

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fachgebiet für Energiewandlungstechnik

Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen

Andreas Wilde

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. Rolf Witzmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Die Dissertation wurde am 21.11.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 27.10.2009 angenommen.

**Eine modulare
Funktionsarchitektur für
adaptives und vorausschauendes
Energiemanagement in
Hybridfahrzeugen**

Meinem Großvater
Dr.-Ing. Ludolf Peithmann
gewidmet

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Projektleiter in der Vorentwicklung der BMW AG in München. Für die Betreuung der Arbeit und seine vielen wertvollen Anregungen möchte ich zunächst meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog danken. Ebenso gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister für die Übernahme des Mitberichts.

Das Vertrauen, das mir sowohl meine wissenschaftlichen Betreuer als auch meine unmittelbaren Vorgesetzten in der BMW AG Dr.-Ing. Stefan Wolff und Dr.-Ing. Matthias Lederer in diesem Arbeitsumfeld entgegenbrachten, trug in Verbindung mit den zahlreichen fruchtbaren Diskussionen entscheidend zum zügigen Abschluss der Arbeit bei. Insbesondere danke ich der BMW AG für die großzügige finanzielle Ausstattung des Projekts, ohne die meine Dissertation nicht möglich gewesen wäre. Ich danke deshalb allen Beteiligten für diese besonders wirkungsvolle Art der Unterstützung.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen für das stets angenehme Arbeitsklima und die vielfältigen fachlichen Anregungen. Dies gilt besonders für Herrn Dipl.-Ing. Aleksandar Otasevic und Herrn Dr.-Ing. Caglayan Erdem, die mit ihren Ratschlägen wesentlich zum Erfolg der Arbeit beigetragen haben. Des Weiteren erfuhr ich willkommene Unterstützung durch die von mir betreuten Studenten Herrn Tobias Kretzler, Herrn Benjamin Ranft sowie Herrn Jürgen Brugger, weshalb auch ihnen mein besonderer Dank gilt.

Einen großen Anteil am Gelingen der Arbeit hatten auch meine Eltern, die mir auf vielerlei Art Unterstützung zuteil werden ließen und mir dadurch das Promotionsvorhaben erleichterten. Ganz besonders bin ich auch meiner Frau für ihre Geduld und andauernde Unterstützung dankbar.

Zu guter Letzt gilt mein Dank vor allem meinem leider kurz vor Fertigstellung der Arbeit verstorbenen Großvater. Seine unzähligen Ratschläge und sein außerordentliches Interesse am Fortschritt der Dissertation waren für mich die entscheidende Antriebskraft auf dem Weg zur Erlangung der Doktorwürde.

München, im August 2008

Andreas Wilde

Abstract

Due to the relatively low energy density of electrical energy storage devices, the control strategy of hybrid electric vehicles has to fulfil a variety of requirements in order to provide both, the availability of hybrid functions, and their efficient execution. Energy consuming functions such as electric drive or electric boost need a high amount of energy stored in the battery. On the other hand for the optimum use of the energy regeneration function a lower state of charge is preferable in order to enable storage of the kinetic energy of the vehicle in all situations, including upon deceleration from high speeds or downhill driving. These diverging requirements yield a conflict of objectives for the charging strategy of hybrid electric vehicles.

This work proposes a way to overcome the restrictions on efficiency in hybrid electric vehicles without deteriorating overall driving performance by charging or discharging the traction battery, and by setting the energy management parameters according to the current and forthcoming driving situation. Specific charging and electric drive strategies are presented for various driving situations which are identified by sensors such as navigation systems, cameras or radar. Necessary sensor data fusion methods for driving situation identification are described and a modular function architecture for predictive energy management is derived that is plug-and-play compatible with a broad fleet of vehicles. In order to evaluate its potential, this work also focuses on the simulation of the energy functions and their implementation into an experimental vehicle. This allows measurements under real traffic conditions and a sensitivity analysis of the main module interactions within the architecture.

Kurzfassung

Aufgrund der relativ niedrigen Energiedichte heutiger elektrischer Energiespeicher unterliegt die Betriebs- und Ladestrategie von Hybridfahrzeugen vielseitigen Anforderungen, um sowohl die Verfügbarkeit von Energiefunktionen als auch deren effizienten Einsatz sicherzustellen. Energieverbrauchende Funktionen wie die elektrische Antriebsunterstützung oder das rein elektrische Fahren erfordern einen hohen Ladezustand des Energiespeichers. Für die Energierückgewinnungsfunktion ist jedoch ein niedriger Ladezustand von Vorteil, um auch bei Verzögerungen aus hohen Geschwindigkeiten oder Bergabfahrten ein Maximum der kinetischen Energie des Fahrzeugs rückspeisen zu können. Diese konkurrierenden Anforderungen ergeben einen Zielkonflikt im Energiemanagement von Hybridfahrzeugen.

Diese Arbeit stellt eine Methode vor, mit der die Effizienz von Hybridfahrzeugen unter Aufrechterhaltung und Verbesserung der Fahrleistungen weiter gesteigert werden kann, indem die Betriebsstrategieparameter automatisch abhängig von der aktuellen und zukünftigen Fahrsituation gewählt werden. Hierfür werden spezifische Lade- und elektrische Fahrstrategien für eine Vielzahl von Fahrsituationen vorgestellt, die unter Nutzung von Methoden der Sensordatenfusion mit Seriensensoren wie Navigationssystem, Kamera oder Radar erkannt werden können. Aus den einzelnen Strategien wird eine modulare Funktionsarchitektur für prädiktives Energiemanagement abgeleitet, die aufgrund ihrer Plug-and-Play-Eigenschaft mit einer breiten Fahrzeugflotte kompatibel ist. Die Arbeit bewertet zudem die energetischen Potenziale der entwickelten Energiefunktionen mittels Simulation und beschreibt deren Implementierung in ein Versuchsfahrzeug. Dadurch wird ein Fahrbetrieb unter realen Verkehrsbedingungen möglich, der eine Sensitivitätsanalyse der wesentlichen Wechselwirkungen innerhalb der Architektur erlaubt.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Abstract	III
Kurzfassung	IV
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Methoden zur Senkung von Energiebedarf und Emissionen	3
2.2 Energiesysteme in Fahrzeugen	5
2.2.1 Energiewandler	5
2.2.2 Elektrische Energiespeicher	9
2.2.3 Bordnetztopologien	11
2.2.4 Grundlagen der Hybridfahrzeugtechnik	13
2.3 Betriebsstrategien und Energiefunktionen	17
2.3.1 Zielkonflikte im Energiemanagement von Hybridfahrzeugen . .	17
2.3.2 Methoden zur Regelung der Energieflüsse	19
2.4 Fahrzeugsensorik und Steuergerätevernetzung	21
2.5 Entwicklungsprozesse	24
2.6 Zielsetzung der Arbeit	25
3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement	27
3.1 Modulare Energiefunktionen	27
3.1.1 Anforderungen an eine modulare Funktionsarchitektur	27
3.1.2 Modularisierung des Energiemanagements	29
3.2 Zugrundeliegende reaktive Reglerarchitektur	34
3.2.1 Funktionsarchitektur	34
3.2.2 Fahrsituationsabhängige Nachteile der Basisbetriebsstrategie . .	40
3.3 Funktionen zur Mehrung der Kundenwertigkeit	41
3.4 Fahrleistungssteigernde Funktionen	42
3.4.1 Probabilistische Netze zur Fahrsituationsklassifikation	43
3.4.2 Fahrstilabhängige Ladezustandsregelung	49
3.4.3 Konditionierung des Fahrzeugs für Überholmanöver	50
3.4.4 Priorisierung der Antriebsleistung in übrigen Situationen	51
3.5 Effizienzsteigernde Funktionen	52
3.5.1 Modellbasierte energetische Streckenbewertung	52

Inhaltsverzeichnis

3.5.2	Höhenprofilabhängige Ladezustandsregelung	55
3.5.3	Verkehrsflussabhängige Ladezustandsregelung	56
3.5.4	Stauspezifische Betriebsstrategie	57
3.6	Modulare Vernetzung der Funktionen	58
4	Umsetzung der Funktionsarchitektur	62
4.1	Modellbildung und Simulation	62
4.1.1	Modellierung effizienzsteigernder Funktionen	62
4.1.2	Modellierung fahrleistungssteigernder Funktionen	70
4.2	Rapid-Prototyping im Versuchsfahrzeug	74
4.2.1	Ziele	74
4.2.2	Entwicklungsumgebung	75
4.2.3	Softwareimplementierung	77
4.2.4	Implementierung der Plug-and-Play-Fähigkeit	82
4.2.5	Herausforderungen in der Datenübertragung	83
5	Bewertung der Ergebnisse	87
5.1	Grundlegende Chancen und Risiken prädiktiver Energiefunktionen . . .	87
5.2	Simulationsergebnisse	91
5.2.1	Versuchsplan und simulierte Fahrzeuge	91
5.2.2	Höhenprofilabhängige Ladezustandsregelung	92
5.2.3	Verkehrsflussabhängige Betriebsstrategien	97
5.2.4	Fahrleistungssteigernde Funktionen	107
5.3	Ergebnisse aus Erprobungsfahrten	111
5.3.1	Versuchsplan und Bewertungsmethode	111
5.3.2	Höhenprofilabhängige Ladezustandsregelung	113
5.3.3	Verkehrsflussabhängige Ladezustandsregelung	118
5.3.4	Stauspezifische Betriebsstrategie	123
5.3.5	Prädiktion von Überholsituationen	125
5.3.6	Übrige Funktionen zur Fahrleistungssteigerung	129
5.3.7	Ortsabhängige Erweiterung der elektrischen Fahrgrenzen	130
5.4	Diskussion der Ergebnisse	131
6	Zusammenfassung	133
	Anhang	135
	Verzeichnisse	138
	Literatur	149

1 Einleitung

Die Verknappung der Rohölvorkommen auf der Erde sorgt in Verbindung mit geopolitischen Risiken seit mehreren Jahren für steigende Energiepreise. Auf der anderen Seite werden die langfristigen ökologischen Auswirkungen eines ansteigenden CO₂-Gehalts in der Atmosphäre zunehmend kritisch bewertet und nicht zuletzt auf die Verbrennung von fossilen Kraftstoffen im Straßenverkehr zurückgeführt [22, 83].

Im Rahmen einer Selbstverpflichtung setzte sich die ACEA¹ das Ziel, im Mittel aller europäischen Automobilhersteller die CO₂-Emissionen bis 2008 auf 140 g/km zu senken [38]. Das Erreichen dieser Ziele sieht die politische und mediale Öffentlichkeit in Europa inzwischen als gescheitert an. Die politische Folge dieser Tendenzen sind verschärfte Vorschriften zum maximal zulässigen CO₂-Ausstoß von PKW. Im Jahr 2012 dürfen Neufahrzeuge daher nach dem Wunsch der Europäischen Kommission im Mittel nicht mehr als 130 g/km im Normzyklus ausstoßen². Eine Überschreitung dieses Zielwerts hat hohe Strafzahlungen für den Produzenten zur Folge [39]. Die Automobilhersteller sind in Bezug auf den erfolgreichen Absatz von Fahrzeugen somit vielseitigem Druck ausgesetzt, den Kraftstoffverbrauch ihrer Produkte zu senken.

