

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fachgebiet Energiewandlungstechnik

Optimierte Betriebsstrategie hybrider Antriebssysteme für den Serieneinsatz

Thomas Salcher

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann

Die Dissertation wurde am 03.04.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 29.07.2013 angenommen.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog für die wissenschaftliche Betreuung der vorliegenden Dissertation, den konstruktiven fachlichen Austausch und das vertrauensvolle Arbeitsklima. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohman für die Erstellung des Zweitgutachtens und Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Herrn Dr.-Ing. Gerd Krämer danke ich für die Ermutigung zu der vorliegenden Dissertation und deren Betreuung.

Ganz besonders danken möchte ich Herrn Dr.-Ing. Lutz Neumann und Herrn Georg Mumelter für die sehr wertvollen fachlichen Denkanstöße und Diskussionen, die Unterstützung bei der Serienentwicklung des Ladezustandsmanagements sowie den stets großen Zuspruch zu meiner Arbeit. Mein Dank gilt zudem Herrn Andy Sittig für den konstruktiven wissenschaftlichen Austausch und die große Unterstützung bei den Prüfstandsmessungen.

Wesentlich zum Erfolg der Arbeit haben auch die von mir betreuten Diplomanden Herr Erik Schmidt, Herr Moritz Schindler, Herr Stefan Brandhoff und Herr Frederik John beigetragen. Ich danke ihnen ganz herzlich für ihren außerordentlichen Einsatz und die sehr gute Zusammenarbeit.

Für die große Unterstützung bei meinen Veröffentlichungen und den fachlichen Austausch danke ich vielmals Herrn Dr.-Ing. Frank Scheibe, Herrn Dr.-Ing. Rainer Gehring und Herrn Dr.-Ing. Florian Österreicher. Herrn Dominik Bücherl danke ich für die Bereitstellung der CAR@TUM-Referenzsimulationen und den wissenschaftlichen Austausch. Darüber hinaus gilt mein Dank all den Kollegen in der Antriebsentwicklung der BMW AG sowie in dem Forschungsprojekt CAR@TUM an der Technischen Universität München, die mich bei meinem Promotionsvorhaben unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Anne, meinen Eltern und meiner Familie für den unerschöpflichen Beistand und Zuspruch sowie das Korrekturlesen der Dissertation.

Zusammenfassung

Hybride Antriebsstränge ermöglichen durch die Kombination von Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zu konventionellen Antrieben. Hierzu ist eine Betriebsstrategie nötig, die das Zusammenspiel der Antriebsstrangkomponenten koordiniert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss der Betriebsstrategie auf die Verbrauchseinsparung eines parallelen Full-Hybridfahrzeugs untersucht. Hierbei liegt der Fokus auf den im Serieneinsatz erreichbaren Verbrauchspotenzialen. Zunächst wird analysiert, warum diese in der Regel geringer sind als die theoretischen Potenzialangaben in Forschungsarbeiten. Hierzu werden Anforderungen an Hybridfahrzeuge in der Serienentwicklung ermittelt, welche die Freiheitsgrade der Betriebsstrategie einschränken. Es bestehen Restriktionen hinsichtlich Emissionsgrenzwerten, Fahrstabilität, Fahrdynamik und Fahrkomfort. Darüber hinaus suggerieren Abstraktionen in der Simulation der Betriebsstrategie zu hohe Verbrauchspotenziale. Letztere verringern sich zudem durch die Effizienzsteigerung der konventionellen Basisfahrzeuge. Simulationen des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) verdeutlichen, dass von der theoretisch ermittelten Verbrauchseinsparung nur etwa die Hälfte in Serienfahrzeugen erreicht werden kann.

Um auch im Serienumfeld den Kraftstoffverbrauch zu senken, werden drei Optimierungsansätze der Betriebsstrategie entwickelt: Gesamtwirkungsgradoptimale Schaltpunkte des Getriebes, ein aufwand- und nutzenbasiertes Ladezustandsmanagement der Traktionsbatterie sowie eine verbrauchsoptimierte Startkoordination des Verbrennungsmotors. Diese werden in Simulationen der Fahrzyklen NEFZ und FTP-72 analysiert. Die Startkoordination wird aufgrund zu geringer Einsparpotenziale nicht weiter untersucht. Die beiden anderen Optimierungsansätze werden hinsichtlich der Umsetzbarkeit in Serienfahrzeugen bewertet. Während im Falle der Gangwahl deutliche Einschränkungen des Potenzials zu erwarten sind, bestehen bezüglich des Ladezustandsmanagements kaum Restriktionen. Deshalb wird dieser Optimierungsansatz mit den Methoden des Serienentwicklungsprozesses in die Steuergerätesoftware eines Serienhybridfahrzeugs integriert. Die entwickelte Funktion erfüllt in der Gesamtfahrzeugarchitektur alle durch die Serienentwicklung vorgegebenen Anforderungen. An einem Antriebsprüfstand wird bezüglich der Basisbetriebsstrategie des Fahrzeugs eine zusätzliche Verbrauchseinsparung von 1 % nachgewiesen.

Abstract

Hybrid electric vehicles (HEVs) offer fuel-savings in comparison to conventional vehicles. In addition to an internal combustion engine the power train consists of at least one electric motor. Thus, an operating strategy is required to coordinate the power train components.

This work analyzes the advantages of an operating strategy on the achievable fuel reduction of a parallel full-HEV with focus on series-production vehicle requirements. Generally, the latter condition shows to return less fuel-savings compared to more abstract results found in the literature. Differences in these results will be explained. First, series-development requirements of HEVs are identified, which pose constraints on the operating strategy, such as limits on emissions, driving stability, driving dynamics and driving comfort. Furthermore, it will be explained that underlying model assumptions cause too optimistic fuel-savings. In addition, increasing efficiency of conventional vehicles reduces the relative savings of HEVs. Simulation results of the New European Driving Cycle (NEDC) show that in series-production HEVs only about half of the theoretical fuel-savings can be obtained.

To raise fuel efficiency in series-production HEVs, three optimization approaches are developed: A strategy for gear shifting of the automatic transmission to optimize efficiency of the complete power train, a state of charge management using cost and benefit considerations, and a fuel-efficient coordination of the engine start. These are evaluated by means of simulations of the driving cycles NEDC and FTP-72. The coordination of the engine start offers limited fuel-savings, thus it is not further analyzed. Both other approaches are evaluated with respect to requirements for series-production vehicles. In terms of the strategy for gear shifting there are significant constraints. The state of charge management proves to be a good approach without major restrictions. It is integrated into the software of a series-production HEV, using the methods of a series-development process. The developed software satisfies the requirements of a complete vehicle environment. At a power train test bench fuel-savings of 1% are obtained.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Hybrider Antriebsstrang	3
2.1	Systemtopologie und Komponenten	3
2.2	Betriebsarten	4
2.3	Hybridisierungsgrad	5
2.4	Energetische Betriebsstrategie	6
2.4.1	Ziele und Anforderungen	7
2.4.2	Optimierungsmethoden	8
2.5	Verbrauchseinsparung	10
2.5.1	Energetische Vorteile gegenüber konventionellen Antriebssträngen	10
2.5.2	Verbrauchsermittlung in Fahrzyklen	11
2.5.3	Ermittlung des Einsparpotenzials in Simulationen	12
2.6	Funktionsarchitektur in der Antriebskoordination	14
2.6.1	Fahrerwunschinterpretation und Momentenstruktur	15
2.6.2	Getriebesteuerung	16
2.7	Funktions- und Softwareentwicklungsprozess	16
2.7.1	V-Modell	16
2.7.2	Toolkette	17
2.8	Untersuchter Antriebsstrang	18
3	Ziel und Gliederung der Arbeit	22
4	Analyse der Verbrauchseinsparung in Serienhybridfahrzeugen	24
4.1	Analysemethode	24
4.2	Theoretische Verbrauchseinsparung	26
4.3	Praktische Verbrauchseinsparung in Serienfahrzeugen	27
4.3.1	Einschränkung durch Anforderungen der Serienentwicklung	27
4.3.2	Einschränkung durch Abstraktionen in der Modellierung	35
4.4	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	37
5	Entwicklung einer verbrauchsoptimierten Betriebsstrategie	40
5.1	Methodisches Vorgehen	40
5.1.1	Anforderungen der Funktions- und Softwareentwicklung	41
5.1.2	Freiheitsgrade der Betriebsstrategie und Stand der Technik	43

5.1.3	Optimierungsmethode	46
5.2	Entwicklung von Optimierungsansätzen	49
5.2.1	Gesamtwirkungsgradoptimale Schaltpunkte des Getriebes	49
5.2.2	Aufwand- und nutzenbasiertes Ladezustandsmanagement der Hochvoltbatterie	59
5.2.3	Verbrauchsoptimierte Startkoordination des Verbrennungsmotors	78
5.3	Bewertung der Optimierungsansätze in Simulationen	89
5.3.1	Simulationsumgebung	89
5.3.2	Verbrauchseinsparung	90
5.3.3	Einschränkungen durch Anforderungen des Serenumfelds	95
5.4	Verknüpfung der Optimierungsansätze in einer übergeordneten Betriebsstrategie	102
5.5	Bewertung der Ergebnisse und der Realisierbarkeit	103
6	Integration des optimierten Ladezustandsmanagements in ein Serienhybridfahrzeug	105
6.1	Funktionsarchitektur	105
6.1.1	Architektur des Ladezustandsmanagements	105
6.1.2	Anforderungen des Serienentwicklungsprozesses	107
6.1.3	Integration in die Fahrzeuggesamtarchitektur	111
6.2	Funktionsentwicklung	112
6.2.1	Berechnung von Aufwand und Nutzen	112
6.2.2	Betriebspunktabhängige Leistungsermittlung und zugehöriger Aufwand und Nutzen	118
6.2.3	Lade- und Entladebedingung	120
6.3	Funktionsintegration und -test	120
6.3.1	Testumgebung	120
6.3.2	Definition von Testfällen	123
6.3.3	Validierung des Lösungsansatzes	123
6.4	Analyse des Verbrauchseinsparpotenzials	125
6.5	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	131
7	Zusammenfassung und Ausblick	133
	Formelzeichen	137
	Abkürzungen	139
	Abbildungsverzeichnis	140
	Tabellenverzeichnis	147

A Anhang	149
A.1 Referenzpunkt im Antriebsstrang	149
A.2 Offlineoptimierung und Parametervariation	150
A.3 Simulationsmodell und -ergebnisse	154
A.4 Serienentwicklung	160
Literaturverzeichnis	161

1 Einleitung

Individuelle Mobilität ist ein wesentlicher Bestandteil der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung. Die globale Erwärmung [71] sowie die Verknappung fossiler Rohstoffe [40, 61] erfordert jedoch ein Umdenken in der Gesellschaft und der Automobilindustrie:

„Nach neuesten Erkenntnissen führt bereits die aktuelle Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre zu einer Erwärmung von 2°C. Um das Zwei-Grad-Ziel einzuhalten, muss die Menschheit den Anstieg der jährlichen, globalen Treibhausgasemissionen spätestens im Zeitraum 2015 bis 2020 stoppen und anschließend ohne Verzögerung um jährlich 5 % senken. Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts muss sie die jährlichen, globalen Emissionen mindestens auf die Hälfte der Emissionen des Jahres 1990 zurückführen und danach weiter reduzieren.“ [71]

CO₂ stellt im Verkehrssektor das bedeutendste Klimagas dar [71]. Der Verkehr hat in der Europäischen Union einen Anteil von 26 % an den gesamten CO₂-Emissionen [54], 12 % stammen alleine vom Pkw-Verkehr [24]. Um die CO₂-Emissionen des Pkw-Verkehrs zu reduzieren, schreibt die Europäische Union für das Jahr 2012 die Obergrenze von durchschnittlich 130 Gramm CO₂ pro Kilometer der Neufahrzeugflotte der Automobilhersteller vor [27]. Die Forderung nach verbrauchs- und somit emissionsarmen Kraftfahrzeugen steht jedoch zum Teil im Widerspruch zu Anforderungen hinsichtlich Fahrkomfort, -dynamik, Sicherheit und Kosten [48]. Die Lösung dieses Zielkonflikts stellt eine entscheidende Herausforderung für die Automobilindustrie dar. Hierbei steht neben der Erfüllung gesetzlicher Vorgaben die Kundenakzeptanz der Lösungsansätze im Mittelpunkt.

Rein elektrisch betriebene Fahrzeuge bieten die Möglichkeit, diesen Zielkonflikt zu lösen und den Flottenverbrauch der Automobilhersteller zu reduzieren. Sie sind jedoch lediglich lokal emissionsfrei. Um sie konventionellen, verbrennungsmotorischen Antrieben gegenüberzustellen, müssen auch die Emissionen der Stromerzeugung in die Betrachtung einbezogen werden. Nach [16] würde beispielsweise ein elektrisch betriebener Mittelklasse-Pkw bei der ausschließlichen Nutzung von Strom aus Kohlekraftwerken durchschnittlich 160 Gramm CO₂ pro Kilometer ausstoßen. Erst ein höherer Anteil erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung verringert die Emissionen. Der Anteil von Elektrofahrzeugen an den verkauften Neuwagen in der EU wird laut [25] im Jahr 2020 bei lediglich 1 bis 2 % liegen, erst für das Jahr 2030 werden 11 bis 30 % erwartet.

[70] prognostiziert für das Jahr 2020 einen weltweiten Marktanteil von lediglich 2 bis 5 %, für das Jahr 2030 von 5 bis 12 % (siehe Abbildung 1.1).

Der Hybridantrieb stellt den Übergang von konventionellen Antrieben hin zu rein elektrischen Antrieben dar. Diese Technologie bietet durch die Kombination von Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine energetische Vorteile gegenüber konventionellen Antrieben. Im Vergleich zu Elektrofahrzeugen wird für Hybridfahrzeuge mittelfristig ein deutlich höherer weltweiter Marktanteil prognostiziert [70]: Für das Jahr 2020 wird ein Anteil von 19 bis 28 % erwartet, für das Jahr 2030 von 30 bis 68 % (siehe Abbildung 1.1). Deshalb wird diesem Antriebskonzept eine entscheidende Rolle bei der Reduktion des Flottenverbrauchs der Automobilhersteller zugesprochen. Das Einsparpotenzial hängt zum einen von den Komponenten des Antriebsstrangs ab. Darüber hinaus ist die Strategie entscheidend, die das Zusammenspiel der Komponenten im Fahrbetrieb koordiniert. Diese sogenannte Betriebsstrategie hat das Ziel, die durch die Antriebsstrangkomponenten theoretisch darstellbare Verbrauchseinsparung bestmöglich auszunutzen. In Hybridfahrzeugen im Großserieneinsatz darf die energetische Optimierung jedoch nicht zu Lasten der Kundenakzeptanz gehen.

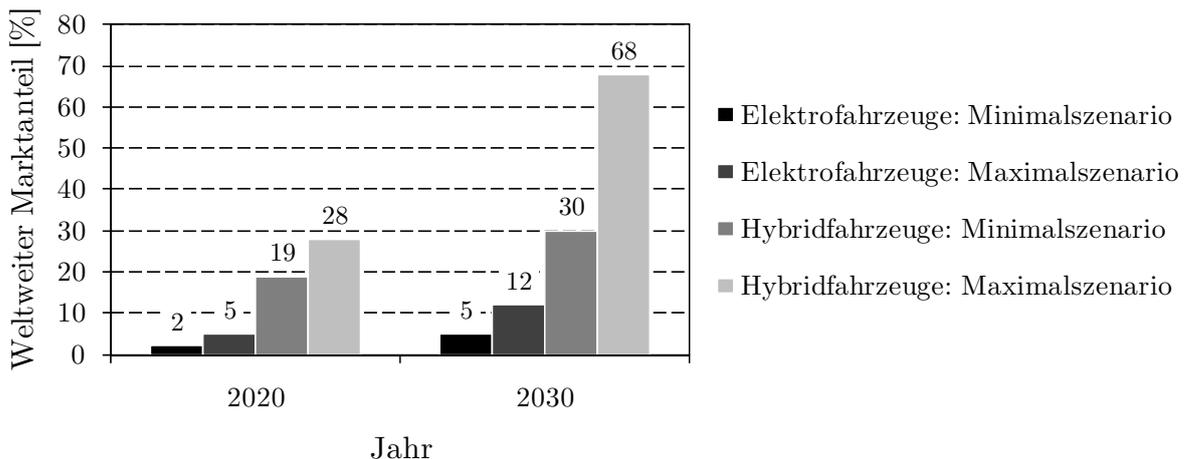


Abb. 1.1: Weltweiter Marktanteil von Elektro- und Hybridfahrzeugen [70]: Für das Jahr 2030 wird ein Marktanteil von Hybridantrieben im Bereich zwischen 30 und 68 % prognostiziert.

2 Hybrider Antriebsstrang

Dieses Kapitel zeigt zunächst auf, weshalb ein Hybridantrieb prinzipiell in der Lage ist, den Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu konventionellen Antrieben zu reduzieren. Hierzu wird die Anordnung der Antriebsstrangkomponenten in verschiedenen Systemtopologien vorgestellt. Es folgt die Erklärung der von den Komponenten ermöglichten Betriebsarten des Antriebs. Auf deren Basis werden verschiedene Hybridisierungsgrade dargestellt. Anschließend erläutert das Kapitel die energetische Betriebsstrategie, welche die Betriebsarten koordiniert.

Der zweite Teil des Kapitels setzt sich mit Rahmenbedingungen der Serienentwicklung von Hybridantrieben auseinander. Den Einstieg stellt die Ermittlung von Einsparpotenzialen in Fahrzyklen und Simulationen dar. Zudem wird die Funktionsarchitektur der Antriebskoordination in Hybridfahrzeugen exemplarisch vorgestellt. Im Anschluss wird der Funktions- und Softwareentwicklungsprozess beschrieben.

Abschließend stellt das Kapitel die Komponenten des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Hybridantriebs vor.

2.1 Systemtopologie und Komponenten

Hybride Antriebsstränge bestehen aus mindestens zwei verschiedenen Energiewandlern und zwei unterschiedlichen Energiespeichern. Meist wird ein Verbrennungsmotor [49, 6] und ein Kraftstofftank mit einer oder mehreren elektrischen Maschinen [29, 77] (in dieser Arbeit als „E-Maschinen“ bezeichnet) sowie einer Traktionsbatterie [69, 90] (in dieser Arbeit als „Hochvoltbatterie“ bezeichnet) kombiniert. Es werden drei prinzipielle Topologien unterschieden [38, 47, 89, 42, 31, 62], die Abbildung 2.1 gegenüberstellt:

- **Serieller Hybrid:** Verbrennungsmotor und Abtrieb sind mechanisch nicht gekoppelt. Alleine eine E-Maschine (Traktionsmaschine) treibt das Fahrzeug an. An den Verbrennungsmotor ist eine zweite E-Maschine gekoppelt, die als Generator betrieben wird. Die erzeugte elektrische Leistung kann in der Hochvoltbatterie zwischengespeichert oder direkt von der Traktionsmaschine genutzt werden.
- **Paraller Hybrid:** Die E-Maschine und der Verbrennungsmotor sind parallel an den Abtrieb gekoppelt. Die Antriebsquellen können jeweils einzeln auf die

Antriebswelle einwirken. Zusätzlich ist auch ein kombinierter (hybrider) Betrieb möglich. Dies erlaubt es beispielsweise, die Hochvoltbatterie mittels des Verbrennungsmotors und der generatorisch betriebenen E-Maschine zu laden (Lastpunktanhebung).

- **Leistungsverzweigter Hybrid:** Diese Topologie enthält mindestens zwei E-Maschinen. Die Antriebsleistung des Verbrennungsmotors wird sowohl über einen mechanischen als auch einen elektrischen Pfad übertragen. Die Leistungsverzweigung erfolgt durch mindestens ein Planetengetriebe. Die von der generatorisch betriebenen E-Maschine erzeugte elektrische Leistung kann im Hochvoltpeicher zwischengespeichert oder direkt von der motorisch betriebenen E-Maschine genutzt werden.

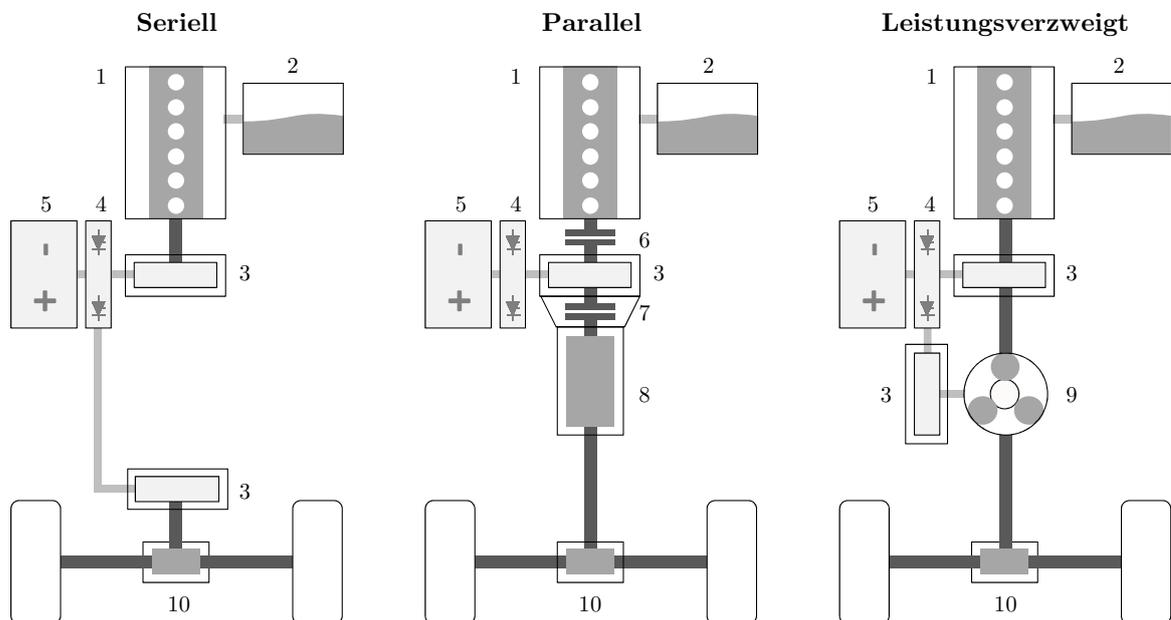


Abb. 2.1: Hybride Antriebsstränge werden in drei prinzipielle Topologien klassifiziert: Seriell, parallel und leistungszweig (1: Verbrennungsmotor, 2: Kraftstofftank, 3: E-Maschine, 4: Leistungselektronik, 5: Hochvoltbatterie, 6: Trennkupplung, 7: Anfahrrelais, 8: Automatikgetriebe, 9: Planetengetriebe, 10: Hinterachsgetriebe).

2.2 Betriebsarten

Durch die Kombination mehrerer Antriebsquellen und Energiespeicher kann in Hybridfahrzeugen die zum Antreiben und Verzögern benötigte Energie auf verschiedene Arten bereitgestellt werden, den sogenannten Betriebsarten [47, 89, 42, 31, 62, 38]:

- **Verbrennungsmotorisches Fahren:** Wie in einem konventionellen Antriebsstrang liefert der Verbrennungsmotor die Leistung zum Antreiben des Fahrzeugs.
- **Elektrisches Fahren:** Die E-Maschine liefert die Leistung zum Antreiben des Fahrzeugs.
- **Lastpunktanhebung:** Der Verbrennungsmotor liefert die Leistung zum Antreiben des Fahrzeugs. Zusätzlich stellt er Leistung zum Laden der Hochvoltbatterie bereit. Hierzu wird die E-Maschine generatorisch betrieben. Im Vergleich zum verbrennungsmotorischen Fahren wird die vom Verbrennungsmotor abgegebene Leistung um den Betrag der von der E-Maschine aufgenommenen Leistung erhöht. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass am Getriebeeingang der Antriebswunsch des Fahrers bereitgestellt werden kann.
- **Lastpunktabsenkung bzw. Assist:** Der Verbrennungsmotor und die E-Maschine liefern die Leistung zum Antreiben des Fahrzeugs. Im Vergleich zum verbrennungsmotorischen Fahren wird die vom Verbrennungsmotor abgegebene Leistung um den Betrag der von der E-Maschine bereitgestellten Leistung reduziert. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass am Getriebeeingang ausschließlich der Fahrerwunsch bereitgestellt wird. Diese Betriebsart dient vorwiegend dem Entladen der Hochvoltbatterie.
- **Boost:** Der Verbrennungsmotor und die E-Maschine liefern die Leistung zum Antreiben des Fahrzeugs. Im Gegensatz zu der Betriebsart Assist bleibt die vom Verbrennungsmotor abgegebene Leistung bezogen auf den verbrennungsmotorischen Betrieb gleich. Die Leistung der E-Maschine wird dazu genutzt, das Instationärverhalten des Verbrennungsmotors zu verbessern (Responseboost) und die stationäre Vollast des Antriebs zu erhöhen (Overboost). Auf diese Weise kann die Längsdynamik des Fahrzeugs gesteigert werden.
- **Rekuperation:** Die E-Maschine stellt Verzögerungsleistung bereit. Hierzu wird sie generatorisch betrieben. Die Energie wird in der Hochvoltbatterie zwischengespeichert.

2.3 Hybridisierungsgrad

Die Verfügbarkeit und Ausprägung der vorgestellten Betriebsarten ist in parallelen Hybridantrieben vom Hybridisierungsgrad des Antriebsstrangs abhängig. Bezüglich der elektrischen Leistungsfähigkeit werden die drei Klassen Micro-, Mild- und Full-Hybrid unterschieden [38, 47, 89, 42, 31, 62].

Das **Micro-Hybridsystem** stellt einen Übergang vom konventionellen Antrieb zum Hybridantrieb dar. Es handelt sich um riemengetriebene Startergeneratorsysteme, die

die Funktion von Anlasser und Generator übernehmen. Dadurch kann eine Motor-Start/Stop-Funktion umgesetzt werden, die den Verbrennungsmotor in den Stillstandsphasen abschaltet. Außerdem besteht die Möglichkeit der Rekuperation von Bremsenergie. Die geringe Leistung des Generators ($< 10 \text{ kW}$) begrenzt jedoch deren Potenzial.

In **Mild-Hybridsystemen** sind E-Maschine und Batterie im Vergleich zum Micro-Hybrid für höhere Leistungen ausgelegt ($5 - 20 \text{ kW}$), weshalb meist ein zusätzliches Bordnetz mit einer höheren Spannung ($> 60 \text{ V}$) verwendet wird. Somit kann das Rekuperationspotenzial besser ausgenutzt werden. Die E-Maschine ist direkt auf der Kurbelwelle zwischen Motor und Getriebe integriert und kann neben dem Starter- und Generatorbetrieb auch zusätzlich zum Verbrennungsmotor Antriebsleistung bereitstellen. Somit stehen neben der Rekuperation auch die Betriebsarten Boost, Assist und Lastpunktanhebung vollständig zur Verfügung.

In **Full-Hybridsystemen** ist neben verbrennungsmotorischem und mit der E-Maschine kombiniertem Betrieb auch rein elektrisches Fahren möglich. Hierzu befindet sich meist eine Trennkupplung zwischen E-Maschine und Verbrennungsmotor. Im Vergleich zu den beiden anderen Ausprägungen fallen höhere elektrische Leistungen für Antrieb und Energierückgewinnung an ($> 20 \text{ kW}$). Es ist ein zusätzliches Bordnetz mit einer höheren Spannung ($> 200 \text{ V}$) erforderlich.

2.4 Energetische Betriebsstrategie

Die verschiedenen Betriebsarten hybrider Antriebe müssen in einer übergeordneten Strategie koordiniert werden. Diese sogenannte energetische Betriebsstrategie steuert in Abhängigkeit von dem Betriebszustand des Fahrzeugs die Abfolge und Ausprägung der Betriebsarten (siehe Abbildung 2.2). Sie koordiniert die Teilsysteme des Antriebs und Fahrzeugs unter Berücksichtigung definierter Funktionsziele und -anforderungen. Dadurch bestimmt sie die Energieflüsse im Antriebsstrang. Sie verteilt die vom Fahrer gewünschte Antriebsenergie zwischen der E-Maschine und dem Verbrennungsmotor. Auf diese Weise legt sie z. B. fest, in welchen Situationen elektrisch gefahren wird. Außerdem regelt die Betriebsstrategie durch das Laden mittels Lastpunktanhebung und das Entladen mittels Lastpunktabsenkung den Ladezustand (State of Charge, SOC) der Hochvoltbatterie (SOC-Regelung). Darüber hinaus bestimmt sie die Übersetzung des Getriebes und legt auf diese Weise die Drehzahl von E-Maschine und Verbrennungsmotor fest [43, 47, 63].

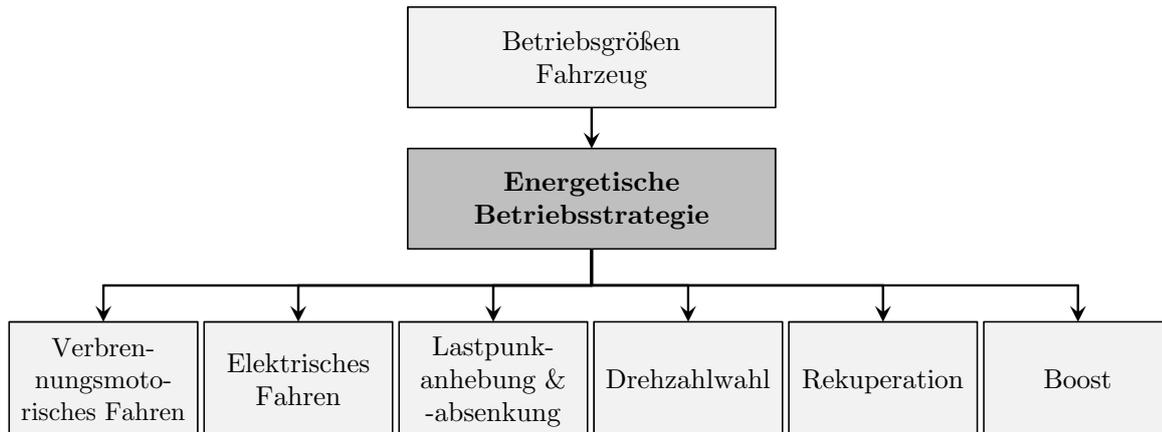


Abb. 2.2: Die energetische Betriebsstrategie steuert die Abfolge und Ausprägung der verschiedenen Betriebsarten des Hybridantriebs.

2.4.1 Ziele und Anforderungen

Das primäre Ziel der energetischen Betriebsstrategie besteht darin, den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs zu minimieren. Außerdem ist sicherzustellen, dass die von dem Fahrer angeforderte Antriebsenergie stets bereitgestellt werden kann [34, 66]. Um einen geringen Kraftstoffverbrauch zu erreichen, muss die Betriebsstrategie speziell auf den jeweiligen Antriebsstrang abgestimmt sein [17]. Sie sollte sich am aktuellen Betriebspunkt der Antriebsstrangkomponenten ausrichten. Deshalb müssen die Steuerfunktionen die Betriebsgrößen des Fahrzeugs verarbeiten, wie z. B. die Fahrzeuggeschwindigkeit, den Ladezustand sowie die Komponentendrehzahlen und -momente [43, 63].

Die Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge im Serieneinsatz hat jedoch darüber hinaus auch Anforderungen zu erfüllen, die Einschränkungen des Verbrauchersparpotenzials nach sich ziehen. Die Betriebsarten können nicht ausschließlich hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs gesteuert werden, es sind u. a. auch Kundenerwartungen an das Fahrzeugverhalten zu erfüllen. So muss die Betriebsstrategie anhand des Ladezustands der Hochvoltbatterie die Verfügbarkeit der hybridspezifischen Betriebsarten sicherstellen. D. h. es ist zum einen ausreichend Energie für das elektrische Fahren und Boosten zur Verfügung zu stellen. Zum anderen müssen jedoch auch Vorhalte für die Rekuperation von Bremsenergie geschaffen werden [8]. Außerdem hat die Betriebsstrategie Anforderungen hinsichtlich Fahrkomfort, -dynamik und -stabilität zu erfüllen [33]. Darüber hinaus bestehen gesetzliche Anforderungen. So muss bspw. in normierten Fahrzyklen für Hybridfahrzeuge ohne externe Lademöglichkeit der Ladezustand der Hochvoltbatterie am Ende des Zyklus das Niveau bei Zyklusstart erreichen (SOC-Neutralität) [26].

Eine detaillierte Analyse der Anforderungen an die Betriebsstrategie von Hybridfahrzeugen erfolgt im weiteren Verlauf der Arbeit. Die Abschnitte 4.3 und 5.1.1 beschreiben,

inwiefern die Anforderungen eines Serieneinsatzes die Freiheitsgrade der Betriebsstrategie und somit das Verbrauchseinsparpotenzial des Hybridantriebs beschränken.

2.4.2 Optimierungsmethoden

Die energetische Betriebsstrategie hat einen erheblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hybrider Antriebe [57, 15]. Es existieren verschiedenste Methoden, um die Betriebsstrategie hinsichtlich der Verbrauchseffizienz zu optimieren. Nach [34] werden heuristische, optimale und suboptimale Verfahren unterschieden.

Heuristische Verfahren

Heuristische Verfahren sind regelbasiert. Sie nutzen boolesche Verknüpfungen oder Fuzzy Logic für verschiedene Betriebsgrößen des Fahrzeugs [34, 30, 2]. Die den Regeln zugrunde liegenden Parameter bzw. Grenzwerte sind an den Antriebsstrang, das Fahrzeug und verschiedene Fahrzyklen anzupassen. Dies erfolgt meist nicht online im Fahrzeug, sondern offline (Offlineoptimierung) beispielsweise mittels Dynamischer Programmierung (DP) [37] oder Genetischer Algorithmen (GA) [39]. Da heuristische Verfahren direkt auf den Betriebsgrößen des Fahrzeugs basieren, handelt es sich um eine kausale Methode. Somit kann sie in Echtzeitsystemen eingesetzt werden [87, 9, 33, 92, 72, 94].

Optimale Verfahren

Optimale Verfahren haben das Ziel, den Energieverbrauch über einen gesamten Fahrzyklus zu minimieren. Hierzu werden für alle Zeitpunkte des Zyklus optimale Stellgrößen generiert. Eine wesentliche Randbedingung stellt die SOC-Neutralität dar. Das Fahrprofil muss im Voraus bekannt sein, somit ist diese Methode nicht kausal. Sie ist daher nicht echtzeitfähig und nicht online in Fahrzeugen einsetzbar. Es werden numerische Ansätze, wie die Dynamische Programmierung (DP) und analytische Verfahren, wie das Pontryagin's Minimum Prinzip (PMP) genutzt [34, 44, 82, 45, 83, 47]. Neben der Betrachtung eines einzelnen Fahrzyklus ist auch die Ableitung einer stochastischen Betriebspunktverteilung aus verschiedenen Fahrzyklen möglich [55].

Suboptimale Verfahren

Suboptimale Verfahren haben das Ziel, den Energieverbrauch im aktuellen Betriebspunkt bzw. Rechenschritt zu minimieren. Die elektrische Energie wird mit der Kraftstoffenergie in einer Kosten- bzw. Gütefunktion kombiniert. Hierzu wird ein Verbrauchs-

äquivalent genutzt, das die elektrische Energie entsprechend gewichtet. Der äquivalente Kraftstoffverbrauch besteht somit aus dem aktuellen Kraftstoffverbrauch und dem gewichteten elektrischen Verbrauch. Die Kostenfunktion wird in jedem Rechenschritt in Abhängigkeit von den Betriebsgrößen des Fahrzeugs minimiert. Es werden geringe Abweichungen des SOC zwischen Zyklusstart und -ende zugelassen. Die Verfahren sind kausal und können daher in Echtzeitsystemen eingesetzt werden. Die Berechnungen erfolgen in diesem Fall online auf dem Fahrzeugsteuergerät (Onlineoptimierung). Hierzu ist ein Modell des Antriebsstrangs nötig. Ein verbreitetes Verfahren stellt die Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) dar [34, 87, 9, 82, 83, 50, 47, 33].

Gegenüberstellung und Bewertung

Heuristische Verfahren bieten den Vorteil eines transparenten Funktionsaufbaus, wodurch die Implementierung und Handhabbarkeit im Entwicklungsprozess erleichtert wird. Dies betrifft insbesondere die Applikation der Funktionen für das jeweilige Zielfahrzeug. Die Parameter der Funktionen haben jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Optimierungsgrößen, wie z. B. den Kraftstoffverbrauch. Je nach Antriebsstrang ist u. U. eine Vielzahl an Parametern nötig, um die Verbrauchspotenziale ausschöpfen zu können. Zudem ist die Robustheit begrenzt, da die gewählten Parameter meist nicht alle Fahrsituationen abdecken [34, 37].

Optimale Verfahren ermöglichen die Ableitung von Grenzpotenzialen. Hierzu muss jedoch das Fahrprofil oder die stochastische Verteilung der Betriebspunkte im Voraus bekannt sein. Optimale Verfahren sind somit nicht kausal und nicht echtzeitfähig. Eine Berücksichtigung der tatsächlichen Fahrsituation und des aktuellen Betriebszustandes des Fahrzeugs ist nicht möglich [34, 83].

Durch suboptimale Verfahren (Onlineoptimierungen) passt sich die Betriebsstrategie in Echtzeit an Fahrsituation und Betriebszustand an. Auf diese Weise ist die Optimierung unabhängig vom jeweiligen Fahrzyklus. Es handelt sich jedoch lediglich um eine lokale Optimierung, d. h. die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den aktuellen Betriebspunkt des Fahrzeugs [83]. Abhilfe hierzu bieten Ansätze zur Situationserkennung und -prädiktion [4, 8, 92, 53, 19] oder Adaptionen durch Neuronale Netze [44, 86]. Außerdem beanspruchen Onlineoptimierungen eine hohe Rechenleistung des Steuergeräts. Die Funktionen sind meist sehr komplex aufgebaut. Die Parameter können oft nur bei Kenntnis des Algorithmus nachvollzogen werden, während dies im Falle heuristischer Methoden aufgrund von Erfahrungen oder Modellvorstellungen möglich ist. Dadurch wird die Handhabung der Onlineoptimierungen im Entwicklungsprozess erschwert [87, 34, 32]. Nach [33] ist der zusätzliche Aufwand nicht gerechtfertigt, da auch mit heuristischen Verfahren vergleichbare Einsparpotenziale erreicht werden können.

2.5 Verbrauchseinsparung

Die vorangegangenen Abschnitte beschreiben Hybridantriebe hinsichtlich der Systemtopologie, der Hybridisierungsgrade, der Betriebsarten und der energetischen Betriebsstrategie. Darauf aufbauend erläutert der vorliegende Abschnitt, weshalb in einem Full-Hybridsystem energetische Vorteile im Vergleich zu konventionellen Antriebssträngen bestehen. Daraufhin werden in der Serienentwicklung relevante Fahrzyklen zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs vorgestellt. Abschließend verdeutlicht der Abschnitt, dass in Simulationen bestimmte Verbrauchseinsparpotenziale in der Serienentwicklung stets auf das konventionelle Basisfahrzeug zu beziehen sind.

2.5.1 Energetische Vorteile gegenüber konventionellen Antriebssträngen

Hybride Antriebe verknüpfen die spezifischen Vorteile der jeweiligen Antriebsquellen und Energiespeicher. Dies ermöglicht ein optimiertes Betriebsverhalten. Während in konventionellen Fahrzeugen ausschließlich Reibbremsen für die Fahrzeugverzögerung genutzt werden, erlaubt der generatorische Betrieb der E-Maschine in Rekuperationsphasen die Verzögerungsenergie teilweise in der Hochvoltbatterie zwischenzuspeichern. Die gewonnene Energie kann zur Deckung des Bordnetzbedarfs oder für elektrisches Fahren verwendet werden. Durch elektrisches Fahren bei geringer Last und Geschwindigkeit kann der verbrauchsungünstige Teillastbereich des Verbrennungsmotors vermieden werden. Dies ist ebenfalls durch Lastpunktanhebungen zum Laden der Hochvoltbatterie möglich. Hierbei kann zwar der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors gesteigert werden, durch die höhere Last wird jedoch mehr verbraucht als im ursprünglichen Betriebspunkt. Dieser Mehrverbrauch wird – in Abhängigkeit von der Betriebsstrategie – durch die Einsparung aufgrund des elektrischen Fahrens überkompensiert. Hierzu muss die gesamte Wirkungsgradkette für das elektrische Fahren einen Vorteil im Vergleich zum Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors aufweisen [66, 57, 8].

Die Verbrauchseinsparung von Hybridantrieben im Vergleich zu konventionellen Antriebssträngen variiert in Abhängigkeit von der Systemtopologie und der Betriebsstrategie. Bereits im Jahr 1998 wies z. B. [42] in Simulationen eines parallelen Hybridantriebs eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im NEFZ um 25 % aus. Optimierungen in einem Parallelhybrid der Mittelklasse [15] und Oberklasse [23] weisen in Simulationen Einsparpotenziale von bis zu 35 % aus. [22] zeigt in einem leistungsverzweigten Serienhybridfahrzeug eine Verbrauchsreduktion von 20 %.

2.5.2 Verbrauchsermittlung in Fahrzyklen

Um den Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen objektiv zu bewerten, werden standardisierte Fahrzyklen verwendet. Diese beinhalten neben dem Geschwindigkeitsprofil auch die Rahmenbedingungen, die in der Verbrauchsmessung eingehalten werden müssen. Dabei handelt es sich beispielsweise um Vorkonditionierung, Lufttemperatur und Beladung. Anhand der Ergebnisse dieser Zyklen wird für die jeweilige Länderzulassung der Durchschnittsverbrauch ermittelt. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Fahrzyklen verwendet:

- Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ): Zyklus zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen, die in der Europäischen Union zugelassen werden [26].
- Federal Test Procedure 72 (FTP-72): Grundlage des in den USA zulassungsrelevanten Zyklus FTP-75. In letzterem wird zunächst der FTP-72 durchfahren, nach einer zehn minütigen Standzeit folgen erneut die ersten 506 s des FTP-72 [88].

Der Geschwindigkeitsverlauf der beiden Fahrzyklen ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt im NEFZ 33.6 km/h und im FTP-72 31.5 km/h. Maximal werden im NEFZ 120 km/h erreicht, im FTP-72 91.2 km/h. Der NEFZ ist 11 km lang und dauert 1180 s, der FTP-72 ist 12 km lang und dauert 1372 s.

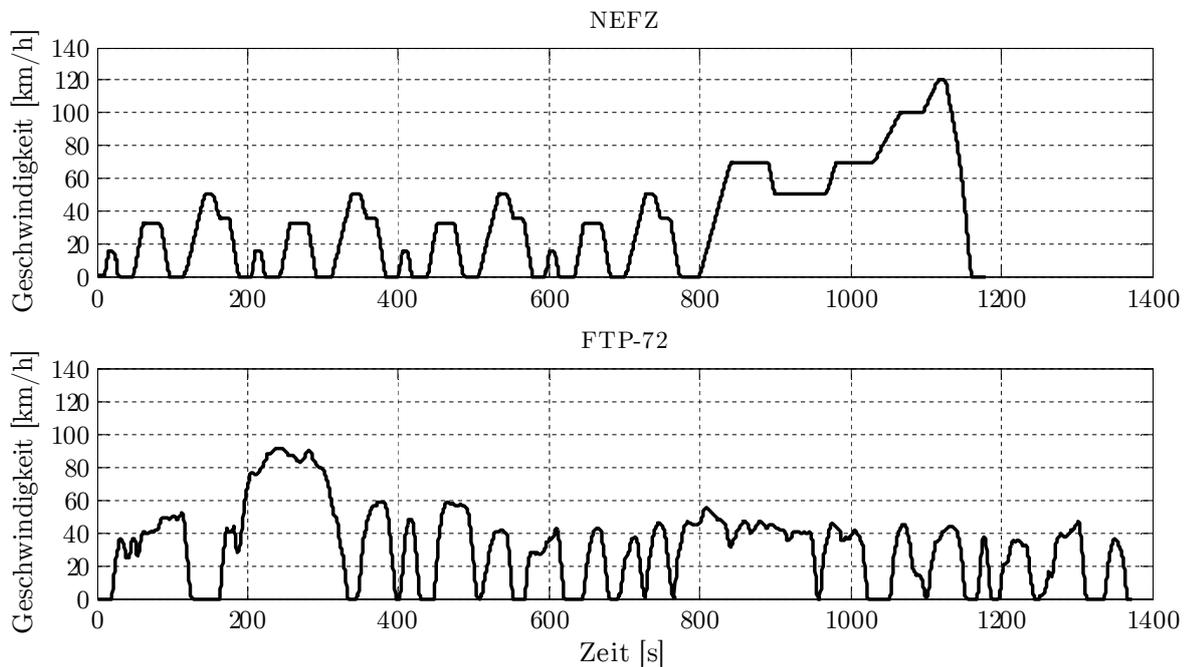


Abb. 2.3: Standardisierte Fahrzyklen zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs: Geschwindigkeitsprofil des NEFZ und des FTP-72.

Während der NEFZ lediglich Beschleunigungen aufweist, die kleiner als 1 m/s^2 sind, erfordert der FTP-72 Beschleunigungen von bis zu 1.5 m/s^2 . Die maximale Verzögerung ist in den Zyklen annähernd gleich (NEFZ: -1.4 m/s^2 , FTP-72: -1.5 m/s^2). Der FTP-72 basiert im Vergleich zum NEFZ auf realen Fahrprofilen. Deshalb enthält dieser keine synthetischen Plateaus mit konstanter Geschwindigkeit. Eine detaillierte Analyse gesetzlicher Fahrzyklen findet sich beispielsweise in [23].

2.5.3 Ermittlung des Einsparpotenzials in Simulationen

Im Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs ist es nötig, dessen Kraftstoffverbrauch bereits vor dem Bau erster Versuchsträger zu analysieren. Ein Ziel besteht beispielsweise darin, die Systemtopologie oder die Betriebsstrategie zu bewerten. Deshalb kommen Gesamtfahrzeugsimulationen zum Einsatz.

Im Kontext hybrider Antriebe dienen die Simulationen vorwiegend der Ermittlung von Einsparpotenzialen durch die Hybridisierung bezogen auf einen Referenzverbrauch. Wird dieser falsch oder nicht einheitlich gewählt, so sind auch die ausgewiesenen Verbrauchspotenziale fehlerhaft. Dies ist insbesondere dann kritisch, wenn in theoretischen Voruntersuchungen zu hohe Einsparpotenziale ermittelt werden, die schließlich in Serienfahrzeugen nicht erreichbar sind. Deshalb ist in der Serienentwicklung von Hybridantrieben stets der Verbrauchsvorteil gegenüber dem konventionellen Basisfahrzeug von Bedeutung. Dies betrifft zum einen die Gesamteinsparung durch die Hybridisierung des Antriebsstrangs. Zum anderen wird auch der Einfluss von Variationen in der Betriebsstrategie auf das Einsparpotenzial bewertet. Die Berechnungsmethode wird anhand von Abbildung 2.4 erläutert.

Zunächst ist der Verbrauch des Basisfahrzeugs zu ermitteln. Um die Komplexität der Simulationsmodelle zu begrenzen, werden die Komponenten des Antriebsstrangs oft vereinfacht dargestellt, z. B. auf Basis von Kennfeldern. Daraus resultiert eine Abweichung zwischen dem Kraftstoffverbrauch in den Simulationen und in den realen Fahrzeugen. Diese ist bei der Ausweisung von Einsparpotenzialen zu berücksichtigen. Da in der frühen Entwicklungsphase der reale Verbrauch nicht anhand von Versuchsträgern ermittelt werden kann, ist der Zielverbrauch für das Basisfahrzeug entscheidend. Dieser wird aus dem Verbrauch vergleichbarer Fahrzeugkonzepte abgeleitet.

Die Berechnung der Einsparpotenziale erfolgt unter der Prämisse, dass in den Simulationsmodellen für das Basisfahrzeug und das Hybridfahrzeug die gleichen Vereinfachungen enthalten sind. Die Verbrauchseinsparung durch die Hybridisierung wird anhand des Deltaverbrauchs der beiden Simulationen und des Zielverbrauchs für das Basisfahrzeug berechnet (siehe Abbildung 2.4):

$$\text{Einsparpotenzial}_{\text{Hybridisierung}} = \frac{\text{Deltaverbrauch}_{\text{Hybridisierung}}}{\text{Zielverbrauch}_{\text{Basisfahrzeug}}} \quad (2.1)$$

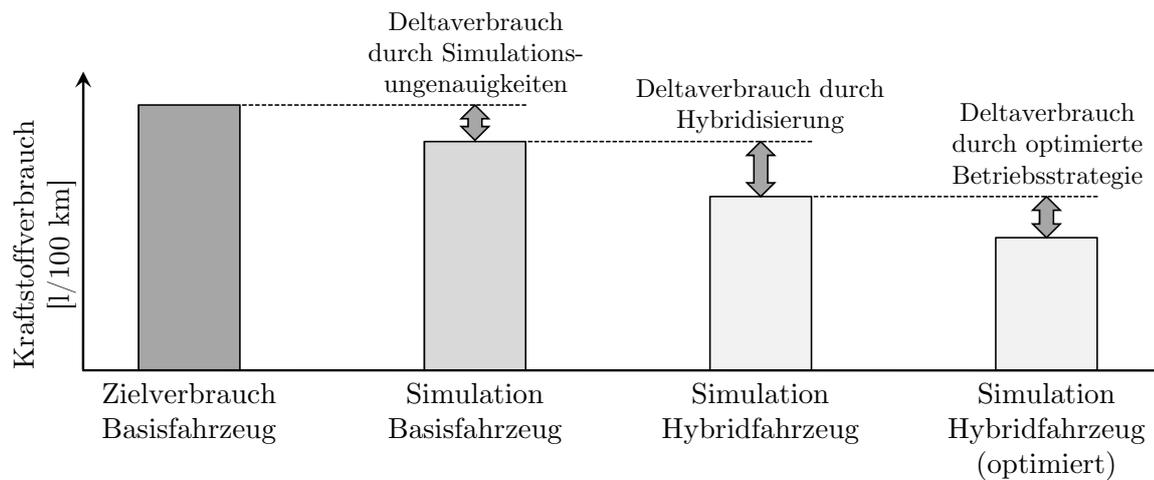


Abb. 2.4: Ermittlung des Einsparpotenzials hybrider Antriebe: Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, sind die Simulationsergebnisse auf den Zielverbrauch des konventionellen Basisfahrzeugs zu beziehen.

Um Variationen oder Optimierungen in der energetischen Betriebsstrategie zu bewerten, wird anhand des Deltaverbrauchs zur ursprünglichen Betriebsstrategie eine zusätzliche Einsparung berechnet:

$$\text{Einsparpotenzial}_{\text{Optimierung}} = \frac{\text{Deltaverbrauch}_{\text{Optimierung}}}{\text{Zielverbrauch}_{\text{Basisfahrzeug}}} \quad (2.2)$$

Der Einfluss dieser Berechnungsmethode auf die Einsparpotenziale wird im Folgenden an einem Zahlenbeispiel erläutert. Es werden die in Tabelle 2.1 dargestellten Verbräuche angenommen. Wie auch in Abbildung 2.4 sei durch die getroffenen Vereinfachungen der simulierte Verbrauch des Basisfahrzeugs geringer als der real erreichbare Wert.

Quelle	Kraftstoffverbrauch [l/100 km]
Zielverbrauch Basisfahrzeug	9
Simulation Basisfahrzeug	8
Simulation Hybridfahrzeug	7
Simulation Hybridfahrzeug mit optimierter Betriebsstrategie	6.5

Tab. 2.1: Beispielhafte Kraftstoffverbräuche: Auf der Basis dieser Werte wird die Berechnungsmethode der Einsparpotenziale verdeutlicht.

Tabelle 2.2 zeigt die anhand von Gleichungen 2.1 und 2.2 berechneten Einsparpotenziale. Im Vergleich dazu sind fehlerhafte Berechnungsmöglichkeiten dargestellt.

Einsparung	Potenzial korrekt berechnet [%]	Potenzial fehlerhaft berechnet [%]
Einsparpotenzial durch die Hybridisierung	11 (Gleichung 2.1)	$\frac{\text{Deltaverbrauch}_{\text{Hybridisierung}}}{\text{Simulierter Verbrauch}_{\text{Basisfahrzeug}}} = 13$ $\frac{\text{Simulierter Verbrauch}_{\text{Hybridisierung}}}{\text{Zielverbrauch}_{\text{Basisfahrzeug}}} = 22$
Einsparpotenzial durch die optimierte Betriebsstrategie	5.6 (Gleichung 2.2)	$\frac{\text{Deltaverbrauch}_{\text{Optimierung}}}{\text{Simulierter Verbrauch}_{\text{Hybridfahrzeug}}} = 7.1$ $\frac{\text{Deltaverbrauch}_{\text{Optimierung}}}{\text{Simulierter Verbrauch}_{\text{Basisfahrzeug}}} = 6.3$

Tab. 2.2: Beispielhafte Einsparpotenziale: Das berechnete Einsparpotenzial variiert in Abhängigkeit von der gewählten Referenz.

Das Rechenbeispiel zeigt, dass die Einsparpotenziale stark vom jeweiligen Referenzverbrauch abhängen. Hinsichtlich der Bewertung einer optimierten Betriebsstrategie täuscht ein alleiniger Bezug auf die Simulation des Hybridfahrzeugs mit der ursprünglichen Betriebsstrategie einen um 1.5 Prozentpunkte höheren Verbrauchsvorteil vor als die Berechnung nach Gleichung 2.2. In Hinblick auf das Einsparpotenzial durch die Hybridisierung suggeriert eine falsche Berechnung ein doppelt so hohes Potenzial.

In der vorliegenden Arbeit wird die real im Serenumfeld erreichbare Verbrauchseinsparung analysiert. Deshalb erfolgen alle Potenzialangaben bezogen auf den Zielverbrauch des Basisfahrzeugs gemäß der Gleichungen 2.1 und 2.2.

2.6 Funktionsarchitektur in der Antriebskoordination

Die Antriebskoordination von Hybridfahrzeugen im Serieneinsatz zeichnet sich durch eine Vielzahl komplexer und vernetzter Softwarefunktionen aus. Die Funktionsarchitektur gliedert die Funktionen in Funktionscluster. Die Antriebskoordination beinhaltet neben der energetischen Betriebsstrategie die Cluster Fahrerwunschinterpretation und Momentenstruktur sowie Getriebesteuerung. Die Software- und Bordnetzarchitektur ordnet die Funktionscluster den Steuergeräten zu und legt die Kommunikation über Bussysteme fest [69, 90, 1, 74].

2.6.1 Fahrerwunschinterpretation und Momentenstruktur

Die Fahrerwunschinterpretation bzw. Fahrpedalinterpretation wertet die Stellung des Fahrpedals aus und leitet daraus Sollgrößen für den Antrieb ab [51]. Abbildung 2.5 zeigt eine beispielhafte Architektur der Antriebskoordination eines Hybridfahrzeugs. Mögliche Stellgrößen sind das Sollmoment des Verbrennungsmotors und der E-Maschine. Die Stellung des Fahrpedals kann hierbei einerseits direkt mit einem Wunschmoment des Verbrennungsmotors oder der E-Maschine verknüpft werden oder andererseits auch als Wunschmoment des gesamten Antriebs an der antreibenden Achse interpretiert werden [22].

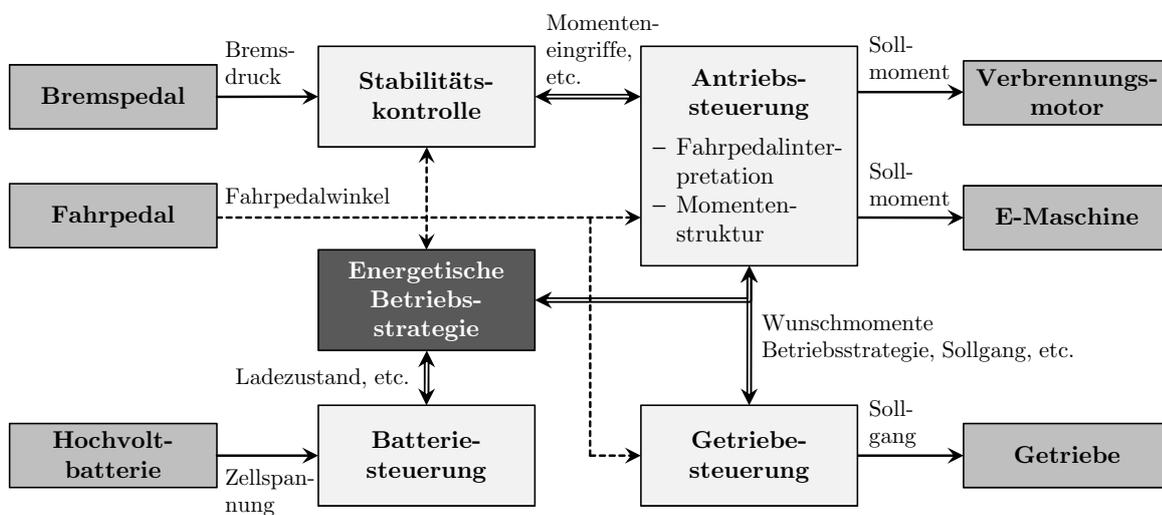


Abb. 2.5: Beispielhafte Architektur der Antriebskoordination eines Hybridfahrzeugs: Aus den Betriebsgrößen des Fahrzeugs und den Fahrervorgaben (Fahr- und Bremspedal) erzeugen die Steuergeräte Stellgrößen für Verbrennungsmotor, E-Maschine und Getriebe.

Die Wunschmomente für die Antriebsquellen werden in der Momentenstruktur koordiniert. Sie berücksichtigt die von der Betriebsstrategie gewählten Betriebsarten. Außerdem werden die Wunschmomente aus Gründen des Fahrkomforts begrenzt und gefiltert. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Momentenstruktur ist die Koordination und Priorisierung verschiedener Momentenanforderungen (vgl. z. B. auch [79, 78]). Diese stammen bspw. von der Betriebsstrategie im Falle von Lastpunktverschiebungen oder von der dynamischen Stabilitätskontrolle im Falle von Regeleingriffen. Die dynamische Stabilitätskontrolle umfasst Antriebs-Schlupf-Regelung (ASR), Motor-Schleppmoment-Regelung (MSR) und Fahrdynamikregelung. Die ASR verhindert durch eine Verringerung des Antriebsmoments ein Durchdrehen der Räder. Die MSR erhöht das Antriebsmoment z. B. bei sprunghafter Rücknahme des Fahrpedals, um eine ausreichende Traktion sicherzustellen [69].

2.6.2 Getriebesteuerung

Neben den Sollmomenten für die beiden Antriebsquellen gibt die Antriebskoordination auch den Gang des Automatikgetriebes vor (vgl. Abbildung 2.5). Hierbei kann der Sollgang zum einen anhand des Fahrpedalwinkels und der Abtriebsdrehzahl des Getriebes ermittelt werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit, anstelle des Fahrpedalwinkels das in der Fahrerwunschinterpretation berechnete Wunschmoment des gesamten Antriebs an der antreibenden Achse zu verwenden. Darüber hinaus wird in der Getriebesteuerung anhand der Betriebsgrößen des Fahrzeugs die aktuelle Fahrsituation analysiert, wie z. B. Konstantfahrt und Beschleunigung. Diese Informationen fließen ebenfalls in die Ermittlung des Sollgangs ein [22, 62].

2.7 Funktions- und Softwareentwicklungsprozess

Verbrauchseinsparungen in Hybridfahrzeugen durch optimierte Funktionen der Betriebsstrategie können im Serieneinsatz nur dann erreicht werden, wenn die Funktionen den etablierten Entwicklungsprozess der Fahrzeugentwicklung durchlaufen. Die Funktions- und Softwareentwicklung von Hybridantrieben weist einen durchgängigen Entwicklungsprozess auf, der im Rahmen des sogenannten V-Modells alle Arbeitsschritte von der Anforderungsanalyse bis hin zum Systemtest abdeckt. Der Prozess gibt zudem die Entwicklungswerkzeuge vor, die sogenannte Toolkette.

2.7.1 V-Modell

In der Funktions- und Softwareentwicklung ist das V-Modell ein anerkannter Entwicklungsstandard. Es legt die Schritte und die Methoden der Entwicklungsarbeiten fest und bewegt sich auf System- und Komponentenebene. Auch das Themenfeld Qualitätsprüfung (Verifikation und Validierung) ist durch das Modell abgedeckt [74].

Das Vorgehensmodell ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Den ersten Schritt stellt die Anforderungsanalyse dar. Darauf aufbauend wird eine Systemarchitektur erarbeitet. Diese legt die Funktions- und Softwareanforderungen sowie die Verteilung der Steuergeräte fest. Im Anschluss erfolgt die Spezifikation der Funktions- und Softwarearchitektur. Der Schritt beinhaltet die Definition von Systemgrenzen und Schnittstellen. Anschließend wird die Software spezifiziert und implementiert. Der zweite Teil des Modells beginnt mit dem Test der einzelnen Softwarekomponenten. Daraufhin werden diese in die Funktions- und Softwarearchitektur integriert und gemeinsam getestet. Der nächste Schritt sieht die Integration der Software in die Systemarchitektur vor. Dazu gehört ein Test des Steuergeräteverbands sowie eine weitere Kalibrierung bzw. Applikation. Letztere ist beispielsweise nötig, um die Software an jede Variante eines Fahrzeugs

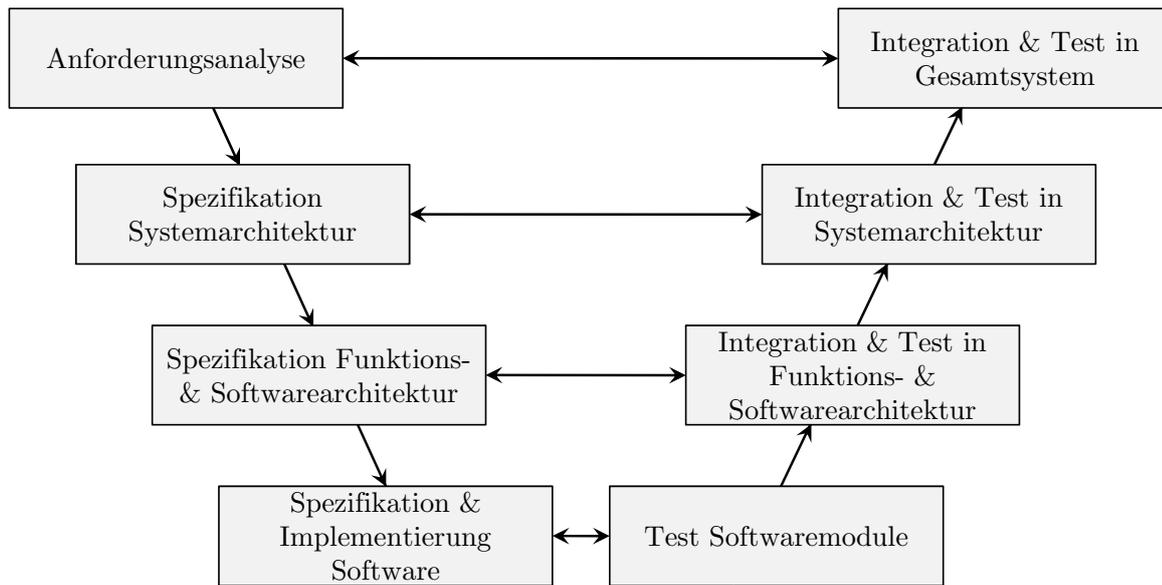


Abb. 2.6: V-Modell in der Funktions- und Softwareentwicklung [74]: Das Modell definiert die Schritte und Methoden der Entwicklungsarbeiten.

individuell anzupassen. Den Abschluss des Entwicklungsprozesses stellt der Test des Gesamtsystems dar. Dieser erbringt den Nachweis, dass das Systemverhalten den Anforderungen entspricht [74, 56, 12].

2.7.2 Toolkette

Neben den im V-Modell definierten Arbeitsabläufen sind im Funktions- und Softwareentwicklungsprozess auch die Entwicklungswerkzeuge entscheidend, die sogenannte Toolkette. Die Funktions- und Softwareentwicklung erfolgt zunehmend modellbasiert [22, 7]. Die Grundlage dazu sind graphische Funktionsmodelle, wie z. B. Blockdiagramme oder Zustandsautomaten. Ein verbreitetes Werkzeug stellt hierbei das Programmpaket Matlab dar. Durch die modellbasierte Entwicklung ist es schon früh im Entwicklungsprozess möglich, Simulationen durchzuführen oder die Funktionen durch Rapid-Prototyping in Fahrzeugen darzustellen. Durch die Simulationen kann das Funktionsverhalten bereits vor einem Einsatz in Erprobungsfahrzeugen getestet und abgesichert werden. Auch die Applikation von Funktionen kann auf diese Weise zum Teil virtuell erfolgen. Durch Methoden zur automatisierten Codegenerierung ist es möglich, die spezifizierten Funktionsmodelle direkt in Steuergerätee-Code zu überführen. Hierzu müssen Modellierungsrichtlinien eingehalten werden. Diese stellen sicher, dass auch nichtfunktionale Eigenschaften der zu generierenden Software definiert sind [74, 56]. Darin sind u. a. die zulässigen Funktionsblöcke und die Stützstellenanzahl von Kennlinien und Kennfeldern vorgegeben (vgl. Abschnitt 6.1.2).

2.8 Untersucher Antriebsstrang

In der vorliegenden Arbeit wird ein paralleler Full-Hybrid untersucht (vgl. Abbildung 2.1). Dieser Abschnitt stellt die wesentlichen Antriebsstrangkomponenten vor (vgl. [67]). Als Verbrennungsmotor kommt ein Ottomotor mit Turboaufladung, Benzindirekteinspritzung und vollvariablem Ventiltrieb zum Einsatz. Er hat sechs Zylinder, drei Liter Hubraum und 225 kW Leistung. Abbildung 2.7 zeigt das Wirkungsgradkennfeld und das maximale Moment (Volllast) des Motors. Das Kennfeld ist aus Kraftstoffmassenströmen abgeleitet, die an einem Motorenprüfstand ermittelt wurden. Die Messungen sind auf einen Drehzahlbereich zwischen 1000 und 5500 U/min begrenzt. Dieser Bereich ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausreichend. Für kleinere oder größere Drehzahlen ist das Kennfeld extrapoliert.

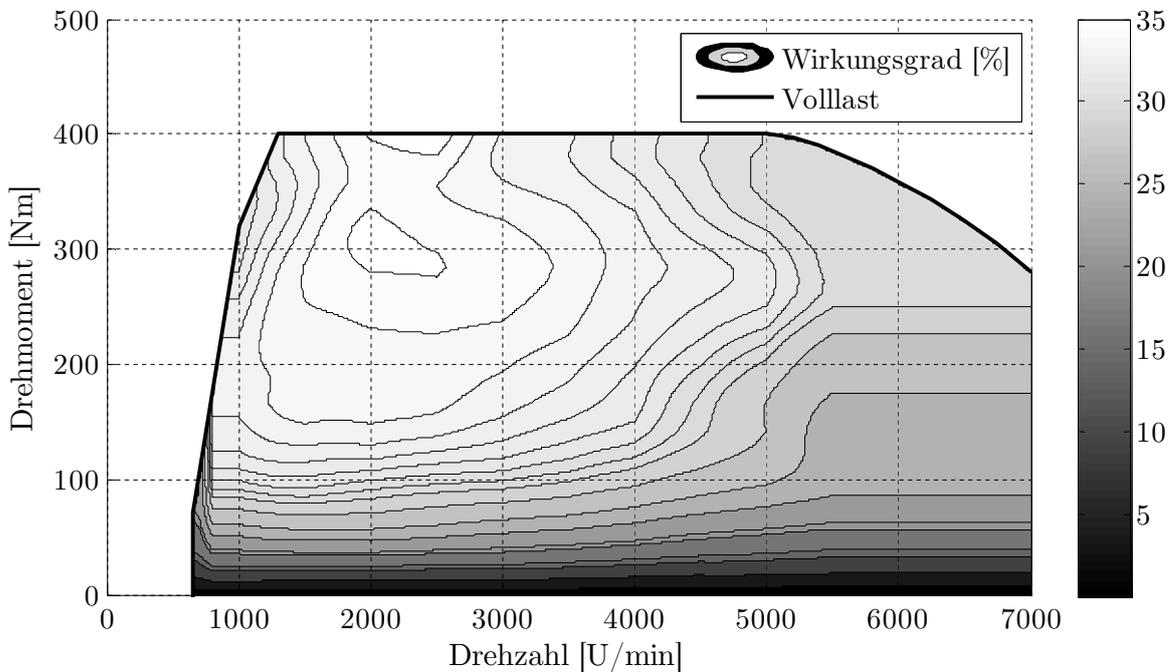


Abb. 2.7: Wirkungsgradkennfeld des Verbrennungsmotors.

