



Gerald Carl Traussner, BSc.

BEWERTUNG DER EFFIZIENZEIGENSCHAFTEN VERSCHIEDENER ANTRIEBSTOPOLOGIEN VON BEV - UND PHEV - FAHRZEUGEN UND IHRES WEITERENTWICKLUNGSPOTENTIALS

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Fachrichtung: Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau

Institut für Fahrzeugtechnik

Member of Frank Stronach Institute

Betreuer: Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Mario Hirz

Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Fischer

Betreuer BMW AG: Dipl.-Ing. Nenad Ivkovic

Graz, Mai 2017

Gesperrt bis 2022

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Datum

Unterschrift

Danksagung

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der BMW AG in der Abteilung „Efficient Dynamics“ und der Subabteilung elektrifizierte Fahrzeuge. Ich möchte mich daher recht herzlich bedanken, dass mir die Chance gegeben wurde in dieser Abteilung mitzuwirken und im Zuge dessen meine Masterarbeit zu verfassen.

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Nenad Ivkovic, der mich in dieser Zeit unterstützte und mich in das Unternehmen einführte. Das Vertrauen, welches mir sowohl von Herrn Dipl.-Ing. Nenad Ivkovic, als auch von meinen Vorgesetzten Dr. Andreas Wilde und Dipl.-Ing. Philipp Wilde sowie meinem gesamten Arbeitsumfeld in der BMW AG entgegengebracht wurde, trug in Verbindung mit zahlreichen Diskussionen und Inputs maßgeblich zum zügigen Abschluss dieser Arbeit bei. Bedanken möchte ich mich auch für die großzügige finanzielle Unterstützung und den großen Einblick in verschiedenste Bereiche des Unternehmens, die mir einen größeren Horizont der Betrachtung ermöglichten. Ohne diese Unterstützung wäre eine solch umfangreiche Untersuchung nicht möglich gewesen. Deshalb möchte ich mich bei allen Beteiligten für die großartige Unterstützung jeglicher Art bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei einigen Kollegen für das angenehme Arbeitsklima und die Anregungen zur Arbeit bedanken, insbesondere möchte ich den Herren Dipl.-Ing. Felix Hanisch, Dipl.-Ing. Mike Zoher, Dipl.-Ing. Christopher Mattes und Dipl.-Ing. Andreas Ertlmeier für die tolle Zusammenarbeit und die fachlichen Anregungen danken. Ein besonderer Dank gilt auch Dipl.-Ing. Phil Gamble, der mir durch seine Vorarbeit ein Tool übergeben hat.

Ohne die hervorragende Betreuung durch meinen Professor an der Technischen Universität Graz Herrn Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Mario Hirz wäre die Arbeit nicht möglich gewesen. Die Zusammenarbeit und der Informationsfluss waren trotz der Entfernung hervorragend und trugen zu einem positiven Erfolg der Arbeit bei. Herr Dipl.-Ing Martin Ackerl von der Technischen Universität Graz verhalf mir, Kontakt mit der BMW AG aufzunehmen und vermittelte mich an Herrn Dr. Andreas Wilde. Ohne seine Hilfe wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen, daher gilt auch ihm mein großer Dank.

Zu guter Letzt möchte ich meinen Eltern für die Unterstützung zu dieser Arbeit besonders danken. Ihre Motivation trug entscheidend zum Fortschritt dieser Masterarbeit bei und gab mir die Antriebskraft zum Erlangen der Diplomwürde.

München, im Mai 2017

Gerald Traussner

Abstract

Due to the still low energy density of current electric energy storage systems, the drive topologies are subject to great demands with regard to their efficiency in order to be able to realize both low fuel / energy and high electrical range. Both hybrid vehicles and purely battery-powered vehicles depend on high efficiency due to limited energy storage possibilities in order to be able to realize the high range required by the customer. The aim of this work is to increase the efficiency and the driving performance of both hybrid vehicles and purely electric driven vehicles.

In this thesis, methods and proposals for increasing the efficiency of plug-in hybrid vehicles in pure electric driving mode and from purely battery-driven vehicles are presented. This is intended to provide a higher state of charge for better driving performance if required and the electrical range can be appreciably increased so that the drivetrain of the entire vehicle is more efficient.

The efficient use of the electrical energy and the recovery of the maximum possible energy are one key to the extension of electrical driving ranges. Simultaneously, under the reproducible test conditions, efficiency increases are shown at the level of mechanical drive components as well as at the operating strategy level. In particular for plug-in hybrid vehicles, electrical consumption savings on the mechanical level of the drive topology are indicated. In case of battery electric vehicles (BEV), consumption savings and associated higher operating ranges are lucrative with the use of adaptive operating strategies, because of the already high efficiency levels of the drive components. Some BEV have electric machines with extremely high-torque as all wheel drive (AWD) vehicles and are used for high driving performance. In order to be able to offer these vehicles with high driving ranges, this work presents an intelligent adaptive axle torque distribution strategy. This strategy is valid for all possible variations of drive components for BEV - AWD vehicles and can be applied to different vehicle classes. The strategy is based on an algorithm for the most efficient distribution of the axle torques between the front axle and the rear axle. The results of the algorithm represent an axle torque distribution characteristic, which is implemented in the simulation for the distribution of the axle torques to show potentials for consumption savings and range increases.

Kurzfassung

Antriebsstopologien unterliegen hinsichtlich ihrer Effizienz großen Herausforderungen aufgrund der nach wie vor geringen Energiedichte aktueller elektrischer Energiespeicher. Um sowohl niedrige Verbräuche als auch hohe elektrische Reichweiten realisieren zu können, ist es notwendig, Antriebsstopologien so effizient wie möglich zu gestalten. Sowohl Hybridfahrzeuge als auch rein batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge sind aufgrund begrenzter Energiespeicherungsmöglichkeiten auf hohe Effizienz angewiesen, um die vom Kunden geforderten hohen Reichweiten realisieren zu können. Diese Arbeit soll dazu beitragen, sowohl die Effizienz als auch die Fahrleistung von Hybridfahrzeugen und von rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen zu steigern.

In dieser Arbeit werden Methoden und Vorschläge zur Effizienzsteigerung von Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen im rein elektrischen Fahrbetrieb und von rein batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen vorgestellt. Durch einen effizienteren Antrieb des Gesamtfahrzeuges sollen bei Bedarf ein höherer Ladezustand für bessere Fahrleistungen zur Verfügung stehen und die elektrische Reichweite spürbar erhöht werden.

Der effiziente Einsatz elektrischer Energie und die maximal mögliche Rückgewinnung der kinetischen Energie stellen den Schlüssel zur Verlängerung elektrischer Reichweiten dar. Unter reproduzierbaren Testbedingungen werden simulativ Effizienzsteigerungspotentiale auf Ebene mechanischer Antriebskomponenten sowie auf Ebene der Betriebsstrategie aufgezeigt. Insbesondere bei Plug-In-Hybridfahrzeugen werden elektrische Verbrauchseinsparungen auf mechanischer Ebene der Antriebsstopologie ausgewiesen. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) werden aufgrund der bereits hohen Wirkungsgrade der Antriebskomponenten Verbrauchseinsparungen und damit verbundene höhere Reichweiten mit dem Einsatz adaptiver Betriebsstrategien lukriert. BEV können als allradangetriebene (AWD) – Fahrzeuge extrem drehmomentstark ausgeführt werden und hohe Fahrleistungen erreichen. Um diese Fahrzeuge dennoch mit hohen Reichweiten anbieten zu können, wird in dieser Arbeit eine intelligente adaptive Achsmomentverteilungsstrategie vorgestellt. Diese Strategie ist für alle möglichen Variationen von Antriebskomponenten für BEV - AWD Fahrzeuge einsetzbar und kann auf unterschiedlichste Fahrzeugklassen angewendet werden. Die Strategie basiert auf einem Algorithmus zur effizientesten Verteilung der Achsmomente zwischen Vorderachse und Hinterachse. Das Ergebnis des Algorithmus stellt ein Achsmomentverteilungskennfeld dar, welches in die Simulation zur Verteilung der Achsmomente implementiert werden kann, um damit Potentiale für Verbrauchseinsparungen und Reichweitenerhöhungen aufzeigen zu können.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	1
Formelverzeichnis.....	3
1 Einführung.....	1
1.1 Motivation und Zielsetzung.....	1
1.2 Aufbau und Kapitelübersicht.....	2
2 Grundlagen.....	4
2.1 Grundlagen und Methoden zur Senkung von Energiebedarf und Verbrauch.....	4
2.1.1 Reduzierung der Fahrwiderstände.....	4
2.1.2 Elektrifizierung von Fahrzeugkomponenten.....	5
2.1.3 Optimierung des Verbrennungsmotors.....	5
2.1.4 Intelligente Betriebsstrategie.....	5
2.2 Definition elektrifizierter Fahrzeuge.....	5
2.2.1 Serieller Hybridantrieb.....	6
2.2.2 Paralleler Hybridantrieb.....	6
2.2.3 Leistungsverzweigter Hybridantrieb.....	10
2.2.4 BEV – Battery Electric Vehicle.....	11
2.3 Elektrifizierte Eigenschaften (Antriebsfunktionen).....	12
2.3.1 Plug-In-Hybrid (auch Full- Hybrid bezeichnet).....	12
2.3.2 Rein elektrisches Fahren.....	12
2.3.3 SoC – State of Charge.....	13
2.3.4 Elektrische Maschinen.....	13
2.4 Fahrzyklen.....	15
2.4.1 FTP72.....	15
2.4.2 Highway.....	16
2.4.3 NEFZ – Neuer Europäischer Fahrzyklus.....	17
2.4.4 WLTP - Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure.....	19
2.4.5 Mittlerer Kundenverbrauchszyklus.....	20
2.5 Simulationsumgebung.....	21
2.5.1 SIGMA.....	21
2.5.2 Dymola.....	22
2.5.3 Simulationsmodelle.....	23
2.6 Getriebetechnik elektrifizierter Fahrzeuge.....	25
3 Effizienzsteigerungspotentiale PHEV im E-Modus.....	30
3.1 Vergleich der elektrischen Verbräuche mit Stammdaten der Fahrzeuge.....	31
3.2 Vergleich der Topologien BEV – PHEV(P2) – PHEV(P4) im FTP72 Zyklus mit angepassten Fahrwiderständen.....	32
3.3 Vergleich der Topologien BEV – PHEV(P2) – PHEV(P4) im Highway Zyklus mit angepassten Fahrwiderständen.....	39
3.4 Wirkungsgradanalyse.....	43

3.4.1	Wirkungsgradanalyse Hochvoltspeicher	44
3.4.2	Wirkungsgradanalyse Getriebe	45
3.4.3	Wirkungsgradanalyse E-Maschinen	47
3.5	Validierung der Simulationsergebnisse anhand von Messungen.....	48
3.5.1	Validierung PHEV(P2)	48
3.5.2	Validierung PHEV(P4)	51
3.5.3	Validierung BEV	52
3.6	Ergebnisse des Vergleiches aus BEV – PHEV(P2) – PHEV(P4)	52
3.7	Mögliche Effizienzpotentiale in Hybridfahrzeugen	53
3.7.1	Effizienzpotentiale PHEV(P2).....	53
3.7.2	Effizienzpotentiale PHEV(P4).....	54
4	Effizienzsteigerungspotentiale BEV.....	56
4.1	Fahrzeuganalyse TESLA Model S P100D	57
4.2	Simulationsmodell für BEV – All Wheel Drive Fahrzeuge	60
4.3	Prämissen für die Untersuchung der Achsmomentverteilung	64
4.4	BEV-AWD Momentenanalyse	67
4.4.1	Konstantverteilung im WLTP	68
4.4.2	Momentanalyse mit Konstantverteilung in einem kundennahen Verbrauchszyklus	70
4.5	Analyse der Verlustkennfelder	73
4.6	Generierung eines Algorithmus für eine optimierte Momentenstrategie.....	77
4.7	Simulation mit vollvariablem Achsmomentverteilungskennfeld	85
4.8	Analyse der Ergebnisse	86
4.9	Anwendung des Algorithmus an einer weiteren Antriebskonfiguration	89
4.10	Diskussion der Ergebnisse	92
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	95
6	Literaturverzeichnis	96
	Abbildungsverzeichnis	99
	Tabellenverzeichnis	102

Abkürzungsverzeichnis

ACEA	European Automobile Manufacturers Association
AC-Mode	air conditioning, zu Deutsch: Klimaanlage
AG	Achsgetriebe
<i>Ah</i>	Amperestunden
ASM	Asynchronmaschine
AWD	All Wheel Drive - Allradantrieb
BEV	Battery Electric Vehicle(batterieelektrisches Fahrzeug)
BMW	Bayrische Motoren Werke AG
<i>CO₂</i>	Kohlenstoffdioxid
CVT	Continous Variable Transmission
E-Maschine	Elektrische Maschine bzw. Elektromotor
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
FTP	Federal Test Procedure
<i>g/km</i>	Gramm pro Kilometer
HA	Hinterachse
HVS	Hochvoltspeicher
ICCT	International Council on Clean Transportation
<i>km</i>	Kilometer
<i>km/h</i>	Kilometer pro Stunde
KSG	Kurbelwelle-Starter-Generator
<i>kW</i>	Kilowattstunde
MSA	Motor Start-/Stopp- Automatik

Abkürzungsverzeichnis

NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PHEV(P2)	Plug-In Hybrid Electric Vehicle als Parallel Hybrid P2
PHEV(P4)	Plug-In Hybrid Electric Vehicle als Parallel Hybrid P4
PSM	permanenterregte Synchronmaschine
RCI	relative State of Charge
RDE	Real Driving Emissions
SoC	State of Charge
SoCmin	State of Charge: minimaler Ladezustand des Speichers
SoCmax	State of Charge: maximaler Ladezustand des Speichers
SSM	stromerregte Synchronmaschine
Tank	Kraftstofftank
USA	United States of America
VA	Vorderachse
VM	Verbrennungsmotor
<i>Wh</i>	Wattstunden
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

Formelverzeichnis

A	Querschnittsfläche	$[m^2]$
a	Fahrzeugbeschleunigung	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
α	Steigung	$[^\circ]$
C	Kapazität	$\left[\frac{As}{V}\right]$
c_w	Luftwiderstandsbeiwert	$[-]$
F	Kraft	$[N]$
f_{Roll}	Rollwiderstandskoeffizient	$[-]$
g	Erdbeschleunigung	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
J_{rad}	Massenträgheitsmoment	$[kg * m^2]$
m	Masse	$[kg]$
M	Moment	$[Nm]$
n	Drehzahl	$[U/min]$
$\mu_{Straße}$	Reibbeiwert Straße	$[-]$
i	Übersetzung	$[-]$
I	Strom	$[A]$
Q	Ladungsmenge	$[As]$
$\varnothing r_{dyn}$	dynamischer Rollradius des Reifens	$[m]$
ρ	Dichte	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
SOC	State of Charge / Ladezustand	$[-]$
v	Geschwindigkeit	$\left[\frac{m}{s}\right]$
V_{rel}	relative Achsmomentverteilung	$[-]$

1 Einführung

Seit Beginn dieses Jahrtausends hat sich die Diskussion über schwindende Rohölvorkommen auf unserer Erde und den damit verbundenen Anstieg von Energiepreisen verschärft. Insbesondere Industrieländer und Schwellenländer haben einen enormen Bedarf an Energie. Die langfristigen ökologischen Auswirkungen einer ansteigenden CO_2 -Belastung in der Atmosphäre werden als äußerst kritisch betrachtet und werden nicht zuletzt auf den life-cycle von Personenkraftwagen zurückgeführt [30].

Das Europäische Parlament hat per Beschluss verordnet, dass der Mittelwert der CO_2 -Emission von in der EU verkauften Fahrzeugen ab dem Jahr 2021 einen Wert von $95\text{ g }CO_2/km$ in der Flotte nicht übersteigen soll. Bei Nichteinhaltung sollen Strafzahlungen drohen [7]. Dieses Ziel ist äußerst hoch gesteckt, wenn man bedenkt, dass der Durchschnittswert der CO_2 - Bilanz der Hersteller 2012 nach EU-Gesetz (EC 443/2009) $130\text{ g }CO_2/km$ betragen musste. Im Jahr 2013 lag der durchschnittliche CO_2 - Ausstoß von PKW in der EU noch bei $127\text{ g }CO_2/km$, dementsprechend gilt es eine Absenkung der Flotte um $32\text{ g }CO_2/km$ umzusetzen. Insbesondere Fahrzeughersteller großer luxuriöser Premiumfahrzeuge sind hier wesentlich stärker betroffen und müssen daher noch wesentlich mehr Maßnahmen umsetzen. Ein Grenzwert von $95\text{ g}/km\text{ }CO_2$ im Jahr 2021 bringt konventionelle verbrennungsmotorische Antriebe an ihre physikalische Grenze. Um die anspruchsvollen Ziele bis 2021 erreichen zu können, sind nicht nur umfangreiche Optimierungen klassischer Antriebe notwendig, sondern auch massive Elektrifizierungsmaßnahmen. Besonders sparsame Fahrzeuge werden mittels sogenannter „Supercredits“ für ihre außergewöhnliche Ökobilanz mehrfach belohnt. [34]

In den letzten Jahren haben viele Hersteller enorme Entwicklungskosten in Kauf genommen um Hybridfahrzeuge auf den Markt zu bringen, die im aktuell gültigen Verbrauchszyklus „Neuer Europäischer Fahrzyklus“ (NEFZ) große Teile rein elektrisch durchfahren können. Um das Ziel im Jahr 2021 zu erreichen, werden diese Maßnahmen je nach Fahrzeughersteller ausreichen, jedoch für noch ambitioniertere Ziele nach 2021 werden Emissionsreduzierungen nur mit einer Fahrzeugflotte erreichbar sein, die BEV – Battery Electric Vehicle Fahrzeuge enthält.

Die hohen Herstellkosten aufgrund der komplexen Technik und der zusätzlich benötigten Komponenten, wie Hochvoltspeicher und die elektrische Maschine, gehören zu den wesentlichen Nachteilen von Fahrzeugen mit elektrischen und hybriden Antriebssystemen. Damit man diese Nachteile wirtschaftlich ausgleichen kann, muss die Hybridtechnik äußerst effizient ausgelegt sein und die Betriebsstrategie intelligent darauf abgestimmt sein. Auf diese Weise kann man das maximale Potential der teuren Technik ausschöpfen. [39]

1.1 Motivation und Zielsetzung

Weltweit haben Städte mit zu hohen schädlichen Abgasemissionen zu kämpfen, insbesondere mit Feinstaub und Smog. Die Gesundheit vieler Menschen ist dadurch betroffen. In Europa wurde in vielen Städten bereits mit Umweltplaketten reagiert, teilweise geht man noch weiter und verhängt an manchen Tagen für ausgewählte Fahrzeuge Fahrverbote. Um die individuelle Mobilität mit Kraftfahrzeugen nicht zu gefährden, ist es notwendig, Kraftfahrzeuge effizienter und umweltfreundlicher für den Praxisbetrieb auf der Straße zu entwickeln.

Der Hauptansatz dieser Arbeit beruht darauf, dass rein elektrisch betriebene Fahrzeuge während der Fahrt lokal keine Abgasemissionen ausstoßen. Um die starke Konzentration von Emissionen jeglicher Art insbesondere in Städten zu reduzieren, ist der rein elektrische Antrieb der vernünftigste Lösungsansatz. In Innenstädten kommt zusätzlich der Effekt der Lärmreduzierung hinzu. Dies ist auch notwendig, um den Fortbestand der individuellen Mobilität langfristig sicherzustellen und die soziale Anerkennung dessen sicherzustellen.

Diese Masterarbeit ist in Zusammenarbeit mit der Abteilung „Fahrleistung und Verbrauch“ und deren Subabteilung „Elektrifizierte Fahrzeuge“ der Hauptabteilung „Effizient Dynamics“ der BMW AG und dem Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Graz entstanden. Aufgrund meiner Vorkenntnisse bezüglich Betriebsstrategien bei Hybridfahrzeugen, die ich im Rahmen meiner Bachelorarbeit erarbeiten konnte, wurde mir die Möglichkeit eingeräumt, an der Weiterentwicklung von elektrifizierten Fahrzeugen mitzuwirken und mich einzubringen.

1.2 Aufbau und Kapitelübersicht

Die Arbeit wie folgt:

In Kapitel 2 werden die allgemeinen Grundlagen und der Stand der Technik vorgestellt. Darin werden zu den verschiedenen Antriebstopologien von elektrifizierten Fahrzeugen die Grundlagen erläutert. Da im weiteren Verlauf der Arbeit vertieft in die Topologien eingegangen wird, wird in diesem Kapitel das Hauptaugenmerk auf Antriebstopologien, elektrische Funktionen und Eigenschaften eines elektrifizierten Fahrzeugs gelegt.

Ein umfangreicher Vergleich zwischen Plug-In-Hybridfahrzeugen und einem Elektrofahrzeug wird in Kapitel 3 gezogen. Dabei werden simulativ Unterschiede herausgearbeitet und in weiterer Folge durch Messungen verifiziert. Als Abschluss dieses Kapitels werden Effizienzsteigerungsmaßnahmen zu den behandelten Fahrzeugen vorgestellt.

In Kapitel 4 wird für BEV - Allradfahrzeuge eine Achsmomentstrategie entwickelt, welche auf eine höchst mögliche Effizienz getrimmt ist. Zuerst werden simulativ Untersuchungen mit konstanten Verteilungen bewertet und im Anschluss wird ein Tool für verschiedene Varianten von E-Maschinenkombinationen entwickelt. Zur Zielerreichung werden die Simulationsmodelle angepasst und es wird im Tool ein Algorithmus entwickelt. Abschließend werden die Potentiale der intelligenten Achsmomentregelung ausgewiesen und diskutiert.

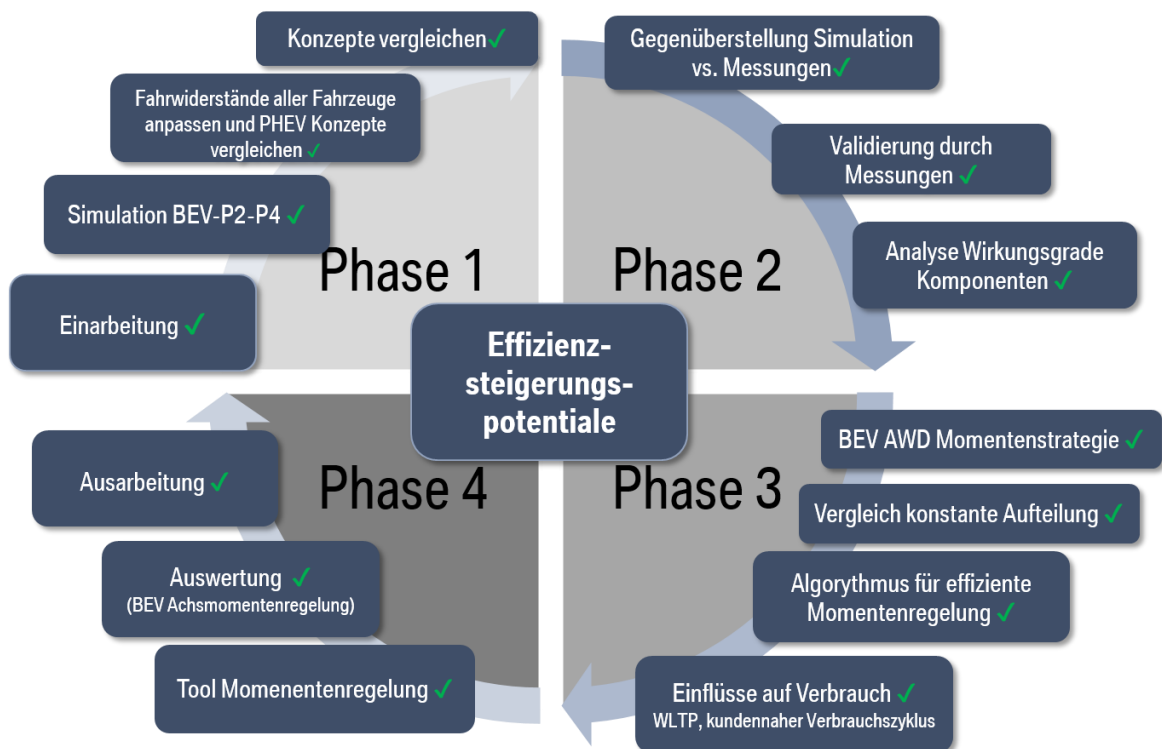


Abbildung 1.1: Vorgehen in der Arbeit

2 Grundlagen

2.1 Grundlagen und Methoden zur Senkung von Energiebedarf und Verbrauch

Zur Einleitung wird ein kurzer Abriss über Möglichkeiten der Effizienzsteigerungsmaßnahmen beim Kraftfahrzeug dargestellt.

2.1.1 Reduzierung der Fahrwiderstände

Die Fahrwiderstände stellen einen der entscheidendsten Stellhebel zur Verbrauchsreduzierung eines Gesamtfahrzeuges dar. Der Gesamtfahrzeugwiderstand stellt sich grob aus 4 Fahrwiderständen zusammen [25]:

- Rollwiderstand
- Luftwiderstand
- Steigungswiderstand
- Beschleunigungswiderstand

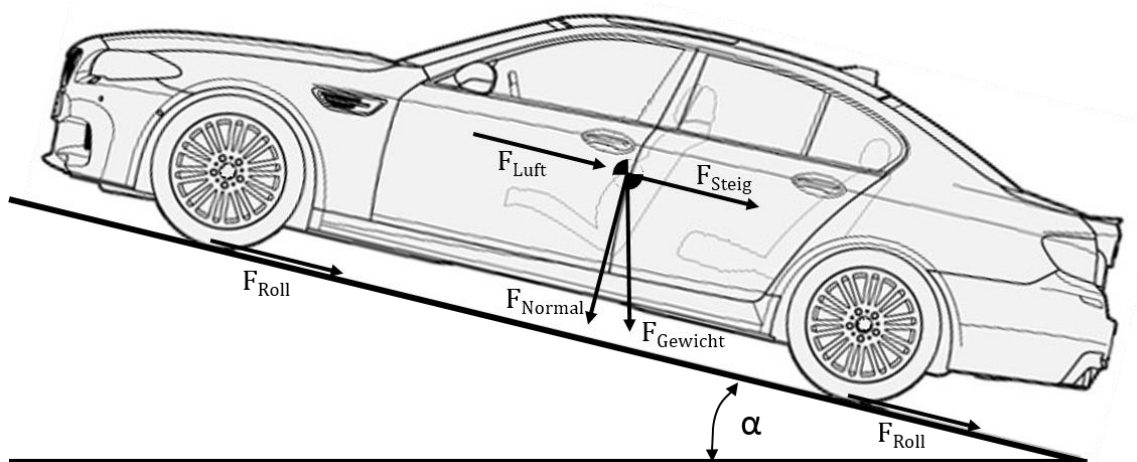


Abbildung 2.1: Längsdynamische Fahrwiderstände

$$F_{Luft} = \frac{\rho_{Luft}}{2} * c_w * A * v_{rel}^2 \quad [23; 25]$$

$$F_{Steig} = m_{FZG} * g * \sin(\alpha) \quad [25]$$

$$F_{Roll} = m_{FZG} * g * f_{Roll} * \cos(\alpha) \quad [25]$$

$$F_{Beschl} = m_{FZG} * a \quad [25]$$

$$F_{Fahr} = F_{Roll} + F_{Luft} + F_{Steig} + F_{Beschl} \quad [25]$$

$$P_{Fahr} = F_{Fahr} * v \quad [25]$$

Die benötigte Leistung setzt sich daher aus den Widerstandsleistungen $P_{wid} = f(F_{Luft}, F_{Steig}, F_{Roll}, F_{Beschl}, v, t, \dots)$ zusammen. Die benötigte Energie zum Antrieb des Fahrzeuges ergibt sich in weiterer Folge aus der Integration über der Zeit. Durch Optimierungen des Rollwiderstandes, der Aerodynamik und der Masse lassen sich daher erhebliche Verbrauchssenkungen realisieren. [39]

2.1.2 Elektrifizierung von Fahrzeugkomponenten

Durch die Elektrifizierung von Nebenaggregaten hat man in der Applikation und Auslegung die Möglichkeit, ursprünglich fest gekoppelte mechanisch betriebene Komponenten bedarfsgerecht zu regeln. In der Folge laufen Nebenaggregate, wie etwa Wasserpumpen, Lenkhilfesysteme oder Klimakompressoren nur bei Bedarf. Weiters können diese zu Gunsten einer effizienten Betriebsstrategie in ihrer Leistungsaufnahme reduziert werden. [17; 36; 38]

2.1.3 Optimierung des Verbrennungsmotors

Sofern ein Hybridfahrzeug im verbrennungsmotorischen Betrieb fährt, gilt es den Kraftstoffverbrauch sowie die Emissionen soweit es geht zu reduzieren. Stellhebel für eine Kraftstoffreduktion stellen die innermotorische Reibungsminimierung, Optimierung des Brennverlaufs, Aufladung, Optimierung des Lastwechsels und Anhebung der Motorlast durch zeitweises Abschalten mehrerer Zylinder dar [10]. Da Verbrennungsmotoren den Großteil ihrer Energie in Wärme umwandeln ist hier ein großer Stellhebel bezüglich des Wirkungsgrads des Gesamtfahrzeuges zu finden [39]. Ein Hybridfahrzeug hat zusätzlich die Möglichkeit eine Lastpunktanhebung durchzuführen [38]. Die beste Möglichkeit um den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeuges überhaupt zu vermeiden, ist rein elektrisch zu fahren. Die Energie für das elektrische Fahren muss zwar auch irgendwo gewonnen werden, jedoch kann diese elektrische Energie aus regenerativen Quellen, wie etwa aus Wasserkraft oder Photovoltaik stammen und damit sehr CO_2 - neutral gewonnen werden.

2.1.4 Intelligente Betriebsstrategie

Der Einsatz von intelligenten Betriebsstrategien ist mittlerweile unabdingbar, wenn man Hybridfahrzeuge und vollelektrische Fahrzeuge so effizient wie möglich applizieren möchte. In einer intelligenten Betriebsstrategie soll das Zusammenspiel der gesamten Komponenten aus Verbrennungsmotor, elektrische Maschine (EM), Nebenaggregate oder Komfortverbraucher so effizient und bedarfsgerecht wie möglich geregelt und gesteuert werden. Das Abschalten von Zündung und Einspritzung während der Schubphasen (Schubabschaltung), die Motor-Start-Stopp-Automatik (MSA) und eine intelligente Generatorregelung zählen zu Maßnahmen einer intelligenten Betriebsstrategie [21; 29]. Zusätzliche zyklisierbare Energiespeicher und mehrere Antriebsmaschinen bieten weitere Möglichkeiten zu Steigerung der Effizienz [25]. In dieser Arbeit wird unter anderem umfangreich auf intelligente Betriebsstrategien bei Battery-Electric-Vehicles (BEV' s) mit mehreren elektrischen Maschinen eingegangen und deren Potentiale aufgezeigt.

2.2 Definition elektrifizierter Fahrzeuge

Der Begriff „Hybrid“ wird aus dem Lateinischen abgeleitet und bedeutet übersetzt: „gebündelt, gekreuzt oder gemischt“ [18]. Ein Hybridfahrzeug wird dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei Energiewandler und zwei Energiespeichersysteme vorhanden sind. Als Energiespeicher kommen

chemische, mechanische oder, wie heute meistens verwendet, elektrische Energiespeicher zum Einsatz [14]. In dieser Arbeit werden ausschließlich hybride Systeme mit konventionellem Verbrennungsmotor und elektrischen Maschinen inklusive chemischem Hochvoltspeicher behandelt. Weitere Hybridformen, wie etwa Brennstoffzellen in Kombination mit Hochvoltspeichern zur Energiespeicherung und einer elektrischen Maschine zum Antrieb, werden hier nicht behandelt.

2.2.1 Serieller Hybridantrieb

Bei einem seriellen Hybriden sind die Energiewandler seriell miteinander verbunden, wie die Bezeichnung bereits impliziert. Das bedeutet, dass der Energiefluss vom Tank zu den Rädern immer in der gleichen Abfolge passiert. Ein Verbrennungsmotor erzeugt mechanische Energie, welche durch einen mechanisch verbundenen Generator in elektrische Energie umgewandelt und in weiterer Folge über einen Inverter (AC/DC-Wandler) in einem Hochvoltspeicher zwischengespeichert wird. Der eigentliche Antrieb des Fahrzeugs erfolgt durch eine elektrische Maschine, welche die Energie aus dem Hochvoltspeicher über den Inverter entnimmt oder direkt vom Generator im seriellen Betrieb gespeist wird. Rekuperation (Rückgewinnung von Energie beim Bremsen) erfolgt durch die elektrische Maschine, welche mit den Antriebsrädern verbunden ist. Als wesentliches Merkmal von seriell hybriden Antriebssträngen kann die fehlende mechanische Verbindung des Verbrennungsmotors mit den angetriebenen Rädern gesehen werden. Vorteile bietet dieses Konzept durch Betreiben des Verbrennungsmotors im effizientesten Betriebspunkt, verbunden mit geringen Emissionen sowie die Möglichkeit einer geräuscharmen Applikation. Nachteile ergeben sich dadurch, dass die zweifache Energieumwandlung erhebliche Wirkungsgradverluste des Gesamtsystems mit sich bringt. [2; 41]

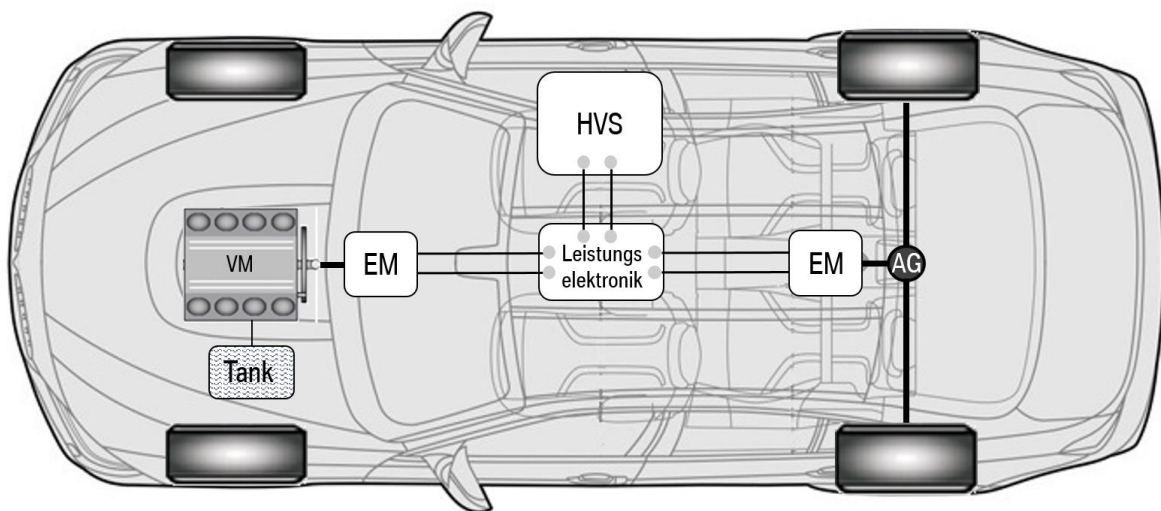


Abbildung 2.2: Schema eines seriellen Hybrid-Antriebs

2.2.2 Paralleler Hybridantrieb

Wenn man von einem Parallel-Hybridfahrzeug spricht, dann versteht man die Anordnung von Verbrennungsmotor und einer oder mehreren E-Maschinen im Verbund des mechanischen Antriebsstranges. Im Unterschied zu einem seriellen Hybrid besteht beim parallelen Hybriden eine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und den Rädern im Falle einer (oder mehrerer) geschlossenen Kupplung(en) im Antriebsstrang. Der wesentliche Vorteil dieser

Antriebstopologie besteht in der einfacheren Umsetzung und Integration in bestehende konventionelle Antriebsstränge. Eine rein elektrische Fahrt ist durch Trennen des Verbrennungsmotors mittels einer Kupplung umsetzbar.[39]

Als Vorteile von Parallel-Hybrid-Fahrzeugen erweisen sich die Möglichkeiten, nur eine E-Maschine zu implementieren, und dass die Leistung des Verbrennungsmotors direkt (also mechanisch) für den Vortrieb nutzbar ist.

Durch das Schließen der Trennkupplung und Zustarten des Verbrennungsmotors kann das System, unter Voraussetzung eines ausreichend hohen State of Charge der Batterie (SoC), die volle Systemleistung zur Verfügung stellen. Aufgrund der unterschiedlichen Umsetzungen zahlreicher Automobilhersteller haben sich verschiedene Arten des Parallel-Hybrid entwickelt.

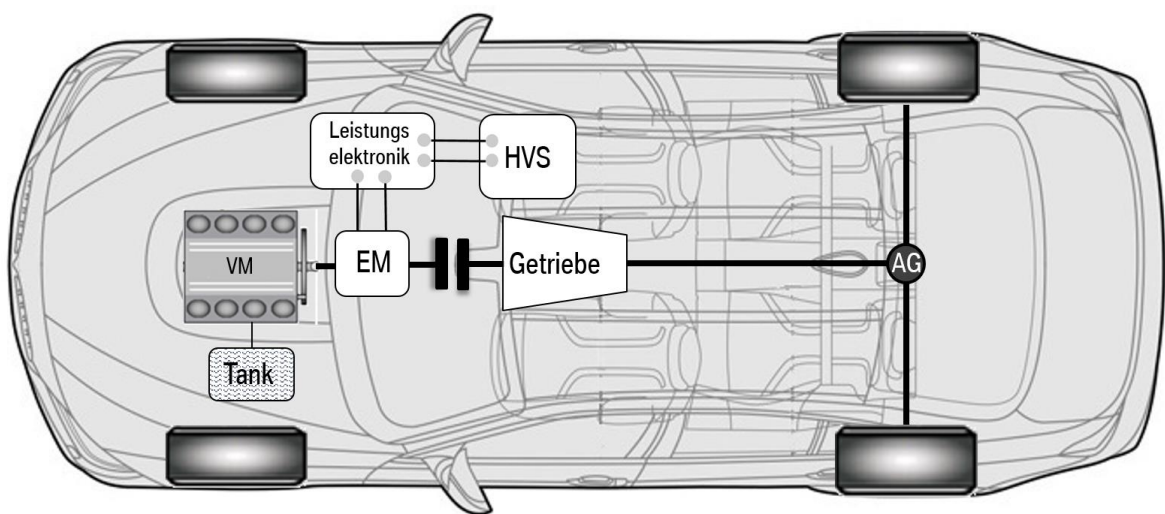


Abbildung 2.3: Schema eines P1- parallel hybriden Antriebsstrangs

Die erste Möglichkeit zur Ausführung eines Parallel Hybriden stellt das P1-Konzept dar. Es stellt eines der einfachsten Möglichkeiten dar, um ein Fahrzeug mit Standardantrieb zu elektrifizieren. Die E-Maschine sitzt in diesem Konzept noch vor der Trennkupplung zum Getriebe. Daher ist eine rein elektrische Fahrt in dieser Antriebstopologie nur mit geschlepptem Verbrennungsmotor möglich. Das hat dementsprechend den großen Nachteil, dass man die hohen Schleppverluste des Verbrennungsmotors in Kauf nehmen müsste. Somit ist der Vorteil der sich durch regeneratives Bremsen ergibt, als gering einzustufen. [28] Die E-Maschine kann in diesem Konzept einfach als KSG-System (Kurbelwelle-Starter-Generator System) umgesetzt werden, indem der Starter als Generator zur Rekuperation fungiert und als E-Maschine zum Antrieb Leistung zum Boosten bereitstellt. Neben dem KSG ist auch ein SGR-System (Starter-Generator System) möglich. Dabei fungiert der Generator, der bisher in Fahrzeugen als 12 V-Generator arbeitete, als Generator mit höherer Spannung. Ein 48 V System dieser Variante gibt es bereits bei deutschen Premiumhersteller in Serie. [14] Der große Vorteil des P1 - Systems ist die einfache Umsetzbarkeit und Implementierung in vorhandene Fahrzeugarchitekturen. Zusätzlich sind große Steigerungen der Fahrdynamik durch sehr schnelles Ansprechen, insbesondere in der Beschleunigungsspontanität, möglich.

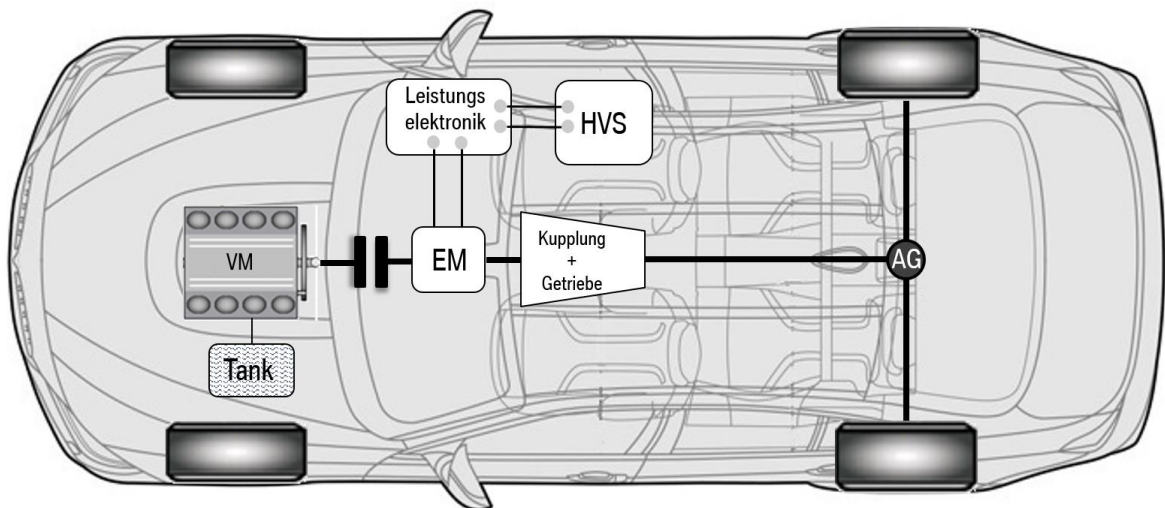


Abbildung 2.4: Schema eines P2 - parallel hybriden Antriebsstrangs

Der Parallel-Hybrid P2 ist ein klassisches Hybridkonzept mit reiner E-Fahr-Funktion. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Varianten des P2 – parallel hybriden Antriebsstranges. Zwischen der E-Maschine und dem Getriebe kann eine Wandlerkupplung (oder auch nur eine einfache Kupplung) verbaut sein. Die Start-Stopp-Funktion übernimmt in der Regel aufgrund des Bauraumes und der Kosten direkt die E-Maschine ohne zusätzlichen Starter, sodass der Verbrennungsmotor mit der E-Maschine gestartet werden kann. Alternativ als Variante 2 kann auf den Wandler verzichtet werden und eine Kupplung zum Anfahren im Getriebe installiert sein. [28] In dieser Arbeit wird ein Versuchsfahrzeug eines P2 – Parallel – Hybriden untersucht mit einem Getriebe der Variante 2 ohne Wandler.

Meist wird die E-Maschine im Getriebe integriert, was somit eine einigermaßen kostengünstige Umsetzung eines Hybriden darstellt. Mit dem P2-Hybrid ist es möglich rein elektrisch zu fahren und eine sportliche Fahrweise zu bieten, indem die E-Maschine boostet, sofern ein ausreichend hoher SoC des Hochvoltspeichers vorliegt. Im Schubbetrieb kann der Verbrennungsmotor abgekoppelt werden und die E-Maschine die kinetische Energie rekuperieren. Als schwierig erweist sich das ruckfreie Zustarten des Verbrennungsmotors. Die Applikation zum ruckfreien Zustarten ohne Response-Einbußen erweist sich als relativ schwierig.

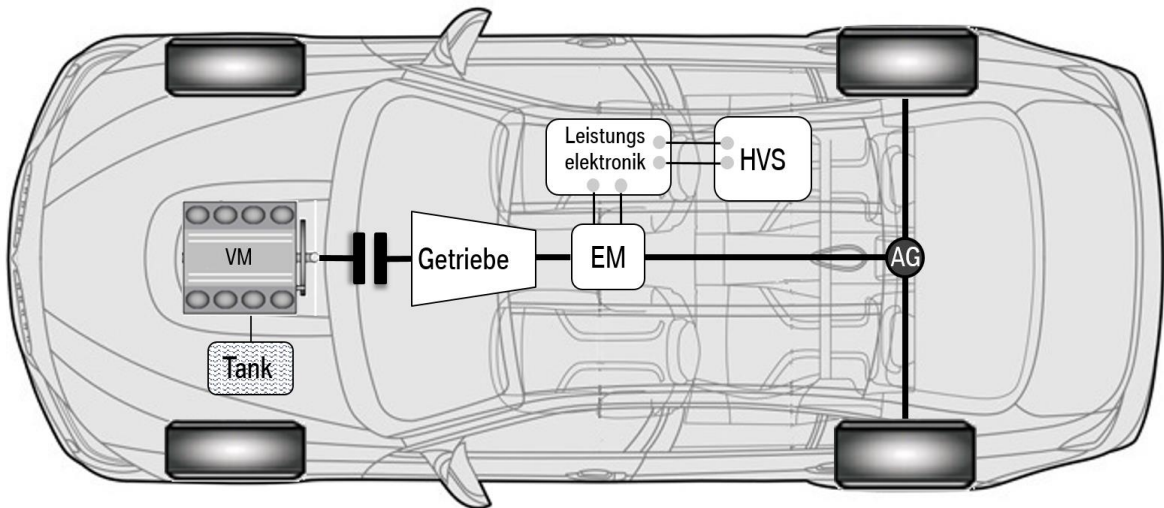


Abbildung 2.5: Schema eines P3 - parallel hybriden Antriebstrangs

Beim P3-Hybrid sitzt die E-Maschine zwischen dem Getriebeausgang und dem Achsgetriebe. Damit sind rein elektrisches Fahren samt Boosten bei hoher Lastanforderung, sowie das Rekuperieren möglich. Auch dieses System ist einfach in vorhandene Antriebe integrierbar, indem die E-Maschine am Getriebeausgang oder im Achsgetriebe platziert wird. Die Start-Stopp Funktion muss mit dem normalen Starter am Zweimassenschwungrad realisiert werden. Nachteile ergeben sich durch eine nur bedingte Fähigkeit, Lastpunktverschiebungen umzusetzen. Wenn der Verbrennungsmotor beim Verzögern vom Antrieb abgekoppelt wird, kann die elektrische Maschine generatorisch die Energie rekuperieren und im Hochvoltspeicher speichern. Die Rekuperation ist somit mit einem P3-Parallelhybrid möglich. Die rein elektrische Höchstgeschwindigkeit hängt von der E-Maschinenleistung- und der Drehzahl in Kombination mit der Übersetzung im Achsgetriebe ab. [27]

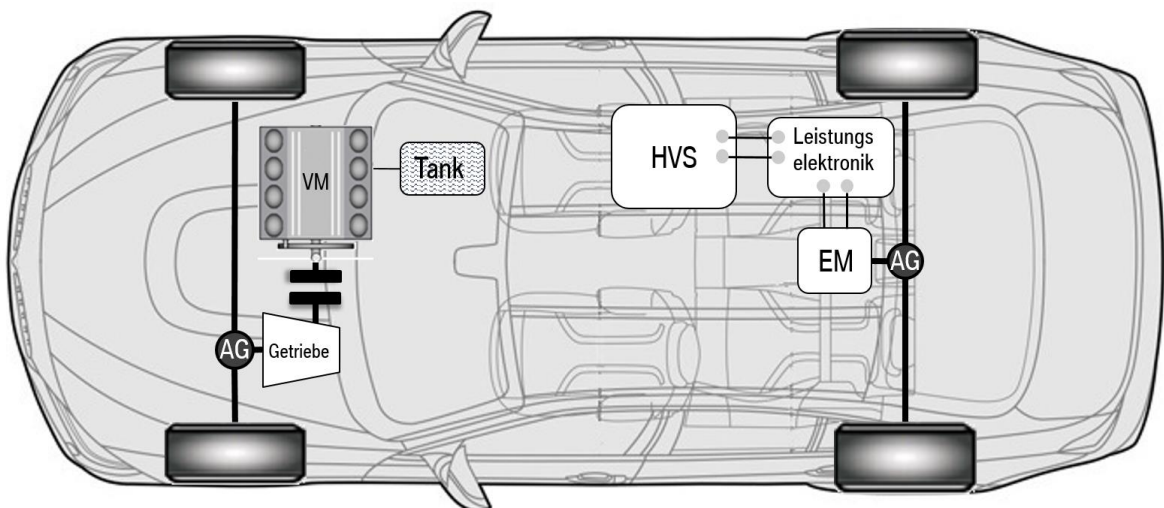


Abbildung 2.6: Schema eines P4 - Parallel hybriden Antriebstrangs

Beim Parallel-hybrid der Klasse P4, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, ist an einer Achse ein Verbrennungsmotor mit Schaltgetriebe und an der zweiten Achse eine E-Maschine mit Übersetzungsgetriebe und Differential platziert. Wie ein solches Übersetzungsgetriebe aussehen könnte, wird in Kapitel 2.6 vorgestellt. Es beispielhaft ist für ein P4-Serienhybridfahrzeug ein an der Hinterachse verbautes Übersetzungsgetriebe samt Differential zur Montage an der Hinterachse dargestellt.

Grundsätzlich ist es in diesem Konzept möglich, dass die E-Maschine und der Verbrennungsmotor an Vorder- und Hinterachse die Position der Antriebstopologie tauschen. Jedoch wird dieses Konzept eher auf Basis von Frontantriebsplattformen genutzt, welche an der Hinterachse zum rein elektrischen Fahren ein komplettes E-Modul aus E-Maschine, Getriebe und Abschaltkupplung verbaut haben.

In dieser Arbeit werden insbesondere näher auf die Topologien von P2 – Parallel - Hybriden und P4 – Parallel Hybriden eingegangen.

2.2.3 Leistungsverzweigter Hybridantrieb

Eine Kombination aus seriellem Hybrid und parallelem Hybrid stellt der leistungsverzweigte Hybrid (Abbildung 2.7) dar. Durch ein Planetengetriebe zwischen Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine besteht eine mechanische Verbindung mit den angetriebenen Rädern sowie eine mechanische Verbindung mit einer zweiten E-Maschine, welche die mechanische Energie in elektrische Energie wandeln und über einen Inverter im Hochvoltspeicher zwischenspeichern kann. Der Verbrennungsmotor gibt daher seine mechanische Leistung zum einen als elektrische Leistung ab und zum anderen als mechanische Leistung an die angetriebenen Räder weiter. Von Vorteil ist die relativ frei wählbare Verbrennungsmotordrehzahl, die den Betrieb in einem guten Wirkungsgradbereich des Motors ermöglicht. Ein elektrisches betätigtes stufenloses Getriebe ermöglicht eine schnelle und angenehme Regelbarkeit der E-Maschinenmomente und letztlich einen angenehmen komfortablen Zustand des Verbrennungsmotors. Als Nachteil erweist sich erneut die mehrfache verlustbehaftete Energieumwandlung [28].

In Personenkraftwagen stellt der leistungsverzweigte Hybrid die komplexeste Art eines Hybridantriebes dar. Aufgrund seiner Komplexität findet dieses Konzept nur bei wenigen Herstellern Anwendung. Zudem ist das Fahrgefühl synthetisch, sodass der/die Fahrer/-in aufgrund des CVT-Getriebes (Continuous-Variable-Transmission) das Fahrgefühl oftmals als unangenehm verspürt. Manche Fahrer/-innen mögen dieses synthetische Fahrgefühl. Andere, die ein direktes Gefühl zum Fahrzeug und zur Straße bevorzugen, verspüren dies als unangenehm.

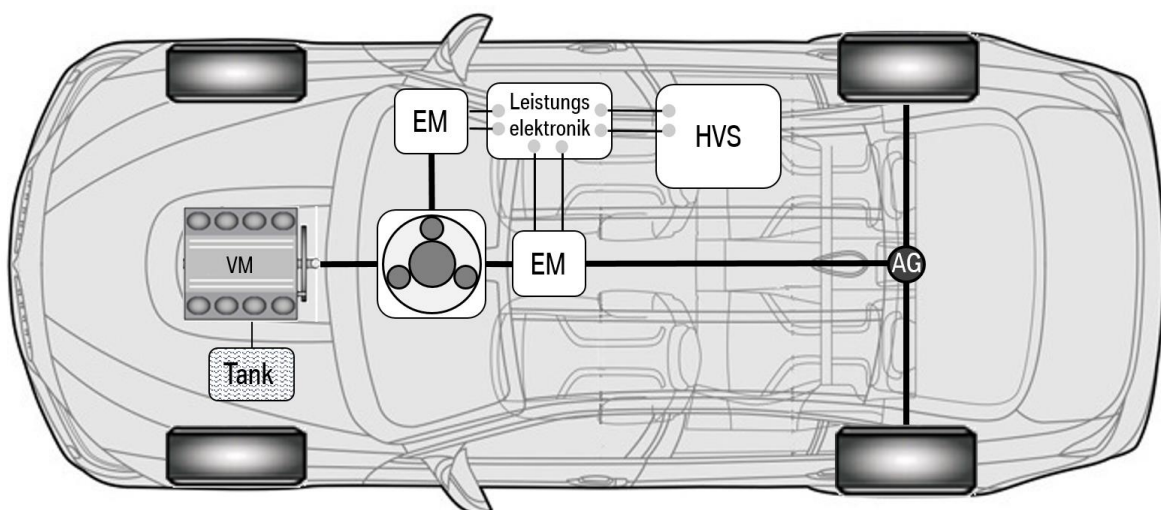


Abbildung 2.7: Schema eines leistungsverzweigten hybriden Antriebstrangs

2.2.4 BEV – Battery Electric Vehicle

Kommende Emissionsgrenzen, die Fahrzeughersteller über 2021 hinaus auffordern ihre Flottendurchschnittsverbräuche- und Emissionen noch weiter zu senken, zwingen die Fahrzeughersteller zu rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen, nämlich den sogenannten BEV - Fahrzeugen. Das Battery Electric Vehicle (zu Deutsch: batterieelektrisches Fahrzeug) hat sich enorm weiterentwickelt und die Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen weltweit nach oben getrieben.

Grundsätzlich ist ein reines Elektrofahrzeug, wesentlich einfacher aufgebaut, als ein Fahrzeug mit konventionellem verbrennungsmotorischem Antrieb oder etwa ein Hybridfahrzeug. Ein Zusammenspiel aus Verbrennungsmotor und einer oder mehreren elektrischen Maschinen ist hier nicht zu berücksichtigen. Nichtsdestotrotz kann man auch bei einem BEV durch intelligente Betriebsstrategien oder durch geeignete Steuerung der Nebenaggregate, sowie durch BEV-spezifische Komponenten den Energieverbrauch senken und damit die elektrische Reichweite erhöhen.

In Abbildung 2.8 ist ein BEV - Fahrzeug mit Heckantrieb dargestellt, da in dieser Arbeit im Kapitel 3 ein Bezug auf BEV - Fahrzeug mit Heckantrieb genommen wird. Es ist natürlich auch möglich, BEV - Fahrzeuge mit Frontantrieb auszuführen. Eine Variante als Allrad ist auch möglich. In Kapitel 4 wird speziell auf allradgetriebene BEV - Fahrzeuge eingegangen und eine mögliche Variante der Ausführung näher erklärt.