Die beschriebenen Rahmenbedingungen führten in jüngster Vergangenheit gerade im asiatischen und US-Marktumfeld zu ansteigenden Verkaufszahlen von Hybridfahrzeugen, während in Europa der Dieselmotor Marktanteile gewinnen konnte. Jedoch war es insbesondere den japanischen Automobilherstellern Toyota (inklusive Lexus) und Honda auch im europäischen Raum möglich, ihren Entwicklungsvorsprung in der Hybridtechnik gegenüber der automobilen Konkurrenz gezielt zur Imageverbesserung und verstärkten Wahrnehmung der Marken beim Kunden zu nutzen. Zwar kann die Form des Hybridantriebs, die einen mit fossilem Kraftstoff betriebenen Verbrennungsmotor einsetzt, keine Dauerlösung im Sinne der Abkehr von der Erdölabhängigkeit sein; die strengen zukünftigen Abgasvorschriften sind allerdings nur mit ihr oder einem hinsichtlich Emissionsreduzierung gleichwertigen Ansatz zu erfüllen.

Zu einem der wesentlichen Nachteile der Hybridtechnologie zählen die hohen Herstellkosten aufgrund von zusätzlich benötigten Komponenten wie elektrischer Maschine oder Energiespeicher. Um diesen Kosten eine maximale Verbrauchersparnis gegenüberstellen zu können, sind intelligente Betriebsstrategien notwendig, die die Komponenten effizient regeln. Die zunehmende Marktverbreitung von Fahrerassistenzsysteme-

¹ACEA = European Automobile Manufacturers Association

²Weitere 10 g/km müssen durch verbrauchssenkende Maßnahmen eingespart werden, deren Effekte im Normzyklus nicht messbar sind (z.B. Schalteinweise für den Fahrer, Reifendruckkontrollsysteme, etc.).

1 Einleitung

men samt der von ihnen benötigten Umfeldsensorik legt die Zielsetzung nahe, die von diesen Systemen bereitgestellten Informationen zu nutzen, um hybride Antriebsstränge fahrsituationsgerecht steuern zu können. Die Kenntnis über die aktuelle und unmittelbar bevorstehende Fahrsituation (etwa Gefälle, Überholmanöver, sportliche Fahrweise o.ä.) erlaubt eine „maßgeschneiderte“ und damit noch effizientere Regelung der Energiesysteme. Vor allem elektrische Energiespeicher sind aufgrund ihrer relativ geringen Energiedichte und dem damit einhergehenden Risiko von Energiemangel und -überschuss für eine Konditionierung auf kommende Fahrsituationen prädestiniert.

Die vorliegende Arbeit untersucht das Potenzial von vorausschauenden und an aktuelle Fahrsituationen adaptierten Energiefunktionen in hybridisierten Fahrzeugen. Neben der Spezifikation von innovativen Energiefunktionen beinhaltet die Arbeit auch deren Modellierung und simulationsgestützte Bewertung sowie die Implementierung in einem Versuchsfahrzeug. Der Funktionsnachweis im realen Verkehr mit einer Untersuchung der Übereinstimmung von prädizierten und anschließend eintretenden Steuergrößen schließt die Ergebnisse ab.

Ein wesentlicher Grundsatz unterscheidet die Arbeit von anderen Untersuchungen auf dem Gebiet der vorausschauenden Antriebsstrangregelung von Hybridfahrzeugen: Alle Funktionen wurden so spezifiziert, dass sie zu den in der Automobilindustrie etablierten Entwicklungsprozessen kompatibel sind und so eine Umsetzung in die Serie zeitnah möglich scheint. Zudem sorgt eine strikt funktionsorientierte Herangehensweise und die Forderung nach einer modularen Funktionsarchitektur für ein breites Einsatzspektrum in Fahrzeugen unterschiedlicher Ausprägung und Ausstattung. Zu guter Letzt orientiert sich die energetische Evaluierung der vorausschauenden Energiefunktionen immer an der tatsächlich erreichbaren Prädiktionsgüte unter realen Verkehrsbedingungen und nicht – wie in der Literatur bisher oft üblich – an einer Idealprädiktion.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Methoden zur Senkung von Energiebedarf und Emissionen

Zur besseren Einordnung des Kernthemas dieser Arbeit ist ein kurzer Abriss über Möglichkeiten der Effizienzsteigerung beim Kraftfahrzeug hilfreich.

a) Optimierung des Verbrennungsmotors

Die Stellhebel zur Steigerung von Effizienz und Leistungsdichte des Verbrennungsmotors sind die Optimierung des Brennverlaufs, Minimierung von innermotorischer Reibung, Aufladung, Optimierung des Ladungswechsels sowie die Anhebung der Motorlast etwa durch zeitweise Abschaltung einzelner Zylinder [46]. Da Verbrennungsmotoren sogar in ihrem effizientesten Betriebspunkt weit mehr als die Hälfte des Kraftstoffs ungewollt in Wärme umsetzen und im Fahrzeug mit Abstand am meisten Energie aufnehmen, haben Verbesserungen an ihnen einen großen Hebel auf den gesamten Energiebedarf des Fahrzeugs.

b) Reduzierung der Fahrwiderstände

Die Reduzierung der Fahrwiderstände kann als verbrauchssenkende Maßnahme am Gesamtfahrzeug bezeichnet werden. Die aufgrund dieser Widerstände entstehenden, dem Antrieb entgegenwirkenden Kräfte sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

Für den Zusammenhang zwischen Kraft und Leistung gilt [25]:

$$E = Fs; \quad P = \frac{E}{t} = F \frac{s}{t} = Fv \quad (2.1)$$

Die Antriebsleistung P_{mot} ergibt sich demnach mit η_{Antr} als Wirkungsgrad des gesamten Antriebsstranges zu¹:

$$P_{\text{mot}} = \frac{P_{\text{wid}}}{\eta_{\text{Antr}}} \quad (2.2)$$

¹ siehe auch Kapitel 4

2 Grundlagen und Stand der Technik

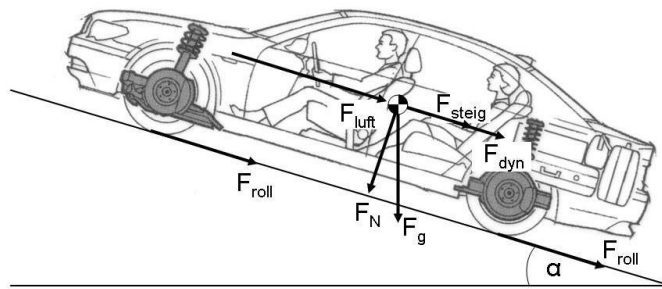


Abbildung 2.1: Längsdynamische Fahrwiderstände

Die benötigte Kraftstoffmenge ist demnach von den Widerstandsleistungen $P_{\text{wid}} = f(F_{\text{dyn}}, F_{\text{steig}}, F_{\text{roll}}, F_{\text{luft}}, v, \dots)$ abhängig. Durch aerodynamische Optimierung der Karosserie oder Optimierung des Reifenmaterials und -profils hinsichtlich des Rollwiderstands sind demnach erhebliche Verbrauchssenkungen zu realisieren. Durch Verringerung der Fahrzeugmasse m oder eine vorausschauende Fahrweise mit geringerer Anzahl an Beschleunigungen kann der Kraftstoffverbrauch weiter gesenkt werden.

c) Umstieg auf alternative Energieträger

Alternative Energieträger bieten das Potenzial, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren und den CO_2 -Ausstoß zu verringern. Biogene Diesel- und Otto-Kraftstoffe sind regenerative Energieträger, die theoretisch bei der Verbrennung nicht mehr CO_2 erzeugen als die produzierenden Pflanzen während des Wachstums der Atmosphäre entzogen haben. In die Bilanz muss jedoch auch der CO_2 -Ausstoß während der Produktion einfließen [17, 63, 85]. Wasserstoff als Alternativkraftstoff kann in Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen zur Energiewandlung genutzt werden. Er ist hoch reaktiv und die Verbrennung schadstofffrei, aber auch leicht flüchtig und damit schwer speicherbar. Die Frage nach der industriellen und in der CO_2 -Bilanz sinnvollen Herstellung von reinem Wasserstoff ist noch weitgehend ungeklärt.

d) Elektrifizierung von Fahrzeugkomponenten

Der elektrische Antrieb von ursprünglich mechanisch betriebenen, fest gekoppelten Komponenten bietet den Vorteil der freien bedarfsgerechten Regelbarkeit. Verlustleistungen zu Zeiten, in denen die Funktion der Komponente nicht benötigt wird, werden so vermieden. Beispiele für bereits umgesetzte Elektrifizierungen sind elektrische Motornebenaggregate wie Wasserpumpe, Klimakompressor oder Lenkhilfssysteme [11, 59, 73, 98, 102]. Die Integration einer Elektromaschine samt elektrischem Energiespeicher in den Antriebsstrang eines Fahrzeugs, Hybridisierung genannt, hat einen ähnlichen Effekt: An Betriebspunkten mit geringen benötigten Antriebsleistungen können der Verbrennungsmotor gestoppt und seine schlechten Wirkungsgrade umgangen werden.

e) Intelligente Betriebsstrategien

Eine weitere Methode zur Effizienzsteigerung ist der Einsatz intelligenter Betriebsstrategien aller Energiesysteme wie Motor, Generator, Nebenaggregate oder Komfortverbraucher. Beispiele hierfür sind die Abschaltung von Zündung und Einspritzung während der Schubphasen (Schubabschaltung), die Motor-Start-Stopp-Automatik (MSA) sowie intelligente Generatorregelungen [68, 82]. Noch größeren Einfluss auf die Effizienz haben Betriebsstrategien in Fahrzeugen mit zusätzlichen, zyklisierbaren Energiespeichern und mehreren Antriebsmaschinen. Freiheitsgrade wie Lade- oder Entladeleistung des Speichers bzw. die Leistungsaufteilung auf die Antriebsquellen können den Kraftstoffverbrauch senken – die Notwendigkeit von intelligenten Betriebsstrategien liegt daher auf der Hand. Je mehr Informationen über die aktuelle und zukünftige Fahrzeugnutzung vorliegen, umso besser können Betriebsstrategien sich diesen Informationen anpassen. Das Kernthema dieser Arbeit ist in die Kategorie der intelligenten Betriebsstrategien einzuordnen. Die folgenden Kapitel werden zeigen, wie eine bereits für die momentane Fahrzeugnutzung optimierte Betriebsstrategie eines Hybridfahrzeugs mithilfe von Umfeldinformationen weitere Potenziale ausschöpfen kann.