Bei der E-Maschine handelt es sich um eine permanenterregte Synchronmaschine. Der Rotor besteht aus 16 Polpaaren mit Seltene-Erden-Magneten, der Stator weist 24 Spulen auf. Die E-Maschine hat eine maximale Leistung von 40 kW. Sie wird von einem bidirektionalen IGBT-Wechselrichter in Dreiphasen-Brückenschaltung angesteuert. Abbildung 2.8 zeigt den Gesamtwirkungsgrad von E-Maschine und Leistungselektronik für den motorischen und generatorischen Betrieb. Zudem ist jeweils das maximale Moment dargestellt. Der abgebildete generatorische Wirkungsgrad weist bei geringen Drehzahlen eine freie Fläche auf. In diesen Betriebspunkten übersteigen die Verluste die

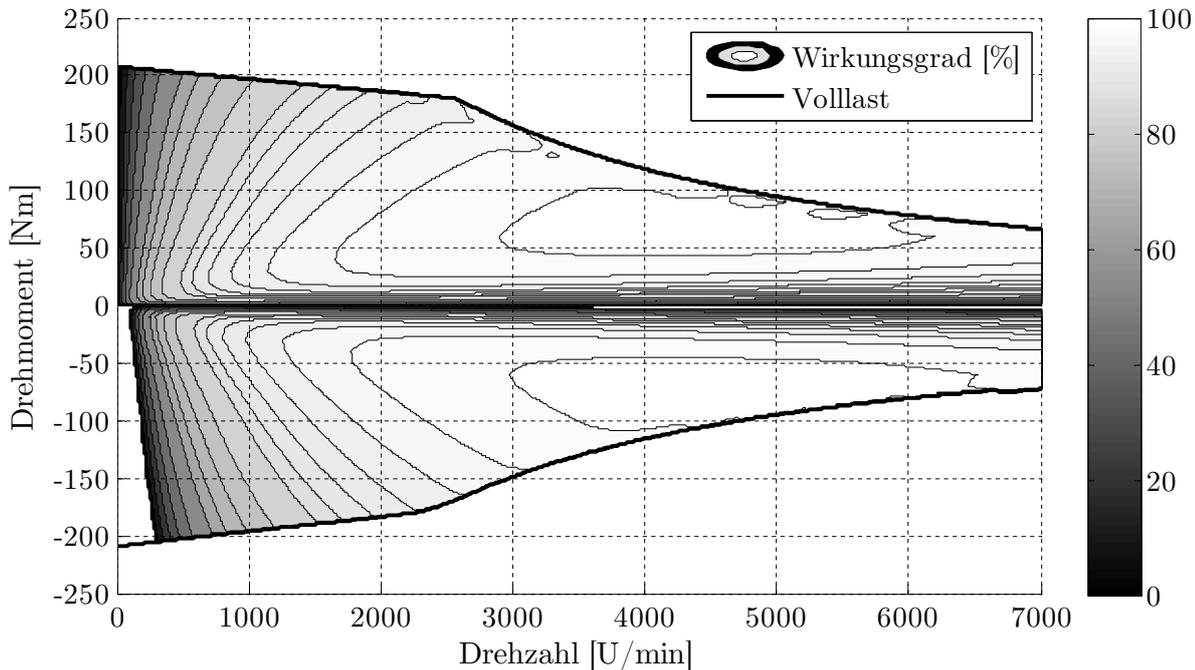


Abb. 2.8: Gesamtwirkungsgradkennfeld von E-Maschine und Leistungselektronik bei 300 V.

generierbare Leistung, es muss somit Leistung aus dem Speicher entnommen werden. Das Kennfeld wurde anhand von Verlustleistungssimulationen generiert. Hierbei wurden einzelne Betriebspunkte mit Hilfe von Prüfstandsmessungen validiert.

Der untersuchte Antriebsstrang weist neben der Traktionsmaschine auch einen Nieder-volt-Startergenerator im Riemen (SGR) auf. Es handelt sich um eine fremderregte Synchronmaschine mit zusätzlichen Permanentmagneten (Klauenpolmaschine). Der SGR ist über den Riementrieb an die Kurbelwelle gekoppelt und kann für Starts des Verbrennungsmotors genutzt werden. Abbildung 2.9 zeigt dessen Wirkungsgrad.

Der Hochvoltspeicher basiert auf Lithium-Ionen-Technologie. Er besteht aus 96 Lithium-Eisen-Phosphat Zellen mit einer Ruhespannung von 3.3 V. Der Speicher stellt einen Spannungsbereich von 200 bis 385 V zur Verfügung. Die Energiedichte beträgt 65 Wh/kg, der Energieinhalt 1.35 kWh. Von dem gesamten SOC-Bereich des Speichers wird der Bereich zwischen 25 und 70 % genutzt. In Abbildung 2.10 ist der Wirkungsgrad für das Laden und Entladen dargestellt.

Bei dem Getriebe handelt es sich um ein Stufenautomatgetriebe mit acht Gängen. Anstelle des hydrodynamischen Wandlers ist die E-Maschine verbaut. Das maximale Eingangsmoment beträgt 700 Nm, die Getriebespreizung liegt bei 7.071. Abbildung 2.11 zeigt für jeden Gang das Schleppmoment am Getriebeeingang. Hierbei ist beispielhaft zum einen der Einfluss des Getriebeeingangsmoments bei einer konstanten Getriebeein-

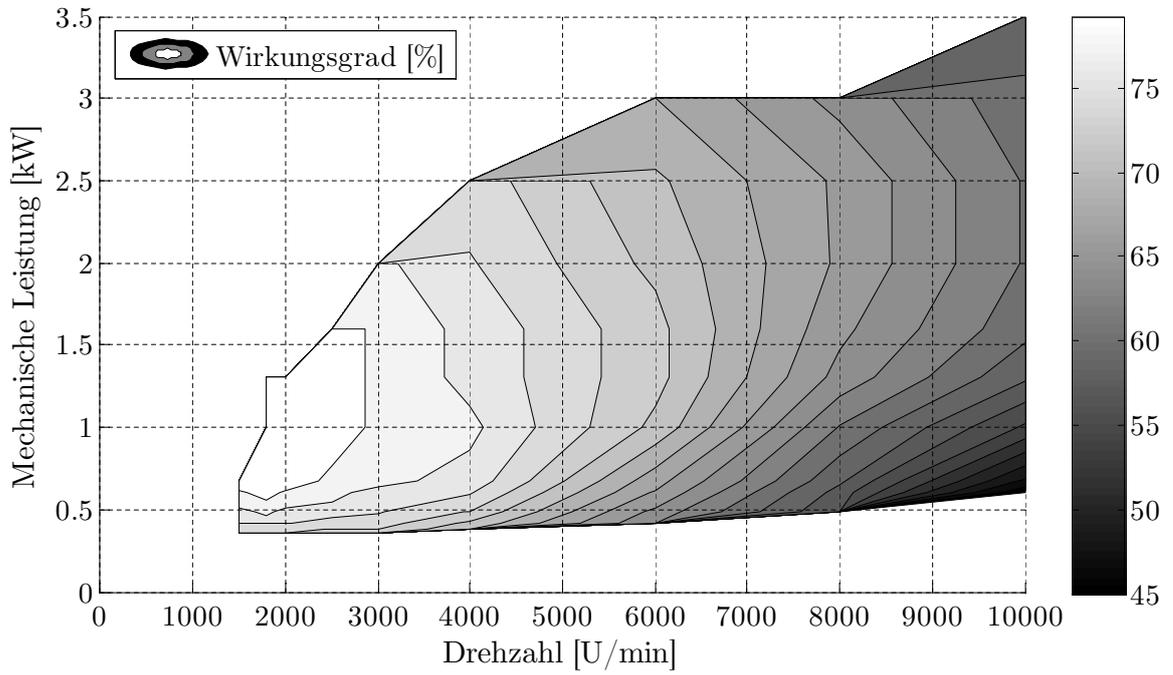


Abb. 2.9: Wirkungsgradkennfeld des Startergenerators im Riemen (SGR).

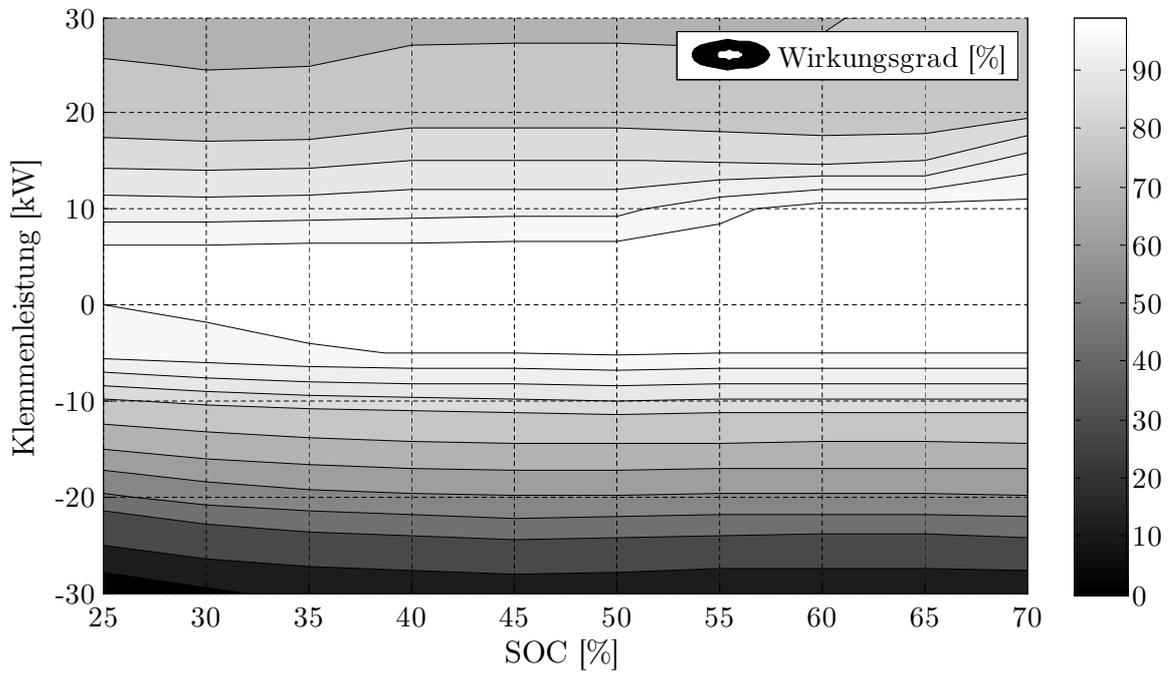


Abb. 2.10: Wirkungsgradkennfeld des Hochvoltspeichers.

gangsdrehzahl von 2000 U/min dargestellt (oberes Diagramm). Zum anderen zeigt das mittlere Diagramm den Einfluss der Getriebeeingangsdrehzahl bei einem konstanten Getriebeeingangsmoment von 200 Nm.

Zwischen der E-Maschine und dem Verbrennungsmotor befindet sich eine Trennkupplung (K0). Es handelt sich um eine nasslaufende Lamellenkupplung. Deren Schleppmoment steigt mit zunehmender Differenzdrehzahl zwischen Ein- und Ausgangswelle an (vgl. Abbildung 2.11). Darüber hinaus enthält das Getriebe eine zweite Kupplung (K1), die zum Anfahren genutzt wird (integriertes Anfahrlement).

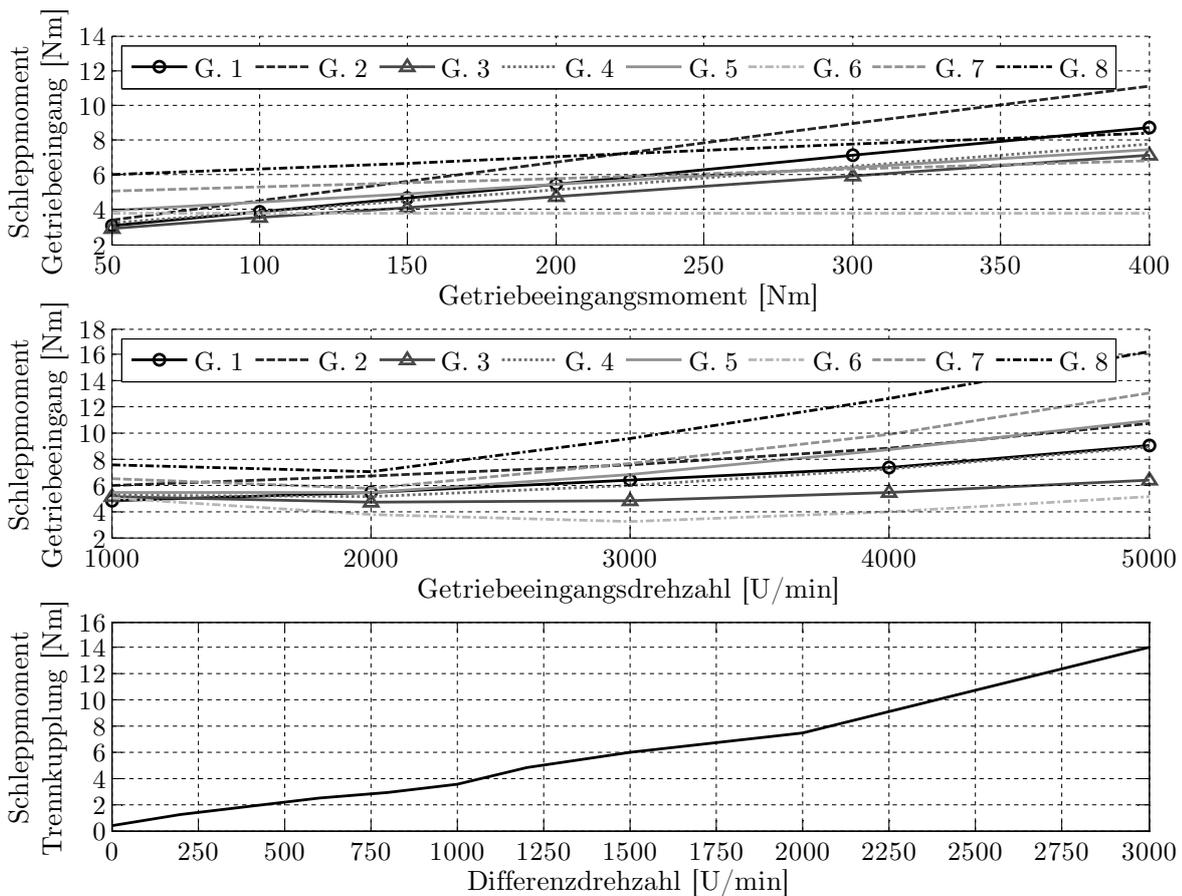


Abb. 2.11: Schleppmoment an der Eingangswelle des Getriebes (Diagramm oben: Getriebeeingangsdrehzahl ist konstant 2000 U/min; Diagramm Mitte: Getriebeeingangsmoment ist konstant 200 Nm) und Schleppmoment der Trennkupplung K0.

3 Ziel und Gliederung der Arbeit

Das Ziel der Arbeit besteht darin, eine optimierte Betriebsstrategie zu entwickeln, durch deren Einsatz der Kraftstoffverbrauch eines parallelen Full-Hybridfahrzeugs reduziert werden kann. Eine wesentliche Randbedingung stellt die Erreichbarkeit der Verbrauchspotenziale in der Praxis, d. h. in Serienfahrzeugen dar. Es wird daher zunächst analysiert, weshalb die Einsparpotenziale von Hybridfahrzeugen im Serieneinsatz in der Regel deutlich geringer sind als die in Forschungsprojekten ausgewiesenen theoretischen Potenziale. Die entwickelte Betriebsstrategie muss die daraus ableitbaren Anforderungen der Serienentwicklung berücksichtigen.

Die Arbeit gliedert sich in die in Abbildung 3.1 dargestellten Bereiche:

1. **Analyse der Verbrauchseinsparung in Serienhybridfahrzeugen:** Zunächst werden Anforderungen an Hybridfahrzeuge im Serieneinsatz ermittelt, welche die Freiheitsgrade der energetischen Betriebsstrategie einschränken. Um den Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch in Simulationen von Fahrzyklen bewerten zu können, werden die Beschränkungen in eine Referenzbetriebsstrategie integriert. Auf diese Weise ist es möglich, den gesamten Mehrverbrauch durch die spezifischen Anforderungen eines Serieneinsatzes zu ermitteln (siehe Kapitel 4).
2. **Entwicklung einer verbrauchsoptimierten Betriebsstrategie:** Aufbauend auf den Analyseergebnissen bzgl. der Anforderungen in Serienfahrzeugen werden verbleibende Freiheitsgrade in der Referenzbetriebsstrategie ermittelt. Nach der Definition von Optimierungsparametern werden hierfür Optimierungsansätze erarbeitet. Deren Bewertung hinsichtlich der Verbrauchseinsparung und der Umsetzbarkeit in Serienfahrzeugen erfolgt in Simulationen von Fahrzyklen (siehe Kapitel 5).
3. **Integration von optimierten Betriebsstrategiefunktionen in ein Serienhybridfahrzeug:** Optimierungsansätze, die anhand der Simulationen eine Verbrauchsreduktion im späteren Serienfahrzeug (vgl. Abschnitt 2.8) versprechen, werden in dessen Steuergerätesoftware integriert. Hierbei kommen die Methoden und Werkzeuge des Serienentwicklungsprozesses zum Einsatz. Schließlich wird an einem Antriebsprüfstand die in der Praxis erreichbare Verbrauchseinsparung ermittelt (siehe Kapitel 6).

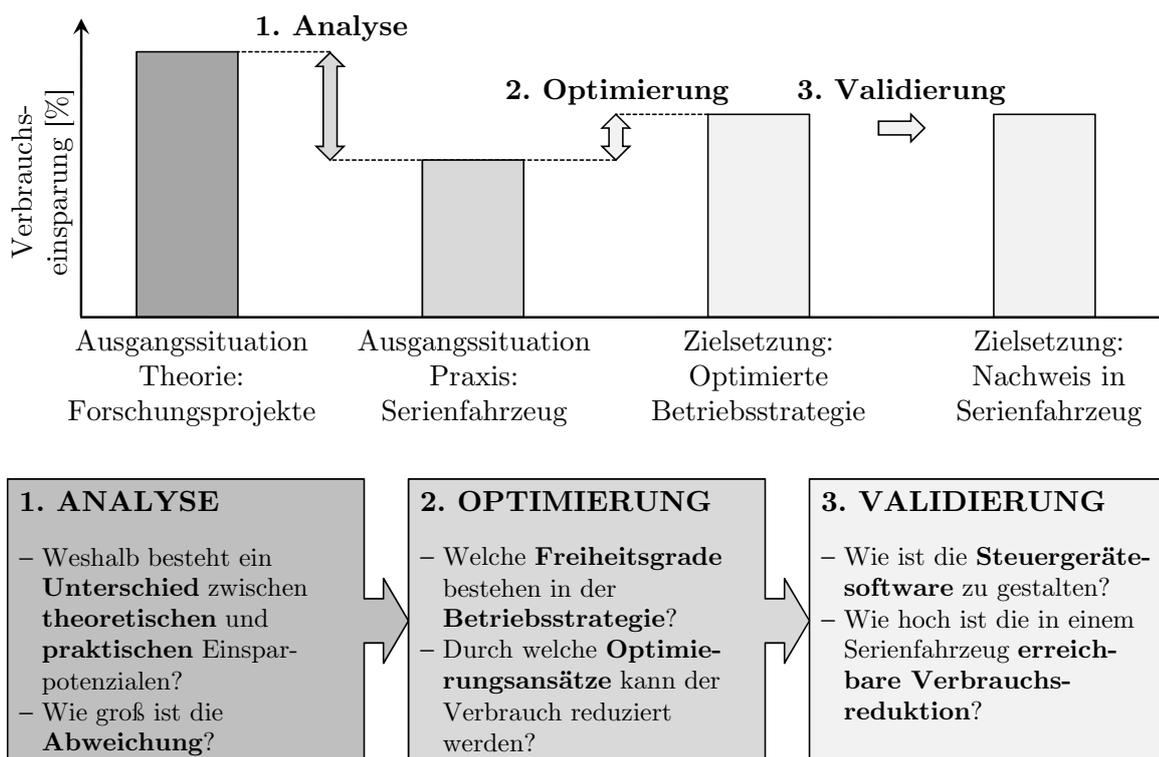


Abb. 3.1: Ziel und Gliederung der Arbeit: Es wird die Differenz der Einsparpotenziale zwischen Theorie und Praxis analysiert, eine optimierte Betriebsstrategie entwickelt und die Verbrauchseinsparung in einem Serienhybridfahrzeug nachgewiesen.

4 Analyse der Verbrauchseinsparung in Serienhybridfahrzeugen

In den vergangenen Jahrzehnten wurde in zahlreichen Forschungsprojekten das Verbrauchseinsparpotenzial von Hybridantrieben untersucht. So wies beispielsweise [42] bereits im Jahr 1998 im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 365 „Umweltfreundliche Antriebstechnik für Fahrzeuge“ eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im NEFZ um 25 % aus. Aktuelle Forschungen in [15] zeigen Einsparpotenziale von bis zu 35 %.

Gegenwärtig befinden sich Hybridantriebe einiger Automobilhersteller im Serieneinsatz. Dabei handelt es sich meist um Baureihen, die nicht ausschließlich mit hybridem sondern auch weiterhin mit konventionellem Antriebsstrang erhältlich sind. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, die Kraftstoffverbräuche beider Varianten direkt gegenüberzustellen. So ermöglicht beispielsweise der BMW ActiveHybrid X6 im NEFZ eine Verbrauchsreduktion um 20 % im Vergleich zu dem konventionellen X6 xDrive50i. Der Lexus LS 600h ermöglicht eine Einsparung von 16 % bezogen auf den LS 460¹. Die Einsparpotenziale der Forschungsprojekte werden nicht erreicht.

Dieses Kapitel analysiert, weshalb eine Differenz zwischen der theoretischen Verbrauchseinsparung in Forschungsprojekten und der praktischen Einsparung in Serienfahrzeugen besteht (vgl. Schritt 1 in Abbildung 3.1). Hierbei liegt der Fokus auf der Betriebsstrategie des hybriden Antriebsstrangs. Der Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch wird in Simulationen bewertet.

4.1 Analysemethode

Den ersten Schritt der Analyse stellt die Definition einer theoretischen Verbrauchseinsparung dar (siehe Abbildung 4.1). Das Ziel besteht darin, die Einsparung einer primär hinsichtlich Kraftstoffverbrauch optimierten Betriebsstrategie für den untersuchten Antriebsstrang zu ermitteln. Daraufhin wird analysiert, welchen Einfluss die zunehmende Effizienz der nichthybridisierten Basisfahrzeuge auf die Einsparpotenziale hybrider Antriebe hat.

¹Normverbräuche im NEFZ: ActiveHybrid X6 9.9l/100 km, xDrive50i 12.5l/100 km, LS 600h 9.3l/100 km, LS 460 11.1l/100 km (Stand 2010)

Im folgenden Schritt werden Anforderungen an Hybridantriebe ermittelt, die durch den Einsatz in der Großserie entstehen. Daraus lassen sich Einschränkungen der Betriebsstrategie hinsichtlich der Wahl und Ausprägung der Betriebsarten ableiten. Um deren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch des untersuchten Antriebsstrangs zu analysieren, werden Simulationen in einem Dymola-Gesamtfahrzeugmodell² durchgeführt. Das Modell ermöglicht die Analyse des Kraftstoffverbrauchs und ist anhand von Fahrzyklen auf Rollenprüfständen validiert. Es bildet den kompletten Antriebsstrang des Fahrzeugs, ein Fahrermodell, die Fahrwiderstände sowie die Nebenaggregate ab [20, 33, 92]. Ausgehend von der Basisbetriebsstrategie wird in diesem Modell gezielt die jeweils untersuchte Anforderung bzw. Einschränkung implementiert und die Änderung des Kraftstoffverbrauchs exemplarisch für den NEFZ ermittelt. Da auch die Modellierung der Betriebsstrategie den berechneten Kraftstoffverbrauch beeinflusst, wird diese zusätzlich analysiert.

Abschließend kann aus den Ergebnissen ein verbleibendes Einsparpotenzial durch die Hybridisierung ermittelt werden. Abbildung 4.1 fasst das methodische Vorgehen zusammen.

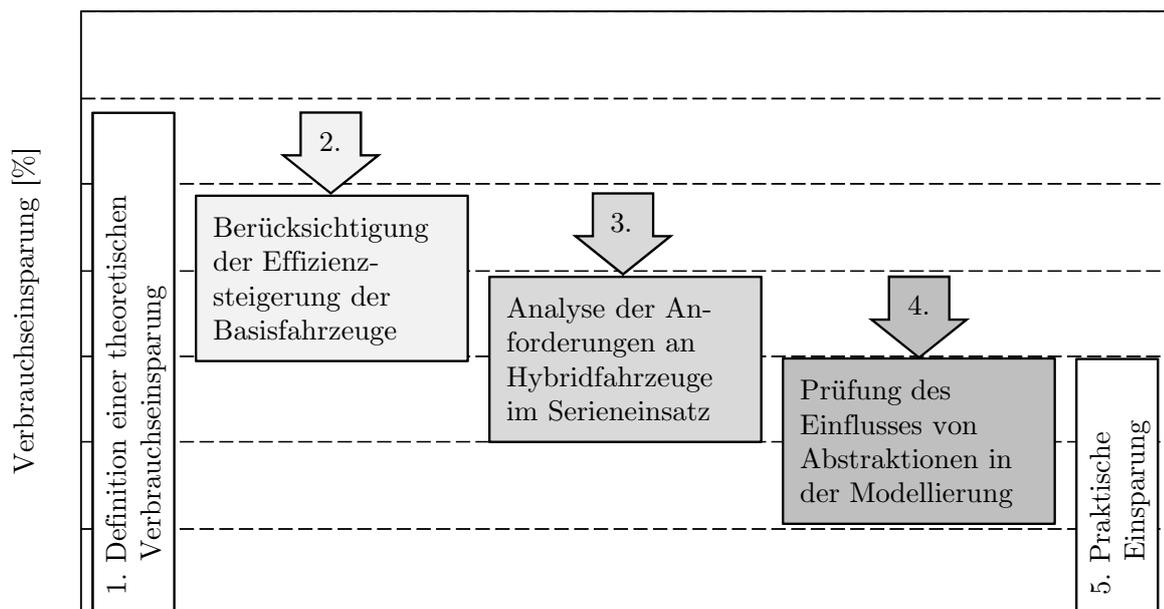


Abb. 4.1: Analysemethode: Ausgehend von einer theoretischen Verbrauchseinsparung werden Einschränkungen durch die Effizienzsteigerung der Basisfahrzeuge, die Anforderungen der Serienentwicklung und Abstraktionen in der Modellierung analysiert.

²Dymola: Software und eingetragenes Markenzeichen der Firma Dynasim

4.2 Theoretische Verbrauchseinsparung

Um die Abweichung der Einsparpotenziale zwischen Theorie und Praxis analysieren zu können, wird zunächst eine theoretische Verbrauchseinsparung für den untersuchten Antriebsstrang ermittelt. Hierbei wird auf die Ergebnisse des Forschungsprojekts CAR@TUM zurückgegriffen. Darin wurde in Kooperation zwischen der BMW Group und der Technischen Universität München die Verbrauchseinsparung von parallelen Hybridantrieben analysiert. Ein Bestandteil des Projekts war die Optimierung der energetischen Betriebsstrategie sowie die optimale Dimensionierung von E-Maschine und Verbrennungsmotor [14, 15, 17, 13]. Simulationen weisen ein Einsparpotenzial der CAR@TUM-Betriebsstrategie in dem CAR@TUM-Antriebsstrang von bis zu 35 % im NEFZ aus [15].

Es wird zunächst die Kraftstoffeinsparung der CAR@TUM-Betriebsstrategie für den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Antriebsstrang (vgl. Abschnitt 2.8) ermittelt. Abbildung 4.2 zeigt die Verteilung der Betriebsarten im NEFZ. Bezogen auf das nicht-hybridisierte Basisfahrzeug ist in der Gesamtfahrzeugsimulationen eine Einsparung von 29 % im NEFZ möglich.

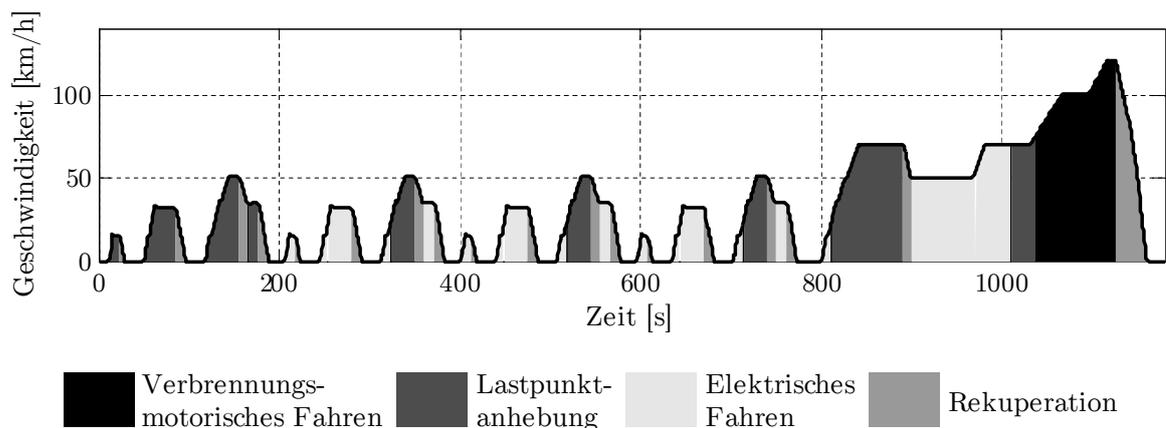


Abb. 4.2: Betriebsartenverteilung der CAR@TUM-Betriebsstrategie [15] im NEFZ.

In Abschnitt 2.5.3 wurde erläutert, dass die Einsparpotenziale stark von dem Referenzverbrauch der konventionellen Basisfahrzeuge abhängen. Die Effizienz des dieser Arbeit zugrunde liegenden Basisfahrzeugs wird durch zwei Maßnahmen gesteigert:

- Die Motor-Start-Stopp-Automatik (MSA) zählt zunehmend zur Serienausstattung von Fahrzeugen mit konventionellem Antriebsstrang. Auch das dieser Arbeit zugrunde liegende Basisfahrzeug wird mit MSA ausgestattet. Dadurch verringert sich dessen Verbrauch um 6 % im NEFZ. Diese Einsparung ist vom Hybridpotenzial abzuziehen.

- Auch die Effizienz der Verbrennungsmotoren wird kontinuierlich gesteigert. Maßnahmen hierzu sind beispielsweise der Voll-Variable Ventiltrieb, Benzindirekteinspritzung oder Turboaufladung. Der im untersuchten Antriebsstrang verwendete Verbrennungsmotor wurde im Zeitraum dieser Arbeit weiter optimiert. Dadurch verringert sich das Hybridpotenzial um 2.5 %.

Es verbleibt ein Einsparpotenzial des Hybridantriebs mit der CAR@TUM-Betriebsstrategie von 20.5 % (siehe Punkt „Effizienzsteigerung Basisfahrzeug“ in Abbildung 4.7 auf Seite 39). Ausgehend von diesem theoretischen CAR@TUM-Potenzial werden die Einschränkungen der Serienentwicklung exemplarisch für den NEFZ analysiert.

4.3 Praktische Verbrauchseinsparung in Serienfahrzeugen

Nun soll analysiert werden, inwiefern das theoretische Einsparpotenzial der CAR@TUM-Betriebsstrategie [15] von 20.5 % in der Praxis, d. h. in Serienfahrzeugen, erreicht werden kann. Dazu werden zunächst Anforderungen der Serienentwicklung ermittelt, die in der CAR@TUM-Betriebsstrategie nicht berücksichtigt sind. Außerdem wird der Einfluss von Abstraktionen in der Modellierung der Betriebsstrategie in der Gesamtfahrzeugsimulation untersucht.

4.3.1 Einschränkung durch Anforderungen der Serienentwicklung

Der Einsatz in der Großserie bedingt in Verbindung mit gesetzlichen Vorschriften und markttypischen Schwerpunkten des jeweiligen Automobilherstellers zahlreiche Anforderungen an das Hybridsystem. Die im Rahmen dieser Arbeit analysierten Anforderungen lassen sich in folgende Bereiche zusammenfassen:

- Emissionsgrenzwerte
- Fahrstabilität
- Fahrdynamik
- Fahrkomfort

Die Anforderungen beschränken die Freiheitsgrade der Betriebsstrategie bzgl. der Verteilung und Ausprägung der Betriebsarten und haben somit direkte Auswirkungen auf die erreichbare Verbrauchseinsparung im NEFZ.

Emissionsgrenzwerte

Zur Erfüllung der Emissionsgrenzwerte gibt es verschiedene Funktionen. Dazu gehören das Heizen des Katalysators, die On-Board-Diagnose sowie die Adaptionen der Gemischbildung.

Heizen des Katalysators Der Katalysator reduziert die Schadstoffemissionen eines Fahrzeugs erheblich. Drei-Wege-Katalysatoren können bei einem Luftverhältnis von $\lambda = 1$ Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenmonoxide (CO) beinahe vollständig oxidieren und Stickstoffoxide (NO_x) reduzieren [60]. Um die volle Konvertierungsleistung nutzen zu können, muss der Katalysator seine Betriebstemperatur erreicht haben [35]. Deshalb ist eine möglichst schnelle Erwärmung das Ziel der Katalysatorheizstrategie. Das Heizen des Katalysators beginnt unmittelbar nach dem Motorstart. Durch eine Spätverstellung des Zündwinkels wird die Entflammung des Gemisches verzögert. Die Verbrennung erfolgt in diesem Fall vorwiegend in der Expansionsphase, wodurch die Abgastemperatur steigt [6, 69]. Diese Heizstrategie sieht vor, den Verbrennungsmotor nach einer Kaltabfahrt erst auszuschalten, wenn die Betriebstemperatur des Katalysators erreicht ist. Im untersuchten Antriebsstrang sind dazu 60s nötig (vgl. Abbildung 4.3). Auf diese Weise wird sichergestellt, dass bei einem erneuten Motorstart bereits die volle Konvertierungsleistung des Katalysators zur Verfügung steht.

Daraus resultieren während des Katheizens Einschränkungen für die Betriebsstrategie (vgl. Abbildung 4.3): Es wird kein elektrisches Fahren sowie kein Motorstopp in Stillstandsphasen freigegeben. Um von der Heizstrategie definierte Betriebspunkte des Verbrennungsmotors anfahren zu können, sind im untersuchten Antriebsstrang zudem keine Lastpunktverschiebungen zulässig. Eine Integration der Einschränkungen in die Gesamtfahrzeugsimulation verursacht einen Mehrverbrauch von 1 %.

On-Board-Diagnose Bei der On-Board-Diagnose (OBD) handelt es sich um ein standardisiertes und gesetzlich vorgeschriebenes Diagnose-System zur kontinuierlichen Überwachung emissionsrelevanter Komponenten im Fahrzeug. In der aktuellsten Version (OBD-II) werden neben der rein elektrischen Überprüfung der Komponenten auch die Plausibilität der Sensorsignale, Aktorsignale und Teilsysteme überwacht. Für einen Teil der Diagnosefunktionen ist gesetzlich eine Überwachungshäufigkeit (In-Use Monitor Performance Ratio) vorgeschrieben [59, 18, 5]. Hierbei beschränken folgende Funktionen die Betriebsstrategie hybrider Antriebe:

- Katalysatordiagnose
- Lambdasondendiagnose
- Diagnose der Tankentlüftung

Die **Katalysatordiagnose** soll die dauerhafte Funktionsfähigkeit des Katalysators sicherstellen, indem dessen Schadstoffreduktion überprüft wird. Die Umsetzung von Schadstoffen (Konvertierungsleistung) hängt von der Sauerstoffspeicherfähigkeit des Katalysators ab. Im Abgastrakt sind eine Vorkatsonde und eine Nachkatsonde untergebracht. Deshalb kann bei gezielter Beeinflussung des Lambdawertes überprüft werden, wie viel Sauerstoff im Katalysator eingelagert wird. Die Katalysatordiagnose prägt dem Motor eine periodische Luftverhältnisänderung auf. Diese Änderung kann bei sehr guter Sauerstoffspeicherfähigkeit nur stark reduziert nach dem Katalysator gemessen werden. Ein defekter Katalysator liegt vor, falls die Amplituden der Änderung nahezu ungedämpft zu erkennen sind [90, 69]. Somit benötigt die Diagnose einen konstanten verbrennungsmotorischen Betrieb, in dem die Luftverhältnisvariation ohne Wechselwirkungen mit Laständerungen durchgeführt werden kann. Der NEFZ bietet lediglich im Überlandteil ausreichende Konstantfahrphasen. In beiden 70 km/h Plateaus wird deshalb kein elektrisches Fahren zugelassen (vgl. Abbildung 4.3).

Die Lambdasonden vor und nach dem Katalysator ermöglichen die Regelung auf eine optimale Verbrennung sowie die Umsetzung der Schadstoffe im Abgas. Sie stellen neben dem Katalysator die wesentlichen Komponenten des Abgasnachbehandlungssystems dar. Im Rahmen der **Lambdasondendiagnose** wird u. a. das Folgeverhalten des SONDENSIGNALS auf Luftverhältnisänderungen überwacht. Hierzu erfolgt eine Prüfung des Spannungssignals der Vorkatsonde in Schubphasen des Verbrennungsmotors. Da im Schubbetrieb kein Kraftstoff eingespritzt wird, steigt der Sauerstoffanteil im Abgas und die SONDENSIGNALSPANNUNG muss somit sinken [90, 69]. Folglich benötigt diese Diagnose Schubphasen mit angekoppeltem Verbrennungsmotor. Die Betriebsstrategie hat in diesen Zeitbereichen deshalb nicht die Möglichkeit, die Schleppverluste in Rekuperationsphasen durch ein Abkoppeln des Verbrennungsmotors zu reduzieren. Im NEFZ laufen die Diagnosen in den Verzögerungen nach dem dritten und vierten 50 km/h Plateau sowie nach dem 70 km/h und dem 120 km/h Plateau (vgl. Abbildung 4.3).

In benzinbetriebenen Fahrzeugen liegt ein Teil des Kraftstoffs bereits bei mittleren Temperaturen in Dampfform vor. Um die Verdampfungsemissionen insbesondere bei hohen Umgebungstemperaturen und im betriebswarmen Fahrzeug zu verringern, kommen Aktivkohlefilter zum Einsatz. Darin werden die durch die Tankentlüftung austretenden gasförmigen Kohlenwasserstoffe abgeschieden, die Luft gelangt über eine Öffnung in die Atmosphäre. Der Filter muss regelmäßig mit Umgebungsluft gespült werden, um eine Überladung mit Kohlenwasserstoffen zu verhindern. Hierzu wird ein Teilstrom der Ansaugluft des Verbrennungsmotors mittels eines elektrischen Ventils durch den Filter geführt. Somit beeinflusst das Tankentlüftungsventil direkt die Gemischbildung [6]. Die **Diagnose der Tankentlüftung** prüft mittels der Vorkatsonde, ob sich bei einer Öffnung des Ventils das Luftverhältnis korrekt verändert. Bei vollem Aktivkohlefilter muss das Gemisch fetter werden, bei leerem Filter magerer. Zusätzlich wird das Ventil in einem festgelegten Rhythmus etwas geöffnet und wieder geschlossen. Die Diagnose prüft die resultierende Veränderung des Saugrohrdrucks. Hierzu wird ein konstanter

Betriebspunkt des Verbrennungsmotors benötigt [5]. Im NEFZ wird diese Diagnose im ersten 32 km/h Plateau durchgeführt (vgl. Abbildung 4.3). In diesem Zeitbereich wird somit kein elektrisches Fahren zugelassen.

Der Mehrverbrauch durch die On-Board-Diagnose wird in Verbindung mit den Adaptionen der Gemischbildung ermittelt.

Adaptionen der Gemischbildung Im Rahmen der Gemischbildung des Verbrennungsmotors muss die Motorsteuerung in stationären sowie transienten Betriebszuständen die eingespritzte Kraftstoffmenge exakt vorgeben. Die Dosierung hat unmittelbaren Einfluss auf die Emissionen [3]. Die Steuerung erfolgt meist modellbasiert. Hierbei bilden mathematische Modelle das physikalische Verhalten ab. Sensorsignale dienen in diesem Fall oft nur noch dem Abgleich mit den im Modell errechneten Sollwerten. Um Abweichungen zwischen Modell und Messwerten auszugleichen, werden Modelladaptionen durchgeführt [90]. Ein wesentlicher Teil der Gemischbildungsfunktion ist die Regelung auf ein gewünschtes Luftverhältnis λ . Die Lambdaeulegung erfolgt meist in Form eines PID-Reglers, der über eine Adaption verfügt. Letztere ermöglicht eine Entlastung des Reglers. Außerdem ist auf diese Weise auch in Zeitbereichen, in denen die Lambdasonden nicht betriebsbereit sind, eine Korrektur der Grundeinspritzung möglich. In der Adaption wird beispielsweise der I-Anteil des Reglers abgespeichert [69]. Die Adaptionen benötigen konstante und transiente Betriebspunkte des Verbrennungsmotors. Deshalb laufen sie in zwei Beschleunigungsphasen mit anschließender Konstantfahrt im NEFZ ab. Es handelt sich im Zyklus um die dritte und vierte Beschleunigung auf 50 km/h (vgl. Abbildung 4.3). In diesem Zeitbereich ist kein elektrisches Fahren erlaubt.

Anforderung	Beschränkung der Betriebsstrategie
Heizen des Katalysators	Aufgrund der Spätverstellung des Zündwinkels wird kein elektrisches Fahren, kein Motorstopp im Stillstand und keine Lastpunktverschiebung freigegeben.
On-Board-Diagnose	Die Diagnosen des Katalysators und der Tankentlüftung benötigen Phasen mit konstantem verbrennungsmotorsichem Betrieb. In diesen wird kein elektrisches Fahren zugelassen.
	Die Lambdasondendiagnose benötigt Schubphasen mit angekoppeltem Verbrennungsmotor, wodurch die Rekuperation eingeschränkt wird.
Adaptionen der Gemischbildung	Es wird eine Abfolge transienter und konstanter Betriebspunkte des Verbrennungsmotors benötigt. In dieser Zeit wird kein elektrisches Fahren zugelassen.

Tab. 4.1: Einschränkungen der Betriebsstrategie durch Anforderungen hinsichtlich der Emissionierung.

Eine Integration der Einschränkungen durch die On-Board-Diagnose und die Adaptionen der Gemischbildung in die Gesamtfahrzeugsimulation verursacht einen Mehrverbrauch von 1 %.

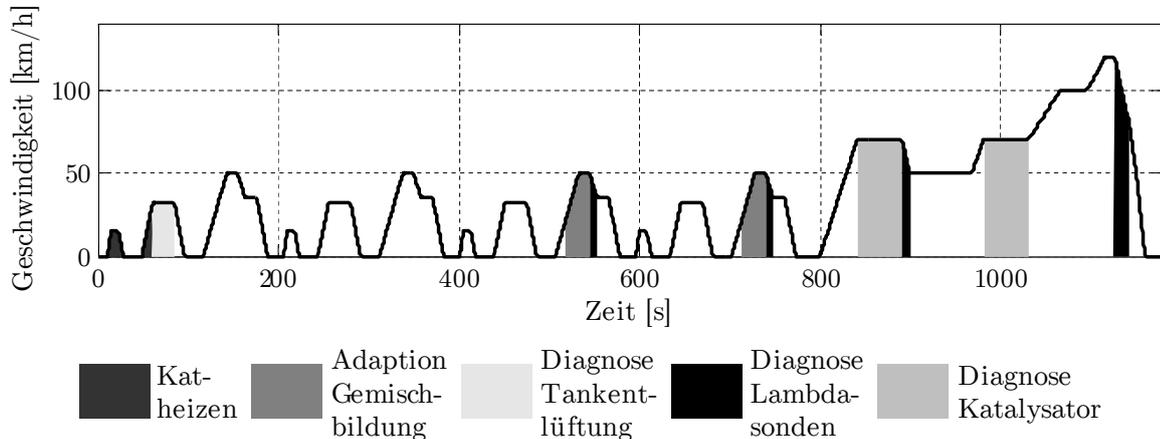


Abb. 4.3: Zeitbereiche im NEFZ, in denen die Betriebsstrategie durch Anforderungen hinsichtlich der Emissionierung beschränkt ist (vgl. Tabelle 4.1).

Fahrstabilität

Die E-Maschine ist ausschließlich mit der Hinterachse des Antriebsstrangs verbunden. Dort liegt somit die Verzögerungsleistung während dem Rekuperieren an. Ein Überbremsen der Hinterachse verursacht bei Erreichen der Kraftschlussgrenze ein Ausbrechen des Fahrzeugs mit dem Heck. Die Gierstabilität geht verloren [36]. Die Rekuperation darf folglich nicht zu einem Überbremsen der Hinterachse führen.

Der Antriebsstrang ist mit einem pedalverkoppelten Bremssystem ausgestattet. Das mechanische Bremssystem ist direkt an das Bremspedal angebunden. Es unterscheidet sich nicht von dem konventioneller Antriebe. Im Bremspedal ist ein Leerweg integriert, um abhängig vom Pedalwinkel ein Rekuperationsmoment von der E-Maschine anfordern zu können. Erst wenn der Leerweg übertreten wird, kommt die konventionelle Bremsanlage zum Einsatz. Deshalb wird während der Rekuperation alleine an der Hinterachse ein Bremsmoment erzeugt. Um eine Überbremsung zu vermeiden, wird anhand von Fahrstabilitätstests eine maximal zulässige Verzögerung durch eine Rekuperation an der Hinterachse definiert. In dem untersuchten Antriebsstrang sind Verzögerungen unkritisch, die kleiner als 0.5 m/s^2 sind. Erst in der letzten Bremsphase im NEFZ von 120 km/h in den Stand wird dieser Grenzwert überschritten (vgl. Abbildung 4.4). Somit verringert sich das nutzbare Rekuperationsmoment und die gewonnene Energie. Eine Integration der maximal zulässigen Verzögerung in die Gesamtfahrzeugsimulation reduziert die Einsparung um 0.2 %.

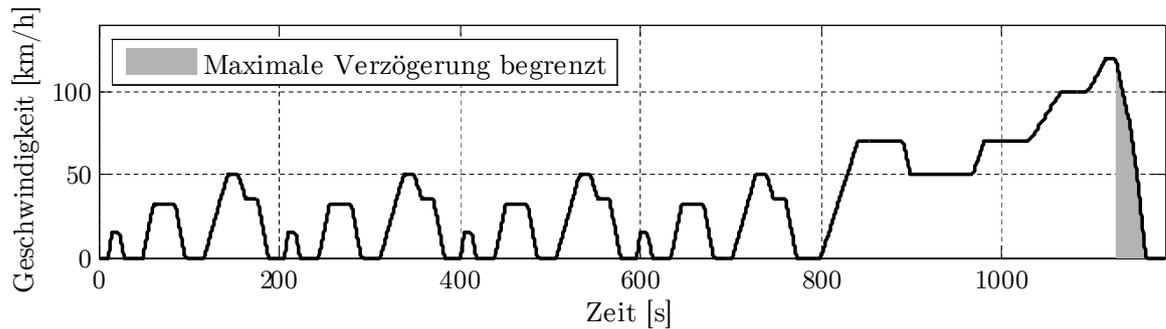


Abb. 4.4: Beschränkung der Betriebsstrategie im NEFZ durch Anforderungen hinsichtlich der Fahrstabilität: In dem markierten Zeitbereich ist die Verzögerung durch Rekuperation auf 0.5 m/s^2 begrenzt.

Fahrdynamik

Ein Kriterium zur Beurteilung der Längsdynamik ist die Reaktionszeit auf einen positiven Fahrerwunsch (Response Zeit). Insbesondere ein Tip-In nach Verzögerungsphasen darf keine zu hohe und für den Fahrer unerwartete Reaktionszeit aufweisen. In konventionellen Antriebssträngen sind hierbei vorwiegend die Schaltdauer des Getriebes und das Ansprechverhalten des Verbrennungsmotors relevant. Letzterer wird in Hybridantrieben während des elektrischen Fahrens und der Rekuperation abgeschaltet und durch die Trennkupplung vom Antriebsstrang gelöst. Somit ist in dem untersuchten Hybridantrieb zusätzlich die Zeit für den Motorstart und das Schließen der Kupplung zu berücksichtigen. Wesentliche Einflussgröße hierbei ist die Zieldrehzahl des Verbrennungsmotors nach dem Start. Sie ist durch die Abtriebsdrehzahl und den vom Getriebe vorgewählten Gang festgelegt. Die Startzeit steigt mit zunehmender Zieldrehzahl und somit im achten Gang auch mit zunehmender Geschwindigkeit. Für den untersuchten Antriebsstrang besteht die Vorgabe, dass im Vergleich zum Basisfahrzeug keine Einschränkungen in der Response zulässig sind. Fahrzeugmessungen zeigen, dass diese Anforderung ab 100 km/h aufgrund des Zustarts nicht mehr erfüllt werden kann. Daher ist ein Abkoppeln des Verbrennungsmotors in Verzögerungsphasen erst unterhalb von 100 km/h zulässig.

Eine weitere Auswirkung des Abkoppeln des Verbrennungsmotors ist der Wegfall des Motorschleppmoments in Verzögerungsphasen. Die Momentenkoordination hat in allen Fahrsituationen ein konsistentes Verzögerungsverhalten sicherzustellen. Deshalb stellt die E-Maschine ein Rekuperationsmoment bereit, das dem Schleppmoment des Verbrennungsmotors entspricht. Zusätzlich zu dieser Schlepprekuperation muss sie jedoch das Wunschbremsmoment des Fahrers umsetzen (vgl. Abschnitt 4.3.1). Wird bei hohen Geschwindigkeiten die Bremse betätigt, so ist die E-Maschine u. U. durch die Bremsrekuperation bereits ausgelastet. Würde die Betriebsstrategie nun den Verbren-

nungsmotor abkoppeln, so könnte dessen Schleppmoment nicht vollständig kompensiert werden. Dies hätte einen Einbruch des Bremsmoments zur Folge. Fahrdynamiksimulationen zeigen, dass bei einem Abkoppeln des Verbrennungsmotors erst unterhalb von 80 km/h eine gleichbleibende Fahrzeugverzögerung sichergestellt werden kann. Somit kann die Betriebsstrategie den Verbrennungsmotor nicht in allen Verzögerungsphasen von dem Antriebsstrang trennen. Dies verringert durch die zusätzlichen Schleppverluste des Verbrennungsmotors im NEFZ die rekuperierbare Energie (vgl. Abbildung 4.5), was in der Gesamtfahrzeugsimulation einen Mehrverbrauch von 0.3 % bewirkt.

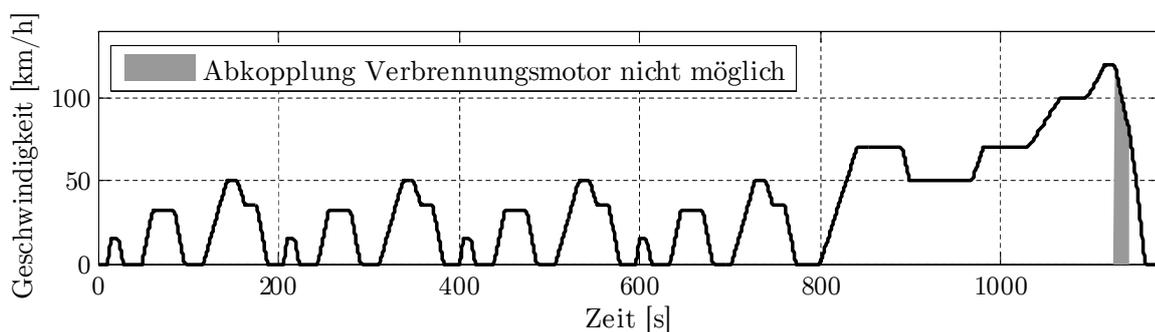


Abb. 4.5: Beschränkung der Betriebsstrategie im NEFZ durch Anforderungen hinsichtlich der Fahrdynamik: In dem markierten Zeitbereich wird das Abkoppeln des Verbrennungsmotors nicht zugelassen.

Fahrkomfort

Der Großteil der Kunden empfindet vorwiegend akustische Unregelmäßigkeiten sowie Drehungleichförmigkeiten im Antriebsstrang als störend.

Akustik Lastpunktanhebungen beaufschlagen den Verbrennungsmotor mit einem Moment, das er zusätzlich zum Antriebsmoment aufbringen muss. Die Drehzahl ist durch das Getriebe fest vorgegeben. Hohe Momente bei niedrigen Drehzahlen regen den Antriebsstrang zu Schwingungen an, die für die Fahrzeuginsassen akustisch wahrnehmbar sind. Deshalb müssen die von der Ladezustandsregelung angeforderten Ladeleistungen in Abhängigkeit von Gang, Getriebeeingangsdrehzahl und -moment begrenzt werden. Fahrzeugerprobungen zeigen, dass in Abhängigkeit vom Betriebspunkt Momentenlimits im Bereich von 40 bis 80 Nm nötig sind (vgl. Abbildung 4.6). Die Betriebsstrategie kann somit nicht alle gewünschten Ladeleistungen umsetzen. Statt dessen muss sie zusätzlich in anderen, teilweise ineffizienteren Betriebspunkten Lastpunktanhebungen durchführen. In der Gesamtfahrzeugsimulation resultiert daraus ein Mehrverbrauch von 0.5 %.

Entkopplung von Drehungleichförmigkeiten Einen weiteren Einfluss auf den Fahrkomfort stellen die Drehungleichförmigkeiten des Verbrennungsmotors dar. Um Geräusche und Schwingungen im Antriebsstrang zu reduzieren, kommen Zweimassenschwungräder (ZMS) zum Einsatz. Deren Auslegung kann aufgrund der vielfältigen Komfortanforderungen nach [46] meist nur einen Kompromiss darstellen. In dem untersuchten Antriebsstrang können die Drehungleichförmigkeiten durch das ZMS nicht vollständig kompensiert werden. Die Massenträgheit der E-Maschine, die verringerte Hinterachsübersetzung sowie der Entfall des Wandlers ändern das Schwingungsverhalten im Vergleich zum Basisfahrzeug. Die Drehungleichförmigkeit in den relevanten Betriebspunkten an der Hinterachse kann nicht – wie in konventionellen Antriebssträngen üblich – durch einen Schlupf am Wandler bzw. der Wandlerüberbrückungskupplung ausgeglichen werden [62]. Statt dessen wird ein Schlupf an der Trennkupplung eingestellt. Dieser wird in Abhängigkeit von Motormoment und -drehzahl in den Gängen fünf bis acht vorgegeben und erreicht bis zu 50 U/min (vgl. Abbildung 4.6). Eine Integration dieses variablen Kupplungsschlupfes in die Gesamtfahrzeugsimulation führt zu einem Mehrverbrauch von 0.5 %.

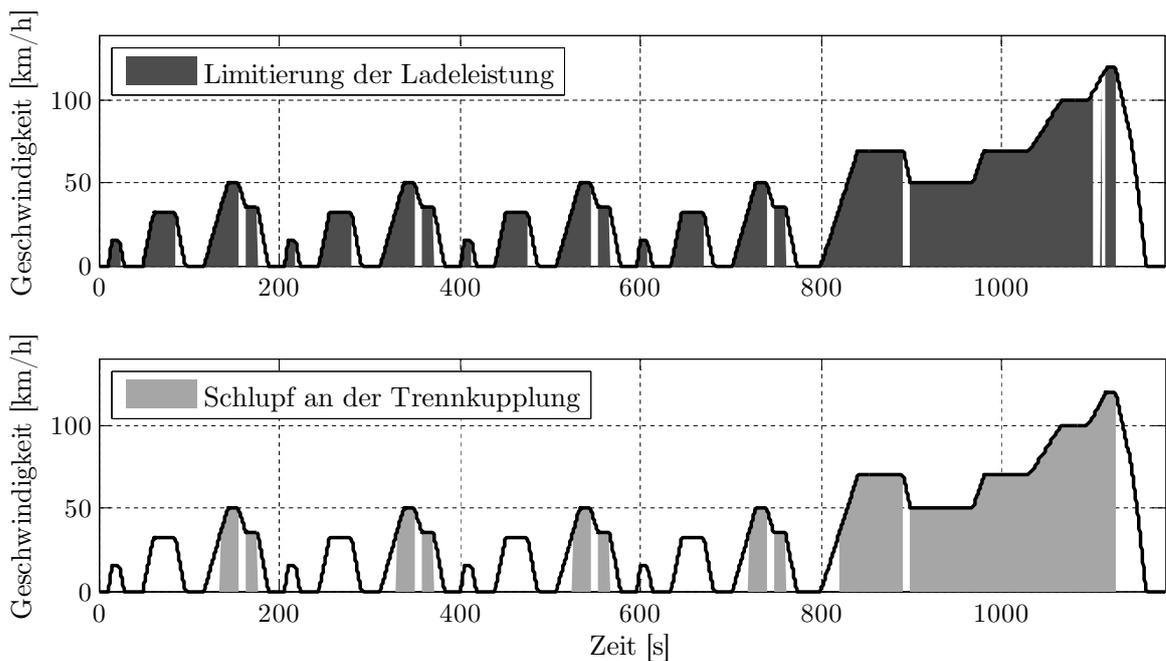


Abb. 4.6: Beschränkung der Betriebsstrategie im NEFZ durch Anforderungen hinsichtlich des Fahrkomforts: In den markierten Zeitbereichen ist die Ladeleistung aufgrund der Fahrzeugakustik in Abhängigkeit von Getriebeeingangsmoment und -drehzahl begrenzt (oben) bzw. muss in Abhängigkeit von Moment und Drehzahl des Verbrennungsmotors ein Schlupf an der Trennkupplung zur Verringerung von Drehungleichförmigkeiten eingestellt werden (unten).

4.3.2 Einschränkung durch Abstraktionen in der Modellierung

Der vorangegangene Abschnitt zeigt, dass die CAR@TUM-Betriebsstrategie einige Anforderungen der Serienentwicklung nicht berücksichtigt. Diese verursachen einen Mehrverbrauch im NEFZ. Nun werden zwei Aspekte bzgl. der Modellierung der Betriebsstrategie in der Gesamtfahrzeugsimulation vorgestellt, die ein zu hohes Einsparpotenzial suggerieren.

Betriebsartenübergang

Eine wesentliche Aufgabe der energetischen Betriebsstrategie ist die Koordination der hybridspezifischen Betriebsarten. Wird der für das elektrische Fahren zulässige Betriebsbereich verlassen, so muss der Verbrennungsmotor gestartet und angekoppelt werden. Bei dem Übergang von verbrennungsmotorischem Fahren in Rekuperation oder elektrisches Fahren wird der Motor gestoppt und abgekoppelt. Dadurch entstehen zeitliche Überschneidungen zwischen den Betriebsarten. Diese sind in der Gesamtfahrzeugsimulation nicht abgebildet. Um den Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch bewerten zu können, werden folgende Aspekte der Betriebsartenübergänge analysiert:

- Dauer der Überschneidung
- Mehrverbrauch durch verlängerten Lauf des Verbrennungsmotors
- Mehrverbrauch durch verlängertes elektrisches Fahren

Dauer der Überschneidung Bei dem Übergang von elektrischem auf verbrennungsmotorisches Fahren kann der Verbrennungsmotor erst die Antriebsleistung übernehmen, wenn er seine Zieldrehzahl erreicht hat und die Trennkupplung geschlossen wurde. Bis zu diesem Zeitpunkt dauert das elektrische Fahren trotz erfolgter Einschaltaufforderung des Verbrennungsmotors an. Die Zeiten werden anhand von Messungen in dem in dieser Arbeit untersuchten Fahrzeug ermittelt. Die Versuchsfahrzeuge sind mit Applikationssteuergeräten ausgestattet und daher ist ein direkter Zugriff auf die Messvariablen der Steuergerätesoftware möglich. Nach der Einschaltaufforderung treten im Mittel folgende Verzögerungen auf:

- Totzeit bis zu einer Reaktion des Startergenerators: 60 ms
- Mittlere Hochlaufzeit des Verbrennungsmotors: 390 ms
- Momentenaufbau an der Trennkupplung: 1190 ms

Somit beträgt im Falle eines Zustarts die mittlere zeitliche Überschneidung insgesamt 1.64 s. Auch der Übergang von verbrennungsmotorischem oder hybridischem Fahren auf elektrisches Fahren bzw. Rekuperation ist ein kontinuierlicher Vorgang. Hierzu werden

ebenfalls Fahrzeugmessungen durchgeführt. Sie zeigen im Mittel folgende Verzögerungen nach der Ausschaltaufforderung:

- Totzeit bis zu einer Reaktion der Kupplungsansteuerung: 100 ms
- Totzeit bis zu einer Reaktion der E-Maschine: 70 ms
- Momentenabbau an der Trennkupplung: 630 ms
- Zeit bis zum vollständigen Öffnen der Trennkupplung: 200 ms

Die mittlere zeitliche Überschneidung im Falle des Ablegens des Verbrennungsmotors beträgt somit insgesamt 1.0 s.

Mehrverbrauch durch verlängerten Lauf des Verbrennungsmotors Sobald durch die Betriebsstrategie eine Ausschaltaufforderung ausgegeben wird, stoppt in den Simulationen die Berechnung des Kraftstoffmassenstroms. Dieses Verhalten entspricht nicht der in Versuchsfahrzeugen ermittelten Überschneidung von 1 s. Im NEFZ wird der Motor neun Mal abgeschaltet. Dabei wechselt die Betriebsart von verbrennungsmotorischem Fahren auf Rekuperation. Fahrzeugmessungen zeigen, dass in der Übergangszeit der Verbrauch des Verbrennungsmotors dem Leerlaufverbrauch von 0.2 g/s entspricht. Bezogen auf das Basisfahrzeug entsteht dadurch insgesamt ein Mehrverbrauch von 0.3 % im NEFZ.

Mehrverbrauch durch verlängertes elektrisches Fahren In der vorliegenden Simulation wird auch das elektrische Fahren bei einer Einschaltaufforderung des Verbrennungsmotors sofort beendet. Dies ist im realen Fahrzeug aufgrund der zeitlichen Überschneidung mit dem verbrennungsmotorischen oder hybriden Betrieb nicht möglich. Das elektrische Fahren muss noch 1.6 s fortgesetzt werden. Im NEFZ treten in der Referenzsimulation acht Startvorgänge auf. Daraus resultiert unter Berücksichtigung des Entladewirkungsgrades der Batterie ein zusätzlicher Energiebedarf für das elektrische Fahren von 155 kWh. Diese Energie muss durch Lastpunktanhebungen erzeugt werden, wodurch ein Mehrverbrauch entsteht. In Kapitel 5.2.2 wird ein Ansatz entwickelt, um die Verbrauchsänderung durch Lastpunktverschiebungen zu bewerten. Gleichung 5.7 (Seite 61) beschreibt den Mehrverbrauch durch Lastpunktanhebungen bezogen auf die generierte Batterieleistung. In der Referenzbetriebsstrategie liegt der Wert im Mittel bei 255 g/kWh. Bezogen auf das Basisfahrzeug resultiert durch das verlängerte elektrische Fahren ein Mehrverbrauch von 1.5 %.

Insgesamt resultiert aus der Berücksichtigung der zeitlichen Überschneidungen zwischen den Betriebsarten ein Mehrverbrauch von 1.8 % im NEFZ bezogen auf die Ergebnisse der Gesamtfahrzeugsimulation.

Bordnetzversorgung

In der Gesamtfahrzeugsimulation ist neben dem Betriebsartenübergang auch die Bordnetzversorgung vereinfacht modelliert. Sie ist durch einen konstanten Stromverbrauch der Nebenverbraucher abgebildet. In Fahrzyklen werden hierbei lediglich zwingend erforderliche und sicherheitsrelevante Verbraucher berücksichtigt. In der frühen Entwicklungsphase beruht der ermittelte Strombedarf meist auf Abschätzungen, Simulationen oder Messungen der Einzelkomponenten an Prüfständen. Der gesamte für den NEFZ relevante Bordnetzbedarf im Systemverbund kann erst in späteren Phasen des Entwicklungsprozesses anhand von Versuchsfahrzeugen hinreichend genau ermittelt werden.

In dem untersuchten Antriebsstrang wurde zunächst ein Strombedarf von 33 A auf der Niederspannungsseite prognostiziert. Im Verlauf der vorliegenden Arbeit wurde der Wert auf Grund von Erprobungserkenntnissen auf 37 A angehoben. Dies verursacht im NEFZ einen Mehrverbrauch von 0.5 %.

4.4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Dieses Kapitel analysiert, weshalb die Einsparpotenziale von Hybridfahrzeugen im Serieneinsatz in der Regel deutlich geringer sind als die in Forschungsprojekten ausgewiesenen theoretischen Potenziale. Die hinsichtlich Kraftstoffverbrauch optimierte CAR@TUM-Betriebsstrategie ermöglicht im NEFZ eine theoretische Verbrauchseinsparung von 29 %. Davon ausgehend sind in Abbildung 4.7 die in den vorangegangenen Abschnitten ermittelten Einschränkungen zusammengefasst.

Zunächst wird in die Berechnung der Verbrauchseinsparung die Effizienzsteigerung der Basisfahrzeuge einbezogen. Durch den Einsatz der Motor-Start-Stopp-Automatik und optimierter Verbrennungsmotoren verringert sich das theoretische Potenzial um 8.5 %.

Die Analyse der Betriebsstrategie konzentriert sich auf zwei Bereiche:

- Einschränkungen durch die spezifischen Anforderungen der Serienentwicklung: Durch Restriktionen in den Bereichen Emissionsgrenzwerte, Fahrstabilität, Fahrdynamik und Fahrkomfort reduziert sich das Potenzial um 3.5 %.
- Abstraktionen in der Modellierung der Betriebsstrategie: Aufgrund der fehlenden Abbildung der Betriebsartenübergänge sowie der zu geringen Bordnetzlast verkleinert sich die Einsparung um 2.3 %.

Unter Berücksichtigung des Serienumfelds erreicht die CAR@TUM-Betriebsstrategie folglich eine Verbrauchseinsparung von 14.7 %. Die größten Einbußen entstehen durch die zunehmende Effizienz der konventionellen Antriebe. Die Restriktionen der Betriebsstrategie verursachen jeweils sehr geringe Potenzialverringernungen. Die Anforderungen

hinsichtlich der Emissionsgrenzwerte und Fahrstabilität sind zwingend in die Betriebsstrategie zu integrieren. In Bezug auf die Fahrdynamik und den Fahrkomfort sind die Vorgaben des jeweiligen Automobilherstellers entscheidend. Diese basieren auf der Generierung markttypischer Fahrzeugeigenschaften und der Erfüllung von Kundenerwartungen. Ein Verzicht auf die im Rahmen dieser Arbeit diskutierten Anforderungen hinsichtlich Fahrdynamik und -komfort würde das Verbrauchseinsparpotenzial um 1.3% erhöhen.

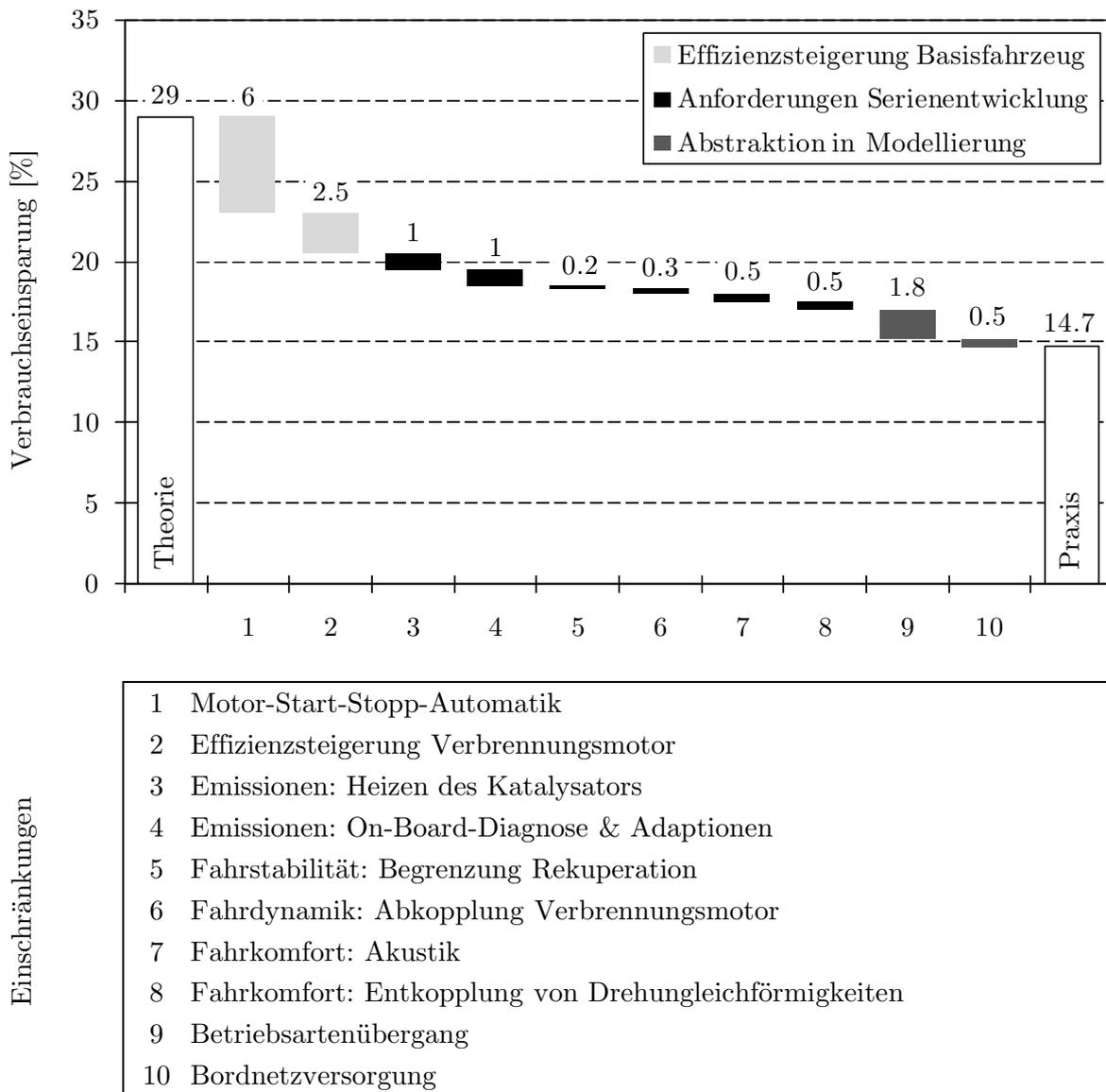


Abb. 4.7: Verringerung des theoretischen Einsparpotenzials im Serieneinsatz: Effizienzsteigerungen der Basisfahrzeuge, Anforderungen der Serienentwicklung an die Betriebsstrategie und Abstraktionen in der Modellierung der Betriebsstrategie reduzieren das in der Praxis erreichbare Einsparpotenzial.

