle ersichtlich. Die Batterie ist mit einer in *GT-SUITE* vorhandenen Modellvorlage abgebildet worden.

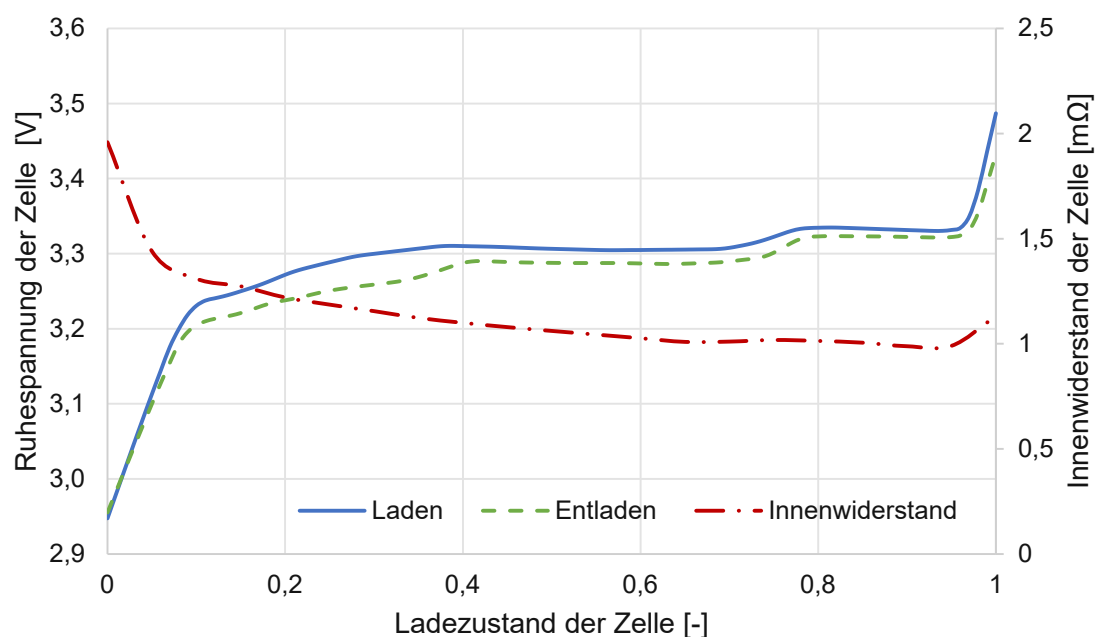


Abbildung 22: Verlauf der Ruhespannung beim Laden- und Entladen sowie des Innenwiderstands einer Zelle in Abhängigkeit des Ladezustandes

## **Betriebsstrategie**

Wie in Kapitel 2.4 erläutert, trifft die Betriebsstrategie die Entscheidung über die Drehmomentenaufteilung zwischen der VKM und der EM zur Erreichung eines oder mehrerer Betriebsziele. Als Ziele der im Folgenden erläuterten regelbasierten Betriebsstrategie wird erstens die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs und zweitens die Reduktion der Partikelanzahlemissionen definiert. Für eine bestmögliche Erreichung der zuvor definierten Ziele müssen die beiden Ziele unabhängig voneinander betrachtet werden. Somit kann für das jeweilige Betriebsziel eine Zielfunktion des gesamten Hybridantriebsstranges abgeleitet werden. Diese sich daraus ergebenden Zielfunktionen haben beide gemein, dass sie für die Erreichung des jeweiligen Betriebszieles ungünstige Betriebsbereiche und –zustände der VKM vermeiden. Die Tabelle 5 verschafft einen Überblick über die ungünstigen Betriebsbereiche und –zustände der VKM, welche durch die jeweilige Betriebsstrategie möglichst vermieden oder eingeschränkt werden, siehe Kapitel 2.1.1 und Kapitel 2.1.2.

Tabelle 5: ungünstige Betriebsbereiche und Betriebszustände der VKM in Bezug auf die Betriebsweise

<b>Kraftstoffverbrauchsoptimal</b>	<b>Partikelemissionsoptimal</b>
niedrige Teillast	Kaltstart/Warmlauf
Volllast	Beschleunigung
Leerlauf im Fahrzeugstillstand	Volllast

Besonders zu erwähnen ist, dass die Volllast als Schnittmenge der beiden Zielfunktionen der Betriebsstrategie vorliegt. Aufbauend auf der Kenntnis über die zuvor identifizierten Betriebsbereiche und -zustände der VKM sind die beiden Zielfunktionen zu einer globalen Betriebsstrategie mit der Möglichkeit zur unterschiedlichen Gewichtung der beiden Zielfunktionen entwickelt worden. Der grundsätzliche Aufbau der globalen Betriebsstrategie mit den beiden Zielfunktionen und den darin implementierten Hybridfunktionen sind in Abbildung 23 dargestellt.

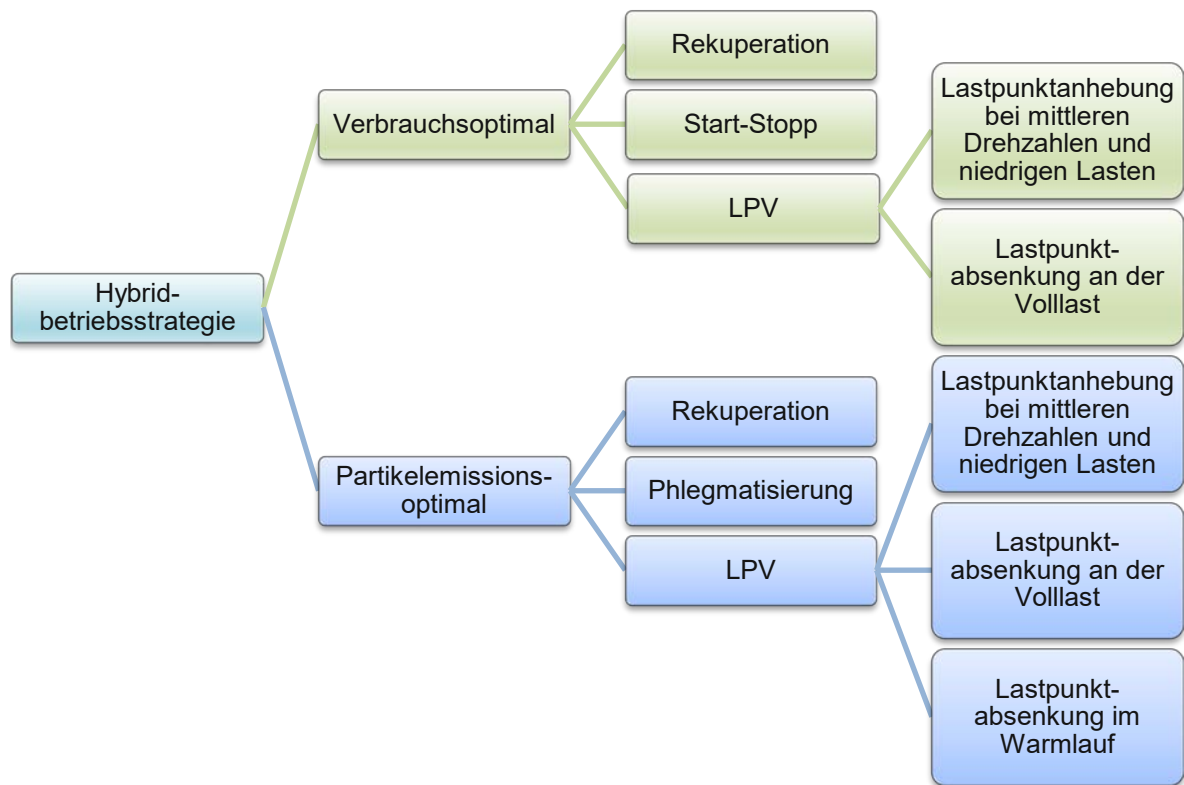


Abbildung 23: schematische Aufbau der globalen Betriebsstrategie der P0-Topologie

Grundsätzlich unterscheiden sich die beiden Zielfunktionen nur dadurch, wie die in der Batterie gespeicherte elektrische Energie mittels der verschiedenen Hybridfunktionen eingesetzt wird. Im Fall des Ladens des Energiespeichers kommen in beiden Zielfunktionen die Hybridfunktionen Rekuperation und Lastpunktanhebung bei mittleren Drehzahlen und niedrigen Lasten vor. Ebenfalls kommt in beiden Zielfunktionen die Hybridfunktion Lastpunktabsenkung an der Vollast zur Vermeidung der Vollast zum Einsatz.

Für die Umsetzung der globalen Betriebsstrategie im Längsdynamikmodell sind alle in der Abbildung 23 angeführten Hybridfunktionen mithilfe von entsprechenden Regeln definiert worden. Zur Einsparung des Leerlaufverbrauches im Fahrzeugstillstand wird die VKM mit der Start-Stopp Funktion immer abgestellt. Die Abschaltung der VKM erfolgt bereits kurz vor dem Stillstand, sobald im Getriebe der Neutralgang eingelegt wird, siehe Abbildung 19. Der Indikator für den Wiederstart der VKM ist der Zeitpunkt, in dem durch das Schaltmuster des WLTC die Einlegung des 1.Ganges gefordert wird. Diese Forderung erfolgt kurz vor dem Anfahren des Fahrzeuges, welche wiederum vom Ansteigen der Geschwindigkeit nach dem Stillstand im Fahrprofil ausgeht.

Während der Fahrt wird innerhalb der Betriebsstrategie zwischen den folgenden Modi unterschieden:

- Vortrieb
- Schaltvorgang
- Verzögerung

Dabei fungieren das Fahrerwunschmodent und der Schaltindikator als Kenngrößen zur Identifikation des jeweiligen Betriebsmodus. Der Schaltindikator dient zur Erkennung eines gewünschten Schaltvorganges und kann zwei Zustände aufweisen. Ausschließlich zum Zeitpunkt einer gewünschten Änderung der Gangstufe ist der Schaltindikator aktiv. In der restlichen Zeit ist der Schaltindikator inaktiv.

#### Vortrieb:

Im Vortriebsmodus liegt ein positives Fahrerwunschmodent vor und der Schaltindikator ist inaktiv. Der grundsätzliche Ablauf zur Entscheidungsfindung in der Betriebsstrategie ist in der Abbildung 24 dargestellt. Dabei wird das Laden der Batterie bei Vorhandensein einer Ladeanforderung priorisiert. Der Ladevorgang kann nur durch ein hohes Fahrerwunschmodent in der Nähe der Vollast der VKM unterbrochen werden. Es wird dann von der Hybridfunktion Auflasten hin zu Ablasten an der Vollast gewechselt. Eine Ladeanforderung liegt dann vor, wenn der aktuelle Wert des SOC der Batterie unterhalb eines gewissen Wertes sinkt. Für eine bessere Ausnützung der Batterie als Zwischenspeicher ist die Ladeanforderung anhand des Ladeanforderungsfaktors  $f_{\text{Laden}}$  mittels einer Hysterese in das Modell implementiert worden, siehe Abbildung 25. Der Betrag von  $f_{\text{Laden}} = 1$  entspricht einer Ladeanforderung. Das Laden der Batterie erfolgt wirkungsgradoptimal. Dafür sind umfangreiche Berechnungen vorab für jedes mögliche Fahrerwunschmodent in Abhängigkeit der Drehzahl der Kurbellwelle, der Batterieklemmspannung und des Ladewirkungsgrades für Lastpunktverschiebung durchgeführt worden.



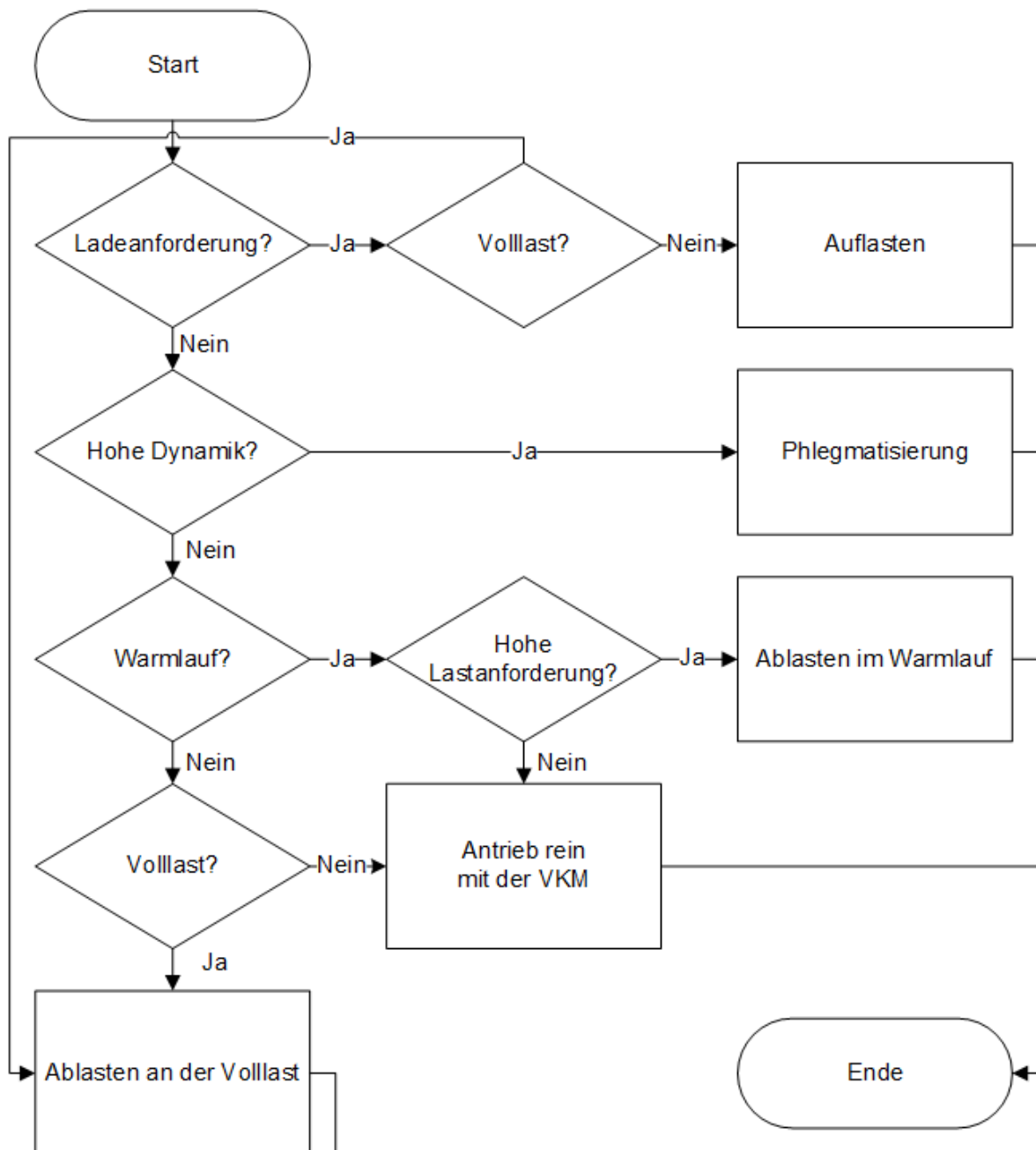


Abbildung 24: Ablaufdiagramm zur Entscheidungsfindung im Vortriebsmodus

Der Ladewirkungsgrad durch Lastpunktanhebung  $\eta_{LPA}$  wird anhand der Gleichung 1 berechnet, siehe Kapitel 2.4.1. Für den durchschnittlichen Ladewirkungsgrad der Batterie ist für die Berechnung ein typischer Wert von 96 % angenommen worden [18]. Ausgehend von der Kenntnis über den Ladewirkungsgrad bei den unterschiedlichen Fahrerwunschkennmomenten ist anschließend der optimale Ladewirkungsgrad für jeden Betriebspunkt der VKM und das dazugehörige Auflastmoment durch die EM ermittelt worden. Damit konnte dann für die an der EM angelegte Spannung von 36 V, 48 V und 52 V ein zwei dimensionales Auflastkennfeld mit der Information über die Höhe des wirkungsgradoptimalen Auflastmomentes in Abhängigkeit des

Fahrerwunschlomentes, der Drehzahl der Kurbelwelle erstellt werden. Für Werte der an die EM angelegten Spannung zwischen den drei oben angeführten Werten erfolgt eine Interpolation des Auflastmomentes.

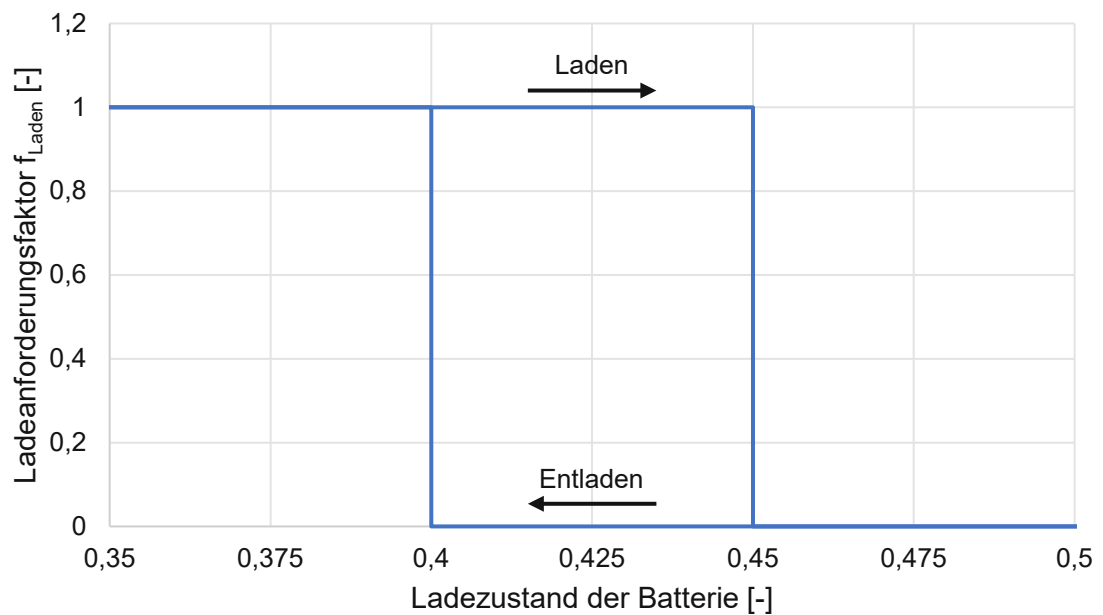


Abbildung 25: Ladeanforderungsfaktor in Abhängigkeit des SOC der Batterie

Die Phlegmatisierung dient zur Begrenzung einer hohen Dynamik der VKM. In der Implementierung der Regel für die Phlegmatisierung in der Betriebsstrategie dient der Gradient des Drehmomentes der VKM als Eingangsgröße. Wenn er einen gewissen Grenzwert überschreitet, erfolgt eine Aufteilung des Fahrerwunschlomentes zwischen der VKM und der EM. Im weiteren Verlauf wird das Drehmoment der VKM so lange begrenzt, bis der Grenzwert des Gradienten wieder unterschritten wird.

Der Unterschied zwischen der in der Betriebsstrategie implementierten Hybridfunktion Lastpunktabsenkung während des Warmlaufes und im betriebswarmen Zustand der VKM liegt in der Höhe des Betrages des Drehmomentes, welches von der EM übernommen wird.

Im Warmlauf bis zu einer Kühlmitteltemperatur von  $T_{\text{KM}} = 60 \text{ °C}$  erfolgt eine Limitierung des Drehmomentes der VKM auf einen Betrag von  $M_{\text{D,VKM,max}} = 60 \text{ Nm}$ , sofern es innerhalb der Leistungsgrenzen der EM ist. Im Gegensatz dazu wird bei der Lastpunktabsenkung an der Volllast der Grenzwert des Drehmomentes der VKM  $M_{\text{D,VKM,max}}$ , bis zu dem ein reiner Betrieb der VKM möglich ist, in Abhängigkeit des aktuell möglichen Volllastmomentes der VKM  $M_{\text{D,VKM,Volllast}}$  definiert, siehe Gleichung 11.

$$M_{D,VKM,max}(t) = w_{Ablasten} \cdot M_{D,VKM,Vollast}(t) \quad (11)$$

$w_{Ablasten}$  ... Ablastfaktor von der Volllast

### Schaltvorgang:

Der Wunsch eines Schaltvorganges wird durch die Änderung der Gangstufe im Schaltmuster, siehe Abbildung 19, detektiert. Dabei ist der Schaltindikator aktiv. Während des Schaltvorganges werden sämtliche Hybridfunktionen unterbrochen. Das angeforderte Drehmoment an die EM wird auf den Wert von  $M_{D,EM,Anforderung} = 0$  Nm gesetzt. Die VKM wird wie in der Realität in den Schubbetrieb bzw. Leerlauf versetzt.

### Verzögerung:

Im Verzögerungsmodus liegt ein negatives Fahrerwunschkmoment vor und der Schaltindikator ist inaktiv. Bei der Verzögerung wird die Rekuperation bis zu den Systemgrenzen immer genutzt. Die so gewonnene elektrische Energie wird durch die Leistungsgrenzen der EM und der Batterie beschränkt. Falls das Fahrerwunschkmoment die Leistungsgrenzen der EM und der Batterie übersteigt, wird das restliche geforderte Verzögerungsmoment durch die mechanischen Reibbremsen aufgebracht. Bei der Rekuperation ist die VKM stets eingekuppelt und wird mitgeschleppt.

## 3.2.4 P2-Topologie

Ausgehend von dem in Kapitel 3.2.3 vorgestellten Längsdynamikmodell eines Hybridantriebsstranges mit der P0-Topologie ist in der vorliegenden Arbeit ein Längsdynamikmodell eines Hybridantriebsstranges mit der P2-Topologie entwickelt worden. Die Kernkomponenten des Hybridantriebsstranges mit der P2-Topologie sind die VKM, die EM, die Trennkupplung, das Zwischengetriebe, die Anfahrkupplung, das manuelle Schaltgetriebe mit 6 Gängen und das Differential. Im Unterschied zum im Kapitel 3.2.3 vorgestellten Modell der P0-Topologie kommt eine leistungsstärkere EM zum Einsatz. Zusätzlich wurde ein Zwischengetriebe auf der Antriebsseite der VKM und eine Trennkupplung zwischen der VKM und dem Zwischengetriebe installiert. Im Gegensatz zur P0-Topologie erfolgt der Start der VKM durch einen Ritzelstarter. Im Nachfolgenden wird nur auf die Neuerungen gegenüber dem Längsdynamikmodell der P0-Topologie und die Betriebsstrategie im Detail eingegangen.

### E-Maschine

Bei der EM handelt es sich um ein Derivat von der in der P0-Topologie eingesetzten EM. Dabei wurde die Leistung der vorhandenen EM um den Faktor 2 hochskaliert, um annähernd das volle Rekuperationspotential im WLTC auszunützen.

Die maximale Antriebsleistung der EM beträgt  $P = 20 \text{ kW}$ . Die EM ist ebenfalls mithilfe einer vorhandenen, kennfeldbasierten Modellvorlage einer EM abgebildet worden. Zur Berücksichtigung der Auswirkung der Batteriespannung auf das Volllastverhalten und den Wirkungsgrad der EM sind jeweils für die Spannungen von  $U = 36 \text{ V}$ ,  $U = 48 \text{ V}$  und  $U = 52 \text{ V}$  die motorische Volllastkennlinie der EM, die generatorische Volllastkennlinie der EM und das Wirkungsgradkennfeld der EM in das Modell der EM implementiert worden. In der Abbildung 26 ist beispielhaft das Wirkungsgradkennfeld der EM der P2-Topologie bei einer angelegten Spannung von  $U = 48 \text{ V}$  ersichtlich.

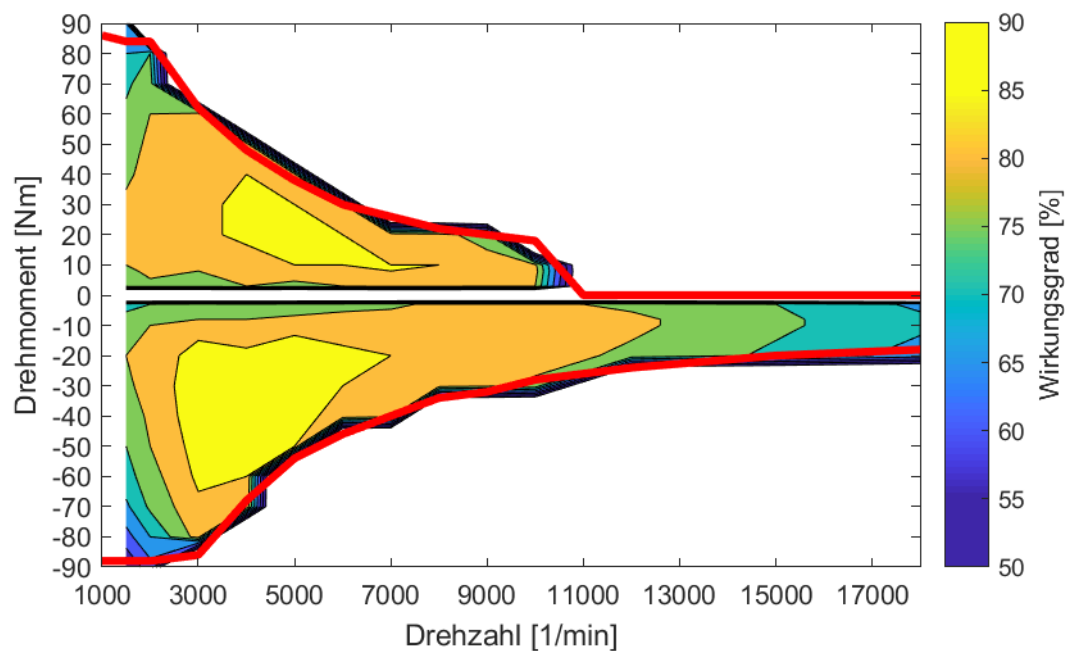


Abbildung 26: Wirkungsgradkennfeld mit der motorischen Volllastkennlinie der EM und der generatorische Volllastkennlinie der EM der P2-Topologie bei  $U = 48 \text{ V}$

Im motorischen Betrieb der EM wird ein maximales Drehmoment von  $86 \text{ Nm}$  und im generatorischen Betrieb ein maximales Drehmoment von  $-88 \text{ Nm}$  erzielt. Die maximale Drehzahl im motorischen Betrieb beträgt  $n_{\text{Mot,max}} = 10\,000 \text{ 1/min}$  und im generatorischen Betrieb  $n_{\text{Gen,max}} = 18\,000 \text{ 1/min}$ . Ebenfalls wie bei der im Kapitel 3.2.3 vorgestellten EM werden sowohl im generatorischen als auch im motorischen Betrieb der EM Wirkungsgrade größer  $80 \%$  über einen weiten Betriebsbereich erreicht.