2.2 Energiesysteme in Fahrzeugen

2.2.1 Energiewandler

Systeme zur Wandlung von Energie sind auf absehbare Zeit vor allem Verbrennungsmotoren zur Wandlung von chemischer in mechanische Energie. Dazu kommen Elektromaschinen zur bidirektionalen Umwandlung von mechanischer und elektrischer Energie. Im Energiemanagement ist eine intensive Kenntnis von deren Verlustleistungen Voraussetzung für die Spezifikation von innovativen Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion.

a) Verbrennungsmotoren

Die weite Verbreitung von Verbrennungsmotoren ist in erster Linie auf ihre sehr hohe volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte sowie die Energiedichte des benötigten Kraftstoffes zurückzuführen, weniger aber auf die energetische Effizienz der Motoren. Modernste Ottomotoren sind mit einer Vielzahl der in Kapitel 2.1 erwähnten Maßnahmen ausgestattet und erreichen dennoch nur absolute Spitzenwirkungsgrade von etwa 35 %. Dieselmotoren derselben Entwicklungsstufe kommen auf etwa 42 % [46] – im durchschnittlichen Fahrzeugbetrieb erreichen beide Motoren jedoch noch deutlich niedrigere Werte. Der absolute Wirkungsgrad ist definiert als der Quotient aus Nutzen und Aufwand. Der Nutzen ist beim Verbrennungsmotor die abgegebene mechanische Leistung P_{mech} , der Aufwand die dafür zugeführte chemische Leistung P_{chem} in Form eines Kraftstoffvolumenstroms:

2 Grundlagen und Stand der Technik

$$\eta_{\text{abs}} = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{chem}}} \quad (2.3)$$

Abbildung 2.2 zeigt das absolute Wirkungsgradkennfeld eines typischen 6-Zylinder-Ottomotors. Auffällig sind der stark abnehmende Wirkungsgrad im unteren Lastbereich sowie das Optimum bei mittleren Drehzahlen und nahezu Volllast. Diese Charakteristik kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass ein Verbrennungsmotor erst ab einer gewissen Mindestdrehzahl selbst lauffähig und in der Lage ist, mechanische Leistung abzugeben. Im Betriebspunkt dieser Mindestdrehzahl erzeugt das Aggregat zwar schon mechanische Verluste durch Reibung, jedoch keinerlei nutzbare Leistung an der Kurbelwelle. Bei gegebener Drehzahl ist es somit effizienter, den Motor mit höherer Last zu betreiben, da man aus den nahezu drehzahlproportionalen Reibungsverlusten mehr Nutzen zieht. Erst nahe der Volllastkennlinie des Motors sinkt der Wirkungsgrad, da hier üblicherweise aus thermischen Gründen das Gemisch angefettet wird [17, 46].

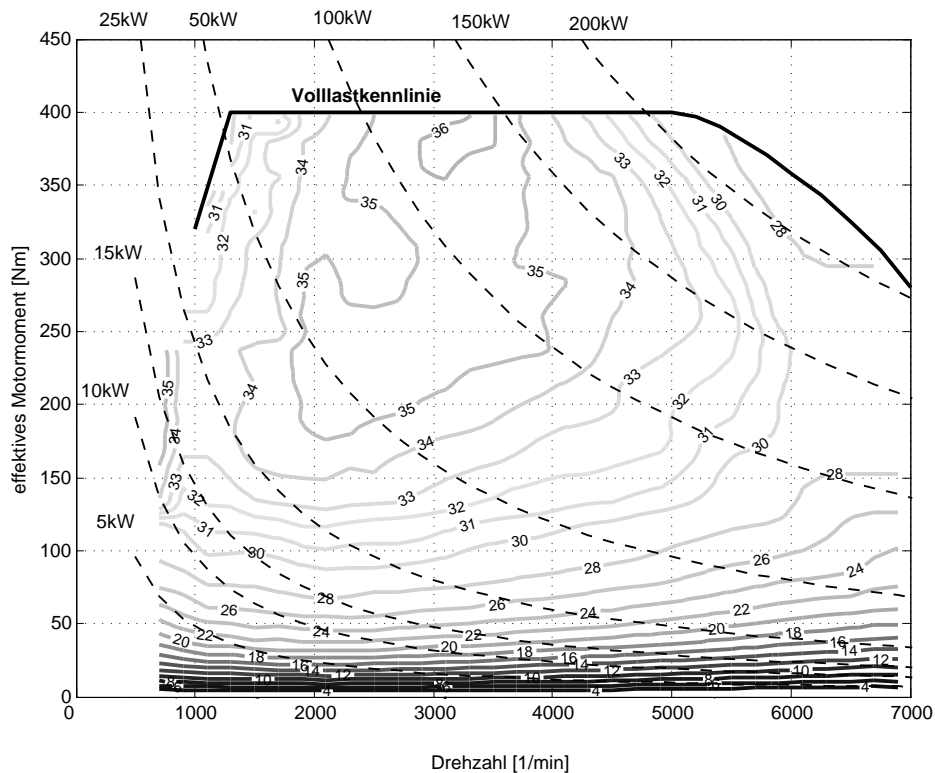


Abbildung 2.2: Wirkungsgradkennfeld eines 6-Zylinder Ottomotors

Für die Untersuchungen der folgenden Kapitel ist jedoch oft nicht der absolute Wirkungsgrad der Komponenten entscheidend, sondern ihr relativer oder auch differenzieller Wirkungsgrad [31, 76, 86]. Er ist definiert als:

2 Grundlagen und Stand der Technik

$$\eta_{\text{rel}} = \frac{\Delta P_{\text{mech}}}{\Delta P_{\text{chem}}} \quad (2.4)$$

In den meisten Fahrsituationen muss der Verbrennungsmotor zum Vortrieb des Fahrzeugs laufen; seine Reibungsverluste müssen demnach ohnehin schon überwunden werden und können bei einer zusätzlich aufgeprägten Last (wie etwa ein Generatormoment) nicht erneut negativ in die Wirkungsgradbilanz einfließen. Deshalb wird die zusätzlich zum Fahrzeugvortrieb vom Verbrennungsmotor erzeugte Energie nicht mit dem absoluten Wirkungsgrad $\eta_{\text{VM,abs}}$, sondern mit dem differentiellen $\eta_{\text{VM,rel}}$ erzeugt. Abbildung 2.3 veranschaulicht diesen Zusammenhang mit den so genannten Willans-Linien für einen 6-Zylinder Ottomotor.

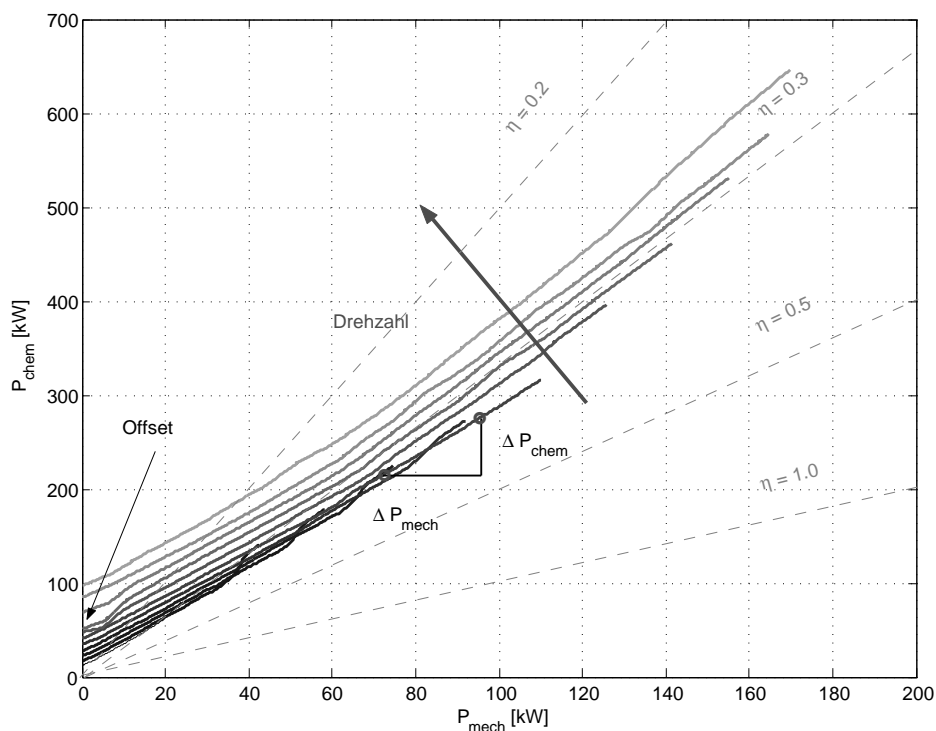


Abbildung 2.3: Willans-Linien eines 6-Zylinder Ottomotors

Die Willans-Linien beschreiben das Verhältnis von chemisch aufgewendeter Leistung für den Betrieb des Verbrennungsmotors P_{chem} zur absolut erbrachten mechanischen Ausgangsleistung P_{mech} . Der Darstellung ist zu entnehmen, dass bei 0 kW mechanischer Ausgangsleistung bereits chemische Energie zum Betrieb des Motors aufgebracht werden muss (z.B. im Leerlauf). Mit steigender Ausgangsleistung steigt die aufzuwendende chemische Leistung nahezu linear, d.h. der differentielle Wirkungsgrad bleibt über weite Betriebsfenster hinweg konstant und sinkt erst im Bereich der Vollastanfettung. Diese Eigenschaft eines nahezu konstanten differentiellen Wirkungsgrades von etwa 42,5 % ist entscheidend bei der Spezifikation einer Betriebsstrategie für

2 Grundlagen und Stand der Technik

Hybridfahrzeuge. Sie bedeutet, dass es nahezu irrelevant ist, zu welchem Zeitpunkt (d.h. in welchen Betriebspunkten) während der Fahrt der Verbrennungsmotor genutzt wird, um über den Generator die Traktionsbatterie zu laden. Es besteht nur die Einschränkung, den Verbrennungsmotor nicht während des Fahrzeugstillstands zu starten, um die Batterie zu laden. Denn dann müssten die Verluste des Motors in die Wirkungsgradbilanz zum Laden der Batterie einbezogen werden – das Laden des Speichers erfolgte mit dem niedrigeren, absoluten Wirkungsgrad.

b) Elektromaschinen

Elektromaschinen weisen bei der Energiewandlung deutlich höhere Wirkungsgrade auf als Verbrennungsmotoren. Sie erreichen je nach Betriebspunkt, Bauweise und Größe absolute Wirkungsgrade von über 95 % [41]. Ihr wesentlicher Vorteil ist außerdem die Fähigkeit, aus dem Stand heraus das maximale Drehmoment erzeugen zu können. In der Hybridfahrzeugtechnik spielen vor allem permanenterrregte Synchronmaschinen eine Rolle, die aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades und der besonders hohen Leistungsdichte bevorzugt werden. Abbildung 2.4 zeigt ein Wirkungsgradkennfeld einer permanenterrregten Synchronmaschine, wie sie heute in Hybridfahrzeugen zum Einsatz kommt. Das Diagramm zeigt die Wirkungsgrade in ihrem Verhältnis zum Bestpunkt. Auffällig ist der große Bereich, in dem die Wirkungsgrade um nicht mehr als 10% einbrechen.