5 Entwicklung einer verbrauchsoptimierten Betriebsstrategie

Das vorangegangene Kapitel zeigt anhand von Simulationen, dass die theoretische Verbrauchseinsparung einer hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs optimierten Betriebsstrategie (CAR@TUM-Betriebsstrategie [14, 15, 17]) unter den Randbedingungen der Serienentwicklung nicht erreicht werden kann (vgl. Schritt 1 in Abbildung 3.1, Seite 23). Das praktische Potenzial liegt durch die Effizienzsteigerung der Basisfahrzeuge, Anforderungen der Serienentwicklung und Abstraktionen in der Modellierung der Betriebsstrategie bei nur etwa der Hälfte des theoretischen Potenzials.

Im weiteren Verlauf der Arbeit soll nun untersucht werden, ob aufbauend auf einer in der Praxis umsetzbaren Betriebsstrategie zusätzliche Optimierungsmöglichkeiten bestehen und auf diese Weise das Verbrauchspotenzial erhöht werden kann (vgl. Schritt 2 in Abbildung 3.1). Eine zentrale Randbedingung ist hierbei, die Anforderungen der Serienentwicklung von vorneherein in den Optimierungsansätzen und deren Bewertung zu berücksichtigen. Die entwickelte Betriebsstrategie soll uneingeschränkt in Serienfahrzeugen eingesetzt werden können.

Dieses Kapitel beschreibt zunächst die Vorgehensmethode zur Optimierung der Betriebsstrategie (Abschnitt 5.1). Anschließend werden drei Optimierungsansätze der Betriebsstrategie vorgestellt (Abschnitt 5.2). Diese werden daraufhin in Simulationen von Fahrzyklen bewertet (Abschnitt 5.3). Hierbei steht neben der erreichbaren Verbrauchsreduktion vor allem die Umsetzbarkeit in Serienfahrzeugen im Vordergrund. Im Anschluss wird eine mögliche Verknüpfung zwischen den Optimierungsansätzen aufgezeigt (Abschnitt 5.4). Abschließend werden anhand der Ergebnisse Optimierungsansätze ausgewählt, die im folgenden Kapitel mit den Methoden des Serienentwicklungsprozesses in die Steuergerätesoftware eines Serienhybridfahrzeugs integriert werden sollen (Abschnitt 5.5, vgl. Schritt 3 in Abbildung 3.1). Auf diese Weise ist eine Analyse der im realen Fahrzeug erreichbaren Verbrauchseinsparung möglich.

5.1 Methodisches Vorgehen

Um die optimierte Betriebsstrategie in die Software des untersuchten Serienfahrzeuges integrieren zu können, werden zunächst die Anforderungen der Funktions- und Soft-

wareentwicklung analysiert (siehe Abbildung 5.1). Im Anschluss wird bewertet, welche verbrauchsrelevanten Freiheitsgrade der Betriebsstrategie im Rahmen dieser Arbeit zu optimieren sind. Hierzu wird neben den Anforderungen der Serienentwicklung auch der Stand der Technik herangezogen. Für die ausgewählten Freiheitsgrade sollen Optimierungsansätze erarbeitet werden. Es wird eine Optimierungsmethode vorgestellt, die bei der Entwicklung der Ansätze einheitlich zum Einsatz kommt. Schließlich erfolgt die Bewertung der Optimierungsansätze anhand von Simulationen.

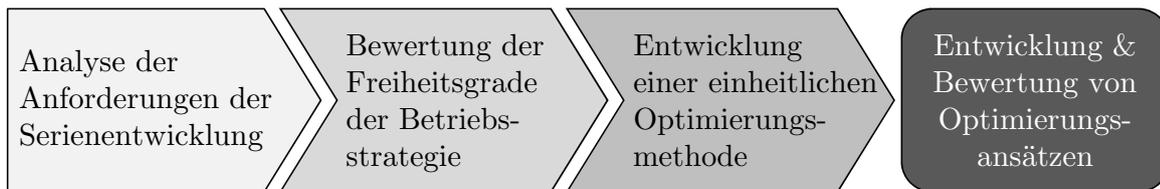


Abb. 5.1: Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung einer verbrauchsoptimierten Betriebsstrategie.

5.1.1 Anforderungen der Funktions- und Softwareentwicklung

Das vorangegangene Kapitel stellt Anforderungen der Serienentwicklung an die Betriebsstrategie von Hybridfahrzeugen vor (siehe Abschnitt 4.3). Es handelt sich um Anforderungen hinsichtlich Emissionen, Fahrstabilität, Fahrdynamik und Fahrkomfort. Sie beschränken die Freiheitsgrade der Betriebsstrategie und somit die theoretischen Verbrauchspotenziale. Im Zuge der Entwicklung einer verbrauchsoptimierten Betriebsstrategie sind nun zusätzlich die Anforderungen von Bedeutung, welche die Serienentwicklung an eine Optimierung der Betriebsstrategie stellt. Hierbei handelt es sich um Anforderungen der Funktions- und Softwareentwicklung hinsichtlich der Funktionsarchitektur, des Entwicklungsprozesses, der technischen Ressourcen und der Kundenerwartung.

Funktionsarchitektur

Die energetische Betriebsstrategie ist im Fahrzeug mit zahlreichen Funktionen auf unterschiedlichen Steuergeräten vernetzt (vgl. Abschnitt 2.6). Dazu zählen die Momentenkoordination für die beiden Antriebsquellen und das Energiemanagement, welches die Nebenverbraucher des Bordnetzes koordiniert. Außerdem bestehen Schnittstellen zum Degradations- und Notlaufmanagement. Im untersuchten Antriebsstrang ist darüber hinaus eine Kopplung an das Navigationssystem vorhanden. Es werden Streckeninformationen genutzt, um bevorstehende Fahrsituationen präzisieren zu können.

Auf diese Weise ist es möglich, die Betriebsstrategieparameter situationsabhängig anzupassen [92, 4]. Die Optimierungsansätze müssen sicherstellen, dass alle Schnittstellen bedient werden können. Insbesondere das Zusammenspiel mit den Funktionen zur Prädiktion von Fahrsituationen soll zudem verbrauchseffizient erfolgen. Die Funktionen sind modular aufzubauen, um sie in bestehende Funktionsarchitekturen integrieren zu können.

Entwicklungsprozess

Bereits in der Funktionsentwicklung und Optimierung sind die Belange der weiteren Phasen des Entwicklungsprozesses zu berücksichtigen. Die Funktionen sollten effiziente Fahrzeuginbetriebnahmen und -erprobungen sicherstellen. Sie müssen schnell an neue Anforderungen oder Erkenntnisse angepasst werden können. In diesem Zusammenhang ist auch der Aufwand für die Applikation der Funktionen bis hin zur Serienreife einzubeziehen: Die Funktionen sollten transparent aufgebaut sowie die Anzahl der Applikationsparameter möglichst gering sein.

Der C-Code auf dem Steuergerät wird im Entwicklungsprozess des untersuchten Antriebs automatisiert mittels Targetlink (dSPACE) erzeugt. Die Funktionsentwicklung erfolgt in MATLAB/Simulink (The MathWorks). Diese Toolkette erfordert die Einhaltung von Modellierungsrichtlinien, die zulässige Funktionsblöcke und die Stützstellenzahl von Kennlinien und Kennfeldern vorgeben.

Technische Ressourcen

Die Funktionen sind unter Berücksichtigung der Funktionsarchitektur auf verschiedenen Steuergeräten partitioniert. Um die Betriebsgrößen des Fahrzeugs verarbeiten zu können, müssen alle Berechnungen in Echtzeit durchführbar sein. Die Funktionen dürfen die Rechen- und Speicherkapazität der Steuergeräte nicht überschreiten. Außerdem sind Anzahl und Auflösung der Schnittstellen zwischen den Steuergeräten aufgrund der Bandbreiten der Bussysteme begrenzt.

Kundenerwartung

Die Betriebsstrategie muss zusätzlich zu den technischen Anforderungen auch Kundenerwartungen erfüllen [65, 33, 92, 21, 91]. Neben der Kraftstoffeinsparung hat insbesondere das Fahrerlebnis eine hohe Bedeutung. Dieses basiert in Hybridfahrzeugen vor allem auf dem elektrischen Fahren. Die maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie die Verfügbarkeit werden vom Kunden bewusst wahrgenommen. Dieser setzt elektrisches Fahren meist mit effizientem Fahren gleich, unabhängig von der tatsächlichen Effizienz

unter Berücksichtigung der Verluste in der Erzeugung der elektrischen Energie. In dem in dieser Arbeit untersuchten Hybridantrieb besteht deshalb die Anforderung an die Betriebsstrategie, elektrisches Fahren in einem kundenwerten Geschwindigkeitsbereich (z. B. Zone 30 und Stadtfahrt) und mit hoher Verfügbarkeit sicherzustellen.

Außerdem besteht für das untersuchte Fahrzeug die Anforderung, dass in der Regel alle im Fahrzeug wahrnehmbaren Antriebsfunktionen (z. B. die Entscheidung elektrisch zu Fahren oder die Gangwahl) für den Fahrer nachvollziehbar sein sollten. Dies beinhaltet auch, dass das Fahrzeug in identischen Fahrsituationen reproduzierbar ein ähnliches Verhalten zeigt. Darüber hinaus besteht die Anforderung, dass der Fahrkomfort und die Fahrdynamik mindestens das Niveau des konventionellen Basisfahrzeugs erreichen müssen.

5.1.2 Freiheitsgrade der Betriebsstrategie und Stand der Technik

Nun werden die verbrauchsrelevanten Freiheitsgrade der Betriebsstrategie, die grundsätzlich für eine Optimierung zur Verfügung stehen, anhand der in den Abschnitten 5.1.1 und 4.3 definierten Anforderungen der Serienentwicklung bewertet. Hierzu wird auch der Stand der Technik bisheriger Forschungsarbeiten herangezogen.

Die Freiheitsgrade betreffen die Abfolge und Ausprägung der Betriebsarten (vgl. Abschnitt 2.4). Es bestehen Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich des elektrischen Fahrens, der Rekuperation, der Gangwahl, der Lastpunktverschiebung und des Verbrennungsmotorstarts.

Elektrisches Fahren

Freiheitsgrade des elektrischen Fahrens sind die maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung, ab denen ein Motorstart erfolgt.

Der vorangegangene Abschnitt erläutert, dass bzgl. des elektrischen Fahrens die Kundenanforderungen eine sehr hohe Bedeutung haben. In dem untersuchten Antrieb kommt deshalb eine auf heuristischen Methoden basierte Entscheidungslogik zum Einsatz. Neben der Verbrauchseinsparung wird miteinbezogen, dass elektrisches Fahren für den Fahrer nachvollziehbar und mit hoher Verfügbarkeit sicherzustellen ist. Die Entscheidung elektrisch zu Fahren erfolgt in direkter Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Beschleunigungswunsch des Fahrers [33, 21]. In [33] wird der Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch untersucht. Es zeigt sich, dass der Ansatz nicht die Verbrauchseffizienz einer Onlineoptimierung erreicht. Im NEFZ resultiert beispielsweise ein Mehrverbrauch von 0.7%. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass bzgl. des elektrischen Fahrens in dem untersuchten Serienfahrzeug die Freiheitsgrade sehr begrenzt

sind und ein Mehrverbrauch toleriert wird, um die Kundenerwartungen zu erfüllen. Deshalb werden im Rahmen dieser Arbeit keine weiteren Optimierungsansätze bzgl. des elektrischen Fahrens erarbeitet.

Rekuperation

In dieser Betriebsart besteht als Freiheitsgrad die maximale Verzögerung durch die Rekuperation. Außerdem kann die Grenzgeschwindigkeit modifiziert werden, ab der der Verbrennungsmotor in Verzögerungsphasen abgekoppelt wird.

In Abschnitt 4.3.1 wird erläutert, dass Anforderungen hinsichtlich der Fahrstabilität und Fahrdynamik für beide Freiheitsgrade Grenzwerte vorgeben. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher keine weiteren Optimierungspotenziale bzgl. der Rekuperation analysiert.

Gangwahl

Der Freiheitsgrad der Gangwahl besteht in der Verknüpfung zwischen Fahrerwunsch, Betriebspunkt bzw. -art des Fahrzeugs und Gang.

Die Gangwahl des automatisierten Getriebes legt die Arbeitspunkte für die übrigen Komponenten des Antriebsstrangs fest. Somit hat sie einen erheblichen Einfluss auf deren Effizienz und den Kraftstoffverbrauch [64]. Ähnlich wie das elektrische Fahren sind die Schaltpunkte direkt vom Fahrer wahrnehmbar. Sie beeinflussen die Fahrdynamik und den Fahrkomfort. Bisherige Optimierungen basieren häufig auf leistungsverzweigten Hybridantrieben mit einer stufenlosen Drehzahlwahl [31, 46, 62]. In dem untersuchten Antriebsstrang (paralleler Hybridantrieb) kommt hingegen ein Automatikgetriebe mit acht festen Gängen zum Einsatz. Das bisherige, heuristische Verfahren zur Gangwahl ist an den Belangen des Verbrennungsmotors ausgerichtet. Somit gewährleistet es zwar den Fahrkomfort, die Effizienz der Energiewandlung im hybriden Antriebsstrang wird jedoch nicht ausreichend berücksichtigt. In der Literatur finden sich verschiedene Optimierungsansätze für automatisierte Schaltgetriebe. In [95] wird bspw. ein Verfahren vorgestellt, das auf Situationserkennung und lernenden Algorithmen basiert. [58] stellt eine Fuzzy-Regelung der Gangwahl vor. In [64] werden die Schaltpunkte mittels dynamischer Programmierung optimiert. Da diese nicht echtzeitfähig ist, wird daraus ein heuristisches Verfahren speziell für Erprobungen des NEFZ abgeleitet. Reale Fahrprofile können noch nicht berücksichtigt werden. [33] analysiert das sogenannte Two-Mode-Getriebe, das vier feste Übersetzungsstufen mit zwei stufenlosen Betriebsbereichen kombiniert (vgl. auch [21]). Durch eine Onlineoptimierung der Drehzahlwahl kann der Verbrauch im NEFZ um ca. 1.5 % verringert werden. Es wird jedoch auch

deutlich, dass sich durch die resultierenden, unruhigen Drehzahlverläufe das Fahrverhalten verschlechtert. Die Kundenerwartung wird durch ein nur begrenzt nachvollziehbares und reproduzierbares Schaltverhalten nicht erfüllt. Außerdem steht die Komplexität der Onlineoptimierung im Widerspruch zum Entwicklungsprozess und den technischen Ressourcen (vgl. Abschnitte 5.1.1 und 2.4.2). Die Untersuchungen bestätigen jedoch, dass durch eine optimierte Gangwahl deutliche Einsparpotenziale im Kraftstoffverbrauch bestehen. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher ein neuer Optimierungsansatz erarbeitet werden, der von vornherein die Anforderungen der Serienentwicklung berücksichtigt.

Lastpunktverschiebung (SOC-Regelung)

Ein Freiheitsgrad der Lastpunktverschiebung besteht in der Entscheidung, wann in Abhängigkeit vom Betriebspunkt des Fahrzeugs die Batterie geladen (Lastpunktanhebung) oder entladen (Lastpunktabsenkung) wird (vgl. Abschnitt 2.2). Darüber hinaus ist es möglich, die angeforderten Lade- und Entladeleistungen zu variieren.

Auch die Lastpunktverschiebung beeinflusst den Kraftstoffverbrauch erheblich [50]. Zum einen verändert sie den Betriebspunkt des Verbrennungsmotors und somit dessen Wirkungsgrad und Kraftstoffbedarf. Zum anderen stellt sie Energie bereit, die für elektrisches Fahren genutzt werden kann. Auf diese Weise wirkt sie sich auch auf die Effizienz des elektrischen Fahrens aus. Eine wesentliche Einschränkung stellen Limitierungen der Ladeleistung aufgrund der Akustik des Verbrennungsmotors dar (vgl. Abschnitt 4.3.1). Darüber hinaus werden Lastpunktverschiebungen vom Fahrer in der Regel nicht wahrgenommen. In dem untersuchten Antriebsstrang dient zur SOC-Regelung eine direkte Verknüpfung von SOC-Level und Lade- bzw. Entladeleistung (vgl. z. B. [33] und [94]). [93] erweitert diese heuristische Regelstrategie um eine Adaptation an prädierte Fahrsituationen. Durch die direkte Abhängigkeit vom SOC sind die Verbrauchspotenziale jedoch begrenzt, da der aktuelle Betriebspunkt der Komponenten und somit deren Wirkungsgrad nicht berücksichtigt wird. [14] stellt einen Optimierungsansatz auf Basis von Willans-Kurven vor. Die nötigen Näherungen verringern jedoch die Einsparpotenziale. Darüber hinaus wird in [14] ein analytischer Ansatz entwickelt. Dieser stellt für infinitesimal kleine Zeitbereiche das rein verbrennungsmotorische Fahren der Kombination aus Lastpunktanhebung und anschließendem elektrischem Fahren gegenüber. Nachteilig ist hierbei jedoch, dass für die Lastpunktanhebung und das elektrische Fahren gleiche Betriebspunkte angenommen werden. Zudem fließen die Effizienz vorangegangener Betriebspunkte sowie variable Ladeleistungen nicht in den Ansatz ein. [30] beschreibt eine Offlineoptimierung, die auf der Basis des differentiellen Verbrennungsmotorwirkungsgrades bei dem Laden einen minimalen Ladewirkungsgrad vorgibt. Auch in diesem Ansatz wird die Effizienz vorangegangener und zukünftiger Betriebspunkte nicht berücksichtigt. Zudem erfolgt keine Bewertung der Energienutzung z. B. für elektrisches Fahren. Dies verringert das Verbrauchspotenzial. Alternativ dazu

kommen auch Fuzzy-Regelungen [2] und Onlineoptimierungen [47, 43] zum Einsatz. [53] kombiniert prädiktive, dynamische Programmierung und Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS). Diese Ansätze berücksichtigen die im vorangegangenen Abschnitt definierten Anforderungen der Serienentwicklung nur unzureichend.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein neuer Optimierungsansatz für die Lastpunktverschiebung erarbeitet werden. Der Anspruch besteht darin, die Effizienz verschiedener Betriebspunkte des Fahrzeugs sowie der Energienutzung durch elektrisches Fahren zu berücksichtigen. Außerdem sollen von vornherein die Anforderungen der Serienentwicklung mit einfließen.

Zustart des Verbrennungsmotors

Bei dem Übergang von elektrischem Fahren auf konventionellen Fahrbetrieb oder Lastpunktverschiebung kann der Verbrennungsmotor in dem untersuchten Antriebsstrang entweder mittels der Traktionsmaschine oder des Startergenerators im Riemen (SGR) gestartet werden (vgl. [10]). Einen weiteren Freiheitsgrad stellt die Ansteuerung der beiden Startsysteme und somit der Startablauf dar.

Der Zustart des Verbrennungsmotors bei einem Betriebsartenwechsel hat u. a. Anforderungen hinsichtlich Komfort und Response zu erfüllen. In dem untersuchten Antriebsstrang wird bisher stets der SGR für Motorstarts genutzt. [68, 52] erläutern, dass durch eine Optimierung des Startablaufs die Energieeffizienz des Motorstarts erhöht werden kann. [28] stellt den anlassergestützten Direktstart dem Start mittels integrierten Startergenerators gegenüber und zeigt, dass letzterer energetisch günstiger ist. Diese Untersuchungen zeigen beispielhaft, dass der Start des Verbrennungsmotors den Kraftstoffverbrauch beeinflusst. Im Rahmen dieser Arbeit sollen bzgl. der zusätzlichen Freiheitsgrade bei der Auswahl und Ansteuerung des Startsystems Optimierungspotenziale analysiert werden.

5.1.3 Optimierungsmethode

In dem vorangegangenen Abschnitt wurde erläutert, dass im weiteren Verlauf der Arbeit Optimierungsansätze für folgende Freiheitsgrade der Betriebsstrategie erarbeitet werden sollen:

- Gangwahl
- Lastpunktverschiebung (SOC-Regelung)
- Zustart des Verbrennungsmotors

In der Bewertung der Freiheitsgrade anhand der Anforderungen der Serienentwicklung wurde deutlich, dass Onlineoptimierungen als Optimierungsmethode nicht geeignet sind (vgl. auch Abschnitt 2.4.2). Die Optimierungen im Rahmen dieser Arbeit sollen primär offline durchgeführt werden. Diese Methode erfüllt die Anforderungen der Funktions- und Softwareentwicklung (vgl. Abschnitt 5.1.1). In die Steuererätfunktionen der Betriebsstrategie fließen die Ergebnisse der Offlineoptimierung in Form von Kennfeldern, -linien und Parametern ein. Darum sind die Daten im Fahrzeug fest vorgegeben und im Vergleich z. B. zu Onlineoptimierungen nur von wenigen Betriebsgrößen des Fahrzeugs abhängig. Dies ermöglicht ein nachvollziehbares und reproduzierbares Fahrverhalten und entspricht den Kundenerwartungen. Die Offlineoptimierung zeichnet sich zudem in der Regel durch einen transparenten Funktionsaufbau aus, wodurch die Implementierung und Applikation im Entwicklungsprozess erleichtert wird. Durch die Offlineberechnungen wird außerdem Rechenkapazität auf dem Steuergerät eingespart.

Die Offlineoptimierung der drei Freiheitsgrade Gangwahl, Lastpunktverschiebung und Verbrennungsmotorstart erfolgt in einem einheitlichen methodischen Vorgehen. Abbildung 5.2 fasst die Optimierungsmethode zusammen. Es werden zunächst die

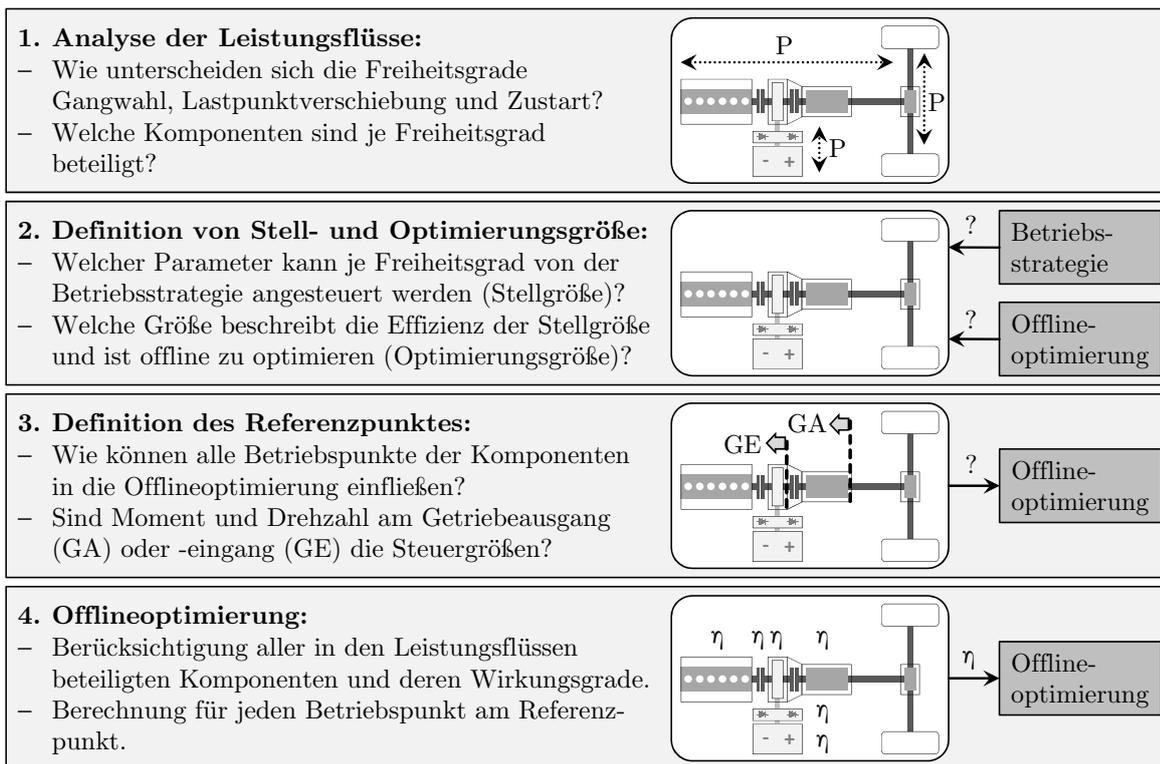


Abb. 5.2: Generische Optimierungsmethode für die Betriebsstrategie: Die Offlineoptimierung wird in drei Schritten vorbereitet, so dass alle Antriebsstrangkomponenten und sämtliche Betriebspunkte berücksichtigt werden können.

Leistungsflüsse im Antriebsstrang analysiert (Schritt 1). Auf diese Weise ist es möglich, alle für den jeweiligen Freiheitsgrad relevanten Komponenten zu ermitteln. Anhand der Leistungsflüsse erfolgt die Definition der Stell- und Optimierungsgrößen (Schritt 2). Bei der Stellgröße handelt es sich um die Eingriffsmöglichkeit der Betriebsstrategie in den Antriebsstrang. Die Stellgrößen dienen dazu, die Leistungsflüsse im Antriebsstrang zu verändern. Die Optimierungsgröße beschreibt die Effizienz der Stellgröße und wird in der Offlineoptimierung verwendet, um verbrauchsoptimierte Stellgrößen zu ermitteln. Um die Offlineoptimierung für jeden Betriebspunkt des Fahrzeugs durchführen zu können, wird im Antriebsstrang ein Referenzpunkt ausgewählt (Schritt 3, siehe auch Abbildung A.1 auf Seite 149). Das Moment und die Drehzahl am Referenzpunkt legen bzgl. der Längsdynamik des Fahrzeugs den Betriebspunkt der Komponenten fest. Prinzipiell stehen dazu der Getriebeausgang und -eingang zur Verfügung. Die Offlineoptimierung soll schließlich für jede Kombination aus Moment und Drehzahl an dem Referenzpunkt verbrauchsoptimierte Stellgrößen generieren (Schritt 4). Hierbei sind die Wirkungsgrade bzw. Verluste aller in den Leistungsflüssen beteiligten Antriebsstrangkomponenten einzubeziehen. Abschließend werden die Ergebnisse in Form von Kennfeldern in die Funktionen der Betriebsstrategie integriert.

Neben der Längsdynamik sind u. U. weitere Einflüsse auf den Betriebspunkt zu berücksichtigen, wie z. B. Vorgaben der Betriebsstrategie oder der Ladezustand. Deshalb wird zusätzlich in Abhängigkeit vom untersuchten Freiheitsgrad geprüft, inwiefern die Lösungsansätze durch Onlineadaptionen im Fahrzeugsteuergerät zu erweitern sind.

5.2 Entwicklung von Optimierungsansätzen

Die vorangegangenen Abschnitte beschreiben die Anforderungen der Funktions- und Softwareentwicklung, die zu optimierenden Freiheitsgrade der Betriebsstrategie sowie die Optimierungsmethode. Im Folgenden werden nun darauf aufbauend Optimierungsansätze für die Gangwahl, die Lastpunktverschiebung und den Verbrennungsmotorstart entwickelt. Das Ziel besteht darin, durch eine optimierte Betriebsstrategie die Verbrauchseinsparung von Hybridfahrzeugen im Serieneinsatz zu erhöhen.

5.2.1 Gesamtwirkungsgradoptimale Schaltpunkte des Getriebes

Das Ziel dieses Optimierungsansatzes besteht darin, den Kraftstoffverbrauch des untersuchten Hybridantriebs mittels der Schaltpunkte des Getriebes zu reduzieren. In der Referenzbetriebsstrategie sind die Schaltpunkte an den Erfordernissen konventioneller Antriebe – und somit an dem Verbrennungsmotor – ausgerichtet. Als Steuergröße des Gangs G dient die Getriebeausgangsdrehzahl n_{GA} und der Fahrpedalwinkel α_{FP} :

$$G = f(n_{GA}, \alpha_{FP}) \quad (5.1)$$

In dem Optimierungsansatz sind die in Abschnitt 5.1.1 definierten Anforderungen zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Gangwahl sind insbesondere die Bereiche Fahrdynamik und Fahrkomfort von Bedeutung. Die optimierten Schaltpunkte müssen ein nachvollziehbares und reproduzierbares Fahrverhalten sicherstellen (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Dieser Abschnitt beschreibt den Lösungsansatz, die Offlineoptimierung sowie deren Ergebnisse (vgl. auch [81, 76, 75]).

Lösungsansatz

Der Lösungsansatz wird gemäß des in Abschnitt 5.1.3 definierten Vorgehens erarbeitet.

Leistungsflüsse im Antriebsstrang Die Leistungsflüsse in Hybridantrieben unterscheiden sich für rein verbrennungsmotorisches Fahren, elektrisches Fahren, Rekuperation, Lastpunktanhebung und Lastpunktabsenkung. Die Rekuperation ist zudem mit gekoppeltem Verbrennungsmotor oder abgekoppeltem Verbrennungsmotor möglich. Deshalb bestimmt die Betriebsstrategie die Leistungsflüsse und nicht wie in konventionellen Fahrzeugen der Fahrerwunsch.

Eine Abstimmung der Gangwahl vorwiegend auf den verbrennungsmotorischen Betrieb und den Fahrerwunsch (Fahrpedalwinkel) wird somit den Anforderungen eines

Hybridantriebes nicht mehr gerecht. Es sind die Betriebspunkte aller Komponenten sowie die verschiedenen Betriebsarten zu berücksichtigen. Zudem sind – anstelle des Fahrpedalwinkels – verbrauchseffiziente Steuergrößen zu definieren.

Stell- und Optimierungsgröße Die Betriebsstrategie steuert den Gang G des Automatikgetriebes. Deshalb ist dieser die Stellgröße des Optimierungsansatzes. Um die Effizienz eines Ganges zu beurteilen und eine Optimierungsgröße zu ermitteln, werden anhand der Wirkungsgraddaten die Wechselwirkungen zwischen den Antriebsstrangkomponenten und der Gangwahl analysiert. Die Wirkungsgrade von Verbrennungsmotor und E-Maschine sind eine Funktion von Drehzahl und Moment (siehe Abbildungen 2.7 und 2.8). Das Schleppmoment des Verbrennungsmotors steigt mit der Motordrehzahl, das Schleppmoment der Trennkupplung mit der Differenzdrehzahl zwischen Ein- und Ausgang. Im Automatikgetriebe variieren die Schleppmomente je Gang in Abhängigkeit von Eingangsmoment und -drehzahl (siehe Abbildung 2.11). Der Wirkungsgrad des Hochvoltspeichers beruht auf der Lade- und Entladeleistung sowie dem SOC (siehe Abbildung 2.10). Die Abhängigkeit der Komponentenwirkungsgrade von der Temperatur wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Dies beruht u. a. auf der Anforderung, dass alle Schaltvorgänge für den Fahrer nachvollziehbar und reproduzierbar sein sollten. Deshalb besteht das Ziel, temperaturbedingte Änderungen der Gangwahl zu vermeiden.

Die Wirkungsgraddaten zeigen, dass eine Änderung von Drehzahl und Moment aufgrund eines Gangwechsels direkten Einfluss auf die Effizienz aller Komponenten hat. Lediglich der Wirkungsgrad der Batterie wird indirekt durch die E-Maschinenleistung beeinflusst. Da die Bestpunkte der Komponentenwirkungsgrade in unterschiedlichen Drehmoment- und Drehzahlbereichen liegen, ergibt sich auch getrennt nach Betriebsarten keine eindeutige Optimierungsrichtung für die Gangwahl. Die Wahl des Betriebspunktes erfordert einen Kompromiss zwischen allen beteiligten Komponenten. Der Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs ermöglicht die Berücksichtigung aller Komponenten und stellt daher die Optimierungsgröße dar. Er setzt die aufgewendeten Leistungen (Kraftstoffleistung P_{Kst} und Entladeleistung der Hochvoltbatterie $P_{\text{HV-Bat, entlad}}$) zu den Nutzleistungen an Abtrieb P_{Abtrieb} und Batterie $P_{\text{HV-Bat, lad}}$ ins Verhältnis und ist in jedem Fahrzustand zu maximieren:

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \frac{P_{\text{Abtrieb}} + P_{\text{HV-Bat, lad}}}{P_{\text{Kst}} + P_{\text{HV-Bat, entlad}}} \quad (5.2)$$

Referenzpunkt im Antriebsstrang Der Gang soll anhand des Gesamtwirkungsgrades für jeden Betriebspunkt des Fahrzeugs optimiert werden. Die Offlineoptimierung benötigt hierzu einen Referenzpunkt im Antriebsstrang, der den aktuellen Betriebspunkt der Antriebsstrangkomponenten beschreibt. Hinsichtlich der Optimierung der Gangwahl wird der Getriebeausgang gewählt, da die im Fahrzeug auftretenden Fahrzustände

anhand von Getriebeausgangsdrehzahl n_{GA} und -moment M_{GA} beschreibbar sind. Diese stellen die Steuergrößen des Optimierungsansatzes dar.

Die Offlineoptimierung bewertet für jede Kombination von Getriebeausgangsdrehzahl und -moment die Effizienz eines Ganges anhand des Gesamtwirkungsgrades. Die beiden Steuergrößen beschreiben die Längsdynamik des Fahrzeugs (Antriebs- bzw. Verzögerungsleistung). Sie geben jedoch keine Auskunft über die von der Betriebsstrategie gewählte Betriebsart. Der Lösungsansatz berücksichtigt diesen Freiheitsgrad, indem für jede Betriebsart B separat wirkungsgradoptimale Gänge G_{opt} vorgegeben werden. Hierbei wird im Falle der Rekuperation zusätzlich zwischen an- und abgekoppeltem Verbrennungsmotor unterschieden (vgl. Abbildung 5.3).

$$G_{opt} = f(n_{GA}, M_{GA}, \eta_{Gesamt}, B) \quad (5.3)$$

Einen weiteren Einfluss der Betriebsstrategie stellt die Lade- bzw. Entladeleistung der SOC-Regelung in der Betriebsart Lastpunktanhebung bzw. -absenkung (Lastpunktverschiebung) dar. Um verbrauchsoptimale Lösungen zu erzielen, müsste in dieser Betriebsart der optimierte Gang zusätzlich in Abhängigkeit von der angeforderten Leistung vorgegeben werden. Dies widerspricht jedoch der Anforderung, dass die Gangwahl für den Fahrer nachvollziehbar und reproduzierbar sein sollte. Die Schaltpunkte dürfen sich nicht in Abhängigkeit vom Ladezustand – und den resultierenden Lade- bzw. Entladeleistungen – ändern. Aus diesem Grund werden die wirkungsgradoptimalen Gänge für die Betriebsart Lastpunktanhebung unter der Annahme einer konstanten Ladeleistung ermittelt. Diese stellt den Mittelwert der Ladeleistungen über die betrachteten Fahrzyklen dar. Lastpunktabsenkungen (Entladeleistungen) sind im Kundenbetrieb kaum relevant und treten auch in gesetzlichen Fahrzyklen nicht auf, da die elektrische Energie primär für elektrisches Fahren genutzt wird. Um die Komplexität der Funktion zu begrenzen, erfolgt keine separate Gangwahl für Lastpunktabsenkungen.

Offlineoptimierung

Für die im vorangegangenen Abschnitt definierten Betriebsarten (vgl. Abbildung 5.3) werden Algorithmen erstellt, die alle möglichen Gänge zur Darstellung von Getriebeausgangsmoment und -drehzahl berechnen und hinsichtlich des Gesamtwirkungsgrades vergleichen.

$$\eta_{Gesamt,opt} = \max \{ \eta_{Gesamt, G} | G = 1, 2, \dots, 8 \} \quad (5.4)$$

Die Algorithmen bilden je Betriebsart die Wirkungsgradkette des Antriebsstrangs ausgehend vom Getriebeausgang ab. Dadurch ist es möglich, für jeden Gang und jeden Betriebspunkt die benötigten primären Leistungen zur Darstellung der Abtriebsleistung

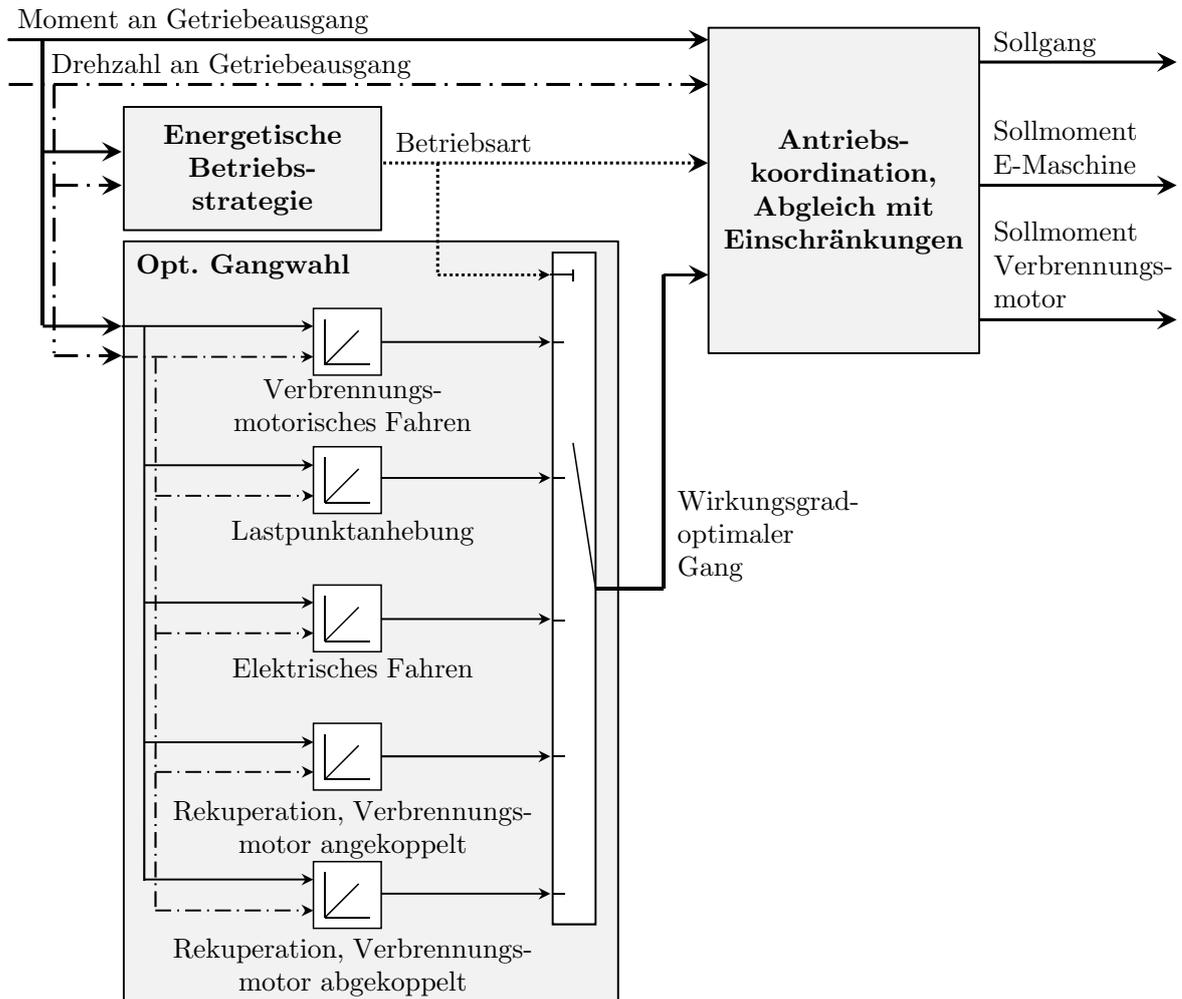


Abb. 5.3: Lösungsansatz für eine verbrauchsoptimierte Gangwahl des Getriebes: Für jede Betriebsart werden gesamtwirkungsgradoptimale Gänge in Abhängigkeit von Getriebeausgangsdrehzahl und -moment vorgegeben. Die Kennfelder stammen aus einer Offlineoptimierung.

zu berechnen. Anhand von Gleichung 5.2 ergibt sich der Gesamtwirkungsgrad des Systems für den untersuchten Betriebspunkt. Durch den Vergleich des Gesamtwirkungsgrades je Betriebspunkt bei Nutzung verschiedener Gänge kann der wirkungsgradoptimale Gang bestimmt werden.

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die Modellierung der Komponenten in den Berechnungsmodellen. Trennkupplung und Verbrennungsmotor sind in Abhängigkeit von der Betriebsart unterschiedlich abgebildet. Die Modellierung enthält folgende Vereinfachungen: Aufgrund der Anforderung, im Anfahren den ersten Gang zu nutzen, ist eine Betrachtung des optimalen Ganges in dieser Phase nicht erforderlich. Deshalb wird

Komponente	VM-Fahren und LPAn	Rekuperation		Elektrisches Fahren
		mit VM	ohne VM	
Automatik- getriebe	Aus den Schleppmomentverläufen generiertes Kennfeld, welches für jeden Gang allen Eingangsdrehzahlen und -momenten das resultierende Abtriebsmoment zuordnet			
Anfahrelement	In den Getriebekennfeldern berücksichtigt, Anfahren über schleifende Kupplung nicht abgebildet			
Getriebeölpumpe	Drehzahlabhängige Momentenkurve			
Elektrische Maschine	Verlustleistungskennfeld in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment inklusive Leistungselektronik, das auch das Schleppmoment der Maschine berücksichtigt			
Trennkupplung	Geschlossen, keine Drehzahlbeschränkung, Entfall Schleppmoment		Geöffnet, eingeschränkter Drehzahlbereich, Schleppmoment drehzahlabhängig	
Verbrennungs- motor	Wirkungs- gradkennfeld	Schleppmo- mentenkurve	Verbrennungsmotor abgekoppelt	
Hochvoltbatterie	Aus Batteriemodell generierte Kennlinie für SOC = 60 %, die einer elektrischen Leistung die gespeicherte Leistung zuordnet			

Tab. 5.1: Modellierung der Komponenten in den Offlinealgorithmen je Betriebsart (VM: Verbrennungsmotor, LPAn: Lastpunktanhebung).

der beim Anfahren nötige Schlupf der Anfahrkupplung nicht berücksichtigt. Die im Getriebe neben der integrierten Ölpumpe zusätzlich verbaute elektrische Getriebeölpumpe wird nicht betrachtet. Sie ist lediglich bei Eingangsdrehzahlen unterhalb von 600 U/min anstelle der mechanischen Pumpe aktiv. Diese treten ebenfalls nur kurzzeitig während des Anfahrens und im Stillstand auf. Hinsichtlich des Wirkungsgrads des Hochvoltspeichers wird von einem konstanten SOC von 60 % ausgegangen, da in dem Lösungsansatz keine SOC-abhängigen Gangwahlkennfelder und somit keine rein SOC-basierten Schaltungen vorgesehen sind. Der Wirkungsgrad des Speichers ist außerdem nur geringfügig von dem SOC abhängig. So weichen die Verlustleistungen bei einem SOC von 35 % und 65 % und einer Entladeleistung von jeweils 10 kW lediglich um 2.5 % voneinander ab. Der konstante Wert von 60 % wird aus dem mittleren SOC in den beiden Fahrzyklen NEFZ und FTP-72 in der Referenzbetriebsstrategie abgeleitet.

Die Algorithmen führen alle Berechnungen in Matrizen aus, die in Abhängigkeit von Getriebeausgangsmoment und -drehzahl alle anfahrbaren Betriebspunkte vorgeben. Zu Beginn der Berechnung werden die Wertebereiche und die Skalierung der Achsen festgelegt. Der Bereich der zulässigen Getriebeeingangsdrehzahlen bei abgekoppeltem Verbrennungsmotor ist durch die Mindestdrehzahl von 800 U/min für einen Zustart des Verbrennungsmotors sowie die obere Betriebsgrenze der Trennkupplung von 3000 U/min beschränkt. Ist der Verbrennungsmotor angekoppelt, so sind aus Response- und Lauftru-

hegründen Drehzahlen ab 1000 U/min zulässig. Die maximale Getriebeeingangsdrehzahl im Rekuperationsbetrieb liegt aus Komfortgründen bei 4750 U/min.

Innerhalb der definierten Wertebereiche werden in den Algorithmen die Achsen für Getriebeausgangsmoment und -drehzahl der Ergebniskennfelder mit einer variablen Schrittweite aufgespannt. Auf der Drehzahlachse werden die minimal darstellbaren Getriebeausgangsdrehzahlen je Gang fest vorgegeben. Dazwischen kann eine definierte Zahl an Stützstellen eingefügt werden. Somit sind die frühest möglichen Schaltpunkte immer exakt abgebildet und die Anzahl der Stützstellen zwischen den Gängen ist konstant. Die Drehmomentachse wird derart skaliert, dass die bei den im Fahrbetrieb vorherrschenden niedrigen Momenten eine kleinere Schrittweite vorliegt als im übrigen Momentenbereich. Mittels der Achsen kann für jede Kombination aus Drehzahl und -moment die Abtriebsleistung berechnet werden.

Im folgenden Teil der Berechnung wird die Achse der Getriebeausgangsdrehzahlen mittels der Übersetzungsstufen der Gänge in acht Drehzahlachsen am Getriebeeingang umgerechnet. Äquivalent werden die Getriebeeingangsmomente ermittelt. Hierbei werden die Schleppmomente des Getriebes sowie der Momentenbedarf der Getriebeölpumpe berücksichtigt.

Daraufhin bestimmen die Algorithmen die Drehzahlen und -momente der übrigen Antriebsstrangkomponenten. Deshalb unterscheidet sich die Berechnung in Abhängigkeit von der Betriebsart:

- Während des verbrennungsmotorischen Fahrens und der Lastpunktanhebung ist die Trennkupplung geschlossen und muss somit nicht berücksichtigt werden. In Abhängigkeit von der vorab definierten mittleren Ladeleistung (Lastpunktanhebung) wird das notwendige mechanische Moment der Maschine berechnet. Es wird anhand der Volllastkurve des generatorischen Betriebs limitiert. Zudem wird die der Batterie zugeführte Leistung ermittelt. Durch die Addition der mechanischen E-Maschinenmomente und der Getriebeeingangsmomente ergeben sich acht Matrizen, die je Gang die vom Verbrennungsmotor aufzubringenden Momente enthalten. Diese werden durch die Momentengrenzen des Verbrennungsmotors limitiert. Im Anschluss werden die Wirkungsgrade und die Effektivleistungen des Verbrennungsmotors für alle ermittelten Betriebspunkte bestimmt. Aus der Division der Effektivleistung durch den Wirkungsgrad ergibt sich die aufgewendete Kraftstoffleistung.
- In der Rekuperation mit angekoppeltem Verbrennungsmotor wird der Betrag des negativen Getriebeeingangsmoments durch das Schleppmoment des Verbrennungsmotors verringert. Das resultierende mechanische Moment der E-Maschine wird durch deren Volllastkurve für den generatorischen Betrieb limitiert. Schließlich wird daraus die elektrische Leistung der E-Maschine und die gespeicherte elektrische Leistung bestimmt.

- Während des elektrischen Fahrens und der Rekuperation mit abgekoppeltem Verbrennungsmotor ist die Trennkupplung geöffnet. Deren Schleppmoment wird zu dem aufzubringenden Getriebeeingangsmoment addiert bzw. vom Rekuperationsmoment abgezogen. Alle weiteren Berechnungen sind äquivalent zu der Betriebsart „Rekuperation mit angekoppeltem Verbrennungsmotor“.

Abschließend berechnen die Algorithmen anhand von Formel 5.2 den Gesamtwirkungsgrad für jeden Betriebspunkt und Gang. Schließlich wird daraus iterativ je Betriebspunkt der Gang ermittelt, der in der aktuellen Betriebsart den größten Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs bis hin zum Getriebeausgang ermöglicht.

Ergebnisse der Offlineoptimierung

Der Offlinealgorithmus generiert Kennfelder, die je Betriebsart für jede Kombination aus Getriebeausgangsmoment und -drehzahl den gesamtwirkungsgradoptimalen Gang ausgeben. Diese werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Verbrennungsmotorisches Fahren Abbildung 5.4 zeigt das Gangwahlkennfeld für verbrennungsmotorisches Fahren. Durch die Verwendung des Getriebeausgangsmoments als Steuergröße anstelle des Fahrpedalwinkels ist beinahe der gesamte Bereich unterhalb

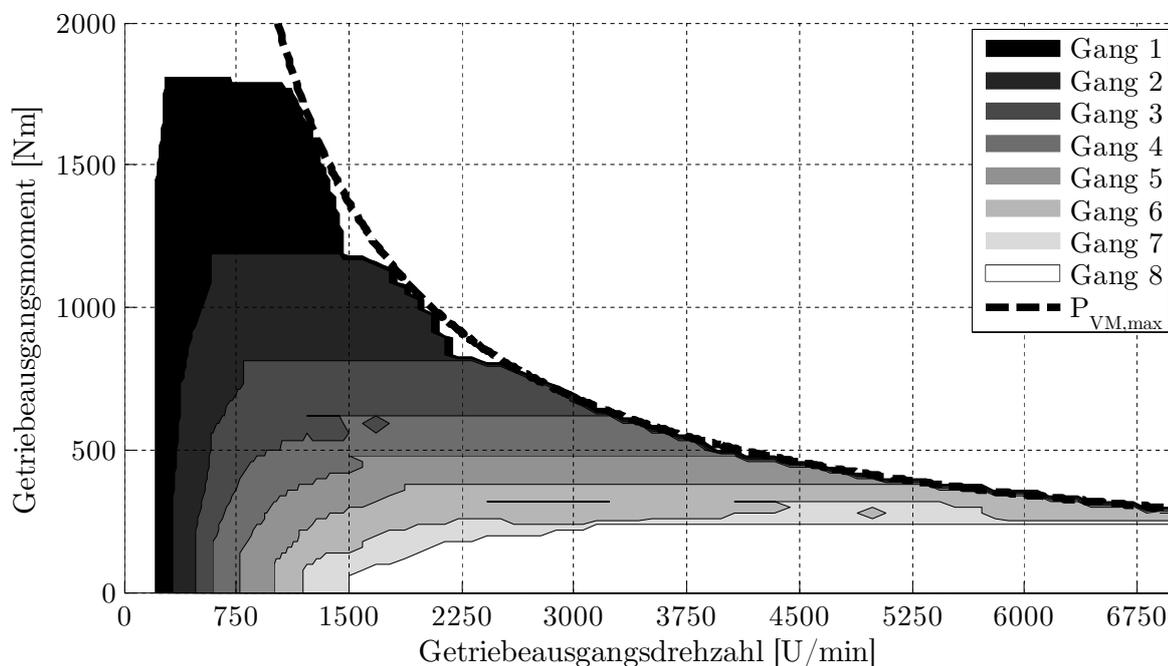


Abb. 5.4: Optimierte Gangwahl für verbrennungsmotorisches Fahren: Die Gänge bewirken größtenteils niedrige Getriebeeingangsdrehzahlen bei hohem Moment.

der idealen Zugkrafthyperbel $P_{VM, \max}$ anfahrbar. Die gewählten Gänge bewirken niedrige Getriebeeingangsdrehzahlen in Verbindung mit hohen Momenten. Eine Ausnahme stellt der Bereich mit sehr hohen Lasten und Drehzahlen unter 1500 U/min dar. Der siebte Gang unterscheidet sich bzgl. seiner Verteilung im Kennfeld von den übrigen Gängen. Er ist in weiten Bereichen ineffizienter als der sechste Gang, der aufgrund seiner Ausführung als Direktgang einen hohen Wirkungsgrad aufweist.

Lastpunktanhebung Das Kennfeld für eine Lastpunktanhebung exemplarisch mit 7.5 kW zeigt einen ähnlichen Verlauf wie das im verbrennungsmotorischen Betrieb (vgl. Abbildung A.2 auf Seite 150). Dies entspricht der Anforderung, dass sich die Schaltpunkte durch eine Lastpunktanhebung nur geringfügig ändern dürfen, um die Nachvollziehbarkeit für den Fahrer sicherzustellen. Die konstante Ladeleistung kann bei geringer Drehzahl lediglich mit einem hohen Moment generiert werden. Deshalb fallen die Vollastlinien je Gang im Gegensatz zu dem verbrennungsmotorischen Betrieb bei niedrigeren Drehzahlen ab. Außerdem steigen im Kennfeld die niedrigsten Drehzahlen je Gang (Basisdrehzahlen) im Vergleich zum verbrennungsmotorischen Kennfeld an. Um 7.5 kW elektrische Leistung bei einer Drehzahl von ca. 1040 U/min zu erzeugen, werden bereits ca. -81 Nm mechanisches Moment der elektrischen Maschine benötigt. Dieses erreicht die im Algorithmus hinterlegte Dauerlast der E-Maschine. Somit sind niedrigere Getriebeeingangsdrehzahlen nicht möglich, weshalb die Hochschaltungen später erfolgen. Des Weiteren sind im Bereich sehr kleiner Abtriebsmomente niedrigere Gänge als im verbrennungsmotorischen Betrieb hinterlegt. Dort verändert sich das Verhältnis von Abtriebsleistung zu Ladeleistung. Somit überwiegt die Wirkungsgradverbesserung der E-Maschine durch Drehzahlerhöhung den Wirkungsgradnachteil des Verbrennungsmotors.

Rekuperation mit gekoppeltem Verbrennungsmotor In Abbildung 5.5 ist das Gangwahlkennfeld für die gekoppelte Rekuperation dargestellt. Sie zeigt zudem die Leistungshyperbel $P_{\text{Break}} = 19 \text{ kW}$. Es ist zu erkennen, dass die Bereiche je Gang an ihrem Schnittpunkt mit der Hyperbel abknicken. Bis zu dieser Rekuperationsleistung überwiegt die Reduktion der Schleppmomentverluste bei einer Verringerung der Drehzahl die Wirkungsgradverschlechterung der E-Maschine. Aufgrund des hohen Wirkungsgrades des sechsten Ganges unterscheidet sich auch in dieser Betriebsart die Verteilung des siebten Ganges von den übrigen Gängen. Sobald P_{Break} überschritten ist, verschiebt sich die Grenze für Rückschaltungen bei steigender Getriebeausgangsdrehzahl hin zu betragsmäßig größeren Getriebeausgangsmomenten. Dies resultiert aus dem mit der Drehzahl zunehmenden Schleppmoment des Verbrennungsmotors. Der betragsmäßige Anstieg der Rückschaltgrenze dauert an, bis je Gang die Vollast der E-Maschine erreicht wird.

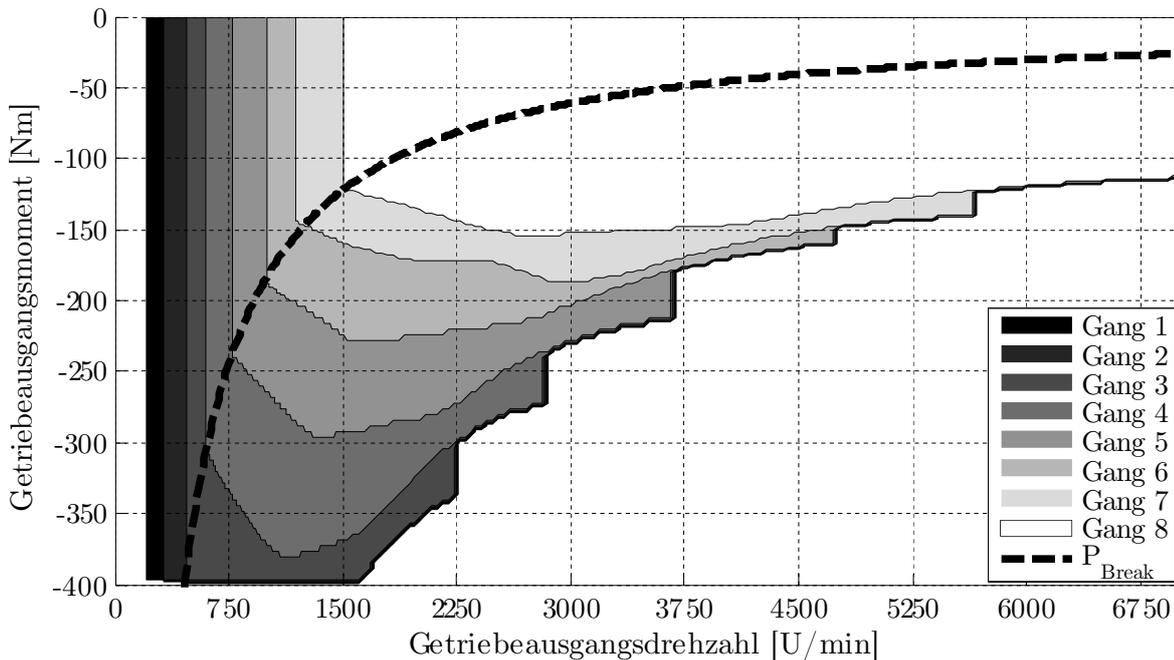


Abb. 5.5: Optimierte Gangwahl für Rekuperation mit gekoppeltem Verbrennungsmotor: Über P_{Break} werden die E-Maschinendrehzahlen gering gehalten, darunter steigen sie an.

Rekuperation mit abgekoppeltem Verbrennungsmotor Abbildung 5.6 zeigt das Gangwahlkennfeld für die Rekuperation mit abgekoppeltem Verbrennungsmotor. Bei geringen Getriebeausgangsmomenten liegt die Schaltgrenze je Gang bei der minimal zulässigen Getriebeeingangsdrehzahl von 800 U/min. Dies resultiert aus dem dominanten Einfluss des Schleppmoments der Trennkupplung, welches mit der Differenzdrehzahl ansteigt. Im Bereich hoher Momente und niedriger Drehzahlen verschlechtert sich der Wirkungsgrad der E-Maschine. Sobald die Verlustleistung der E-Maschine die der Trennkupplung übersteigt, knicken die Kurven ab. Im Vergleich zur Rekuperation mit angekoppeltem Verbrennungsmotor verlaufen die Schaltgrenzen bei betragsmäßig geringeren Getriebeausgangsmomenten. Deshalb haben die Schleppverluste des Getriebes in dieser Betriebsart einen größeren Einfluss und die Knickpunkte im Kennfeld sind nicht durch eine Hyperbel beschreibbar.

Elektrisches Fahren In Abbildung 5.7 ist das Gangwahlkennfeld für das elektrische Fahren dargestellt. Ähnlich zur Rekuperation mit abgekoppeltem Verbrennungsmotor ist das drehzahlabhängige Schleppmoment der Trennkupplung bei kleinen Momentenanforderungen dominant. Bei steigendem Getriebeausgangsmoment nimmt der Einfluss des Wirkungsgrades der elektrischen Maschine zu. Daher knicken die Kurven ab, sobald die Verlustleistung der E-Maschine die der Trennkupplung überschreitet.

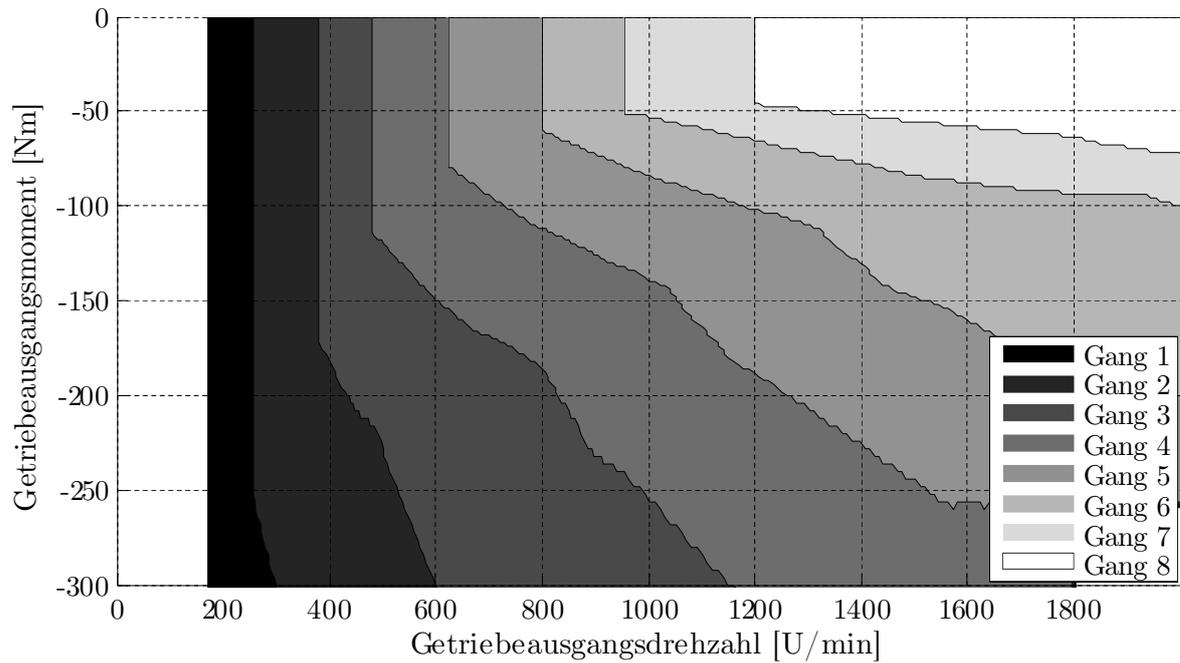


Abb. 5.6: Optimierte Gangwahl für Rekuperation mit abgekoppeltem Verbrennungsmotor: Im Vergleich zur gekoppelten Rekuperation hat die Trennkupplung einen dominanten Einfluss bei kleinen Momenten.

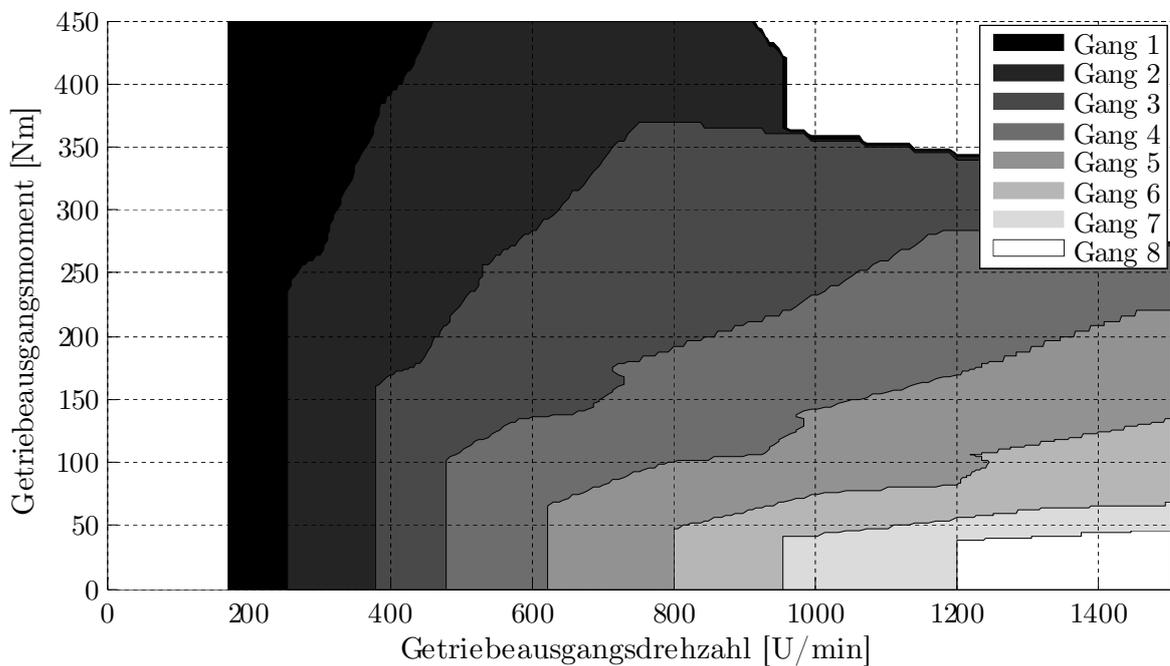


Abb. 5.7: Optimierte Gangwahl für elektrisches Fahren: Die Rahmenbedingungen entsprechen denen der abgekoppelten Rekuperation.

5.2.2 Aufwand- und nutzenbasiertes Ladezustandsmanagement der Hochvoltbatterie

Das Ziel dieses Optimierungsansatzes besteht darin, den SOC der Hochvoltbatterie durch eine Lastpunktverschiebung des Verbrennungsmotors verbrauchseffizient zu regeln. In der Referenzbetriebsstrategie kommt bisher eine feste Verknüpfung zwischen SOC und Lade- bzw. Entladeleistung in Form einer Kennlinie zum Einsatz (siehe Abbildung 5.19 auf Seite 92). Das neue Verfahren soll neben der Entscheidung, in welchem Betriebspunkt des Fahrzeugs eine Lastpunktverschiebung durchzuführen ist, auch den energetisch optimierten Betrag der Lastpunktverschiebung vorgeben. Ein weiterer Anspruch besteht darin, nicht ausschließlich die Effizienz der Energieerzeugung im aktuellen Betriebspunkt zu bewerten, sondern auch vorangegangene oder bevorstehende Betriebspunkte in die Betrachtung miteinzubeziehen. Zusätzlich soll der spätere Nutzen der erzeugten Energie – beispielsweise für elektrisches Fahren – im Voraus abgeschätzt werden.

In der Optimierung sind die in Abschnitt 5.1.1 definierten Anforderungen zu berücksichtigen. Insbesondere die Schnittstellen zu betriebsstrategischen Eingriffen in die SOC-Regelung, z. B. durch Situationserkennung und -prädiktion [4, 92], sollen in den Regelansatz integriert werden. Der Ansatz muss außerdem den Leistungsbedarf des Bordnetzes, die Verfügbarkeit von elektrischem Fahren und Rekuperation sowie akustische Limitierungen der Ladeleistungen berücksichtigen.

Dieser Abschnitt beschreibt den Lösungsansatz, die Optimierung sowie die Ergebnisse der Offlineberechnungen (vgl. auch [80, 73, 85]).

Lösungsansatz

Der Lösungsansatz wird gemäß des in Abschnitt 5.1.3 definierten Vorgehens erarbeitet.

Leistungsflüsse im Antriebsstrang An der Betriebsart Lastpunktverschiebung sind im Antriebsstrang Verbrennungsmotor, E-Maschine, Leistungselektronik und Hochvoltbatterie beteiligt. Die gewählte Lade- bzw. Entladeleistung beeinflusst den Betriebspunkt und somit den Wirkungsgrad der Komponenten. Da die Drehzahl am Getriebeeingang durch die Fahrsituation und den Gang vorgegeben ist, kann an der E-Maschine und dem Verbrennungsmotor lediglich das Moment variiert werden, um die angeforderten Leistungen umzusetzen. Muss der Verbrennungsmotor zusätzliches Moment zum Laden aufbringen, so steigt sein Kraftstoffverbrauch. Während des Assistens (Lastpunktabsenkung) durch die E-Maschine ist weniger Moment nötig, somit sinkt der Verbrauch. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass sich durch die Lastpunktverschiebung

der Wirkungsgrad ändert und somit je nach Betriebspunkt die aus dem Kraftstoff gewonnene effektive Leistung des Verbrennungsmotors variiert.

Stell- und Optimierungsgröße Die der Batterie zu- bzw. abgeführte Leistung in Form der elektrischen E-Maschinenleistung $P_{EM,el}$ stellt die Stellgröße des Regelanlasses dar. Für jeden Betriebspunkt des Antriebsstrangs soll $P_{EM,el}$ – im Rahmen der von der E-Maschine umsetzbaren Leistungen – verbrauchsoptimiert vorgegeben werden. Ist im aktuellen Betriebspunkt eine Lastpunktverschiebung nicht effizient, so wird die Leistung Null ausgegeben. Die Leistung ist für Lastpunktanhebungen negativ und für Lastpunktabsenkungen positiv definiert. Als Maß für die Effizienz und Optimierungsgröße dient die spezifische Verbrauchsänderung b_{LPV} :

$$b_{LPV} = \frac{\dot{m}_{LPV} - \dot{m}_{Bas}}{P_{HV-Bat}} \quad (5.5)$$

\dot{m}_{LPV} ist der Kraftstoffmassenstrom während einer Lastpunktverschiebung, \dot{m}_{Bas} der Kraftstoffmassenstrom ohne Lastpunktverschiebung und P_{HV-Bat} die Lade- bzw. Entladeleistung der Hochvoltbatterie. Die spezifische Verbrauchsänderung bezieht die Änderung des Kraftstoffverbrauch durch Lastpunktverschiebungen auf die der Batterie zugeführten bzw. entnommenen Leistung. Auf diese Weise berücksichtigt die Größe neben der Verbrauchsänderung auch den Wirkungsgrad der Komponenten.

Referenzpunkt im Antriebsstrang Für das SOC-Management gibt der Getriebeeingang Auskunft über den Betriebspunkt des Fahrzeugs. Dort werden Moment und Drehzahl durch eine Lastpunktverschiebung nicht verändert. In der Offlineoptimierung ist der Betriebspunkt folglich durch Getriebeeingangsmoment M_{GE} und -drehzahl n_{GE} festgelegt. Diese bestimmen in Verbindung mit der spezifischen Verbrauchsänderung die elektrische E-Maschinenleistung:

$$P_{EM,el} = f(n_{GE}, M_{GE}, b_{LPV}) \quad (5.6)$$

Das Ladezustandsmanagement muss nicht nur ausreichend Energie für die Hybridfunktionen zur Verfügung stellen (z. B. elektrisches Fahren oder Motorstart) sondern auch das Bordnetz versorgen. Die beiden Steuergrößen Getriebeeingangsmoment und -drehzahl geben keine Auskunft über die aktuelle Bordnetzlast. Somit ist diese als Freiheitsgrad in der Optimierung zu berücksichtigen und Gleichung 5.5 um die Bordnetzleistung zu erweitern.