Die Werte der Kenngrößen Drehmoment und Wirkungsgrad sind ausgehend von den zur Verfügung gestellten Daten bis zu einer Drehzahl von  $n_{\text{EM}} = 0 \text{ 1/min}$  extrapoliert worden.

### Trennkupplung

Für die Abbildung der Trennkupplung ist eine in *GT-SUITE* vorhandene Modellvorlage einer Einscheibentrockenkupplung verwendet worden. Die

Einscheibentrockenkupplung hat einen mittleren Reibradius von 90 mm und kann ein maximales Drehmoment von 400 Nm übertragen.

### **Zwischengetriebe**

Das Zwischengetriebe ist als einstufiges Zahnradgetriebe mit einem fixen Übersetzungsverhältnis von 3:1 zwischen der Drehzahl der Rotorwelle der EM und der Drehzahl der Kurbellwelle und mit einem Wirkungsgrad von 97 % modelliert worden.

### **Ritzelstarter**

Der Ritzelstarter ist anhand eines einfachen Modells, welches ein konstantes Drehmoment abgeben kann, abgebildet worden. Die Steuerung der Höhe des abzugebenden Drehmomentes und der Dauer des Startvorganges erfolgt mittels der Engine Control Unit (ECU).

### **Betriebsstrategie**

Die Ziele der implementierten Betriebsstrategie sind die Reduktion des Kraftstoffverbrauches und die Senkung der Partikelanzahlemissionen. Die Ergebnisse der in Kapitel 3.2.3 durchgeführten Analyse zur Erreichung der jeweiligen Betriebsziele können für die hier vorgestellte Betriebsstrategie übernommen werden. Basierend auf der Erkenntnis dieser Analyse und der Kenntnis über die mit der P2-Topologie umsetzbaren Hybridfunktionen ist eine globale Betriebsstrategie entwickelt worden. Der Aufbau der globalen Betriebsstrategie ist in der Abbildung 27 ersichtlich.

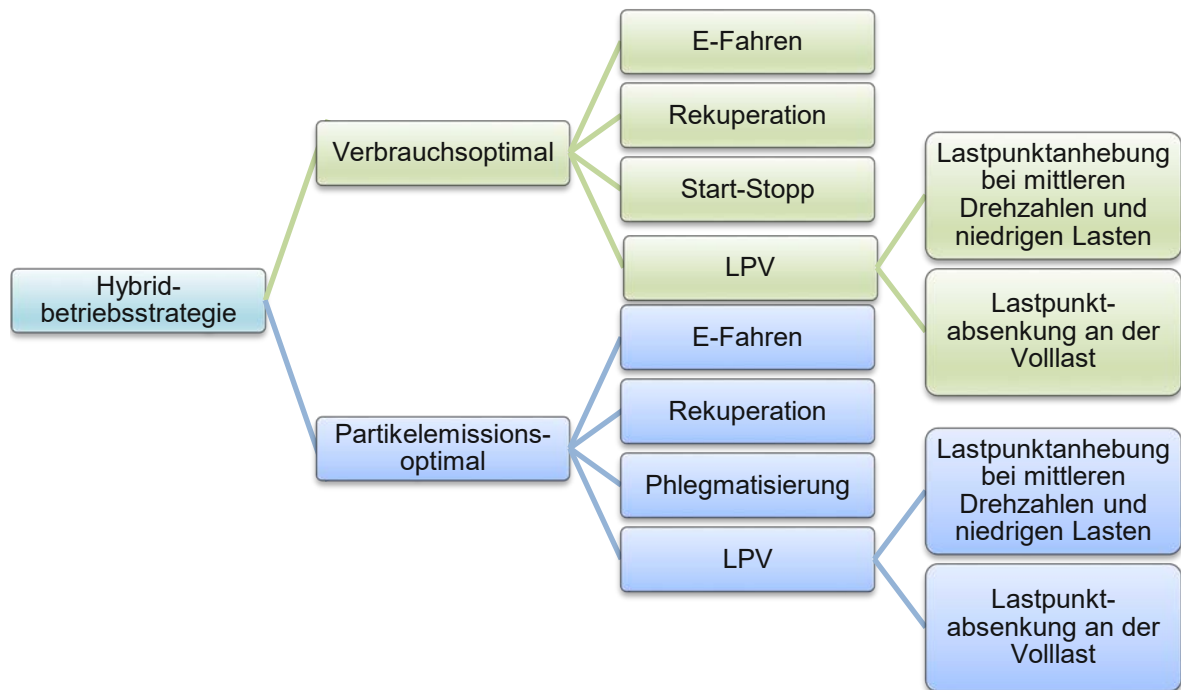


Abbildung 27: schematische Aufbau der globalen Betriebsstrategie der P2-Topologie

Im ersten Schritt der Entwicklung erfolgte die Umsetzung der Zielfunktion für den verbrauchsoptimalen Betrieb in einer Steuereinheit der sogenannten HCU. Im zweiten Schritt sind die Hybridfunktionen zur Erreichung des zweiten Betriebszieles in einer separaten HCU im Längsdynamikmodell implementiert worden. Analog zu den Überlegungen der globalen Betriebsstrategie im Längsdynamikmodell der P0-Topologie erfolgt die Umsetzung der Hybridfunktionen zum Laden der Batterie wie die Rekuperation und die Lastpunktanhebung mittels der Zielfunktion für den verbrauchsoptimalen Betrieb. Daher trifft die Zielfunktion für den partikelemissionsoptimalen Betrieb nur Entscheidungen über den Einsatz der in der Batterie gespeicherten, elektrischen Energie. Die Berechnungen der beiden Zielfunktionen in der jeweiligen Steuereinheit erfolgt im Modell zu jedem Zeitschritt parallel und unabhängig voneinander. Die Berechnung der verbrauchsoptimalen Drehmomentenaufteilung zwischen der VKM und der EM erfolgt mithilfe der ECMS, siehe Kapitel 2.4.2. Die Zielfunktion für den partikelemissionsoptimalen Betrieb ist, in Anlehnung an die bereits aus dem Modell der P0-Topologie bekannte Zielfunktion, regelbasiert ausgeführt worden.

Die P2-Topologie bietet die Möglichkeit zur Nutzung der Hybridfunktion E-Fahren. Ein Spezialfall des Antriebs nur mit der EM stellt das Anfahren und Kriechen mit der EM bei geringen Geschwindigkeiten dar. Diese Funktion ist mit der Start-Stopp Funktion in der Betriebsstrategie verknüpft worden. In der Abbildung 28

sind die Einschalt- und Ausschaltswelle der VKM und die E-Anfahrtgrenze exemplarisch für einen Ausschnitt des WLTC dargestellt.

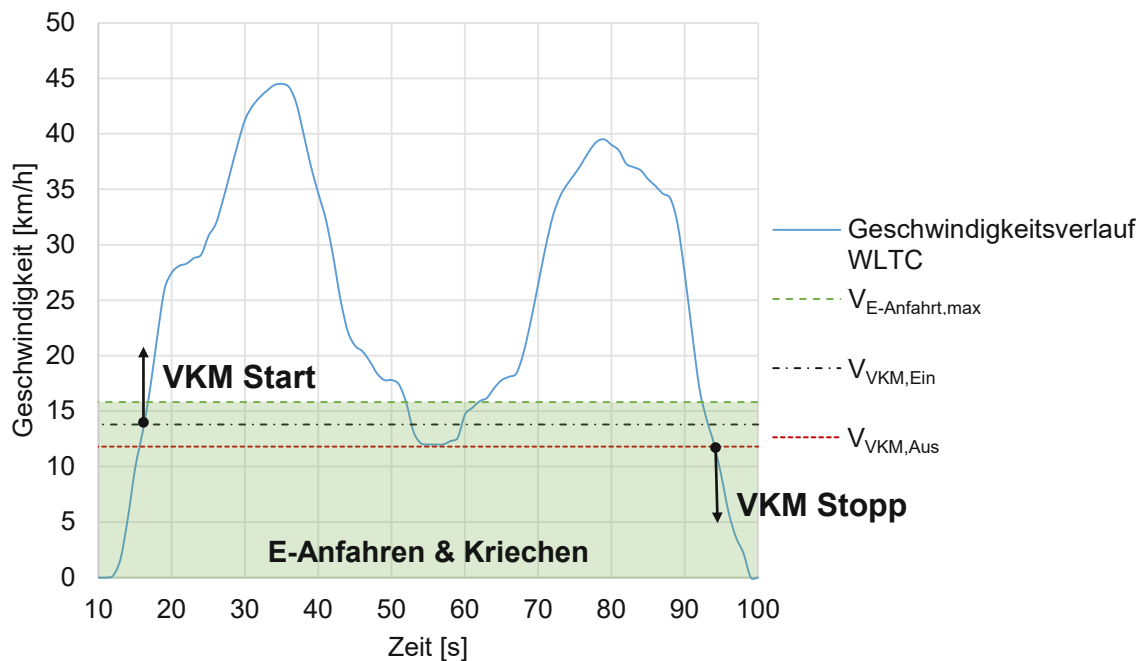


Abbildung 28: Einschalt- und Ausschaltswelle der VKM und E-Anfahrtgrenze in einem Ausschnitt des WLTC

Es ist ersichtlich, dass die EM zum E-Anfahren und Kriechen unterhalb einer Grenze der Fahrzeuggeschwindigkeit, bis zu der der Antrieb nur mit der EM hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs von Vorteil ist,  $v_{E-Anfahrt,max}$  eingesetzt wird. In der Zeit des Stillstands des Fahrzeuges ist die VKM immer abgestellt. Sie wird erst kurz vor Erreichen von  $v_{E-Anfahrt,max}$  hochgefahren. Die Einschaltswelle für den Start der VKM  $v_{VKM,Ein}$  ist ausschließlich von  $v_{E-Anfahrt,max}$  abhängig und wird so gewählt, dass ausreichend Zeit zum Starten und Hochfahren der VKM verbleibt. Dabei hat sich eine Differenz der Grenzwerte von  $(v_{E-Anfahrt,max} - v_{VKM,Ein}) = 2 \text{ km/h}$  im WLTC als ausreichend erwiesen. Aus Komfortgründen bleibt die VKM während der Fahrt immer eingeschaltet, um einen schnellen Wechsel zwischen den Hybridfunktionen zu gewährleisten. Wie die Abbildung 28 zeigt, wird bei einem Verzögerungsvorgang die VKM erst ab dem Zeitpunkt des Unterschreitens des Grenzwertes der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{VKM,Aus}$  die VKM abgestellt. Durch die gezielte Wahl von  $v_{VKM,Aus}$  kann sichergestellt werden, dass die VKM während der Fahrt immer eingeschaltet bleibt. Damit die VKM während der Fahrt im WLTC immer eingeschaltet bleibt, wird die Abschaltswelle zu einem Betrag von  $v_{VKM,Aus} = 11,8 \text{ km/h}$  gewählt, siehe Abbildung 28. Die so gewählte Abschaltswelle  $v_{VKM,Aus}$  wird im WLTC ausschließlich vor Stillstandsphasen unterschritten. Die VKM wird während der E-Fahrt und der Rekuperation durch die Trennkupplung vom restlichen Antriebsstrang abgekoppelt und im Leerlauf betrieben. Die Wahl der Höhe des Grenzwertes  $v_{E-Anfahrt,max}$  hat einen wesentlichen



Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch des gesamten Fahrzyklus. Aus diesem Grund erfolgt im Kapitel 4.2 mithilfe einer Optimierung die Auswahl des kraftstoffverbrauchsoptimalen Wertes von  $v_{E-Anfahrt,max}$ .

Die Umsetzung der ECMS und der dazu notwendigen Aktuierung der Trennkupplung läuft in einer HCU im Modell ab. Anhand der [Abbildung 29](#) kann der Ablauf der ECMS nachvollzogen werden. Die für die ECMS benötigten Wirkungsgradkennfelder der EM bei den verschiedenen Spannungslagen sind in Abhängigkeit der Getriebeeingangsdrehzahl und dem Drehmoment implementiert worden. Weiters ist das Verbrauchskennfeld der VKM, siehe [Abbildung 17](#), implementiert worden.

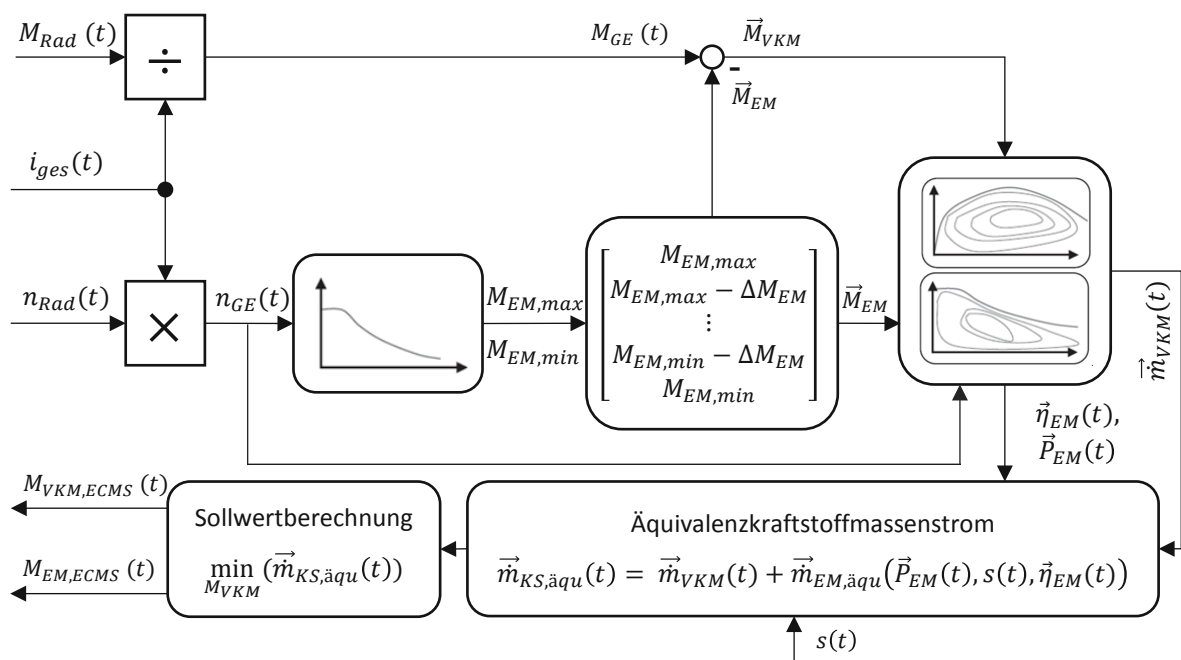


Abbildung 29: Ablauf der ECMS in Anlehnung an [46]

Für ein gegebenes Fahrprofil resultiert zum Zeitpunkt  $t$  zur Erreichung der Zielgeschwindigkeit ein Fahrerwunschloment am Rad  $M_{Rad}(t)$ . Mit Kenntnis der aktuellen Gesamtübersetzung  $i_{ges}(t)$  kann  $M_{Rad}(t)$  in das Fahrerwunschloment am Getriebeeingang  $M_{GE}(t)$  und die Raddrehzahl  $n_{Rad}(t)$  in die Getriebeeingangsdrehzahl  $n_{GE}(t)$  umgerechnet werden. Anschließend diskretisiert die ECMS das Drehmoment der EM zwischen dem für die momentane Getriebeeingangsdrehzahl ausgelesenem Minimalmoment  $M_{EM,min}$  und Maximalmoment  $M_{EM,max}$  mit der Schrittweite  $\Delta M_{EM}$ . Die Schrittweite  $\Delta M_{EM}$  der Diskretisierung kann anhand der [Gleichung 12](#) beschrieben werden.

$$\Delta M_{EM} = \frac{M_{EM,max} - M_{EM,min}}{N - 1} \quad (12)$$

Wobei mit  $N$  die Dimension des mittels der Diskretisierung erhaltenen Vektors des Drehmomentes  $\vec{M}_{EM}$  beschrieben wird. Die Lösungsgüte der ECMS ist unter anderem von der Schrittweite zur Diskretisierung des Drehmomentes abhängig. Bei zu grober Diskretisierung besteht die Gefahr, Punkte günstiger Wirkungsgrade in den Kennfeldern zu überspringen. Andererseits nimmt der Speicherplatzbedarf mit kleiner Schrittweite bei Elektromotoren mit hohen Maximalmomenten zu [47]. Der Speicherbedarf spielt in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle. Daher ist für eine hinreichend genaue Berechnung der Drehmomentenaufteilung mittels der ECMS die Dimension der Vektoren mit  $N = 200$  festgelegt worden.

Entsprechend der Gleichung 13 können die Elemente des Drehmomentvektors  $M_{VKM}$  berechnet werden.

$$M_{VKM,i} = M_{GE}(t) - M_{EM,i} \quad (13)$$

Durch die Diskretisierung des Drehmomentes der EM werden alle möglichen Betriebszustände des Hybridantriebsstranges zum aktuellen Zeitpunkt von maximaler Lastpunktanhebung der VKM ( $M_{EM} = M_{EM,min}$ ) bis maximaler Lastpunktabsenkung der VKM ( $M_{EM} = M_{EM,max}$ ) definiert. Mit den Drehmomentvektoren und der Getriebeeingangsdrehzahl lassen sich die Leistung der EM  $\vec{P}_{EM}(t)$  berechnen und der Kraftstoffmassenstrom der VKM  $\vec{m}_{VKM}(t)$  sowie der Wirkungsgrad der EM  $\vec{\eta}_{EM}(t)$  aus den Maschinenkennfeldern interpolieren. Mit der Leistung der EM und dem Wirkungsgrad der EM resultiert in Verbindung mit einem vorgegebenen Äquivalenzfaktor  $s$  der Vektor des äquivalenten Kraftstoffverbrauchs der EM  $\vec{m}_{EM,\ddot{a}qu}(t)$ . Bei der Berechnung von  $\vec{m}_{EM,\ddot{a}qu}(t)$  wird zwischen dem Fall des Ladens bzw. des Entladens mit dem jeweils dazu gehörigen Äquivalenzfaktor ( $s_{Laden}$ ,  $s_{Entladen}$ ) unterschieden, siehe Gleichung 4. Aus der Vektoraddition des äquivalenten Kraftstoffverbrauchs der EM mit dem Kraftstoffmassenstrom der VKM resultiert der Vektor des äquivalenten Kraftstoffmassenstroms  $\vec{m}_{KS,\ddot{a}qu}(t)$ . Das Argument des Minimums des resultierenden äquivalenten Kraftstoffmassenstroms liefert das Drehmoment der VKM  $M_{VKM,ECMS}(t)$  und das Drehmoment der EM  $M_{EM,ECMS}(t)$ .

Wegen der Gewährleistung der Ladungsausgeglichenheit am Ende des Fahrzyklus und der Einhaltung des für die Nutzung der Batterie zulässigen Bereiches des SOC ist die zuvor beschriebene Ausführung der ECMS zu einer A-ECMS Methode, bei der die Adaption auf dem Feedback des SOC basiert, weiterentwickelt worden. Es erfolgt eine ausschließliche Adaption des Entladeäquivalenzfaktors  $s_{Entladen}$  mithilfe eines PI-Reglers. Der Ladeäquivalenzfaktor  $s_{Laden}$  wird über den gesamten Fahrzyklus konstant gehalten. Eine Adaption des Ladeäquivalenzfaktors wirkt sich im Speziellen im Falle eines sinkenden Ladezustands der Batterie nachteilig auf den

Kraftstoffverbrauch aus. Dabei würde der Ladeäquivalenzfaktor erhöht werden. Dies hat zur Folge, dass nach der Berechnung der Drehmomentenaufteilung durch die ECMS eine Lastpunktanhebung der VKM nahe der Vollast als günstig erscheint. Dadurch wird der Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu der Ausführung mit einem konstanten Ladeäquivalenzfaktor erhöht. Die Adaption des Entladeäquivalenzfaktors erfolgt nach dem Regelgesetz, welches in der Gleichung 8 ersichtlich ist. Für den Referenzladezustand wird ein Wert von  $SOC_{ref} = 0,5$  gewählt. Der zulässige Bereich des Ladezustandes beträgt  $(SOC_{max} - SOC_{min}) = 0,2$ . Nach dem Vorschlag in [37] ist der Integrationsfaktor des PI-Reglers zu  $K_I = 0,005$  gewählt worden. Der Proportionalterm ist als kubische Funktion mit einem Exponent  $a = 3$  ausgeführt worden, siehe Gleichung 7. Die Ermittlung des initialen Entladeäquivalenzfaktors sowie des über den gesamten Fahrzyklus konstanten Ladeäquivalenzfaktors erfolgt mithilfe eines Optimierungsverfahrens mit einem genetischen Algorithmus im Kapitel 4.2.

Im Hinblick auf einen praktischen Einsatz der ECMS müssen neben einem möglichst geringen Kraftstoffverbrauch auch Fahrbarkeits- und Komfortkriterien berücksichtigt werden. Daraus lässt sich die Forderung nach einer geringen Anzahl an Wechseln der Modi von der reinen E-Fahrt zum Hybrid- oder reinem VKM-Betriebsmodus und vice versa ableiten. Aus diesem Grund ist für die reine E-Fahrt und für die Betriebsmodi, in denen die VKM ein Drehmoment abgibt, eine Mindestdauer definiert und in das Modell implementiert worden. Für beide Fälle ist eine Mindestdauer von  $t_{mindest} = 1$  Sek festgelegt worden. Wenn bei der reinen E-Fahrt die Mindestdauer noch nicht verstrichen ist, aber von der ECMS das angeforderte Drehmoment der EM Null beträgt, dann werden die Drehmomentanforderung an die VKM und die ECMS von der Mindestdauer-Steuerung überschrieben. Dabei gibt die EM weiterhin bis zum Ablauf der Mindestdauer das Fahrerwunschemoment ab und die VKM bleibt abgekoppelt im Leerlauf. Erfolgt während der Betriebsmodi, in denen die VKM ein Drehmoment abgibt, vor Verstreichen der Mindestdauer eine Anforderung durch die ECMS, bei der die VKM abgekoppelt werden soll, wird diese ebenfalls von der Mindestdauer-Steuerung überschrieben. Dabei erfolgt, sofern es möglich ist, immer eine wirkungsgradoptimale Lastpunktanhebung. Dazu ist eine Kennlinie mit dem wirkungsgradoptimalen Drehmoment der VKM in Abhängigkeit der Drehzahl erstellt worden, siehe Abbildung 30.

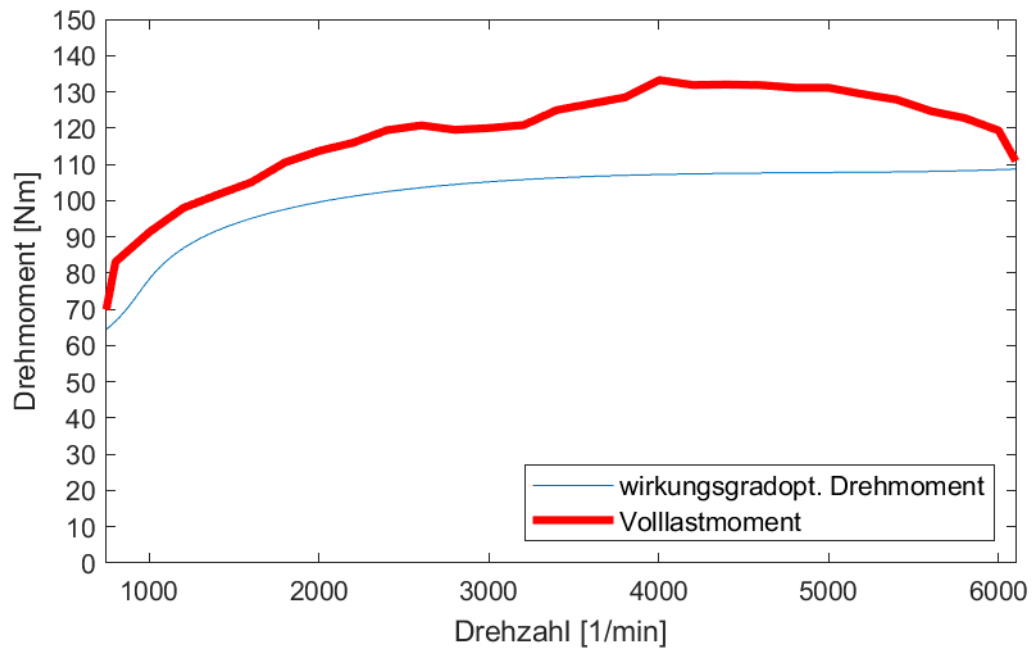


Abbildung 30: wirkungsgradoptimales Drehmoment der VKM in Abhängigkeit der Drehzahl

Die VKM wird mit dem in der Abbildung 30 für die momentane Drehzahl wirkungsgradoptimalen Auflastmoment angesteuert. Das an die EM angeforderte Drehmoment ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Fahrerwunschloment und dem wirkungsgradoptimalen Auflastmoment der VKM. An dieser Stelle sei erwähnt, dass durch die Forderung von Mindestdauern von Betriebsmodi eine Abweichung von der optimalen Lösung des Problems der Minimierung des gesamten Kraftstoffverbrauchs der ECMS vorliegt. Diese suboptimale Lösung wirkt sich in einem leicht höheren Kraftstoffverbrauch gegenüber der optimalen Lösung der ECMS aus.

Nach der Berechnung der Drehmomentenaufteilung durch die A-ECMS erfolgen in einer weiteren HCU die Umsetzung der für die unterschiedlichen Hybridfunktionen notwendige Aktuierung der Trennkupplung und die Weiterleitung der angeforderten Drehmomente zur VKM sowie zur EM. Die VKM wird bei den Hybridfunktionen reines E-Fahren, Segeln und Rekuperation vom restlichen Antriebsstrang durch die Trennkupplung abgekuppelt und im Leerlauf betrieben.

Für die Berücksichtigung des Betriebszieles der Reduktion der Partikelanzahlemissionen ist in der globalen Betriebsstrategie eine regelbasierte Teilbetriebsstrategie implementiert worden. Diese regelbasierte Teilbetriebsstrategie beinhaltet die Hybridfunktionen Phlegmatisierung und Lastpunktabsenkung an der Volllast.