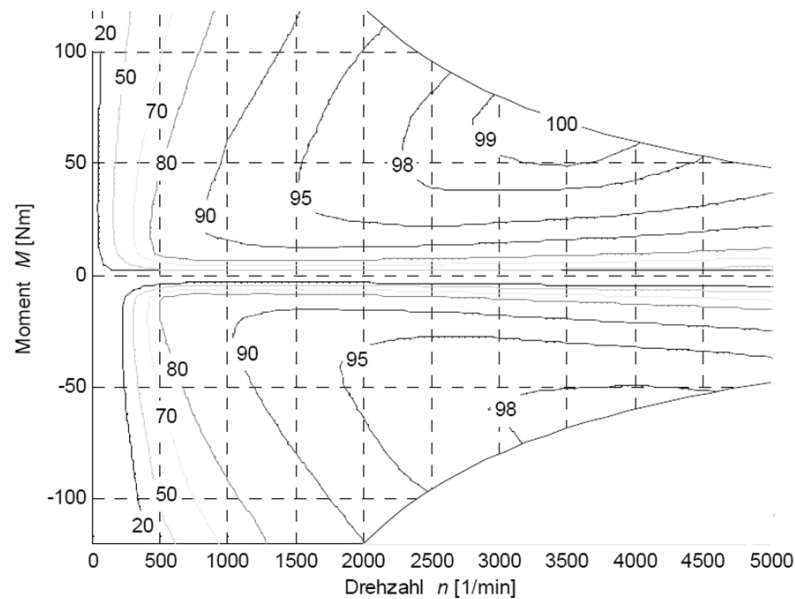


Abbildung 2.4: Qualitatives Wirkungsgradkennfeld einer permanenterrregten Synchronmaschine

Aufgrund der Verluste im Teillastbereich, die noch vor Erzeugung einer nutzbaren Ausgangsleistung auftreten, muss auch bei E-Maschinen zwischen absolutem und dif-

ferenziellem Wirkungsgrad unterschieden werden. Da die Nullleistungsverluste aber deutlich geringer ausfallen als bei Verbrennungsmotoren, ist der Unterschied zwischen absolutem und relativem Wirkungsgrad kleiner.

2.2.2 Elektrische Energiespeicher

Die in dieser Arbeit untersuchten Energiefunktionen greifen in die Regelung des Ladezustands von elektrischen Energiespeichern ein. Deshalb ist die Kenntnis der Funktionsweise moderner elektrischer Speicher Voraussetzung für das Verständnis der Funktionen. Elektrische Energiespeicher sorgen für eine Stabilisierung der Bordnetzspannung und befähigen Fahrzeuge zur elektrischen Rekuperation von kinetischer Energie. Wie Abbildung 2.5 zeigt, existiert heute noch keine elektrische Speichertechnologie, die gleichzeitig höchste Energie- und Leistungsdichten erreicht. Vielmehr muss je nach Einsatzfall ein Speicherkonzept gewählt werden, das den Anforderungen gerecht wird, jedoch immer einen Kompromiss darstellt.

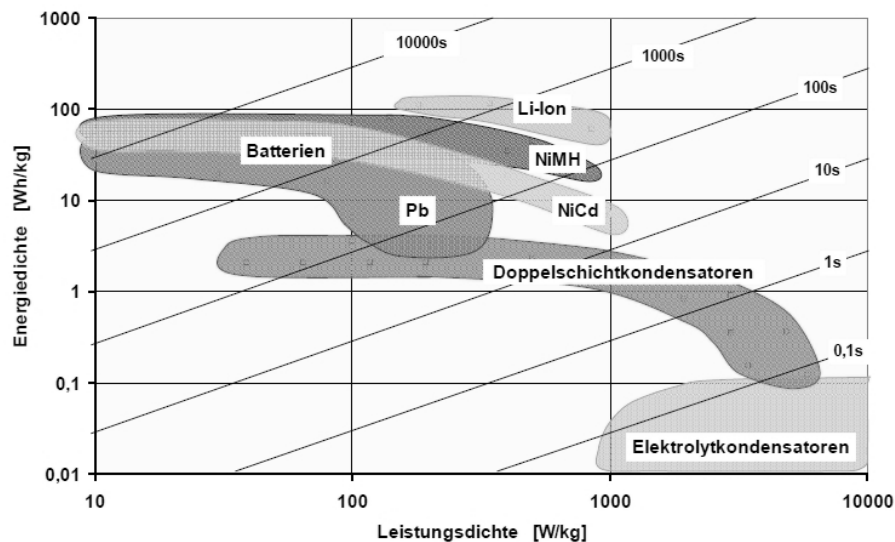


Abbildung 2.5: Gravimetrisches Ragone Diagramm [100]

a) Batterien

Bei wiederaufladbaren Batterien (Akkumulatoren) handelt es sich um elektrochemische Energiespeicher mit einer sehr großen Verbreitung in unterschiedlichsten Bereichen der Technik. Die Batteriekapazität Q_{Nenn} wird in [Ah] oder [As] angegeben. Es handelt sich dabei also nicht um eine Kapazität im eigentlichen Sinne ($C = \frac{Q}{U} [\frac{As}{V}]$), sondern um eine Ladungsmenge. Die Kapazität ist sowohl temperatur- als auch stromabhängig, wobei qualitativ gilt: je wärmer eine Batterie innerhalb ihres thermischen Betriebsfensters und je geringer der Entladestrom, desto mehr Ladungsmenge kann entnommen werden [54]. Mit Verlängerung der Belastungsdauer der Batterie steigt

2 Grundlagen und Stand der Technik

der Innenwiderstand und damit die inneren Verluste. Der Wirkungsgrad von Batterien sinkt daher mit steigender Lade- bzw. Entladedauer. Auch das Alter und die Historie der Batterienutzung haben aufgrund von chemischen Degradationseffekten negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit [50]. Den Ladezustand der Batterie bezeichnet man auch als State of Charge (SOC). Er ergibt sich vereinfacht zu:

$$SOC(t) = \frac{Q|_{t_0} + \int_{t_0}^t I_{\text{Bat}} dt}{Q_{\text{Nenn}}} \quad (2.5)$$

I_{Bat} ist hier der positive Ladestrom bzw. der negative Entladestrom und $Q_{\text{Nenn}} = C$ die Batterienennkapazität in [As].

Die folgenden Typen von Batterien kommen heute und in naher Zukunft in Fahrzeugen zum Einsatz:

- *Blei-Säure*
Der Energiespeicher im Niederspannungsbordnetz ist seit Jahrzehnten die Blei-Säure Batterie. Der flüssige Elektrolyt wird zunehmend durch Gel (Pb/Gel) oder Vlies (AGM, Absorbent Glass Mat) ersetzt, um mehr Lade- und Entladezyklen zu ermöglichen. Diese Batterien erreichen eine relativ geringe gravimetrische Energiedichte von $20-45 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ und halten einer dynamischen Belastung durch Zyklisierung darüber hinaus nur relativ schlecht stand.
- *Nickel-Metallhydrid*
Dieser Batterietyp wird derzeit in den meisten Hybridfahrzeugen als Traktionsbatterie eingesetzt [44]. Er erreicht spezifische Energiedichten bis zu $60 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$. Im Vergleich zur Bleibatterie ist der NiMH-Akku wesentlich zyklenfester. Nachteile sind die teuren Materialien sowie eine relativ hohe Selbstentladung von $2-10 \frac{\%}{\text{d}}$. Außerdem sind durch die Nennspannung von 1,2 V mehr Zellen notwendig als bei anderen Typen [2].
- *Lithium-Ionen*
Lithium-Ionen-Akkumulatoren werden als zukünftige Standardtechnologie für die Traktionsbatterie in Hybridfahrzeugen angesehen. Sie erreichen Energiedichten von $90-160 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ und erlauben mehrere tausend Ladezyklen. Die hohe Zellennspannung von ca. 3,3-3,6 V führt zu einer geringeren Zellanzahl als bei NiMH-Batterien. Nachteile sind das vergleichsweise schmale Betriebstemperaturband und die hohe Reaktivität von Lithium mit den damit einhergehenden Sicherheitsrisiken [2].

b) Doppelschichtkondensatoren

Doppelschichtkondensatoren sind elektrostatische Energiespeicher [64]. Ihre Vorteile sind die günstig zu beschaffenden Materialien, die hohe Zyklenlebensdauer sowie die hohe spezifische Leistungsdichte bis über $10.000 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$. Als Hauptnachteil ist die sehr niedrige spezifische Energiedichte bis $5 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ zu nennen. Außerdem findet eine höhe-

re Selbstentladung als bei Batterien statt. Eine Steigerung der Energiedichte geht, wie bei Batterien, auf Kosten der Leistungsdichte (Abb. 2.5) [100]. Der Ladezustand des Doppelschichtkondensators ergibt sich zu:

$$SOC = \frac{U^2}{U_{\max}^2} \quad (2.6)$$

U und U_{\max} sind hier die momentane bzw. maximale Kondensatorspannung [95].

2.2.3 Bordnetztopologien

Die oben vorgestellten Energiespeichertypen sind schon allein aufgrund ihrer spannungsstabilisierenden Funktion Kernelemente heutiger Bordnetztopologien. Eine variable Ladezustandsregelung bewirkt Spannungsschwankungen, die bestimmte Anforderungen an die Topologie des Energiebordnetzes stellen.

a) Konventionelle Energiebordnetze

Bild 2.6 zeigt die bis heute in konventionell angetriebenen Fahrzeugen übliche 12V-Bordnetztopologie. Das Ersatzschaltbild fasst die Vielzahl der an Bord aktiven elektrischen Verbraucher zu einer einzigen Energiesenke zusammen. Außerdem ist schematisch der Verbrennungsmotor mit seiner Anbindung an den Klauenpolgenerator sowie die Fahrzeugbatterie dargestellt [25].

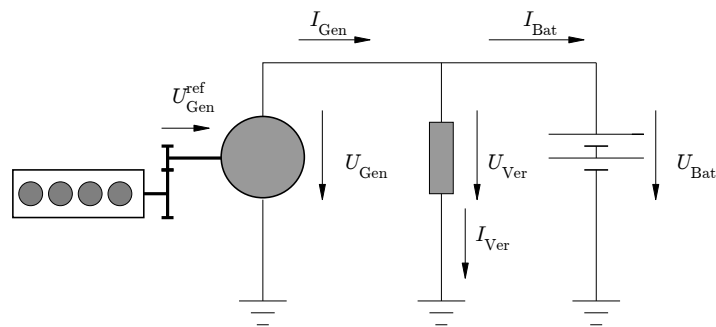


Abbildung 2.6: Energiebordnetz nach heutigem Stand der Technik

Das charakteristische Merkmal des konventionellen 12 V-Bordnetzes ist die nahezu konstante Spannung an Verbrauchern, Batterie und Generator. Abzüglich der Spannungsabfälle an den Leitungswiderständen wird sie durch die Batteriespannung $U_{\text{Bat}} = f(SOC, I_{\text{Bat}})$ als Funktion von Ladezustand und Batteriestrom vorgegeben. Die Funktion des Generators ist es, die Bordnetzspannung auf einen Referenzwert $U_{\text{Gen,ref}}$ zu regeln (üblicherweise auf etwa 14 V). Mithilfe eines PI-Reglers wird eine Abweichung

der Ist- von der Soll-Spannung in einen Erregerstrom $I_{\text{Gen, err}}$ umgesetzt, der die Leistung des Generators gerade so weit erhöht, dass er und nicht die Batterie den Strom für das Bordnetz liefert. Inzwischen sind Fahrzeuge mit konventionellem Bordnetz auf dem Markt, in denen die Generatorregelung um den Freiheitsgrad einer frei wählbaren Referenzspannung $U_{\text{Gen, ref}}$ erweitert wurde. Die Spannung wird bewusst herabgesetzt, um den Ladezustand der Batterie zu senken und sie dadurch dazu zu befähigen, während Schubphasen Energie rückzuspeisen [68,82].

