



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

**Potenzialbetrachtung einer prädiktiven Betriebsstrategie für einen Hybrid-
antrieb im Niederspannungsbereich**

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

Assoc. Prof. Dr.techn Peter Hofmann

und

Dipl.-Ing. Robert Steffan

E315

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Harald Schneider, M.Sc.

1128428

Wiedner Gürtel 58/42

1040 Wien



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



Institut für Fahrzeugantriebe
& Automobiltechnik

**Institut für Fahrzeugantriebe
und Automobiltechnik**

Getreidemarkt 9
A-1060 Wien
<http://www.ifa.tuwien.ac.at>

**Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Ing.
Bernhard GERINGER**

Institutsvorstand
tel.: +43-1/ 58801-31500
fax: +43-1/ 58801-31599
bernhard.geringer@tuwien.ac.at

DIPLOMAUFGABE

Herrn Harald Schneider, Matr.Nr.: 11 28 428 wird folgende Diplomaufgabe gestellt:

“Potenzialbetrachtung einer prädiktiven Betriebsstrategie für einen Hybridantrieb im Niederspannungsbereich“

Im Einzelnen sind folgende Punkte zu bearbeiten:

1. Literaturrecherche
2. Simulation:
 - Erstellung einer Basisbetriebsstrategie
 - Definition erforderlicher Fahrzyklen
 - Erstellung einer prädiktiven Betriebsstrategie:
 - Adaptierung des Fahrzeugmodells
 - Geschwindigkeits- und Ladezustandsprädiktion
 - Prädiktive Eingriffe in die Basisstrategie

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

Dauer: Februar 2015 – Jänner 2016

Kennzahl: E 740

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

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

Einverstanden:



Harald Schneider

Betreuer am Institut:



Dr. Peter Hofmann



Prof. Dr. Bernhard Geringer
Institutsvorstand

Eidesstattliche Erklärung

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

„Potenzialbetrachtung einer prädiktiven Betriebsstrategie für einen Hybridantrieb im Niederspannungsbereich“

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

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

Wien, am 06.01.2016



Harald Schneider

Sperrvermerk:

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

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich in meinem Studium und bei meiner Diplomarbeit stets unterstützt haben.

Ganz besonders gilt mein Dank meinen Betreuern Herrn Assoc. Prof. Peter Hofmann und Herrn Robert Steffan für die Anregungen und die Förderung meiner Arbeit. Ebenso bedanken möchte ich mich bei Herrn Christoph Six für die wichtige Hilfestellung bei der Vorbereitung der Messfahrten.

Den Mitarbeitern des Instituts für Kraftfahrzeuge und Automobiltechnik möchte ich vielmals danken für die freundliche Aufnahme als Diplomand und der produktiven und nie langweiligen Arbeitsumgebung.

Mein aufrichtiger Dank gilt besonders meinen Eltern, die mir mein Studium erst ermöglichten und mich immerwährend dabei unterstützt haben. Ganz herzlich möchte ich mich auch bei meiner Freundin Astrid für ihre Geduld und Unterstützung bedanken.

Wien, im Jänner 2016

Harald Schneider

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Hybridtechnologie	3
2.1.1	Klassifizierung	3
2.1.2	Niederspannungstechnologie	6
2.1.3	Cars‘ Ultra Light Technology	8
2.2	Betriebsstrategien	10
2.2.1	Nicht prädiktive Betriebsstrategie	13
2.2.2	Prädiktive Betriebsstrategie	14
2.3	Sensorik für die prädiktive Betriebsführung	15
2.3.1	Bestimmung des Fahrzeugzustands	16
2.3.2	Umfeldererkennung	16
2.3.3	Satellitennavigation	17
2.3.4	Routendaten	18
2.3.5	Backendsysteme	19
2.3.6	Fahrzeug zu Fahrzeug Kommunikation	19
3	Methodik	21
3.1	Modellbildung	21
3.2	Fahrzyklen	23
3.2.1	Überlandzyklus	24
3.2.2	Stadtzyklus	26
3.2.3	Pendlerzyklus	27
3.3	Basisbetriebsstrategie	29
3.4	Prädiktive Betriebsstrategie	35
3.4.1	Bildung der Prädiktion	38
3.4.1.1	Fahrwiderstände	38
3.4.1.2	Prädiziertes Geschwindigkeitsprofil	41
3.4.1.3	Vereinfachte Betriebsstrategie	52
3.4.1.4	SOC-Prädiktion im Fahrzyklus	53

3.4.2	Beeinflussung der Basisbetriebsstrategie	55
3.4.2.1	Startwert und Variationsbereich	56
3.4.2.2	Auswirkungen der Parameterstellung	58
3.4.2.3	Beeinflussungsschritte	59
4	Ergebnisse.....	62
4.1	Versuch mit extremen Höhenprofil	64
4.2	Gesamte Zyklen mit halber Batteriekapazität	69
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	76
	Literaturverzeichnis.....	78

Kurzfassung

Durch die Notwendigkeit der CO₂-Reduktion beim Betrieb des Kraftfahrzeugs unternehmen Automobilhersteller verschiedenste Maßnahmen, den Kraftstoffverbrauch zu senken. Zu den Maßnahmen zählen u.a. Anstrengungen im Leichtbau und die Hybridisierung des Antriebsstrangs. Weiters gibt es Bestrebungen, einige Hybridfunktionen mit einem 48 V Boardnetz darzustellen. Durch konsequenten Leichtbau ist es möglich, ein Fahrzeug im A-Segment trotz der geringen Bordnetzspannung mit Full-Hybrid-Funktionalität, zu betreiben.

Ein Hybridfahrzeug mit diesen Eigenschaften wird in dieser Arbeit auf mögliche Kraftstoffeinsparungen durch die Erweiterung mit einer prädiktiven Betriebsstrategie untersucht.

Dafür sind die Erstellung geeigneter Fahrzyklen, einer Ladezustandsprädiktion sowie einer prädiktive Betriebsstrategie notwendig. Die Ladezustandsprädiktion versucht, über einen sinnvollen Prädiktionshorizont den zukünftigen Verlauf des Ladezustands zu berechnen. Die Informationen, die dafür notwendig sind, werden modernen Navigationssystemen entnommen und notwendige Daten für statistische Berechnungen werden Vergangenheitsdaten entnommen.

Im Weiteren wird eine Methode vorgestellt, wie mit einer regelbasierten Steuerung die Prädiktionsdaten genutzt werden können, um den Kraftstoffverbrauch über den Zyklus zu senken. Ferner wird untersucht, wie sich der Kraftstoffverbrauch bei Reduktion der Batteriekapazität und vorhandener prädiktiver Betriebsstrategie verhält.

Abstract

Due to the need for CO₂ reduction in the automotive industry, manufacturers are using several technologies to fulfil their target. Actions they take are for example weight reduction or hybridisation. In hybrid powertrains intentions are going to a main power supply voltage of 48 V to display first hybrid functions. With consequent lightweight construction of vehicles in the A-segment, Full-Hybrid functions become possible despite the low voltage level.

In this theses a vehicle with the described characteristics is used for further research. The question to be answered is if adding a predictive operating strategy is resulting in the reduction of fuel consumption.

For the development of appropriate test cycles, a prediction of the state of charge and a predictive operating strategy are necessary. The prediction algorithm tries to calculate the future course of the state of charge over a reasonable time period. The necessary information are obtained from navigation systems and parameter for statistical calculations are taken from historical data.

Afterwards, a method to reduce the fuel consumption over the cycle with a rule-based approach is presented. It also examines how the fuel behaves with a reduced battery capacity and an existing predictive operating strategy.

Nomenklatur

Griechische Symbole

α	[rad]	Steigungswinkel
η	[-]	Wirkungsgrad
ϑ	[kg m ²]	Reduziertes Massenträgheitsmoment
λ	[-]	Drehmassenzuschlagsfaktor
ρ	[kg/m ³]	Dichte

Lateinische Symbole

A	[m ²]	Querspanfläche
a, \dot{v}	[m/s ²]	Beschleunigung
c_w	[-]	Luftwiderstandsbeiwert
e	[-]	Anteil der gespeicherten Energie
F	[N]	Kraft
f	[-]	Rollwiderstandsbeiwert
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H	[J/kg]	Heizwert
h	[m]	Höhe
I_η	[-]	Wirkungsgradfaktor
i	[-]	Gangstufe
m	[kg]	Masse
P	[W]	Leistung
p	[-]	Wahrscheinlichkeit
Q	[J]	Kraftstoffenergie
s	[m]	Weg
t	[s]	Zeit
T	[J]	Kinetische Energie

v	[m/s]	Geschwindigkeit
W	[J]	Arbeit

Abkürzungsverzeichnis

ADAS	Advanced Driver Assistance System
ADASIS	Advanced Driver Assistance Systems Interface Specifications
ASG	Automatisiertes Schaltgetriebe
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
C2C	Car-to-Car
GLONASS	Globales Satellitennavigationssystem von Russland (Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema)
EKI	Energiekostenindikator
GPS	Global Positioning System
LPH	Lastpunkterhöhung
MPP	Most-Probable-Path
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NDS	Navigation Data Standard
NVH	Noise Vibration Harshness
RDS	Radio Data System
RSG	Riemen-Starter-Generator
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
SOC	State of Charge (Ladezustand)
TMC	Traffic Message Channel
TU	Technische Universität
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WLTC	Worldwide Harmonized Light-Vehicles Test Cycle

1 Einleitung

Eine der Hauptaufgaben unserer Zeit ist die Eindämmung der Erderwärmung und somit die Reduktion des CO₂-Ausstoßes. Ein wesentlicher Teil der CO₂-Emissionen wird durch den motorisierten Straßenverkehr verursacht. Daher muss es ein Bestreben der Automobilbranche sein, Techniken zu entwickeln, um den Kraftstoffverbrauch und damit den CO₂ Ausstoß zu reduzieren.

Politischen Nachdruck erfährt diese Aufgabe durch gesetzliche Verordnungen zur CO₂-Reduktion. Ab 2021 darf in der Europäischen Union der Flotten-CO₂-Ausstoß maximal 95 g/km betragen. Basierend auf dem heute durchschnittlichen Ausstoß von 130 g/km CO₂, bedeutet das eine notwendige Absenkung des Verbrauchs an Kraftstoff um etwa 27 %. Dieses Ziel ist bei schweren und stark motorisierten Fahrzeugen durch Maßnahmen ausschließlich am Verbrennungsmotor nicht mehr erreichbar. Insbesondere nicht mit den gängigsten Kraftstoffen Benzin und Diesel. Es wird notwendig, den Antriebsstrang zu elektrifizieren und so Hybridfunktionen darzustellen. Außerdem ist es unumgänglich, das Fahrzeuggewicht zu reduzieren. Ein weiterer Baustein der CO₂-Reduktion könnte die Verwendung von Kraftstoffen sein, die bei ihrer Verbrennung weniger CO₂ emittieren. Ein in Europa gut verfügbarer Brennstoff der diesen Ansprüchen genügt ist Erdgas. Daher könnte die Forcierung von Erdgasfahrzeugen wesentlich zum Erreichen des CO₂ Ziels beitragen. [1]

Durch die Reduktion des Fahrzeuggewichts sinkt die benötigte Antriebsleistung. Dies ermöglicht bei Fahrzeugen im A-Segment, alle Hybridfunktionen bereits mit einem 48 V System darzustellen [2]. Durch die in Kapitel 2.1.2 weiter erläuterten Vorteile eines 48 V Bordspannungsnetzes, eröffnet dies eine kostengünstige Möglichkeit, ein Hybridsystem einzusetzen.

Abgesehen von der Reduktion des CO₂-Ausstoßes, kann der Einsatz eines Hybridantriebs weitere Gründe haben. Dazu zählen u.a. die Erhöhung des Fahrspaßes sowie die Reduktion von Schadstoffen, jedoch bleibt zumeist die Absenkung des Kraftstoffverbrauchs die Hauptaufgabe der Hybridisierung. Zur Umsetzung dieser Ziele bestehen verschiedene Bauarten von Hybridantrieben sowie verschiedene Leistungsklassen, die in Kapitel 2.1 weiter erläutert werden. Entscheidend für die Umsetzung dieser Ziele ist jedoch die Betriebsstrategie, die das Zusammenspiel der Komponenten im Antriebsstrang koordiniert. In dieser Arbeit ist die Betriebsstrategie dafür verantwortlich, den Beschleunigungswunsch des Fahrers so umzusetzen, dass der Kraftstoffverbrauch über den Fahrzyklus minimiert wird.

Betriebsstrategien können zur Umsetzung dieser Ziele reaktiv oder proaktiv arbeiten. Reaktive Betriebsstrategien arbeiten mit den Daten des aktuellen Fahrzeugzustandes und stützen ihre

Entscheidungen ausschließlich auf diese Informationen. Stehen der Betriebsstrategie auch Informationen über die vorausliegende Route zur Verfügung, kann sie das Hybridsystem auf zukünftige Fahrsituationen vorbereiten. Die Erweiterung mit kommenden Streckeninformationen bildet somit eine prädiktive Betriebsstrategie. Für die Vorhersage des Fahrprofils kann eine Vielzahl an Informationen verwendet werden. Für kurzzeitige Prädiktionen können etwa Informationen aus im Fahrzeug vorhandenen Assistenzsystemen verwendet werden. Für einen langfristigen Prädiktionshorizont, der von einigen Minuten bis zu Stunden reichen kann, sind jedoch Informationen über die kommende Route und Verkehrsinformationen notwendig. Bei bekanntem Zielort können diese Daten vom Navigationsgerät zur Verfügung gestellt werden.

Da das Fahrzeug jedoch weiterhin vom Fahrer gesteuert wird und viele Umgebungseinflüsse, wie andere Verkehrsteilnehmer, nicht vorhersagbar sind, besteht ständig eine gewisse Ungenauigkeit in der Vorhersage des zukünftigen Fahrprofils. Daher ist es nicht möglich, ein globales Optimum über die zu fahrende Route durch eine prädiktive Betriebsstrategie zu erreichen.

Durch diese Arbeit soll die Fragestellung geklärt werden, welche Vorteile im Kraftstoffverbrauch unter Verwendung eines 48 V Hybrids entstehen, wenn die Basisbetriebsstrategie um eine Prädiktion erweitert wird. Die vorausschauende Betriebsstrategie soll echtzeitfähig sein und real verfügbare Daten verwenden.

2 Grundlagen

2.1 Hybridtechnologie

Hybridantriebe werden in Fahrzeugen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und des CO₂-Ausstoßes sowie zur Erhöhung des Fahrspaßes eingesetzt. Sie werden von einem Verbrennungsmotor und zumindest einem Elektromotor angetrieben. Außerdem ist ein Energiespeicher nötig, der den Elektromotor mit elektrischer Energie speist. Als Energiespeicher werden heute meist Batterien eingesetzt, in denen die elektrische Energie in Form von chemischer Energie gespeichert wird. [3]

2.1.1 Klassifizierung

Hybridfahrzeuge können über die Strukturierung des Antriebsstrangs, d.h. der Anordnung von Verbrennungskraftmaschine (VKM) und Elektromaschine, eingeteilt werden. Dies führt zur Unterscheidung in serielle, parallele und leistungsverzweigte Hybridantriebe. Ein serieller Hybridantrieb ([Abbildung 1](#)) besteht aus einem Verbrennungsmotor, der mit einem Generator verbunden ist. Dieser erzeugt die gesamte Energie, welche für den Betrieb des Fahrzeugs notwendig ist. Für das Antriebsmoment sorgt mindestens eine zweite mit dem Verbrennungsmotor nicht mechanisch verbundene Elektromaschine. Die im Generator erzeugte Energie wird direkt im Elektromotor wieder umgesetzt oder in der Batterie gespeichert. Der Vorteil dieser Struktur ist, dass der Verbrennungsmotor in einem stationären Betriebspunkt arbeiten kann und somit verbrauchsoptimal betrieben wird. Nachteilig wirkt sich diese Anordnung allerdings auf die Kosten und das Gewicht des Antriebsstrangs aus. Da der generatorische Teil die gesamte benötigte Antriebsenergie erzeugen muss, ist dieser Teil und damit auch der Generator entsprechend groß zu dimensionieren. Außerdem hat die serielle Struktur einen großen Nachteil bei konstanter Fahrt, da durch die zweifachen Energiewandlungen der Gesamtwirkungsgrad gegenüber einem mechanischen Getriebe deutlich abnimmt. Diese Antriebsstruktur findet besonders bei Stadtbussen mit stark transientem Fahrprofil Anwendung. [4]

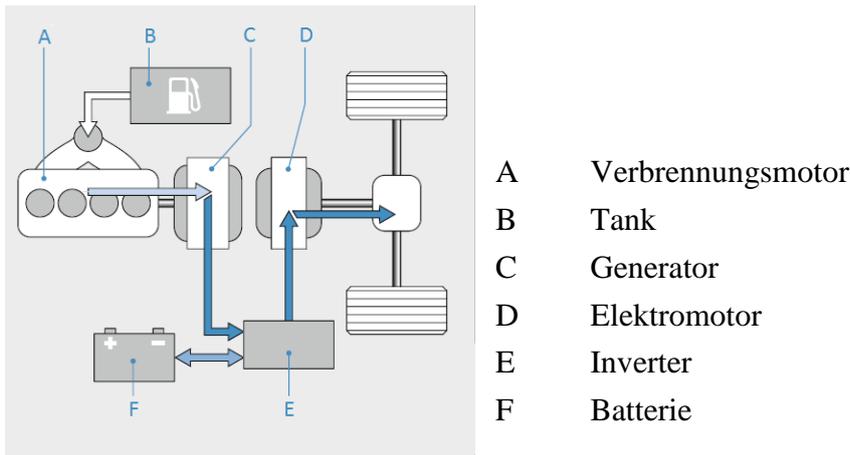


Abbildung 1: Serieller Hybridantrieb [3]

Im Gegensatz zum seriellen Hybrid besitzt der parallele Hybrid einen mechanischen Durchtrieb von der Verbrennungskraftmaschine bis zu den Rädern. Die Momente der VKM und der Elektromaschine können bei Bedarf addiert werden. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau eines Parallelhybrids in einer P2 Anordnung und zwei Kupplungen. Durch die zwei Kupplungen ist es möglich, rein elektrisch zu fahren und dabei den Verbrennungsmotor abzukoppeln, damit das Schlepptomment der VKM nicht von der Elektromaschine aufgebracht werden muss.

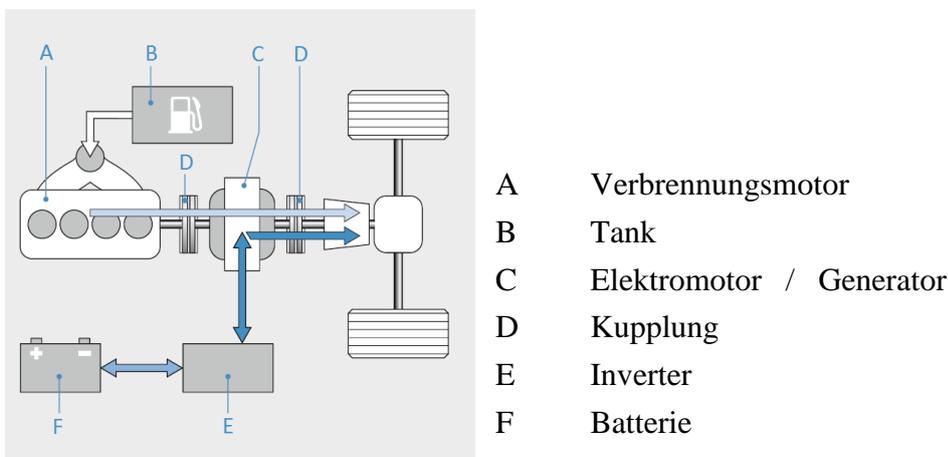


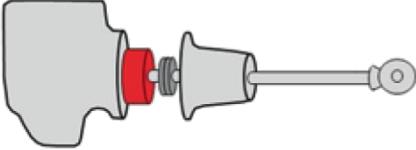
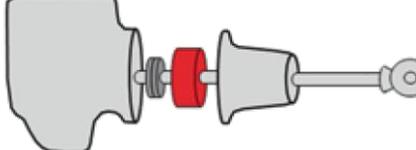
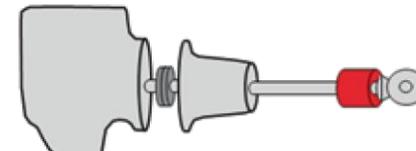
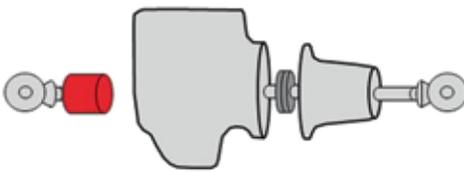
Abbildung 2: Parallelhybrid mit zwei Kupplungen [3]

Für die Anordnung der Elektromaschine im Antriebsstrang von Parallelhybriden hat sich die Nomenklatur entsprechend Tabelle 1 durchgesetzt. Die Bezeichnung reicht dabei von P1 bis P4, wobei das P für parallel und die Nummer für die Position der Elektromaschine steht. P1¹ bezeichnet eine Anordnung, bei der die Elektromaschine fest mit dem Verbrennungsmotor verbunden ist. Diese Anordnung ist ohne großen Mehraufwand bei bestehenden Fahrzeugen implementierbar. Jedoch müsste beim elektrischen Fahren das Schlepptomment der VKM durch

¹ Teilweise auch als P0 bezeichnet sofern die Elektromaschine über dem Riementrieb angekoppelt ist.

den Elektromotor zusätzlich aufgebracht werden. Daher kommt diese Anordnung bei Vollhybriden kaum zur Anwendung. Bei Vollhybriden sind die Anordnungen P2 bis P4 sinnvoll, da der Verbrennungsmotor abgekoppelt werden kann. Deren Integration im Fahrzeug bedarf deutlichem Mehraufwand. Bei der Verwendung von automatisierten Schaltgetrieben (ASG) ermöglichen die Anordnungen P3 und P4 die Zugkraftunterbrechungen durch das Getriebe ganz oder teilweise zu unterbinden, wobei P4 zusätzlich die Möglichkeit eines elektrischen Allradantriebs bietet. [5]

Tabelle 1: Nomenklatur für Parallel-Hybridantriebssysteme [5]

P1		E-Motor drehfest mit dem Verbrennungsmotor verbunden
P2		E-Motor am Getriebeeingang, durch eine Kupplung vom Verbrennungsmotor getrennt
P3		E-Motor hinter dem Getriebe
P4		E-Motor an separater, vom Verbrennungsmotor nicht angetriebener Achse

Die dritte mögliche Struktur des Antriebsstrangs ist der leistungsverzweigte Hybrid. Häufig wird dieser mit einem Planetengetriebe, über das die Eingangsleistung in einen mechanischen und einen elektrischen Pfad aufgeteilt wird, ausgeführt. In [Abbildung 3](#) ist die Übertragung der Leistung im elektrischen Pfad über die Elektromaschinen D und G angedeutet. Je nach Betriebspunkt können diese als Motor oder Generator verwendet werden. Durch diesen Aufbau wird ein stufenloses Getriebe realisiert, bei dem der Betriebspunkt der VKM freier als bei parallelen Hybridantrieben eingestellt werden kann. Der größte Nachteil dieses Antriebsstrangs ist die Energieübertragung über den elektrischen Pfad, welcher aufgrund der vielen Umwandlungsverluste zu einem schlechten Gesamtwirkungsgraden führen kann. [4, 5]

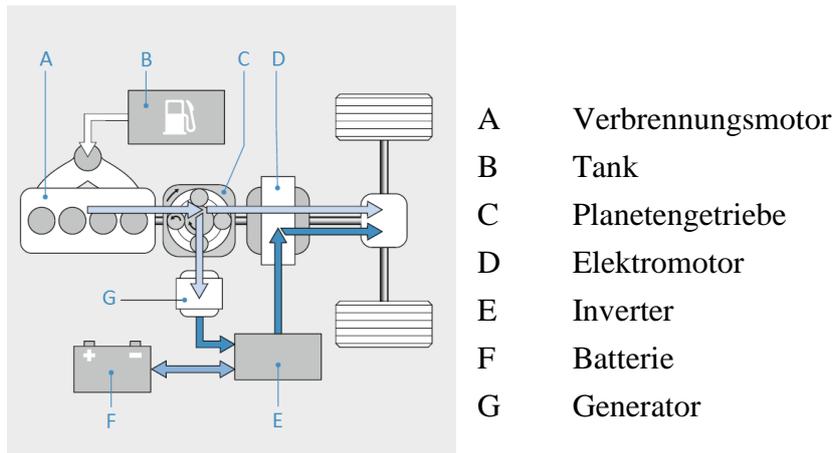


Abbildung 3: Leistungsverzweigter Hybridantrieb [3]

Weiters kann man Hybridantriebe auch anhand ihres Funktionsumfangs klassifizieren. Hybrid-systeme mit dem geringsten Funktionsumfang werden als Mild-Hybride bezeichnet und verfü- gen über eine Start-Stopp-Funktion der VKM und können begrenzt Rekuperieren, Lastpunkt- verschieben und Boosten. Im Gegensatz dazu ist bei einem Full-Hybrid Fahrzeug das elektri- sche Fahren ein fester Bestandteil. Der Elektromotor ist vom Verbrennungsmotor abkoppelbar, damit der Verbrennungsmotor im rein elektrischen Betrieb nicht mitgeschleppt werden muss. [3] Üblicherweise werden Full-Hybrid Fahrzeuge mit 300-400 V betrieben, um eine für den elektrischen Betrieb ausreichende Leistung erzeugen zu können [6]. Zusätzlich zu dieser Klassifizierung können auch Micro-Hybridantriebe mit aufgenommen werden. Diese bilden die Brücke zwischen Start/Stopp-System und Mild-Hybrid. Neben dem Motorstart beschränkt sich ihr Funktionsumfang auf der teilweisen Rekuperation von Bremsenergie. [5]

2.1.2 Niederspannungstechnologie

Full-Hybrid Fahrzeuge werden üblicherweise im Hochvoltbereich ausgeführt, um genug Leis- tung für alle Hybridfunktionen zur Verfügung zu haben. Übliche Spannungsebenen bewegen sich um die 300 bis 800 V. [6] Diese hohen Spannungen benötigen aufwendige und damit kos- tenintensive Vorkehrungen, um den Berührungsschutz sicherzustellen. Diese Maßnahmen können bei Spannungen unter 60 V entfallen, wodurch Hybridsysteme unter dieser Spannungsgrenze einen Kostenvorteil bieten. In heutigen Personenkraftfahrzeugen ist es üblich, ein 12 V Bord- netz einzusetzen, das für normale Verbraucher, Komfort- und Infotainment-Funktionen, auch bei Hochvolthybridfahrzeugen vorhanden sein muss. [7] Ebenfalls steigt der Leistungsbedarf durch die Elektrifizierung von Hilfsaggregaten, wodurch diese bedarfsgesteuert eingesetzt werden können, wobei diese bei Hybridfahrzeugen zum Teil mit höheren Spannungen betrieben werden. Dadurch können bereits heutige Full-Hybrid Fahrzeuge an die Leistungsgrenzen des 12 V Bordnetzes stoßen. [8, 9] Mit dem 12 V Bordnetz würden bei einer Leistung von 4 kW

bereits Ströme von 330 A auftreten. Zur Umsetzung von Strömen über 200 A sind jedoch aufwendige technische Maßnahmen notwendig. Möchte man unterhalb dieser Grenzen bleiben, sind nur Leistungen bis 2,4 kW darstellbar. Durch Verdoppelung der Spannung auf 24 V sind Leistungen bis 4,8 kW darstellbar. Allerdings bietet sich für eine sinnvolle Ausnutzung der Berührungsgrenze von 60 V ein Spannungsniveau von 48 V an. Mit dieser Spannung können elektrische Leistungen von etwa 12 kW umgesetzt werden, welche für grundlegende Mild-Hybrid Funktionen bei Klein- bis Mittelklassefahrzeugen ausreichend sind. [7] Das 48 V Bordspannungsnetz wird derzeit durch die LV 148 [10] spezifiziert, welche eine Werksnorm einiger deutscher Automobilhersteller ist. Darin werden in erster Linie die in Abbildung 4 gezeigten Spannungsbereiche des 48 V Systems definiert. Dabei befindet sich der normale Betriebsbereich zwischen 36 und 52 V. Beim Überschreiten dieser Grenzen müssen Funktionseinschränkungen getroffen werden. Ab 54 V beginnt ein Sicherheitsbereich, der nicht erreicht werden soll, aber vor allem als Maßnahme dient, um die 60 V Grenze nicht zu überschreiten. [11] Werden Spannungen über 54 V oder unter 24 V erreicht, so muss dies im Fehlerspeicher protokolliert werden. Unter 24 V befindet sich der Bereich der Unterspannung, der bei 20 V in die Speicherschutzspannung übergeht. [12]



Abbildung 4: Definitionen der statischen Spannungsbereiche [7]

Das 48 V Bordspannungsnetz stellt eine kostengünstige Möglichkeit dar, ein Hybridsystem mit erweitertem Funktionsumfang umzusetzen. Dabei sind verschiedene Ausführungen des Hybridsystems, wie ein Riemen-Starter-Generator (RSG) anstelle der Lichtmaschine, oder an einer anderen Position im Antriebsstrang möglich. Ein wesentlicher Vorteil der Anbindung des RSG anstelle der Lichtmaschine direkt am Motor ist die einfache Anpassung bereits vorhandener Motoren. Allerdings kann der RSG sein maximales Potenzial bei einer Anordnung vor oder

nach dem Getriebe ausschöpfen. Es sollen so Verbrauchsvorteile von etwa 14 % im „Worldwide Harmonized Light-Vehicles Test Cycle“ (WLTC) gegenüber einfachen Start/Stopp fähigen Motoren mit 14 V Bordspannungsnetz erreicht werden. [13] Mit dem zusätzlichen Moment des RSG kann durch Downspeeding weiteres Verbrauchseinsparungspotenzial genutzt werden. Die verlängerte Getriebeübersetzung führt zu verbrauchsgünstigeren Betriebspunkten des Verbrennungsmotors gegenüber 12 V Systemen. Eine wesentliche Funktion ist die Möglichkeit, die Bremsenergie zu rekuperieren und in der Batterie zu speichern. Dabei kann mit einem leistungsstarken 48 V System etwa 80 % der Bremsenergie wiedergewonnen werden. Außerdem kann mit einem 48 V Hybridsystem elektrisches Fahren ermöglicht werden. Allerdings hängt die maximale Geschwindigkeit des rein elektrischen Betriebs stark von der Leistung des RSG sowie von den Fahrwiderständen des Fahrzeugs ab. [1] Schäffler schränkt beispielsweise bei einem Konzept mit einer elektrischen Achse die elektrische Höchstgeschwindigkeit auf 20 km/h ein [14]. Es zeigt sich allerdings, dass bei Leichtbaukonzepten auch Geschwindigkeiten um 50 km/h realistisch erscheinen [15]. Für die zuvor erläuterten Funktionen muss das 12 V Bordnetz weiterhin vorhanden sein. Die 12 V Batterie wird jedoch über einen DC/DC Wandler über das 48 V Bordnetz geladen (Abbildung 5). [9]

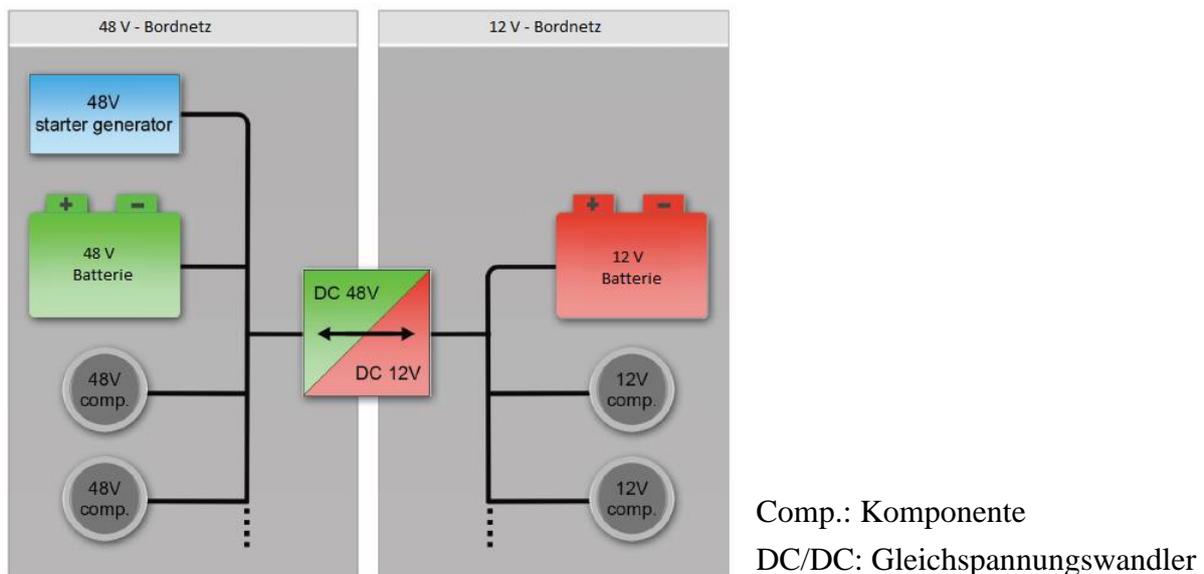


Abbildung 5: Komponenten und Struktur des 12 V - 48 V Bordnetzes [9]

2.1.3 Cars' Ultra Light Technology

Das CULT Projekt, was für „Cars' Ultra Light Technology“ steht, wurde in einem firmenübergreifenden Konsortium durchgeführt. Dabei wurde ein Fahrzeug (Abbildung 6) entwickelt, dessen Fokus auf Leichtbau und CO₂-Reduktion liegt. [16] Das Fahrzeug beinhaltet einen Hybridantrieb, bestehend aus einem Dreizylinder-Erdgasmotor und einem Riemen-Starter-Generator. Das Hybridsystem ist in P2 Anordnung aufgebaut und verwendet eine Spannungsebene von

12 V. In dieser Konfiguration erreicht das CULT Fahrzeug ein Leergewicht von 672,5 kg. [17] Ausgehend davon hat Steffan [2] die Spannungslage auf 48 V erhöht und ist auf eine P3 Anordnung übergegangen.



Abbildung 6: CULT Fahrzeug [18]

Die P3 Hybridanordnung sowie die 48 V Spannungslage wurden für diese Arbeit übernommen. Teile des elektrischen Systems wurden jedoch durch Komponenten mit besseren Wirkungsgraden und höheren Leistungen ersetzt. Somit befindet sich nun ein RSG mit maximalem motorischem Moment von 38 Nm und generatorischem Moment von 59 Nm im Antriebsstrang. Die Batteriekapazität wurde mit 500 Wh festgelegt. Ausgehend von der Ursprungskonfiguration mit 12 V, verursacht das 48 V System inklusive der neuen Komponenten ein Mehrgewicht von 10,4 kg, was zu einem Leergewicht von 682,9 kg führt. Für die längsdynamischen Untersuchungen ist das fahrfertige und beladene Fahrzeug von Interesse. Dies wird durch eine Erhöhung des Leergewichts um 100 kg simuliert, was zu einem Fahrzeuggewicht von 782,9 kg führt. Alle Fahrzeugeigenschaften sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Mit 48 V Systemen werden vorwiegend Mild-Hybridantriebsstränge angestrebt, da die Ausgangsleistung beschränkt ist. Durch den Einsatz eines kompakten Fahrzeugs in Leichtbauweise ist es möglich, auch die Funktionen eines Full-Hybrids umzusetzen. Zur Umsetzung dieser Funktionen ist die Elektromaschine an das Differenzialgetriebe gekoppelt. Die Momenteinleitung an dieser Stelle ist notwendig, da das Fahrzeug über ein automatisiertes Schaltgetriebe verfügt, welches mit dem Differenzial eine Einheit bildet.