Aufwand und Nutzen Aus der spezifischen Verbrauchsänderung werden der Ladeaufwand und Entladenutzen abgeleitet. Der Aufwand A ist definiert als die Kraftstoffmenge

in Gramm, die zur Erzeugung einer Kilowattstunde Batterie- oder Bordnetzenergie durch eine Lastpunktanhebung (LPAn) nötig ist (Spezifischer Mehrverbrauch).

$$A_{\text{LPAn}} = \frac{\dot{m}_{\text{LPAn}} - \dot{m}_{\text{Bas}}}{|P_{\text{EM,el}}| \eta_{\text{HV-Bat,lad}} + P_{\text{BN}}(1 - \eta_{\text{HV-Bat,lad}})} \quad (5.7)$$

P_{BN} entspricht der Bordnetzleistung, $\eta_{\text{HV-Bat,lad}}$ dem Ladewirkungsgrad der HV-Batterie. Der Nutzen N beschreibt, wie viele Gramm Kraftstoff bei der Verwendung einer Kilowattstunde Batterieenergie für Lastpunktabsenkung (LPAb) oder elektrisches Fahren (eFahr) eingespart werden (Spezifische Verbrauchseinsparung).

$$N_{\text{LPAb}} = \left| \frac{(\dot{m}_{\text{LPAb}} - \dot{m}_{\text{Bas}}) \eta_{\text{HV-Bat,entlad}}}{P_{\text{EM,el}} + P_{\text{BN}}(1 - \eta_{\text{HV-Bat,entlad}})} \right| \quad (5.8)$$

$$N_{\text{eFahr}} = \left| \frac{\dot{m}_{\text{Bas}} \eta_{\text{HV-Bat,entlad}}}{P_{\text{EM,el}} + P_{\text{BN}}(1 - \eta_{\text{HV-Bat,entlad}})} \right| \quad (5.9)$$

Für das Laden mittels Lastpunktanhebung wird ein maximaler Aufwand A_{max} vorgegeben:

$$P_{\text{EM,el,LPAn}} = f(n_{\text{GE}}, M_{\text{GE}}, A_{\text{max}}) \Rightarrow A(P_{\text{EM,el,LPAn}}) \leq A_{\text{max}} \quad (5.10)$$

Im Falle eines Entladens mittels Lastpunktabsenkung wird ein minimaler Nutzen N_{min} definiert:

$$P_{\text{EM,el,LPAb}} = f(n_{\text{GE}}, M_{\text{GE}}, N_{\text{min}}) \Rightarrow N(P_{\text{EM,el,LPAb}}) \geq N_{\text{min}} \quad (5.11)$$

Die Verwendung von Aufwand und Nutzen ermöglicht hinsichtlich Zeit- und Betriebspunkt eine entkoppelte Betrachtung der Energieerzeugung durch Lastpunktanhebung und der Energienutzung durch elektrisches Fahren oder Lastpunktabsenkung. Dies hat den Vorteil, dass die durch die Betriebsstrategie vorgegebene Aufteilung von Erzeugung und Nutzung auf unterschiedliche Betriebspunkte des Antriebsstrangs berücksichtigt werden kann. So sind beispielsweise Fahrsituationen, die im Rahmen der Betriebsstrategie für Lastpunktanhebungen zur Verfügung stehen, auf Grund der Fahrzeuggeschwindigkeit oder der benötigten Antriebsleistung oft nicht für elektrisches Fahren geeignet.

Regelung des SOC Der aktuelle SOC legt den maximal zulässigen Aufwand A_{max} sowie den minimal erforderlichen Nutzen N_{min} einer Lastpunktanhebung bzw. -absenkung fest (siehe Abbildung 5.8). Eine Vorgabe von $P_{\text{EM,el}}$ alleine hinsichtlich maximaler Effizienz ist nicht im gesamten SOC-Bereich der Batterie zielführend. Aus Bauteilschutzgründen sind sehr kleine und sehr hohe SOC nicht zulässig (vgl. Abbildung 5.8).

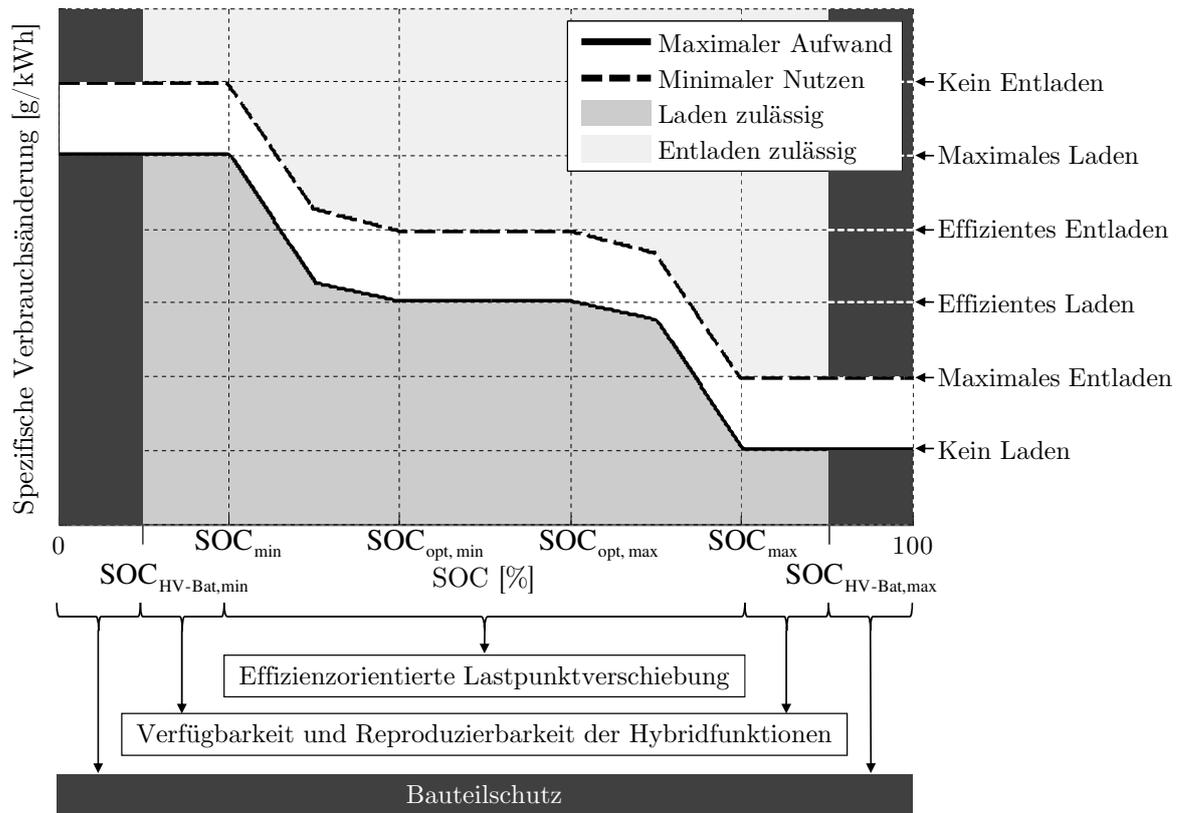


Abb. 5.8: Lösungsansatz der verbrauchsoptimierten SOC-Regelung: Definition eines maximal zulässigen Ladeaufwands und minimal geforderten Nutzens in Abhängigkeit vom SOC.

Der nutzbare SOC-Bereich zwischen $SOC_{HV-Bat,min}$ und $SOC_{HV-Bat,max}$ wird als relativer SOC definiert, der in einem Wertebereich zwischen 0 und 1 angegeben wird:

$$SOC_{rel} = \frac{SOC - SOC_{HV-Bat,min}}{SOC_{HV-Bat,max} - SOC_{HV-Bat,min}} \quad (5.12)$$

Das Ladezustandsmanagement muss die Verfügbarkeit der Hybridfunktionen in allen Fahrzuständen reproduzierbar sicherstellen. So muss bereits unterhalb des maximalen SOC der Lastpunkt des Verbrennungsmotors abgesenkt werden, um im Speicher einen Rekuperationsvorhalt (z. B. für Talfahrt) zu schaffen. Die Verfügbarkeit des elektrischen Fahrens wird durch ein Laden schon vor dem Erreichen des minimal zulässigen SOC sichergestellt. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen haben A_{max} und N_{min} in Abhängigkeit vom SOC unterschiedliche Bedingungen zu erfüllen:

- $SOC < SOC_{min}$: Maximales Laden. Kein Entladen.
- $SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$: Verbrauchseffiziente Lastpunktverschiebung.

- $\text{SOC} > \text{SOC}_{\max}$: Kein Laden. Maximales Entladen.

Adaption der Grenzwerte Die Werte für den maximalen Aufwand und minimalen Nutzen können entsprechend der Darstellung in Abbildung 5.8 fest vorgegeben werden. Um Lastpunktverschiebungen verbrauchsoptimal über einen Fahrzyklus durchzuführen, müssen der durchschnittliche Aufwand so gering wie möglich und der durchschnittliche Nutzen so groß wie möglich sein. Deshalb wird der Lösungsansatz dahingehend erweitert, die Grenzkurven an die Mittelwerte von Aufwand und Nutzen adaptieren zu können.

Hierzu wird der auf die erzeugte Batterieenergie bezogene Durchschnittsaufwand \bar{A}_{LPAn} und Durchschnittsnutzen \bar{N}_{LPAn} verwendet. Es handelt sich um gleitende Mittelwerte mit applizierbarem Zeitfenster. Befindet sich der SOC in dem Bereich, der eine verbrauchsoptimierte Vorgabe der Grenzwerte vorsieht ($\text{SOC}_{\text{opt, min}} < \text{SOC} < \text{SOC}_{\text{opt, max}}$), erfolgt die Steuerung der Lastpunktverschiebung wie folgt:

- Eine Lastpunktanhebung wird mit der maximal möglichen Leistung durchgeführt, deren Aufwand kleiner oder gleich dem aktuellen Durchschnittsaufwand ist:

$$A_{\max} = \bar{A}_{\text{LPAn}} \Rightarrow A(P_{\text{EM, el, LPAn}}) \leq \bar{A}_{\text{LPAn}} \quad (5.13)$$

- Eine Lastpunktabsenkung wird mit der maximal möglichen Leistung durchgeführt, deren Nutzen größer oder gleich dem aktuellen Durchschnittsnutzen ist:

$$N_{\min} = \bar{N}_{\text{LPAn}} \Rightarrow N(P_{\text{EM, el, LPAb}}) \geq \bar{N}_{\text{LPAn}} \quad (5.14)$$

Um den Kraftstoffverbrauch zu minimieren, ist bei einer Lastpunktanhebung neben dem Aufwand auch zu berücksichtigen, wie effizient die erzeugte Energie später genutzt werden kann. Die Steuerung der Lastpunktverschiebung wird wie folgt erweitert:

- Eine Lastpunktanhebung wird nur dann durchgeführt, wenn der Aufwand kleiner als der Durchschnittsnutzen ist:

$$A(P_{\text{EM, el, LPAn}}) \leq \bar{A}_{\text{LPAn}} \wedge A(P_{\text{EM, el, LPAn}}) \leq \bar{N}_{\text{LPAn}} \quad (5.15)$$

- Eine Lastpunktabsenkung wird nur dann durchgeführt, wenn der Nutzen größer als der Durchschnittsaufwand ist:

$$N(P_{\text{EM, el, LPAb}}) \geq \bar{N}_{\text{LPAn}} \wedge N(P_{\text{EM, el, LPAb}}) \geq \bar{A}_{\text{LPAn}} \quad (5.16)$$

Optimierung

Ähnlich zur Gangwahl erfolgt der Großteil der Optimierung in einem Offlinealgorithmus, der Kennfelder mit der Stellgröße generiert. Ein Teil der Optimierung wird online im

Fahrzeug umgesetzt. Hierbei handelt es sich um die Adaption an die Bordnetzleistung und die Mittelwerte von Aufwand und Nutzen. Die Grenzkurven für Aufwand und Nutzen werden mit Hilfe einer Parametervariation erstellt.

Offlinealgorithmus Es wird ein Algorithmus entwickelt, der offline unter Berücksichtigung der Komponentenwirkungsgrade für einen definierten maximalen Aufwand und minimalen Nutzen verbrauchseffiziente E-Maschinenleistungen ermittelt. Er generiert Kennfelder gemäß der Gleichungen 5.10 und 5.11. Somit handelt es sich um dreidimensionale Kennfelder. Um die Bordnetzleistung bereits offline zu berücksichtigen, müsste eine vierte Dimension eingeführt werden. Dies erschwert die Handhabbarkeit der Funktion im Entwicklungsprozess, beispielsweise bzgl. der Applikation der Daten. Deshalb wird die Bordnetzleistung nicht offline sondern online im Fahrzeug berücksichtigt. In dem Offlinealgorithmus sind daher Aufwand und Nutzen ohne die Bordnetzleistung wie folgt definiert:

$$A_{\text{LPAn, Offline}} = \frac{\dot{m}_{\text{LPAn}} - \dot{m}_{\text{Bas}}}{|P_{\text{EM, el}}| \eta_{\text{HV-Bat, lad}}} \quad (5.17)$$

$$N_{\text{LPAb, Offline}} = \left| \frac{(\dot{m}_{\text{LPAb}} - \dot{m}_{\text{Bas}}) \eta_{\text{HV-Bat, entlad}}}{P_{\text{EM, el}}} \right| \quad (5.18)$$

Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über die Modellierung der Komponenten in dem Offlinealgorithmus. Die Modellierung enthält folgende Vereinfachungen: Die Abhängigkeit der Wirkungsgrade von der Temperatur wird auch in diesem Fall nicht berücksichtigt. Dies beruht auf der Anforderung, dass sich das Lade- und Entladeverhalten sowie der resultierende SOC nicht temperaturbedingt verändern dürfen. Sollte z. B. die Temperatur der Komponenten trotz aktiver Kühlung über die normale Betriebstemperatur ansteigen, so ist weiterhin ausreichend Energie für elektrisches Fahren und das Bordnetz bereitzustellen. Außerdem wurde in Abschnitt 5.2.1 gezeigt, dass die Verlustleistungen der Batterie im genutzten SOC-Bereich eine sehr geringe Abhängigkeit vom Ladezustand aufweisen. Deshalb wird erneut in dem Algorithmus ein konstanter SOC von 60 % genutzt.

Der Algorithmus führt alle Berechnungen in Matrizen aus, die in Abhängigkeit von Getriebeeingangsmoment und -drehzahl alle anfahrbaren Betriebspunkte vorgeben. Es werden Iterationen über vorab definierte maximale Aufwände bzw. minimale Nutzen und alle zulässigen E-Maschinenleistungen durchgeführt.

Zu Beginn der Berechnung wird festgelegt, ob die Leistungen für eine Lastpunktanhebung oder -absenkung berechnet werden sollen. Es werden die zu untersuchenden Wertebereiche und Schrittweiten der elektrischen E-Maschinenleistungen sowie des maximal zulässigen Ladeaufwands bzw. minimal geforderten Entladenutzens vorgegeben.

Komponente	Modellierung
Elektrische Maschine	Relatives Verlustleistungskennfeld in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment inklusive Leistungselektronik, Schleppverluste der Maschine werden abgezogen, da sie bereits im Basisbetriebspunkt enthalten sind
Trennkupplung	Geschlossen, Entfall Schleppmoment
Verbrennungsmotor	Kennfeld des Kraftstoffmassenstroms in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment
Hochvoltbatterie	Aus Batteriemodell generiertes Kennfeld der Lade- bzw. Entladeverlustleistungen in Abhängigkeit von SOC und Lade- bzw. Entladeleistung

Tab. 5.2: Modellierung der Komponenten in dem Offlinealgorithmus zur Berechnung der verbrauchsoptimierten Lade- und Entladeleistungen.

Es ist möglich, akustische Limitierungen der Ladeleistung in Form von maximal zulässigen Lademomenten in Abhängigkeit von der Drehzahl festzulegen. Schließlich werden die Achsen (Wertebereich und Skalierung) für Getriebeeingangsdrehzahl und -moment vorgegeben. Hierbei sind die vom Verbrennungsmotor darstellbaren Betriebspunkte entscheidend. Anhand der Achsen wird für jede Drehzahl-/Drehmomentenkombination die Antriebsleistung berechnet. Daraufhin bestimmt der Algorithmus das Moment des Verbrennungsmotors ohne Lastpunktverschiebung. Daraus lässt sich ein maximal zulässiges Entlade- bzw. Lademoment ableiten.

Im weiteren Verlauf des Algorithmus werden die Berechnungen für jeden Aufwand bzw. Nutzen separat durchgeführt. Zusätzlich erfolgen die Berechnungen einzeln je elektrischer E-Maschinenleistung. Zunächst werden die aus der aktuellen Leistung resultierenden mechanischen E-Maschinenmomente ermittelt und anhand der Vollastkurven begrenzt. Im Anschluss erfolgt der Abgleich mit dem maximal zulässigen Lade- bzw. Entlademoment. Daraus lässt sich das insgesamt vom Verbrennungsmotor während einer Lastpunktanhebung bzw. -absenkung aufzubringende Moment ableiten. Schließlich erfolgt die Berechnung der in der Batterie ankommenden bzw. der Batterie entnommenen elektrischen Leistung.

Abschließend berechnet der Algorithmus den Kraftstoffmassenstrom des Verbrennungsmotors mit und ohne Lastpunktverschiebung. Daraus wird in Verbindung mit der berechneten Speicherleistung anhand von Formel 5.17 bzw. 5.18 der Ladeaufwand bzw. Entladenutzen ermittelt. Diese werden mit dem in der aktuellen Schleife maximal zulässigen Aufwand bzw. minimal geforderten Nutzen verglichen. Falls die Bedingungen 5.10 bzw. 5.11 erfüllt sind, wird die aktuelle elektrische Leistung der E-Maschine in den zugehörigen Betriebspunkten der Ergebnismatrizen abgelegt. Da die E-Maschinenleistung je Iteration zunimmt, können die vorangegangenen Leistun-

gen überschrieben werden. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die betragsmäßig größte Leistung ermittelt wird, die mit dem aktuell geforderten Aufwand bzw. Nutzen darstellbar ist.

Onlineberechnung Der Lösungsansatz basiert auf offline erzeugten Daten sowie Berechnungen, die online im Steuergerät des Fahrzeugs durchgeführt werden. Abbildung 5.9 stellt die Architektur beispielhaft für die Lastpunktanhebung dar. Der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Algorithmus generiert Kennfelder zur Vorgabe der Ladeleistung. Sie sind in der Funktion „Ladeleistung & benötigter Aufwand“ hinterlegt. Sie berücksichtigen den aktuellen Betriebspunkt sowie den maximal zulässigen Aufwand. Außerdem wird in dem Block der Aufwand berechnet, der bei einer Umsetzung der optimierten Ladeleistung in der gegenwärtigen Fahrsituation zu erwarten ist. Die Funktion „Aufwand & Nutzen“ gibt in Abhängigkeit vom SOC mittels der hinterlegten Grenzkurven (vgl. Abbildung 5.8) den maximalen Aufwand vor. Darüber hinaus berechnet sie anhand des Moments und der Drehzahl am Getriebeeingang, der Lade- und Entladeleistungen der Batterie sowie der Bordnetzleistung den Durchschnittsaufwand aller Lastpunktanhebungen. Zudem ermittelt sie den Durchschnittsnutzen aus der erzeugten Energie durch elektrisches Fahren und Lastpunktabsenkung. Da

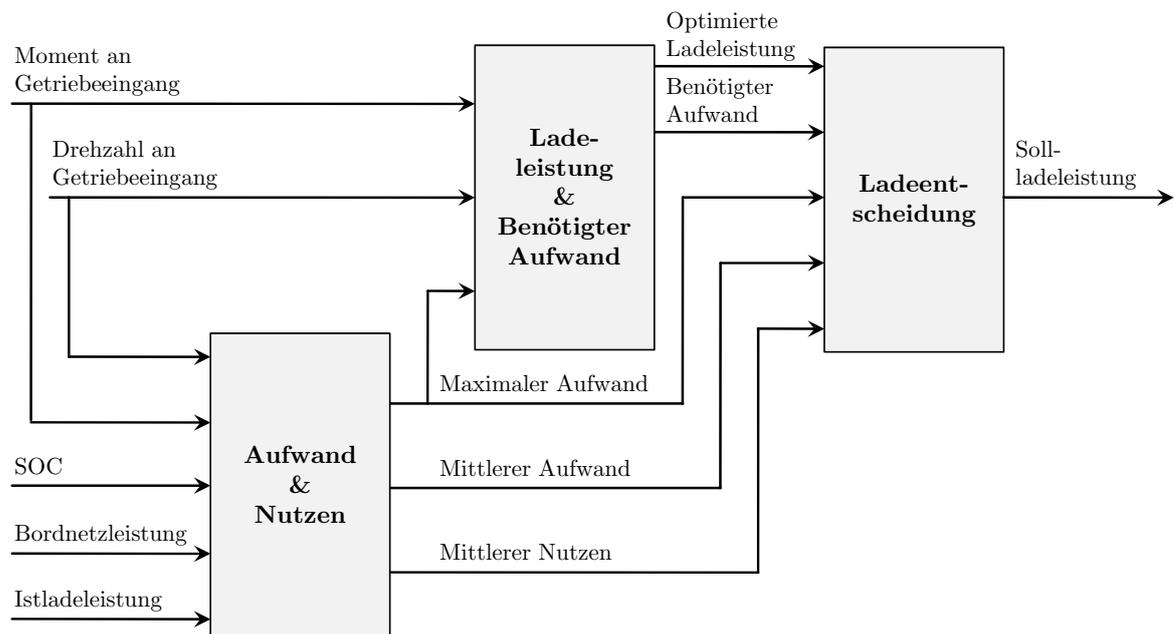


Abb. 5.9: Lösungsansatz des verbrauchsoptimierten Ladezustandsmanagements beispielhaft für das Laden: Die Ladeleistung wird in Abhängigkeit von Moment und Drehzahl am Getriebeeingang sowie des maximal zulässigen Ladeaufwands ermittelt.

in der Offlineberechnung die Bordnetzleistung P_{BN} nicht berücksichtigt wird, erfolgt in der Funktion eine Adaption des maximalen Aufwands und minimalen Nutzens. Hierzu werden zunächst die Faktoren $F_{\text{LPAn, BN}}$ und $F_{\text{LPAb, BN}}$ definiert. Diese dienen der Umrechnung von Aufwand und Nutzen aus der Offlineberechnung (Gleichungen 5.17 und 5.18) in die realen Werte (Gleichungen 5.7 und 5.8):

$$A_{\text{LPAn}} = F_{\text{LPAn, BN}} A_{\text{LPAn, Offline}} \quad (5.19)$$

$$N_{\text{LPAb}} = F_{\text{LPAb, BN}} N_{\text{LPAb, Offline}} \quad (5.20)$$

Daraus ergeben sich folgenden Faktoren:

$$F_{\text{LPAn, BN}} = \frac{|P_{\text{EM, el}}| \eta_{\text{HV-Bat, lad}}}{|P_{\text{EM, el}}| \eta_{\text{HV-Bat, lad}} + P_{\text{BN}}(1 - \eta_{\text{HV-Bat, lad}})} \quad (5.21)$$

$$F_{\text{LPAb, BN}} = \frac{P_{\text{EM, el}}}{P_{\text{EM, el}} + P_{\text{BN}}(1 - \eta_{\text{HV-Bat, entlad}})} \quad (5.22)$$

Mit Hilfe der Faktoren können Deltawerte für den maximalen Aufwand $\Delta A_{\text{max, ES}}$ und minimalen Nutzen $\Delta N_{\text{min, ES}}$ berechnet werden. Diese passen A_{max} und N_{min} an den aktuellen Wert von P_{BN} an, falls $|P_{\text{EM, el}}| > |P_{\text{BN}}|$:

$$\Delta A_{\text{max, BN}} = \frac{\dot{m}_{\text{LPAn}} - \dot{m}_{\text{Bas}}}{P_{\text{EM, el}} \eta_{\text{HV-Bat, lad}}} (1 - F_{\text{LPAn, BN}}) \quad (5.23)$$

$$\Delta N_{\text{min, BN}} = \left| \frac{(\dot{m}_{\text{LPAb}} - \dot{m}_{\text{Bas}}) \eta_{\text{HV-Bat, entlad}}}{P_{\text{EM, el}}} \right| (F_{\text{LPAb, BN}} - 1) \quad (5.24)$$

In der Funktion „Ladeentscheidung“ werden Aufwand und Nutzen schließlich abgeglichen. Es wird überprüft, ob der erwartete Aufwand kleiner als der mittlere Aufwand und Nutzen ist (siehe Gleichung 5.15). Falls die Bedingung erfüllt ist, wird das Laden zugelassen und die E-Maschinenleistung ausgegeben.

Parametervariation Der Lösungsansatz des Ladezustandsmanagements basiert auf Kennfeldern, die in Abhängigkeit von Getriebeeingangsmoment und -drehzahl sowie des maximalen Aufwands bzw. minimalen Nutzens optimierte Lade- bzw. Entladeleistungen vorgeben. Die vorangegangenen Abschnitte beschreiben den Offlinealgorithmus zur Generierung dieser Kennfelder. Außerdem werden Funktionen vorgestellt, die online im Fahrzeug den maximalen Aufwand bzw. minimalen Nutzen an die Bordnetzlast adaptieren sowie die Mittelwerte der Grenzwerte berechnen. Abschließend wird nun die Erstellung der Grenzkurven für den maximalen Aufwand und minimalen Nutzen (vgl. Abbildung 5.8) erläutert. Die Steuertrajektorien legen die Effizienz des Ladens

und Entladens fest. Sie beeinflussen maßgeblich die erreichbaren Verbrauchseinsparpotenziale. Zudem bestimmen sie den Ladezustand der Batterie. Deshalb erfolgt eine erste Applikation der Grenzkurven auf der Basis einer Parametervariation (vgl. auch [41]).

Wie in den vorangegangenen Abschnitten erläutert wurde, sind die Werte für Aufwand und Nutzen anhand des gewünschten Lade- und Entladeverhaltens in Abhängigkeit vom SOC vorgegeben (vgl. Abbildung 5.8). Abbildung 5.10 stellt die Freiheitsgrade der Grenzkurven dar. Der Aufwand und Nutzen für die Randbereiche der Grenzkurven ($SOC < SOC_{LPAn, \min}$, $SOC < SOC_{LPAb, \min}$, $SOC > SOC_{LPAn, \max}$, $SOC > SOC_{LPAb, \max}$) kann in dem Offlinealgorithmus ermittelt werden. Hierzu wird der maximal zulässige Aufwand solange erhöht bzw. verringert, bis in allen Betriebspunkten maximal bzw. nicht geladen wird. Die Bestimmung des Nutzens in den Randbereichen erfolgt äquivalent. Im Optimalbereich ($SOC_{LPAn, \text{opt}, \min} < SOC < SOC_{LPAn, \text{opt}, \max}$ bzw. $SOC_{LPAb, \text{opt}, \min} < SOC < SOC_{LPAb, \text{opt}, \max}$) besteht die Möglichkeit, den mittleren Ladeaufwand bzw. Entladenutzen als Grenzwert zu verwenden (vgl. Gleichungen 5.15 und 5.16). Es sind jedoch Initialwerte der Grenzkurven im Optimalbereich nötig. Diese werden in der Parametervariation verändert, ebenso wie die Aufwände

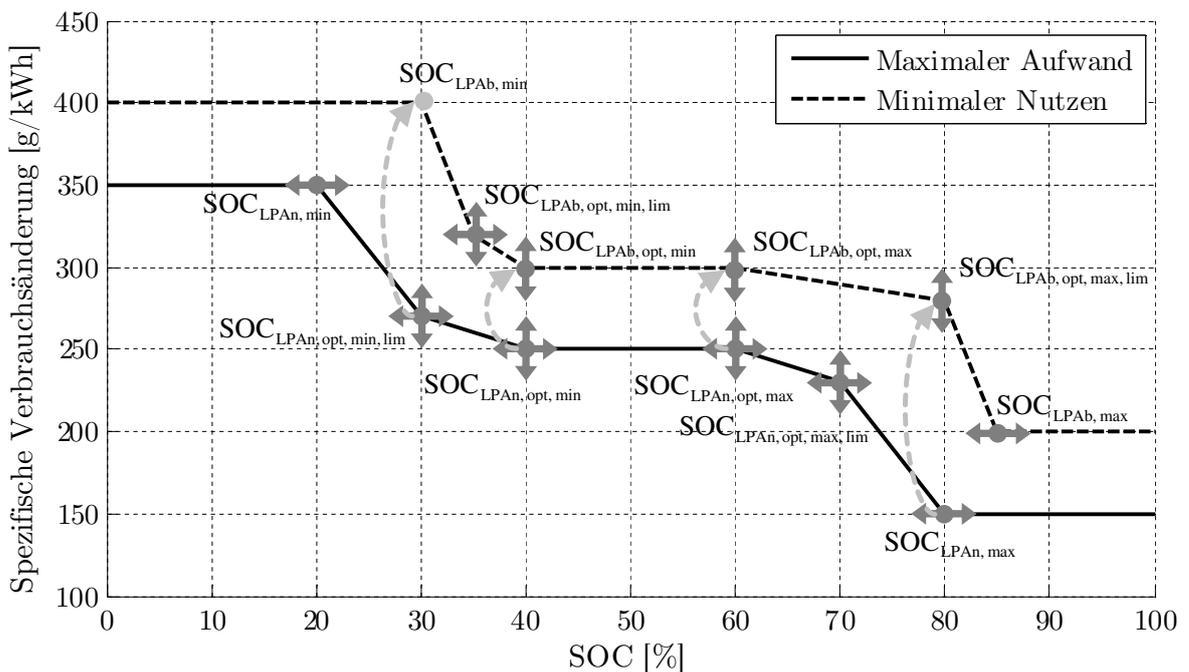


Abb. 5.10: Freiheitsgrade der Parametervariation: Die SOC-Stützstellen der Nutzenkurve werden größtenteils aus der Aufwandkurve abgeleitet, Aufwand und Nutzen für minimalen und maximalen SOC werden in dem Offlinealgorithmus bestimmt.

bzw. Nutzen bei $\text{SOC}_{\text{LPAn, opt, min, lim}}$ und $\text{SOC}_{\text{LPAn, opt, max, lim}}$ bzw. $\text{SOC}_{\text{LPAb, opt, min, lim}}$ und $\text{SOC}_{\text{LPAb, opt, max, lim}}$.

Alle SOC-Stützstellen der Trajektorie des maximalen Aufwands können variiert werden. Die SOC-Stützstellen der Grenzkurve für den minimalen Nutzen werden aus der Trajektorie für den maximalen Aufwand abgeleitet. Auf diese Weise ist es möglich, eine Hysterese zwischen Lastpunktanhebung und -absenkung umzusetzen. Abbildung 5.10 zeigt, dass hierzu von den sechs relevanten Stützstellen der Nutzen-Kurve vier aus der Aufwand-Kurve abgeleitet werden. Der Optimalbereich wird identisch gewählt. Da bereits bei $\text{SOC}_{\text{LPAn, opt, min, lim}}$ mehr Laden zugelassen werden muss, ist ab diesem SOC kein Entladen erwünscht. Deshalb wird $\text{SOC}_{\text{LPAb, min}}$ an die gleiche Stelle gelegt. Dem entsprechend wird bei dem SOC, ab dem kein Laden mehr zulässig ist, bereits mehr Entladen ermöglicht. D. h. $\text{SOC}_{\text{LPAn, max}}$ legt $\text{SOC}_{\text{LPAb, opt, max, lim}}$ fest.

Um die Anzahl der zu untersuchenden Parametervariationen weiter zu reduzieren, werden die Wertebereiche der jeweiligen Freiheitsgrade analysiert und eingeschränkt. Zunächst wird der Einfluss der Grenzwerte von Aufwand und Nutzen auf das Zeitverhalten und die Regelgüte untersucht. In Simulationen (vgl. Abschnitt 5.3.1) werden hierzu konstante Werte anstelle der Grenzkurven vorgegeben. Die Bewertung der Werte erfolgt anhand der SOC-Abweichung zwischen Anfang und Ende des Fahrzyklus. Um auch die verschieden langen Zyklen NEFZ und FTP-72 vergleichen zu können, wird die Abweichung auf die Zyklusdauer bezogen:

$$\Delta \text{SOC}_{\text{Zyklus, Rel}} = \frac{\text{SOC}_{\text{Ende}} - \text{SOC}_{\text{Start}}}{t_{\text{Zyklus}}} \quad (5.25)$$

Da in den Zyklen keine Lastpunktabsenkungen auftreten, wird nur der Einfluss des maximalen Aufwands untersucht. Bis zu einem Aufwand von 180 g/kWh wird in beiden Zyklen nicht geladen (vgl. Abbildung A.4 auf Seite 151). Somit sinkt der SOC aufgrund des Energiebedarfs für das elektrische Fahren und das Bordnetz. Im FTP-72 ermöglicht ein Aufwand von 220 g/kWh SOC-Neutralität, im NEFZ ein Aufwand von 250 g/kWh. Aufgrund dieser Voruntersuchungen wird für die Startwerte der Mittelwertberechnung im Optimalbereich des SOC in der Parametervariation der Wertebereich von 240 bis 260 g/kWh für den maximalen Aufwand vorgegeben. Es ist hierbei nötig, die Werte am NEFZ auszurichten. Das geringe Aufwandsniveau des FTP-72 könnte keine SOC-Neutralität im NEFZ gewährleisten. Der Wertebereich des minimalen Nutzens wird auf Basis des Nutzens von elektrischem Fahren festgelegt, da Lastpunktabsenkungen in den untersuchten Fahrzyklen nicht auftreten. Zudem sind Lastpunktabsenkungen energetisch nur sinnvoll, wenn sie einen größeren Nutzen erzielen als durchschnittlich das elektrische Fahren. Mit der im untersuchten Antrieb implementierten Entscheidungslogik für elektrisches Fahren kann im NEFZ ein durchschnittlicher Nutzen von 332 g/kWh erreicht werden, im FTP-72 von 312 g/kWh. In der Parametervariation wird darum ein Bereich von 280 bis 340 g/kWh betrachtet.

Im Folgenden werden die Wertebereiche für die SOC-Stützstellen der Grenzkurven ermittelt. Der optimale SOC-Bereich ergibt sich aus der im gesamten Fahrzyklus nötigen Bedarfsenergie (elektrisches Fahren, Bordnetzversorgung und Lastpunktabsenkung) sowie der gewonnenen Rekuperationsenergie. Stünde in einem Zyklus ausschließlich Rekuperationsenergie zur Verfügung, so wäre ein relativer Start-SOC von 0 optimal. Für den Fall, dass nur Energie verbraucht wird, wäre ein relativer Start-SOC von 1 optimal. In realen Fahrzyklen muss der Wert einen Kompromiss aus Rekuperationsvorhalt und der Verfügbarkeit des elektrischen Fahrens darstellen:

$$\text{SOC}_{\text{rel,opt}} = \frac{\sum E_{\text{eFahr}} + \sum E_{\text{LPAb}} + \sum E_{\text{Bordnetz}}}{\sum E_{\text{eFahr}} + \sum E_{\text{LPAb}} + \sum E_{\text{Bordnetz}} + |\sum E_{\text{Reku}}|} \quad (5.26)$$

Für den untersuchten Antriebsstrang resultiert daraus ein Startwert des relativen SOC von 0.68 im NEFZ und 0.61 im FTP-72. Das Ladezustandsmanagement sollte ausreichendes Laden sicherstellen, um diese Werte erreichen zu können.

Um die Wertebereiche für die SOC-Vorhalte ($\text{SOC}_{\text{LPAn,min}}$ bzgl. elektrischem Fahren und $\text{SOC}_{\text{LPAb,max}}$ bzgl. Rekuperation) zu ermitteln, wird die Änderung des relativen SOC in Phasen mit ausgeschaltetem Verbrennungsmotor im NEFZ und FTP-72 untersucht. Abbildung 5.11 zeigt für jeden dieser Zeitbereiche die positiven und negativen SOC-Änderungen aufgrund von elektrischem Fahren, Bordnetzversorgung oder Rekuperation. Zusätzlich ist die resultierende Gesamtänderung dargestellt. Die Werte beziehen sich auf den relativen SOC zu Beginn des jeweiligen Zeitbereichs. In diesen Phasen ist in der Regel kein Laden oder Entladen mittels Lastpunktverschiebungen möglich. Somit müssen die SOC-Änderungen durch Vorhalte in den Grenzkurven abgefangen werden. Es zeigt sich, dass die Mehrzahl der Änderungen kleiner als 0.05 Prozentpunkte ist. Es treten jedoch auch Änderungen um bis zu 0.17 Prozentpunkte im NEFZ und -0.2 Prozentpunkte im FTP-72 auf. Diese sind ebenso wie eine mögliche Abfolge von SOC-Änderungen in den Vorhalten zu berücksichtigen.

Neben den SOC-Änderungen in den beiden Fahrzyklen wird auch der SOC-Verlauf in weiteren Fahrsituationen analysiert. Hinsichtlich des elektrischen Fahrens werden in dem in Abschnitt 5.3.1 vorgestellten Simulationsmodell Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit simuliert. Eine vierminütige Konstantfahrt mit 30 km/h verringert den relativen SOC bereits um 0.3 Prozentpunkte. Für 3 min mit 50 km/h sind 0.45 Prozentpunkte nötig. In Bezug auf die Rekuperation werden konstante Verzögerungen in der Ebene bis zum Stillstand und Bergabfahrten mit gleich bleibender Geschwindigkeit und Steigung untersucht. Alltägliche Fahrsituationen sowie kurze Bergabfahrten können mit einem Vorhalt von 0.1 Prozentpunkten abgedeckt werden. Vorhalte für lange Bergabfahrten werden in der Funktionsarchitektur durch die Situationsprädiktion geschaffen und müssen daher nicht dauerhaft in den Grenzkurven berücksichtigt werden.

Tabelle 5.3 fasst die Wertebereiche der Optimierungsparameter zusammen. Eine automatisierte Parametervariation generiert daraus verbrauchseffiziente Parametersätze.

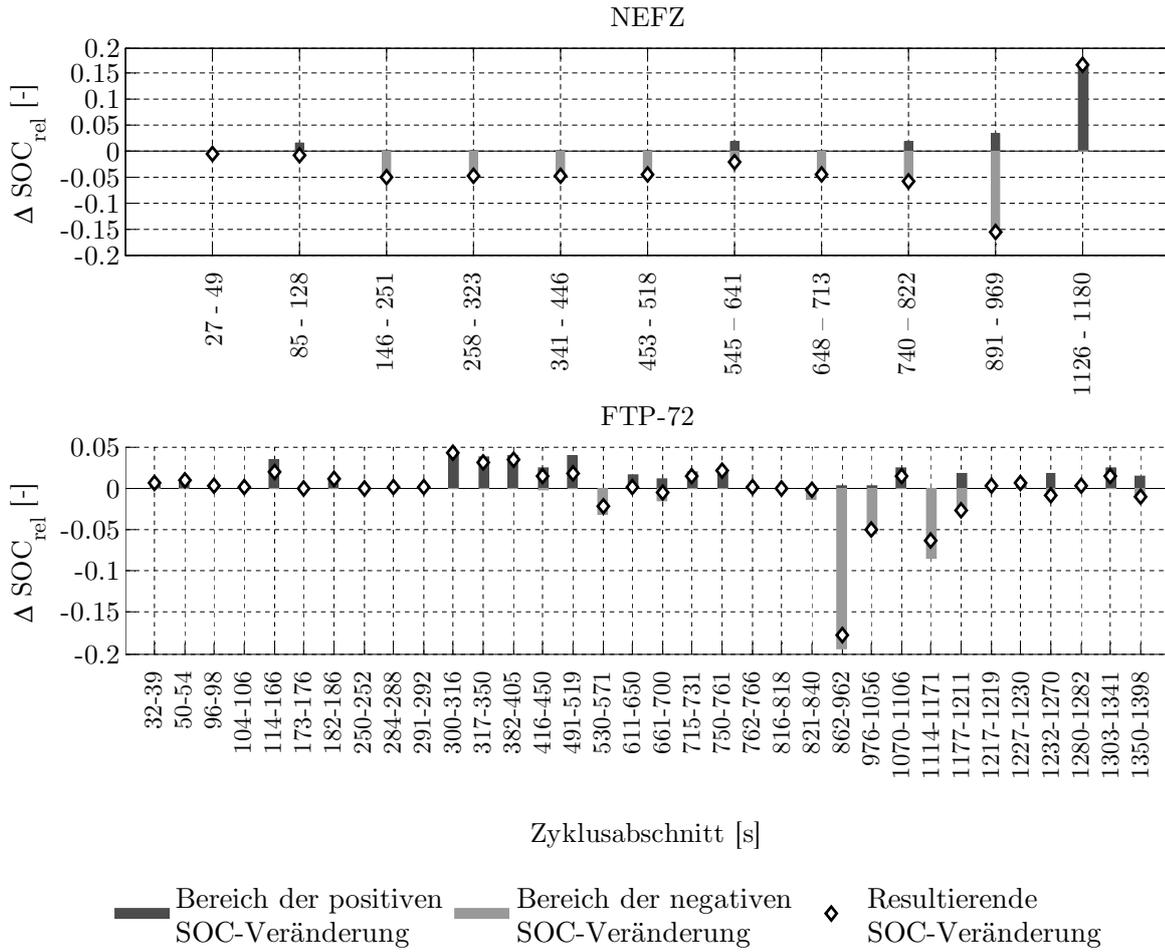


Abb. 5.11: Veränderungen des relativen SOC im NEFZ und FTP-72 in Phasen mit ausgeschaltetem Verbrennungsmotor: Es treten Veränderungen von bis zu 0.2 Prozentpunkten auf.

Um die SOC-Neutralität sicherzustellen, wird der Start-SOC jeder Simulation an den End-SOC angepasst. Als Bewertungskriterium dient der Kraftstoffverbrauch im Fahrzyklus.

Parameter	Wert bzw. Wertebereich	Erläuterung
$SOC_{rel, LPAn, min}$	0.5	Vorhalt für elektrisches Fahren
$A_{max}(SOC_{rel, LPAn, min})$	380 g/kWh	Laden in allen Betriebspunkten
$SOC_{rel, LPAn, max}$	0.95	Vorhalt für Rekuperation
$A_{max}(SOC_{rel, LPAn, max})$	180 g/kWh	Kein Laden in allen Betriebspunkten
$SOC_{rel, LPAn, opt, min}$	0.6-0.7	Bereich um optimalen SOC
$SOC_{rel, LPAn, opt, max}$	0.7-0.9	Bereich um optimalen SOC
$A_{max}(SOC_{rel, LPAn, opt, min}),$ $A_{max}(SOC_{rel, LPAn, opt, max})$	240-260 g/kWh	Minimaler Verbrauch, SOC-Neutralität
$SOC_{rel, LPAn, opt, min, lim}$	0.5-0.6	Übergangsbereich
$SOC_{rel, LPAn, opt, max, lim}$	0.8-0.9	Übergangsbereich
$A_{max}(SOC_{rel, LPAn, opt, min, lim})$	250-270 g/kWh	Übergangsbereich
$A_{max}(SOC_{rel, LPAn, opt, max, lim})$	230-250 g/kWh	Übergangsbereich
$N_{min}(SOC_{rel, LPAb, min})$	320 g/kWh	Kein Entladen in allen Betriebspunkten
$N_{min}(SOC_{rel, LPAb, max})$	150 g/kWh	Entladen in allen Betriebspunkten
$N_{min}(SOC_{rel, LPAb, opt, min}),$ $N_{min}(SOC_{rel, LPAb, opt, max})$	270-340 g/kWh	Bereich um Durchschnittsnutzen von elektrischem Fahren

Tab. 5.3: Variablen und zugehörige Wertebereiche der Parametervariation zur Ermittlung verbrauchseffizienter Grenzkurven für den maximalen Ladeaufwand und minimalen Entladenutzen.

Ergebnisse der Offlineberechnungen

Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse des Offlinealgorithmus und der Parametervariation vor.

Offlinealgorithmus Der Algorithmus generiert Kennfelder, die für Lastpunktanhebungen in Abhängigkeit von Getriebeeingangsmoment und -drehzahl sowie des maximal zulässigen Aufwands die elektrische E-Maschinenleistung vorgeben (vgl. Gleichung 5.10 auf Seite 61). Im Falle der Lastpunktabsenkung handelt es sich um Leistungskennfelder je minimal gefordertem Nutzen (vgl. Gleichung 5.11). Zunächst werden die Kennfelder für die Lastpunktanhebung vorgestellt. Abbildung 5.12 zeigt die berechnete E-Maschinenleistung für einen maximal zulässigen Aufwand von 220 g/kWh. Unter dieser Bedingung ist das Laden vorwiegend in Bereichen mit niedrigen Getriebeeingangsmomenten möglich. Dort weist der Verbrennungsmotor einen sehr geringen Wirkungsgrad auf (vgl. Abbildung 2.7 auf Seite 18). Durch die Anhebung des Lastpunktes kann seine Effizienz erhöht werden. Die Ladeleistung nimmt mit der Getriebeeingangsdrehzahl ab. Dies resultiert zum einen aus der Volllast des Verbrennungsmotors. Durch das Moment der Lastpunktanhebung darf in Verbindung mit dem aktuellen Getriebeeingangsmoment das maximal darstellbare Moment nicht überschritten werden. Zum anderen weist die

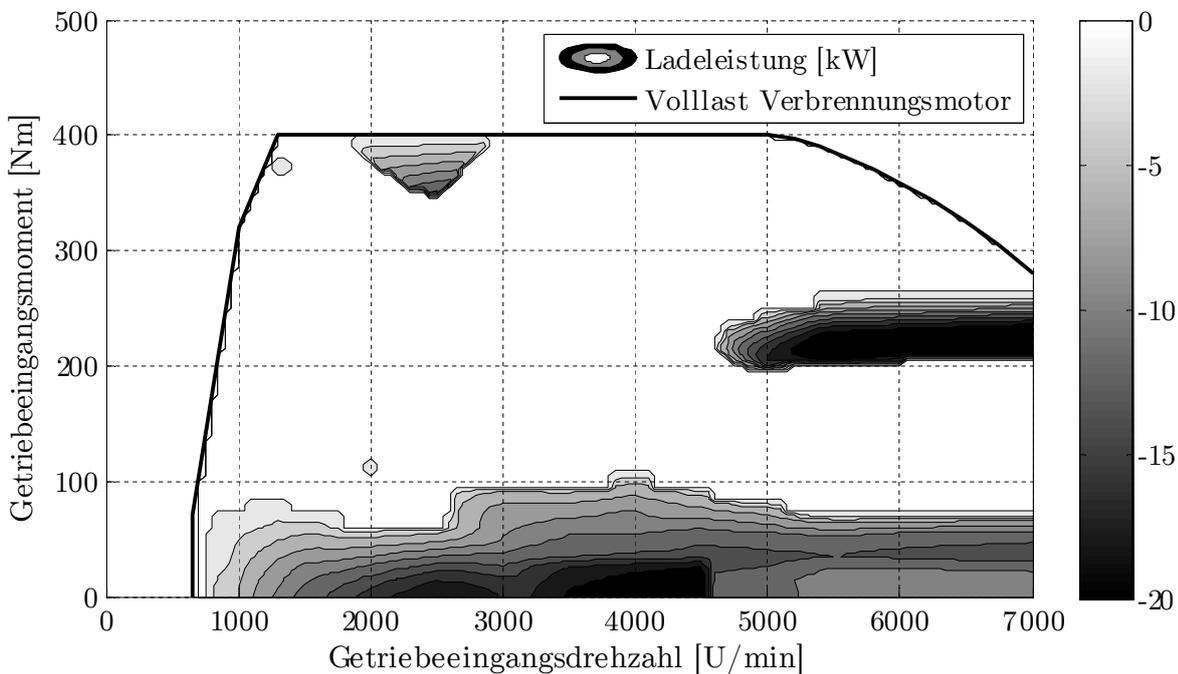


Abb. 5.12: Optimierte Ladeleistung bei einem zulässigen Aufwand von 220 g/kWh: Das Laden ist in drei Kennfeldbereichen möglich. Im Fahrbetrieb relevant ist der Bereich mit geringen Getriebeeingangsmomenten.

E-Maschine bei geringen Drehzahlen sehr schlechte Wirkungsgrade auf (vgl. Abbildung 2.8). Somit könnte durch eine Lastpunktanhebung der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors zwar erhöht werden. Der trotzdem verursachte Mehrverbrauch würde jedoch nur eine geringe Ladeleistung der Batterie bewirken. Außerdem zeigt das Kennfeld, dass der Algorithmus zwischen 2000 und 3000 U/min auch nahe der Volllast Ladeleistungen ermittelt. Die Ursache liegt in der Verteilung der wirkungsgradoptimalen Betriebspunkte des untersuchten Verbrennungsmotors. Sie liegen in diesem Drehzahlbereich zum einen bei einem Moment von 300 Nm zum anderen aber auch an der Volllast bei 400 Nm. Deshalb werden die Lastpunkte im dazwischenliegenden Bereich erhöht. Schließlich enthält das Kennfeld einen dritten Bereich für Lastpunktanhebungen. Er liegt in etwa zwischen 200 und 250 Nm bei einer Drehzahl von größer als 4500 U/min. In diesem erreicht die E-Maschine ihren besten Wirkungsgrad. Es ist jedoch anzumerken, dass in dem vorliegenden Kennfeld des Verbrennungsmotors der Kraftstoffmassenstrom ab einer Drehzahl von 5500 U/min nicht gemessen sondern extrapoliert wurde. Dies hat keinen Einfluss auf die Analyse der Verbrauchspotenziale, da dieser Drehzahlbereich im Fahrbetrieb sehr selten und in gesetzlichen Fahrzyklen niemals auftritt.

In Abbildung 5.13 sind die Ladeleistungen der E-Maschine für einen maximalen Aufwand von 250 g/kWh dargestellt. Durch den erhöhten Aufwand sind insbesondere im mittleren

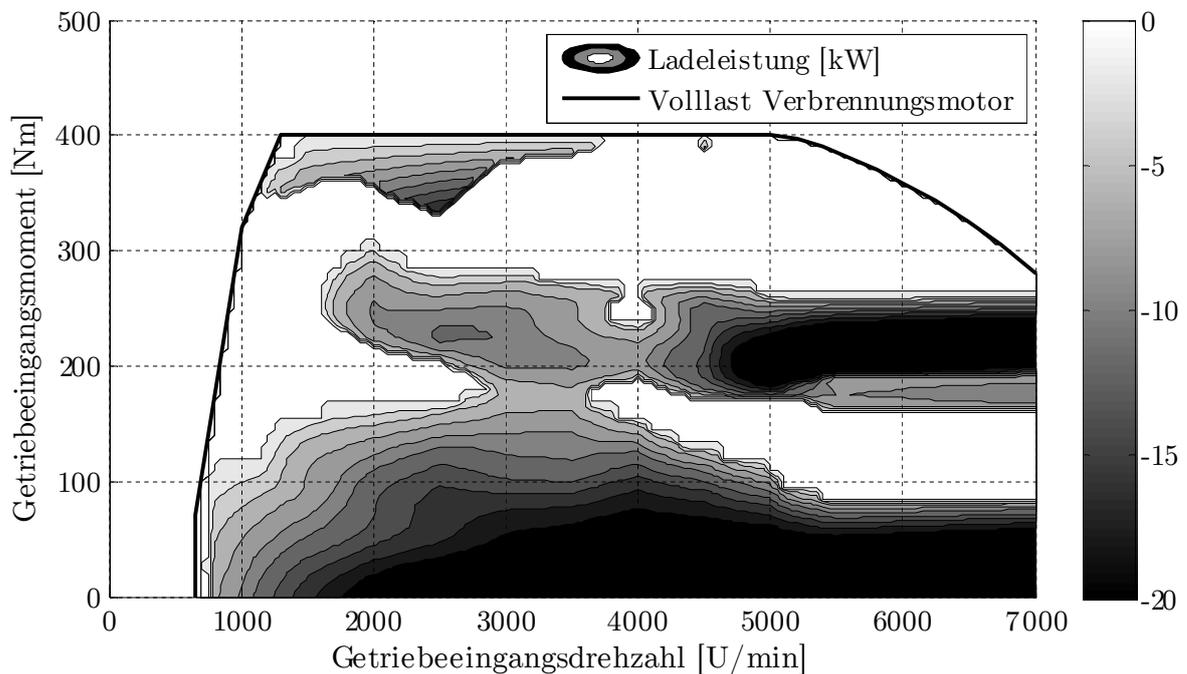


Abb. 5.13: Optimierte Ladeleistung bei einem zulässigen Aufwand von 250 g/kWh: Im Vergleich zu dem Kennfeld mit 220 g/kWh sind insbesondere im mittleren Kennfeldbereich deutlich mehr Betriebspunkte für eine Lastpunktanhebung geeignet.

Kennfeldbereich deutlich mehr Betriebspunkte für eine Lastpunktanhebung geeignet. Dort wird die Last des Verbrennungsmotors in Richtung Bestpunkt verschoben. Auch in dem für Fahrzyklen relevanten Bereich mit Drehzahlen kleiner als 2000 U/min sowie Momenten kleiner als 200 Nm wird nun häufiger und mehr geladen. Abbildung A.3 (siehe Seite 150) zeigt das Kennfeld für einen maximalen Ladeaufwand von 280 g/kWh. In diesem Fall werden in einem Großteil der Betriebspunkte Ladeleistungen vorgegeben. So wird beispielsweise beinahe im gesamten für Fahrzyklen relevanten Bereich geladen, die Ladeleistungen variieren jedoch auch in diesem Fall in Abhängigkeit vom Betriebspunkt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Lastpunktabsenkung vorgestellt. In Abbildung 5.14 sind die Entladeleistungen der E-Maschine für den minimal geforderten Nutzen von 260 g/kWh dargestellt. Der Großteil der Lastpunktabsenkung des Verbrennungsmotors erfüllt nur ab ca. 2500 U/min und 260 Nm die Effizienzbedingung. Außerdem enthält das Kennfeld Entladeleistungen ab ca. 4500 U/min sowie zwischen 100 und 160 Nm. In diesem Bereich erreicht die E-Maschine sehr gute Wirkungsgrade (vgl. Abbildung 2.8), während der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors nur eine sehr geringe Abhängigkeit von der Last aufweist. In diesem Fall ist jedoch erneut die Extrapolation des Kraftstoffmassenstromkennfeldes des Verbrennungsmotors oberhalb von 5500 U/min zu berücksichtigen.

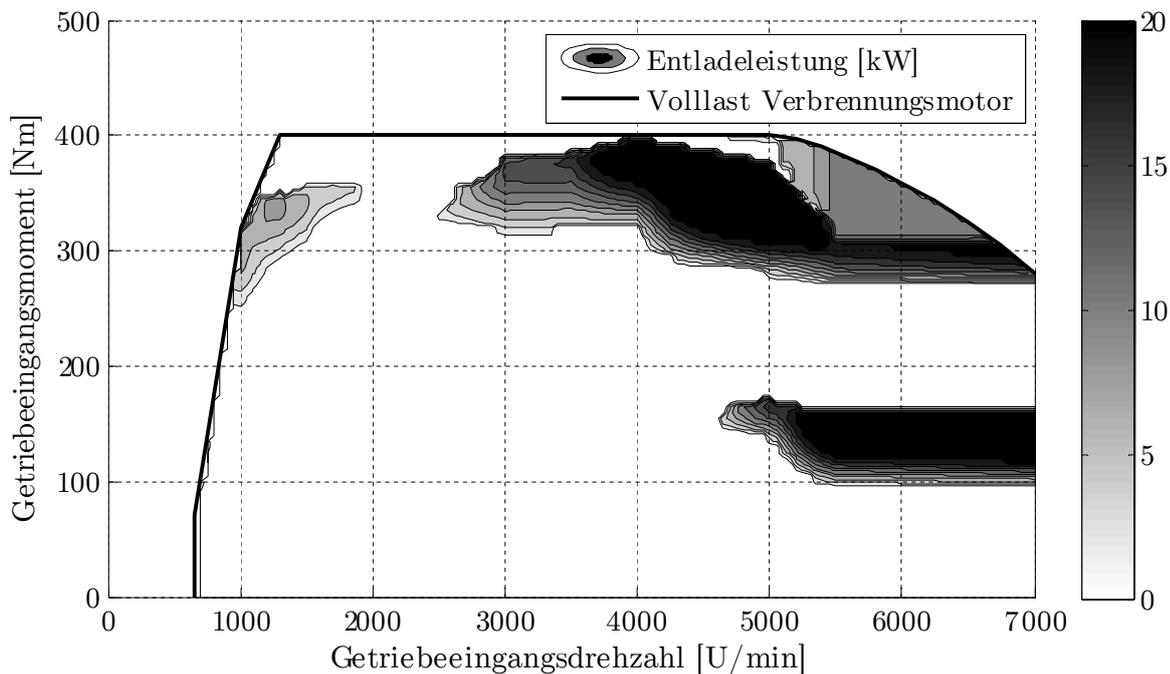


Abb. 5.14: Optimierte Entladeleistung bei einem geforderten Nutzen von 260 g/kWh: Das Entladen ist in drei Kennfeldbereichen möglich. Der Großteil der Betriebspunkte befindet sich bei hohen Drehzahlen.

Abbildung 5.15 zeigt, dass sich mit der Verringerung des Nutzes auf 210 g/kWh die Bereiche für Lastpunktabsenkungen deutlich ausweiten. Im unteren Teil des Kennfelds erfolgt kein Entladen, da dadurch der Lastpunkt des Verbrennungsmotors in die Bereiche des sehr schlechten Wirkungsgrades verschoben werden würde. Außerdem wird das Gebiet um die Bestpunkte des Verbrennungsmotors bei ca. 300 Nm und 400 Nm ausgespart.

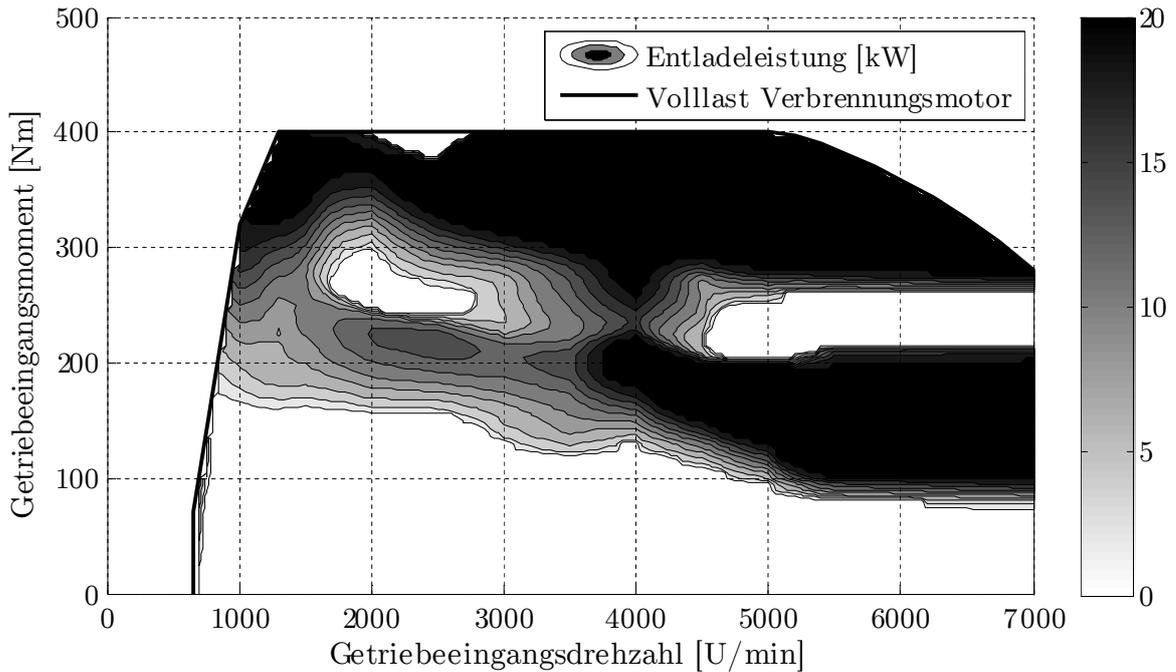


Abb. 5.15: Optimierte Entladeleistung bei einem geforderten Nutzen von 210 g/kWh: Im unteren Kennfeldbereich und dem Gebiet mit sehr hohem Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors wird nicht entladen.

Parametervariation Während im FTP-72 64% der Batterieenergie durch Rekuperation erzeugt wird, deckt sie im NEFZ lediglich 45% ab. Somit müssen die Grenzkurven den erhöhten Ladebedarf im NEFZ sicherstellen, weshalb die Optimierungsergebnisse des NEFZ für beide Zyklen verwendet werden. Abbildung 5.16 zeigt die in der Parametervariation ermittelten Steuertrajektorien des maximalen Aufwands und des minimalen Nutzens für den NEFZ. Sie zeichnen sich durch einen großen Optimalbereich aus. Das Plateau des relativen SOC liegt zwischen 0.62 und 0.83, der Aufwand beträgt 248 g/kWh und der Nutzen 295 g/kWh.

In der Aufwandskurve befindet sich $SOC_{rel, LPAn, opt, min, lim}$ bei 0.51, der Aufwand steigt nur sehr geringfügig auf 253 g/kWh. Der Übergang zu $SOC_{rel, LPAn, min}$ bei 0.45 ist sehr steil, der Aufwand beträgt 380 g/kWh. Im Vergleich dazu steigt die Nutzenkurve bei

einem $\text{SOC}_{\text{rel, LPAb, opt, min, lim}}$ von 0.57 auf 310 g/kWh und bei einem $\text{SOC}_{\text{rel, LPAb, min}}$ von 0.51 auf 320 g/kWh. Bei hohem SOC verlaufen die Kurven entgegengesetzt. Der Aufwand sinkt gleichmäßig auf 223 g/kWh ($\text{SOC}_{\text{rel, LPAn, opt, max, lim}} = 0.9$) und 180 g/kWh ($\text{SOC}_{\text{rel, LPAn, max}} = 0.95$). Der Nutzen wird hingegen zunächst nur leicht auf 280 g/kWh reduziert ($\text{SOC}_{\text{rel, LPAb, opt, max, lim}} = 0.95$). Der Übergang zu einem $\text{SOC}_{\text{rel, LPAb, max}}$ von 0.97 auf 150 g/kWh ist sehr steil.

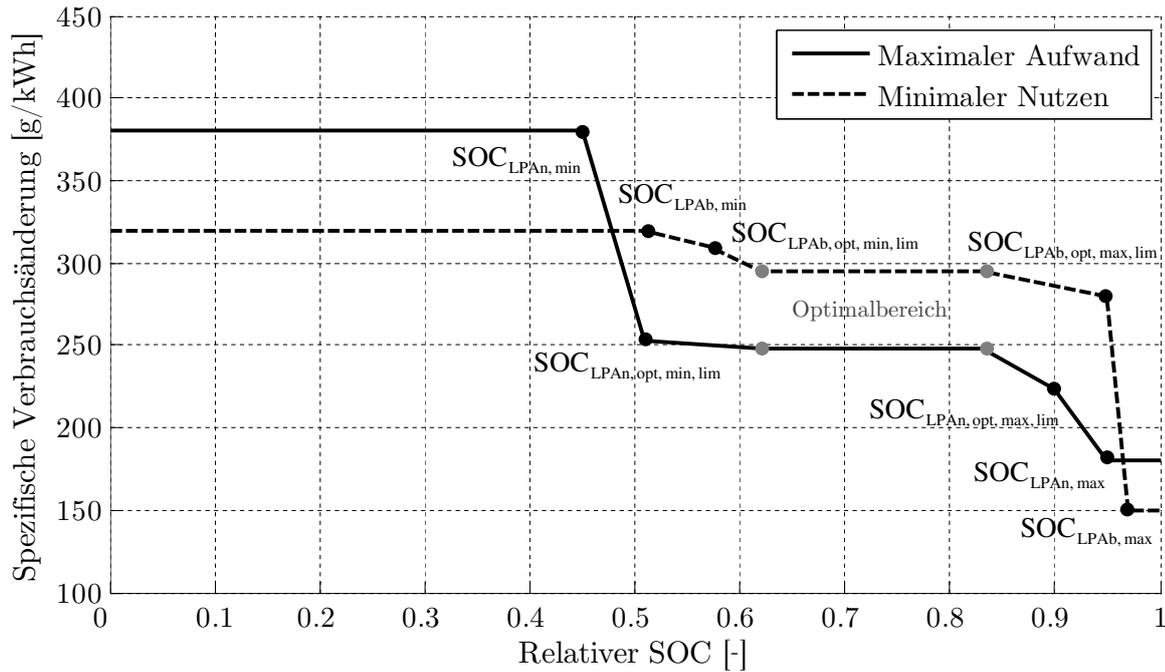


Abb. 5.16: Ergebnis der Parametervariation für den maximalen Aufwand und den minimalen Nutzen: Die Grenzkurven weisen ein breites Plateau im Optimalbereich und steile Übergänge zu den Randbereichen auf.

5.2.3 Verbrauchsoptimierte Startkoordination des Verbrennungsmotors

Neben der Verteilung und Ausprägung der Betriebsarten beeinflusst auch der Übergang zwischen den Betriebsarten den Kraftstoffverbrauch. In Abschnitt 4.3.2 wurde bereits diskutiert, welche Auswirkungen Abstraktionen in der Modellierung in diesem Kontext haben. Der untersuchte Antriebsstrang weist zwei verschiedene Startsysteme auf:

- Startergenerator im Riemen (SGR)
- Traktionsmaschine

Es soll eine Startkoordination entwickelt werden, die das im aktuellen Betriebspunkt verbrauchsoptimale Startsystem auswählt und nicht – wie im untersuchten Antriebsstrang vorgesehen – ausschließlich den SGR nutzt. Zudem ist zu prüfen, ob Optimierungspotenziale im Zustartablauf bzgl. der funktionalen Ansteuerung der Komponenten bestehen. In der Optimierung sind die in Abschnitt 5.1.1 definierten Anforderungen zu berücksichtigen. Der Motorstart hat insbesondere Ansprüche hinsichtlich Fahrdynamik (Response) und -komfort zu erfüllen.

Dieser Abschnitt beschreibt den Lösungsansatz, die Offlineoptimierung sowie deren Ergebnisse (vgl. auch [11]).

Lösungsansatz

Der Lösungsansatz wird gemäß des in Abschnitt 5.1.3 definierten Vorgehens erarbeitet.

Leistungsflüsse im Antriebsstrang Der Startablauf unterscheidet sich für Starts im Stand und während der Fahrt sowie bzgl. des Startsystems.

- **Startergenerator im Riemen:** Im Stand beschleunigt der SGR zunächst den Verbrennungsmotor. Dieser erzeugt ab dem Zeitpunkt der ersten Zündung selbstständig ein Moment. Er beschleunigt bis seine Leerlaufdrehzahl erreicht ist. Hierbei wird er weiterhin vom SGR unterstützt. Erfolgt der Start während der Fahrt, so muss der Verbrennungsmotor ab der Leerlaufdrehzahl alleine mit dem selbst erzeugten Moment auf die Zieldrehzahl beschleunigen. In dieser Zeit bleibt die Trennkupplung geöffnet.
- **E-Maschine:** Im Stand erfolgt der Start mittels der E-Maschine auf die gleiche Weise wie mit dem SGR. Die Trennkupplung ist jedoch geschlossen, das Anfahrlement ist geöffnet. Erfolgt der Start während der Fahrt, so bringt die E-Maschine bereits Moment für das elektrische Fahren auf. Dieses wird erhöht und mittels der schleifenden Trennkupplung kann das zusätzliche Moment für

das Beschleunigen des Verbrennungsmotors genutzt werden. Um Schwingungen des Motorhochlaufs vom Antriebsstrang zu entkoppeln, wird zusätzlich die Drehzahl der E-Maschine angehoben und das Anfahrerelement in Schlupf gebracht. Im Gegensatz zum SGR-Start überlagern sich die Momente von E-Maschine und Verbrennungsmotor bis zum Erreichen der Zieldrehzahl. Daraufhin wird zur Vermeidung einer Übertragung des Drehzahlüberschwingens die Trennkupplung kurz geöffnet, die Drehzahl der E-Maschine wieder auf das ursprüngliche Niveau abgesenkt sowie das Anfahrerelement geschlossen.

Die energetische Betrachtung der Startvorgänge erfolgt jeweils bis zum Erreichen der Zieldrehzahl. Die Abläufe im Anschluss, wie z. B. das Schließen der Trennkupplung bei gleichbleibendem Getriebeeingangsmoment, unterscheiden sich nicht zwischen den verschiedenen Zustartsystemen. Die Effizienz eines Starts wird durch folgende Leistungsflüsse bestimmt:

- Elektrisches Anschleppen des Verbrennungsmotors
- Selbsthochlauf des Verbrennungsmotors bis zur Übernahme der Antriebsleistung
- Erzeugung der verbrauchten elektrischen Energie durch Lastpunktanhebung

Stell- und Optimierungsgrößen Als Stellgröße im Fahrzeug dient die Vorgabe des effizientesten Startsystems. Darüber hinaus sollen jeweils die Parameter zur Steuerung des Startablaufs in Abhängigkeit vom Betriebspunkt verbrauchseffizient vorgegeben werden. Eine Beeinflussung des Starts per SGR ist im untersuchten Antriebsstrang lediglich oberhalb der Leerlaufdrehzahl möglich. Deshalb verbleibt als Freiheitsgrad die Hochlaufzeit des Verbrennungsmotors. Diese resultiert aus dem vom Verbrennungsmotor nach dem Leerlauf abgegebenen Moment. Im Falle des E-Maschinenstarts sind das maximale Startmoment der E-Maschine, die maximale Startleistung und das Unterstützungsmoment nach der ersten Zündung variabel. Darüber hinaus können die Drehzahl der ersten Zündung, die Hochlaufzeit sowie der Schlupf des Anfahrerelements verändert werden (vgl. Abbildung 5.17).