b) Zwei-Spannungsbordnetze

Der seit Jahrzehnten zunehmende Leistungsbedarf von elektrischen Verbrauchern an Bord von PKW sorgt für ansteigende Spitzenströme in den Leitungen. Die nach $P_V = R \cdot I^2$ quadratisch mit dem Strom wachsenden Verluste erfordern ab Leistungen um ca. 3 kW ein höheres Spannungsniveau als die üblichen 12 V [57, 92]. Andernfalls beeinträchtigen je nach Leitungswiderstand Spannungsabfälle von mehreren Volt die Funktion des Bordnetzes. Eine vollständige Umstellung des Spannungsniveaus ist aus Kostengründen auf absehbare Zeit nicht realisierbar [99]. Deshalb ist ein Gleichstromsteller als Trennelement zweier Teilbordnetze verschiedener Spannung erforderlich. Bild 2.7 zeigt beispielhaft eine entsprechende Bordnetztopologie, wie sie heute bereits in Hybridfahrzeugen zum Einsatz kommt und auf der die Untersuchungen der Kapitel 3.3 bis 3.5 basieren. Die Hochvoltverbraucher sind wie die Niedervoltverbraucher zu einer Energiesenke zusammengefasst. In der gezeigten Topologie ist ein AC/DC-Wandler separat als Kopplungselement von Drehstrommaschine und Gleichstrombordnetz aufgeführt. Ist in dieser Arbeit vom Wirkungsgrad oder der Leistung einer E-Maschine die Rede, so bezieht sich der Wert jedoch immer auf das Gesamtsystem aus Leistungselektronik und Maschine.

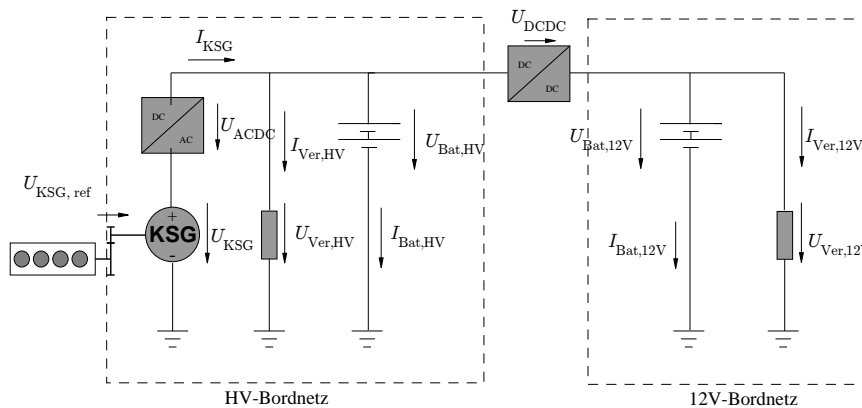


Abbildung 2.7: KSG-Energiebordnetz mit zwei Spannungsniveaus

Eine Vielzahl weiterer Topologien – auch ohne zweite Hochspannungsantriebsquelle – ist denkbar, um eine höhere Spannung zu realisieren [25]. In den in dieser Arbeit untersuchten Hybridfahrzeugen kommt allerdings die Topologie aus Abbildung 2.7

zum Einsatz.

2.2.4 Grundlagen der Hybridfahrzeugtechnik

Grundsätzlich spricht man von einem Hybridfahrzeug, wenn in ihm mehrere verschiedene Energiequellen und Energiewandler gleichzeitig zum Einsatz kommen. Meist ist vom elektrischen Hybridfahrzeug die Rede, ein Fahrzeug mit konventionellem Treibstofftank und Verbrennungsmotor sowie mindestens einem elektrischen Energiespeicher und Aktor. Die elektrische Maschine kann sowohl motorisch wie auch generatorisch betrieben werden, um die Antriebsunterstützung sowie die Energierückgewinnung zu ermöglichen.

a) Hybridisierungsgrad

Der Grad der Hybridisierung kann je nach installierter elektrischer Antriebsleistung und realisierbarer Funktionen unterschieden werden. Der Hybridisierungsgrad Hyb wird in dieser Arbeit definiert als:

$$Hyb := \frac{P_{ePfad,max}}{P_{ePfad,max} + P_{VM,max}} \quad (2.7)$$

mit

$$P_{ePfad,max} = \min\{P_{Bat,max} \eta_{EM}, P_{EM,max}\} \quad (2.8)$$

$P_{ePfad,max}$ ist die maximale Leistung, die das elektrische System mechanisch und additiv an den Antriebsstrang abgeben kann. Hierbei kann $P_{ePfad,max}$ entweder durch die maximale E-Maschinenleistung oder die maximale Speicherleistung limitiert sein. Beispielsweise ist im Toyota Prius der aktuellen Generation eine 50 kW leistende E-Maschine installiert, während die effektive vom elektrischen Antriebspfad an die Räder übertragbare Leistung durch den elektrischen Energiespeicher auf ca. 22 kW limitiert ist [59]. In der Literatur hat sich eine dreistufige Einstufung von Hybridfahrzeugen etabliert [96]. In dieser Arbeit gelten die folgenden drei Definitionen:

- *Micro-Hybrid*
Ein Micro-Hybrid gleicht in seinem Aufbau größtenteils einem konventionellen Fahrzeug, allerdings verfügt er meist über einen 2-4 kW leistenden Riemenstartergenerator, welcher die Funktion des Anlassers und Generators in sich vereint. Hiermit ist sowohl eine komfortable Realisierung der Motor-Start-Stopp-Funktion als auch das Ausschöpfen eines gewissen Rekuperationspotenzials in Verzögerungsphasen möglich [68,81].
- *Mild-Hybrid*
Ein Mild-Hybridfahrzeug ist zusätzlich zu den im Micro-Hybridfahrzeug ver-

fügbaren Funktionen in der Lage, den Verbrennungsmotor beim Anfahren oder Beschleunigen zu unterstützen sowie größere Mengen an Bremsenergie in seinen elektrischen Hochspannungsspeicher rückzuspeisen. Zur Realisierung dieser Funktionen kommt meist ein so genannter Kurbelwellen-Starter-Generator zum Einsatz – eine direkt an die Kurbelwelle des Verbrennungsmotors angeflanschte E-Maschine im Leistungsbereich bis ca. 20 kW.

- *Full-Hybrid*

Die stärkste Hybridisierungsstufe stellt das Full-Hybridfahrzeug dar. Es unterscheidet sich von geringer elektrifizierten Stufen durch höhere elektrische Leistung, eine höhere Betriebsspannung sowie die Möglichkeit, den Verbrennungsmotor während der Fahrt durch Abkopplung vom Antriebsstrang zu stoppen. Hierdurch werden der Arbeitsbereich und die Reichweite des effizienten rein elektrischen Fahrens deutlich erweitert². Zur weiteren Ausschöpfung des Energierückgewinnungspotenzials werden üblicherweise zwischen mechanischer und elektrischer Bremsleistung bilanzierende Bremssysteme angewendet, die bei niedrigen Geschwindigkeiten idealerweise bis zu 100 % des Fahrerbremswunsches elektrisch erfüllen können.

b) Topologien hybrider Antriebsstränge

Bei der Hybridisierung eines konventionellen Fahrzeuges gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die zusätzlichen Komponenten anzuordnen. Man unterscheidet zwischen serieller, paralleler und leistungsverzweigter Anordnung [12, 101].

- *Serieller Hybrid*

Wie die Bezeichnung impliziert, sind die Energiewandler hier seriell miteinander verbunden (Abbildung 2.8). Der Energiefluss vom Tank zu den Rädern passiert dabei immer die gleiche Kette: Der Verbrennungsmotor erzeugt mechanische Leistung, die abzüglich der Verluste vollständig von einem mit ihm verbundenen Generator in elektrische Leistung gewandelt wird. Im Anschluss wird die Leistung entweder der motorisch arbeitenden E-Maschine (und damit den Rädern) oder einem elektrischen Energiespeicher zugeführt. Die Rekuperation erfolgt durch generatorischen Betrieb der mit den Rädern verbundenen E-Maschine. Das Konzept bietet Vorteile aufgrund des stationären und damit effizienten Betriebspunktes des Verbrennungsmotors, erhebliche Nachteile ergeben sich jedoch aufgrund der ständigen zweifachen Energiewandlung und der damit verbundenen Verluste [81, 108].

- *Paralleler Hybrid*

Verbrennungsmotor und Elektromaschine sind bei einem parallelen Hybridfahrzeug (Abbildung 2.8) so angeordnet, dass sie ihre Leistung einzeln oder gemeinsam an die Antriebsräder abgeben können. Durch Trennkupplungen zwischen

² So genannte Plug-in-Hybridfahrzeuge steigern die elektrische Reichweite zusätzlich durch Aufladung der Batterie am öffentlichen Stromnetz.

2 Grundlagen und Stand der Technik

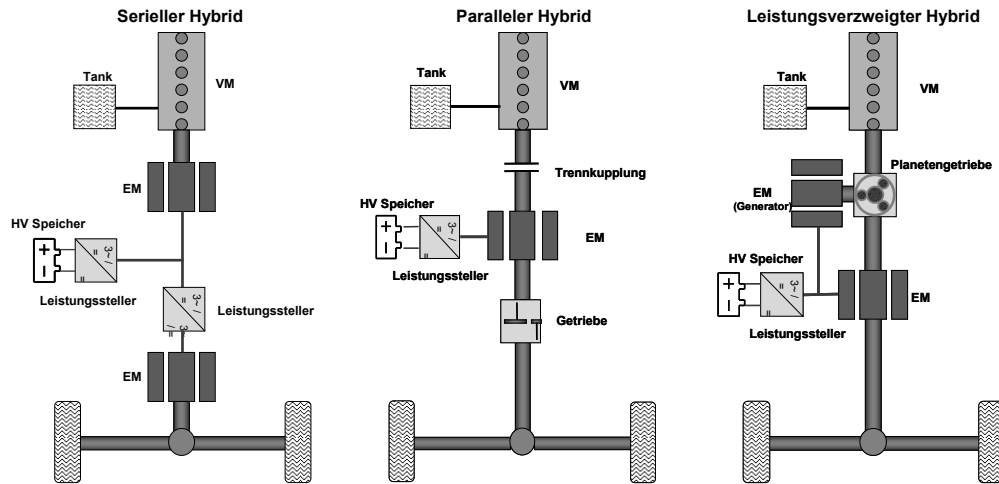


Abbildung 2.8: Unterschiedliche Hybridfahrzeugtopologien

Antriebswellen und antreibenden Maschinen können Full-Hybridkonzepte mit größerer Anzahl von Freiheitsgraden realisiert werden. Ein paralleles Hybridfahrzeug weist Vorteile bezüglich auftretender Verlustleistungen auf, da keine ständige Wandlung von mechanischer in elektrische Energie notwendig ist. Durch die mögliche Leistungsaddition beider Antriebsmaschinen kann der Verbrennungsmotor bei Erhalt der Fahrleistungen kleiner dimensioniert werden, was erneut verringerte Verlustleistungen mit sich bringt. Der wesentliche Nachteil des Konzepts ist die Notwendigkeit eines separaten Anlassers für den komfortablen Zustand des Verbrennungsmotors während der elektrischen Fahrt und unter.