Die Phlegmatisierung ist in der sogenannten Transient Control (TC) implementiert. Die TC ist im Ablauf nach der HCU, in der die Umsetzung der Aktuierung der Trennkupplung und die Weiterleitung der angeforderten Drehmomente zur VKM

sowie zur EM erfolgt, angeordnet. In der TC wird der Gradient der Drehmomentenanforderung der VKM durch die ECMS  $M_{VKM,ECMS}(t)$  begrenzt. Der standardmäßig eingestellte Wert für den Grenzwert des positiven Gradienten des Drehmomentes der VKM beträgt  $\frac{dM_{D,VKM,max}}{dt} = 20 \frac{Nm}{s}$ . Die Anordnung der TC ermöglicht im Falle des Überschreitens des Grenzwertes des Gradienten eine Überschreibung der Drehmomentenaufteilung der ECMS durch die TC. Dabei wird das Drehmoment der VKM so lange begrenzt, bis der Grenzwert des Gradienten eingehalten wird. Das Drehmoment wird dann unter Einhaltung des Grenzwertes an das Fahrerwunschkmoment nachgeführt. Die TC ist in die Betriebsstrategie so implementiert worden, dass sie für die unterschiedlichen Untersuchungen über die Einstellung der globalen Betriebsstrategie aktiviert bzw. deaktiviert werden kann.

Analog zur Regel für die Lastpunktabenkung an der Vollast, die in der partikeloptimalen Teilbetriebsstrategie in der P0-Topologie implementiert ist, ist ein Grenzwert des Drehmoments der VKM, bis zu dem ein reiner Betrieb der VKM möglich ist,  $M_{D,VKM,max}$  definiert worden, siehe Gleichung 11. Zusätzlich ist die in der ECMS durchgeführte Bilanzierung des äquivalenten Kraftstoffmassenstromes, siehe Gleichung 2, um einen additiven Term zur Bestrafung bei Überschreiten des Grenzwertes  $M_{D,VKM,max}$  zur Gleichung 13 erweitert worden.

$$\dot{m}_{KS,\ddot{a}qu}(t) = \dot{m}_{VKM}(P_{VKM}(t)) + \dot{m}_{EM,\ddot{a}qu}(P_{EM}(t)) + \dot{m}_{Strafkosten} \quad (13)$$

$\dot{m}_{Strafkosten}$  ... Strafkosten

Im Falle der Überschreitung kann so eine Entscheidung der A-ECMS über die Drehmomentenaufteilung und somit eine Begrenzung der maximalen Höhe des Betrages des Drehmomentes der VKM auf den Grenzwert  $M_{D,VKM,max}$  erzwungen werden. Dafür sind Strafkosten in der Höhe von  $\dot{m}_{Strafkosten} = 10 \frac{g}{s}$  gewählt worden.

Basierend auf den variabel gestalteten Grenzwerten der Regeln der partikelemissionsoptimalen Betriebsstrategie besteht die Möglichkeit zur unterschiedlichen Gewichtung der beiden Betriebsziele der globalen Betriebsstrategie.

### 3.2.5 Validierung

Die Validierung dient zur Steigerung der Aussagekraft des Längsdynamikmodells mit der P0-Topologie und des darauf aufbauenden Längsdynamikmodells mit der P2-Topologie hinsichtlich der Beurteilung des Kraftstoffverbrauchs für die im Kapitel 4 und Kapitel 5 durchgeführten Untersuchungen. Es ist eine Validierung des im Kapitel 3.2.3 vorgestellten Längsdynamikmodells der P0-Topologie anhand der Messungen, welche am Motorenprüfstand erzielt wurden, durchgeführt worden. Für

den Abgleich der simulativen und experimentellen Resultate ist als Fahrzyklus, wie in den nachfolgenden Untersuchungen in dieser Arbeit, das Fahrprofil des WLTC Klasse 3 verwendet worden. Die Gewichtung der globalen Betriebsstrategie der P0-Topologie erfolgte stärker in Richtung Reduktion der Partikelanzahlemissionen. Dafür beträgt der Grenzwert des positiven Gradienten des Drehmomentes der VKM  $\frac{dM_{D,VKM,max}}{dt} = 20 \frac{Nm}{s}$ . Das momentane, maximal zulässige Drehmoment der VKM  $M_{D,VKM,max}$  wird mittels des Ablastfaktors  $w_{Ablasten} = 0,85$  auf 85 % des aktuellen Volllastdrehmomentes beschränkt. Bei der Validierung wurden die simulativen und experimentellen Ergebnisse hinsichtlich Motordrehzahl, Drehmoment der VKM und kumulierten Kraftstoffverbrauch gegenübergestellt. Anhand dieser Gegenüberstellung können Aussagen über die Modellierungsgüte des virtuellen Hybridantriebsstrangs getroffen werden. Die Messungen wurden im betriebswarmen Zustand mit einem entsprechend vorkonditionierten Kühlmittel und Schmieröl durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 31 dargestellt. Der Abgleich der Motordrehzahl und des Drehmomentes der VKM verdeutlicht, dass das reale Verhalten des Antriebstranges gut durch das Modell abgebildet werden kann.

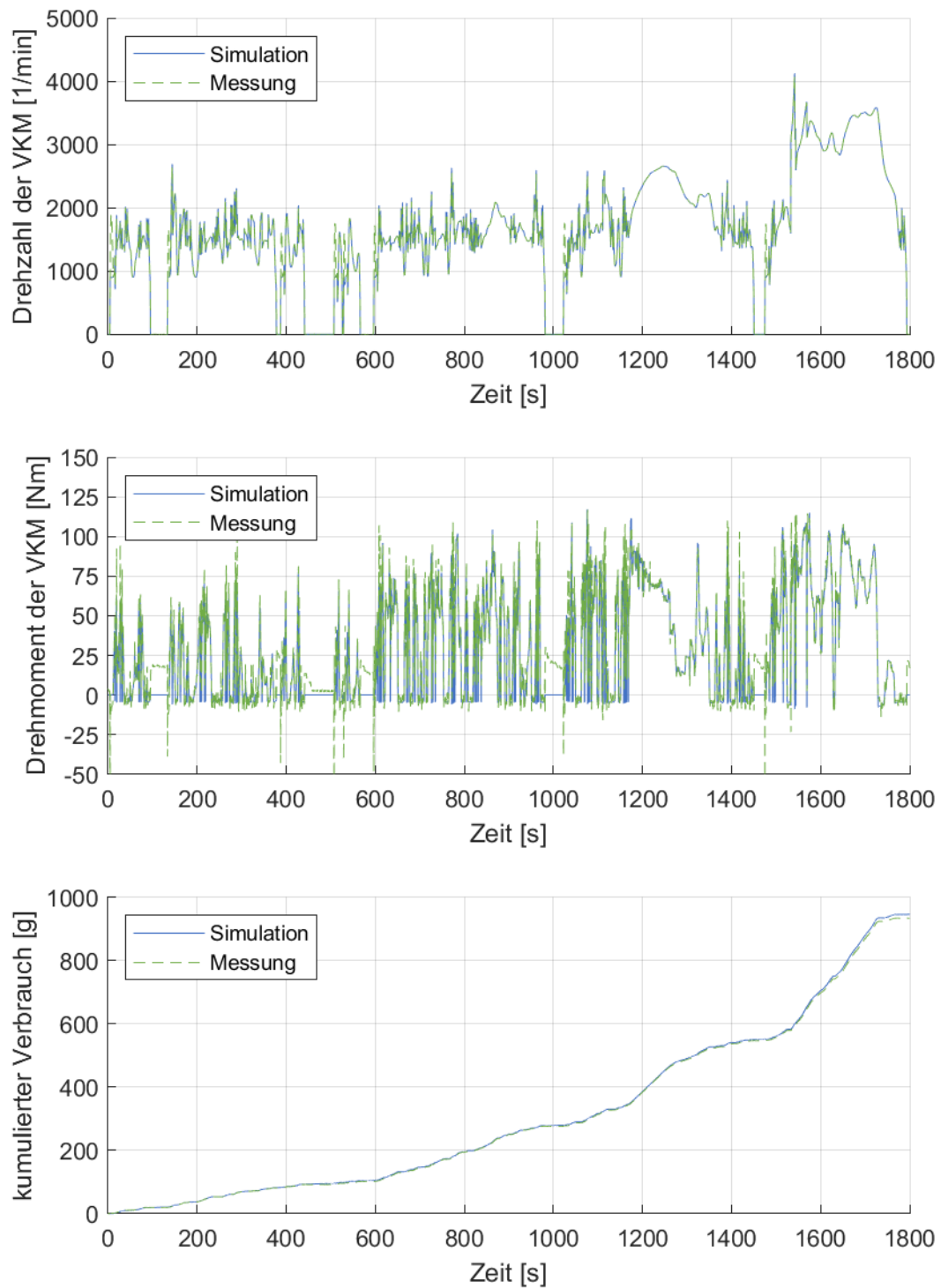


Abbildung 31: Validierung der Simulationsergebnisse durch Prüfstandsmessungen im WLTC

Jedoch kommt es in der Startphase zu einer geringfügigen Abweichung der Drehzahl und des Drehmomentes der VKM. Dies beruht auf der Tatsache, dass bei den Messungen mittels Motorenprüfstand das originale Motorsteuergerät verwendet wurde. In der ECU kann die Einspritzung nicht separat von der Zündung



aktuiert werden. Aus diesem Grund muss beim Start die VKM auf eine höhere Drehzahl als die Leerlaufdrehzahl geschleppt werden. Kurz vor Erreichen der Leerlaufdrehzahl wird die Zündung aktiviert. Mit der Aktivierung der Zündung erfolgt die Synchronisierung der ECU. Sobald die ECU synchronisiert ist, kann sie die Leerlaufregelung der VKM übernehmen und die Regelung des Motorenprüfstandes wird in eine 0-Momenten Regelung übergeführt.

Weiters gibt es eine geringfügige Abweichung des Drehmomentes während der Stillstandsphasen der VKM. Im Stillstand wird von der VKM kein Drehmoment abgegeben, aber die Belastungsmaschine gibt ein Drehmoment, welches am Messflansch gemessen wird, im Stillstand zur Beibehaltung ab. Zusammenfassend lässt sich anhand des kumulierten Kraftstoffverbrauches eine gute Übereinstimmung der simulativen und experimentellen Ergebnisse für das zu Grunde liegende Fahrprofil erkennen. Somit konnte das Modell für den relevanten Betriebsbereich abgestimmt werden und bildet die Grundlage für die weiteren Untersuchungen.

### 3.3 Partikelanzahlemissionsmodell

Das Simulationsmodell des Partikelanzahlstromes ist mit der Hilfe eines Werkzeuges in der Simulationsumgebung *MATLAB-Simulink* erstellt worden. Zur Erstellung wurde die Model Based Calibration (MBC) Toolbox verwendet.

#### 3.3.1 Aufbau

In der MBC Toolbox sind zwei statistische Modelle für den Warmlauf der VKM und den betriebswarmen Zustand der VKM zur Ermittlung der Partikelanzahlemissionen entwickelt worden. Der Grund für die Erstellung von zwei statistischen Modellen ist die Steigerung der Modellgüte im Gegensatz zur Verwendung von nur einem statistischen Modell. Grundsätzlich ermöglicht ein statistisches Modell die realen, komplexen, physikalischen Phänomene der Emittierung von Partikeln zu beschreiben. Dies hat den Vorteil der einfacheren Modellbildung im Gegensatz zur Modellierung der Partikelemissionen mit traditionellen, physikalischen Modellen. Ein weiterer wesentlicher Vorteil des statistischen Modells gegenüber einem physikalischen Modell ist eine bessere Modellgüte. Dieser Vorteil basiert auf der Tatsache, dass das statistische Modell der Partikelanzahlemissionen aus den Messungen am Motorenprüfstand der Partikelanzahlemissionen abgeleitet wird und somit die kompletten, physikalischen Phänomene des realen Systems beschreibt. Der Ablauf zur Erstellung des Modells ist in der Abbildung 32 ersichtlich.

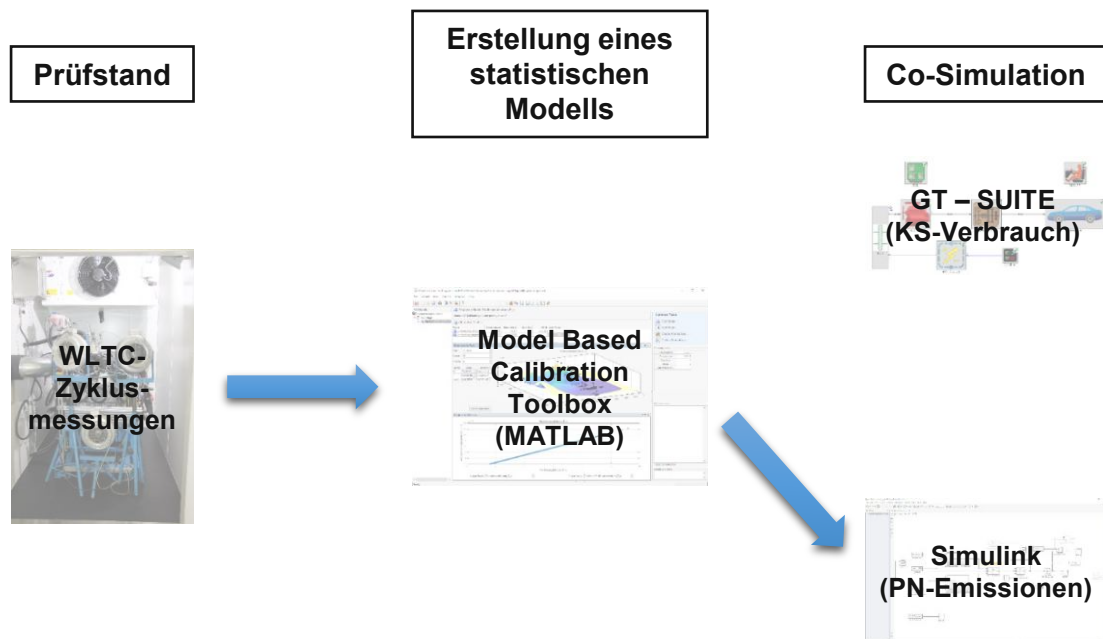


Abbildung 32: Ablauf der Erstellung des PN-Modells und Simulation der PN-Emissionen

### **Prüfstand**

Die Grundlage der statistischen Modelle bilden die Daten von bereits vorhandenen Messungen der Partikelanzahlemissionen am Motorenprüfstand der P0-Topologie und einer um eine Start-Stopp Funktion erweiterten Variante des Basisfahrzeuges im WLTC Klasse 3 jeweils für den Kalt- und Warmstart der VKM. Bei den Messungen ist die Gewichtung der Betriebsstrategie der P0-Topologie gleich beibehalten worden, wie bei den Messungen für die Validierung des Längsdynamikmodells, siehe Kapitel 3.3.2.

### **Erstellung der statistischen Modelle**

Es ist ein Modell für die Warmlaufphase ( $T_{KM} < 67,2 \text{ °C}$ ) und ein Modell für den betriebswarmen Zustand erstellt worden. Dabei wurde das Modell für die Warmlaufphase mit den Daten der Messungen mit dem Kaltstart der VKM und das Modell für den betriebswarmen Zustand mit den Daten der Messungen mit dem Warmstart der VKM trainiert. Die Trainingsdaten beinhalten sowohl die Daten der Eingangsgrößen als auch die der Ausgangsgrößen. Die Eingangsgrößen der statistischen Modelle sind das Drehmoment der VKM, der positive Gradient des Drehmomentes der VKM, die Drehzahl der VKM und die Kühlmitteltemperatur (nur für das Warmlaufmodell). Die Ausgangsgröße beider Modelle ist der Partikelanzahlstrom. Mithilfe der MBC Toolbox konnten verschiedene Arten von statistischen Modellen mit den Daten aus den Messungen trainiert werden. Dabei hat sich hinsichtlich der Modellierungsgüte das Radiale-Basisfunktionen-Netz (RBF-Netz) für diese Anwendung als vielversprechend erwiesen. RBF-Netze sind streng geschichtete, vorwärtsbetriebene neuronale Netze mit genau einer

versteckten Schicht [48]. Für eine detailliertere Erläuterung der RBF-Netze sei auf die Fachliteratur wie z.B. [48] verwiesen.

### **Co-Simulation**

Mittels der MBC Toolbox sind die beiden zuvor erstellten RBF-Netze in zwei *Simulink*-Modelle übergeführt worden. In weiterer Folge sind diese beiden zu einem gemeinsamen *Simulink*-Modell zur Ermittlung der Partikelanzahlemissionen zusammengeführt worden. Innerhalb dieses *Simulink*-Modells wird ab einem Grenzwert der Kühlmitteltemperatur von  $T_{KM} = 67,2 \text{ °C}$  zwischen den beiden RBF-Netzen umgeschaltet. Weiters ist für die Co-Simulation mit *GT-SUITE* eine Schnittstelle zur Übergabe der benötigten Eingangsgrößen vom Längsdynamikmodell in *GT-SUITE* an das *Simulink*-Modell definiert worden.

### **3.3.2 Validierung**

Zur Validierung des Partikelanzahl-Simulationsmodells ist exemplarisch die Messung am Motorenprüfstand der P0-Topologie mit Kaltstart der VKM herangezogen worden. Bei der Validierung wurden die simulativen und experimentellen Ergebnisse hinsichtlich kumulierte Partikelanzahl und Partikelanzahlstrom gegenübergestellt, siehe Abbildung 33.

Der Vergleich der kumulierten Partikelanzahlen bestätigt, dass das reale Verhalten der Emittierung von Partikel durch die VKM vom Simulationsmodell gut abgebildet wird. Aufgrund der Streuung der Messdaten ist ein exakter Abgleich des Partikelanzahlstromes nur eingeschränkt möglich. Bei der Betrachtung der Partikelanzahlströme zeigt sich eine Abweichung innerhalb der Messtoleranz des Ergebnisses der Simulation von den Ergebnissen der Messungen ab in etwa ein Drittel der Dauer des Fahrzyklus  $t = 600 \text{ s}$ . Hierbei wird vom Modell für den Warmlauf auf das Modell für den betriebswarmen Zustand umgeschaltet. Dadurch wird eine nicht optimale Abbildung des Partikelanzahlstromes bedingt.

Das gesamte PN-Modell bestehend aus dem Modell für den Warmlauf und dem Modell für den betriebswarmen Zustand konnte mittels der Validierung für den relevanten Betriebsbereich abgestimmt werden und bildet die Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit angestellten, simulativen Untersuchungen.

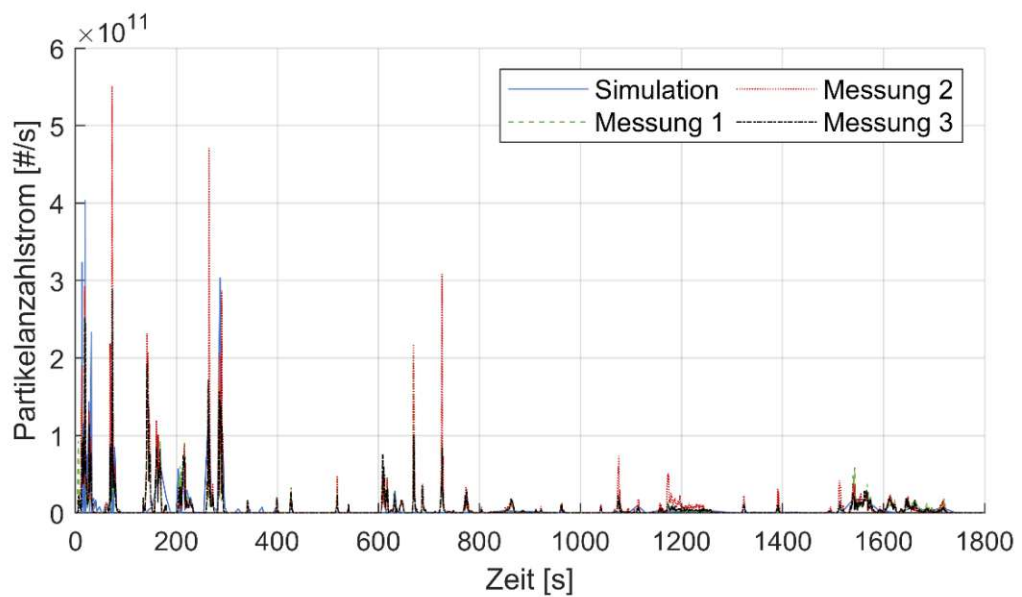
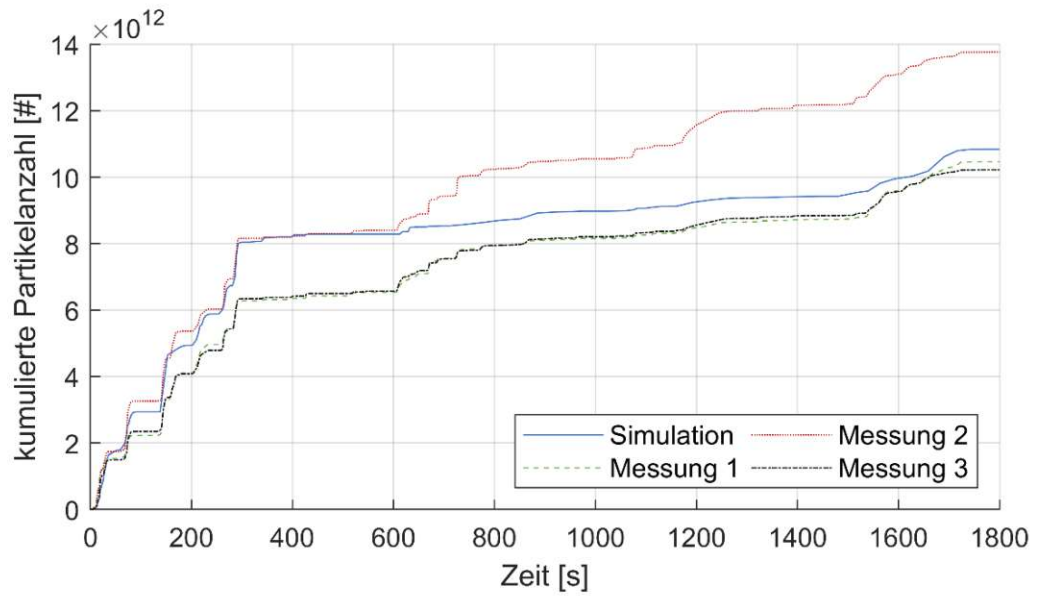


Abbildung 33: Validierung des PN-Modells anhand der P0-Topologie mit starker Gewichtung der Betriebsstrategie zur Absenkung der PN-Emissionen bei Kaltstart im WLTC

## 4. Untersuchungen zur Absenkung CO<sub>2</sub>- und PN-Emissionen

Für die Analyse des Trade Off Verhaltens von Kraftstoffverbrauch und Partikelanzahlemissionen, jeweils für die P0- und die P2-Topologie, sind Simulationsrechnungen mit den beiden Längsdynamikmodellen und dem PN-Modell im WLTC Klasse 3 Fahrzyklus durchgeführt worden. Dabei wurde jeweils eine Variation von Parametern in der Betriebsstrategie, welche einen Einfluss auf die unterschiedliche Gewichtung hinsichtlich der Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Partikelanzahlemissionen haben, vorgenommen. Die Referenz für alle simulativen Untersuchungen bildet die Simulationsrechnung mit dem Längsdynamikmodell des Basisfahrzeug, welches im Kapitel 3.2.2 vorgestellt wurde, und dem PN-Modell im WLTC Klasse 3 Fahrzyklus.

### 4.1 P0-Topologie

Ein Eckpunkt der Analyse des Trade Off Verhaltens von Kraftstoffverbrauch und Partikelanzahlemissionen stellt die Gewichtung der Betriebsstrategie hinsichtlich des minimalsten Kraftstoffverbrauches dar. Zur Auffindung der verbrauchsoptimalen Betriebsstrategie ist eine Optimierung mit einem genetischen Algorithmus durchgeführt worden. Dafür ist der in *GT-SUITE v2018* integrierte, sogenannte *Design Optimizer* verwendet worden. Bei dem genetischen Algorithmus handelt es sich um den Algorithmus NSGAIII. Dieser eignet sich nach [49] gut für das vorliegende Optimierungsproblem zur Suche des globalen Optimums. Die Optimierungsvariable ist der Ablastfaktor von der Volllast  $w_{\text{Ablasten}}$  und das Ziel der Optimierung ist das Ergebnis des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauches für den Fahrzyklus. Zusätzlich neben der Minimierung des Kraftstoffverbrauches ist für die Optimierung die Nebenbedingung der Einhaltung der Ladungsausgeglichenheit definiert worden. Dies bedeutet, dass nur dann ein optimaler Wert von  $w_{\text{Ablasten}}$  hinsichtlich des minimalen Kraftstoffverbrauches vorliegt, wenn der initiale Wert des SOC gleich dem Wert des SOC am Ende des Fahrzyklus  $\text{SOC}_{\text{Ende}}$  ist. Bei der Optimierungsrechnung ist eine Populationsgröße von  $n = 6$  und eine Anzahl an Generationen von 25 gewählt worden. Das Ergebnis der Optimierungsrechnung für den Fall des Warmstarts ist exemplarisch in der Abbildung 34 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich die Ergebnisse der Optimierungsrechnung ab in etwa der 40. Iteration in der Nähe des Optimums unter Einhaltung der Nebenbedingung befinden. Im weiteren Verlauf zeigt sich, dass die Optimierungsrechnung gegen ein Minimum des Kraftstoffverbrauchs konvergiert. Daher kann davon ausgegangen werden, dass ein globales Minimum des Kraftstoffverbrauches mit dem so erhaltenen  $w_{\text{Ablasten}}$  gefunden wurde. Für diesen Fall beträgt der minimale, durchschnittliche Kraftstoffverbrauch 5,34 L/100km und für den Ablastfaktor an der Volllast konnte ein Wert von  $w_{\text{Ablasten}} = 0,8122$  ermittelt werden.

Weiters verdeutlicht die Abbildung 34, dass niedrigere Kraftstoffverbräuche nur mit einer Nichteinhaltung der Nebenbedingung der Optimierung einhergehen und somit nicht weiter betrachtet werden.