Als Optimierungsgröße dient der insgesamt von einem Zustart verursachte Kraftstoffverbrauch in Gramm. Auf diese Weise kann die Effizienz der verschiedenen Startvarianten direkt gegenübergestellt werden.

Referenzpunkt im Antriebsstrang Zustarts im Fahrbetrieb treten während des elektrischen Fahrens auf. Die Drehzahl der E-Maschine legt die Zieldrehzahl des Verbrennungsmotors fest. Ebenso ist durch das E-Maschinenmoment das Moment nach erfolgtem Zustart vorgegeben. Somit dient auch in diesem Optimierungsansatz der Getriebeeingang als Referenzpunkt (vgl. Abbildung 5.17). In der Offlineberechnung ist der Betriebspunkt folglich durch Getriebeeingangsmoment M_{GE} und -drehzahl n_{GE}

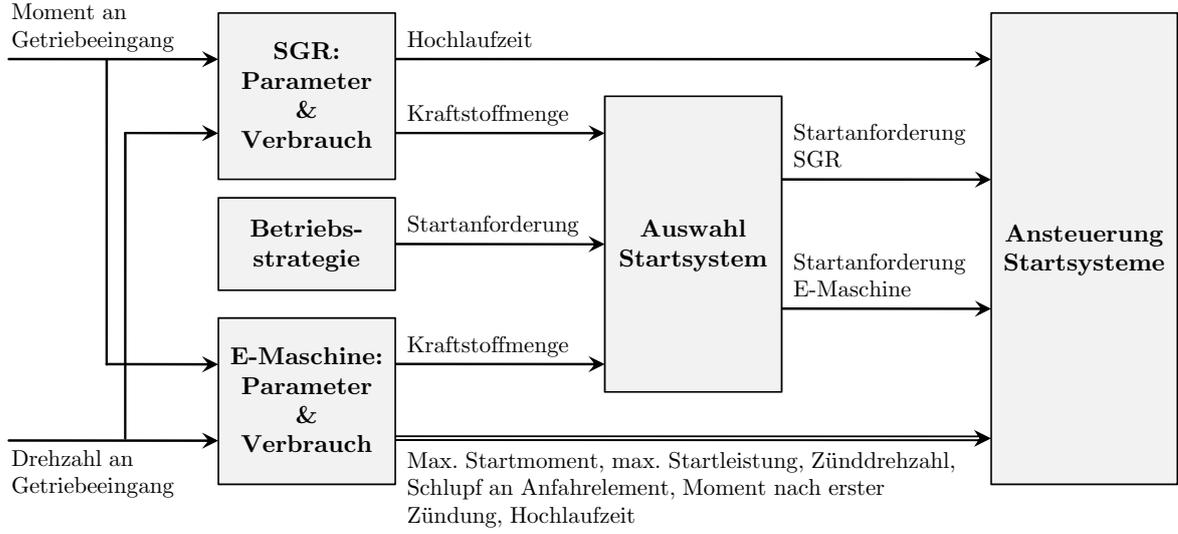


Abb. 5.17: Lösungsansatz für die verbrauchsoptimierte Startkoordination des Verbrennungsmotors: Auf der Basis von Drehzahl und Moment am Getriebeeingang werden das Startsystem ausgewählt und die Startparameter vorgegeben.

festgelegt. Es wird für jeden darstellbaren Betriebspunkt der Kraftstoffverbrauch m_{Kst} je Zustartsystem ermittelt. Somit gilt für die Startvariante S :

$$S = f(n_{GE}, M_{GE}, m_{Kst}) \quad (5.27)$$

Kraftstoffverbrauch Der Kraftstoffverbrauch setzt sich aus den zwei Bereichen elektrisches Anschleppen und Selbsthochlauf zusammen (siehe oben). Für den Selbsthochlauf wird er auf Basis von Berechnungsmodellen und Fahrzeugmessungen ermittelt. Auf die gleiche Weise kann der Energiebedarf für das elektrische Anschleppen bestimmt werden. Um diesen ebenfalls in eine Kraftstoffmenge zu überführen, wird der in Abschnitt 5.2.2 hergeleitete Ladeaufwand verwendet (vgl. Gleichung 5.7 auf Seite 61). Dessen Mittelwert gibt Auskunft darüber, wieviel Kraftstoff für die Lastpunktanhebungen zur Erzeugung der Anschleppenergie nötig ist. Die Mittelung erfolgt über die gesamte Zeit des Fahrzyklus t_{Zyklus} . Für das Laden mittels SGR gilt:

$$\bar{A}_{LPA_n, SGR}(t_{Zyklus}) = \frac{\sum_{i=1}^{t_{Zyklus}} |\dot{m}_{LPA_n}(i) - \dot{m}_{Bas}(i)|}{\sum_{i=1}^{t_{Zyklus}} (|P_{SGR, el}(i)| \eta_{NV-Bat, lad}(i))} \quad (5.28)$$

\dot{m}_{LPA_n} ist der Kraftstoffmassenstrom während einer Lastpunktanhebung, \dot{m}_{Bas} der Kraftstoffmassenstrom ohne Lastpunktverschiebung im Basisbetriebspunkt, $P_{SGR, el}$ die

elektrische Leistung am SGR und $\eta_{\text{NV-Bat, lad}}$ der Ladewirkungsgrad der Niedervoltbatterie. Im Falle des Ladens mittels der E-Maschine gilt:

$$\bar{A}_{\text{LPA n, EM}}(t_{\text{Zyklus}}) = \frac{\sum_{i=1}^{t_{\text{Zyklus}}} |\dot{m}_{\text{LPA n}}(i) - \dot{m}_{\text{Bas}}(i)|}{\sum_{i=1}^{t_{\text{Zyklus}}} (|P_{\text{EM, el}}(i)| \eta_{\text{HV-Bat, lad}}(i) + P_{\text{BN}}(i)(1 - \eta_{\text{HV-Bat, lad}}(i)))} \quad (5.29)$$

$P_{\text{EM, el}}$ ist die elektrische E-Maschinenleistung, P_{BN} die Bordnetzleistung und $\eta_{\text{HV-Bat, lad}}$ der Ladewirkungsgrad der Hochvoltbatterie. Während im Falle des Ladezustandsmanagements lediglich der Aufwand für Lastpunktanhebungen relevant ist (vgl. Abschnitt 5.2.2), so ist nun der gesamte Aufwand der im Speicher enthaltenen Energie von Bedeutung. Somit beinhaltet $P_{\text{EM, el}}$ neben den Ladeleistungen auch die Rekuperationsleistungen.

Optimierung

Die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs je Zustartsystem und Betriebspunkt erfolgt in Offlineberechnungsmodellen. Die Wahl der Startparameter erfolgt mit Hilfe einer Parametervariation.

Offlineberechnungsmodelle Es werden Berechnungsmodelle der drei Phasen „Elektrisches Anschleppen des Verbrennungsmotors“, „Selbsthochlauf des Verbrennungsmotors bis zur Übernahme der Antriebsleistung“ und „Erzeugung der verbrauchten elektrischen Energie durch Lastpunktanhebung“ jeweils für den Start mittels SGR und die E-Maschine erstellt. Das Ziel besteht darin, für jeden Betriebspunkt am Getriebeeingang den Kraftstoffverbrauch beider Startsysteme zu ermitteln. Die Datenbasis ist in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Die Betriebsstrategie lässt ein Ablegen des Motors und somit z. B. elektrisches Fahren nur zu, wenn der Verbrennungsmotor seine Betriebstemperatur erreicht hat. Deshalb werden die Starts lediglich für betriebswarmen Motor untersucht.

Die Energie für das **elektrische Anschleppen** wird jeweils für den SGR und die E-Maschine ermittelt. Die Ansteuerung des SGR ist im untersuchten Antriebsstrang in dieser Phase nicht variabel. Der Verlauf der Stromaufnahme des SGR liegt anhand einer Startsimulation vor. In dem entwickelten Modell wird daraus die von der 12V-Batterie abgegebene Energie unter Berücksichtigung der Entlade- und Leitungsverluste ermittelt. Der SGR ist anhand eines Kennfeldes abgebildet, das in Abhängigkeit von Drehzahl und Moment die Verluste ausgibt. Zudem werden die Verluste durch dessen Anbindung über den Riemen berücksichtigt. Die Niedervoltbatterie ist durch ein vorliegendes und validiertes Simulationsmodell abgebildet. Die Zuleitung ist als Ohmscher Widerstand modelliert.

Komponente	Modellierung
Verbrennungsmotor	Massenträgheitsmoment und Verbrauchskennfeld, Schleppmoment beim Start, Kraftstoffmenge für Motorhochlauf bis Leerlaufdrehzahl
E-Maschine	Verlustleistungskennfeld
SGR	Verlustleistungskennfeld, Verlauf der Stromaufnahme während des Starts, Verluste am Riemen
Trennkupplung	Kenlinie des Schleppmoments in Abhängigkeit von der Differenzdrehzahl
Hochvoltbatterie	Aus Batteriemodell generiertes Kennfeld der Lade- bzw. Entladeverlustleistungen in Abhängigkeit von SOC und Lade- bzw. Entladeleistung
Niedervoltbatterie	Physikalisches Simulationsmodell (inkl. Zuleitungen)

Tab. 5.4: Modellierung der Komponenten zur Ermittlung der verbrauchsoptimierten Zustartvariante.

Um auch den Start mittels E-Maschine abbilden zu können, werden in das Berechnungsmodell die Verluste an den Kupplungen und im Hochvoltspeicher integriert. Die Kupplungsverluste lassen sich aus den Differenzdrehzahlen und dem übertragenen Moment berechnen. Im Falle der Trennkupplung ist zusätzlich ein von der Differenzdrehzahl abhängiges Schleppmoment zu berücksichtigen. Die Verluste der Hochvoltbatterie werden wie in den vorangegangenen Untersuchungen anhand eines Verlustleistungskennfeldes abgebildet. Im Fahrbetrieb erfolgt der Zustart während des elektrischen Fahrens. Deshalb muss zur Ermittlung der Startenergie die Energie für den elektrischen Antrieb parallel berechnet und abgezogen werden. Aus der vorliegenden Startsimulation können der Drehzahlverlauf des Verbrennungsmotors sowie der Drehmomentverlauf der E-Maschine ermittelt werden. Weitere Freiheitsgrade der Simulation sind der Schlupf des Anfahrlements, die Drehzahl und das Moment der E-Maschine zum Zeitpunkt des Starts sowie die Zünddrehzahl des Verbrennungsmotors.

Die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs eines **Motorhochlaufs** ab der ersten Zündung erfolgt in zwei Phasen:

- Hochlauf bis Leerlaufdrehzahl: Unterhalb der Leerlaufdrehzahl wird der Verbrennungsmotor aus Stabilitätsgründen mit Vollast betrieben und eine fest vorgegebene Kraftstoffmenge eingespritzt. Diese wird in Fahrzeugmessungen ermittelt.
- Hochlauf ab Leerlaufdrehzahl: Anhand des vorgegebenen Drehzahlverlaufs wird das für den Hochlauf benötigte Moment des Verbrennungsmotors ermittelt. Mittels des Verbrauchskennfeldes wird der zugehörige Kraftstoffmassenstrom bestimmt.

Bei einem Start per SGR ist die erste Phase nicht variierbar. Deshalb bleibt neben dem verbrauchten Kraftstoff auch die benötigte elektrische Energie gleich. Die zweite Phase weist keine elektrische Unterstützung auf, somit wird in dem Modell lediglich die benötigte Kraftstoffmenge anhand des Verbrauchskennfeldes des Verbrennungsmotors ermittelt. Eingangsgrößen sind dessen Drehzahlverlauf, die Zieldrehzahl und die Massenträgheit des Motors.

Das zugehörige Modell für den E-Maschinenstart nutzt als Eingangsgrößen den Drehzahlverlauf des Verbrennungsmotors, Moment und Drehzahl der E-Maschine zum Zeitpunkt des Starts, das zusätzliche Moment der E-Maschine zur Unterstützung des Motorhochlaufs sowie den Schlupf des Anfahrlements. Die Kupplungen und der HV-Speicher sind äquivalent zu dem elektrischen Anschleppen abgebildet. Das Modell ermittelt zum einen den reduzierten Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors bei einer elektrischen Unterstützung durch die E-Maschine. Zum anderen wird die vom HV-Speicher abgegebene Leistung berechnet.

Der Kraftstoffbedarf zur **Erzeugung der verbrauchten elektrischen Energie durch Lastpunktanhebung** wird mittels des durchschnittlichen Ladeaufwands bestimmt (vgl. Gleichungen 5.28 und 5.29). Der Ladestromverlauf des SGR während des spannungsgeregelten Ladens im NEFZ wird in Batteriemessungen ermittelt und in das Berechnungsmodell integriert. Daraus berechnet das Modell das vom Verbrennungsmotor bereitzustellende mechanische Moment zum Laden der 12V-Batterie. Bei der Bestimmung der in der Niedervoltbatterie ankommenden Leistung werden neben dem Ladewirkungsgrad auch die Leitungsverluste berücksichtigt. Hinsichtlich des E-Maschinenstarts basiert der durchschnittliche Ladeaufwand auf dem in Abschnitt 5.2.2 entwickelten Ladezustandsmanagement der Hochvoltbatterie. Die Verläufe der Ladeleistungen stammen aus Simulationen in dem in Abschnitt 5.3.1 vorgestellten Modell.

Parametervariation Um den Kraftstoffverbrauch der jeweiligen Starts auf Basis des Startablaufs zu reduzieren, werden automatisierte Parametervariationen durchgeführt. Tabelle 5.5 fasst die Optimierungsparameter sowie die untersuchten Wertebereiche zusammen. Letztere werden durch die verbauten Komponenten eingeschränkt. So sind beispielsweise mindestens 70 Nm für den Start des Verbrennungsmotors nötig. Die E-Maschinenleistung kann aus der mittleren Leistung für das elektrische Fahren, der Verlustleistung an der Trennkupplung und der Schleppleistung des Verbrennungsmotors abgeleitet werden. Die Zünddrehzahl muss größer als 200 U/min sein, unterhalb ist der Motor nicht mehr zuverlässig zündbar.

Der Wertebereich aller Parameter wird iterativ durchlaufen und der Verbrauch nach jeder Parameteränderung neu ermittelt. Ist dieser kleiner als der bisherige Minimalverbrauch, so wird er als neues Minimum gespeichert. In diesem Fall werden auch alle

Parameter	Wertebereich
Maximal erlaubtes Startmoment der E-Maschine	70-150 Nm
Maximal erlaubte Startleistung der E-Maschine	1500-6000 W
Zünddrehzahl	200-900 U/min
Schlupf Anfahrelement	0-75 U/min
Unterstützung durch die E-Maschine nach Zündung	0-100 Nm
Moment des Verbrennungsmotors ab Leerlauf	0 Nm - max. Moment

Tab. 5.5: Zur Optimierung des Zustarts veränderte Parameter: Die Wertebereiche werden durch die verbauten Komponenten beschränkt.

zugehörigen Startparameter in Matrizen abgelegt. Somit liefert der Algorithmus für jeden untersuchten Betriebspunkt verbrauchsoptimierte Parameterkombinationen. In den Berechnungen werden stets die Leistungs- und Momentengrenzen der E-Maschine sowie die geforderte Startzeit geprüft.

Ergebnisse der Optimierung

Im NEFZ beträgt der durchschnittliche Ladeaufwand für den SGR 310 g/kWh und für die E-Maschine 135 g/kWh (vgl. Gleichungen 5.28 und 5.29).

Der Betriebspunkt für einen Start im Stand setzt sich aus der Leerlaufdrehzahl von 600 U/min und dem Getriebeeingangsmoment von 0 Nm zusammen. Im Falle des SGR-Starts sind keine Parameter variabel. Es werden insgesamt 0.14 g Kraftstoff benötigt. Die optimierten Parameter des Starts im Stand mittels E-Maschine sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst. Der Start benötigt 0.04 g und ist somit deutlich effizienter als der SGR-Start. Haupteinfluss auf den Verbrauchsvorteil hat der erheblich geringere Ladeaufwand der HV-Batterie.

Parameter	Wert
Maximales Drehmoment der E-Maschine	100 Nm
Maximale Leistung der E-Maschine	2500 W
Zünddrehzahl	200 U/min
Schlupf am Anfahrelement	Nicht relevant
Elektrisches Moment nach der ersten Zündung	150 Nm
Gesamtzeit Start	0.2 s

Tab. 5.6: Ergebnis der Parametervariation: Optimierte Parameter des E-Maschinenstarts im Stand.

Bei einem SGR-Start während der Fahrt ist lediglich das vom Verbrennungsmotor nach dem Leerlauf abgegebene Moment beeinflussbar. Dieses legt die Hochlaufzeit fest. Der Hochlauf bis zur Leerlaufdrehzahl beansprucht bereits 0.3 s. Es zeigt sich in dem Großteil der Betriebspunkte, dass der Kraftstoffbedarf mit einer Verlängerung der Hochlaufzeit steigt. Das Optimum liegt über alle Zieldrehzahlen bei Zeiten von weniger als ca. 0.4 s und somit hohen Momenten (siehe Abbildung A.5 auf Seite 153).

Im Falle des E-Maschinenstarts während der Fahrt liefert die Parametervariation folgende Ergebnisse (vgl. Tabelle A.1 auf Seite 152 und Abbildung A.6 auf Seite 153):

- Als Moment für den elektrischen Hochlauf dient das maximal mögliche E-Maschinenmoment. Dies verkürzt die Anschleppzeit. Dadurch können die Verluste an der Trennkupplung reduziert werden, da die verringerte Zeit einen größeren Einfluss hat als das erhöhte Moment.
- Die maximale E-Maschinenleistung verhält sich äquivalent zum maximalen Moment.
- Die Zündung wird bei der niedrigst möglichen Drehzahl von 200 U/min gestartet. Die Ursache hierfür ist der hohe Energieverbrauch für das elektrische Anschleppen. Dieser entsteht durch die unbefeuerte Kompression und Expansion. Die dabei auftretenden Verluste können im Falle einer erhöhten Zünddrehzahl durch die Vermeidung des schlechten Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors unterhalb der Leerlaufdrehzahl nicht kompensiert werden.
- Es wird kein komfortbedingter Schlupf am Anfahrlemermet zugelassen. Somit entfallen die zugehörigen Verluste.
- Das Moment, mit dem die E-Maschine den Verbrennungsmotor nach der ersten Zündung unterstützt, hängt von der Zieldrehzahl ab. Zwischen 700 U/min bis 900 U/min ist ein Moment von 50 Nm effizient. Ist die Getriebeeingangsdrehzahl größer als 900 U/min, so ist ein Start ohne elektrische Unterstützung verbrauchs-optimal. Dieses Verhalten resultiert aus der Verlustleistung an der Trennkupplung. Ab einer Drehzahl von 1000 U/min überwiegen die Verluste an der Kupplung die Vorteile einer elektrischen Unterstützung des Verbrennungsmotors.
- Auch bei dem Start mittels E-Maschine sind stets die Starts mit der geringst möglichen Hochlaufzeit effizient.

Um die beiden Zustartvarianten gegenüberzustellen, wird je Betriebspunkt die prozentuale Abweichung des Kraftstoffverbrauchs zwischen E-Maschinenstart und SGR-Start ermittelt. Sie ist in Abbildung 5.18 dargestellt. Negative Werte entsprechen einem Vorteil des Starts mittels der E-Maschine. Dieser stellt in einem Großteil der Betriebspunkte den effizienteren Start dar. Lediglich ab Getriebeeingangsdrehzahlen von 1430 U/min und ab Getriebeeingangsmomenten von 55 Nm benötigt der Start per SGR teilweise weniger Kraftstoff. Im übrigen Kennfeldbereich variiert der Vorteil des

E-Maschinenstarts in Abhängigkeit von der Zieldrehzahl. Bei einer Getriebeeingangsdrehzahl von 700 U/min wird bis zu 35 % weniger Kraftstoff verbraucht. Steigt die Zieldrehzahl auf 1600 U/min so verringert sich der maximale Vorteil auf 3 %. Hinsichtlich des Getriebeeingangsmoments besteht lediglich eine geringe Abhängigkeit.

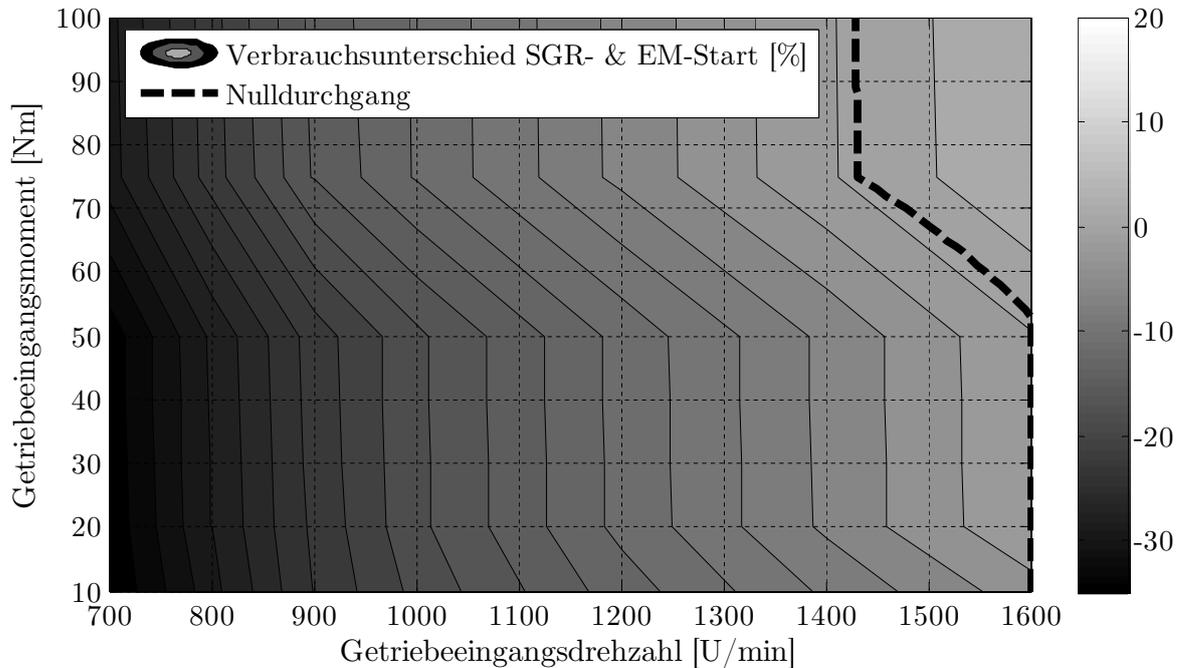


Abb. 5.18: Prozentualer Verbrauchsunterschied zwischen SGR-Start und optimiertem E-Maschinenstart: Der E-Maschinenstart stellt in einem Großteil der Betriebspunkte den effizienteren Start dar (Positive Werte: Vorteil SGR; Negative Werte: Vorteil E-Maschine).

Sensitivitätsanalyse

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Berechnungsmodelle bzgl. der Startkoordination des Verbrennungsmotors basieren sowohl auf Messdaten als auch auf Simulationsergebnissen unterschiedlicher Güte. Deshalb wird die Sensitivität des ermittelten Kraftstoffverbrauchs bzgl. der Veränderung einzelner Parameter analysiert. Die Parameter werden ausgehend vom Istwert in 10 %-Schritten in einem Bereich von -20 % bis +20 % variiert. Es wird jeweils ein Kennfeld des Kraftstoffverbrauchs des Motorstarts m_{Kst} mit k Stützstellen erstellt. Dieses deckt Hochlaufzeiten t_{HL} zwischen 0.2 s und 1 s sowie Getriebeeingangsdrehzahlen n_{GE} von 600 U/min bis 1600 U/min ab.

Den Einfluss der geänderten Parameter auf die Ergebnisse beschreibt die mittlere prozentuale Abweichung D des variierten Kennfeldes vom Referenzkennfeld.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \left(\frac{m_{\text{Kst, Variation}}(n_{\text{GE}, i}, t_{\text{HL}, j})}{m_{\text{Kst, Referenz}}(n_{\text{GE}, i}, t_{\text{HL}, j})} - 1 \right)}{k^2} \cdot 100\% \quad (5.30)$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.7 für den SGR und in Tabelle 5.8 für die E-Maschine dargestellt. Die maximale Abweichung beschreibt die größte Differenz zwischen zwei Einzelwerten des Kennfelds. Um die Validität des jeweiligen Parameters beurteilen zu können, wird zusätzlich dessen Güte angegeben. Sie basiert auf einer Bewertung der Qualität der verwendeten Daten. Je höher die Güte der Daten ist, desto unkritischer ist eine hohe Sensitivität. Im Fall einer geringen Güte ist das Simulationsergebnis lediglich dann valide, wenn dieser Parameter auch eine geringe Sensitivität aufweist. Die Datengüte wird wie folgt bewertet:

- Trägheitsmoment Verbrennungsmotor: Das Trägheitsmoment stammt aus den Konstruktionsdaten des Verbrennungsmotors. Somit ist dessen Güte sehr hoch.
- Mittlerer Ladeaufwand: Der Ladeaufwand wird mit einem Ansatz ermittelt, der auf der Optimierung der SOC-Regelung aufbaut (vgl. Abschnitt 5.2.2) und tiefgehend analysiert ist. Daher kann von einer hohen Güte des Aufwands ausgegangen werden.
- Kraftstoffverbrauch bis Leerlauf: Die Kraftstoffmasse, die für den Motorhochlauf bis zur Leerlaufdrehzahl nötig ist, wurde in Fahrzeugmessungen bestimmt. Da es sich um einen sehr kurzen und instationären Vorgang bei niedriger Drehzahl handelt, streuen die Messergebnisse. Deshalb ist die Güte dieses Parameters gering.
- Kraftstoffverbrauch ab Leerlauf: Der Kraftstoffverbrauch ab der Leerlaufdrehzahl wird in dem Verbrauchskennfeld des Motors bestimmt. Das Kennfeld besteht aus exakt vermessenen, stationären Betriebspunkten. Daher ist die Güte sehr hoch.
- Elektrischer Energieverbrauch: Der elektrische Energieverbrauch des SGR stammt aus einer anhand von Fahrzeugmessungen validierten Simulation. Daraus wird ebenfalls der Energieverbrauch der E-Maschine abgeleitet. Deshalb ist die Güte hoch.

Im Falle des SGR-Starts (vgl. Tabellen 5.7) weisen der mittlere Ladeaufwand, der Kraftstoffverbrauch ab dem Leerlauf und der elektrische Energieverbrauch vergleichsweise hohe Sensitivitäten auf. Die Simulation des E-Maschinenstarts (vgl. Tabelle 5.8) zeigt hinsichtlich des mittleren Ladeaufwands eine höhere Sensitivität, während die übrigen Parameter lediglich geringe Einflüsse auf die Ergebnisse haben. Die hohen Sensitivitäten können bei der Auswertung des Gesamtergebnisses jedoch als unkritisch

angesehen werden, da die Güte dieser Parameter hoch ist. In den Simulationen beider Startsysteme hat die geringe Güte des Kraftstoffverbrauchs bis zur Leerlaufdrehzahl aufgrund der sehr geringen Sensitivität keinen negativen Einfluss auf die Validität des Gesamtergebnisses.

Parameter	Quelle	Güte		Prozentuale Abweichung bei Variation um			
				-20	-10	+10	+20
Trägheitsmoment Verbrennungsmotor	Simulation	++	∅	-3.6	-1.8	+1.8	+3.7
			max	-10.2	-5.1	+5.4	+10.9
Mittlerer Lade- aufwand	Simulation	+	∅	-9.4	-4.7	+4.7	+9.4
			max	-15.4	-7.7	+7.7	+15.5
Kraftstoffver- brauch bis Leerlauf	Messung	-	∅	-2.0	-1.0	+1.0	+2.0
			max	-3.4	-1.7	+1.7	+3.4
Kraftstoffver- brauch ab Leerlauf	Simulation	++	∅	-8.6	-4.3	+4.3	+8.6
			max	-13.2	-6.6	+6.6	+13.2
Elektrischer Energieverbrauch	Simulation/ Messung	+	∅	-9.4	-4.7	+4.7	+9.4
			max	-15.4	-7.7	+7.7	+15.5

Tab. 5.7: Sensitivitätsanalyse der Parameter bezogen auf den Gesamtverbrauch beim Zustart per SGR: Hohe Sensitivitäten werden durch eine hohe Datengüte kompensiert.

Parameter	Quelle	Güte		Prozentuale Abweichung bei Variation um			
				-20	-10	+10	+20
Trägheitsmoment Verbrennungsmotor	Simulation	++	∅	-1.9	-1.3	+1.5	+3.1
			max	-8.4	-4.6	+4.8	+9.7
Mittlerer Lade- aufwand	Simulation	+	∅	-17.2	-8.6	+8.6	+17.2
			max	-19.3	-9.6	+9.6	+19.3
Kraftstoffver- brauch bis Leerlauf	Messung	-	∅	-1.3	-0.7	+0.7	+1.3
			max	-3.0	-1.5	+1.5	+3.0
Kraftstoffver- brauch ab Leerlauf	Simulation	++	∅	-1.4	-0.7	+0.7	+1.4
			max	-6.4	-3.2	+3.2	+6.4
Elektrischer Energieverbrauch	Simulation	+	∅	-0.8	-0.4	+0.4	+0.8
			max	-1.8	-0.9	+0.9	+1.8

Tab. 5.8: Sensitivitätsanalyse der Parameter bezogen auf den Gesamtverbrauch beim Zustart per E-Maschine: Hohe Sensitivitäten werden durch eine hohe Datengüte kompensiert.

5.3 Bewertung der Optimierungsansätze in Simulationen

Im vorangegangenen Abschnitt wurden Lösungsansätze und Methoden für eine Optimierung der Gangwahl, der Regelung des Ladezustands der Hochvoltbatterie und der Startkoordination des Verbrennungsmotors hergeleitet. Deren Verbrauchseinsparpotenziale sollen nun in Simulationen von Fahrzyklen analysiert werden. Dieses Kapitel beschreibt zunächst das erstellte Simulationsmodell. Anschließend wird je Optimierungsansatz die Verbrauchseinsparung ermittelt. Alle Einsparpotenziale werden auf den Zielverbrauch des nichthybridisierten Basisfahrzeugs bezogen (vgl. Abschnitt 2.5.3). Schließlich wird anhand der Simulationsergebnisse bewertet, ob die Optimierungsansätze die Anforderungen der Serienentwicklung erfüllen und ob gegebenenfalls weitere Einschränkungen in die Ansätze zu integrieren sind.

5.3.1 Simulationsumgebung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Simulationsmodell des untersuchten Antriebsstrangs in Matlab/Simulink aufgebaut (vgl. auch [75, 76]). Die Zielsetzung besteht nicht darin, ein vollwertiges Gesamtfahrzeugmodell aufzubauen. Es liegt hierzu bereits ein Modell vor, das in Dymola erstellt wurde [20, 92]. Aufgrund der Komplexität weist es sehr lange Berechnungszeiten auf und ist somit nicht echtzeitfähig. Außerdem erfolgt die Funktionsentwicklung im Bereich Betriebsstrategie für den untersuchten Antrieb in Matlab/Simulink. Darin entwickelte Funktionen haben deshalb den Vorteil, dass sie – bei Einhaltung der Modellierungsrichtlinien – im Anschluss direkt in die Software des Steuergeräts integriert werden können.

Das Modell baut auf den Simulationsergebnissen der Dymola-Gesamtfahrzeugsimulation auf, indem es deren Radmomentenverlauf als Führungsgröße verwendet. Auf diese Weise ist kein Fahrer- und Fahrzeugmodell nötig. Der Radmomentenverlauf stellt in Verzögerungsphasen ausschließlich das Rekuperationsmoment dar. Deshalb kann auch auf eine Modellierung der Betriebsbremse des Fahrzeugs verzichtet werden. Das Radmoment hängt ausschließlich vom Fahrzeug und dem betrachteten Zyklus ab und ist daher unabhängig von der implementierten Betriebsstrategie. Diese wird zusätzlich in Form der Ladeleistung und Betriebsartenverteilung aus der Gesamtfahrzeugsimulation eingelesen. Auch der Gangverlauf kann daraus übernommen werden. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, im Modell jeweils nur den aktuell untersuchten Freiheitsgrad in der Betriebsstrategie zu variieren.

Das Matlab/Simulink Modell bestimmt anhand des Radmomentenverlaufs, des gewählten Gangs und der Betriebsart die Momente von E-Maschine und Verbrennungsmotor. In die Berechnung fließen die Wirkungsgrade bzw. Verluste aller Antriebsstrangkom-

ponenten ein. Schließlich wird daraus der Kraftstoffverbrauch und der Ladezustand (SOC) der Hochvoltbatterie abgeleitet. Weitere Informationen zum Aufbau und der Validierung des Modells finden sich in Kapitel A (siehe Abbildung A.7 auf Seite 155).

5.3.2 Verbrauchseinsparung

In diesem Abschnitt wird die Verbrauchseinsparung durch die drei im Rahmen der Arbeit entwickelten Optimierungsansätze der Betriebsstrategie (siehe Kapitel 5.2) analysiert. Die Ergebnisse werden in dem im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Simulationsmodell erzeugt. Um den Kraftstoffverbrauch bewerten zu können, erfolgen alle Simulationen SOC-neutral, d. h. der Start-SOC im Zyklus wird so gewählt, dass sich der gleiche End-SOC einstellen kann.

Gesamtwirkungsgradoptimale Schaltpunkte des Getriebes

Für die Ermittlung der Einsparpotenziale durch die optimierte Gangwahl wird die Verteilung der Betriebsarten aus der Gesamtfahrzeugsimulation übernommen (vgl. auch [75]). Da durch optimierte Schaltungen ein verminderter Energiebedarf zu erwarten ist, erfolgt die Regelung des SOC direkt im Simulationsmodell. Hierzu wird der Ansatz der Referenzstrategie in das Modell integriert (vgl. Abbildung 5.19).

NEFZ Tabelle 5.9 zeigt die Simulationsergebnisse für den NEFZ. Es wird zunächst der Einfluss auf den Verbrauch und die Schalthäufigkeit unter der Prämisse analysiert, dass jeweils nur in einer Betriebsart die gesamtwirkungsgradoptimale Gangwahl zum Einsatz kommt. Abschließend wird das optimierte Schalten in allen Betriebsarten zugelassen.

Bis auf die Rekuperation mit gekoppeltem Verbrennungsmotor kann in allen Betriebsarten der Kraftstoffverbrauch reduziert werden. Aufgrund der Rundung der Einzelwerte sowie den unterschiedlichen Werten des Start-SOC, die jeweils für eine SOC-neutrale Simulation nötig sind, entspricht die Summe der Einsparpotenziale nicht exakt dem Potenzial bei Nutzung aller optimierten Kennfelder. Die Anzahl der Schaltvorgänge steigt im Vergleich zur Referenzgangwahl um 46 %.

Der Vergleich mit der Referenzgangwahl im NEFZ zeigt, dass bis auf die 15 km/h Plateaus in den Konstantfahrphasen ein höherer Gang gewählt wird (vgl. Abbildung 5.21 auf Seite 97). Während des elektrischen Fahrens mit 50 km/h geben die Kennfelder wegen des Schlepptoments der Trennkupplung einen um zwei Stufen höheren Gang aus. Aufgrund des schlechteren Wirkungsgrades des siebten Gangs wird der sechste Gang sehr lange gehalten. In Rekuperationsphasen zeigt sich ein früheres Rückschalten.

Schaltstrategie	Einsparung		Anzahl Schaltvorgänge			
	bzgl. Referenz	bzgl. Basisfzg.	VM & LPAn	elektr. Fahren	Rekuperation oVM	mVM
Referenzgangwahl			36	8	39	4
Wirkungsgradoptimale Gangwahl für die Betriebsart:						
Verbrennungsmotorisches Fahren	0.6 %	0.5 %	41	10	39	5
Lastpunktanhebung	0.4 %	0.3 %	45	11	39	6
Elektrisches Fahren	0.7 %	0.5 %	39	27	48	4
Abgekoppelte Rekuperation	0.5 %	0.4 %	36	9	47	4
Gekoppelte Rekuperation	0 %	0 %	36	8	39	4
Alle Betriebsarten	2.1 %	1.6 %	44	25	52	6

Tab. 5.9: Verbrauchseinfluss der wirkungsgradoptimalen Gangwahl im NEFZ: Insgesamt kann der Verbrauch um 1.6 % verringert werden (VM: Verbrennungsmotor, LPAn: Lastpunktanhebung, oVM: Verbrennungsmotor abgekoppelt, mVM: Verbrennungsmotor angekoppelt).

Schaltstrategie	Einsparung		Anzahl Schaltvorgänge			
	bzgl. Referenz	bzgl. Basisfzg.	VM & LPAn	elektr. Fahren	Rekuperation oVM	mVM
Referenzgangwahl			137	41	122	44
Wirkungsgradoptimale Gangwahl für die Betriebsart:						
Verbrennungsmotorisches Fahren	0.8 %	0.6 %	163	47	122	52
Lastpunktanhebung	0.5 %	0.4 %	194	49	122	59
Elektrisches Fahren	0.5 %	0.4 %	140	191	176	44
Abgekoppelte Rekuperation	0.4 %	0.3 %	137	79	241	44
Gekoppelte Rekuperation	0 %	0 %	137	41	122	44
Alle Betriebsarten	2.4 %	1.8 %	184	152	193	56

Tab. 5.10: Verbrauchseinfluß der wirkungsgradoptimalen Gangwahl im FTP-72: Insgesamt kann der Verbrauch um 1.8 % verringert werden (VM: Verbrennungsmotor, LPAn: Lastpunktanhebung, oVM: Verbrennungsmotor abgekoppelt, mVM: Verbrennungsmotor angekoppelt).

Aufgrund der höheren Getriebeeingangsdrehzahlen erreicht die E-Maschine bessere Wirkungsgrade. Somit kann mehr Energie rekuperiert werden. Es ist zudem zu erkennen, dass bei dem Übergang von Zug- in Schubetrieb sehr große Gangsprünge auftreten.

FTP-72 Die Verbrauchseinsparpotenziale für die optimierte Gangwahl im FTP-72 sind in Tabelle 5.10 dargestellt. Ähnlich zu dem NEFZ kann der Kraftstoffverbrauch in allen Betriebsarten bis auf die gekoppelte Rekuperation reduziert werden. Die Schaltfrequenz steigt bei Nutzung aller optimierten Kennfelder um 70 % (vgl. Abbildung 5.22 auf Seite 98). Ein Großteil davon entfällt auf Übergänge von Schub- in Zugbetrieb sowie auf das elektrische Fahren.

Zur Validierung der Ergebnisse wird die optimierte Gangwahl auch in das Dymola Gesamtfahrzeugmodell eingebaut. Es ergeben sich die gleichen Einsparpotenziale.

Aufwand- und nutzenbasiertes Ladezustandsmanagement der Hochvoltbatterie

Nach der wirkungsgradoptimalen Gangwahl sollen nun auch für das optimierte Ladezustandsmanagement die Einsparpotenziale ermittelt werden. In den Simulationen wird die Verteilung des elektrisches Fahrens und der Rekuperation im Fahrzyklus aus der Gesamtfahrzeugsimulation übernommen. In den verbleibenden Phasen mit aktivem Verbrennungsmotor kann die Lastpunktverschiebung frei vorgegeben werden. Als Referenz dient eine SOC-Regelung, die anhand einer Kennlinie direkt in Abhängigkeit vom aktuellen SOC die Lade- und Entladeleistung vorgibt (vgl. [33, 92]). Die Kennlinie ist in Abbildung 5.19 dargestellt.

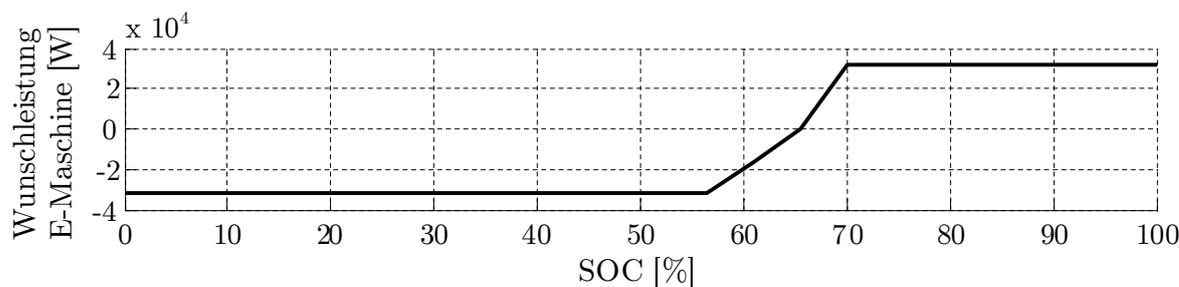


Abb. 5.19: Referenz SOC-Regelung: Vorgabe der Lade- und Entladeleistung in Abhängigkeit vom SOC.

NEFZ Abbildung 5.20 zeigt die Ergebnisse für den NEFZ. Es sind die Fahrzeuggeschwindigkeit, der SOC, das Lademoment, der Ladeaufwand und der aufsummierte Ladeaufwand abgebildet. Das Lademoment hängt stark vom aktuellen Betriebspunkt

ab. Insbesondere in Beschleunigungsphasen, d. h. bei hohen Getriebeeingangsmomenten, wird es in dem gewählten Lösungsansatz stark reduziert. Dadurch ist das Lademoment gleichmäßiger auf die Konstantfahrphasen des Zyklus verteilt. Zudem werden Aufwände über 300 g/kWh vermieden. Der aufsummierte Ladeaufwand zeigt, dass in der ersten Hälfte des Zyklus leichte Vorteile für die Referenzregelung bestehen. Diese werden

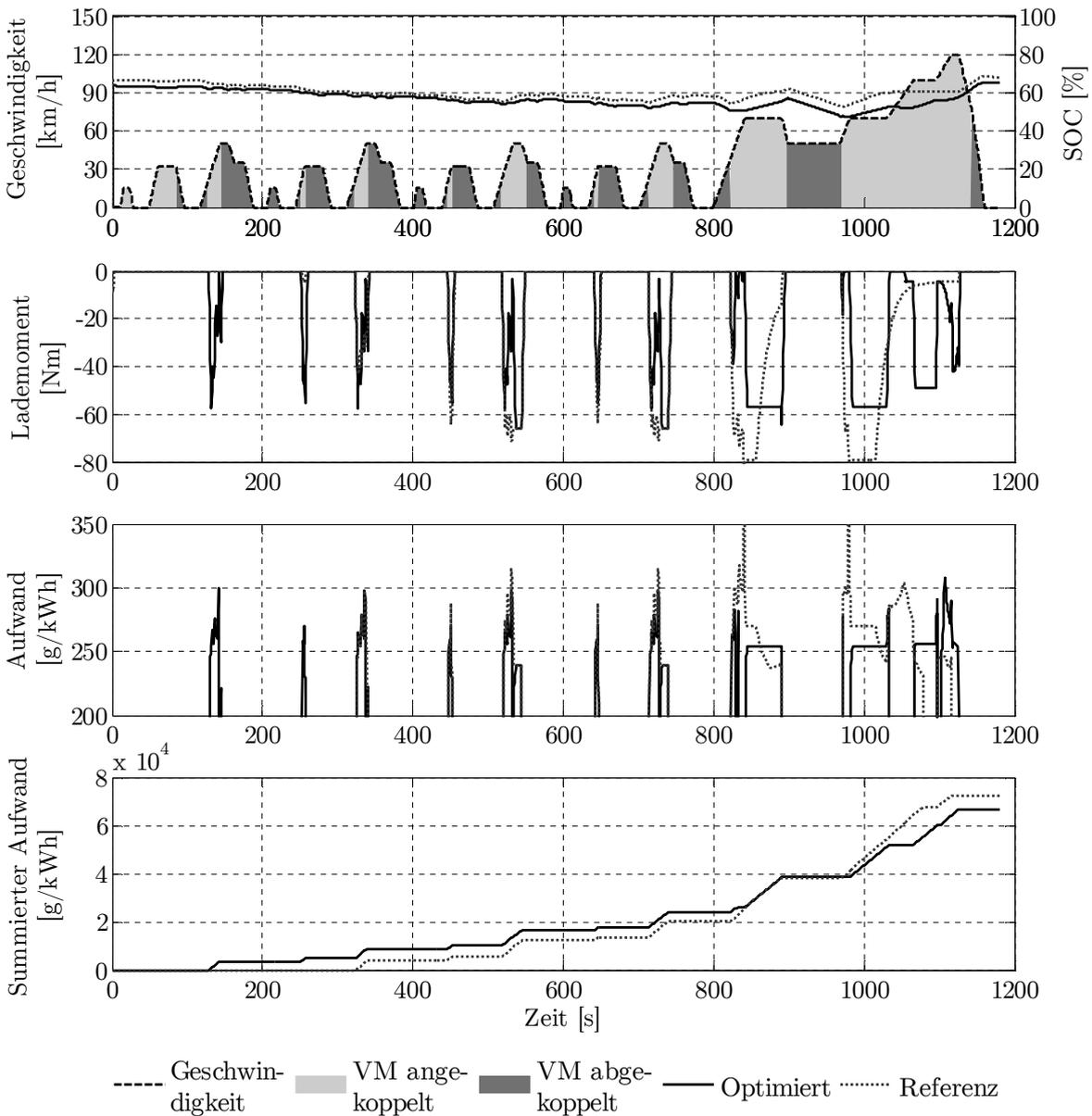


Abb. 5.20: Optimiertes Ladezustandsmanagement im NEFZ: Das Lademoment passt sich dem Betriebspunkt des Fahrzeugs an, so dass der summierte Ladeaufwand am Zyklusende geringer ist.

jedoch im zweiten Teil des Zyklus (Überlandteil) durch die deutlich höhere Effizienz der optimierten Regelung überkompensiert. Die aufsummierten Ladeaufwände des Regelansatzes am Zyklusende sind geringer und es wird ein Verbrauchsvorteil von 1.0 % erzielt. Tabelle 5.11 zeigt, dass der auf die gesamte Zykluslänge bezogene mittlere Aufwand im Vergleich zur Referenzstrategie sinkt. Der SOC-Hub zwischen dem maximalen und minimalen SOC im Zyklus steigt um zwei Prozentpunkte an.

FTP-72 Der FTP-72 weist mehr Rekuperationsphasen als der NEFZ auf. Es steht somit eine höhere Rekuperationsenergie zur Verfügung und der Zyklus hat deshalb ein höheres SOC-Niveau. Die Referenzregelung entlädt fünf mal durch Lastpunktabsenkungen die Batterie, um den SOC abzusenken (siehe Abbildungen A.8 und A.9 auf Seite 156). Die optimierte Regelung verteilt das Laden betriebspunktabhängig derart, dass kein Entladen nötig ist. Es kann ein Verbrauchsvorteil von 0.9 % erzielt werden. Tabelle 5.11 verdeutlicht, dass der mittlere Ladeaufwand im Vergleich zum NEFZ deutlich geringer ist.

	NEFZ		FTP-72	
	Referenz	Optimiert	Referenz	Optimiert
Mittlerer Aufwand [g/kWh]	261	249	236	221
Zeitlicher Anteil Laden [%]	23	23	19	19
SOC-Hub [-]	16	18	17	17
Kraftstoffverbrauch [l/100km]	5.94	5.86	6.55	6.48
Einsparung bzgl. Referenz [%]	1.3		1.1	
Einsparung bzgl. Basisfzg. [%]	1.0		0.9	

Tab. 5.11: Simulationsergebnisse für das optimierte Ladezustandsmanagement: Im NEFZ kann der Verbrauch um 1.0 % verringert werden, im FTP-72 um 0.9 %

Verbrauchsoptimierte Startkoordination des Verbrennungsmotors

Der Zustand des Verbrennungsmotors ist weder in der Dymola-Gesamtfahrzeugsimulation noch in dem im Rahmen dieser Arbeit erstellen Simulinkmodell abgebildet. Der Verbrauchseinfluss der betriebspunktabhängigen Auswahl des Startsystems sowie des optimierten Startablaufs wird anhand der in Kapitel 5.2.3 hergeleiteten Daten und Modelle ermittelt (vgl. auch [11]). Die Referenz bildet der SGR-Start. Dieser hat im NEFZ einen Anteil am Kraftstoffverbrauch von 0.3 % und im FTP-72 von 0.9 %.

NEFZ Wird der E-Maschinenstart mit den optimierten Parametern (vgl. Tabelle A.1) verwendet, so ist er für alle im NEFZ auftretenden Zustarts effizienter als der

SGR-Start. Es kann bzgl. der Starts 0.17 g Kraftstoff eingespart werden, was insgesamt einer prozentualen Einsparung von lediglich 0.03 % entspricht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.14 auf Seite 101 zusammengefasst. Da der Erststart im Stand und bei nicht betriebswarmem Motor erfolgt, wird er nicht in die Analyse einbezogen.

FTP-72 Im Vergleich zum NEFZ ist der optimierte E-Maschinenstart im FTP-72 nicht für jeden Start effizienter als der SGR-Start. Es erfolgen Starts mit einer Zieldrehzahl von mehr als 1430 U/min ausgehend von einem Drehmoment von 85 Nm. In diesen Betriebspunkten ist der SGR-Start effizienter. Deshalb verringert sich die Einsparung bzgl. des Gesamtverbrauchs auf 0.02 %. Tabelle A.2 auf Seite 159 zeigt die Ergebnisse.

5.3.3 Einschränkungen durch Anforderungen des Serenumfelds

In diesem Abschnitt werden – aufbauend auf den Simulationen des vorangegangenen Kapitels – die Auswirkungen der drei Optimierungsansätze auf das Fahrzeugverhalten analysiert. Diese sind mit den Anforderungen einer Implementierung in Serienfahrzeugen abzugleichen. Die Zielsetzung besteht darin, mögliche Einschränkungen der Verbrauchspotenziale zu ermitteln.

Gesamtwirkungsgradoptimale Schaltpunkte des Getriebes

Die Schalthäufigkeit nimmt in beiden Fahrzyklen im Vergleich zur Referenzgangwahl deutlich zu (siehe Abbildungen 5.21 und 5.22). Ein Teil der zusätzlichen Gangwechsel resultiert aus den höheren Gängen in den Konstantfahrphasen in Abhängigkeit von der Betriebsart. Im NEFZ verschlechtern die kurzzeitigen Rückschaltungen vom dritten in den zweiten Gang bei dem Verbrennungsmotorzustart im dritten und vierten Grundzyklus den Fahrkomfort, ebenso die kurzen Rückschaltungen im Überlandteil bei 50 km/h. Problematisch sind zudem die Gangsprünge bei dem Übergang von 50 auf 35 km/h in den Grundzyklen. Im Vergleich zum NEFZ weist der FTP-72 eine nochmals höhere Schalthäufigkeit auf. Diese basiert zum Teil auf Pendelschaltungen im verbrennungsmotorischen Fahren aufgrund von leichten Verzögerungen nach Hochschaltungen. Einen weiteren Einfluss hat der häufige Wechsel zwischen elektrischem Fahren und Rekuperation.

Die Gangwahl kann somit die Anforderungen bzgl. des Fahrkomforts nicht erfüllen. Auch die Fahrdynamik verschlechtert sich teilweise, da durch die größtenteils höheren Drehzahlen in Rekuperationsphasen die Zeit für Zustarts zunimmt. Um einen Kompromiss aus Kraftstoffverbrauch, Fahrleistung und Fahrkomfort zu erzielen, werden Getriebesteuerungen bei der Gangwahl in der Regel den aktuellen Fahrzustand aus [62]: Neben den Betriebsgrößen des Fahrzeugs werden hierbei u. a. Zustände wie

z. B. Beschleunigung und Konstantfahrt erfasst. Daraus leitet ein komplexes Regelwerk die Schaltempfehlung ab. Die Nachbildung oder Analyse eines solchen Regelwerks ist nicht Teil dieser Arbeit. Es wird jedoch überprüft, ob das Schaltverhalten mit Hilfe weiterer Funktionen zu verbessern ist und ob sich dadurch die Verbrauchseinsparung verringert (vgl. auch [81, 75]). Es werden folgende Funktionen entwickelt und in dem Simulationsmodell implementiert:

- Ein Zustart des Verbrennungsmotors wird anhand der Drehzahl- und Momentengradienten prädiiziert. So kann bereits vorab auf die Gangwahl der folgenden Betriebsart übergeblendet werden, um einen Zustart in Verbindung mit einem Gangwechsel oder eine Pendelschaltung zu verhindern. Anhand des SOC wird abgeschätzt, ob eine Lastpunktanhebung oder rein verbrennungsmotorisches Fahren zu erwarten ist.
- Auch ein bevorstehender Gangwechsel wird anhand der Drehzahl- und Momentengradienten prädiiziert. Eine Schaltung wird unterdrückt, wenn der eingelegte Gang und der für den aktuellen sowie den extrapolierten Betriebspunkt ermittelte Wunschgang voneinander abweichen. Rückschaltungen durch einen Beschleunigungswunsch des Fahrers oder Mehrfachschaltungen sind davon nicht betroffen.
- Schaltungen bei dem Übergang in den Schubbetrieb werden nur zugelassen, wenn die Verzögerung länger als eine Sekunde anhält. Auf diese Weise werden Pendelschaltungen vermieden.
- Um die Response bei einem Zustart nach einer Rekuperation mit abgekoppeltem Verbrennungsmotor sicherzustellen, können je nach Fahrzeuggeschwindigkeit minimale Getriebeeingangsdrehzahlen festgelegt werden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass der Verbrennungsmotor auch ohne Rückschaltung in einem Drehzahlbereich zugestartet wird, in dem er schnell Moment produzieren kann. Bei geringen Fahrzeuggeschwindigkeiten kann die E-Maschine die Dynamik ausgleichen. Tabelle 5.12 zeigt die definierten Geschwindigkeitsgrenzen und Mindestdrehzahlen.

Geschwindigkeit [km/h]	< 50	≥ 50	≥ 55	≥ 65	≥ 75
Eingangsdrehzahl [U/min]	800	1000	1100	1200	1300

Tab. 5.12: Mindestdrehzahlen bei abgekoppelter Rekuperation

- Während der Rekuperation werden Hochschaltungen unterdrückt. Dies verhindert Pendelschaltungen bei einer leichten Rücknahme des Verzögerungswunsches und Hochschaltungen bei dem Übergang vom Zugbetrieb in eine geringfügige Verzögerung.

- Bei einer Rücknahme des Fahrerwunsches, die kürzer als eine halbe Sekunde ist, werden Hochschaltungen unterdrückt.
- Nach einer Rückschaltung wird eine Hochschaltung für zwei Sekunden unterdrückt.
- Bei einer geforderten Rückschaltung aufgrund eines Beschleunigungswunsches wird zunächst überprüft, ob durch ein zusätzliches Moment der E-Maschine das gewünschte Getriebeausgangsmoment eingestellt werden kann. Im Falle einer Lastpunktanhebung wird eine Reduzierung des E-Maschinenmoments und im elektrischen Fahren das maximale Ausnutzen der E-Maschinenleistung geprüft. Falls dadurch das geforderte Getriebeeingangsmoment darstellbar ist, wird die Rückschaltung unterdrückt.

Der Einfluss der vorgestellten Funktionen wird im NEFZ und im FTP-72 analysiert. Im NEFZ (siehe Abbildung 5.21) können die Pendelschaltungen vor dem Zustart des Ver-

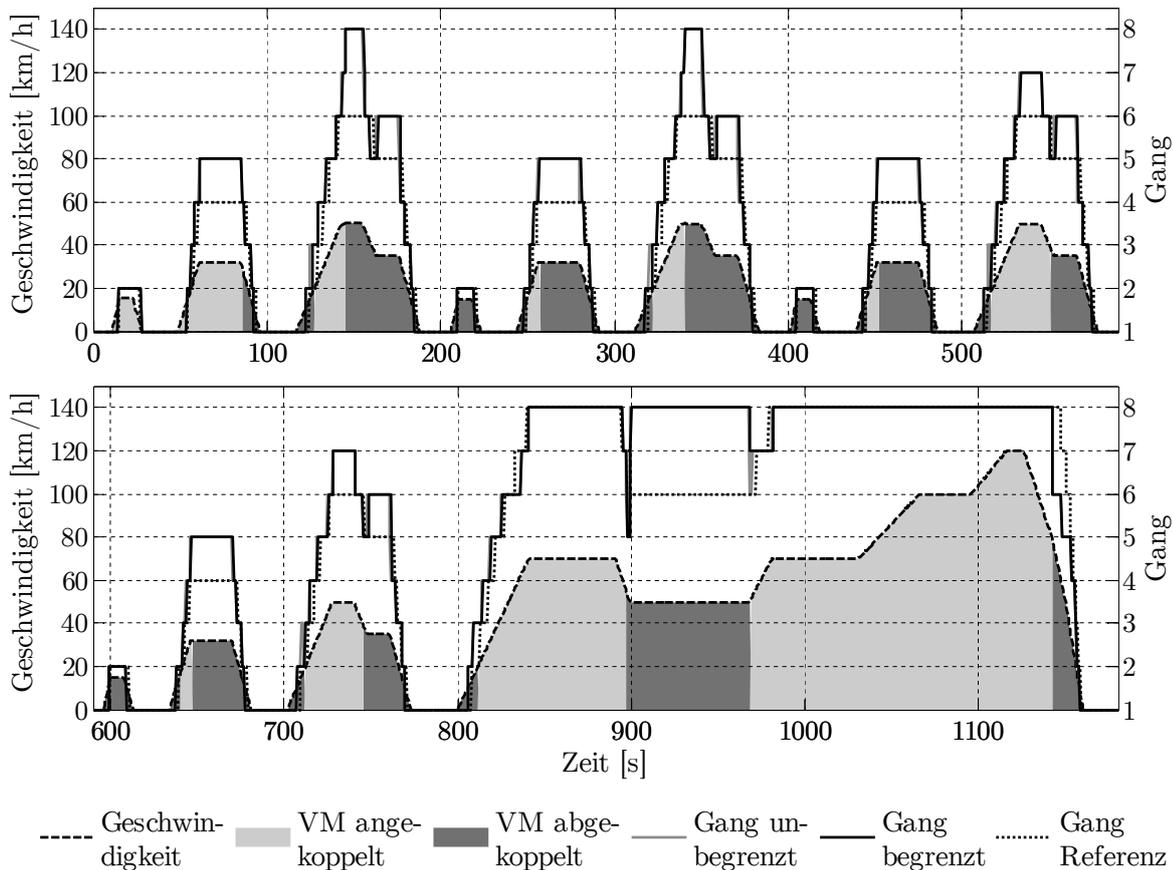


Abb. 5.21: Wirkungsgradoptimale Gangwahl im NEFZ mit und ohne Limitierungen: Nur wenige Gangsprünge können mittels der Funktionen zur Schaltunterdrückung verhindert werden.

brennungsmotors sowie die kurze Rückschaltung in den sechsten Gang im Überlandteil vermieden werden. Die übrigen Gangsprünge treten weiterhin auf. Die Rückschaltungen in der abgekoppelten Rekuperation sind durch die für den Verbrennungsmotorstart vorgegebenen Mindestdrehzahlen festgelegt. In der gekoppelten Rekuperation muss aufgrund der Drehzahlgrenze des Verbrennungsmotors zurückgeschaltet werden. Das Einsparpotenzial verringert sich absolut lediglich um 0.1 % auf 1.5 %.

Abbildung 5.22 zeigt die Gangverläufe für den FTP-72 mit und ohne Limitierungen. In diesem Zyklus verringern die Funktionen die Gangsprünge während des elektrischen Fahrens sowie die Pendelschaltungen erheblich. Auch an diesem Fahrzyklus wird deutlich, dass Rückschaltungen aufgrund der Drehzahlgrenze des Verbrennungsmotors nicht vermieden werden können. Zudem resultieren Rückschaltungen aus der Drehzahlgrenze der E-Maschine. Das Einsparpotenzial verringert sich absolut um 0.1 % auf 1.7 %.

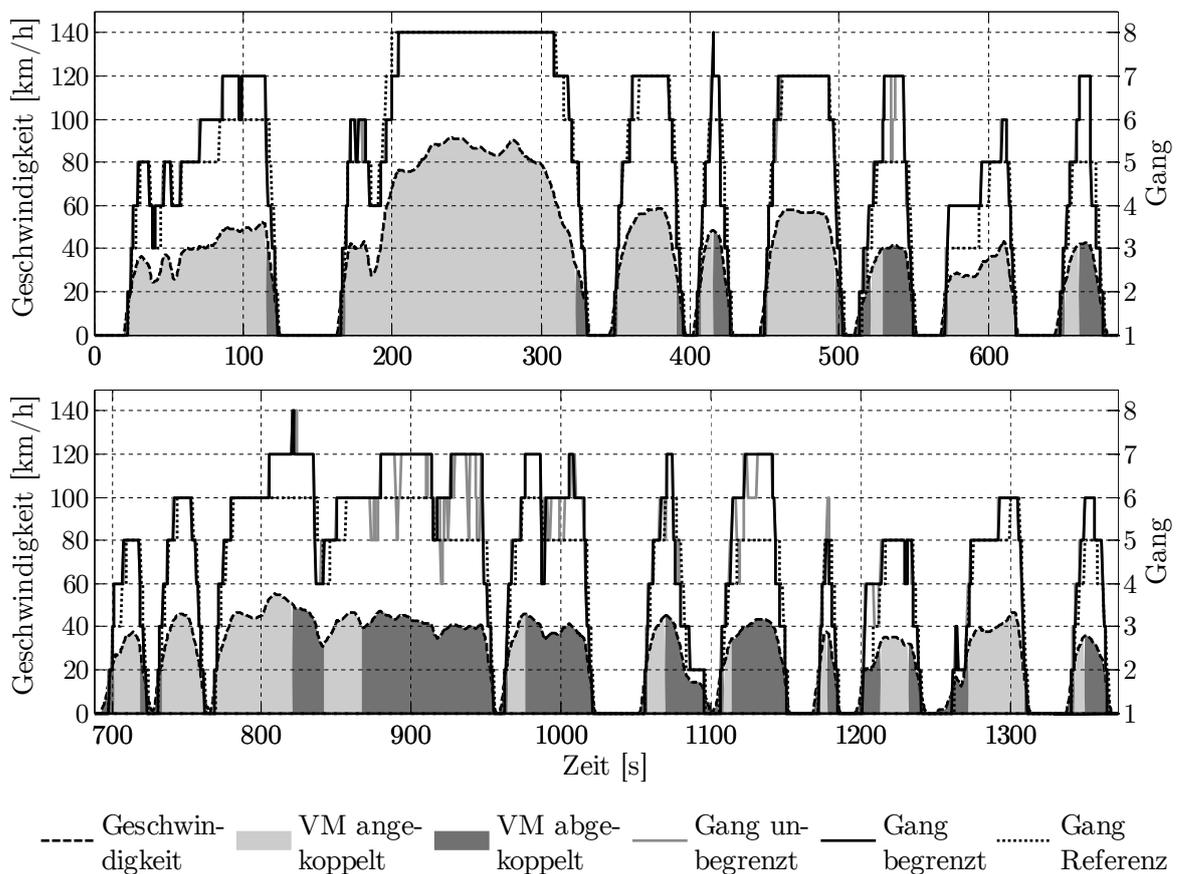


Abb. 5.22: Wirkungsgradoptimale Gangwahl im FTP-72 mit und ohne Limitierungen: Eine Vielzahl von Gangsprüngen kann mittels der Funktionen zur Schaltunterdrückung verhindert werden.

Tabelle 5.13 fasst die Auswirkungen der optimierten Gangwahl sowie der entwickelten Schaltbegrenzungen auf die Schalthäufigkeit zusammen. Die Häufigkeit von Gangwechseln steigt insbesondere in Betriebsarten mit abgekoppelten Verbrennungsmotor an. Dabei erfolgt keine Drehzahlrückmeldung an den Fahrer und es treten kleinere Lasten auf. Deshalb sind diese Schaltvorgänge unauffälliger als im gekoppelten Betrieb.

Optimierte Gangwahl	NEFZ			FTP-72		
	Gesamt	oVM	mVM	Gesamt	oVM	mVM
Ohne Schaltbegrenzungen	46 %	64 %	25 %	70 %	112 %	33 %
Mit Schaltbegrenzungen	32 %	45 %	18 %	31 %	44 %	20 %

Tab. 5.13: Erhöhung der Schalthäufigkeit mit optimierter Gangwahl: Insbesondere im FTP-72 nimmt die Anzahl der Gangwechsel ohne Schaltbegrenzungen deutlich zu (oVM: Verbrennungsmotor abgekoppelt, mVM: Verbrennungsmotor angekoppelt).

Die Analyse zeigt, dass nur geringe Potenzialeinbußen auftreten, wenn die wirkungsgradoptimale Gangwahl im Sinne der Fahrbarkeit und des Fahrkomforts modifiziert wird.

Aufwand- und nutzenbasiertes Ladezustandsmanagement der Hochvoltbatterie

Die Lademomente werden aufgrund von Anforderungen hinsichtlich der Fahrzeugakustik in Abhängigkeit vom Betriebspunkt limitiert (vgl. Abschnitt 4.3.1). Dies ist in den Simulationen abgebildet, so dass dadurch kein weiterer Einfluss auf die ausgewiesenen Einsparpotenziale im NEFZ und im FTP-72 besteht. Die akustischen Begrenzungen beeinflussen jedoch die Mittelwertberechnung des Ladeaufwands. Ist beispielsweise der SOC sehr gering, so wird durch das Ladezustandsmanagement das Laden mit maximalem Aufwand angesteuert. Aufgrund der Limitierungen wird jedoch mit deutlich geringerem Aufwand geladen, so dass der Mittelwert nur wenig ansteigt. Das Ziel, in Phasen mit hohem Energiebedarf durch einen steigenden Mittelwert auch höhere SOC-Niveaus zu erreichen, kann somit nicht in allen Betriebszuständen erfüllt werden. Dies ist in der Funktion zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit stellt die Vorgabe eines Ziel-SOC-Niveaus dar, das vom Ladezustandsmanagement langfristig einzuregeln ist (siehe Abschnitt 6.2). Diese Funktion hat jedoch keinen Einfluss auf die Einsparpotenziale in gesetzlichen Fahrzyklen.

Außerdem muss der Gradient des angeforderten Lademoments auf 15 Nm pro Sekunde begrenzt werden. Dadurch ist sichergestellt, dass der Verbrennungsmotor die

Momentenänderungen kompensieren kann und somit das Fahrverhalten nicht beeinträchtigt wird. Das Simulationsmodell wird dahingehend erweitert. Es besteht kein in der Simulationsgenauigkeit liegender Verbrauchseinfluss.

Verbrauchsoptimierte Startkoordination des Verbrennungsmotors

Im Rahmen der Paramtervariation bzgl. des Zustartablaufs wird die Effizienz des E-Maschinenstarts unter anderem durch den Entfall des Schlupfs am Anfahrlement gesteigert. Dies führt zu Komfortbeeinträchtigungen, die vom Fahrer direkt wahrgenommen werden können. Eine Abhilfe stellt die Dämpfung von Schwingungen durch die E-Maschine dar. Sollte dies nicht möglich sein, so ist aufgrund der Anforderungen hinsichtlich des Fahrkomforts im Serieneinsatz ein Schlupf im Antriebsstrang nötig (vgl. auch [11]). Um die Auswirkung zu beurteilen, werden die beiden Startvarianten zusätzlich bei einer festen Differenzdrehzahl von 50 U/min an dem Anfahrlement verglichen. Abbildung 5.23 zeigt den prozentualen Unterschied zwischen E-Maschinen- und SGR-Start. Es zeigt sich auch in diesem Fall eine starke Abhängigkeit von der

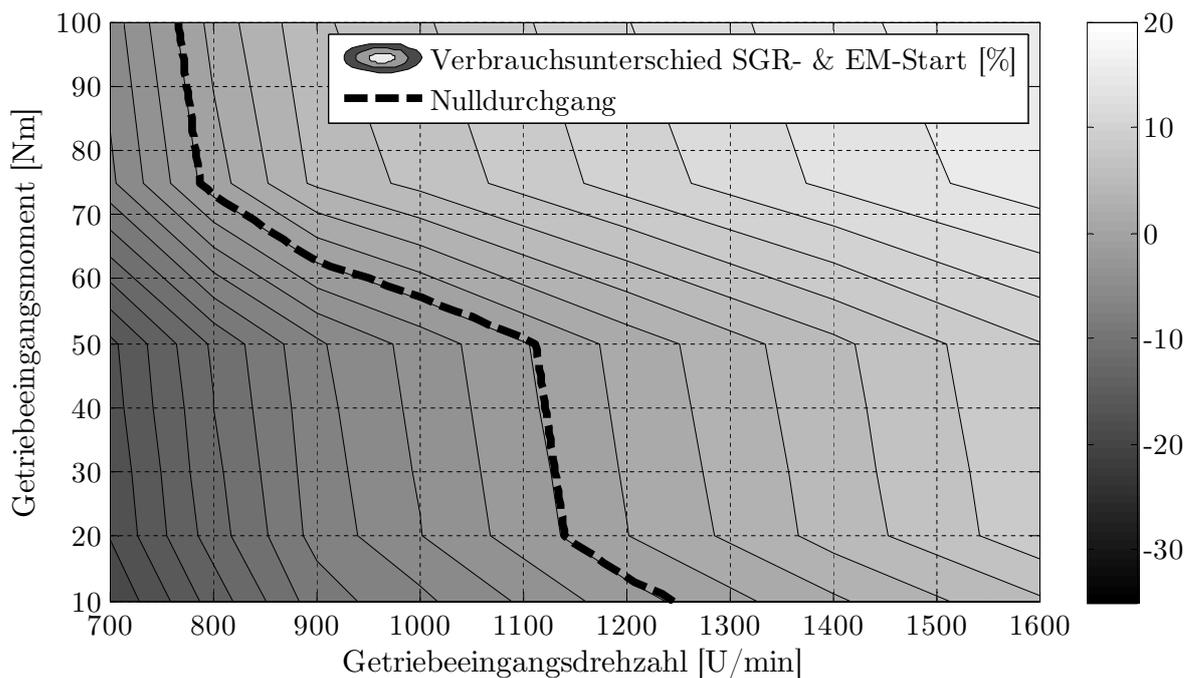


Abb. 5.23: Prozentualer Verbrauchsvorteil der SGR-Starts im Vergleich zu E-Maschinenstarts, die mit einem Schlupf von 50 U/min an dem Anfahrlement durchgeführt werden: Der Bereich mit Verbrauchsvorteilen für den E-Maschinenstart verkleinert sich im Vergleich zu Abbildung 5.18 (Positive Werte: Vorteil SGR; Negative Werte: Vorteil E-Maschine).