- *Leistungsverzweigter Hybrid*

Der leistungsverzweigte Hybridantriebsstrang ist eine Kombination aus den vorherigen Topologien, gezeigt in Abbildung 2.8. Die mechanische Leistung des Verbrennungsmotors wird hier in einen elektrischen und einen mechanischen Pfad verzweigt. Dies geschieht üblicherweise mithilfe eines Planetengetriebes, das zwei Elektromaschinen sowie die Verbrennungsmaschine miteinander verbindet. Mechanische Leistung kann hier nur übertragen werden, wenn eine der E-Maschinen generatorisch arbeitet. Das auftretende Generatormoment wird direkt an die Räder übertragen, während die dabei erzeugte elektrische Leistung entweder in die Traktionsbatterie gespeist oder als Eingangsleistung in der zweiten, motorisch arbeitenden E-Maschine genutzt wird. Die gute und schnelle Regelbarkeit der E-Maschinenmomente ermöglicht ein elektrisch realisiertes, stufenloses Getriebe³ sowie einen sehr komfortablen Verbrennungsmotorzustart aus der elektrischen Fahrt heraus. Positiv ist zudem die frei und effizient wählbare Verbrennungsmotordrehzahl. Als Nachteil ist wie beim seriellen Hybridfahrzeug die zweifache verlustbehaftete Energiewandlung zu nennen [51].

³ ECVT = Electric Continuous Variable Transmission

c) Hybridspezifische Antriebsfunktionen

Hybridfahrzeuge verfügen über eine größere Anzahl an Freiheitsgraden, um verschiedene Fahrerwünsche zu erfüllen. Da der Fahrer mit dem Steuern und Regeln der einzelnen Komponenten überfordert wäre, sind automatisierte Funktionen notwendig, die in Abhängigkeit der Fahrerstellhebel Gas und Bremse und weiteren Eingangsdaten die Leistungsflüsse regeln. Die Hauptfunktionen sind:

- *Elektrisches Fahren*
Die Funktion elektrisches Fahren entscheidet aufgrund von Randbedingungen wie etwa geforderter Antriebsleistung und dem Ladezustand der Traktionsbatterie, ab wann der Verbrennungsmotor für den Antrieb genutzt wird. Obwohl der Verbrennungsmotor die Energie für die antreibende Elektromaschine zum Teil zuvor selbst erzeugt haben muss, ist es in gewissen Betriebspunkten effizienter, diese Energie für den elektrischen Fahrzeugantrieb zu nutzen [14,80]. Die Motor-Start-Stop-Funktion kann als Sonderfall der Funktion elektrisches Fahren während des Fahrzeugstillstands angesehen werden.
- *Lastpunktverschiebung*
Die Funktion Lastpunktverschiebung entscheidet während der verbrennungsmotorischen Fahrt, mit welcher Leistung die Elektromaschine den Verbrennungsmotor unterstützt oder generatorisch belastet, um elektrische Energie zu erzeugen. Sie kann deshalb als Funktion zur Regelung des Ladezustands der Traktionsbatterie interpretiert werden und umfasst die Unterfunktionen Lastpunktanhebung und -absenkung⁴. Wie Kapitel 2.2 zeigen wird, hat die Höhe der Elektromotorleistung dabei keinen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz, solange gewisse Grenzen eingehalten werden. Vielmehr sind die richtigen Zeitpunkte für das Laden und Entladen der Traktionsbatterie entscheidend [14, 80].
- *Boost*
Der parallele und leistungsverzweigte Hybridantrieb erlaubt mit der so genannten Boost-Funktion eine elektromotorische Antriebsunterstützung über die Volllastkennlinie des Verbrennungsmotors hinaus. Zwar wird während des Boostvorgangs zusätzlich elektrische Energie verbraucht, die meistens der Verbrennungsmotor im Anschluss über den Generator wieder der Batterie zuführen muss. Jedoch ermöglicht erst die Boost-Funktion ein effektives Downsizing des Verbrennungsmotors, da in Verbindung mit der E-Maschine kurzzeitig die gleichen Fahrleistungen erreicht werden, wie in einem nicht hybridisierten Fahrzeug mit leistungsfähigerem Verbrennungsmotor. Die Funktion trägt also ganz wesentlich zum Kraftstoffeinsparpotenzial von Hybridfahrzeugen bei.
- *Rekuperation*
Die Rückgewinnung und Speicherung von kinetischer Energie des Fahrzeugs wird als Rekuperation bezeichnet. Sie erfolgt im Hybridfahrzeug über den generatorischen Betrieb mindestens einer Elektromaschine während Verzögerungs-

⁴ Lastpunktabsenkung wird in der Literatur auch als Assist bezeichnet.

phasen. Diese Energie kann im Anschluss zur Entlastung des Verbrennungsmotors und somit zur Senkung des Kraftstoffbedarfs genutzt werden. Die Funktion Rekuperation sollte immer so viel „kostenlose“ Energie wie möglich rückspeisen, ohne den Verzögerungswunsch des Fahrers oder die Grenzen der Fahrstabilität zu überschreiten. Gerade während der elektrischen Fahrt wird die Funktion auch dazu genutzt, das im Schubbetrieb gewohnte Schleppmoment des Verbrennungsmotors zu simulieren.

2.3 Betriebsstrategien und Energiefunktionen

2.3.1 Zielkonflikte im Energiemanagement von Hybridfahrzeugen

Der Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie wird von einer Vielzahl divergierender Ziele geprägt. Zu diesen zählen etwa Anforderungen an Fahrzeuggewicht, Sicherheit, Komfort, Qualität, Kosten, Effizienz und so weiter. Diesen Zielkonflikten unterliegt auch die Entwicklung des Energiemanagements für ein Fahrzeug. So muss etwa die energetische Betriebsstrategie von Hybridfahrzeugen einer Vielzahl konkurrierender Anforderungen gerecht werden, um die Umsetzung des Fahrerwunsches zu gewährleisten, dabei aber die Hybridfunktionen möglichst effizient einzusetzen. Energieverbrauchende Funktionen wie die elektrische Antriebsunterstützung (Boost) und das rein elektrische Fahren erfordern eine hohe Menge gespeicherter Energie. Für die Rekuperation von Bremsenergie ist dagegen ein niedriger Ladezustand von Vorteil, um bei Abbremsungen aus hohen Geschwindigkeiten sowie bei Bergabfahrten die auftretenden kinetischen Energien rückspeisen zu können. Aufgrund dieses Zielkonflikts stellt eine statische Applikation der energetischen Betriebsstrategie, insbesondere der Ladestrategie, immer einen suboptimalen Kompromiss dar, der vor allem den Anforderungen nach Effizienz, Fahrdynamik, Komfort und Funktionsverfügbarkeit nicht in jeder Fahrsituation gerecht werden kann.

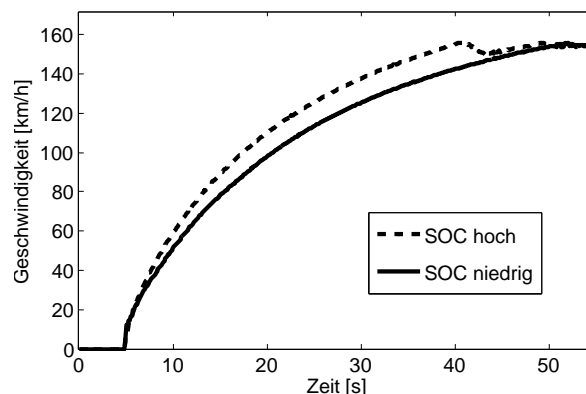


Abbildung 2.9: Ladezustandsabhängige Fahrleistung in einem Mild-Hybridfahrzeug [103,104]

2 Grundlagen und Stand der Technik

Abbildung 2.9 zeigt Ergebnisse aus der Wettbewerbsanalyse mit einem derzeit angebotenen Mild-Hybridfahrzeug. Die Dauer für eine Beschleunigung von 0-100 km/h variiert je nach Ladezustand des elektrischen Energiespeichers um bis zu 3,4 s. Bei Energiemangel kommt es demnach zu einem deutlichen Einbruch in den Fahrleistungen.

Bild 2.10 zeigt den umgekehrten Fall, nämlich eine Fahrsituation mit Energieüberschuss: Zu sehen ist ein mit einem derzeit auf dem Markt erhältlichen Full-Hybridfahrzeug gefahrenes Höhenprofil mit dem korrespondierenden absoluten Ladezustandsverlauf⁵. Nach ca. drei Minuten Bergabfahrt ist der elektrische Energiespeicher zunehmend weniger aufnahmefähig, die Funktion Rekuperation wird daher degradiert und der Bremswunsch des Fahrers ausschließlich mithilfe der mechanischen Bremse erfüllt. Üblicherweise ist die Traktionsbatterie zu Beginn des Gefälles in einem derartigen Fahrzeug noch deutlich weiter geladen, was das maximal mögliche Rekuperationspotenzial zusätzlich einschränkt.

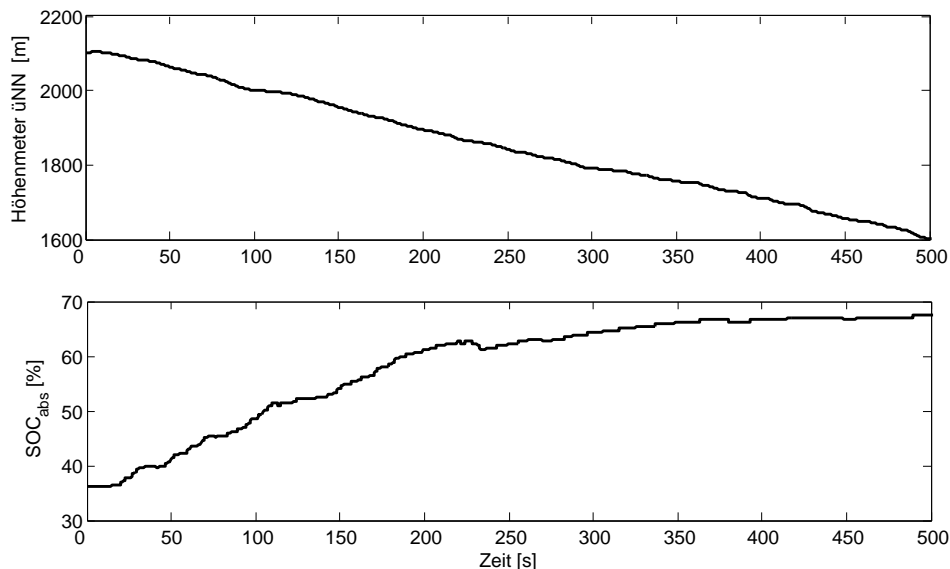


Abbildung 2.10: Degradation der Rekuperation in einem Full-Hybridfahrzeug bei Bergabfahrt [103,104]

⁵ Der absolute Ladezustand ist aus Gründen der Batterielebensdauer nicht vollständig nutzbar. Die Messung aus Bild 2.10 beginnt beim minimal möglichen absoluten Ladezustand, die Rekuperation wird ab einem SOC von gut 60 % bereits degradiert.