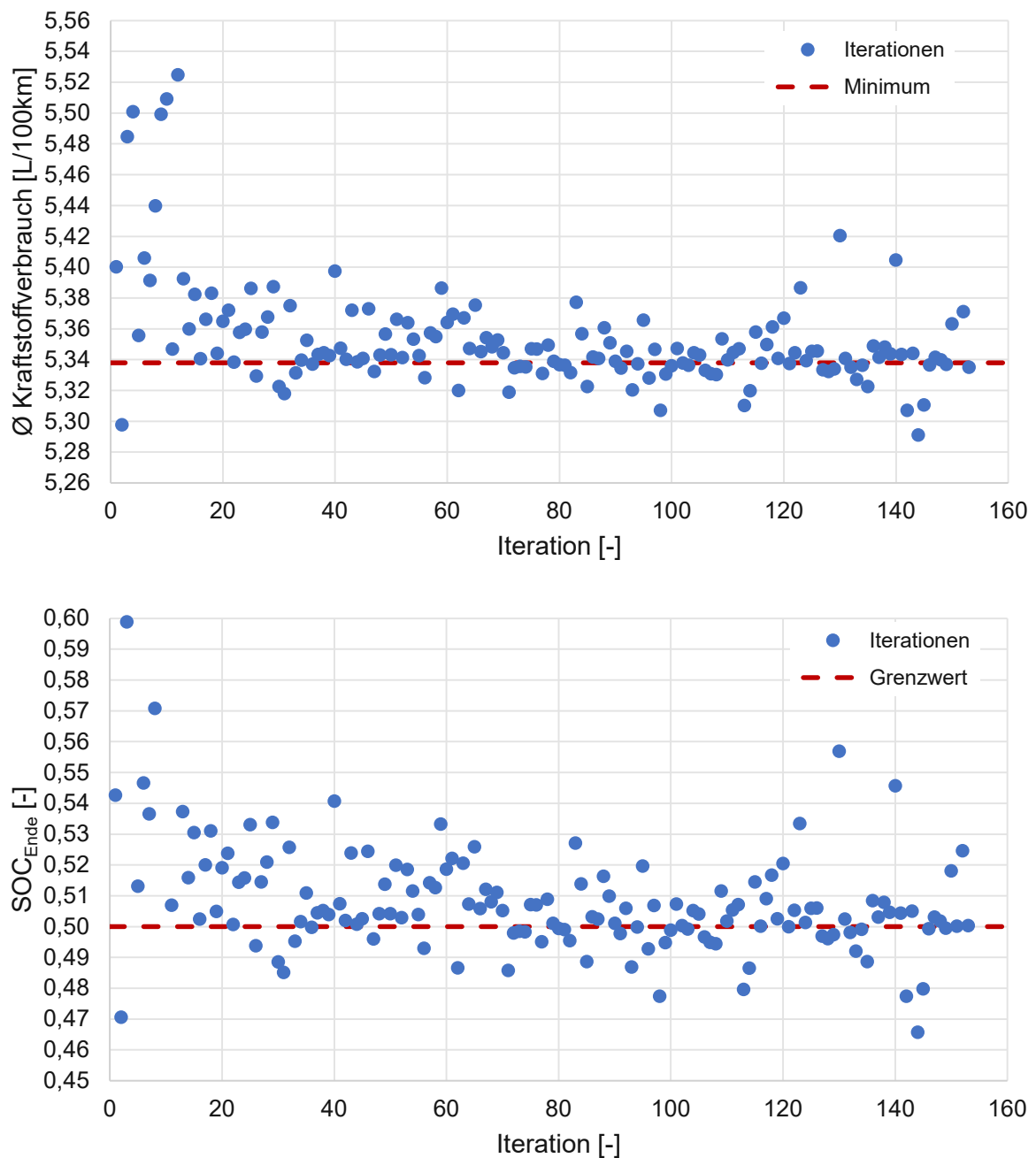


Abbildung 34: Ergebnisse der Optimierung der P0-Topologie für die Warmstartuntersuchung

Das globale Minimum wird nach 116 Iterationen erreicht. Die Abweichung des Endwertes von dem des Initialwertes des SOC beträgt 0,04 %. Daher wird von einer Ladungsausgeglichenheit und somit der Erfüllung der Nebenbedingung ausgegangen. Die erzielte Kraftstoffeinsparung der P0-Topologie entspricht einer Reduktion des Kraftstoffverbrauches von in etwa 5 % gegenüber des Basisfahrzeugs. Ähnliche Resultate für ein Fahrzeug des C-Segementes hinsichtlich des Einsparungspotentials der P0-Topologie gegenüber einem Fahrzeug mit konventionellen Antriebsstrang sind



in den Untersuchungen im WLTC in [50], [51] erzielt worden. Die Untersuchung hat gezeigt, dass sich die Verbrauchsvorteile der P0-Topologie im Wesentlichen durch die Abschaltung der VKM im Stillstand des Fahrzeuges, die Rekuperation und die Lastpunktabsenkung an der Volllast ergeben. Die Reduktion des Kraftstoffverbrauches mithilfe der Funktion Lastpunktabsenkung erfolgt in Phasen, in denen die VKM in der Nähe der Volllast betrieben wird. Diese Phasen treten im WLTC vor allem in Beschleunigungsvorgängen auf. In der Abbildung 35 ist exemplarisch ein solcher Beschleunigungsvorgang vom Fahrzeugstillstand weg dargestellt.

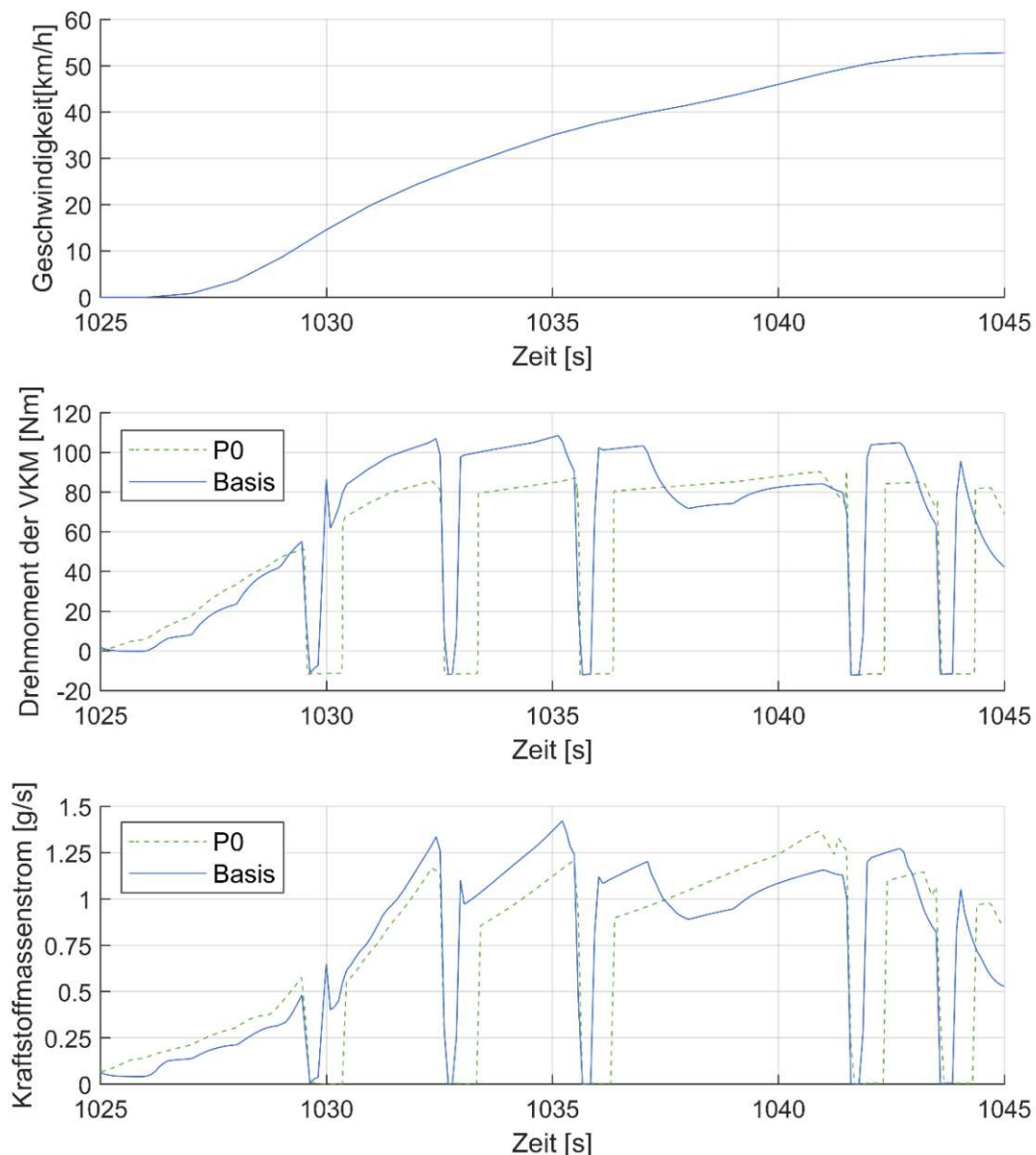


Abbildung 35: Beschleunigungsvorgang im WLTC mit dem Basisfahrzeug und der P0-Topologie

Es ist ersichtlich, dass mittels der Lastpunktabsenkung das von der VKM abgegebene Drehmoment reduziert werden kann. Die VKM wird in einem deutlich günstigeren



Lastpunkt hinsichtlich des Wirkungsgrades betrieben. Dies hat einen signifikant geringeren Kraftstoffmassenstrom zur Folge. Weiters hat die Untersuchung der verbrauchsoptimalen Konfiguration der Betriebsstrategie der P0-Topologie gezeigt, dass ausschließlich elektrische Energie, die durch die Rekuperation gewonnen wurde, für die Lastpunktabsenkung eingesetzt wird. Die Abbildung 36 bestätigt, dass die mit der in der Abbildung 25 definierten Grenze des SOC für das Laden der Batterie von SOC = 0,4 nie unterschritten wird. Dadurch kommt es während des gesamten Fahrzyklus in keinem Fall zu einer Ladeanforderung.

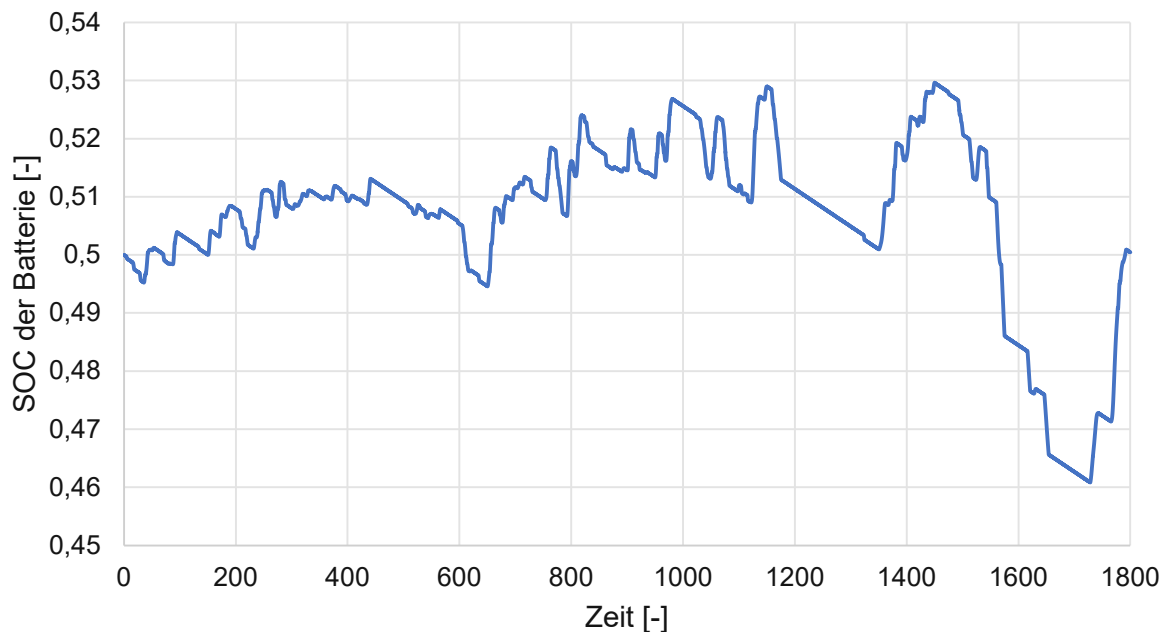


Abbildung 36: Verlauf des SOC der verbrauchsoptimalen Variante der P0-Topologie bei Warmstart im WLTC

Mit der Start-Stopp-Funktion kann die VKM während des WLTC für die Dauer von in etwa 240 Sekunden abgestellt werden und dadurch der Leerlaufverbrauch während der Stillstandsphasen eingespart werden. Die gesamte Dauer der Stillstandsphasen entspricht 13,3 % der gesamten Testdauer des WLTC.

Ausgehend von der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie werden in den nachfolgenden Untersuchungen jeweils für den Kalt- und Warmstart die folgenden Parameter der Betriebsstrategie variiert:

- der Ablastfaktor an der Volllast  $w_{\text{Ablasten}}$
- der Betrag für den maximal zulässigen positiven Drehmomentgradient der VKM  $\frac{dM_{D,VKM,max}}{dt}$

Dadurch erfolgt eine unterschiedliche Gewichtung der Betriebsstrategie jeweils für Absenkung des Kraftstoffverbrauchs sowie für Absenkung der Partikelanzahlemissionen. Damit bei der unterschiedlichen Gewichtung der

Betriebsstrategie für Vergleichszwecke eine Ladungsausgeglichenheit gewährleistet werden kann, müssen sowohl der obere als auch der untere Grenzwert der Ladeanforderungsfunktion, siehe Abbildung 25, angepasst werden. Für die Auffindung der optimalen Grenzwerte ist ebenfalls das oben genannte Optimierungsverfahren zum Einsatz gekommen.

### **Kaltstart**

Bei den Kaltstartuntersuchen hat der initiale Wert der Kühlmitteltemperatur der VKM einen Betrag von  $T_{KM,0} = 25 \text{ °C}$ . Die Tabelle 6 gibt einen Überblick über die untersuchten Varianten der Gewichtung der Betriebsstrategien der Kaltstartuntersuchungen.

Tabelle 6: Varianten der Gewichtung der Betriebsstrategien der P0-Topologie der Kaltstartuntersuchungen

<b>Variante</b>	<b>W<sub>Ablasten</sub></b> [-]	<b><math>\frac{dM_{D,VKM,max}}{dt}</math></b> [Nm/s]
V1_1	0.865	-
V1_2	0,75	-
V1_3	0,7	-
V2_1	0.865	60
V2_2	0,75	60
V2_3	0,7	60
V3_1	0.865	20
V3_2	0,75	20
V3_3	0,7	20

Für alle oben angeführten Varianten der Betriebsstrategie sind die Standardeinstellung der restlichen, implementierten Hybridfunktionen, siehe Kapitel 3.2.3, zur besseren Vergleichbarkeit gleich beibehalten worden. Bei der Benennung der jeweiligen Variante gibt die erste Ziffer die Stufe der Phlegmatisierung und die zweite Ziffer die Stufe der Lastpunktabenkung an. Demnach ist die Variante V1\_1 die verbrauchsoptimale Einstellung der Betriebsstrategie. Bei dieser Variante erfolgt eine Lastpunktabenkung sowohl im Warmlauf und an der Vollast. Es ist keine Phlegmatisierung bei dieser Variante vorgesehen. Im Vergleich des Ablastfaktors  $W_{Ablasten}$  der verbrauchsoptimalen Variante V1\_1 der Kaltstartuntersuchungen mit dem der eingangs beschriebenen, verbrauchsoptimalen Variante der Warmstartuntersuchungen ist eine Abweichung der beiden Faktoren voneinander erkennbar. Der verbrauchsoptimale Ablastfaktor in der Kaltstartuntersuchung fällt deutlich höher aus, weil ein Teil der rekuperierten Energie für die Hybridfunktion

Ablasten im Warmlauf zum Einsatz kommt. Somit steht für die Lastpunktabsenkung weniger elektrische Energie zur Verfügung, ohne die Batterie zusätzlich durch eine Lastpunktanhebung aufladen zu müssen. Die Variante V3\_3 ist das Pendant der verbrauchsoptimalen Variante hinsichtlich der Gewichtung der Betriebsstrategie. Bei dieser Variante erfolgt die höchste Gewichtung zur Reduktion der Partikelanzahlemissionen. Sofern es möglich ist, beträgt das maximal mögliche Drehmoment der VKM 70 % des aktuellen Volllastmomentes und der positive Drehmomentengradient wird auf einen Wert von 20 Nm/s limitiert.

In der Abbildung 37 sind die Ergebnisse der Parametervariation dargestellt. Die rot umrandeten Bereiche stehen für die jeweilige Stufe der Phlegmatisierung. Ausgehend von links nach rechts wird die Stufe der Phlegmatisierung gesteigert. Demnach entspricht der rot umrandete Bereich ganz links der Stufe V1\_x mit keiner Phlegmatisierung und der rot umrandete Bereich ganz rechts der Stufe V3\_x. Innerhalb der rot umrandeten Bereiche nimmt der Ablastfaktor von links nach rechts ab. Wie in der Abbildung 37 gekennzeichnet, entspricht jeweils der Datenpunkt ganz links in den rot umrandeten Bereichen der Version mit dem höchsten Ablastfaktor  $Vx\_1$  und der Datenpunkt ganz rechts der Version mit der höchsten Stufe Lastpunktabsenkung  $Vx\_3$ .

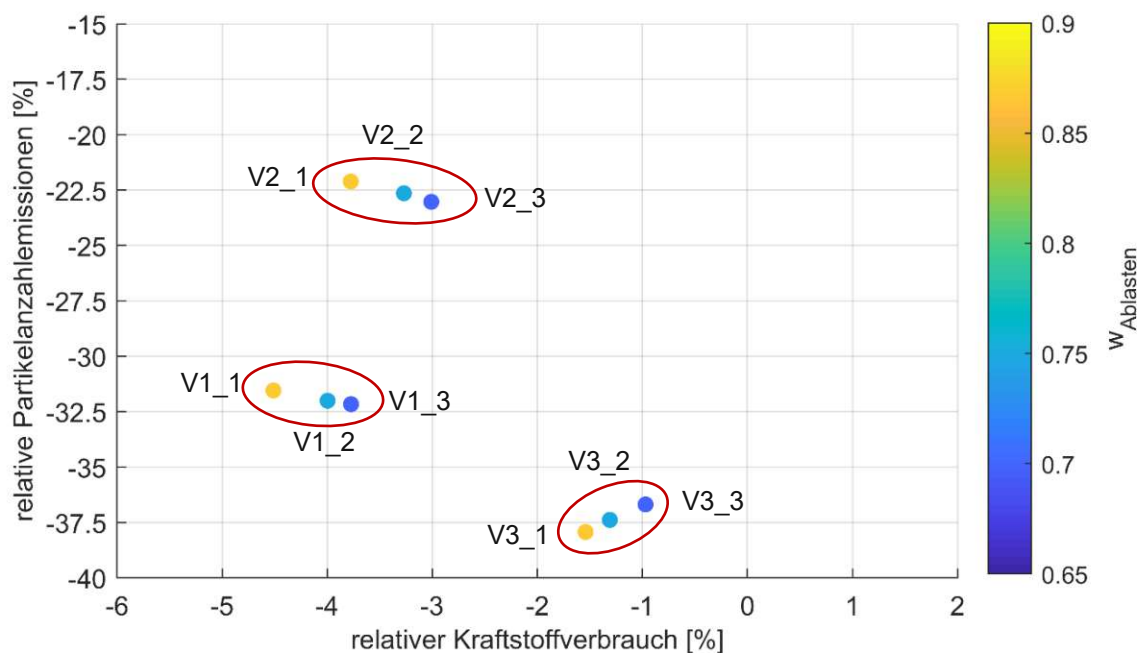


Abbildung 37: Trade Off Verhalten von Kraftstoffverbrauch und PN-Emissionen der P0-Topologie beim WLTC mit Kaltstart

Mit der verbrauchsoptimalen Variante der Betriebsstrategie V1\_1 konnte der Kraftstoffverbrauch um in etwa 4,5 % und die Partikelanzahlemissionen um circa 32 % gegenüber dem Basisfahrzeug abgesenkt werden. Daraus kann geschlossen werden, dass durch den verbrauchsoptimalen Einsatz der Lastpunktabsenkung sowohl an der Volllast als auch im Warmlauf ein großes Potential zur Reduktion der

Partikelanzahlemissionen und des Kraftstoffverbrauches der P0-Topologie gegenüber einem Fahrzeug mit konventionellen Antriebsstrang erschlossen wird. Die Abbildung 38 verdeutlicht, dass es vor allem während der Warmlaufphase durch die Lastpunktabsenkung zu einer erheblichen Reduktion des Ausstoßes an Partikeln im Vergleich zu jener des Basisfahrzeuges kommt. Es ist erkennbar, dass das maximal mögliche Drehmoment der VKM mittels der Funktion Lastpunktabsenkung im Warmlauf auf einen Betrag von 60 Nm beschränkt wird. Jedoch kommt es in Folge der niedrigeren Last der VKM zu einer späteren Erreichung des betriebswarmen Zustandes der VKM.

Weiters ist in der Abbildung 37 ersichtlich, dass die eingesetzte, elektrische Energie von links nach rechts zunimmt. Mit steigender Zunahme des Einsatzes an elektrischer Energie nimmt der Kraftstoffverbrauch stetig zu. Im Falle der Steigerung der eingesetzten, elektrischen Energie durch einen vermehrten Einsatz der Lastpunktabsenkung an der Vollast ( $W_{Ablasten \downarrow}$ ) zeigt sich, dass die Partikelanzahlemissionen bei gleichzeitigem leichten Anstieg des Kraftstoffverbrauches weiter reduziert werden können. Hierbei werden durch vermehrten Einsatz von elektrischer Energie die Lastpunkte der VKM und folglich die Partikelanzahlemissionen deutlich abgesenkt. Jedoch muss für die Bereitstellung der elektrischen Energie neben der Aufladung der Batterie durch die Rekuperation die Batterie zusätzlich mittels der Lastpunktanhebung geladen werden. Aufgrund der Notwendigkeit der zusätzlichen Aufladung der Batterie kommt es zu einem höheren Kraftstoffverbrauch gegenüber der verbrauchsoptimalen Variante V1\_1 der Betriebsstrategie, bei der ausschließlich die rekuperierte Energie zur Lastpunktabsenkung eingesetzt wird.

Ferner zeigen die Ergebnisse der Kaltstartuntersuchungen, dass es wegen des vermehrten Einsatzes an elektrischer Energie aufgrund der zusätzlichen Hybridfunktion Phlegmatisierung zu einem geringeren Kraftstoffverbrauchsvorteil der Varianten V2\_x und der Varianten V3\_x gegenüber dem Basisfahrzeug kommt.

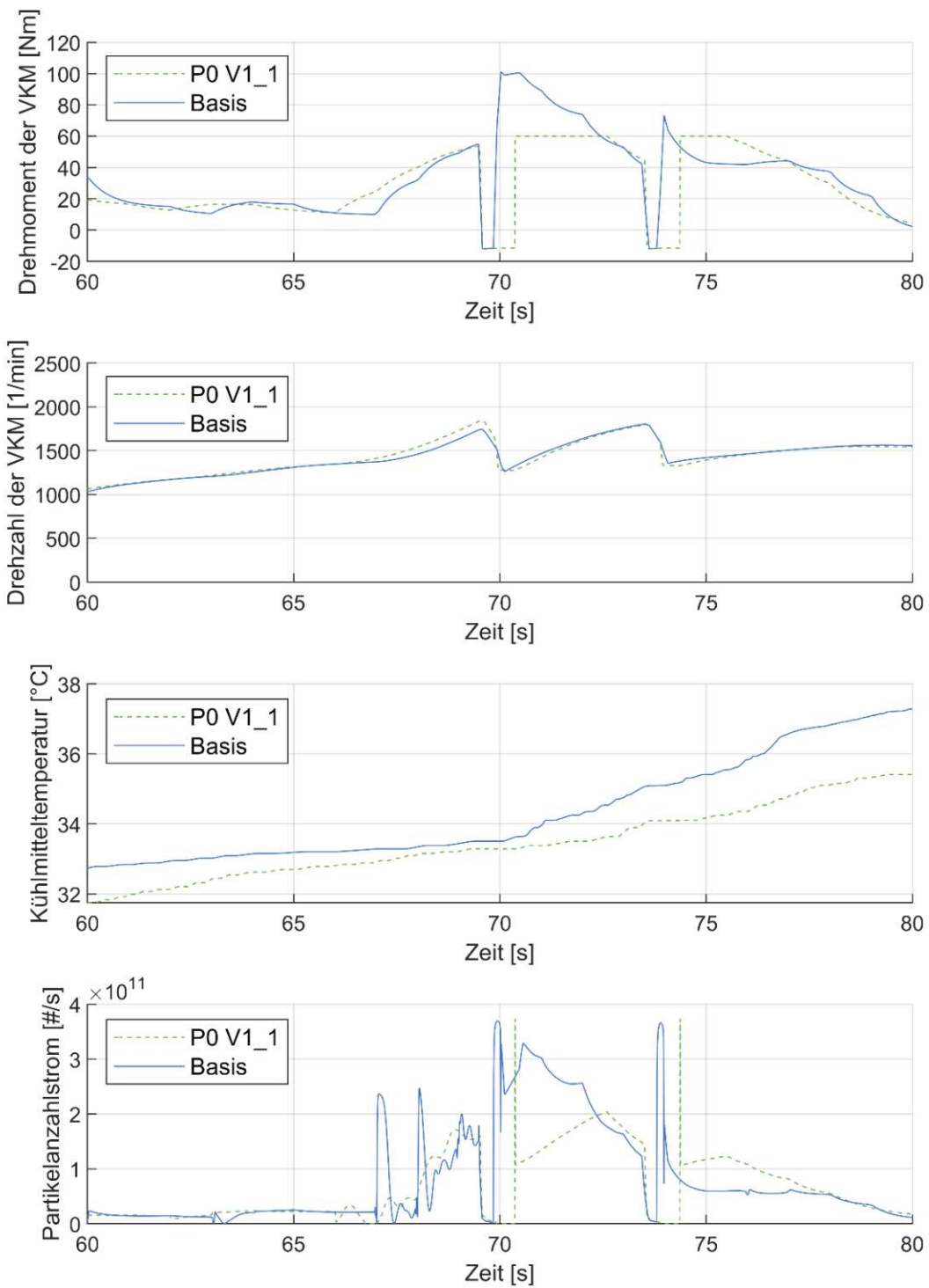


Abbildung 38: Einfluss der Lastpunktabsenkung während der Warmlaufphase auf die Kühlmitteltemperatur und den PN-Strom

Besonders erwähnenswert ist, dass bei den Varianten V2\_x mit einer moderaten Verwendung der Phlegmatisierung sich der Ausstoß an Partikel gegenüber den Varianten V1\_x ohne Phlegmatisierung signifikant erhöht. Der Anstieg der Partikelanzahlemissionen der Varianten V2\_x gegenüber den Varianten V1\_x wird durch die Entscheidung der Betriebsstrategie nach dem Schaltvorgang bedingt. In der Abbildung 39 ist exemplarisch der Vergleich des Schaltvorgangs und in einem kurzen Ausschnitt davor und danach des WLTC der Varianten V1\_1, V2\_1 und V3\_1 dargestellt. Während des Schaltvorganges wird die Phlegmatisierung deaktiviert, aber das Fahrerwunschkmoment zur Erfüllung der Sollgeschwindigkeit bleibt aufrecht. Deswegen kommt es bei allen drei Varianten nach Beendigung des Schaltvorganges zu einem sprunghaften Anstieg des Drehmomentes der VKM und damit zur Spitze im Verlauf des Partikelanzahlstromes. Anschließend wird bei V1\_1 die VKM bei konstant höherem Niveau betrieben. Bei den beiden anderen Varianten wird die VKM mittels der Phlegmatisierung an das gewünschte Drehmoment herangeführt. Dabei kommt es bei V2\_1 mit der geringeren Phlegmatisierungsrate bei der Nachführung des Drehmomentes der VKM wegen des stetigen Anstieges des Drehmomentes zur Beschleunigungsanreicherung des Kraftstoff-Luft-Gemisches. In weiterer Folge führt diese Tatsache zu einem erhöhten Ausstoß an Partikeln gegenüber V1\_1 bis zum Erreichen des gewünschten Drehmomentes. Durch die striktere Limitierung des Gradienten des Drehmomentes der VKM bei V3\_1 kommt es zu keiner Beschleunigungsanreicherung des Kraftstoff-Luft-Gemisches. Dadurch konnten in dem gezeigten Ausschnitt des WLTC die Partikelanzahlemissionen gegenüber der V1\_1 und V2\_1 reduziert werden. Bei V1\_1 kommt es zwischen der Sekunde 17 und 18 zu einem höheren Drehmomentengradienten der VKM und somit zu einem Anstieg des Partikelanzahlstromes. Der höhere Drehmomentengradient der VKM ist dadurch bedingt, dass in diesem Zeitraum die EM an ihre Leistungsgrenze stößt und somit das abgegebene Drehmoment der EM limitiert ist.