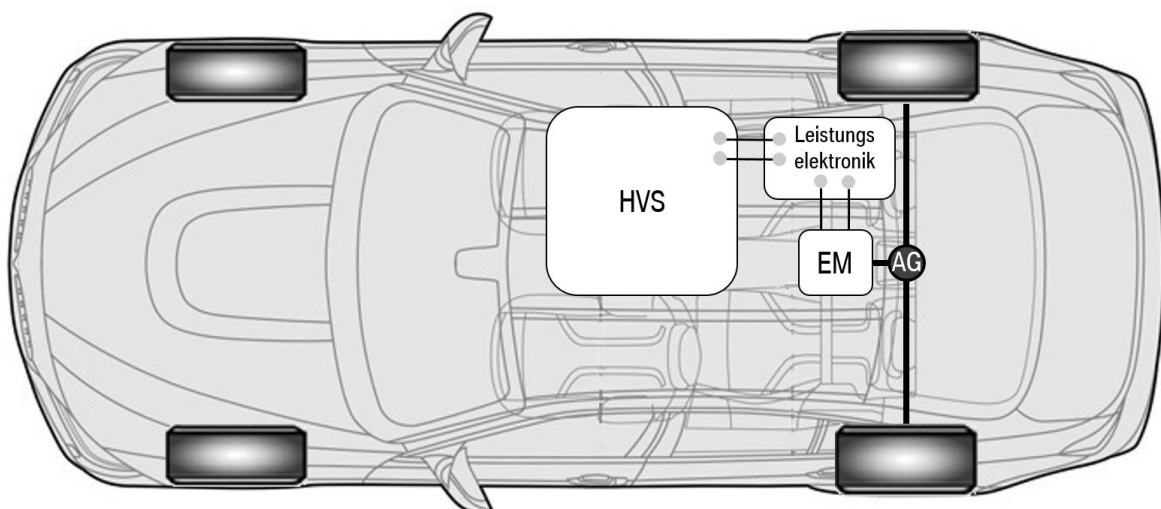


Abbildung 2.8: Schema des Antriebstrangs eines BEV - Battery Electric Vehicles

2.3 Elektrifizierte Eigenschaften (Antriebsfunktionen)

2.3.1 Plug-In-Hybrid (auch Full- Hybrid bezeichnet)

Durch Laden des HochvoltSpeichers im Fahrzeug über ein externes Stromnetz kann die Reichweite eines Hybridfahrzeugs enorm erhöht werden. Plug-In-Hybride (PHEV) sind grundsätzlich meist Vollhybride, das heißt, es ist ein rein elektrisches Fahren möglich. Größter Benefit eines elektrisch autarken Vollhybriden ist die Vergrößerung der elektrischen Reichweite und damit die Verbesserung der Zyklergebnisse im Charge Depleting- (Entladung) und im Charge Sustaining- (Ladungserhaltung) Modus. Abbildung 2.9 beschreibt die Entladung und die Ladungserhaltung [28]. Um in Testzyklen niedrige Kraftstoffverbräuche zu erzielen ist es notwendig, den Ladezustand so lange wie möglich zu halten. Dies erreicht man indem die negative Steigung der Gerade in Abbildung 2.9 so gering wie möglich gehalten wird. Damit dies möglich ist, muss das System so effizient wie möglich mit der chemischen Energie des Speichers umgehen. Diese These gilt vor allem für Testzyklen mit dem Hintergrund, während des Zyklus den geringsten gemessenen CO_2 - Ausstoß am Prüfstand zu ermitteln. Während realen Fahrten kann es in der Praxis Sinn machen, den Ladezustand teilweise zu halten oder zwischenzeitlich sogar zu erhöhen [39].

Mit dem Ziel niedrige Flottenwerte im CO_2 - Ausstoß zu erzielen, wird versucht die elektrischen Reichweiten von PHEV - Fahrzeugen stark zu vergrößern.

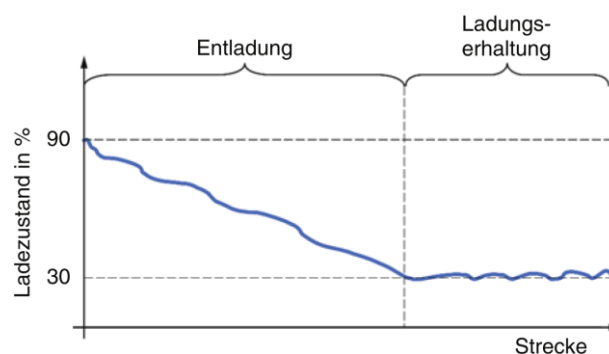


Abbildung 2.9: Betriebsweise von Plug-In-Hybridfahrzeugen [28]

2.3.2 Rein elektrisches Fahren

Bei Hybridfahrzeugen ist unter Voraussetzung ausreichender Dimensionierung der E-Maschinen und des HochvoltSpeichers ein rein elektrisches Antreiben des Fahrzeuges möglich. Aufgrund des Wirkungsgrades bei Verbrennungsmotoren in Kombination einer Betrachtung mit den Fahrwiderstandskurven ergibt sich bei Hybridfahrzeugen ein hohes Einsparpotential von Kraftstoff, wenn man bei niedrigen Geschwindigkeiten sowie niedrigen Lasten ein rein elektrisches Fahren umsetzen kann. Das rein elektrische Fahren hat die Funktion eines Energie-Puffers, sodass man den Wirkungsgrad eines VM im Mittel nach oben verschiebt. [37; 14] Stark weiterentwickelte hochmoderne Hybridfahrzeuge mit großen Kapazitäten der HochvoltSpeicher bieten die Möglichkeit weite Strecken von rund 50 km im NEFZ rein elektrisch zu durchfahren. Selbst komplette Zyklen wie NEFZ, FTP72 und Highway können rein elektrisch durchfahren werden.

2.3.3 SoC – State of Charge

Wiederaufladbare Batterien (Akkumulatoren) sind elektrochemische Energiespeicher, welche in der Technik beispielsweise in der Automobilbranche verwendet werden. Q_{Nenn} entspricht der Batteriekapazität und wird in [Ah] oder [As] angegeben. Dabei handelt es sich um eine Ladungsmenge und nicht um eine Kapazität im eigentlichen Sinn ($C = \frac{Q}{U} \left[\frac{As}{V} \right]$). Qualitativ gilt: Je geringer der Ladestrom und je wärmer die Batterie innerhalb des thermischen Betriebsfensters liegt, desto mehr Lademenge kann dem Speicher entnommen werden [39]. Wenn die Belastungsdauer verlängert wird, dann steigt der Innenwiderstand der Batterie und die Verluste nehmen zu. Mit steigender Stromentnahme des Speichers geht somit ein Sinken des Wirkungsgrades einher. Auf die Leistungsfähigkeit haben insbesondere chemische Degradationseffekte Einfluss, die zum einen vom Alter der Batterie abhängig sind und zum anderen vom Nutzungsverhalten des Kunden bezüglich Entnahmelistung und auch Laden des Speichers [11]. Häufiges Schnellladen mit hoher Leistung verringert die Lebensdauer um ein Vielfaches.

Der SoC(Ladezustand) eines chemischen Speichers ist wie folgt definiert: [27]

$$SoC(t) = \frac{Q|_{t_0} + \int_{t_0}^t I_{Bat} dt}{Q_{Nenn}} \quad (2.1)$$

2.3.4 Elektrische Maschinen

Im Bereich der Antriebstechnik von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen kommen hauptsächlich drei Varianten von E-Maschinentypen zum Einsatz [16]:

- Asynchronmaschinen (ASM)
- permanenterregte Synchronmaschinen (PSM) beziehungsweise Hybridsynchronmaschinen (HSM)
- stromerregte Synchronmaschinen (SSM) [16]

Asynchronmaschinen bieten Vorteile in der einfachen und kostengünstigen Herstellung. Der schlechte Leistungsfaktor, sowie eine niedrigere Effizienz sind negative Eigenschaften der ASM. Aus ökonomischer Sicht werden gerne ASM im Automobilbereich eingesetzt. Die permanenterregte Synchronmaschine vereint die Wirkung aus elektromagnetischer Reluktanz und die Wirkung der Permanentmagneten zur Drehmomentbildung. Die Leistungskurve und vor allem die Effizienz sind deutlich besser gegenüber der Asynchronmaschine. Der große Nachteil der PSM liegt vor allem in der Notwendigkeit von Magneten aus seltenen Erden im Umfang von etwa $\frac{1,5 \text{ kg}}{100 \text{ kW}}$. [16]

Die SSM hingegen weist die Vorteile der PSM auf ohne den Einsatz von Permanentmagneten. Der Grund für diese Charakteristik ist die Möglichkeit, die Magnetisierung des Rotors über den Rotorstrom einstellen zu können. Dadurch erreicht man einen exzellenten Wirkungsgrad im Teillastbereich und mit dem zusätzlichen Freiheitsgrad der Regelung der Maschine einen hervorragenden Leistungsfaktor. Verglichen mit den beiden anderen Konzepten liegt der Nachteil der SSM eindeutig in der schwierigeren Regelung der E-Maschine. Die einfachere Variante wäre es, Bürsten als Schleifkontakte zu verwenden. Dies würde jedoch bedeuten, dass die SSM dadurch stark

verschleißbehaftet wäre und damit nicht wartungsfrei. Anstatt einer konduktiven Energieübertragung mittels Bürsten und Schleifringen ist noch eine induktive Übertragung mittels eines Transformators möglich. Die Regelung wird allerdings dadurch weiter erschwert. [16]

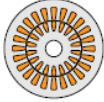
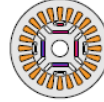

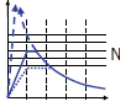
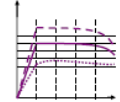
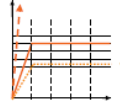

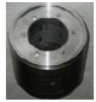
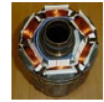
	ASM	HSM	SSM
Prinzip			
Großer Drehzahlbereich mit konstanter Leistung?	 Nein	 Ja	 Ja
Magnete	Nein	Ja: 1,5 kg/100 kW	Nein
Hauptnachteil	Tiefe Dauerleistung	Magnete	Aufwand, Konstruktion
Hauptvorteil	Keine Magnete	Leistungskurve	Keine Magnete Leistungskurve
Rotorpaket			

Abbildung 2.10: Vergleich E-Maschinentypen bei Elektrofahrzeugen [16]

Anhand von Abbildung 2.11 sieht man bereits welche guten Wirkungsgrade eine E-Maschine aufweisen kann. In dieser Abbildung handelt es sich um eine PSM, welche in einem Kleinkraftwagen eingesetzt wird. Im Bereich der 0 – Momentenlinie und bei kleineren Drehzahlen sinkt der Wirkungsgrad, jedoch im Teillastbereich herrschen Wirkungsgrade von über 90 %.

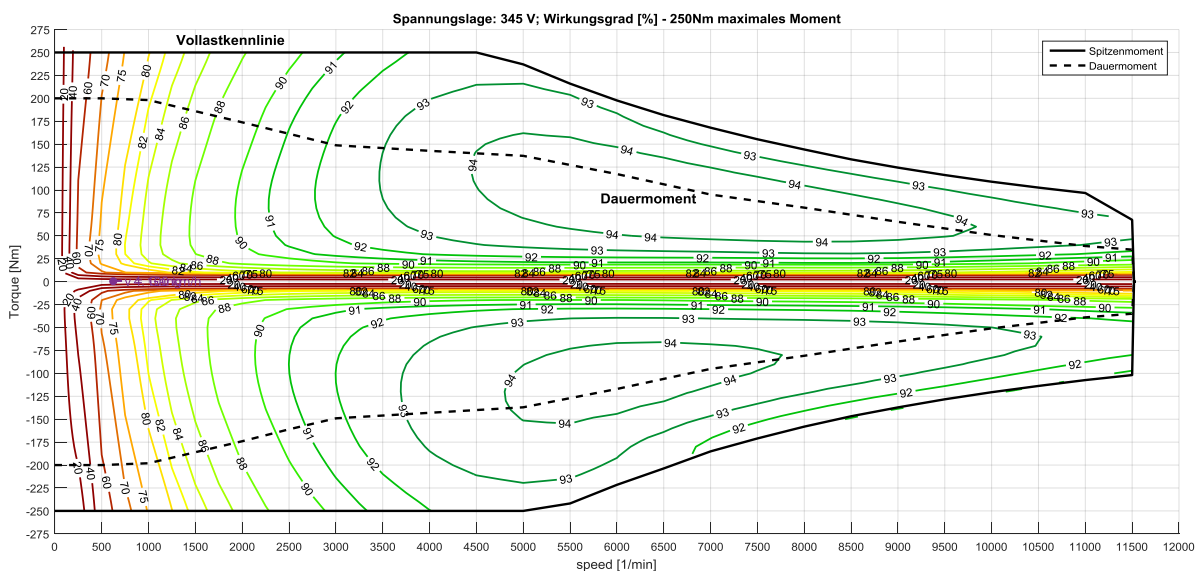


Abbildung 2.11: Qualitives Wirkungsgradkennfeld einer permanenten Synchronmaschine

2.4 Fahrzyklen

Standardisierte Fahrzyklen wurden mit dem Hintergrund der objektiven Vergleichbarkeit eingeführt. Sie stellen die rechtliche Basis für die Typzulassung in den jeweiligen Ländern dar. Die Grenzen für die Schadstoffemissionen, welche in den Zyklen gemessen werden, müssen die gesetzlichen Limitierungen einhalten, um eine Zulassung beziehungsweise eine Homologation für ein Fahrzeug zu erlangen. In den letzten Jahrzehnten sind die Grenzen der Schadstoffemissionen stark verschärft worden mit dem Hintergrund, Menschen und Umwelt weniger zu belasten. Neben der Limitierung schädlicher Abgasemissionen wurden CO_2 - Limits eingeführt, um die Effizienz der Fahrzeuge zu erhöhen.

Für die Untersuchung der Effizienzsteigerungspotentiale von PHEV - und BEV - Fahrzeugen in Kapitel 3 eignen sich gesetzliche Zyklen wie der FTP72 und der Highway optimal [32]. Um die Fahrzeuge bei niedrigen Lasten und niedrigen Geschwindigkeiten mit vielen Verzögerungsvorgängen bis zum Stillstand und dementsprechend auch vielen Beschleunigungsvorgängen zu betrachten, wird der FTP72 herangezogen. Im Highway - Zyklus werden die Fahrzeuge bei höheren Lasten und höheren Geschwindigkeiten ohne Stillstandphasen untersucht, insbesondere deshalb, da man die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen aus dem genormten Ablauf der Zyklen objektiv, unter Berücksichtigung von Toleranzen, vergleichen und analysieren kann. Die Simulationsergebnisse können somit durch Messungen verifiziert werden.

Da BEV - Fahrzeuge keine Probleme hinsichtlich Abgasemissionen in gesetzlichen Zyklen haben, ist es sinnvoll, Energieverbräuche und Reichweiten mit einem möglichst kundennahen Verbrauchszyklus zu bewerten. Reichweiten werden zukünftig in einem WLTP - Zyklus ermittelt, daher werden in einer ersten Abschätzung möglicher Potentiale mittels des WLTP - Fahrzyklus ermittelt. Für weitere Untersuchungen wird jedoch ein kundenaher Verbrauchszyklus herangezogen, da man großen Wert darauf legt, den maximalen Nutzen für Fahrer/-innen auf der Straße in der Praxis herauszufinden. Auch der WLTP enthält zu geringe Lasten, um die realen Fahrmanöver abzudecken und daraus realistische, praxisnahe Energieverbräuche und folglich Reichweiten zu ermitteln.

Für PHEV – Fahrzeuge ist die Vorgehensweise grundsätzlich ähnlich für alle Zyklen. Im ersten Schritt wird dem Fahrprofil gefolgt im Charge Depleting und anschließend im Charge Sustaining nach Abbildung 2.9. Umso länger die elektrische Reichweite ist, desto niedriger wird der angegebene CO_2 Ausstoß, welche in den Labelwerten angegeben wird.

2.4.1 FTP72

In den USA gilt grundsätzlich der FTP75 (Federal Test Procedure von 1975) Verbrauchszyklus, jedoch fällt bei BEV - und PHEV - Fahrzeugen der letzte Teil weg (siehe Abbildung 2.12 [32]). Der FTP75 besteht grundsätzlich aus drei Phasen. Einer kalten Übergangsphase (505 s), der stabilisierten Phase (867 s) und schließlich der warmen Übergangsphase (505 s). Die letzte Phase, die warme Übergangsphase, entspricht vom Fahrprofil der kalten Übergangsphase und fällt, wie oben erwähnt, bei BEV - und PHEV - Fahrzeugen weg. [32] In den US-Zyklen gilt es zu beachten, dass bei Messungen immer diejenige verbrauchte Energie angegeben wird, die elektrisch nachgeladen wird und nicht die verbrauchte Klemmenenergie. Somit wird der Energieverlust des HVST (=Hochvoltspeicher) während der Fahrt und während des Ladens mitberücksichtigt.

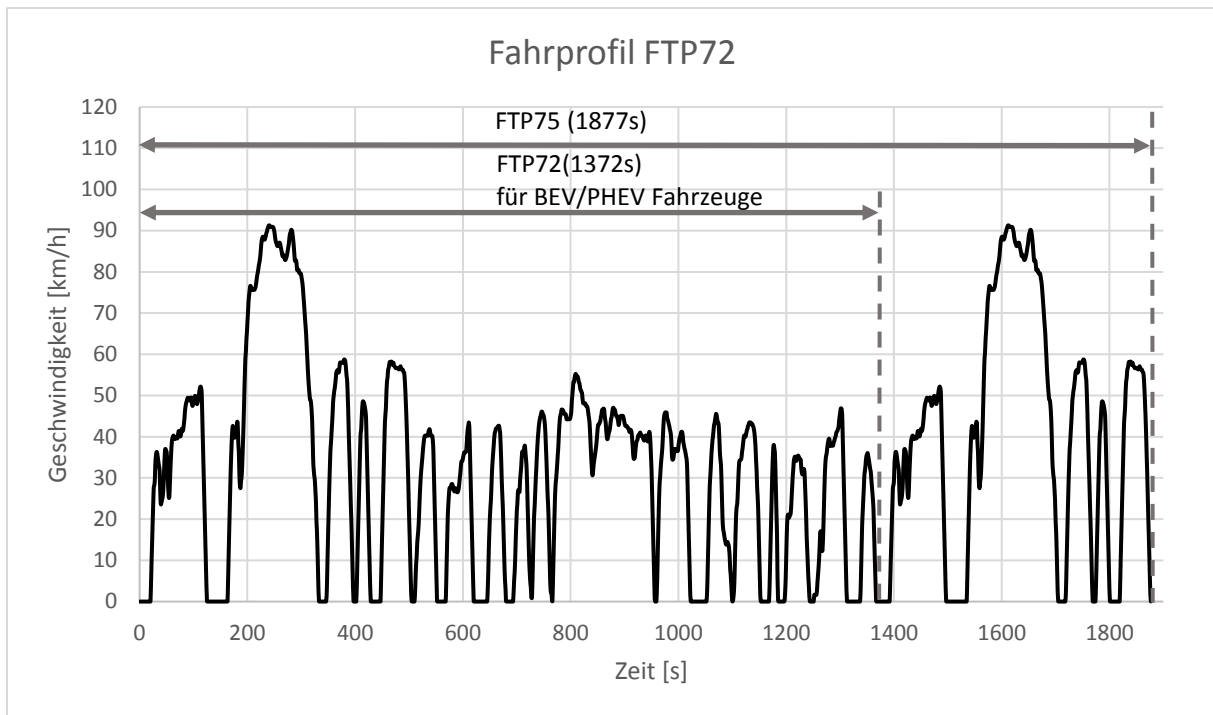


Abbildung 2.12: Fahrprofil FTP72 [32]

2.4.2 Highway

Für die Verbrauchs- und Reichweitenermittlung in den USA wird zusätzlich zum niedrig lastigen Fahrprofil FTP72 ein Highway Zyklus gefahren. Dieser Zyklus soll höhere Lasten, sowie höhere Geschwindigkeiten abbilden und in den Labelwert mit einfließen lassen. Dieser Zyklus wird im Kapitel 3 zum Thema Effizienzsteigerungspotentiale PHEV im E-Modus zusätzlich zum FTP72 verwendet, um Untersuchungen bei höheren Geschwindigkeiten mit geringen Verzögerungen durchzuführen.

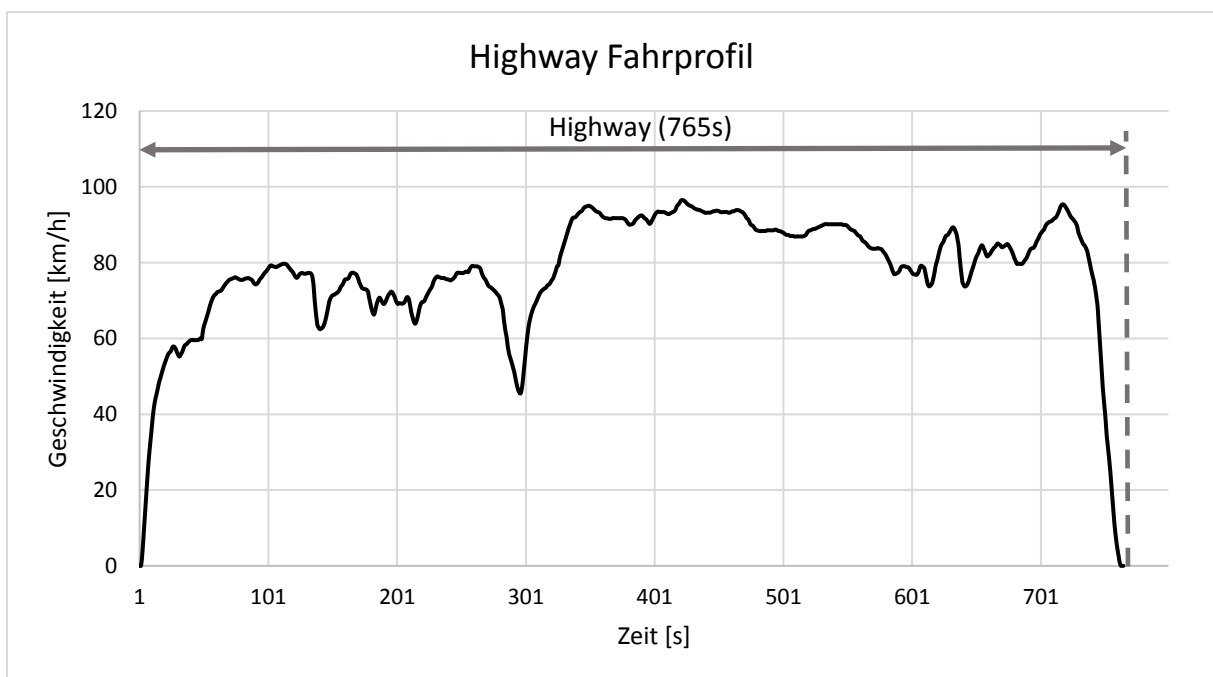


Abbildung 2.13: Fahrprofil Highway [18]

2.4.3 NEFZ – Neuer Europäischer Fahrzyklus

Der Neue Europäische Fahrzyklus ist aufgrund seines synthetischen Fahrprofils ohne Mehrwert für die Kunden seit Beginn der Einführung bereits in der Kritik. Das Fahrprofil entspricht in der Praxis nicht einer Fahrt mit einem Automobil im 21. Jahrhundert, da die aus den Beschleunigungen des Fahrprofils heraus resultierenden Lasten viel zu gering sind. Auch die Stehzeiten sind mit 24% im gesamten Zyklus viel zu hoch um einen realistischen Verbrauch auf der Straße wiederspiegeln zu können. Die Maximalgeschwindigkeit beträgt lediglich 120 km/h und wird auch nur für rund 8 Sekunden gehalten. Das Fahrprofil ist wenig volatil und ist von vielen Konstantfahrten und Stillstandsphasen geprägt. Die Randbedingungen sind so gewählt, dass zu optimistische Verbräuche der Fahrzeuge die Folge sind. Nebenverbraucher können vollständig deaktiviert werden und vor allem der große Verbrauchseinfluss der Klimaanlage fällt weg, da diese deaktiviert werden dürfen. In den Labelwerten der Fahrzeuge werden somit fiktive Verbrauchswerte angegeben, die in der Praxis nicht einhaltbar sind.

Die Gegenüberstellung der Zyklen in Tabelle 1 zeigt wichtige Parameter wie Durchschnittsgeschwindigkeit und Höchstgeschwindigkeit. Daraus lässt sich bereits ableiten, dass eine mittlere Geschwindigkeit von 34 km/h nicht der Realität entsprechen kann. Dies hat nämlich auch zur Folge, dass der Fahrwiderstand aus dem Luftwiderstand aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit, welcher zur 2. Potenz eingeht, nicht zum Tragen kommt. Vor allem die zu geringe Volatilität in Kombination mit zu geringen Beschleunigungen ergeben zu geringe Kraftstoff- und Energieverbräuche der Fahrzeuge bei einer Messung am Rollenprüfstand. Zusätzlich wird der Zyklus bei einer Umgebungstemperatur von $20 - 30^\circ\text{C}$ ermittelt. [1] Bei niedrigen Temperaturen ist die Heizung aktiv und bei höheren Temperaturen ist die Klimaanlage aktiv. Somit ergeben sich aufgrund vieler ausgeschalteter Nebenverbraucher im der Messung des NEFZ Unterschiede im Kraftstoff- und Energieverbrauch zur Praxis.

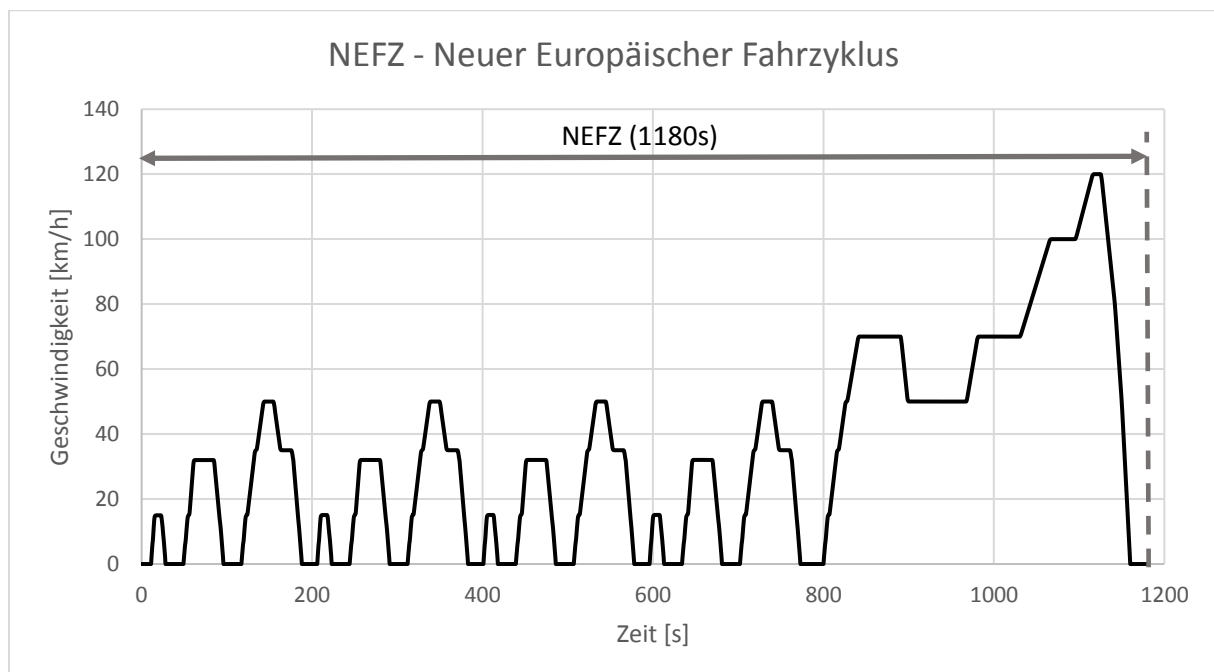


Abbildung 2.14: Fahrprofil NEFZ [18]

In Abbildung 2.15 wird die Vorgehensweise zur Ermittlung des CO_2 Ausstoßes grafisch dargestellt. Zu Beginn wird nach der Vorkonditionierung und dem Laden e-Reichweite ermittelt. Anschließend wird nach einer weiteren Vorkonditionierungsphase der Charge Sustaining Kraftstoffverbrauch und der damit einhergehende CO_2 Ausstoß ermittelt. Aus dem Utility Factor und dem CO_2 Ausstoß wird anschließend der angegebene CO_2 Ausstoß errechnet. [1]

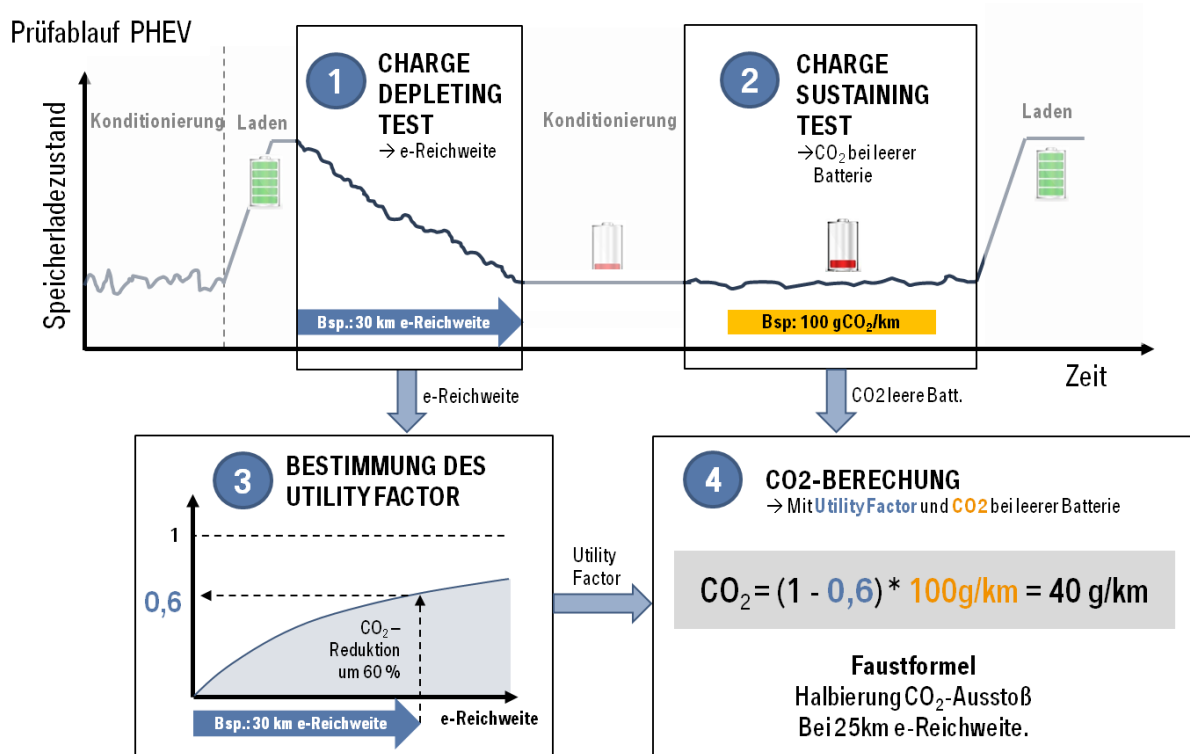


Abbildung 2.15: Darstellung zur Ermittlung des CO_2 Ausstoßes eines PHEV-Fahrzeuges [6]

Die aktuelle Regelung besagt, dass neue Fahrzeuge bis August 2017 im NEFZ noch typisiert werden dürfen. Ab 1. September 2018 müssen dann alle Fahrzeuge im WLTP typgeprüft werden. Für den Flottenausstoß hat die EU-Kommission eine Korrelation ausgearbeitet, mit der vom Verbrauch des WLTP auf den Verbrauch des NEFZ zurückgerechnet werden kann. [33] Bis zum Ziel 2021 den Durchschnittsflottenverbrauch aller Hersteller abhängig vom Gewicht der Fahrzeuge auf $< 95g/km$ (nach NEFZ) zu reduzieren, spielt daher der NEFZ immer noch eine bedeutende Rolle. Abhängig vom durchschnittlichen Fahrzeuggewicht der Hersteller, gibt es eine festgelegte Grenze des Flottendurchschnittsverbrauch. Wenn das Durchschnittsgewicht der Fahrzeuge eines Herstellers hoch ist, so ist auch der einzuhaltende Grenzwert höher. Bei Herstellern mit kleinen Fahrzeugen und demnach niedrigen Gewichten der Fahrzeuge kann der einzuhaltende Grenzwert auch unter die $95g/km$ Marke fallen. [15] Zusätzlich gibt es sogenannte „Supercredits“, die sich Fahrzeughersteller verdienen können, wenn sie besonders sparsame Fahrzeuge unter $50g/km$ verkaufen. Für lokal völlig emissionsfreie Fahrzeuge wie BEV's gibt es nochmals verbesserte Flottenverbräuche. [34]

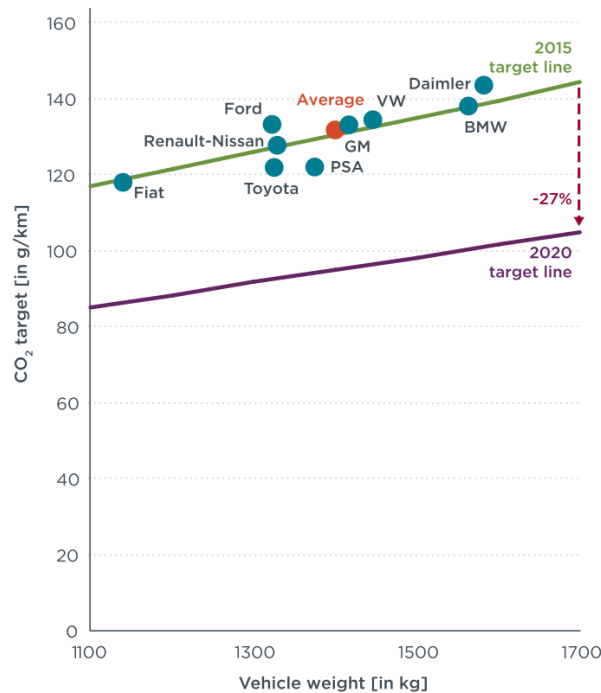


Abbildung 2.16: Grenzwerte der EU für CO_2 - Emissionen der Flottenverbräuche der Hersteller [15]

2.4.4 WLTP - Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

Der WLTP wurde eingeführt um den NEFZ zu ersetzen und in weiterer Folge Verbrauchswerte auf den Labelwerten der Fahrzeuge anzuführen, welche in der Praxis wesentlich näher kommen als jene Verbrauchswerte des NEFZ.

Anhand weltweit gesammelter Daten wurde ein Zyklus entworfen, der vom Innenstadtverkehr bis zur Autobahnfahrt verschiedene Fahrsituationen abdeckt. Der WLTP ist wesentlich dynamischer, denn dieser hat deutlich höhere Beschleunigungs- und Verzögerungsanteile als im NEFZ. Die Durchschnittsgeschwindigkeit liegt mit $46,6 \text{ km/h}$ rund $12,6 \text{ km/h}$ höher und die Maximalgeschwindigkeit ist mit 131 km/h ebenfalls 11 km/h höher als im NEFZ. Ziel des WLTP ist es, die Realität so gut wie möglich abzubilden und unter genormten Bedingungen reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. [35] Bei Kraftfahrzeugen über 135 km/h wird das Fahrprofil in die vier Sektoren: Low, Medium, High und Extra High unterteilt. [40]

Die Angaben zu CO_2 - Emissionen, Kraftstoffverbrauch, elektrischer Verbrauch und Reichweite werden wie beim NEFZ ausgewiesen. Mit einem Utility Faktor werden die CO_2 - Emissionen für den Charge Depleting Modus, den Charge Sustaining Modus berechnet und schließlich wird der elektrische Energieverbrauch errechnet. [40]

Allgemein kann gesagt werden, dass hohe elektrische Reichweiten die Emissionen, insbesondere CO_2 - Emissionen, der Labelwerte erheblich senken. Daher wird in dieser nur auf rein elektrische Verbräuche und Reichweiten eingegangen und Kraftstoffverbräuche werden nicht behandelt.

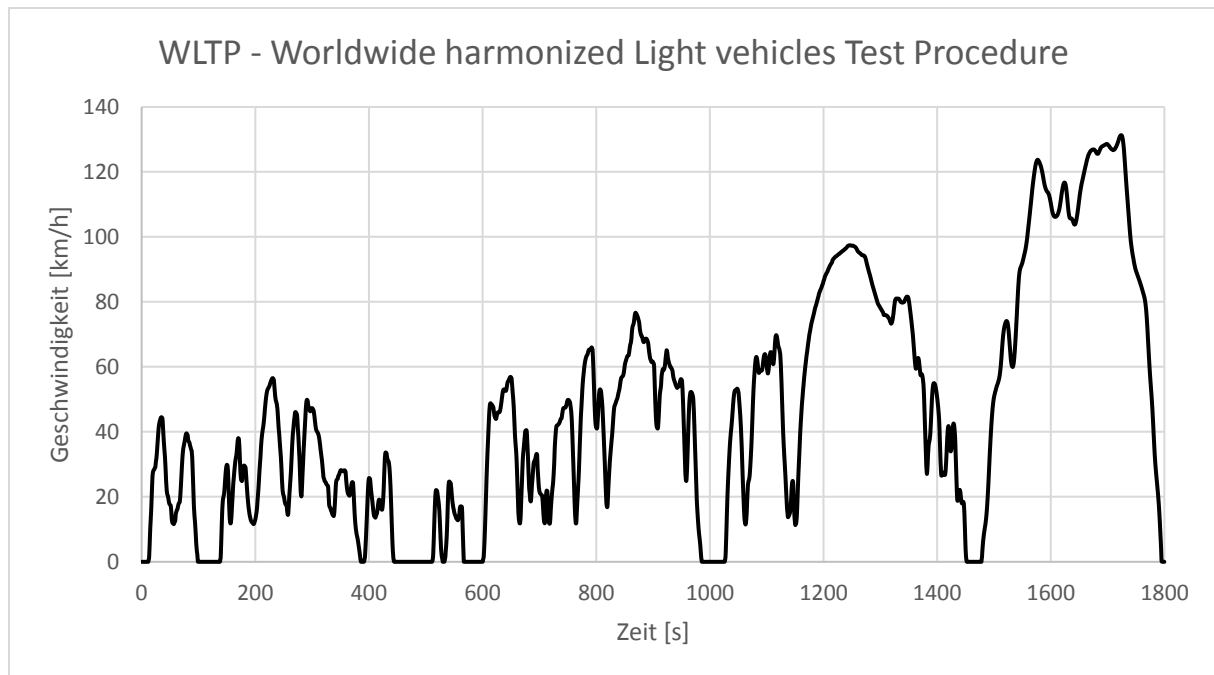


Abbildung 2.17: WLTP - Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure [18]

2.4.5 Mittlerer Kundenverbrauchszyklus

Zur Untersuchung der BEV - AWD Strategie wird in dieser Arbeit ein mittlerer Kundenverbrauchszyklus herangezogen, der mit einer Maximalgeschwindigkeit von 150 km/h und einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 60 km/h das Fahrverhalten eines mittleren durchschnittlichen Kunden darstellen soll. Aus der Fahrprofilkurve ergibt sich, dass das Geschwindigkeitsprofil zum einen niedrige Lasten und Standzeiten einer Stadtfahrt enthält, aber auch dynamische Lasten mit höheren Geschwindigkeiten, wie etwa auf Landstraßen und Autobahnen, auftreten können. Wie man anhand des Geschwindigkeitsprofils erkennen kann, besitzt dieser Zyklus eine hohe Volatilität, was somit das Fahrverhalten eines mittleren Kunden in der Praxis abdecken sollte.

Damit Klimaanlage und die Heizungen für den Innenraum sowie den Hochvoltspeicher (HVS) aktiviert sind, werden die Fahrzeuge auf $10 \text{ }^\circ\text{C}$ vorkonditioniert und die Prüfumgebung hat ebenfalls eine Temperatur von $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Somit sind die wichtigsten Parameter für einen objektiven Vergleich einer wissenschaftlichen Arbeit erfüllt.

Viele Untersuchungen der BMW Group AG haben gezeigt, dass dieses Fahrprofil mit der Randbedingung von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ den Jahresdurchschnittsverbrauch aller Kunden am besten abdeckt. Daher wird in den Untersuchungen zu den BEV - Fahrzeugen in Kapitel 4 dieses Fahrprofil gewählt, um möglichst kundennahe elektrische Verbräuche sowie Reichweiten zu ermitteln. Zusätzlich ist dies wichtig, da man in Kapitel 4 eine Methodik entwickelt, die BEV - Fahrzeuge effizienter machen soll. Hier ist es wichtig, dass diese Ergebnisse mit einem praxisnahen Fahrzyklus überprüft werden. Der Nutzen dieser Methodik soll damit vor allem bei den Kunden/-innen ankommen. In eventuellen realen Verbrauchsmessungen soll die verbrauchte elektrische Energie damit ebenfalls gute Werte liefern.

Zusammenfassend sind die wichtigsten Parameter der genannten Zyklen in Tabelle 1 dargestellt. Der mittlere Kundenverbrauchszyklus wird als Zyklus zur Bewertung der Effizienz und der Reichweiten von BEV - Fahrzeugen in Kapitel 4 herangezogen. Anhand der mittleren Geschwindigkeit und vor allem der maximalen Geschwindigkeit in Tabelle 1 ist bereits ersichtlich, dass er mittlere Kundenverbrauchszyklus äußerst hohe Lasten abdeckt und damit sehr kundenahe Verbräuche abbildet.

Parameter	NEFZ	FTP75	Highway	WLTP	Mittlerer Kundenverbrauchszyklus
Starttemperatur [°C]	kalt	kalt	warm	kalt	kalt
Zykluszeit	20	31	13	30	32
Stadtzeitanteil [%]	24	18	1	13	8
Zykluslänge [km]	11	18	17	23	32
Mittlere Geschwindigkeit [km/h]	34	34	78	47	59
Maximale Geschwindigkeit [km/h]	120	91	96	131	150

Tabelle 1: Übersicht der wichtigsten Parameter der verwendeten Fahrzyklen [18]

2.5 Simulationsumgebung

In der Entwicklung moderner Fahrzeuge werden verschiedenste Entwicklungsmethoden angewendet und unterschiedlichste Arbeitsumgebungen genutzt. Es ist oft sehr aufwendig, Versuche in einem realen Praxistest durchzuführen, insbesondere wenn man vergleichbare Ergebnisse erhalten möchte. Entwickler bedienen sich daher verschiedenster Simulationstools zur Vorhersage von Fahrleistungen, Verbrauch und zur Auswertung der Ergebnisse. Insbesondere für Fahrzeuge, die sich in der frühen Entwicklungsphase befinden und es noch keine physischen Prototypen für etwaige Tests gibt, eignen sich Simulationstools.

In der BMW AG werden verschiedenste Simulationstools verwendet, die die Entwicklungsarbeit der Ingenieure massiv unterstützen und Ressourcen sparen. Um Effizienzmaßnahmen des Gesamtfahrzeuges zu bewerten, sind in der Hauptabteilung EG - 6, „Efficient Dynamics“, Gesamtfahrzeugmodelle entwickelt und modelliert worden. Diese Modelle werden verwendet, um Fahrleistungs-, Verbrauchs-, Leichtbau-, Gewichts-, Aerodynamik-, Wärmemanagement- und Aerodynamikveränderungen zu analysieren. Für diese Anwendungsbereiche wurden Simulationstools entwickelt und für diese Anwendungen maßgeschneidert. Die für die vorliegende Arbeit notwendigen Tools sind SIGMA und Dymola. [20] Der Aufbau und die Funktionsweise der Tools werden im Folgenden erklärt.

2.5.1 SIGMA

SIGMA (Simulationsumgebung Gesamtfahrzeug für Energie- und Wärme-Management) ist ein Simulationstool der BMW-AG, welches in Zusammenarbeit mit der Firma TESIS zur Ansteuerung für Gesamtfahrzeugmodelle in Dymola entsandt ist.

Die Hauptaufgabe des Tools besteht darin, Fahrleistung, Wärme-/Energiemanagement und Verbrauch der gesamten BMW-Group Flotte im gesamten Produktentwicklungsprozess darzustellen. Gesamtfahrzeugfunktionen und Gesamtfahrzeugkonzepte können damit bewertet und abgebildet werden. Zusätzlich können auf dieser Ebene einzelne Funktionen und Komponenten angepasst und dimensioniert werden.

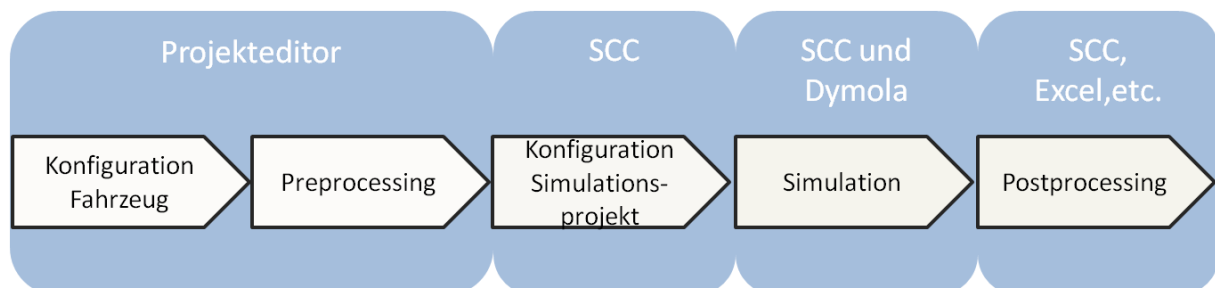


Abbildung 2.18: Übersicht Simulationsvorgang in SIGMA nach [20]

Über das SIGMA Control Center (SCC) werden der Projekteditor gestartet, die Datensätze der einzelnen Fahrzeugbaugruppen ausgewählt und aus einer Datenbank geladen. Damit ist die Grundbedatung des Gesamtfahrzeugmodells festgelegt. Im SCC werden die Simulationsprojekte verwaltet und durch eine Vielzahl von Auswahl- und Einstellmöglichkeiten definiert. Nach dem Starten der Simulation wird vollautomatisch das Simulationsprogramm *Dymola* geöffnet und sämtliche notwendigen Bibliotheken geladen. Dabei wird die Bedatung, welche in SCC voreingestellt wurde, übergeben. *Dymola* kompiliert das Model anschließend selbstständig und startet die Berechnung der Simulation. [20]

Falls keine Neumodellierungen für neue Fahrzeugkonzepte notwendig sind, können alle Parameter in SCC gesetzt und nach Auswählen der Simulationsaufgabe an *Dymola* weitergegeben werden. SIGMA ermöglicht mit einer benutzerfreundlichen Simulationsumgebung, Fahrzeugkonzepte mittels virtueller Modelle hinsichtlich Verbrauch, Fahrleistung und Reichweite zu analysieren. [20]

2.5.2 Dymola

*Dymola*¹ (Dynamic Modeling Laboratory) ist ein Modellierungs- und Simulationstool der Firma Dassault Systems-, welches mit der offenen Programmiersprache *Modelica*² arbeitet. Mit Hilfe des Simulationstools *Dymola* lassen sich physikalische Zusammenhänge darstellen und simulieren. [5]

In der Gesamtfahrzeugentwicklung der BMW-Group wurden dafür zahlreiche Bibliotheken für unterschiedlichste Fahrzeugkonzepte mit konventionellen Antrieben, Hybridantrieben oder beispielsweise rein elektrischen Antrieben entwickelt.

¹ Kommerzielle Software des schwedischen Unternehmens Dynasim www.dyasim.com

² Seit 1996 entwickelte Programmiersprache von der Modelica Association www.modelica.org

Konkret sind folgende Bibliotheken hinterlegt:

- Energy Library: Basis für andere Bibliotheken, enthält Modelle für konventionelle Fahrzeuge
- Hybrid Library: beinhaltet Modelle für Hybridfahrzeuge
- EDRIS Library: enthält Systemmodelle für BEV - Fahrzeuge
- EDRISLibComponents: enthält die einzelnen Komponenten für den E-Fahrertrieb
- EdrisLib_SysModels: enthält Systemmodelle für den grundsätzlichen Aufbau von elektrifizierten Fahrzeugen

Die Modelle sind in Form von Blockdiagrammen aufgebaut und besitzen eine hierarchische Struktur. In solchen Blockdiagrammen sind bereits die meisten Grundfunktionen in den einzelnen Bibliotheken integriert und können bei Bedarf beliebig ins Gesamtmodell integriert werden. Auf Code-Ebene können einzelne Funktionen nach Bedarf beliebig geändert werden und individuell für den jeweiligen Anwendungsbereich angepasst werden. [20; 5]

2.5.3 Simulationsmodelle

Bevor die Fahrzeuge simuliert werden können, wird zur Simulation der PHEV - Fahrzeuge ein Gesamtfahrzeugmodell, wie in Abbildung 2.19 dargestellt, aus *Dymola* herangezogen. Die Parameter werden, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, bedatet und geladen. Das Gesamtfahrzeugmodell wird für die beiden untersuchten Antriebstopologien für das P2 - und das P4 - PHEV - Fahrzeug angepasst, indem verschiedene Pakete der Libraries geladen werden.

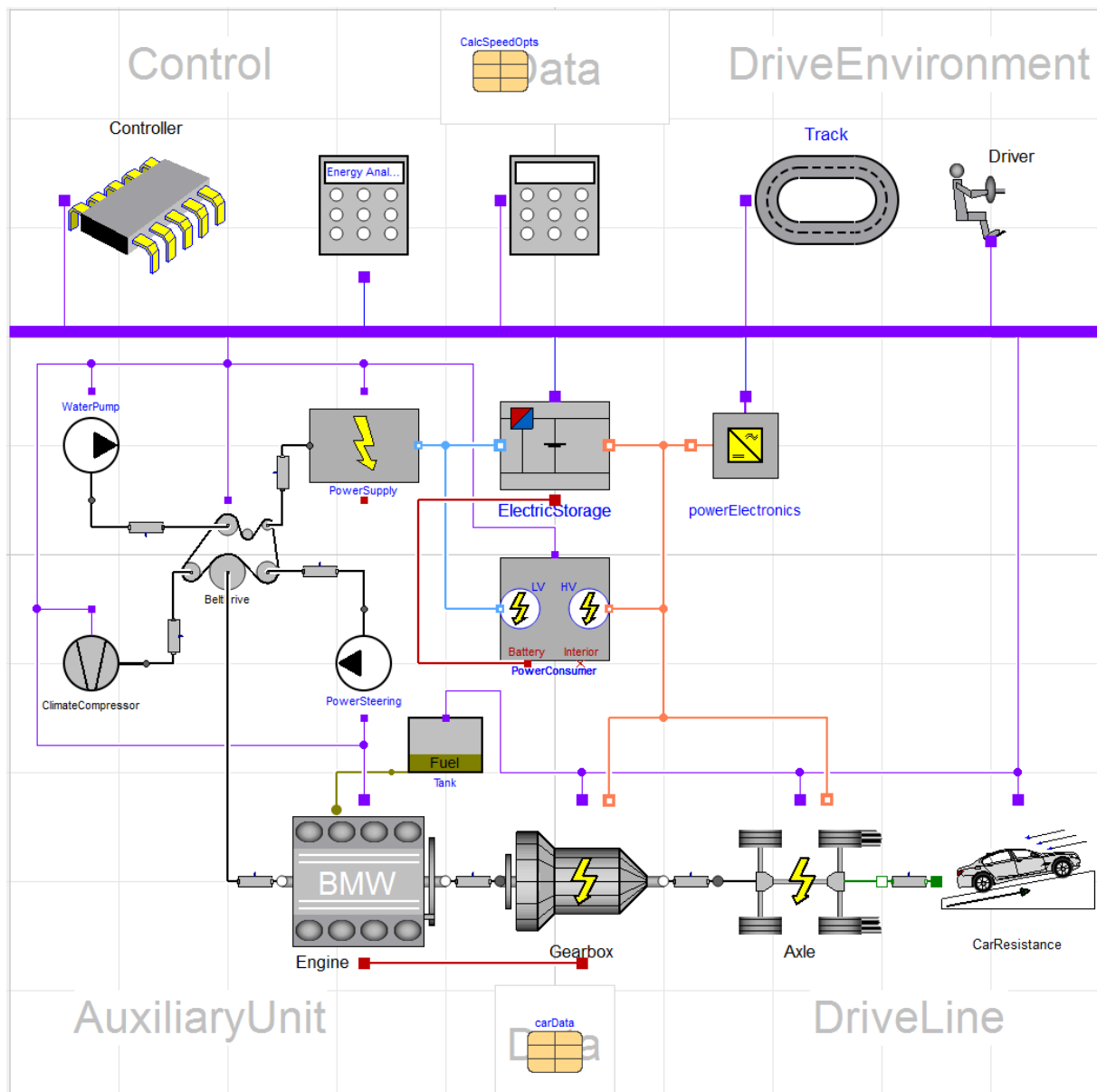


Abbildung 2.19: Systemmodell eines Plug-In-Hybridfahrzeuges in *Dymola*

Das Grundmodell für BEV – Fahrzeuge ist in Abbildung 2.20 dargestellt. Es stellt eine Vernetzung der technischen Komponenten, Controller zur Steuerung der Komponenten und Applikation der Betriebsstrategie, Fahrwiderstandsabbildung, Vernetzung der gesamten E-System Peripherie, Fahrermodell sowie einer umfangreichen Energieanalyse dar. Für unterschiedliche Fahrzeuge können entweder die Fahrwiderstandsdaten angepasst und je nach Methode mit ABC-Werten definiert und simuliert, oder es wird physikalisch mit kompletter Berechnung „just in Time“ des Fahrwiderstandes simuliert.

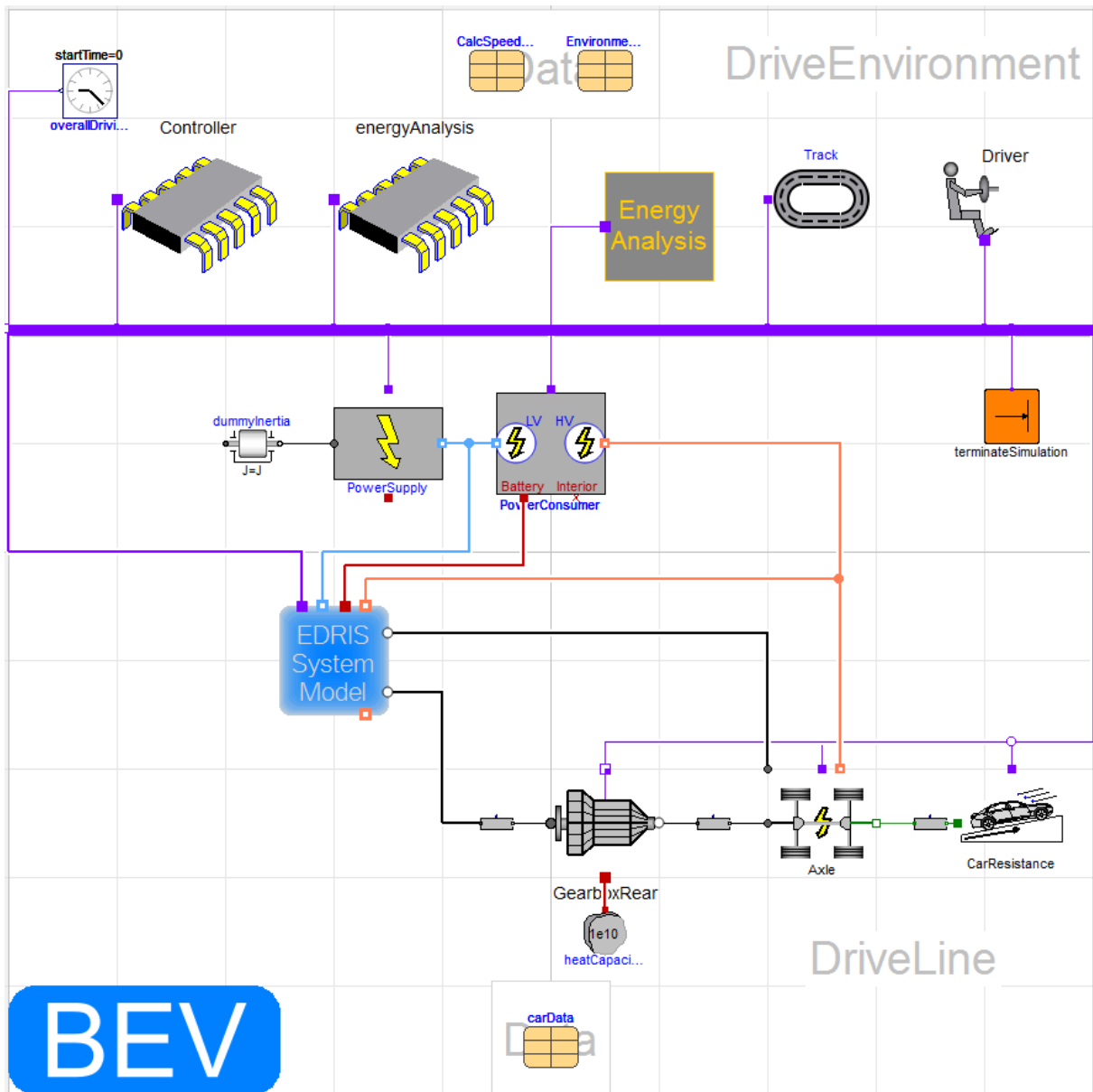


Abbildung 2.20: Oberste Ebene des Gesamtfahrzeugmodells BEV in Dymola

Das Gesamtfahrzeugmodell des BEV wird sowohl für die Untersuchungen in Kapitel 3, als auch in Kapitel 4 verwendet. Insbesondere für die Untersuchungen an BEV - AWD Fahrzeugen ist die Anpassung des „EDRIS System Models“ notwendig.