2.3.2 Methoden zur Regelung der Energieflüsse

a) Statische Betriebsstrategien

Betriebsstrategien können schon vor dem Einsatz im Fahrzeug detailliert beschrieben und festgelegt werden (offline, statisch). Für alle Nutzungsfälle des Fahrzeugs existieren dann feste Vorgaben, nach denen der Energiehaushalt im Fahrzeug eingestellt wird. Diese Regeln können mit unterschiedlichsten Methoden umgesetzt werden, Beispiele hierfür sind etwa:

- Zustandsautomaten
In Abhängigkeit von gewissen Größen wie SOC, Geschwindigkeit, Fahrpedalwinkel o.ä. stellt die Betriebsstrategie einen bestimmten Fahrzeugzustand ein (etwa Rekuperation, Boost, etc.). Zustandsübergänge erfolgen, sobald diese Größen Schwellwerte über- oder unterschreiten. Die Zustandsübergänge erfahren dann meist aus Komfortgründen eine Glättung durch einen Filter.
- Kontinuierliche Regler
Eine auf kontinuierlichen Reglern basierte Betriebsstrategie nimmt keine diskreten Zustände an, sondern regelt die Leistungen der Energiesysteme stufenlos, indem über Kennlinien oder Regelkreise funktionale Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen hergestellt werden.

b) Online-Optimierungen

Diese Methoden verstehen das Fahrzeug als ein mehrdimensionales Optimierungsproblem, das durch eine Zielfunktion Γ beschrieben wird. Γ hängt dabei nicht nur von physikalischen Größen wie dem Verbrauch ab, sondern muss auch andere Anforderungen wie die Akustik, Lebensdauer etc. mit einbeziehen:

$$\Gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i(a_1, a_2, a_3, \dots, a_m) \quad (2.9)$$

Die Zielfunktion ist die Summe aus mehreren Kostenfunktionen γ_i , die ihrerseits Funktionen der relevanten Parameter a_i sind. Das Minimum von Γ entspricht dem angestrebten Fahrzeugzustand. Zur Optimierung können unterschiedlichste Algorithmen eingesetzt werden, die allerdings den Grenzen der Rechenkapazität aktueller Steuergeräte Rechnung tragen müssen. Mehrere Publikationen sind bereits auf diesem Gebiet erschienen [51, 67]. Viele kommen zu dem Schluss, dass eine Online-Optimierung den hohen Aufwand bezüglich Rechenleistung und Applikation nicht rechtfertigt, da sie gegenüber statischen Verfahren nur einen geringen Mehrwert bezüglich Kraftstoffverbrauch bieten.

c) KI-Methoden-basierte Betriebsstrategien

Bei diesen Ansätzen zur Regelung der Energiesysteme im Hybridfahrzeug handelt es sich um Methoden, die sich am menschlichen Denken orientieren. Es wird versucht, unscharfes Wissen mithilfe mathematischer Verfahren derart darzustellen, dass Rechnersysteme es verarbeiten können. Die am häufigsten angewandten Methoden sind:

- Neuronale Netze [70, 106]
- Fuzzy Logic [7, 23, 40, 52, 65, 89]
- Ökonomische Modelle [35]
- Spieltheorie [13, 45]

Dem reizvollen Versuch, mithilfe derartiger Methoden einem Fahrzeug den „gesunden Menschenverstand“ beizubringen, steht die Unsicherheit bezüglich der Reproduzierbarkeit des Fahrzeugverhaltens gegenüber: Das zielgerichtete Trainieren von neuronalen Netzen ist beispielsweise nicht mit einer Garantie für ein in Zukunft unter allen Umständen zuverlässiges Regelverhalten gleichzusetzen. Zudem ist es beispielsweise schwer, die Stabilität eines ökonomischen Reglermodells nachzuweisen (Stichwort „Börsencrash“).

d) Optimalsteuerungen

Analog zur Online-Optimierung versuchen Optimalsteuerungsmethoden, einen hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs optimalen Ladezustandsverlauf zu finden, allerdings beziehen sie dabei einen Prädiktionshorizont in das Optimierungsproblem mit ein. Die Optimalsteuerung – auch Modellbasierte Prädiktive Regelung (MPR) genannt – findet also basierend auf ihren Eingangsinformationen in einem gewissen Vorausschaufenster für das betrachtete Modell eine optimale Trajektorie des SOC. Ein hierfür in der Literatur häufig angewendetes Optimierungsverfahren ist die Dynamische Programmierung nach Bellmann, deren Echtzeitfähigkeit bereits nachgewiesen werden konnte [3, 5, 6, 18, 24, 60, 91].

Voraussetzung für das Auffinden einer im Fahrzeugbetrieb tatsächlich optimalen SOC-Trajektorie ist jedoch das Vorhandensein von exakten Informationen über die Fahrzeugbewegung in der nahen Zukunft sowie ein entsprechend valides und rechenaufwendiges Modell des Fahrzeugs. Da beim nicht-autonomen Fahrzeugbetrieb mit einem Menschen als Fahrer auf absehbare Zeit keine derart vollständigen Informationen über die nahe Zukunft zu erwarten sind, wurde die Methode der Optimalsteuerung für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit als ungeeignet angesehen. Das Auffinden eines Optimums hinsichtlich einer angenommenen, dann aber nicht exakt eintretenden Zukunft wird als nicht notwendig erachtet. Es wird vielmehr versucht, mit der im realen Fahrzeug vorhandenen, eingeschränkten Prädiktionsgüte sinnvolle Eingriffe an einer Basisbetriebsstrategie vorzunehmen.

2.4 Fahrzeugsensorik und Steuergerätevernetzung

Zur vorausschauenden Erkennung von Fahrsituationen halten moderne Fahrerassistenzsysteme in Verbindung mit schon vielfach in Fahrzeugen verfügbaren Standardsensoren ein großes Informationsangebot bereit, auf das sich bereits mehrere Patente und Beiträge in der Literatur berufen [19,27,28,32,49,55,66,72,90,93].

a) Inertialsensorik

Viele Sensoren zählen in der Mittel- und Oberklasse von Fahrzeugen bereits zum Standard, da sie für die dort gängigen Sicherheits- und Komfortsysteme erforderlich sind. Gerade das vielverbreitete ESP-System zur Stabilisierung des Fahrzeugs im fahrdynamischen Grenzbereich benötigt Sensorik zur Erfassung der Fahrzeugbeschleunigung entlang aller drei Achsen, der Drehzahlen aller Räder, des Fahrpedal- und Lenkwinkels etc. Die digitale Motorelektronik benötigt zur Regelung der Motorkomponenten sowie des Generators eine Vielzahl weiterer Größen wie etwa Temperaturen der Außenluft, des Motoröls oder des Kühlmittels bzw. Spannung an Generator oder Batterie. Auch Systeme wie Abblendlichtautomatik oder die regenabhängige Steuerung des Wischintervalls sind in einigen Fahrzeugklassen zum Standard geworden und bieten wertvolle Umweltinformationen über Niederschlags- und Lichtverhältnisse zur möglichen Weiterverarbeitung.

b) Fahrerassistenzsysteme

Zusätzliche Informationen zum Fahrzeugumfeld werden von aktuellen Fahrerassistenzsystemen bereitgehalten. In der Literatur erscheint eine Vielzahl an Klassifikationsmethoden für Fahrerassistenzsysteme [9,42,79]. Zusammengefasst dienen sie der Entlastung des Fahrers bei der Erledigung seiner drei Hauptaufgaben, nämlich der Navigation, der Führung und Stabilisierung des Fahrzeugs [87]. Des Weiteren können Fahrerassistenzsysteme in informierende und agierende Systeme eingeteilt werden. Die fettgedruckten Systeme in Tabelle 2.1 eignen sich gut zur Unterstützung des vorausschauenden Energiemanagements. Vor allem Navigationssysteme beinhalten dank der steigenden Informationsfülle des Kartenmaterials wertvolle Daten zum Fahrzeugumfeld.

Verhalten	Fahraufgabe		
	Navigation	Führung	Stabilisierung
informierend	Navigationssystem	Spurwechselassistent Speed Limit Info	Spurhalteassistent
agierend		Notbremsassistent Parkmanöverassistent	Active Cruise Control ESP

Tabelle 2.1: Klassifikation von Fahrerassistenzfunktionen [87]

c) Navigationssysteme

Aktuelle Navigationssysteme senden auf den Fahrzeugbussen schon heute eine Vielzahl an Informationen über den aktuellen und kommenden Streckenverlauf. Das so genannte ADAS-Protokoll⁶ für Navigationssteuergeräte beinhaltet Informationen zur Geometrie, Kategorie und gesetzlichen Geschwindigkeitsbeschränkungen von aktuellen und möglicherweise in der Zukunft befahrenen Streckensegmenten. Dessen Standardisierung wird vom so genannten ADASIS-Forum angestrebt, an dem mehrere OEMs und Zulieferer der Automobilindustrie seit 2001 mitwirken [30,33,43,71,97].

Bild 2.11 zeigt beispielhaft einen Kartenausschnitt, aus dem die Routenschätzung gemäß ADAS-Protokoll hervorgeht. Jedem Streckensegment wird in Abhängigkeit der Straßenkategorie sowie des Abbiegewinkels eine auf das Vorgängersegment bezogene bedingte Wahrscheinlichkeit p_i zugeordnet. Streckenabschnitte, deren Geometrie mit einem konstanten Satz von Parametern (wie Kurvenradius, geltendes Geschwindigkeitslimit, Straßenklasse etc.) beschrieben werden können, werden oft zu einem Segment zusammengefasst. So genannte *Shape Points* entlang eines Segments können jedoch auch zur Definition von komplexeren Segmentgeometrien herangezogen werden. Segmente enden jeweils an Kreuzungen, bei Änderung des Geschwindigkeitslimits, an Ortsgrenzen oder ähnlichen Einschnitten. Die aufeinander folgende Verknüpfung der wahrscheinlichsten Segmente bildet den dargestellten MPP⁷, der sich je nach Anforderung an die Mindestwahrscheinlichkeit der Route unterschiedlich lang ausdehnen kann. Im städtischen Bereich ist aufgrund der Vielzahl von Verzweigungen im Straßennetz nur eine Vorausschau von wenigen hundert Metern möglich, im außerstädtischen Verkehr hingegen über mehrere Kilometer.