Bei der gesamtheitlichen Betrachtung der Ergebnisse der Partikelanzahlemissionen für den WLTC der Varianten V3\_x erschließt sich die Erkenntnis, dass die Partikelanzahlemissionen mit der Kombination aus der Lastpunktabsenkung und der strikten Phlegmatisierung die Partikelanzahlemissionen gegenüber dem Basisfahrzeug am Deutlichsten abgesenkt werden können.

Weiters ist ersichtlich, dass bei den Varianten V3\_x die Partikelanzahlemissionen im Gegensatz zu den Varianten V1\_x und V2\_x mit der Abnahme des Ablastfaktors zunehmen. Bei den Varianten V3\_2 und V3\_3 wird gegenüber V3\_1 der vermehrte Einsatz an elektrischer Energie durch das notwendige, zusätzliche Aufladen der Batterie mittels der Lastpunktanhebung unter anderem während des Warmlaufes abgedeckt, siehe Abbildung 40.

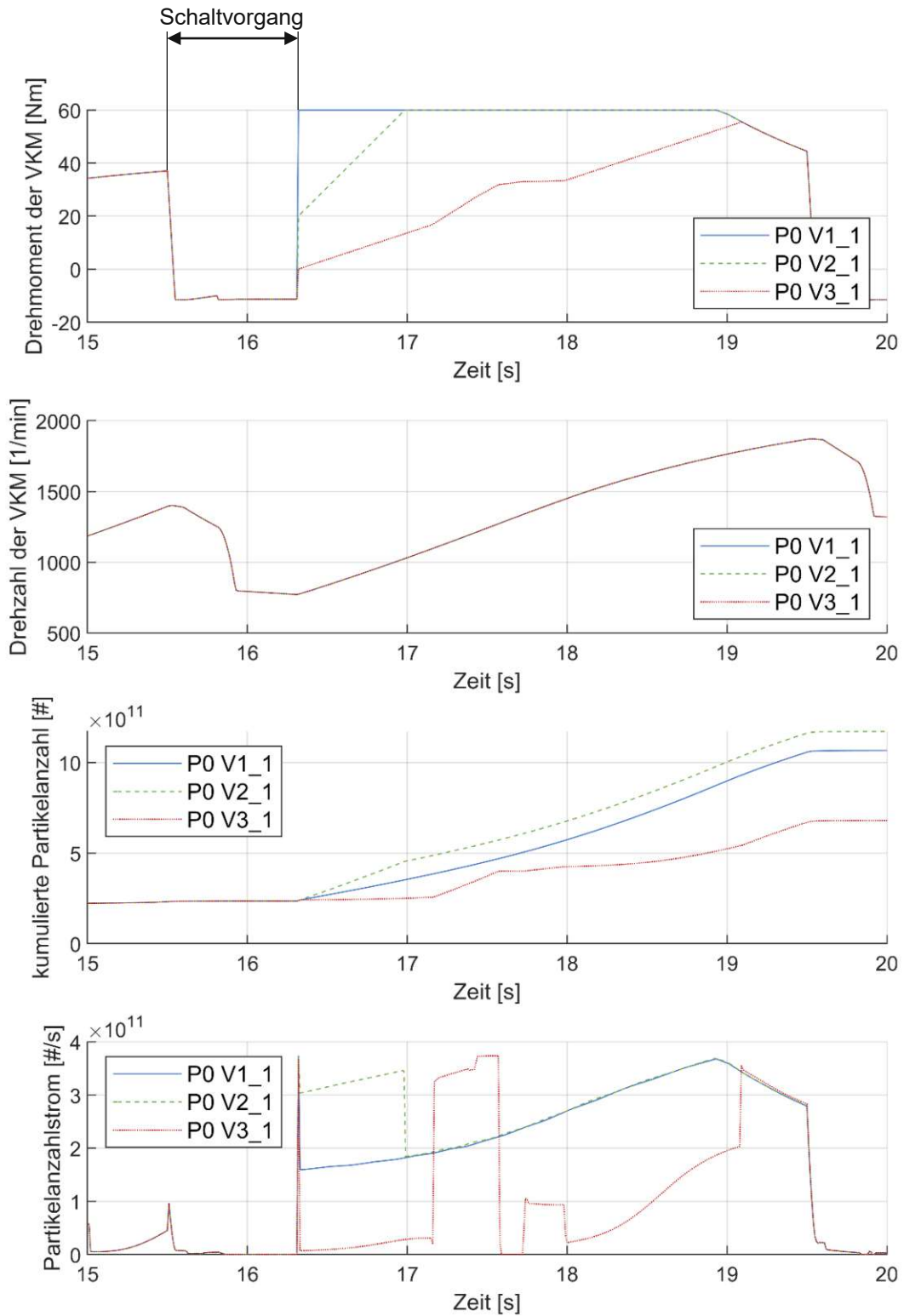
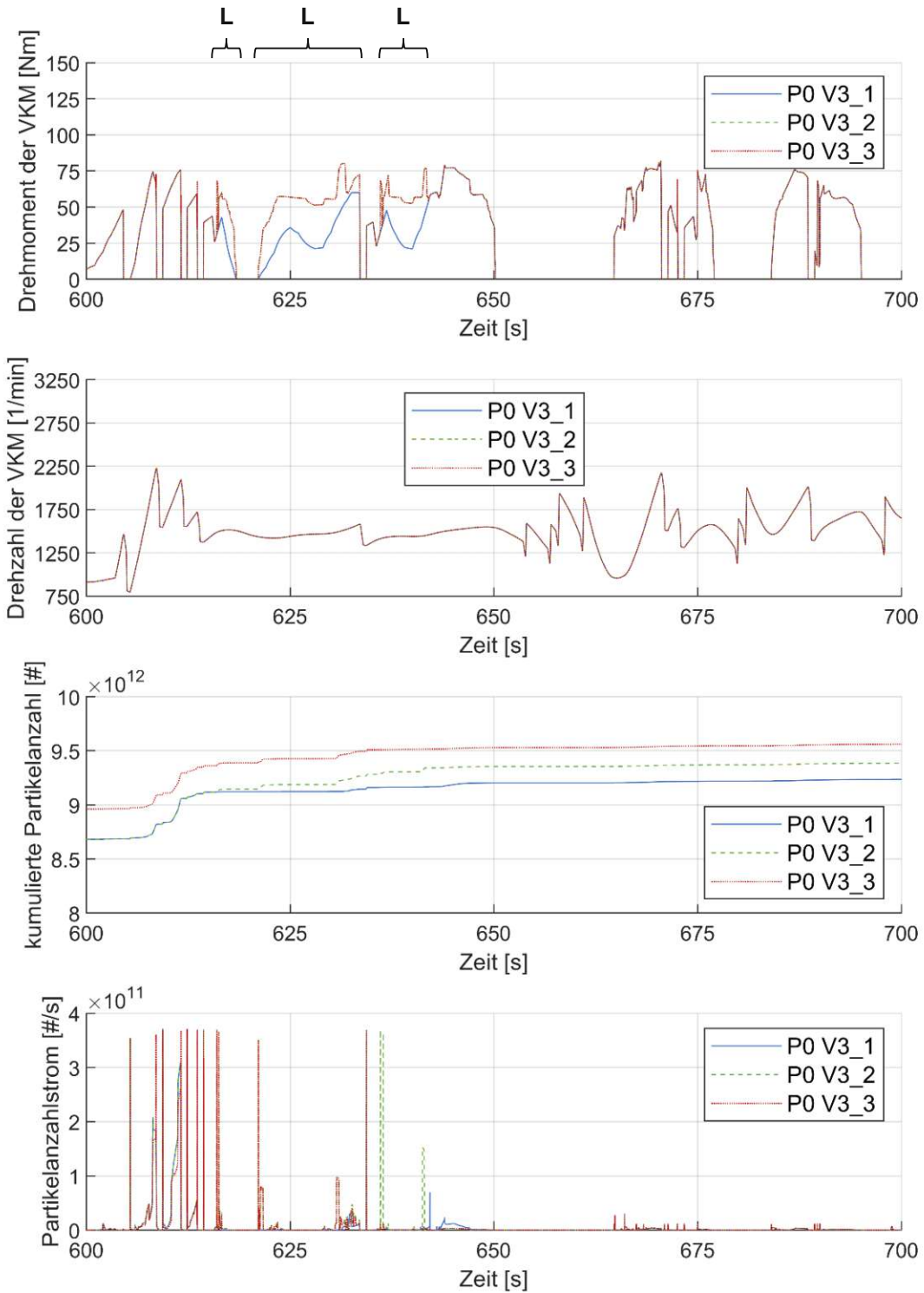


Abbildung 39: Vergleich des Verhaltens der verschiedenen Versionen der Betriebsstrategie der P0-Topologie in Bezug auf die PN-Emissionen während eines Schaltvorganges und kurz danach





L ... Laden

Abbildung 40: Vergleich des Ladeverhaltens der verschiedenen Versionen der Betriebsstrategie der P0-Topologie in einem Ausschnitt des WLTC

## Warmstart

Bei den Warmstartuntersuchungen ist das Kühlmittel der VKM auf eine initiale Temperatur von  $T_{KM,0} = 85 \text{ °C}$  vorkonditioniert. Die Tabelle 7 verschafft einen Überblick über die untersuchten Varianten der Gewichtung der Betriebsstrategien der Warmstartuntersuchungen. Das Benennungsschema ist zur besseren Übersichtlichkeit von den Kaltstartuntersuchungen übernommen worden. Die einzige Veränderung gegenüber der Varianten der Betriebsstrategie erfuhren die Varianten V1\_1, V2\_1 und V3\_1. Wie bereits angeklungen ist, kann aufgrund der bei den Warmstartuntersuchungen nicht benötigten Hybridfunktion Lastpunktabsenkung im Warmlauf mehr elektrische Energie für die Lastpunktabsenkung an der Volllast eingesetzt werden. Diese Tatsache spiegelt sich in einem niedrigeren Ablastfaktor der Varianten V1\_1, V2\_1 und V3\_1 wieder. Sofern nicht explizit angegeben, sind sämtliche Einstellungen in der Betriebsstrategie aller anderen Hybridfunktionen von der Kaltstartuntersuchung beibehalten worden.

Tabelle 7: Varianten der Gewichtung der Betriebsstrategien der P0-Topologie der Warmstartuntersuchungen

Variante	W <sub>Ablasten</sub> [-]	$\frac{dM_{D,VKM,max}}{dt}$ [Nm/s]
V1_1	0,812	-
V1_2	0,75	-
V1_3	0,7	-
V2_1	0,812	60
V2_2	0,75	60
V2_3	0,7	60
V3_1	0,812	20
V3_2	0,75	20
V3_3	0,7	20

In der Abbildung 41 sind die Ergebnisse der Parametervariation dargestellt. Die rot umrandeten Bereiche stehen für die jeweilige Stufe der Phlegmatisierung.

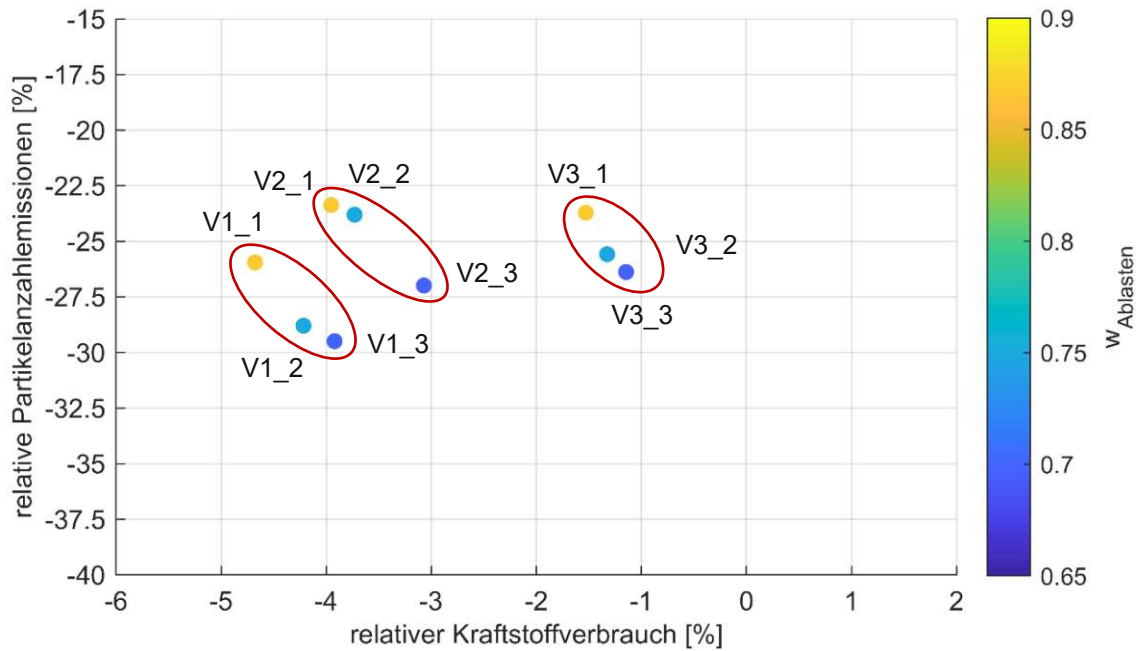


Abbildung 41: Trade Off Verhalten von Kraftstoffverbrauch und PN-Emissionen der P0-Topologie beim WLTC mit Warmstart

Mit der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie V1\_1 wird eine Reduktion des Kraftstoffverbrauches um rund 4,7 % und der Partikelanzahlmissionen um circa 26 % im Vergleich mit dem Basisfahrzeug erzielt. Hierbei sei erwähnt, dass bereits die Partikelanzahlmissionen des Basisfahrzeuges bei Warmstart um den Faktor 5,6 geringer sind als beim Kaltstart. Daraus kann gefolgert werden, dass sich die Partikelanzahlmissionen generell auf einem unkritischen Niveau gegenüber einem Referenzwert befinden. Für saugrohreinspritzende Ottomotoren gibt es aktuell keinen Grenzwert in der für die Typengenehmigung in Europa gültigen Abgasvorschrift Euro 6d-Temp. Daher wird als Referenzwert der für direkteinspritzende Ottomotoren geltende Grenzwert der Partikelanzahlmissionen der Abgasvorschrift Euro 6d-Temp im WLTC herangezogen. Dieser beträgt für die Messungen am Rollenprüfstand mit dem Fahrzyklus WLTC  $PN_{Euro\ 6d-Temp,max} = 6 \cdot 10^{11} \frac{\#}{km}$ . Zusammenfassend kann daraus abgeleitet werden, dass die Partikelanzahlmissionen für die Auslegung der Betriebsstrategie eine untergeordnete Rolle spielen und somit bei Warmstart in jedem Fall eine Favorisierung der verbrauchsoptimalen Gewichtung vorzunehmen ist. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle keine detailliertere Betrachtung der anderen Varianten mit Phlegmatisierung angestrengt. Die Varianten mit einer Phlegmatisierung V2\_x und V3\_x weisen sowohl einen Nachteil hinsichtlich des Kraftstoffverbrauches und der Partikelanzahlmissionen gegenüber den Varianten V1\_x ohne Phlegmatisierung auf, wie in der Abbildung 41 zu sehen ist. Die beiden zuvor genannten Nachteile können durch die notwendige Aufladung der Batterie mittels Lastpunktanhebung und den damit verbundenen höheren Drehmomenten der VKM begründet werden.

## Zusammenfassung

Anhand der Kaltstartuntersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie eine deutliche Reduktion des Kraftstoffverbrauches von etwa 4,5 % bei gleichzeitiger, erheblicher Absenkung der Partikelanzahlemissionen von circa 32 % gegenüber dem Basisfahrzeug realisiert werden kann. Mit einer weiteren Absenkung des Abblastfaktors können die Partikelanzahlemissionen weiter leicht abgesenkt werden. Jedoch geht das mit einer leichten Einbuße des Kraftstoffverbrauchsvorteils gegenüber dem Basisfahrzeug einher. Die erste Stufe der Phlegmatisierung führt zu einer Erhöhung der Partikelanzahlemissionen und einem gleichzeitigen Anstieg des Verbrauches. Dies beruht einerseits auf der Tatsache, dass mehr elektrische Energie gegenüber der verbrauchsoptimalen Variante der Betriebsstrategie aus der Batterie entnommen wird. Dies wiederum führt zu einem Laden der Batterie durch Lastpunktanhebung unter anderem während der Warmlaufphase. Eine höhere Last der VKM während der Warmlaufphase bedingt einen höheren Ausstoß an Partikel. Andererseits bedingt eine moderate Phlegmatisierung nach dem Schaltvorgang durch die Nachführung der VKM an das gewünschte Drehmoment einen höheren Ausstoß an Partikel. Erst durch eine restriktivere Beschränkung des Gradienten des Drehmomentes der VKM können die Partikelanzahlemissionen signifikant gegenüber dem Basisfahrzeug abgesenkt werden. Jedoch hat die stärkere Gewichtung der Betriebsstrategie zur Absenkung der Partikelanzahlemission den Nachteil, dass dies mit einem zusätzlich höheren Bedarf an elektrischer Energie einhergeht. Aufgrund des zusätzlich notwendig gewordenen Ladens der Batterie mittels der Lastpunktanhebung reduziert sich der Verbrauchsvorteil dieser Variante der Betriebsstrategie.

Bei den Warmstartuntersuchungen liegen die Ergebnisse der Partikelanzahlemissionen bereits bei dem Basisfahrzeug deutlich unterhalb des Referenzwertes von  $PN_{Euro\ 6d-Temp,max} = 6 \cdot 10^{11} \frac{\#}{km}$ . Analog zu den Kaltstartuntersuchungen konnte in den Warmstartuntersuchungen gezeigt werden, dass die verbrauchsoptimale Gewichtung der Betriebsstrategie gleichzeitig auch die effektivste Einstellung in Bezug auf eine Reduktion der Partikelanzahlemissionen ist. Mit der verbrauchsoptimalen Variante der Betriebsstrategie konnte eine Reduktion des Kraftstoffverbrauches um circa 4,7 % und der Partikelanzahlemissionen um etwa 26 % erreicht werden.

Aus den zuvor genannten Gründen macht es in Hinblick auf die Reduktion der Partikelanzahlemissionen und des Kraftstoffverbrauches sowohl bei einem Kalt- als auch Warmstart der VKM Sinn, die Gewichtung der Betriebsstrategie der P0-Topologie in Richtung des minimalsten Kraftstoffverbrauches auszuführen. Damit können in beiden Fällen sehr vielversprechende Ergebnisse zur Reduktion der

Partikelanzahlemissionen und des Kraftstoffverbrauches mit einem Fahrzeug des C-Segmentes im WLTC erzielt werden.

## 4.2 P2-Topologie

Zu Beginn der Analyse des Trade Off Verhaltens von Kraftstoffverbrauch und Partikelanzahlemissionen ist ebenfalls eine Suche der verbrauchsoptimalen Einstellung der Parameter der Betriebsstrategie durchgeführt worden. Wie auch schon für die P0-Topologie kam hier ein Optimierungsverfahren mit einem genetischen Algorithmus zum Einsatz. Dafür ist der in *GT-SUITE v2018* integrierte *Design Optimizer* verwendet worden. Mit der Kenntnis, dass die beiden s-Faktoren  $s_{Laden}$  und  $s_{Entladen}$  sowie der Grenzwert der Fahrzeuggeschwindigkeit, bis zu der der Antrieb nur mit der EM hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs von Vorteil ist,  $v_{E-Anfahrt,max}$  den wesentlichsten Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben, sind diese als Optimierungsvariablen ausgewählt worden. Das Ziel der Optimierung ist das Ergebnis des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauches für den Fahrzyklus. Als Nebenbedingung ist die Ladungsausgeglichenheit definiert worden. Daher liegen nur dann optimale Werte der Optimierungsvariablen vor, wenn der initiale Wert des SOC gleich dem Wert des SOC am Ende des Fahrzyklus  $SOC_{Ende}$  ist. Nach [49] kann mit dem NSGAIII Algorithmus das vorliegende, komplexe Optimierungsproblem mit drei Optimierungsvariablen hinreichend genau gelöst werden. Für die komplexere Optimierungsrechnung ist eine Populationsgröße von  $n = 48$  und eine Anzahl an Generationen von 55 gewählt worden. Das Ergebnis der Optimierungsrechnung für den Fall des Warmstarts ist exemplarisch in der [Abbildung 42](#) dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich die Ergebnisse der Optimierungsrechnung ab in etwa der 300. Iteration in der Nähe des Optimums unter Einhaltung der Nebenbedingung befinden. Im weiteren Verlauf zeigt sich, dass die Optimierungsrechnung gegen ein Minimum des Kraftstoffverbrauchs konvergiert. Daher kann davon ausgegangen werden, dass ein globales Minimum des Kraftstoffverbrauches mit den so erhaltenen Werten für  $s_{Laden}$ ,  $s_{Entladen}$  und  $v_{E-Anfahrt,max}$  gefunden wurde. Das globale Minimum wird bereits nach 1562 Iterationen erreicht. Die Abweichung des Endwertes von dem des Initialwertes des SOC beträgt 0,07 %. Daher wird von einer Ladungsausgeglichenheit und somit der Erfüllung der Nebenbedingung ausgegangen. Für den verbrauchsoptimalen Fall beträgt der minimale, durchschnittliche Kraftstoffverbrauch 5,08 L/100km. Für die Optimierungsvariablen konnten folgende Werte  $s_{Laden} = 2,79$ ,  $s_{Entladen} = 2,61$  und  $v_{E-Anfahrt,max} = 15,8$  km/h ermittelt werden. Die erzielte Kraftstoffeinsparung der P2-Topologie entspricht einer Reduktion des Kraftstoffverbrauches von etwa 9,5 % gegenüber dem Basisfahrzeug. In [51] ist mit einer ähnlichen Konfiguration eines 48 V MHEV mit P2-Topologie eine Verbrauchsreduktion von circa 11 % gegenüber einem Fahrzeug mit konventionellen Antrieb gezeigt worden. Der Unterschied zwischen der in dieser Arbeit ermittelten

Kraftstoffverbrauchsreduktion der P2-Topologie gegenüber dem in [51] kann dadurch begründet werden, dass während dem rein elektrischen Antrieb bei Geschwindigkeiten über  $v_{E-Anfahrt,max}$  die VKM nicht abgestellt wird, sondern im Leerlauf betrieben wird. Mithilfe der Simulation konnte der so verursachte Leerlaufverbrauch im gesamten WLTC zu 0,025 L bestimmt werden. Dies entspricht im WLTC einer absoluten Erhöhung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauches um 0,11 L/100km und einer relativen Erhöhung um rund 2 % bezogen auf den Kraftstoffverbrauch des Basisfahrzeugs.

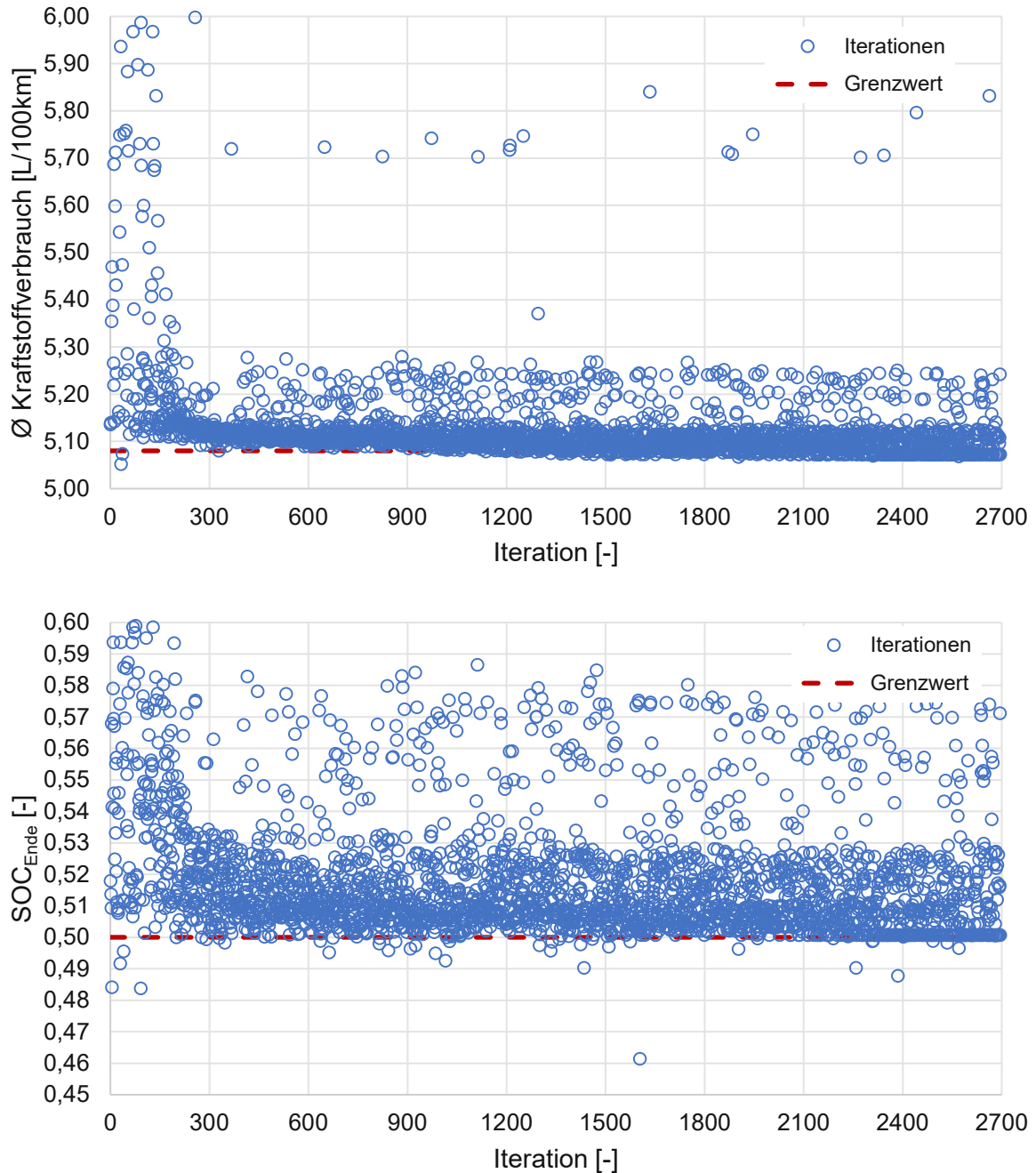


Abbildung 42: Ergebnisse der Optimierung der P2-Topologie für die Warmstartuntersuchung

Die Untersuchung mit der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie der P2-Topologie hat gezeigt, dass sich die Verbrauchsvorteile der P2-Topologie im



Wesentlichen durch die Abschaltung der VKM im Stillstand des Fahrzeuges, die Rekuperation, die Lastpunktverschiebung, der E-Anfahrt und der E-Fahrt ergeben. Besonders bemerkenswert ist die Kraftstoffverbrauchseinsparung durch die reine E-Fahrt. Während des WLTC entscheidet sich die A-ECMS im Speziellen für die reine E-Fahrt bei Vorliegen von niedrigen Fahrerwunschkomenten. In der Abbildung 43 ist exemplarisch ein Wechsel vom rein verbrennungsmotorischen Betrieb hin zu der reinen E-Fahrt dargestellt.