Tabelle 2: Fahrzeugeigenschaften

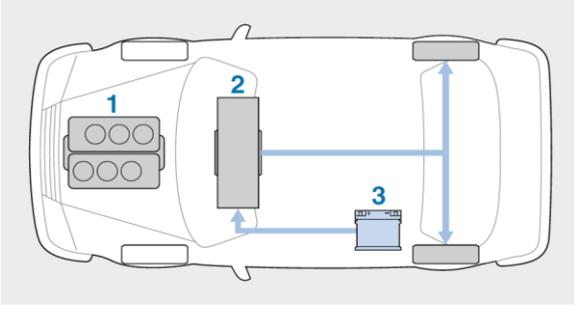
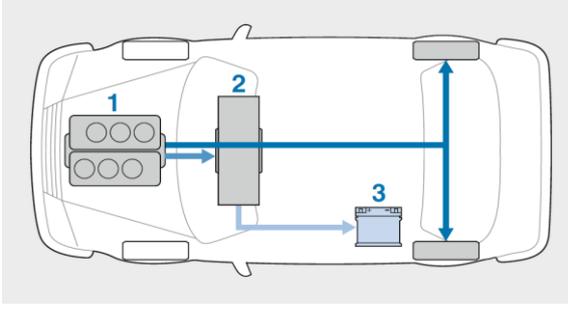
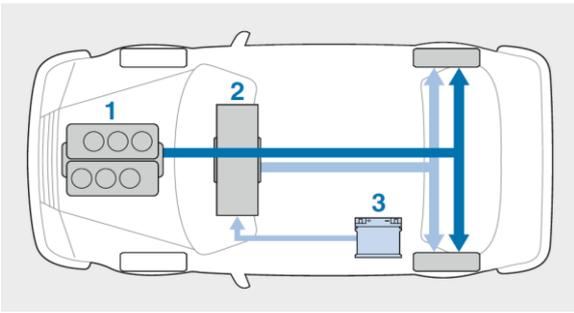
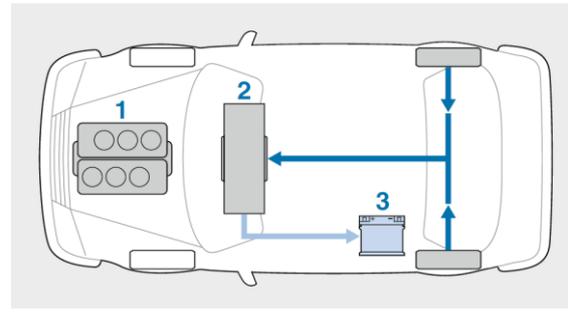
Motor		
Motorbauart		3-Zylinder Ottomotor
Max. Leistung	[kW]	50
Max. Moment	[Nm]	110
Hubraum	[cm ³]	658
Kraftstoff		Erdgas
Einblasung		Direkteinblasung
Aufladung		Turboaufladung
Elektrisches System		
Motorbauart		Permanenterregte Synchronmaschine (PSM)
Max. Dauerleistung	[kW]	10 (motorisch) 20,7 (generatorisch)
Max. Moment	[Nm]	38 (motorisch) 59 (generatorisch)
Spannung	[V]	48
Batterietyp		Lithium Ionen
Batteriekapazität	[Wh]	500
Getriebe		
Getriebebauart		6-Gang ASG
Fahrzeuggewicht		
Leergewicht	[kg]	682,9
Bezugsgewicht	[kg]	782,9

2.2 Betriebsstrategien

Mit der Antriebsstrangkonfiguration des CULT Fahrzeugs ist es möglich, einen Großteil der für Full-Hybridfahrzeuge möglichen Betriebsmodi, abzubilden. Diese Betriebsmodi sind in [Tabelle 3](#) schematisch dargestellt. [3] Da der Elektromotor am Getriebeausgang angebracht ist, wäre es möglich die Zugkraftunterbrechungen, bedingt durch das automatisierte Schaltgetriebe, zu mindern oder ganz zu verhindern. Diese Funktion dient jedoch nur dem Komfortgewinn und nicht der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Für den Motorstart ist bei dieser Anordnung ein zusätzlicher Starter oder die Funktion eines zuverlässigen VKM-Direktstarts notwendig. Ein weiterer Nachteil ist, dass je nach aktueller Getriebeübersetzung das maximal mögliche Lastpunkterhöhungsmoment variiert. [4] Beim rein elektrischen Fahren wird das gesamte Antriebsmoment vom Elektromotor aufgebracht, der die benötigte Energie aus der Batterie bezieht. Die VKM wird dabei vom restlichen Antriebsstrang abgekoppelt, damit dessen Schlepptomment nicht durch den Elektromotor überwunden werden muss. Der elektrische Betrieb ist besonders bei geringen Lasten, bei denen die VKM besonders ineffizient ist, sinnvoll. Im Generatorbetrieb oder Lastpunkterhöhungsbetrieb, bringt die VKM das gesamte Antriebsmoment

auf. Zusätzlich zum Antriebsmoment muss die VKM das notwendige Moment zum Laden der Batterie über die Elektromaschine erzeugen. Durch diese Erhöhung der Last am Verbrennungsmotor soll dieser in einem verbrauchsgünstigeren Lastpunkt betrieben werden. [3] Dabei ist allerdings die Gesamtwirkungsgradkette von VKM, Elektromaschine und Energiespeicher zu berücksichtigen. Da alle drei Komponenten unterschiedliche Wirkungsgradcharakteristiken und damit auch unterschiedliche Bestpunkte besitzen, müssen für einen optimalen Betrieb alle Kennfelder berücksichtigt werden. Die so zusätzlich erzeugte Energie kann zu einem späteren Zeitpunkt aus der Batterie abgerufen werden und zum Boosten oder rein elektrischen Fahren verwendet werden. Boosten bewirkt eine Unterstützung der VKM durch die Elektromaschine, wodurch ein insgesamt höheres Drehmoment erreicht werden kann. Beim regenerativen Bremsen können Teile des Bremsmoments durch den Generator aufgebracht werden. Dieser Vorgang wird auch als Rekuperieren bezeichnet. Dadurch können Teile der kinetischen und potenziellen Energie des Fahrzeugs wiedergewonnen und in der Batterie gespeichert werden. [3]

Tabelle 3: Betriebsmodi [3]

<p>Rein elektrisches Fahren</p> 	<p>Lastpunktanhebung</p> 
<p>Boosten</p> 	<p>Regeneratives Bremsen</p> 
<p>1 Verbrennungsmotor 2 Elektromaschine 3 Batterie</p>	

Zum Betrieb eines Hybridfahrzeugs muss das Zusammenspiel der Komponenten im Antriebsstrang geregelt werden, was durch die Betriebsstrategie der Hybridsteuerung geschieht. Das

primäre Ziel ist es, den Fahrerwunsch durch die Betriebsstrategie umzusetzen. Der Fahrerwunsch, welcher durch das Fahrpedal und das Bremspedal erfasst wird, muss in ein Wunschmoment übersetzt werden. Dieses ergibt sich durch Addition der Momente von Elektro- und Verbrennungskraftmaschine, wobei die Übersetzung des Getriebes berücksichtigt werden muss. Abgesehen von dieser primären Aufgabe werden durch die Betriebsstrategie weitere Ziele verfolgt. Dazu zählen etwa ein geringer Kraftstoffverbrauch, geringe Emissionen sowie hoher Komfort. Um den Komfort im Fahrzeug zu gewährleisten, ist nicht nur ein unmerklicher Übergang zwischen den Betriebsmodi notwendig, sondern auch eine Beeinflussung des Betriebsmodus durch die Fahrzeugklimatisierung. [5] Außerdem muss das NVH-Verhalten des Gesamtsystems, in jedem Betriebsmodus den Kundenanforderungen entsprechen. So könnte es durch Lastpunktverschiebung zu für den Fahrerwunsch unerwarteten Geräuscentwicklungen kommen [19]. Weiters bestimmt die Betriebsstrategie wesentlich über die Lebensdauer der Batterie, da sie die Entladetiefe, sowie die Anzahl der Ladezyklen bestimmt [5].

Die Notwendigkeit einer Betriebsstrategie ergibt sich durch den gewonnenen Freiheitsgrad mit der elektrischen Maschine und dessen Energiespeicher, der Batterie. Dieser ermöglicht es, den Verbrennungsmotor in gewissen Grenzen unabhängig vom eigentlichen Fahrerwunsch zu betreiben. Die VKM kann dadurch in effizienteren Lastpunkten betrieben werden. Der zusätzliche Freiheitsgrad ermöglicht auch das elektrische Fahren mit ausgeschalteter VKM. Im Wesentlichen werden die Erzeugung von elektrischer Energie, durch Lastpunktverschiebung oder Rekuperation und der Verbrauch dieser Energie, durch elektrisches Fahren oder Boosten, durch die Betriebsstrategie im Hybridsteuergerät koordiniert. Dabei müssen die Leistungs- und Temperaturgrenzen des Systems, sowie der SOC der Batterie beachtet werden. [5] Dies erfordert die Kommunikation der Hybridsteuerung mit den Subsystemen im Antriebsstrang. Zu den Subsystemen gehören u.a. das Batteriemanagement, das Motormanagement der VKM, das Management des elektrischen Antriebs, sowie das Getriebe- und Bremsmanagement. Diese regeln die Komponenten selbständig, erhalten die Zielwerte allerdings von der Hybridsteuerung. [3]

Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge lassen sich in prädiktive und nicht prädiktive Betriebsstrategien unterteilen. Nicht prädiktive Betriebsstrategien arbeiten nur mit momentan verfügbaren Fahrzeugdaten und können sich auf den bevorstehenden Streckenverlauf nicht, oder nur sehr bedingt durch die aktuelle Geschwindigkeit, vorbereiten. Prädiktive Betriebsstrategien hingegen verwenden die Eigenschaften des vorausliegenden Streckenprofils und eventuell auch des Verkehrs und Umgebungsdaten. Für eine sichere Vorausschau des Streckenprofils ist die Eingabe von Zielkoordinaten durch den Fahrer notwendig. [5] Alternativ können auch Streckenverläufe basierend auf vergangenen Fahrten geschätzt werden oder mit verschiedenen Straßeneigenschaften ein sogenannter Most-Probable-Path (MPP) bestimmt werden. Die höchste Genauigkeit bei der Prädiktion wird natürlich bei der manuellen Eingabe des Ziels erreicht. [20]

2.2.1 Nicht prädiktive Betriebsstrategie

Für die Funktionsweise von nicht prädiktiven Betriebsstrategien existieren verschiedene Ansätze, die in den letzten Jahrzehnten entwickelt worden sind. Diese können grob in analytische und heuristische Ansätze unterteilt werden. [21] In analytischen Betriebsstrategien kommen mathematische Optimierungsalgorithmen zum Einsatz, um die Strategie auf einen minimalen Kraftstoffverbrauch zu optimieren. Dabei wird meist der elektrischen Energie eine äquivalente Masse an Kraftstoff zugeordnet. Mit dieser Hilfe kann zu jedem Zeitpunkt der Kraftstoffverbrauch minimiert werden, wie etwa Paganelli et al [22] oder Kleimaier [23] ausführen. Heuristische Betriebsstrategien basieren auf Regeln, die mit diversen Eingangsgrößen den Betriebsmodus festlegen. Das Ziel ist auf methodischem Weg ein möglichst gutes Ergebnis in akzeptabler Zeit zu erreichen. Im Vergleich zu einer analytischen Betriebsstrategie kann eine heuristische nicht das Optimum erreichen. [21] Vorteilhaft an einer heuristischen Betriebsstrategie sind die niedrigeren Anforderungen an das Steuergerät durch den geringeren Rechenbedarf. Des Weiteren ist das Verhalten des Hybridsystems in verschiedenen Situationen besser überprüfbar und die Komplexität der Strategie beherrschbarer. Dies führt zu einer robusten Funktionalität bei beliebigen Fahrprofilen. [24, 25] Diese Art der Betriebsstrategie findet auch in zahlreichen Fahrzeugen seine Anwendung [21].

Ein Konzept einer Betriebsstrategie, an welches sich auch die in dieser Arbeit erstellte Basisbetriebsstrategie orientiert, hat bereits Fleckner et al [25] ausgeführt. Bei dieser Strategie steht die Kraftstoffeinsparung im Vordergrund. Eine Kernaufgabe der Betriebsstrategie ist die Koordination von Erzeugung und Verbrauch der elektrischen Energie. Gewonnen werden kann die Energie durch Lastpunktverschiebung oder Rekuperation, wobei die Rekuperation nur in Extremsituationen des Batterieladestands durch die Betriebsstrategie beeinflusst wird. Verbraucht wird die Energie durch elektrisches Fahren, Boosten und durch andere Verbraucher im Bordnetz. Die Boost-Funktion dient zur Steigerung der Fahrleistungen und wird daher bei Bedarf durch den Fahrer aktiviert. Die Bordnetzleistung liegt ständig an und kann daher nicht durch die Betriebsstrategie beeinflusst werden. Es bleiben für eine gezielte Lade- und Entladeregulierung die Funktionen Lastpunktverschiebung und elektrisches Fahren über. Durch die Betriebsstrategie ist eine verbrauchsoptimale Abstimmung dieser Betriebsmodi notwendig. Die Schnittstelle dieser Betriebszustände bildet die Batterie, in welcher die gewonnene elektrische Energie gespeichert wird, um sie zu einem späteren Zeitpunkt durch den Elektromotor wieder freizusetzen. Für die Wahl des Betriebsmodus muss eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, welcher Modus am optimalsten für den Kraftstoffverbrauch ist. Eine Möglichkeit dafür ist die Bewertung der Energie in der Batterie, z.B. durch die Einführung eines Energiekostenindikators (EKI) wie bei Fleckner et al [25]. Dieser weist der durch Lastpunktverschiebung gewonnenen elektrischen Energie fiktive Kraftstoffkosten zu. Mithilfe dieses EKI ist es der Betriebsstrategie möglich, zu entscheiden, welcher Betriebsmodus energetisch günstiger ist. Eine

weitere Möglichkeit ist ein auf Wirkungsgraden basierender Ansatz, wie ihn Steffan [2] ausführt. Dabei werden die Wirkungsgrade des Lade- und Entladepfads mit denen des verbrennungsmotorischen Fahrens verglichen. Der effizientere Pfad entscheidet über den Betriebsmodus.

Neben dieser Entscheidung muss die Betriebsstrategie auch für einen Batterieladestatus innerhalb gewisser Grenzen sorgen. So darf die Batterie diese Grenzwerte nicht unter- aber auch nicht überschreiten. Dafür wird die Batteriekapazität in SOC-Bereiche unterteilt, in denen vorbeugende Maßnahmen gegen Überschreiten der Ladezustandsgrenzen gesetzt werden. Abbildung 7 zeigt eine mögliche Aufteilung der SOC-Bereiche der Batterie. Dabei ist zu erkennen, dass geschwindigkeitsabhängig ein sich ändernder Sollladezustand angestrebt wird. Dieser reduziert sich mit steigender Geschwindigkeit, um genügend Kapazität für eine mögliche Rekuperation bereitzuhalten. Im Bereich Laden 1 wird nur bei sehr guten Ladewirkungsgraden geladen. Diese Einschränkung wird bis zu Laden 3 immer weiter aufgelockert und die Ladeleistung gleichzeitig erhöht. Oberhalb des SOC-Soll wird nicht weiter durch Lastpunktverschiebung geladen. Ab dem Bereich des Nullladens wird keine elektrische Energie wiedergewonnen. Somit findet ab diesem Ladezustand keine Rekuperation mehr statt. Oberhalb von diesem Bereich wird der Verbrennungsmotor besonders in ineffizienten Lastpunkten durch den Elektromotor unterstützt, um aktiv die Batterie wieder zu entladen. [25]

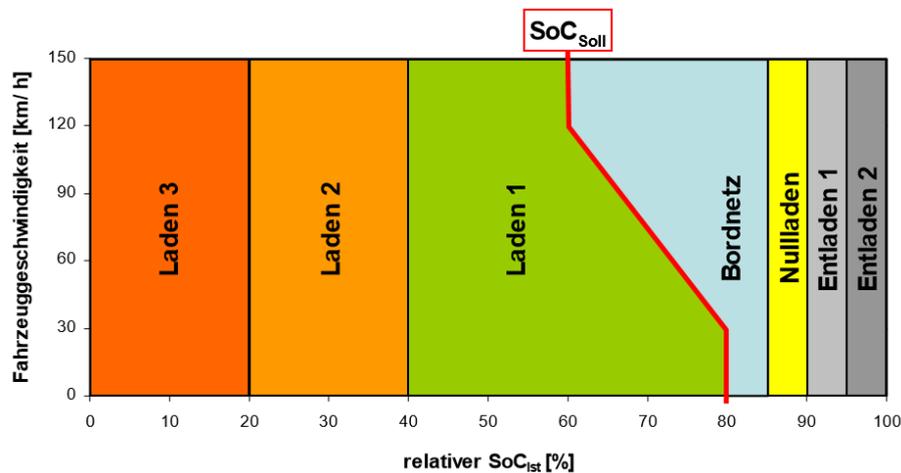


Abbildung 7: Regelung des Ladebedarfs in Abhängigkeit von Ladezustand und Fahrzeuggeschwindigkeit [25]

2.2.2 Prädiktive Betriebsstrategie

Die wesentliche Aufgabe der prädiktiven Betriebsstrategie ist es, den Kraftstoffverbrauch über eine zu fahrende Strecke zu senken. Das bedeutet, dass die VKM in Summe in effizienteren Betriebspunkten und Betriebsmodi betrieben wird. Die Informationen über die zu fahrende Strecke muss dabei durch geeignetes Kartenmaterial und Sensorik gewonnen werden. Damit

wird durch das Fahrzeug ein voraussichtlicher Fahrzyklus, der so genannte „elektrische Horizont“ gebildet. Dieser wird dazu genutzt, die Betriebsstrategie in Hinblick auf den minimalen Kraftstoffverbrauch zu optimieren. [26]

Es gibt verschiedene Methoden, wie eine vorausschauende Betriebsstrategie aufgebaut werden kann. Eine Möglichkeit zur Einteilung ist die Unterscheidung in optimalsteuerungsbasierte Betriebsstrategien und in Strategien mit einer optionalen Prädiktion [21].

Für optimalsteuerungsbasierte Betriebsstrategien ist es wichtig, den Geschwindigkeits- und Streckenverlauf möglichst genau vorauszusagen. Diese Strategien versuchen mit einer Online-Optimierung den verbrauchsgünstigsten SOC-Verlauf zu berechnen. Häufig verwenden diese Strategien die Methode der dynamischen Programmierung nach Bellmann zur Lösung des Optimierungsproblems [27-29]. Wichtig für diese Strategien ist die Güte der Vorausschau. Das Höhenprofil lässt sich, abhängig von den vorhandenen Navigationsdaten, sehr genau vorausbestimmen. Die Qualität des Geschwindigkeitsprofils ist jedoch stark vom Fahrverhalten des Fahrers abhängig und daher nicht exakt präzifizierbar. Daher ist die Anwendung optimalsteuerungsbasierter Betriebsstrategien in der Praxis nicht praktikabel. [26]

Als besser geeignet erscheint die Beeinflussung der nicht prädiktiven Betriebsstrategie durch die Erweiterung einer Prädiktion. Bei dieser Methode ist die genaue Kenntnis des vorausliegenden Geschwindigkeitsprofils nicht notwendig. Es gibt dabei verschiedene Ansätze der Vorausberechnung, denen gemein ist, dass sie die zugrunde liegende Betriebsstrategie durch Veränderung derer Parameter beeinflussen [21, 26, 30, 31]. Bei der Prädiktion werden neben der Vorausschau der gesamten Strecke auch vereinfachte Ansätze verfolgt, wie etwa eine Vorausschau der kommenden zwei Geschwindigkeitsgradienten [32], oder der kommenden zwei Minuten [30]. Es erscheint allerdings sinnvoll, insbesondere bei Fahrprofilen mit längeren Steigungen oder extremeren Verkehrsbedingungen, eine Prädiktion über einen möglichst langen Zeitraum bis hin zur gesamten zu befahrenden Strecke durchzuführen.

Das Potenzial einer prädiktiven Betriebsstrategie würde sich weiter steigern lassen, wenn die Betriebsstrategie aktiv in die Längsdynamik des Fahrzeugs eingreifen könnte. Dies ermöglicht es, unnötige Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge zu unterbinden, was zu weiteren Verbrauchseinsparungen führen würde. [33]

2.3 Sensorik für die prädiktive Betriebsführung

Für eine zuverlässige Prädiktion muss das Fahrzeug in der Lage sein, aus den eingegebenen Navigationsdaten ein für die Betriebsstrategie relevantes Fahrprofil zu erstellen. Dieses muss zumindest eine Prädiktion des Höhen- und Geschwindigkeitsprofils beinhalten [29, 32]. Soll

die Betriebsstrategie auch auf Ereignisse im näheren Fahrzeugumfeld reagieren, ist weitere Sensorik erforderlich die in der Lage ist das Umfeld zuverlässig zu erkennen. Für diese Aufgaben werden häufig Sensoren verwendet, die bereits in Serienfahrzeugen zur Anwendung kommen [26, 27].

2.3.1 Bestimmung des Fahrzeugzustands

Zur Bestimmung des Fahrzeugzustands können Beschleunigungssensoren verwendet werden, die in jedem Fahrzeug mit ESP-System bereits vorhanden sind. Diese Sensoren erkennen die Beschleunigungen in allen drei Raumrichtungen. Die Information über die Beschleunigung in Fahrtrichtung ist allerdings auch über die Änderung der Fahrzeuggeschwindigkeit berechenbar. [26]

2.3.2 Umfelderkennung

Die Identifizierung des Fahrzeugumfelds ist mit verschiedenen Sensoren oder Sensorkombinationen möglich. Häufig verwendete Sensoren sind:

- Ultraschall
- Radar
- Mono-/Stereokamera
- Laserscanner

Für die unmittelbare Umgebung des Fahrzeugs hat sich bis zu einer Entfernung von 3 m die Ultraschallsensorik durchgesetzt. Sie wird heute standardmäßig als Einparkhilfe verwendet. Ein weiterer möglicher Anwendungsfall ist die Erkennung von Fahrzeugen im „Toten-Winkel“. Für Abstandsmessungen zu vorausfahrenden Fahrzeugen finden Ultraschallsensoren aufgrund der geringen Reichweite keine Anwendung. Daher haben diese Sensoren auch keinen Einfluss auf eine vorausschauende Betriebsstrategie des Hybridsystems. Für Abstandsmessungen zu vorausfahrenden Objekten werden hingegen die im Folgenden erklärten Radar- oder optischen Sensoren eingesetzt. [34]

Abstandsregeltempomaten benutzen meist Radarsysteme zum Erfassen des vorausfahrenden Fahrzeugs. Damit erkennt die Abstandsregelung die Geschwindigkeit und Distanz zum vorausfahrenden Fahrzeug. [29] Abstandsmessungen mittels Radar im 77 GHz Bereich haben eine Reichweite von bis zu 250 m. Im 24 Ghz Bereich wird eine Reichweite ab 0,2 m bis etwa 100 m erreicht. Dieser ist daher für die nähere Umgebung sowie für Einparkassistenten relevant. [34] Außerdem müssen sie gegenüber optischen Systemen, auch bei widrigen Wetterverhältnissen zuverlässig funktionieren. Sie sind unabhängig von Nebel, Schnee, Regen, Staub und schlechten Lichtverhältnissen. [35] Durch die Reichweite ist es möglich, auf Hindernisse bzw. langsamer fahrende Fahrzeuge früh zu reagieren. Solche Situationen erfordern eine Veränderung der

Relativgeschwindigkeit zum erkannten Hindernis. Diese Information kann von der Betriebsstrategie des Hybridsystems verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung von vorausfahrenden Fahrzeugen bildet eine kamera-basierte Sensorik. Hier ist zwischen Mono- und Stereokamerasystemen zu unterscheiden. Ein großer Nachteil von Monokamerasystemen ist die eingeschränkte Möglichkeit, Entfernungen zu messen. Mit Stereokamerasystemen ist es im Gegensatz dazu möglich, Tiefeninformationen zu erfassen. Somit kann mit diesem System die Lage und damit auch die Relativgeschwindigkeit von anderen Objekten erfasst werden. Da der Straßenverkehr auf die menschliche visuelle Wahrnehmung ausgelegt ist, sind viele Informationen an der Straße, wie die Spurführung und die Verkehrszeichen, nur mit Kamerasystemen erfassbar. [27] Aufgrund der Möglichkeit, Verkehrszeichen zu erkennen, können Abweichungen zu den Navigationsdaten festgestellt werden. Insbesondere bei temporären Verkehrszeichen und bei veralteten Navigationskarten ist dies notwendig. [29] In diesem Fall kann aufgrund des kurzen Horizonts nur sehr kurzfristig auf die Betriebsstrategie Einfluss genommen werden.

Eine Erweiterung der Kamerasensorik ist eine Fusion aus Bilderkennung mittels Monokamera und einem Laserscanner. Dabei können über eine gemeinsame Auswertung dieser Sensoren verschiedene Eigenschaften vorausfahrender Fahrzeuge erfasst werden. Dazu zählen deren Position, Orientierung, Breite, Länge und Geschwindigkeit. Dabei sind Objekte bis zu einer Entfernung von 50 m erfassbar. Dieses System eliminiert die Nachteile der Monokamerasensorik. [36]

Eine weitere Einflussgröße aus dem Umfeld kann das Wetter sein. Dieses trägt signifikant zur erwarteten Höchstgeschwindigkeit bei. So sind bei schlechter Sicht, nasser Fahrbahn oder Temperaturen um den Gefrierpunkt, reduzierte Höchstgeschwindigkeiten und geringere Beschleunigungen zu erwarten. Sensoren zur Erfassung der Wetterbedingungen sind bereits in modernen Fahrzeugen verfügbar wie etwa der Regensensor für die Scheibenwaschanlage, das Außenthermometer und der Solarsensor [37] für die automatische Klimaanlage. Diese Sensoren können genutzt werden, um auf die aktuellen Wetterverhältnisse zu schließen. [29]

2.3.3 Satellitennavigation

Zur Bestimmung der aktuellen Position werden in Fahrzeugen Satellitennavigationssysteme eingesetzt. Globale Bedeutung haben das NAVSTAR Global Positioning System (GPS), das russische globale Satellitennavigationssystem (GLONASS) und das sich in der Fertigstellung befindende GALILEO. Das NAVSTAR GPS System wird vom US-Verteidigungsministerium betrieben und besteht aus 31 Satelliten. Die Positionierung des Empfängers geschieht, indem die Laufzeit gemessen wird, die das vom Satelliten ausgesendete Signal bis zum Eintreffen am

Empfänger benötigt. Besteht Empfang zu ausreichend vielen Satelliten (mindestens vier), kann die Position mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Ein Teil des GPS Systems ist für die zivile Nutzung zugänglich und bietet eine weltweite Abdeckung. Das GLONASS System wird von Russland betrieben und ist ebenfalls zivil nutzbar, hat aber keine lückenlose globale Abdeckung. [38] Das GALILEO System wird von der Europäischen Union betrieben und befindet sich aktuell in der Fertigstellung. Es soll eine weltweite genaue Positionierung ermöglichen [39]. Da das GPS System zivil nutzbar ist und eine globale Abdeckung hat, ist es das System mit der größten Relevanz in der Fahrzeugnavigation. Es kann mit diesem System eine Positionierungsgenauigkeit bis zu 13 m horizontal und 22 m vertikal erreicht werden. Da Fahrzeuge auf die Fortbewegung auf Straßen gebunden sind, ist diese Genauigkeit ausreichend, um dem Fahrzeug eine Position auf der Straßenkarte zuzuordnen. [27]

2.3.4 Routendaten

Zur Navigation mithilfe eines Satellitennavigationssystems sind Kartendaten im Navigationssystem erforderlich. Kartendaten werden von spezialisierten Firmen, die die Geodaten erfassen, erstellt. Zur Verwendung in einem Navigationssystem müssen diese speziell aufbereitet werden. In der Automobilindustrie gibt es seit 2004 das Bestreben, diese Aufbereitung der Kartendaten für Navigationssysteme zu standardisieren, um die hohen Kosten der Navigationsdatenaufbereitung zu senken. Aus diesem Bestreben wurde der Navigation Data Standard (NDS) gegründet, dem sich viele Automobilhersteller, Zulieferer der Automobilindustrie, Kartendatenlieferanten sowie Telematikdienstleister angeschlossen haben. [34] Außerdem bringt der Standard Vorteile in der Aktualisierung der Navigationsdaten im Fahrzeug. Vor dem Standard wurden Kartenaktualisierungen meist im Jahresrhythmus von den Automobilherstellern freigegeben, da die Daten für die unterschiedlichen Navigationsgerätetypen separat aufbereitet werden. Durch die Vereinheitlichung der Navigationsdaten wird die Aufbereitung unabhängig vom Navigationsgerät. Dies ermöglicht es, tagesaktuelle Daten bereitzustellen. Der NDS beinhaltet neben den Basisinformationen der Straßen auch weitere Daten, wie etwa digitale Terrainmodelle, Advanced Driver Assistance System (ADAS) Daten oder Satellitenbilder. [40]

Die ADAS Daten werden mittels Advanced Driver Assistance Systems Interface Specifications (ADASIS) Protokoll durch das Navigationssystem bereitgestellt. Diese beinhalten Zusatzinformationen über den kommenden Straßenverlauf. Das ADASIS Protokoll definiert außerdem, wie jene Daten über den CAN Bus weitergegeben werden. Die ADAS Daten, die so bereitgestellt werden, bilden den sogenannten ADAS Horizont. Dieser wirkt wie ein virtueller Sensor, der Informationen über die zukünftigen Streckenabschnitte bereitstellt. Die bereitgestellten Daten können von diversen Anwendungen im Fahrzeug genutzt werden. Dazu zählt etwa die Steu-

erung des Hybridsystems oder die Getriebesteuerung. Zu den Informationen des ADASIS Protokolls gehören u.a. die Geometrie, Kategorie, Anzahl der Spuren, Ampelanlagen und gesetzliche Geschwindigkeitslimits des Straßennetzes. [41]

2.3.5 Backendsysteme

Bei Backendsystemen sind die Fahrzeuge mit dem Backend, das durch ein Serversystem gebildet wird, verbunden. Eine Möglichkeit der Verbindung zwischen Fahrzeugen und Server stellt das Mobilfunknetz dar. Diese Lösung ist bereits Stand der Technik und wird von Fahrzeugherstellern eingesetzt. Dabei bestehen unterschiedliche Detaillösungen zwischen den Herstellern. In dem gebildeten Netzwerk sammeln Fahrzeuge Daten über den Straßen- und Verkehrszustand oder andere Gefahren und übermitteln diese an den Server.

Somit bekommt der Server eine Fülle an Informationen durch die große Anzahl an Fahrzeugen. Der zentrale Rechner wertet die gesammelten Daten aus und sendet relevante Informationen zurück zu den Fahrzeugen. Auf diese Weise kann durch den Server das Fahrzeug vor Gefahrensituationen gewarnt werden. Außerdem kann durch eine Analyse der gewonnenen Daten auf die Verkehrslage einzelner Streckensegmente geschlossen werden. Die Fahrzeuge können die Informationen über die Verkehrslage nutzen, um alternative Routen vorzuschlagen oder das Energiemanagement des Fahrzeugs der zukünftigen Verkehrslage anzupassen. [34]

Die älteste Möglichkeit, Verkehrsdaten an das Fahrzeug zu senden, ist mittels Rundfunk. Dies funktioniert über eine unidirektionale Verbindung, von zentralen Sendern zu den Fahrzeugen, im Frequenzbereich 87,5 bis 108 MHz [42]. Zur Übertragung der Verkehrsdaten dient der Traffic Message Channel (TMC) des Radio Data Systems (RDS). Dabei werden die Verkehrsinformationen im nicht hörbaren Bereich auf das Radiosignal aufmoduliert. Die Informationen werden dabei ständig gesendet, da die Fahrzeuge keine Möglichkeit haben, den Empfang zu quittieren. Navigationssysteme können diese Informationen auswerten und verkehrsabhängige Routenvorschläge machen. Es werden durch das System allerdings nur Stauinformationen und keine weiteren Informationen, wie z.B. die momentanen Durchschnittsgeschwindigkeiten, weiter gegeben. [29]

2.3.6 Fahrzeug zu Fahrzeug Kommunikation

Die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen wird meist als Car-to-Car (C2C) Communication bezeichnet. Dabei werden verschiedene Daten über den Fahrzeugzustand und die Verkehrslage mit in Reichweite befindlichen Fahrzeugen geteilt. Diese Daten werden anonymisiert und verschlüsselt, um Missbrauch des Systems zu verhindern. Der Vorteil gegenüber Backendsystemen ist, dass keine zusätzliche Infrastruktur notwendig ist, da die Fahrzeuge die Verbindung

untereinander aufbauen. Es ist lediglich notwendig, dass die Fahrzeuge in Funkreichweite (einige hundert Meter) und lange genug in Verbindung sind, um ihre Daten auszutauschen. Da die Fahrzeuge unterschiedliche Geschwindigkeiten haben und so die Entfernungen zueinander ständig variieren, kommt es oft zu Verbindungsaufbauten und –abbrüchen. Dies stellt eine der wesentlichen Herausforderungen dar, insbesondere bei sich entgegenkommenden Fahrzeugen, bei denen durch die hohe Relativgeschwindigkeit die Verbindungszeit auf wenige Sekunden beschränkt ist. Weitere Herausforderungen sind der Datenschutz der Verkehrsteilnehmer sowie die Absicherung gegen Missbrauch. Sind genügend Fahrzeuge mit dieser Technologie in einem Streckenabschnitt unterwegs, können Rückschlüsse auf den Verkehrszustand getroffen werden. Dadurch werden z.B. Informationen über Staubeginn und dessen Länge verfügbar. Diese können den nachkommenden Verkehrsteilnehmern zur Verfügung gestellt werden (Abbildung 8). Außerdem ist es möglich, andere Verkehrsteilnehmer von sonstigen Gefahren zu warnen, aber auch Aussagen über die Verkehrsdichte weiterzuleiten. Da in diesem System jedes Fahrzeug einen Sensor darstellt, sind die Verkehrsinformationen sehr genau und aktuell. Daher eignen sich diese Informationen gut, um sie in der Betriebsstrategie des Hybridsystems zu verwenden. [43]

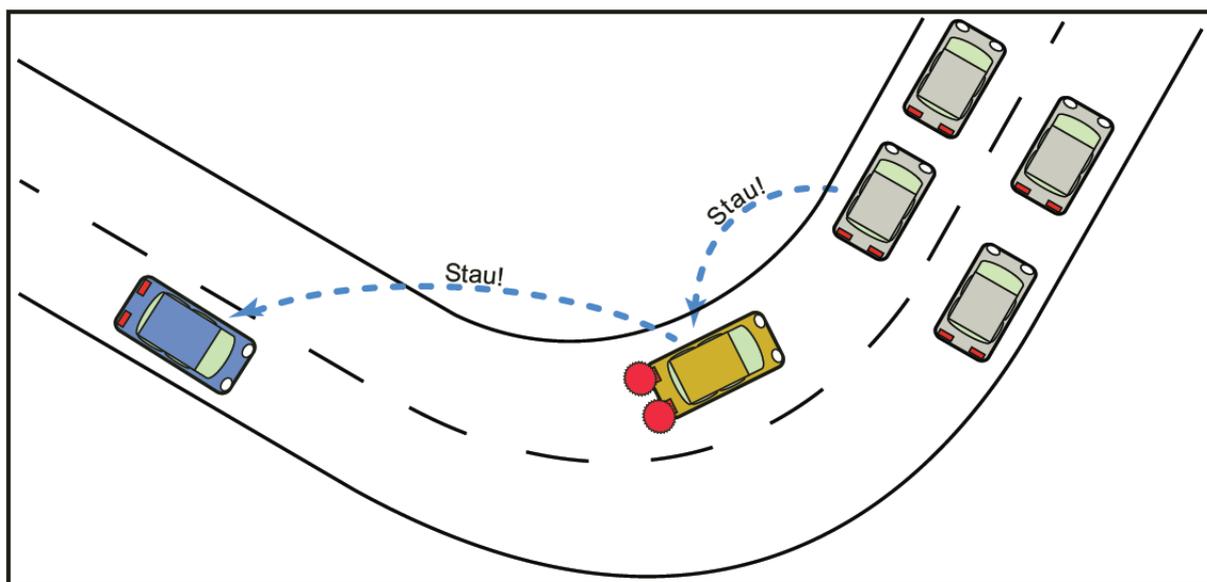


Abbildung 8: Frühzeitige Warnung vor einem Stau [43]

3 Methodik

3.1 Modellbildung

Zur Entwicklung einer Betriebsstrategie für den hybriden Antriebsstrang ist eine geeignete Simulationsumgebung notwendig. Diese muss es ermöglichen, eine Längsdynamiksimulation eines Fahrzeugmodells sowie eine prädiktive Antriebssteuerung zu bilden. Es ist erforderlich, dass das Modell mit ausreichender Genauigkeit das Verhalten des realen Fahrzeugs abbildet. Erreicht wird dies mittels mathematischer Gleichungen und Kennfeldern [44]. Beim Aufbau des Fahrzeugmodells ist es sinnvoll, zwischen dynamischer und quasi statischer Modellierung zu unterscheiden [45-47], da damit unterschiedliche Genauigkeiten und Anwendungsgebiete einhergehen.

In dynamischen Modellen wird dem Fahrzeug eine Fahr- bzw. Bremspedalstellung vorgegeben und es errechnet sich damit dessen Geschwindigkeit [48]. Berechnet wird dies durch physikalische Zusammenhänge zwischen den Fahrzeugkomponenten, wobei Beschleunigungs- und Einschwingzustände der Komponenten berücksichtigt werden. Die Simulationssoftware muss dafür Differenzialgleichungen lösen, was Rechenleistung und damit Rechenzeit benötigt. Einzelne Funktionen, wie etwa der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors, können über Kennfelder vereinfacht werden. Damit ein dynamisches Fahrzeugmodell angewendet werden kann, ist zusätzlich ein Fahrermodell notwendig. Dieses regelt die Fahr- bzw. Bremspedalstellung so, dass die geforderte Geschwindigkeit erreicht wird. Da sich die Komponenten ähnlich verhalten wie im realen Fahrzeug, eignet sich das dynamische Modell bei vorwärts gerichteter Simulation für die Entwicklung von Steuerungen und Regelungen. [44, 45, 47]

Ein quasi statisches Modell dreht Ursache und Wirkung im Fahrzeug um. Es wird nicht eine Geschwindigkeit aufgrund der Fahrpedalstellung errechnet, sondern welche Fahrpedalstellung zum Erreichen der Geschwindigkeit notwendig ist. Allgemeiner betrachtet ergibt sich aus der geforderten Geschwindigkeits- und Höhenänderung die dafür benötigte Energie. Bei dieser Methode werden einfache statische Modelle und Kennfelder verwendet und Einschwingzustände vernachlässigt. [46] Dies führt zu einer schnellen Rechenzeit, wodurch schnelle Optimierungsschleifen möglich werden [48].

Für die Simulation eines Hybridfahrzeugs mit prädiktiver Betriebsstrategie ist die Verwendung beider Modellierungsmethoden notwendig. Die dynamische Modellierung für die eigentliche Simulation des Fahrzeugs und die quasi statische Modellierung für die Abschätzung des Energieverbrauchs in der Prädiktion. Abbildung 9 zeigt den schematischen Aufbau des gesamten Simulationsmodells. Die Grundlage bildet ein Fahrzeugmodell ohne Hybridsteuerung, welches durch Steffan [2] bereits validiert vorliegt und weiter verwendet werden kann. Dazu gehört ein

Fahrermodell, welches durch Vorgabe einer Zielgeschwindigkeit das Fahrzeug auf diese hin regelt. Die Ausgangsgrößen des Fahrermodells sind die Fahr- und Bremspedalpositionen. Diese werden durch die Hybridsteuerung in ein Wunschmoment übersetzt. Dabei entscheidet die Hybridsteuerung wie dieses Moment durch den Verbrennungsmotor, Elektromotor und den Bremsen aufgeteilt wird. Die Momentenverteilung durch die Betriebsstrategie der Hybridsteuerung wird in Kapitel 3.3 weiter ausgeführt. Die soeben beschriebenen Teile des Gesamtmodells wurden in der Simulationsumgebung GT SUITE modelliert. Zur Bildung einer prädiktiven Hybridsteuerung sind Funktionen notwendig, die in GT SUITE nicht modellierbar sind. Dazu zählen u.a. Optimierungsschleifen oder die Veränderung von Kennfeldern. Daher wurde die prädiktive Betriebsstrategie in SIMULINK und MATLAB modelliert, welche in vorgegebenen Intervallen die Basisbetriebsstrategie beeinflusst. Dafür war eine Verknüpfung zwischen GT SUITE und SIMULINK, in dem MATLAB-Skripte ausgeführt werden, notwendig.