Getriebeeingangsdrehzahl. Die Wechselwirkung mit dem Getriebeeingangsmoment nimmt bzgl. Abbildung 5.18 (siehe Seite 86) zu. Der E-Maschinenstart erreicht lediglich noch einen maximalen Vorteil von 19 %. Der Bereich, in dem dieser Start effizienter ist als der Start per SGR verkleinert sich. Unter diesen Prämissen befinden sich die Zustarts im NEFZ in Betriebspunkten, in welchen der Start mittels SGR effizienter ist (vgl. Tabelle 5.14). Das Getriebeeingangsmoment ist stets größer als 50 Nm und die Getriebeeingangsdrehzahl liegt über 1100 U/min. Somit kann kein Verbrauchsvorteil mehr im Vergleich zum Referenzstart erzielt werden.

Auch im FTP-72 kann bei einem schlupfenden Anfahrlement während des E-Maschinenstarts kein Verbrauchsvorteil mehr erreicht werden (siehe Tabelle A.2 auf Seite 159).

Nr.	M_{GE} [Nm]	n_{GE} [U/min]	Kraftstoffverbrauch [g]		
			SGR (Referenz)	E-Maschine (optimierte Parameter mit Schlupf)	E-Maschine (optimierte Parameter ohne Schlupf)
1	0	0	Erststart	Erststart	Erststart
2	51.5	1170	0.2152	0.2196	0.1910
3	64.9	1203	0.2199	0.2360	0.2035
4	51.8	1168	0.2149	0.2195	0.1908
5	64.8	1204	0.2201	0.2363	0.2038
6	51.8	1168	0.2149	0.2195	0.1908
7	64.6	1210	0.2212	0.2376	0.2051
8	72.1	1118	0.2077	0.2251	0.1908
9	108.2	1178	0.2163	0.2414	0.2038
10	155.9	1125	0.2088	0.2347	0.1939
Summe aller Starts [g]			1.9391	2.0697	1.7734
Änderung des Verbrauchs bzgl. SGR [%]			Referenz	+7	-9
Auswirkung auf den Zyklusverbrauch [%]			Referenz	+0.02	-0.03

Tab. 5.14: Kraftstoffverbräuche für den Zustart im NEFZ: Der Zyklusverbrauch kann durch den Lösungsansatz nicht nennenswert reduziert werden (GE: Getriebeeingang).

5.4 Verknüpfung der Optimierungsansätze in einer übergeordneten Betriebsstrategie

Die vorangegangenen Abschnitte erläutern Optimierungsansätze für drei Freiheitsgrade der energetischen Betriebsstrategie: Gesamtwirkungsgradoptimale Schaltpunkte des Getriebes, ein aufwand- und nutzenbasiertes Ladezustandsmanagement der Hochvoltbatterie und eine optimierte Startkoordination des Verbrennungsmotors. Die Ansätze stehen in Wechselwirkung zueinander und können für den Einsatz in einer übergeordneten Betriebsstrategie miteinander verknüpft werden. Abbildung 5.24 verdeutlicht die Schnittstellen. Gangwahl, Ladezustandsmanagement und Startkoordination verarbeiten den Fahrzeugbetriebspunkt und Vorgaben der Betriebsartenkoordination sowie der Situationserkennung und -prädiktion (vgl. [4, 92]). Daraus generieren die Funktionen die Stellgrößen Gang, Lade- bzw. Entladeleistung (Lastpunktverschiebung) und Startsystem sowie -parameter. Das Ladezustandsmanagement stellt das zentrale Element der energetischen Betriebsstrategie dar. Die gewählten Leistungen der Lastpunktanhebungen fließen in die Gangwahl dieser Betriebsart ein, da sie Auswirkungen auf den

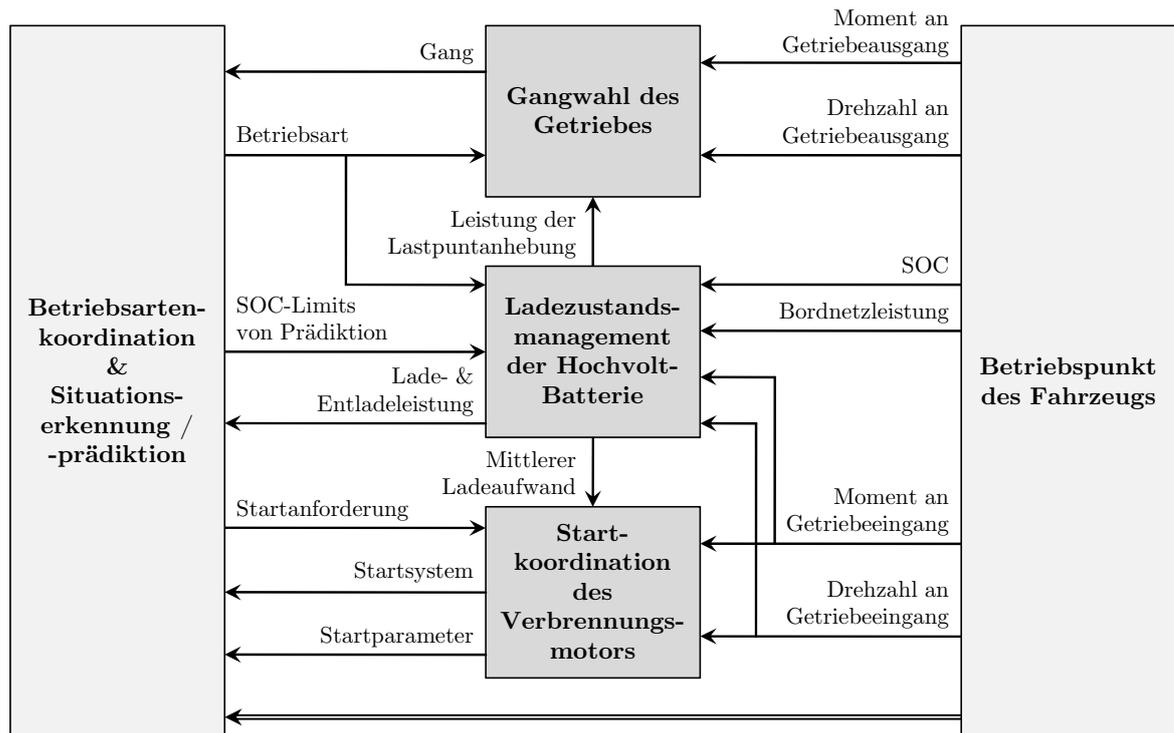


Abb. 5.24: Verknüpfung der Optimierungsansätze in einer übergeordneten Betriebsstrategie: Das Ladezustandsmanagement übergibt die Leistung der Lastpunktverschiebung an die Gangwahl und den mittleren Ladeaufwand an die Startkoordination.

Gesamtwirkungsgrad haben. Während des Ladens kommt das Gangwahlkennfeld zum Einsatz, welches anhand der mittleren Ladeleistung berechnet wurde. Darüber hinaus bestimmt das Ladezustandsmanagement den mittleren Ladeaufwand, der ein Maß für den Mehrverbrauch bezogen auf die generierte Batterieleistung ist. Der Aufwand ist eine Eingangsgröße der Startkoordination. Daraus wird der Kraftstoffverbrauch ermittelt, der zur Erzeugung der für die Starts nötigen elektrischen Energie durch Lastpunktanhebungen nötig ist.

Die entwickelten Lösungsansätze können somit auch im Verbund in der energetischen Betriebsstrategie eingesetzt werden. Die Grundlage dazu bildet die übergeordnete Verknüpfung der Einzelregelungen.

5.5 Bewertung der Ergebnisse und der Realisierbarkeit

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei Optimierungsansätze für die Betriebsstrategie entwickelt:

- Gesamtwirkungsgradoptimale Schaltpunkte des Getriebes
- Aufwand- und nutzenbasiertes Ladezustandsmanagement der Hochvoltbatterie
- Verbrauchsoptimierte Startkoordination des Verbrennungsmotors

Auf der Basis der Simulationsergebnisse wird nun abschließend bewertet, welche Optimierungsansätze für eine weitere Analyse in die Steuergerätesoftware des realen Fahrzeuges integriert werden.

Die Startkoordination wählt in Abhängigkeit von Getriebeingangsmoment und -drehzahl von den beiden Startsystemen Traktionsmaschine und Startergenerator im Riemen (SGR) dasjenige mit dem geringeren Kraftstoffbedarf aus und gibt verbrauchseffiziente Startparameter vor. Dieser Optimierungsansatz ermöglicht in beiden Fahrzyklen lediglich eine unterhalb der Simulationsgenauigkeit liegende Verbrauchseinsparung. Unter Berücksichtigung der Komfortanforderungen für einen Serieneinsatz (Schlupf an dem Anfahrlement, vgl. Abschnitt 5.3.3) ist kein Potenzial mehr ausweisbar. Somit ist eine Umsetzung des Ansatzes in Versuchsfahrzeugen nicht zielführend.

Die wirkungsgradoptimale Gangwahl wählt in Abhängigkeit von Getriebeausgangsmoment und -drehzahl sowie der Betriebsart den Gang, bei dem sich der höchste Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs einstellt. Dieser Optimierungsansatz reduziert in Simulationen den Kraftstoffverbrauch im NEFZ um 1.6 % und im FTP-72 um 1.8 %. Allerdings nimmt die Schalthäufigkeit im Vergleich zur Referenzgangwahl deutlich zu. Funktionen zur Beruhigung des Schaltverhaltens reduzieren diesen Anstieg von 46 % auf 32 % im NEFZ und von 70 % auf 31 % im FTP-72. Dadurch verrin-

gern sich die Verbrauchspotenziale jeweils absolut um 0.1 %. Es können jedoch nicht alle Gangsprünge verhindert werden. Insbesondere die optimierte Gangwahl für die Betriebsart Rekuperation erfüllt diesbezüglich nicht die Anforderungen hinsichtlich des Fahrkomforts. Ohne diese Betriebsart verbleibt im NEFZ eine Einsparung von ca. 1.2 % und im FTP-72 von ca. 1.5 % (vgl. Tabellen 5.9 und 5.10). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Einsparung während des verbrennungsmotorischen Fahrens nicht aufgrund des hybriden Antriebsstrangs erzielt wird. Sollte der Lösungsansatz in das Serienfahrzeug integriert werden, so ist davon auszugehen, dass das konventionelle Basisfahrzeug die verbrauchsoptimierten Schaltpunkte übernimmt. Dadurch würde das Einsparpotenzial für die Betriebsart Verbrennungsmotorisches Fahren entfallen und sich für die Betriebsart Lastpunktanhebung deutlich verringern. Da die optimierte Gangwahl während der Rekuperation aus Gründen des Fahrkomforts nicht genutzt werden kann (siehe oben), verbleibt somit im Worst Case lediglich das elektrische Fahren mit einem Potenzial von 0.5 % im NEFZ und 0.4 % im FTP-72. Doch auch in diesem Fall ist die starke Wechselwirkung zwischen der Gangwahl und dem Fahrverhalten als kritisch zu bewerten. Im Falle einer Umsetzung der Funktion in der Serienentwicklung ist es sehr wahrscheinlich, dass im Rahmen der Optimierung der Fahrdynamik und des Fahrkomforts in Fahrzeugerprobungen Änderungen an den Gangwahlkennfeldern vorgenommen werden. Diese könnten die Einsparpotenziale weiter reduzieren. Somit stehen voraussichtliche Einsparpotenziale von kleiner als 0.5 % einem hohen Funktionsentwicklungs- und Absicherungsaufwand gegenüber. Aus diesen Gründen wird der Lösungsansatz im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht in Versuchsfahrzeugen umgesetzt.

Im Falle des Ladezustandsmanagements wird auf der Basis der spezifischen Verbrauchsänderung in [g/kWh] ein maximaler Ladeaufwand und minimaler Entladenutzen definiert. Die Vorgabe erfolgt im Wesentlichen abhängig vom aktuellen SOC. Die Ladeleistung resultiert aus Getriebeeingangsmoment und -drehzahl sowie dem maximalen Aufwand, die Entladeleistung aus Getriebeeingangsmoment und -drehzahl sowie dem minimalen Nutzen. Das Ladezustandsmanagement reduziert in Simulationen den Verbrauch im NEFZ um 1.0 % und im FTP-72 um 0.9 %. Hinsichtlich des Fahrkomforts sind Limitierungen der Lademomente nötig, um negative Auswirkungen auf die Fahrzeugakustik zu vermeiden. Diese sind in den Simulationen bereits enthalten. Das Ladezustandsmanagement hat ausreichend Energie zu generieren, um die Anforderungen hinsichtlich der Ausprägung des elektrischen Fahrens zu erfüllen. Es bestehen keine weiteren Auswirkungen auf das Fahrverhalten und den Fahrkomfort. Deshalb bietet die Funktion die Chance, die Potenziale auch im Fahrzeugverbund zu erreichen. Sie wird mit den Methoden des Serienentwicklungsprozesses in die Steuergerätesoftware des untersuchten Fahrzeugs integriert. Das folgende Kapitel beschreibt die Funktionsentwicklung und -integration. Der Lösungsansatz wird anhand von Fahrzeugmessungen verifiziert. Die Analyse des real erreichbaren Einsparpotenzials erfolgt an einem Prüfstand, an dem der gesamte Antriebsstrang des untersuchten Fahrzeugs dargestellt ist.

6 Integration des optimierten Ladezustandsmanagements in ein Serienhybridfahrzeug

Das vorangegangene Kapitel stellt drei Optimierungsansätze der Betriebsstrategie vor: Gesamtwirkungsgradoptimale Schaltpunkte des Getriebes, ein aufwand- und nutzenbasiertes Ladezustandsmanagement der Hochvoltbatterie und eine verbrauchsoptimierte Startkoordination des Verbrennungsmotors. Diese werden in Simulationen der Fahrzyklen NEFZ und FTP-72 hinsichtlich der Verbrauchseinsparung analysiert. Zusätzlich wird überprüft, ob die Ansätze den Anforderungen der Serienentwicklung genügen.

Das entwickelte Ladezustandsmanagement erfüllt die gestellten Anforderungen. Außerdem lässt die Analyse den Schluss zu, dass die simulierten Einsparpotenziale von ca. 1 % zu großen Teilen auch im realen Fahrzeug erreichbar sind. Der Lösungsansatz wird deshalb in die Funktionsarchitektur des untersuchten Serienhybridfahrzeugs integriert. Hierbei werden die Methoden des Serienentwicklungsprozesses genutzt. Dieses Kapitel beschreibt Funktionsarchitektur, -entwicklung und -test. Abschließend wird in Prüfstandsmessungen die real erreichbare Verbrauchseinsparung analysiert.

6.1 Funktionsarchitektur

Dieser Abschnitt fasst zunächst den Lösungsansatz des Ladezustandsmanagements zusammen. Daraufhin wird er an die Anforderungen des Funktions- und Softwareentwicklungsprozesses angeglichen und in die Fahrzeuggesamtarchitektur integriert.

6.1.1 Architektur des Ladezustandsmanagements

Abschnitt 5.2.2 stellt den Lösungsansatz des aufwand- und nutzenbasierten Ladezustandsmanagements vor. Es handelt sich um eine Kombination von Offline- und Onlineberechnungen, die Abbildung 6.1 zusammenfasst. Die Offlinealgorithmen (vgl. Seite 64) ermitteln die Lade- bzw. Entladeleistungen in Abhängigkeit von Getriebeeingangsmoment und -drehzahl sowie dem maximalen Aufwand bzw. minimalen Nutzen. Es handelt sich somit um dreidimensionale Zuordnungen (Kennfelder), die in der Funktion

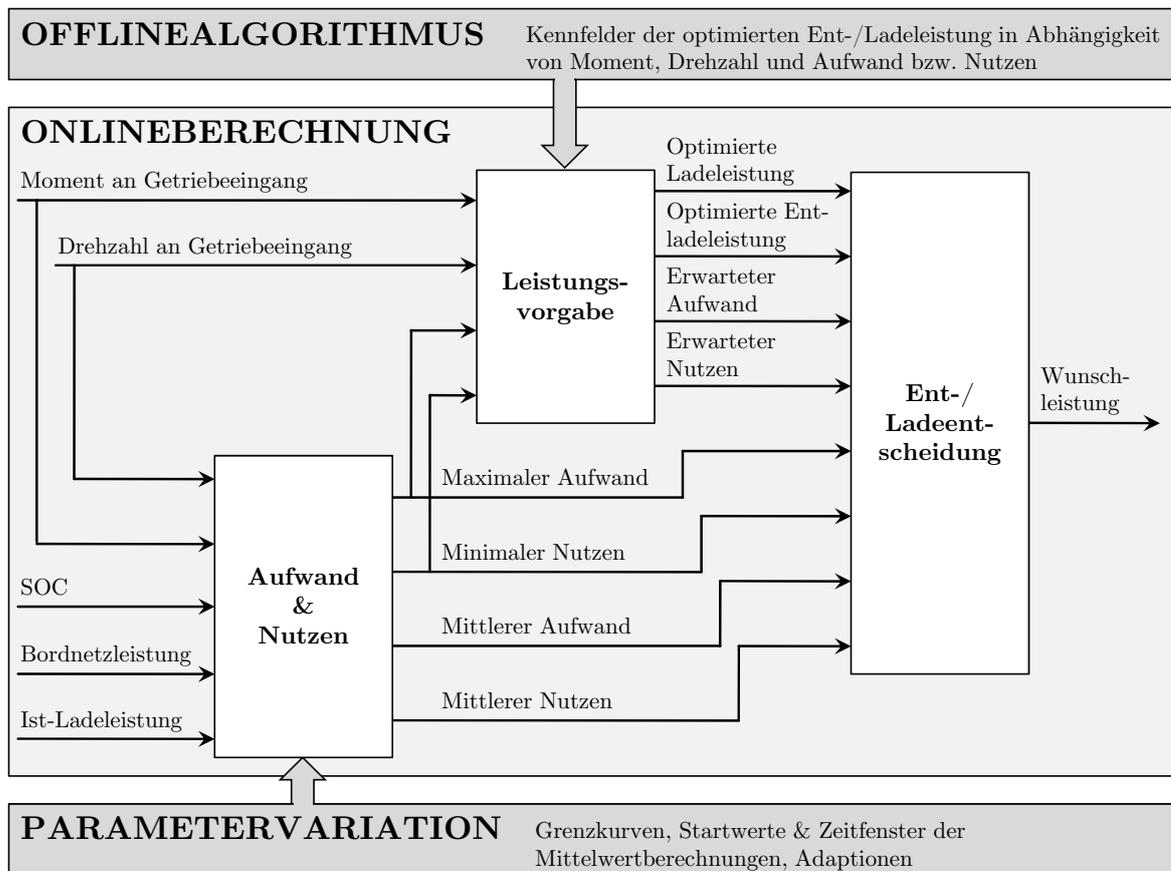


Abb. 6.1: Funktionsarchitektur des Ladezustandsmanagements: In einem Algorithmus und einer Parametervariation offline erzeugte Daten fließen in die Funktion auf dem Steuergerät ein.

„Leistungs-vorgabe“ hinterlegt sind. Um verbrauchseffiziente Grenzkurven für den Aufwand und Nutzen zu erzielen, erfolgt zudem ebenfalls offline eine Parametervariation der Freiheitsgrade in der Funktion „Aufwand & Nutzen“ (vgl. Seite 67).

Die Onlineberechnung auf dem Fahrzeugsteuergerät ermittelt in Abhängigkeit von den Fahrzeugbetriebsgrößen den maximalen Aufwand bzw. minimalen Nutzen. Hierbei sind neben dem SOC als zusätzliche Freiheitsgrade die Bordnetzversorgung (vgl. Gleichungen 5.23 und 5.24 auf Seite 67) sowie die Schnittstellen zur Situationserkennung und -prädiktion vorgesehen. Außerdem sollen die Grenzkurven in Abhängigkeit eines Ziel-SOC variiert werden (vgl. Abschnitt 5.3.3, Seite 99).

6.1.2 Anforderungen des Serienentwicklungsprozesses

Abschnitt 5.1.1 beschreibt die spezifischen Anforderungen der Serienentwicklung von Hybridfahrzeugen. In Bezug auf die Integration des Optimierungsansatzes in die Steuergerätesoftware sind zwei wesentliche Anforderungen zu berücksichtigen:

- Rechen- und Speicherkapazität des Steuergeräts
- Modellierungsrichtlinien der automatisierten Codegenerierung

Rechen- und Speicherkapazität des Steuergeräts

Die Rechen- und Speicherkapazität des Steuergeräts begrenzt die Auflösung der Kennfelder und -linien. In der Regel sind maximal 22 Stützstellen einer Achse zulässig. Die in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten Leistungskennfelder weisen eine Auflösung von 121 mal 141 auf. Deshalb werden die Achsen im Offlinealgorithmus angepasst. Hierbei wird in dem für den Fahrbetrieb relevanten Bereich kleiner Drehzahlen und Momente eine höhere Auflösung gewählt (siehe Abbildung A.10 auf Seite 160). Durch die reduzierte Auflösung bestehen kaum Abweichungen zum ursprünglichen Kennfeld (siehe Abbildung 5.13 auf Seite 74). Simulationen des NEFZ und FTP-72 bestätigen, dass die neuen Kennfelder keinen Einfluss auf die ermittelten Verbrauchspotenziale haben.

Modellierungsrichtlinien der automatisierten Codegenerierung

Die Modellierungsrichtlinien erlauben lediglich Kennfelder mit zwei Eingängen. Somit können die drei Steuergrößen für die Lade- und Entladeleistungen nicht direkt in je einem Kennfeld verarbeitet werden. Die dreidimensionale Zuordnung ist durch eine Kombination aus zweidimensionalen Zuordnungen darzustellen. Hierzu werden zwei Ansätze erarbeitet:

- Sektormodell
- Ebenenmodell

Sektormodell Das Sektormodell ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Es fasst die Betriebspunkte am Getriebeeingang (Moment und Drehzahl) zu Sektoren zusammen. Die Nummer des Sektors stellt die Ausgangsgröße des ersten Kennfeldes dar. Weitere Kennfelder ordnen jeder Sektornummer in Abhängigkeit von dem maximalen Aufwand bzw. minimalen Nutzen die Lade- bzw. Entladeleistung zu. Die Anzahl und die Platzierung der Sektoren bestimmt die Genauigkeit des Modells. Deshalb wird ein Algorithmus entwickelt, der die Sektoren automatisiert festlegt. Das Ziel besteht darin, die originalen 3D-Kennfelder bestmöglich abzubilden. Der Algorithmus analysiert

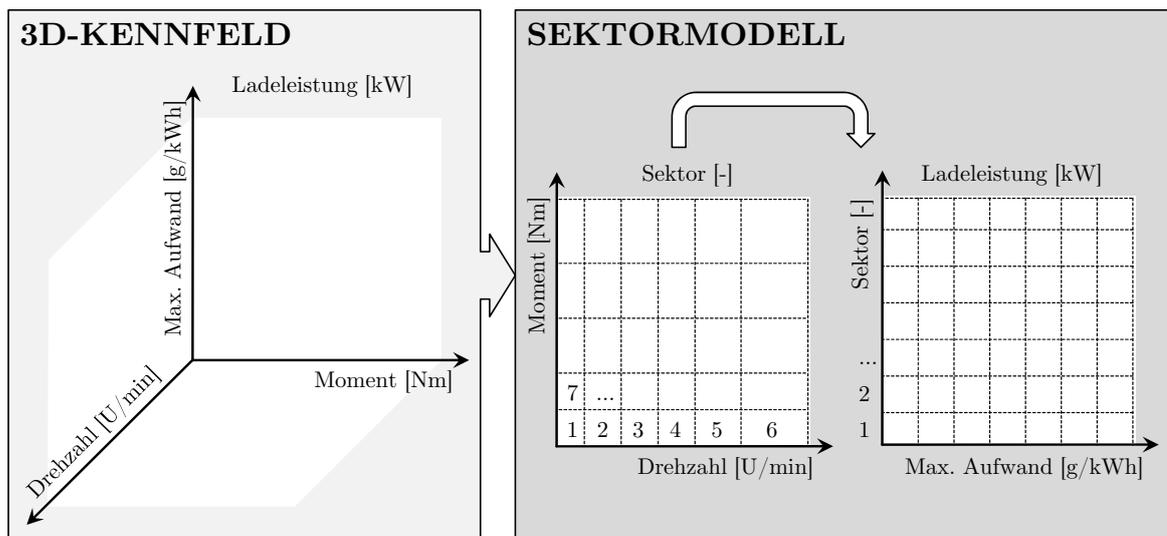


Abb. 6.2: Sektormodell zur Überführung des 3D-Systems in zwei 2D-Systeme beispielhaft für die Lastpunktanhebung: Die Betriebspunkte werden in Sektoren unterteilt, denen in Abhängigkeit vom maximalen Aufwand jeweils eine Ladeleistung zugeordnet wird.

die 3D-Leistungskennfelder mit vorab definierten Werten für Aufwand bzw. Nutzen (Ebenen im 3D-Kennfeld). Je Kennfeldpunkt der Ebenen wird die Leistungsdifferenz zu den benachbarten Werten der Drehzahl- und Drehmomentachse berechnet. Diese Gradienten werden für jede Stützstelle der beiden Achse aufsummiert. Die Berechnung erfolgt für alle definierten Werte für Aufwand bzw. Nutzen. Im Anschluss ermittelt der Algorithmus den Mittelwert der Gradienten über die Aufwand- bzw. Nutzenebenen. Die Sektorgrenzen werden an den Drehzahl- und Momentenstützstellen platziert, an denen die größten mittleren Gradienten auftreten. Aufgrund der zulässigen Kennfelddimensionen ist die Anzahl der Sektorgrenzen limitiert. Deshalb berücksichtigt der Algorithmus einen vorgegebenen Mindestabstand zwischen zwei Grenzen. Abschließend werden die zu den Sektoren gehörenden Lade- bzw. Entladeleistungen ermittelt und in dem zweiten Kennfeld abgelegt. Hierzu wird je Sektor der Mittelwert der in diesem Bereich im 3D-Kennfeld enthaltenen Leistungen gebildet.

Ebenenmodell In dem Ebenenmodell werden als maximaler Aufwand bzw. minimaler Nutzen nur definierte Werte zugelassen. In Abbildung 6.3 sind beispielsweise drei maximale Aufwände vorgegeben: 230, 250 und 270 g/kWh. Somit werden drei Ebenen aus dem 3D-Kennfeld entnommen, die jeweils ein 2D-Kennfeld darstellen. Das Verhalten der ursprünglichen Zuordnung wird durch eine Überblendung zwischen den Kennfeldausgängen in Abhängigkeit von dem maximalen Aufwand angenähert. Die Wahl des maximalen Aufwands und minimalen Nutzens als jeweils konstanten Para-

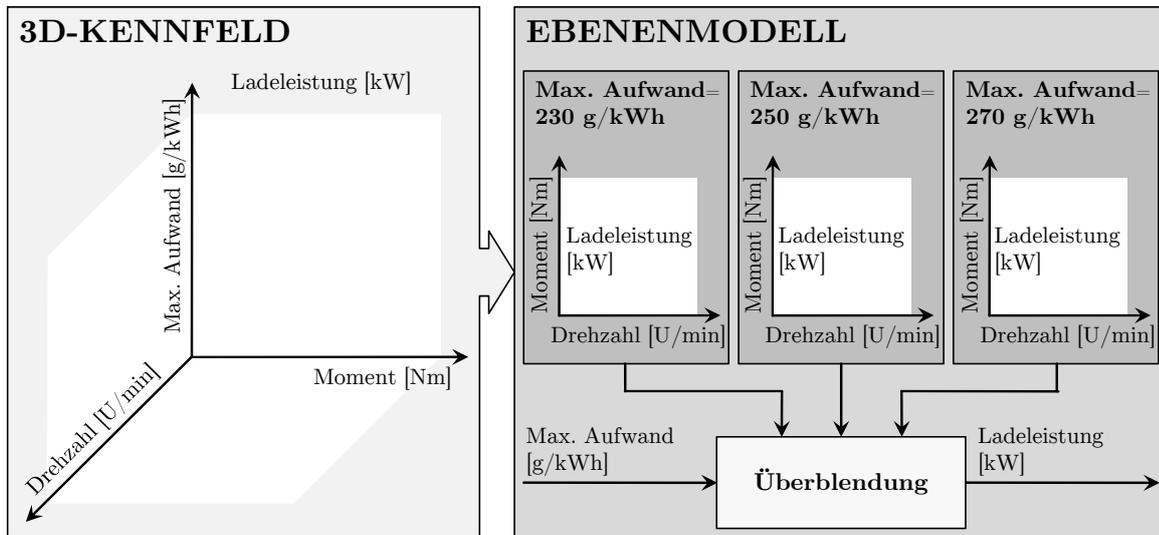


Abb. 6.3: Ebenenmodell zur Überführung des 3D-Systems in zwei 2D-Systeme beispielhaft für Lastpunktanhebung und drei Ebenen: Jedem Betriebspunkt werden Ladeleistungen für drei Aufwandsebenen zugeordnet, zwischen denen in Abhängigkeit vom maximalen Aufwand übergeblendet wird.

meter basiert auf deren im Vergleich zu Drehzahl und Moment deutlich geringeren Zeitvarianz. Die Festlegung der drei Ebenen beeinflusst das Lade- und Entladeverhalten sowie die Verbrauchspotenziale erheblich. Grundlage hierzu sind die Ergebnisse der Parametervariation (vgl. Abschnitt 5.2.2, Seite 67). Die mittlere Ebene wird möglichst nahe an die Werte für Aufwand und Nutzen im Optimalbereich der Grenzkurven gelegt (vgl. Abbildung 5.16, Seite 77). Die Grenzkurven steigen an den Rändern des Optimalbereichs bei geringem SOC an und fallen bei hohem SOC ab. Die an diesen Stellen ($SOC_{LPAn, opt, min, lim}$ und $SOC_{LPAn, opt, max, lim}$ bzw. $SOC_{LPAb, opt, min, lim}$ und $SOC_{LPAb, opt, max, lim}$) auftretenden Werte für Aufwand und Nutzen sind bei der Wahl der beiden anderen Ebenen zu berücksichtigen. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die verbrauchsrelevanten Bereiche von Aufwand und Nutzen möglichst exakt abgebildet werden.

Gegenüberstellung Das Sektormodell bietet die Möglichkeit, auch den maximalen Aufwand und minimalen Nutzen mit einer hohen Auflösung darzustellen. Die Funktion ist sehr transparent aufgebaut. Der wesentliche Nachteil besteht darin, dass keine Interpolation zwischen den Sektoren möglich ist. Dies führt zu Sprüngen in der Leistungsvorgabe, die durch Gradientenbegrenzungen oder Filterungen abgefangen werden müssen. Außerdem stellen die Lade- und Entladeleistungen nur einen Mittelwert des jeweiligen Sektors dar. Daraus resultiert mit dem beschriebenen Algorithmus zur Ermittlung der Kennfelder bspw. eine mittlere Abweichung von 1089 W bzgl. der ur-

sprünglichen Ladeleistung. Aufgrund der Zuordnung der Leistungen zu Sektoren wird eine manuelle Applikation der Bedatung erschwert. Zudem ist eine hohe Zahl von Sektoren nötig, wodurch die Dimension der Leistungskennfelder steigt. Somit benötigt das Modell zwar insgesamt weniger Speicherstellen als zwei 3D-Kennfelder, die zulässigen Kennfelddimensionen werden jedoch überschritten.

In dem Ebenenmodell kann in allen Dimensionen interpoliert werden. Es treten somit keine Sprünge in der Leistungsvorgabe auf. Der Betriebspunkt (Moment und Drehzahl) wird sehr exakt abgebildet, so dass für den jeweiligen Aufwand einer Ebene sehr exakte Leistungen ausgegeben werden. Durch den direkten Bezug der Leistungen zum Betriebspunkt ist auch eine manuelle Applikation der Daten möglich. Ein Nachteil besteht darin, dass für eine exakte Abbildung des 3D-Kennfeldes eine Vielzahl von Ebenen nötig ist, wodurch der Speicherbedarf steigt. Insgesamt werden mehr Speicherstellen als im Sektormodell benötigt.

Die beiden Ansätze werden in Simulationen des NEFZ und FTP-72 bzgl. ihres Einflusses auf die Verbrauchspotenziale untersucht. Die Referenz stellen 3D-Kennfelder dar, in denen der Aufwand bzw. Nutzen eine Auflösung von 10 g/kWh aufweist. Da in beiden Zyklen keine Lastpunktabsenkungen auftreten, wird lediglich das Ladeverhalten verglichen. Das Sektormodell weist hierbei 196 Sektoren auf, der maximale Aufwand hat fünf Stützstellen (160, 240, 250, 260 und 420 g/kWh). Das Ebenenmodell besteht aus den drei maximalen Aufwänden 230, 250 und 270 g/kWh mit einer Auflösung von 22 mal 20. Tabelle 6.1 zeigt die Ergebnisse. Das Sektormodell verursacht durch die Ungenauigkeiten in der Leistungsvorgabe einen Mehrverbrauch von 0.2 % in beiden Zyklen. Mit dem Ebenenmodell werden die Verbräuche der 3D-Kennfelder erreicht.

Modell	Änderung Kraftstoffverbrauch [%]	
	NEFZ	FTP-72
Sektormodell	0.2	0.2
Ebenenmodell	0	0

Tab. 6.1: Änderung des Kraftstoffverbrauchs durch 2D-Systeme im Vergleich zum 3D-Kennfeld: Durch das Sektormodell steigt der Verbrauch.

Zusammenfassend weist das Sektormodell durch den Mehrverbrauch und die Leistungssprünge deutliche Nachteile im Vergleich zu dem Ebenenmodell auf. Zudem werden die zulässigen Kennfelddimensionen überschritten. Deshalb wird in der Funktion das Ebenenmodell umgesetzt.

6.1.3 Integration in die Fahrzeuggesamtarchitektur

Das Ladezustandsmanagement wird auf dem Steuergerät der E-Maschine in die Funktionsarchitektur integriert. Es bestehen zahlreiche Schnittstellen zu anderen Funktionsmodulen und Steuergeräten (siehe Abbildung 6.4). Der Betriebsstrategiemanager verarbeitet Betriebsgrößen des Fahrzeugs, wie z. B. Temperaturen, Momente und Drehzahlen der Antriebsquellen. Zusätzlich reagiert er auf Fahrervorgaben, wie etwa die Stellung des Gangwahlschalters. Aus den Größen leitet der Manager unter anderem Usecases für das SOC-Management ab. Es sind folgende Usecases vorgesehen: Normal, Sport, Eco, Schubbetrieb, Batterieheizen, Katheizen, Leerlauf, Fertigungs- und Transportmodus sowie Standladen. Das SOC-Management hat je Usecase unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen. Während beispielsweise im Eco-Modus effizientes Laden im Vordergrund steht, so muss im Sport-Modus sehr viel geladen werden, um ausreichend Energie für das Boosten der E-Maschine zur Verfügung zu stellen. Wie bereits in den

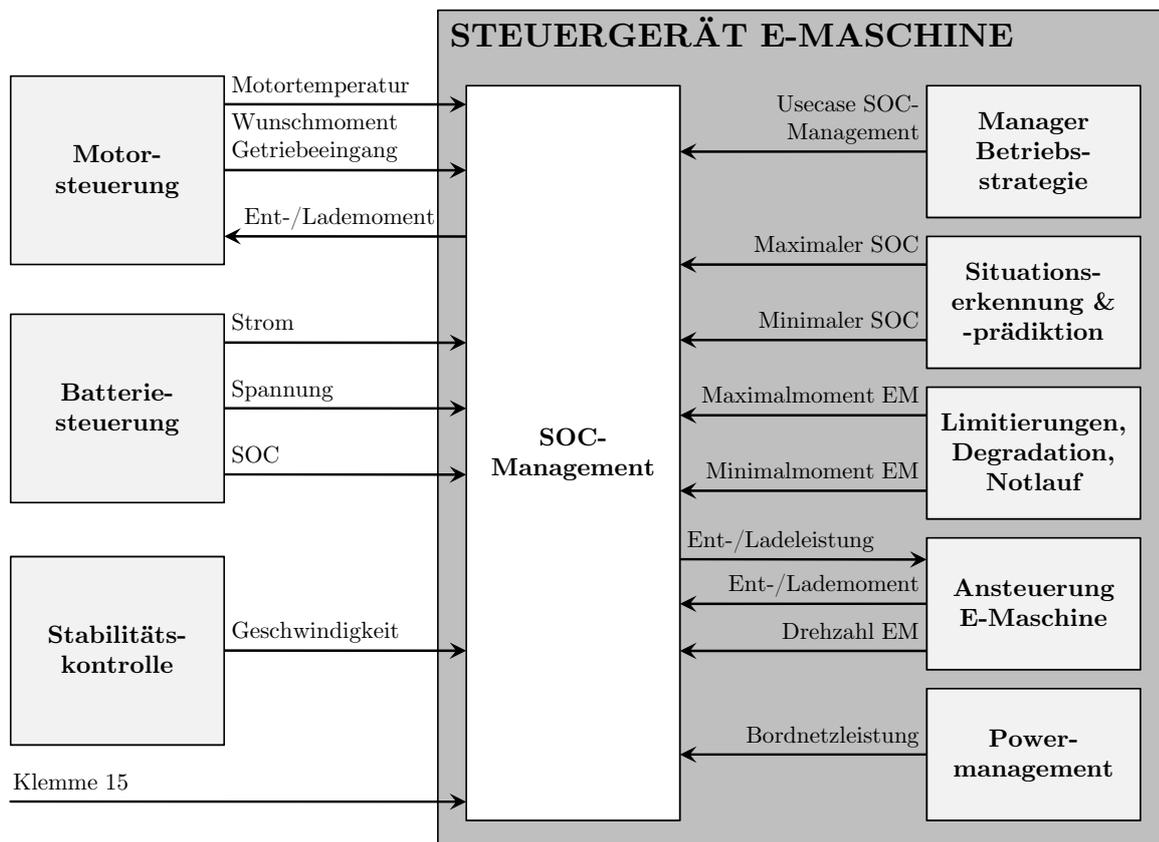


Abb. 6.4: Integration des Ladezustandsmanagements in die Fahrzeuggesamtarchitektur: Es bestehen Schnittstellen innerhalb und außerhalb des Steuergeräts (EM: E-Maschine).

Abschnitten 5.1.1 und 5.2.2 vorgestellt wurde, beeinflusst auch die Situationserkennung und -prädiktion das Lade- und Entladeverhalten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden neue Schnittstellen entwickelt: Das Modul gibt einen maximal und minimal geforderten SOC vor. Dies ermöglicht es dem SOC-Management auf die Situationen Autobahnauffahrt, Gefälle bzw. Steigung, Stau, Langsamfahrzone, Zielzone und Fahrt mit hoher Geschwindigkeit zu reagieren. Das nächste Modul berücksichtigt Limitierungen der Ladeleistung aufgrund der Fahrzeugakustik (vgl. Abschnitt 4.3.1) und Komponentengrenzen. Außerdem fließen Limitierungen des Degradations- und Notlaufmanagements ein. Daraus werden das für das SOC-Management maximal und minimal zur Verfügung stehende Drehmoment der E-Maschine ermittelt. Die Ansteuerung der E-Maschine übermittelt dem SOC-Management die Drehzahl der E-Maschine. Die Lade- und Entladeleistung gehen in das Modul ein. Das Powermanagement koordiniert und überwacht die Leistungsflüsse der Hochvolt- und Niedervoltverbraucher. Es übermittelt die Bordnetzleistung an das SOC-Management.

Neben den Schnittstellen zu Modulen auf dem Steuergerät der E-Maschine werden auch Daten mit anderen Steuergeräten ausgetauscht. Die Motorsteuerung übermittelt die Motortemperatur und das in der Momentenkoordination gebildete Wunschkmoment am Getriebeeingang. Letztere empfängt das Lade- und Entlademoment von der E-Maschinensteuerung. Die Batteriesteuerung sendet Strom und Spannung an den Klemmen der Batterie sowie den SOC an das SOC-Management. Von der Stabilitätskontrolle wird die Geschwindigkeit übertragen. Einen weiteren für das SOC-Management relevanten Hardware-Eingang der E-Maschinensteuerung stellt die Klemme 15 dar. Alle Berechnungen werden nur bei aktiver Klemme 15 ausgeführt. Zudem erfolgt bei einer steigenden Flanke des Signals ein Reset aller Berechnungen auf Initialwerte.

6.2 Funktionsentwicklung

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Funktionsarchitektur ist die Basis für die Entwicklung einer Funktion, die auf der E-Maschinensteuerung des untersuchten Hybridfahrzeuges integriert werden kann. Sie gliedert sich in die in Abschnitt 6.1.1 vorgestellten Teilfunktionen (vgl. Abbildung 6.1, Seite 106).

6.2.1 Berechnung von Aufwand und Nutzen

Dieses Modul ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Die Grenzkurven für den maximalen Aufwand und minimalen Nutzen sind die Steuergrößen des SOC-Managements. Somit legen sie das funktionale Verhalten und die Verbrauchseffizienz der Gesamtfunktion fest. In den folgenden Abschnitten werden die Einzelfunktionen des Moduls erläutert.

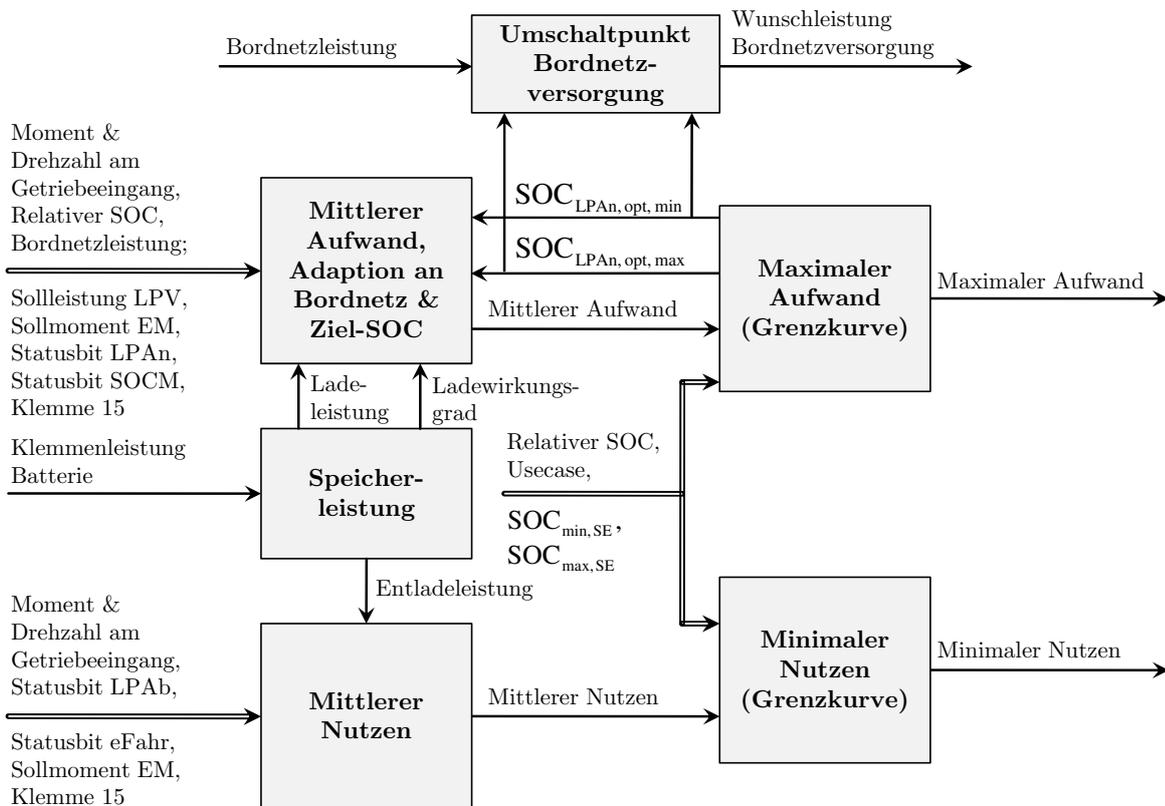


Abb. 6.5: Modul „Aufwand und Nutzen“: Ermittlung der Grenzkurven für Aufwand und Nutzen, Schnittstelle zur Situationserkennung und Bordnetzversorgung, Berechnung eines Ziel-SOC (EM: E-Maschine, eFahr: Elektrisches Fahren, LPAn: Lastpunktanhebung, LPAb: Lastpunktabsenkung, LPV: Lastpunktverschiebung, SOCM: Ladezustandsmanagement, $SOC_{max,SE}$ bzw. $SOC_{min,SE}$: Maximaler bzw. minimaler SOC der Situationserkennung).

Grenzkurven für Aufwand und Nutzen

Die Grenzkurven werden nicht fest vorgegeben sondern in Abhängigkeit des Usecases des Betriebsstrategiemangers erstellt. Die Kennlinien bestehen aus je sechs variablen Stützstellen. Wie in Abbildung 5.8 und 6.6 exemplarisch für das Laden dargestellt, wird der Randbereich der Kennlinien durch SOC_{min} und SOC_{max} vorgegeben, der Optimalbereich durch $SOC_{opt,min}$ und $SOC_{opt,max}$. Eine zusätzliche Stützstelle befindet sich jeweils zwischen den beiden Bereichen: $SOC_{opt,min,lim}$ und $SOC_{opt,max,lim}$. Jede Stützstelle wird in Abhängigkeit des Usecases des Betriebsstrategiemangers vorgegeben.

In den Randbereichen der Kennlinie ist der maximale Aufwand fest vorgegeben. Er stellt bei niedrigem SOC maximales Laden und bei hohem SOC kein Laden in allen Betriebspunkten sicher. Im Optimalbereich dient der mittlere Ladeaufwand \bar{A}_{LPAn}

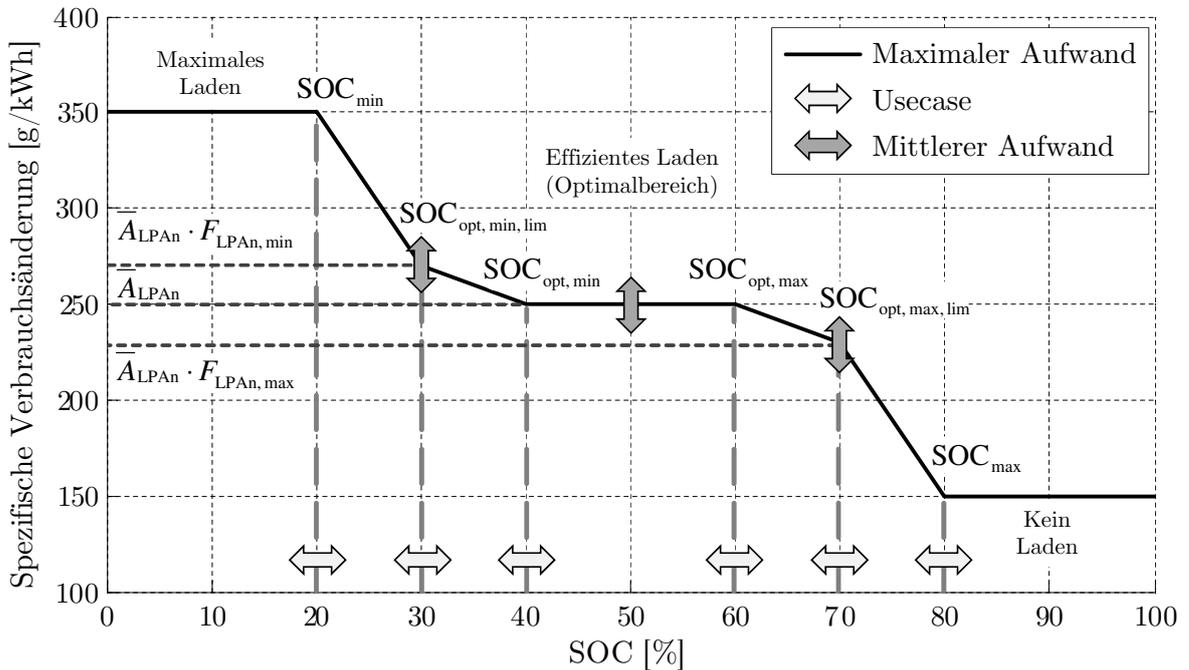


Abb. 6.6: Erstellung der Grenzkurve für den maximalen Aufwand: Die SOC-Stützstellen sind u. a. abhängig vom Usecase (z. B. Normal, Sport), der Aufwand im Optimalbereich wird aus dem mittleren Ladeaufwand abgeleitet.

als maximaler Aufwand. Der Wert für $SOC_{opt, min, lim}$ bzw. $SOC_{opt, max, lim}$ wird durch Multiplikation des mittleren Aufwands mit dem Faktor $F_{LPA_n, min}$ bzw. $F_{LPA_n, max}$ ermittelt. Die Faktoren, die Initialwerte der Mittelwerte sowie die SOC-Stützstellen für den Usecase „Normal“ werden auf Basis der Ergebnisse der Parametervariation vorgegeben (vgl. Abschnitt 5.2.2).

Situationserkennung und -prädiktion

Auch der maximale und minimale SOC der Situationserkennung ($SOC_{max, SE}$, $SOC_{min, SE}$) haben direkten Einfluss auf die Kennlinien. Es bestehen zwei Möglichkeiten, die Grenzkurven durch Vorgaben der Situationserkennung zu verändern (vgl. auch [41]):

- Verwendung neuer Steuertrajektorien
- Verschiebung und Stauchung der ursprünglichen Grenzkurven

Eine Definition neuer Steuertrajektorien bietet die Möglichkeit, das Funktionsverhalten exakt festzulegen. Die zusätzlichen Parameter erhöhen jedoch den Applikationsaufwand. Diese entfallen bei einer reinen Verschiebung oder Stauchung der ursprünglichen Grenzkurven. Die Genauigkeit der Regelung bzgl. der maximalen oder minimalen SOC-

Vorgabe hängt jedoch stark von dem Verlauf der ursprünglichen Grenzkurven ab. Deshalb wird eine Funktion entwickelt, die beide Verfahren kombiniert. Die Stützstellen im Umfeld von $SOC_{\max, SE}$ bzw. $SOC_{\min, SE}$ werden durch zusätzliche Parameter vorgegeben. Die übrigen Stützstellen lassen sich aus einer Stauchung der ursprünglichen Trajektorien bestimmen. Abbildung 6.7 verdeutlicht das Prinzip bei der Vorgabe eines minimalen Wertes $SOC_{\min, SE}$ der Situationserkennung. Der Wert legt $SOC_{LPAb, \min}$ in der Nutzenkurve und $SOC_{LPAn, \text{opt}, \min, \text{lim}}$ in der Aufwandkurve fest. Ausgehend von diesem Wert wird über zwei Parameter der Abstand von $SOC_{LPAn, \min}$ auf der einen Seite sowie von $SOC_{LPAn, \text{opt}, \min}$ und $SOC_{LPAb, \text{opt}, \min, \text{lim}}$ auf der anderen Seite vorgegeben. Die übrigen Stützstellen werden bezogen auf die ursprünglichen Kurven gestaucht, da $SOC_{LPAn, \max}$ und $SOC_{LPAb, \max}$ konstant gehalten werden. Erst wenn ein applizierbarer Mindestabstand zwischen $SOC_{\min, SE}$ und $SOC_{LPAn, \max}$ bzw. $SOC_{LPAb, \max}$ unterschritten wird, werden sie ebenfalls nach rechts verschoben.

Der Maximalwert der Situationserkennung $SOC_{\max, SE}$ verändert äquivalent die Grenzkurven. In diesem Fall legt der Wert $SOC_{LPAn, \max}$ in der Aufwandkurve und $SOC_{LPAb, \text{opt}, \max, \text{lim}}$ in der Nutzenkurve fest. Somit weist die Funktion insgesamt lediglich sechs zusätzliche Parameter auf. Durch die Vorgabe von SOC-Grenzwerten anstelle eines Soll-SOC-Levels wird auch im Falle einer erkannten Situation in weiten SOC-Bereichen noch effizientes Laden ermöglicht.

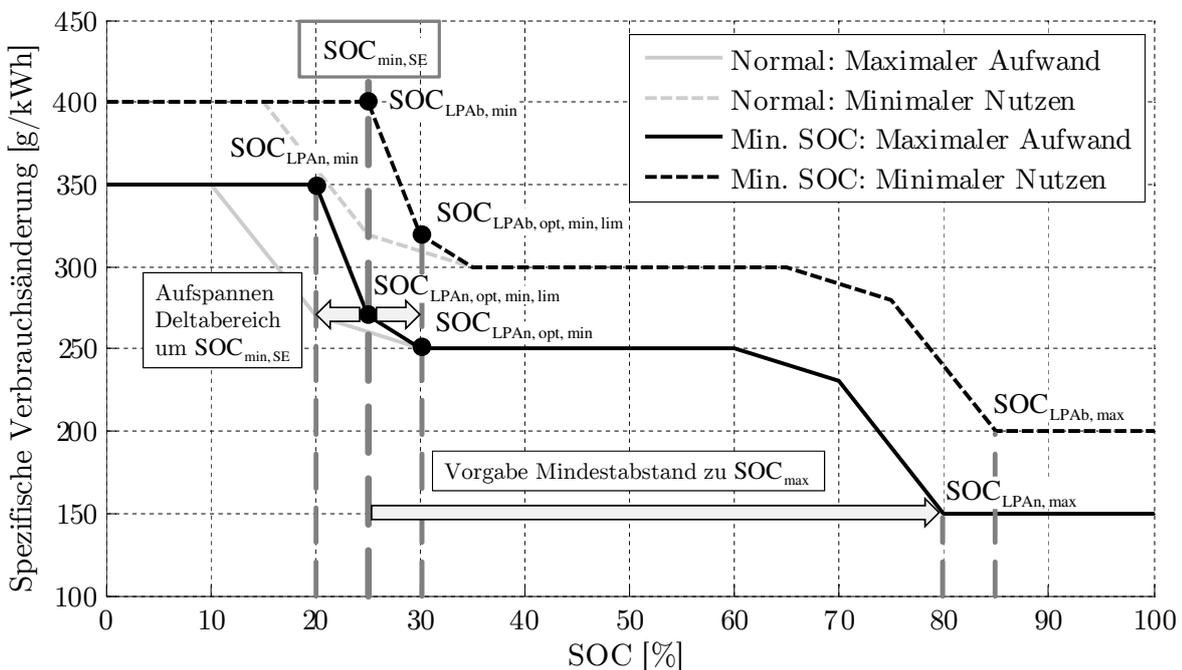


Abb. 6.7: Vorgabe eines minimalen SOC durch die Situationserkennung: Variation der Grenzkurven mit Hilfe zusätzlicher Applikationsparameter.

Mittelwerte von Aufwand und Nutzen

Die Istwerte für Aufwand und Nutzen werden anhand von Formeln 5.7 bis 5.9 (siehe Seite 61) berechnet. Hierzu ist in der Funktion ein Kennfeld hinterlegt, das in Abhängigkeit von Motormoment und -drehzahl dessen Kraftstoffmassenstrom ausgibt. Während einer Lastpunktverschiebung wird das Moment der E-Maschine zum Motormoment addiert. Auch das Schleppmoment der E-Maschine fließt in die Berechnung ein.

Auf Basis der Istwerte erfolgt die Berechnung von gleitenden Mittelwerten. Um den Speicherplatz und die Rechenleistung zu begrenzen, wird die Berechnung zyklisch ausgeführt. Darüber hinaus darf der Mittelwert nur während Lastpunktverschiebungen berechnet werden. In diesen Phasen ist eine hohe Genauigkeit der Berechnung nötig. Deshalb erfolgt sie in zwei Kaskaden. Bei aktiver Lastpunktverschiebung schreibt die Funktion jede Sekunde die Istwerte von Aufwand und Nutzen jeweils in ein 16-stelliges Array. Sie startet bei Position eins des Arrays und, sobald alle Speicherplätze befüllt sind, wird wieder von vorne mit dem Schreiben begonnen. Somit werden immer die ältesten Werte durch neue ersetzt. Aus den 16 Werten wird kontinuierlich der Mittelwert berechnet. Dieser wird in einer zweiten Kaskade alle 18 Sekunden ebenfalls in ein 16-stelliges Array geschrieben. Daraus wird erneut ein Mittelwert berechnet. Beide Arrays werden bei der Initialisierung der Berechnung mit applizierbaren Startwerten beschrieben. Die Funktion bietet die Möglichkeit, mit nur 32 Speicherstellen einen Zeitbereich von fünf Minuten abzudecken. Abbildung A.11 (siehe Seite 160) zeigt, dass damit der exakte gleitende Mittelwert mit einer Auflösung von einer halben Sekunde und 608 Speicherstellen gut angenähert wird. Außerdem ist zu erkennen, dass durch die zwei Kaskaden die Genauigkeit im Vergleich zu nur einem 16-stelligen Array gesteigert werden kann.

Ziel-SOC

Wie in Abschnitt 5.3.3 (siehe Seite 99) erläutert wurde, begrenzen die Limitierungen der Ladeleistung aufgrund der Fahrzeugakustik auch den Wertebereich des mittleren Ladeaufwands. Deshalb wird in die Funktion zusätzlich die Berechnung eines Ziel-SOC integriert. Dieser ist von dem Ladezustandsmanagement langfristig einzuregeln. Da die Grenzkurven für den maximalen Aufwand und den minimalen Nutzen die zentralen Steuergrößen der Funktion darstellen, wird der Ziel-SOC daraus abgeleitet. SOC_{Ziel} wird als Mittelpunkt des Optimalbereichs der Aufwand-Kurve definiert (vgl. Abbildung 6.6):

$$SOC_{Ziel} = \frac{SOC_{LPAn, opt, max} - SOC_{LPAn, opt, min}}{2} + SOC_{LPAn, opt, min} \quad (6.1)$$

Das Modul berechnet nach dem gleichen Prinzip wie bei Aufwand und Nutzen die gleitenden Mittelwerte \overline{SOC} und \overline{SOC}_{Ziel} . Da die Berechnung kontinuierlich erfolgt, ist

an dieser Stelle eine Kaskade ausreichend. Es wird alle 15 Sekunden ein Wert in das 16-stellige Array geschrieben. Der Mittelwert deckt somit einen Zeitbereich von vier Minuten ab. Anhand der Differenz zwischen Ist- und Zielwert wird ein Delta-Aufwand $\Delta A_{\max, \text{Ziel}}$ in einer Kennlinie hinterlegt, der im Optimalbereich die Grenzkurve des maximalen Aufwands anheben oder absenken kann.

$$\Delta A_{\max, \text{Ziel}} = f(\overline{\text{SOC}}_{\text{Ziel}} - \overline{\text{SOC}}) \quad (6.2)$$

Die Funktion bietet die Möglichkeit bei einem über längere Zeit sehr hohen oder geringen Energiebedarf das Ladeverhalten anzupassen, um sich dem Ziel-SOC anzunähern. Eine Anpassung des Nutzens ist nicht nötig, da Lastpunktabsenkungen im Fahrbetrieb sehr selten auftreten. Somit haben sie kaum Einfluss auf das SOC-Niveau. Ein Abfallen des SOC resultiert primär aus elektrischem Fahren und der Bordnetzversorgung. Ersteres wird im Optimalbereich des SOC nicht verändert. Auf die Bordnetzversorgung geht der folgende Abschnitt ein.

Bordnetzversorgung

Die Bordnetzversorgung ist in den Offlineberechnungen nicht enthalten (vgl. Abschnitt 5.2.2). Sie wird online im Fahrzeug berücksichtigt, indem das Modul die Grenzkurven von Aufwand und Nutzen anhand von Gleichungen 5.21 bis 5.24 (siehe Seite 67) an die aktuelle Bordnetzleistung adaptiert. Dies ist im Falle des Ladens nur zulässig, solange die generierte Leistung an der E-Maschine größer als die Bordnetzleistung ist. Der Gradient der Deltawerte für Aufwand und Nutzen wird in der Funktion begrenzt, um Sprünge der Grenzwerte zu vermeiden. Es ist maximal 1 g/kWh pro Sekunde zulässig.

In Betriebspunkten, in denen der Verbrennungsmotor aktiv ist und das Ladezustandsmanagement kein Laden anfordert, kann das Bordnetz entweder über die HV-Batterie oder mittels der E-Maschine versorgt werden. Die Umschaltung der Wunschleistung für die Bordnetzversorgung erfolgt in Abhängigkeit von der Steuertrajektorie für den maximalen Aufwand. Es wird ein Umschaltpunkt $\text{SOC}_{\text{Umsch, BN}}$ ermittelt. Für $\text{SOC} < \text{SOC}_{\text{Umsch, BN}}$ versorgt die E-Maschine das Bordnetz, für $\text{SOC} > \text{SOC}_{\text{Umsch, BN}}$ wird das Bordnetz aus der HV-Batterie versorgt. $\text{SOC}_{\text{Umsch, BN}}$ bewegt sich in Abhängigkeit von der aktuellen Bordnetzleistung P_{BN} im Optimalbereich der Aufwandskurve:

$$\text{SOC}_{\text{Umsch, BN}} = ((\text{SOC}_{\text{LPAn, opt, max}} - \text{SOC}_{\text{LPAn, opt, min}}) \cdot F_{\text{BN}}(P_{\text{BN}})) + \text{SOC}_{\text{LPAn, opt, min}}$$

Der Faktor F_{BN} ist auf einen Wertebereich zwischen null und eins begrenzt. Tabelle 6.2 zeigt die Zuordnung.

P_{BN} [W]	0	550	750	1000	1500	2500	4000	5000
F_{BN} [-]	0	0	0.25	0.5	0.7	0.9	1	1

Tab. 6.2: Anpassung des Umschalt-SOC an den Bordnetzbedarf: Bei hohem Bordnetzbedarf wird das Bordnetz stets direkt aus der E-Maschine versorgt.

Speicherleistung

Für die Berechnung des Aufwands wird die im HV-Speicher ankommende Leistung benötigt, für die Ermittlung des Nutzens die dem Speicher entnommene Leistung. Dieses Modul bestimmt die Leistungen anhand der Klemmenleistung der Batterie und des Lade- und Entladewirkungsgrades. Letztere sind als Kennlinie in Abhängigkeit von der Klemmenleistung hinterlegt.

6.2.2 Betriebspunktabhängige Leistungsermittlung und zugehöriger Aufwand und Nutzen

Die Teilfunktion ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Es kommt das in Abschnitt 6.1.2 vorgestellte Ebenenmodell zum Einsatz. Dieses ermittelt aus dem Drehmoment und der Drehzahl am Getriebeeingang sowie dem maximalen Aufwand bzw. minimalen Nutzen die Lade- bzw. Entladeleistungen. Das Ebenenmodell besteht jeweils für das Laden und Entladen aus drei Kennfeldebene, die den Optimalbereich der Grenzkurven von Aufwand und Nutzen abdecken. Die Platzierung der Kennfelder wird beispielhaft für das Laden anhand von Abbildung 6.6 erläutert: Das mittlere Kennfeld wird für den Initialwert des mittleren Aufwands \bar{A}_{LPAn} bestimmt. Die beiden anderen Kennfelder werden jeweils mit dem Aufwand berechnet, der aus der Multiplikation dieses Initialwertes mit dem Faktor $F_{\text{LPAn, min}}$ bzw. $F_{\text{LPAn, max}}$ resultiert. Somit ist der verbrauchsrelevante Bereich zwischen $\text{SOC}_{\text{opt, min, lim}}$ und $\text{SOC}_{\text{opt, max, lim}}$ sehr exakt abgebildet. Die Kennfelder werden mittels des in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten Offlinealgorithmus ausgegeben.

Für das maximale Laden bzw. Entladen in den Randbereichen der Grenzkurven dient je ein konstanter Parameter mit der maximalen generatorischen bzw. motorischen E-Maschinenleistung. Ebenso wird für die Bedingung „kein Laden bzw. Entladen zulässig“ ein Parameter mit dem Wert null verwendet. Dies bedeutet beispielhaft für das Laden anhand von Abbildung 6.6, dass ab dem Aufwand an der Stützstelle SOC_{min} die maximale generatorische E-Maschinenleistung angefordert wird. Äquivalent dazu wird ab dem Aufwand an der Stützstelle SOC_{max} eine Leistung von null angefordert.

Somit hat das Modell insgesamt jeweils fünf Ebenen für den maximalen Aufwand bzw. minimalen Nutzen. Zwischen den zugehörigen fünf Ladeleistungen bzw. Entladeleistungen wird in Abhängigkeit vom aktuellen maximalen Aufwand bzw. minimalen

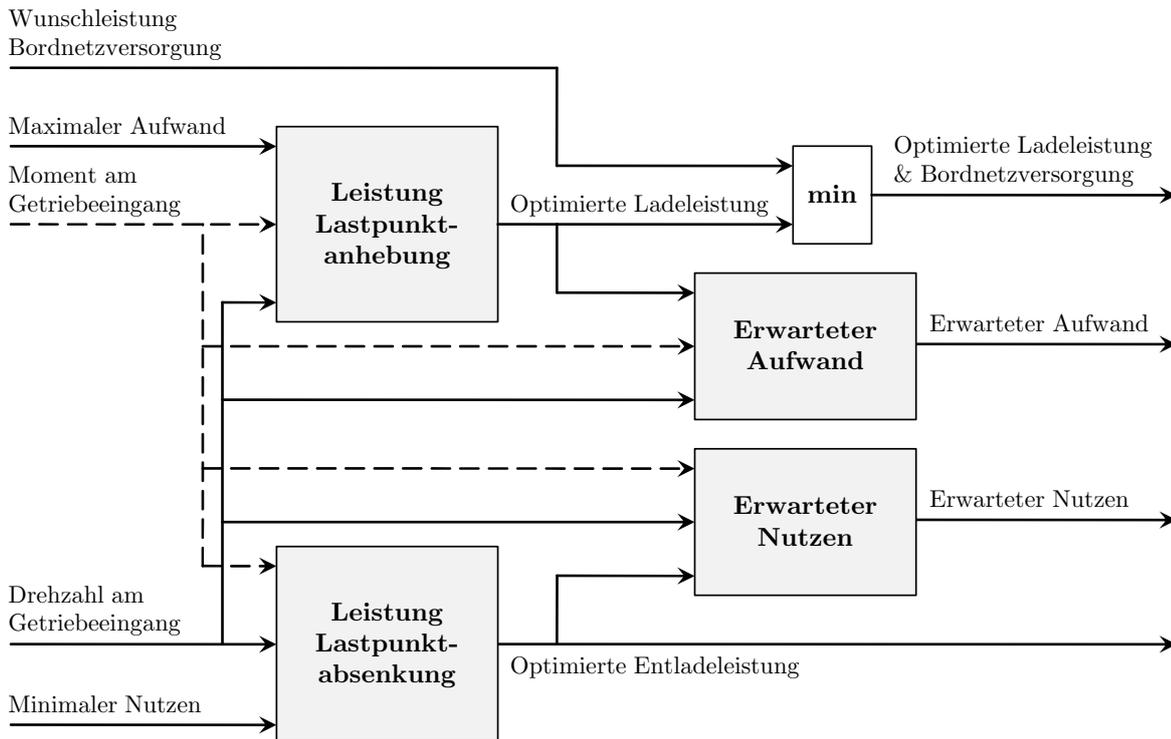


Abb. 6.8: Modul „Leistungsvorgabe“: Ermittlung der Leistung der Lastpunktverschiebung und des dabei erwarteten Aufwands bzw. Nutzens.

Nutzen übergeblendet. Dies erfolgt anhand eines Überblendefaktors $F_{\text{Üb}}$, der aus den Stützstellen der Grenzkurven berechnet wird. Gleichung 6.3 stellt die Berechnung exemplarisch für das Laden in Abhängigkeit des Aufwands A vor:

$$F_{\text{Üb, Stützstelle x nach y}} = \frac{A_{\text{Stützstelle x}} - A_{\text{Istwert}}}{A_{\text{Stützstelle x}} - A_{\text{Stützstelle y}}} \quad (6.3)$$

Für $F \leq 0$ wird die Leistung $P_{\text{Stützstelle x}}$ aus dem der Stützstelle x zugeordneten Kennfeld bzw. Parameter verwendet, für $F \geq 1$ die Leistung $P_{\text{Stützstelle y}}$ aus dem der Stützstelle y zugeordneten Kennfeld bzw. Parameter. Im Bereich $0 < F < 1$ gilt für die ausgegebene Leistung $P_{\text{Stützstelle x nach y}}$:

$$P_{\text{Üb, Stützstelle x nach y}} = (P_{\text{Stützstelle y}} - P_{\text{Stützstelle x}}) F_{\text{Üb, Stützstelle x nach y}} + P_{\text{Stützstelle x}} \quad (6.4)$$

Im Falle des Ladens erfolgt eine Minimumauswahl aus der Ladeleistung und der vom Modul „Aufwand und Nutzen“ gewünschten Bordnetzversorgung. Dadurch ist sichergestellt, dass auch ohne Ladeanforderung das Bordnetz direkt über die E-Maschine versorgt werden kann.