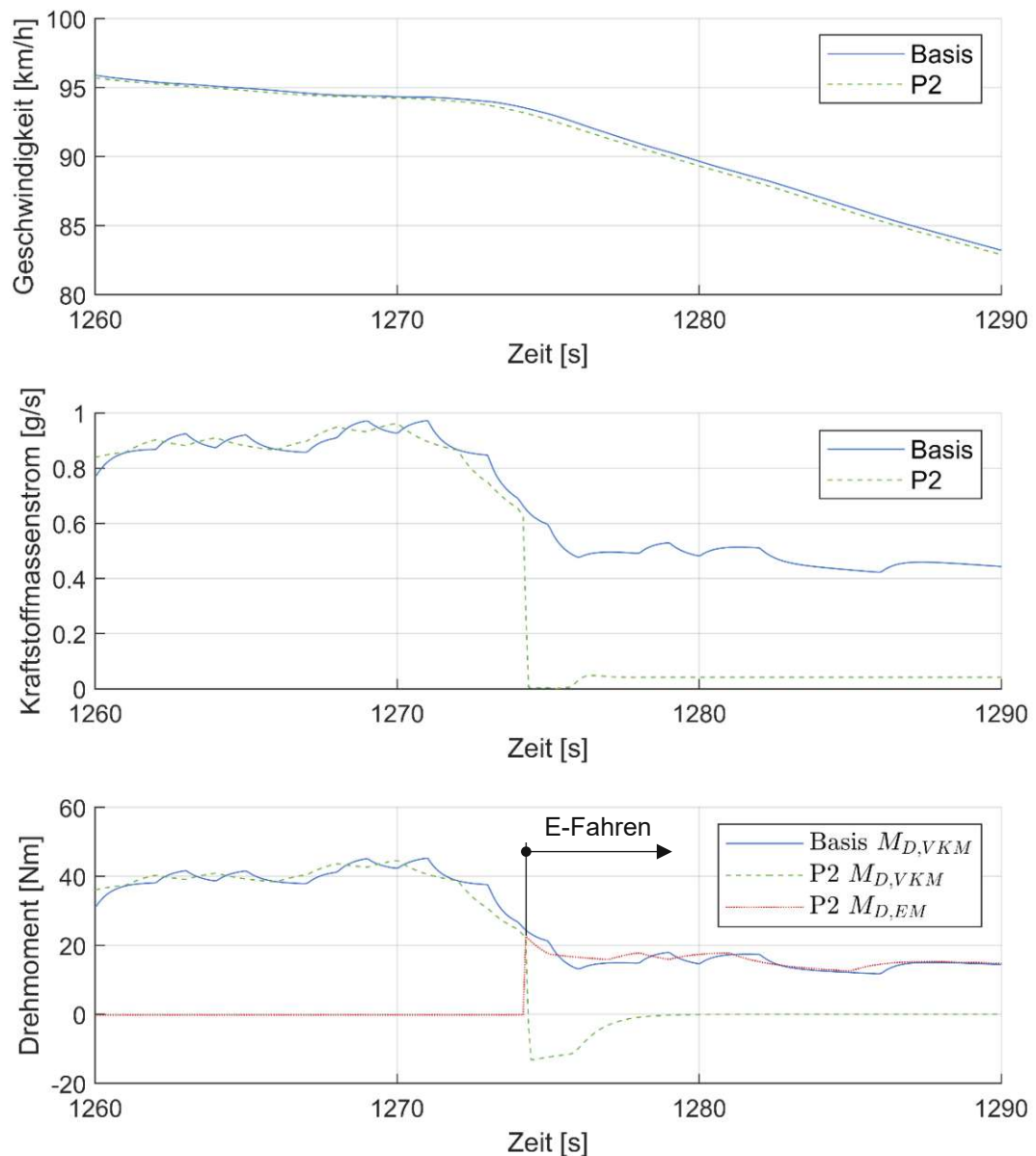


Abbildung 43: Auszug aus dem WLTC zum Vergleich der P2-Topologie mit dem Basisfahrzeug

Es ist ersichtlich, dass aufgrund der zu überwindenden Fahrwiderstände trotz einer Verzögerung ein Antriebsmoment erforderlich ist. Dieses Fahrerwunschkoment befindet sich im unteren Bereich der Teillast der VKM und führt zu einem



wirkungsgradungünstigen Betrieb ebendieser im Basisfahrzeug. Daher trifft die A-ECMS ab der Sekunde 1274 die Entscheidung über die Drehmomentenaufteilung zu Gunsten der reinen E-Fahrt. Ab diesem Zeitpunkt übernimmt die EM die Aufgabe des Antriebes und die VKM wird vom restlichen Antriebsstrang abgekoppelt und im Leerlauf betrieben.

Ausgehend von der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie werden in den nachfolgenden Untersuchungen jeweils für den Kalt- und Warmstart die folgenden Parameter der Betriebsstrategie variiert, sowie ein Teil der Betriebsstrategie aktiviert bzw. deaktiviert:

- der Ablastfaktor an der Volllast  $W_{\text{Ablasten}}$
- Aktivierung (TC = 1) bzw. Deaktivierung (TC = 0) der Transient Control

Diese Variation ermöglicht eine unterschiedliche Gewichtung der Betriebsstrategie jeweils für Absenkung des Kraftstoffverbrauchs sowie der Partikelanzahlemissionen. Damit bei der unterschiedlichen Gewichtung der Betriebsstrategie für Vergleichszwecke eine Ladungsausgeglichenheit gewährleistet werden kann, müssen die beiden s-Faktoren für die jeweilige Gewichtung angepasst werden. Für die Suche nach den jeweils optimalen Werten der beiden s-Faktoren ist ebenfalls das oben genannte Optimierungsverfahren zum Einsatz gekommen.

### **Kaltstart**

Bei den Kaltstartuntersuchen hat der initiale Wert der Kühlmitteltemperatur der VKM einen Betrag von  $T_{\text{KM},0} = 25 \text{ °C}$ . Die Tabelle 8 gibt einen Überblick über die untersuchten Varianten der Gewichtung der Betriebsstrategien der Kaltstartuntersuchungen.

Für den Vergleichszweck sind die Standardeinstellungen der restlichen, implementierten Hybridfunktion, siehe Kapitel 3.2.4, aller in der Tabelle 8 angeführten Varianten der Betriebsstrategie beibehalten worden. Bei der Benennung der jeweiligen Variante gibt die erste Ziffer an, ob die TC de- oder aktiviert ist, und die zweite Ziffer die Stufe der Lastpunktabsenkung an. Demnach ist die Variante V1\_1 die verbrauchsoptimale Einstellung der Betriebsstrategie. Bei dieser Variante erfolgt die Entscheidung der Drehmomentenaufteilung ausschließlich in der A-ECMS. Bei dieser Variante ist keine restriktivere Lastpunktabsenkung ( $W_{\text{Ablasten}} = 1$ ) vorgesehen und sowie die TC ist deaktiviert. Die Variante V2\_4 ist das Pendant der verbrauchsoptimalen Variante hinsichtlich der Gewichtung der Betriebsstrategie. Bei dieser Variante erfolgt die höchste Gewichtung zur Reduktion der Partikelanzahlemissionen. Sofern es möglich ist, beträgt das maximal mögliche Drehmoment der VKM 70 % des aktuellen Volllastmomentes und der positive Drehmomentengradient wird mit der TC auf einen Wert von 20 Nm/s beschränkt.

Tabelle 8: Varianten der Gewichtung der Betriebsstrategien der P2-Topologie der Kaltstartuntersuchungen

Variante	W <sub>Ablasten</sub> [-]	TC [-]
V1_1	1	0
V1_2	0,9	0
V1_3	0,8	0
V1_4	0,7	0
V2_1	1	1
V2_2	0,9	1
V2_3	0,8	1
V2_4	0,7	1

Die Abbildung 44 zeigt die Ergebnisse der Kaltstartuntersuchungen. Die rot umrandeten Bereiche stehen für den Zustand der TC. Der rot umrandete Bereich links entspricht den Versionen V1\_x mit deaktivierter TC und der rot umrandete Bereich rechts der Versionen V2\_x mit aktiver TC. Innerhalb der rot umrandeten Bereiche nimmt der Ablastfaktor von links nach rechts ab. Wie in der Abbildung 44 gekennzeichnet, entspricht jeweils der Datenpunkt ganz links in den rot umrandeten Bereichen der Version mit dem höchsten Ablastfaktor Vx\_1 und der Datenpunkt ganz rechts der Version mit der höchsten Stufe Lastpunktabsenkung Vx\_4.

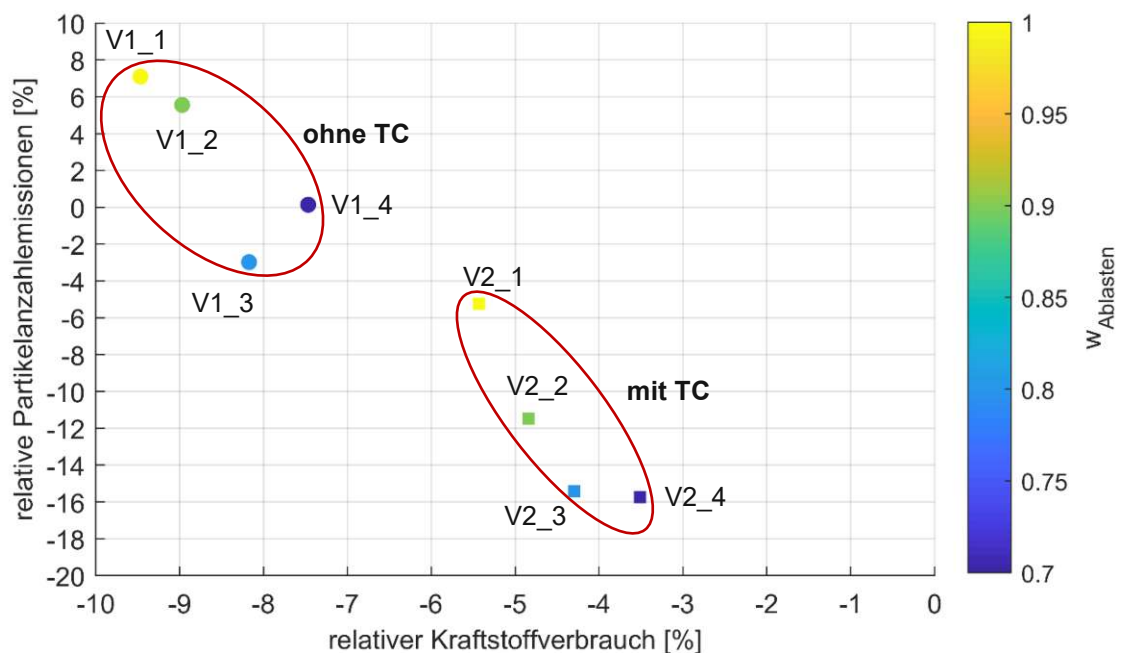


Abbildung 44: Trade Off Verhalten von Kraftstoffverbrauch und PN-Emissionen der P2-Topologie beim WLTC mit Kaltstart

Mit der verbrauchsoptimalen Variante der Betriebsstrategie V1\_1 konnte der Kraftstoffverbrauch um in etwa 9,5 % gegenüber dem Basisfahrzeug abgesenkt werden. Jedoch führte dies zu einer Erhöhung der Partikelanzahlemissionen um rund 7 % im Vergleich zum Basisfahrzeug. Daraus kann geschlossen werden, dass bei einem Kaltstart der VKM die verbrauchsoptimale Gewichtung der Betriebsstrategie ausschließlich ein großes Potential zur Reduktion des Kraftstoffverbrauches der P2-Topologie gegenüber einem Fahrzeug mit konventionellen Antriebsstrang aufweist. Für die Absenkung der Partikelanzahlemissionen müssen zusätzliche Anstrengungen, wie der vermehrte Einsatz an elektrischer Energie, getätigt werden. Dabei verdeutlicht die Abbildung 44, dass die Partikelanzahlemissionen in einem ersten Schritt mit der Absenkung des Ablastfaktors an der Volllast und in einem zweiten Schritt noch deutlicher durch die Nutzung der Transient Control zur Begrenzung des Gradienten des Drehmomentes der VKM reduziert werden können. Dieser Vorteil hinsichtlich der Partikelanzahlemissionen und der damit einhergehende höhere Bedarf an elektrischer Energie für die Hybridfunktionen zur Absenkung der Partikelanzahlemissionen muss durch ein zusätzliches Aufladen der Batterie bewerkstelligt werden. In weiterer Konsequenz führt dies zu einem höheren Kraftstoffverbrauch im Gegensatz zu der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie. Die Version V2\_3 ist ein Beispiel für die starke Gewichtung in Richtung Reduktion der Partikelanzahlemissionen, siehe Tabelle 8. Bei dieser Version konnten bei der Kaltstartuntersuchung die Partikelanzahlemissionen um etwa 16 % abgesenkt werden. Jedoch im Vergleich mit der verbrauchsoptimalen Gewichtung ist der Kraftstoffverbrauchsvorteil um mehr als die Hälfte zu einem Betrag von rund 4,3 % gegenüber dem Basisfahrzeug abgesunken.

Die höheren Partikelanzahlemissionen der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie der P2-Topologie V1\_1 haben folgende Gründe:

- späteres Erreichen des betriebswarmen Zustandes der VKM
- höhere Drehmomente der VKM im Hybrid Modus
- hohe Drehmomentgradienten bei Wechsel vom E-Fahrt Modus in den Hybrid Modus

Die Abbildung 45 verdeutlicht, dass aufgrund des exklusiven Anfahrens mit der EM die VKM in der Untersuchung mit der P2-Topologie im Gegensatz zum Basisfahrzeug später den betriebswarmen Zustand erreicht. Besonders deutlich zeigt sich diese Tatsache zwischen der Sekunde 600 bis 700 des WLTC. Durch die höhere Kühlmitteltemperatur werden bei der Basis deutlich weniger Partikel emittiert.

In der Abbildung 46 ist ein Ausschnitt des WLTC während der Warmlaufphase der VKM im Vergleich zur verbrauchsoptimalen Variante P2 V1\_1 mit dem Basisfahrzeug dargestellt. Es ist ersichtlich, dass im Hybrid Modus (Modus = 2) deutlich höhere Drehmomente an die VKM angelegt werden. Der Grund dafür ist die Aufladung der

Batterie nach der E-Anfahrt (Modus = 1) mittels der Lastpunktanhebung. Die höheren Drehmomente der VKM bedingen im Warmlauf einen erhöhten Ausstoß an Partikel.

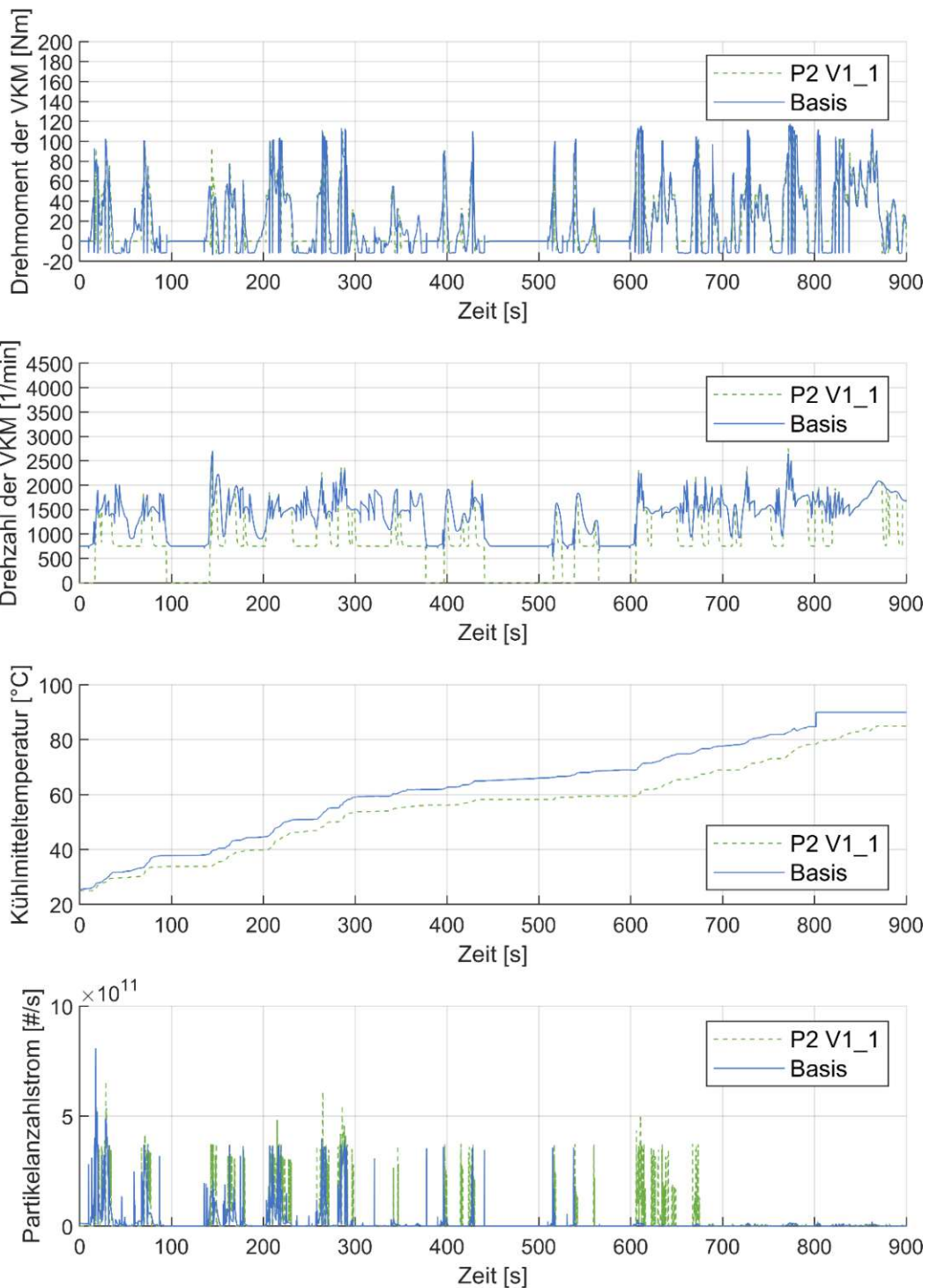
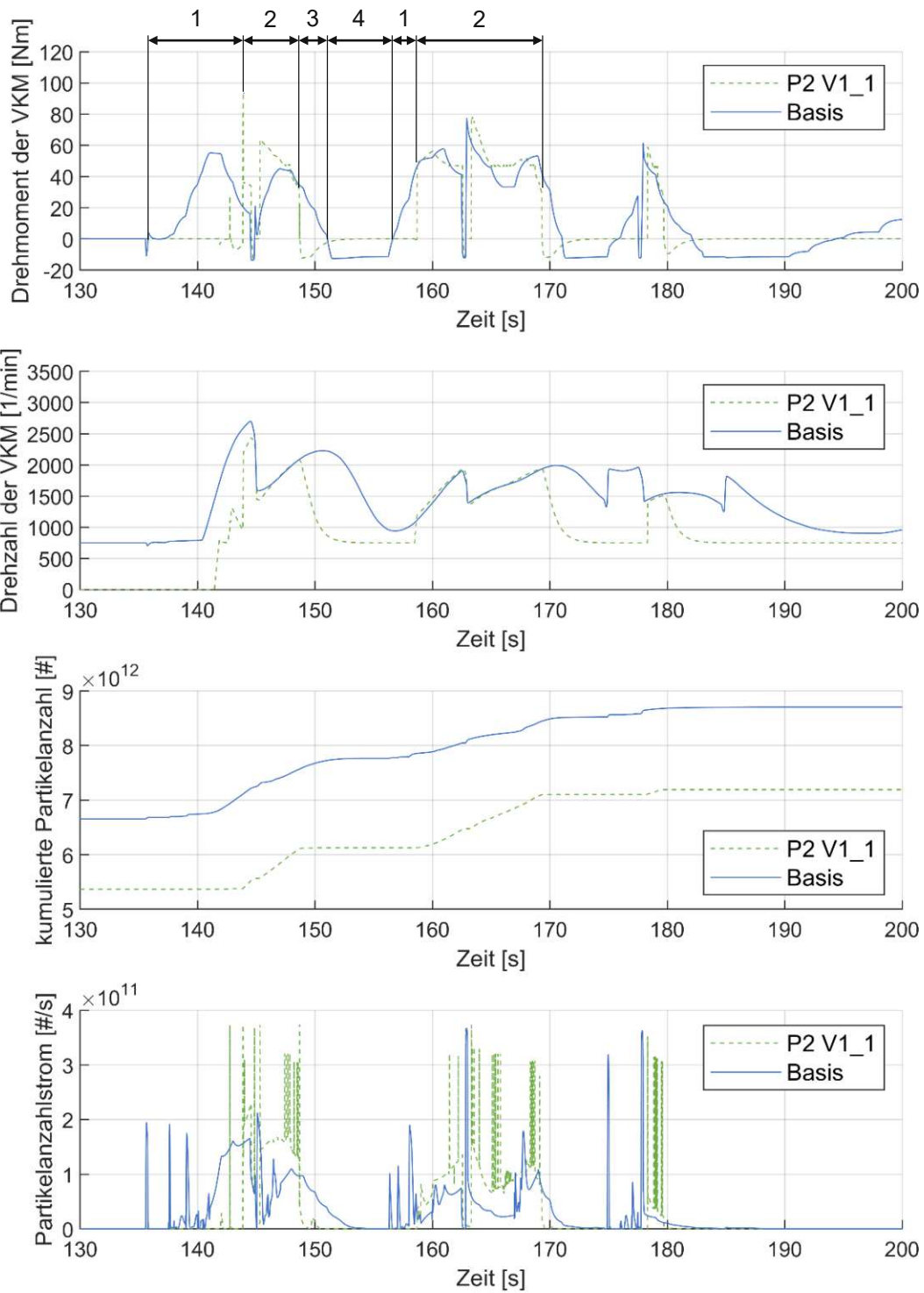


Abbildung 45: Vergleich der Warmlaufphase der P2-Topologie mit dem Basisfahrzeug der ersten 900 Sekunden des WLTC

Weiters ist erkennbar, dass bei einem Wechsel vom E-Anfahrt Modus in den Hybrid Modus eine sprunghafte Änderung des Drehmomentes der VKM von der Betriebsstrategie gefordert wird. Der hohe, positive Gradient des Drehmomentes der VKM führt zu einer starken Anreicherung des Kraftstoff-Luft Gemischs und somit in weiterer Folge zu einer hohen Partikelemissionsanzahl. Im direkten Vergleich der beiden Varianten V1\_3 und V1\_4 weist V1\_4 höhere Partikelanzahlemissionen im Gegensatz zu V1\_3 auf, siehe Abbildung 44.

Der Unterschied der Partikelanzahlemissionen zwischen der Variante V1\_4 und V1\_3 ergibt sich dadurch, dass bei V1\_3 die elektrische Energie für E-Fahren sowie für eine moderatere Lastpunktabenkung und bei V1\_4 vermehrt zur Lastpunktabenkung eingesetzt wird. Die Abbildung 47 verdeutlicht, dass ein ausgewogener Einsatz der elektrischen Energie für die E-Fahrt und die moderate Lastpunktabenkung hinsichtlich einer Absenkung der Partikelanzahlemissionen vorteilhafter im Gegensatz zum Fokus auf eine restriktive Lastpunktabenkung ist. In der Summe ergibt sich für den gesamten WLTC durch die Balance zwischen der E-Fahrt und der Lastpunktabenkung bei der Variante V1\_3 ein besseres Ergebnis hinsichtlich der Absenkung der Partikelanzahlemissionen.