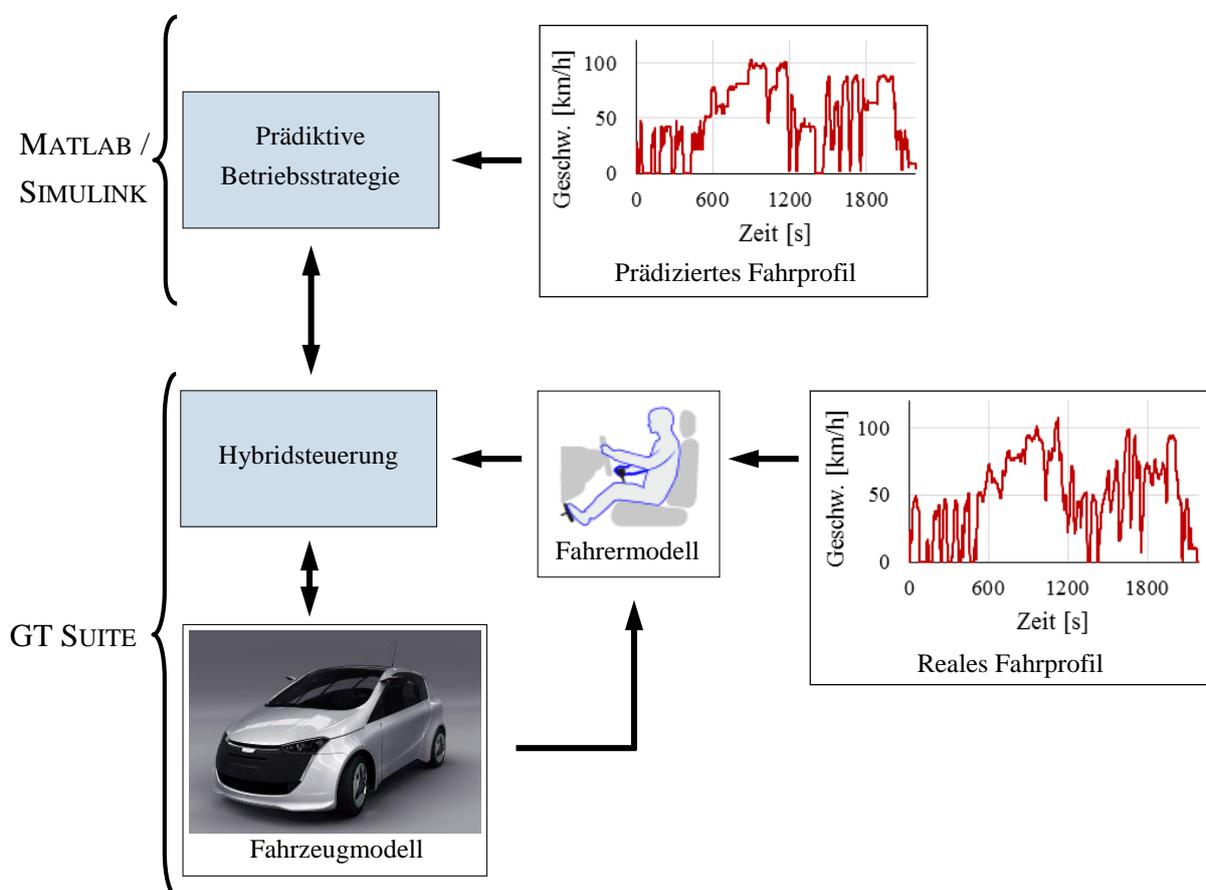


Abbildung 9: Schematischer Aufbau und Verknüpfungen des Simulationsmodells

Im Fahrzeugmodell wird das in Kapitel 2.1.3 ausgeführte CULT-Fahrzeug abgebildet. Dabei handelt es sich um ein Ultraleichtfahrzeug mit einem Bezugsgewicht von 782,9 kg und einem hybriden Antriebsstrang in P3 Ausführung. Die Elektromaschine ist somit direkt nach dem automatisierten Schaltgetriebe, am Differenzial angebracht. Das Hybridsystem arbeitet mit 48 V, allerdings mit allen Full-Hybrid Funktionalitäten. Die Elektromaschine besitzt ein maximales

Moment von 38 Nm im motorischen Betrieb und 59 Nm im generatorischen Betrieb. Die elektrische Energie kann in einer 48 V Batterie mit einer Kapazität von 500 Wh gespeichert werden. Das Fahrzeugmodell beinhaltet ebenfalls die Substeuerungen der Antriebsstrangkomponenten, welche ihre Zielwerte durch die Hybridsteuerung vorgegeben bekommen. Diese Vernetzung wird schematisch in Abbildung 10 dargestellt.

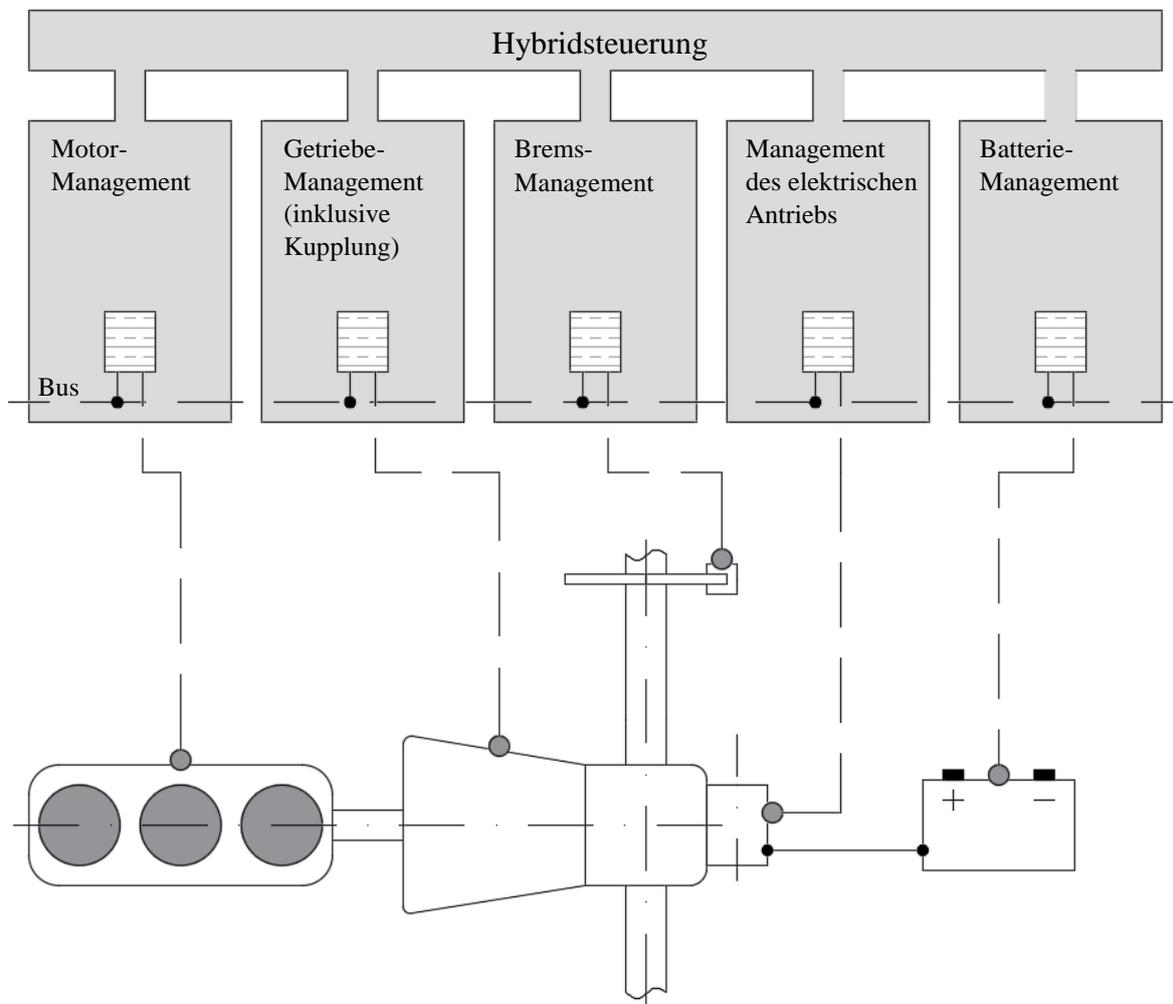


Abbildung 10: Vernetzung der Steuerungssysteme im Antriebsstrang in Anlehnung an [3]

3.2 Fahrzyklen

Für die Simulation des Fahrzeugs mit einer vorausschauenden Betriebsstrategie ist ein Fahrzyklus notwendig, der den Anforderungen einer solchen Simulation entspricht. Dafür müssen zunächst die Einflussgrößen für die prädiktive Betriebsstrategie geklärt werden. Der Energiekonsum des Fahrzeugs wird stark durch das Höhenprofil beeinflusst. Weiters ist es für die Erstellung des Geschwindigkeitsprofils essenziell, die Geschwindigkeitsbeschränkungen auf den Streckenabschnitten zu kennen. Außerdem sollen Verkehrsdaten auf den befahrenen Strecken berücksichtigt werden. Dies sind die weitsichtigen Einflussparameter auf die Betriebsstrategie.

Durch Kommunikation mit der Infrastruktur wäre es möglich, dass Informationen über Ampelanlagen auf die Betriebsstrategie Einfluss nehmen. Im direkten Umfeld könnte auch der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug durch die Betriebsstrategie berücksichtigt werden. Letzteres zeigt etwa Wilde [26] indem sich das Fahrzeug auf ein bevorstehendes Überholmanöver vorbereitet. In dieser Arbeit werden die im Folgenden angeführten und erwarteten Haupteinflüsse berücksichtigt.

- Höhenprofil
- Verkehr
- Geschwindigkeitsbeschränkungen

Fahrzeuge, die in der Europäischen Union zugelassen werden sollen, müssen aktuell Schadstoffgrenzwerte die im „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ) gemessen werden, erfüllen [49]. Daher würde dieser Fahrzyklus prinzipiell für eine Simulation nahe liegen, allerdings ist er ein sehr synthetischer Zyklus und spiegelt kein reales Fahrverhalten wider. Eine Alternative zu diesem Zyklus wäre der Worldwide Harmonized Light-Vehicles Test Cycle (WLTC), welcher den NEFZ schrittweise von 2017 bis 2019 ablösen wird. Dieser Zyklus ist ein Abbild einer realen Fahrt und deckt damit weit mehr Betriebspunkte ab als sein Vorgänger. [50] Beide Fahrzyklen beinhalten jedoch nicht die zuvor bestimmten Haupteinflussgrößen und sind daher für die Simulation einer prädiktiven Betriebsstrategie nicht geeignet.

Auf Basis dieser Anforderungen wurden deshalb drei unterschiedliche Fahrzyklen erstellt. Es handelt sich dabei um einen Überland-, Stadt- und Pendlerzyklus, die sich in und um Wien (Österreich) befinden und im Folgenden weiter erläutert werden. Zur Erstellung der Zyklen waren Messfahrten mit einem speziell präparierten Fahrzeug notwendig, um die erforderlichen Einflussparameter zu erfassen. Es wurde die gefahrene Geschwindigkeit aus dem Fahrzeugsteuergerät ausgelesen und aufgezeichnet. Diese Geschwindigkeit dient als Soll-Geschwindigkeit für das Fahrzeug in der Simulation. Um die aktuelle Position des Fahrzeugs auf der Karte zu bestimmen, wurden jeder Geschwindigkeitsmessung die aktuellen Lagekoordinaten des Fahrzeugs zugeordnet. Dafür war die Positionsermittlung mittels GPS-Sensor notwendig, wodurch gleichzeitig das gefahrene Höhenprofil bestimmt werden konnte. Für die Erhebung der Geschwindigkeitsbeschränkungen und des Verkehrs wurde die Fahrt mit einer Kamera aufgezeichnet. Mit diesen Informationen aus der Messfahrt können die Fahrzyklen mit den notwendigen Attributen erstellt werden.

3.2.1 Überlandzyklus

Als erster Fahrzyklus wurde ein schneller Überlandzyklus, mit einem erhöhten Anteil an Autobahn und Bundesstraßen gewählt. Abbildung 11 zeigt die Streckenführung dieses Zyklus, der

bei der Technischen Universität (TU) Wien beginnt und die Stadt südlich über die Autobahn verlässt. Weiter führt die Strecke über ein steiles Autobahnstück Richtung Westen, gefolgt von einem Abschnitt auf einer Bundesstraße, wo das Höhenprofil sein Maximum erreicht. Danach führt die Route über die Westautobahn bis zur TU Wien zurück. Die Route schließt sich somit und hat durch die Einfahrt im Westen Wiens einen langsameren Teil am Schluss. Die Strecke hat etwa eine Länge von 72,5 km und ein ausgeprägtes Höhenprofil, wie Abbildung 12 zeigt. Ebenfalls ersichtlich ist, dass das Geschwindigkeitsprofil Höchstgeschwindigkeiten bis zu 130 km/h erreicht. Die gesamte Fahrtzeit für den Zyklus beträgt 5836 s, bei der insgesamt ein Höhenunterschied von 330 m erreicht wird.

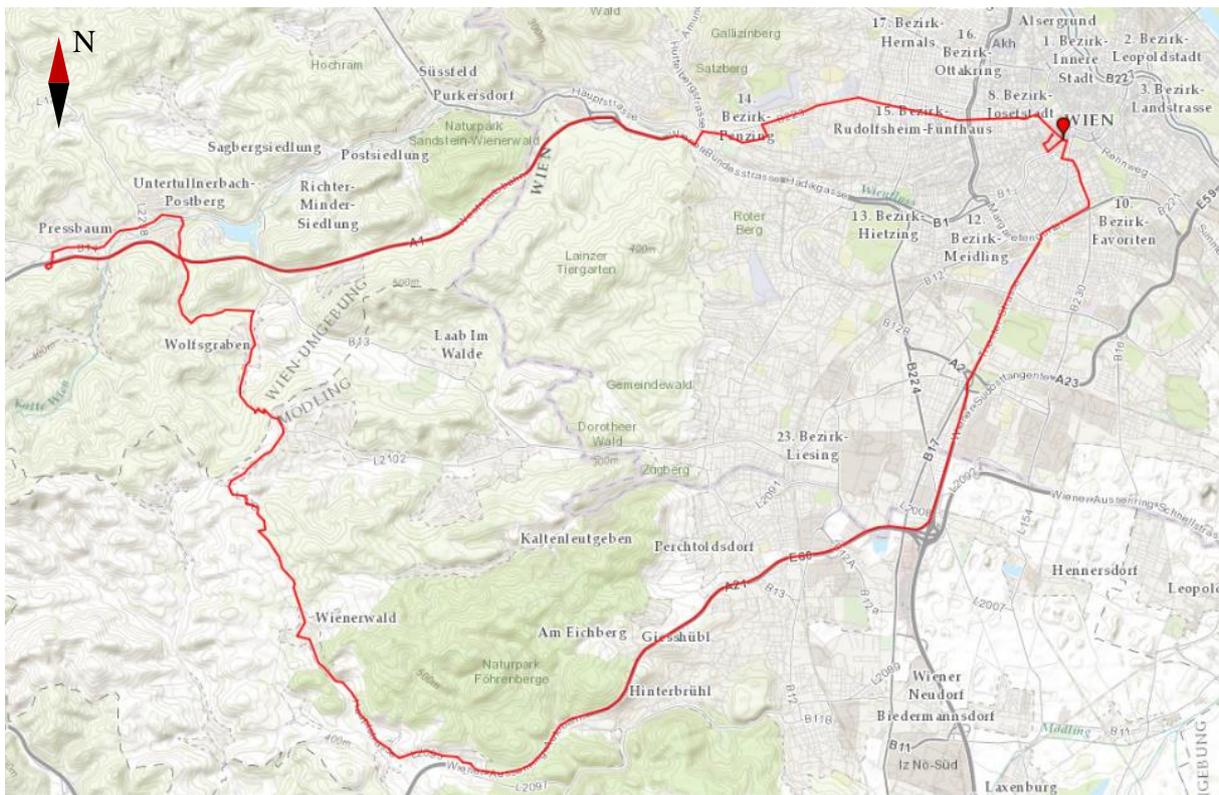


Abbildung 11: Streckenführung des Überlandzyklus dargestellt auf der World Topographic Map (ArcGIS) [51]

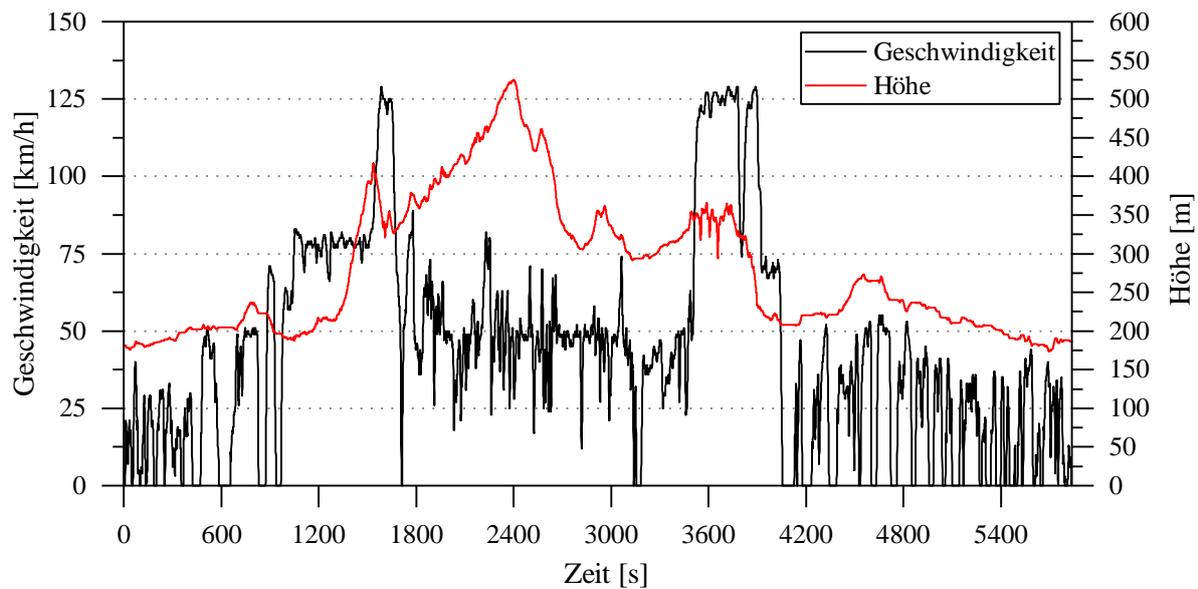


Abbildung 12: Geschwindigkeits- und Höhenprofil des Überlandzyklus

3.2.2 Stadtzyklus

Der Stadtzyklus ist ein ausschließlich in der Stadt gefahrener Zyklus, der eine Fahrt durch Wien widerspiegelt (Abbildung 13). Ausgangs- und Endpunkt der Route ist wieder die TU Wien. Der Zyklus hat eine Länge von etwa 22,5 km und eine Dauer von 5548 s. Wie [Abbildung 14](#) zeigt, werden Geschwindigkeiten von etwa 65 km/h erreicht und in der zweiten Hälfte wird eine Sequenz mit stockendem Verkehr durchfahren. Dieser Abschnitt mit stockendem Verkehr tritt etwa von Sekunde 2785 bis 4100 auf und ermöglicht es, die Auswirkungen auf die Betriebsstrategie zu analysieren. Das Höhenprofil zeigt nur eine leichte Ausprägung mit einem maximalen Höhenunterschied von etwa 75 m.

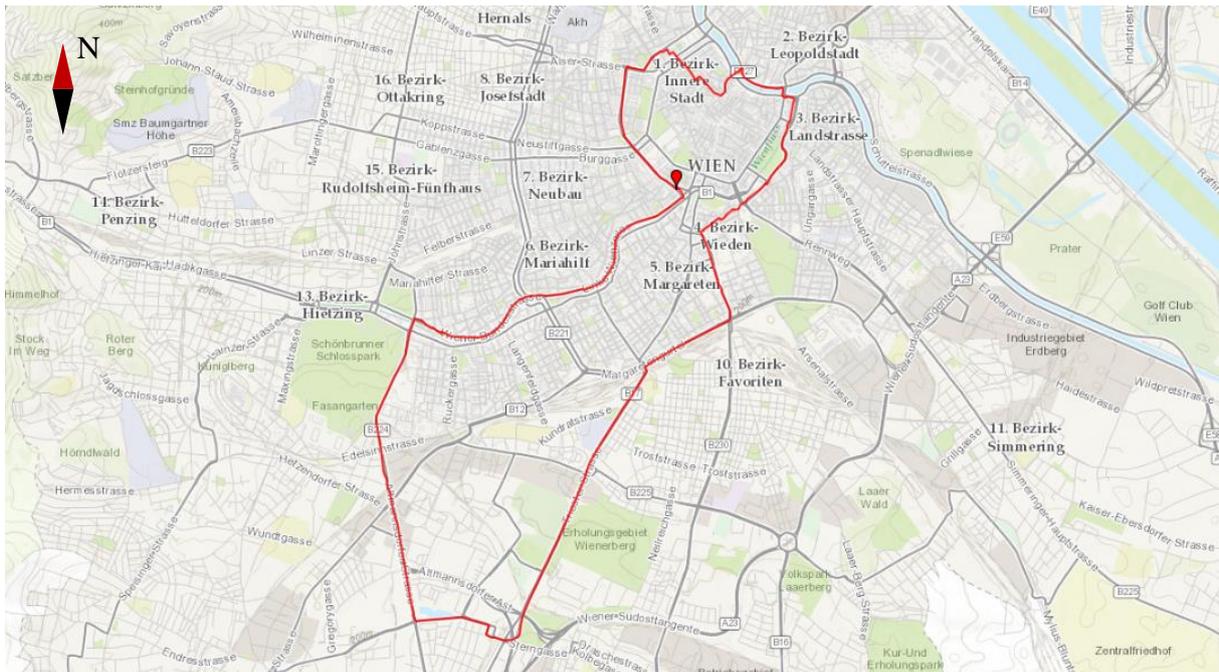


Abbildung 13: Streckenführung des Stadtskyklus dargestellt auf der World Topographic Map (ArcGIS) [51]

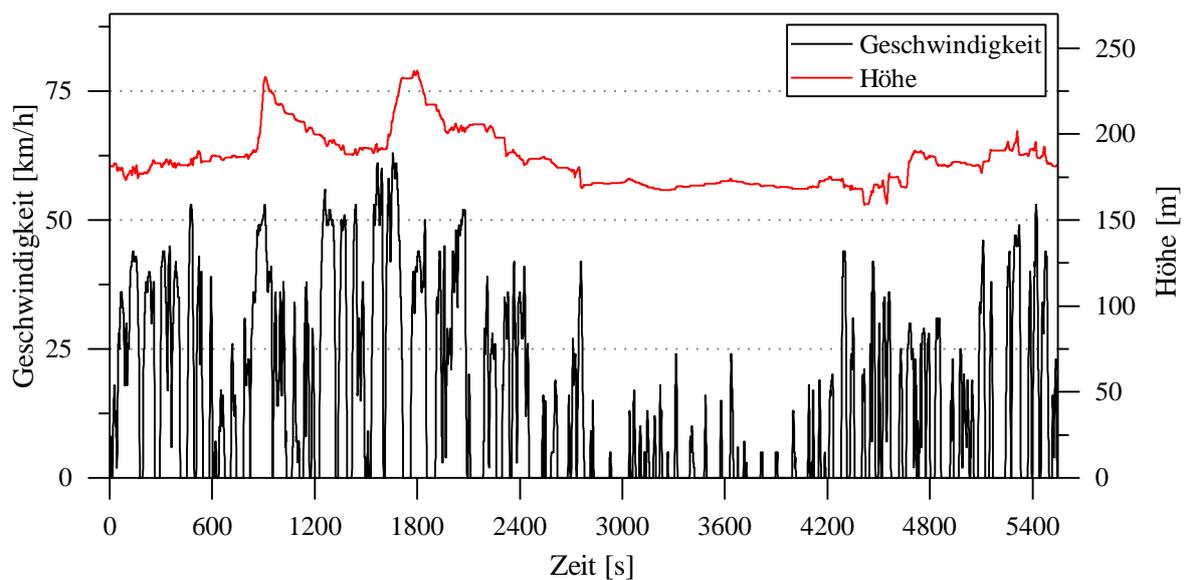


Abbildung 14: Geschwindigkeits- und Höhenprofil des Stadtskyklus

3.2.3 Pendlerzyklus

Der Pendlerzyklus soll eine Fahrt von der Arbeit zum Wohnort simulieren. Daher wurde ausgehend von der TU Wien als Ziel ein Vorort südlich von Wien gewählt. Die Streckenlänge zu diesem Ort beträgt 30,4 km und ist in [Abbildung 15](#) dargestellt.

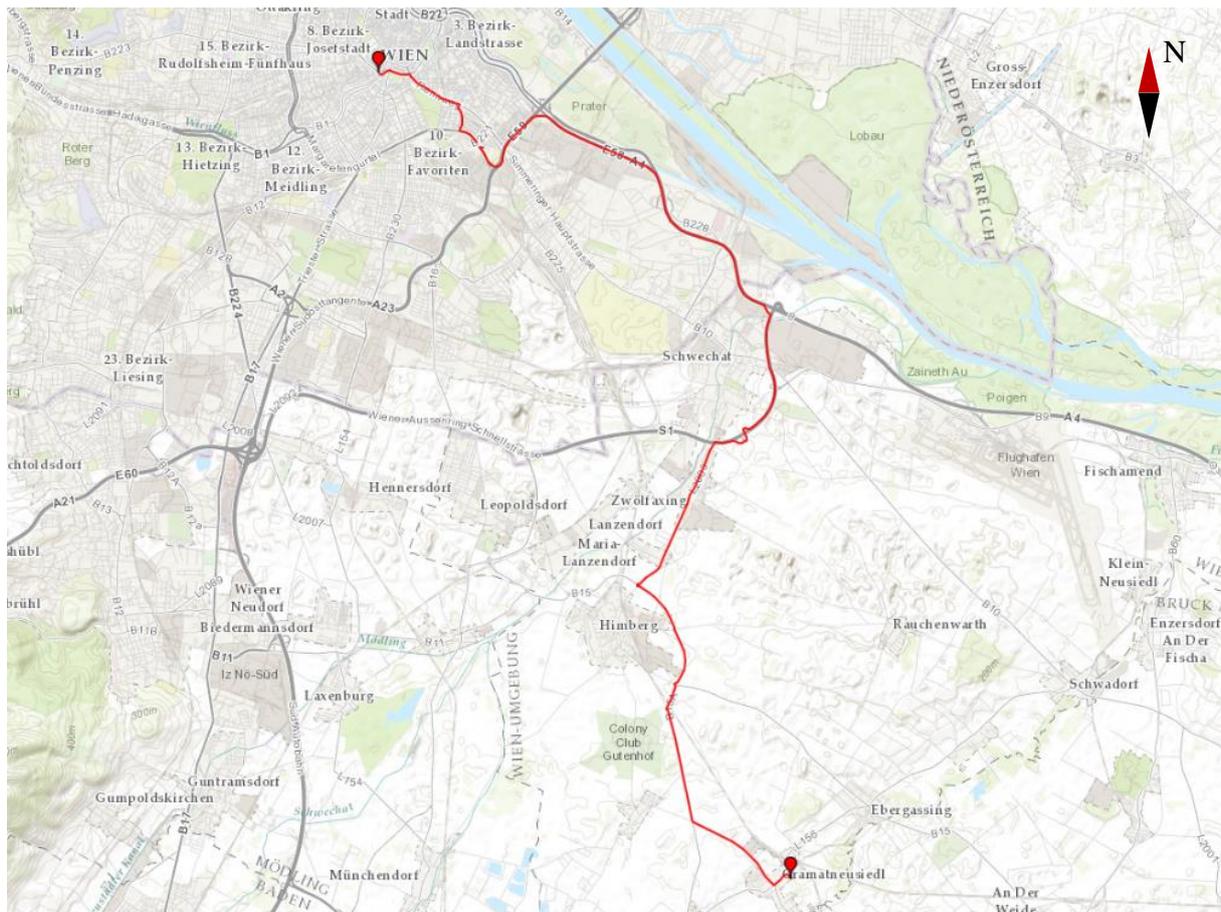


Abbildung 15: Streckenführung des Pendlerzyklus dargestellt auf der World Topographic Map (ArcGIS) [51]

Die Route beinhaltet Straßen in der Stadt mit geringer Geschwindigkeit und einer hohen Anzahl an Kreuzungen mit Ampelanlagen innerhalb von Wien. Außerdem besteht sie aus einem erhöhten Anteil an Stadtautobahnen mit Geschwindigkeiten zwischen 80 und 100 km/h. Nach dem Autobahnabschnitt führt die Strecke über Bundesstraßen bis zum Zielort. Dieser Abschnitt ist von verschiedenen Tempolimits und Ortsdurchfahrten geprägt. Außerdem wird die mögliche Geschwindigkeit von langsameren vorausfahrenden Fahrzeugen gebremst, die nicht vorhersehbar sind aber teilweise auch überholt werden. Das Ziel im Vorort befindet sich in einer Spielstraße, die nur mit sehr geringer Geschwindigkeit durchfahren werden darf. In [Abbildung 16](#) ist das gesamte Geschwindigkeitsprofil samt dem zugehörigen Höhenprofil dargestellt. Das Höhenprofil hat eine sehr geringe Ausprägung mit einer maximalen Differenz von etwa 40 m.

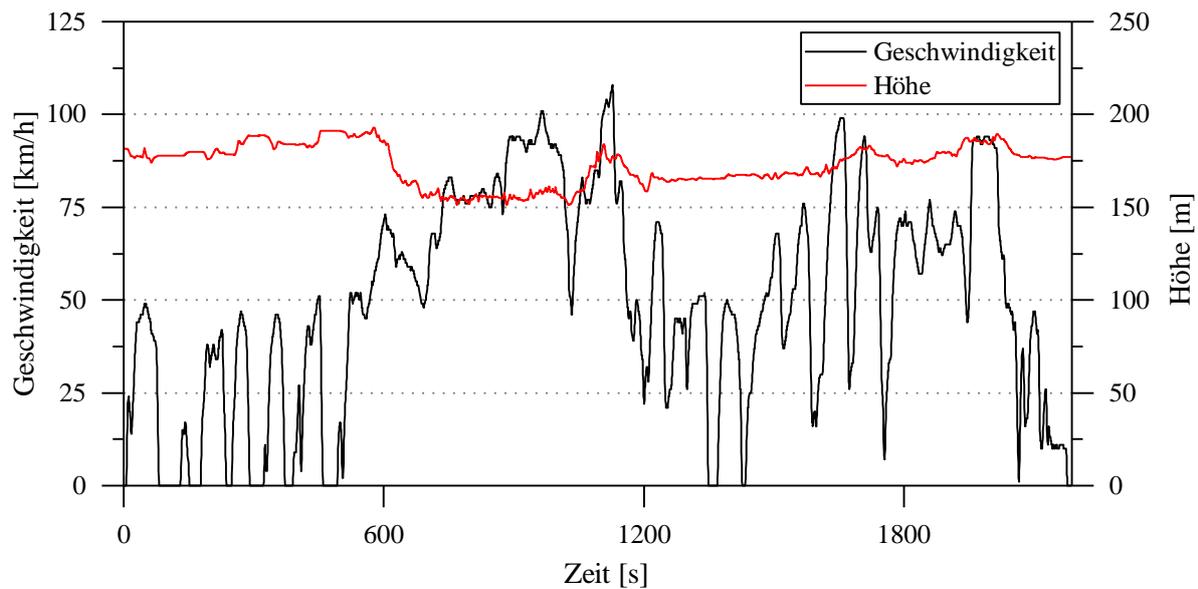


Abbildung 16: Geschwindigkeits- und Höhenprofil des Pendlerzyklus

3.3 Basisbetriebsstrategie

Die Aufgabe der Basisbetriebsstrategie ist es, zu entscheiden, in welchem Betriebsmodus das Hybridsystem betrieben werden soll, mit dem Ziel den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs zu minimieren. Dabei ist das zu absolvierende Fahrprofil im Vorhinein nicht bekannt. Für die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs sind die Betriebsmodi Lastpunkterhöhung (LPH), elektrisches Fahren, Rekuperieren und das Fahren ausschließlich mit dem Verbrennungsmotor ausschlaggebend. Letzterer Betriebsmodus ist notwendig, wenn dieser effizienter als elektrisches Fahren ist oder Betriebsgrenzen des elektrischen Systems überschritten werden. Boosten zur Erhöhung des Beschleunigungsvermögens und während Schaltvorgängen zur Vermeidung von Zugkraftunterbrechungen tragen nicht zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bei und werden deshalb nicht in der Betriebsstrategie implementiert.

Bei der Lastpunktanhebung entsteht, wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, die Verbrauchersparnis durch das Betreiben des Verbrennungsmotors in einem effizienteren Lastpunkt und in der späteren Nutzung der zusätzlich erzeugten elektrischen Energie. Für die Bestimmung des optimalen Lademoments muss der Ladewirkungsgrad berücksichtigt werden. Dieser bildet sich aus der Wirkungskette bestehend aus dem Verbrennungsmotor, dem Getriebe, der Elektromaschine, der Leistungselektronik sowie der Batterie. Die Wahl des Lastpunkterhöhungsmoments durch die Betriebsstrategie orientiert sich zur Vereinfachung an den stärksten Einflussfaktoren dieser Kette, dem Verbrennungsmotor und der Elektromaschine. Gemeinsam ergeben sich von verschiedenen Faktoren abhängige Ladewirkungsgradkennfelder. Durch die P3 Hybridarchitektur ist das Kennfeld zusätzlich von der gewählten Gangstufe abhängig, da sich mit dieser die aufzubringenden Momente zueinander verschieben. Außerdem ist das Kennfeld des

optimalen Lademoments vom Fahrerwunschloment für den Vortrieb abhängig. Mit steigendem Fahrerwunschloment nimmt das maximale Lademoment an der Elektromaschine ab. Somit ist das Lademoment eine Funktion von der Drehzahl der VKM, des Fahrerwunschloments und der Gangstufe des Getriebes. Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen jeweils ein sich so ergebendes Ladewirkungsgradkennfeld für eine Gangstufe und festgehaltenem Fahrerwunschloment. Im rechten Teil der Abbildungen ist ein Schnitt des Kennfeldes bei einer konstanten Geschwindigkeit abgebildet. Durch Vergleich der beiden beispielhaften Geschwindigkeiten ist der Unterschied im Wirkungsgradkennfeld deutlich ersichtlich. Besonders auffallend ist, dass bei 32 km/h der Wirkungsgrad beim maximal möglichen Lademoment abfällt. Im Gegensatz dazu steigt der Ladewirkungsgrad bei 70 km/h kontinuierlich bis zum maximalen Lademoment. Daher wurde eine Laderegulierung basierend auf den Wirkungsgradkennfeldern eingeführt, um ein hohes Lademoment bei gleichzeitiger Vorgabe eines unteren Grenzladowirkungsgrads zu erreichen.

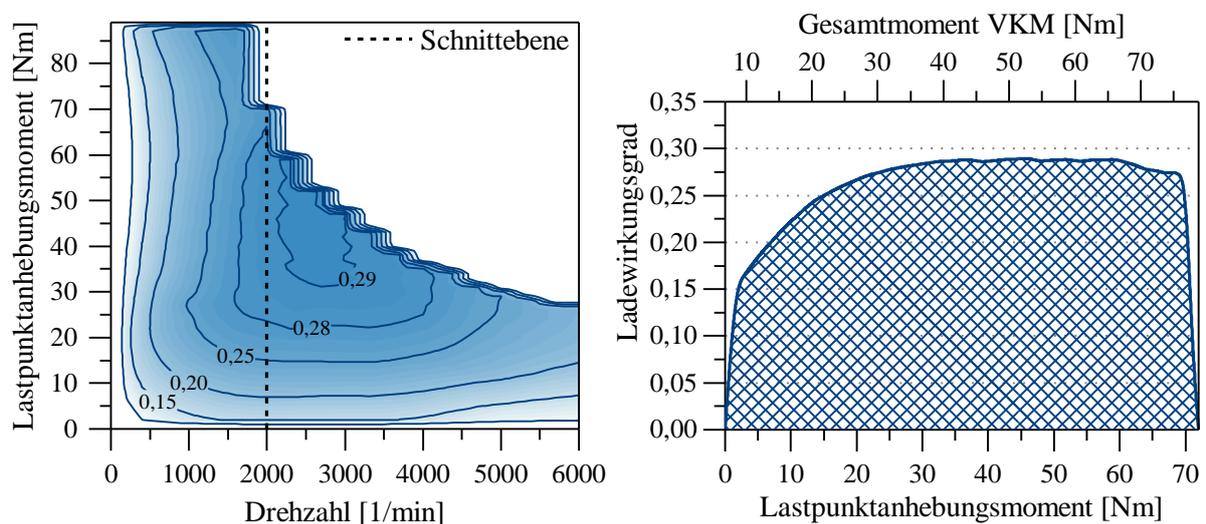


Abbildung 17: Ladewirkungsgradkennfeld bei 32 km/h im 3. Gang mit 6,8 Nm Fahrerwunschloment und Schnitt des Kennfeldes bei daraus ergebenden 2000 [1/min]

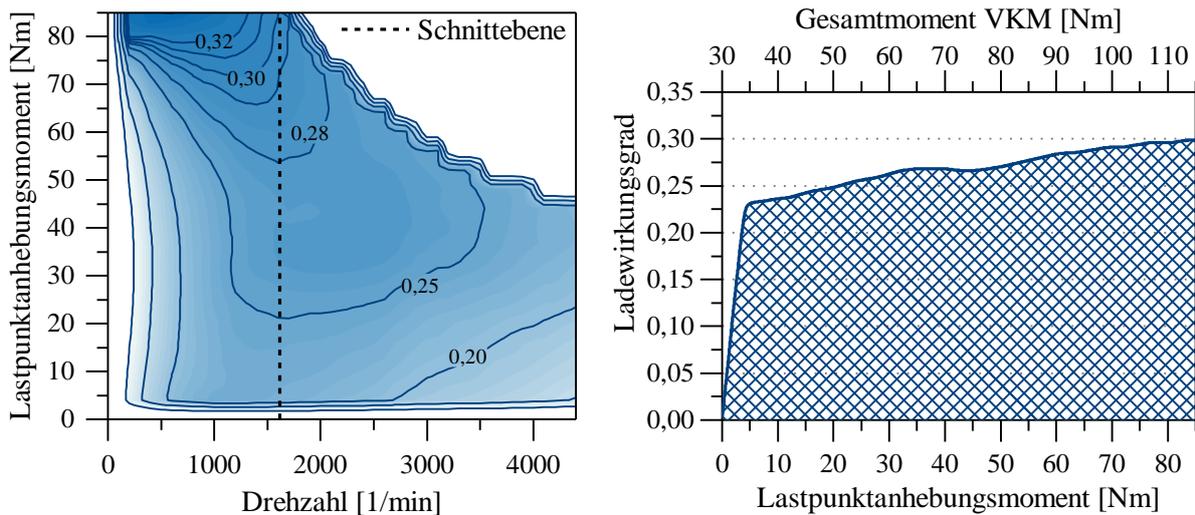


Abbildung 18: Ladewirkungsgradkennfeld bei 70 km/h im 6. Gang mit 30 Nm Fahrerwunschloment und Schnitt des Kennfeldes bei daraus ergebenden 1615 [1/min]

Die Rekuperation von kinetischer und potenzieller Energie wird bis zu den Systemgrenzen immer genutzt. Beschränkt wird die Aufnahme durch die Leistungsgrenzen der Elektromaschine. Außerdem darf die Batterie nicht durch zu viel Rekuperationsenergie die oberste SOC-Grenze überschreiten. Bei der Rekuperation ist der Verbrennungsmotor stets ausgeschaltet und abgekoppelt.