2.6 Getriebetechnik elektrifizierter Fahrzeuge

Die Getriebetechnik, insbesondere bei Hybridfahrzeugen, kann sehr aufwendig sein. Den Antrieb von Verbrennungsmotor und E-Maschine zu kombinieren ist teilweise äußerst komplex. Hybridfahrzeuge und Elektrofahrzeuge sollen aber auch so effizient wie möglich sein und daher entscheidet bereits die Topologie, ob ein Konzept mit deren Getriebetechnik ein effizientes Fahrzeug abbildet.

Da insbesondere in Kapitel 3 sehr detailliert auf Verluste in Getrieben eingegangen wird, soll in diesem Abschnitt eine allgemeine Darstellung von Getriebeverlusten im Schleppegang vorgenommen werden, mit dem Hintergrund eine Größenordnung für Getriebeverluste zu erhalten und im Anschluss in Kapitel 3 die Ergebnisse und Erkenntnisse zu bewerten und plausibilisieren.

Bei P2 – Parallel - Hybridfahrzeugen, die in der Regel mittlerweile aus Effizienz­sicht als Plug-In Hybride ausgeführt sind, werden Automat­ikgetriebe ohne Drehmomentwandler verwendet. An­statt des Drehmomentwandlers wird eine Trennkupplung verwendet. Diese ermöglicht es, den Verbrennungsmotor vom Antriebsstrang me­chanisch zu trennen. Die Trennkupplung hat als Hybridtrennkupplung wesentlich weniger Verluste als eine Wandlerkupplung, wie in Ab­bildung 2.21 dargestellt. Abhängig von der Ge­schwindigkeit der Trennkupplung in U/min liegen bei einem Vollhybriden Verluste in der Größenordnung von rund $2 Nm$ bis $13 Nm$ an, was einer Verlustleistung von $105 W$ bis zu $4085 W$ entspricht. Demnach liegen bei einer Umdrehung von $3000 U/min$, nach der Darstellung in Ab­bildung 2.21, bei einem Vollhybrid - Fahrzeug über $4 kW$ Verlustleistung vor und bei einem Getriebe eines Plug-In Hybrid Fahrzeuges $628 W$ Verlustleistung vor. [42]

Wenn man von einer Drehzahl von rund $2500 U/min$ bei einer Autobahnfahrt mit einer Geschwindigkeit von ca. $130 km/h$ ausgeht, so würde selbst bei einem modernen Plug-in Hybrid Getriebe eine Verlustleistung von $471 W$ auftreten. [42]

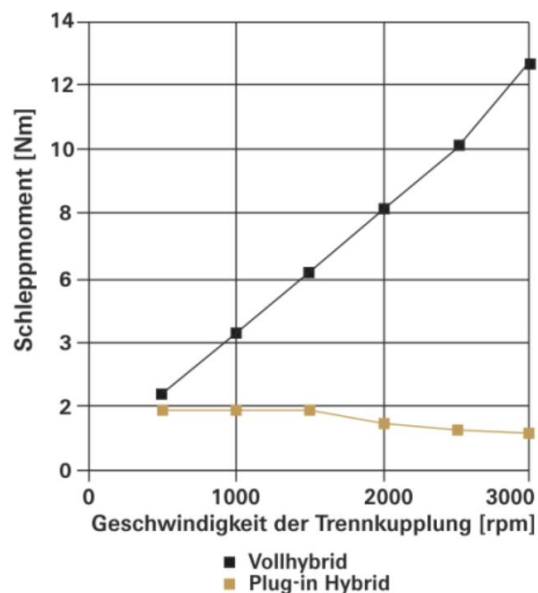


Abbildung 2.21: Beispielhafter Verlauf eines Schleppmomentes einer Trennkupplung [42]

Aufgrund der Antriebsarchitektur hat der P4 - Parallel Hybrid an der Vorderachse meist ein konventionelles Drehmomentwandler-Automatikgetriebe und ein Verteilergetriebe. An der Hinterachse treibt die E-Maschine über ein zweistufiges Einganggetriebe mit Schrägverzahnung und einem Verteilergetriebe die Räder an. In dieser Arbeit wird in Kapitel 3 ein Fahrzeug behandelt, welches mit solch einer Topologie als P4 - Parallel Hybrid ausgestattet ist. Im Folgenden wird vor allem auf Schleppleistungen von Getrieben allgemein eingegangen, um die Verluste aus Kapitel 3 einordnen zu können.

Um eine Größenordnung zu erhalten, wie bedeutsam Getriebeverluste allgemein sind, wird im Folgenden ein 6. Gang 3-Wellen-Beispielgetriebe für ein Fahrzeug mit konventionellem verbrennungsmotorischen Antrieb betrachtet. Im ersten Schritt werden die Wirkungsgrade bei verschiedenen Eingangsdrehzahlen analysiert, danach werden die Verluste auf ihren Ursprung aufgesplittet.

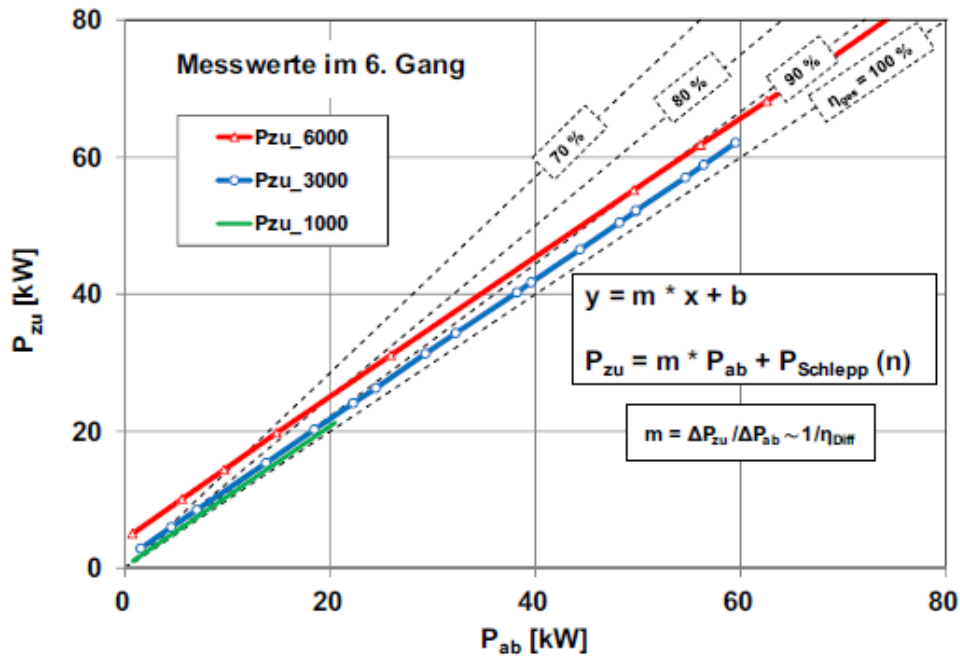


Abbildung 2.22: Wirkungsgrad im 6. Gang für 3-Wellen-Beispielgetriebe [22]

Wie in Abbildung 2.22 ersichtlich sind Wirkungsgradverläufe bei drei verschiedenen Eingangs-Drehzahlen von einem konventionellen 6. Gang 3-Wellen-Beispielgetriebe abhängig von der abgeführten Leistung P_{ab} zur zugeführten Leistung P_{zu} . Bei einer Abtriebsleistung von 20 kW mit einer Eingangs-Drehzahl von 6000 U/min liegt der Wirkungsgrad bei 80% , während bei einer Eingangs-Drehzahl von 6000 U/min noch ein Wirkungsgrad von etwa 95% herrscht. Anhand der Abbildung 2.22 kann man erkennen, dass der Wirkungsgrad eines konventionellen 6-Gang Schaltgetriebes mit steigender Eingangs-drehzahl auf rund 80% stark abfällt. Das Verhältnis von Eingangsleistung (P_{zu}) zu Ausgangsleistung (P_{ab}) bei konstant bleibender Drehzahl kann man näherungsweise als Geradengleichung der Form $y = m \cdot x + b$ darstellen. Die Steigung m entspricht dem Verhältnis aus zu- und abgeführter Differenzleistung. [22]

Das Schleppmoment ergibt sich aus allen Reibstellen, welche im Getriebe vorhanden sind. Die Schleppleistung ergibt sich aus dem Produkt des Schleppmoments und der Winkelgeschwindigkeit der Antriebsdrehzahl.

Insbesondere bei Automatikgetrieben ist eine Ölpumpe erforderlich, die den Öl-druck für die Ölversorgung im gesamten Getriebe für Schmierung und Kühlung der mechanischen Getriebeteile (Zahnräder, Lager, Schaltelemente), Druckversorgung der hydraulischen Steuerung und der Druckversorgung der Schaltelement-Betätigung zur Verfügung stellt. Die Ölpumpe muss zusätzlich noch den Ölfiler als Widerstand überwinden. Beim Plug-In-Getriebe entfällt die Kühlung des hydrodynamischen Drehmomentwandlers, da dieser durch ein integriertes Anfahr-element ersetzt wird. [26] Vor allem beim behandelten P2 - Hybriden treten die genannten Verluste in voller Höhe auch beim rein elektrischen Fahren auf, da die E-Maschine am Getriebeeingang sitzt.

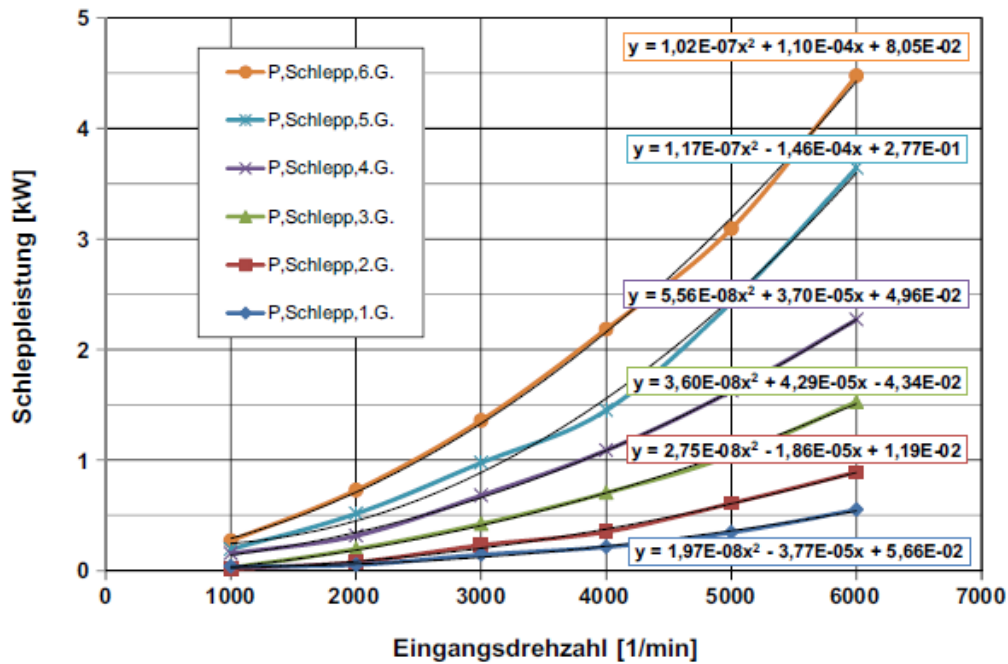


Abbildung 2.23: Schleppleistung eines 3-Wellen 6-Gang Getriebes mit 80 °C Öltemperatur [22]

Für diese Arbeit werden insbesondere Schleppleistungen von Getrieben bei einem PHEV(P4) Getriebe untersucht. Abbildung 2.23 zeigt die Schleppleistungen eines 3-Wellen 6-Gang-Getriebes. Bei einer mittleren Drehzahl von 4000 U/min im 6.Gang liegt bereits eine Schleppleistung von über 2 kW an. Dies entspricht jedoch der reinen Schleppleistung und nicht jene Verlustleistung die sich etwa beim Antreiben des Getriebes ergibt [22]. Eventuelle Trägheiten des gesamten restlichen Antriebstranges sind dabei ebenfalls nicht berücksichtigt. Zusätzlich steigen mit dem Eingangsmoment die Verzahnungsverluste und damit erhöhen sich wiederum die Gesamtverluste eines Getriebes.

In der folgenden Darstellung nach Abbildung 2.24 wird im Detail auf Verlustleistungen eingegangen. Dabei werden die Verluste auf ihren Ursprung aufgeteilt und grafisch dargestellt. [24]

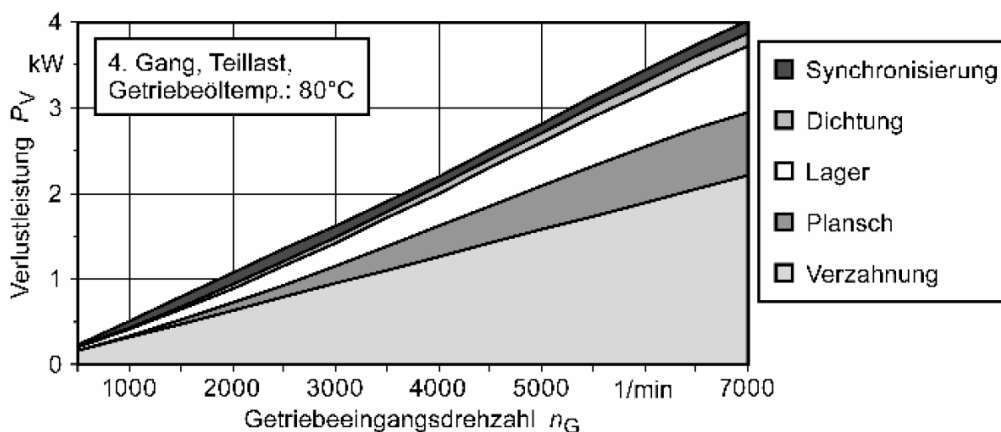


Abbildung 2.24: Größe und Aufteilung der Verlustleistungen von einem koaxialen 6-Gang-Handschatgetriebe im 4. Gang bei 50 % Teillast [24]

In Abbildung 2.24 sind die Verlustleistungen im 4. Gang eines 6-Gang Handschatgetriebes über der Getriebeeingangsdrehzahl grafisch dargestellt. Die Verzahnungs-, Plansch- und die

Lagerverlustleistungen haben dabei den größten Anteil. [24] Diese Verluste sind für dieses Getriebe beispielhaft, jedoch zeigen diese Verlustleistungen, dass Reibung im Getriebe einen hohen Stellhebel hat für die Effizienz eines Gesamtfahrzeuges. Speziell Hybridfahrzeuge haben wesentlich komplexere Getriebetechnik an Board. Diese Technik bringt aufgrund der vielen Funktionen auch mehr Verlustleistungen mit sich. In dieser Arbeit werden daher die Verluste der Getriebe in den Topologien von P2 – und P4 – Hybrid - Fahrzeugen sowie BEV – Fahrzeugen in Kapitel 3 genauer untersucht.

Ein P2 – Parallel – Hybrid hat, wie bereits in Kapitel 2.2.2 in Abbildung 2.4 vorgestellt, ein Automatikgetriebe mit einer E-Maschine am Getriebeeingang. Das Getriebe läuft somit immer mit und ist mechanisch direkt mit den angetriebenen Rädern verbunden. Sowohl in Zug- als auch in Schubrichtung muss das Getriebe angetrieben beziehungsweise mitgeschleppt werden.

Im Gegensatz dazu hat ein P4 – Parallel – Hybrid nach Abbildung 2.6 ein konventionelles Automatikgetriebe an der Vorderachse ohne E-Maschine und an der Hinterachse wird in der Regel ein zweistufiges Einganggetriebe verbaut, welches mit einer Abschaltkupplung von den Antriebsrädern getrennt werden kann. Beispielhaft kann ein Getriebe an der Hinterachse nach Abbildung 2.25 eingesetzt werden. [19]

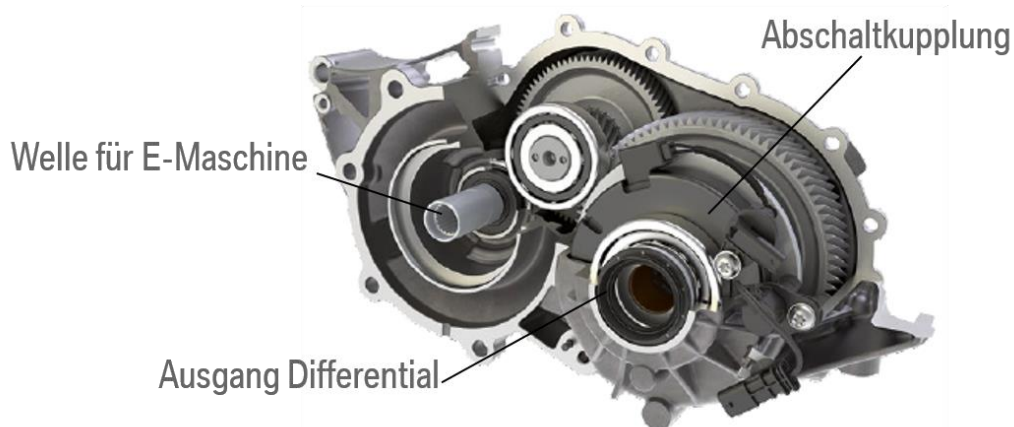


Abbildung 2.25: E-Getriebe an der Hinterachse mit integriertem Differential eines PHEV(P4) [19]

In dieser Arbeit wird speziell auf einen P4-Parallel Hybridfahrzeug eingegangen. Ein solches Fahrzeug besitzt an der Hinterachse ein kompaktes Zweistufen-Einganggetriebe mit integriertem Differential nach Abbildung 2.25. Im selben Gehäuse ist bereits die E-Maschine integriert. Diese Bauweise hat sich bei P4-Hybridfahrzeugen mit niedrigen Leistungen etabliert.

BEV - Getriebe sind ähnlich aufgebaut wie das oben dargestellte PHE(P4) – Getriebe. Meist werden zweistufige Einganggetriebe ohne eine Kupplung verwendet. Das bedeutet, dass die E-Maschine mechanisch immer mit den Rädern verbunden ist. Aus Kostengründen wird häufig keine Kupplung verwendet, da diese auch nicht zwingend erforderlich ist.

Dieses Kapitel soll als Basis und Einschätzung für Getriebeverluste und Wirkungsgrade für die ermittelten Ergebnisse, welche im folgenden Kapitel 3 folgen, gesehen werden.

3 Effizienzsteigerungspotentiale PHEV im E-Modus

Das erste Kernthema dieser Arbeit umfasst den Antriebstopologievergleich von BEV-, PHEV(P2)- und PHEV(P4) Fahrzeugen. Hintergrund dieser Betrachtung ist, dass sich in Messungen gezeigt hat, dass PHEV - Fahrzeuge im rein elektrischen Betrieb wesentlich mehr elektrische Energie verbrauchen als reine BEV - Fahrzeuge.

Für die Bewertung der Verbräuche von BEV, PHEV(P2) und PHEV(P4) Fahrzeugen werden sowohl der FTP72 (Federal Test Procedure von 1975) Zyklus als auch der Highway Zyklus zur Betrachtung herangezogen. Um die Unterschiede in einem Zyklus mit niedrigen Lasten und niedrigen Geschwindigkeiten im Stadtbereich abzubilden, wird der FTP72 Zyklus gewählt. Höhere Lasten und höhere Geschwindigkeiten mit Konstantfahrten werden im Highway- Zyklus abgebildet und untersucht. Die genormten und strengen Vorgaben dieser Zyklen gewährleisten ein wissenschaftlich fundiertes Ergebnis unter den genormten Randbedingungen wie Temperatur, Messtoleranzen und dergleichen wohlwissend, dass bei Messungen immer Fehler auftreten können und Messtoleranzen miteinzubeziehen sind.

Aufgrund der Vergleiche mit den Untersuchungen in den US-Amerikanischen Fahrprofilen werden jeweils die US-Versionen der Fahrzeuge herangezogen. In diesem Kapitel werden zum Verbrauchsvergleich zwischen Plug-In-Hybridfahrzeugen und BEV - Fahrzeuge 3 Modelle verwendet:

- PHEV(P2) - US:
 - Eigengewicht 1780 *kg*, 137 *kg* Zuladung
 - P2-Hybridarchitektur
 - E-Maschine: maximale Leistung: 63 *kW*, maximales Drehmoment: 250 *Nm*
- PHEV(P4) - US
 - Eigengewicht 1800 *kg*, 137 *kg* Zuladung
 - P4-Hybridarchitektur
 - E-Maschine: maximale Leistung: 65 *kW*, maximales Drehmoment: 165 *Nm*
- BEV - US
 - Eigengewicht 1300 *kg*, 137 *kg* Zuladung
 - BEV - Heckantriebstopologie
 - E-Maschine: maximale Leistung: 125 *kW*, maximales Drehmoment: 250 *Nm*

Alle drei Antriebstopologien besitzen jeweils nur eine E-Maschine, welche als PSM ausgeführt ist, jedoch mit unterschiedlichen Leistungen. Die PHEV - Fahrzeuge haben beide relativ geringere Leistungen von 65 *kW*, wobei der PHEV(P2) 250 *Nm* maximales Drehmoment hat und der PHEV(P4) 165 *Nm* maximales Drehmoment. Dies liegt daran, dass die E-Maschine des PHEV(P2) vor dem Getriebe angeordnet ist und als Scheibenläufer ausgeführt ist. Beim PHEV(P4) ist die E-Maschine systembedingt an der Hinterachse angeordnet. Nach der E-Maschine an der Hinterachse ist das Verteilergetriebe angeordnet mit zweistufiger Übersetzung mit einem einzigen Gang. Beim PHEV(P2) ist nach der E-Maschine ein 8-Gang Automatikgetriebe angeordnet. Die Übersetzung des Getriebes ist somit völlig unterschiedlich und daher ergeben sich die stark abweichende Drehmomentanforderungen an die E-Maschinen der PHEV - Fahrzeuge.

Die PHEV - Fahrzeuge haben nahezu identische elektrische Leistungen und der BEV hat rund doppelt so viel Leistung. Auf den ersten Blick ist dies für den Vergleich nicht korrekt, jedoch muss man hier anmerken, dass Hybridfahrzeuge zusätzlich einen Verbrennungsmotor an Board haben, um höhere Leistungsbedarfe abzudecken. Ein BEV muss alle Fahrzustände mit der E-Maschine abdecken und hat keine Möglichkeit zusätzlich zur elektrischen Leistung der E-Maschine Leistung von dem VM zu erhalten. Dies stellt den substantiellen Unterschied von Hybridfahrzeugen und reinen BEV - Fahrzeugen dar. Aufgrund der unterschiedlichen Leistungen der E-Maschinen und der Topologien werden unterschiedliche Lastbereiche der E-Maschinenkennfelder angefahren. Grundsätzlich könnte man die Leistungen und Drehmomente anpassen, jedoch würde dies in der Praxis nicht funktionieren, da beispielsweise der PHEV(P2) die E-Maschine vor dem 8-Gang Automatikgetriebe angeordnet hat. Das bedeutet, dass die E-Maschine die Drehzahldifferenzen und dergleichen aufnehmen muss und damit muss auch das E-Maschinenkennfeld darauf angepasst sein. Die E-Maschinenkennfelder müssen daher in der Praxis immer an die jeweilige Topologie angepasst werden. Daher macht es in diesem Vergleich keinen Sinn die E-Maschinen und deren Lastkennfelder anzupassen. Alle Fahrzeuge schaffen es jedoch, rein elektrisch die ausgewählten Zyklen zu durchfahren. Dies stellt die Grundlage für einen objektiven Vergleich dar.

Im ersten Schritt dieses Kapitels werden die Fahrzeuge mit ihren Homologationsdaten mit den US – Fahrwiderständen simuliert, um zum Einen Vergleichswerte für die später durchgeführte Validierung mittels Prüfstandsdaten zu erhalten und zum Anderen einen ersten Anhaltspunkt für die Differenzen im elektrischen Verbrauch zu erhalten.

3.1 Vergleich der elektrischen Verbräuche mit Stammdaten der Fahrzeuge

In einer ersten Analyse werden die drei Fahrzeuge mit ihren Stammdaten der Homologation in einem FTP72- und in einem Highway-Zyklus simuliert. Basis des Vergleiches stellt das BEV - Fahrzeug dar, welches mit Heckantrieb ausgestattet ist.

	BEV-US	PHEV-P2-US	PHEV-P4-US
	FTP72	FTP72	FTP72
Simulation[Wh/km]	88.2 (Basis)	172.8	158.5
	<u>100 %</u>	<u>196 %</u>	<u>180 %</u>

Tabelle 2: Simulation des Energieverbrauchs im FTP72 mit den Stammdaten der Fahrzeuge

Aus den Simulationsdaten lässt sich erschließen, dass die PHEV - Fahrzeuge deutlich mehr Energie verbrauchen, als das BEV – Fahrzeug. Der P2-Hybrid verbraucht annähernd doppelt so viel elektrische Energie wie das BEV Fahrzeug. Das gleiche Bild ergibt sich in der Simulation im Highway-Fahrzyklus. Der Unterschied der PHEV - Fahrzeuge zum rein elektrischen BEV - Fahrzeug ist allerdings nicht mehr so dramatisch. Auch das PHEV(P4) Fahrzeug hat einen 80% beziehungsweise 51% höheren elektrischen Verbrauch im FTP72 und dem Highway.

	BEV-US	PHEV-P2-US	PHEV-P4-US
	Highway	Highway	Highway
Simulation[Wh/km]	111.0 (Basis)	144.7	167.8
	<u>100 %</u>	<u>130 %</u>	<u>151 %</u>

Tabelle 3: Simulation des Energieverbrauchs im Highway mit den Stammdaten der Fahrzeuge

Die Simulation bestätigt also den Verbrauchsunterschied beim rein elektrischen Fahren zwischen Elektrofahrzeugen und Plug-In-Hybrid Fahrzeugen. Da man Messaufzeichnungen im Homologationszustand des Fahrzeuges besitzt, werden die Daten der Simulation nach den Vergleichen in Kapitel 0 mit den Messungen verifiziert, um die Ergebnisse der Simulation zu plausibilisieren.

Um auszuschließen, dass die Unterschiede rein aufgrund von Fahrwiderständen heraus resultieren, werden alle drei Antriebstopologien auf einen Fahrwiderstand angepasst. Somit ist gewährleistet, dass die Unterschiede nur mehr aufgrund der unterschiedlichen Antriebe resultieren. Die Fahrwiderstände sind eine nicht zu vernachlässigende Größe und müssen daher in dieser Betrachtung herausgefiltert werden. Die Fahrwiderstände werden bewusst auf das PHEV(P4) Fahrzeug bezogen, da die Fahrwiderstände dieses Fahrzeuges in der Mitte der 3 Fahrzeuge liegen. Die Fahrwiderstände werden bewusst nicht auf den BEV bezogen, da PHEV - Fahrzeuge aufgrund ihrer Topologie wirtschaftlich und praktisch nicht die Fahrwiderstände des herangezogenen BEV - Fahrzeuges erreichen. Das ist der Tatsache geschuldet, dass ein PHEV – Fahrzeug aufgrund seiner Komplexität im Antriebsstrang wesentlich schwerer ist. Ein PHEV hat einen Verbrennungsmotor zusätzlich an Board, welche das Fahrzeuggewicht massiv nach oben treibt. Zusätzlich verschlechtert sich bei einem PHEV – Fahrzeug die aerodynamische Komponente des c_w - Wertes aufgrund des erhöhten Kühlbedarfs für den VM. Bei einem PHEV - Fahrzeug sind zusätzliche Kühlöffnungen in der Fahrzeugfront hin zum VM notwendig, um diesen mit Kühlluft und Ansaugluft zu versorgen. Ein BEV benötigt lediglich eine Kühlung der E-Maschine und des dazugehörigen Getriebes. Dies passiert häufig über eine Ölschmierung, welche keine nennenswerten aerodynamischen Nachteile bringt. Zusätzlich wird eine Hochvoltspeicherkühlung aufgrund des großen Speichers benötigt. Diese erfolgt in der Regel über eine Zwangskühlung mittels Kühlflüssigkeit. Aufgrund der hohen Zellenbelastung eines PHEV - Fahrzeuges mit kleinem Speicher unterscheidet sich der Kühlbedarf bei ruhiger Fahrt, wie etwa in den untersuchten Zyklen, kaum. Die aerodynamischen Unterschiede für die Speicherkühlung zwischen PHEV - und BEV - Fahrzeugen sind daher annähernd identisch und werden daher vernachlässigt.

3.2 Vergleich der Topologien BEV – PHEV(P2) – PHEV(P4) im FTP72 Zyklus mit angepassten Fahrwiderständen

Nach den bisherigen Ergebnissen der Simulation werden starke Energieverbrauchsdifferenzen zwischen den behandelten Fahrzeugen ermittelt. Um einen genaueren Vergleich zwischen den Topologien von BEV, PHEV(P2) und PHEV(P4) ziehen zu können werden die Fahrwiderstände aller 3 Fahrzeuge aneinander angeglichen. Die spezifischen Parameter wie etwa die E-Maschinenkennfelder und der gleichen werden nicht verändert. Die Fahrzeuge sollen in ihren Eigenschaften nicht verändert werden und sollen ihre Funktionen beibehalten. Ein PHEV(P2) beispielsweise muss

aufgrund der bereits diskutierten Topologie in 2.2.2 die Drehzahldifferenzen aufgrund der Schaltvorgänge im Getriebe aufnehmen und trotzdem seine Funktion beibehalten. Daher werden weitere Daten nicht verändert.

Prämissen für die Simulation mit angepassten Fahrwiderständen:

- Speicherkühlung wird während den Zyklen nicht aktiviert und benötigt
- einheitliche aerodynamische Widerstandswerte:
 - Querschnittsfläche $A = 2,2 \text{ m}^2$
 - Luftwiderstandbeiwert $c_w = 0,292$
- einheitliches Fahrzeuggewicht
 - Unbeladenes Fahrzeuggewicht $m = 1780 \text{ kg}$
 - Zuladungsgewicht $m = 137 \text{ kg}$
- einheitliche Schwerpunktdaten:
 - Radstand $2,81 \text{ m}$
 - Schwerpunktabstand von der Vorderachse zur Hinterachse $1,4865 \text{ m}$
 - Schwerpunkthöhe von der Fahrbahn $0,49 \text{ m}$
- einheitliche Rollwiderstandsdaten
 - Dynamischer Reifenradius abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit r_{dyn}

	0 km/h	40 km/h	70 km/h	100 km/h	130 km/h	160 km/h
$r_{dyn} [m]$	0,3215	0,3215	0,3214	0,3216	0,3219	0,3223

- $\mu_{\text{straße}} = 1,1$
- Trägheit der Räder $J_{rad} = 1,455 \text{ kg} * \text{m}^2$
- Rollwiderstandskoeffizient f_{Roll}

	0 km/h	0,1 km/h	40 km/h	70 km/h	100 km/h	130 km/h
$f_{Roll} [-]$	0	0,0078	0,0078	0,0079	0,0085	0,009

Die Speicherverluste der Hochvoltspeicher sind von der Technologie und auch von der Größe der Speicher abhängig. Aus Platz-, aus Gewichts- und aus Kostengründen ist es nicht möglich, PHEV - Fahrzeuge mit den gleichen Speichergrößen auszustatten wie BEV - Fahrzeuge. Das soll auch nicht Ziel von PHEV - Fahrzeugen sein. Aufgrund der kleineren Speicher und der damit verbundenen kleineren Zahl an Zellen steigt die Belastung jeder einzelnen Zelle. Durch diese steigende Belastung ist auch ein erhöhter Kühlbedarf die Folge. Daher werden Speicherverluste nicht betrachtet, und die Verluste werden auf die Klemmenenergie bezogen. Die Temperatur im Hochvoltspeicher beim BEV - Fahrzeug steigt von Beginn der Simulation mit $25 \text{ }^\circ\text{C}$ bis zum Ende der Simulation lediglich um ca. $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ und bei den PEHV - Fahrzeugen um ca. $3 \text{ }^\circ\text{C}$ an. Aufgrund dessen, dass man nur einen Zyklus in der Simulation im FTP72 fährt, wird die Speicherkühlung nicht aktiviert und die unterschiedliche Zellbelastung zwischen dem BEV - Fahrzeug und den PHEV - Fahrzeugen hat keine signifikanten Auswirkungen auf den elektrischen Verbrauch.

	BEV-US	PHEV-P2-US	PHEV-P4-US
	FTP72	FTP72	FTP72
Simulation[Wh/km] (Fahrwiderstände an PHEV(P2) angepasst)	119.80 (Basis)	172.8	151.0
	<u>100 %</u>	<u>144 %</u>	<u>126 %</u>

Tabelle 4:Vergleich BEV-PHEV(P2)-PHEV(P4) mit angepassten Fahrwiderständen im FTP72

Nach Anpassung der Fahrwiderstände des BEV - Fahrzeugs und des PHEV(P4) auf den PHEV(P2) sind die Unterschiede nicht mehr so dramatisch jedoch bleibt ein deutlicher Mehrverbrauch.

Der PHEV(P2) verbraucht nach Anpassung der Fahrwiderstände relativ 44 % und absolut 53 *Wh/km* mehr als der BEV mit rein elektrischem Antrieb, wie in Abbildung 3.2 dargestellt. Ein ähnliches Bild stellt sich beim Vergleich zwischen dem BEV und dem PHEV(P4) ein. In einem FTP72 Fahrzyklus ergibt sich aufgrund des Antriebes ein Mehrverbrauch von 26 % und absolut eine Differenz von 31 *Wh/km* . Angesichts dessen, dass in der Simulation alle drei Fahrzeuge die gleichen Fahrwiderstände haben, ist es erstaunlich, solch große Differenzen vorzufinden. Insbesondere der PHEV(P2) hat im FTP72 große Differenzen zum BEV aufzuweisen.

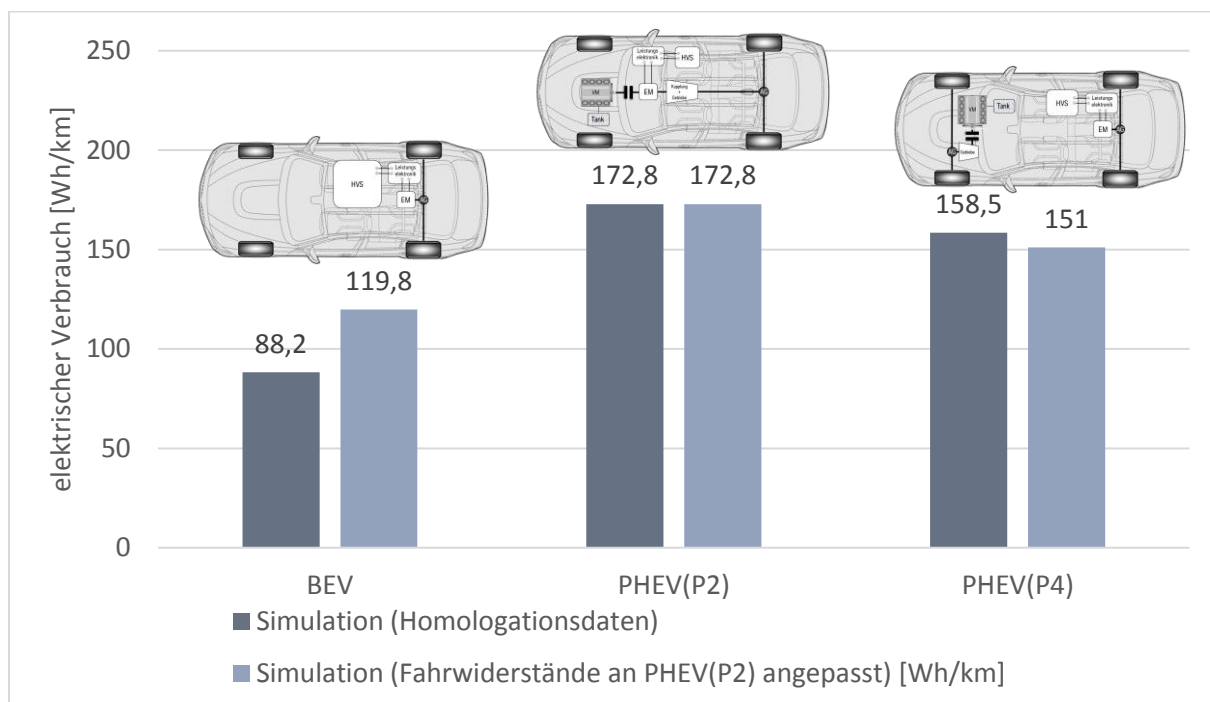


Abbildung 3.1: Elektrische Verbräuche im FTP72 absolut im Vergleich

Angesichts der großen Bemühungen der Fahrzeughersteller den Energieverbrauch in einem Fahrzeug zu senken, sind die Differenzen beachtlich und deuten auf Effizienzpotentiale hin. Grundsätzlich gilt es in Normverbrauchszyklen die elektrische Reichweite vor allem bei PHEV - Fahrzeugen zu maximieren. Je nach Gesetzgebung ist es weltweit unterschiedlich, wie sich der CO_2 - Wert auf den ausgewiesenen Labelwerten zusammensetzt. Eines haben die Ermittlungsmethoden jedoch gemeinsam: um einen niedrigen CO_2 - Wert aus der Typprüfung zu erhalten, muss das Fahrzeug

effizient sein und eine hohe elektrische Reichweite aufweisen. Wenn ein Fahrzeug rein elektrisch fährt, wird in der Typprüfung aktuell ein CO_2 – Wert von 0 g/km angegeben.

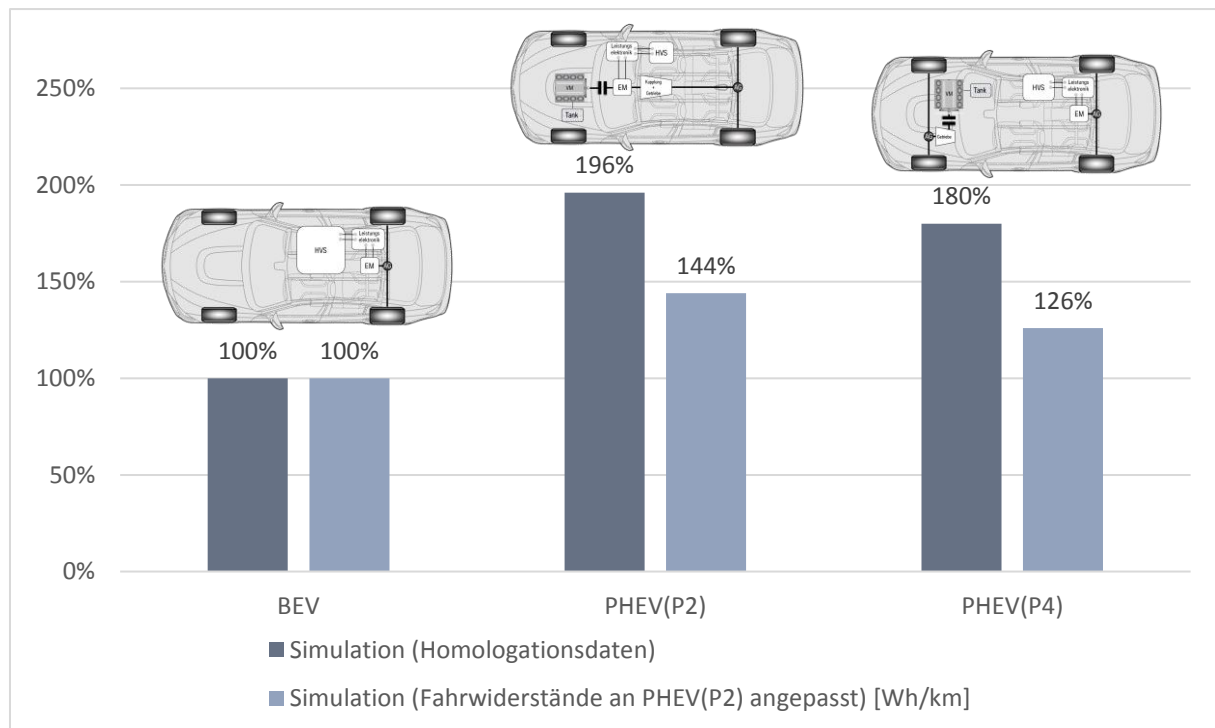


Abbildung 3.2: Elektrische Verbräuche im FTP72 relativ im Vergleich (Basis: BEV)

Um nun herausfinden zu können, woher diese hohen Energieverbrauchsunterschiede kommen, werden sämtliche Verluste, die in einem Fahrzeug vorkommen, addiert und mit der chemischen Energie gleich gesetzt. Die Summe aller Verluste muss jener Menge an chemischer Energie entsprechen, die man in den Hochvoltspeicher mittels elektrischer Energie geladen hat. Basis der Betrachtungsweise ist ein vollgeladenes, vorkonditioniertes Fahrzeug unter Normbedingungen des FTP72.

In einer grafischen Darstellung nach Abbildung 3.4 kann man sehr deutlich erkennen, dass der Luftwiderstand und der Rollwiderstand angepasst wurden. Dazu wurden der Luftwiderstand mit den entscheidenden Größen des Luftwiderstandbeiwertes c_w und die Querschnittsfläche A aneinander angeglichen. Der Rollwiderstand wurde angepasst, indem das Gesamtfahrzeugmodell mit den gleichen Rädern der gleichen Dimension, dem gleichen dynamischen Reifenradius in allen Geschwindigkeitsbereichen und dem gleichen Rollwiderstand bedatet wurde. Zusätzlich wurde die Masse der Fahrzeuge auf das gleiche Niveau angepasst. Somit sind sämtliche verbleibende Verbrauchsdifferenzen auf den Antrieb zurückzuführen.

Das Niedervoltbordnetz wurde in allen Fahrzeugen aus Nutzersicht gleich bedatet. Das bedeutet, dass für Innenraumfunktionen, Licht und weitere Komfortfeatures die gleiche Leistung zur Verfügung steht. Der unterschiedliche Bordnetzverbrauch ist demnach auf andere Dinge zurückzuführen. Beim PHEV(P4) ist der Bordnetzverbrauch etwa doppelt so hoch wie beim BEV - Fahrzeug. Ein Grund dafür ist, dass die elektrische Ölpumpe des Automatikgetriebes (im PHEV(P2) Fahrzeug ein Standardautomatikgetriebe mit Planetensätzen und Schaltelementen) immer in Betrieb ist und über den Zyklus rund 121 Wh verbraucht. Damit ist der Unterschied des Bordnetzverbrauches bereits erklärt.

Der FTP72 bringt aufgrund seines volatilen Fahrprofils mit den vielen Standzeiten auch hohe Verzögerungen mit sich. Nach Anpassen der Fahrwiderstände inklusive der Fahrzeugmasse und der Zuladung sieht man in Abbildung 3.3 den Beschleunigungsverlauf im FTP72. Interessant ist hier insbesondere der Rekuperationsbereich, denn die PHEV - Fahrzeuge können nur bis maximal $0,11\text{ g}$ Verzögerung rekuperieren. Im FTP72 gibt es daher viele Anteile, in denen mit der Betriebsbremse zusätzlich verzögert werden muss, um dem Fahrprofil folgen zu können.

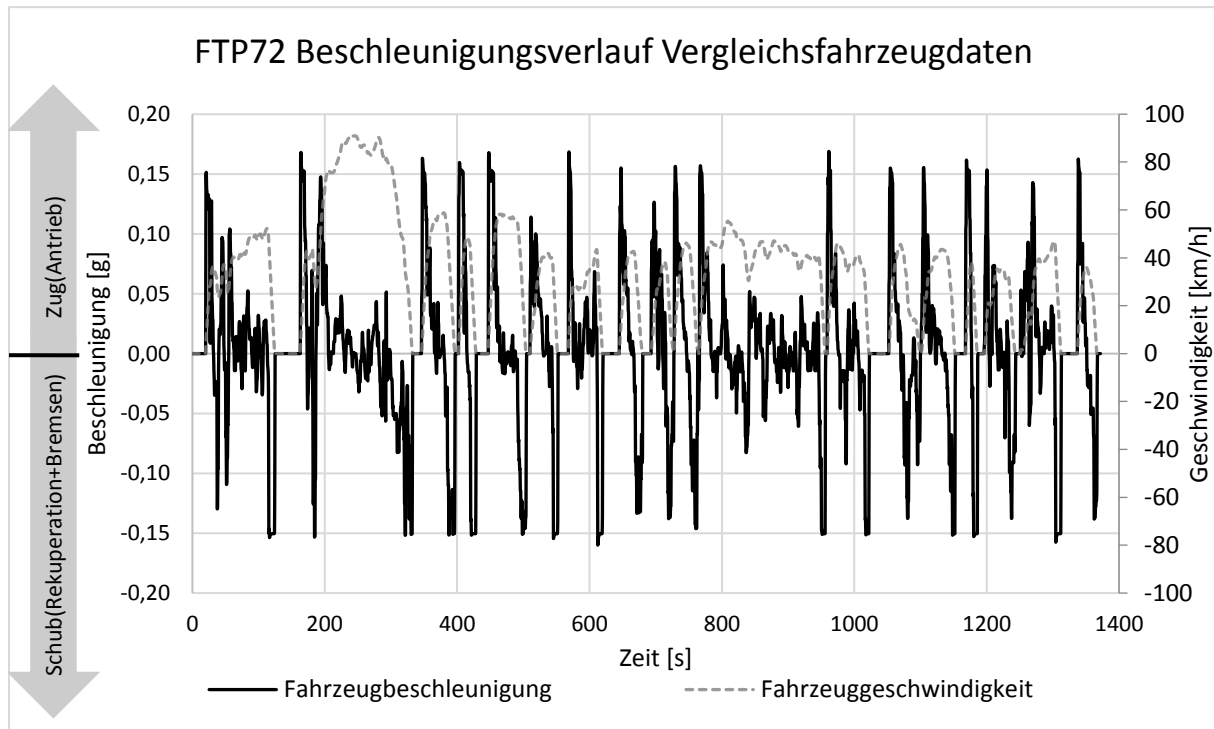


Abbildung 3.3: Beschleunigungsverlauf mit den angepassten Fahrwiderstandsdaten im FTP72

Aufgrund des volatilen Fahrprofils mit vielen Geschwindigkeitsänderungen im FTP72 sind viele Verzögerungsvorgänge notwendig. Ein BEV hat aufgrund seiner Kundenakzeptanz eine höhere Rekuperationsverzögerung als die PHEV - Fahrzeuge. Die Rekuperationsverzögerung beim BEV liegt bei maximal $0,16\text{ g}$. Mit einer Rekuperationsverzögerung $0,16\text{ g}$ lässt sich ein sogenanntes „One-Pedal-Feeling“ verwirklichen. Über das Fahrpedal kann man somit bremsen: Das bedeutet, sobald man vom Fahrpedal geht, verspürt man aufgrund der Rekuperation eine sofortige Bremswirkung. Damit wird die kinetische Energie rekuperiert und als elektrische Energie über die E-Maschine und Inverter im Hochvoltspeicher gespeichert. Die Rekuperation trägt damit vor allem im städtischen Bereich mit vielen Verzögerungsvorgängen wesentlich zur Reichweitenverlängerung bei. [4]

Da PHEV – Parallel-Hybridfahrzeuge vom Kunden oft als konventionelles Fahrzeug interpretiert werden, will man dem/der Fahrer/-in nicht zumuten, dass man eine derart starke Rekuperationsverzögerung erfährt, wenn das Fahrpedal in Nullstellung kommt. Bei PHEV - Fahrzeugen wird eine Rekuperationsverzögerung von maximal $0,11\text{ g}$ Verzögerung durch Rekuperation in der Simulation eingestellt, wobei die Rekuperation beim PHEV(P4) mit 20 km/h beginnt auszuphasen bis 6 km/h . Der PHEV(P2) beginnt aufgrund seines Bremssystems des Gesamtfahrzeuges schon ab 36 km/h auszuphasen. Das unterschiedliche Ausphasen der Rekuperation der Fahrzeuge wird in den Modellen in der Simulation berücksichtigt. Im Gegensatz dazu mutet man einer/einer BEV - Fahrer/-in zu, dass man aufgrund der neuen Technologie mehr rekuperieren kann. In vielen Serienfahrzeugen am Markt ist die Rekuperationsverzögerung bei BEV's

durch die E-Maschine bereits einstellbar und lässt sich in mehreren Stufen anpassen. Beim BEV wird daher eine maximale Rekuperationsverzögerung von $0,16 g$ eingestellt. Aus dieser Betrachtung erklärt sich, warum das BEV wesentlich geringere Bremsverluste im FTP72 aufweist, als die beiden PHEV - Fahrzeuge. Der P2-Hybrid hat zudem den Nachteil, dass dieser aufgrund seiner Bremsanlage bereits bei $36 km/h$ beginnt auszuphasen. Das heißt, es ist ab dieser Geschwindigkeit schon notwendig die Betriebsbremse zusätzlich zu aktivieren. Es ist nicht mehr möglich, jene Energie zu rekuperieren, die ein BEV rekuperiert.

Zusätzlich haben PHEV - Fahrzeuge konzeptbedingt kleiner dimensionierte E-Maschinen und Hochvoltspeicher, welche bei höherer Rekuperationsverzögerung mehr Reperationsleistung aufbringen müssten, dies aber aus Degradationsgründen nicht schaffen würden. Das BEV - Fahrzeug in dieser Untersuchung hat, wie bereits eingangs dieses Kapitels beschrieben, eine wesentlich höhere E-Maschinen - Leistung und kann daher die Rekuperationsleistung bei einer Rekuperationsverzögerung von $0.16 g$ leicht umsetzen. Die Rekuperationsgrenze von $0.16 g$ des BEV-Fahrzeugs würden die beiden PHEV - Fahrzeuge jedoch aus Degradationssicht noch schaffen.

Zusätzlich muss erwähnt werden, dass für die Untersuchungen immer von einem vollen Energiespeicher ausgegangen wird. Dies hat zur Folge, dass zu Beginn des Zyklus nicht die volle Energie rekuperiert werden kann, da der Speicher bereits voll geladen ist. Erst wenn der SoC geringer ist als der SoCmax, kann rekuperiert werden. Da in dieser Untersuchung ein FTP72 und im kommenden Kapitel 3.3 ein Highway - Zyklus verwendet wird, in denen in der Anfangsphase keine Verzögerungsvorgänge stattfinden, kann dieser Effekt vernachlässigt werden.

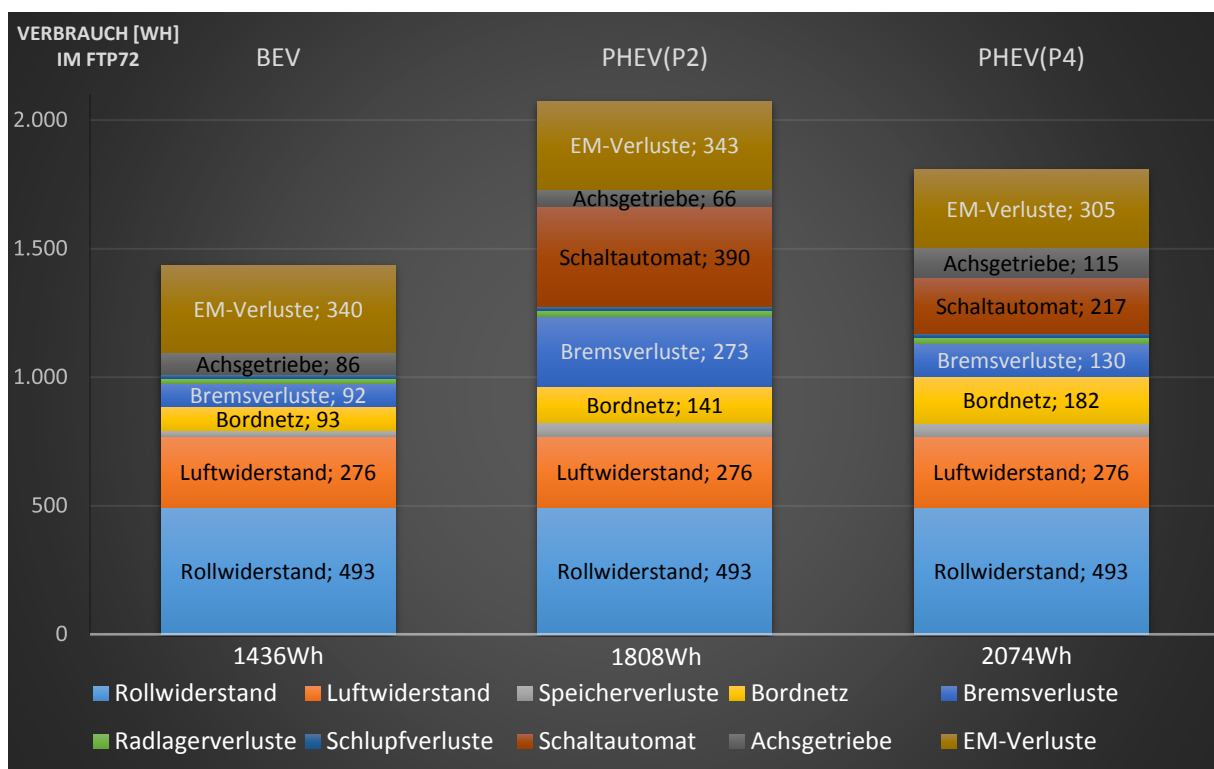


Abbildung 3.4: Vergleich der Verluste im FTP72 absolut: BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2)

Bemerkenswert ist insbesondere beim P4-Hybrid die Tatsache, dass der Schaltautomat $217 Wh$ im FTP72 von den $1808 Wh$ des chemischen Hochvoltspeichers verbraucht. Beim rein elektrischen Fahren wird der Schaltautomat an der Vorderachse nur mitgeschleppt. Er trägt damit in keinster

Weise zum Antrieb bei und hat somit einen Wirkungsgrad von 0 %. Die Energie wird in diesem Fall nur in Reibung und damit in Wärme umgesetzt. Hinzu kommt, dass eine Ölpumpe elektrisch angetrieben werden muss, um die Schmierung im Automatikgetriebe zu gewährleisten. Der PHEV(P4) hat rund die doppelten Verluste im Achsgetriebe, da aufgrund der Topologie sowohl an der Vorderachse als auch an der Hinterachse ein Achsgetriebe notwendig ist. Kleine Unterschiede ergeben sich beim Achsgetriebe an der Vorderachse, da es nur geschleppt wird und nicht angetrieben wird, daher sind die Verluste etwas geringer als wenn es angetrieben werden würde.