Um die Lade- bzw. Entladeentscheidung zu treffen, muss der Aufwand und Nutzen berechnet werden, der durch die offline ermittelte Lastpunktverschiebungsleistung ent-

stehen würde. Die Berechnung erfolgt anhand von Gleichungen 5.7 und 5.9 (Seite 61). Der Kraftstoffmassenstrom des Verbrennungsmotors ist in Kennfeldern in Abhängigkeit von Moment und Drehzahl hinterlegt. Da die Lade- bzw. Entladeleistung zwar angefordert aber noch nicht umgesetzt wird, muss eine theoretische Batterieleistung ermittelt werden. Sie wird aus der vorgeschlagenen Leistung der Lastpunktverschiebung und dem Lade- bzw. Entladewirkungsgrad bestimmt. Die Wirkungsgrade sind in Abhängigkeit von der Leistung hinterlegt. Auch das zugehörige mechanische Moment der E-Maschine ist nicht verfügbar. Deshalb wird in die Funktion ein Kennfeld integriert, das für jede darstellbare Kombination aus der Leistung der Lastpunktverschiebung und der Getriebeeingangsdrehzahl das resultierende mechanische E-Maschinenmoment ausgibt.

6.2.3 Lade- und Entladebedingung

Die Funktion prüft, ob Gleichungen 5.15 und 5.16 (siehe Seite 63) erfüllt sind. Die Abfrage ist jeweils nur im Optimalbereich der Steuertrajektorien zulässig. Außerdem wird überprüft, ob das Ladezustandsmanagement von dem Betriebsstrategiemanager freigegeben wurde. Falls Laden und Entladen von der Funktion gleichzeitig angefordert wird, hat Laden aufgrund des Energiebedarfs für das elektrische Fahren und das Bordnetz Priorität. Das Modul gibt die elektrische E-Maschinenleistung aus. Zusätzlich werden Statusbits gebildet, die anzeigen, ob das Ladezustandsmanagement Laden oder Entladen anfordert.

6.3 Funktionsintegration und -test

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Funktionen des Ladezustandsmanagements werden in die Funktionsarchitektur des E-Maschinensteuergeräts integriert. Dieser Abschnitt beschreibt die Testumgebung und die definierten Testfälle zur Validierung des Lösungsansatzes.

6.3.1 Testumgebung

Die Verifikation des Funktionsverhaltens erfolgt in einer Model-in-the-Loop Simulation, an einem Antriebsprüfstand und in Testfahrzeugen.

Model-in-the-Loop Simulation

Als Simulationsumgebung dient das in Kapitel 5.3.1 und A.3 vorgestellte Simulationsmodell. Es ermöglicht, die entwickelten Funktionen in Simulink vor der automatisierten

Codegenerierung zu testen. Die Umgebung stellt alle benötigten Eingangsgrößen bereit und verarbeitet die ausgegebene Lade- bzw. Entladeleistung.

Antriebsprüfstand

Für die Analyse der Steuererätfunktionen steht ein Antriebsprüfstand zur Verfügung. An dem Prüfstand ist der Antriebsstrang des untersuchten Fahrzeugs verbaut [84, 85]. Er enthält Verbrennungsmotor, Trennkupplung, E-Maschine, Leistungselektronik und Getriebe mit integriertem Anfahrlement (siehe Abbildung 6.9). Anstelle der Hochvoltbatterie ist eine Stromversorgungsanlage verbaut, die sowohl als Quelle als auch als Senke dient. Sie bildet das Verhalten der Hochvoltbatterie auf der Basis eines Batteriemodells ab, das anhand des gemessenen Stroms den SOC und das Spannungsniveau berechnet. Außerdem kann ein konstanter Bordnetzbedarf auf der Niedervoltseite vorgegeben werden, der von der Leistungselektronik bereitgestellt werden muss.

Die Antriebswelle ist mit einer Belastungsmaschine des Prüfstandaufbaus verbunden. Diese ermöglicht anhand eines Fahrzeugmodells das Schleppen oder Bremsen des Antriebs. Das Modell ermittelt anhand des an der Gelenkwelle gemessenen Moments eine virtuelle Drehzahl an der Gelenkwelle sowie eine virtuelle Fahrzeuggeschwindigkeit. Hierzu sind auch die Hinterachse sowie die Räder abgebildet. Die virtuelle Drehzahl dient als Sollwert für die Belastungsmaschine. Darüber hinaus enthält die Simulation ein Fahrermodell, dem beliebige Fahrprofile vorgegeben werden können. In Abhängigkeit von der Soll-Geschwindigkeit und dem im Fahrzeugmodell berechneten Wert entscheidet das Fahrermodell zwischen Gas und Bremse. Der Prüfstand enthält die Steuergeräte für Verbrennungsmotor, E-Maschine, Getriebe und Batterie. Es handelt sich um Applikationssteuergeräte, so dass die Bedienung der Funktionen variiert und Variablen gemessen werden können. Außerdem ist der Prüfstand mit einer Kraftstoffmesstechnik ausgestattet, die den Durchfluss des Kraftstoffs kontinuierlich misst. Die Messunsicherheit beträgt 0.05 % des Messwertes. Die Kraftstofftemperatur wird mit einer Standardabweichung von 0.03 °C konstant gehalten. Gasblasen werden abgeschieden.

Der Prüfstand bietet die Möglichkeit, beliebige Fahrzyklen automatisiert zu durchlaufen. Im Vergleich zu Rollenprüfständen streuen die Ergebnisse nicht in Abhängigkeit vom Prüfstandsfahrer. Da die Hochvoltbatterie als Modell abgebildet ist, können die Startwerte des SOC frei vorgegeben werden. Deshalb ist es an dem Prüfstand möglich, neben Funktionstests auch die Verbrauchsuntersuchungen von Optimierungen in der Betriebsstrategie reproduzierbar durchzuführen.

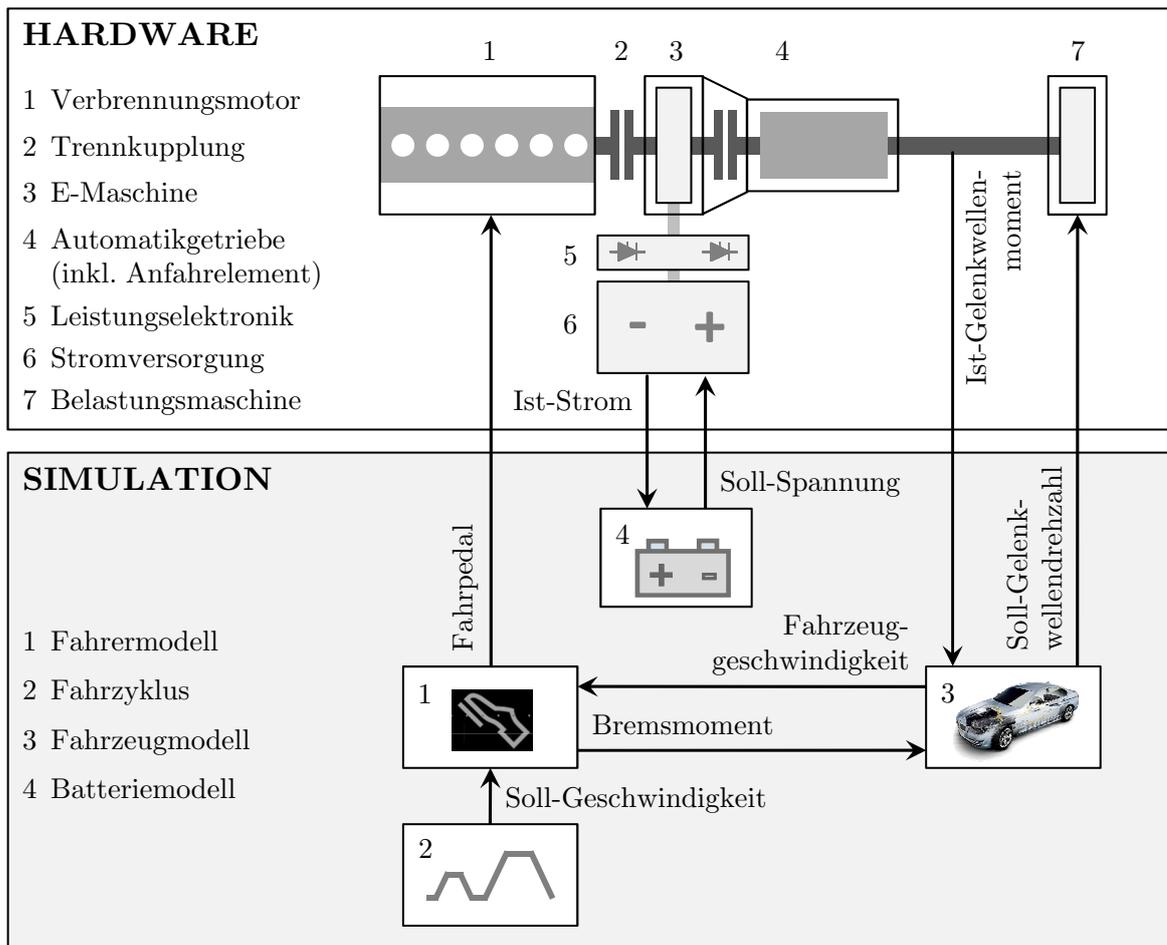


Abb. 6.9: Konfiguration des Antriebsprüfstands: Der Prüfstand enthält beinahe alle Komponenten des Antriebsstrangs. Lediglich das Hinterachsgetriebe wird in einem Fahrzeugmodell berücksichtigt und die Hochvoltbatterie ist durch eine Stromversorgungsanlage abgebildet. Letztere wird anhand eines Batteriemodells angesteuert. Die Belastungsmaschine wird aus dem Fahrzeugmodell angesteuert, die Antriebsquellen aus einem Fahrermodell [84, 85].

Versuchsfahrzeug

Bei den Versuchsfahrzeugen handelt es sich um Vorserienfahrzeuge. Es sind alle Komponenten des Hybridsystems verbaut. Auch die Fahrzeuge enthalten Applikationssteuergeräte der Komponenten. In den Fahrten kann das Ladezustandsmanagement im Gesamtsystem erprobt werden. Dies beinhaltet beispielsweise variable Bordnetzlasten.

6.3.2 Definition von Testfällen

Um den Lösungsansatz zu validieren werden zunächst Testfälle definiert. Die Funktion hat je Testmanöver ein definiertes Zielverhalten sicherzustellen. Letzteres resultiert beispielsweise aus den im Lastenheft des Fahrzeugs vorgegebenen Anforderungen.

Tabelle 6.3 fasst wichtige Testfälle des Ladezustandsmanagements zusammen. Sie prüfen die Effizienz, die Wechselwirkungen zum Fahrverhalten und die Bereitstellung von Energie für die Hybridfunktionen elektrisches Fahren und Boost. Zudem wird die Abhängigkeit von der Bordnetzlast und der Situationserkennung getestet.

6.3.3 Validierung des Lösungsansatzes

Model-in-the-Loop Simulationen sowie Messungen an dem Antriebsprüfstand und in Versuchsfahrzeugen bestätigen, dass die entwickelte Funktion in den Testfällen das jeweils gewünschte Verhalten zeigt.

Die Testfälle „Bordnetzversorgung durch Rekuperation“, „Stop-and-go“ und „Kundenfahrt“ können teilweise im Fahrprofil des FTP-72 nachvollzogen werden. Im folgenden Abschnitt wird die Verbrauchseinsparung durch das Ladezustandsmanagement im FTP-72 anhand von Messungen am Antriebsprüfstand analysiert. Abbildungen 6.10 bis 6.13 stellen die Ergebnisse für jeweils ein Viertel des Zyklus dar. Deshalb werden auch die genannten Testfälle beispielhaft am FTP-72 diskutiert.

- **Bordnetzversorgung durch Rekuperation:** Im Zeitbereich zwischen 200 und 300 s kann bei einer Geschwindigkeit von 70 bis 90 km/h geladen werden. Zusätzlich treten fünf leichte Rekuperationsphasen auf. Somit steigt der SOC an. Die Lastpunktanhebung wird derart gesteuert, dass in diesem Zeitbereich und auch im weiteren Zyklusverlauf keine Lastpunktabsenkungen nötig sind.
- **Stop-and-go:** Im Zeitbereich zwischen 350 und 700 s sowie zwischen 1050 und 1400 s tritt ein Stop-and-go Betrieb bei einer Geschwindigkeit von 30 bis 60 km/h auf. Die Messungen zeigen, dass das Ladezustandsmanagement ausreichend Energie für das elektrische Fahren zur Verfügung stellt. Ein Großteil der Abschnitte unterhalb von 50 km/h kann elektrisch gefahren werden, ohne die SOC-Neutralität zu gefährden.
- **Kundenfahrt:** Der Zyklus bestätigt, dass in der Stadtfahrt zwischen 350 und 1400 s genügend Energie für das elektrische Fahren erzeugt wird. Bei den höheren Geschwindigkeiten zwischen 200 und 300 s wird sehr schnell nachgeladen.

Testfall	Erklärung	Zielverhalten
Bordnetzversorgung durch Rekuperation	Fahrt mit 120 km/h, Abbremsung in ca. 8 s auf 100 km/h, Konstantfahrt für 40 s, leichte Beschleunigung auf 120 km/h, 4 Wiederholungen	Nutzung Rekuperationsenergie für Bordnetzversorgung, keine LPAn mit anschließender LPAb
Volllastbeschleunigung	Volllastbeschleunigung von 60 auf 140 km/h im 6. Gang (Manueller Modus)	LPAn alleine zur Bordnetzversorgung, kein Laden der Batterie um volle Antriebsleistung zur Verfügung zu haben
Bordnetzversorgung	Konstantfahrt mit 90 km/h, alle Verbraucher für 60 s ausschalten, dann alle mit Maximalleistung für 60 s einschalten	Adaption des Ladementes an höhere Bordnetzlast, dauerhafte Bordnetzversorgung durch EM unterhalb von Umschalt-SOC
Stop-and-go	Geschwindigkeitsprofil ähnlich zu Stadtteil des NEFZ oder FTP-72 mit warmem Motor	Ausreichendes Laden der Batterie, um elektrisches Fahren mit allen zulässigen Geschwindigkeiten & Beschleunigungen sicherzustellen
Situationserkennung	Konstante Geschwindigkeit für 30 s von 60, 80 und 100 km/h, manuelle Vorgabe von minimalem oder maximalem SOC (Applikationsschalter)	SOC-Verlauf passt sich an minimalem oder maximalem SOC an
Leerlauf kalt bzw. warm	Kalten bzw. warmen Motor bei niedrigem SOC starten	SOC kommt innerhalb von 4 min in seinen Optimalbereich, es dürfen keine Schwingungen im Ladement auftreten
Sportliche Fahrt	Sportliche Fahrt bspw. auf einem Handlingkurs	Adaption der Grenzkurven an den Ziel-SOC stellt sicher, dass ausreichend Energie für Boosten zur Verfügung steht
Kundenfahrt	Ca. 10 min Stadtfahrt, 15 min Überlandfahrt und 5 min Autobahnfahrt	Ausreichendes Laden für elektrisches Fahren in Stadtfahrt, schnelles Nachladen in Überlandfahrt, keine LPAb in Autobahnfahrt

Tab. 6.3: Testfälle zur Validierung des Ladezustandsmanagements: Die Funktion hat je Testmanöver ein definiertes Zielverhalten sicherzustellen (EM: E-Maschine, LPAb: Lastpunktabsenkung, LPAn: Lastpunktanhebung).

6.4 Analyse des Verbrauchseinsparpotenzials

Im vorangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, dass das Ladezustandsmanagement im Systemverbund das gewünschte Verhalten aufweist. Abschließend wird nun das real erreichbare Verbrauchseinsparpotenzial ermittelt. Die Untersuchungen werden an dem in Abschnitt 6.3.1 vorgestellten Antriebsprüfstand durchgeführt. Er bietet die Möglichkeit, gesetzliche Fahrzyklen automatisiert und reproduzierbar zu durchfahren. Außerdem kann der Kraftstoffverbrauch sehr exakt gemessen und der Start-SOC beliebig vorgegeben werden. Um die Verbrauchseinsparung ermitteln zu können, ist neben dem optimierten Ladezustandsmanagement auch die Referenzregelung auf dem Steuergerät der E-Maschine integriert (vgl. Abbildung 5.19 auf Seite 92). Mittels eines Applikationsschalters kann die gewünschte Funktion aktiviert werden.

Das Ziel der Analyse besteht darin, das unter den Bedingungen eines Serieneinsatzes erreichbare Einsparpotenzial zu ermitteln. Deshalb werden für alle Steuergeräte die zum Zeitpunkt der Messung aktuellsten Softwarestände verwendet. Die darin enthaltene, seriennahe E-Fahrlogik weist im Vergleich zu den Simulationen geringfügig veränderte Grenzwerte für die Fahrzeuggeschwindigkeit und Beschleunigung auf, ab denen ein Motorstart erfolgt.

Die Simulationen in Abschnitt 5.3.2 zeigen, dass für den NEFZ und FTP-72 vergleichbare Einsparpotenziale von 1.1 % und 0.9 % bestehen. Während der NEFZ ein sehr synthetisches Fahrprofil darstellt, bildet der FTP-72 eine kundennahe Stadt- und Überlandfahrt ab. Außerdem weist dieser Zyklus ein etwas geringeres Einsparpotenzial auf. Mit dem Ziel, ein im Fahrbetrieb erreichbares Potenzial zu ermitteln, wird deshalb für die Prüfstandsmessung der FTP-72 ausgewählt.

Alle Zyklusdurchläufe erfolgen SOC-neutral. Die Reproduzierbarkeit der Messungen wird anhand von Probedurchläufen bestätigt. Es werden Messungen mit der Referenzstrategie und dem optimierten Ladezustandsmanagement durchgeführt. Um Temperatureinflüsse auszuschließen, starten die Durchläufe bereits mit betriebswarmen Komponenten. Sie werden für jede Fahrt auf die gleichen Temperaturen gebracht. Die Einschränkung der Ladestrategie durch das Heizen des Katalysators wird dennoch berücksichtigt, indem das Laden erst nach 60 s zugelassen wird (vgl. Abschnitt 4.3).

Abbildungen 6.10 bis 6.13 stellen die Messergebnisse für jeweils ein Viertel des FTP-72 dar. Es ist das Geschwindigkeitsprofil inklusive der Phasen mit an- und abgekoppeltem Verbrennungsmotor abgebildet. Die Referenzstrategie und das optimierte Ladezustandsmanagement (SOCM) werden anhand des SOC, des Lade- und Entlademoments der E-Maschine, des Ladeaufwands und des über den gesamten Zyklus summierten Ladeaufwands verglichen.

Abbildung 6.10 (erstes Viertel des FTP-72) verdeutlicht im Überlandteil die Unterschiede der beiden Regelansätze. Während die Referenzstrategie in der Beschleunigung bei

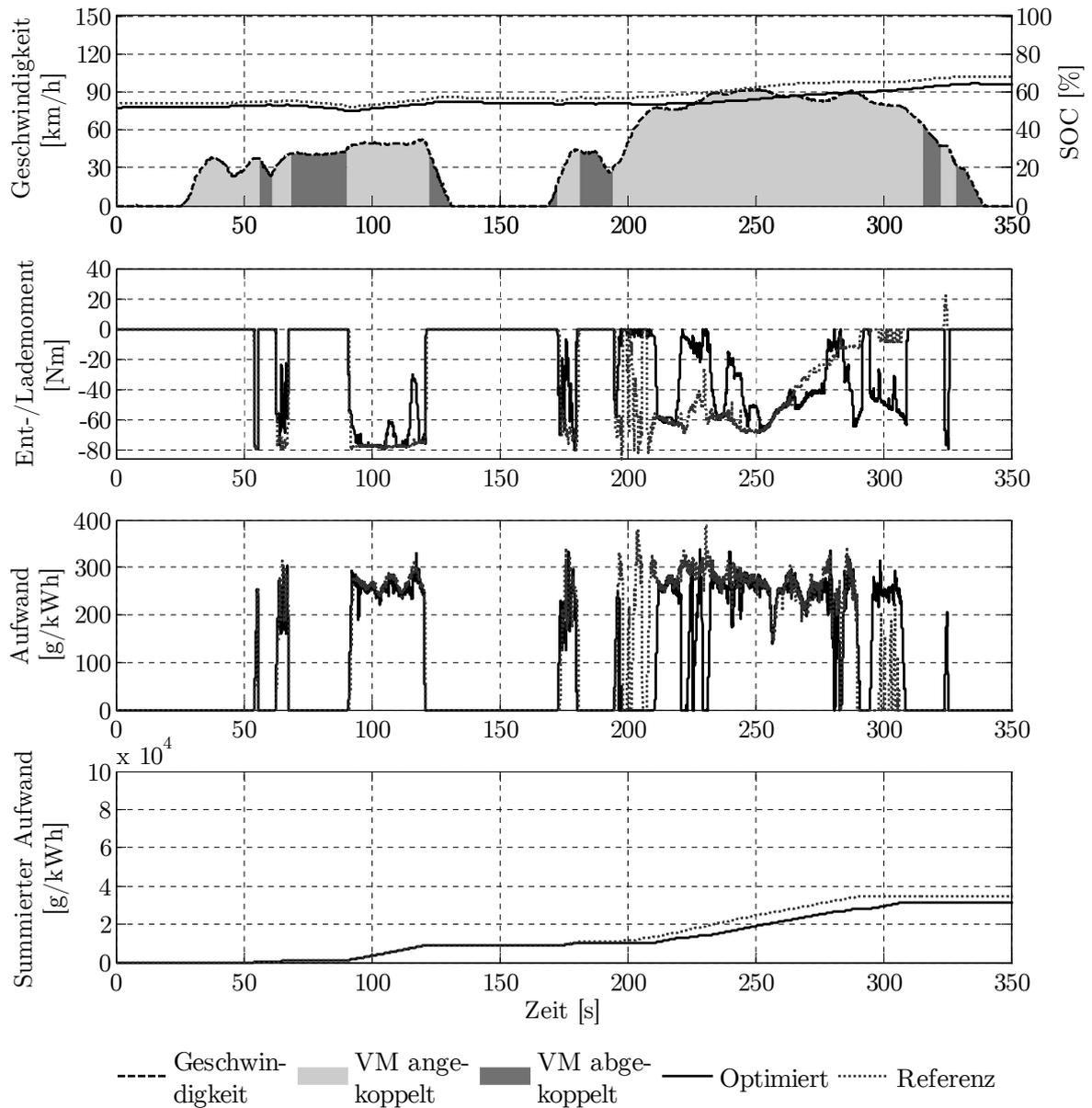


Abb. 6.10: Optimiertes Ladezustandsmanagement im ersten Viertel des FTP-72: Während die Referenzstrategie in der Beschleunigung bei 200 s sehr stark und mit hohem Aufwand lädt, reduziert das optimierte SOC-Management das Lademoment auf ein Minimum.

200 s sehr stark und mit hohem Aufwand lädt, reduziert das SOCM das Lademoment auf ein Minimum. Erst wenn das Geschwindigkeitsplateau von 77 km/h erreicht ist, wird wieder geladen. Das gleiche Verhalten zeigt sich im Zeitbereich bis 250 s. Das ineffiziente Laden mit hohem Aufwand in den Beschleunigungsphasen wird vermieden. Dies erklärt den Vorteil des SOCM bzgl. des summierten Ladeaufwands. Die Refe-

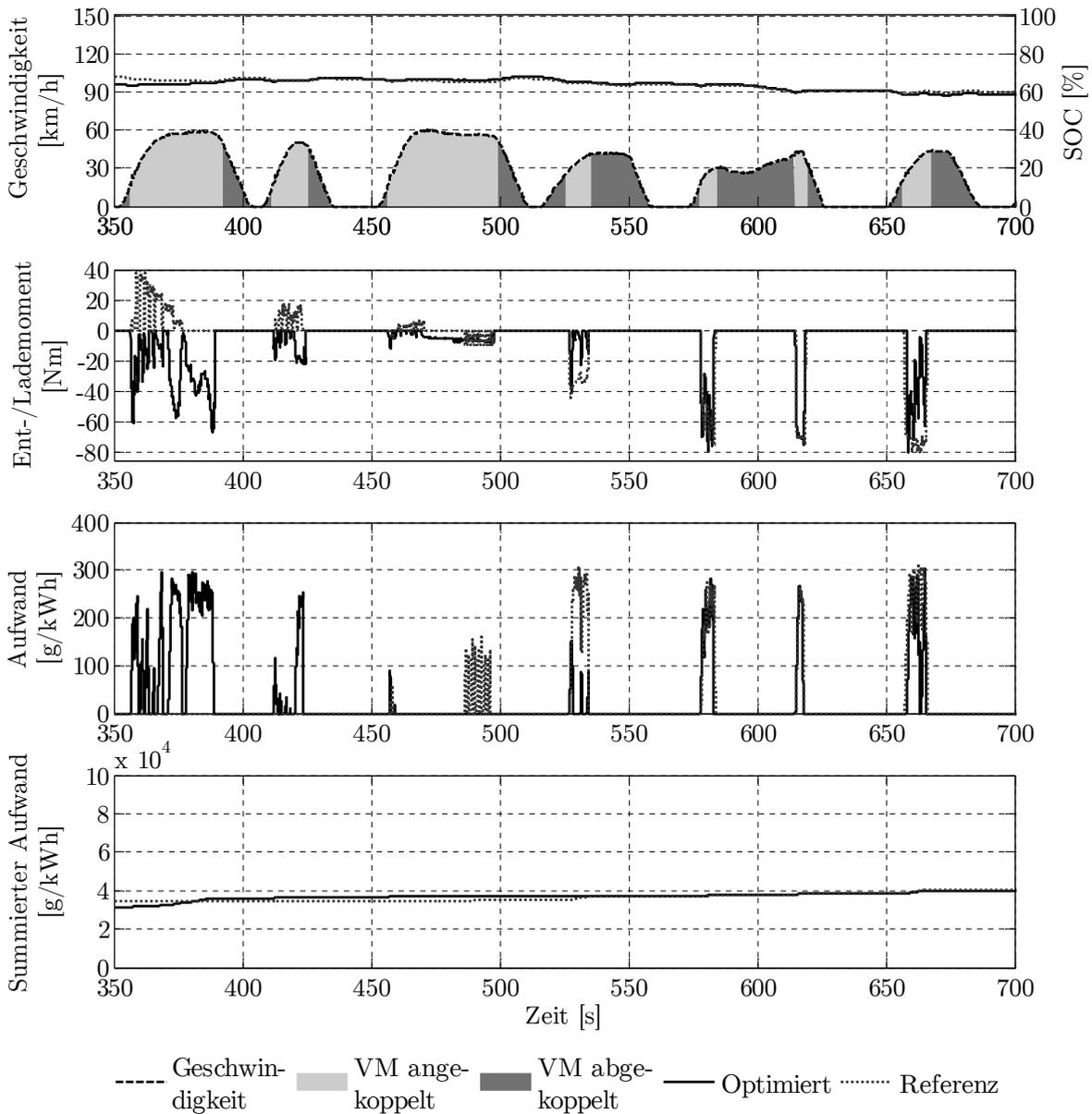


Abb. 6.11: Optimiertes Ladezustandsmanagement im zweiten Viertel des FTP-72: Von der Referenzstrategie muss Entladen angefordert werden, deshalb übersteigt der summierte Aufwand des optimierten SOC-Managements den der Referenzstrategie.

renzstrategie erreicht bei ca. 275 s ein sehr hohes SOC-Niveau und stellt deshalb das Laden ein. Trotzdem kann ein kurzzeitiges Entladen bei 375 nicht vermieden werden. Im Vergleich dazu lädt das SOCM aufgrund des geringeren SOC-Niveaus weiterhin in Abhängigkeit vom Betriebspunkt und es ist kein Entladen nötig. In Abbildung 6.11 (zweites Viertel des FTP-72) ist zu erkennen, dass auch in den folgenden Phasen mit

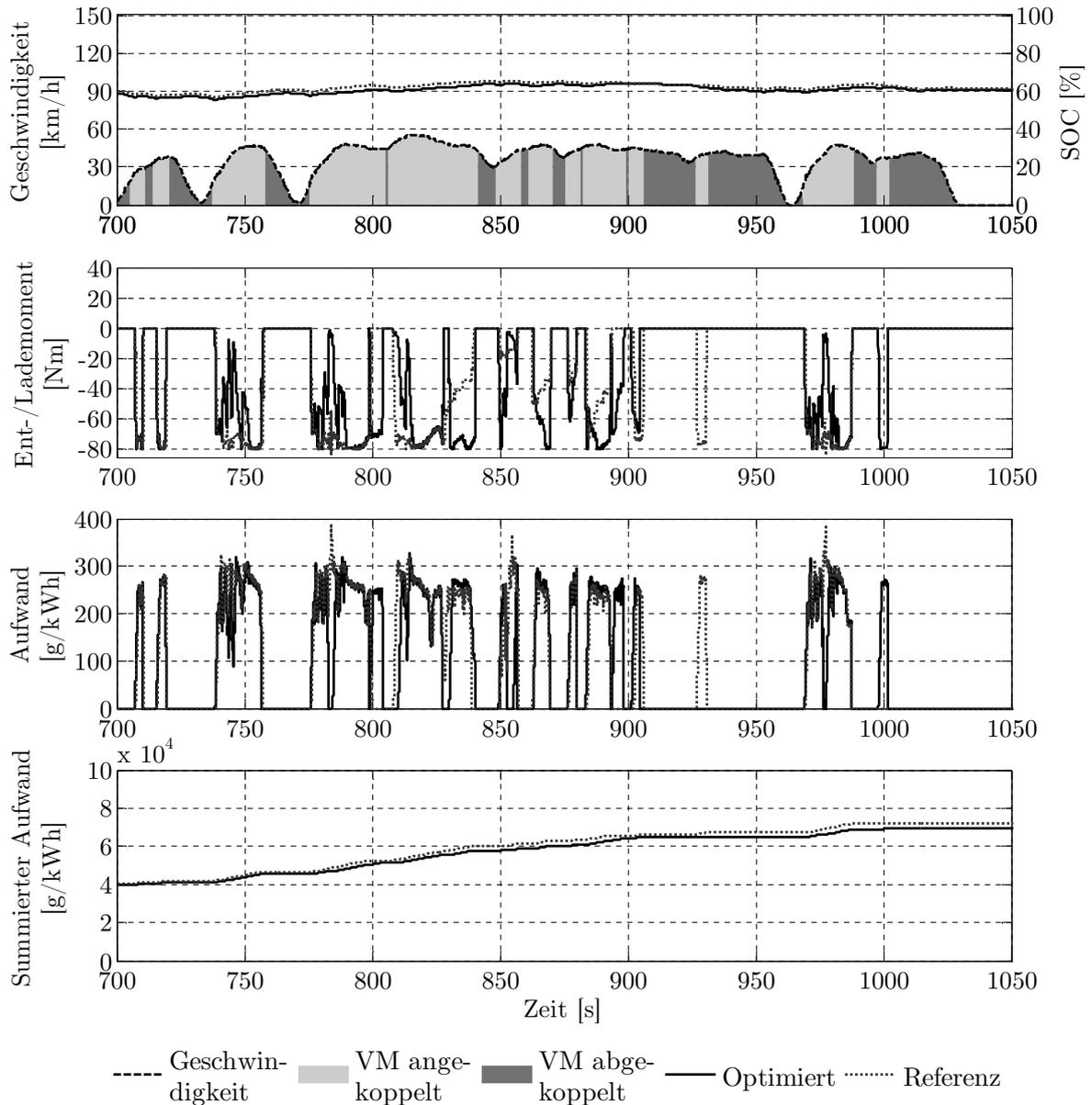


Abb. 6.12: Optimiertes Ladezustandsmanagement im dritten Viertel des FTP-72: Durch das aufwand- und nutzenbasierte Laden in der Stadtfahrt von 700 bis 1050 s fällt der summierte Aufwand wieder unter den Wert der Referenzstrategie.

angekoppeltem Verbrennungsmotor bis ca. 475 s von der Referenzstrategie ein Entladen angeforderte werden muss, um das SOC-Niveau zu senken. Da das SOCM in diesem Zeitbereich das Laden fortsetzt, übersteigt der summierte Aufwand des SOCM den der Referenzstrategie. Deren hohes SOC-Niveau erreicht auch das SOCM bei ca. 400 s. Deshalb reduziert das SOCM den maximal zulässigen Ladeaufwand und es ist nur noch sehr geringfügiges Laden möglich. Im Zeitbereich zwischen 400 und 425 s wird

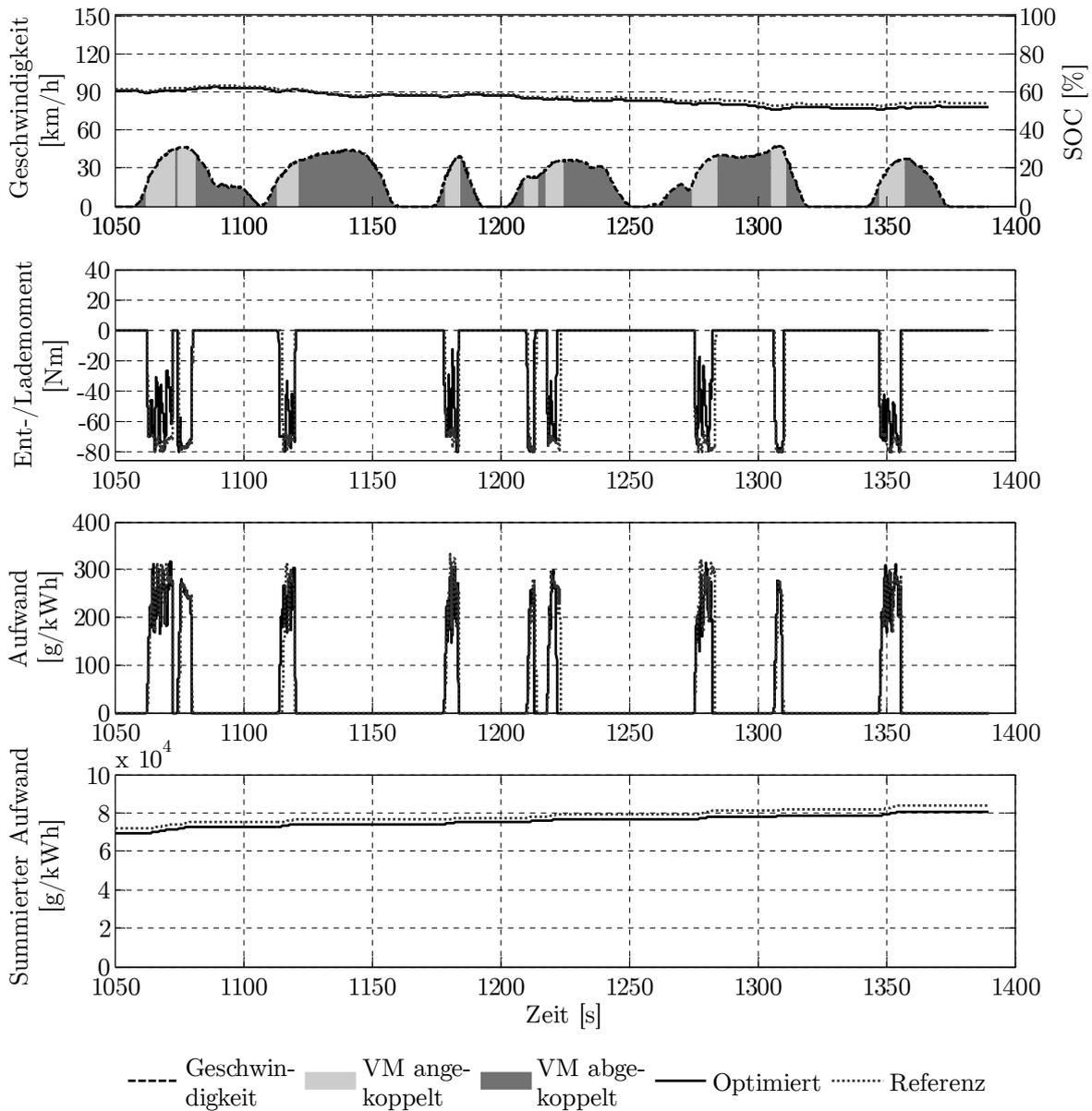


Abb. 6.13: Optimiertes Ladezustandsmanagement im letzten Viertel des FTP-72: Der summierte Ladeaufwand des optimierten SOC-Managements bleibt bis zum Zyklusende unterhalb der Kurve der Referenzstrategie.

hierbei deutlich, dass auch bei verringertem maximalen Aufwand in Abhängigkeit vom Betriebspunkt effizienzbasierend geladen wird. Durch das häufige elektrische Fahren zwischen 500 und 700 s sinkt der SOC in beiden Messungen, so dass sich wieder die bereits bzgl. Abbildung 6.10 diskutierten Unterschiede zeigen. Der summierte Aufwand der beiden Funktionen ist bei 700 s identisch. Abbildung 6.12 (drittes Viertel des FTP-72) zeigt, dass durch das aufwand- und nutzenbasierte Laden in der Stadtfahrt von 700

bis 1050 s der summierte Aufwand wieder unter den Wert der Referenzstrategie fällt. Die sehr hohen Aufwände bei 785, 855 und 980 s werden vermieden. In Abbildung 6.13 (letztes Viertel des FTP-72) wird deutlich, dass der summierte Ladeaufwand des SOCM bis zum Zyklusende unterhalb der Kurve der Referenzstrategie bleibt. Der Vorteil kann im Zeitraum von 1050 bis 1390 s um weitere 970 g/kWh vergrößert werden.

Tabelle 6.4 fasst die Ergebnisse der Prüfstandsmessung zusammen. Der mittlere Aufwand und der SOC-Hub liegen in der Größenordnung der Simulationsergebnisse in Tabelle 5.11 (siehe Seite 94). Der zeitliche Anteil der Ladephasen ist am Prüfstand deutlich größer. Dies erklärt den höheren summierten Aufwand im Vergleich zu den Simulationen. Am Prüfstand kann durch das SOCM der mittlere Ladeaufwand im Vergleich zur Referenzstrategie im FTP-72 um 18 g/kWh reduziert werden. Der zeitliche Anteil des Ladens ist nahezu identisch. Das SOCM nutzt durch das betriebspunktabhängige Laden einen um zwei Prozentpunkte größeren SOC-Bereich aus. Aus dem gemessenen Kraftstoffverbrauch ergibt sich eine Einsparung von 1 %. Die in den Simulationen ermittelten Werte können somit auch an dem Antriebsprüfstand erreicht werden.

	Referenz	Optimiert
Mittlerer Aufwand [g/kWh]	236	218
Zeitlicher Anteil Laden [%]	26	27
SOC-Hub [-]	16	18
Kraftstoffverbrauch [l/100km]	7.79	7.71
Einsparung bzgl. Referenz [%]		1
Einsparung bzgl. Basisfzg. [%]		1

Tab. 6.4: Messergebnisse für das optimierte Ladezustandsmanagement: Wie in den Simulationen kann auch am Prüfstand der Kraftstoffverbrauch um 1 % reduziert werden.

Abbildung 6.14 zeigt abschließend die Verteilung der Betriebspunkte des Verbrennungsmotors in dessen Wirkungsgradkennfeld. Die Betriebspunkte weisen ein Zeitraster von 1 s auf. Zusätzlich ist die Kennlinie des optimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs dargestellt. Dort ermöglicht der Verbrennungsmotor den kleinsten Quotienten aus dem Kraftstoffmassenstrom und der effektiv abgegebenen Leistung. Die Kennlinie ist lediglich für den am Motorenprüfstand vermessenen Drehzahlbereich zwischen 1000 und 5500 U/min dargestellt.

Die Abbildung verdeutlicht, dass das optimierte Ladezustandsmanagement Betriebspunkte des Verbrennungsmotors wählt, die im Vergleich zur Referenzstrategie näher an der Kennlinie des optimalen spezifischen Verbrauchs liegen. Insbesondere in dem Momentenbereich zwischen 0 und 100 Nm sowie dem Drehzahlbereich zwischen 1500

und 3000 U/min treten Verbesserungen auf. Aber auch die ineffizienten Betriebspunkte nahe der Volllast des Verbrennungsmotors zwischen 300 und 400 Nm können durch die optimierte Strategie vermieden werden.

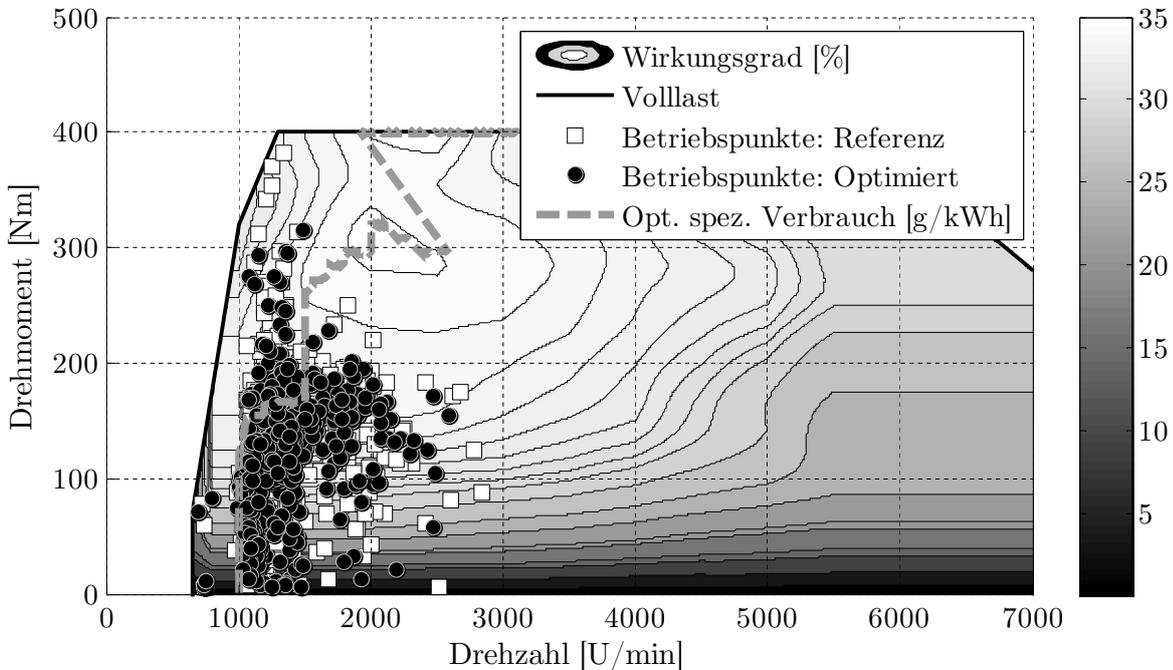


Abb. 6.14: Verteilung der Betriebspunkte im Wirkungsgradkennfeld des Verbrennungsmotors: Das optimierte Ladezustandsmanagement nähert die Betriebspunkte an die Linie mit dem optimalen spezifischen Verbrauch des Verbrennungsmotors an.

6.5 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Das aufwand- und nutzenbasierte Ladezustandsmanagement der Hochvoltbatterie wird in die Steuergerätesoftware des untersuchten Serienhybridfahrzeugs integriert. In die Funktionsentwicklung fließen die Anforderungen des Serienentwicklungsprozesses hinsichtlich der Rechen- und Speicherkapazität der Steuergeräte sowie der Modellierungsrichtlinien der automatisierten Codegenerierung ein. Im Zuge der Integration in die Fahrzeuggesamtarchitektur wird eine neue Schnittstelle zur Situationserkennung und -prädiktion entwickelt, die auf maximalen und minimalen SOC-Grenzwerten basiert.

Model-in-the-Loop Simulationen sowie Messungen an einem Antriebsprüfstand und in Versuchsfahrzeugen bestätigen, dass die Funktion ein in der Form von Testfällen definiertes Zielverhalten erfüllt.

Die Verbrauchseinsparung durch das Ladezustandsmanagement wird an dem Antriebsprüfstand analysiert. Er beinhaltet Verbrennungsmotor, Trennkupplung, E-Maschine, Leistungselektronik und Getriebe. Die Batterie ist durch eine Stromversorgungsanlage abgebildet. Auf dem Steuergerät der E-Maschine ist neben dem optimierten Ladezustandsmanagement auch die Referenzregelung enthalten. Durch die Aktivierung der jeweiligen Funktion mittels eines Applikationsschalters ist ein Vergleich der Kraftstoffverbräuche möglich. Das in Simulationen hergeleitete Einsparpotenzial des Ladezustandsmanagements wird an dem Antriebsprüfstand für den FTP-72 bestätigt. Aus dem gemessenen Kraftstoffverbrauch ergibt sich eine Einsparung von 1 %. Dies lässt den Schluss zu, dass bereits in den Simulationen die spezifischen Anforderungen der Serienentwicklung hinreichend exakt eingeflossen sind.

Die Auswirkungen des Ladezustandsmanagements auf das Fahrverhalten werden in den Funktionen bereits berücksichtigt. Es sind beispielsweise Gradientenbegrenzungen für den Auf- und Abbau des Lade- und Entlademoments sowie Begrenzungen des Lademoments aufgrund der Fahrzeugakustik enthalten. Die Prüfstandsmessungen sowie Erprobungen in Testfahrzeugen belegen die Bewertung aus Abschnitt 5.5, wonach im Serieneinsatz keine zusätzlichen Einschränkungen nötig sind.

Das Einsparpotenzial ist jedoch direkt mit der Strategie des elektrischen Fahrens verknüpft. In den Prüfstandsmessungen kommt im Vergleich zu den Simulationen eine seriennahe Entscheidungslogik mit leicht modifizierten Parametern zum Einsatz. Dies ist beim Vergleich der Messverläufe und der ermittelten Verbrauchsreduzierung mit den Simulationsergebnissen zu berücksichtigen. Das Ziel der Analyse besteht jedoch darin, das unter den Bedingungen eines Serieneinsatzes erreichbare Einsparpotenzial zu ermitteln. Diesem Anspruch wird die Prüfstandsmessung durch die Verwendung seriennaher Softwarestände gerecht.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Hybride Antriebsstränge ermöglichen durch die Kombination von Verbrennungs- und Elektromotor eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zu konventionellen Antrieben. Neben den Komponenten des Antriebsstrangs bestimmt die energetische Betriebsstrategie die Einsparpotenziale.

Das Ziel der Arbeit besteht darin, eine optimierte Betriebsstrategie zu entwickeln, durch deren Einsatz der Kraftstoffverbrauch eines parallelen Full-Hybridfahrzeugs reduziert werden kann. Eine wesentliche Randbedingung stellt die Erreichbarkeit der Verbrauchspotenziale in der Praxis, d. h. in Serienfahrzeugen dar. Die Arbeit gliedert sich in drei Bereiche (vgl. Abbildung 7.1):

1. Analyse der Verbrauchseinsparung in Serienhybridfahrzeugen
2. Entwicklung einer verbrauchsoptimierten Betriebsstrategie
3. Integration von optimierten Betriebsstrategiefunktionen in ein Serienhybridfahrzeug und Nachweis des Einsparpotenzials

Zunächst wird analysiert, weshalb die Einsparpotenziale von Hybridfahrzeugen im Serieneinsatz in der Regel deutlich geringer sind als die in Forschungsprojekten ausgewiesenen theoretischen Potenziale (Schritt 1 in Abbildung 7.1). Hierzu werden Anforderungen an Hybridfahrzeuge im Serieneinsatz ermittelt, welche die Freiheitsgrade der energetischen Betriebsstrategie einschränken. Der Einfluss dieser Restriktionen auf den Kraftstoffverbrauch wird in Simulationen auf Basis des NEFZ ermittelt. Als Referenz dient eine hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs optimierte Betriebsstrategie, die in dem Forschungsprojekt CAR@TUM erarbeitet wurde [15, 14, 17]. Diese erreicht im untersuchten Antriebsstrang eine Verbrauchseinsparung von 29 % gegenüber dem konventionellen Basisfahrzeug. Die Analyse der Betriebsstrategie konzentriert sich auf zwei Bereiche:

- **Einschränkungen durch die spezifischen Anforderungen der Serienentwicklung:** Durch Restriktionen in den Bereichen Emissionsgrenzwerte, Fahrstabilität, Fahrdynamik und Fahrkomfort reduziert sich das Potenzial um 3.5 %.
- **Abstraktionen in der Modellierung der Betriebsstrategie:** Aufgrund der fehlenden Abbildung der Betriebsartenübergänge sowie einer zu geringen Bordnetzlast verkleinert sich die Einsparung um 2.3 %.

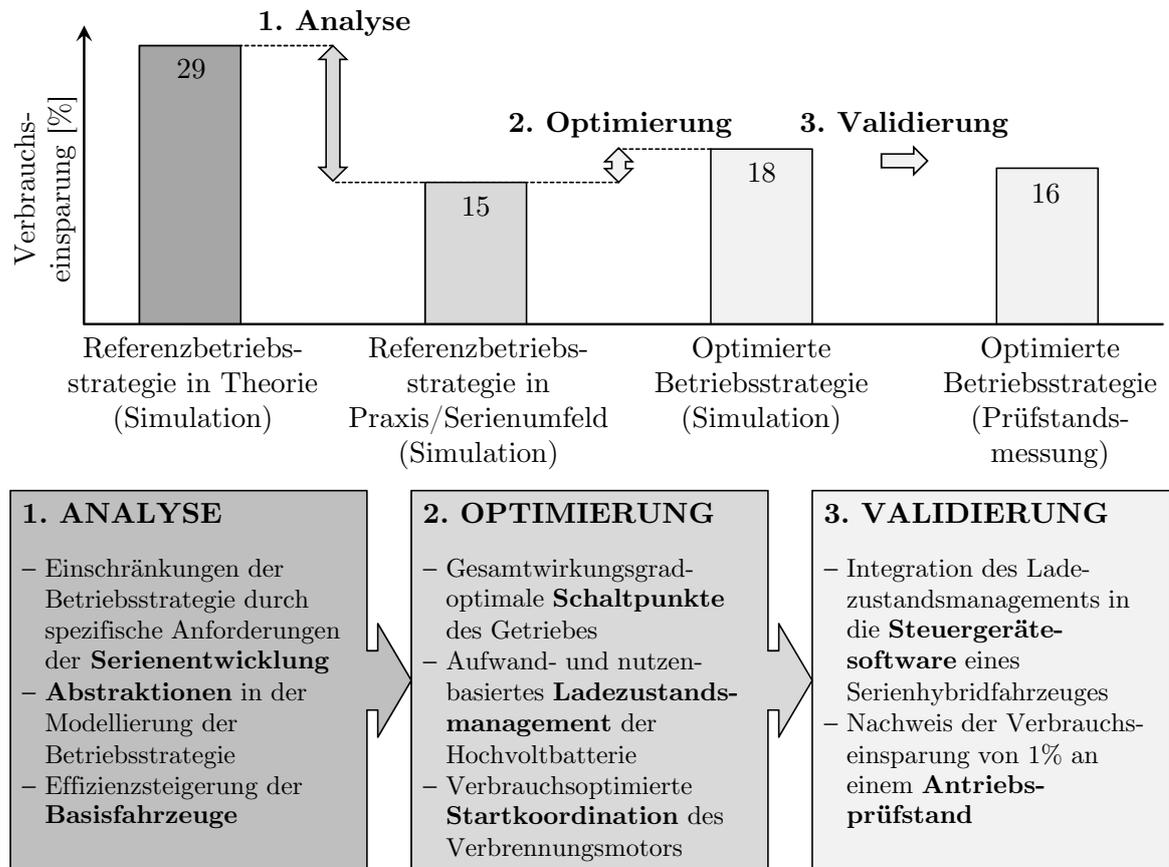


Abb. 7.1: Zusammenfassung der Arbeit: Um den Kraftstoffverbrauch von Hybridantrieben weiter zu reduzieren, werden die Einschränkungen der Serienentwicklung analysiert und eine optimierte Betriebsstrategie entwickelt. Die Verbrauchseinsparung wird in einem Serienhybridfahrzeug nachgewiesen.

Darüber hinaus verringert sich das Einsparpotenzial des Hybridsystems um 8,5 % durch die Effizienzsteigerung der konventionellen Basisfahrzeuge. Dies betrifft die Motor-Start-Stopp-Automatik sowie optimierte Verbrennungsmotoren. Somit verbleibt im Serienumfeld ein Einsparpotenzial von ca. 15 %.

Aufbauend auf der Analyse der Anforderungen in Serienfahrzeugen werden verbleibende Freiheitsgrade in der Referenzbetriebsstrategie ermittelt. Hierfür werden Optimierungsansätze erarbeitet, um das Verbrauchspotenzial des Hybridantriebs zu erhöhen (Schritt 2 in Abbildung 7.1). Diese basieren auf Offlineoptimierungen und berücksichtigen alle an den jeweiligen Leistungsflüssen im Antriebsstrang beteiligten Komponenten. Die Ansätze werden in Simulationen von Fahrzyklen hinsichtlich der Verbrauchseinsparung bewertet:

-
- **Gesamtwirkungsgradoptimale Schaltpunkte des Getriebes:** In Abhängigkeit von Getriebeausgangsmoment und -drehzahl sowie der Betriebsart wird der Gang gewählt, bei dem sich der höchste Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs einstellt. In Simulationen des NEFZ kann der Verbrauch maximal um 1.6 % verringert werden, im FTP-72 um 1.8 %.
 - **Aufwand- und nutzenbasiertes Ladezustandsmanagement der Hochvoltbatterie:** Auf der Basis der spezifischen Verbrauchsänderung in [g/kWh] wird ein maximaler Ladeaufwand und minimaler Entladennutzen definiert. Die Vorgabe erfolgt im Wesentlichen abhängig vom aktuellen SOC. Die Ladeleistung resultiert aus Getriebeeingangsmoment und -drehzahl sowie dem maximalen Aufwand, die Entladeleistung aus Getriebeeingangsmoment und -drehzahl sowie dem minimalen Nutzen. In Simulationen des NEFZ kann der Verbrauch um 1.0 % verringert werden, im FTP-72 um 0.9 %.
 - **Verbrauchsoptimierte Startkoordination des Verbrennungsmotors:** In Abhängigkeit von Getriebeeingangsmoment und -drehzahl wird von den beiden Startsystemen Traktionsmaschine und Startergenerator im Riemen (SGR) dasjenige mit dem geringeren Kraftstoffbedarf ausgewählt und verbrauchseffiziente Startparameter vorgegeben. In der Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs wird das elektrische Anschleppen des Verbrennungsmotors, dessen Selbsthochlauf bis zur Übernahme der Antriebsleistung und die Erzeugung der verbrauchten elektrischen Energie durch Lastpunktanhebung berücksichtigt. In Simulationen des NEFZ und des FTP-72 kann der Verbrauch nicht nennenswert verringert werden.

Die Startkoordination wird aufgrund der zu geringen Einsparpotenziale nicht weiter analysiert. Die beiden anderen Optimierungsansätze werden hinsichtlich der Umsetzbarkeit in Serienfahrzeugen bewertet. Die Potenziale der wirkungsgradoptimalen Gangwahl verringern sich durch Funktionen zur Beruhigung des Schaltverhaltens absolut um jeweils 0.1 %. Die starke Wechselwirkung zwischen Gangwahl und Fahrkomfort sowie -dynamik ist hinsichtlich der Erreichbarkeit der Verbrauchseinsparung im realen Fahrzeug als kritisch zu bewerten. Darüber hinaus halbiert sich das Potenzial, falls auch das konventionelle Basisfahrzeug die optimierten Schaltpunkte für den rein verbrennungsmotorischen Betrieb übernimmt.

Im Falle des Ladezustandsmanagements sind keine Einschränkungen der Potenziale bei einem Einsatz in Serienfahrzeugen zu erwarten. Deshalb wird dieser Ansatz mit den Methoden des Serienentwicklungsprozesses in die Steuergerätesoftware eines Serienhybridfahrzeuges integriert (Schritt 3 in Abbildung 7.1). Die entwickelte Funktion bedient alle durch die Softwarearchitektur vorgegebenen Schnittstellen. Hinsichtlich der Situationserkennung und -prädiktion wird eine neue Schnittstelle erarbeitet, die auf maximalen und minimalen SOC-Grenzwerten basiert. Die Validierung des Lösungsansatzes erfolgt in Model-in-the-Loop Simulationen, an einem Antriebsprüfstand und in Versuchsfahrzeugen. Die Funktion erfüllt alle durch die Serienentwicklung vorgegebenen

Anforderungen. Die real erreichbare Verbrauchseinsparung wird an dem Antriebsprüfstand analysiert. Dieser enthält bis auf die Hochvoltbatterie alle Komponenten des Antriebsstrangs. Die Batterie ist durch eine Spannungsquelle bzw. -senke abgebildet. Aus dem gemessenen Kraftstoffverbrauch resultiert im FTP-72 eine Verbrauchseinsparung durch das Ladezustandsmanagement von 1 % bzgl. der Referenzbetriebsstrategie. Die in den Simulationen ermittelten Werte können somit auch an dem Antriebsprüfstand erreicht werden. Geht man insgesamt von einer Verbrauchsreduktion des untersuchten Hybridantriebs von 15 % im Vergleich zu konventionellen Antrieben aus, so ermöglicht das in dieser Arbeit entwickelte Ladezustandsmanagement eine Einsparung von 16 %. Dies entspricht einer relativen Steigerung des Gesamteinsparpotenzials von 6.7 %.

Weiterführende Forschungsarbeiten bestätigen, dass durch das Ladezustandsmanagement auch im NEFZ eine Einsparung von 1 % am Antriebsprüfstand möglich ist. Um das Einsparpotenzial weiter zu erhöhen, soll zudem ein Verfahren entwickelt werden, welches die optimierten Ladeleistungen nicht anhand der in dieser Arbeit erstellen Offlinealgorithmen sondern auf der Basis von automatisierten Prüfstandsmessungen ermittelt [85]. Dadurch fließen die Wirkungsgrade der realen Antriebsstrangkomponenten und die Wechselwirkungen im Gesamtsystem in die Berechnung ein. Erste Auswertungen zeigen, dass durch die auf diese Weise erzeugten Daten die Verbrauchseinsparung des Ladezustandsmanagements absolut um mindestens 0.3 % erhöht werden kann.

Das entwickelte Ladezustandsmanagement geht von einer Topologie des Antriebsstrangs aus, in der alleine eine E-Maschine Leistungen für Lastpunktverschiebungen des Verbrennungsmotors vorgibt. In zukünftigen Antriebskonzepten werden auch vermehrt Topologien zum Einsatz kommen, die mehrere E-Maschinen kombinieren. So ist z. B. denkbar, eine Traktionsmaschine in Verbindung mit einem Hochvoltstartergenerator einzusetzen. Hierfür wäre der Optimierungsansatz dahingehend zu erweitern, die Lade- und Entladeleistungen zusätzlich zwischen den beiden E-Maschinen verbrauchseffizient zu koordinieren.