Elektrisches Fahren wird angewandt, um sehr ineffiziente Betriebspunkte des Verbrennungsmotors zu vermeiden. Diese treten besonders bei geringen Geschwindigkeiten und Lasten auf. Daher wird das Fahrzeug ausschließlich elektrisch angefahren und nur bei hohem Leistungsbedarf der Verbrennungsmotor schon bei geringen Geschwindigkeiten gestartet und im VKM-Modus weiter gefahren. Außerdem wird der Verbrennungsmotor bei Fahrzeugstillstand ausgeschaltet.

Durch die Entscheidung über den Einsatz der beschriebenen Betriebsmodi regelt die Betriebsstrategie im Wesentlichen das Laden und Entladen des Energiespeichers. Diese Betriebsmodi sind in Tabelle 4 noch einmal zusammengefasst. Auf der Entladeseite ist mit der Betriebsstrategie nur das elektrische Fahren beeinflussbar, da die Boost-Funktion nicht vorhanden ist und der Bordnetzverbrauch nicht beeinflusst werden kann. Letzterer wird für die Simulation als konstant angenommen.

Tabelle 4: Übersicht über Betriebsmodi zum Laden und Entladen des Energiespeichers

Laden	Entladen
<ul style="list-style-type: none"> • Rekuperation • Lastpunktanhebung 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrisch Fahren • Bordnetz • (Boosten)

Wie bereits erläutert, kann die Batterie durch Rekuperation und Lastpunktanhebung geladen werden. Dabei muss die Ladestrategie dafür sorgen, dass die Batterie nicht so weit durch Lastpunktanhebung geladen wird, dass die Energie aus Rekuperationsvorgängen nicht mehr aufgenommen werden kann. Da der Basisbetriebsstrategie das kommende Höhenprofil nicht bekannt ist, kann die potenzielle Energie des Fahrzeugs nicht berücksichtigt werden. Wie auch von Fleckner et al. [25] oder Steffan [2] vorgeschlagen wird deshalb ein Ansatz verfolgt, der von der momentanen Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig ist. Dabei wird angenommen, dass die kinetische Energie des Fahrzeugs beim Bremsen wiedergewonnen werden kann. Um die entsprechende Energiemenge wird der SOC_{soll} abgesenkt. Dadurch hat der Energiespeicher bei Stillstand des Fahrzeugs im Idealfall einen SOC_{soll} von 70 %. Somit ergibt sich der in Abbildung 19 gezeigte Verlauf des SOC_{soll} in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Als Hysterese für das Laden durch Lastpunktanhebung wird ein Versatz von 2 % SOC-Punkten auf den SOC_{soll} eingeführt. Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Batterie nicht auf Steigungen der Route vorbereitet wird und somit die potenzielle Energie des Fahrzeugs nicht berücksichtigt wird. Ebenfalls kann diese Methode nicht das Fahrverhalten des Fahrers vorhersagen. Der Fahrer entscheidet durch die Vorgabe der Bremskraft, ob Teile davon aus Leistungsgründen durch die Reibbremsen aufgebracht werden müssen.

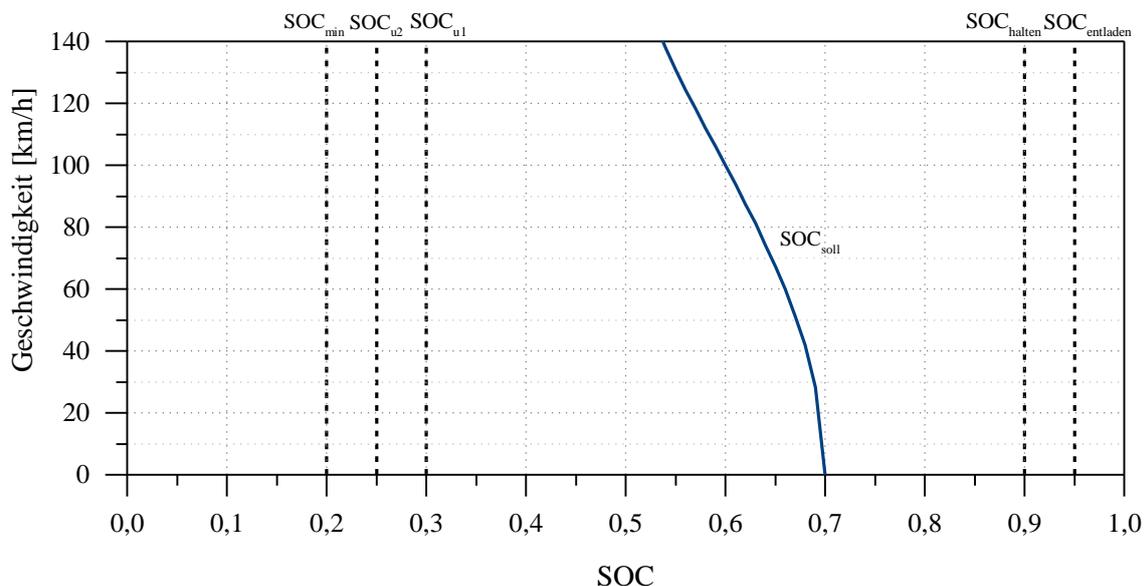


Abbildung 19: Geschwindigkeitsabhängiger SOC_{soll} und SOC Grenzen für die Eingriffe der Betriebsstrategie

Es ist neben der Vorgabe des SOC_{soll} auch die Abgrenzung des nutzbaren Batteriespeichers durch die in Abbildung 19 gezeigten SOC-Grenzen notwendig. Beim Überschreiten dieser Grenzen werden die in Tabelle 5 ausgeführten Maßnahmen ergriffen, um ein weiteres Überschreiten zu verhindern. Dabei steigt die Intensität der Maßnahmen mit dem Überschreiten weiterer Grenzen an. Überschreiten dieser Grenzen führt durch die getroffenen Maßnahmen zu höheren Kraftstoffverbräuchen für die Dauer dieses Zustands. Besonders wirkt sich dies beim

Überschreiten von $SOC_{entladen}$ aus, da dadurch das Rekuperieren von Energie verhindert wird. Zwischen den Grenzen SOC_{u1} und SOC_{halten} befindet sich das Hybridsystem im Normalbetrieb und es stehen alle Hybridfunktionen zur Verfügung. Solange sich der Ladezustand unter der SOC_{soll} -Kurve befindet, wird die Batterie durch Lastpunktanhebung und Rekuperation geladen. Oberhalb dieser Kurve findet keine Lastpunktanhebung mehr statt.

Tabelle 5: Auswirkungen beim Überschreiten von SOC Grenzen

SOC Grenzen	Auswirkung
$< SOC_{min} = 0,20$	Kein elektrisches Fahren & kein Start/Stopp
$< SOC_{u2} = 0,25$	Kein elektrisches Fahren über der VKM Mindestgeschwindigkeit & Erhöhung des Lademoments
$< SOC_{u1} = 0,30$	Kein elektrisches Fahren über der VKM Mindestgeschwindigkeit
$> SOC_{halten} = 0,90$	Keine Lastpunktanhebung & Wirkungsgradunabhängig elektrisch Fahren
$> SOC_{entladen} = 0,95$	Keine Lastpunktanhebung & Wirkungsgradunabhängig elektrisch Fahren & Keine Rekuperation

Das elektrische Fahren wird von den drei Faktoren dem Fahrerwunschloment, der Geschwindigkeit und dem Wirkungsgradvorteil des elektrischen Pfads beeinflusst. Bis zu einer Geschwindigkeit von 10 km/h wird das Fahrzeug rein elektrisch bewegt. Allerdings soll die Erfüllung des Fahrerwunschloments durch den Antriebsstrang stets innerhalb dessen Leistungsgrenzen eingehalten werden. Übersteigt somit dieses Wunschloment das maximale elektrische Moment, wird zwingend das Antriebsmoment vom Verbrennungsmotor erzeugt. Der Elektromotor erzeugt dabei kein Antriebsmoment. Diese Bedingung überstimmt jede andere zwischen VKM und elektrischem Betrieb.

Abgesehen von diesen grundlegenden Entscheidungen wird für die Wahl der Antriebsquelle ein wirkungsgradbasierter Ansatz verfolgt. Dieser besteht aus einem elektrischen und einem mechanischen Pfad. Der elektrische Pfad bildet sich aus dem Lade- und Entladewirkungsgrad und der mechanische Pfad aus dem Wirkungsgrad bei Antrieb durch den Verbrennungsmotor. Die Bedingung, die die Pfade verknüpft, zeigt Gleichung (3-1). Ist der elektrische Pfad effizienter, entscheidet die Betriebsstrategie für elektrisches Fahren.

$$\eta_{Laden} \cdot \eta_{Entladen} > \eta_{VKM} \quad (3-1)$$

mit

η_{Laden}	[-]	Ladewirkungsgrad
$\eta_{Entladen}$	[-]	Entladewirkungsgrad
η_{VKM}	[-]	Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors

Die schematische Zusammensetzung von Lade- und Entladewirkungsgrad wird in Abbildung 20 dargestellt. Sie zeigt im linken Teil die Wirkungsgradketten bei Laden durch Lastpunktanhebung und bei zusätzlicher Rekuperation. Im rechten Teil der Abbildung sind die Wirkungsgradketten beim Verbrauchen der elektrischen Energie aus der Batterie dargestellt. Beim Laden besteht diese Kette (Gleichung (3-2)) bei ausschließlicher Lastpunktanhebung aus dem differentiellen Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors, dem Getriebewirkungsgrad, dem Wirkungsgrad der Elektromaschine im generatorischen Betrieb und der Leistungselektronik sowie dem Wirkungsgrad der Batterie. Diese Kette bildet die Ladeeffizienz der Lastpunktanhebung ($\eta_{Laden,LPH}$) und erreicht im Mittel 27,5 %. Der differentielle Wirkungsgrad beschreibt die Effizienz des Verbrennungsmotors für die zusätzlich aufgebrauchte Ladeleistung. Er wird gebildet, indem die Energie der zusätzlichen Kraftstoffmenge mit der durch den Motor zusätzlich erzeugten mechanischen Energie ins Verhältnis gesetzt wird. Die zusätzliche Kraftstoffmenge ergibt sich aus der Differenz zwischen Gesamtverbrauch bei Lastpunktanhebung und dem Verbrauch bei ausschließlichem Fahrerwunschkmoment (Gleichung (3-3)).

$$\eta_{Laden,LPH} = \eta_{VKM,LPH} \cdot \eta_{Getr} \cdot \eta_{EM+LE} \cdot \eta_{Batt} \quad (3-2)$$

$$\eta_{VKM,LPH} = \frac{\Delta W_e}{\Delta Q_B} = \frac{\Delta W_e}{\Delta m_b \cdot H_u} \quad (3-3)$$

mit

$\eta_{VKM,LPH}$	[-]	<i>Differenzieller Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors</i>
η_{Getr}	[-]	<i>Getriebewirkungsgrad</i>
η_{EM+LE}	[-]	<i>Wirkungsgrad der Elektromaschine und der Leistungselektronik</i>
η_{Batt}	[-]	<i>Wirkungsgrad der Batterie</i>
W_e	[J]	<i>Effektiv gewonnene Arbeit des Verbrennungsmotors</i>
Q_B	[J]	<i>Kraftstoffenergie</i>
m_b	[kg]	<i>Kraftstoffmasse</i>
H_u	[J/kg]	<i>Heizwert</i>

Beim Laden durch Rekuperation sind die Wirkungsgrade der Elektromaschine, der Batterie und der Leistungselektronik ausschlaggebend. Da jedoch bei der Rekuperation der Verbrennungsmotor unmittelbar keinen Kraftstoff verbraucht, wird diese Schmälerung nicht weiter berücksichtigt und der Ladewirkungsgrad durch Lastpunktanhebung erhält den Wert von 100 %. Sie erhöht den Wirkungsgrad der gespeicherten Energie in Abhängigkeit von dessen Zusammensetzung. Abbildung 20 zeigt, dass mit steigendem Anteil an rekuperierter Energie der Wirkungsgradvorteil gegenüber dem Fahren mit dem Verbrennungsmotor ansteigt. In der Basisbetriebsstrategie wurde dieser Umstand mit einem konstanten Rekuperationsanteil berücksichtigt. Die prädiktive Betriebsstrategie verwendet dieses Wirkungsgradmodell um Eingriffe in der Basisbetriebsstrategie vorzunehmen. Dafür wird der Wirkungsgradwert der gespeicherten Energie

künstlich durch einen Wirkungsgradfaktor verändert. Die genaue Vorgangsweise wird später im Kapitel 3.4.2 ausführlich erläutert.

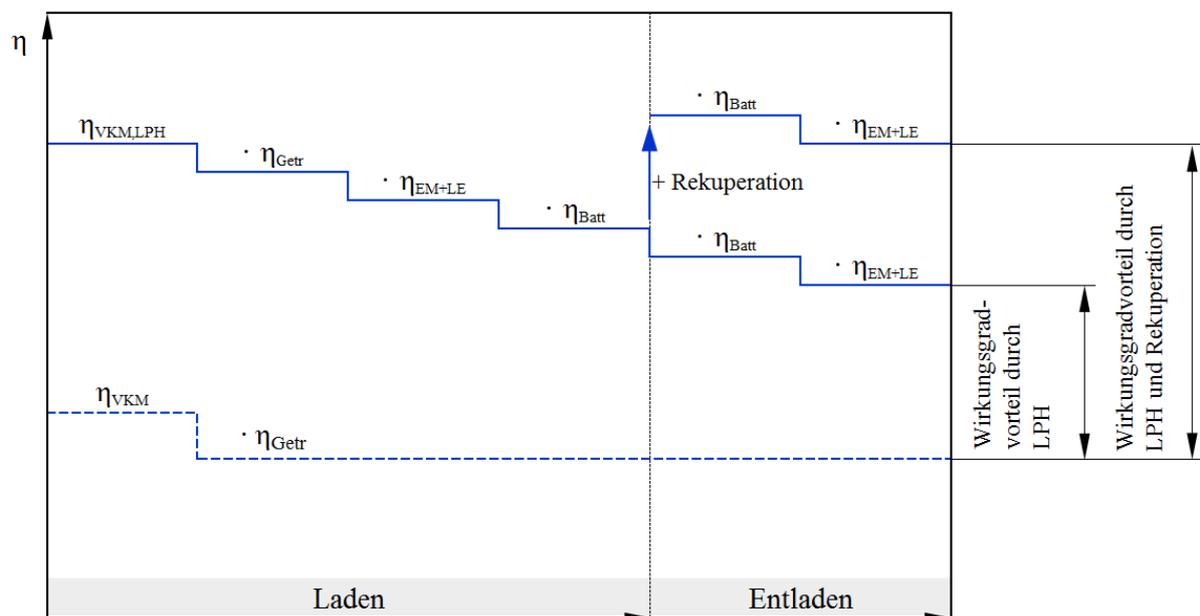


Abbildung 20: Wirkungsgradverkettung beim Laden und Entladen der Batterie mit und ohne Rekuperation

3.4 Prädiktive Betriebsstrategie

Die Notwendigkeit einer prädiktiven Betriebsstrategie lässt sich aus den Simulationen mit der Basisbetriebsstrategie herleiten. Hierfür wurden der Pendlerzyklus und der Überlandzyklus gewählt, da sie insbesondere im Höhenprofil sehr verschieden sind. Diese Simulationsläufe sind in [Abbildung 21](#) und [Abbildung 22](#) dargestellt. In [Abbildung 21](#) ist im oberen Teil der SOC-Verlauf der Batterie dargestellt. Dieser startet bei 70 % und endet wieder etwas unter 70 %. Über den Verlauf ist zu erkennen, dass der SOC bei etwa 1000 Sekunden sein Minimum und bei 1750 Sekunden sein Maximum erreicht. Bei beiden Extremwerten besteht noch ausreichend Abstand zu den SOC-Grenzen. Es wird deutlich, dass beim Pendlerzyklus die Batteriekapazität bei weitem nicht ausgenutzt wird.

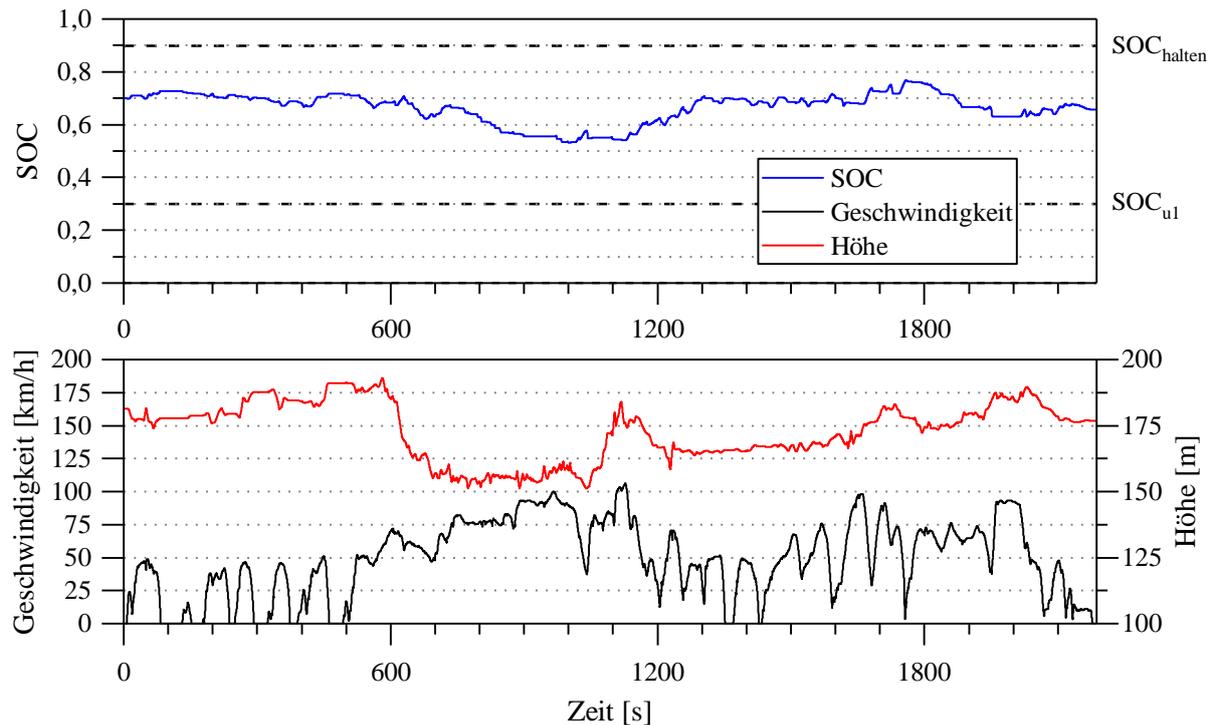


Abbildung 21: SOC-Verlauf, Geschwindigkeits- und Höhenprofil im Pendlerzyklus mit der Basisbetriebsstrategie

Die Notwendigkeit einer Prädiktion zeigt sich erst im Überlandzyklus mit ausgeprägtem Höhenprofil (Abbildung 22). Hier wird die obere SOC Grenze zum ersten Mal bereits nach etwa 2530 Sekunden erreicht. Ausschlaggebend dafür ist vor allem das Höhenprofil, welches ab dem Höhepunkt fast ausschließlich fallend ist. Daher überschreitet der Energiespeicher ab diesem Zeitpunkt immer wieder die oberen Grenzen. Da die Basisstrategie sich nicht auf dieses Szenario vorbereiten kann, reagiert sie ausschließlich auf diese Überschreitungen mit den in Kapitel 3.3 erläuterten Maßnahmen.

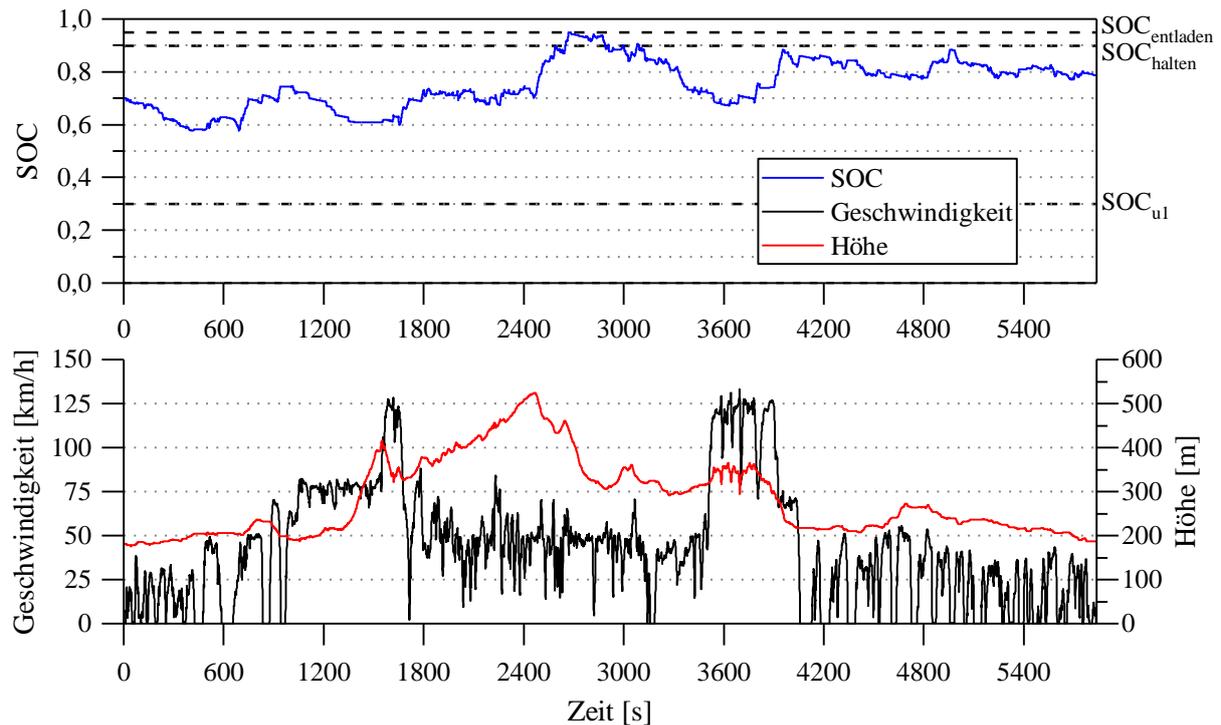


Abbildung 22: SOC-Verlauf, Geschwindigkeits- und Höhenprofil im Überlandzyklus mit der Basisbetriebsstrategie

Ziel der prädiktiven Betriebsstrategie ist es, die Überschreitung der SOC-Grenzen nach oben und unten zu verhindern. Dadurch soll vor allem erreicht werden, dass das komplette Rekupe-
rationspotenzial genutzt wird und ein Laden bei schlechten Wirkungsgraden vermieden wird. Dafür ist es notwendig, den SOC-Verlauf für die zu fahrende Strecke vorzuberechnen, um zu erkennen, ob in der Zukunft eine Grenze überschritten wird. Ist dies der Fall, muss rechtzeitig in die Basisbetriebsstrategie eingegriffen werden, um das Überschreiten zu verhindern.

Der Ablauf der prädiktiven Betriebsstrategie wird in [Abbildung 23](#) aufgelistet. Sie besteht im Grunde aus zwei Teilen. Zuerst wird mit dem Wissen über den Zielort das vorausliegende Ge-
schwindigkeits- und Höhenprofil vorhergesagt. Damit wird mit einem vereinfachten Fahrzeug-
modell der Verlauf des Batterieladezustands vorausberechnet und damit Überschreitungen von
Grenzwerten frühzeitig erkannt. Im zweiten Schritt müssen optimierte Parameter für die Basis-
betriebsstrategie gefunden und dieser übergeben werden.

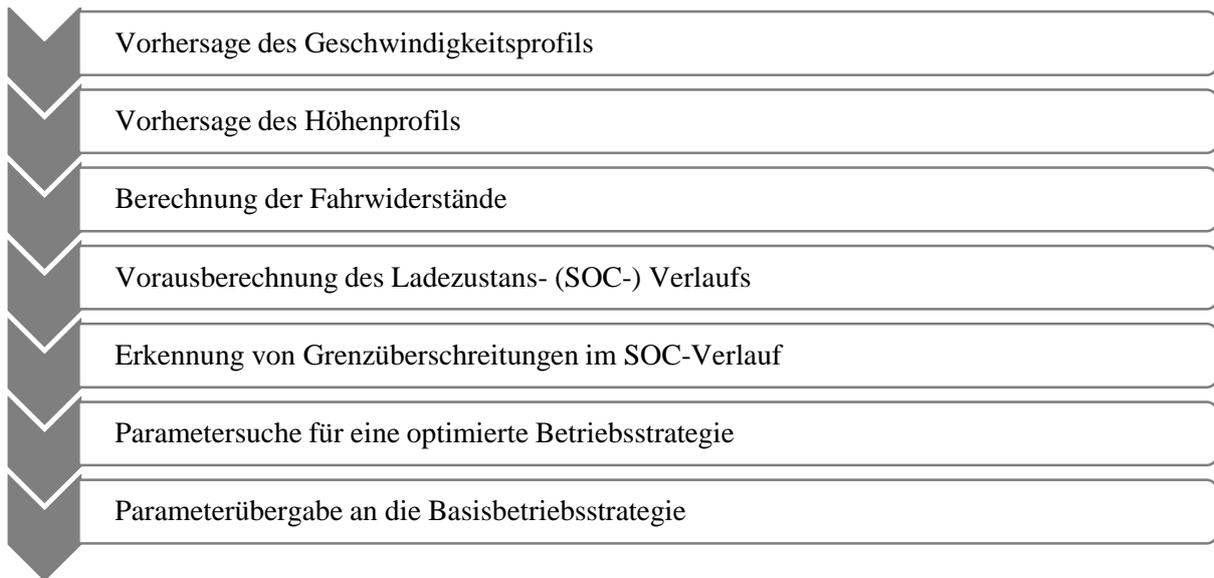


Abbildung 23: Ablaufschema der prädiktiven Betriebsstrategie

3.4.1 Bildung der Prädiktion

Für die Prädiktion des SOC-Verlaufs wird, wie bereits erwähnt, ein quasi statisches Modell verwendet. Dieses besteht aus den drei wesentlichen Bereichen der Fahrwiderstände, der prädizierten Geschwindigkeit und einer vereinfachten Betriebsstrategie. Die Fahrwiderstände sind notwendig, um den Energieverbrauch des Fahrzeugs zu berechnen. Zur Kalkulation der Fahrwiderstände werden das prädizierte Geschwindigkeitsprofil und das durch Navigationsdaten vorhandene Höhenprofil benötigt. Die so berechneten Fahrwiderstände führen mit der vereinfachten Betriebsstrategie zu einer SOC-Veränderung in der Batterie und somit zu einem prädizierten SOC-Verlauf.

3.4.1.1 Fahrwiderstände

Zur Berechnung der benötigten Energie pro Zeitschritt wird die im Streckenabschnitt aufgewandte Leistung integriert. Dafür ist zunächst der Zusammenhang zwischen Leistung und Fahrwiderständen erforderlich (Gleichung (3-4) und (3-5)).

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad (3-4)$$

$$P = \frac{\vec{F} \cdot d\vec{s}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad (3-5)$$

mit

F	[N]	<i>Kraft</i>
P	[W]	<i>Leistung</i>
s	[m]	<i>Weg</i>
t	[s]	<i>Zeit</i>
v	[m/s]	<i>Geschwindigkeit</i>
W	[J]	<i>Arbeit</i>

In Summe muss für die Fortbewegung des Fahrzeugs die Leistung zur Überwindung der Gesamtfahrwiderstände aufgebracht werden (Gleichung (3-6) und (3-7)).

$$\overrightarrow{F_{WGes}} = \overrightarrow{F_{St}} + \overrightarrow{F_B} + \overrightarrow{F_L} + \overrightarrow{F_R} \quad (3-6)$$

$$P_{WGes} = \overrightarrow{F_{WGes}} \cdot \vec{v} = P_{St} \cdot P_B \cdot P_L \cdot P_R \quad (3-7)$$

mit

F_B	[N]	<i>Beschleunigungswiderstand</i>
F_L	[N]	<i>Luftwiderstand</i>
F_R	[N]	<i>Rollwiderstand</i>
F_{St}	[N]	<i>Steigungswiderstand</i>
F_{WGes}	[N]	<i>Gesamtkraft der Fahrwiderstände</i>
P_B	[W]	<i>Leistung des Beschleunigungswiderstands</i>
P_L	[W]	<i>Leistung des Luftwiderstands</i>
P_R	[W]	<i>Leistung des Rollwiderstands</i>
P_{St}	[W]	<i>Leistung zur Überwindung der Steigung</i>
P_{WGes}	[W]	<i>Leistung der gesamten Fahrwiderstände</i>

Zur Erhöhung der Fahrzeuggeschwindigkeit ist das Überwinden des Beschleunigungswiderstands erforderlich. Dieser ist eine Funktion der Beschleunigung des Fahrzeugs, der Fahrzeugmasse sowie der Rotationsbeschleunigung und der entsprechenden Massenträgheitsmomente (Gleichung (3-8)).

$$F_B = \left(m + \frac{\vartheta_{Ges}(i)}{r_{Rad}^2} \right) \cdot \dot{v} \quad (3-8)$$

mit

$\vartheta_{Ges}(i)$	[kg m ²]	<i>Reduziertes gesamtes Massenträgheitsmoment des Antriebsstrangs in Abhängigkeit der Gangstufe i</i>
m	[kg]	<i>Fahrzeugmasse</i>
r_{Rad}	[m]	<i>Radius des angetriebenen Rades</i>
\dot{v}	[m/s ²]	<i>Beschleunigung (Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit)</i>

Wobei $\vartheta_{Ges}(i)$ das auf die Antriebswelle reduzierte gesamte Trägheitsmoment des Antriebsstrangs ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich dieses Trägheitsmoment mit der gewählten Gangstufe i ändert. Meist ist es allerdings ausreichend, das Massenträgheitsmoment des Antriebsstrangs über einen konstanten Drehmassenzuschlagsfaktor λ zu berücksichtigen, wodurch sich die Gleichung (3-8) zu Gleichung (3-9) vereinfacht.

$$F_B = m \cdot \lambda \cdot \dot{v} \quad (3-9)$$

Die für die Beschleunigung aufgewandte Leistung wird als kinetische Energie gespeichert und kann später durch Rekuperation teilweise zurückgewonnen werden. Der Zusammenhang ergibt sich aus dem Arbeitssatz wie Gleichung (3-10) zeigt.

$$\Delta T = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} (F \cdot v) dt = \int_{t_1}^{t_2} (m \cdot \lambda \cdot \dot{v} \cdot v) dt = \frac{1}{2} m \cdot \lambda \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad (3-10)$$

mit

ΔT	[J]	Änderung der kinetischen Energie
λ	[-]	Drehmassenzuschlagsfaktor

Der Luftwiderstand ist besonders bei höheren Geschwindigkeiten von Bedeutung, da er mit der zweiten Potenz von der Relativgeschwindigkeit abhängig ist. Dies ist die Differenz aus Fahrzeug- und Windgeschwindigkeit in der Fahrzeuginnenachse. Zur Vereinfachung wird in der Prädiktion Windstille angenommen, wodurch die Relativgeschwindigkeit gleich der Fahrzeuggeschwindigkeit ist. Gleichung (3-11) zeigt die Berechnung des Luftwiderstands.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v_{rel}^2 \quad (3-11)$$

mit

c_w	[-]	Luftwiderstandsbeiwert
A	[m ²]	Querspanntfläche
ρ	[kg/m ³]	Dichte der Luft
v_{rel}	[m/s]	Relativgeschwindigkeit

Der Rollwiderstand wird durch den Reifen, seinen Luftdruck, die Fahrbahn und die Geschwindigkeit beeinflusst. Er entsteht durch Formänderung des Reifens und der Fahrbahn durch das Abrollen des Reifens. Außerdem tritt Reibung in den Lagern und nicht vollständig geöffneten Bremsen auf. Diese Einflussfaktoren werden durch einen Rollwiderstandsbeiwert berücksichtigt (Gleichung (3-12)).

$$F_R = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha \quad (3-12)$$

mit

g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
f	[-]	Rollwiderstandsbeiwert
α	[rad]	Steigungswinkel

Zur Überwindung von Steigungen muss der Steigungswiderstand überwunden werden. Er ist abhängig vom Steigungswinkel und der Fahrzeugmasse (Gleichung (3-13)).

$$F_{St} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (3-13)$$

Die aufgewendete Energie zur Überwindung des Höhenunterschieds wird in Form von potenzieller Energie gespeichert (Gleichung (3-14)). Diese kann bei einem Gefälle wiedergewonnen werden.

$$W_{St} = \int_{h_1}^{h_2} (m \cdot g) dh = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \quad (3-14)$$

$$(h_2 - h_1) = (s_2 - s_1) \cdot \sin \alpha$$

mit

W_{St}	[J]	<i>Potenzielle Energie der Höhe</i>
h	[m]	<i>Höhe</i>

Da das Fahrzeugmodell in der Prädiktion ausschließlich auf Kräften basiert, führt das Wiedergewinnen kinetischer und potenzieller Energie zu negativen Kräften. Übertreffen diese die sonstigen Fahrwiderstände, ergibt sich ein Energieüberschuss, der in der Batterie gespeichert werden kann.

Da die Bordnetzleistung kein Fahrwiderstand ist, wird diese nicht über das Fahrwiderstandsmodell berücksichtigt. Sie wird in der Prädiktion über eine konstant anliegende Leistung von 130 W berücksichtigt, welche zu der Leistung aus den Fahrwiderständen hinzuaddiert wird.

3.4.1.2 Prädiziertes Geschwindigkeitsprofil

Zur Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils dienen in erster Linie die geltenden Geschwindigkeitsbegrenzungen auf der zu fahrenden Route. Die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit hängt allerdings von weiteren Faktoren ab. Zu diesen Faktoren zählen Eigenschaften der Straße sowie der umgebende Verkehr und vor allem auch die Fahrweise des Fahrers. Zu den Eigenschaften der Straße gehören neben den Geschwindigkeitsbeschränkungen auch der Typ der Straße wie auch deren Steigung und Kurvenradien. In dieser Arbeit werden die Steigung und die Kurvenradien nicht weiter bei der Bildung des Geschwindigkeitsprofils berücksichtigt. Ferner haben Kreuzungen einen wesentlichen Einfluss auf das Geschwindigkeitsprofil.

Bei den genannten Einflussfaktoren handelt es sich bis auf die Verkehrsdichte und das Verhalten des Fahrers, um statische Einflüsse, die sich mit der Zeit nicht verändern. Beim Typ der Straße wird zwischen Straßen im Ortsgebiet, außerorts und Autobahnen unterschieden. Kreuzungen werden eingeteilt in Kreuzungen mit Stoppschild, Nachrang und Lichtsignalanlagen.

Kreuzungen an denen das Fahrzeug Vorrang hat, werden bei der Bildung des Geschwindigkeitsprofils nicht beachtet. Die Berücksichtigung von Ampelkreuzungen stellt eine besondere Herausforderung dar, da ohne Kommunikation mit den Ampeln das Auftreten und die Dauer einer Rotphase nicht vorhersagbar sind. Der gewählte statistische Ansatz zur Berücksichtigung dieser, wird später weiter erläutert. Informationen über den Verkehrszustand können, wie in Kapitel 2.3 ausgeführt, über verschiedene Systeme in Erfahrung gebracht werden. Es wird angenommen, dass diese Informationen im Stadtgebiet und auf Autobahnen hinreichend bekannt sind. Klassifiziert wird die Verkehrsdichte in die drei Stufen: frei, dicht und stauend. Bei dichtem Verkehr wird die erwartete Geschwindigkeit deutlich verringert. In Streckenabschnitten, für die ein Stau vorhergesagt ist, wird ein stauspezifisches Geschwindigkeitsprofil herangezogen. Dieses besteht vorwiegend aus Stillstand mit kurzen vereinzelt Phasen, in denen das Fahrzeug mit geringer Geschwindigkeit fährt.

Mithilfe dieser Einflussfaktoren wird nach dem Schema in [Abbildung 24](#) ein einfaches Geschwindigkeitsprofil gebildet. Ausgangsbasis sind die Geschwindigkeitsbeschränkungen auf der zu befahrenden Route. Dieses Ausgangsprofil wird mit den Einflussfaktoren verändert, so dass ein Geschwindigkeitsprofil mit konstanten Geschwindigkeiten und sprunghaften Übergängen zwischen Geschwindigkeiten entsteht. Dieses wird mit konstanten Verzögerungs- und Beschleunigungsrampen zu einem fahrbaren und einfachen Geschwindigkeitsprofil vervollständigt.