Die Speicherverluste der PHEV - Fahrzeuge sind aufgrund der geringeren Zellenanzahl und der damit verbundenen höheren Belastung auf den Speicher wesentlich höher. Durch die höhere Belastung der Zellen steigt die Temperatur in den Zellen an und die Verluste des Gesamtspeichers werden größer.

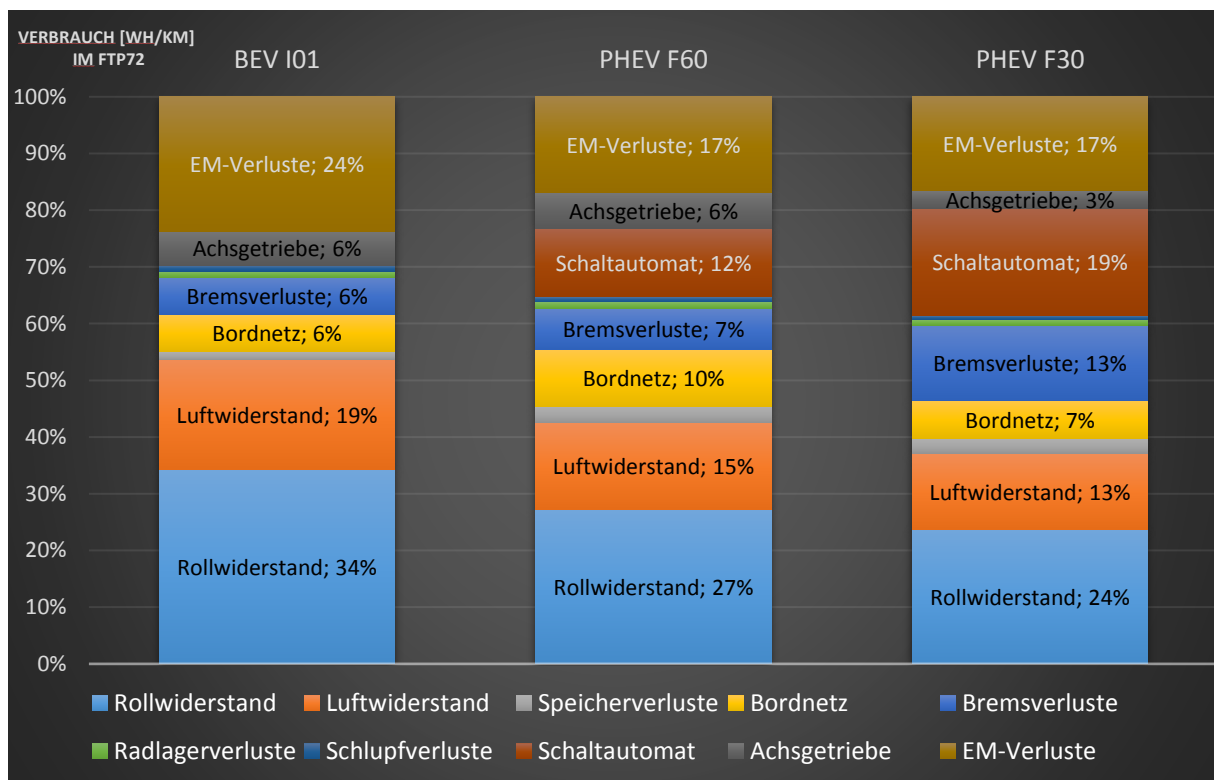


Abbildung 3.5: Vergleich Verluste FTP72 relativ: BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2)

Die E-Maschinenverluste sind beim P2-Hybrid größer, da die E-Maschine vor dem Automatikgetriebe sitzt und somit immer Drehzahländerungen erfährt. Dadurch wechselt der Wirkungsgrad im Lastkennfeld. E-Maschinen können für bestimmte Lastbereiche sehr effizient ausgelegt werden, jedoch nicht über eine so große Bandbreite der Betriebspunkte die sich in dem untersuchten PHEV(P2) vorfindet. Der BEV hat aus Antriebsgründen eine wesentlich stärkere E-Maschine, da dieser in allen Lebenslagen mit dieser E-Maschine auskommen muss. PHEV - Fahrzeuge können bei hoher Lastanforderung den Verbrennungsmotor zustarten und somit Leistung vom VM abrufen.

Im relativen Vergleich der drei Antriebstopologien nach Abbildung 3.5 fallen zum einen die im Vergleich erhöhten Bremsverluste ins Auge und zum anderen, dass die Verluste des Schaltautomaten sowohl beim PHEV(P4), aber vor allem beim PHEV(P2) einen enormen Anteil der Verluste darstellen. Relativ fallen die höheren Verluste des BEV Achsgetriebes auf, diese sind absolut jedoch in etwa auf gleicher Ebene mit dem PHEV(P2) Achsgetriebe. Der Unterschied besteht in der zusätzlichen Übersetzungsstufe.

3.3 Vergleich der Topologien BEV – PHEV(P2) – PHEV(P4) im Highway Zyklus mit angepassten Fahrwiderständen

Da der FTP72 nur niedrige Lasten bei niedrigen Geschwindigkeiten im Stadtbereich mit vielen Stehzeiten abbildet, werden zusätzlich höhere Geschwindigkeiten mit höheren Lasten im Highway-Fahrzyklus simuliert. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf eventuelle Sensitivitäten bei höheren Lasten und höheren Geschwindigkeiten.

	BEV-US	PHEV-P2-US	PHEV-P4-US
	Highway	Highway	Highway
Simulation [Wh/km] (Fahrwiderstände an PHEV(P2) angepasst)	128.8 (Basis)	144.7	150.9
	<u>100%</u>	<u>112%</u>	<u>117%</u>

Tabelle 5: Vergleich BEV-PHEV(P2)-PHEV(P4) mit angepassten Fahrwiderständen im Highway Zyklus

Erneut werden die Fahrwiderstände aller Fahrzeuge an den PHEV(P2) angeglichen und anschließend im Highway-Fahrzyklus simuliert. Es stellt sich interessanterweise das gegenteilige Ergebnis im Vergleich zu den Untersuchungen im FTP72 Zyklus heraus. Im Highway-Fahrprofil verbraucht verhältnismäßig der PHEV(P4) mehr als der PHEV(P2).

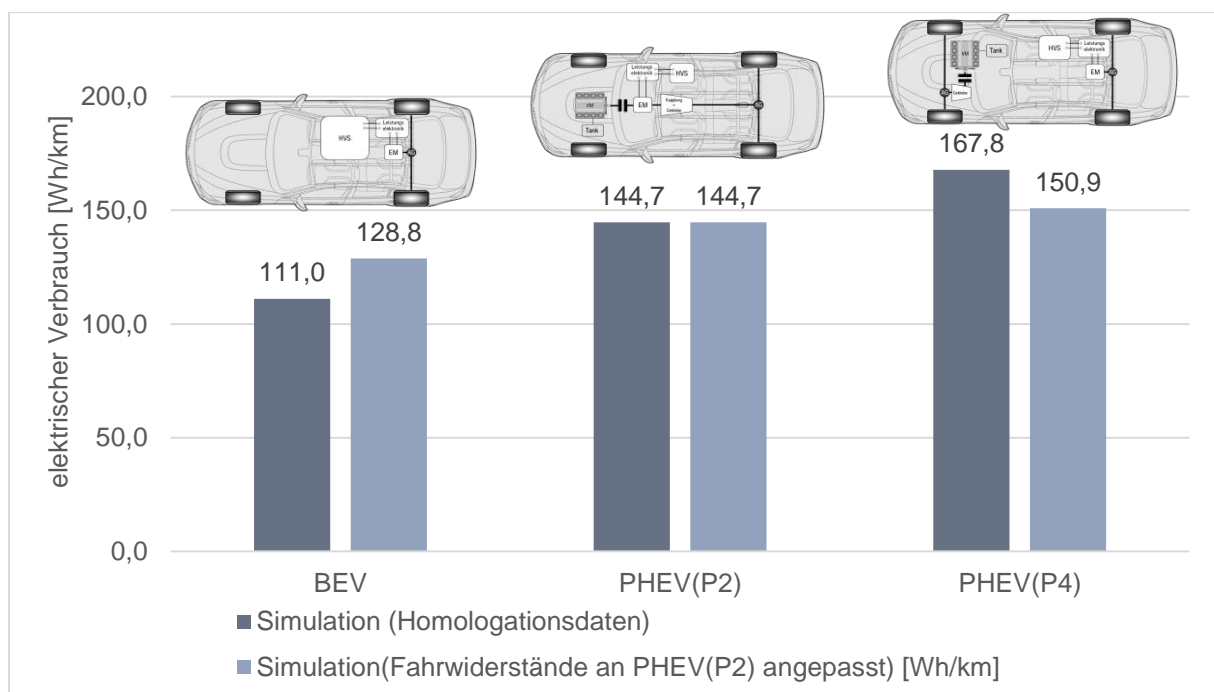


Abbildung 3.6: Elektrische Verbräuche im Highway Zyklus; Absolutwerte im Vergleich

Relativ gesehen ist die Differenz der Verbräuche also bei höheren Geschwindigkeiten wesentlich geringer, als bei niedrigen Geschwindigkeiten wie etwa im FTP72. Ein PHEV(P4) verbraucht jedoch immer noch 17 % bzw. $22 \frac{Wh}{km}$ mehr als der BEV und das obwohl beide Fahrzeuge rein elektrisch angetrieben werden. Die Unterschiede zwischen PHEV(P2) und BEV stellt sich nicht mehr ganz so

groß dar. Hier beträgt das Delta relativ 12 % und absolut ist ein Verbrauchsdelta von $15,9 \frac{Wh}{km}$ festzustellen.

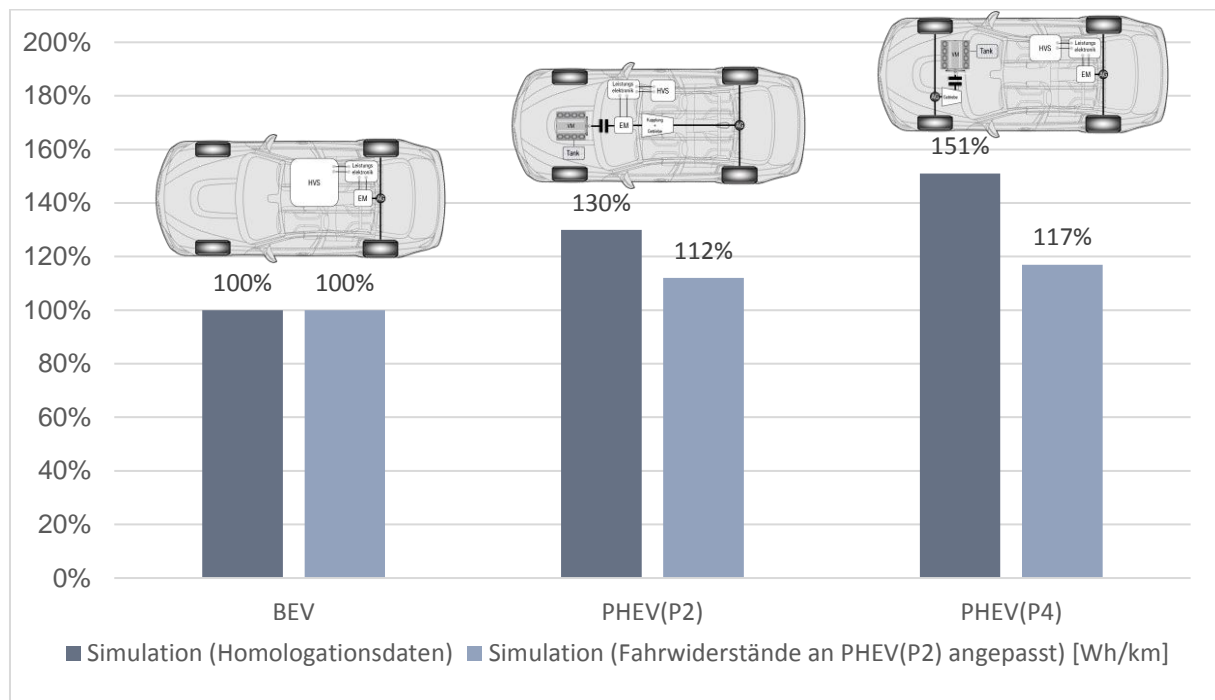


Abbildung 3.7: Elektrische Verbräuche im Highway Zyklus; Relativwerte im Vergleich

Wie man im Fahrprofil des Highways-Fahrzyklus nach Abbildung 2.13 erkennt, gibt es im Highway Fahrprofil keine Standzeiten und wenige Geschwindigkeitsänderungen mit hohen Verzögerungen. Es gibt lediglich 2 Punkte an denen die Rekuperationsverzögerung der PHEV - Fahrzeuge mit maximal $0.11 g$ nicht ausreicht. Hier kommt jedoch ein weiterer Effekt zum Tragen. Der erste Peak der Verzögerung mit etwa $0.13 g$ tritt bei rund $70 km/h$ und der 2. Peak mit $0.15 g$ Verzögerung tritt ebenfalls bei rund $70 km/h$ auf. Bei diesen Geschwindigkeiten beträgt die Luftwiderstandskraft etwa $2300 N$ und die Rollwiderstandskraft aller vier Räder liegt bei $2700 N$. Dementsprechend erfolgt ein Großteil der Verzögerung bereits aufgrund der Fahrwiderstände und nicht aufgrund des negativen Rekuperationsmomentes der E-Maschine.

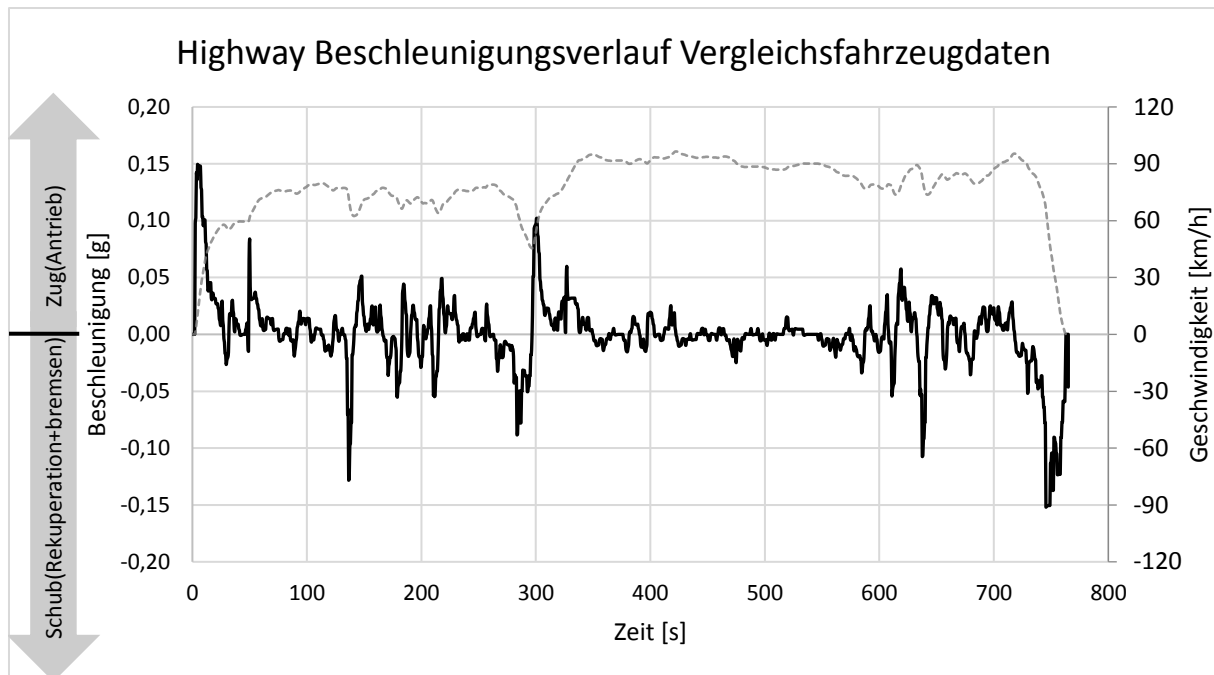


Abbildung 3.8: Beschleunigungs- und Verzögerungsverlauf mit den angepassten Fahrwiderstandsdaten im Highway

Aufgrund der geringen Verzögerungen gibt es im Highway so gut wie keine Unterschiede in den Bremsverlusten. Die Verzögerung aufgrund der Fahrwiderstände in Kombination mit der Rekuperationsverzögerung der E-Maschinen reicht aus, ohne ein zusätzliches Verzögern durch die Betriebsbremse zu aktivieren.

In Abbildung 3.9 sind die Verluste der 3 Antriebsvarianten grafisch aufgeschlüsselt dargestellt. Die aus den Fahrwiderständen resultierenden Verluste wie Luftwiderstand und Rollwiderstand sind identisch bei allen 3 Fahrzeugen. Die Bordnetzunterschiede ergeben sich erneut aus dem Verbrauch der Ölpumpen für die Automatikgetriebe.

Die großen Deltas des Gesamtverbrauches sind im Highway Zyklus aufgrund der fehlenden Differenzen der Bremsverluste ausschließlich in den Getrieben zu finden. Die Achsgetriebeverluste des PHEV(P4) sind gleich gelagert wie bereits im FTP72. Die Achsgetriebeverluste des PHEV(P4) sind annähernd doppelt so hoch wie beim 2. PHEV. Grund dafür ist, dass der PHEV(P4) topologiebedingt zwei Achsgetriebe benötigt. Das Achsgetriebe an der Vorderachse hat jedoch geringere Verluste, als jenes an der Hinterachse, da es nur geschleppt wird und nicht am Vortrieb beteiligt ist.

Aufgrund des konstanten Fahrprofils des Highway-Fahrzyklus sind die Verzögerungen fast ausschließlich mit den Fahrwiderständen und der Bremsenergie-Rekuperation durch die E-Maschinen durchführbar. Daher sind die Bremsverluste in Abbildung 3.9 und in Abbildung 3.10 sowohl bei den PHEV Fahrzeugen als auch beim BEV null.

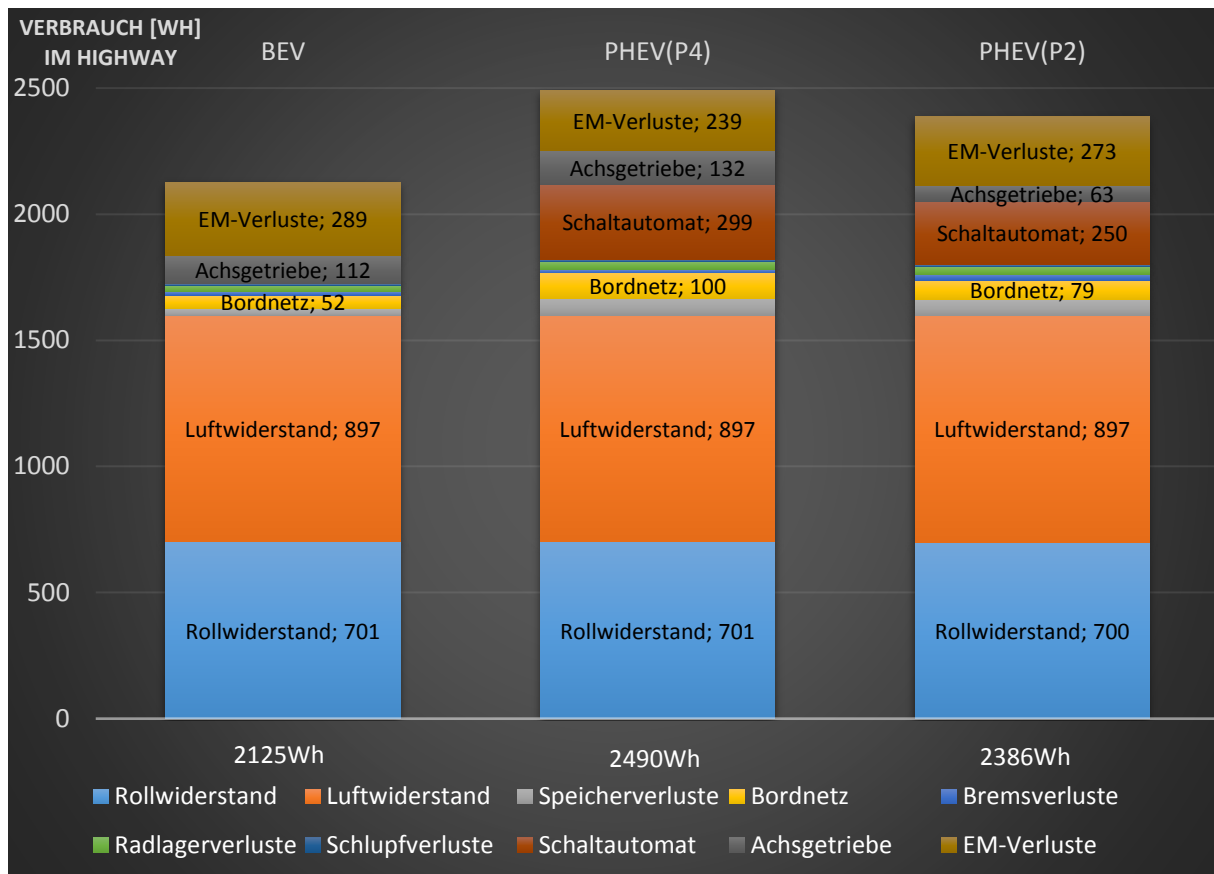


Abbildung 3.9: Vergleich der Verluste im Highway Zyklus; Absolutwerte: BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2)

Der PHEV(P4) verschwendet 299 Wh von 2490 Wh im Highway aufgrund des Mitschleppens des Schaltgetriebes an der Vorderachse. Rechnet man das Verteilergetriebe an der Vorderachse mit ein, so ergibt sich ein noch dramatischeres Verhältnis. Man kann also sagen, dass rund 14 % der Energie, welche als chemische Energie aus dem Hochvoltspeicher gezogen wird, als Reibung im Verteilergetriebe und im Schaltgetriebe an der Vorderachse verloren geht. Diese Energie trägt nicht zum Antrieb bei und wird lediglich in Wärme umgewandelt.

In der Antriebstopologie des PHEV(P2) treten zwar auch 12 % Verluste im Schaltautomat inklusive dem Achsgetriebe auf, jedoch ist das in dieser Antriebskonfiguration notwendig, da über das Getriebe das erforderliche Antriebsmoment geleitet wird. Da die E-Maschine vor dem Automatikgetriebe sitzt, müssen die Verluste des Schaltautomaten in Kauf genommen werden.

Radlagerverluste, Bremsverluste, Speicherverluste und Schlupfverluste haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Verbrauch im Highway-Zyklus. Wenn man die chemische Energie jedoch nach ihrer Wirkung genau aufdröseln möchte, so müssen diese Verluste berücksichtigt werden.

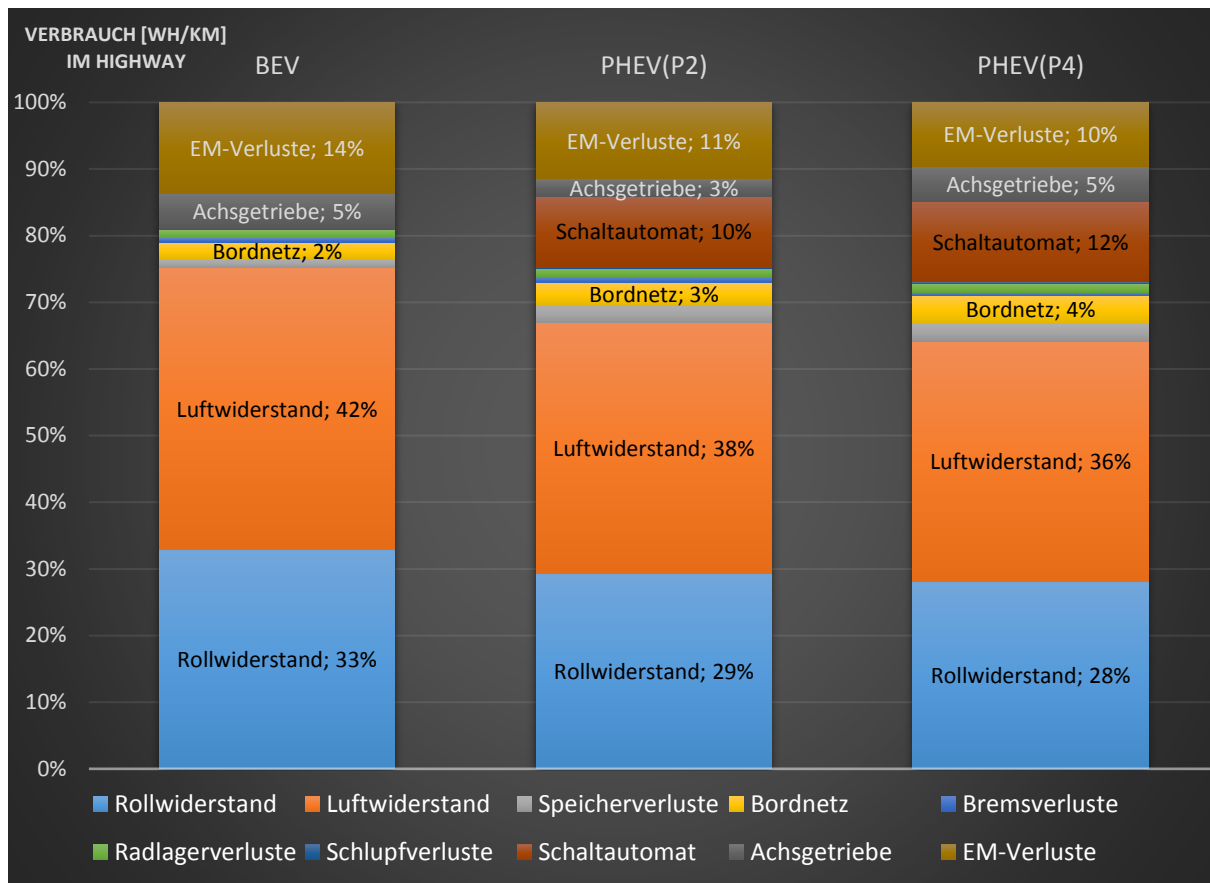


Abbildung 3.10: Vergleich der Verluste im Highway-Zyklus; Relativwerte: BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2)

Um die E-Maschinenverluste und einige weitere Verluste zu verifizieren, werden im folgenden Kapitel sämtliche Wirkungsgrade der E-Maschinen, der Getriebe und der Hochvoltspeicher untersucht.

3.4 Wirkungsgradanalyse

In Abbildung 3.11 ist die Betrachtung zur Berechnung des Wirkungsgrades am Beispiel des Hochvoltspeichers abgebildet. Es wird unterschieden zwischen aufgewendeter Energie, also dem System hinzugefügter Energie und der Nutzenergie, und der vom System abgeführten Energie. Die Energieflussrichtung ist durch das Vorzeichen festgelegt. Positive Vorzeichen weisen auf den Zugbetrieb (Antrieb) hin und negative Vorzeichen sind als Schubbetrieb (Rekuperation) deklariert.



Abbildung 3.11: Wirkungsanalyse am Beispiel des Hochvoltspeichers [12]

$$\eta_{HVS} = \frac{E_{\text{nutz}}^{\text{Chem}} + E_{\text{nutz}}^{\text{Klemme}}}{E_{\text{aufwand}}^{\text{Chem}} + E_{\text{aufwand}}^{\text{Klemme}}} [12] \quad (3.1)$$

Die Berechnung der Energien erfolgt in der Simulation. Die Verluste der Getriebe werden für den jeweiligen Lastzustand aus Kennfeldern ausgelesen, welche in Versuchen an Prüfständen ermittelt wurden.

Nachfolgend werden alle kumulierten Wirkungsgrade im FTP72 untersucht und dargestellt. Aufgrund dieser Analyse lassen sich Verbesserungen eruieren. Ausgegangen wurde jeweils immer von einem vollen Hochvoltspeicher, wobei die Kühlung dieser Hochvoltspeicher nicht aktiv war.

3.4.1 Wirkungsgradanalyse Hochvoltspeicher

Grundsätzlich sind die Wirkungsgrade der Hochvoltspeicher ohne Speicherkühlung im genormten FTP72 Zyklus sowie im Highway Zyklus in einem sehr hohen Bereich angesiedelt. Der BEV hat in diesem Vergleich mit einem Wirkungsgrad von etwa 99 % einen sehr beeindruckend hohen Wert. Berücksichtigt muss jedoch werden, dass die Speicherkühlung nicht aktiv war und auch die Wirkungsgradverluste aufgrund der etwaigen Kühlung beim Laden hier nicht berücksichtigt sind.

Nach Anpassen der Fahrwiderstände wird das Verhältnis der Wirkungsgrade der Hochvoltspeicher zwischen dem BEV - Fahrzeug und den PHEV - Fahrzeugen besser. Die PHEV - Fahrzeuge haben beide konzeptbedingt eine wesentlich geringere Nettoenergie und damit wesentlich weniger Zellen an Board als der BEV. Damit kann die Energie beim BEV aus mehr Zellen entnommen werden als bei den PHEV - Hochvoltspeichern. Daraus resultiert ein verbesserter Wirkungsgrad des Hochvoltspeichers des BEV' s. Dieser Effekt wird bei höherer Leistungsanforderung noch wesentlich größer, da die Speicherkühlung bei PHEV' s aufgrund der geringeren Zellenanzahl wesentlich früher startet als bei BEV' s mit großen Speichern.

Der Originalwirkungsgrad in Abbildung 3.12 bis Abbildung 3.15 bezieht sich die Fahrzeuge mit den Fahrwiderständen aus den Homologationsdaten nach Kapitel 3.1. Der Wirkungsgrad mit Bedatung des PHEV(P2) bezieht sich auf die Untersuchungen mit angepassten Fahrwiderständen im FTP72, wie in Kapitel 3.2 durchgeführt wurde. In Kapitel 3.2 sind auch die Prämissen inklusive Vereinfachungen und Annahmen für diese Untersuchungen angeführt.

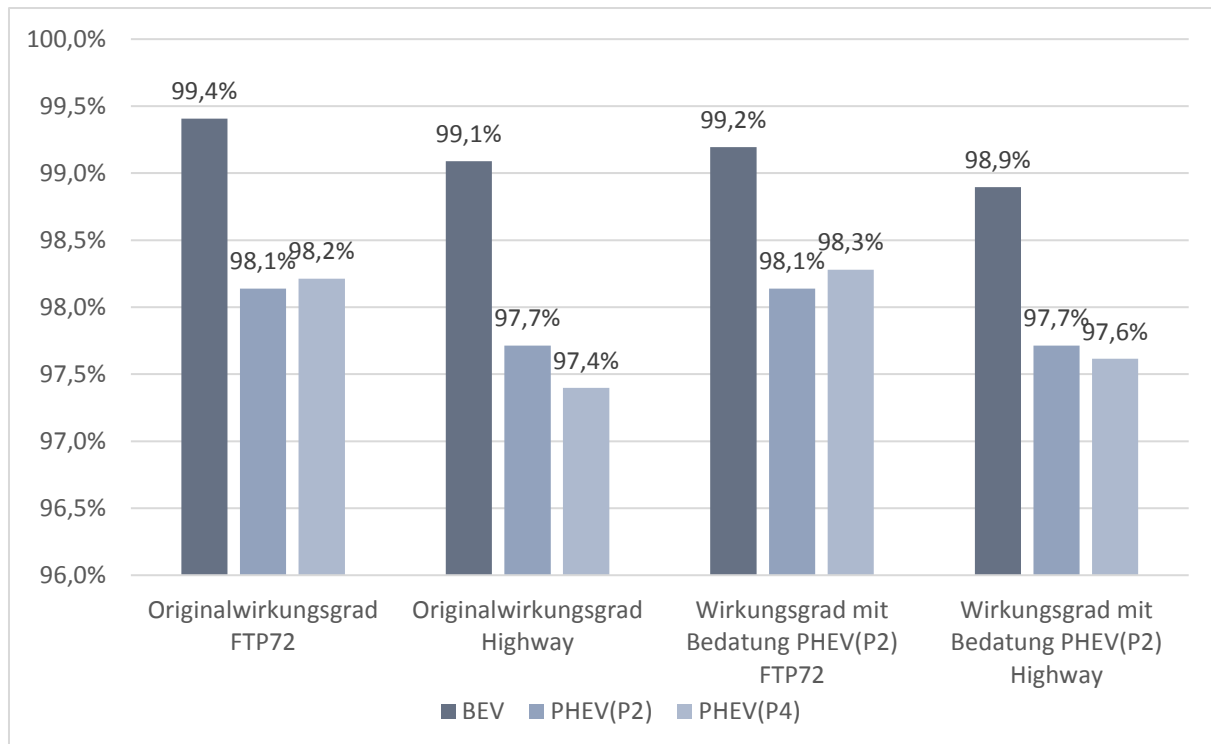


Abbildung 3.12: Wirkungsgradvergleich BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2) des Hochvoltspeichers

3.4.2 Wirkungsgradanalyse Getriebe

In der Wirkungsgradanalyse der Getriebe müssen die Antriebstopologien berücksichtigt werden. Grundsätzlich wird zwischen Achsgetriebe und Schaltgetriebe unterschieden. Das PHEV(P4) - Fahrzeug hat jedoch zwei Achsgetriebe. In Abbildung 3.13 wird beim PHEV(P4) lediglich das hintere E-Getriebe betrachtet. Das Achsgetriebe an der Vorderachse wird lediglich mitgeschleppt und hätte einen Wirkungsgrad von 0 %. Daher wird dieses in diesem Fall nicht berücksichtigt. Jedoch sind die absoluten Schlepplverluste der PHEV(P4) Getriebe mit den Absolutwerten in Abbildung 3.1 bereits dargestellt und können in Kapitel 3.6 in den Ergebnissen analysiert und diskutiert werden.

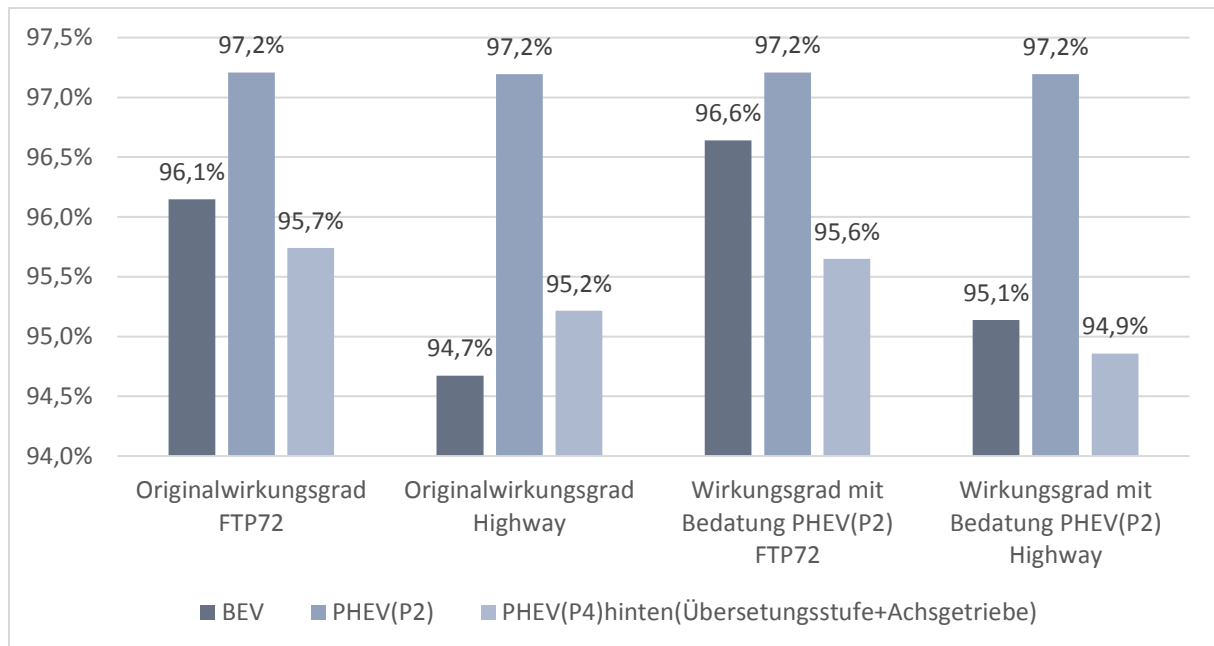


Abbildung 3.13: Wirkungsgradvergleich BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2) des Achsgetriebes

Der BEV und der PHEV(P4) haben an der Hinterachse annähernd identisch ausgeprägte Achsgetriebe. Der BEV hat aufgrund der fehlenden Abschaltkupplung (wie in Abbildung 2.25) einen besseren Wirkungsgrad. Der PHEV(P2) hat vor dem eigentlichen Differential aus Kegelrad und Triebbling/Tellerrad keine Übersetzungsstufe mehr und hat demnach auch einen besseren Wirkungsgrad. Nach Angleichung der Fahrwiderstände auf das gleiche Level sind kaum Unterschiede erkennbar im Vergleich zur Simulation ohne Anpassung der Fahrwiderstände.

Der Wirkungsgradvergleich nach Abbildung 3.14 zeigt insbesondere nach Anpassung der Fahrwiderstände große Differenzen auf. Nach Abbildung 3.13 ist das Achsgetriebe des PHEV(P2) deutlich besser als die beiden anderen Achsgetriebe. Im Wirkungsgradvergleich der Gesamtgetriebe muss zwischen FTP72 und Highway unterschieden werden. Im FTP72 Fahrzyklus schneidet der PHEV(P2) mit Abstand am schlechtesten ab. Das Verhältnis vom PHEV(P2) zum PHEV(P4) ändert sich im Highway Zyklus. Das Mitschleppen der Vorderachse wirkt sich bei hohen Geschwindigkeit wesentlich dramatischer aus als bei niedrigen Geschwindigkeiten im FTP72. Beim BEV ändern sich die Wirkungsgrade von Abbildung 3.13 zu Abbildung 3.14 nicht, da kein weiteres Getriebe vorhanden ist.

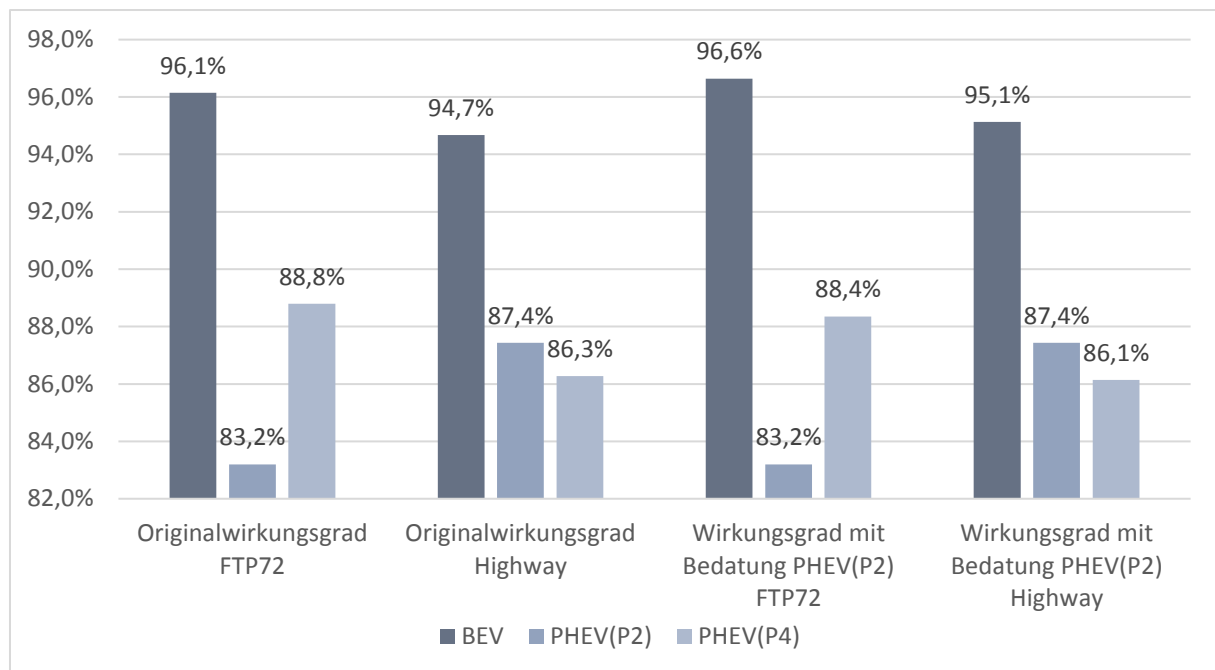


Abbildung 3.14: Wirkungsgradvergleich BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2) des Gesamtgetriebes

3.4.3 Wirkungsgradanalyse E-Maschinen

Vor Anpassung der Fahrwiderstände hat der PHEV(P4) eine deutlich effizientere E-Maschine. Nach Anpassung der Fahrwiderstände sind die Wirkungsgrade des BEV und des PHEV(P2) nahezu identisch im FTP72 Fahrzyklus. Der PHEV(P4) hebt sich etwas ab und ist um einen guten Prozentpunkt besser. Im Highway Zyklus ist die E-Maschine im PHEV(P4) wesentlich besser. Im Unterschied zum PHEV(P2) lässt sich das insofern erklären, da sich die E-Maschine des PHEV(P2) aufgrund der Gangänderungen in einem schlechteren Wirkungsgradbereich befindet. Die Übersetzungen in einem PHEV(P2) müssen in der Regel aufgrund der niedrigen praktischen Reichweite auf der Straße im Realverkehr auf die Verbrennungsmotorenkennfelder und deren Drehzahlen hin optimiert und ausgelegt werden. Daher ergeben sich Effizienz Nachteile hinsichtlich der E-Maschine, die sich im Wirkungsgrad dieser Analyse bestätigen. Beim PHEV(P4) muss im Gegensatz zum PHEV(P2) in der Übersetzung an der Hinterachse der E-Maschine keine Rücksicht auf den Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors gelegt werden, da der Verbrennungsmotor mechanisch entkoppelt ist und an der Vorderachse positioniert ist. Aus diesem Grund ist auch der Wirkungsgrad der E-Maschine besser.

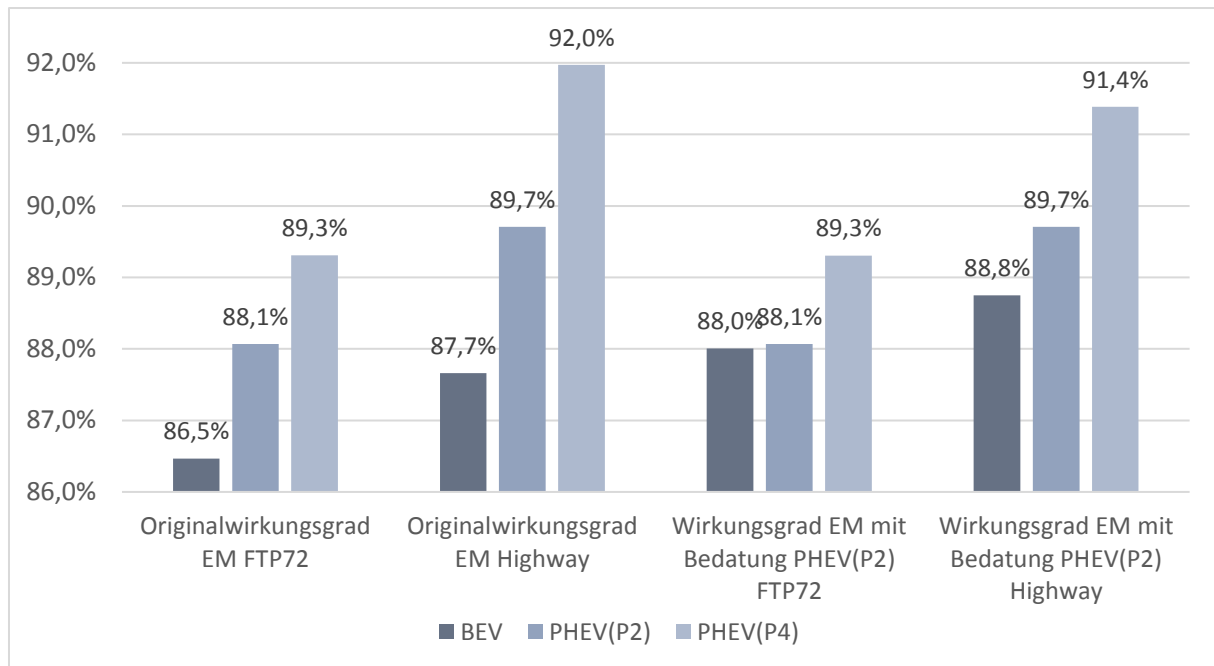


Abbildung 3.15: Wirkungsgradvergleich der EM

3.5 Validierung der Simulationsergebnisse anhand von Messungen

Anhand von Messungen auf dem Rollenprüfstand sollten die bisherigen Ergebnisse validiert werden, um die Simulationsergebnisse zu überprüfen und eventuelle weitere Effizienzsteigerungsmaßnahmen auszuarbeiten. Grundsätzlich kann man die Aussage tätigen, dass die Simulationsergebnisse in den Messungen bestätigt wurden. Das bedeutet, dass die elektrischen Verbräuche der Einzelkomponenten sich in den Messungen und in der Simulation decken. Die elektrischen Verbräuche wurden in der Simulation im Vergleich zu den Messungen mit einer Genauigkeit von unter 1 % getroffen. Aufgrund der Messungenauigkeit und der Streuung durch die Toleranz beim Folgen des Fahrprofils am Rollenprüfstand durch den Prüfstandfahrer ist dies eine äußerst hohe Genauigkeit. In der Simulation wird dem Fahrprofil durch den *DriverController* mit äußerst hoher Genauigkeit gefolgt, sodass sich eine vernachlässigbare Toleranz ergibt.

Die Messungen auf dem Rollenprüfstand wurden bereits in der Vergangenheit mit seriennahen Fahrzeugen durchgeführt. Diese waren komplett mit Messequipment ausgestattet und haben alle möglichen Parameter und Einflussgrößen gemessen, welche relevante Größen für anschließende Untersuchungen in diversen Bereichen des Fahrzeuges und Abteilungen darstellen. Diese Messungen wurden im Rahmen von Entwicklungsmessungen durchgeführt und beinhalten sämtliche Messsignale aus dem internen CAN-Bus sowie weitere relevante Messsignale aus diversen Sensoren die am Fahrzeug angebracht wurden. Diese genauen Messungen mit seriennahen Fahrzeugen und US – Fahrwiderständen werden herangezogen, um die bisherigen Ergebnisse der aus Kapitel 3 zu verifizieren.

3.5.1 Validierung PHEV(P2)

Die Verläufe der Energien, Stromflüsse und dergleichen aus der Simulation spiegeln sich fast eins zu eins in der Messung wider. Wie die Verläufe der Grafiken belegen, sind kaum Abweichungen

feststellbar und daher stimmen auch die Verbräuche und sonstige Werte zwischen Simulation und Messung überein.

Beim PHEV(P2) haben die bisherigen Ergebnisse einen starken Energieverbrauch des Getriebes ergeben. Bei genauer Analyse der Verifikation stellt sich heraus, dass vor allem die Ölpumpe über den Zyklus einen Großteil dieses Energieverbrauches über den gesamten Zyklus einnimmt.

Die Messung am Rollenprüfstand eines FTP72-Fahrzyklus bestätigt diese These aus den Simulationsergebnissen. In Abbildung 3.16 ist eine starke Stromaufnahme beim Anfahren festzustellen.

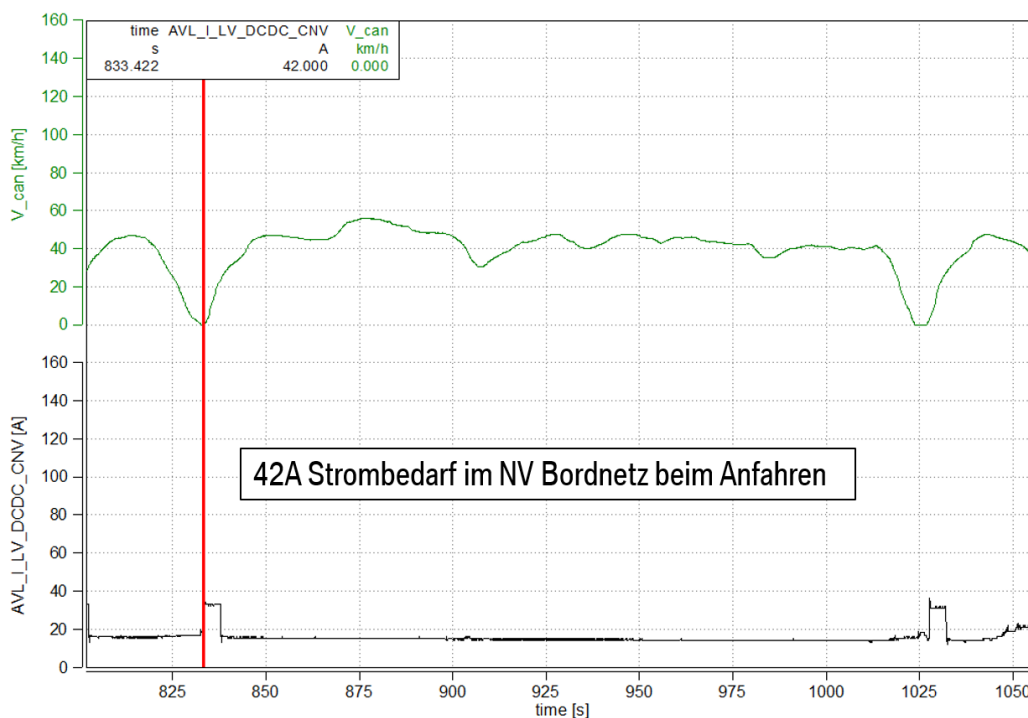


Abbildung 3.16: Stromaufnahme des Niedervoltkreises in der Messung am Rollenprüfstand eines FTP72

Die Stromaufnahme im Niedervoltbordnetz in der Messung des PHEV(P2) Fahrzeuges am Rollenprüfstand, welche im Anfahrbereich sehr stark auftritt, ist zum Großteil auf den Leistungsbedarf der elektrischen Ölpumpe zur Versorgung der Ölschmierung im Automatikgetriebe zurückzuführen. Wie in Abbildung 3.16 zu sehen ist, beträgt die Stromaufnahme 42 A beim Anfahrvorgang im Niedervoltbordnetz, das ergibt ein Delta in der Stromaufnahme zur Konstantfahrt und zum Stillstand von 24 A im Niedervoltbordnetz. Dieses Delta der Leistungsaufnahme ist genau jener Stromverbrauch, der auch an der Klemme zur Ölpumpe gemessen werden konnte. Somit kann festgestellt werden, dass die Ölpumpe entscheidend zur Belastung und damit zum Energieverbrauch des Niedervoltbordnetzes beiträgt.

Es gab jedoch im Verbrauch eine leichte Differenz. Durch die Validierung hat sich noch ein weiteres Potential ermitteln lassen. Wie in der Abbildung 3.17 abgebildet, ergeben sich leichte Differenzen zwischen den Simulationsergebnissen aus dem FTP72 Zyklus und den Messungen am Rollenprüfstand im Drehmomentverlauf der E-Maschine des PHEV(P2).

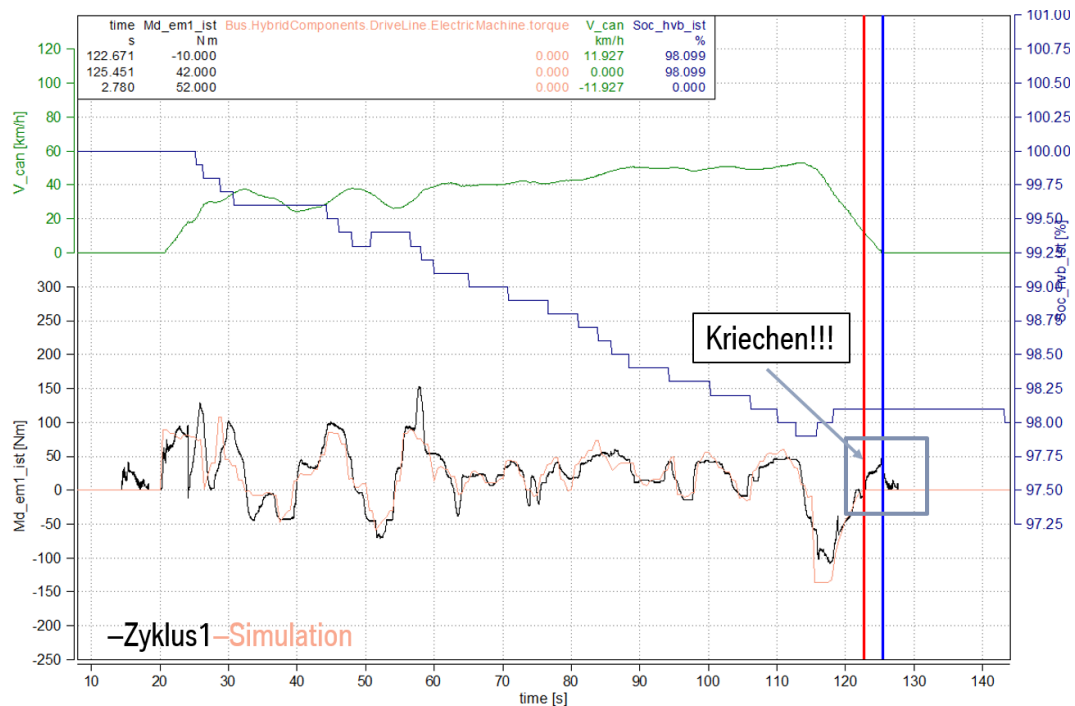


Abbildung 3.17: Moment an der E-Maschine vor dem Stillstand beim PHEV(P2) in einer Versuchsmessung am Rollenprüfstand mit FTP72 Fahrprofil

In Abbildung 3.17 werden die Momentenverläufe der E-Maschine aus der Simulation (in beige dargestellt) und aus der Messung des PHEV(P2) am Rollenprüfstand (in schwarz dargestellt) mit dem FTP72 Fahrzyklus geplottet. Der Momentenverlauf der Messung wird dabei aus den Signalen von Strom berechnet, Spannung und Drehzahl, welche an der E-Maschine anliegen.

Die untersuchten PHEV - Fahrzeuge kriechen beim Anfahren. Das bedeutet, dass beim Loslassen des Bremspedals das Fahrzeug anfährt wie ein konventionelles Fahrzeug mit Automatikgetriebe. Das liegt daran, dass die PHEV - Fahrzeuge auch mit Verbrennungsmotor anfahren und sich dadurch kein verändertes Anfahren des Fahrzeuges im Vergleich zu einem rein konventionellen Fahrzeug ergeben soll. Damit also der Fahrer ein gleiches Fahrgefühl im PHEV erfährt, erzeugt die E-Maschine ein positives Zugmoment beim Anfahren beziehungsweise kurz vor Stillstand. Insbesondere kurz vor dem Stillstand eines konventionellen Fahrzeuges erfolgt, aufgrund der Funktionsweise des Wändlers des Automatikgetriebes, ein positives Moment in Zugrichtung. Dieses positive Moment ist aus Effizienz Sicht sehr schlecht, da es in keinsten Weise zum Antrieb des Fahrzeuges beiträgt. Im Gegenteil, muss diese positive Zugkraft zusätzlich mit der Betriebsbremse abgebremst werden, um das Fahrzeug zum Stillstand zu bringen. Die Energie wird dadurch lediglich in Wärme umgewandelt. Beim Anfahren stellt das Kriechmoment der E-Maschine keine signifikanten Nachteile dar. In der Simulation ist das Kriechen nicht abgebildet und konnte somit bisher nicht bewertet werden.