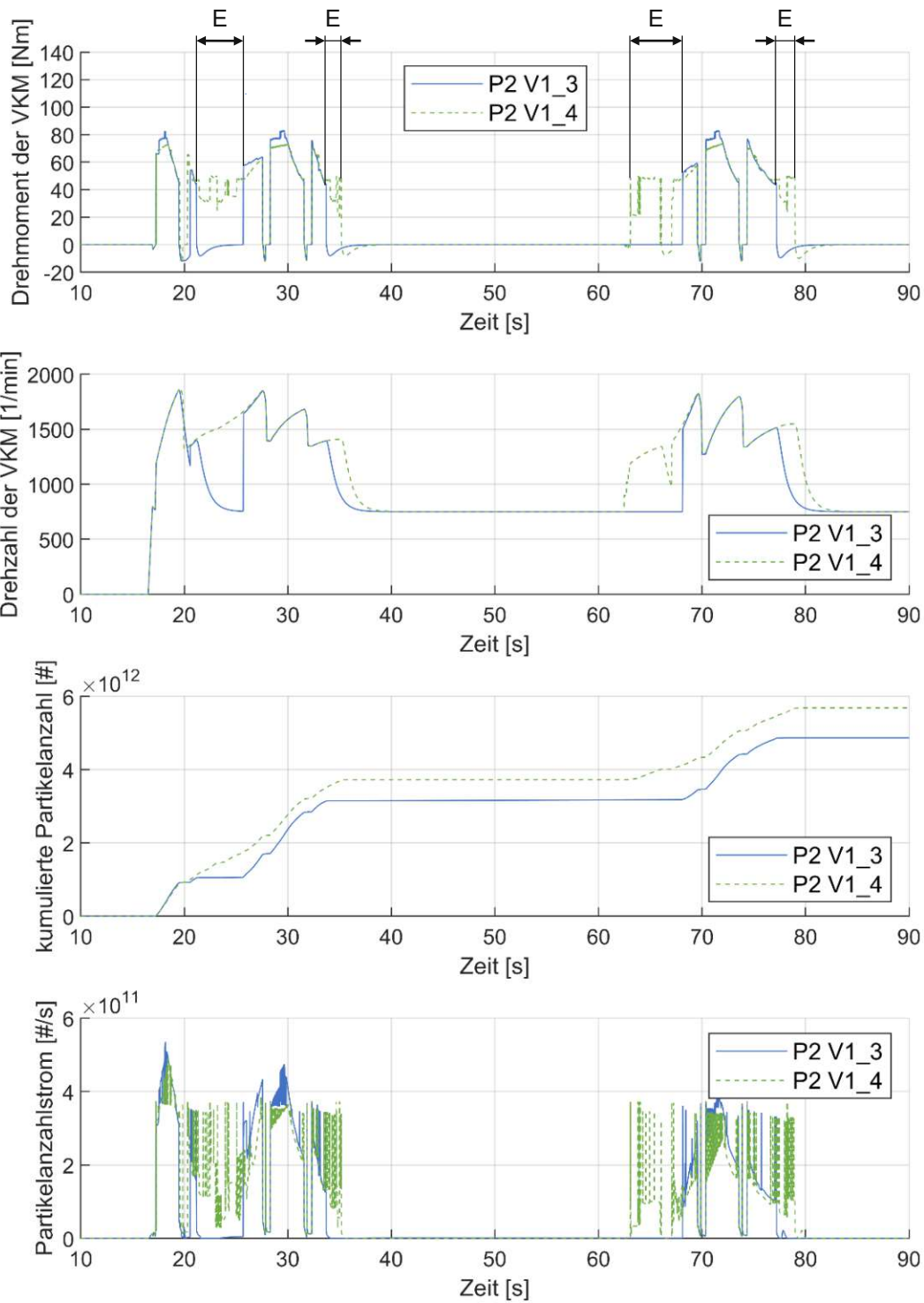


1 ... E-Anfahrt Modus      3 ... E-Fahrt Modus  
 2 ... Hybrid Modus      4 ... Rekuperation Modus

Abbildung 46: Vergleich der verschiedenen Modi der P2-Topologie mit dem Basisfahrzeug während der Warmlaufphase im WLTC

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.





E ... E-Fahrt

Abbildung 47: Vergleich der verschiedenen Varianten V1\_3 und V1\_4 der P2-Topologie während des Warmlaufes im WLTC



## Warmstart

Bei den Warmstartuntersuchungen ist das Kühlmittel der VKM auf eine initiale Temperatur von  $T_{KM,0} = 85 \text{ °C}$  vorkonditioniert. Die Tabelle 9 gibt einen Überblick über die untersuchten Varianten der Gewichtung der Betriebsstrategien der Warmstartuntersuchungen. Das Benennungsschema und sämtliche Einstellungen in der Betriebsstrategie sind von der Kaltstartuntersuchung beibehalten worden.

Tabelle 9: Varianten der Gewichtung der Betriebsstrategien der P2-Topologie der Warmstartuntersuchungen

Variante	W <sub>Ablasten</sub> [-]	TC [-]
V1_1	1	0
V1_2	0,9	0
V1_3	0,8	0
V1_4	0,7	0
V2_1	1	1
V2_2	0,9	1
V2_3	0,8	1
V2_4	0,7	1

In der Abbildung 48 sind die Ergebnisse der Warmstartuntersuchungen dargestellt. Der linke, rot umrandete Bereich beinhaltet die Ergebnisse der Varianten V1\_x mit deaktivierter Transient Control. Mit der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie V1\_1 wird eine Reduktion des Kraftstoffverbrauches um in etwa 9,5 % und der Partikelanzahlemissionen um circa 9 % im Vergleich zum Basisfahrzeug erzielt. Die Schlussfolgerung bei den Warmstartuntersuchungen der P0 Topologie, dass die Partikelanzahlemissionen, die bei einem Warmstart der VKM im WLTC, für die Auslegung der Betriebsstrategie eine untergeordnete Rolle spielen, behält auch bei den Warmstartuntersuchungen mit den Varianten der P2-Topologie ihre Gültigkeit. Daher ist hier ebenfalls bei Warmstart in jedem Fall eine Favorisierung der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie vorzunehmen ist. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle keine detailliertere Betrachtung der anderen Varianten mit Phlegmatisierung angestrengt. Die Varianten mit einer Phlegmatisierung V2\_x weisen sowohl einen Nachteil hinsichtlich des Kraftstoffverbrauches und der Partikelanzahlemissionen gegenüber den Varianten V1\_x ohne Phlegmatisierung auf, wie in der Abbildung 48 zu sehen ist. Die Nachteile hinsichtlich des höheren Kraftstoffverbrauches und der höheren Partikelanzahlemissionen werden durch die notwendige Aufladung der Batterie mittels Lastpunktanhebung und den damit verbundenen höheren Drehmomenten der VKM bedingt.

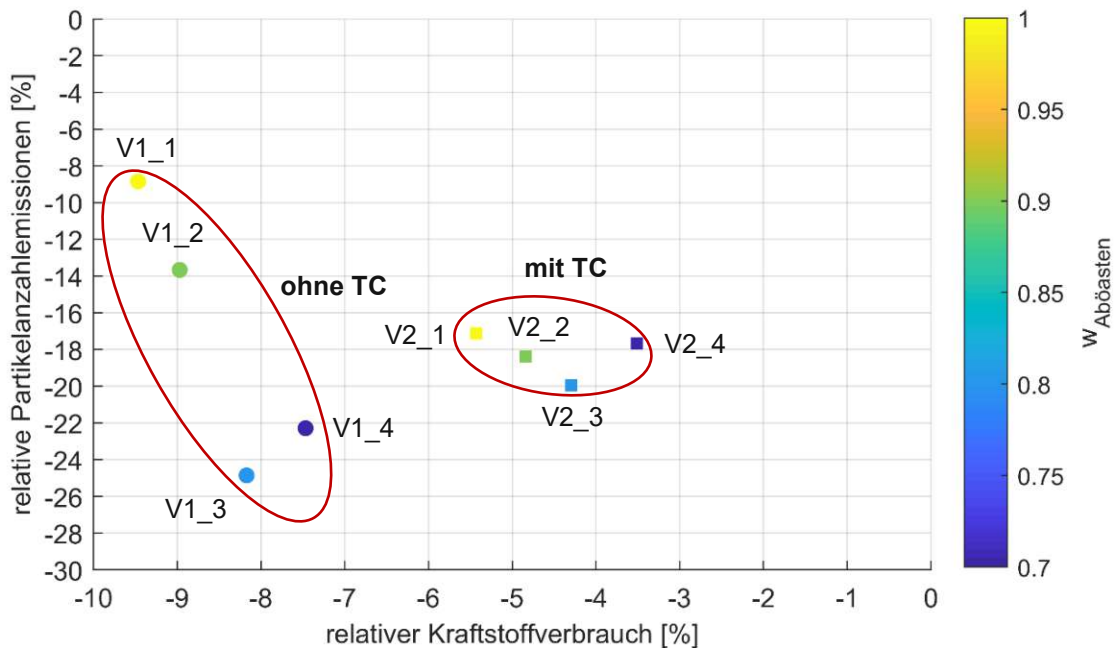


Abbildung 48: Trade Off Verhalten von Kraftstoffverbrauch und PN-Emissionen der P2-Topologie bei Warmstart im WLTC

### Zusammenfassung

Die Kaltstartuntersuchungen haben gezeigt, dass mit der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie eine wesentliche Reduktion des Kraftstoffverbrauches von etwa 9,5 % gegenüber dem Basisfahrzeug realisiert werden kann. Jedoch geht dies mit einem Anstieg des Ausstoßes an Partikeln von circa 7 % im Vergleich mit dem Basisfahrzeug einher. Die Gründe für höhere Partikelanzahlmissionen sind ein späteres Erreichen des betriebswarmen Zustandes der VKM, höhere Drehmomente der VKM im Hybrid Modus und hohe Drehmomentgradienten bei Wechsel vom E-Fahrt Modus in den Hybrid Modus. Mit einer Absenkung des Abblastfaktors können die Partikelanzahlmissionen weiter leicht abgesenkt werden. Dies hat eine geringfügige Einbuße des Kraftstoffverbrauchsvorteils gegenüber dem Basisfahrzeug zur Folge. Dabei haben die Kaltstartuntersuchungen gezeigt, dass ein moderat gewählter Abblastfaktor vorteilhafter hinsichtlich der Reduktion der Partikelanzahlmissionen gegenüber einem sehr niedrig gewählten Abblastfaktor ist. Der Vorteil des moderaten Abblastfaktors liegt in der ausgewogenen Balance des Einsatzes der elektrischen Energie für die E-Fahrt und für die Lastpunktabsenkung. Bei einem sehr niedrig gewählten Abblastfaktor kommt es zu einem vermehrten Einsatz der elektrischen Energie für die Lastpunktabsenkung. Die Aktivierung der Transient Control und somit der Phlegmatisierung führt zu einer wesentlichen Reduktion der Partikelanzahlmissionen und einem gleichzeitigen Anstieg des Verbrauches. Mit der stärkeren Gewichtung der Betriebsstrategie in Richtung der Absenkung der Partikelanzahlmission kommt es zu einem zusätzlich höheren Bedarf an elektrischer Energie. Diese zusätzlich benötigte Energie wird durch

Gewinnung von elektrischer Energie mittels der Lastpunktanhebung bereitgestellt. In weiterer Folge kommt es wegen des vermehrten Einsatzes der Lastpunktanhebung zu einem höheren Kraftstoffverbrauch im Gegensatz zu der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie.

Bei den Warmstartuntersuchungen kann zusammengefasst werden, dass die verbrauchsoptimale Gewichtung der Betriebsstrategie gleichzeitig auch die effektivste Einstellung in Bezug auf eine Reduktion der Partikelanzahlemissionen ist. Dies kann dadurch begründet werden, dass sich die Partikelanzahlemissionen grundsätzlich bei den Warmstartuntersuchungen auf einem unkritischen Niveau unterhalb des gewählten Referenzwertes  $PN_{Euro\ 6d-Temp,max} = 6 \cdot 10^{11} \frac{\#}{km}$  befinden. Mit der verbrauchsoptimalen Variante der Betriebsstrategie konnte eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um circa 9,5 % und der Partikelanzahlemissionen um rund 9 % erreicht werden. Im Falle des Warmstarts der VKM ist die verbrauchsoptimale Gewichtung der Betriebsstrategie zu favorisieren. Dadurch können sehr vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Absenkung der Partikelanzahlemissionen und des Kraftstoffverbrauches mit einem Fahrzeug des C-Segmentes im WLTC erreicht werden.

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Kaltstartuntersuchungen macht es im Hinblick auf die Reduktion der Partikelanzahlemissionen und einer moderaten Absenkung des Kraftstoffverbrauches bei einem Kaltstart der VKM Sinn, die Gewichtung der Betriebsstrategie der P2-Topologie in Richtung der Reduktion der Partikelanzahlemissionen auszuführen. Mit einer aktivierten TC und einem moderaten Ablastfaktor können gute Resultate zur Reduktion der Partikelanzahlemissionen und des Kraftstoffverbrauches mit einem Fahrzeug des C-Segmentes im WLTC erzielt werden.

## 5. Bewertung und Vergleich der P0- mit der P2-Topologie

Ein wesentlicher Beitrag zur Reduktion des Kraftstoffverbrauches sowohl mit der P0- als auch mit der P2-Topologie erfolgt durch den gezielten Einsatz der elektrischen Energie, die mittels der Rekuperation gewonnen wird. Dabei unterscheiden sich die beiden Hybridtopologien in der Höhe der Rekuperationsenergie. Im Gegensatz zur P2-Topologie muss bei der P0-Topologie bei der Rekuperation die VKM mitgeschleppt werden. Durch diese Schleppverluste verringert sich die Rekuperationsenergie der P0-Topologie gegenüber der P2-Topologie signifikant. Neben der Situation, ob die VKM mitgeschleppt werden muss oder abgekoppelt werden kann, hat die Leistung der EM einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe des Drehmomentes der EM. Für die Untersuchung der elektrischen Rekuperationsenergie der P0- und der P2-Topologie sind zusätzlich zu den aus den Untersuchungen der Kapitel 4.1 und 4.2 bekannten Modellen ein Modell der P0-Topologie mit einer EM mit einer maximalen Leistung von  $P = 20 \text{ kW}$  und ein Modell der P2-Topologie mit einer EM mit einer maximalen Leistung von  $P = 10 \text{ kW}$  erstellt worden. Ein Einfluss der Gewichtung der Betriebsstrategie kann ausgeschlossen werden, weil in beiden Topologien unabhängig von der Gewichtung der Betriebsstrategie so viel wie möglich an Energie rekuperiert wird.

Die [Abbildung 49](#) zeigt die Simulationsergebnisse im WLTC der rekuperierten Energie für die beiden Topologien mit jeweils E-Maschinen mit einer maximalen Leistung von  $P = 10 \text{ kW}$  und  $P = 20 \text{ kW}$ . Dabei konnte mit der EM, welche eine maximale Leistung von  $P = 20 \text{ kW}$  hat, in der P2-Topologie um in etwa 32 % mehr an elektrischer Energie gegenüber der EM mit einer Leistung von  $P = 10 \text{ kW}$  in der P0-Topologie rekuperiert werden. Der Anstieg der elektrischen Rekuperationsenergie von der P0-Topologie zur P2-Topologie entfällt der größere Anteil mit 27 % auf den Wegfall der Schleppverluste der VKM und der kleinere Anteil mit 5 % auf die Erhöhung der maximalen Leistung der EM von  $P = 10 \text{ kW}$  auf  $P = 20 \text{ kW}$ . Während der Rekuperation wurden beide EM im Durchschnitt über den WLTC betrachtet mit einem generatorischen Wirkungsgrad von in etwa  $\bar{\eta}_{EM,gen} = 82 \%$  betrieben.

Ferner ist in der [Abbildung 49](#) ersichtlich, dass zur annähernden Ausschöpfung des Rekuperationspotentials eines Fahrzeuges des C-Segmentes im WLTC für die P0-Topologie eine EM mit einer Leistung von  $P = 10 \text{ kW}$  und für die P2-Topologie eine EM mit einer Leistung von  $P = 20 \text{ kW}$  ausreichend ist. Ähnliche Ergebnisse für ein Fahrzeug des C-Segmentes hinsichtlich der Rekuperationsenergie sind in den Untersuchungen im WLTC in [51] und [52] erzielt worden.

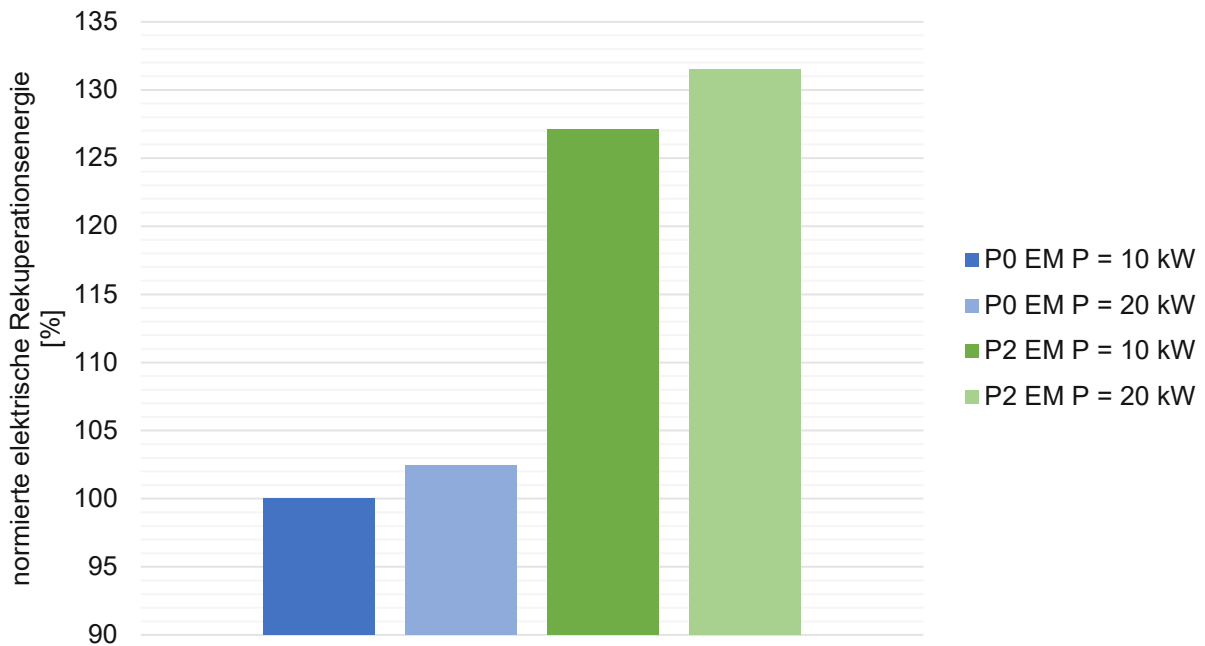


Abbildung 49: Vergleich der elektrischen Rekuperationsenergie der verschiedenen Hybridtopologien im WLTC

Für den Vergleich des Kraftstoffverbrauches und der Partikelanzahlemissionen zwischen der P2-Topologie und der P0-Topologie werden exemplarisch jeweils die Simulationsergebnisse der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie herangezogen. Demnach ist im Nachfolgenden ein Vergleich zwischen den Varianten P2 V1\_1 und P0 V1\_1 angestellt worden. Der Vergleich des Kraftstoffverbrauches und der Partikelanzahlemissionen der beiden Topologien sowohl für Kaltstart als auch Warmstart ist in der [Abbildung 50](#) dargestellt.

Für den Warmstart zeigt sich, dass die Reduktion des Kraftstoffverbrauches mit der P2-Topologie um etwa den Faktor 2 größer gegenüber der Reduktion des Kraftstoffverbrauches mit der P0-Topologie ist. Die Gründe für das höhere Potential zur Reduktion des Kraftstoffverbrauches der P2-Topologie sind die höhere Rekuperationsenergie und die rein elektrische Fahrt. Mit der P2-Topologie konnte eine Absenkung der Partikelanzahlemissionen um rund 9 % und mit der P0-Topologie um circa 26 % erreicht werden. Grundsätzlich haben die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Warmstartuntersuchungen mit den verschiedenen Antriebsstrangtopologien gezeigt, dass die Partikelanzahlemissionen beim Warmstart auf einem unkritischen Niveau gegenüber dem Referenzwert  $PN_{Euro\ 6d-Temp,max}$  liegen. Aus diesem Grund sollte, wenn sich die VKM in einem betriebswarmen Zustand befindet, bei beiden Hybridtopologien die Gewichtung der Betriebsstrategie verbrauchsoptimal erfolgen.

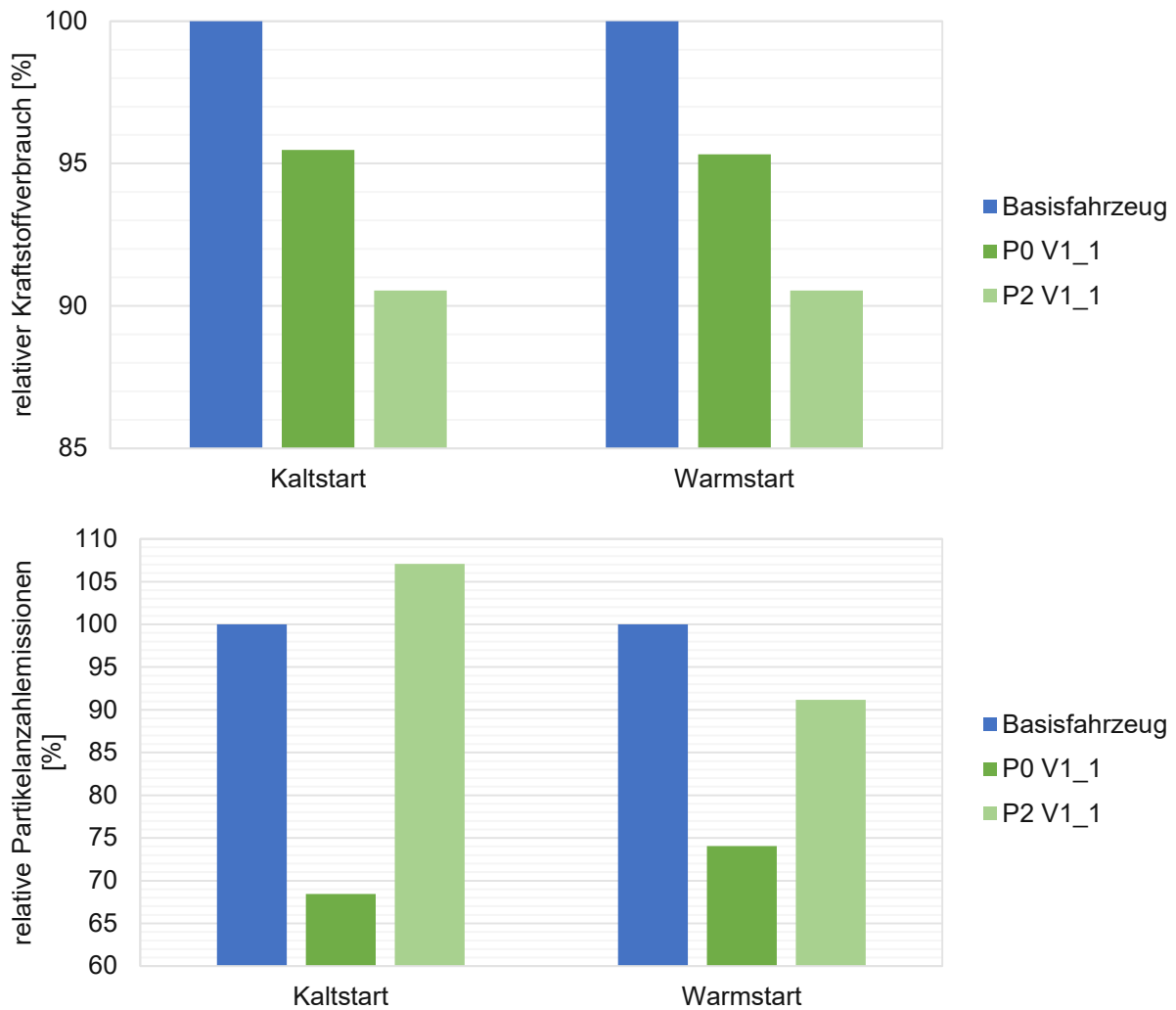


Abbildung 50: Vergleich zwischen der verbrauchsoptimalen Varianten der P2- und der P0-Topologie im WLTC

Dagegen liegen bei der Kaltstartuntersuchung des Basisfahrzeuges die Partikelanzahlmissionen auf einem kritischen Niveau gegenüber dem Referenzwert  $PN_{Euro\ 6d-Temp,max}$ . Bei einem Kaltstart erhöhen sich bei der verbrauchsoptimalen Variante der P2-Topologie die Partikelanzahlmissionen um etwa 7 % gegenüber dem Basisfahrzeug. In der [Abbildung 51](#) ist der signifikante Unterschied der Partikelanzahlmissionen zwischen der P0- und der P2-Topologie erkennbar. Die Gründe für die höheren Partikelanzahlmissionen der P2-Topologie sind ein späteres Erreichen des betriebswarmen Zustandes der VKM, höhere Drehmomente der VKM im Hybrid Modus und hohe Drehmomentgradienten bei Wechsel vom E-Fahrt Modus in den Hybrid Modus. Es zeigt sich, dass die VKM in der P2-Topologie während des Warmlaufs bis etwa zur Sekunde 700 eine deutlich höhere Anzahl an Partikeln im Gegensatz zur VKM in der P0-Topologie emittiert. Ab dem Erreichen des betriebswarmen Zustandes der VKM werden bei beiden Topologien circa gleich viele Partikel ausgestoßen. Mit der P0-Topologie kann eine Reduktion der Partikelanzahlmissionen um circa 32 % erzielt werden. Dies ist dadurch bedingt, dass bei der P0-Topologie ein Ablasten im Warmlauf und an der Vollast durchgeführt wird und die dazu notwendige elektrische Energie mittels

der Rekuperation gewonnen wird. Weiters ist in der Abbildung 51 der Vorteil bezüglich des Kraftstoffverbrauches der P2-Topologie gegenüber der P0-Topologie ersichtlich. Dies zeigt sich exemplarisch im Bereich der Sekunde 1600 durch einen flachen Verlauf der Kurve des kumulierten Kraftstoffverbrauches. Im Bereich der Sekunde 1600 entscheidet sich die Betriebsstrategie zu Gunsten der E-Fahrt. Neben der Möglichkeit für den effektiven Einsatz der elektrischen Energie mit der Hybridfunktion E-Fahren basiert das höhere Potential zur Reduktion des Kraftstoffverbrauches der P2-Topologie auf der höheren Rekuperationsenergie.