Da bis zum Zielort eine feste Distanz überwunden werden muss, würde eine wegbasierende Simulation naheliegen. Jedoch müssen die häufigen Stillstandszeiten zeitbasierend durchlaufen werden, was einen Wechsel zwischen diesen Methoden verlangt. Da dieser Wechsel die Simulation stark verkompliziert, wurden ausschließlich zeitbasierende Simulationen durchgeführt.

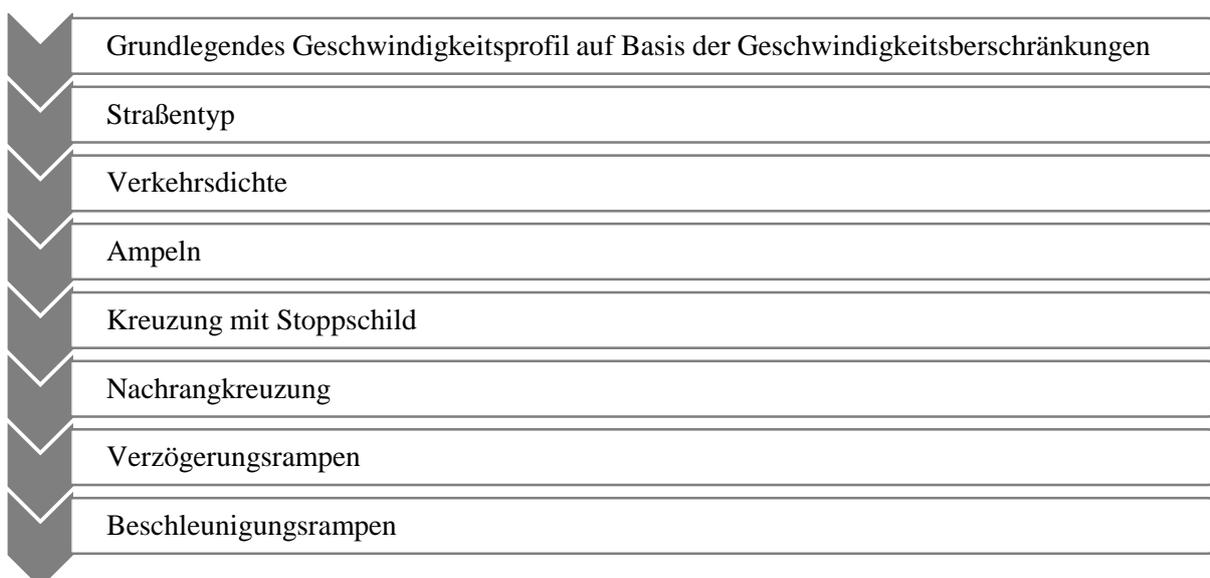


Abbildung 24: Ablaufschema der Erstellung des einfachen Geschwindigkeitsprofils

Unter der Annahme, dass keine Kommunikation zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlagen besteht, ist eine Rotphase nicht vorhersagbar. Daher wurde versucht, das Auftreten und die Dauer des Stillstands an einer roten Ampel mithilfe einer Wahrscheinlichkeitsverteilung zu schätzen. Die notwendigen Vergangenheitsdaten stammen aus den drei gefahrenen Zyklen. Dabei ergab sich eine Wahrscheinlichkeit von 50 %, dass eine Ampel rot ist. Die Verteilung der Standzeiten wurde über die Häufigkeit des Auftretens in den Zyklen ermittelt. Abbildung 25 zeigt das Ergebnis dieser Analyse. Es wurden bis zu einer Standzeit von 18 Sekunden, Klassen von 6 Sekunden verwendet und darüber die Klassen aufgrund des geringen Stichprobenumfangs auf 12 Sekunden erweitert.

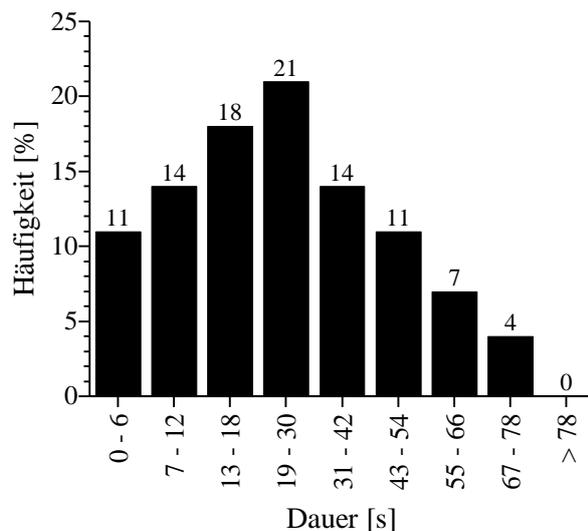


Abbildung 25: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Standzeit an einer roten Ampel

Mit dieser Verteilung und der später erläuterten statistischen Prädiktion ergibt sich für die ersten Sekunden des Pendlerzyklus das in Abbildung 26 gezeigte Geschwindigkeitsprofil. Alle Stopps in diesem Profil sind durch Ampeln verursacht. Es ist deutlich zu sehen, dass nicht jede Ampel in Eintreten und Dauer richtig geschätzt wird. Dennoch legt das Fahrzeug in der Prädiktion im Schnitt nahezu denselben Weg, wie in der Messfahrt zurück (Abbildung 27). Daher scheint diese statistische Methode als geeignet für eine langfristige Vorausrchnung. Es ist denkbar über häufig zurückgelegte Strecken auch Statistiken für einzelne Ampeln zu erstellen, was für Fahrzeuge mit entsprechender Sensorik problemlos selbständig möglich wäre.

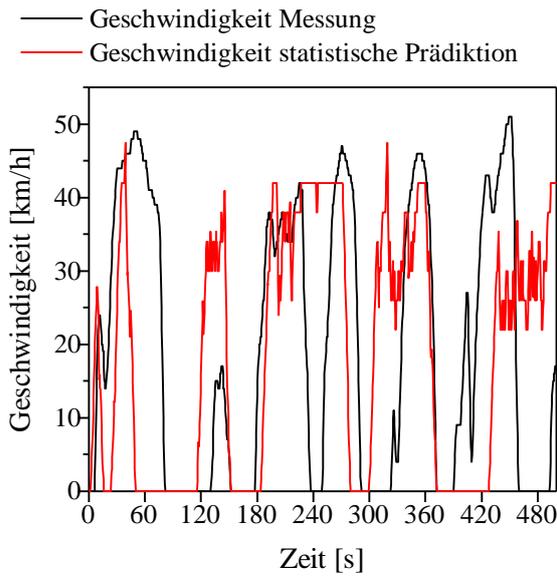


Abbildung 26: Auswirkung der Ampelschätzung auf die prädierte Geschwindigkeit am Beispiel des Pendlerzyklus

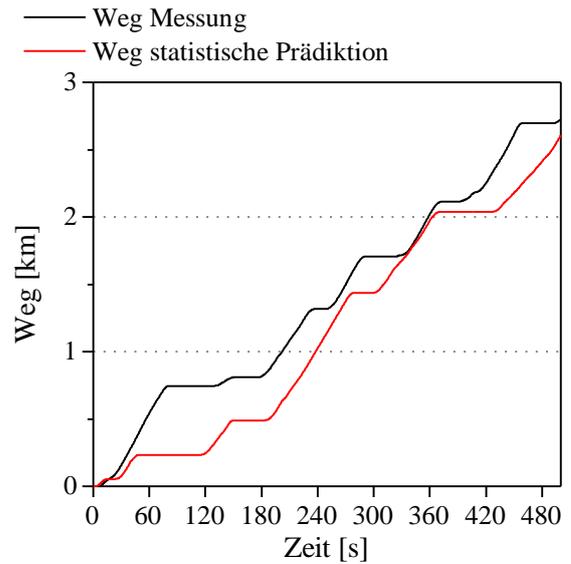


Abbildung 27: Auswirkung der Ampelschätzung auf den zurückgelegten Weg der Prädiktion am Beispiel des Pendlerzyklus

Unter Verwendung des einfachen Geschwindigkeitsprofils mit der statistischen Schätzung der Rotphasen ergeben sich für den Pendlerzyklus und den Überlandzyklus die in [Abbildung 28](#) und [Abbildung 29](#) dargestellten einfachen Geschwindigkeitsprofile. Diese Abbildungen zeigen jeweils einen Ausschnitt des Zyklus. Es ist zu sehen, dass das einfache Profil den Messdaten grob folgen kann. Da eine reale Fahrt allerdings nicht aus konstanten Anteilen besteht, tritt kontinuierlich ein Geschwindigkeitsfehler auf.

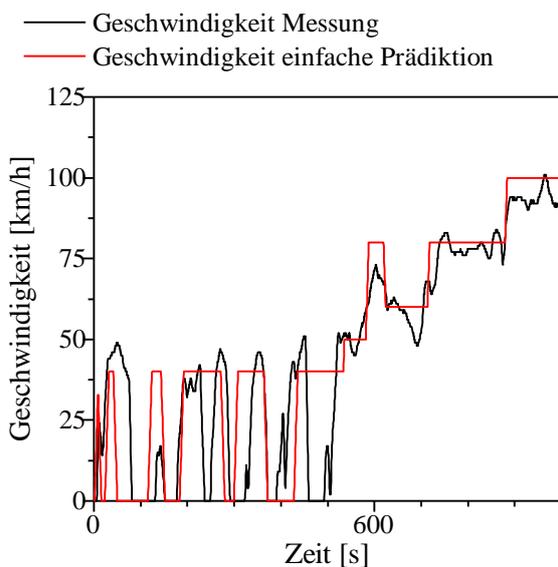


Abbildung 28: Einfaches prädiertes Geschwindigkeitsprofil an einem Ausschnitt des Pendlerzyklus

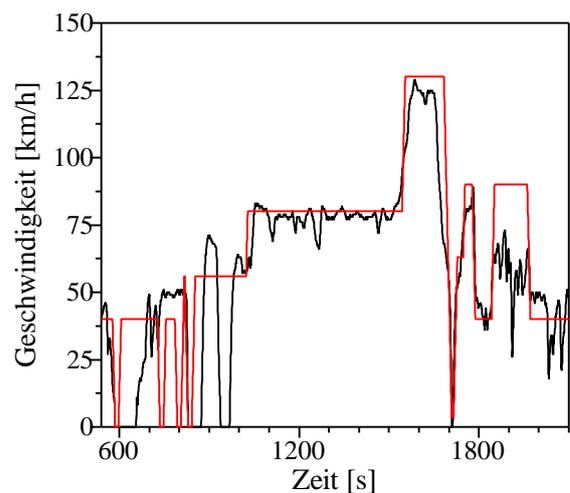


Abbildung 29: Einfaches prädiertes Geschwindigkeitsprofil an einem Ausschnitt des Überlandzyklus

Dieser Fehler wird deutlich bei Betrachtung des zurückgelegten Wegs. Über den gesamten Pendlerzyklus tritt so ein Fehler von 1,67 km auf ([Abbildung 30](#)), das entspricht einem Fehler von 5,5 %. Beim deutlich längeren Überlandzyklus ergibt sich sogar ein Fehler von 12,55 km ([Abbildung 31](#)), was einem Fehler von 17,4 % entspricht. Bei Betrachtung eines kürzeren Prädiktionshorizonts tritt im Überlandzyklus nach 1800 s bereits ein Fehler von 15,1 % auf. Dieser Fehler führt zu einem falschen Höhenprofil in der Prädiktion, wodurch der Energiebedarf für die Überwindung der Höhendifferenz zu falschen Zeitpunkten berechnet wird. Folglich könnten Überschreitungen der SOC-Grenzen vorausberechnet werden, die unter Umständen nicht eintreten würden.

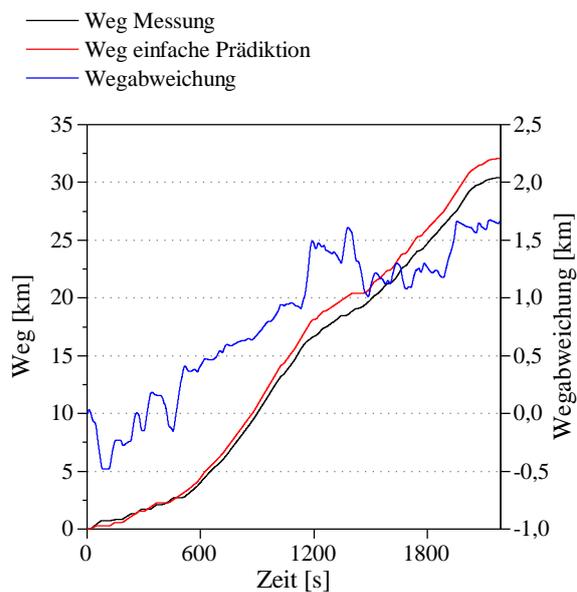


Abbildung 30: Zurückgelegter Weg bei einfacher Prädiktion und Wegabweichung zur Messung über den gesamten Pendlerzyklus

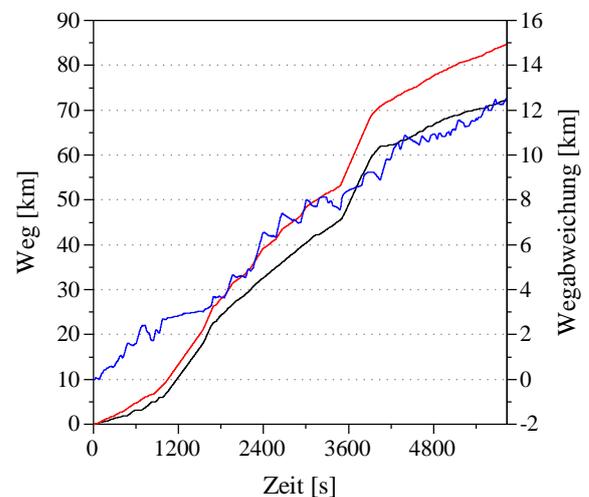


Abbildung 31: Zurückgelegter Weg bei einfacher Prädiktion und Wegabweichung zur Messung über den gesamten Überlandzyklus

Abgesehen vom Fehler im Weg, verursacht dieses einfache Geschwindigkeitsprofil weitere Fehler in der SOC-Berechnung. Diese beruhen im Wesentlichen auf falsch geschätzte Betriebspunkte und mangelnder Rekuperationsenergie. [Abbildung 32](#) zeigt beispielhaft die Abweichungen zwischen einem konstanten und einem gemessenen Geschwindigkeitsprofil, was zu falsch prädizierten Betriebsmodi führt. Das gemessene Geschwindigkeitsprofil spiegelt eine Fahrt auf einer ebenen Landstraße wider. Ebenfalls wird durch [Abbildung 32](#) verdeutlicht, dass Rekuperationspotenzial nicht identifiziert werden kann. Besonders in Bereichen, in denen aus Leistungsgründen mit dem Verbrennungsmotor gefahren wird, führen diese Situationen zu einem nicht vorhergesehenen Anstieg des Ladezustandes.

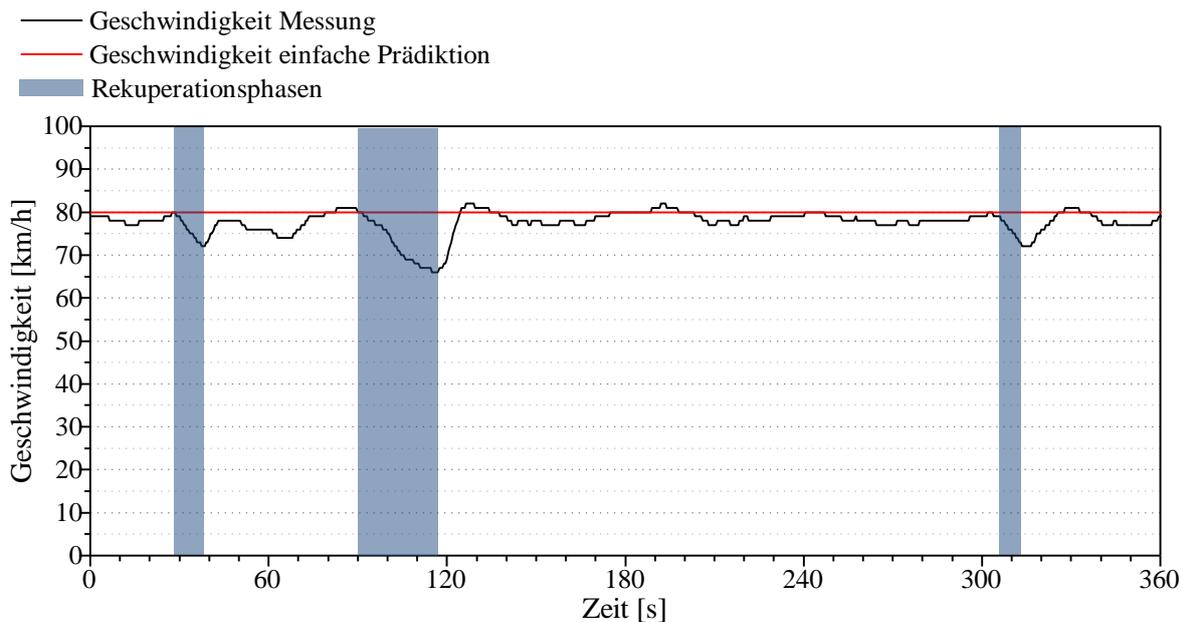


Abbildung 32: Betriebspunktfehler durch einfache Geschwindigkeitsprädiktion

Insgesamt ergibt sich aufgrund dieser vielen Ungenauigkeiten ein SOC-Fehler, der eine sinnvolle Prädiktion und Beeinflussung der Basisbetriebsstrategie nicht erlaubt. Folglich muss das Geschwindigkeitsprofil weiter verfeinert werden. Ziel dabei ist es, die Geschwindigkeitsschwankungen so zu berücksichtigen, dass sich der Ladezustand im Mittel so verändert, wie im realen Fahrzeug. Diese Geschwindigkeitsschwankungen entstehen aus einem ungleichmäßigen Fahrverhalten des Fahrers, aus Beeinflussungen durch andere Verkehrsteilnehmer und durch sonstige Umwelteinflüsse. Diesen drei Ursachen für die Schwankungen ist gemein, dass sie nicht vorhersagbar sind. Daher muss für die Berücksichtigung dieser auf statistische Verfahren zurückgegriffen werden. Stiegeler [28] erzeugt dieses notwendige Geschwindigkeitsrauschen mithilfe von Zufallszahlen, die die nächste Geschwindigkeit vorgeben. Beschränkt wird die nächste Geschwindigkeit von der halben maximalen Beschleunigung. Eine erweiterte Methode ist die Verwendung von Markovketten für die Bildung des Geschwindigkeitsrauschens wie es etwa von Necula [52] oder Karbowski et al. [53] verwendet wird. Das von letzterem erzeugte Geschwindigkeitsprofil wird erfolgreich in einer vorausschauenden Betriebsstrategie eingesetzt [54].

Um ein Geschwindigkeitsrauschen zu erzeugen, das dem des Fahrers nahe kommt, wurde für diese Arbeit die Methode mittels Markovketten verwendet. Diese Ketten bestehen aus den Übergangswahrscheinlichkeiten, um von einem Zustand in einen bestimmten nächsten Zustand zu gelangen. Das bedeutet, dass dem Übergang in jeden möglichen nächsten Zustand eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet ist. In Summe müssen alle Übergangswahrscheinlichkeiten 100 % ergeben. Die Übergangswahrscheinlichkeiten sind dabei nicht von vorherigen Zuständen abhängig. [55] Bei der Bildung eines Geschwindigkeitsprofils werden die Übergänge zwischen

verschiedenen Geschwindigkeiten betrachtet. In Abbildung 33 links wird anschaulich dargestellt, dass zum Zeitpunkt $t + 1$ jede mögliche Geschwindigkeit v_j mit der Wahrscheinlichkeit p_{ij} aus der Geschwindigkeit v_i zum Zeitpunkt t erreicht werden kann. Dabei klassifiziert i den Zustand vor dem Übergang und j jenen nach dem Übergang. In Abbildung 33 links wird dies für den Ausgangszustand v_3 und fünf mögliche Endzustände gezeigt. Diese Übergänge werden bei jedem Zeitschritt über den gesamten Geschwindigkeitszyklus angewendet. Die Übergangswahrscheinlichkeiten werden in der Übergangsmatrix definiert. Das bedeutet, dass für jeden Ausgangszustand eine Übergangswahrscheinlichkeit zu jedem Endzustand existiert. Dieser Zusammenhang wird durch die schematische Darstellung in Abbildung 33 rechts für eine Auswahl von drei Geschwindigkeiten verdeutlicht. Jeder Zustand ist mit sich selbst und jedem anderen Zustand mit der Übergangswahrscheinlichkeit p_{ij} verbunden.

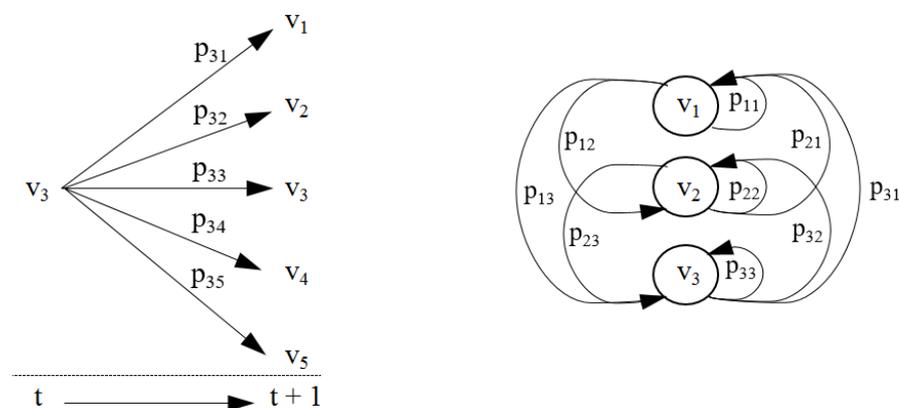


Abbildung 33: Markovübergänge von der Geschwindigkeit v_3 zum nächsten Zeitschritt und zeitunabhängige Darstellung der Markovübergänge zwischen drei Geschwindigkeiten

Da das Geschwindigkeitsprofil grundsätzlich dem einfachen prädizierten Geschwindigkeitsprofil folgen soll, werden bezogene Relativgeschwindigkeiten $v_{rel,bez}$ eingeführt (Gleichung (3-15)). Sie sind definiert als die Differenz aus gemessener Geschwindigkeit und der Geschwindigkeit im einfachen Geschwindigkeitsprofil und auf Letzteres bezogen.

$$v_{rel,bez} = \frac{v_{mess} - v_{einfach}}{v_{einfach}} \quad (3-15)$$

mit

$v_{rel,bez}$	[-]	Bezogene Relativgeschwindigkeit
v_{mess}	[m/s]	Gemessene Geschwindigkeit
$v_{einfach}$	[m/s]	Geschwindigkeit des einfachen Geschwindigkeitsprofils

Diese bezogenen Relativgeschwindigkeiten bilden die Ausgangs- und Endzustände bei den Markovübergängen. Folglich müssen zwischen diesen Zuständen Übergangswahrscheinlichkeiten gebildet werden (Gleichung (3-16)). Diese wurden anhand der Messdaten aus allen drei Messfahrten ermittelt. Da diese drei Fahrzyklen alle Geschwindigkeitsbereiche abdecken, erscheint dies als sinnvolle Stichprobe zur Ermittlung der Übergangswahrscheinlichkeiten. Die Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus der Häufigkeit des Übergangs zu einem bestimmten Endzustand aus einem bestimmten Anfangszustand dividiert durch die gesamte Anzahl an Übergängen aus diesem Anfangszustand.

$$P_{ij} = \frac{M_{ij}}{M_i} \quad (3-16)$$

mit

P_{ij}	[-]	Übergangswahrscheinlichkeit vom Zustand i nach j
M_{ij}	[-]	Anzahl der Übergänge vom Zustand i nach j
M_i	[-]	Anzahl der gesamten Übergänge vom Zustand i zu allen möglichen Zuständen $j = 1 \dots n$ (n ... Anzahl der möglichen Zustände)

Die Übergangsmatrix besteht aus den einzelnen Übergangswahrscheinlichkeiten (Gleichung (3-17)). Jede Spalte ist einem Ausgangszustand und jede Zeile einem Endzustand zugeordnet. Die Spalten definieren somit die Übergangswahrscheinlichkeiten von einem Ausgangszustand zu den möglichen Endzuständen.

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{1n} & \cdots & P_{nn} \end{pmatrix} \quad (3-17)$$

mit

\mathbf{P}	[-]	Übergangsmatrix
--------------	-----	-----------------

Es zeigt sich bei Betrachtung der gemessenen Geschwindigkeitsprofile, dass die Geschwindigkeitsabweichungen mit zunehmender Geschwindigkeit abnehmen. Dies könnte am verminderten Beschleunigungsvermögen liegen. Daher wurden für folgende Geschwindigkeitsbereiche eigene Übergangsmatrizen erstellt.

- Geschwindigkeitsbereich 1: ≤ 40 km/h
- Geschwindigkeitsbereich 2: > 40 km/h und ≤ 70 km/h
- Geschwindigkeitsbereich 3: > 70 km/h

Ebenfalls erscheint es sinnvoll, den aktuellen Beschleunigungszustand des Fahrzeugs zu berücksichtigen. Es wird erwartet, dass bei einer Beschleunigung im aktuellen Zeitschritt die Wahrscheinlichkeit eines Geschwindigkeitssprungs zu einer höheren Relativgeschwindigkeit

größer ist als zu kleineren. Daher wird eine weitere Unterteilung der Übergangsmatrizen vorgenommen. Diese Unterteilung wird klassifiziert durch die Beschleunigung, Verzögerung oder Konstantfahrt des Fahrzeugs im aktuellen Zeitschritt. Alle Unterteilungen führen zu insgesamt neun Übergangsmatrizen, die durch die Messdaten bestimmt werden. Dafür stehen zur Auswertung etwa 10800 Geschwindigkeitsübergänge zur Verfügung. Im Mittel ergibt das pro Übergangswahrscheinlichkeit zwölf, bzw. pro Übergangsmatrix 1200 Geschwindigkeitsübergänge aus der Messung. Es zeigt sich in der Auswertung, dass dennoch Ausreißer in der Übergangsmatrix vorhanden sind, diese aber in der Erstellung des Geschwindigkeitsprofils keine Probleme verursachen. Abbildung 34 zeigt beispielhaft eine der neun Übergangsmatrizen, wobei der Aufbau dem aus Gleichung (3-17) entspricht.

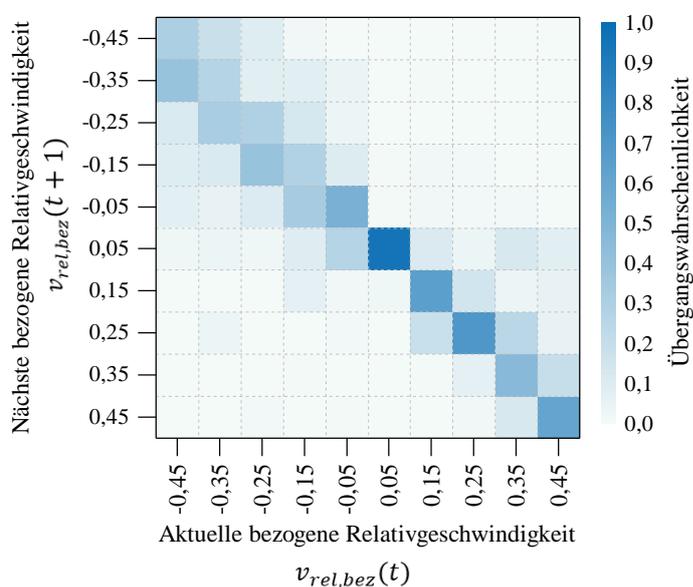


Abbildung 34: Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix bei ≤ 40 km/h und Beschleunigung im aktuellen Zustand

Zur Ermittlung der neuen bezogenen Relativgeschwindigkeit $v_{rel,bez}(t+1)$ wird zunächst ein Wahrscheinlichkeitsvektor gebildet. Dieser beinhaltet die kumulierten Übergangswahrscheinlichkeiten bei der aktuellen bezogenen Relativgeschwindigkeit $v_{rel,bez}(t)$, die bekannt ist. Mithilfe von MATLAB wird eine gleichverteilte Zufallsvariable im Bereich von null bis eins erstellt. Der Wahrscheinlichkeitsbereich des erstellten Vektors, der den Wert der Zufallsvariable einschließt, bestimmt die neue bezogene Relativgeschwindigkeit. Diese Berechnung wird für jeden Zeitschritt durchgeführt und ergibt ein bezogenes Geschwindigkeitsprofil für den jeweiligen Fahrzyklus. Ausgehend davon kann mit Gleichung (3-18) das statistische Geschwindigkeitsprofil, welches das Geschwindigkeitsrauschen enthält, berechnet werden.

$$v_{\text{präd,stat}} = v_{\text{einfach}} \cdot (1 + v_{\text{rel,bez}}) \quad (3-18)$$

mit

$$v_{\text{präd,stat}} \quad [\text{m/s}] \quad \text{Mit Statistik prädierte Geschwindigkeit}$$

Abbildung 35 und Abbildung 37 zeigen Ausschnitte der Prädiktion des Pendlerzyklus und des Überlandzyklus, erstellt mit der vorgestellten statistischen Methode. Ebenfalls in den Abbildungen zu sehen, ist das jeweilige gemessene Geschwindigkeitsprofil. Durch diese Methode sind größere Schwankungen in niedrigeren Geschwindigkeitsbereichen und geringere Schwankungen in mittleren bis hohen Bereichen entstanden. Dadurch wird die tatsächlich eingetretene Messfahrt deutlich besser prädiert als durch das einfache Geschwindigkeitsprofil. Besonders deutlich sind die Auswirkungen in Abbildung 36 und Abbildung 38 zu sehen, die den zurückgelegten Weg und die entsprechende Wegabweichung zur Messfahrt darstellen. Im Pendlerzyklus wird mit der statistischen Geschwindigkeitsprädiktion nur mehr eine Wegabweichung von 27 m am Ende des Zyklus erreicht und der maximal auftretende Fehler beträgt 3,9 %. Im längeren Überlandzyklus werden ebenfalls deutlich Zugewinne in der Prädiktionsgenauigkeit erzielt. Die Wegabweichung am Ende des Zyklus beträgt nur mehr 2,64 km mit einem maximalen Fehler von 7,2 %. Im Überlandzyklus entsteht etwa ab der Sekunde 1800 bis 3000 ein größerer Prädiktionsfehler, da in diesem Bereich das Fahrzeug langsamer unterwegs ist als vorausgerechnet. In diesem Bereich sind mehrere enge Kurven die eine deutlich reduzierte Geschwindigkeit erfordern. Da der Prädiktionsalgorithmus die Kurvenradien nicht berücksichtigt, entsteht an dieser Stelle dieser größere Fehler. Dennoch zeigt sich später, dass die Genauigkeit ausreichend für die prädiktive Betriebsstrategie ist.

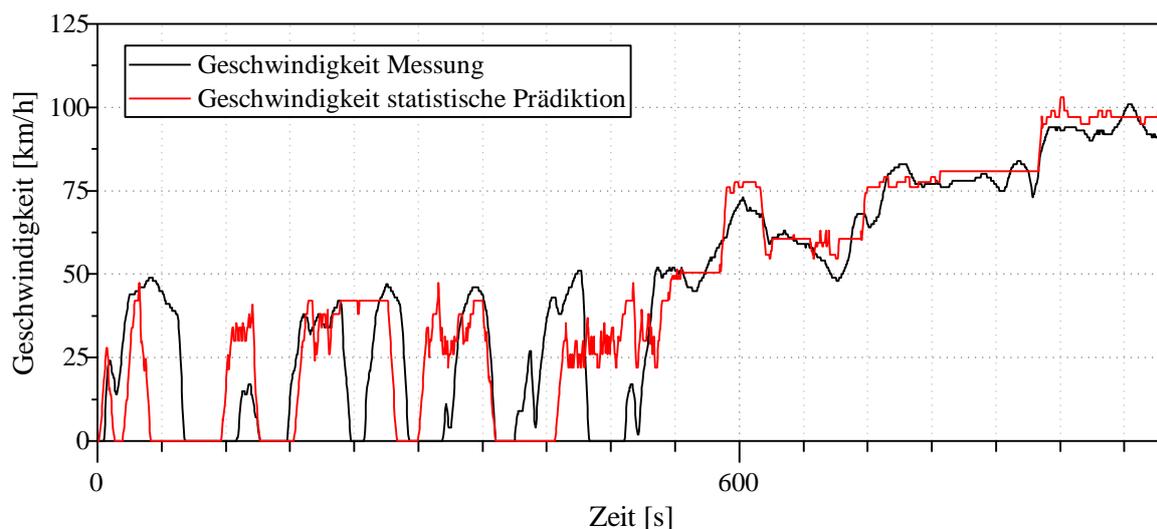


Abbildung 35: Statistisches prädiertes Geschwindigkeitsprofil an einem Ausschnitt des Pendlerzyklus

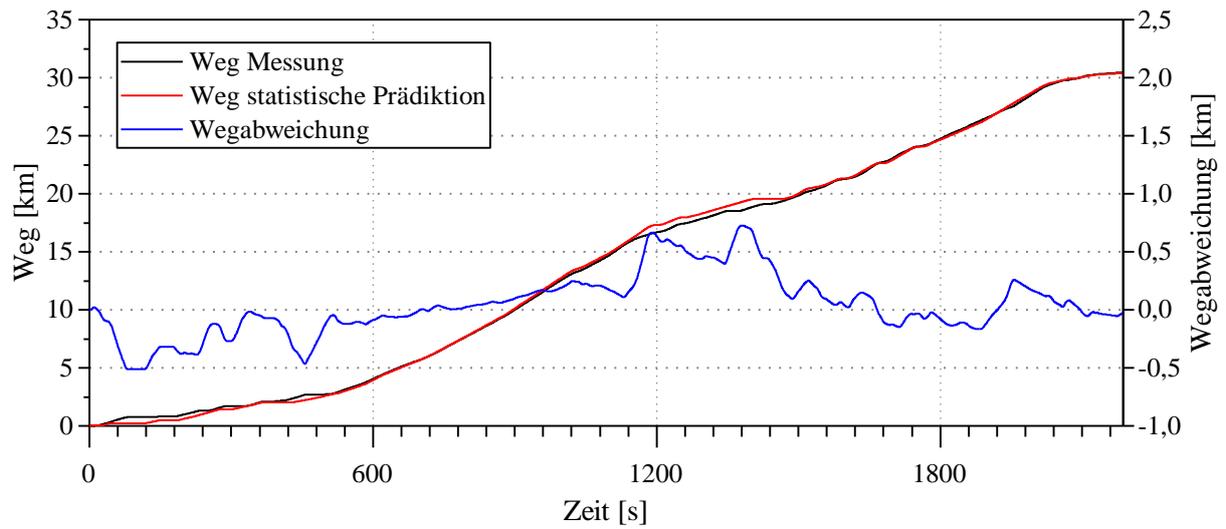


Abbildung 36: Zurückgelegter Weg bei statistischer Prädiktion und Wegabweichung zur Messung über den gesamten Pendlerzyklus

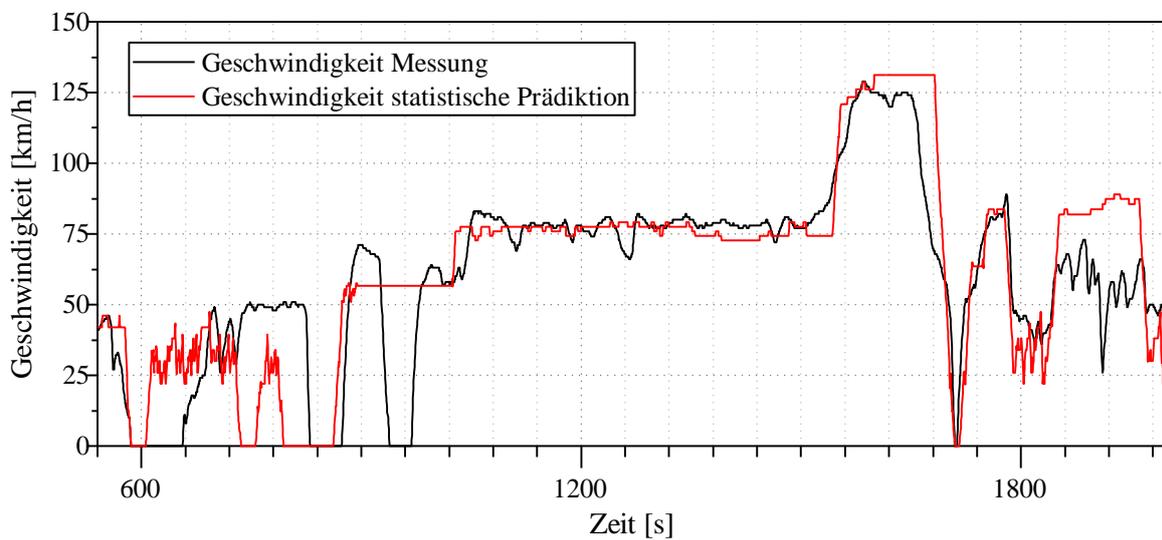


Abbildung 37: Statistisches prädiertes Geschwindigkeitsprofil an einem Ausschnitt des Überlandzyklus

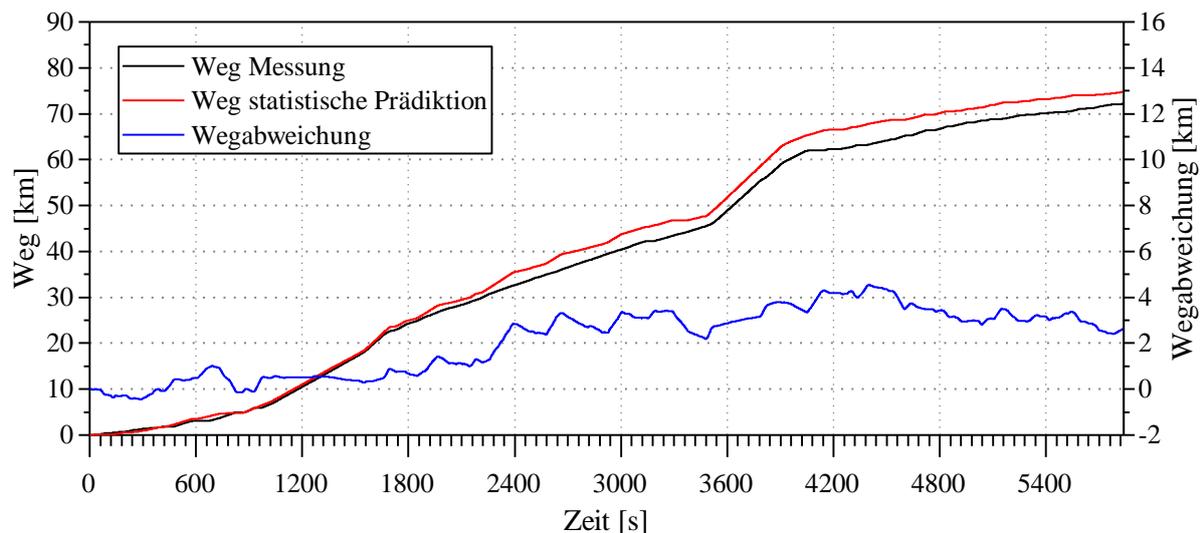


Abbildung 38: Zurückgelegter Weg bei statistischer Prädiktion und Wegabweichung zur Messung über den gesamten Überlandzyklus

3.4.1.3 Vereinfachte Betriebsstrategie

Mit dem prädictierten Geschwindigkeits- und Höhenverlauf können somit die notwendigen Fahrwiderstände berechnet werden. Für prädictive Eingriffe muss der zukünftige SOC-Verlauf der Batterie bekannt sein. Dafür ist es notwendig die Betriebsmodi des Antriebsstrangs ohne und mit Eingriffe vorauszuberechnen. Dafür muss die Basisbetriebsstrategie in der Prädiktion integriert sein. Diese entscheidet, ob die Fahrwiderstände durch den Verbrennungsmotor oder das elektrische System aufgewendet werden. Ebenfalls entscheidet sie über Rekuperation und Lastpunktanhebung, was ausschlaggebend für den SOC-Verlauf ist. Wie in Kapitel 3.3 angeführt, hat die Basisbetriebsstrategie moment- und wirkungsgradabhängige Entscheidungspfade für den Betriebsmodus. Bei einer exakten Abbildung dieser Strategie in der Prädiktion würde das bedeuten, dass alle Komponenten des Antriebsstrangs ebenfalls abgebildet werden müssen, um dessen Betriebspunkte und somit dessen Wirkungsgrade zu kennen. Dieses System über den gesamten Prädiktionshorizont vorauszuberechnen würde eine enorme Rechenleistung benötigen oder zu unbrauchbar langen Rechenzeiten im Fahrzeug führen. Daher wurde versucht, die Basisbetriebsstrategie mithilfe von Kennfeldern zu vereinfachen.