Wie in Abbildung 3.17 dargestellt, kann man den Bereich des Kriechens gut eingrenzen. Kurz vor dem Stillstand des Fahrzeuges wird die E-Maschine bestromt und die aufgebrauchte Energie muss von dem/der Fahrer/-in mit der Betriebsbremse eliminiert werden. Wenn man in diesem eingegrenzten Bereich die aus dem Speicher gezogene Energie abzüglich des Bordnetzverbrauches beziffert, dann beschreibt diese Energie den Mehrverbrauch des Kriechens an dieser Stelle.

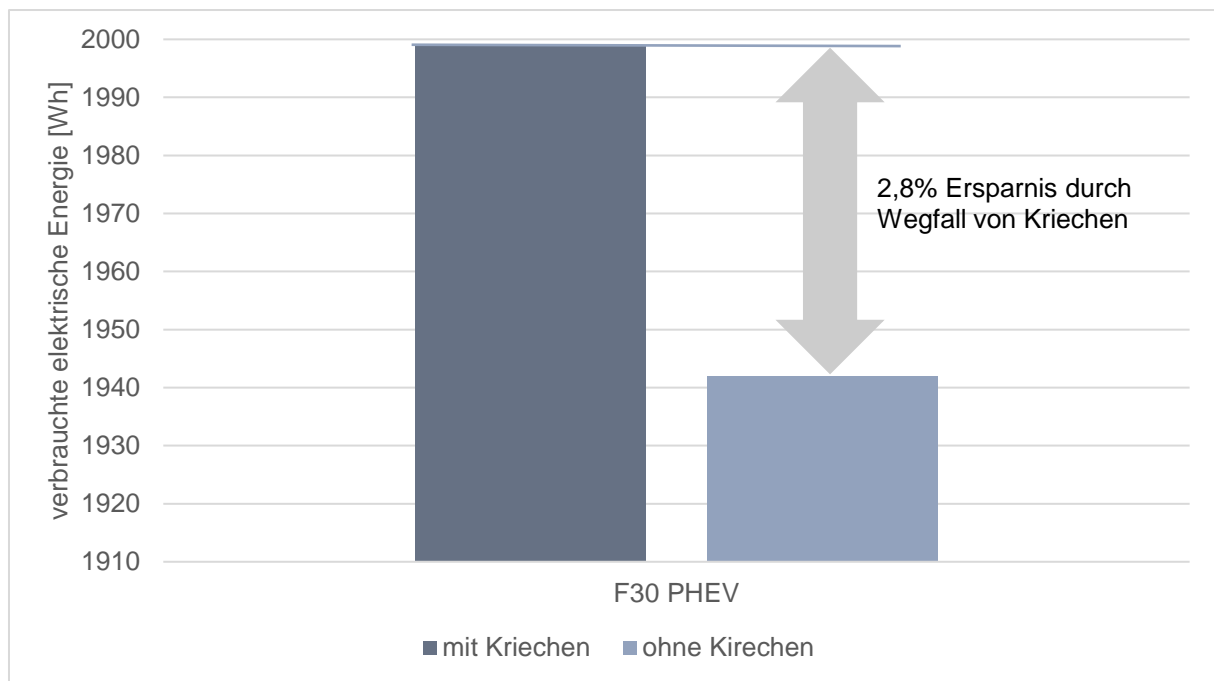


Abbildung 3.18: Ersparnis an Energie durch Wegfall von Kriechen beim PHEV(P2)

Durch aufsummieren aller Stillstandsphasen mit Kriechen ergibt sich ein Mehrverbrauch von 2,8 %. Anders gesagt könnte man durch den Wegfall von Kriechen etwa 2,8 % an elektrischer Energie einsparen (siehe Abbildung 3.18). Weitere Messungen des PHEV(P2) kamen zu den gleichen Ergebnissen.

3.5.2 Validierung PHEV(P4)

Wie in den vorherigen Messungen des PHEV(P2) gezeigt, stimmen auch die Ergebnisse der Simulation beim PHEV(P4) äußerst gut mit den Messungen überein. Die Energieverbräuche zeigen lediglich leichte Abweichungen. Kriechen ist auch beim PHEV(P4) nicht in der Simulation abgebildet und konnte deshalb auch hier bisher noch nicht bewertet werden.

Die Ölpumpe an der Vorderachse zum Schmieren des Vorderachsgetriebes könnte aufgrund des Mitschleppens während der elektrischen Fahrt in dieser Verifizierung ebenfalls festgestellt werden. Das Getriebe an der Vorderachse trägt beim PHEV(P4) während der rein elektrischen Fahrt nicht zum Antrieb bei, und verbraucht lediglich Energie. Dies verschlechtert den Wirkungsgrad des Gesamtantriebes enorm und wird aufgegriffen, um im Kapitel 3.7 Effizienzpotentiale für PHEV - Fahrzeuge darzulegen.

Der PHEV(P4) kriecht ebenfalls und hat, wie in Abbildung 3.19 abgebildet, starke E-Maschinenmomente kurz vor dem Stillstand. Beim Anfahren sind die E-Maschinenmomente des Kriechens kein Nachteil, jedoch kurz vor dem Abbremsen muss das E-Maschinemoment von der Betriebsbremse durch Bremsen überwunden werden. Die Energie, welche die E-Maschine dazu benötigt, wird daher nur in Wärme umgewandelt und nicht in Antriebsleistung umgesetzt.



Abbildung 3.19: Moment an der E-Maschine des PHEV(P4) aus Messung am Rollenprüfstand in einem FTP72 Fahrzyklus

Das Kriechen des PHEV(P4) verbraucht jedoch im Vergleich zum PHEV(P2) lediglich $2,8 \text{ Wh}$. Dies entspricht einem Mehrverbrauch von rund 0.14% . Der Wegfall von Kriechen bringt daher im untersuchten PHEV(P4) in dieser Messung kaum Verbesserungen. Weitere Messungen deckten sich mit dieser Messung.

3.5.3 Validierung BEV

In der Validierung des BEV-Fahrzeuges mittels Messungen auf dem Rollenprüfstand in einem FTP72 Fahrzyklus bestätigen die Ergebnisse aus der Simulation hinsichtlich der elektrischen Gesamtverbräuche, und der Verbräuche der Einzelkomponenten sowie das Fahrverhalten des Antriebes. Die Simulation ist daher valide und die bisherigen Ergebnisse konnten bestätigt werden. Aufgrund mehrerer Messungen zeigte sich jedoch, dass der Fahrereinfluss bei einem BEV sehr groß ist.

3.6 Ergebnisse des Vergleiches aus BEV – PHEV(P2) – PHEV(P4)

Zusammenfassend kann man aus dem Vergleich zwischen den Antriebstopologien BEV, PHEV(P2) und PHEV(P4) schließen, dass die PHEV Fahrzeuge einen deutlich höheren elektrischen Verbrauch haben als das BEV Fahrzeug. Exemplarisch ist in Abbildung 3.4 für den FTP72-Zyklus der Mehrverbrauch gegenübergestellt. Vor allem aufgrund der dramatischen Getriebeverluste verbrauchen die PHEV - Fahrzeuge deutlich mehr als das BEV - Fahrzeug.

In der Simulation lässt sich durch Anpassung der Fahrwiderstände ein objektiver Vergleich aufzeigen, wie viel der Unterschied der Antriebstoplogie tatsächlich ausmacht. Nach Anpassung der Fahrwiderstände im FTP72 haben der PHEV(P2) einen Mehrverbrauch von 44% und der PHEV(P4) von 26% . Im Highway-Fahrprofil sind die Unterschiede mit 12% und 17% nicht ganz so hoch.

Im Folgenden sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, um die Verbrauchsunterschiede zu reduzieren oder zu eliminieren. In der Praxis werden Mehrverbräuche aufgrund der erhöhten Fahrwiderstände durch topologiebedingtes Mehrgewicht trotzdem auftreten.

3.7 Mögliche Effizienzpotentiale in Hybridfahrzeugen

Aus den bisherigen Betrachtungen lassen sich für alle drei untersuchten Topologien Effizienzpotentiale ausweisen. Da sich die höchsten Einsparungen in den Verlusten der Getriebe finden, wird versucht diese zu vermeiden und zu verringern.

3.7.1 Effizienzpotentiale PHEV(P2)

Mit den gewonnen Erkenntnissen dieses Kapitels wird nun ein Konzept für einen hocheffizienten Plug-In-Hybrid vorgestellt, der dem eines P2 - Parallel Hybrid sehr ähnlich ist. Im Folgenden soll eine Variante eines Plug-In Hybrides vorgestellt werden, die eine Weiterentwicklung aus der Mischung eines P2 - und eines P3 - Parallel Hybrides darstellen soll. Ein Parallel Hybrid der Variante P2, wie in Kapitel 2.2.2 vorgestellt, hat nach der Literatur die E-Maschine am Eingang des Schaltgetriebes. Dies bedingt, dass die E-Maschine Drehzahländerungen in Kauf nehmen muss, und aus diesem Grund nicht jenen Wirkungsgrad des PHEV(P4) erreicht.

Wenn man die Verluste des Schaltautomaten vermeiden möchte, so ist es notwendig, die E-Maschine technisch nach dem Schaltgetriebe anzuordnen und vor der E-Maschine eine Trennkupplung zu installieren. Es ist daher möglich, die E-Maschine am Getriebeausgang zu positionieren und von dort das erforderliche Moment weiterzuleiten. Eine weitere Möglichkeit wäre, die E-Maschine im Achsgetriebe miteinzubinden. Wichtig ist jedoch, dass man durch eine Trennkupplung das Getriebe abkoppelt, um so, wie anhand der Untersuchung gezeigt wurde, beispielsweise 10 % im Highway Fahrzyklus der Energie einsparen zu können.

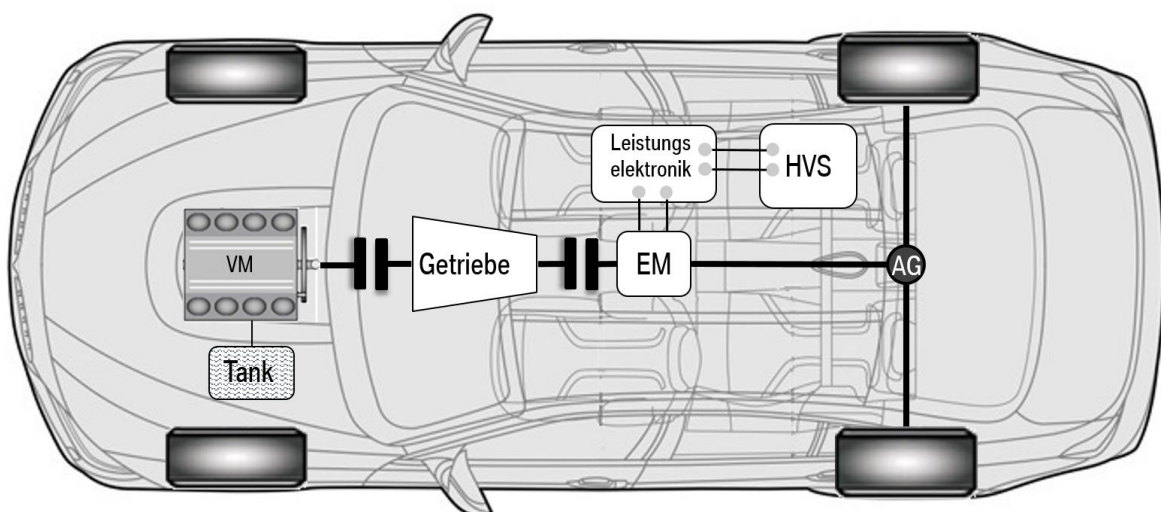


Abbildung 3.20: Weiterentwickeltes P2/P3 – Parallel Hybrid Antriebskonzept

Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass in einer solchen Antriebskonfiguration bei hoher Lastanforderung nicht der richtige Gang im Getriebe vorgewählt ist und daher das Getriebe durch Hochschleppen in den richtigen Gang versetzt werden muss. Dies kann zum einen durch eine E-Maschine oder durch eine weitere E-Maschine im Getriebe erfolgen. Mit dieser Variante ist es jedoch

auch möglich, in einem Fahrmodus der sportlich ausgelegt ist, die Trennkupplung vor die E-Maschine zu verbinden und damit den richtigen Gang im Getriebe vorzuschalten. Damit wäre eine deutlich verbesserte Response Zeit bei hoher Lastanforderung möglich. Auch die Beschleunigungsspontanität würde davon deutlich profitieren. Die elektrische Reichweite würde aufgrund der erneuten Verluste in einem etwaigen Sport-Modus sinken.

3.7.2 Effizienzpotentiale PHEV(P4)

Für den PHEV(P4) wird aus den bisherigen Erkenntnissen gewonnen, dass es bei rein elektrischer Fahrt von Vorteil wäre, wenn man das Getriebe und das Achsgetriebe an der Vorderachse entkoppeln könnte. Aus diesem Grund wird eine Weiterentwicklung eines P4 - Parallel Hybrid Konzeptes vorgestellt. In diesem Konzept bleibt die Hinterachse mit der E-Maschine und dem Verteilergetriebe unangetastet. Es ändert sich nur das Differential an der Vorderachse. Dieses wird um 2 Trennkupplungen an den Ausgängen des Differentials hin zu den Antriebswellen erweitert. Nachteil dieser Variante wäre, dass bei einer hohen Lastanforderung das Getriebe an der Vorderachse nicht im richtigen Gang wäre und auch hier in den richtigen Gang hochgeschleppt werden müsste. Die Response Zeit in einem solchen Modus wäre dementsprechend lange. In einem sehr effizienten Fahrzeugmodus wäre es möglich, diese Einschränkungen in Kauf zu nehmen und so diese Vorteile in die Fahrzyklen miteinfließen lassen zu können.

Es wäre auch möglich, eine solche Kupplung zum Trennen des Getriebes von den Rädern der Vorderachse zu trennen, indem man diese Kupplung am Getriebeausgang platziert. Die Momente sind hier wesentlich geringer, dementsprechend wäre die Ausführung leicht zu bewerkstelligen. Jedoch müssten dadurch die Verluste des Achsgetriebes im Schleppebetrieb bei rein elektrischer Fahrt berücksichtigt werden. Dies würde ausgehend von der bisherigen Betrachtung eine Erhöhung um rund 2-3% in einem Highway beziehungsweise einem FTP72 Zyklus bedeuten.

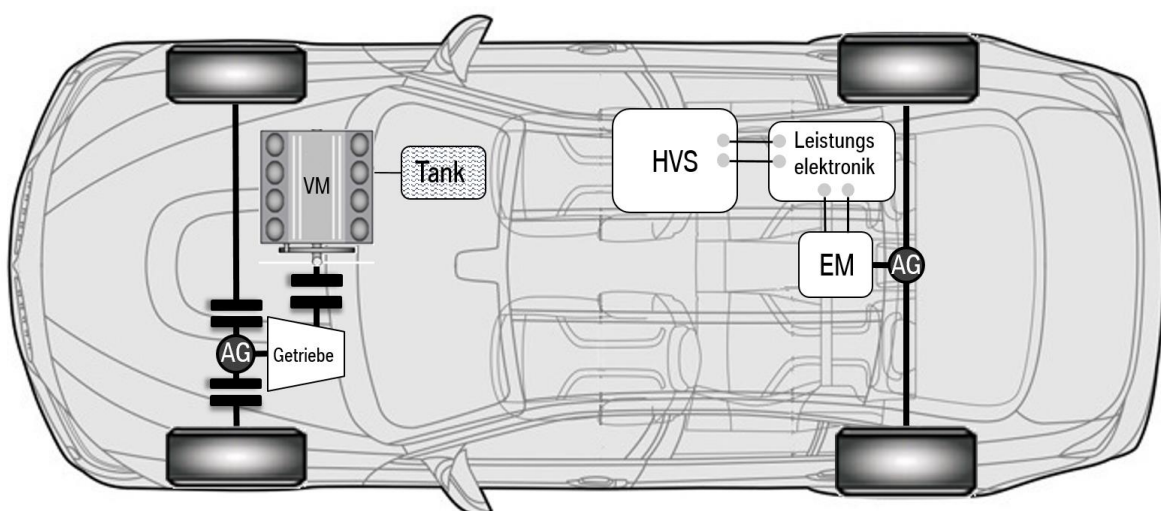


Abbildung 3.21: Weiterentwickeltes P4 – Parallel Hybrid Antriebskonzept Konzept

An dieser Stelle sind die Momente sehr groß. Sie entsprechen den Momenten, welche am Rad anliegen. Trennkupplungen eignen sich an dieser Stelle nur bedingt. Lamellenkupplungen, wie sie bei hochmodernen allradangetriebenen Fahrzeugen in Verteilergetrieben integriert sind, wären eine Möglichkeit der Ausführung. Des Weiteren wäre auch eine Abschaltkupplung, wie sie an der Hinterachse von P4 – Parallel Hybrid Konzepten verwendet werden, möglich.

In einem Sport-Modus könnten auch in diesem Konzept die Trennkupplungen am Achsgetriebeausgang geschlossen werden, um eine verringerte Response Zeit und eine verbesserte Beschleunigungsspontanität zu gewährleisten. In einem effizienten Modus würden die Kupplungen beim elektrischen Fahren geöffnet werden und das Getriebe würde keine Verluste mehr mit sich bringen.

4 Effizienzsteigerungspotentiale BEV

Elektrische Maschinen weisen deutlich höhere Wirkungsgrade in der Energiewandlung auf als Verbrennungsmotoren. Je nach Baugröße, Betriebspunkt und Bauweise sind absolute Wirkungsgrade größer 90 % zu erreichen [8]. Ein wesentlicher Vorteil ergibt sich außerdem aufgrund der Fähigkeit, das maximale Drehmoment nahezu aus dem Stand heraus lukrieren zu können. In der Automobilbranche waren permanent erregte Synchronmaschinen aufgrund ihres hervorragenden Wirkungsgrades bisher weit verbreitet. Aufgrund des hohen Einsatzes von Magneten haben diese E-Maschinen jedoch einen großen wirtschaftlichen Nachteil. Hersteller wie etwa Tesla verwenden Asynchronmaschinen und sind daher auch nicht von Magnetpreisen am Weltmarkt abhängig.

Um BEV - Fahrzeuge effizienter zu gestalten, reicht es nicht alleine relevante Bauteile, wie etwa die E-Maschinen oder den Hochvoltspeicher (HVST) effizienter zu gestalten. Die in Kapitel 3.4 durchgeführten Wirkungsgradanalysen haben eindrucksvoll gezeigt, dass die Wirkungsgrade der elektrifizierten Komponenten bereits sehr effizient sind und wenig Einsparungspotential bieten. Eine weitere Steigerung der Effizienz ist nur im Gesamtverbund aus konstruktiver Gestaltung und intelligenter Betriebsstrategie möglich.

Ein BEV-Fahrzeug verbraucht bei steigender Geschwindigkeit relativ betrachtet wesentlich mehr Energie als ein Fahrzeug mit konventionellem verbrennungsmotorischen Antrieb. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Sensitivitäten bei BEV' s anders gelagert sind. Bei steigender Geschwindigkeit steigt der Bedarf an Energie zum Antreiben des Fahrzeuges enorm an und der Speicher wird dadurch hoch belastet. Durch diese Belastung ist ein hoher Kühlbedarf erforderlich und damit sinkt die Reichweite rapide. Die Sensitivitäten sind somit bei einem BEV anders gelagert als bei einem Fahrzeug mit konventionellem Antrieb [3]. Aus dieser Betrachtung heraus ergibt sich somit, dass elektrisch betriebene Fahrzeuge in Kombination mit einer intelligenten Betriebsstrategie unter Last Potentiale zur Optimierung des Energieverbrauchs aufweisen. Intelligente Betriebsstrategien ermöglichen BEV - Fahrzeugen daher geringere Energieverbräuche und das Reichweitenproblem, welches BEV - Fahrzeuge aktuell noch aufweisen, kann dadurch in hohem Maße verringert werden.

Grundsätzlich könnte man behaupten, es wäre grundlegend effizienter, lediglich eine E-Maschine an einer Achse einzusetzen, jedoch sind dadurch nicht jene Fahrleistungen möglich, wie mit einem BEV-AWD. Dies beruht auf zwei Gründen. Einerseits können die Räder einer Achse mit gewöhnlicher Bereifung nicht jenes Moment auf die Straße übertragen, wie vier Räder an zwei Achsen. Andererseits wäre eine E-Maschine an nur einer Achse sehr groß zu dimensionieren, was sich aus Effizienzsicht, als auch aus Gewichtsgründen nachteilig auswirken würde.

Aus fahrdynamischer Sicht macht es bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen Sinn, hohe Leistungen für traktionsstarke Fahrzeuge als allradangetriebene Fahrzeuge auszulegen. Der Hochvoltspeicher eines Elektrofahrzeuges mit 100 kWh Energieinhalt hat eine Masse von rund 1000 kg. Im Gesamtverbund mit dem Fahrzeug bedeutet dies ein hohes Leergewicht für das Fahrzeug. Bei ausreichender Nutzlast und der Möglichkeit hohe Reichweiten zu lukrieren, ist es aus aktueller Sicht mit aktuellen Speichertechnologien notwendig, hohe Speicherkapazitäten im Fahrzeug unterzubringen. Dies bedeutet, dass das Fahrzeuggewicht stark steigt, auf über 2000 kg. Wenn ein Fahrzeughersteller nun gute Fahrleistungen für einen BEV einfordert und gleichzeitig geringe Verbräuche benötigt, um

hohe Reichweiten zu realisieren, ist es unumgänglich BEV's mit einer allradangetriebenen Antriebstopologie zu versehen.

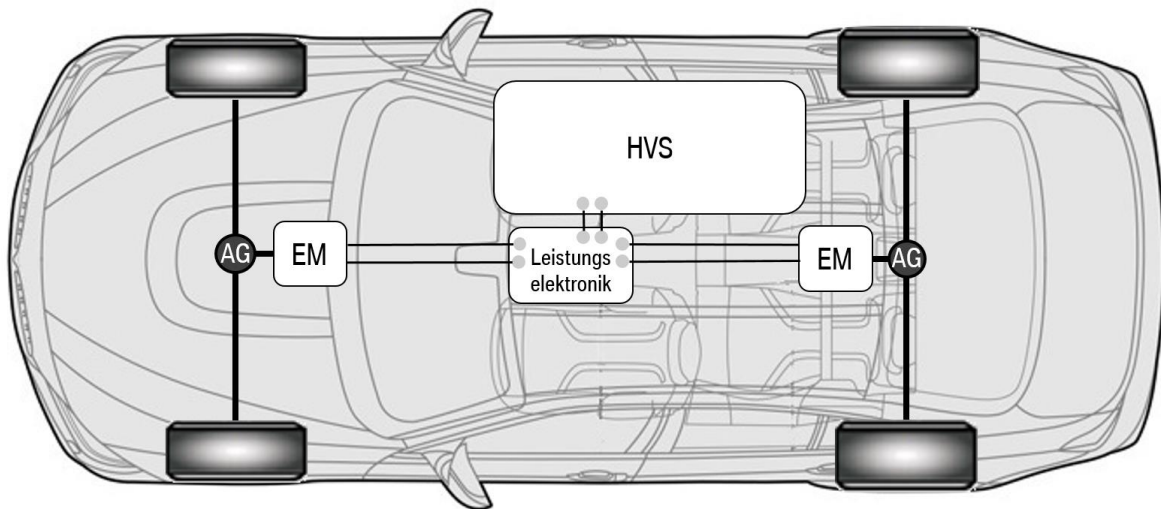


Abbildung 4.1: Antriebstopologie eines BEV - AWD

Ein BEV – AWD - Fahrzeug ist in der Regel so aufgebaut, dass eine E-Maschine die Vorderachse und eine E-Maschine die Hinterachse antreibt. Damit hat man einen Stellhebel zur Steuerung der Momente zwischen der vorderen und der hinteren E-Maschine. In der Betrachtung der Momentenaufteilung bei BEV – AWD Antrieben mit jeweils einer E-Maschine an der Vorderachse und einer E-Maschine an der Hinterachse werden stromerregte Synchronmaschinen (SSM) herangezogen. Da die E-Maschinen an den zwei Achsen nicht ident sind, sowohl was ihre Leistung als auch ihr Drehmoment betrifft, ist eine Untersuchung der Effizienz durchaus sinnvoll. Zusätzlich verwendet man aufgrund der unterschiedlichen Momentenverläufe unterschiedliche Übersetzungen zwischen den E-Maschinen und den angetriebenen Rädern. Für Untersuchungen hinsichtlich der Effizienz und einer damit verbundenen Momentenregelung ist es sinnvoll, die Momente auf Radmomente zu beziehen, da diese unter der Prämisse, dass an beiden Achsen gleiche Räder verwendet werden, identisch sind. Gleiches gilt für die Drehzahl. Die Drehzahl an der Vorderachse und an der Hinterachse wird bezogen auf die Getriebeausgangsdrehzahl und nicht auf die E-Maschinendrehzahlen, da diese sich auch mit der Übersetzung ändern.

4.1 Fahrzeuganalyse TESLA Model S P100D

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Fahrzeug hinsichtlich der Effizienz untersucht. Aktuell gibt es nur sehr wenige Serienfahrzeuge mit BEV - AWD Antrieb. Aufgrund der großen Nachfrage von BEV - Fahrzeugen seitens ökologisch bewusster Kunden/-innen und Fahrzeugherstellern, die Ihren Flottendurchschnitts-Verbrauch senken wollen, werden diese Fahrzeuge in Zukunft in größerer Stückzahl auf den Markt kommen. Um eine Größenordnung zu erhalten, wie groß sich der Effekt der Achsmomentverteilung durch die E-Maschinen auf die Effizienz darstellt, wurde als Referenzmodell ein Tesla Model S P100D³ auf einem Allradrollenprüfstand untersucht [31]. Das Fahrzeug wurde komplett mit Messequipment ausgestattet, um die notwendigen Signale zu messen.

³ Fahrzeug der Firma TESLA Inc.

Es wurden insbesondere folgende Signale ausgewertet:

- Inverterströme aller 3 Phasen der E-Maschinen an Vorder- und Hinterachse
- Inverterspannungen aller 3 Phasen der E-Maschinen an Vorder- und Hinterachse
- Klemmenspannung am Hochvoltspeicher
- Klemmenstrom am Hochvoltspeicher

Für die Untersuchung zur Analyse der Verteilung und einer eventuellen Veränderung in einem Betriebsmodus zur Verlängerung der Reichweite wird auf einem Allradrollenprüfstand ein kundennaher Verbrauchszyklus, wie in Kapitel 2.4.5, gefahren. Die Fahrwiderstände auf dem Allradprüfstand in der BMW Group AG wurden auf die offiziell ausgewiesenen Fahrwiderstände der EPA (U.S. Environmental Protection Agency) eingestellt. In dieser Untersuchung gilt es abzuklären, welchen Einfluss die Funktion *Range Mode*⁴ (zu Deutsch: Reichweitenmodus) in den Einstellungsmöglichkeit ON und OFF, welche im Fahrzeugterminal in der Mitte des Armaturenbrettes eingestellt werden kann, auf die Effizienz des Fahrzeuges hat. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei dem Antrieb der E-Maschinen. Es gilt zu untersuchen, wie sich das Verhalten hinsichtlich der Bestromung, und damit dem Moment an den jeweiligen E-Maschinen an der Vorderachse und an der Hinterachse, verhält. Der elektrische Verbrauch wird dabei einerseits am Hochvoltspeicher ermittelt und andererseits an den beiden E-Maschinen an der Vorderachse und an der Hinterachse.

Die Klimaanlage war dabei immer deaktiviert (AC-Mode OFF), damit Verbrauchseinflüsse durch die Klimaanlage-Regelung ausgeschlossen werden können. Auch die Lüftung und sämtliche andere Verbraucher, welche im Fahrzeug vom/von der Fahrer-/in einzustellen sind, werden vollständig deaktiviert. Wenn man von anderen Einsparungsmöglichkeiten, wie etwa Bordnetzlastverringerungen absieht, gibt es außer dem Antrieb keine großen Stellhebel mehr, die große Verbrauchsveränderungen bewirken können. Es wird dabei stets überprüft, dass die Speicherkühlung nicht aktiviert wurde. Da das Fahrzeug auf 10 °C vorkonditioniert ist, hat der Speicher auch ein ausreichend großes Temperaturfenster, um sich zu erwärmen, ohne die Speicherkühlung zu aktivieren.

Die Konnotation wird so gewählt, dass die E-Maschinensignale an der Hinterachse mit 1 und die Signale an der Vorderachse mit 2 nummeriert sind. Die Konnotation wird verwendet, um die Leistungen an den beiden Achsen zu vergleichen. Im ersten Schritt werden jeweils die Leistungen der E-Maschine an der Vorderachse mit *Range Mode* OFF und mit *Range Mode* ON verglichen. Zur Überprüfung der Daten werden die Leistungen der E-Maschinen an Vorder- und Hinterachse addiert und für beide Versuchsfahrten mit *Range Mode* OFF und *Range Mode* ON verglichen. Die Leistungen deckten sich dabei. Dies soll sicherstellen, dass dem Fahrprofil während der Messung am Allradprüfstand gefolgt wurde und kein Fehler in der Messung aufgetaucht ist, der etwaige Schlüsse verfälschen könnte.

Um die Leistungen an der E-Maschine an der Vorderachse zu erhalten, werden der Strom und die Spannung an einer Phase der E-Maschine multipliziert. Daraus ergibt sich ein deutlicher Unterschied im kundennahen Verbrauchszyklus in der Leistung der hinteren E-Maschine (Abbildung 4.2). Im *Range Mode* OFF wird die Hinterachse mehr bestromt und erzeugt damit mehr Leistung. Im *Range Mode* OFF ist die E-Maschine an der Hinterachse sehr oft inaktiv und wird nicht bestromt.

⁴ Modus zur Verlängerung der Reichweite in einem BEV – Fahrzeug des Herstellers TESLA Inc.

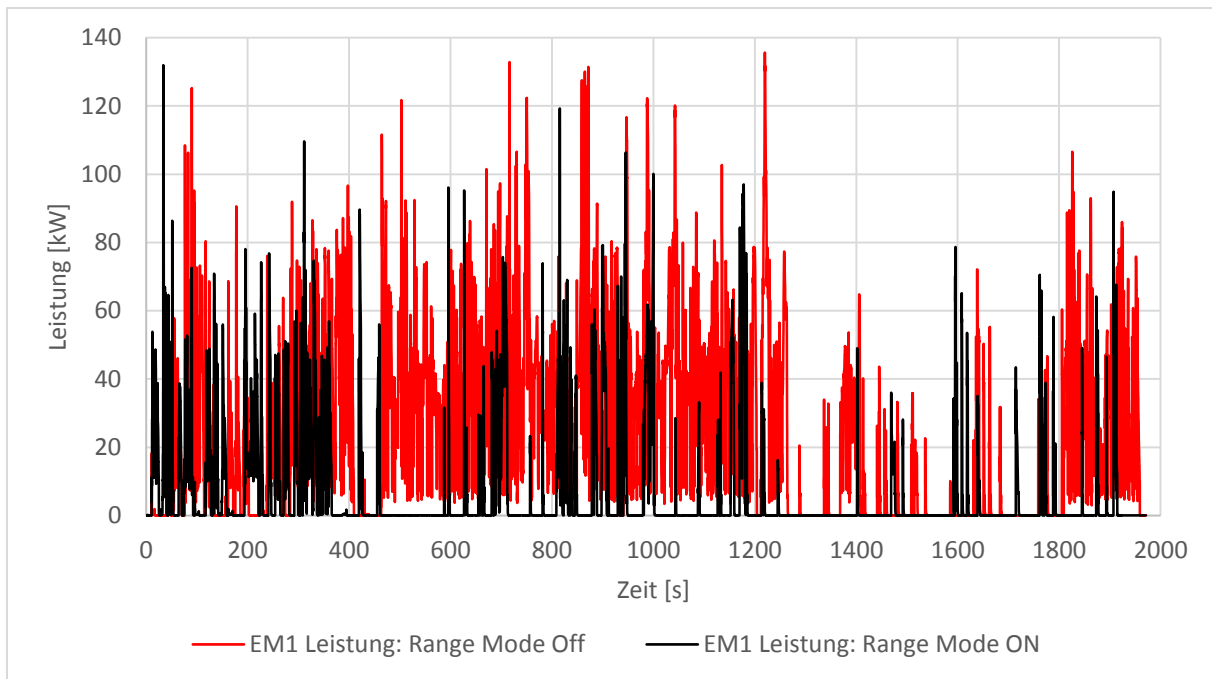


Abbildung 4.2: EM an der Vorderachse mit *Range Modus* ON und OFF des kundennahen Verbrauchszyklus

In der Abbildung 4.3 ist wie zu erwarten das Gegenteil zu sehen wie in Abbildung 4.2. Die Leistung der E-Maschine an der Vorderachse nimmt dementsprechend zu, um dem Fahrprofil folgen zu können. Damit wäre festgestellt, dass Tesla beim Model S P100D die Strategie der Achsmomentverteilung im *Range Mode* ON verändert.

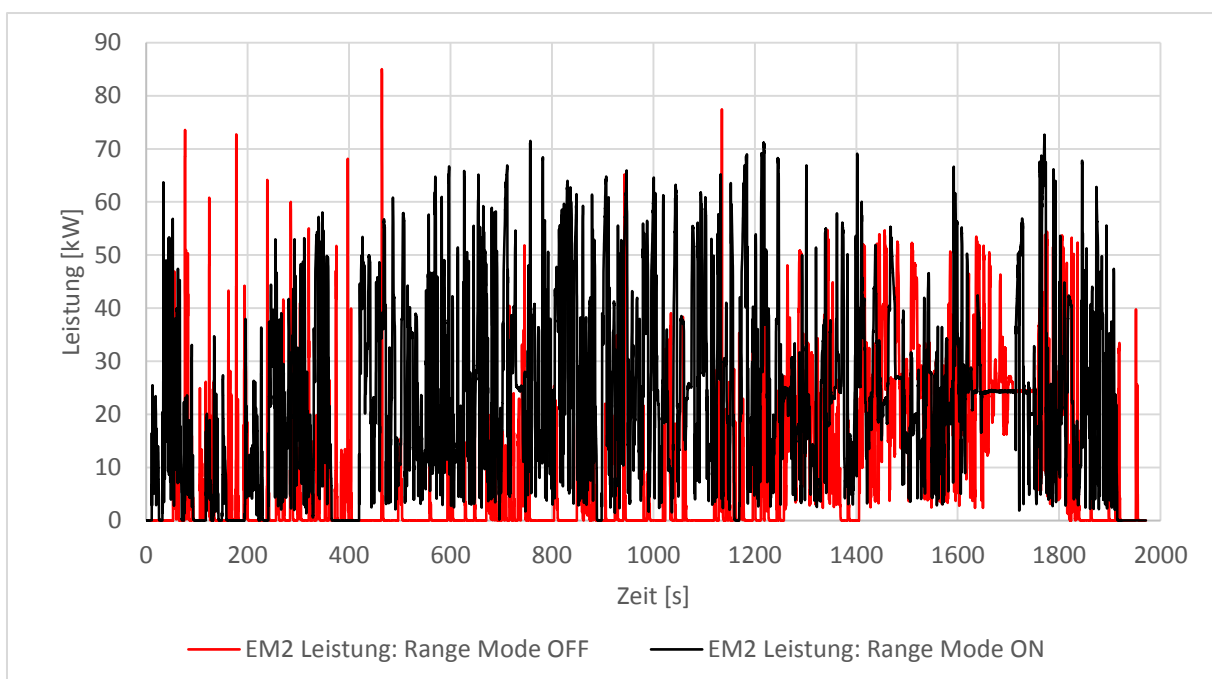


Abbildung 4.3: EM an der Hinterachse mit *Range Modus* ON und OFF im kundennahen Verbrauchszyklus

Nun soll auch noch geklärt werden, ob diese Veränderung der Antriebsverteilung eine Auswirkung auf den elektrischen Verbrauch und damit der Effizienz hat. Dazu werden die Leistungen der

vorderen und der hinteren E-Maschine jeweils für *Range Mode ON* und *Range Mode OFF* addiert. Anschließend werden die Leistungen integriert, um auf die kumulierte Energie schließen zu können. Wie in Abbildung 4.4 ersichtlich, verbraucht der Antrieb gesamt wesentlich weniger im *Range Mode ON*. Aus dem Delta der verbrauchten Energie der E-Maschinen wird der Effizienzvorteil ermittelt.

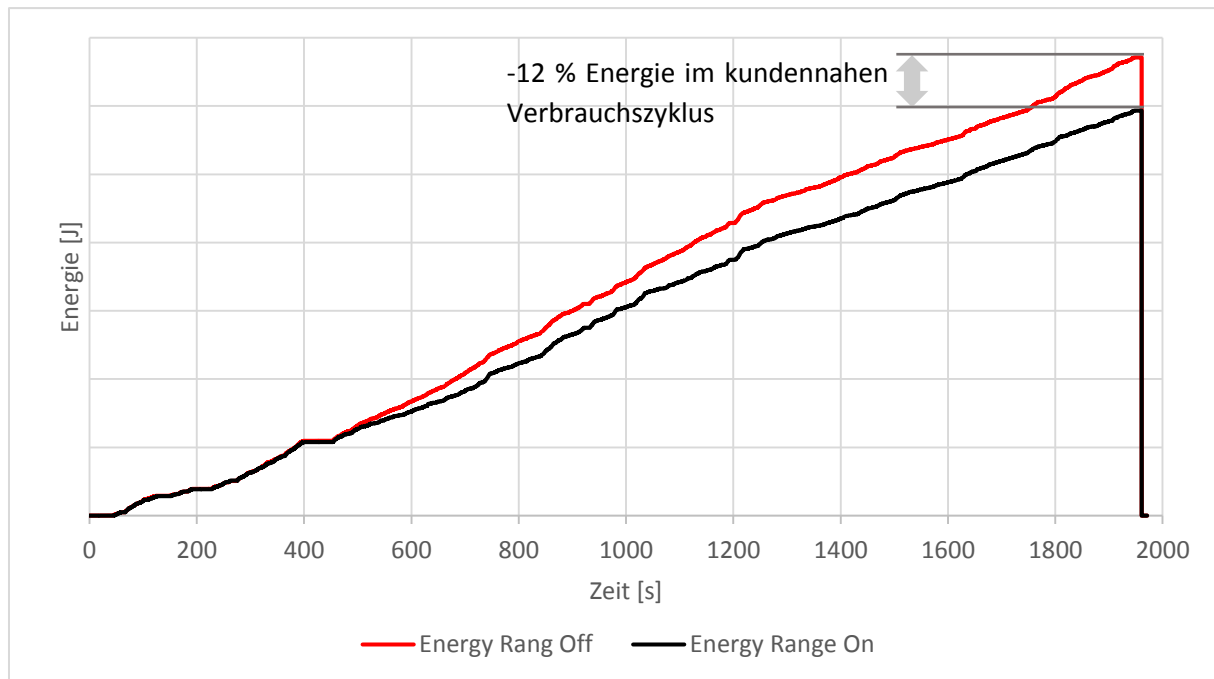


Abbildung 4.4: Energien mit *Range Mode ON* und *Range Mode OFF*

Aus den Kurven in Abbildung 4.4 ergibt sich eine Verbrauchsverringerung von rund 12 % wenn man die Energien der E-Maschinen von *Range Mode OFF* und *Range Mode ON* betrachtet. Es wird in diesem Fall bewusst nicht die Klemmenenergie gemessen, da an der Klemmenenergie andere Einflussfaktoren, wie verringerter Niedervoltbordnetzverbrauch, mit hinein spielen könnten. Sowohl mit *Range Mode ON* als auch mit *Range Mode OFF* war die Klimaanlage auf AC Mode OFF, um wesentliche Einflussfaktoren der Klimaanlage ausschließen zu können. Der Unterschied der Klemmenenergien zwischen *Range Mode OFF* und *Range Mode ON* bewegt sich allerdings auch auf gleichem Niveau. Daher ist dieser Wert durchaus als plausible zu betrachten.

4.2 Simulationsmodell für BEV – All Wheel Drive Fahrzeuge

Für die Untersuchungen in diesem Kapitel wird grundsätzlich das gleiche Gesamtfahrzeugmodell wie in Kapitel 3 verwendet. Jedoch wird die EDRIS-Library angepasst, da hier 2 E-Maschinen und Inverter an der Vorderachse und an der Hinterachse notwendig sind. Diese Bibliothek muss auch die Degradationen und deren Zusammenspiel zwischen den Komponenten regeln.

Grundsätzlich ist der Signalfluss während der Simulation folgender:

- In einem geschlossenen Regelkreis stellt der Fahrregler eine Lastanforderung an eine Steuereinheit, damit dem vorgegebenen Fahrprofil gefolgt werden kann.
- In der Ebene *Control* wird die Lastanforderung aufgenommen und in diversen Controllern wie beispielsweise dem *TorqueController* oder dem *BrakeController* verarbeitet. Der *TorqueController* stellt eine wichtige Stellgröße für die Regelung der Momente der E-

Maschinen dar. Hier ist die Betriebsstrategie hinterlegt, welche je nach Lastanforderung die Momente zwischen Vorderachse und Hinterachse regelt. Die Signale werden über einen CAN-BUS an die jeweiligen Komponenten gesendet.

- Die Anforderungen und die gesendeten Signale werden anschließend von den physikalischen Modellen empfangen und umgesetzt. Dort sind auch eine Verbrauchs- beziehungsweise eine Verlustberechnung integriert.
- Das Folgen des Fahrprofils des Gesamtfahrzeugmodells wird dann unter Berücksichtigung sämtlicher Fahrwiderstände und Trägheiten ausgeführt.

Die Konfiguration verschiedener Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebstopologien erfolgt unter anderem im „EDRIS System Model“ in dem die E-Maschinen und der Hochvoltpeicher konfiguriert und vollständig simulativ abgebildet werden. Diese Struktur ist äußerst komplex und berücksichtigt Degradationen der E-Maschinen, der gesamten Leistungselektronik des Systemverbundes sowie die Hochvoltpeicher und alle anderen elektrisch einschränkenden Bauteile und Betriebsstrategien.

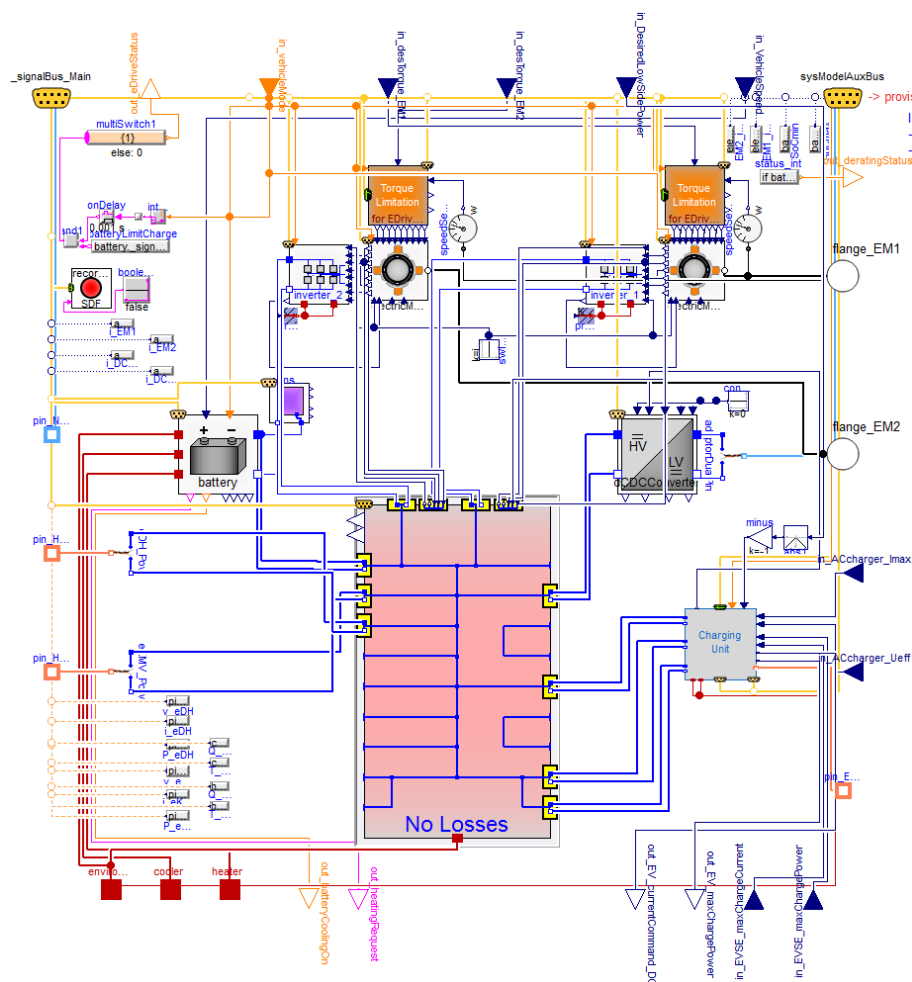


Abbildung 4.5: E-System Modell („EDRIS System Model“)

Im E-System Modell (Abbildung 4.5) werden außerdem sämtliche Verluste zum Teil berechnet oder aus Kennfeldern mit Parametern ausgelesen, die in Versuchen ermittelt wurden. Für diese Arbeit sind insbesondere das Auslesen der Verlustkennfelder für die E-Maschinen, der Inverter und das Getriebe von Bedeutung. In Abbildung 4.6 ist dargestellt, wie das Auslesen der Kennfelder der E-Maschinen, exemplarisch an der Hinterachse, erfolgt. Abhängig von den 3 Eingangsgrößen: E-Maschinenmoment, Drehzahl der E-Maschine und Spannungslage der DC-Spannung wird der aktuelle

Verlust ausgegeben. Der Vorgang des Auslesens erfolgt grundsätzlich für die anderen genannten Komponenten auf die gleiche Art und Weise.

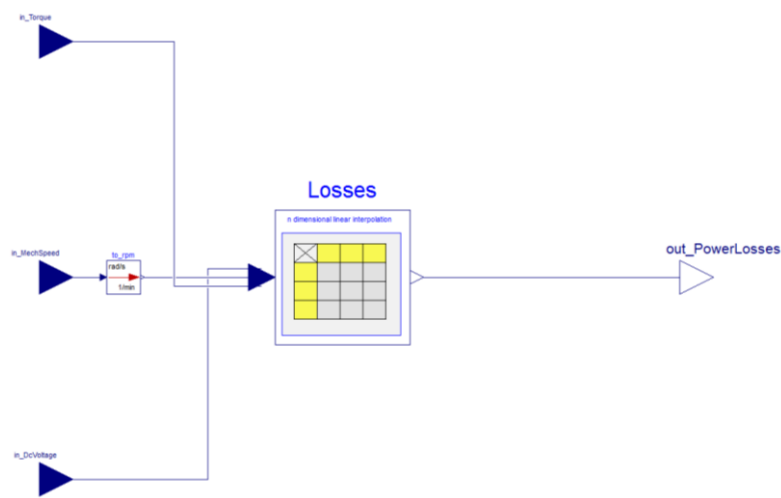


Abbildung 4.6: Simulationsmodell zum Auslesen der Kennfelddaten für die Verlustleistung der E-Maschinen

Um alle folgenden Untersuchungen durchführen zu können, wird ein *Torque Controller* benötigt, der einerseits die Limits der Rekuperation hinsichtlich der maximalen Rekuperationsverzögerung in g berücksichtigt. Andererseits muss dieser die Verteilungen regeln können, mit der die jeweilige Untersuchung abläuft. Die Verteilungen werden immer mittels eines Kennfeldes abhängig von Raddrehzahl und Radmoment abgegriffen und mit den jeweiligen E-Maschinenmomenten multipliziert.

Abbildung 4.7 zeigt die zweite Ebene des *Torque Controllers*. Dabei sind farblich die Signale als Ein- und als Ausgänge der Bussignale erkennbar. Die Bussignale können dann in den Unterebenen abgerufen werden und auch weiter gesendet werden. Damit bildet man auch den Signalfluss ähnlich der Realität ab.

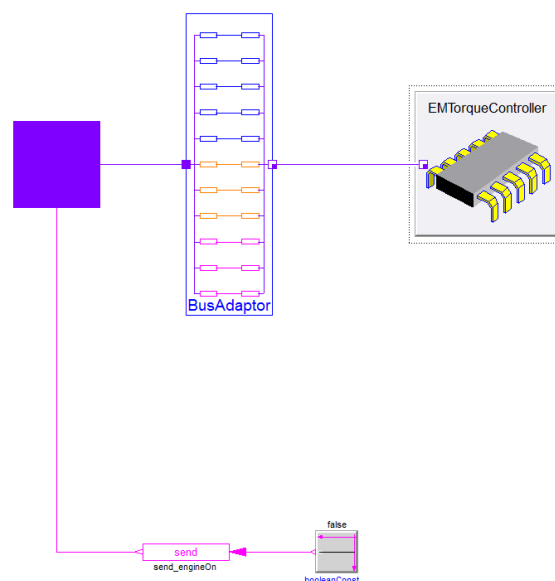


Abbildung 4.7: Zweite *Torque Controller* Ebene

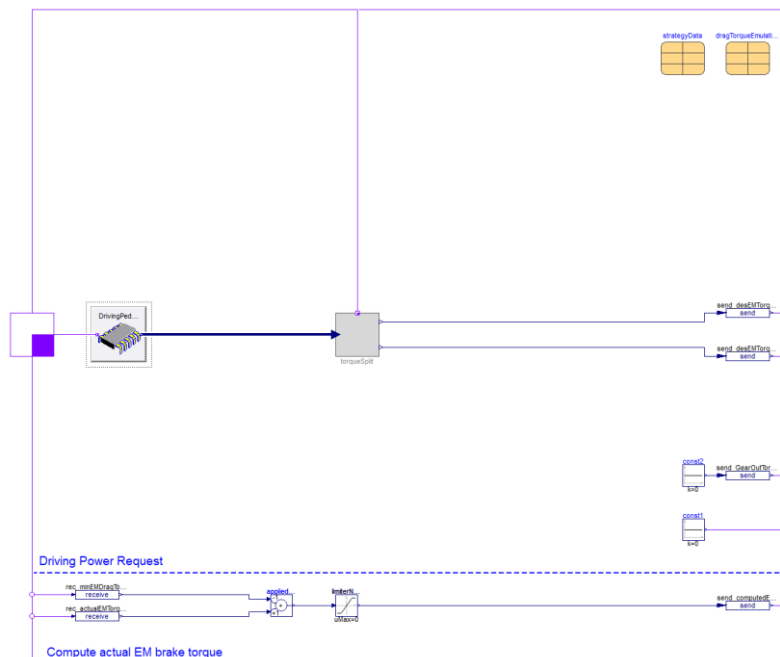


Abbildung 4.8: Dritte Torque Controller Ebene

In der dritten Ebene des wichtigen Torque Controllers geht der Signalfluss durch einen driving Pedal Interpreter, der das Eingangssignal, welches zwischen 0 und 1 liegt in ein gefordertes Radmoment umwandelt und in die vierte Ebene nach Abbildung 4.9 weiterleitet.

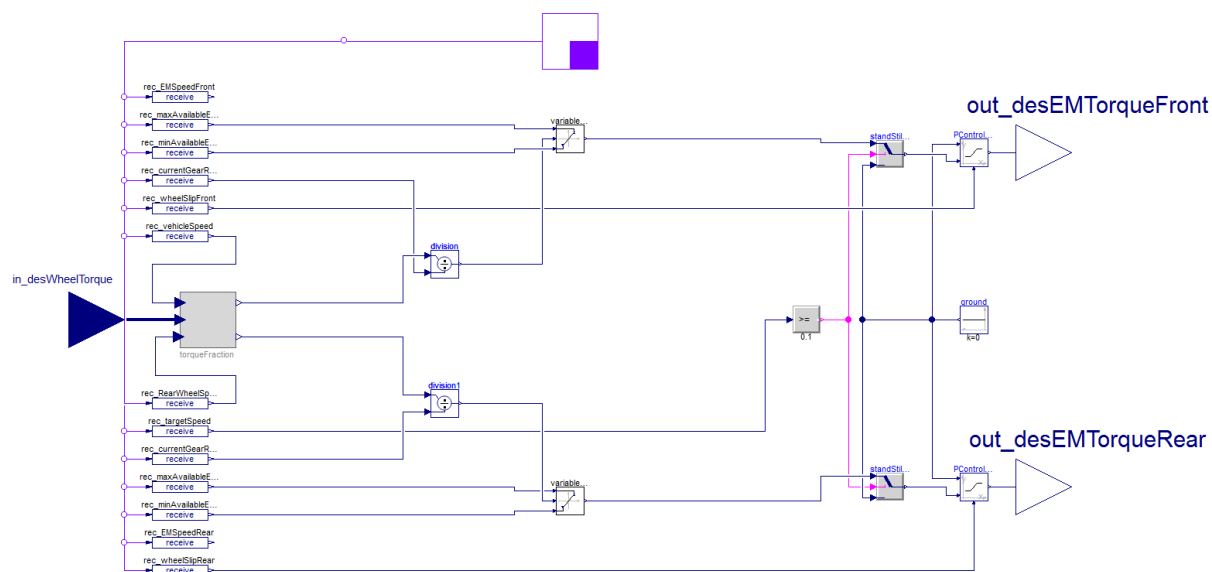


Abbildung 4.9: Vierte Torque Controller Ebene

In der vierten Ebene werden alle benötigten Signale aus dem Bus ausgelesen, um diese in den eigentlichen Controller zum Auslesen der Daten aus dem Kennfeld, unter Berücksichtigung der Rekuperationseinschränkungen, weiterzuleiten. Die restlichen Signale werden für die Umrechnung der Radmomente in E-Maschinenmomente verwendet.

In den Berechnungen werden zur Vermeidung von Problemen in der Simulation auch weitere Elemente eingebaut. Probleme könnten sich etwa ergeben, wenn die Momentenanforderung an die jeweilige E-Maschine im Torque Controller der untersten Ebene nach Abbildung 4.10 größer ist, als

die E-Maschine aufgrund ihrer Auslegung schaffen würde. Bei Überschreitungen der Limits für die E-Maschinen könnten sich in der Simulation Fehler im E-System Modell nach Abbildung 4.5 ergeben. Dazu sind viele Elemente in der untersten *Torque Controller* nach dem Auslesen der Kennfelder mit den Verteilungen hinzugefügt worden.