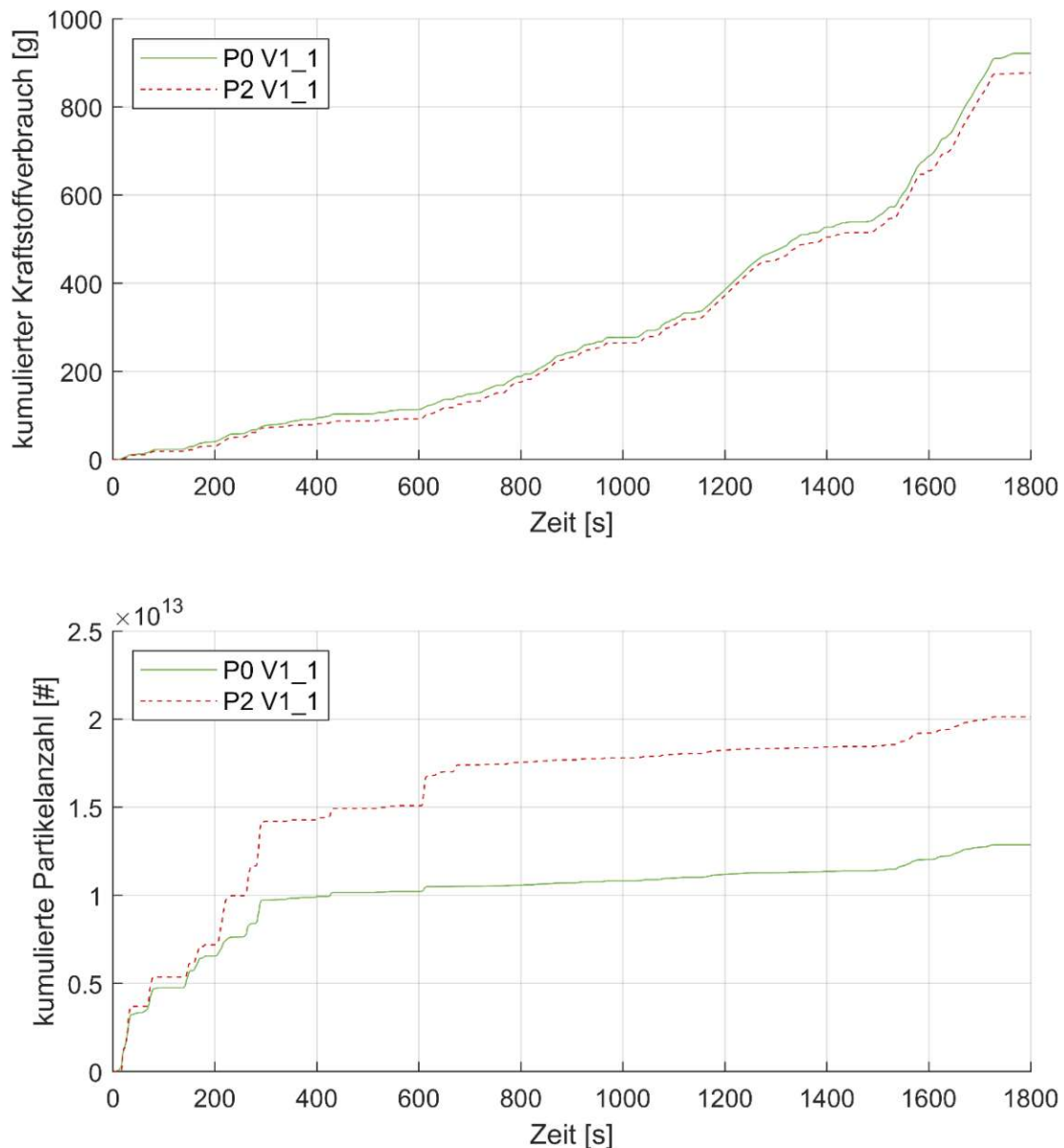


Abbildung 51: Vergleich des Kraftstoffverbrauches und der Partikelanzahlmissionen zwischen der P0- und der P2-Topologie beim WLTC mit Kaltstart



In der [Abbildung 52](#) lässt sich die höhere Rekuperationsenergie der P2-Topologie durch einen deutlich höheren Anstieg des Ladezustands der Batterie feststellen. Dieser Umstand ist exemplarisch am Ende des WLTC in der [Abbildung 52](#) gut ersichtlich. Ferner zeigt sich, dass bei der P2-Topologie die Batterie wegen des vermehrten Einsatzes an elektrischer Energie zusätzlich durch die Lastpunktanhebung aufgeladen wird. Dies stellt sich exemplarisch im Bereich der Sekunde 1700 dar. Im Gegensatz dazu erfolgt bei der P0-Topologie ausschließlich ein Aufladen der Batterie mittels der Rekuperation.

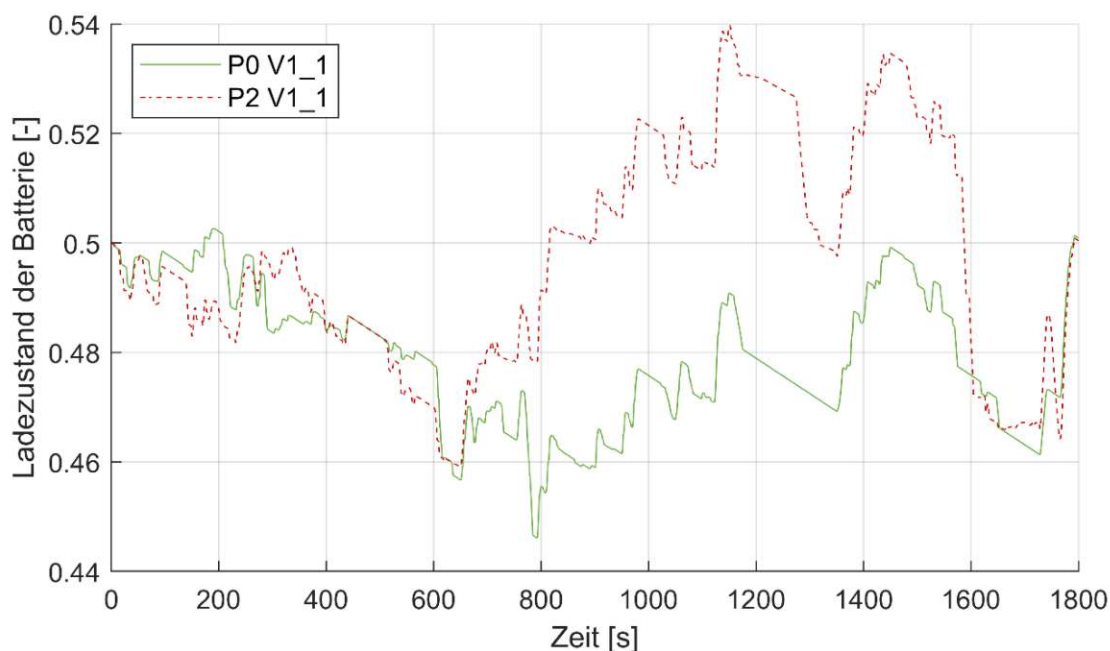


Abbildung 52: Vergleich des SOC der Batterie zwischen der P0- und der P2-Topologie beim WLTC mit Kaltstart

Die [Abbildung 53](#) verdeutlicht einerseits den vermehrten Einsatz an elektrischer Energie der P2-Topologie durch motorische Drehmomente der EM zum E-Fahren, siehe z.B. Sekunde 100 des WLTC, sowie andererseits das Mehr an Rekuperationsenergie der P2-Topologie durch die höheren generatorische Drehmomente der EM, siehe z.B. Sekunde 800 des WLTC.

Abschließend wird ein Vergleich der Kaltstartuntersuchungen der Versionen P0 V1\_1 und P2 V2\_3, welche beide circa denselben Kraftstoffverbrauch haben, vorgenommen. Dafür werden die Ergebnisse der Partikelanzahlemissionen und des Kraftstoffverbrauches bei Kaltstart, welche in der [Abbildung 37](#) und der [Abbildung 44](#) dargestellt sind, betrachtet. Dabei ist ersichtlich, dass mit der P0-Topologie die Reduktion der Partikelanzahlemissionen um etwa den Faktor 2 höher ist als die Reduktion der Partikelanzahlemissionen mit der P2-Topologie. Dieser signifikante Unterschied ist durch die unterschiedliche Auslegung der in den beiden Hybridtopologien verwendeten Betriebsstrategien bedingt. Grundsätzlich können mit der P2-Topologie bei gleicher Auslegung der Betriebsstrategie wie bei der P0-Topologie die Partikelanzahlemissionen

im Vergleich mit der P0-Topologie zusätzlich abgesenkt werden, weil mehr Rekuperationsenergie für den Einsatz zur Absenkung der Partikelanzahlemissionen zur Verfügung steht.

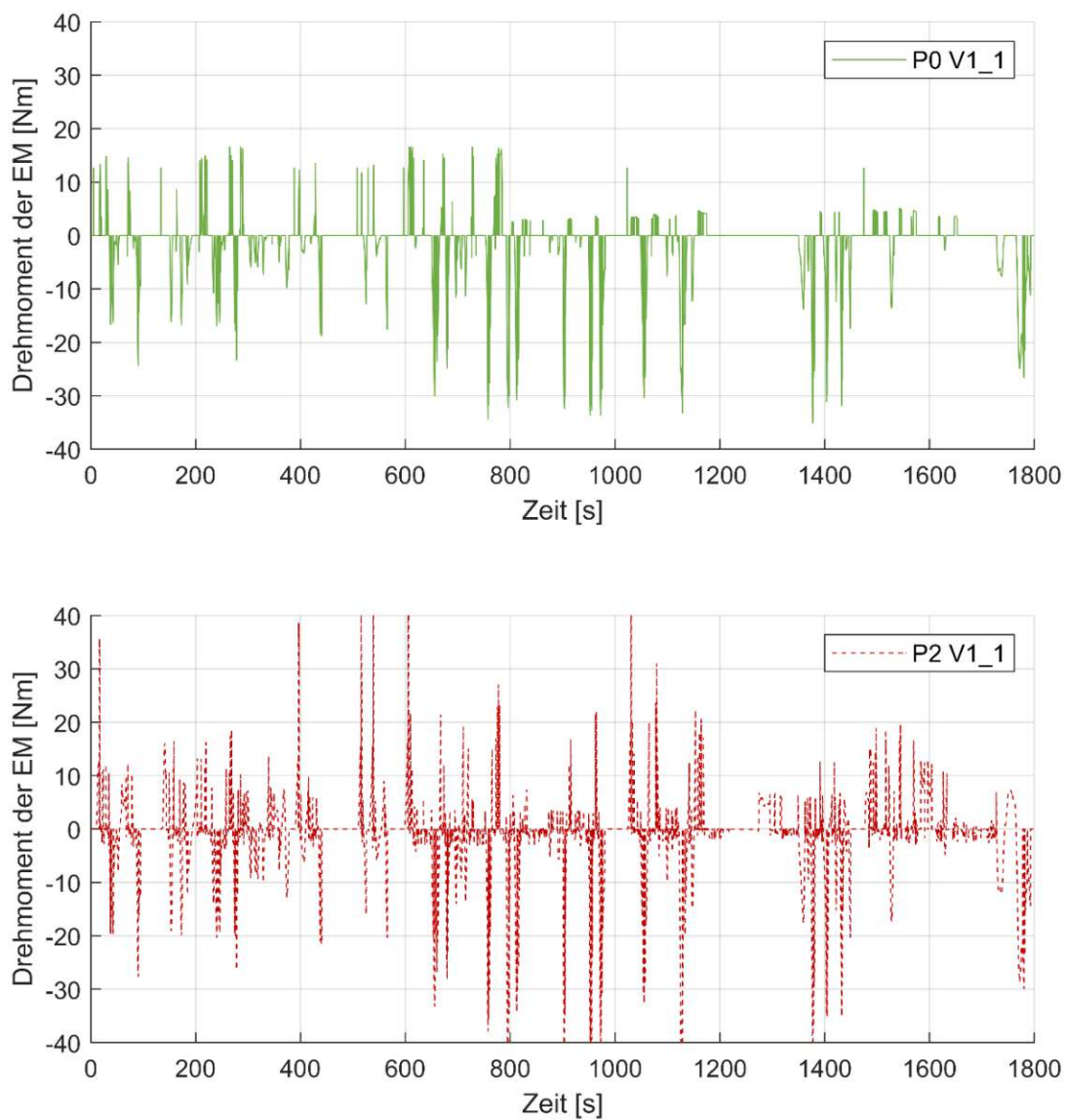


Abbildung 53: Vergleich des Drehmomentes der EM zwischen der P0- und der P2-Topologie beim WLTC mit Kaltstart

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit ist ein vorhandenes Längsdynamikmodell eines 48 Volt Hybrid-Fahrzeuges der Kompaktklasse mit einem saugrohreinspritzenden Ottomotor (MPFI) in *GT-SUITE* an die spezielle Aufgabenstellung in einem P0-Hybrid adaptiert worden. Anschließend erfolgte der Umbau des Längsdynamikmodells des P0-Hybrid zu einem P2-Hybrid. Für beide Topologien sind unterschiedliche Betriebsstrategien mit den Betriebszielen Absenkung des Verbrauchs sowie Absenkung der Partikelanzahlemissionen entwickelt und in die Längsdynamikmodelle implementiert worden. Bei der im P0-Hybrid implementierten Betriebsstrategie handelt es sich um eine Betriebsstrategie mit deterministischen Regeln. Im Längsdynamikmodell des P2-Hybrid kam die optimierungsbasierte Betriebsstrategie Equivalent Consumption Minimization Strategy zum Einsatz. Die beiden verschiedenen Betriebsstrategien sind dahin gehend entworfen worden, dass sie die Möglichkeit zur unterschiedlichen Gewichtung jeweils für Absenkung des Verbrauches sowie Absenkung der Partikelanzahlemissionen besitzen. Zusätzlich ist für die Ermittlung der Partikelanzahlemissionen mithilfe der Software *MATLAB-Simulink* ein statistisches Modell des Partikelanzahlstromes in Abhängigkeit von Parametern, die Einfluss auf die Entstehung von Partikel haben, erstellt worden. Die Längsdynamikmodelle und das Partikelanzahlemissionsmodell wurden für den relevanten Betriebsbereich anhand von Messdaten, welche am Motorenprüfstand ermittelt worden sind, abgestimmt.

Im Anschluss an die Modellbildung und Entwicklung der Betriebsstrategie wurden mit den Modellen des P0-Hybrid und des P2-Hybrid jeweils Kaltstart- und Warmstartuntersuchungen anhand des Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle (WLTC) durchgeführt. Bei beiden Hybridtopologie wurden Parameter, die die Gewichtung der Betriebsstrategie beeinflussen, variiert.

Bei den Warmstartuntersuchungen zeigte sich, dass bei beiden Hybridtopologien mit der verbrauchsoptimalen Gewichtung der Betriebsstrategie der Kraftstoffverbrauch bei gleichzeitiger Absenkung der Partikelanzahlemissionen signifikant gegenüber dem Vergleichsfahrzeug mit einem konventionellen Antriebsstrang abgesenkt werden kann. Mit der verbrauchsoptimalen Variante der Betriebsstrategie der P2-Topologie konnte eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um circa 9,5 % und der Partikelanzahlemissionen um rund 9 % erreicht werden. Mit der verbrauchsoptimalen Variante der Betriebsstrategie der P0-Topologie konnte eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um circa 4,7 % und der Partikelanzahlemissionen um etwa 26 % erreicht werden. Daher zeigt sich, dass bezüglich der Höhe der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs die P2-Topologie im Vergleich mit der P0-Topologie ein wesentlich größeres Potential um rund den Faktor zwei aufweist. Grundsätzlich befinden sich bei allen in dieser Arbeit mit den Modellen des Vergleichsfahrzeuges, der P0-Topologie und der P2-Topologie durchgeführten Warmstartuntersuchungen die Partikelanzahlemissionen auf einem unkritischen Niveau

unterhalb des gewählten Referenzwertes  $PN_{Euro\ 6d-Temp,max} = 6 \cdot 10^{11} \frac{\#}{km}$ . Daher ist es bei beiden Hybridtopologien bei einem betriebswarmen Zustand des Verbrennungsmotors sinnvoll die verbrauchsoptimale Gewichtung der Betriebsstrategie zu wählen.

Die Kaltstartuntersuchungen ergaben, dass bei der verbrauchsoptimalen Variante der P2-Topologie eine Reduktion des Kraftstoffverbrauches um rund 9,5 % erzielt werden kann. Gleichzeitig liegen dabei die Partikelanzahlemissionen um etwa 7 % gegenüber dem Vergleichsfahrzeug mit einem konventionellen Antriebsstrang höher. Mittels einer stärkeren Gewichtung der Betriebsstrategie in Richtung der Absenkung der Partikelanzahlemissionen konnten die Partikelanzahlemissionen signifikant abgesenkt werden. Dies hat eine teilweise Einbuße des Kraftstoffverbrauchsvorteils gegenüber dem Basisfahrzeug zur Folge. Mit der verbrauchsoptimalen Betriebsstrategie der P0-Topologie kann eine Reduktion der Partikelanzahlemissionen um rund 32 % und eine Reduktion des Kraftstoffverbrauches um circa 4,5 % erzielt werden. Wie bei der P2-Topologie auch, konnten bei der P0-Topologie durch eine starke Gewichtung der Betriebsstrategie in Richtung der Absenkung der Partikelanzahlemissionen die Partikelanzahlemissionen deutlich abgesenkt werden bei gleichzeitigem Rückgang des Kraftstoffverbrauchsvorteiles gegenüber dem Vergleichsfahrzeug mit einem konventionellen Antriebsstrang.

Beim Vergleich der beiden Hybridtopologien konnte gezeigt werden, dass zur annähernden Ausschöpfung des Rekuperationspotentials eines Fahrzeuges der Kompaktklasse im WLTC für die P0-Topologie eine EM mit einer maximalen Leistung von  $P = 10$  kW und für die P2-Topologie eine EM mit einer maximalen Leistung von  $P = 20$  kW ausreichend ist.

In weiterer Folge werden Messungen hinsichtlich des Kraftstoffverbrauches und der Partikelanzahlemissionen am Motorenprüfstand für die unterschiedlichen Gewichtungen der Betriebsstrategie jeweils der P0- und der P2-Topologie mithilfe der in dieser Arbeit simulierten Fahrzyklen durchgeführt. Anschließend werden die Fahrzeugmodelle und die Betriebsstrategien weiterentwickelt, um im Speziellen mit den beiden Hybridtopologien Untersuchungen bei Warmstart ( $T_{KM,0} = 85$  °C), bei Kaltstart bei moderaten Temperaturen ( $T_{KM,0} = 25$  °C) und bei Kaltstart bei tiefen Temperaturen ( $T_{KM,0} = -7$  °C) anhand eines Real Driving Emissions (RDE) Fahrzyklus durchführen zu können. Dadurch soll mithilfe der Simulation und dem Motorenprüfstand das Trade Off Verhalten durch eine unterschiedliche Gewichtung der Betriebsstrategie beider Hybridtopologien jeweils für Absenkung des Kraftstoffverbrauches sowie Absenkung der Partikelanzahlemissionen in einem RDE Fahrzyklus aufgezeigt werden. Zusätzlich soll das Potential eines P2-Hybrids gegenüber einem P0-Hybrid in einem RDE Fahrzyklus aufgezeigt werden.

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] Mock, P.: European Vehicle Market Statistics - Pocketbook 2017/18. International Council on Clean Transportation, Berlin, 2017.
- [2] van Basshuysen, R.; Schäfer, F.; et al: Handbuch Verbrennungsmotor. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 8.Auflage, ISBN: 978-3-658-10901-1, 2017.
- [3] Reif, K.; et al: Abgastechnik für Verbrennungsmotoren. Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-09521-5, 2015.
- [4] Merker, G.; Schwarz, C.; Teichmann, R.; et al: Grundlagen Verbrennungsmotoren. Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 6.Auflage, ISBN: 978-3-8348-1987-1, 2012.
- [5] Heywood, J.B.: Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill, London, ISBN: 9780071004992, 1988.
- [6] Hofmann, P.: Hybridfahrzeuge. Wien: Springer-Verlag, 2.Auflage, ISBN: 978-3-7091-1779-8, 2014.
- [7] Görke, D.: Untersuchung zur kraftstoffoptimalen Betriebsweise von Parallelhybridfahrzeugen und darauf basierende Auslegung regelbasierter Betriebsstrategien. Dissertation Universität Stuttgart, 2015.
- [8] Sorger, H.; et al: Vehicle integration of a new engine concept for 48 Volts – opportunities for efficiency improvement and optimization of the overall system complexity. 3. Internationaler Motorenkongress, Baden-Baden 2016.
- [9] Eilinger, R.; et al: Potenziale und Grenzen von 48-V-Systemen. ATZextra Automobiltechnische Zeitschrift, 4/2017, Volume 22, Seite 16-21.
- [10] Reif, K.; et al: Kraftfahrzeuge-Hybridantriebe. Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8348-0722-9, 2012.
- [11] Arcati, A.; et al: Coasting als Realfahrfunktion. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 03/2017, Volume 119, Seite 26-31.
- [12] Helbing, M.; et al: Bewertender Überblick von Methoden zur Antriebsstrangsteuerung in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. ATZ elektronik Automobiltechnische Zeitschrift, 4/2015, Volume 10, Seite 66-71.
- [13] Wüst, M.; et al: Operating strategy for optimized CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions of diesel-engine mild-hybrid vehicles. 15. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart 2015.
- [14] Salmasi, F. R.: Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 05/2007, Volume 59, Seite 2393-2404.
- [15] Guzzella, L.; Sciarretta, A.: Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization. Springer, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-642-35912-5, 2013.
- [16] Onori, S.; Serrao, L.; Rizzoni, G.: Hybrid electric vehicles: energy management strategies. Springer, London, ISBN: 978-1-4471-6779-2, 2016.



- [17] Helbing, M.: Energiemanagement für eine parallele Hybridarchitektur. Diplomarbeit TU Dresden, 2014.
- [18] Fleckner, M.; et al: Neue Strategien zur verbrauchsoptimalen Auslegung der Betriebsführung von Hybridfahrzeugen. 18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, Aachen 2009.
- [19] Paganelli, G.; et al: Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, July 2000, Volume 214(7), Seite 705-717.
- [20] Musardo, C.; et al: A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management. 44th IEEE Conference on Decision and Control, Sevilla 2005.
- [21] Chasse, A.; et al: Online optimal control of a parallel hybrid with after-treatment constraint integration. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille 2010.
- [22] Onori, S.; et al: Adaptive equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicles. ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference, Cambridge 2010.
- [23] Nüesch, T.; et al: Equivalent Consumption Minimization Strategy for the Control of Real Driving NOx Emissions of a Diesel Hybrid Electric Vehicle. Energies, May 2014, Volume 7(5), Seite 3148-3178.
- [24] Enang, W.; Bannister, C.: Robust proportional ECMS control of a parallel hybrid electric vehicle. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, January 2017, Volume 231(1), Seite 99-119.
- [25] Rizzoni, G.: System Integration, Simulation and Energy Management of Hybrid Electric Vehicles. Vorlesungsskriptum, Stuttgart International Summer School - Mobility 2018.
- [26] Paganelli, G.: General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles. JSAE Review, 2001, Volume 22(4), Seite 511-518.
- [27] Serrao, L.; Onori, S.; Rizzoni, G.: ECMS as a realization of Pontryagin's minimum principle for HEV control. 2009 American Control Conference, St. Louis 2009.
- [28] Ambuhl, D.; Guzzella, L.: Predictive Reference Signal Generator for Hybrid Electric Vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology, November 2009, Volume 58(9), Seite 4730-4740.
- [29] Fu, L.; et al: Real-time energy management and sensitivity study for hybrid electric vehicles. 2011 American Control Conference, San Francisco 2011.
- [30] Sun, C.; Sun, F.; He, H.: Investigating adaptive-ECMS with velocity forecast ability for hybrid electric vehicles. Applied Energy, Jänner 2017, Volume 185, Teil 2, Seite 1644-1653.

- [31] Gu, B.; Rizzoni, G.: An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management based on driving pattern recognition. ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2006 Chicago
- [32] Jeon, S.-I.; et al: Multi-mode driving control of a parallel hybrid electric vehicle using driving pattern recognition. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, März 2002, Volume 124(1), Seite 141-149.
- [33] Gu; B.: Supervisory control strategy development for a hybrid electric vehicle. Master's thesis, The Ohio State University 2006.
- [34] Kessels, J.T.B.A.; et al: Online Energy Management for Hybrid Electric Vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology, November 2008, Volume 57(6), Seite 3428-3440.
- [35] Chasse, A.; Sciarretta, A.; Chauvin, J.: Online optimal control of a parallel hybrid with costate adaptation rule. 6th IFAC Symposium Advances in Automotive Control, München 2010.
- [36] Riemer, T.: Vorausschauende Betriebsstrategie für ein Erdgas Hybridfahrzeug. Dissertation Universität Stuttgart, 2012.
- [37] Onori, S.; Serrao, L.: On Adaptive-ECMS strategies for hybrid electric vehicles. International scientific conference on Hybrid and Electric Vehicles – RHEVE 2011, Rueil-Malmaison 2011.
- [38] van Keulen T.; et al: Optimal Energy Management in Hybrid Electric Trucks Using Route Information. Oil & Gas Science and Technology, August 2009, Volume 65(1), Seite 103-113.
- [39] Sivertsson, M.; Sundström, C.; Eriksson, L.: Adaptive Control of a Hybrid Powertrain with Map-based ECMS. 18th IFAC World Congress, Mailand 2011.
- [40] Bianchi, D.; et al: Layered control strategies for hybrid electric vehicles based on optimal control. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, Jänner 2011, Volume 3(2), Seite 191-217.
- [41] Koot, M.; et al: Energy management strategies for vehicular electric power systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Mai 2005, Volume 54(3), Seite 771-782.
- [42] Ambühl, D.: Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles. Dissertation ETH Zürich, 2009.
- [43] Pisu, P.; Rizzoni, G.: A Comparative Study Of Supervisory Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Mai 2007, Volume 15(3), Seite 506-518.
- [44] Rizzoni, G.: Energy Modeling, Simulation, Optimization and Control of Advanced Vehicles. Vorlesungsskriptum, The Ohio State University 2017.
- [45] Hakvoort, H.; Olbrich, T.: Serienapplikation eines 48-V-Hybridantriebs. MTZ Motorentechnische Zeitschrift, 9/2017, Volume 78, Seite 28–37.



- [46] Kutter, S.: Eine prädiktive und optimierungsbasierte Betriebsstrategie für autarke und extern nachladbare Hybridfahrzeuge. Dissertation TU Dresden, 2013.
- [47] Uebel, S.; et al: Anwendung der Variationsrechnung für Steuerungsaufgaben im Kraftfahrzeug. At-Automatisierungstechnik, April 2014, Volume 62(4), Seite 249-259.
- [48] Kruse, R.; et al: Computational Intelligence. Wiesbaden: Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2.Auflage, ISBN: 978-3-658-10903-5, 2015.
- [49] Gamma Technologies: GT-SUITE Optimization Manual. Westmont, 2018.
- [50] Uhl, M.; et al: Electrified Powertrain at 48 V – More than CO<sub>2</sub> and Comfort. 22. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen 2013.
- [51] Vögler, M.; et al: Combustion Engines for Electrified Powertrains – Systems Engineering between Efficiency, Emission and Cost. 27. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen 2018.
- [52] Pels, T.; et al: 48 V – Wo sitzt der E-Motor?. 11. Internationale MTZ-Fachtagung „Der Antrieb von morgen“, Frankfurt, 2017.