Im Wesentlichen bedeutet das eine Vereinfachung der Basisbetriebsstrategie auf zwei Kennfelder, die für das Laden und Entladen der Batterie verantwortlich sind. Dazu zählt ein Kennfeld über die Ladeleistung durch Lastpunktanhebung und ein Kennfeld, welches über elektrisches Fahren entscheidet.

Ersteres wird in [Abbildung 39](#) gezeigt und besteht aus drei Graphen, die die mittleren Ladeleistungen durch Lastpunktanhebung über die Geschwindigkeit des Fahrzeugs widerspiegeln. Da der hybride Antriebsstrang eine P3 Architektur besitzt, ist die Geschwindigkeit für die La-

deleistung ausschlaggebend. Die mögliche Leistung ist ebenfalls stark vom Beschleunigungszustand abhängig, daher wird zwischen den in Abbildung 39 gezeigten Beschleunigungszuständen unterschieden. Dieses Kennfeld vereinfacht somit nicht nur die Höhe des Lademoments durch die gezeigten Durchschnittswerte, es vereinfacht auch die wirkungsgradabhängige Entscheidung über eine Lastpunktanhebung. Durch Letzteres wird das durchschnittliche Lademoment in betroffenen Geschwindigkeitsbereichen verringert. Besonders deutlich wird dies im Bereich oberhalb von 80 km/h, in dem ein Lastpunktanheben nicht mehr effizient genug ist. Dies entsteht vor allem durch den relativ niedrigen Wirkungsgrad der Elektromaschine bei geringem generatorischen Moment und hoher Drehzahl.

Die Entscheidung über elektrisches Fahren wird durch eine Funktion in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Steigung der Fahrbahn getroffen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, über den in Kapitel 3.4.2 näher erläuterten Wirkungsgradfaktor I_η diese Entscheidung zu beeinflussen. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 40 dargestellt, in der die Geschwindigkeit bis zu der elektrisch gefahren wird, zu sehen ist. Wie zu erwarten, steigt die maximale elektrische Geschwindigkeit mit fallender Steigung und zunehmendem Wirkungsgradfaktor. Das bedeutet, dass bei Überschreiten dieser Geschwindigkeiten nur mehr die Leistung des Bordnetzes an der Batterie anliegt. Da in diesem Bereich der Verbrennungsmotor aktiv ist, ist Lastpunktanhebung möglich.

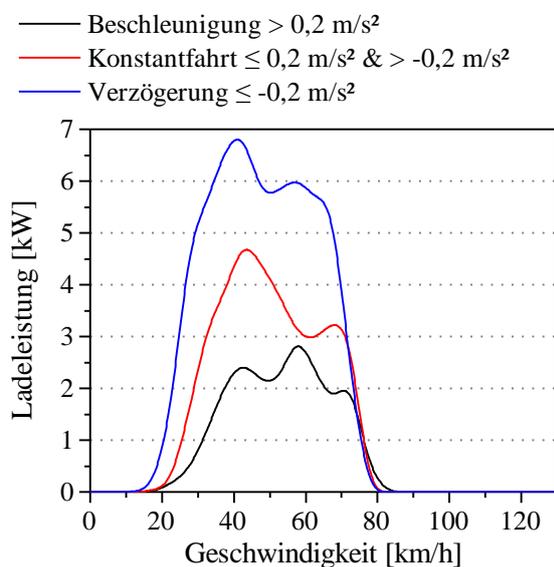


Abbildung 39: Dreistufiges Ladekennfeld

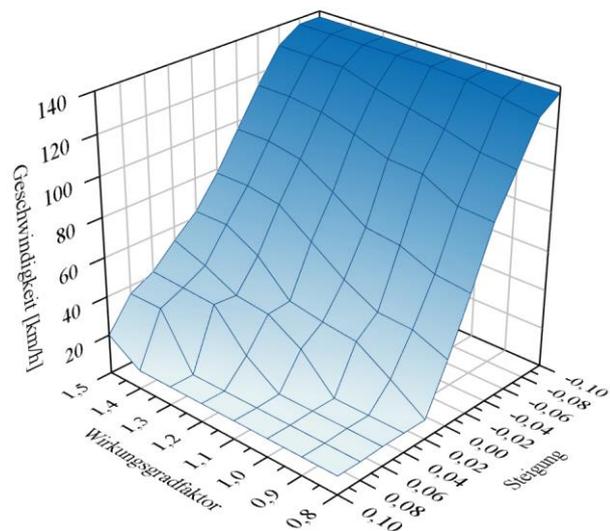


Abbildung 40: Kennfeld der elektrischen Maximalgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Wirkungsgradfaktor und der Steigung der Straße

3.4.1.4 SOC-Prädiktion im Fahrzyklus

Die vorgestellte Methode erlaubt es, den SOC-Verlauf des Fahrzeugs über die kommende Strecke vorzuberechnen. Wie der prädizierte Geschwindigkeitsverlauf und die Vereinfachungen

aufgrund der Rechenzeit vermuten lassen, entstehen dabei Ungenauigkeiten. Aus Versuchen mit verschiedenen Fahrzyklen hat sich gezeigt, dass mit den hier verwendeten Methoden ein Prädiktionshorizont von 1200 Sekunden (20 Minuten) zu guten Ergebnissen führt. Mit diesem Horizont kann bei kurzen Strecken bereits der gesamte Verlauf prädiziert werden. Beim Pendlerzyklus wird so bereits das halbe Fahrprofil vorausberechnet. Außerdem reicht dieser Horizont bei Zyklen mit ausgeprägtem Höhenprofil, wie etwa dem Überlandzyklus, um die Batterie auf die Steigungen rechtzeitig vorzubereiten. Die Berechnung der SOC-Prädiktion wird alle 30 Sekunden oder 200 Meter durchgeführt. Weil mit der Prädiktion eine langfristige Optimierung angestrebt wird, ist dieses Berechnungsintervall ausreichend. Zumal ändert sich innerhalb dieses Intervalls der SOC nicht so stark, um einen Eingriff der prädiktiven Betriebsstrategie zu erfordern.

Mit diesem Prädiktionshorizont ergeben sich für den Pendlerzyklus die in [Abbildung 41](#) gezeigten SOC-Prädiktionstrajektorien. Zur Übersicht werden nur einige Trajektorien der Prädiktion und der tatsächliche SOC-Verlauf gezeigt. Die Ungenauigkeiten in der Prädiktion sind sofort ersichtlich. Insbesondere zu Beginn des Abschnittes mit höheren Geschwindigkeiten, etwa bei Sekunde 650, entsteht eine größere Fehlschätzung durch eine Abweichung im Geschwindigkeitsprofil. Trotzdem sind die Vorausberechnungen ausreichend genau.

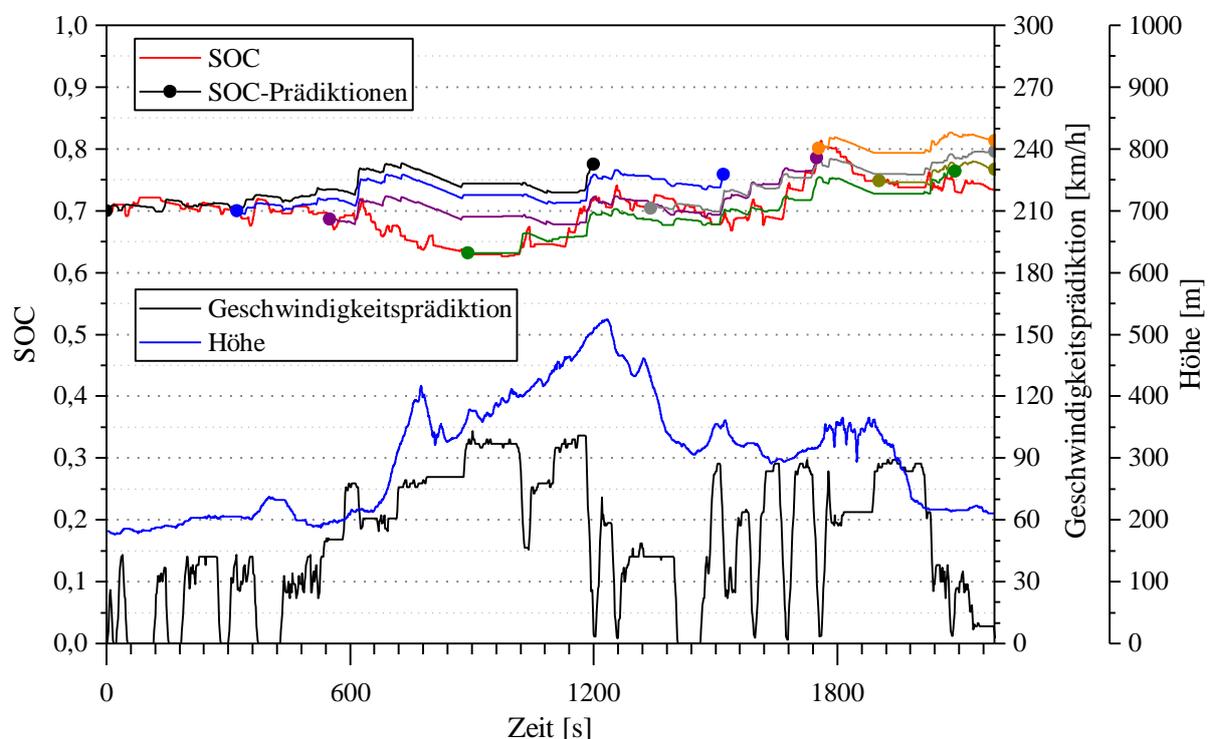


Abbildung 41: SOC - Prädiktion im Pendlerzyklus mit Prädiktionsstart zu unterschiedlichen Zeiten und Prädiktionshorizont von 1200 Sekunden

Eine Auswahl der Prädiktionstrajektorien im Überlandzyklus wird in Abbildung 42 gezeigt. Der Anfang und das Ende der Trajektorien wird durch einen Punkt symbolisiert. Die Abweichungen fallen deutlich größer aus als im flacheren Pendlerzyklus. Diese entstehen zum Großteil aus Fehlern in der Geschwindigkeitsprädiktion. Wie bereits in Kapitel 3.4.1.2 ausgeführt, bereiten besonders nicht vorhergesehene enge Kurven ein Problem. Dennoch ist die Tendenz der SOC-Trajektorien meist richtig und die Tendenz zum Überschreiten der SOC-Grenzen kann erkannt werden.

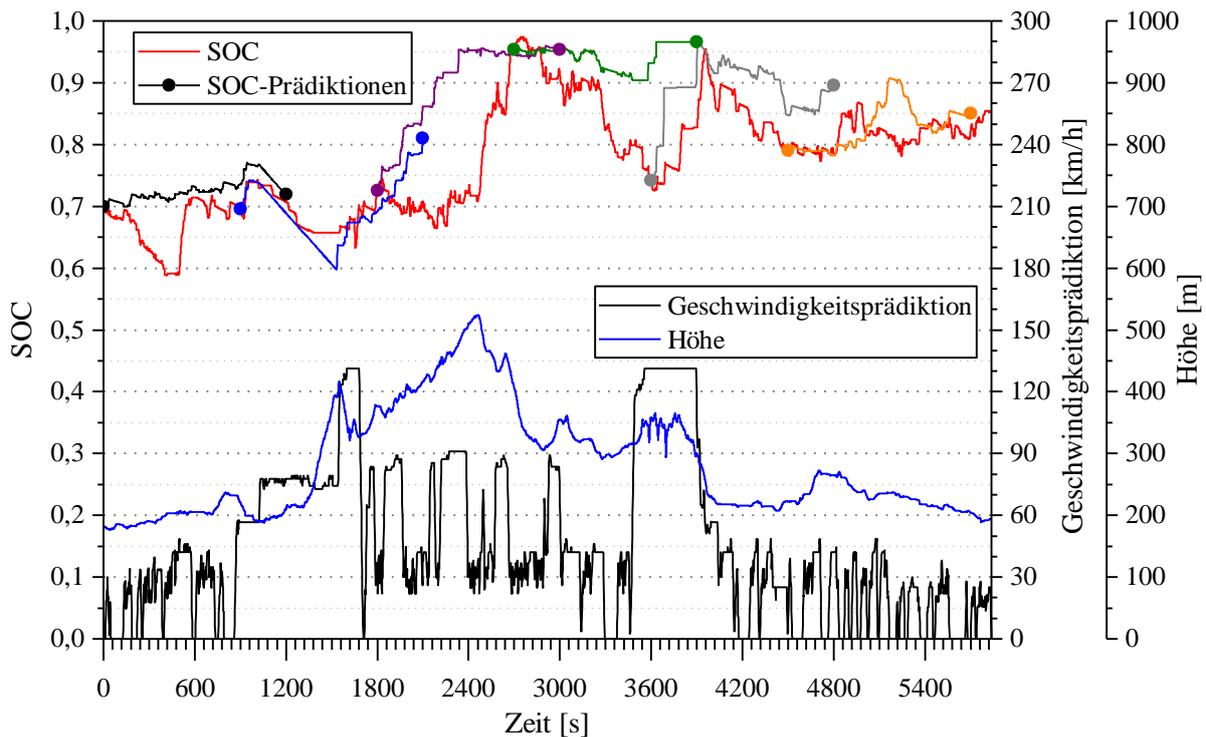


Abbildung 42: SOC - Prädiktion im Überlandzyklus mit Prädiktionsstart zu unterschiedlichen Zeiten und Prädiktionshorizont von 1200 Sekunden

3.4.2 Beeinflussung der Basisbetriebsstrategie

Die Beeinflussung der Basisbetriebsstrategie ist der Mechanismus, mit dem diese auf das kommende Fahrprofil optimiert wird. Sie bildet neben der Bildung der Prädiktion den Kern der prädiktiven Betriebsstrategie. Dabei erfolgt die Beeinflussung, indem Parameter der Basisbetriebsstrategie vorgegeben werden. Dies geschieht in den gleichen Intervallen, wie die Prädiktion erstellt wird. Zwischen diesen Intervallen bleiben die Parameter konstant. Die Momentenverteilung im Antriebsstrang wird weiterhin von der Basisbetriebsstrategie vorgenommen. Somit fungiert die prädiktive Betriebsstrategie als Erweiterung der Basisbetriebsstrategie. Die Schnittstelle zwischen den beiden Betriebsstrategien erfolgt über den Wirkungsgradfaktor I_η und über die Vorgabe des SOC-Soll.

Der Wirkungsgradfaktor I_η beruht auf der Annahme, dass durch Rekuperationsanteile der Ladewirkungsgrad verbessert wird, wie bereits in Abbildung 20 in Kapitel 3.3 veranschaulicht wurde. Die Berechnung des fiktiven Ladewirkungsgrades erfolgt nach Gleichung (3-19) mit historischen Wirkungsgradwerten und führt direkt zum Wirkungsgradfaktor in Gleichung (3-20).

$$\eta_{Laden} = \eta_{Laden,LPH} \cdot e_{LPH} + \eta_{Laden,Rek} \cdot e_{Rek} = \eta_{Laden,LPH} \cdot I_\eta \quad (3-19)$$

$$I_\eta = e_{LPH} + \frac{\eta_{Laden,Rek} \cdot e_{Rek}}{\eta_{Laden,LPH}} \quad (3-20)$$

mit

$\eta_{Laden,LPH}$	[-]	Ladewirkungsgrad durch Lastpunktanhebung
e_{LPH}	[-]	Anteil der Gesamtenergie durch Lastpunktanhebung
$\eta_{Laden,Rek}$	[-]	Ladewirkungsgrad durch Rekuperation
e_{Rek}	[-]	Anteil der Gesamtenergie durch Rekuperation
I_η	[-]	Wirkungsgradfaktor

Der Wirkungsgradfaktor I_η vereinfacht die Berechnung des Gesamtladewirkungsgrades in die Effizienz des Ladens durch Lastpunktanhebung, multipliziert mit dem Wirkungsgradfaktor. Er ist somit ein Maß für den Anteil an Rekuperationsenergie in der Batterie und damit maßgebend für den Ladewirkungsgrad. Wie bereits in Gleichung (3-1) gezeigt, ist η_{Laden} gemeinsam mit $\eta_{Entladen}$ verantwortlich für die Wahl zwischen elektrischem und verbrennungsmotorischem Betrieb. Über die Variation von I_η ist es damit möglich, die Entladung der Batterie wirkungsgradbasierend zu steuern. Daher dient der Wirkungsgradfaktor in der prädiktiven Betriebsstrategie als zentraler Stellhebel für den Konsum elektrischer Energie.

3.4.2.1 Startwert und Variationsbereich

Für die Variation des Wirkungsgradfaktors muss jedoch zunächst ein Bereich gefunden werden, indem die Basisbetriebsstrategie ausreichend beeinflusst werden kann, um den elektrischen Energieverbrauch in sinnvollem Maß zu steuern. Außerdem muss ein Startwert definiert werden, von dem die Variation des Wirkungsgradfaktors beginnt.

In Simulationen zeigt sich, dass als Startwert die Wahl von I_η nach dem Anteil an rekuperierter Energie nicht sinnvoll ist, da der elektrische Betrieb mit Rekuperationsenergie dem VKM-Betrieb zu oft überlegen ist. Der häufige Einsatz führt so zu einer zu starken Entladung der Batterie, wodurch die untere Grenze der Batterie zu oft unterschritten wird. Das System ist bei dieser Einstellung nicht mehr fähig, ein SOC-Niveau zu halten, bei dem alle Hybridfunktionen verfügbar sind. Daher ist es notwendig, eine I_η Einstellung zu finden, bei der ein ausgewogenes

Verhältnis von Laden und Entladen der Batterie besteht. Zur Bestimmung einer solchen Einstellung wurde der Pendlerzyklus herangezogen, da er vom Geschwindigkeitsprofil breit gefächert ist, allerdings keine Extremsituationen bezüglich des Höhenprofils oder der Verkehrslage beinhaltet.

Zur Ermittlung der besten Einstellung wurden Simulationen mit über den Zyklus konstanter I_η Einstellung durchgeführt. Dabei wurde die feste Einstellung für I_η von 0,8 bis 1,6 variiert. Ausgangspunkt für die Berechnungen war ein SOC von 70 % mit dem Ziel diesen Zustand am Ende des Zyklus wieder zu erreichen. Wie in [Abbildung 43](#) ersichtlich, konnte dies mit den Einstellungen 1,0 und 1,1 gut erreicht werden. Es ist außerdem klar ersichtlich, dass I_η von 0,8 bereits die erste obere SOC-Grenze der Batterie erreicht. Dies geschieht durch den geringen Einsatz des elektrischen Betriebs und der damit verbundenen geringen Entladung des Energiespeichers. Das gegenteilige Extrem ist bei I_η von 1,6 zu beobachten, wo das SOC-Niveau häufig die erste untere Grenze erreicht.

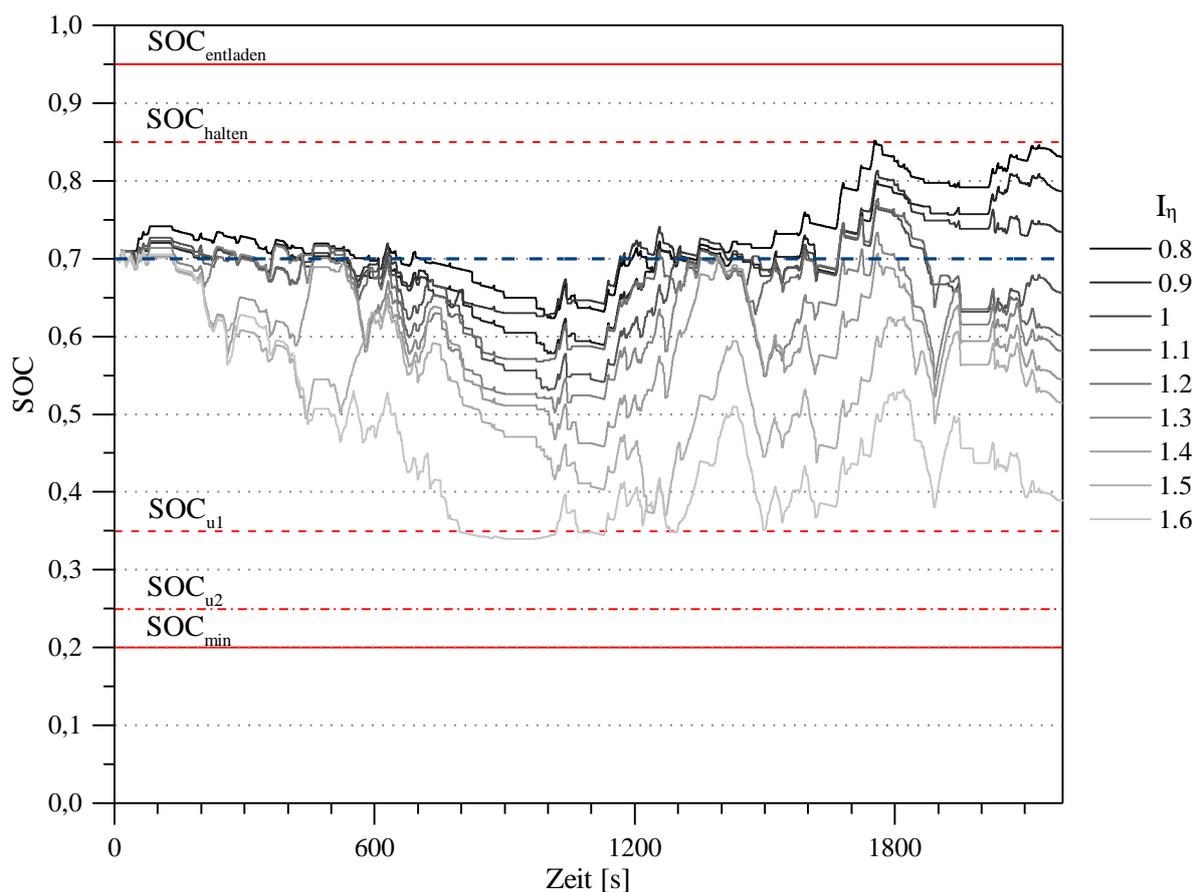


Abbildung 43: SOC-Verläufe im Pendlerzyklus bei verschiedenen über den Zyklus konstant gehaltenen I_η Einstellungen

Die Auswirkungen dieser Einstellungen auf den Energieverbrauch und die Art der Energiegewinnung ist in [Abbildung 44](#) zusammengefasst. Dabei ist anzumerken, dass bei Zyklen die den

Soll-SOC von 70 % am Ende unterschreiten, die fehlende Energie durch eine fiktive spätere Lastpunktanhebung korrigiert wurde. Dabei wurde der zuvor angegebene mittlere Ladewirkungsgrad bei Lastpunktanhebung ($\eta_{Laden,LPH}$) von 27,5 % verwendet. Das bedeutet, dass der Kraftstoff zum Laden auf einen SOC von 0,7 hinzugerechnet wurde. Damit ergibt sich ein minimaler Kraftstoffverbrauch über den Zyklus bei einer Einstellung von $I_\eta = 1,0$. Bei Reduktion unter 1,0 kann die Energie aus der Rekuperation nicht ausreichend ausgenutzt werden, wodurch der Kraftstoffverbrauch wieder steigt. Bei Erhöhung über 1,0 steigt der elektrisch zurückgelegte Weg. Diese Ergebnisse führen zu einem Ausgangswert für den Wirkungsgradfaktor von 1,0.

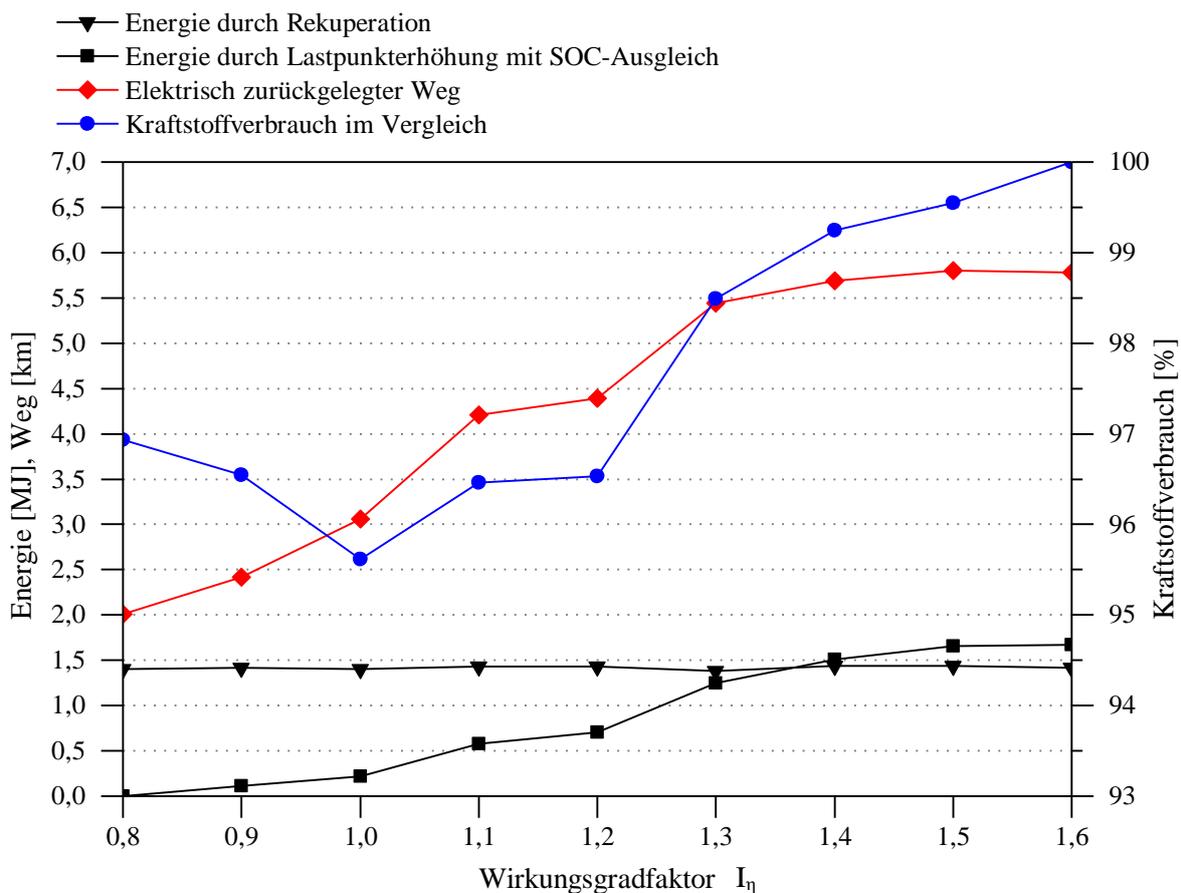


Abbildung 44: Ergebnisse der I_η Variation im Pendlerzyklus

3.4.2.2 Auswirkungen der Parameterstellung

Wie bereits das Kennfeld in Abbildung 40 zeigte, beeinflusst der Wirkungsgradfaktor die maximale Geschwindigkeit, mit der elektrisch gefahren wird. Das bedeutet eine Erhöhung von I_η führt zu einem höheren Konsum elektrischer Energie und eine Reduktion zu einem geringeren elektrischen Verbrauch. Die Vorgabe des SOC-Soll beeinflusst die Ladestrategie, da nur bei Unterschreitung dieser Vorgabe, die Batterie durch Lastpunktanhebung geladen wird. Ladung durch Rekuperation findet immer statt, solange der SOC 95 % nicht überschreitet. Insgesamt bleiben die Maßnahmen, die in Tabelle 5 in Kapitel 3.3 angeführt wurden, weiterhin aktiv. Die prädiktive Betriebsstrategie versucht lediglich zu verhindern, dass diese Grenzen überschritten

werden. Besonderes Augenmerk hat dabei die Einschränkung der Rekuperation, da mit ihr die Batterie geladen werden kann, ohne Kraftstoff zu verbrennen.

Der Wirkungsgradfaktor beeinflusst nicht nur die Geschwindigkeit bis zu der elektrisch gefahren wird, er kann gleichzeitig als Maß für den Anteil an rekuperierter Energie in der Batterie aufgefasst werden. Die Bildung des Wirkungsgradfaktors (Gleichung (3-20)) legt nahe, ihn in die Bereiche $I_\eta > 1$ und $I_\eta < 1$ zu unterteilen.

$I_\eta > 1$ erhöht den Ladewirkungsgrad auf ein Maß, das größer ist als der Ladewirkungsgrad durch Lastpunktanhebung. Dies setzt voraus, dass Teile der Energie durch Rekuperation gewonnen wurden. Daher ist eine Einstellung größer 1 nur sinnvoll, wenn Rekuperationsenergie vorhanden ist, da sonst kein Wirkungsgradvorteil mehr vorhanden wäre was einen reinen VKM Betrieb effizienter macht. Erhöhung des Faktors führt folglich zu vermehrtem Einsatz des rein elektrischen Modus, was die Entladung der Batterie steigert. Dies kann notwendig sein, wenn der Energiespeicher auf eine erneute Rekuperationsphase vorbereitet wird. In diesen Phasen ist eine gleichzeitige Lastpunktanhebung nicht sinnvoll und ist damit zu unterbinden.

$I_\eta < 1$ verschlechtert künstlich den Wirkungsgrad der gespeicherten Energie auf ein Maß, das schlechter als $\eta_{Laden,LPH}$ ist. Dies führt zu einem reduzierten Einsatz des elektrischen Betriebs, was wiederum zu einer geringeren Entladung der Batterie führt.

3.4.2.3 Beeinflussungsschritte

Die Parameterwahl für eine optimierte Strategie wird regelbasiert ermittelt. Aufgrund der schlanken Prädiktion stellen Optimierungsschleifen mit maximal sechs Durchläufen für die Laufzeit kein Problem dar. Der prinzipielle Vorgang in der Parameterfindung ist in [Abbildung 45](#) dargestellt. Dieser beginnt mit einer Initialisierung und einer anschließenden Anpassung des Geschwindigkeitsprofils an die tatsächliche momentane Geschwindigkeit. Sollten sich die Umgebungsbedingungen ändern, ist zusätzlich eine neue Prädiktion der Geschwindigkeit notwendig. Übersteigt der prädizierte SOC-Verlauf einen SOC von 75 %, wird der SOC-Soll auf 35 % reduziert. Dadurch wird ein Laden durch Lastpunktanhebung bis zum Unterschreiten dieser Grenze unterbunden. Bleibt der SOC-Soll auf 70 %, ist die geschwindigkeitsabhängige Absenkung durch die Basisbetriebsstrategie weiterhin aktiv. Das ist notwendig, da die Prädiktion nicht auf die schnellen Geschwindigkeitsänderungen reagieren kann. Bei einer Absenkung auf 35 % wird die geschwindigkeitsabhängige Absenkung deaktiviert und der SOC-Soll behält konstant 35 %. Befindet sich das SOC-Maximum nach der SOC-Soll Reduktion unter 95 %, bleibt I_η bei 1,0. Eine Erhöhung von I_η auf einen Wert über 1 bei gleichzeitiger Lastpunktanhebung führt zu reduzierter Effizienz des Antriebsstrangs. Daher wird eine Erhöhung des Wirkungsgradfaktors nur bei abgesenktem SOC-Soll durchgeführt. Wird ohne Lastpunktanhebung

ein SOC-Maximum von über 95 % vorausberechnet, wird der Wirkungsgradfaktor in Schritten von 0,1 erhöht, bis diese Grenze nicht mehr überschritten wird oder der Maximalwert von I_η mit 1,5 erreicht wird. Die Variation beginnt erst mit einem deutlichen Abstand in der SOC-Schwelle im Vergleich zur ersten Maßnahme, um ein unnötiges Eingreifen aufgrund von Prädiktionsungenauigkeiten zu verhindern. Da die Erhöhung von I_η zum Verbrauch elektrischer Energie auch bei schlechteren Wirkungsgraden führt, darf diese Funktion nur eingesetzt werden, wenn zukünftige Rekuperationsenergie nicht mehr gespeichert werden könnte. Ein Kriterium, welches die Erhöhung von I_η unterbinden kann, ist die Unterschreitung der SOC-Grenze von 35 % durch die SOC-Trajektorie bis zum Maximum. Dies stellt sicher, dass die gesamte Batteriekapazität ausgenutzt wird.

Wird im kommenden Fahrprofil ein Stau prädiziert, so wird die zuvor erklärte Optimierungsschleife durch eine stauspezifische Betriebsstrategie ausgehebelt. Damit dieser Sonderfall aktiviert wird, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein. Es muss durch die Verkehrsdaten ein Stau vorhergesagt werden und ein geschwindigkeitsabhängiges Staukriterium muss erfüllt sein. Befindet sich ein Stau innerhalb des Prädiktionshorizonts von 900 Sekunden, kann er rechtzeitig erkannt werden, indem die prädizierte durchschnittliche Geschwindigkeit in diesem Horizont unter die erste Schwelle in [Tabelle 6](#) fällt. Dadurch wird die Vorbereitung des Energiespeichers eingeleitet, indem der Wirkungsgradfaktor leicht reduziert wird und der SOC-Soll auf 80 % erhöht wird. Dies bewirkt ein verstärktes Laden vor einem Stau. Da der Prädiktionshorizont zu kurz ist, um längere Stauphasen zu erkennen, wird diese Maßnahme vor jedem Stau eingesetzt. Das Erreichen des Staus wird durch das zweite Kriterium identifiziert, indem dessen Schwelle bei einem kürzeren Prädiktionshorizont unterschritten wird. Die in [Tabelle 6](#) gezeigten Maßnahmen bewirken während der Stauphase einen erweiterten elektrischen Betrieb des Fahrzeugs.