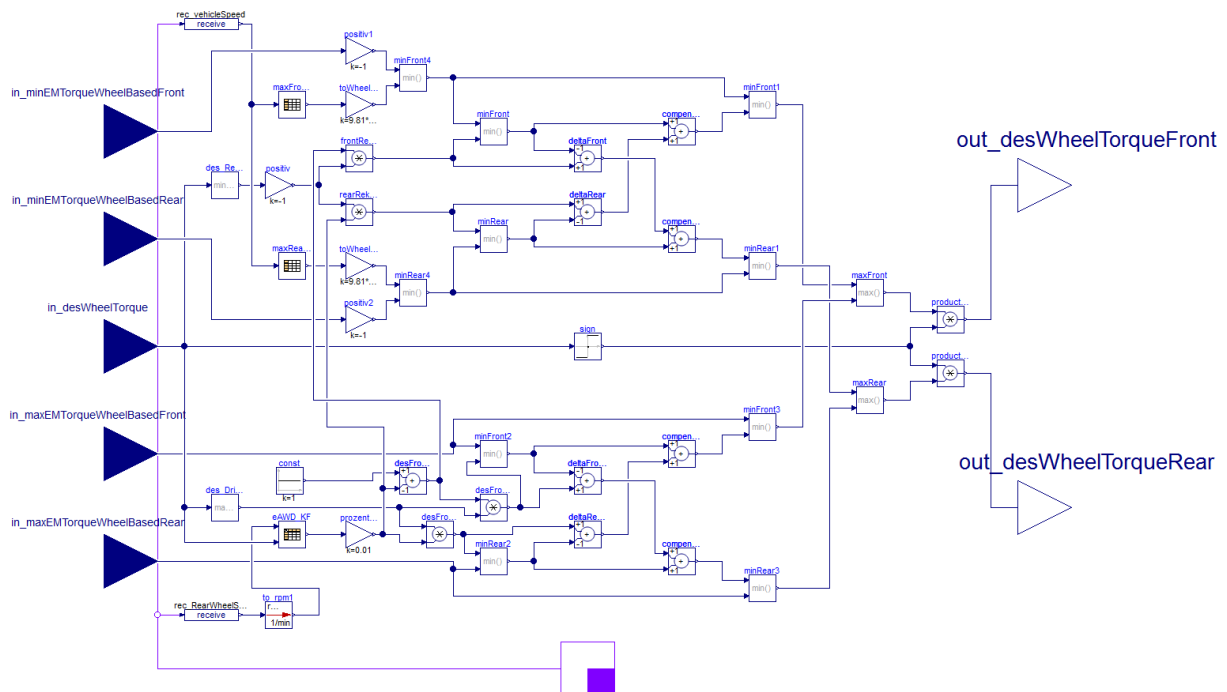


Abbildung 4.10: Unterste *Torque Controller* Ebene mit Rekuperations-Limiter

Als Output des unter Abbildung 4.10 dargestellten *Torque Controllers* erhält man die Achsmomente an der Vorderachse und an der Hinterachse. Damit die Momente an die E-Maschinen über den Datenbus weiter gegeben werden können, müssen die Radmomente in der *Torque Controller* Ebene vier nach Abbildung 4.9 in E-Maschinenmomente über die Getriebeübersetzung umgerechnet werden.

4.3 Prämissen für die Untersuchung der Achsmomentverteilung

Um eine wissenschaftlich und technisch fundierte Analyse über eine effiziente Achsmomentverteilung durchführen zu können, müssen die Randbedingungen für die Untersuchungen klar definiert sein, um objektiv Vergleiche ziehen zu können.

Anfangsparameter für die Simulation Fahrzeug 1:

- Mittlerer kundennaher Verbrauchszyklus nach Kapitel 2.4.5
- 10°C Umgebungstemperatur der Luft
- 10°C Start-Temperatur des Hochvoltspeichers
- Klimaanlage/Heizung ist eingeschaltet (AC-Mode: ON)
- Masse inklusive Zuladung: 2260 kg
- Effektive Luftkraftfläche: $c_w * A = 0,825 \text{ m}^2$
- Zusätzliche Niedervoltspannung aufgrund elektrischer Verbraucher im Fahrzeug: 600 W
- Dynamischer Reifenradius: 0.381 m (bei 100 km/h)

Systemdaten der Antriebskomponenten Fahrzeug 1:

- E-Maschine an der Vorderachse: max. 175 Nm (optional auch Achsmoment von : 1564 Nm)
- E-Maschine an der Vorderachse: max. 17.000 U/min
- Maximaler Inverterstrom an der Vorderachse: 640 A
- Maximaler Inverterspannung an der Vorderachse: 640 A
- Übersetzung Getriebe an der Vorderachse: $i = 8,96$
- E-Maschine an der Hinterachse: max. 400 Nm (optional auch Achsmoment von : 4424 Nm)
- E-Maschine an der Hinterachse: max. 17.000 U/min
- Maximaler Inverterstrom an der Hinterachse: 460 A
- Maximaler Inverterspannung an der Hinterachse: 460 A
- Übersetzung Getriebe an der Hinterachse: $i = 11,06$
- Die Speicherkapazität des Hochvoltspeichers ist auf einen nutzbaren chemischen Energieinhalt von 106 kWh bezogen

Anfangsparameter für die Simulation Fahrzeug 2:

- Mittlerer kundennaher Verbrauchszyklus nach Kapitel 2.4.5
- 10 °C Umgebungstemperatur der Luft
- 10 °C Start-Temperatur des Hochvoltspeichers
- Klimaanlage/Heizung ist eingeschaltet (AC-Mode: ON)
- Masse inklusive Zuladung: 2055 kg
- Effektive Luftkraftfläche: $c_w * A = 0,6655 \text{ m}^2$
- Zusätzliche Niedervoltspannung aufgrund elektrischer Verbraucher im Fahrzeug: 580 W
- Dynamischer Reifenradius: 0.381 m (bei 100 km/h)

Systemdaten der Antriebskomponenten Fahrzeug 2:

- E-Maschine an der Vorderachse: max. 245 Nm (optional auch Achsmoment von : 1564 Nm)
- E-Maschine an der Vorderachse: max. 17.000 U/min
- Maximaler Inverterstrom an der Vorderachse: 640 A
- Maximaler Inverterspannung an der Vorderachse: 640 A
- Übersetzung Getriebe an der Vorderachse: $i = 11,19$
- E-Maschine an der Hinterachse: max. 110 Nm (optional auch Achsmoment von : 4424 Nm)
- E-Maschine an der Hinterachse: max. 17.000 U/min
- Maximaler Inverterstrom an der Hinterachse: 460 A
- Maximaler Inverterspannung an der Hinterachse: 460 A
- Übersetzung Getriebe an der Hinterachse: $i = 9,33$
- Die Speicherkapazität des Hochvoltspeichers ist auf einen nutzbaren chemischen Energieinhalt von 68 kWh bezogen

Die Klimaanlage wird in dieser Betrachtung deshalb aktiviert (AC-Mode: ON), da die folgenden Untersuchungen jene Reichweiten und elektrische Verbräuche liefern sollen, die auch in der Praxis bei durchschnittlicher Fahrweise im realen Straßenverkehr erreicht werden sollen. Im gewöhnlichen Betrieb eines/einer durchschnittlichen Kunden/-in ist die Klimaanlage auch immer aktiviert.

Aufgrund der unterschiedlichen Übersetzungen, die sich aus dem jeweiligen Getriebe inklusive Verteilergetriebe ergeben, werden die Achslasten auf Radmomente bezogen und nicht auf die Momente der E-Maschinen. In dieser Konfiguration der Antriebskomponenten ist ein Folgen des Fahrprofils im kundennahen Verbrauchszyklus nach Kapitel 2.4.5 nur bis zu einer Achsmomentverteilung bis etwa 35 % relativen Hinterachsanteil möglich. Im kundennahen Verbrauchszyklus sind bei einer Geschwindigkeit von 15 km/h im Maximum 3247 Nm Radmoment notwendig. Grundsätzlich wäre bei einer Variation der Zuglastverteilung bei nicht ausreichendem Moment der vorderen E-Maschine ein vorübergehendes „Shiften“ des notwendigen Restmomentes additiv zum maximalen Moment der Vorderachse möglich. Dies würde jedoch bedeuten, dass die Verteilung dynamisch nicht konstant wäre und somit ein systematischer Fehler der Betrachtung auftreten würde. Daher wird unter Zugbelastung die Variation nur bis 40 % relativem Hinterachsanteil durchgeführt, um ein dynamisches Wechseln des Hinterachsanteils zu verhindern.

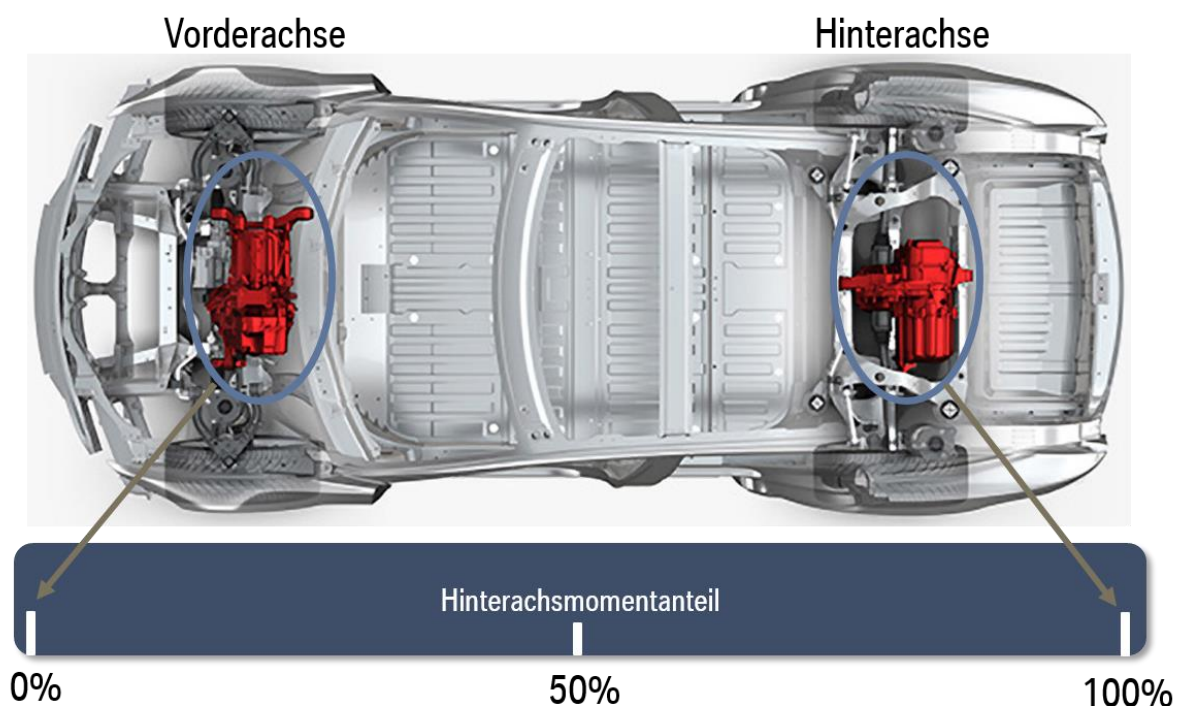


Abbildung 4.11: Grundprinzip der Achsmomentverteilung

In Abbildung 4.12 sieht man, dass bei einer 100 % relativen Hinterachsmomentverteilung in Zugrichtung und einer 90 % relativen Hinterachsmomentverteilung in der Rekuperation im Maximum lediglich 2,5 % Antriebsschlupf an der Hinterachse auftreten. In Zugrichtung liegt dabei der Schlupf tendenziell zwischen 0 % und 1,5 % und in der Rekuperation liegen die Maxima bei 1,5 % Schlupf. Wie in Abbildung 4.12 im oberen Teil dargestellt, tritt der geringe Schlupf nur beim Beschleunigen auf. Es liegen keine großen Flächen unter den Kurven des Schlupfes (blaue Linie: Schlupf an der Hinterachse, rote Linie: Schlupf an der Vorderachse).

Dieser geringe Schlupf ruft eine vernachlässigbare Raddrehzahldifferenz zwischen der Vorderachse und der Hinterachse hervor. Der geringe Schlupf hat keine wesentlichen Auswirkungen auf das Ergebnis einer vollvariablen Achsmomentverteilung und kann daher vernachlässigt werden.

Ein Schlupf tritt allgemein auch bei normaler konstanter Fahrt auf. Der Grund für Schlupf setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Einerseits aus dem Formschlupf, der durch eine Profilstollendeformation bei haftendem Rad zustande kommt und andererseits durch Gleitschlupf, welche durch eine Relativbewegung zwischen dem Reifen und der Straße hervorgerufen wird. [13] Der erste erwähnte Schlupf, nämlich der Formschlupf, lässt sich während der Fahrt nicht vermeiden und muss daher in Kauf genommen werden. Ein gewisser Schlupfanteil tritt somit immer auf und daher kann auch die geringe festgestellte Schlupfdifferenz zwischen Vorderachse und Hinterachse in der Untersuchung vernachlässigt werden.

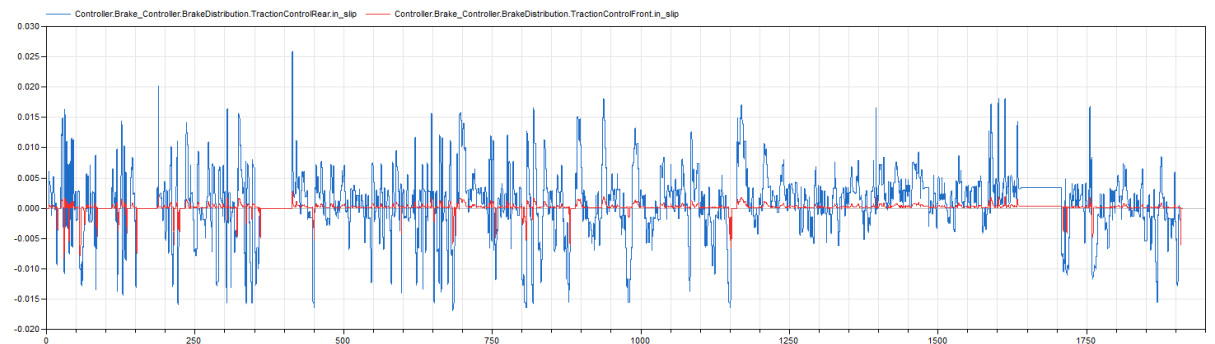


Abbildung 4.12: Schlupf an der Vorderachse und an der Hinterachse im kundennahen Verbrauchszyklus

4.4 BEV-AWD Momentenanalyse

Die gesamten Untersuchungen für eine BEV - AWD Momentenstrategie erfolgen mittels eines Simulationsmodells eines vollelektrischen Fahrzeuges mit jeweils einer E-Maschine an der Vorderachse und einer weiteren an der Hinterachse. Um eine erste Abschätzung der Wirksamkeit einer Allradstrategie eines BEV – All Wheel Drive Fahrzeuges treffen zu können, wird eine Untersuchung mit konstanten Verteilungen durchgeführt. Der Hintergrund vorerst nur konstante Verteilungen zu untersuchen ist jener, dass man einerseits eine erste Abschätzung treffen kann, wie eine sehr vereinfachte effiziente Achsmomentverteilung aussehen könnte, und andererseits um weitere Untersuchungen dynamischer Achsmomentverteilungen plausibilisieren zu können. Dazu wird ein Controller mit einer konstanten Verteilung zur Ansteuerung der E-Maschinen bedatet. In den folgenden Betrachtungen wird die relative Achsmomentverteilung immer auf die Hinterachse bezogen.

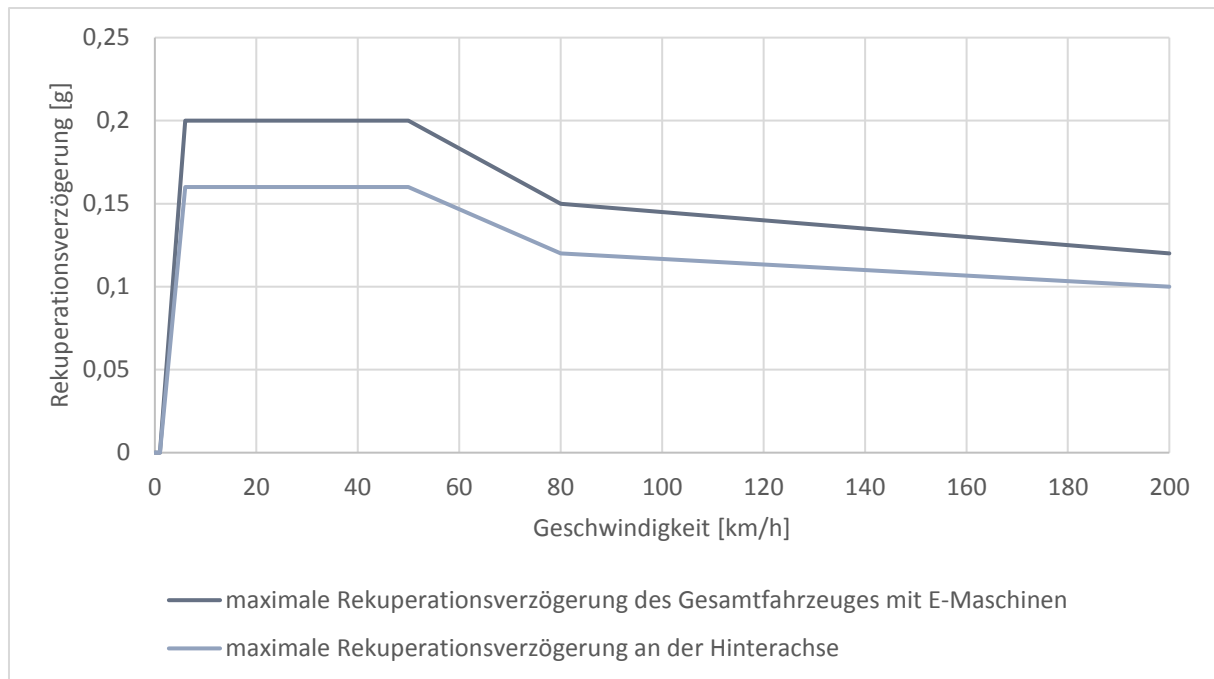


Abbildung 4.13: Kennlinie der Rekuperation im Schubbetrieb

Im Schubbetrieb des Fahrzeuges ist es aus fahrdynamischer Sicht notwendig, die Rekuperation im Schubbetrieb zu begrenzen. Da in der Praxis bei höheren Geschwindigkeiten Instabilitäten des Fahrzeuges auftreten könnten, muss die Rekuperation der E-Maschine an der Hinterachse begrenzt werden. Insbesondere an der Hinterachse gilt es diese Instabilitäten zu vermeiden, da sonst ein etwaiges unkontrolliertes Schleudern die Folge sein könnte. Um dies zu vermeiden, wird im Fahrzeugmodell eine Rekuperationskennlinie abhängig der aktuellen Verzögerung und der aktuellen Geschwindigkeit hinterlegt. Bei Überschreiten der höchst zulässigen Rekuperationsverzögerung wird das negative Radmoment über die E-Maschinen begrenzt. Zusätzlich wird eine begrenzte Rekuperation benötigt, um eine Degradation der E-Maschinen und des Speichers zu verhindern.

Das Simulationsmodell der untersuchten Fahrzeugperipherie sieht ein „One-Pedal-Feeling“ vor. [4] Darunter versteht man ein Beschleunigen und Verzögern des Fahrzeuges ausschließlich mit dem Fahrpedal. Nur in Notsituationen und bei starken Verzögerungen soll die Betriebsbremse zusätzlich zur Verzögerung des Fahrzeuges beitragen.

4.4.1 Konstantverteilung im WLTP

In der Untersuchung möglicher Potentiale einer Betriebsstrategie eines BEV - AWD wird vorerst ein Simulationsmodell herangezogen, welches eine komplette Fahrzeugarchitektur abbildet und alle Limitierungen von E-Systemen berücksichtigt. Als Beispiel wäre hier die Degradation der E-Maschinen oder des HochvoltSpeichers zu nennen.

Bei vollem Moment an der Vorderachse beziehungsweise an der Hinterachse wird angenommen, dass die Achse mit 0 - Moment tatsächlich eine 0 - Momentenregelung fährt. Das heißt, dass die mitlaufende E-Maschine soweit bestromt wird, dass die Verluste aus Reibung und dergleichen ausgeglichen werden und nicht mitgeschleppt werden. Eine weitere Möglichkeit wäre eine sogenannte 0-Strome gelung. Das würde bedeuten, dass die nicht antreibende E-Maschine nicht bestromt wird und mitgeschleppt werden muss. Eine 0 - Stromregelung wird aus zwei Gründen nicht

untersucht. Zum einen aus Response Gründen, also dem Ansprechverhalten bei hoher Lastanforderung und zum anderen weil die Verlustkennfelder, welche hinterlegt sind um die elektrischen und mechanischen Verluste abzubilden, für eine 0 - Stromregelung äußerst komplex zu ermitteln sind. Bei hoher Lastanforderung ist es notwendig, beide E-Maschinen anzutreiben. Bis die mit 0 - Stromregelung laufende E-Maschine ihr volles Moment aufgebaut hätte, würde eine für Elektrofahrzeug nicht übliche Reaktionszeit auftreten und damit eine für den Kunden nicht akzeptable Response Zeit entstehen. Die damit verbundene Verzögerungszeit würde eine verschlechterte Beschleunigungsspontanität zur Folge haben und ein kontinuierlicher Momentenaufbau wäre damit in der Praxis aus heutiger Sicht nicht gewährleistet.

In der Abbildung 4.14 ist zu erkennen, dass bei konstanten Verteilungen die E-Maschine an der Hinterachse wesentlich effizienter ist, als jene der Vorderachse. Bei Betrachtung der Einzelwirkungsgrade (kumuliert über den gesamten Zyklus) der E-Maschinen wie auch beim Gesamtwirkungsgrad (kumuliert über den gesamten Zyklus) beider E-Maschinen ergibt sich das gleiche Bild.

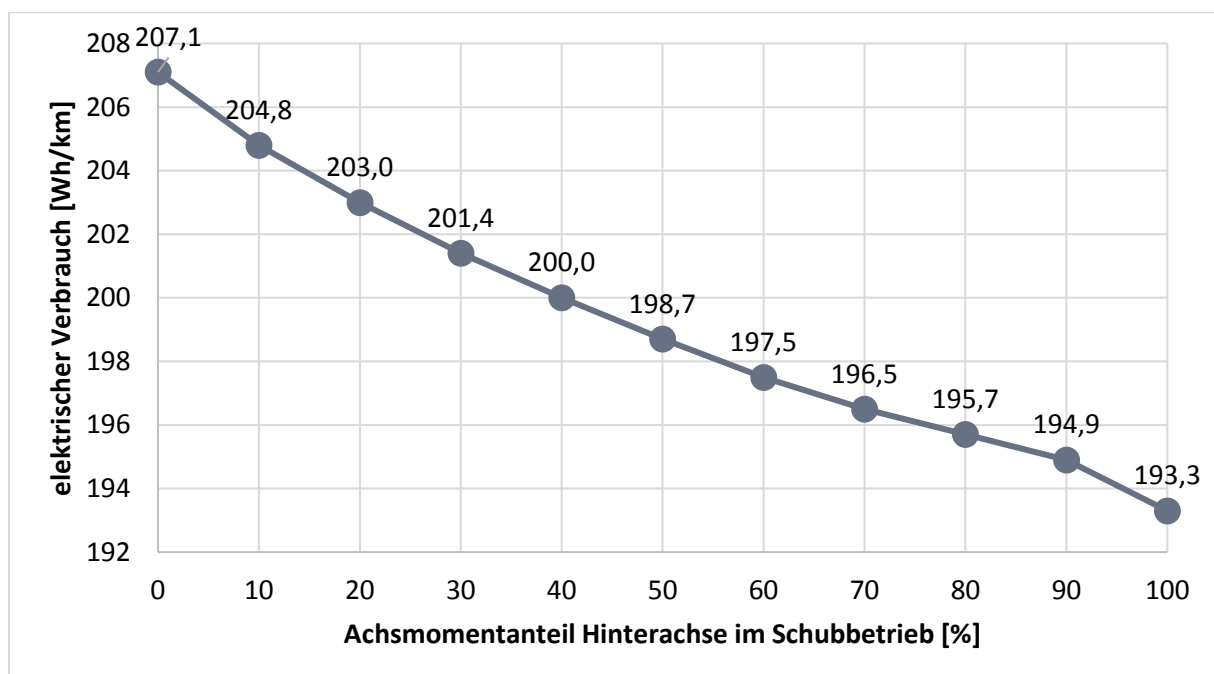


Abbildung 4.14: Verbrauch bei Variation der Achsmomente in einem WLTP

Die eingetragenen Punkte der Wirkungsgrade der E-Maschinen sind die kumulierten Wirkungsgrade integriert über den gesamten Zyklus. Der Gesamtwirkungsgrad erreicht bei rund 90 % Hinterachsanteil sein Maximum in einem WLTP-Zyklus. Als Worst Case kann nun angenommen werden, dass man im WLTP das komplette Moment zum Überwinden der Fahrwiderstände komplett mit der E-Maschine an der Vorderachse aufbringt. Wenn man den kompletten Zyklus mit der E-Maschine an der Hinterachse durchfährt, dann ergibt sich eine Verbrauchsreduzierung von absolut 13,8 Wh/km und relativ gesehen ergibt dies eine Verbesserung von 6,66 %. Aufgrund dieser Aussage kann die Behauptung aufgestellt werden, dass die Achsmomentregelung eines BEV - AWD einen durchaus beachtlichen Stellhebel für den Verbrauch eines BEV' s darstellt.

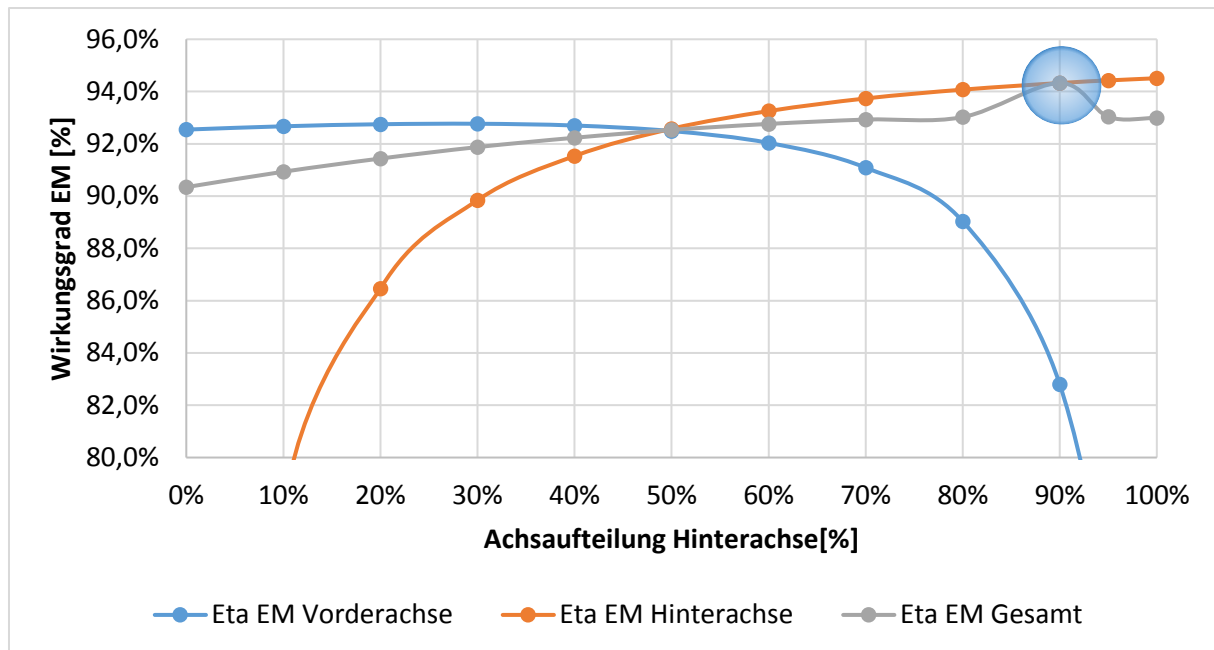


Abbildung 4.15: Wirkungsgradvergleich der E-Maschinen im WLTP

Es gilt hier anzumerken, dass dies nur eine Betrachtung in einem WLTP Zyklus darstellt und nicht allgemein gültig ist für jede Fahrt und den damit verbundenen unterschiedlichen Lasten mit dem simulierten Fahrzeug. Der WLTP stellt aufgrund seines genormten Zyklus eine gute Basis für einen Vergleich dar, jedoch sollen in dieser Arbeit auch ein kundennaher Verbrauch und eine kundennahe Reichweite untersucht werden. Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel die gleiche Untersuchung für einen kundennahen Zyklus untersucht.

4.4.2 Momentanalyse mit Konstantverteilung in einem kundennahen Verbrauchszyklus

Dieser Zyklus nach Kapitel 2.4.5 deckt hohe Lasten ab und ist mit einer Maximalgeschwindigkeit von 150 km/h begrenzt. Die Klimaanlage wird in diesem Zyklus aktiviert und es wird eine Umgebungstemperatur wie auch Fahrzeug- und Hochvoltspeicherstarttemperatur von 10 °C in der Simulation voreingestellt. Des Weiteren wird ein dauerhafter Bordnetzverbrauch von 600 W voreingestellt, damit man höhere Bordnetzverbräuche, wie sie in der Praxis aufgrund einer Vielzahl an Entertainment und Komfortfeatures auftreten, abgedeckt sind. Somit sollte ein kundennaher Verbrauch ermittelt werden können.

Um ein noch genaueres Ergebnis bezüglich einer effizienten Achsmomentverteilung zu erhalten, wird eine Variation der Verteilung sowohl in Zugrichtung als auch in Schubrichtung vorgenommen. Für die Betrachtung der Reichweite wird eine beliebig hohe Endzeit festgelegt und der Zyklus so lange abgefahren, bis der RCI (relativer SoC) auf 0 gesunken ist und das Fahrzeug dem vorgegebenen Fahrprofil des kundennahen Verbrauchszyklus nicht mehr folgen kann.

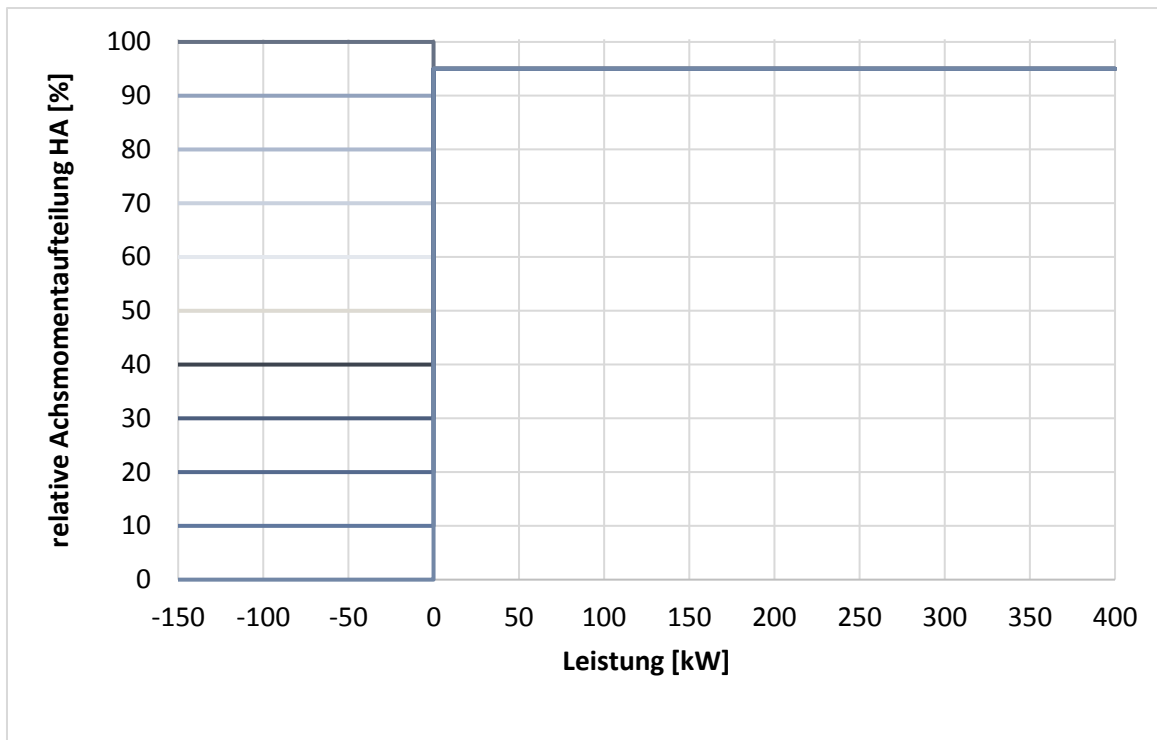


Abbildung 4.16: Achsmomentverteilungsvariation in Schubrichtung (Rekuperation), konstante positive Verteilung

In Schubrichtung wird eine Variation der Achsmomentverteilung durchgeführt, wobei 95 % Achsmomentverteilung an der Hinterachse in positiver Richtung konstant eingehalten wird. In Abbildung 4.17 kann man erkennen, dass sich im Worst Case mit 0 - Momentenregelung an der Hinterachse eine Reichweite von 456 km ergibt. Im Best Case bei vollständigem Aufbringen des Achsmomentes auf die Hinterachse ergibt sich eine Reichweite von 471 km. Damit liegt zwischen Best Case und Worst Case eine Spreizung von 15 km vor.

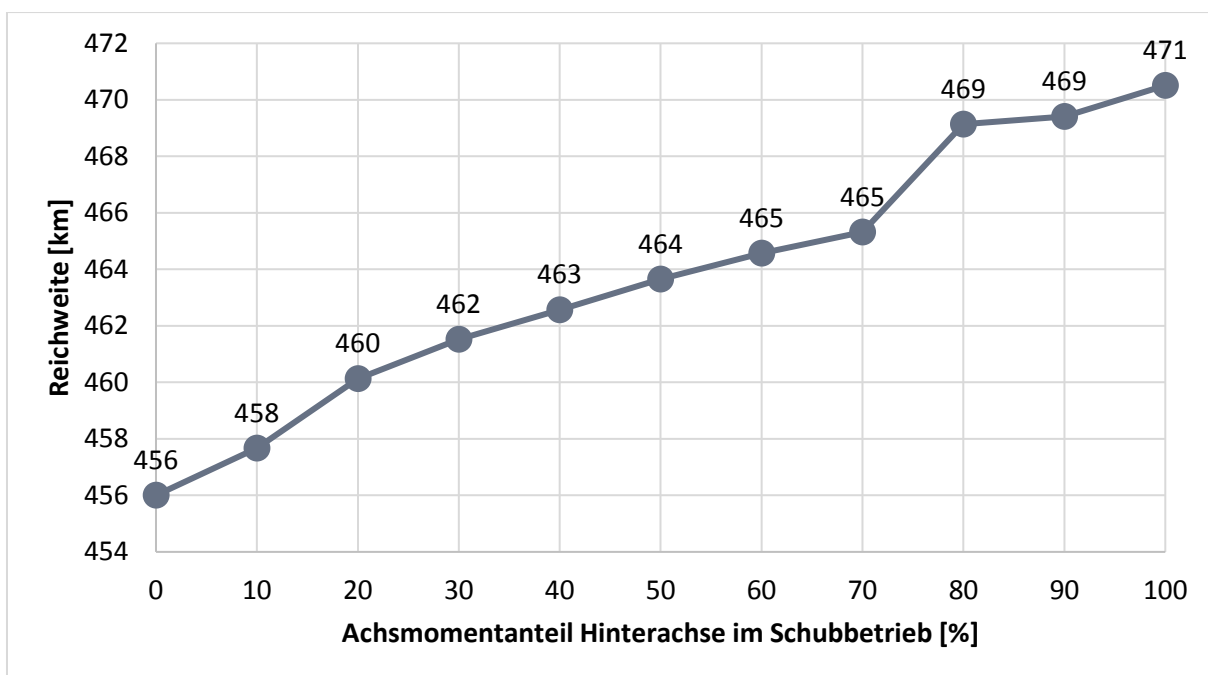


Abbildung 4.17: Reichweiten bei Variation der Verteilung im Schubbetrieb

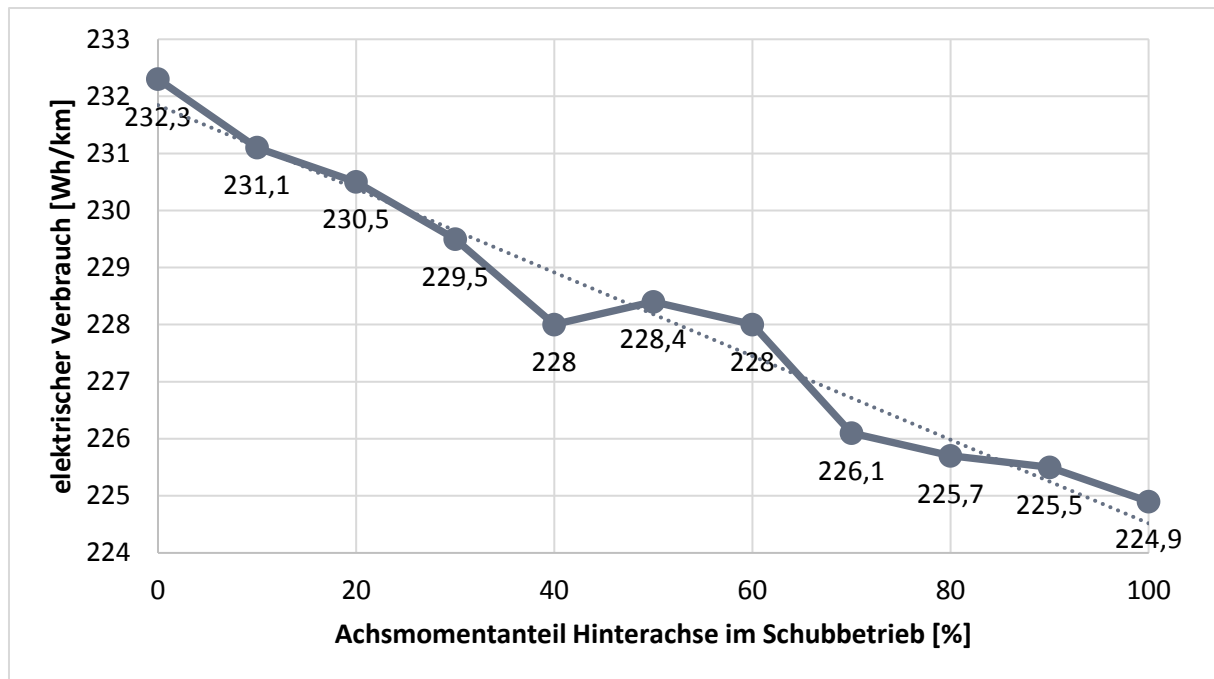


Abbildung 4.18: Elektrischer Verbrauch bei Variation der Achsmomentverteilung im Schubbetrieb

Die Tendenz eines höheren Verbrauches und einer damit verbundenen niedrigeren Reichweite (Abbildung 4.17) spiegelt sich sowohl im Verbrauch (Abbildung 4.20) als auch in der Reichweite wieder. Der Verbrauch wird nach dem letzten vollen Zyklus und nicht am Ende der Reichweite ermittelt. Da die Simulation so lange läuft, bis das Fahrzeug dem Fahrprofil nicht mehr folgen kann und eine Abweichung von mehr als 5 km/h aufweist, ist es notwendig, die Prämissen für die Verbrauchsermittlung zu definieren. Wenn das Fahrzeug noch eine höhere Geschwindigkeitsphase erreichen würde und anschließend rekuperieren könnte, dann würde sich der elektrische Verbrauch wesentlich verbessern und damit ein falsches Ergebnis liefern. Die Vergleichbarkeit wäre damit nicht gegeben.

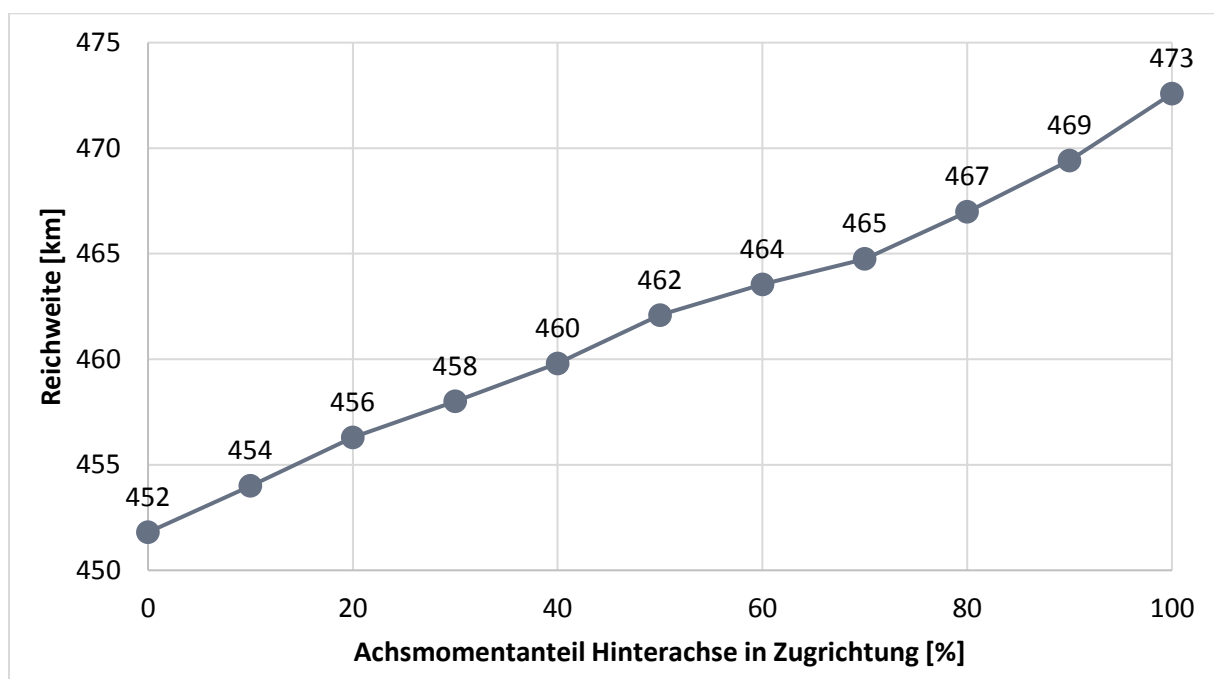


Abbildung 4.19: Reichweiten bei Variation der Achsmomentverteilung in Zugrichtung

In Zugrichtung ergibt sich das gleiche Bild, wie bereits in Schubrichtung festgestellt wurde. In Zugrichtung ist es ebenfalls wesentlich effizienter, den Antrieb mit der E-Maschine an der Hinterachse zu übernehmen. In Abbildung 4.19 und in Abbildung 4.20 ergibt sich in Zugrichtung das gleiche Bild wie in Schubrichtung. Mit fallendem relativem Achsmomentanteil an der Hinterachse steigt der Verbrauch und die Reichweite sinkt spürbar.

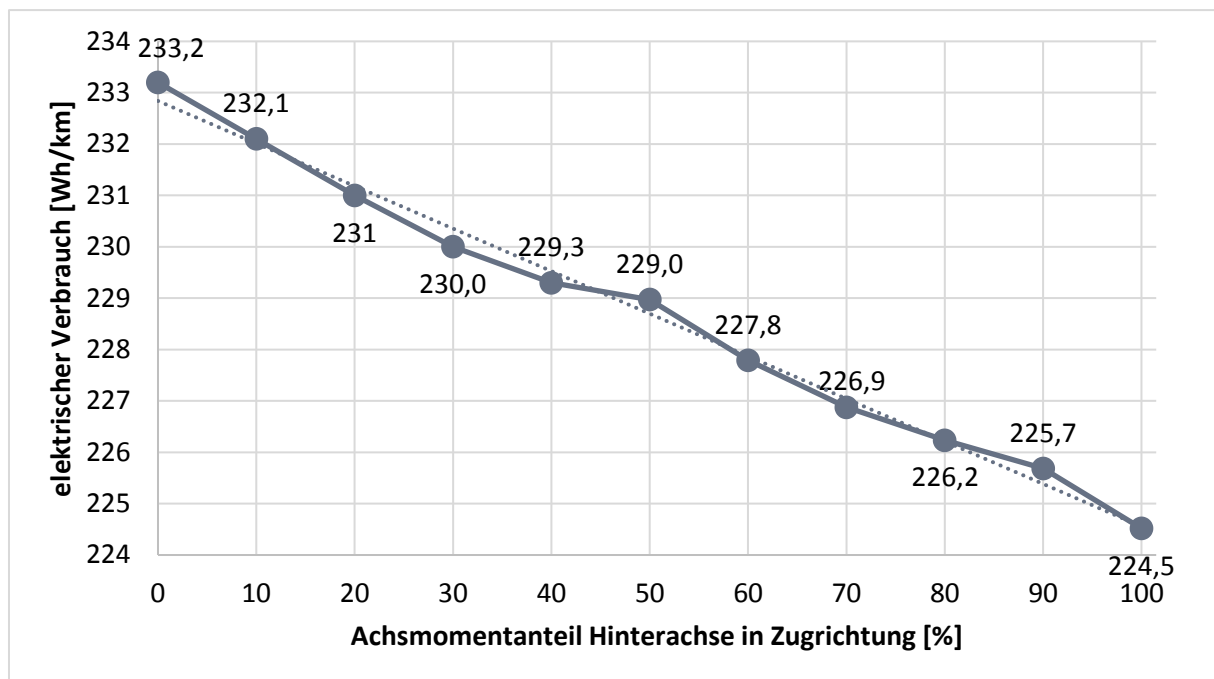


Abbildung 4.20: Verbräuche bei Variation der Achsmomentverteilung in Zugrichtung

Unter Zugrundelegung der Ergebnisse dieses Kapitels folgt der Schluss, dass sowohl in Zugrichtung als auch in Schubrichtung das Antreiben der E-Maschine in Kombination mit Inverter eine wesentlich effizientere Betriebsstrategie zum Antreiben des Fahrzeuges darstellt. Daraus leitet sich ab, dass die Verluste an der Hinterachse geringer sind als an der Vorderachse. Aus den bisherigen Betrachtungen ergibt sich demnach eine optimale Achsmomentverteilung mit dauerhaft 100 % relativem Anteil an der Hinterachse aus Effizienz­sicht in einem kundennahen Verbrauchszyklus. Es stellt sich jedoch die Frage, ob es nicht Bereiche gibt, in denen 100 % Achsmomentverteilung tatsächlich die effizienteste Verteilung darstellt.

4.5 Analyse der Verlustkennfelder

In der Simulation sind Verlustkennfelder abgebildet, aus denen abhängig von der jeweiligen Spannungslage, dem aktuellen E-Maschinenmoment und der aktuellen Drehzahl der dazu korrespondierende Verlust aus einer Matrix ausgelesen wird. Diese Verluste wurden aufwändig mittels mehrerer Versuche von E-Maschinen Prototypen ermittelt. In diesen Versuchen wurden Kennfelder für die reinen EM-Verluste und Verluste der dazugehörigen Inverter eruiert. Die Verlustwerte werden in Matrizen über Drehmoment und Drehzahl der E-Maschinen eingetragen. Die Kennfelder von Inverter und EM werden übereinander gelegt und an den Stützstellen addiert, um den Gesamtverlust aus dem Verbund von E-Maschine und Inverter zu erhalten [9]. Grundsätzlich sind die Kennfelder in Matrizenform, jedoch wird zur besseren Darstellung in den folgenden Abbildungen ein 3-D Plot gewählt. Exemplarisch werden die Verlustkennfelder für eine Achse grafisch dargestellt.

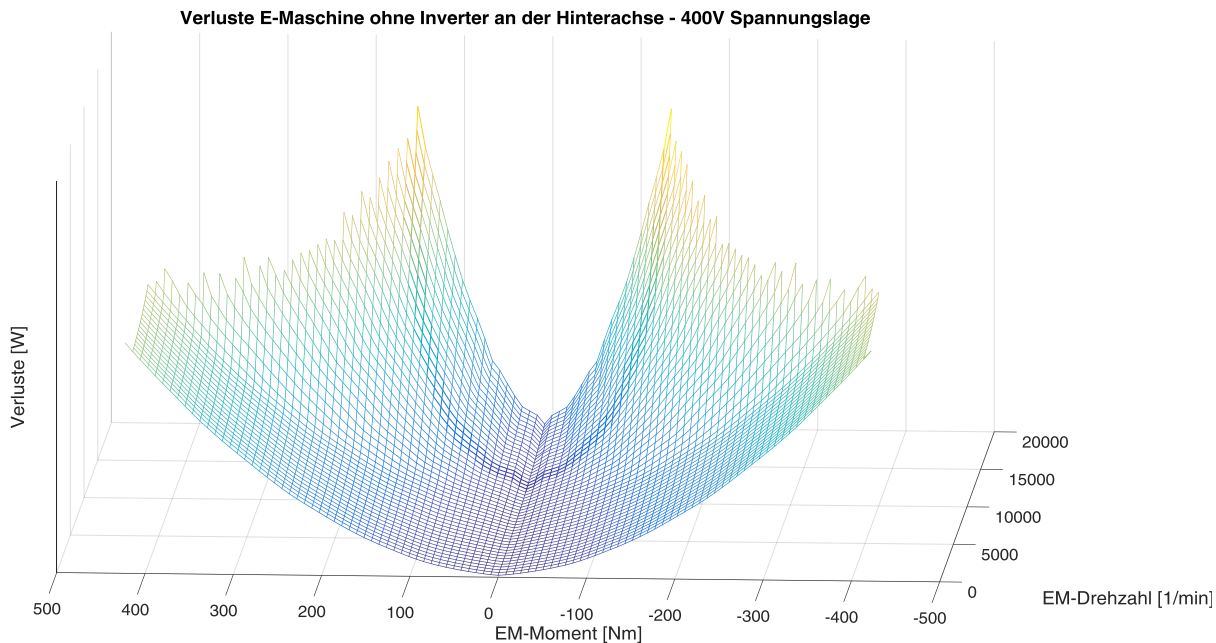


Abbildung 4.21: Verlustkennfeld der E-Maschine (ohne Inverter) an der Hinterachse (bei 400V Spannungslage)

Sowohl an der Vorderachse als auch an der Hinterachse werden die Verlustkennfelder der E-Maschinen am Prüfstand ermittelt und erstellt. Die Verluste werden über Drehmoment und Drehzahl aufgetragen. Über den maximalen Momenten zur jeweiligen Drehzahl findet man keine Verlustwerte, da die E-Maschine ab der Eckdrehzahl beziehungsweise Nutzdrehzahl eingeschränkt wird.

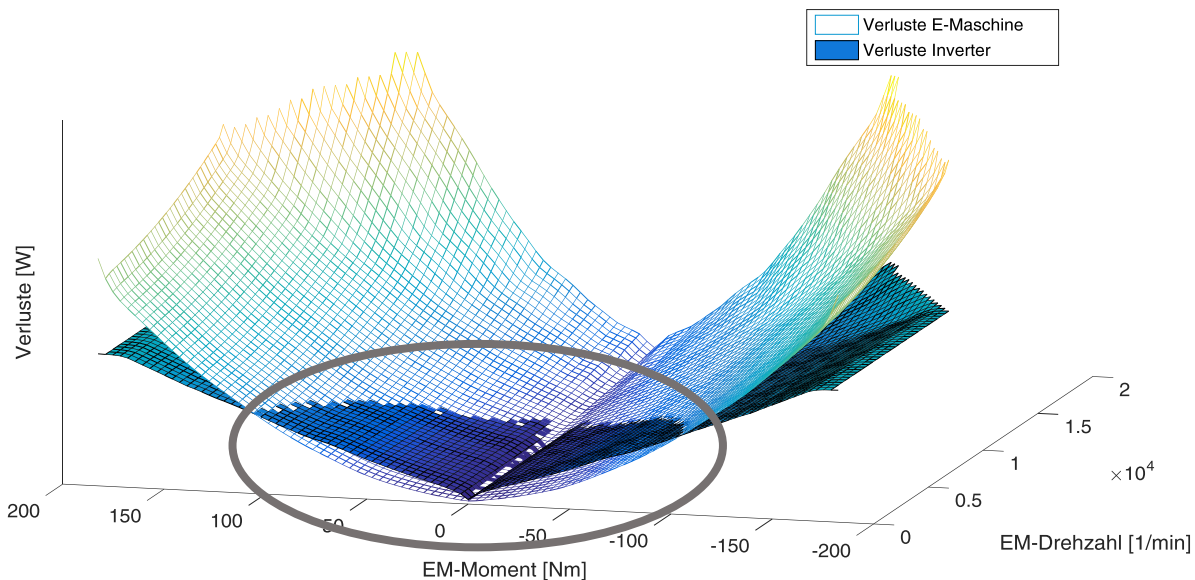


Abbildung 4.22: Vergleich zwischen E-Maschinen Verlustkennfeld und Inverter Verlustkennfeld

In der weiteren Vorgehensweise werden nur mehr die addierten Kennfelder von E-Maschine und Inverter betrachtet, da diese immer als Verbund anzusehen sind.

Die Verlustkennfelder aus E-Maschine und Inverter überschneiden sich insbesondere in den unteren Lastbereichen, daher ist eine Betrachtung der Verluste aus dem Verbund der E-Maschine und Inverter zwingend erforderlich. Eine reine Betrachtung der E-Maschinenverluste würde systematische Fehler zur Folge haben. Daher ist eine punktweise Addition der Verluste an den jeweiligen Stützstellen erforderlich. Dies führt zu einem Verlustkennfeld aus der Addition von E-Maschinenverlusten und Inverterverlusten zu einem gemeinsamen Kennfeld in einer 2-D Matrix.

Exemplarisch wird ein Gesamtverlustkennfeld aus E-Maschinenverlusten und Inverterverlusten in Abbildung 4.23 dargestellt.

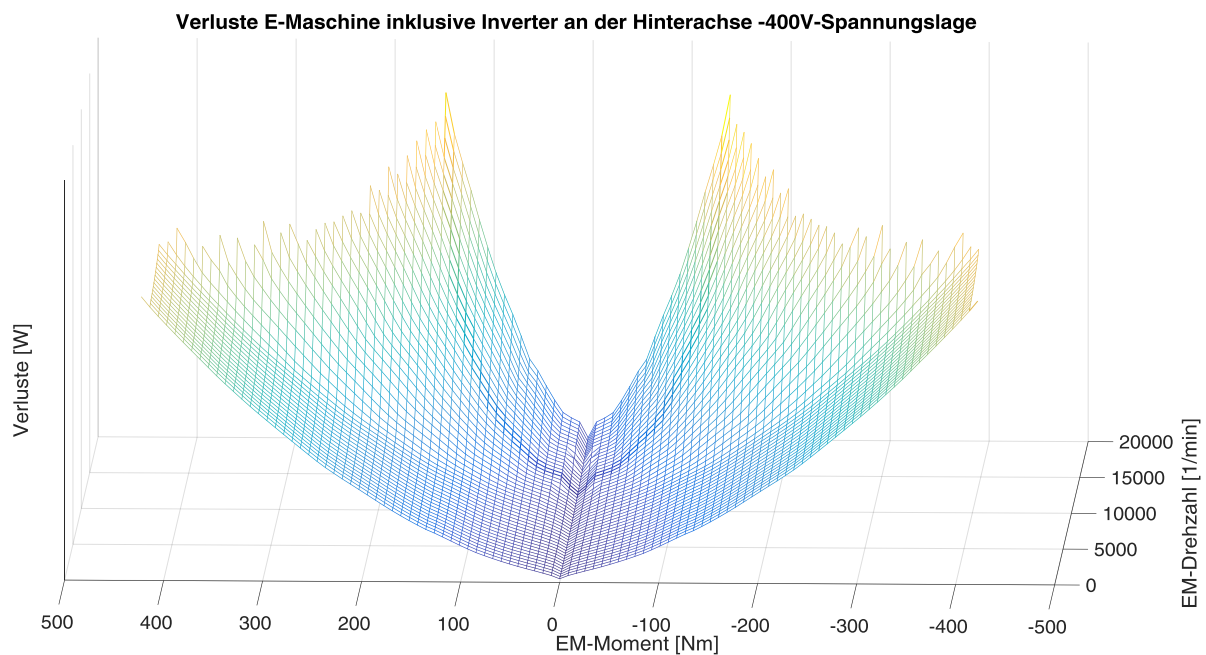


Abbildung 4.23: Verlustkennfeld von E-Maschine + Inverter an der Hinterachse (bei 400V Spannungslage)

Wenn man alle Einflussgrößen für die Verlustbewertung im Antriebsstrang eines BEV - AWD Fahrzeugs analysieren möchte, muss man auch die Getriebeverluste mit berücksichtigen. Wie sich in Abbildung 4.24 zeigt, sind die Getriebeverluste im Vergleich zu den E-Maschinenverlusten oder den Inverterverlusten äußerst gering. In Abbildung 4.24 handelt es sich lediglich um ein beispielhaftes Getriebe, welches für das Drehmoment und die Drehzahl der E-Maschine an der Hinterachse passend ist. Die Verlustverhältnisse von E-Maschine inklusive Inverter zu den Getriebeverlusten können bei anderen Kombinationen anders aussehen. Um die größtmögliche Genauigkeit dieser Untersuchung zu gewährleisten, werden auch Getriebeverluste mit berücksichtigt.