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
A	Ladeaufwand	g/kWh
B	Betriebsart	-
b	Spezifische Verbrauchsänderung	g/kWh
D	Prozentuale Abweichung	%
F	Faktor	-
G	Gang	-
k	Anzahl Stützstellen	-
M	Drehmoment	Nm
m	Masse	kg
N	Entladenutzen	g/kWh
n	Drehzahl	1/min
P	Leistung	W
t	Zeit	s

Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
α	Pedalwinkel	rad
η	Wirkungsgrad	-
λ	Luftverhältnis	-
\dot{m}	Kraftstoffmassenstrom	kg/s

Indizes

Index	Bedeutung
Bas	Basisbetrieb
BN	Bordnetz
Break	Break-Even Punkt
eFahr	Elektrisches Fahren
el	Elektrisch
EM	Elektrische Maschine
entlad	Entladen
FP	Fahrpedal
GA	Getriebeausgang
GE	Getriebeeingang
HL	Hochlauf des Verbrennungsmotors
HV-Bat	Hochvoltbatterie
Kst	Kraftstoff
lad	Laden
lim	Limit
LPAb	Lastpunktabsenkung
LPAn	Lastpunktanhebung
LPV	Lastpunktverschiebung
max	Maximal
min	Minimal
NV-Bat	Niedervoltbatterie
opt	Optimiert
Reku	Rekuperation
rel	Relativ
SE	Situationserkennung
SGR	Startergenerator im Riemen
Üb	Überblenden
Umsch	Umschaltung
VM	Verbrennungsmotor

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
3D	Dreidimensional
ASR	Antriebs-Schlupf-Regelung
eFahren	Elektrisches Fahren
EM	Elektrische Maschine
E-Maschine	Elektrische Maschine
FTP	Federal Test Procedure
HV	Hochvolt
K0	Trennkupplung
K1	Anfahrelement im Getriebe
Kat	Katalysator
LPAb	Lastpunktabsenkung
LPAn	Lastpunktanhebung
LPV	Lastpunktverschiebung
Max	Maximal
Min	Minimal
MSA	Motor-Start-Stopp-Automatik
MSR	Motor-Schleppmoment-Regelung
mVM	Verbrennungsmotor angekoppelt
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NV	Niedervolt
OBD	On-Board-Diagnose
oVM	Verbrennungsmotor abgekoppelt
SGR	Startergenerator im Riemen
SOC	State of Charge
SOCM	State of Charge Management
VM	Verbrennungsmotor
ZMS	Zweimassenschwungrad

Abbildungsverzeichnis

1.1	Weltweiter Marktanteil von Elektro- und Hybridfahrzeugen [70]: Für das Jahr 2030 wird ein Marktanteil von Hybridantrieben im Bereich zwischen 30 und 68 % prognostiziert.	2
2.1	Hybride Antriebsstränge werden in drei prinzipielle Topologien klassifiziert: Seriell, parallel und leistungsverzweigt (1: Verbrennungsmotor, 2: Kraftstofftank, 3: E-Maschine, 4: Leistungselektronik, 5: Hochvoltbatterie, 6: Trennkupplung, 7: Anfahrlement, 8: Automatikgetriebe, 9: Planetengetriebe, 10: Hinterachsgetriebe).	4
2.2	Die energetische Betriebsstrategie steuert die Abfolge und Ausprägung der verschiedenen Betriebsarten des Hybridantriebs.	7
2.3	Standardisierte Fahrzyklen zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs: Geschwindigkeitsprofil des NEFZ und des FTP-72.	11
2.4	Ermittlung des Einsparpotenzials hybrider Antriebe: Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, sind die Simulationsergebnisse auf den Zielverbrauch des konventionellen Basisfahrzeugs zu beziehen.	13
2.5	Beispielhafte Architektur der Antriebskoordination eines Hybridfahrzeugs: Aus den Betriebsgrößen des Fahrzeugs und den Fahrervorgaben (Fahr- und Bremspedal) erzeugen die Steuergeräte Stellgrößen für Verbrennungsmotor, E-Maschine und Getriebe.	15
2.6	V-Modell in der Funktions- und Softwareentwicklung [74]: Das Modell definiert die Schritte und Methoden der Entwicklungsarbeiten.	17
2.7	Wirkungsgradkennfeld des Verbrennungsmotors.	18
2.8	Gesamtwirkungsgradkennfeld von E-Maschine und Leistungselektronik bei 300 V.	19
2.9	Wirkungsgradkennfeld des Startergenerators im Riemen (SGR).	20
2.10	Wirkungsgradkennfeld des Hochvoltspeichers.	20
2.11	Schleppmoment an der Eingangswelle des Getriebes (Diagramm oben: Getriebeeingangsdrehzahl ist konstant 2000 U/min; Diagramm Mitte: Getriebeeingangsmoment ist konstant 200 Nm) und Schleppmoment der Trennkupplung K0.	21

3.1	Ziel und Gliederung der Arbeit: Es wird die Differenz der Einsparpotenziale zwischen Theorie und Praxis analysiert, eine optimierte Betriebsstrategie entwickelt und die Verbrauchseinsparung in einem Serienhybridfahrzeug nachgewiesen.	23
4.1	Analysemethode: Ausgehend von einer theoretischen Verbrauchseinsparung werden Einschränkungen durch die Effizienzsteigerung der Basisfahrzeuge, die Anforderungen der Serienentwicklung und Abstraktionen in der Modellierung analysiert.	25
4.2	Betriebsartenverteilung der CAR@TUM-Betriebsstrategie [15] im NEFZ. 26	
4.3	Zeitbereiche im NEFZ, in denen die Betriebsstrategie durch Anforderungen hinsichtlich der Emissionierung beschränkt ist (vgl. Tabelle 4.1).	31
4.4	Beschränkung der Betriebsstrategie im NEFZ durch Anforderungen hinsichtlich der Fahrstabilität: In dem markierten Zeitbereich ist die Verzögerung durch Rekuperation auf 0.5 m/s^2 begrenzt.	32
4.5	Beschränkung der Betriebsstrategie im NEFZ durch Anforderungen hinsichtlich der Fahrdynamik: In dem markierten Zeitbereich wird das Abkoppeln des Verbrennungsmotors nicht zugelassen.	33
4.6	Beschränkung der Betriebsstrategie im NEFZ durch Anforderungen hinsichtlich des Fahrkomforts: In den markierten Zeitbereichen ist die Ladeleistung aufgrund der Fahrzeugakustik in Abhängigkeit von Getriebeeingangsmoment und -drehzahl begrenzt (oben) bzw. muss in Abhängigkeit von Moment und Drehzahl des Verbrennungsmotors ein Schlupf an der Trennkupplung zur Verringerung von Drehungleichförmigkeiten eingestellt werden (unten).	34
4.7	Verringerung des theoretischen Einsparpotenzials im Serieneinsatz: Effizienzsteigerungen der Basisfahrzeuge, Anforderungen der Serienentwicklung an die Betriebsstrategie und Abstraktionen in der Modellierung der Betriebsstrategie reduzieren das in der Praxis erreichbare Einsparpotenzial.	39
5.1	Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung einer verbrauchsoptimierten Betriebsstrategie.	41
5.2	Generische Optimierungsmethode für die Betriebsstrategie: Die Offlineoptimierung wird in drei Schritten vorbereitet, so dass alle Antriebsstrangkomponenten und sämtliche Betriebspunkte berücksichtigt werden können.	47
5.3	Lösungsansatz für eine verbrauchsoptimierte Gangwahl des Getriebes: Für jede Betriebsart werden gesamtwirkungsgradoptimale Gänge in Abhängigkeit von Getriebeausgangsdrehzahl und -moment vorgegeben. Die Kennfelder stammen aus einer Offlineoptimierung.	52

5.4	Optimierte Gangwahl für verbrennungsmotorisches Fahren: Die Gänge bewirken größtenteils niedrige Getriebeeingangsdrehzahlen bei hohem Moment.	55
5.5	Optimierte Gangwahl für Rekuperation mit gekoppeltem Verbrennungsmotor: Über P_{Break} werden die E-Maschinendrehzahlen gering gehalten, darunter steigen sie an.	57
5.6	Optimierte Gangwahl für Rekuperation mit abgekoppeltem Verbrennungsmotor: Im Vergleich zur gekoppelten Rekuperation hat die Trennkupplung einen dominanten Einfluss bei kleinen Momenten.	58
5.7	Optimierte Gangwahl für elektrisches Fahren: Die Rahmenbedingungen entsprechen denen der abgekoppelten Rekuperation.	58
5.8	Lösungsansatz der verbrauchsoptimierten SOC-Regelung: Definition eines maximal zulässigen Ladeaufwands und minimal geforderten Nutzens in Abhängigkeit vom SOC.	62
5.9	Lösungsansatz des verbrauchsoptimierten Ladezustandsmanagements beispielhaft für das Laden: Die Ladeleistung wird in Abhängigkeit von Moment und Drehzahl am Getriebeeingang sowie des maximal zulässigen Ladeaufwands ermittelt.	66
5.10	Freiheitsgrade der Parametervariation: Die SOC-Stützstellen der Nutzenkurve werden größtenteils aus der Aufwand-Kurve abgeleitet, Aufwand und Nutzen für minimalen und maximalen SOC werden in dem Offlinealgorithmus bestimmt.	68
5.11	Veränderungen des relativen SOC im NEFZ und FTP-72 in Phasen mit ausgeschaltetem Verbrennungsmotor: Es treten Veränderungen von bis zu 0.2 Prozentpunkten auf.	71
5.12	Optimierte Ladeleistung bei einem zulässigen Aufwand von 220 g/kWh: Das Laden ist in drei Kennfeldbereichen möglich. Im Fahrbetrieb relevant ist der Bereich mit geringen Getriebeeingangsmomenten.	73
5.13	Optimierte Ladeleistung bei einem zulässigen Aufwand von 250 g/kWh: Im Vergleich zu dem Kennfeld mit 220 g/kWh sind insbesondere im mittleren Kennfeldbereich deutlich mehr Betriebspunkte für eine Lastpunktanhebung geeignet.	74
5.14	Optimierte Entladeleistung bei einem geforderten Nutzen von 260 g/kWh: Das Entladen ist in drei Kennfeldbereichen möglich. Der Großteil der Betriebspunkte befindet sich bei hohen Drehzahlen.	75
5.15	Optimierte Entladeleistung bei einem geforderten Nutzen von 210 g/kWh: Im unteren Kennfeldbereich und dem Gebiet mit sehr hohem Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors wird nicht entladen.	76
5.16	Ergebnis der Parametervariation für den maximalen Aufwand und den minimalen Nutzen: Die Grenzkurven weisen ein breites Plateau im Optimalbereich und steile Übergänge zu den Randbereichen auf.	77

5.17	Lösungsansatz für die verbrauchsoptimierte Startkoordination des Verbrennungsmotors: Auf der Basis von Drehzahl und Moment am Getriebeeingang werden das Startsystem ausgewählt und die Startparameter vorgegeben.	80
5.18	Prozentualer Verbrauchsunterschied zwischen SGR-Start und optimiertem E-Maschinenstart: Der E-Maschinenstart stellt in einem Großteil der Betriebspunkte den effizienteren Start dar (Positive Werte: Vorteil SGR; Negative Werte: Vorteil E-Maschine).	86
5.19	Referenz SOC-Regelung: Vorgabe der Lade- und Entladeleistung in Abhängigkeit vom SOC.	92
5.20	Optimiertes Ladezustandsmanagement im NEFZ: Das Lademoment passt sich dem Betriebspunkt des Fahrzeugs an, so dass der summierte Ladeaufwand am Zyklusende geringer ist.	93
5.21	Wirkungsgradoptimale Gangwahl im NEFZ mit und ohne Limitierungen: Nur wenige Gangsprünge können mittels der Funktionen zur Schaltunterdrückung verhindert werden.	97
5.22	Wirkungsgradoptimale Gangwahl im FTP-72 mit und ohne Limitierungen: Eine Vielzahl von Gangsprüngen kann mittels der Funktionen zur Schaltunterdrückung verhindert werden.	98
5.23	Prozentualer Verbrauchsvorteil der SGR-Starts im Vergleich zu E-Maschinenstarts, die mit einem Schlupf von 50 U/min an dem Anfahrlement durchgeführt werden: Der Bereich mit Verbrauchsvorteilen für den E-Maschinenstart verkleinert sich im Vergleich zu Abbildung 5.18 (Positive Werte: Vorteil SGR; Negative Werte: Vorteil E-Maschine).	100
5.24	Verknüpfung der Optimierungsansätze in einer übergeordneten Betriebsstrategie: Das Ladezustandsmanagement übergibt die Leistung der Lastpunktverschiebung an die Gangwahl und den mittleren Ladeaufwand an die Startkoordination.	102
6.1	Funktionsarchitektur des Ladezustandsmanagements: In einem Algorithmus und einer Parametervariation offline erzeugte Daten fließen in die Funktion auf dem Steuergerät ein.	106
6.2	Sektormodell zur Überführung des 3D-Systems in zwei 2D-Systeme beispielhaft für die Lastpunktanhebung: Die Betriebspunkte werden in Sektoren unterteilt, denen in Abhängigkeit vom maximalen Aufwand jeweils eine Ladeleistung zugeordnet wird.	108
6.3	Ebenenmodell zur Überführung des 3D-Systems in zwei 2D-Systeme beispielhaft für Lastpunktanhebung und drei Ebenen: Jedem Betriebspunkt werden Ladeleistungen für drei Aufwandsebenen zugeordnet, zwischen denen in Abhängigkeit vom maximalen Aufwand übergeblendet wird.	109

6.4	Integration des Ladezustandsmanagements in die Fahrzeuggesamtarchitektur: Es bestehen Schnittstellen innerhalb und außerhalb des Steuergeräts (EM: E-Maschine).	111
6.5	Modul „Aufwand und Nutzen“: Ermittlung der Grenzkurven für Aufwand und Nutzen, Schnittstelle zur Situationserkennung und Bordnetzversorgung, Berechnung eines Ziel-SOC (EM: E-Maschine, eFahr: Elektrisches Fahren, LPAn: Lastpunktanhebung, LPAb: Lastpunktabsenkung, LPV: Lastpunktverschiebung, SOCM: Ladezustandsmanagement, $SOC_{max, SE}$ bzw. $SOC_{min, SE}$: Maximaler bzw. minimaler SOC der Situationserkennung).	113
6.6	Erstellung der Grenzkurve für den maximalen Aufwand: Die SOC-Stützstellen sind u. a. abhängig vom Usecase (z. B. Normal, Sport), der Aufwand im Optimalbereich wird aus dem mittleren Ladeaufwand abgeleitet.	114
6.7	Vorgabe eines minimalen SOC durch die Situationserkennung: Variation der Grenzkurven mit Hilfe zusätzlicher Applikationsparameter.	115
6.8	Modul „Leistungsvorgabe“: Ermittlung der Leistung der Lastpunktverschiebung und des dabei erwarteten Aufwands bzw. Nutzens.	119
6.9	Konfiguration des Antriebsprüfstands: Der Prüfstand enthält beinahe alle Komponenten des Antriebsstrangs. Lediglich das Hinterachsgetriebe wird in einem Fahrzeugmodell berücksichtigt und die Hochvoltbatterie ist durch eine Stromversorgungsanlage abgebildet. Letztere wird anhand eines Batteriemodells angesteuert. Die Belastungsmaschine wird aus dem Fahrzeugmodell angesteuert, die Antriebsquellen aus einem Fahrermodell [84, 85].	122
6.10	Optimiertes Ladezustandsmanagement im ersten Viertel des FTP-72: Während die Referenzstrategie in der Beschleunigung bei 200s sehr stark und mit hohem Aufwand lädt, reduziert das optimierte SOC-Management das Lademoment auf ein Minimum.	126
6.11	Optimiertes Ladezustandsmanagement im zweiten Viertel des FTP-72: Von der Referenzstrategie muss Entladen angefordert werden, deshalb übersteigt der summierte Aufwand des optimierten SOC-Managements den der Referenzstrategie.	127
6.12	Optimiertes Ladezustandsmanagement im dritten Viertel des FTP-72: Durch das aufwand- und nutzenbasierte Laden in der Stadtfahrt von 700 bis 1050s fällt der summierte Aufwand wieder unter den Wert der Referenzstrategie.	128
6.13	Optimiertes Ladezustandsmanagement im letzten Viertel des FTP-72: Der summierte Ladeaufwand des optimierten SOC-Managements bleibt bis zum Zyklusende unterhalb der Kurve der Referenzstrategie.	129

6.14	Verteilung der Betriebspunkte im Wirkungsgradkennfeld des Verbrennungsmotors: Das optimierte Ladezustandsmanagement nähert die Betriebspunkte an die Linie mit dem optimalen spezifischen Verbrauch des Verbrennungsmotors an.	131
7.1	Zusammenfassung der Arbeit: Um den Kraftstoffverbrauch von Hybridantrieben weiter zu reduzieren, werden die Einschränkungen der Serienentwicklung analysiert und eine optimierte Betriebsstrategie entwickelt. Die Verbrauchseinsparung wird in einem Serienhybridfahrzeug nachgewiesen.	134
A.1	Moment und Drehzahl am Getriebeausgang oder -eingang legen die Betriebspunkte der Komponenten fest und sind die Steuergrößen für die Offlineoptimierung.	149
A.2	Optimierte Gangwahl für eine Lastpunktanhebung von 7.5 kW: Aufgrund der Ladeleistung sinken die Maximalmomente je Gang bei niedrigen Drehzahlen.	150
A.3	Optimierte Ladeleistung bei einem zulässigen Aufwand von 280 g/kWh: In einem Großteil der Betriebspunkte werden Ladeleistungen berechnet.	150
A.4	Simulationen mit über den gesamten Fahrzyklus konstantem maximalen Ladeaufwand: Im NEFZ wird SOC-Neutralität bei 250 g/kWh erreicht, im FTP-75 bei 220 g/kWh. Diese Werte geben den Bereich der Parametervariation vor.	151
A.5	Kraftstoffverbrauch des Motorstarts mittels SGR während der Fahrt: Der Verbrauch steigt mit einer Verlängerung der Hochlaufzeit sowie mit wachsender Getriebeeingangsdrehzahl.	153
A.6	Kraftstoffverbrauch des optimierten Motorstarts mittels E-Maschine während der Fahrt: Der Verbrauch steigt vorwiegend mit zunehmender Getriebeeingangsdrehzahl.	153
A.7	Architektur des entwickelten Simulationsmodells in Matlab/Simulink: Nutzung der Simulationsergebnisse einer Dymola-Gesamtfahrzeugsimulation (VM: Verbrennungsmotor, EM: E-Maschine, K0: Trennkupplung).	155
A.8	Optimiertes Ladezustandsmanagement in der ersten Hälfte der FTP-72 Simulation: Das Lademoment passt sich dem Betriebspunkt des Fahrzeugs an.	156
A.9	Optimiertes Ladezustandsmanagement in der zweiten Hälfte der FTP-72 Simulation: Am Zyklusende ist der summierte Ladeaufwand geringer als mit der Referenzstrategie.	157
A.10	Optimierte Ladeleistung bei einem maximalen Aufwand von 250 g/kWh und einer reduzierten Kennfeldauflösung von 22 mal 20: Die reduzierte Auflösung hat keinen Einfluss auf die ermittelten Verbrauchspotenziale.	160

- A.11 Gleitender Mittelwert des Ladeaufwands über fünf Minuten im FTP-72:
Eine kaskadierte Berechnung folgt dem realen Wert hinreichend genau. 160

Tabellenverzeichnis

2.1	Beispielhafte Kraftstoffverbräuche: Auf der Basis dieser Werte wird die Berechnungsmethode der Einsparpotenziale verdeutlicht.	13
2.2	Beispielhafte Einsparpotenziale: Das berechnete Einsparpotenzial variiert in Abhängigkeit von der gewählten Referenz.	14
4.1	Einschränkungen der Betriebsstrategie durch Anforderungen hinsichtlich der Emissionierung.	30
5.1	Modellierung der Komponenten in den Offlinealgorithmen je Betriebsart (VM: Verbrennungsmotor, LPAn: Lastpunktanhebung).	53
5.2	Modellierung der Komponenten in dem Offlinealgorithmus zur Berechnung der verbrauchsoptimierten Lade- und Entladeleistungen.	65
5.3	Variablen und zugehörige Wertebereiche der Parametervariation zur Ermittlung verbrauchseffizienter Grenzkurven für den maximalen Ladeaufwand und minimalen Entladenutzen.	72
5.4	Modellierung der Komponenten zur Ermittlung der verbrauchsoptimierten Zustartvariante.	82
5.5	Zur Optimierung des Zustarts veränderte Parameter: Die Wertebereiche werden durch die verbauten Komponenten beschränkt.	84
5.6	Ergebnis der Parametervariation: Optimierte Parameter des E-Maschinenstarts im Stand.	84
5.7	Sensitivitätsanalyse der Parameter bezogen auf den Gesamtverbrauch beim Zustart per SGR: Hohe Sensitivitäten werden durch eine hohe Datengüte kompensiert.	88
5.8	Sensitivitätsanalyse der Parameter bezogen auf den Gesamtverbrauch beim Zustart per E-Maschine: Hohe Sensitivitäten werden durch eine hohe Datengüte kompensiert.	88
5.9	Verbrauchseinfluss der wirkungsgradoptimalen Gangwahl im NEFZ: Insgesamt kann der Verbrauch um 1.6% verringert werden (VM: Verbrennungsmotor, LPAn: Lastpunktanhebung, oVM: Verbrennungsmotor abgekoppelt, mVM: Verbrennungsmotor angekoppelt).	91
5.10	Verbrauchseinfluß der wirkungsgradoptimalen Gangwahl im FTP-72: Insgesamt kann der Verbrauch um 1.8% verringert werden (VM: Verbrennungsmotor, LPAn: Lastpunktanhebung, oVM: Verbrennungsmotor abgekoppelt, mVM: Verbrennungsmotor angekoppelt).	91

5.11	Simulationsergebnisse für das optimierte Ladezustandsmanagement: Im NEFZ kann der Verbrauch um 1.0 % verringert werden, im FTP-72 um 0.9 %	94
5.12	Minstdrehzahlen bei abgekoppelter Rekuperation	96
5.13	Erhöhung der Schalthäufigkeit mit optimierter Gangwahl: Insbesondere im FTP-72 nimmt die Anzahl der Gangwechsel ohne Schaltbegrenzungen deutlich zu (oVM: Verbrennungsmotor abgekoppelt, mVM: Verbrennungsmotor angekoppelt).	99
5.14	Kraftstoffverbräuche für den Zustart im NEFZ: Der Zyklusverbrauch kann durch den Lösungsansatz nicht nennenswert reduziert werden (GE: Getriebeeingang).	101
6.1	Änderung des Kraftstoffverbrauchs durch 2D-Systeme im Vergleich zum 3D-Kennfeld: Durch das Sektormodell steigt der Verbrauch.	110
6.2	Anpassung des Umschalt-SOC an den Bordnetzbedarf: Bei hohem Bordnetzbedarf wird das Bordnetz stets direkt aus der E-Maschine versorgt.	118
6.3	Testfälle zur Validierung des Ladezustandsmanagements: Die Funktion hat je Testmanöver ein definiertes Zielverhalten sicherzustellen (EM: E-Maschine, LPAb: Lastpunktabsenkung, LPAn: Lastpunktanhebung).	124
6.4	Messergebnisse für das optimierte Ladezustandsmanagement: Wie in den Simulationen kann auch am Prüfstand der Kraftstoffverbrauch um 1 % reduziert werden.	130
A.1	Ergebnis der Parametervariation des Verbrennungsmotorstarts: Optimierte Parameter des Starts mittels der E-Maschine während der Fahrt.	152
A.2	Kraftstoffverbräuche für den Zustart im FTP-72: Der Zyklusverbrauch kann durch den Lösungsansatz nicht nennenswert reduziert werden (GE: Getriebeeingang).	159

A Anhang

A.1 Referenzpunkt im Antriebsstrang

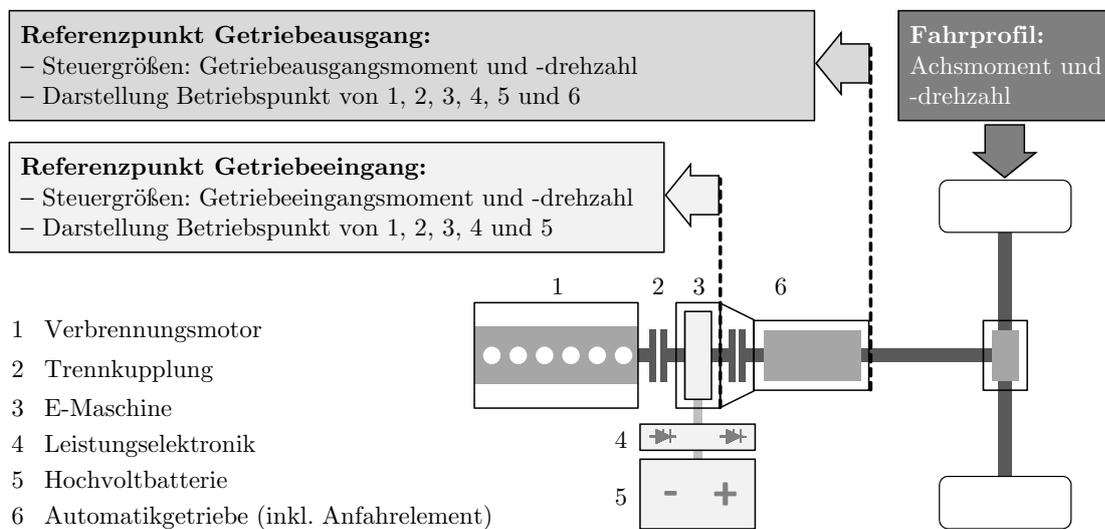


Abb. A.1: Moment und Drehzahl am Getriebeausgang oder -eingang legen die Betriebspunkte der Komponenten fest und sind die Steuergrößen für die Offlineoptimierung.

A.2 Offlineoptimierung und Parametervariation

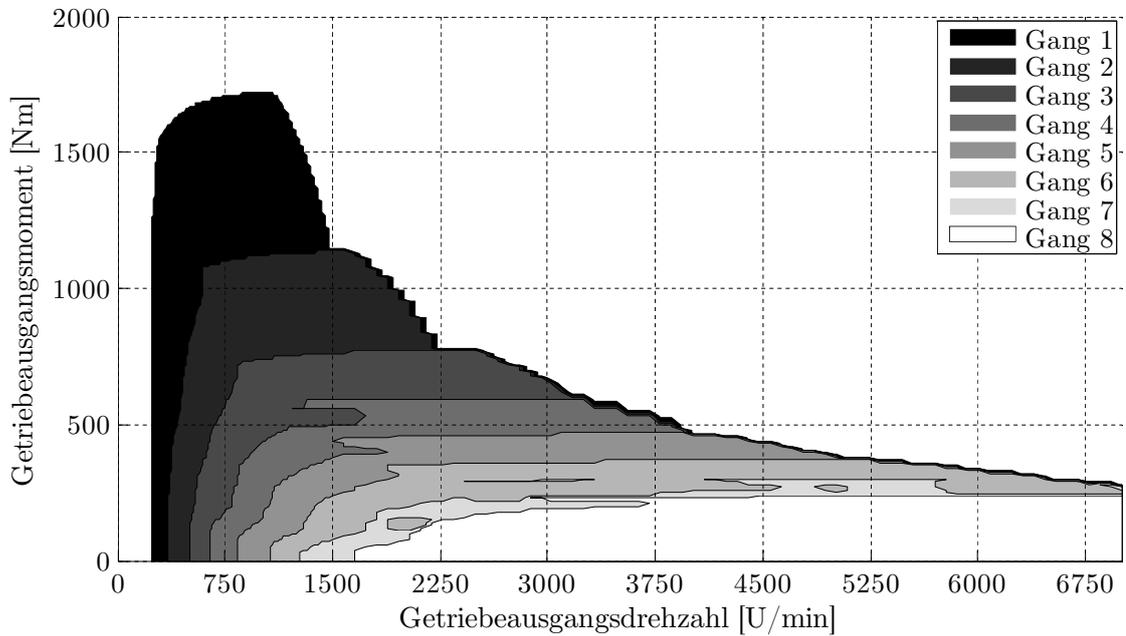


Abb. A.2: Optimierte Gangwahl für eine Lastpunktanhebung von 7.5 kW: Aufgrund der Ladeleistung sinken die Maximalmomente je Gang bei niedrigen Drehzahlen.

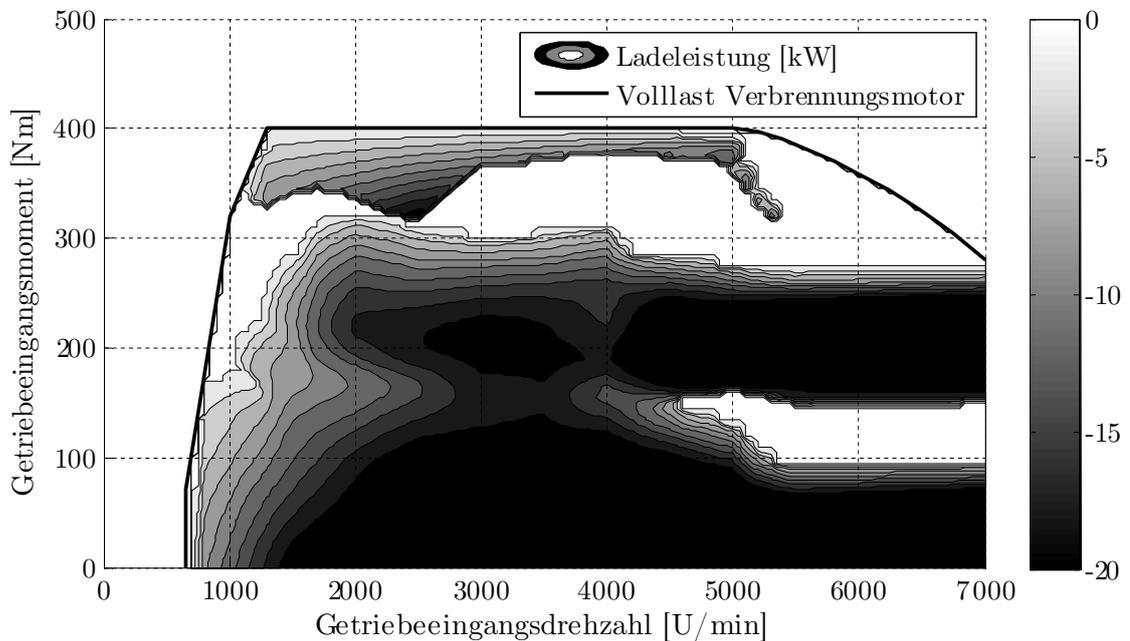


Abb. A.3: Optimierte Ladeleistung bei einem zulässigen Aufwand von 280 g/kWh: In einem Großteil der Betriebspunkte werden Ladeleistungen berechnet.

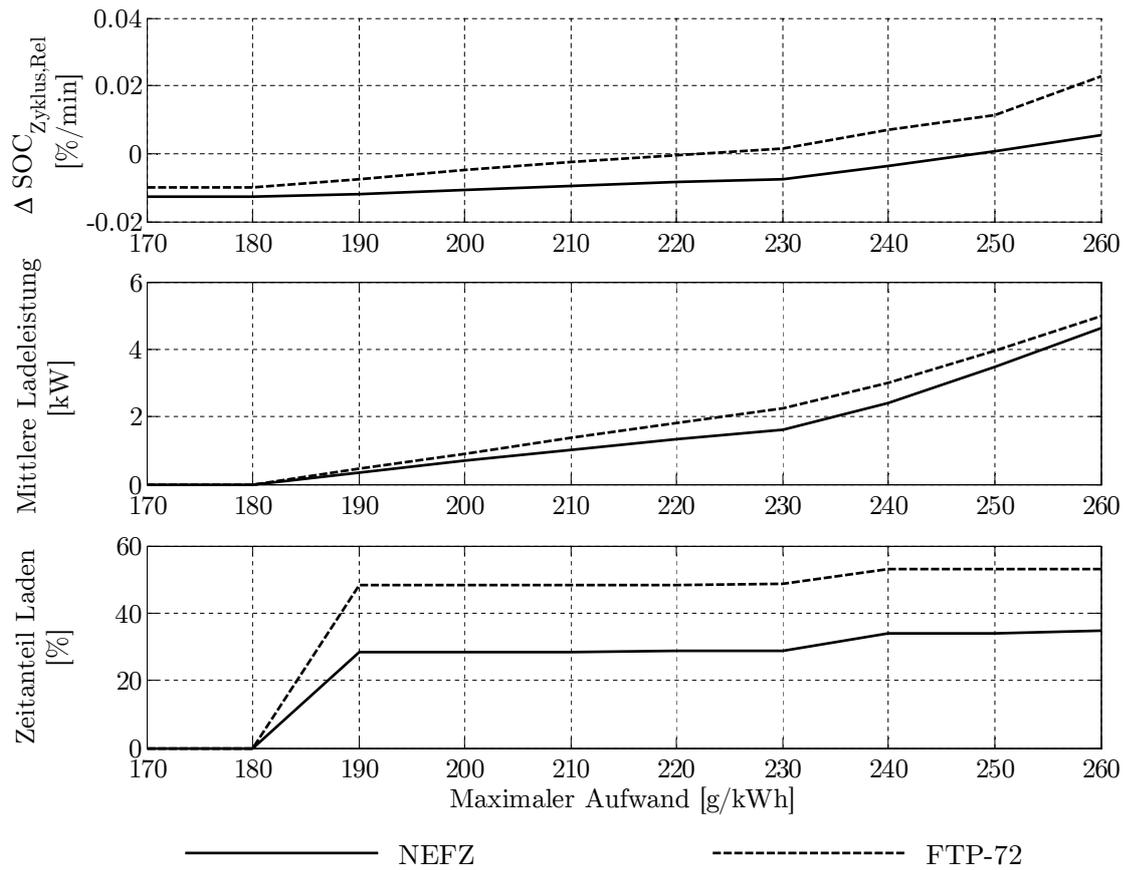


Abb. A.4: Simulationen mit über den gesamten Fahrzyklus konstantem maximalen Ladeaufwand: Im NEFZ wird SOC-Neutralität bei 250 g/kWh erreicht, im FTP-75 bei 220 g/kWh. Diese Werte geben den Bereich der Parametervariation vor.

Zieldrehzahl [U/min]	Moment el. Fahren [Nm]						
	10	20	30	40	50	75	100
700	200	150	150	150	150	100	100
800	200	150	150	150	150	100	100
900	200	200	150	150	150	100	100
1000	200	150	150	150	150	100	100
1200	200	150	150	150	150	100	100
1400	200	150	150	150	150	100	100
1600	200	150	150	150	150	100	100

Momentenbegrenzung [Nm]

Zieldrehzahl [U/min]	Moment el. Fahren [Nm]						
	10	20	30	40	50	75	100
700	6	5.5	5.5	5.5	5.5	3	2
800	6	5.5	5.5	5.5	5.5	2	2
900	6	3	5.5	5.5	5.5	2	2
1000	6	5.5	5.5	5.5	5.5	2	2
1200	6	5.5	5.5	5.5	5.5	2.5	2.5
1400	6	5.5	5.5	5.5	5.5	2.5	2.5
1600	6	5.5	5.5	5.5	5.5	2.5	2.5

Leistungsbegrenzung [kW]

Zieldrehzahl [U/min]	Moment el. Fahren [Nm]						
	10	20	30	40	50	75	100
700	200	200	200	200	200	200	200
800	200	200	200	200	200	200	200
900	200	200	200	200	200	200	200
1000	200	200	200	200	200	200	200
1200	200	200	200	200	200	200	200
1400	200	200	200	200	200	200	200
1600	200	200	200	200	200	200	200

Zünddrehzahl [U/min]

Zieldrehzahl [U/min]	Moment el. Fahren [Nm]						
	10	20	30	40	50	75	100
700	0	0	0	0	0	0	0
800	0	0	0	0	0	0	0
900	0	0	0	0	0	0	0
1000	0	0	0	0	0	0	0
1200	0	0	0	0	0	0	0
1400	0	0	0	0	0	0	0
1600	0	0	0	0	0	0	0

Schlupf K1 [U/min]

Zieldrehzahl [U/min]	Moment el. Fahren [Nm]						
	10	20	30	40	50	75	100
700	50	50	50	50	50	50	50
800	50	50	50	50	50	50	50
900	50	50	50	50	50	50	50
1000	0	0	0	0	0	0	0
1200	0	0	0	0	0	0	0
1400	0	0	0	0	0	0	0
1600	0	0	0	0	0	0	0

Moment ab Zündung [Nm]

Zieldrehzahl [U/min]	Moment el. Fahren [Nm]						
	10	20	30	40	50	75	100
700	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
800	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
900	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
1000	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
1200	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
1400	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
1600	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3

Startzeit [s]

Tab. A.1: Ergebnis der Parametervariation des Verbrennungsmotorstarts: Optimierte Parameter des Starts mittels der E-Maschine während der Fahrt.

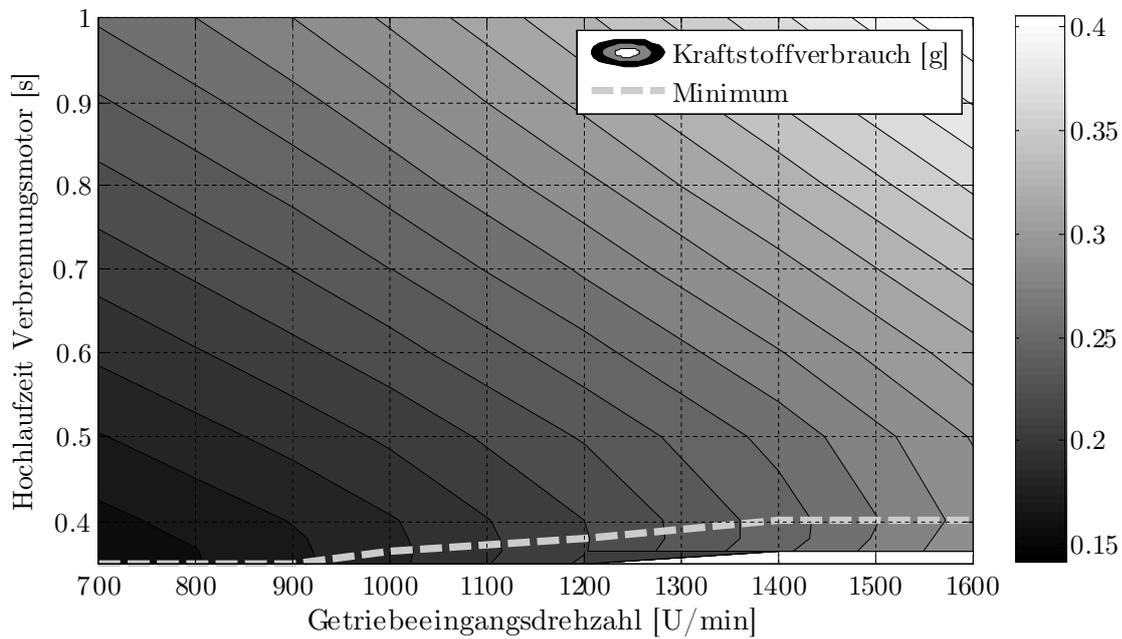


Abb. A.5: Kraftstoffverbrauch des Motorstarts mittels SGR während der Fahrt: Der Verbrauch steigt mit einer Verlängerung der Hochlaufzeit sowie mit wachsender Getriebeeingangsdrehzahl.

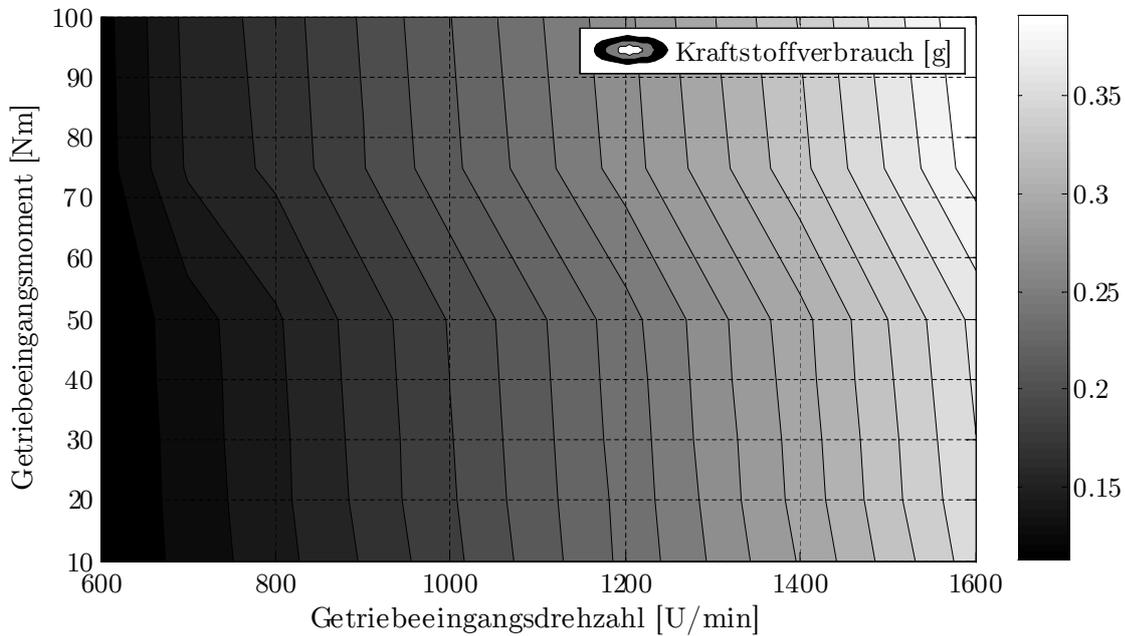


Abb. A.6: Kraftstoffverbrauch des optimierten Motorstarts mittels E-Maschine während der Fahrt: Der Verbrauch steigt vorwiegend mit zunehmender Getriebeeingangsdrehzahl.

A.3 Simulationsmodell und -ergebnisse

Der Aufbau des in Matlab/Simulink erstellten Simulationsmodells ist in Abbildung A.7 dargestellt und wird im Folgenden erläutert. Die dem Modell zugrunde liegenden Daten entsprechen denen der Offlinealgorithmen (vgl. z. B. Tabelle 5.1 auf Seite 53).

- **Hinterachse:** In diesem Block werden das Radmoment und die Fahrzeuggeschwindigkeit aus der Referenzsimulation eingelesen und daraus das Getriebeausgangsmoment und die -drehzahl berechnet.
- **Getriebeeingang:** In diesem Block werden die Getriebeeingangswerte für Moment und Drehzahl ermittelt. Es ist entweder möglich, den Gang des Getriebes aus der Referenzsimulation zu verwenden oder diesen in einer eigenen Gangwahllogik zu ermitteln. Letztere stellt die funktionale Umsetzung des in Kapitel 5.2.1 entwickelten Optimierungsansatzes dar. In der Berechnung der Getriebeeingangsgrößen sind die Getriebeverluste enthalten.
- **Momentenverteilung:** Dieser Block verteilt in Abhängigkeit von der Betriebsart das Getriebeeingangsmoment auf den Verbrennungsmotor und die E-Maschine. Zusätzlich wird das Verlustmoment an der Trennkupplung ermittelt. Es werden die Betriebsart aus der Gesamtfahrzeugsimulation und die Lade- bzw. Entladeleistung aus dem Block „SOC-Regelung“ verwendet. Die Berechnung berücksichtigt die mechanische Getriebeölpumpe, das Anfahren mittels des schlupfenden Anfahrlements sowie die Komponentenlimits.
- **Wirkungsgrade:** Dieser Block dient der Ermittlung der Verlustleistungen bzw. Wirkungsgrade aller Einzelkomponenten und des Gesamtsystems. Außerdem wird der Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors sowie der Lade- und Entladestrom der HV-Batterie berechnet.
- **SOC der HV-Batterie:** In diesem Block wird der Ladezustand des Hochvoltspeichers bestimmt. Er berücksichtigt den Startwert des SOC, den Lade- und Entladestrom sowie die maximal aufnehmbare Ladungsmenge.
- **SOC-Regelung:** Die gewünschte Leistung für eine Lastpunktverschiebung kann in diesem Block entweder aus der Dymolasimulation übernommen oder eigenständig simuliert werden. Darüber hinaus ist eine Funktion auf Basis des in Kapitel 5.2.2 entwickelten Optimierungsansatzes integriert.

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgt mittels der Gesamtfahrzeugsimulation in Dymola. Es werden die Drehzahl- und Drehmomentverläufe des Verbrennungsmotors und der E-Maschine, der SOC-Verlauf sowie der Kraftstoffverbrauch im NEFZ verglichen. Die Momentenverläufe zeigen geringe Abweichungen während der Gangwechsel und im Schleppbetrieb. Diese resultieren daraus, dass die Momenteneingriffe für Schaltungen und der Verbrennungsmotorwarmlauf nicht abgebildet sind. Der SOC-Verlauf

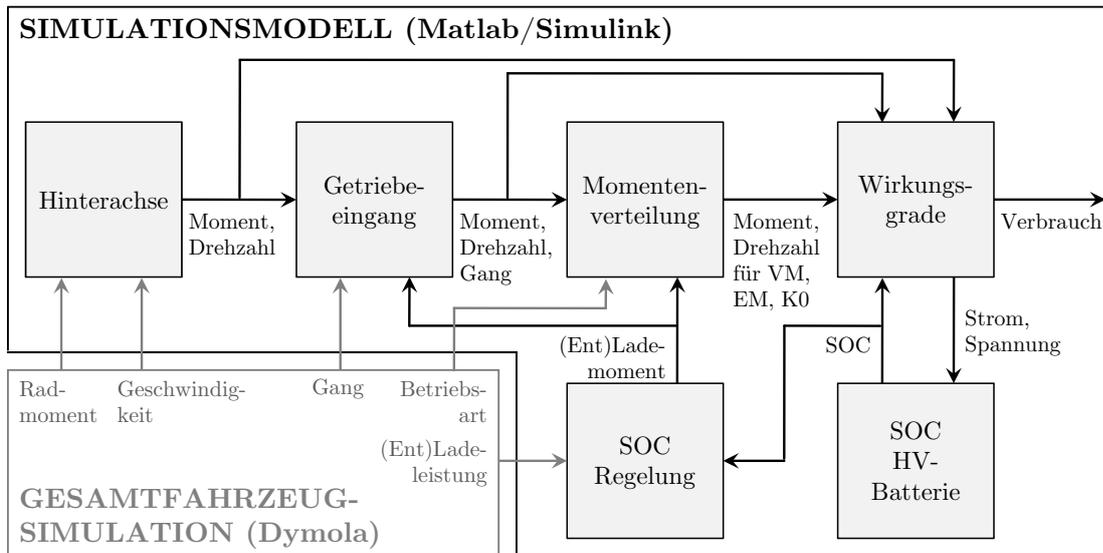


Abb. A.7: Architektur des entwickelten Simulationsmodells in Matlab/Simulink: Nutzung der Simulationsergebnisse einer Dymola-Gesamtfahrzeugsimulation (VM: Verbrennungsmotor, EM: E-Maschine, K0: Trennkupplung).

zeigt, dass sich am Ende des Zyklus ein um 1.1% höherer SOC als in der Referenz einstellt. Ursachen hierfür sind die geringeren Motorschleppmomente aufgrund der fehlenden Warmlaufphase, die als konstant angenommene Zwischenkreisspannung sowie die vereinfachte Abbildung des Speichers. Die genannten Einschränkungen führen dazu, dass der Kraftstoffverbrauch um 0.6% von der Gesamtfahrzeugsimulation abweicht. Um die Verbrauchspotenziale der Optimierungsansätze zu ermitteln, werden in diesem Modell auch stets Referenzsimulationen mit der Basisbetriebsstrategie durchgeführt. Somit können die Effekte der Einschränkungen vernachlässigt werden, da es sich um eine Deltabetrachtung handelt.

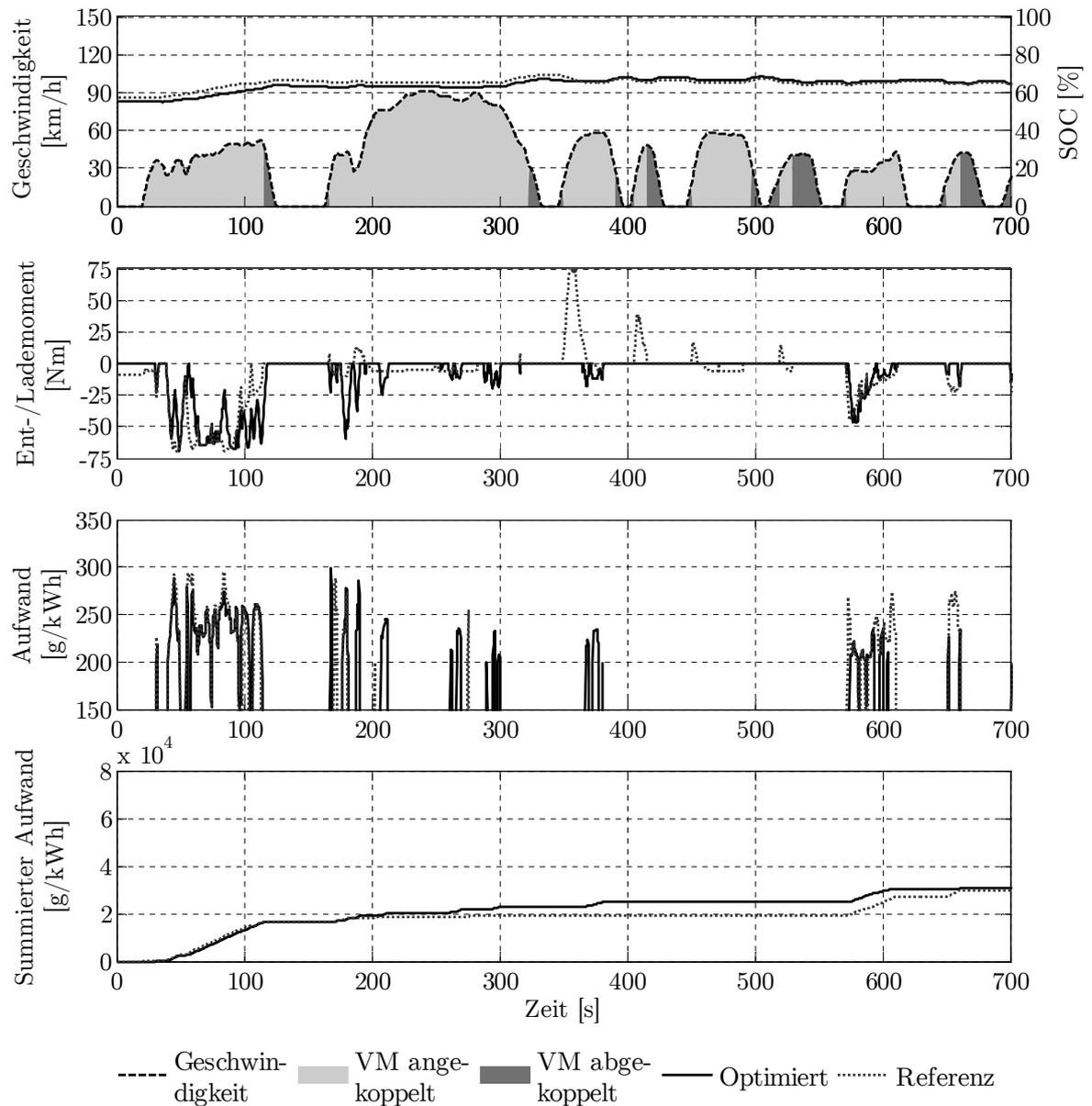


Abb. A.8: Optimiertes Ladezustandsmanagement in der ersten Hälfte der FTP-72 Simulation: Das Lademoment passt sich dem Betriebspunkt des Fahrzeugs an.

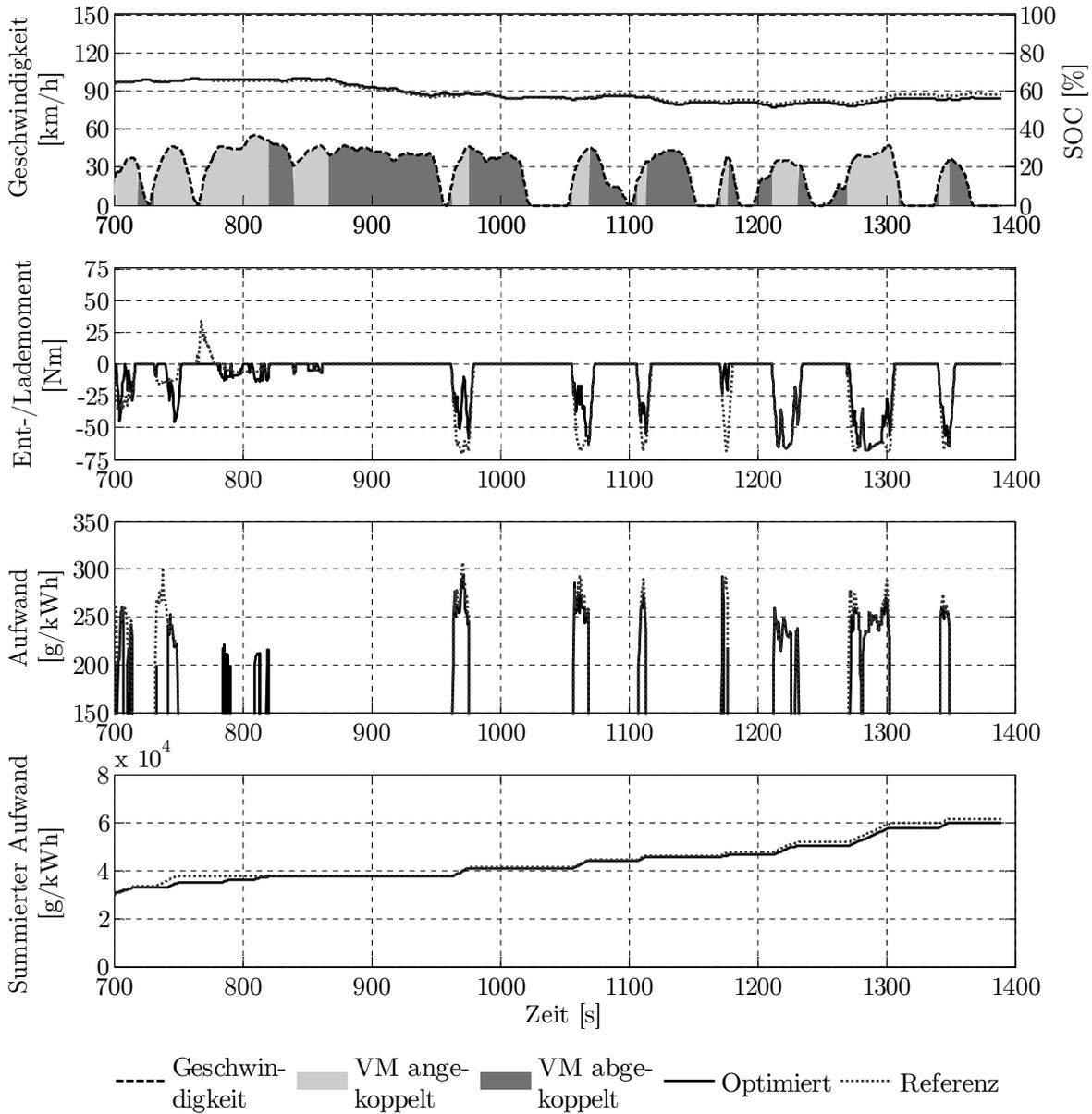


Abb. A.9: Optimiertes Ladezustandsmanagement in der zweiten Hälfte der FTP-72 Simulation: Am Zyklusende ist der summierte Ladeaufwand geringer als mit der Referenzstrategie.

Nr.	M_{GE} [Nm]	n_{GE} [U/min]	Kraftstoffverbrauch [g]		
			SGR (Referenz)	E-Maschine (optimierte Parameter mit Schlupf)	E-Maschine (optimierte Parameter ohne Schlupf)
1	0	0	Erststart	Erststart	Erststart
2	133.4	1405	0.2544	0.2942	0.2535
3	130.3	1342	0.2436	0.2796	0.2394
4	130.4	1400	0.2534	0.2927	0.2522
5	135.3	1495	0.2716	0.3172	0.2757
6	118.4	1281	0.2332	0.2648	0.2259
7	114.1	1238	0.2260	0.2548	0.2164
8	67.7	1247	0.2275	0.2483	0.2147
9	87.0	1180	0.2166	0.2402	0.2041
10	101.5	1418	0.2569	0.2951	0.2565
11	11.5	1289	0.2346	0.2378	0.2121
12	86.1	1513	0.2752	0.3178	0.2799
13	133.9	1369	0.2481	0.2860	0.2454
14	97.0	1472	0.2672	0.3084	0.2698
15	85.8	1530	0.2784	0.3221	0.2841
16	116.9	1199	0.2194	0.2462	0.2079
17	116.5	1314	0.2388	0.2722	0.2332
18	109.4	1434	0.2599	0.2997	0.2605
19	168.7	1242	0.2266	0.2598	0.2175
20	146.9	1358	0.2462	0.2844	0.2430
21	154.3	1334	0.2422	0.2796	0.2378
22	136.2	1483	0.2694	0.3143	0.2728
23	129.6	1416	0.2565	0.2968	0.2562
24	129.3	1400	0.2535	0.2928	0.2523
25	136.8	1495	0.2717	0.3174	0.2758
26	118.0	1281	0.2332	0.2648	0.2259
27	107.8	1240	0.2263	0.2547	0.2168
28	67.7	1248	0.2277	0.2485	0.2149
29	83.4	1182	0.2169	0.2403	0.2044
30	101.1	1418	0.2568	0.2949	0.2564
31	11.5	1290	0.2347	0.2378	0.2121
32	90.8	1514	0.2754	0.3185	0.2801
33	130.3	1369	0.2481	0.2856	0.2453
34	96.7	1472	0.2673	0.3083	0.2698
35	91.6	1531	0.2786	0.3228	0.2844
36	117.0	1199	0.2194	0.2462	0.2079
37	115.8	1314	0.2388	0.2721	0.2332

Nr.	M_{GE} [Nm]	n_{GE} [U/min]	SGR (Referenz)	E-Maschine (optimierte Parameter mit Schlupf)	E-Maschine (optimierte Parameter ohne Schlupf)
38	109.4	1434	0.2599	0.2997	0.2605
Summe aller Starts [g]			9.1541	10.4161	8.9983
Änderung des Verbrauchs bzgl. SGR [%]			Referenz	+14	-2
Auswirkung auf den Zyklusverbrauch [%]			Referenz	+0.14	-0.02

Tab. A.2: Kraftstoffverbräuche für den Zustand im FTP-72: Der Zyklusverbrauch kann durch den Lösungsansatz nicht nennenswert reduziert werden (GE: Getriebeeingang).

A.4 Serienentwicklung

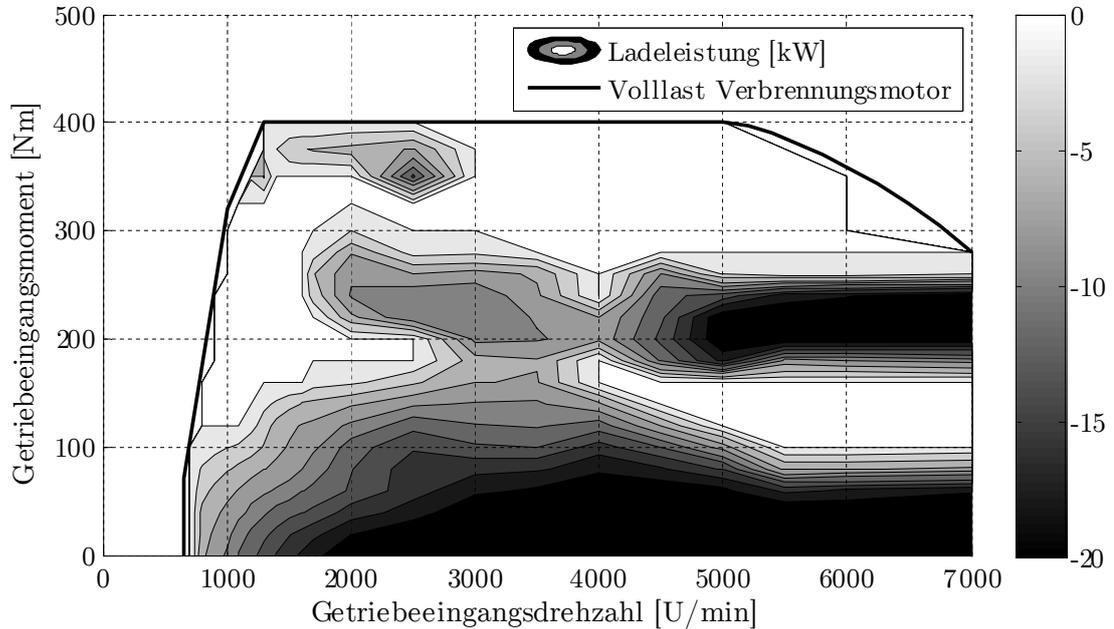


Abb. A.10: Optimierte Ladeleistung bei einem maximalen Aufwand von 250 g/kWh und einer reduzierten Kennfeldauflösung von 22 mal 20: Die reduzierte Auflösung hat keinen Einfluss auf die ermittelten Verbrauchspotenziale.

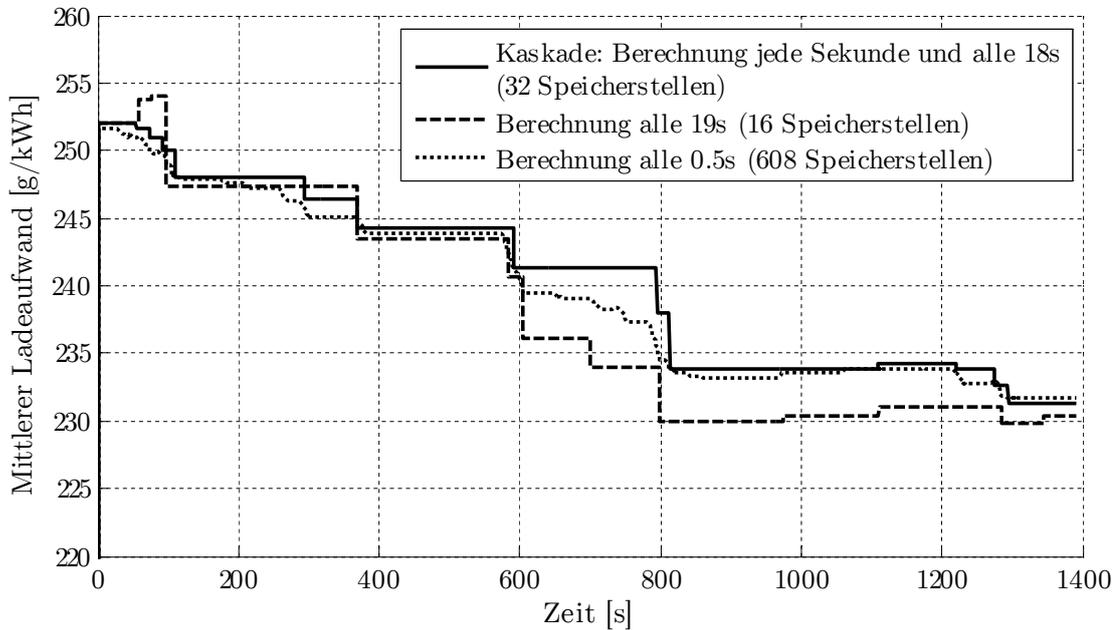


Abb. A.11: Gleitender Mittelwert des Ladeaufwands über fünf Minuten im FTP-72: Eine kaskadierte Berechnung folgt dem realen Wert hinreichend genau.

Literaturverzeichnis

- [1] Anderl, T.: *Kommunikation für Fahrtriebe - Entwicklung am Beispiel eines Hybridantriebs*. Dissertation, Technische Universität München, 2004.
- [2] Annuar, A. und A. Yatim: *A Development of Fuzzy Control of Hybrid Energy System using Ultracapacitor*. In: *2nd IEEE International Conference on Power and Energy*, 2008.
- [3] Atkinson, C., T. Long und E. Hanzevack: *Virtual Sensing: A Neural Network-based Intelligent Performance and Emissions Prediction System for On-Board Diagnostics and Engine Control*. In: *SAE International Congress and Exposition, Paper 980516*, 1998.
- [4] Back, M.: *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridantrieben*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2005.
- [5] Bäker, B. und A. Unger: *Diagnose in mechatronischen Fahrzeugsystemen, III*. Expert Verlag, Renningen, 1. Auflage, 2010.
- [6] Basshuysen, R. (Hrsg.): *Ottomotor mit Direkteinspritzung - Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1. Auflage, 2007.
- [7] Beister, U.-J.: *Aktuelle Entwicklungstendenzen hybrider Antriebskonzepte in den USA*. In: *VDI-Berichte Nr. 1852*, 2004.
- [8] Böckl, M.: *Adaptives und prädiktives Energiemanagement zur Verbesserung der Effizienz von Hybridfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität Wien, 2008.
- [9] Boland, D.: *Wirkungsgradoptimaler Betrieb eines aufgeladenen 1,0 l Dreizylinder CNG Ottomotors innerhalb einer parallelen Hybridarchitektur*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2011.
- [10] Bonkowski, M. und M. Bogner: *Der Riemengetriebene Starter-Generator (RSG) als aktuelle Herausforderung für eine funktionsoptimierte Riementrieb-Systementwicklung*. In: *VDI Berichte*, 2003.
- [11] Brandhoff, S.: *Energetische Analyse und Optimierung des Verbrennungsmotorstarts in hybriden Antriebssträngen*. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2010.

- [12] Bröhl, A. P. und W. Dröschel: *Das V-Modell*. Oldenbourg Verlag, München, 1. Auflage, 1993.
- [13] Bücherl, D., I. Bolvashenkov und H.-G. Herzog: *Verification of the Optimum Hybridization Factor as Design Parameter of Hybrid Electric Vehicles*. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009.
- [14] Bücherl, D., H.-G. Herzog und A. Engstle: *Energetische Betrachtung der Lastpunktanhebung als Maßnahme zur Kraftstoffreduktion in Hybridfahrzeugen*. In: *VDE/VDI-Fachtagung Elektrisch-mechanische Antriebssysteme*, 2008.
- [15] Bücherl, D., W. Meyer und H.-G. Herzog: *Simulation of the Electrical Machine's Fuel Saving Potential in Parallel Hybrid Drive Trains*. In: *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2009.
- [16] Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (Hrsg.): *Elektromobilität und Erneuerbare Energien*. BEE-Position, Mai 2010.
- [17] Bürger, S., B. Lohmann, M. Merz, B. Vogel-Heuser und M. Hallmannsegger: *Multi-Objective Optimization of Hybrid Electric Vehicles Considering Fuel Consumption and Dynamic Performance*. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010.
- [18] California Environmental Protection Agency (Hrsg.): *Malfunction and Diagnostic System Requirements 2004 and Subsequent Model-Year Passenger Cars, Light-Duty Trucks, and Medium-Duty Vehicles and Engines*. California Code of Regulations - Section 1968.2, 2004.
- [19] Cassebaum, O., P. Schuricht und B. Bäker: *Modellprädiktive Regelung als Ansatz für eine effiziente Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*. In: *VDI Fachtagung Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG*, 2008.
- [20] Christ, T.: *Rekuperation in elektrischen Energiebordnetzen von Kraftfahrzeugen*. In: *VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 623*, 2006.
- [21] Christ, T., E. Fuchs, F. Lins und W. Bohne: *Regelstrategien für Hybridantriebe am Beispiel des BMW X6 Active Hybrid*. *ATZ elektronik*, (02):8–15, 2010.
- [22] Christ, T., F. Lins, W. Bohne und E. Fuchs: *Model-Based Control for a Hybrid Powertrain*. In: *10th Stuttgart International Symposium - Automotive and Engine Technology*, 2010.
- [23] Engstle, A.: *Energiemanagement in Hybridfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität München, 2008.
- [24] Europäische Kommission (Hrsg.): *Ergebnisse der Überprüfung der Strategie der Gemeinschaft zur Minderung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und*

- leichten Nutzfahrzeugen*. Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament, 19, 2007.
- [25] Europäische Kommission (Hrsg.): *Eine europäische Strategie für saubere und energieeffiziente Fahrzeuge*. Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament, 186, 2010.
- [26] Europäische Union (Hrsg.): *Regelung Nr. 101 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE)*. Amtsblatt der Europäischen Union - Addendum 100: Regelung Nr. 101, Revision 2, 2007.
- [27] Europäische Union (Hrsg.): *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates*. Amtsblatt der Europäischen Union - Verordnung (EG) Nr. 443, 2009.
- [28] Fesefeldt, T.: *Ganzheitliche Betrachtung zur Auswahl der Starteinrichtung des Verbrennungsmotors eines Parallel-Hybrids mit Trennkupplung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2010.
- [29] Fischer, R.: *Elektrische Maschinen*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 12. Auflage, 2004.
- [30] Fleckner, M., M. Göhring und L. Spiegel: *Neue Strategien zur verbrauchsoptimalen Auslegung der Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*. In: *18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik*, 2009.
- [31] Frei, B.: *Regelung eines elektromechanischen Getriebes für Hybridfahrzeuge*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2005.
- [32] Grundherr, J.: *Möglichkeiten und Grenzen einer Online-Optimierung zur Steuerung eines hybriden Antriebsstranges*. In: *VDI Fachtagung Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG*, 2008.
- [33] Grundherr, J.: *Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer Online-Optimierung*. Dissertation, Technische Universität München, 2009.
- [34] Guzzella, L. und A. Sciarretta: *Vehicle Propulsion Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1. Auflage, 2005.
- [35] Haupt, C., D. Bücherl, A. Engstle, H.-G. Herzog und G. Wachtmeister: *Energy Management in Hybrid Vehicles Considering Thermal Interactions*. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007.
- [36] Heiing, B. und M. Ersoy (Hrsg.): *Fahrwerkhandbuch*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1. Auflage, 2007.

- [37] Hofman, T., M. Steinbuch, R.M. van Druten und A.F.A. Serrarens: *Rule-Based Equivalent Fuel Consumption Minimization Strategies for Hybrid Vehicles*. In: *Proceedings of the 17th World Congress "The International Federation of Automatic Control"*, 2008.
- [38] Hofmann, P.: *Hybridfahrzeuge - Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft*. Springer Verlag, Wien, 1. Auflage, 2010.
- [39] Hu, F. und Z. Zhao: *Optimization of Control Parameters in Parallel Hybrid Electric Vehicles Using a Hybrid Genetic Algorithm*. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010.
- [40] International Energy Agency (Hrsg.): *World Energy Outlook 2010*. 2010.
- [41] John, F.: *Optimierung der Ladezustandsregelung in einem parallelen Hybridantrieb*. Diplomarbeit, Hochschule München, 2010.
- [42] Kersch, S.: *Der Autarke Hybrid – Optimierung des Antriebsstrangs hinsichtlich Energieverbrauch und Bestimmung des Einsparpotentials*. Dissertation, Technische Universität München, 1998.
- [43] Kessels, J., M. Koot, P. van den Bosch und D. Kok: *Online Energy Management for Hybrid Electric Vehicles*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(6):3428–3440, 2008.
- [44] Kim, N., S. Cha und H. Peng: *Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle*. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19(5):1279–1287, 2010.
- [45] Kim, N. und A. Rousseau: *Comparison between Rule-Based and Instantaneous Optimization for a Single-Mode Power-Split HEV*. SAE Paper 2011-01-0873, 2011.
- [46] Kirchner, E.: *Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1. Auflage, 2007.
- [47] Kleimaier, A.: *Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität München, 2003.
- [48] Koch, H.-J., C. Haaren, P. Brunner, H. Foth, M. Jänicke, P. Michaelis und K. Ott: *Umwelt und Straßenverkehr*. Rat der Sachverständigen für Umweltfragen, Berlin, 2005.
- [49] Köhler, E. und R. Flierl: *Verbrennungsmotoren*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 4. Auflage, 2006.
- [50] Koot, M., J. Kessels, B. de Jager, W. Heemels, P. van den Bosch und M. Steinbuch: *Energy Management Strategies for Vehicular Electric Power Systems*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(3):771–782, 2005.

- [51] Krämer, G.: *Laststerverfahren für vollvariable Ventiltriebe zur Berechnung in Echtzeit-Motorsteuerungssystemen*. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2003.
- [52] Kramer, U.: *Potentialanalyse des Direktstarts für den Einsatz in einem Stopp-Start-System an einem Ottomotor mit strahlgeführter Benzin-Direkteinspritzung unter besonderer Berücksichtigung des Motorauslaufvorgangs*. Dissertation, Universität Duisburg – Essen, 2005.
- [53] Kutter, S. und B. Bäker: *Predictive Online Control for Hybrids: Resolving the conflict between global optimality, robustness and real-time capability*. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010.
- [54] Lahl, U.: *Die Verminderung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2007.
- [55] Lin, C.-C., H. Peng und J.W. Grizzle: *A Stochastic Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles*. In: *American Control Conference*, 2004.
- [56] Loos, P. und P. Fettke: *Aspekte des Wissensmanagements in der Software-Entwicklung am Beispiel von V-Modell und Extreme Programming*. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, 2001.
- [57] Lukic, S. und A. Emadi: *Effects of Drivetrain Hybridization on Fuel Economy and Dynamic Performance of Parallel Hybrid Electric Vehicles*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 53(2):385–389, 2004.
- [58] Mashadi, B., A. Kazemkhani und R.B. Lakeh: *An automatic gear-shifting strategy for manual transmissions*. *Journal of Systems and Control Engineering*, 221(15):757–768, 2007.
- [59] Merkisz, J. und P. Bielaczyc: *An analysis of the implementation of EOBD systems in European vehicles*. In: *Proceedings of the 3rd IMechE Automobile Division Southern Centre Conference*, Seiten 177–188, 2004.
- [60] Mladenov, N.: *Modellierung von Autoabgaskatalysatoren*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2009.
- [61] Möckli, D. (Hrsg.): *Brennpunkt Energiesicherheit: Erdölverknappung und die Folgen*. CSS Analysen zur Sicherheitspolitik, Center for Security Studies, ETH Zürich, 2, 2006.
- [62] Naunheimer, H., B. Bertsche und G. Lechner: *Fahrzeuggetriebe*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2. Auflage, 2007.
- [63] Neudorfer, H., N. Wicker und A. Binder: *Comparison of Three Different Electric Powertrains for the Use in Hybrid Electric Vehicles*. In: *4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Seiten 510–514, 2008.

- [64] Ngo, D.V., T. Hofman, M. Steinbuch, A. Serrarens und L. Merx: *Improvement of Fuel Economy in Power-Shift Automated Manual Transmission through Shift Strategy Optimization – An Experimental Study*. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010.
- [65] Ophey, L.: *Entwicklungsmanagement - Methoden in der Produktentwicklung*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1. Auflage, 2005.
- [66] Österreicher, F.: *Anforderungsdefinition und virtuelle Absicherung bei der Entwicklung eines Aktivegetriebes*. In: *VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 690*, 2008.
- [67] Rabenstein, F., M. Klüting, F. Kessler, J. Kretschmer, C.-O. Griebel und E. Hockgeiger: *The Full-Hybrid Powertrain of the new BMW ActiveHybrid 5*. In: *20. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 2011.
- [68] Rau, A.: *Analyse und Optimierung des ottomotorischen Starts und Stopps für eine Start Stopp Automatik*. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2009.
- [69] Reif, K.: *Automobilelektronik*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2. Auflage, 2007.
- [70] Reiner, R., O. Cartalos, A. Evrigenis und K. Viljamaa: *Challenges for a European Market for Electric Vehicles*. European Parliament, Brussels, 2010.
- [71] Rodt, S., B. Georgi, B. Huckestein, L. Mönch, R. Herbener, H. Jahn, K. Koppe und J. Lindmaier: *CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2010.
- [72] Rousseau, A., S. Pagerit und D. Wenzhong Gao: *Plug-in Hybrid Electric Vehicle Control Strategy Parameter Optimization*. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 6(2):1125–1133, 2008.
- [73] Salcher, T., L. Neumann, G. Krämer und H.-G. Herzog: *Fuel-Efficient State of Charge Control in Hybrid Electric Vehicles*. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010.
- [74] Schäuffele, J. und T. Zurawka: *Automotive Software Engineering*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 3. Auflage, 2006.
- [75] Schindler, M.: *Gesamtwirkungsgradoptimale Antriebskoordination für ein paralleles Hybridsystem*. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 2009.
- [76] Schmidt, E.: *Analyse und Optimierung der Gangwahl eines parallelen Hybridsystems*. Diplomarbeit, Hochschule München, 2009.
- [77] Schröder, D.: *Elektrische Antriebe*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 3. Auflage, 2007.

-
- [78] Schutzrecht DE 10 2008 058 668 A1 (2010-05-27). BMW AG: *Drehmomentsteuerung eines elektrischen Antriebmotors eines Fahrzeugs*.
- [79] Schutzrecht DE 10 2008 058 669 A1 (2010-05-27). BMW AG: *Verfahren zur Steuerung der Rekuperationsstärke bzw. des Rekuperationsmoments einer elektrischen Maschine eines Hybrid- oder Elektrofahrzeugs*.
- [80] Schutzrecht DE 10 2010 009 565 A1 (2011-09-01). BMW AG: *Verfahren zur Ermittlung einer Lastpunktverschiebung für einen Verbrennungsmotor eines Hybridfahrzeugs*.
- [81] Schutzrecht WO 00 2011 088 876 A1 (2011-07-28). BMW AG, T. Salcher, M. Schindler, E. Schmidt und G. Krämer. Pr.: DE 10 2010 005 532 2010-01-23: *Verfahren zur Ermittlung eines Soll-Getriebeengangs für ein Hybridfahrzeug*.
- [82] Sciarretta, A., M. Back und L. Guzzella: *Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 12(3):352–363, 2004.
- [83] Serrao, L.: *A Comparative Analysis of Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles*. Dissertation, Ohio State University, 2009.
- [84] Sittig, A., G. Mumelter und F. Rabenstein: *Development and Calibration of Hybrid Electric Vehicles Operating Strategies Combining Simulation and a Hybrid Power Train Test Bench*. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011.
- [85] Sittig, A., T. Salcher und H.-G. Herzog: *Optimierung des Ladezustandsmanagements in der Hybridserienentwicklung am Antriebsprüfstand*. In: *VDI Fachtagung Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG*, 2011.
- [86] Stoica-Klüver, C., J. Klüver und J. Schmidt: *Modellierung komplexer Prozesse durch naturanaloge Verfahren*. Vieweg + Teubner Verlag, 2008.
- [87] Sundström, O.: *Optimal Control and Design of Hybrid-Electric Vehicles*. Dissertation, ETH Zürich, 2009.
- [88] U. S. Environmental Protection Agency (Hrsg.): *Federal Test Procedure*. Code of Federal Regulations - Title 40, Part 86, 2010.
- [89] Vollmer, T.: *Methodik zur Entwicklung einer Fahrstrategie für Fahrzeuge ausgeführt am Beispiel des Autarken Hybrids*. Dissertation, Technische Universität München, 1998.
- [90] Wallentowitz, H. und K. Reif (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1. Auflage, 2006.

- [91] Wei, Xi: *Modeling and Control of a Hybrid Electric Drivetrain for Optimum Fuel Economy, Performance and Driveability*. Dissertation, Ohio State University, 2004.
- [92] Wilde, A.: *Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität München, 2009.
- [93] Wilde, A., J. Schneider und H.-G. Herzog: *Adaptive Energy Management in Hybrid Electric Vehicles: Driving Situation and Driving Style Dependent Charging Strategy for Optimal Power Availability*. In: *8th Stuttgart International Symposium "Automotive and Engine Technology"*, 2008.
- [94] Won, J. S.: *Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle*. Dissertation, Texas A&M University, 2003.
- [95] Yang, Z., C.X. Cao und Y.G. Su: *A method of optimal shift control based on pattern recognition and learning algorithm*. In: *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Seiten 955–952, 2002.