Tabelle 6: Kriterien für die Stauspezifische Betriebsstrategie

	Schwelle	Prädiktionshorizont	Wirkungsgradfaktor	SOC-Soll
Staukriterium 1 Vorbereitung	< 3 m/s	900 s	0,9	80 %
Staukriterium 2 Durchfahren	< 1 m/s	300 s	1,4	35 %

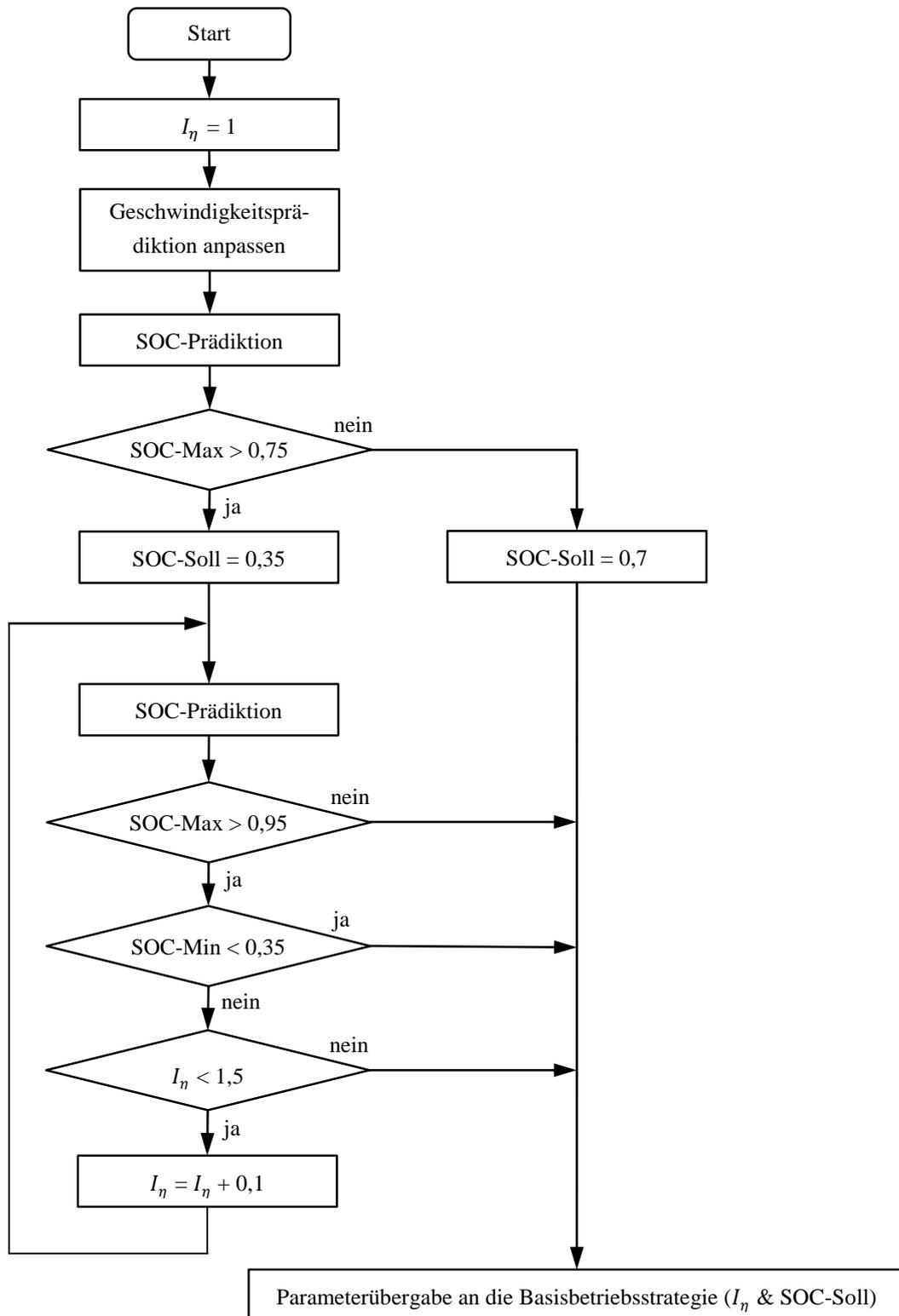


Abbildung 45: Flussdiagramm der Optimierungsschleife gegen Überschreitung der oberen SOC-Grenzen

4 Ergebnisse

In Kapitel 3.4 wurde bereits festgestellt, dass der Pendlerzyklus die Batteriekapazität nicht ausnutzt. Es werden weder die oberen noch die unteren SOC-Eingriffsgrenzen erreicht. Dementsprechend sind keine Eingriffe durch die prädiktive Betriebsstrategie notwendig. Da die prädiktive Betriebsstrategie mit dem Startwert des Wirkungsgradfaktors nicht der Konfiguration der Basisbetriebsstrategie entspricht, gleichen sich die SOC-Verläufe dennoch nicht. Ohne Eingriff erwartet sich die Prädiktion über weite Teile des Zyklus ein Überschreiten der ersten oberen Eingriffsgrenze der prädiktiven Betriebsstrategie. Daher wird der SOC-Soll in diesen Momenten abgesenkt, wie im oberen Teil von Abbildung 46 gezeigt. Diese Maßnahme ist ausreichend, um keine Eingriffsgrenzen der Basisbetriebsstrategie zu überschreiten. In Abbildung 46 unten ist ersichtlich, dass eine weitere Anpassung des Wirkungsgradfaktors nicht erfolgt und er somit über dem kompletten Zyklus auf 1,0 konstant gehalten wird.

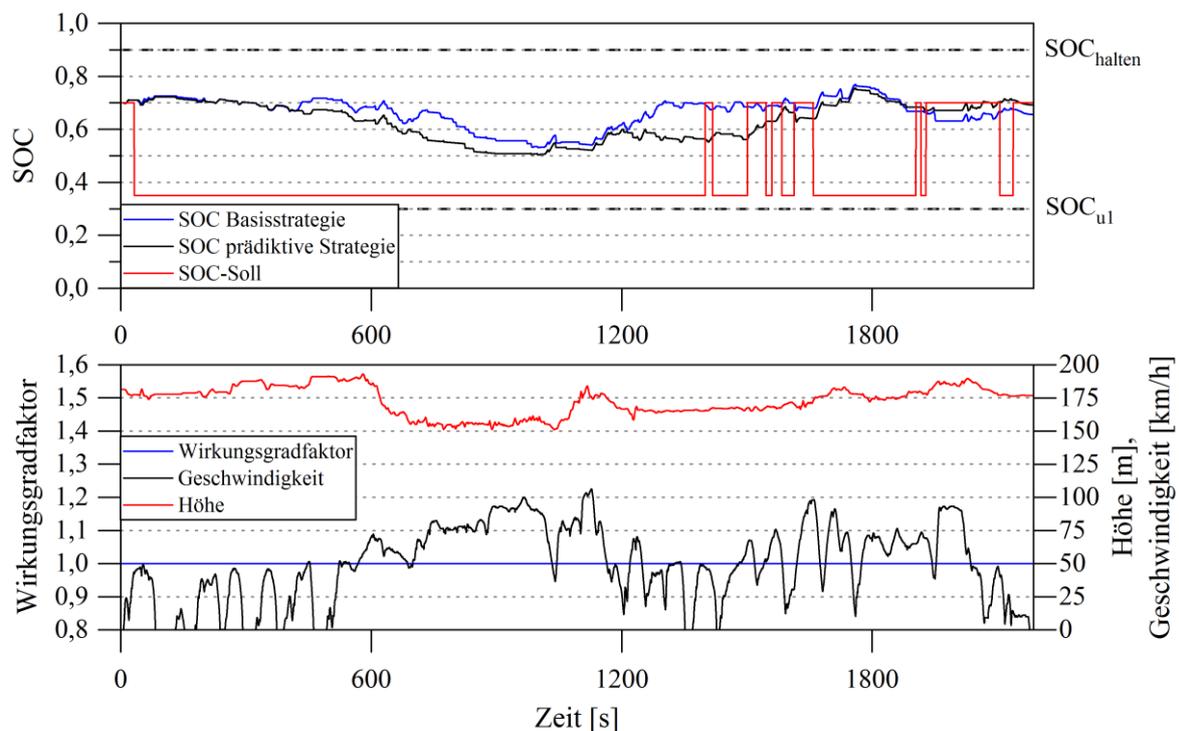


Abbildung 46: SOC-Verlauf mit und ohne prädiktiver Betriebsstrategie sowie die Parametervorgaben an die Basisstrategie im Pendlerzyklus

Sinnvoller erweist sich die Prädiktion im Überlandzyklus. In diesem Zyklus wird die erste und zweite obere Eingriffsgrenze mit der Basisbetriebsstrategie einmal überschritten. Allerdings befindet sich der SOC nur für etwa vier Minuten über der ersten oberen Grenze. Die meiste Zeit davon wird lediglich der elektrische Verbrauch erhöht und Rekuperation nicht eingeschränkt. Entsprechend gering ist das Verbrauchseinsparungspotenzial mit der prädiktiven Betriebsstrategie. Dennoch erkennt diese das zukünftige Überschreiten der oberen Grenzen und beeinflusst

rechtzeitig die Basisstrategie. Diese Beeinflussung ist in [Abbildung 47](#) oben, durch Absenkung des SOC-Soll und unten, durch Erhöhung des Wirkungsgradfaktors zu sehen. Die Anhebung des Wirkungsgradfaktors wird vor und während des langen Gefälles ab etwa Sekunde 2400 durchgeführt. Dies ist notwendig, um den Batterieladestatus auf die bevorstehende Rekuperation vorzubereiten und zum anderen, um durch erhöhten elektrischen Verbrauch zwischen den Rekuperationsphasen ein Überschreiten von Eingriffsgrenzen der Basisstrategie zu vermeiden. Durch diese Eingriffe der Prädiktion in die Basisbetriebsstrategie kann ein Überschreiten der SOC-Eingriffsgrenzen gänzlich verhindert werden, wie in [Abbildung 47](#) oben ersichtlich ist. Dennoch führen die Eingriffe nicht zu einem optimalen Ergebnis. So wird der SOC-Soll von 35 % schon deutlich vor Sekunde 2400 und somit vor der intensiven Rekuperationsphase erreicht. Dies führt dazu, dass die Batterie durch Lastpunktanhebung auf diesem SOC-Niveau gehalten werden muss und somit zusätzlich Kraftstoff verbraucht wird. Insbesondere da die elektrische Energie zuvor durch Anhebung des Wirkungsgradfaktors vermehrt mit niedrigeren Wirkungsgraden verbraucht wurde, ist diese vorzeitige SOC-Absenkung problematisch. Verursacht wird der übermäßige Eingriff durch die Ungenauigkeiten in der Geschwindigkeitsprädiktion, wodurch ein geringerer elektrischer Energiekonsum vorausberechnet wurde.

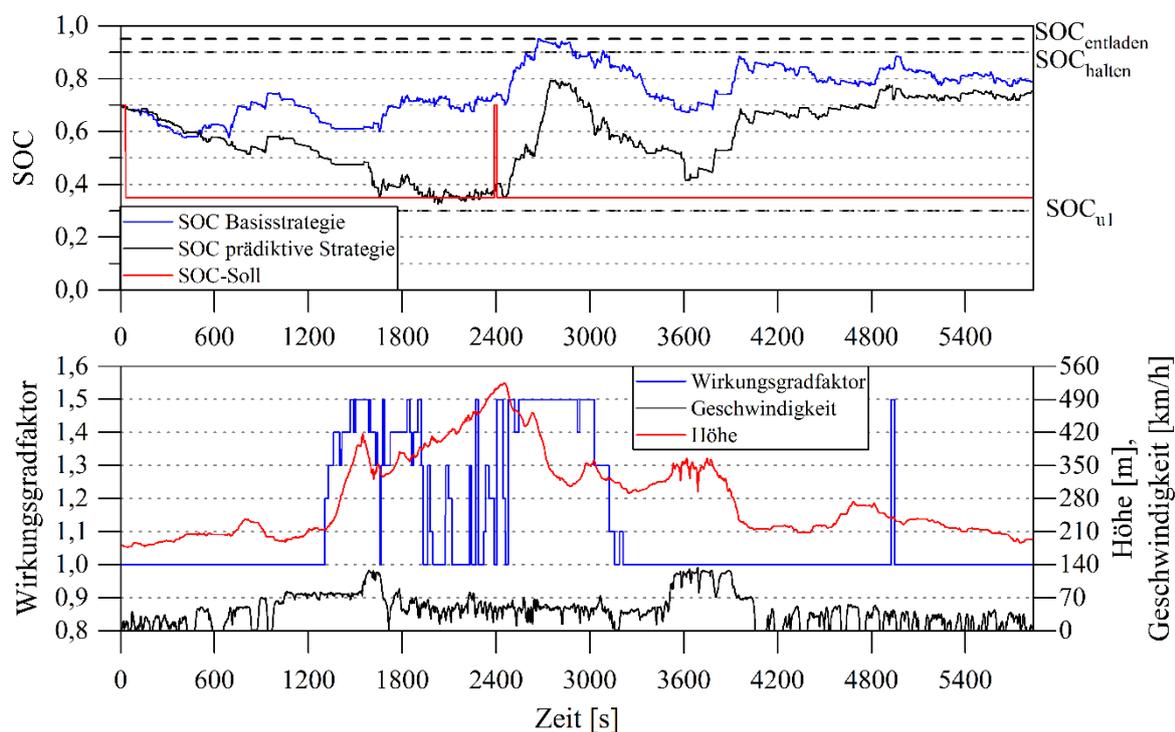


Abbildung 47: SOC-Verlauf mit und ohne prädiktiver Betriebsstrategie sowie die Parametervorgaben an die Basisstrategie im Überlandzyklus

Prädiktionsungenauigkeiten verursachen Eingriffe in die Basisbetriebsstrategie, die in manchen Situationen zu schlechteren Systemzuständen führen. Außerdem ist der Batteriespeicher so groß, dass er selbst mit der Basisbetriebsstrategie und ausgeprägten Höhenprofil kaum ausgenutzt wird. Daher sind die Potenziale für Kraftstoffeinsparungen durch die Erweiterung mit

einer Prädiktion äußerst gering. In manchen Fahrprofilen zeigt sich sogar eine Verschlechterung durch die oben erläuterten Effekte bei Fehlschätzungen. Zusammengefasst zeigt sich in [Abbildung 48](#) keine signifikante Veränderung des Kraftstoffverbrauchs durch die Erweiterung mit einer prädiktiven Betriebsstrategie.

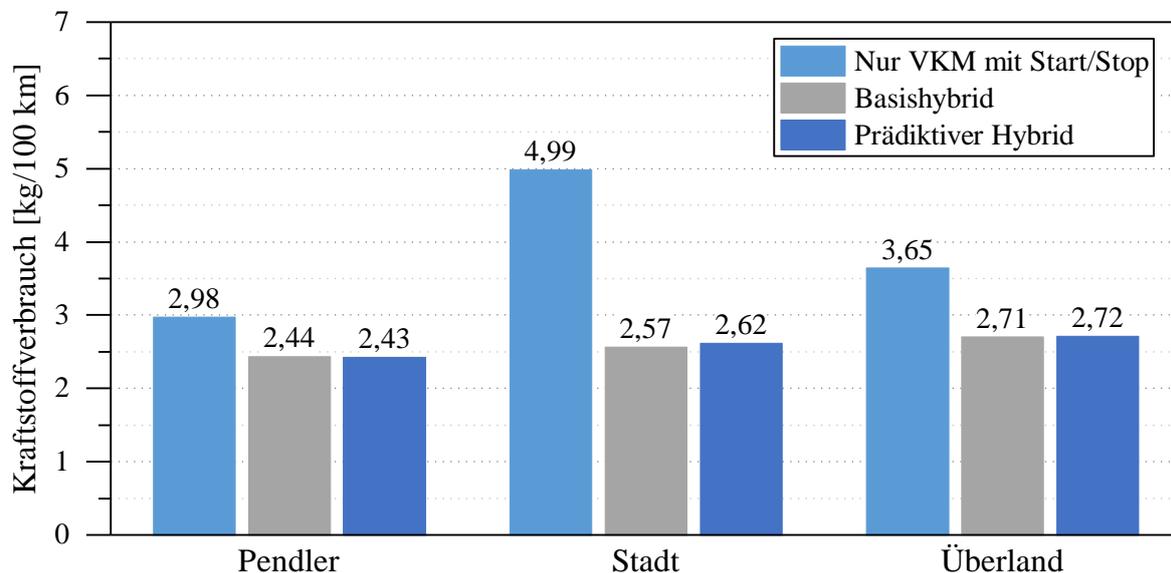


Abbildung 48: Zusammenfassung der Verbrauchsergebnisse in den betrachteten Zyklen

4.1 Versuch mit extremen Höhenprofil

Zur Überprüfung möglicher Einsparungspotenziale mit der ausgeführten prädiktiven Betriebsstrategie wurde zusätzlich ein spezielles Fahrprofil herangezogen. Hierbei handelt es sich um einen Ausschnitt des Überlandzyklus und beinhaltet die Passage mit den ausgeprägten Steigungen. Die Informationen zur Berechnung des prädizierten Geschwindigkeitszyklus entsprechen ebenfalls denen des Überlandzyklus. Das zu fahrende Geschwindigkeitsprofil wurde lediglich um eine Beschleunigungsrampe am Beginn und eine Verzögerungsrampe am Ende des Zyklus ergänzt.

Im Vergleich zum zuvor analysierten Überlandzyklus hat der Ladezustand am Beginn der Steigungspassage einen Wert von 70 % und ist damit höher, da die Berechnung des Zyklus wieder mit einem SOC von 70 % beginnt. [Abbildung 49](#) zeigt den sich ergebenden SOC-Verlauf über dem gesamten Fahrprofil. Da der SOC zu Beginn des Fahrzyklus höher ist, ist der Batterieladezustand über weitere Bereiche in den oberen Eingriffsgrenzen der Basisbetriebsstrategie. Die prädiktive Betriebsstrategie erkennt diese zukünftigen Überschreitungen und steuert wie bereits im gesamten Überlandzyklus rechtzeitig entgegen. Veranschaulicht wird das durch die Absenkung des SOC-Soll in [Abbildung 49](#) oben und durch die Anhebung des Wirkungsgradfaktors in [Abbildung 49](#) Mitte. Die Ungenauigkeiten in der Prädiktion des SOC bestehen auch in diesem Zyklus, allerdings wird der abgesenkte SOC-Soll nicht zu früh erreicht, da der SOC am

Beginn der Steigung höher ist. Damit ist der Batteriespeicher optimal auf das Gefälle vorbereitet, wodurch später keine Eingriffsgrenzen der Basisbetriebsstrategie überschritten werden.

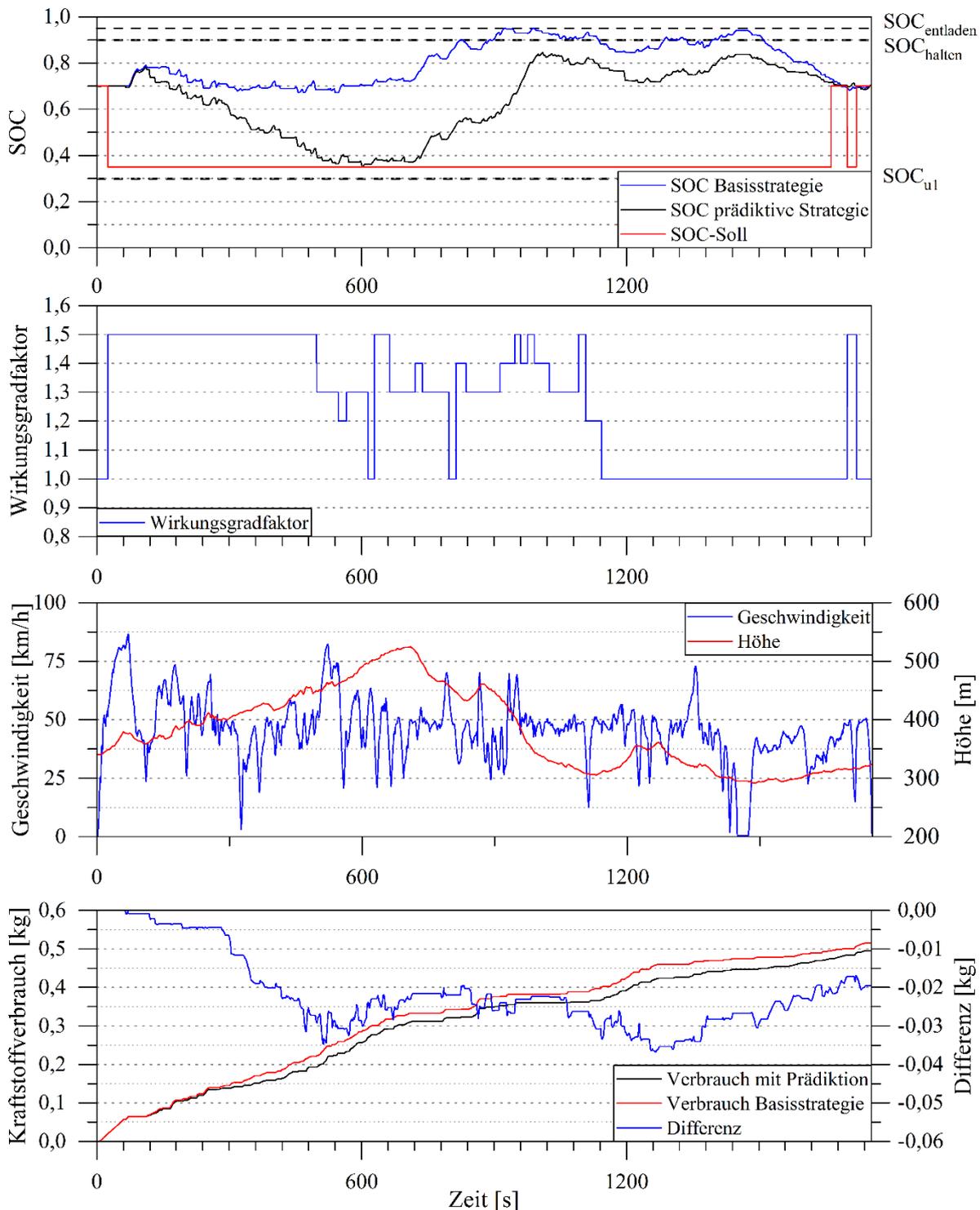


Abbildung 49: Simulationsergebnisse in einem Ausschnitt des Überlandzyklus

Die Verbrauchsentwicklung über den Zyklus wird in Abbildung 49 unten gezeigt. Durch den vermehrten Verbrauch elektrischer Energie vor der Passage mit dem starken Gefälle wird der Verbrennungsmotor weniger verwendet und somit Kraftstoff eingespart. Abbildung 49 unten

zeigt die Differenz des Verbrauchs mit Prädiktion gegenüber der Basisbetriebsstrategie. Im ersten Drittel des Zyklus ist die Kraftstoffeinsparung durch das vermehrte elektrische Fahren deutlich ersichtlich. Diese aufgebaute Differenz kann im Anschluss gehalten werden, da der Ladezustand mit der Basisbetriebsstrategie die oberste Grenze passiert und somit die Rekuperation eingeschränkt wird. Das gleiche Szenario ist auch am Beginn des letzten Drittels nochmal zu beobachten, da hier eine weite Passage mit einer Steigung und anschließendem Gefälle auftritt. Zum Ende des Zyklus verringert sich die Kraftstoffeinsparung aufgrund der Anpassung der SOC-Verläufe wieder. In Summe ergibt sich über dem 22,2 km langen Zyklus eine Einsparung von 0,019 kg CNG, was einer Reduktion von 3,9 % entspricht.

Der SOC-Verlauf der prädiktiven Betriebsstrategie erreicht sein Maximum bei Sekunde 1000 mit einem Ladezustand von 84,5 %. Dieses Maximum ist 10 % unterhalb der Eingriffsgrenze, ab der die Rekuperation eingeschränkt wird. Das bedeutet, dass trotz des extremen Höhenprofils die Batteriekapazität nicht völlig ausgeschöpft wird. Folglich wurden weitere Untersuchungen mit deutlich reduzierter Batteriekapazität durchgeführt. Dafür wurde die Kapazität auf 250 Wh halbiert, was zusätzlich eine Gewichtersparnis bringen würde, die allerdings nicht weiter berücksichtigt wurde. Zu beachten ist, dass sich die Eingriffsgrenzen der prädiktiven und der Basisbetriebsstrategie an denselben SOC-Marken wie zuvor befinden. Durch die Reduktion der Gesamtkapazität der Batterie sind jedoch die Bereiche zwischen den Grenzen absolut kleiner geworden. D.h., dass nun weniger Energie notwendig ist, um eine weitere Grenze zu erreichen.

Durch die Reduktion der Batteriekapazität ergeben sich die in [Abbildung 50](#) zusammengefassten Ergebnisse. Bei Betrachtung des SOC-Verlaufs der Basisstrategie wird sofort ersichtlich, dass die Eingriffsgrenze SOC_{halten} deutlich häufiger erreicht wird als mit der ursprünglichen Batteriekapazität. Das führt zu einem gesteigerten Verbrauchseinsparungspotenzial, wenn mit der prädiktiven Betriebsstrategie ein Erreichen dieser Grenze vermieden werden kann. Wie sich ebenfalls in [Abbildung 50](#) zeigt, kann das nicht ganz erreicht werden. Der Ladezustand wird zwar vor dem Gefälle auf ein Minimum reduziert, jedoch reicht dies mit der halben Batteriekapazität nicht aus, um die gesamte Rekuperationsenergie aufzunehmen. Dennoch verbessert die Prädiktion den Kraftstoffverbrauch um 2,1 % gegenüber der Basisbetriebsstrategie. Der Wirkungsgradfaktor ist während der Steigung und auch während des Gefälles nahezu durchgehend durch die prädiktive Betriebsstrategie auf 1,5, für maximalen elektrischen Energieverbrauch, gesetzt. Diese Einstellung wird nach der langen Rekuperationsphase rechtzeitig wieder auf die Ausgangseinstellung von 1,0 zurückgesetzt, um zum regulären Betrieb des Hybridsystems überzugehen.

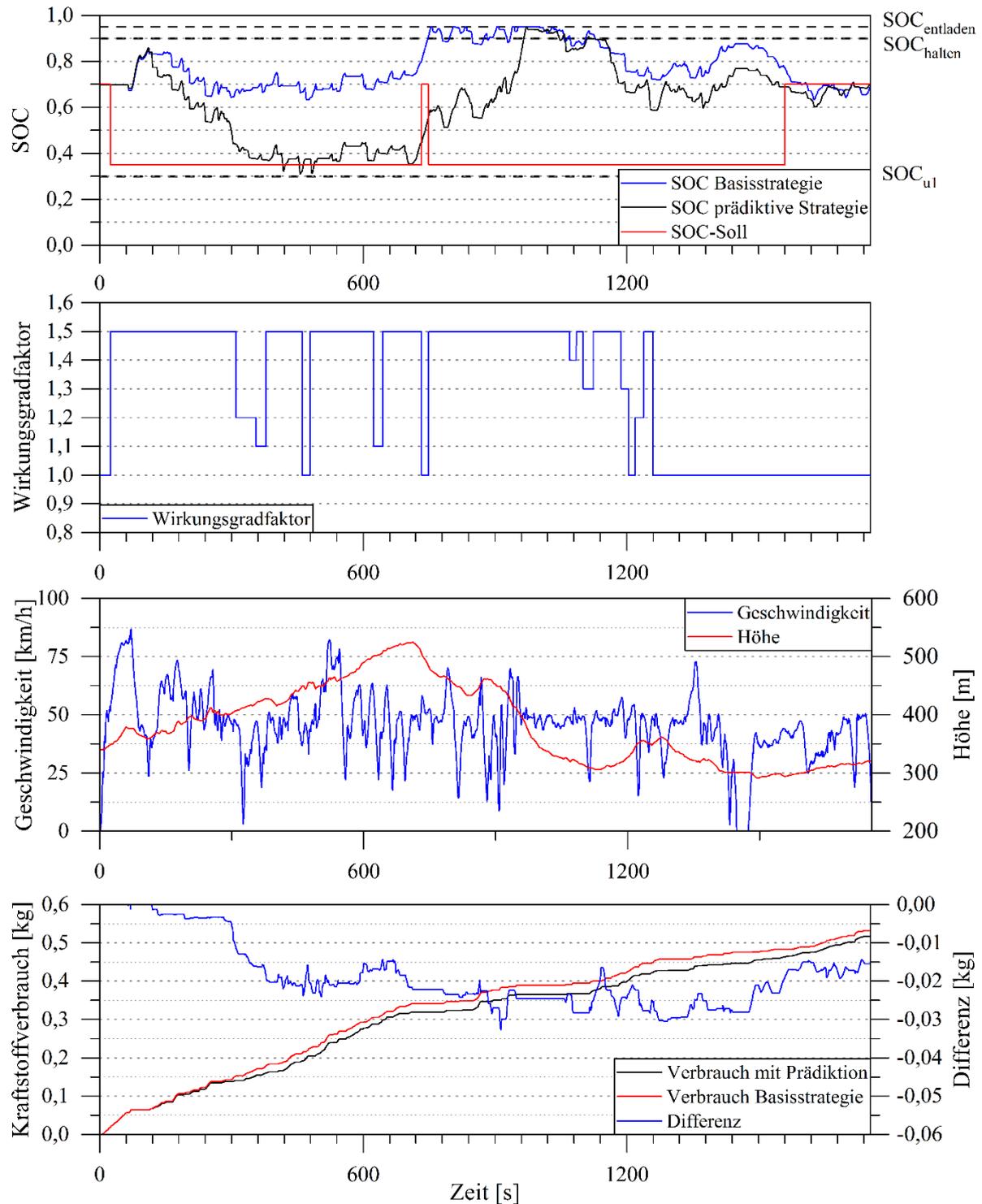


Abbildung 50: Simulationsergebnisse in einem Ausschnitt des Überlandzyklus mit halber Batteriekapazität

Die Reduktion der Batteriekapazität wirkt sich jedoch nachteilig auf Prädiktionsungenauigkeiten aus, da sich durch die Halbierung der Kapazität der Fehler verdoppelt. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit einer falschen bzw. nicht sinnvollen Beeinflussung durch die prädiktive Betriebsstrategie. Dieser Problematik kann entgegengewirkt werden, indem der Prädiktionshorizont verkleinert wird. Durch die geringere Kapazität kann die Batterie schneller entleert oder

geladen werden. Es hat sich gezeigt, dass eine SOC-Prädiktion für die kommenden 15 Minuten ausreichend ist, um den Speicher auf das kommende Fahrprofil vorzukonditionieren.

Abbildung 51 zeigt die Verbrauchsergebnisse im Vergleich zur Basisbetriebsstrategie mit der ursprünglichen sowie mit halber Batteriekapazität. Alle Verbrauchsangaben sind, wie schon in Kapitel 3.4.2.1 erläutert, um die SOC-Abweichung zum SOC-Soll von 70 %, bereinigt. Die prozentmäßigen Kraftstoffeinsparungen sind ebenfalls in dieser Abbildung zu sehen. Wie bereits erwähnt, bringt die Prädiktion in diesem speziellen Fahrprofil eine Verbesserung um 3,9 %. Wie zu erwarten, weist die Basisbetriebsstrategie mit halbiertem Batteriekapazität einen um 2,2 % höheren Kraftstoffverbrauch auf. Es fällt jedoch auf, dass trotz der enorm reduzierten Kapazität, der Verbrauch durch die prädiktive Betriebsstrategie gegenüber der Ursprungskonfiguration konstant bleibt.

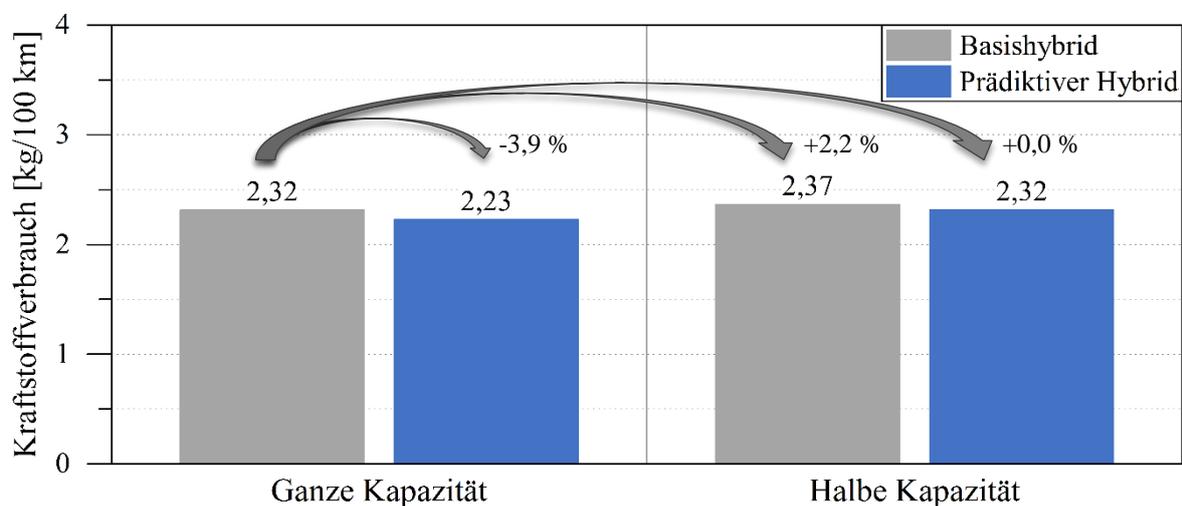


Abbildung 51: Vergleich der Verbrauchsergebnisse im Ausschnitt des Überlandzyklus mit ganzer und halber Batteriekapazität

Die genauen SOC- und Verbrauchsentwicklungen der relevanten Einstellungen sind in Abbildung 52 abgebildet. Sofort ersichtlich ist der steilere SOC-Verlauf bei halber Batteriekapazität. Zu Beginn bewegen sich die Verbrauchskurven der prädiktiven Strategien ident, bis ein baldiges Überschreiten der unteren Grenze mit halber Kapazität prädiziert wird. Dadurch kann ab der fünften Minute vorerst kein weiterer Verbrauchsvorteil generiert werden. Erst zu Beginn der Rekuperationsphase kann dieser weiter ausgebaut werden. Am Ende des Zyklus gleichen sich die SOC-Verläufe wieder an, wodurch die gesamte Kraftstoffeinsparung ersichtlich wird. Da die Rekuperation bei der Basisbetriebsstrategie mit gesamter Kapazität in ähnlicher Häufigkeit wie mit prädiktiver Betriebsstrategie und halber Kapazität eingeschränkt wird, ergibt sich schlussendlich der gleiche Verbrauch.

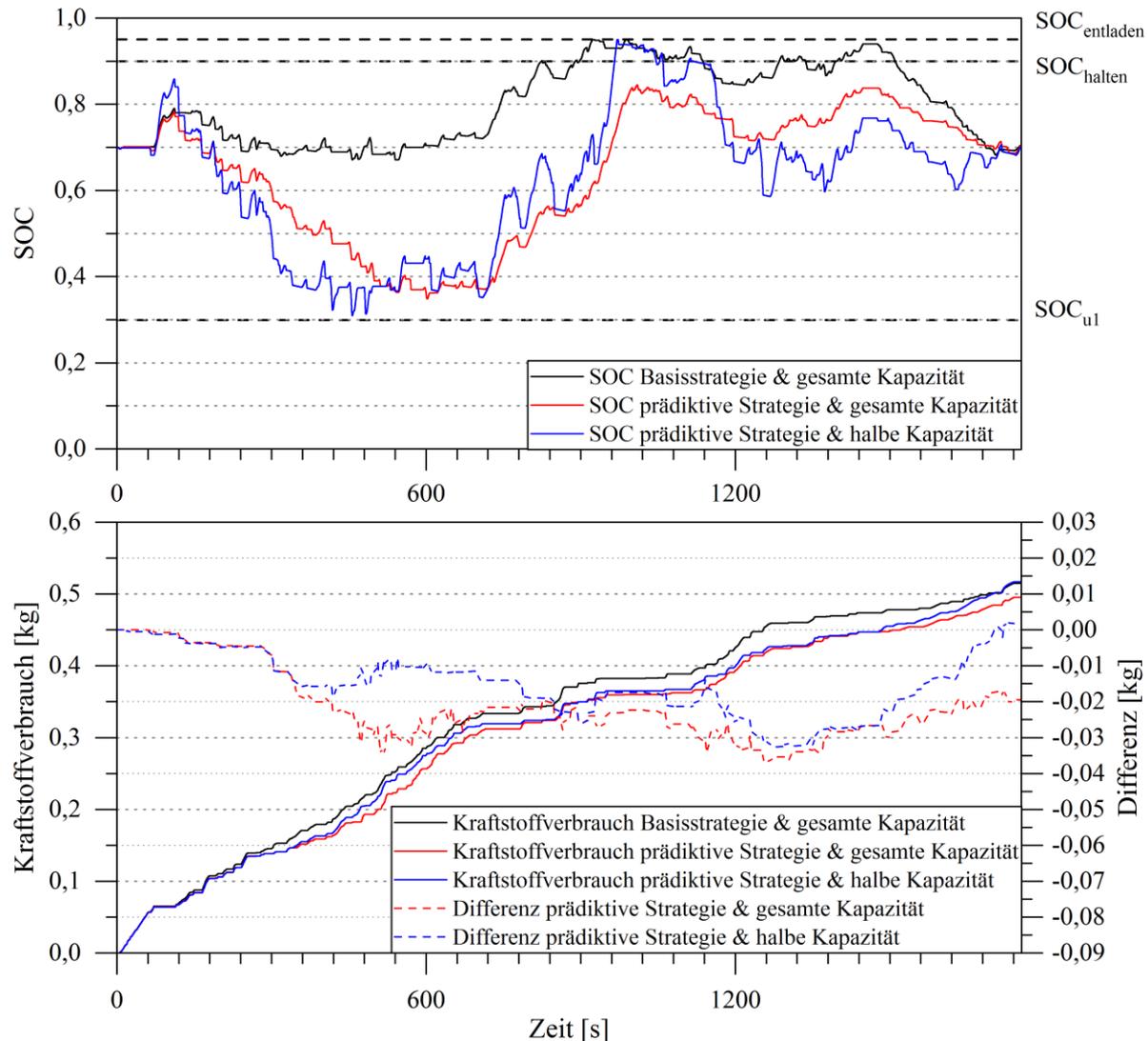


Abbildung 52: Vergleich der SOC-Verläufe und der Verbrauchsentwicklung zwischen der Basisstrategie und der prädiktiven Betriebsstrategie in der Ursprungsconfiguration sowie der prädiktiven Betriebsstrategie mit halber Batteriekapazität

4.2 Gesamte Zyklen mit halber Batteriekapazität

Da die Versuche mit reduzierter Batteriekapazität selbst bei sehr ausgeprägtem Höhenprofil sehr gute Ergebnisse liefern und die Kapazität voll ausgenutzt wird, werden im Folgenden weitere Versuche mit halber Batteriekapazität durchgeführt. Dafür waren die folgenden Veränderungen an der Betriebsstrategie notwendig. Der Prädiktionshorizont wurde auf 15 Minuten reduziert, da diese Zeit ausreichend ist, den Energiespeicher auf zukünftige Ereignisse zu konditionieren. Außerdem musste die geschwindigkeitsabhängige Vorgabe des SOC_{soll} an den geänderten Batteriespeicher angepasst werden. Dadurch ergibt sich die in [Abbildung 53](#) gezeigte SOC_{soll} -Kurve, die nun deutlich näher an die unteren Eingriffsgrenzen ragt.