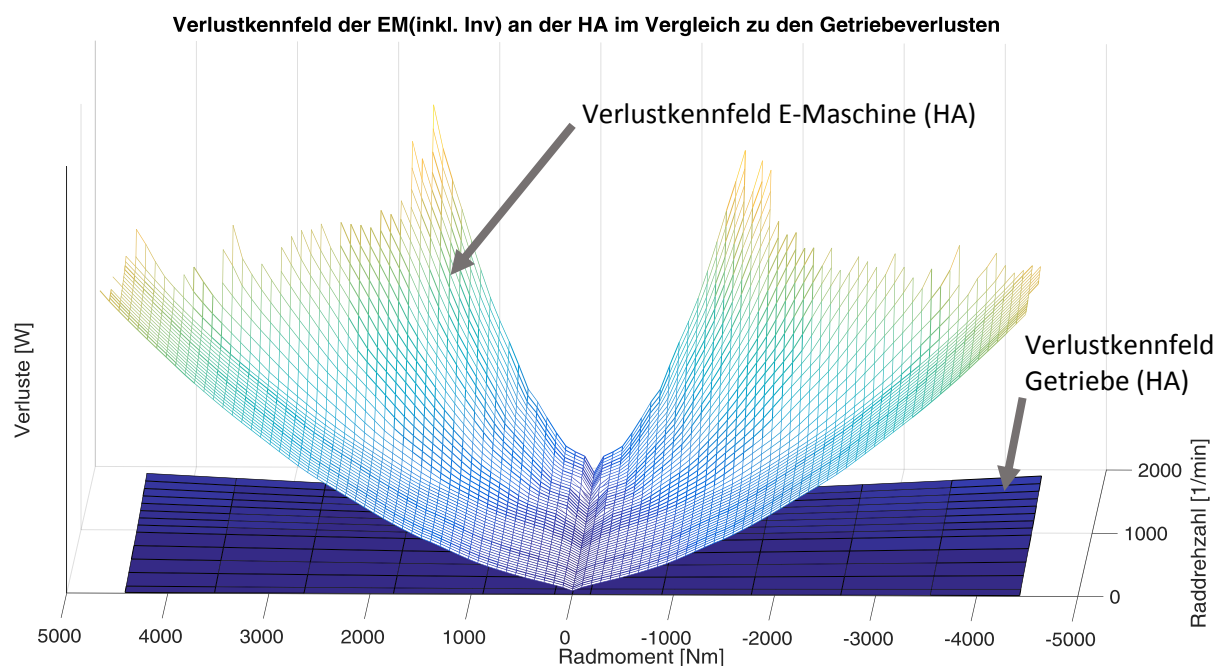


Abbildung 4.24: Vergleich der Verlustkennfelder von E-Maschine inklusive Inverter und Getriebe

Da man durch die Antriebstopologie eines BEV - AWD die Wahl hat, wie man die Momentenanforderung zwischen der Vorderachse und der Hinterachse regelt, hat man die Möglichkeit diese entsprechend einer optimalen Effizienz aufzuteilen. Die Darstellung Abbildung 4.25 bildet die Unterschiede in den Verlusten zweier verschiedener E-Maschinen ab. Dadurch soll man eine Vorstellung bekommen, wie sich die Verluste von E-Maschinen inklusive deren Inverter aufteilen. In dieser grafischen Darstellung werden auch die Grenzen der E-Maschinen berücksichtigt.

In Abbildung 4.25 sind zwei Verlustkennfelder der E-Maschinen von Fahrzeug 1 übereinander geplottet. In dieser Darstellung erkennt man sehr gut, dass die vordere und auch kleinere E-Maschine Verluste nur bis zu deren maximalen Drehmoment aufweist. Die große hintere E-Maschine weist Verluste auf bis zu einem weit höheren Radmoment. Da beide E-Maschinen die gleiche Maximaldrehzahl besitzen, sind die Verluste auf der Raddrehzahlachse in der gleichen Länge aufgetragen. Man kann deutlich erkennen, dass der Steigungsgradient der größeren E-Maschine an der Hinterachse wesentlich geringer ist. Das bedeutet als Schlussfolgerung, dass die hintere E-Maschine bis zur Überdeckung bei rund 11.000 U/min E-Maschinendrehzahl effizienter ist. Nach dieser E-Maschinendrehzahl ist der Steigungsgradient der Verluste an der kleineren E-Maschine an der Vorderachse flacher und damit effizienter. Diese Erkenntnis wird in den folgenden Kapiteln genauer analysiert. Anschließend wird die unterschiedliche Übersetzung und damit eine Verschiebung dieser Überschneidung berücksichtigt.

Zusätzlich wird in kommenden Kapiteln auch auf die verschobenen Verlustkennfelder zueinander Rücksicht genommen. Nach Umrechnung der E-Maschinendrehzahl in Raddrehzahl und der E-Maschinenmomente in Radmomente verschieben sich die Verlustkennfelder zueinander aufgrund der unterschiedlichen Übersetzungen an der Vorderachse und an der Hinterachse. Dies muss jedenfalls berücksichtigt werden, daher ist eine weitere Vorgehensweise der Untersuchungen in Raddrehzahlen und Radmomente zwingend erforderlich.

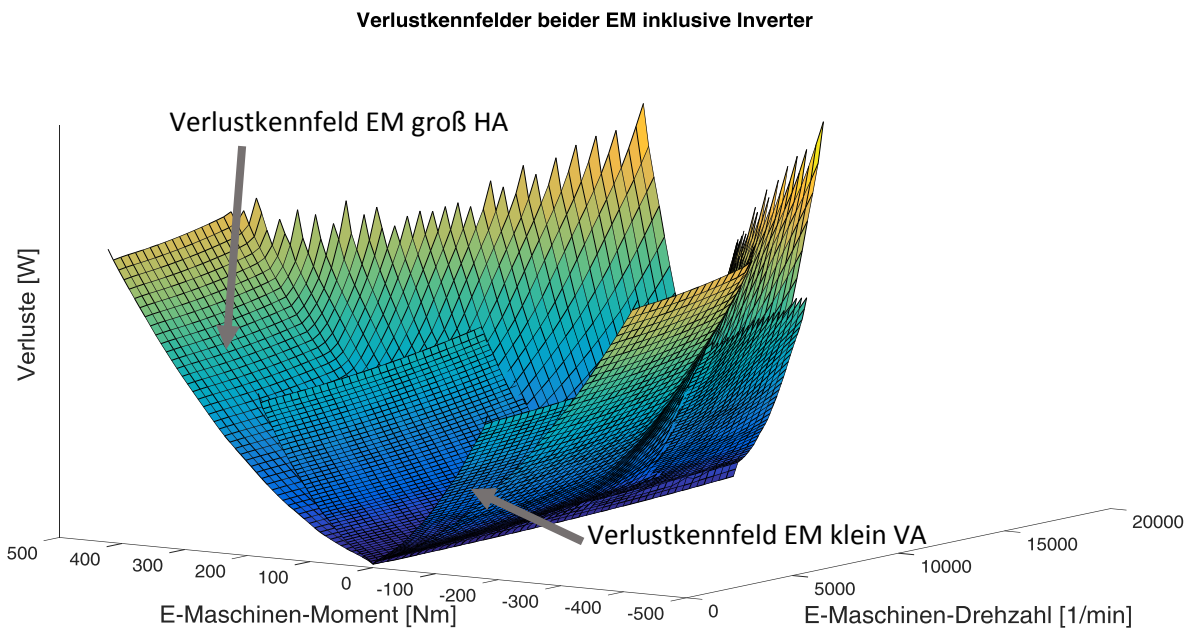


Abbildung 4.25: Gegenüberstellung beider EM-Verlustkennfelder inklusive Inverter von Fahrzeug 1

Um den Gesamtverlust von E-Maschine, Inverter und Getriebe zu bestimmten Momenten und Drehzahlen zu erhalten, werden die Verlustkennfelder wieder punktweise addiert. Schließlich hat man dann den gesamten Verlust der Antriebseinheit, ausgenommen des Hochvoltspeichers, grafisch beziehungsweise in Matrizenform dargestellt.

Diese Vorgehensweise ist für jede beliebige Antriebskonfiguration von E-Maschine, Inverter und Getriebe möglich. Daher kann man für Bewertungen und Aussagen über die Reichweite für verschiedene Antriebskonfigurationen sehr schnell eine Aussage treffen.

4.6 Generierung eines Algorithmus für eine optimierte Momentenstrategie

Aufgrund der Analyse mit konstanten Achsmomentverteilungen weiß man zwar, dass die Hinterachse sowohl in Zug als auch in Schubrichtung bei konstanter Verteilung effizienter ist, jedoch weiß man nicht, ob es Bereiche gibt in denen mehr Moment an der Vorderachse aus Effizienzsicht von Vorteil wäre. Daher wird im Folgenden untersucht, ob eine vollvariable Verteilung, abhängig von Raddrehzahl und Radmoment, Effizienzpotentiale bringt.

Auf Basis der Analyse der Verlustkennfelder wird in *Matlab*⁵ ein Kennfeld erarbeitet, welches vollvariabel je nach Lastanforderung und Geschwindigkeit die effizienteste Verteilung ausgeben soll. Um eventuelle weitere Effizienzpotentiale festmachen zu können, wird dieses Kennfeld in einem *TorqueController* implementiert und erneut eine Reichweitensimulation durchgeführt.

⁵ Software des Unternehmens *MathWorks* zur Lösung mathematischer Probleme

Das Prinzip des *Matlab*-Tools soll dem folgenden Ablauf folgen:

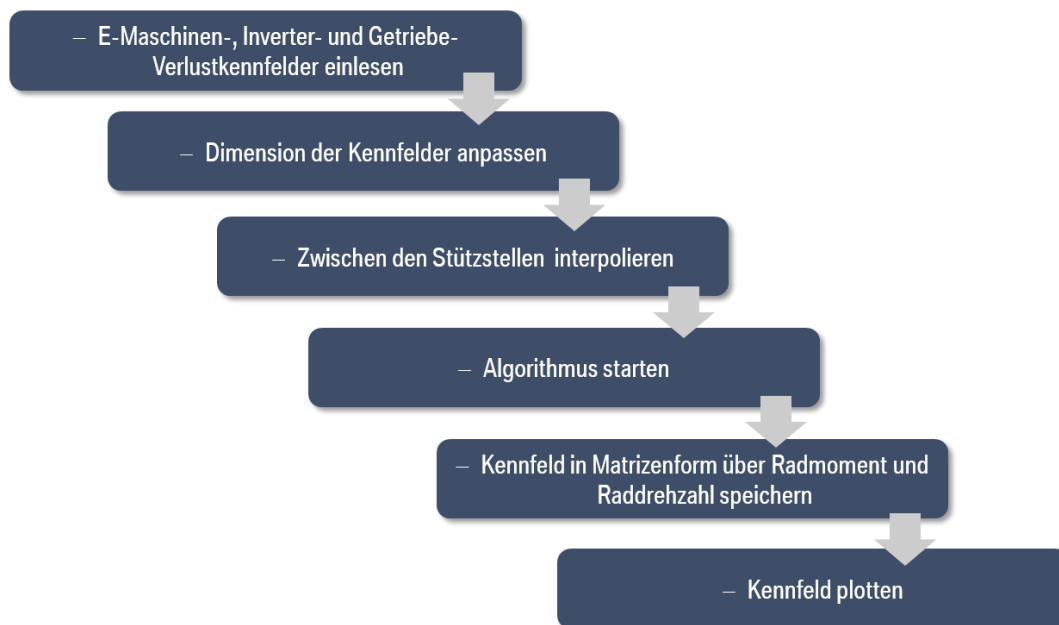


Abbildung 4.26: Vorgang zur Bestimmung eines vollvariablen Achsmomentverteilungskennfeld

Die Verlustkennfelder werden aus vorhandenen XLSX-Excel Dateien oder MAT-Files ausgelesen. In diesen vorgefertigten Dateien sind sämtliche Informationen für die jeweilige E-Maschine und den dazugehörigen Inverter vorhanden. Die Verlustkennfelder sind für mehrere Spannungsstufen vorhanden und werden im *Matlab*-Tool ausgelesen. Die Verlustkennfelder der Getriebe sind in Mat-Files bedatet und werden ebenfalls ausgelesen. In den Mat-Files der Getriebekennfelder sind auch die jeweiligen Übersetzungen der Getriebe hinterlegt.

Für die weitere Vorgehensweise ist es wichtig, dass man die Kennfelder auf eine einheitliche Basis bringt. Die Verlustkennfelder der E-Maschinen und Inverter sind auf E-Maschinenmomente- und Drehzahlen bezogen. Um ein vollautomatisches Tool zu generieren, in dem man für unterschiedlichste Antriebskonfigurationen von E-Maschinen und Getrieben samt Übersetzungen Achsmomentaufteilungen generieren kann, ist es notwendig, Drehzahlen und Momente auf Raddrehzahlen und Radmomente zu beziehen. Daher werden die Abszisse und die Ordinate von E-Maschinendrehzahlen auf Raddrehzahlen und die E-Maschinenmomente auf Radmomente umgerechnet. Die Verluste der Getriebekennfelder sind auf Getriebeeingangsdrehzahlen bezogen, daher ist die Umrechnung gleich wie bei den E-Maschinen.

$$M_{rad} = M_{EM} * i_{Getriebe} \quad (4.1)$$

$$n_{rad} = \frac{n_{EM}}{i_{Getriebe}} \quad (4.2)$$

Aus den Kennfelddateien werden nicht nur die Kennfelder an sich, sondern auch Maximalmomentkennlinien über die Drehzahl ausgelesen. Diese Kennlinien werden benötigt, um im Algorithmus die Grenzen der E-Maschinen zu berücksichtigen. Zum einen als Berücksichtigung für die

maximalen Radmomente der Systemleistung und zum anderen, um die Verteilung der maximalen Momente der einzelnen E-Maschinen an der Vorderachse und an der Hinterachse zu berücksichtigen. In Abbildung 4.27 sind die Maximalkennlinien der beiden E-Maschinen grafisch dargestellt. Anhand dieser Verläufe muss die Verteilung begrenzt werden. Dementsprechend muss die Verteilung bei Vollast bei geringen Drehzahlen vor dem Einschnüren beider E-Maschinen nach der Eckdrehzahl folgende Verteilung haben:

$$V_{rel} = \frac{M_{HA}}{M_{gesamt}} \quad (4.3)$$

Das Gesamtmoment muss immer, jeweils zur aktuellen Drehzahl der E-Maschine, addiert werden. Die maximalen Momentenkennlinien der E-Maschinen werden ebenfalls auf Raddrehzahl und Radmoment umgerechnet. Unter der Voraussetzung, dass an den Vorderrädern und an den Hinterrädern keine Drehzahldifferenz herrscht, sind die Raddrehzahlen bei gleichen Rädern identisch. Bei unterschiedlich hohem Schlupf würden sich Raddrehzahldifferenzen ergeben. Im kundennahen Fahrzyklus, welcher in dieser Betrachtung herangezogen wird, tritt jedoch bei dieser Antriebskonfiguration und der Bedatung der Fahrwiderstandsdaten kein nennenswerter Schlupf auf, der relevante Auswirkungen auf die Raddrehzahldifferenzen hätte.

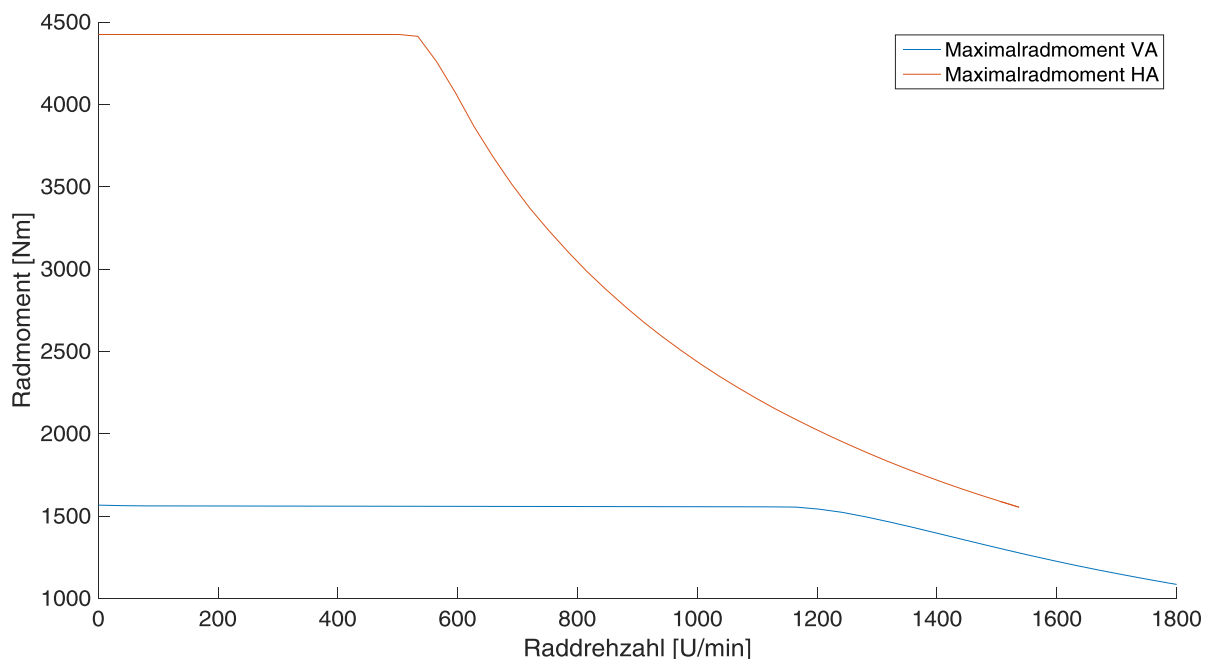


Abbildung 4.27: Maximalmomentkennlinie der E-Maschine an der Vorderachse und an der Hinterachse

Der Algorithmus im Hinblick auf maximale Effizienz ist das Kernstück der variablen Achsmomentverteilung. Dieser funktioniert so, dass man in *Matlab* drei Schleifen ineinander verschachtelt. In der ersten Schleife wird die Raddrehzahl variiert. In der zweiten Schleife wird das Radmoment vom negativen maximalen Radmoment bis zum positiven maximalen Radmoment variiert. In der zweiten Schleife ist noch eine dritte Schleife integriert, die das geforderte Maximalmoment prozentual in skalierbaren Schritten zwischen der Vorderachse und der Hinterachse aufteilt. Für jede dieser prozentualen Aufteilung wird der aktuelle Gesamtverlust aus E-Maschinen und Getrieben in einem Vektor gespeichert. Wenn die Variation der Achsmomentverteilung zwischen

0% und 100% relativem Achsmomentanteil an der Hinterachse zum aktuellen Radmoment abgeschlossen ist, wird der minimale Verlust aus dem Vektor ausgelesen und die dazugehörige relative Achsmomentverteilung in Prozent im Kennfeld abgespeichert.

Anhand von Abbildung 4.28 kann man mit sehr grobem Netz des Algorithmus die Funktionsweise des Algorithmus erkennen. Das aktuelle angeforderte Radmoment wird auf die Vorderachse und auf die Hinterachse, unter Berücksichtigung der maximalen Achsmomente, aufgeteilt. So ist die Einschnürung im oberen Bereich relativ groß. Das bedeutet, dass bei sehr hohen Gesamttradmomentanforderungen die E-Maschinen das geforderte Moment nur gemeinsam aufbringen können. Wenn die Gesamttradmomentanforderung sinkt, dann können die E-Maschinen die Momentanforderung einzeln erfüllen. Im aktuell betrachteten Modell ist die E-Maschine an der Hinterachse wesentlich leistungsfähiger, daher ist die Gesamtverlustschüssel in der Abbildung 4.28 mehr nach rechts ausgeprägt. Die Ausprägung und die Form der Gesamtverluste, wie in Abbildung 4.28 ersichtlich, können sich bei Konfiguration mit anderen Antriebskomponenten verändern.

Gesamt- Verlustleistung bei Moment von 0 bis M-MAX-Fahrzeug bei Drehzahl: 256.18 U/min, Geschw: 37 km/h

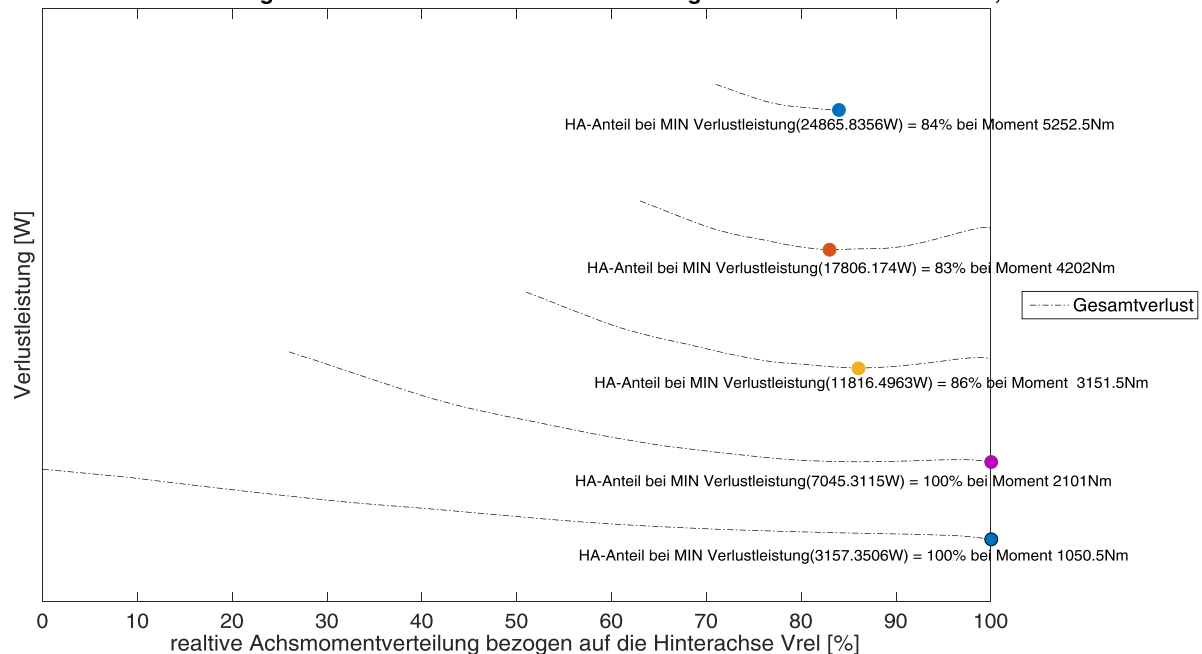


Abbildung 4.28: Gesamtverluste von Inverter, E-Maschinen und Getriebe bei Variation der Achsmomentverteilung

Nachdem die prozentuale Schleife für den minimalen Verlust zum jeweiligen Radmoment und der jeweiligen Raddrehzahl vollständig durchlaufen ist, wird der prozentuale Wert, bei dem der niedrigste Gesamtverlust des Antriebes auftritt, gespeichert. Die zweite Schleife mit der Variation der Momente erfolgt vom negativen Maximum bis zum positiven Maximum, wobei die Einschränkung der maximalen E-Maschinenmomente berücksichtigt wird. Wenn diese Schritte wiederum abgeschlossen sind, wird die erste Schleife inklusive der zweiten Radmomentenschleife und der dritten prozentualen Vektorschleife von Drehzahl Null bis zum Drehzahlmaximum der begrenzenden E-Maschinen durchgerechnet, wobei die Drehzahlen der E-Maschinen auf Raddrehzahlen bezogen sind. Am Ende der dritten Schleife wird für die jeweiligen E-Maschinen und die jeweiligen Raddrehzahlen die relative Achsmomentverteilung mit dem geringsten Gesamtverlust in einer Matrix abgespeichert. Zusätzlich werden während der Schleife die aktuellen Radleistungen und die

Beschleunigung des Fahrzeuges abgespeichert, um diese dann in einem Kennfeld visuell abbilden zu können.

Mit sämtlichen abgespeicherten Daten, wie dem Kennfeld in Matrix Form, werden unterschiedlichste Grafiken geplottet, um eine geeignete Betriebsstrategie für das Fahrzeug festzulegen. Für das Fahrzeug 1 sieht das Netz für die Achsmomentregelung nach Abbildung 4.29 sehr hecklastig aus. Die Farben wurden so gewählt, dass 100 % Hinterachslast grün und 100 % Vorderachslast rot dargestellt sind. Beim Fahrzeug 1 sieht man in der 3D-Darstellung mit Netz sehr deutlich, dass die eine hecklastige Auslegung nach dem Algorithmus effizienter ist. Nachdem die Grenzen der E-Maschinen berücksichtigt sind, flacht das Netz zu höheren Radmomenten in Richtung mehr Vorderachsmoment ab.

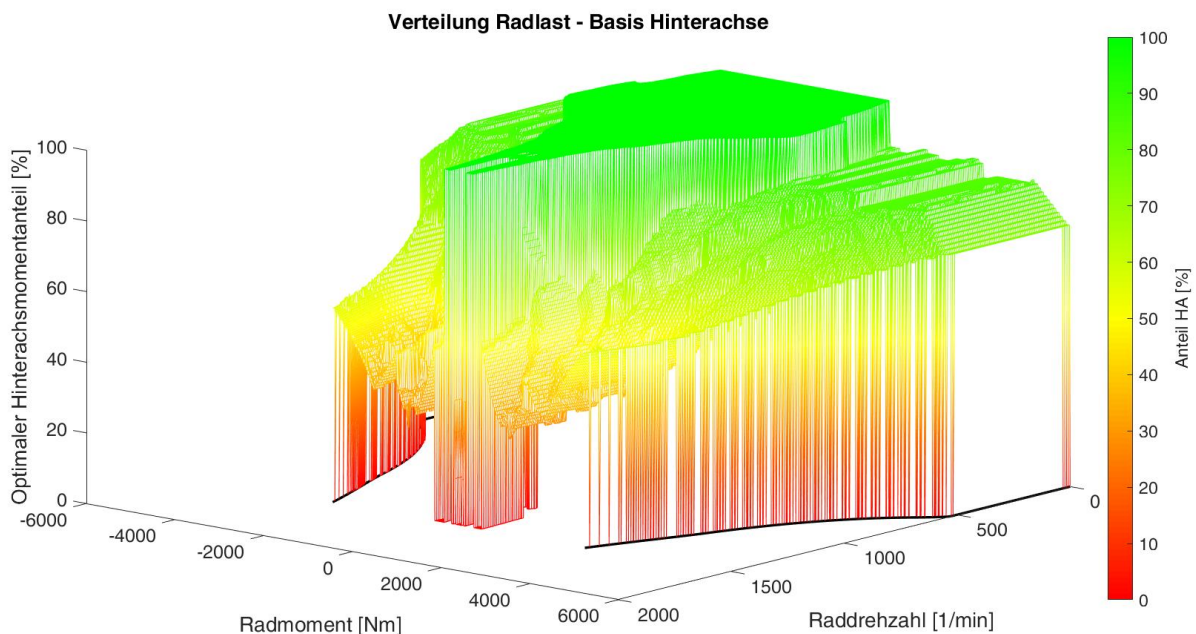


Abbildung 4.29: exemplarisches Netz einer Achsmomentverteilung für Fahrzeug 1

Das Netz in Abbildung 4.29 eignet sich optimal, um sich grafisch eine Vorstellung über die relative Achsmomentverteilung über Radmoment und Raddrehzahl zu machen. Für eine Auswertung und eine Auslegung der E-Maschinen und deren Getriebe für etwaige Lastprofile, wie dem kundennahen Verbrauchszyklus, eignen sich die Abbildung 4.30 und die Abbildung 4.33 besser. In diesen Darstellungen sind die maximalen Radmomente der Vorderachse und der Hinterachse sowohl in positiver Zugrichtung als auch in negativer Schubrichtung geplottet. Die maximale Systemleistung ist durch die schwarzen dicken Linien am Rand begrenzt und setzt sich aus der Summe aus maximalem Vorderachsmoment und maximalem Hinterachsmoment zusammen.

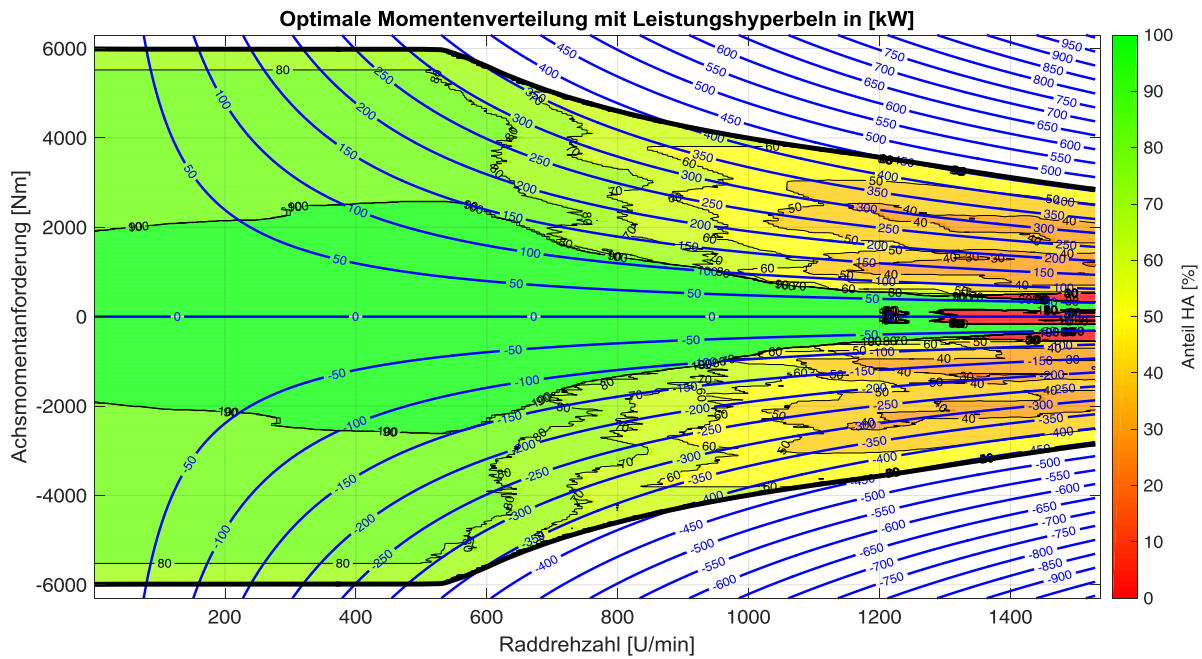


Abbildung 4.30: Optimales Achsmomentverteilungskennfeld aus Effizienz­sicht über Raddrehzahl mit Leistungshyperbeln

Für die Auslegung des Antriebsstranges an der Vorderachse und an der Hinterachse ist es zwingend notwendig, die aus Effizienz­sicht optimalen Momente absolut in die selbe Darstellungsart wie in Abbildung 4.33 zu bringen, damit etwa eine Getriebeauslegung für ein Lastprofil in der Dauerfestigkeitsberechnung getroffen werden kann.

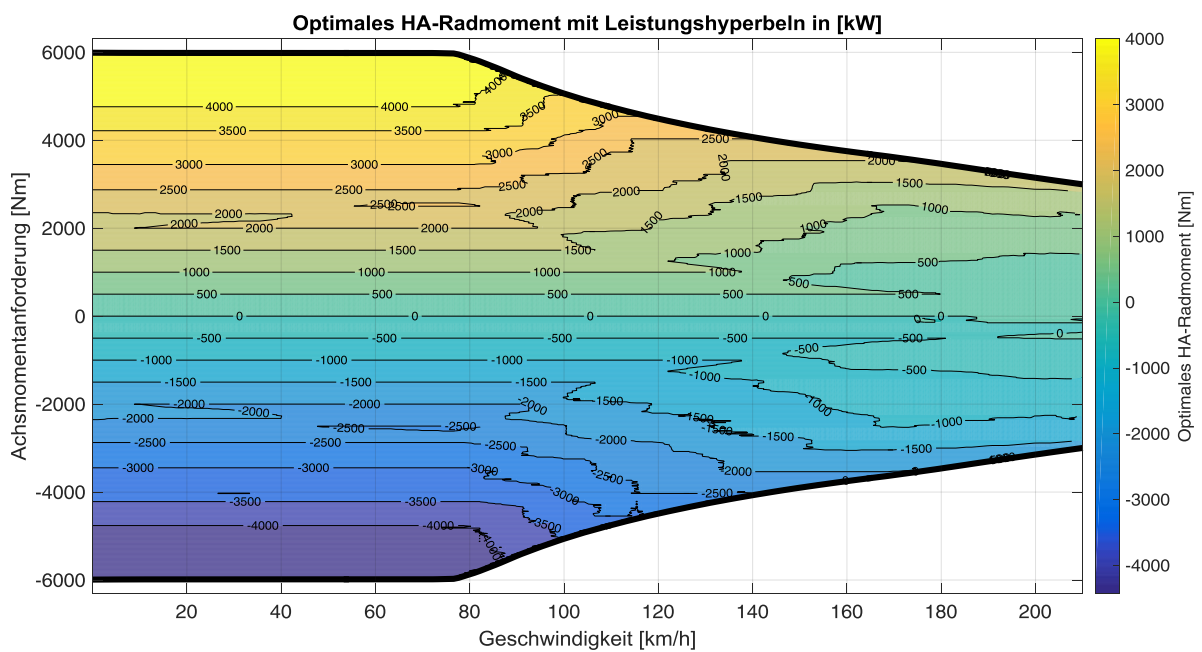


Abbildung 4.31: Optimales Hinterachsradmoment

Wenn man einen bestimmten Punkt mit bestimmter Geschwindigkeit und bestimmtem Radmoment betrachtet, so ergibt sich die Summe des Radmomentes aus den optimalen Momenten der Vorderachse und den optimalen Momenten der Hinterachse aus Abbildung 4.32 und Abbildung 4.31.

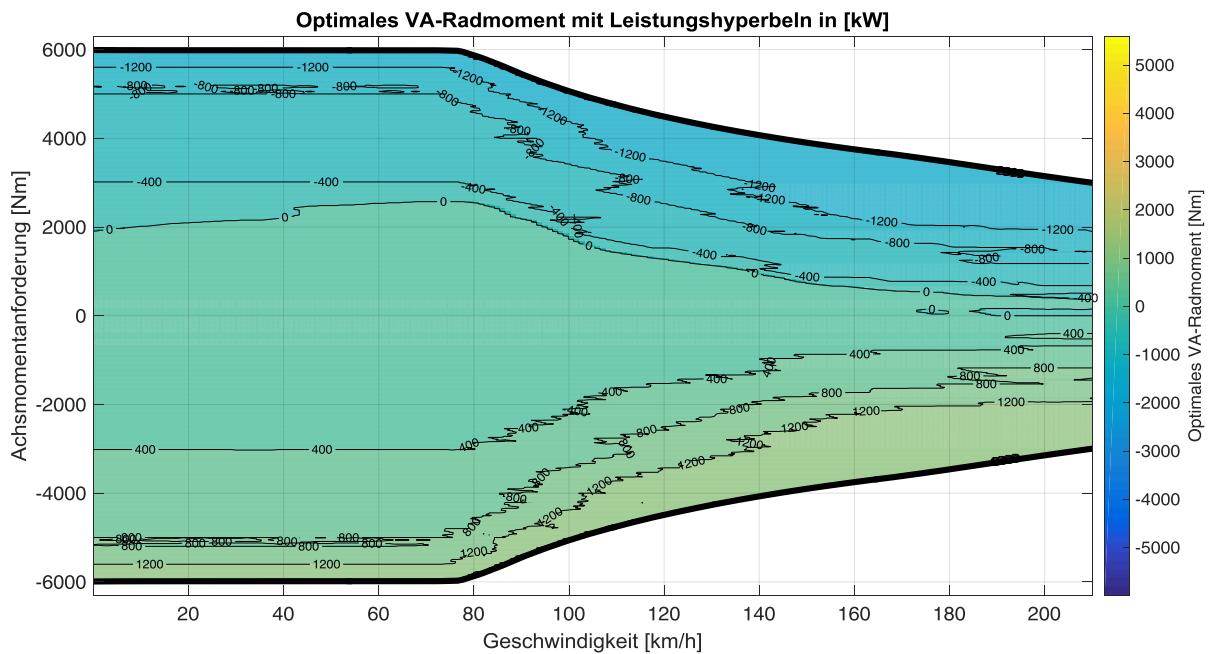


Abbildung 4.32: Optimales Vorderachsradmoment

In Abbildung 4.33 wurden zusätzlich in das Achsmomentverteilungskennfeld die Lastpunkte des kundennahen Verbrauchszyklus eingetragen. Anhand dieses Kennfeldes und den Lastpunkten erkennt man, dass man mit einer annähernd 100 % relativen Achsmomentverteilung an der Hinterachse fast den gesamten kundennahen Verbrauchszyklus abdecken kann. Bis rund 25 km/h und ab rund 90 km/h sind ein paar Lastpunkte zu finden, die außerhalb der optimalen Achsmomentverteilung von 100 % an der Hinterachse liegen. In diesem Bereich ist es effizienter, wenn die vordere E-Maschine mehr Moment aufbringt.

Im negativen Achsmomentbereich des Schubetriebes zur Rekuperation erkennt man, dass die E-Maschine an der Hinterachse aufgrund der Rekuperationsverzögerungsgrenze nicht die volle Rekuperation übernehmen kann. Es muss ein Teil der Rekuperation von der E-Maschine der Vorderachse übernommen werden.

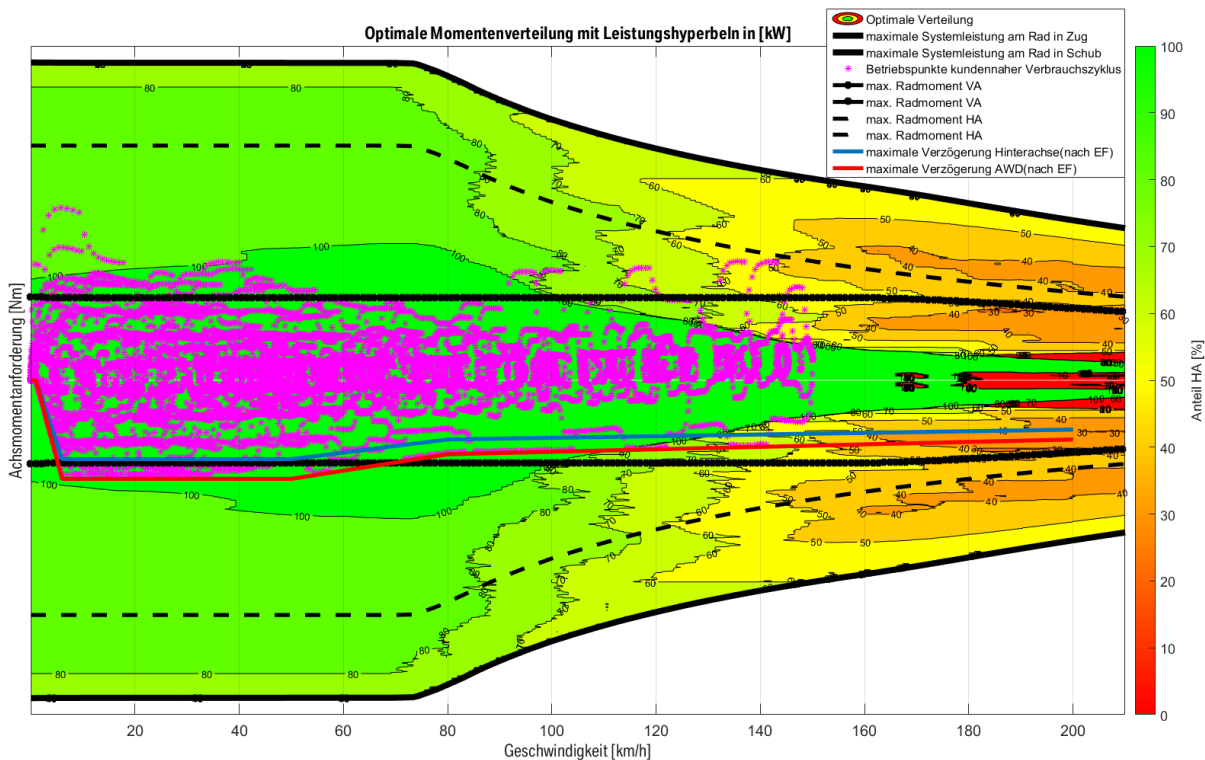


Abbildung 4.33: Optimale Achsmomentverteilung über Radmoment und Geschwindigkeit mit Betriebspunkten des mittleren Kundenverbrauchszyklus

In der Praxis kann eine Umsetzung der Achsmomentverteilung, wie in Abbildung 4.29 dargestellt, zu Problemen führen, da ein sprunghaftes Eingreifen der vorderen E-Maschine ab einer gewissen Last erforderlich wäre. Um dies sprunghafte Eingreifen zu vermeiden, wird dieses Kennfeld der Achsmomentverteilung in der Praxis geglättet und ein sanftes Eingreifen der E-Maschinen ist die Folge. Zusätzlich wird die Belastung auf E-Maschinen reduziert. Für Fahrzeug 1 ist in Abbildung 4.34 die geglättete relative Achsmomentverteilung dargestellt.

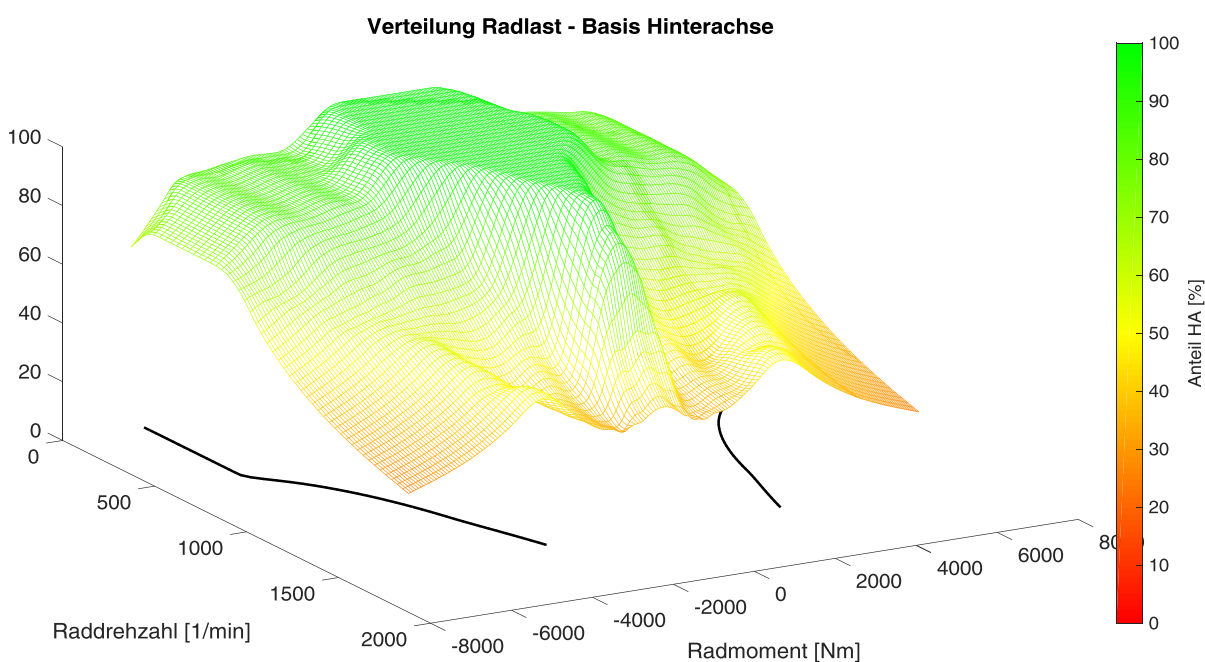


Abbildung 4.34: exemplarisches geglättetes Netz einer Achsmomentverteilung für Fahrzeug 1

Das Tool in Kombination mit dem Algorithmus ermöglicht es zudem, verschiedene Antriebstopologien hinsichtlich der optimalen Verteilung zu untersuchen. Dies kann insbesondere dann sinnvoll sein, wenn Fahrzeuge mit der gleichen E-Maschine an der Hinterachse als RWD - Fahrzeug und als AWD - Fahrzeug ausgeführt werden sollen. An der Vorderachse soll aus Kostengründen lediglich zusätzlich eine E-Maschine verbaut werden. Das gleiche Szenario ist natürlich auch umgekehrt denkbar. Das bedeutet ein FWD - Fahrzeug mit einer zusätzlichen E-Maschine an der Hinterachse zu einem AWD - Fahrzeug aufzuwerten. Dieses Tool besitzt also nicht nur die Fähigkeit, die optimale Achsmomentverteilung für die bestehende AWD - Antriebstopologie zu ermitteln und damit Reichweite zu gewinnen, sondern es ermöglicht auch, mögliche Varianten von Antriebskomponenten hinsichtlich ihrer Effizienz zu untersuchen. Mit Hilfe des Tools und dessen Algorithmus wird die effizienteste Achsmomentverteilungsmatrix erstellt und im Anschluss in der Simulation bewertet. Dies ist eine äußerst schnelle und effiziente Möglichkeit, Antriebskomponenten hinsichtlich ihrer Effizienz und deren idealen Einsatz zu untersuchen. Damit können zum Beispiel Führungskräfte Entscheidungen der Antriebskomponenten aufgrund einer simulativen Bewertung schnell und kostengünstig treffen.

4.7 Simulation mit vollvariablem Achsmomentverteilungskennfeld

Das Kennfeld, welches das *Matlab*-Tool ausgibt, muss natürlich auf seine Effizienz und seine Auswirkung auf den elektrischen Verbrauch und die elektrische Reichweite überprüft werden. Daher wird ein neuer *TorqueController* in *Dymola* in das Simulationsmodell des Gesamtfahrzeuges implementiert [5]. Dieser Controller muss mit den Eingangsgrößen des aktuell angeforderten Radmomentes und den aktuellen Radgeschwindigkeiten die aktuell effizienteste Achsmomentverteilung ausgeben. Mit Hilfe dieser Verteilung kann das geforderte Radmoment auf die Vorderachse und auf die Hinterachse aufgeteilt werden. Berücksichtigt muss erneut jedoch die höchst zulässige Rekuperationsverzögerung an den einzelnen Achsen werden, um Instabilitäten und schlechtes Fahrverhalten des Gesamtfahrzeuges in der Praxis zu vermeiden.

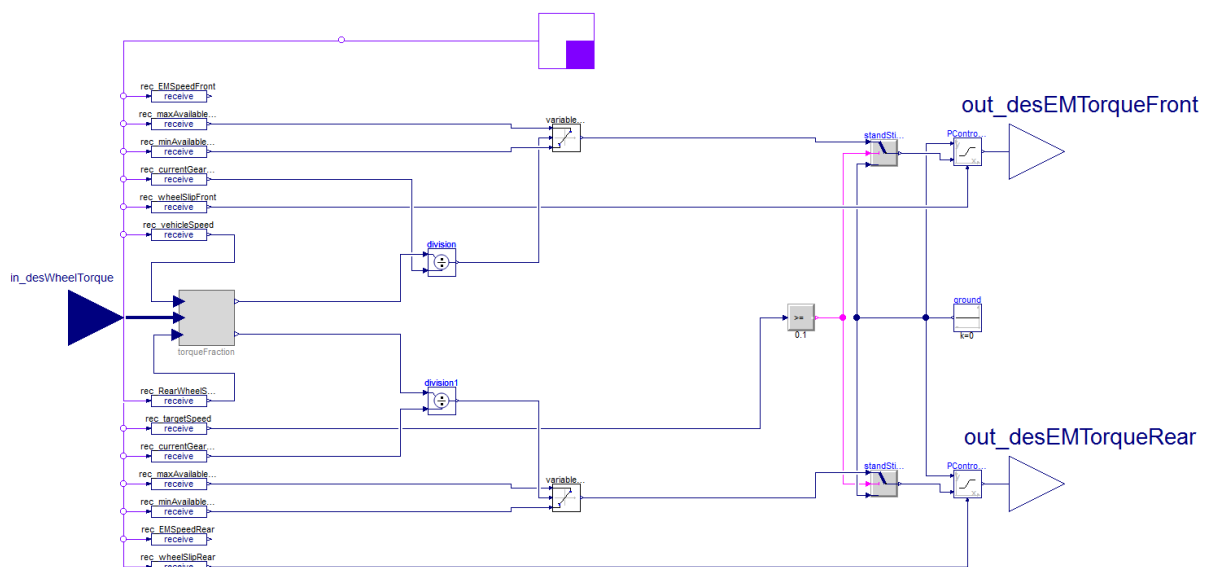


Abbildung 4.35: Ebene in *Dymola* zum Einlesen der Daten für den *TorqueController*

In der übergeordneten Ebene des *TorqueControllers* werden vorerst nur die notwendigen Daten aus dem CAN-Bus ausgelesen und die Radmomente in E-Maschinenmomente umgerechnet. Diese werden dann weitergeleitet an die physikalischen Modelle der E-Maschinen und den dazugehörigen Inverter, wie in Abbildung 4.5: E-System Modell („EDRIS System Model“) dargestellt ist.

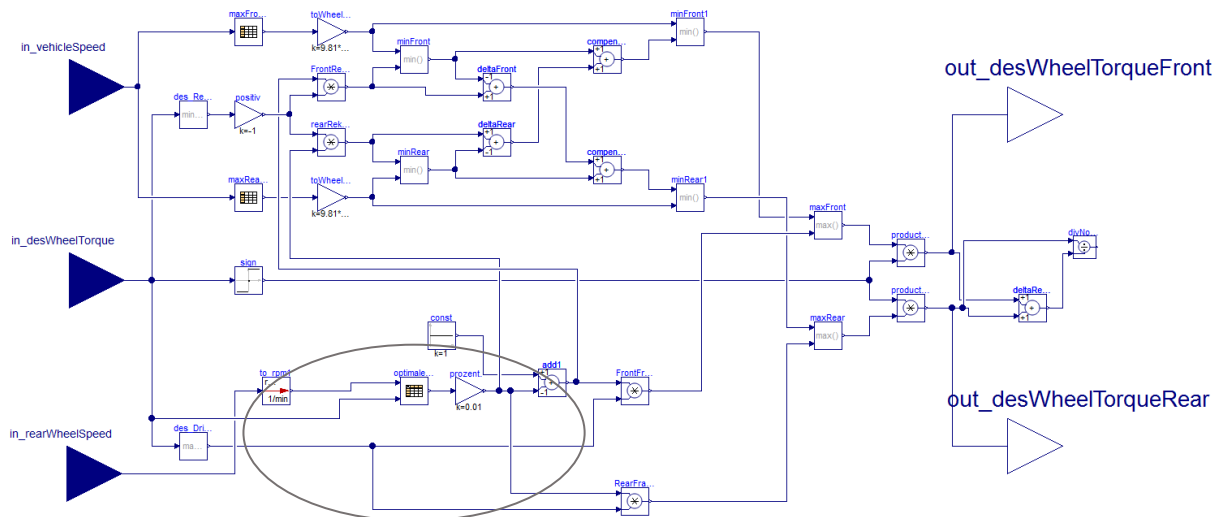


Abbildung 4.36: *TorqueController* mit Berücksichtigung der Rekuperationsverzögerungen an den Achsen

Das Herzstück des neuen *TorqueControllers* in Abbildung 4.36 unterscheidet zwischen positiven und negativen Momenten. Positive Momente beschreiben das Antreiben des Fahrzeugs in Zugrichtung und negative Momente tragen zum Verzögern des Fahrzeuges bei. Negative Momente werden auch als Rekuperationsmomente bezeichnet.

Wie bereits in den Grundlagen erwähnt, sind Simulationen grundsätzlich mit Ungenauigkeiten behaftet, da diese nur eine Näherung darstellen können. Simulationen erfordern immer gewisse Vereinfachungen, da zum einen Modelle immer nur vereinfacht dargestellt werden können und da man zum anderen auch in der Rechenleistung der PCs begrenzt ist. Jedoch eignen sich Simulationen hervorragend für Delta-Simulationen, also um Verbesserungen oder Verschlechterungen des Modells festmachen zu können. In diesem Fall sollen Veränderungen des elektrischen Verbrauches sowie der Reichweite ermittelt werden.

4.8 Analyse der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus der Simulation mit dem neuen *TorqueController* mit vollvariablem Kennfeld werden gegenübergestellt mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.4.2 mit den konstanten Verteilungen. Zusätzlich werden insbesondere der elektrische Verbrauch und die Reichweite gegenübergestellt. Da die elektrische Reichweite eines der entscheidendsten Eigenschaften eines BEV - Fahrzeuges ist, wird dieser Punkt besonders analysiert. Als zusätzlicher Faktor wird eine Strategie der Achsmomentaufteilung miteinbezogen, welche sich vor dieser Arbeit bewährt hat.

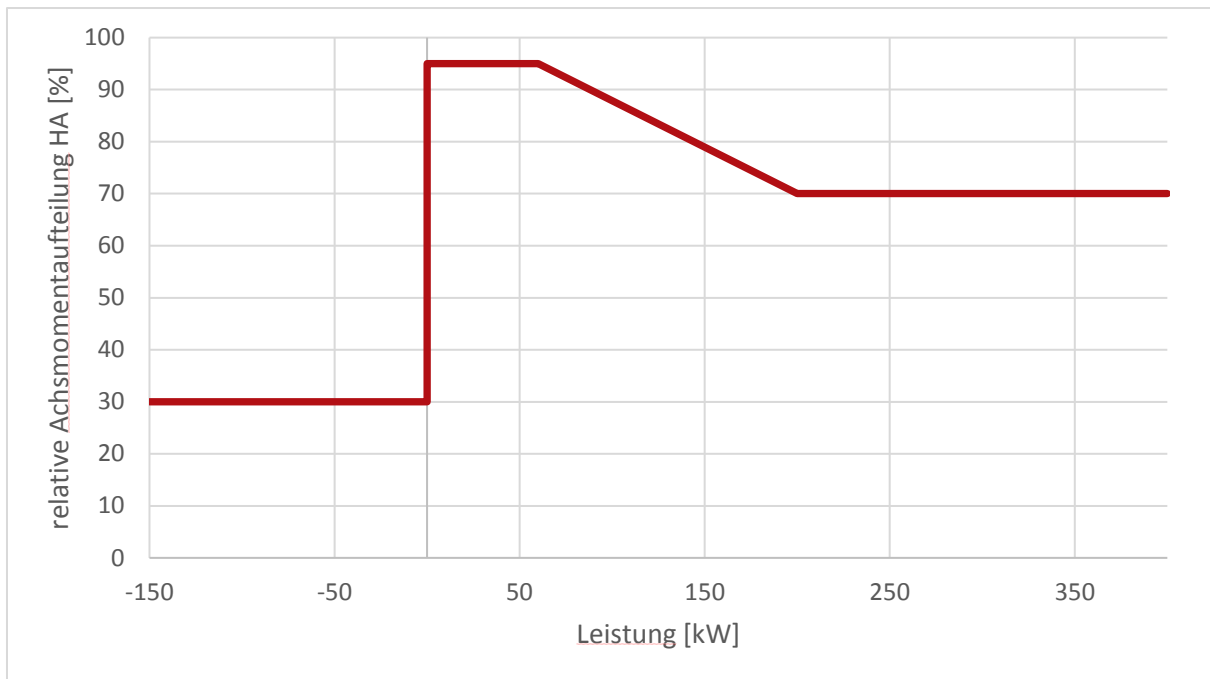


Abbildung 4.37: Vereinfachte Strategie aus bisherigen Betrachtungen

Bisher war es weit verbreitet, insbesondere in der Rekuperation, im Schubbetrieb 70 % des Achsmomentes auf die Vorderachse zu verlagern. Eine gewöhnliche hydraulische Betriebsbremse hat in der Regel eine 70/30 Aufteilung. Das bedeutet, 70 % der Bremslast wird aufgrund der dynamischen Achslastverteilung mit der Vorderachse gebremst. Dies ist eine Strategie, die einfach von Fahrzeugen mit konventionellem Antriebsstrang (Verbrennungsmotor) abgeleitet wurde. Für Fahrzeuge mit zwei Elektromotoren, jeweils einen an der Vorderachse und einen an der Hinterachse, sollte man eine 70/30 - Strategie jedoch hinterfragen. Insbesondere, weil E-Maschinen Rekuperationsmomente nutzen können, um den Hochvoltspeicher wieder zu laden. Die Rekuperation stellt einen großen Stellhebel zur Beeinflussung der Reichweite dar. Insbesondere in Stadt- und Landstraßenfahrten kann die Rekuperation eine massive Reichweitenerhöhung bringen.