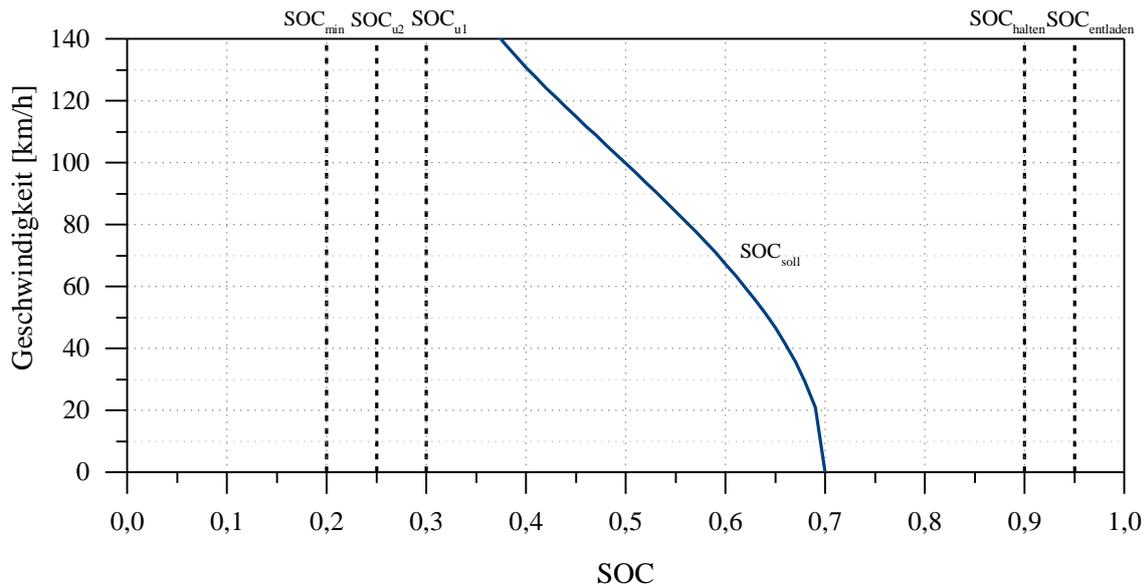


Abbildung 53: Geschwindigkeitsabhängiger SOC_{soll} und SOC Grenzen für die Eingriffe der Betriebsstrategie mit halbiertes Batteriekapazität

Durch den reduzierten Batteriespeicher wird sofort deutlich, dass im Pendlerzyklus auch die Basisbetriebsstrategie weitere Teile der Batterie ausnutzt (Abbildung 54). Durch das homogene Fahrprofil werden jedoch trotzdem keine Eingriffsgrenzen überschritten. Dennoch wird der SOC-Soll über weite Teile durch die prädiktive Betriebsstrategie abgesenkt, da mit einem Wirkungsgradfaktor von 1,0, der SOC über 75 % anwachsen würde. Deshalb ist der SOC-Verlauf mit der Prädiktion insgesamt etwas tiefer. Eingriffe durch Veränderung des Wirkungsgradfaktors sind allerdings nicht notwendig. Am Ende ergibt sich ein geringer Verbrauchsvorteil gegenüber der Basisbetriebsstrategie, der vor allem darauf beruht, dass der Ladewirkungsgrad der Batterie bei geringerem SOC-Niveau etwas besser ist.

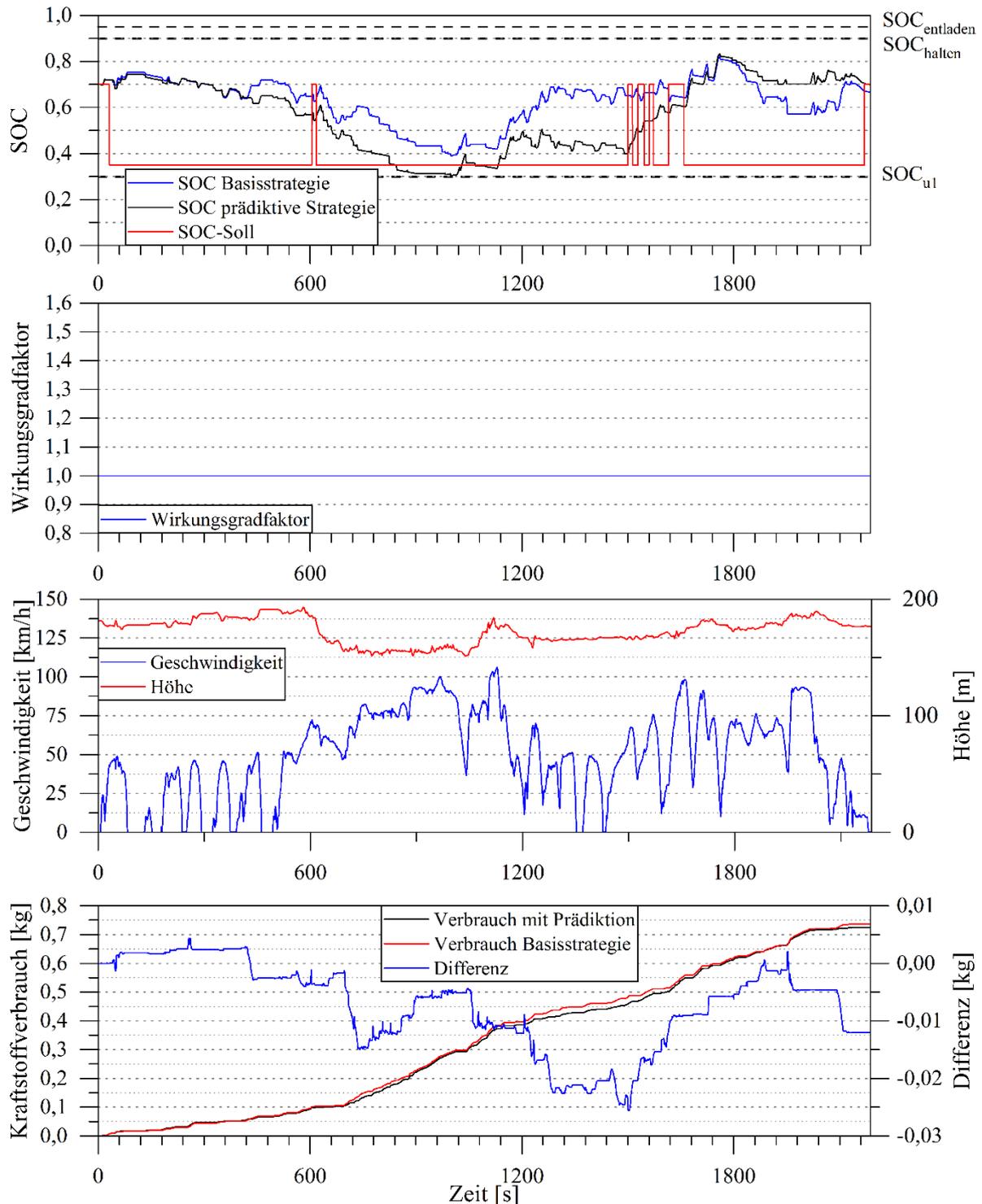


Abbildung 54: Simulationsergebnisse des Pendlerzyklus mit halbiertes Batteriekapazität

Beim Überlandzyklus muss die prädiktive Betriebsstrategie deutlich aktiver eingreifen als beim Pendlerzyklus und auch über einen längeren Zeitraum als mit der gesamten Batteriegröße (Abbildung 55). Die prädiktive Strategie kann in diesem Zyklus den Ladezustand optimal auf alle Rekuperationsphasen vorbereiten. Lediglich bei Sekunde 2700 stößt die Batterie an ihre Auf-

nahmegrenzen für etwa drei Minuten und ist damit um die Hälfte kürzer oberhalb der Eingriffsgrenze als mit der Basisbetriebsstrategie. Im Verlauf des Kraftstoffverbrauchs ist deutlich zu sehen, dass die Verbrauchsvorteile bei den Vorkonditionierungen der Batterie produziert werden. Bei den anschließenden Rekuperationen auf annähernd der Niveaus der Basisbetriebsstrategie, können die Kraftstoffeinsparungen gesichert werden. In Summe ergibt sich somit eine deutliche Verbrauchsreduktion.

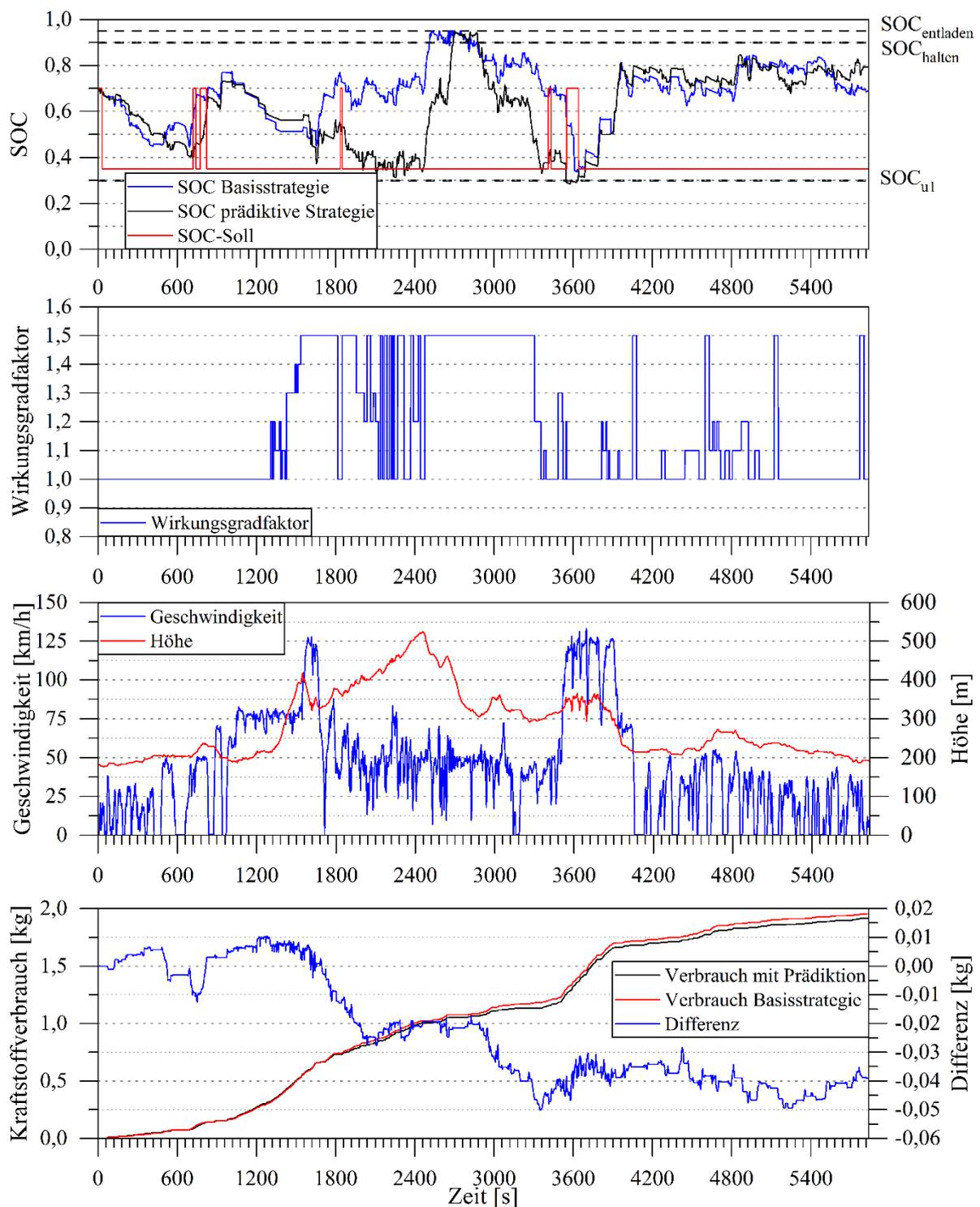


Abbildung 55: Simulationsergebnisse des Überlandzyklus mit halbiertem Batteriekapazität

Beim Stadtzyklus, der in [Abbildung 56](#) gezeigt wird, kommen die stauspezifischen Maßnahmen zum Einsatz. Ziel ist, den Stau im elektrischen Betrieb zu durchfahren. Dies soll nicht nur Verbrauchsvorteile, sondern auch Komfortsteigerungen bewirken. Sobald ein Stau im vorausliegenden Streckenprofil erkannt wird, versucht die Betriebsstrategie durch Anhebung des SOC-Soll die Batterie zu laden. Zusätzlich wird elektrisches Fahren durch die Absenkung des Wirkungsgradfaktors auf 0,9 leicht reduziert. Diese Maßnahmen sind etwa ab Sekunde 1600 zu beobachten. Durch Unterschreiten des zweiten Staukriteriums wird das Erreichen des Staus erkannt und die Betriebsstrategie wechselt in den Staumodus. Dieser erweitert den Bereich des elektrischen Fahrens und senkt gleichzeitig den SOC-Soll ab. Dieser Modus ist von Sekunde 2700 bis 4000 aktiviert. Der positive Effekt auf den Kraftstoffverbrauch wird erreicht, indem das Unterschreiten der unteren SOC-Schranke verhindert wird.

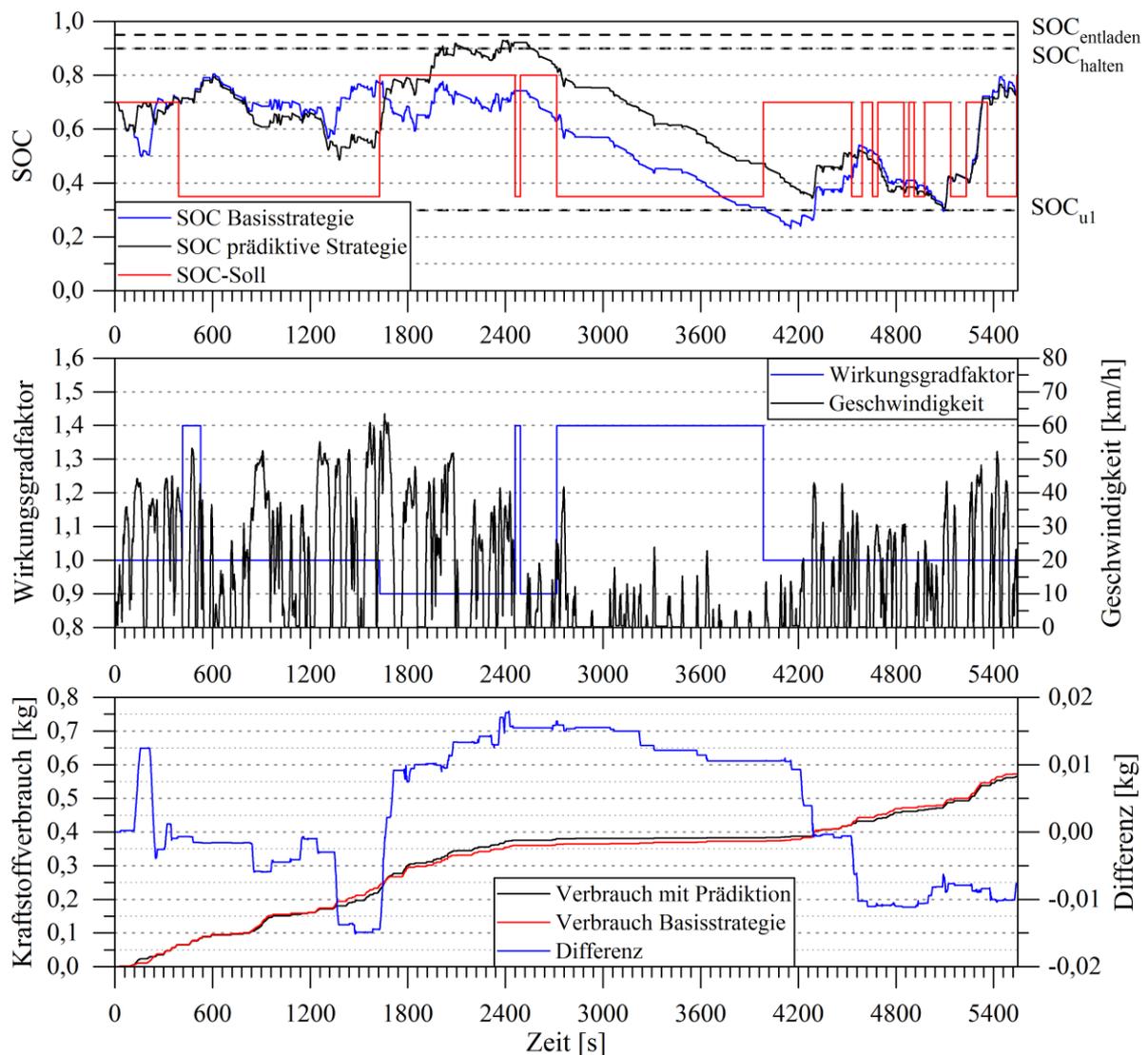


Abbildung 56: Simulationsergebnisse des Stadtzyklus mit halbiertem Batteriekapazität

Die Ergebnisse der Kraftstoffberechnungen aller drei Zyklen sind in [Abbildung 57](#) zusammengefasst. Die Hybridisierung des Fahrzeugs bewirkt deutliche Kraftstoffreduktionen in allen Zyklen. Der Verbrauch bewegt sich mit der Basisbetriebsstrategie von 2,45 bis 2,76 kg/100 km. Mit der Erweiterung einer prädiktiven Betriebsstrategie können weitere Verbrauchsvorteile generiert werden was in Verbräuchen von 2,41 bis 2,69 kg/100 km resultiert. [Abbildung 58](#) zeigt die prozentuale Kraftstoffeinsparung mit der prädiktiven Betriebsstrategie gegenüber dem nicht hybridisierten Fahrzeug mit Start/Stop. Die Einsparungen erreichen im Pendlerzyklus 19,1 % und im Stadtzyklus sogar 49,1 %. Die dabei resultierenden Kraftstoffeinsparungen durch die Erweiterung der Basisbetriebsstrategie mit der Prädiktion werden in [Abbildung 59](#) aufgeführt. Die Einsparungen bewegen sich zwischen 1,2 und 2,5 %, abhängig vom Zyklus. Das größte Einsparungspotenzial wird im Überlandzyklus erreicht, da die Batteriekapazität in diesem Zyklus am häufigsten an ihre Grenzen stößt. Die Maßnahmen zur Stauerkennung bewirken im Stadtzyklus eine Kraftstoffersparnis von 1,2 %.

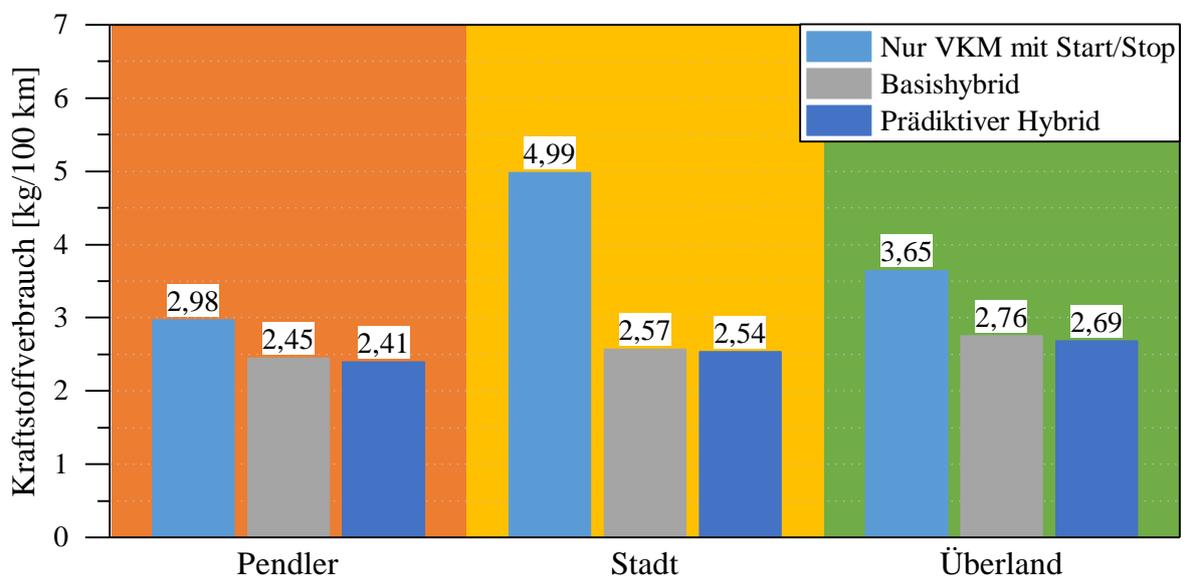


Abbildung 57: Zusammenfassung der Verbrauchsergebnisse in allen drei Zyklen mit halber Batteriekapazität

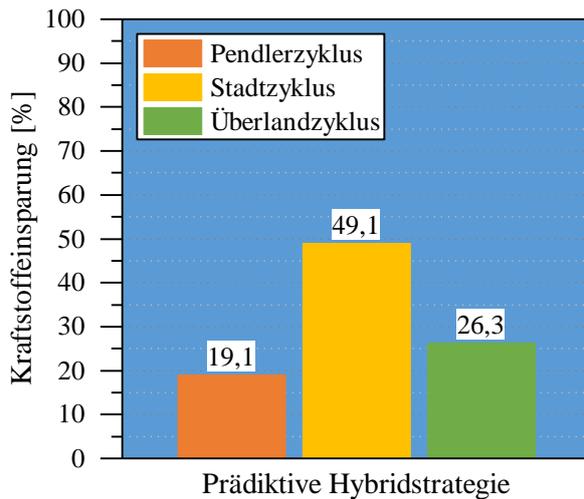


Abbildung 58: Kraftstoffersparungen der prädiktiven Betriebsstrategie mit halber Kapazität gegenüber dem nicht hybridisierten Fahrzeug mit Start/Stop

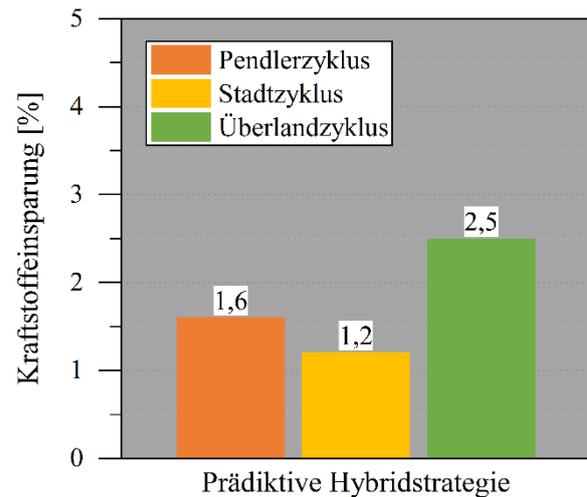


Abbildung 59: Kraftstoffersparungen der prädiktiven Betriebsstrategie mit halber Kapazität gegenüber der Basisbetriebsstrategie mit halber Kapazität

Abschließend sind wichtige Simulationsergebnisse, welche die Kraftstoffersparungen bei halber Batteriekapazität und prädiktiver Betriebsstrategie gegenüber der Basisbetriebsstrategie mit gesamter Batteriekapazität aufzeigen, in [Abbildung 60](#) dargestellt. Es können dabei Reduktionen im Verbrauch von 0,7 bis 1,2 % erzielt werden. Das bedeutet, dass durch Hinzufügen einer Prädiktion der Batteriespeicher halbiert werden kann und dennoch ein geringer Verbrauchsvorteil entsteht.

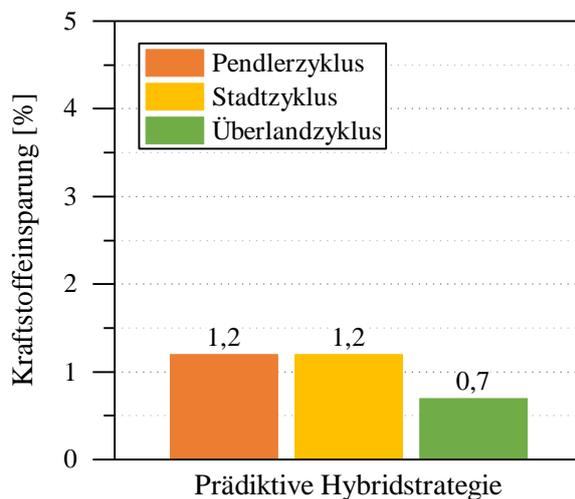


Abbildung 60: Kraftstoffersparungen der prädiktiven Betriebsstrategie mit halber Kapazität gegenüber der Basisbetriebsstrategie mit gesamter Kapazität

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Arbeit bestand in der Untersuchung möglicher Kraftstoffeinsparungen durch Erweiterung einer Betriebsstrategie eines Hybridantriebs mit einer Prädiktion. Für die Erreichung dieses Ziels mussten zunächst Fahrzyklen definiert werden, anhand derer die Untersuchungen durchgeführt werden konnten. Um verschiedene Szenarien abzudecken, wurden drei sich stark unterscheidende Zyklen gewählt. Dazu zählen ein Überlandzyklus mit ausgeprägten Höhen- und Geschwindigkeitsprofil, ein Stadtzyklus, der eine Stausituation beinhaltet und ein gemischter Zyklus, der eine typische Pendlerfahrt darstellen soll. Da für die Bildung einer State of Charge (SOC) -Prädiktion Routendaten und Verkehrsinformationen notwendig sind, konnten standardisierte Fahrzyklen nicht verwendet werden. Daher wurden die Fahrzyklen durch Messfahrten mit einem Fahrzeug, welches mit Messgeräten ausgerüstet war, selbst erstellt.

Ein Schwerpunkt der Arbeit lag in der Erstellung der Geschwindigkeits- und SOC-Prädiktion. Da bei der Vorhersage viele Einflüsse nicht bekannt sind, stellte die ausreichende Genauigkeit der Vorausberechnungen die größte Herausforderung dar. Es stellte sich heraus, dass mit wachsender Ungenauigkeit der Prädiktion die Fehlentscheidungen der Betriebsstrategie steigen. Dies kann so weit führen, dass der Kraftstoffverbrauch mit prädiktiver Betriebsstrategie in gewissen Situationen sogar steigt. Ungenauigkeiten entstehen vor allem durch das nicht vorhersehbare Verhalten des Fahrers und der umgebenden Verkehrsteilnehmer. Außerdem haben rote Ampeln einen großen Einfluss, welcher ohne Kommunikation mit der Infrastruktur und intelligenten Ampeln nur schwer berücksichtigt werden kann. Letztlich stellte sich auch heraus, dass enge Kurvenradien und die dabei notwendigen reduzierten Geschwindigkeiten zu beträchtlichen Geschwindigkeits- und somit SOC-Abweichungen führen.

Durch die folgenden statistischen Methoden wurde versucht, diese Einflüsse zu berücksichtigen. Die Standzeit an Ampeln wurde etwa durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung angenähert. Das Geschwindigkeitsrippel, welches durch den Fahrer und verschiedensten Umwelteinflüsse entsteht, wurde durch Übergangswahrscheinlichkeiten berücksichtigt. Hierfür wurden Übergangswahrscheinlichkeiten von Geschwindigkeitsabweichungen zwischen den Zeitschritten erstellt. Diese Wahrscheinlichkeiten wurden anhand der Daten aus den Messfahrten generiert und trugen entscheidend dazu bei, die erforderliche Prädiktionsgenauigkeit zu erzielen.

Die Basisbetriebsstrategie wurde zur Vorausberechnung des SOC-Verlaufs mithilfe von Kennfeldern über die Ladeleistung sowie über die maximale elektrische Fahrgeschwindigkeit vereinfacht und bildete die Grundlage der prädiktiven Betriebsstrategie. Diese Vereinfachung ermöglichte es, einfache regelbasierte Optimierungen ohne Laufzeitprobleme durchzuführen.

Der zweite Schwerpunkt der Arbeit lag in der vorausschauenden Beeinflussung der Basisbetriebsstrategie mit dem Ziel, den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Diese Aufgabe wurde erfüllt, indem die prädiktive Betriebsstrategie verhindert, dass SOC-Grenzen der Basisbetriebsstrategie überschritten werden. Dafür hat sich bei der vorhandenen Batteriekapazität ein Prädiktionshorizont von 15 Minuten als ausreichend herausgestellt. Zusätzlich wurde eine optimalere Ausnutzung der Batterie bewirkt, was zu häufigerer Nutzung von effizienteren Betriebspunkten der Batterie führte. Beim Auftreten von Stauphasen wurden außerdem Funktionen integriert, die es ermöglichen, einen Stau elektrisch zu durchfahren.

Im Zuge einiger Simulationen hat sich gezeigt, dass die ursprünglich angesetzte Batteriekapazität in Zyklen mit geringeren Höhenunterschieden und der prädiktiven Betriebsstrategie nicht ausgenutzt wird. Daher wurden weitere Versuche mit reduziertem Energiespeicher durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die prädiktive Betriebsstrategie dennoch Kraftstoffeinsparungen von 0,7 bis 1,2 % gegenüber der Basisbetriebsstrategie und gesamter Batteriekapazität erreicht. Gegenüber der Basisbetriebsstrategie mit reduzierter Batteriekapazität sind sogar Kraftstoffreduktionen von 1,2 bis 2,5 % möglich.

Es zeigt sich somit, dass die Erweiterung um eine prädiktive Betriebsstrategie zu deutlichen Kraftstoff- und somit auch CO₂-Reduktionen beitragen kann. Andererseits ist es möglich, durch Hinzufügen einer Prädiktion, die Batteriekapazität zu reduzieren, ohne Einbußen im Kraftstoffverbrauch hinnehmen zu müssen.

Wie sich gezeigt hat, lassen sich mit den vorhandenen Daten die Prädiktionsungenauigkeiten nicht restlos beseitigen. Diese Ungenauigkeiten limitieren jedoch das Kraftstoffeinsparungspotenzial. Eine Fahrzeug zu Fahrzeug Kommunikation könnte die Auflösung der Verkehrsdaten erhöhen, was zu einer genaueren Prädiktion führen würde und das Einsparungspotenzial besser ausschöpft.

Literaturverzeichnis

- [1] Winkler, M.; Hoffmann, S.; Unterberger, B.; Park, S. G.; Weissbäck, M.: Hyundai Kia's ganzheitlicher Ansatz zum Thema 48V Hybridisierung. 36. Internationales Wiener Motorensymposium, 2015.
- [2] Steffan, R.: Entwicklung eines 48 Volt Full-Hybrid Antriebsstrangs für ein Ultraleicht-Fahrzeug. Dissertation, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Technische Universität Wien, 2015.
- [3] Reif, K.: Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, ISBN: 978-3-8348-1303-9, 2010.
- [4] Reif, K.; Noreikat, K.-E.; Borgeest, K.: Kraftfahrzeug-Hybridantriebe. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-8348-2050-1, 2012.
- [5] Hofmann, P.: Hybridfahrzeuge - Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft. Wien u.a.: Springer, ISBN: 978-3-7091-1780-4, 2014.
- [6] Mahr, B.; Backhaus, R.: "Das Beste aus zwei Welten kombinieren". MTZ Motortechnische Zeitschrift, 2015, Seite 22-24.
- [7] Nalbach, M.; Körner, A.; Hoff, C.: Der 48-V-Mikro-Hybrid - Ein neues Leistungsbordnetz. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 04/2013, Seite 296-300.
- [8] Kirchner, E.; Kufner, A.; Sattler, M.: Hybridisierung mit einer E-Achse für das 48-V-Bordnetz. MTZ Motortechnische Zeitschrift, 2015, Seite 26-31.
- [9] Timmann, M.; Renz, M.: 48V at Mercedes-Benz - options for further applications. 14th Stuttgart International Symposium, 2014.
- [10] LV148 der Audi AG, BMW AG, Daimler AG, Porsche AG und Volkswagen AG. 2011.
- [11] Kuypers, M.: Application of 48 Volt for Mild Hybrid Vehicles and High Power Loads. SAE Technical Paper, 2014-01-1790, 2014.
- [12] Dörsam, T.; Kehl, S.; Klinkig, A.; Radon, A.; Sirch, O.: Die neue Spannungsebene 48 V im Kraftfahrzeug. ATZ elektronik 1/2012, Seite 20-25.
- [13] Zhang, H.; Achleitner, E.; Beer, J.; Kapphan, F.; Klügl, W.; Maiwald, O.; et al.: Die Zukunft der Benzin-Motoren. 36. Internationales Wiener Motorensymposium, 2015.
- [14] Smetana, T.: Who's Afraid of 48 V? - Not the Mini Hybrid with Electric Axle! 10th Schäffler Symposium, 2014.
- [15] Kohlhauser, M.; Bichler, M.: Cost efficient hybrid - electrification with focus on cost and functionality. 13th Stuttgart International Symposium, 2013.
- [16] Damböck, M.; Fritz, W.; Hofherr, T.; Hofmann, P.; Kampelmühler, F.: Der CULT Antrieb: Hocheffizienter CNG Motor mit Direkteinblasung. 34. Internationales Wiener Motorensymposium, 2013.

- [17] Fritz, W.; Hofer, D.; Bruno, G.: Leichtbaukonzept für ein CO₂-armes Fahrzeug. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 09/2013, Seite 702-707.
- [18] Hofmann, P.; Steffan, R.: Die Chancen und Potenziale von hybriden Antriebsmaßnahmen in Verbindung mit Ultraleicht-Fahrzeugen. 9. MTZ Fachtagung: Der Antrieb von morgen Wolfsburg, 2014.
- [19] Eisele, G.; Wolff, K.; Wittler, M.; Abtahi, R.; Pischinger, S., NVH of Hybrid Vehicles, [ONLINE]
http://www.fev.com/fileadmin/user_upload/Media/TechnicalPublications/NVH/NVH_of_Hybrid_Vehicles.pdf, Zugriff am 14.05.2015.
- [20] Mauk, T.: Selbstlernende, zuverlässigkeitsorientierte Prädiktion energetisch relevanter Größen im Kraftfahrzeug. Dissertation, Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart, 2011.
- [21] Riemer, T.: Vorausschauende Betriebsstrategie für ein Erdgas-Hybridfahrzeug. Dissertation, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart, 2012.
- [22] Paganelli, G.; Delprat, S.; Guerra, T. M.; Rimaux, J.; Santin, J. J.: Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains. Vehicular Technology Conference, 2002.
- [23] Kleimaier, A.: Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München 2003.
- [24] Grundherr zu Altenthan und Weiherhaus, J., von: Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer Online-Optimierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, 2009.
- [25] Fleckner, M.; Göhring, M.; Spiegel, L.: Neue Strategien zur verbrauchsoptimalen Auslegung der Betriebsführung von Hybridfahrzeugen. 18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2009.
- [26] Wilde, A.: Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München, 2008.
- [27] Radke, T.: Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. Dissertation, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, 2013.
- [28] Stiegeler, M.: Entwurf einer vorausschauenden Betriebsstrategie für parallele hybride Antriebsstränge. Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik, Universität Ulm, 2008.
- [29] Back, M.: Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Universität Karlsruhe, 2005.

- [30] Töpler, F.; Antony, P.; Langhammer, S.; Kube, R.; Köhle, S.: Hybridbetriebsstrategien mit elektronischem Horizont - ein Gemeinschaftsprojekt der Daimler AG, der Volkswagen AG und dem ika. 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2008.
- [31] Böckl, M.: Adaptives und prädiktives Energiemanagement zur Verbesserung der Effizienz von Hybridfahrzeugen. Dissertation, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, Technische Universität Wien, 2008.
- [32] Lange, S.; Schimanski, M.: Energiemanagement in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2006.
- [33] Neunzig, D.; Benmimoun, A.: Potentiale der vorausschauenden Fahrerassistenz zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- Motorentechnik, 2002.
- [34] Winner, H.; Hakuli, S.; Lotz, F.; Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-05734-3, 2015.
- [35] Jose, E.; Adams, M.; Mullane, J. S.; Patrikalakis, N. M.: Predicting Millimeter Wave Radar Spectra for Autonomous Navigation. IEEE Sensors Journal, Vol. 10, No. 5/2010, Seite 960-971.
- [36] Tischler, K.; Clauss, M.; Günter, Y.; Kämpchen, N.; Schreier, R. M.; Stiegeler, M. M.: Networked Environment Description for Advanced Driver Assistance Systems. 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Vienna, Austria, 2005.
- [37] Nagel, D.; Trapp, R.: Komfort in der Fahrzeugklimatisierung. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 12/2005, Seite 1106-1107.
- [38] Wendel, J.: Integrierte Navigationssysteme. München: Oldenbourg Verlag, ISBN: 978-3-486-70439-6, 2011.
- [39] ESA, Galileo meets Galileo as launch draws near, [ONLINE] http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Launching_Galileo/Galileo_meets_Galileo_as_launch_draws_near, Zugriff am 20.03.2015.
- [40] Müller, T. M.: Navigation Data Standard (NDS): Bald Industriestandard? Automobil-Elektronik, 6/2010, Seite 30-31.
- [41] Ress, C.; Balzer, D.; Bracht, A.; Durekovic, S.; Löwenau, J.: ADASIS Protocol for advanced in-vehicle applications. ITS World Congress, New York, 2008.
- [42] Schnieder, E.: Verkehrsleittechnik. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, ISBN: 978-3-540-48541-4, 2007.
- [43] Plößl, K.: Mehrseitig sichere Ad-hoc-Vernetzung von Fahrzeugen. Dissertation, Universität Regensburg, 2008.

- [44] Bouscayrol, A.; Chan, C. C.; Chen, K.: Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling. IEEE Transactions on vehicular technology, 59/2010, Seite 589-598.
- [45] Bouscayrol, A.; Delarue, P.; Horrein, L.; Mayet, C.; Verhille, J. N.: Forward and Backward simulations of a power propulsion system. 8th Power Plant and Power System Control Symposium, 2012.
- [46] Amstutz, A.; Guzzella, L.: CAE Tools for Quasi-Static Modeling and Optimization of Hybrid Powertrains. IEEE Transactions on vehicular technology, 48/1999, Seite 1762-1769.
- [47] Besnier, F.; Rousseau, A.; Sharer, P.: Feasibility of Reusable Vehicle Modeling: Application to Hybrid Vehicles. SAE International, 2004.
- [48] Fröberg, A.: Inverse Dynamic Simulation of Non-Quadratic MIMO Powertrain Models -Application to Hybrid Vehicles. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006.
- [49] Schreiner, K.: Basiswissen Verbrennungsmotor. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, ISBN: 978-3-8348-1279-7, 2011.
- [50] Schmidt, H.: Worldwide Harmonized Light-Vehicles Test Procedure (WLTP) und Real Driving Emissions (RDE) – aktueller Stand der Diskussion und erste Messergebnisse 15. Internationales Stuttgarter Symposium, 2015.
- [51] Schneider, A., GPS Visualizer: Do-It-Yourself Mapping, [ONLINE] <http://www.gpsvisualizer.com/>, Zugriff am 28.07.2015.
- [52] Necula, E.: Dynamic traffic flow prediction based on GPS Data. 26th International Conference on Tools with Artificial Intelligence, 2014.
- [53] Karbowski, D.; Rousseau, A.; Smis-Michel, V.; Vermeulen, V.: Trip prediction using GIS for vehicle energy efficiency. 21st World Congress on Intelligent Transport Systems, Detroit, 2014.
- [54] Karbowski, D.; Namwook, K.; Aymeric, R.: Route-Based Online Energy Management of a PHEV and Sensitivity to Trip Prediction. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2014.
- [55] Baum, D.: Grundlagen der Warteschlangentheorie. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, ISBN: 978-3-642-39632-8, 2013.