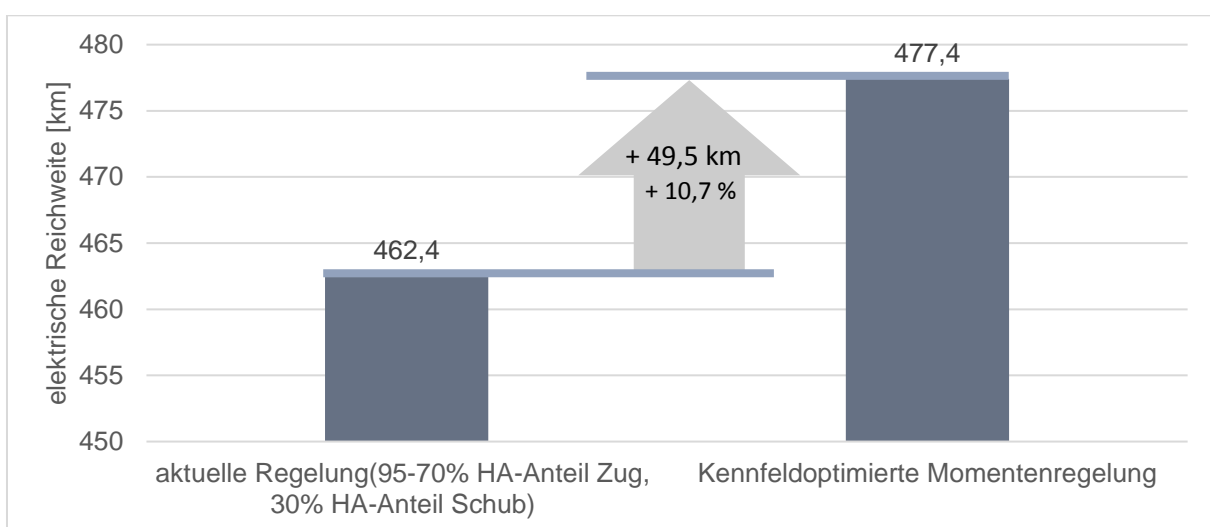


Abbildung 4.38: Reichweitenvergleich konventionelle Achsmomentaufteilung im Vergleich zur kennfeldoptimierten Achsmomentenregelung, Fahrzeug 1

Wenn man das Gesamtfahrzeugmodell mit den gleichen Fahrwiderständen und Rädern simuliert wie in Kapitel 4.4.2, so erhält man mit der konventionellen Betriebsstrategie der Achsmomentverteilung nach Abbildung 4.37 eine Reichweite von 462,4 km. Die kennfeldbasierte Achsmomentverteilung bietet hier ein Potential von 14,1 km, sodass sich simulativ eine Reichweite von 477,4 km ergibt. Der Verbrauch verbessert sich um 5,2 Wh/km im kundennahen Verbrauchszyklus.

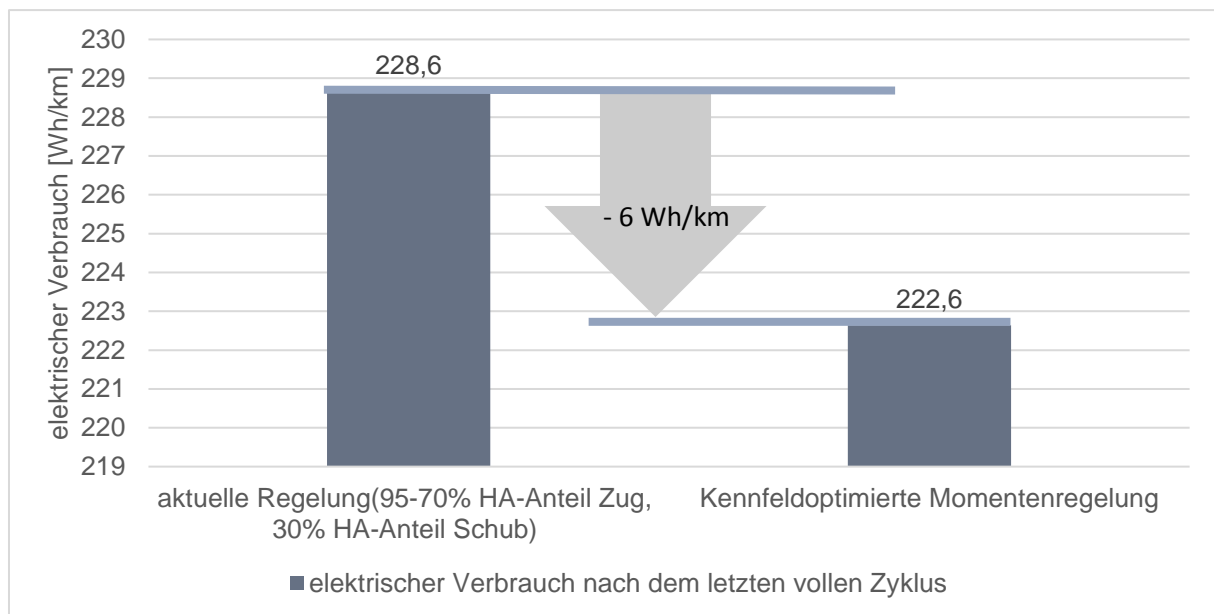


Abbildung 4.39: Verbrauchsvergleich konventionelle Achsmomentaufteilung im Vergleich versus kennfeldoptimierte Achsmomentanforderung, Fahrzeug 1

Das klingt im ersten Moment nach nicht viel, jedoch sind das relativ gesehen rund 3 % Steigerung der Reichweite. Die Anpassung dieser Betriebsstrategie ruft aufgrund fehlender Veränderung der physikalischen Komponenten keine höheren Herstellkosten hervor. Vereinfacht gesagt kann man festhalten, dass es sich in diesem Fall um eine Adaption der Betriebsstrategie handelt. In diesem Fall mit den verwendeten Antriebskomponenten ist eine hecklastige Auslegung wesentlich effizienter. Daher könnte man die E-Maschine und das Getriebe in Sachen Dauerhaltbarkeit adaptieren und somit Herstellkosten minimieren und trotzdem ein sehr effizientes Fahrzeug herstellen.

In Abbildung 4.40 sind die Reichweiten einer 0 % und einer 100 % Achsmomentverteilung bezogen auf die Hinterachse dargestellt. Diese starren Verteilungen in Zug- als auch Schubrichtung sind als Kombination von der in Kapitel 4.4.2 ausgeführten Verteilungsuntersuchungen der Achsmomentverteilung. Es ist jedoch zu beachten, dass in der starren 0 % Achsmomentverteilung ein bei sehr Momentanforderungen ein zusätzliches Moment der Hinterachse notwendig ist. Die E-Maschine an der Vorderachse würde diese hohen Momente nicht aufbringen können.

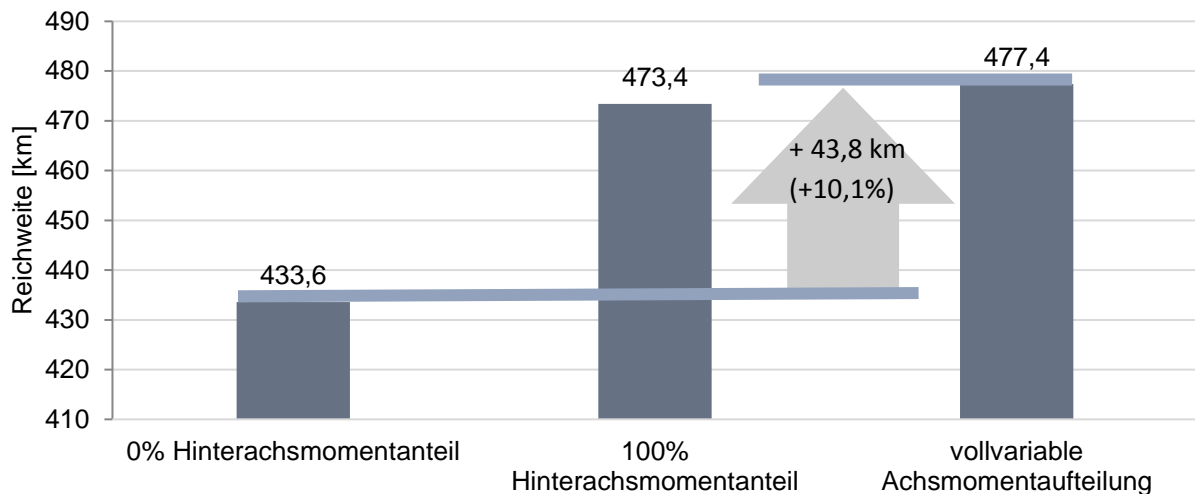


Abbildung 4.40: Reichweitenvergleich von starren Achsmomentverteilung gegenüber kennfeldoptimierter Achsmomentverteilung

Zwischen einer frontlastigen Auslegung von Fahrzeug 1 und der kennfeldoptimierten Achsmomentverteilung liegen 43,8 km. Ohne dem vorgestellten Tool müsste man durch probieren die effizienteste Achsmomentverteilung herausfinden. Aber selbst bei dieser Methode schafft man es nicht alle Bereiche abzudecken, daher ist vorgestellte Variante mittels des Algorithmus die einzige Variante alle Bereiche abzudecken und damit die effizienteste Achsmomentverteilung zu applizieren.

4.9 Anwendung des Algorithmus an einer weiteren Antriebskonfiguration

Zur Verifizierung der bisherigen Ergebnisse wird ein weiteres BEV - AWD-Fahrzeug mit einer komplett anderen Antriebskonfiguration untersucht. In dieser Antriebskonfiguration sitzt an der Vorderachse die starke E-Maschine und an der Hinterachse die leistungsschwächere E-Maschine. Beide E-Maschinen sind wieder als stromerregte Synchronmaschine ausgeführt.

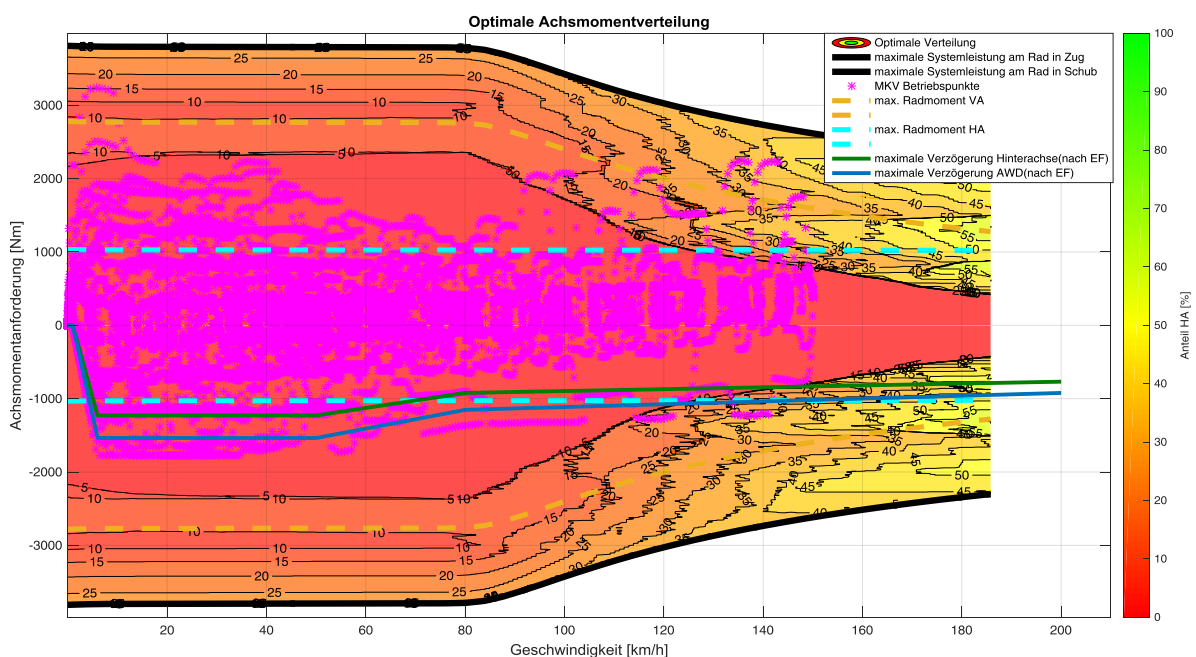


Abbildung 4.41: Optimale Achsmomentverteilung Antriebskonfiguration 2

In der grafischen 3D - Darstellung nach Abbildung 4.42 ist ein deutlicher Unterschied zur Antriebskonfiguration 1 zu erkennen. Im Gegensatz zur ersten Antriebskonfiguration ist in diesem Fall eine stark frontlastige Achsmomentverteilung effizienter. Bei größeren Momenten tritt wieder eine Verlagerung der Effizienz ein und die hintere E-Maschine sollte zusätzlich Moment aufbringen.

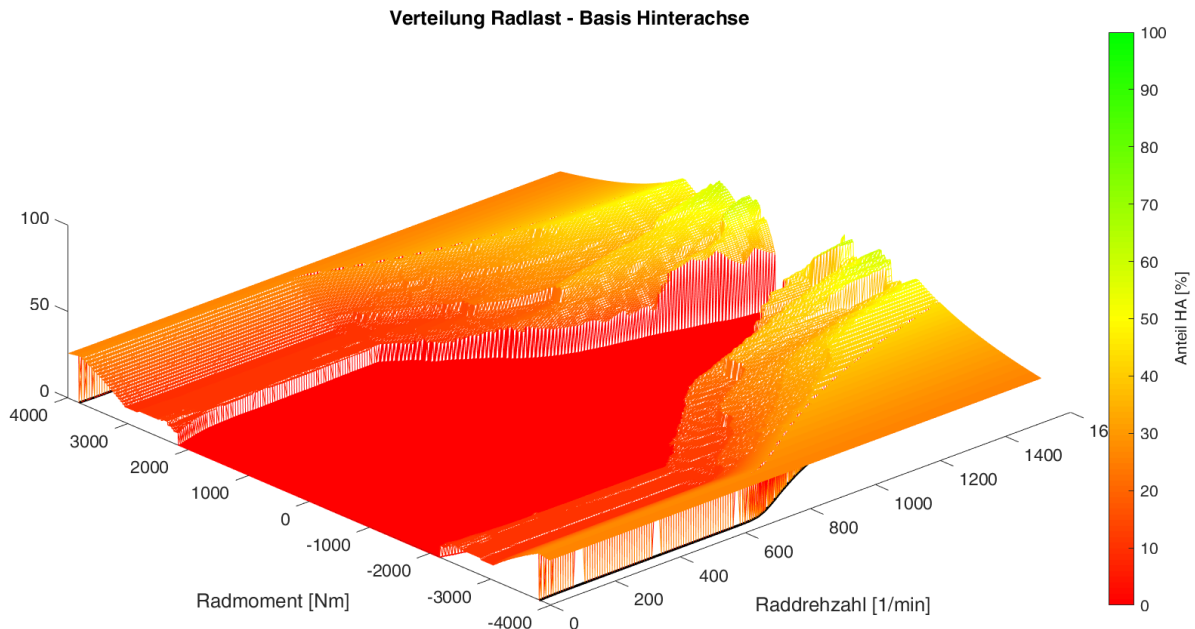


Abbildung 4.42: Achsmomentverteilung Antriebskonfiguration 2 als Netz

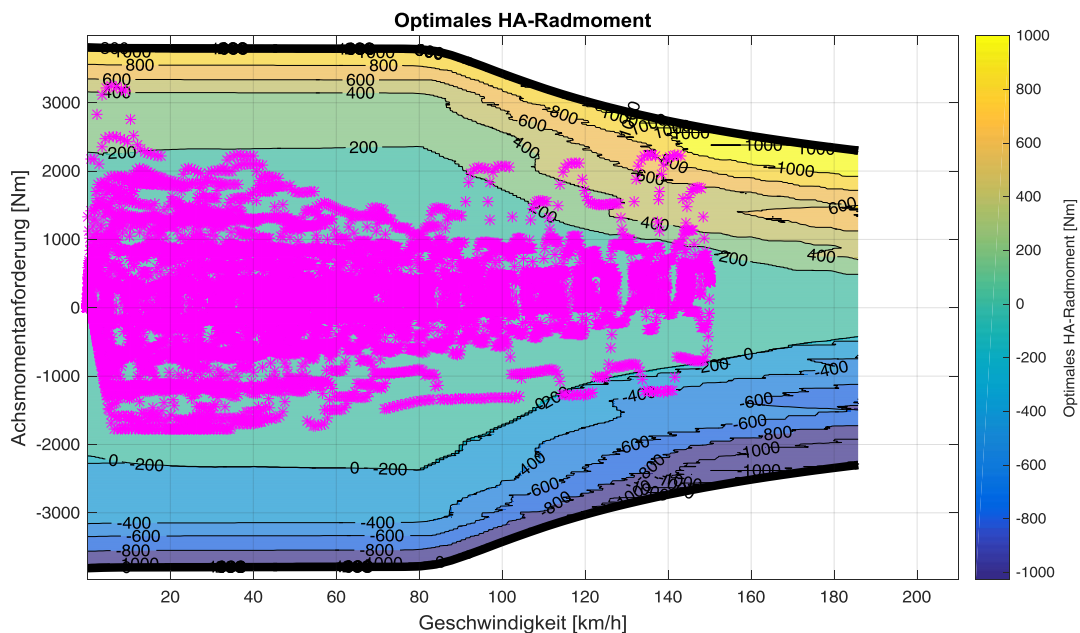


Abbildung 4.43: Optimales Radmoment an der Hinterachse in Antriebskonfiguration 2

In Abbildung 4.42 erkennt man deutlich, dass bis 2000 Nm Achsmomentanforderung und der ab etwa 90 km/h beginnenden Einschnürung eine 0 - Momentregelung der Vorderachse am effizientesten ist. Wenn man die Lastpunkte des kundennahen Verbrauchszyklus in der Darstellung berücksichtigt, so ist für normale Anwendungen ein reiner Fronantrieb aus Effizienzsicht vorzuziehen und nur in Lastfällen mit hoher Achsmomentanforderung die E-Maschine an der Hinterachse

zuzuschalten. Für die Auslegung der E-Maschinen und der Getriebe bedeutet dies, dass man an der Vorderachse hohe Dauerhaltbarkeit fordern muss und die Hinterachse, insbesondere für hohe Achsmomentanforderungen, auslegen muss. Dies gilt dann für die E-Maschine, den Inverter, das Getriebe, die Antriebswellen und für die Radlager.

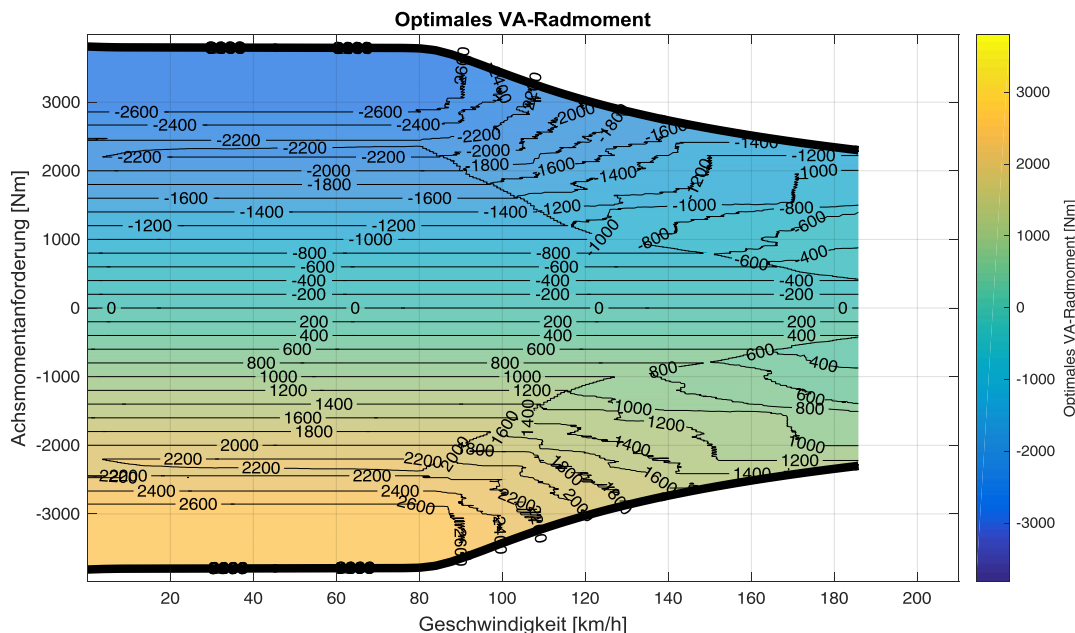


Abbildung 4.44: Optimales Radmoment an der Vorderachse in Antriebskonfiguration 2

Das wesentliche der Validierung stellen jedoch der Verbrauchsvergleich und der Reichweitenvergleich dar. Es wurde wiederum der Verbrauch nach dem letzten vollen Zyklus und die vollständige Reichweite in der Simulation eines Gesamtfahrzeugmodells mit den Antriebskomponenten des Fahrzeuges 2 ermittelt.

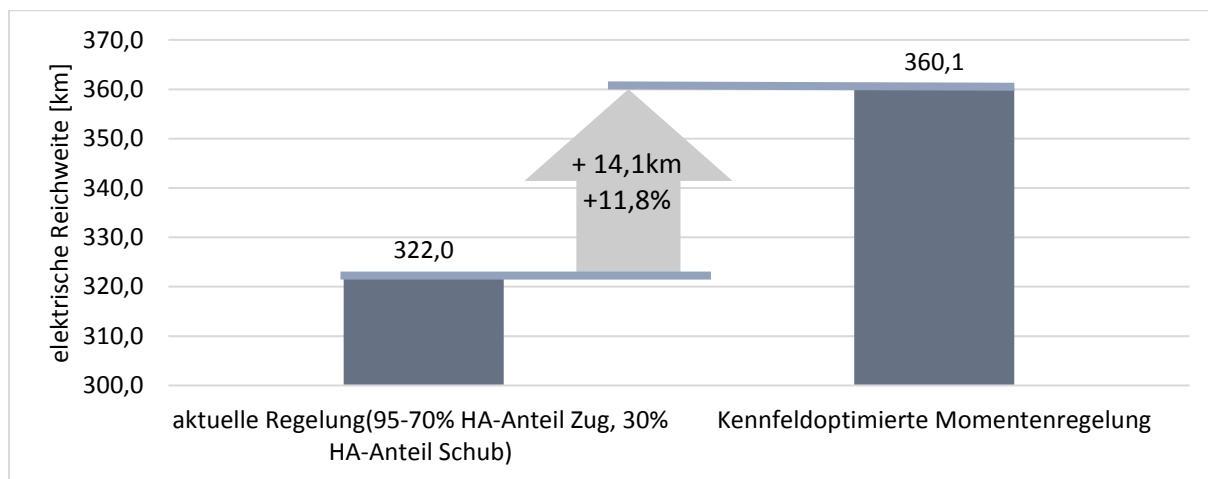


Abbildung 4.45: Reichweitenvergleich der Achsmomentverteilungsstrategie für Fahrzeug 2

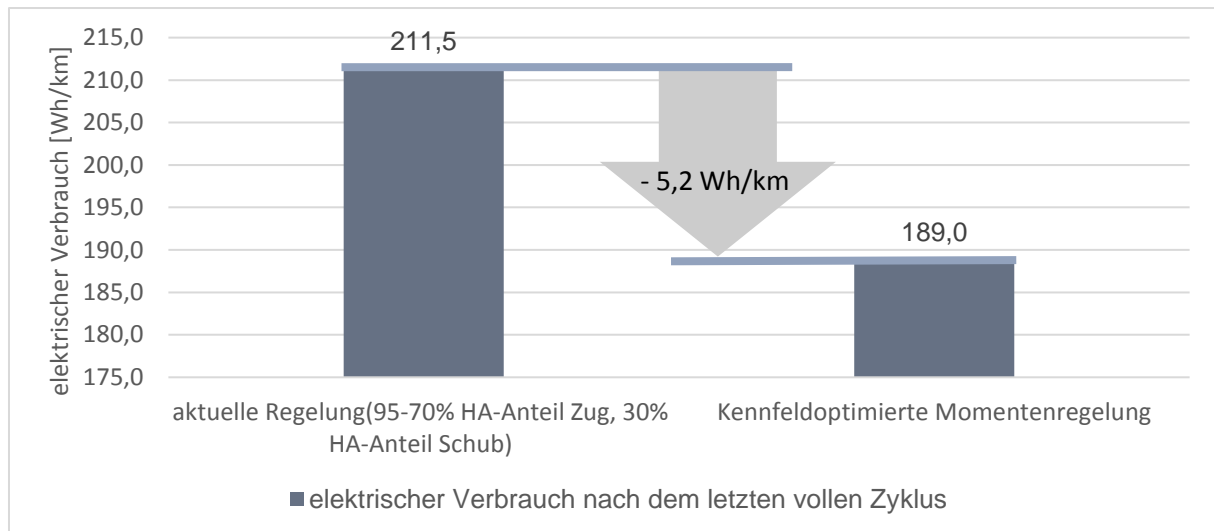


Abbildung 4.46: Verbrauchsvergleich der Achsmomentverteilungsstrategie für Fahrzeug 2

Nach dem Verbrauchsvergleich (in Abbildung 4.46 dargestellt) und dem Reichweitenvergleich (in Abbildung 4.45 dargestellt) des Fahrzeuges 2 bestätigen sich die Ergebnisse noch deutlicher als in der Antriebskonfiguration des Fahrzeuges 1. Die Vorteile sind hier noch eklatanter. Grund hierfür ist die noch stärker negativ auswirkende Betriebsstrategie laut Abbildung 4.37. Bis zu Lasten von 60 kW und auch im Rekuperationsbereich werden 95 % des Achsmomentes auf der Hinterachse vollzogen. Nachdem in Antriebskonfiguration 2 die Vorderachse im unteren Lastbereich sich als effizienter dargestellt hat, ist diese Strategie stark reichweiten- und verbrauchsschädigend. Damit lassen sich auch die vielfach verbesserten Ergebnisse erklären.

4.10 Diskussion der Ergebnisse

Batterieelektrische Fahrzeuge sind aufgrund der aktuell geforderten Regulierungen seitens der Gesetzgeber und auch aufgrund des sozialen und ökologischen Bewusstseins der Bevölkerung ein wichtiger Bestandteil zukünftiger Fahrzeugflotten. Um in Zukunft auch leistungsstarke und traktionsstarke Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb realisieren zu können, sind BEV - AWD Fahrzeuge gefordert, dennoch müssen diese auch sparsam mit der Energie umgehen um niedrige Energieverbräuche zu realisieren und den Kunden hohe Reichweiten bieten zu können. Die Arbeit aus Kapitel 4 trägt einen wesentlichen Teil dazu bei, entsprechende Antriebe zu entwickeln, um diese Bedürfnisse befriedigen zu können.

Als Ergebnis sind die Verbesserungen der Reichweiten wie in Antriebskonfiguration von Fahrzeug 1 mit 10,7 % und 11,8 % in der Antriebskonfiguration des Fahrzeuges 2 als durchaus beachtliche Optimierungen anzusehen. Nicht zuletzt weil die physikalischen Antriebskomponenten wie E-Maschinen und Hochvoltspeicher kaum mehr Effizienzpotentiale aufweisen. Effizienzverbesserungen mit den Antriebskomponenten an sich sind daher nur sehr schwer und mit äußerst hohem finanziellen Aufwand möglich. Mit den Verbesserungen der Reichweite wird in etwa das gleiche Potential erreicht, wie sich in den Messungen des Tesla' s herausgestellt hat. Wobei berücksichtigt werden muss, dass Tesla Asynchronmaschinen verbaut hat und die Untersuchungen dieses Kapitels mit stromerregten Synchronmaschinen erfolgten. Jedoch lässt der Vergleich darauf schließen, dass die Ergebnisse aus den Messungen am Rollenprüfstand des BEV – AWD Fahrzeuges mit den Ergebnissen aus der Simulation mit dem generierten Algorithmus die gleichen Ergebnisse liefern.

Somit sind die Ergebnisse der Simulation mit dem Kennfeld aus dem Algorithmus verifiziert sowie plausibilisiert und können für die Auslegung der Antriebskomponenten herangezogen werden.

Grundsätzlich erfolgte die Ermittlung dieser Ergebnisse auf Basis von gemessenen Kennfeldern von E-Maschinen-Prototypen. Sollten die Verlustkennfelder der in der Serie eingesetzten E-Maschinen anders aussehen, so kann es sein, dass sich die optimale Achsmomentverteilung stark verändert. Sollten aus Kostengründen oder anderen Motiven andere Kombinationen an E-Maschinen eingesetzt werden, so kann man mit dem Tool und der vorgestellten Methode des Algorithmus sehr schnell die optimale Achsmomentverteilung ermitteln. Die veränderten Verlustkennfelder und eventuell geänderte optimale Achsmomentverteilungen können dazu führen, dass sich bereits beschlossene Getriebeauslegungen als falsch erweisen. Dies könnte dramatische Auswirkungen auf Gesamtfahrzeugprojekte hinsichtlich Kosten und Einhaltung des Projektzeitplanes haben.

Positiv ist jedoch, dass im Vorfeld vor einer Entwicklung einer serienmäßig eingesetzten E-Maschinenkombination eines BEV - AWD bereits Getriebe, Inverter und E-Maschine aufgrund vorhandener Lastkollektive mit der in dieser Arbeit präsentierte Methodik zur Erstellung der optimalen Achsmomentverteilung eine optimale und kostengünstige Auslegung erfolgen kann. Sollte sich, wie im Fahrzeug 1 dieser Arbeit, heraus stellen, dass die E-Maschine an der Hinterachse in den meisten Betriebspunkten effizienter ist, so können die Komponenten von E-Maschine, Inverter, Getriebe und Radlager an der Vorderachse hinsichtlich Dauerfestigkeit und anderen Auslegungsparametern kostengünstiger ausgelegt werden. In Summe ergeben sich dadurch sehr hohe Kosteneinsparungspotentiale. Die Höhe dieser Kosten richtet sich nach der Leistung beziehungsweise dem Drehmoment der E-Maschinen, sowie der Achsmomentverteilungsdifferenz zwischen Vorderachse und Hinterachse.

Als großer Vorteil der vorgestellten Methodik des Algorithmus zur effizientesten Achsmomentverteilung erweist sich, dass es sich lediglich um eine Anpassung der Betriebsstrategie handelt. Große und teure technische Umbaumaßnahmen der Antriebstopologie sind nicht notwendig. Zusätzlich kann die Methodik zur Auslegung der Komponenten aus E-Maschinen, Inverter, Getriebe und Radlager herangezogen werden.

Die am Fahrzeug 1 durchgeführte Variation der Achsmomentverteilung liefert als Ergebnis sowohl in Zug- als auch in Schubrichtung das Optimum mit der besten Effizienz und damit mit dem geringsten Verbrauch bei einer 100 % hecklastigen Achsmomentverteilung. Das Kennfeld aus dem Algorithmus für die effizienteste Verteilung nach Abbildung 4.29 liefert ebenfalls diesen Wert. Dies allerdings nur bis zu einer gewissen Radmomentanforderung, denn dann ist eine vollvariable Verteilung effizienter. Dieses Zuschalten der vorderen E-Maschine führt zu einer Reichweitenverlängerung von 4 km im Vergleich zu einer starren 100 % Achsmomentverteilung.

Erweitert könnte die Methode werden, indem man die Kennfeldgenerierung nicht extern in *Matlab* erzeugt, sondern direkt in der Simulation. Dies würde den Prozess zeitlich wesentlich verbessern. Weiters könnte man die Methodik verbessern, indem man Parameter einstellt. Beispielsweise kann es in der Praxis in Applikation von Vorteil sein, wenn man zum Anfahren bis zu einer gewissen Geschwindigkeit, eine definierte Achsmomentverteilung zwischen den E-Maschinen einstellt. Bei winterlichen Fahrbedingungen wie etwa auf Eis und Schnee kann es vorteilhaft sein, wenn man eine definierte Allradverteilung vorsieht. In diesem Fall wäre etwa eine 55% Achsmomentverteilung bezogen auf die Hinterachse eine mögliche definierte Verteilung. Damit würde das Anfahren

wesentlich erleichtert werden und damit kundenfreundlicher. Mit einer Erweiterung im Algorithmus wäre diese Parametrisierung durchführbar.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Betrachtung der P2- und P4-Hybridfahrzeuge im Vergleich zu BEV - Fahrzeugen hat gezeigt, dass insbesondere bei P4-Hybridfahrzeugen sowohl in Fahrzuständen mit niedrigen Lasten und niedrigen Geschwindigkeiten, aber vor allem bei höheren Lasten in Kombination mit höheren Geschwindigkeiten massive Einsparungspotentiale möglich sind. P4 - Hybride können mit technischen Maßnahmen an der Vorderachse die Verbindung der Räder mit dem Getriebe mittels Kupplung trennen und somit wesentliche Effizienzsteigerungen lukrieren. P2 - Hybride haben einen Nachteil hinsichtlich der Antriebstopologie aufgrund der E-Maschine, die am Eingang des Schaltgetriebes liegt. Die E-Maschine muss aufgrund der Schaltvorgänge immer eine Drehzahländerung nach dem Schaltvorgang aufnehmen. Dies führt zu einem starken Wirkungsgradverlust. Wenn man den P2 -Hybrid als P3 – Hybrid mit einer E-Maschine im Achsgetriebe an der Hinterachse und einer Trennkupplung zwischen dem Achsgetriebe und der Kardanwelle ausstattet, könnte man die Verluste des Schaltgetriebes einsparen. Somit könnte man einen wesentlich effizienteren Hybridantrieb im rein elektrischen Fahrbetrieb realisieren.

In naher Zukunft werden viele BEV - Fahrzeuge unser Straßenbild prägen, nicht zuletzt aufgrund der geringen Emissionen im Fahrbetrieb und der enorm gesteigerten Fahrleistungen in Sachen Beschleunigung und Beschleunigungsspontanität. BEV - AWD Antriebstopologien, wie in dieser Arbeit vorgestellt, sind bereits jetzt in Serienfahrzeugen verbaut und bieten in diesen Fahrzeugen hohe Fahrdynamik. Damit diese Fahrzeuge zukünftig noch effizienter werden, sind Allradstrategien unumgänglich. Abhängig von der effizienteren E-Maschine an der jeweiligen Achse wird in den 2 untersuchten Fahrzeugen bei niedrigen Lasten immer eine 0 – Momentregelungsstrategie gefahren. Das bedeutet, dass die E-Maschine soweit bestromt wird, dass diese aufgrund des eigenen Widerstandes durch Reibung der E-Maschine in den Lagerungen, Luftverwirbelungen des Rotors und sämtlichen Verluste im Getriebe, kein negatives Moment erzeugt. Verluste der E-Maschine ohne Abtriebsmoment werden daher ausgeglichen.

Zusätzlich zu der 0 - Momentenstrategie in Bereichen mit niedrigen Lasten ist es möglich, eine 0 - Stromregelung der E-Maschinen umzusetzen. Das bedeutet, dass der Läufer der E-Maschinen komplett stromlos läuft. Die Achse mit 0 - Stromregelung erzeugt dadurch ein negatives Moment, dass von der zweiten E-Maschine ausgeglichen werden muss. Diese 0-Stromregelung kann zusätzliche Effizienzpotentiale des Gesamtantriebes liefern. Aus aktueller Sicht muss aber eine höhere Response-Zeit der E-Maschine mit 0 - Stromregelung in Kauf genommen werden. Dies beruht auf der Tatsache, dass sich bei Aktivierung das Magnetfeld erst aufbauen muss und die E-Maschine erst dann ein Moment aufbringen kann. Des Weiteren muss unter Umständen, je nach Lastanforderung, ein ruckartiges Verhalten der E-Maschine beim Aufbauen des Magnetfeldes in Kauf genommen werden. Dies würde starke Komforteinbußen und schwächere Fahrleistungen aufgrund der längeren Response-Zeit verursachen.

Durch die Weiterentwicklung von E-Maschinen und Inverter kann es durchaus möglich sein, dass diese Nachteile ausgeräumt werden und eine 0 - Stromregelung zusätzlich in Betracht gezogen werden kann, und somit weitere Effizienzsteigerungen möglich sind.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Amtsblatt der Europäischen Union: *Regelung Nr. 101 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE)- Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Personenkraftwagen , die nur mit einem Verbrennungsmotor oder mit Hybrid-Elektro-Antrieb betrieben werden, hinsichtlich der Messung der Kohlenstoffdioxidemission und der Kraftstoffverbrauchs und/oder der Messung des Stromverbrauchs und der elektrischen Reichweite sowie der nur mit Elektroantrieb betriebenen Fahrzeug der Klasse M1 und N1 hinsichtlich Messung des Stromverbrauchs und der elektrischen Reichweite*, 2010.
- [2] *Autoelektrik, Autoelektronik [Systeme und Komponenten ; neu: Vernetzung, Hybridantrieb]*, Vieweg, ISBN 3528238720, 2007.
- [3] Beitler, A.: *Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen durch eine bewusste Energieoptimierung mittels Thermomanagement und Fahrerbeeinflussung*, disserta Verlag, ISBN 978-3-95935-216-1, 2016.
- [4] BMW Group AG: *0 % EMISSIONEN, 100 % FAHRFREUDE - Entwickelt für die Elektromobilität – Antrieb & Technik des BMW i3*. Im Internet. URL: http://www.bmw.com/com/de/newvehicles/i/i3/2016/showroom/drive_technology.html, (letzter Abruf: 07.04.2017).
- [5] Dassault Systems AB: *Dymola Modeling Laboratory*, User Manual.
- [6] EG-6: *E-Mobilität*, Anforderungsszenarien und Rahmenbedingungen. Interne Firmenschrift BMW AG.
- [7] *EUROPEAN AUTOMOBILE MANUFACTURERS ASSOCIATION (ACEA)*. Im Internet. URL: <http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/20140221IPR36626/begrenzung-der-co2-emissionen-von-pkw>, (letzter Abruf: 26.01.2017).
- [8] Fischer, R.: *Elektrische Maschinen*, Hanser, ISBN 3446406131, 2006.
- [9] Gamble, P.: *internes Tool zum Auslesen von Kennfeldern*, München, 2015.
- [10] Golloch, R.: *Downsizing bei Verbrennungsmotoren*, Springer, ISBN 9783540274902, 2005.
- [11] GROTE, C.; ESTER, R. (HRSG.): *Batterien, Ladekonzepte und Stromversorgungsdesign*, WEKA Fachzeitschriften-Verlag GmbH, 2006.
- [12] Hanisch F.: *Wirkungsgradberechnung - Vergleich der Berechnungen*, Interne Firmenschrift BMW AG, 2014.
- [13] Heißing, Bernd; Ersoy, Metin; Gies, Stefan: *Fahrwerkhandbuch*, Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 9783658019914, 2013.
- [14] Hofmann, P.: *Hybridfahrzeuge - Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*, Springer, ISBN 3709117798, 2014.
- [15] ICCT - THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION: *EU CO 2 EMISSION STANDARDS FOR PASSENGER CARS AND LIGHT-COMMERCIAL VEHICLES*. Im Internet. URL: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_EU-95gram_jan2014.pdf, (letzter Abruf: 04.04.2017).

- [16] Illiano, E.: *Die stromerregte Synchronmaschine als hocheffizienter Traktionsmotor in Elektrofahrzeugen*, In: In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 04/2013, In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 04/2013.
- [17] Kleimaier, A.: *Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*, Technische Universität München, Dissertation, 2003.
- [18] *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, Vieweg, ISBN 3834801380, 2011.
- [19] Krauß, M.; Gregori, H.; Möllmann, J.; Marschall, T.: *Der Antriebsstrang des neuen BMW 225xe iPerformance Active Tourer*, In: MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2016.
- [20] Kurz J., Kuss G.: *SIGMA Anwenderhandbuch*, Interne Firmenschrift BMW AG, München, 2012.
- [21] Liebl, J.; Hafkemayr, M.: *Intelligente Generatorregelung - ein Beitrag zur Effizienz*, In: In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift Elektronik 04/2006.
- [22] Liebl, J.; Lederer, M.; Rohde-Brandenburger, K.; Biermann, J.-W.; Roth, M.; Schäfer, H.: *Energiemanagement im Kraftfahrzeug*, Springer Vieweg, ISBN 9783658044503, 2014.
- [23] Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*, Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 9783658050689, 2014.
- [24] Naunheimer, H.; Bertsche, B.; Lechner, G.: *Fahrzeuggetriebe*, Springer, ISBN 3-540-30625-0, 2007.
- [25] Neudorfer, H.: *Weiterentwicklung von elektrischen Antriebssystemen für Elektro- und Hybridstraßenfahrzeuge*, OVE, ISBN 9783851330564, 2010.
- [26] Pischinger, S.; Seiffert, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, Vieweg, ISBN 978-3-658-09528-4, 2016.
- [27] Reif, K.: *Batterien, Bordnetze und Vernetzung*, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, ISBN 9783834813107, 2010.
- [28] Reif, K.; Noreikat, K.-E.; Borgeest, K.: *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe*, Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 9783834807229, 2012.
- [29] ROSENMAYR, M.; HAFKEMEYER, M.; SCHMIDT, R.; LIEBL J.; HEIM A.: *Optimiertes Batteriemangement mit dem intelligenten*, VDI-Verl., ISBN 9783180919577, 2006.
- [30] Rötzer, F.: *CO2-Konzentration in der Atmosphäre hat die symbolische Grenze von 400 ppm überschritten*. Im Internet. URL: <https://www.heise.de/tp/news/CO2-Konzentration-in-der-Atmosphaere-hat-die-symbolische-Grenze-von-400-ppm-ueberschritten-2013966.html>, (letzter Abruf: 23.01.2017).
- [31] TESLA, Inc.: *MODEL S*. Im Internet. URL: https://www.tesla.com/de_DE/models, (letzter Abruf: 08.04.2017).
- [32] United States Environmental Protection Agency - EPA: *Emission Standards Reference Guide - EPA Federal Test Procedure (FTP)*. Im Internet. URL: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-federal-test-procedure-ftp>, (letzter Abruf: 04.04.2017).
- [33] VDA - Verband der Automobilindustrie: *Abgasemissionen*. Im Internet. URL: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/abgasemissionen/wltp-weltweit-harmonisierter-zyklus-fuer-leichte-fahrzeuge.html>.

- [34] VDA - Verband der Automobilindustrie: *CO₂-Regulierung bis 2020 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge*. Im Internet. URL: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/co2-regulierung-bis-2020/co2-regulierung-bis-2020-fuer-pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge.html>, (letzter Abruf: 23.01.2017).
- [35] VDA - Verband der Automobilindustrie: *WLTP – weltweit harmonisierter Zyklus für leichte Fahrzeuge*. Im Internet. URL: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/abgasemissionen/wltp-weltweit-harmonisierter-zyklus-fuer-leichte-fahrzeuge.html>, (letzter Abruf: 08.02.2017).
- [36] Voss, B.: *Wirkungsgradverbesserungen von Fahrzeugantrieben durch eine bedarfsorientierte Auslegung der Nebenaggregate und ihrer Antriebe*, VDI-Verlag, ISBN 3181459127, 1991.
- [37] Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges*, Vieweg + Teubner Verlag, ISBN 9783834814128, 2011.
- [38] Weissbrich, A.: *Elektrischer Antrieb zur Lenkunterstützung im Personenkraftwagen*, VDI-Verlag, ISBN 318144412X, 1990.
- [39] Wilde, A.: *Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen*, Technische Universität München, Dissertation, 2009.
- [40] WLTP-2013-028 GTR: *Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure*, WLTP.
- [41] Zentrum für Verkehr der Technischen Universität Braunschweig (Hrsg.): *Hybridfahrzeuge und Energiemanagement*, VDI-Verlag, ISBN 3183484129, 2002.
- [42] ZF - Friedrichshafen AG: *ZF - Technik im PKW Automatikgetriebe: 8-Gang plug-In Hybridgetriebe*. Im Internet. URL: http://www.zf.com/corporate/de_de/products/product_range/cars/cars_8_speed_plug_in_hybrid_transmission.shtml, (letzter Abruf: 03.02.2017).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Vorgehen in der Arbeit	3
Abbildung 2.1: Längsdynamische Fahrwiderstände.....	4
Abbildung 2.2: Schema eines seriellen Hybrid-Antriebs	6
Abbildung 2.3: Schema eines P1- parallel hybriden Antriebsstrangs.....	7
Abbildung 2.4: Schema eines P2 - parallel hybriden Antriebsstrangs.....	8
Abbildung 2.5: Schema eines P3 - parallel hybriden Antriebsstrangs	9
Abbildung 2.6: Schema eines P4 - Parallel hybriden Antriebsstrangs	9
Abbildung 2.7: Schema eines leistungsverzweigten hybriden Antriebsstrangs	10
Abbildung 2.8: Schema des Antriebsstrangs eines BEV - Battery Electric Vehicles.....	11
Abbildung 2.9: Betriebsweise von Plug-In-Hybridfahrzeugen [28]	12
Abbildung 2.10: Vergleich E-Maschinentypen bei Elektrofahrzeugen [16]	14
Abbildung 2.11: Qualitatives Wirkungsgradkennfeld einer permanenterregten Synchronmaschine..	14
Abbildung 2.12: Fahrprofil FTP72 [32]	16
Abbildung 2.13: Fahrprofil Highway [18]	16
Abbildung 2.14: Fahrprofil NEFZ [18]	17
Abbildung 2.15: Darstellung zur Ermittlung des CO ₂ Ausstoßes eines PHEV-Fahrzeuges [6]	18
Abbildung 2.16: Grenzwerte der EU für CO ₂ - Emissionen der Flottenverbräuche der Hersteller [15]	19
Abbildung 2.17: WLTP - Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure [18].....	20
Abbildung 2.18: Übersicht Simulationsvorgang in SIGMA nach [20]	22
Abbildung 2.19: Systemmodell eines Plug-In-Hybridfahrzeuges in <i>Dymola</i>	24
Abbildung 2.20: Oberste Ebene des Gesamtfahrzeugmodells BEV in <i>Dymola</i>	25
Abbildung 2.21: Beispielhafter Verlauf eines Schleppmomentes einer Trennkupplung [42].....	26
Abbildung 2.22: Wirkungsgrad im 6. Gang für 3-Wellen-Beispielgetriebe [22].....	27
Abbildung 2.23: Schleppleistung eines 3-Wellen 6-Gang Getriebes mit 80 °C Öltemperatur [22].....	28
Abbildung 2.24: Größe und Aufteilung der Verlustleistungen von einem koaxialen 6-Gang- Handschaltgetriebe im 4. Gang bei 50 % Teillast [24].....	28
Abbildung 2.25: E-Getriebe an der Hinterachse mit integriertem Differenzial eines PHEV(P4) [19] ...	29
Abbildung 3.1: Elektrische Verbräuche im FTP72 absolut im Vergleich	34
Abbildung 3.2: Elektrische Verbräuche im FTP72 relativ im Vergleich (Basis: BEV)	35
Abbildung 3.3: Beschleunigungsverlauf mit den angepassten Fahrwiderstandsdaten im FTP72	36
Abbildung 3.4: Vergleich der Verluste im FTP72 absolut: BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2)	37
Abbildung 3.5: Vergleich Verluste FTP72 relativ: BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2)	38
Abbildung 3.6: Elektrische Verbräuche im Highway Zyklus; Absolutwerte im Vergleich	39
Abbildung 3.7: Elektrische Verbräuche im Highway Zyklus; Relativwerte im Vergleich.....	40
Abbildung 3.8: Beschleunigungs- und Verzögerungsverlauf mit den angepassten Fahrwiderstandsdaten im Highway.....	41
Abbildung 3.9: Vergleich der Verluste im Highway Zyklus; Absolutwerte: BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2)	42
Abbildung 3.10: Vergleich der Verluste im Highway-Zyklus; Relativwerte: BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2)	43
Abbildung 3.11: Wirkungsanalyse am Beispiel des Hochvoltspeichers [12]	43
Abbildung 3.12: Wirkungsgradvergleich BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2) des Hochvoltspeichers	45
Abbildung 3.13: Wirkungsgradvergleich BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2) des Achsgetriebes	46
Abbildung 3.14: Wirkungsgradvergleich BEV - PHEV(P4) - PHEV(P2) des Gesamtgetriebes	47
Abbildung 3.15: Wirkungsgradvergleich der EM.....	48

Abbildung 3.16: Stromaufnahme des Niedervoltkreises in der Messung am Rollenprüfstand eines FTP72	49
Abbildung 3.17: Moment an der E-Maschine vor dem Stillstand beim PHEV(P2) in einer Versuchsmessung am Rollenprüfstand mit FTP72 Fahrprofil	50
Abbildung 3.18: Ersparnis an Energie durch Wegfall von Kriechen beim PHEV(P2)	51
Abbildung 3.19: Moment an der E-Maschine des PHEV(P4) aus Messung am Rollenprüfstand in einem FTP72 Fahrzyklus	52
Abbildung 3.20: Weiterentwickeltes P2/P3 – Parallel Hybrid Antriebskonzept	53
Abbildung 3.21: Weiterentwickeltes P4 – Parallel Hybrid Antriebskonzept Konzept.....	54
Abbildung 4.1: Antriebstopologie eines BEV - AWD	57
Abbildung 4.2: EM an der Vorderachse mit <i>Range Modus</i> ON und OFF des kundennahen Verbrauchszyklus.....	59
Abbildung 4.3: EM an der Hinterachse mit <i>Range Modus</i> ON und OFF im kundennahen Verbrauchszyklus.....	59
Abbildung 4.4: Energien mit <i>Range Mode</i> ON und <i>Range Mode</i> OFF	60
Abbildung 4.5: E-System Modell („EDRIS System Model“)	61
Abbildung 4.6: Simulationsmodell zum Auslesen der Kennfelddaten für die Verlustleistung der E-Maschinen	62
Abbildung 4.7: Zweite <i>Torque Controller</i> Ebene	62
Abbildung 4.8: Dritte <i>Torque Controller</i> Ebene.....	63
Abbildung 4.9: Vierte <i>Torque Controller</i> Ebene	63
Abbildung 4.10: Unterste <i>Torque Controller</i> Ebene mit Rekuperations-Limiter.....	64
Abbildung 4.11: Grundprinzip der Achsmomentverteilung	66
Abbildung 4.12: Schlupf an der Vorderachse und an der Hinterachse im kundennahen Verbrauchszyklus.....	67
Abbildung 4.13: Kennlinie der Rekuperation im Schubbetrieb.....	68
Abbildung 4.14: Verbrauch bei Variation der Achsmomente in einem WLTP	69
Abbildung 4.15: Wirkungsgradvergleich der E-Maschinen im WLTP	70
Abbildung 4.16: Achsmomentverteilungsvariation in Schubrichtung (Rekuperation), konstante positive Verteilung	71
Abbildung 4.17: Reichweiten bei Variation der Verteilung im Schubbetrieb	71
Abbildung 4.18: Elektrischer Verbrauch bei Variation der Achsmomentverteilung im Schubbetrieb .	72
Abbildung 4.19: Reichweiten bei Variation der Achsmomentverteilung in Zugrichtung.....	72
Abbildung 4.20: Verbräuche bei Variation der Achsmomentverteilung in Zugrichtung.....	73
Abbildung 4.21: Verlustkennfeld der E-Maschine (ohne Inverter) an der Hinterachse (bei 400V Spannungslage)	74
Abbildung 4.22: Vergleich zwischen E-Maschinen Verlustkennfeld und Inverter Verlustkennfeld.....	74
Abbildung 4.23: Verlustkennfeld von E-Maschine + Inverter an der Hinterachse (bei 400V Spannungslage)	75
Abbildung 4.24: Vergleich der Verlustkennfelder von E-Maschine inklusive Inverter und Getriebe ...	76
Abbildung 4.25: Gegenüberstellung beider EM-Verlustkennfelder inklusive Inverter von Fahrzeug 1	77
Abbildung 4.26: Vorgang zur Bestimmung eines vollvariablen Achsmomentverteilungskennfeld	78
Abbildung 4.27: Maximalmomentkennlinie der E-Maschine an der Vorderachse und an der Hinterachse	79
Abbildung 4.28: Gesamtverluste von Inverter, E-Maschinen und Getriebe bei Variation der Achsmomentverteilung.....	80
Abbildung 4.29: exemplarisches Netz einer Achsmomentverteilung für Fahrzeug 1.....	81

Abbildung 4.30: Optimales Achsmomentverteilungskennfeld aus Effizienz­sicht über Raddrehzahl mit Leistungshyperbeln	82
Abbildung 4.31: Optimales Hinterachsradmoment	82
Abbildung 4.32: Optimales Vorderachsradmoment	83
Abbildung 4.33: Optimale Achsmomentverteilung über Radmoment und Geschwindigkeit mit Betriebspunkten des mittleren Kundenverbrauchszyklus	84
Abbildung 4.34: exemplarisches geglättetes Netz einer Achsmomentverteilung für Fahrzeug 1	84
Abbildung 4.35: Ebene in <i>Dymola</i> zum Einlesen der Daten für den <i>TorqueController</i>	85
Abbildung 4.36: <i>TorqueController</i> mit Berücksichtigung der Rekuperationsverzögerungen an den Achsen	86
Abbildung 4.37: Vereinfachte Strategie aus bisherigen Betrachtungen	87
Abbildung 4.38: Reichweitenvergleich konventionelle Achsmomentaufteilung im Vergleich zur kennfeldoptimierten Achsmomentregelung, Fahrzeug 1	87
Abbildung 4.39: Verbrauchsvergleich konventionelle Achsmomentaufteilung im Vergleich versus kennfeldoptimierte Achsmomentanforderung, Fahrzeug 1	88
Abbildung 4.40: Reichweitenvergleich von starren Achsmomentverteilung gegenüber kennfeldoptimierter Achsmomentverteilung	89
Abbildung 4.41: Optimale Achsmomentverteilung Antriebskonfiguration 2	89
Abbildung 4.42: Achsmomentverteilung Antriebskonfiguration 2 als Netz	90
Abbildung 4.43: Optimales Radmoment an der Hinterachse in Antriebskonfiguration 2	90
Abbildung 4.44: Optimales Radmoment an der Vorderachse in Antriebskonfiguration 2	91
Abbildung 4.45: Reichweitenvergleich der Achsmomentverteilungsstrategie für Fahrzeug 2	91
Abbildung 4.46: Verbrauchsvergleich der Achsmomentverteilungsstrategie für Fahrzeug 2	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der wichtigsten Parameter der verwendeten Fahrzyklen [18]	21
Tabelle 2: Simulation des Energieverbrauchs im FTP72 mit den Stammdaten der Fahrzeuge	31
Tabelle 3: Simulation des Energieverbrauchs im Highway mit den Stammdaten der Fahrzeuge	32
Tabelle 4: Vergleich BEV-PHEV(P2)-PHEV(P4) mit angepassten Fahrwiderständen im FTP72	34
Tabelle 5: Vergleich BEV-PHEV(P2)-PHEV(P4) mit angepassten Fahrwiderständen im Highway Zyklus	39