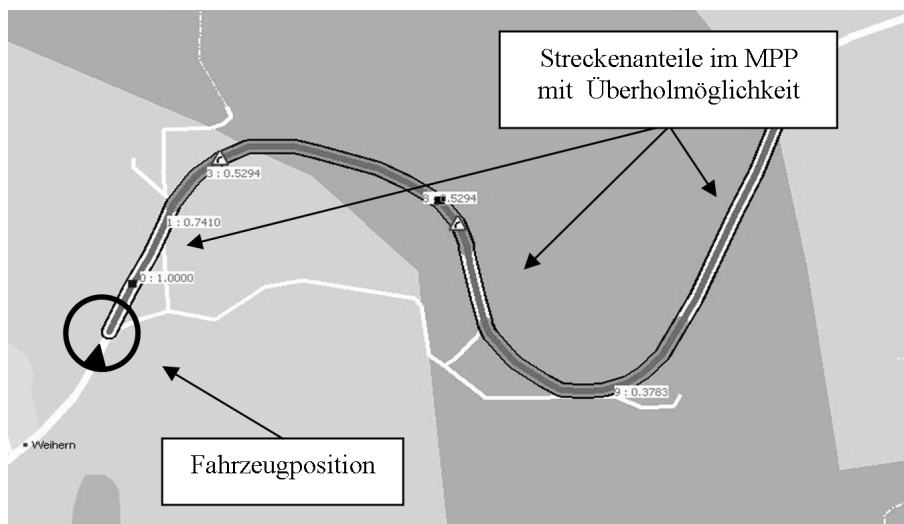


Abbildung 2.11: Routenschätzung gemäß ADAS-Protokoll

⁶ ADAS = Advanced Driver Assistance System

⁷ MPP = Most Probable Path

Heutige Nachrichtenkataloge für CAN-Bus-Systeme sehen bereits Botschaften und Signale vor, die den MPP samt seiner Eigenschaften beschreiben. Im Überland- und Autobahnbetrieb ist hiermit auch ohne aktivierte Zielführung bereits eine Streckenvorausschau bis maximal etwa 10 km möglich. Bei aktivierter Zielführung wird den Segmenten entlang der kalkulierten Route jeweils die Wahrscheinlichkeit 100 % zugeordnet - der wahrscheinlichste Pfad wird zur geplanten Route und kann sich bis zum gewählten Ziel hin ausdehnen.

Auf der digitalen Karte gespeicherte Daten können von unterschiedlichsten Funktionen weiterverarbeitet werden, so etwa von einer Funktion zur Bestimmung der streckengeometrieabhängigen Überholmöglichkeit. Der MPP weist in Abbildung 2.11 beispielsweise helle sowie dunkle Abschnitte auf, die Bereichen mit bzw. ohne Möglichkeit zum Überholen entsprechen und basierend auf den Kurvenradien der einzelnen Segmente ermittelt wurden.

d) CAN-Bus zur Vernetzung von Steuergeräten und Sensoren

Der Anfang der 1980er Jahre von einem Industriekonsortium unter Leitung der Robert Bosch GmbH vorgestellte CAN-Bus ist zu einem der internationalen Standards in der automobilen Steuergerätevernetzung avanciert [1,34]. Es handelt sich um einen zweiadrigen, seriellen Bus mit einer je nach Kabellänge erreichbaren Übertragungsrate von bis zu 1 Mbit. Die an das Multi-Master-Netzwerk gekoppelten Steuergeräte schicken ihre Botschaften als gleichberechtigte Teilnehmer, die Botschaften selbst sind jedoch über einen festen *Identifizier* untereinander priorisiert. Durch Arbitrierung wird sichergestellt, dass nur die Nachricht mit der höchsten Priorität übermittelt wird, was zu höheren Laufzeiten bei niedriger eingestuftem Signalen führt. Abbildung 2.12 zeigt die Bit-Codierung von CAN-Botschaften.

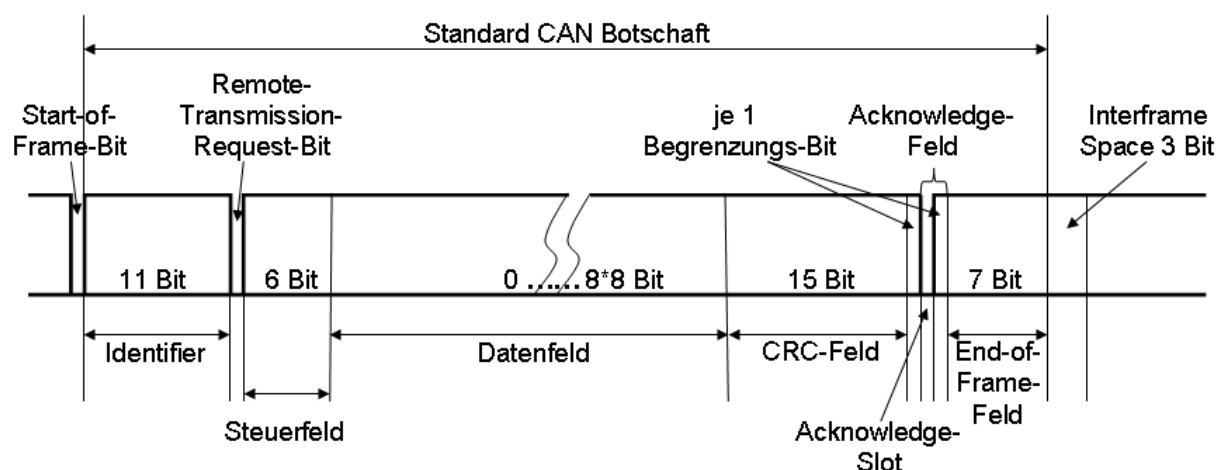


Abbildung 2.12: Format einer standardisierten CAN-Botschaft mit 11-Bit-Identifizier

Durch Arbitrierung, Bit-Überwachung sowie Prüfsummen und Empfangsbestätigungen wird eine hohe Kommunikationssicherheit erreicht - die eigentlich zu übertragende Information macht jedoch nur etwa 60 % des Bit-Aufkommens aus. Dadurch wird die Anzahl der Bits im Datenfeld auf 64 reduziert. Für einige komplexe Anwendungen müssen Informationen daher auf mehrere 64-Bit-Nachrichten aufgeteilt werden, was allerdings zu einer erhöhten Bus-Last und damit längeren Signallaufzeiten führen kann. Die im Rahmen der Funktionsarchitektur in dieser Arbeit übermittelten Informationen dürfen die Möglichkeiten des CAN-Bussystems nicht überfordern.

2.5 Entwicklungsprozesse

Ein neuartiges Energiemanagementsystem kann nur erfolgreich umgesetzt werden, wenn es mit den in der Softwareentwicklung bereits etablierten Prozessen im Rahmen der Fahrzeugentwicklung kompatibel ist, andernfalls kommt es zu erheblichen Schwierigkeiten bei den einzelnen Arbeitsschritten und ein anfänglich vielversprechendes System bleibt im Anfangsstadium stecken. Insbesondere die Vielzahl an beteiligten Entwicklern erfordert oft Lösungen, die in ihrer Komplexität so weit abstrahiert werden können, dass sie schnell an andere weitergegeben werden können.

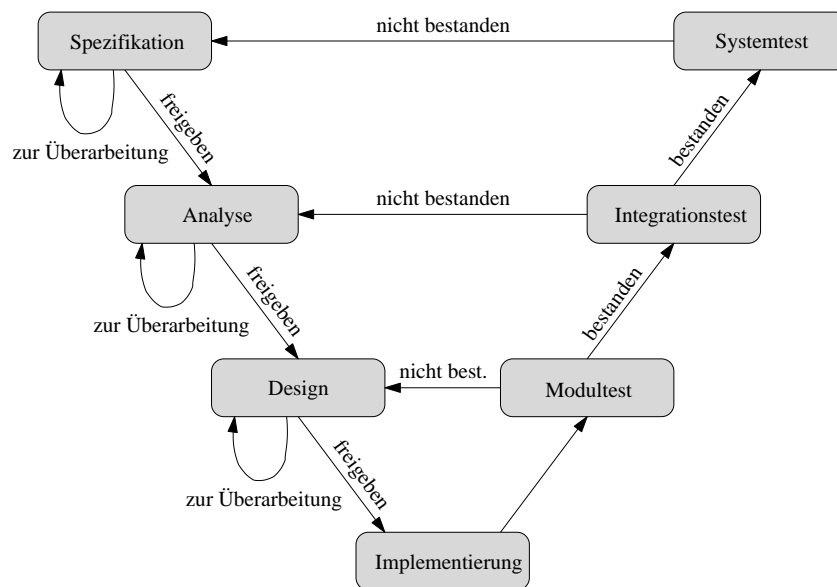


Abbildung 2.13: V-Modell zur Softwareentwicklung

Das für die Softwareentwicklung und damit auch für die Energiefunktionsentwicklung maßgebliche Prozessmodell ist das so genannte V-Modell, gezeigt in Abbildung 2.13 [15, 20]. Es besteht aus zwei Ästen und beschreibt die Abfolge der notwendigen Arbeitsschritte von der Anforderungsspezifikation bis hin zur Implementierung und

den anschließenden Testläufen des rechten Asts. Letztere haben das Ziel, die erzielten Ergebnisse den ursprünglichen Anforderungen systematisch gegenüberstellen zu können. In der Automobilindustrie dauert das Durchlaufen beider Äste mehrere Jahre und betrifft eine Vielzahl an Entwicklern in unterschiedlichen Fachabteilungen, die jeweils für einen Teil der im V-Modell verankerten Tätigkeiten verantwortlich sind. Die zu entwickelnden Software-Funktionen müssen daher in ihrer Komplexität soweit reduziert sein, dass sie über Grenzen von Fachabteilungen und Entwicklern hinweg kommunizierbar sind.

2.6 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit zeigt eine Methode zur Lösung des Zielkonflikts zwischen Fahrleistung und Effizienz im Energiemanagement von Hybridfahrzeugen auf. Hierfür wird eine modulare Funktionsarchitektur erarbeitet, die fahrsituationsabhängig für die Vermeidung von Energieüberschuss oder -mangel im elektrischen Speicher sorgt.

Die Erweiterungsmodule der Basisbetriebsstrategie stützen sich dabei auf Fahrerassistenzsysteme sowie Inertialsensorik, die gemeinsam Informationen über die Fahrzeugumgebung liefern und gepaart mit geeigneten mathematischen Methoden der Datenfusion eine Vorausschau im Bereich bis zu mehreren Kilometern erlauben.

Vor Fahrsituationen mit erhöhtem Leistungsbedarf wie etwa Überholmanövern, Autobahnauffahrten oder Ortsausfahrten wird das Hybridfahrzeug prädiktiv auf optimale Fahrleistungen konditioniert, indem der elektrische Energiespeicher auf einen ausreichend hohen Ladezustand eingestellt wird. Das Gleiche geschieht mit dem Ziel der Effizienzsteigerung vor Situationen, in denen hohe elektrische Fahranteile wahrscheinlich sind – so etwa vor der Einfahrt in 30er Zonen oder Staus. Vor der Bergabfahrt an Gefällen versuchen die in dieser Arbeit vorgestellten Funktionen hingegen, durch Regelung auf einen ausreichend niedrigen Ladezustand den Energiespeicher auf die Rückspeisung von möglichst viel Bremsenergie vorzubereiten.

Ein wichtiger Aspekt der angestrebten Funktionsarchitektur ist ihre Modularität und Plug-and-Play-Fähigkeit gegenüber der im Fahrzeug verbauten Sensorik. Ist ein für die Erkennung einer bestimmten Fahrsituation benötigter Sensor nicht vorhanden, so müssen die betroffenen Funktionen automatisch deaktiviert werden, während alle übrigen Funktionalitäten unberührt ihre Arbeit fortsetzen sollen.

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Funktionen haben – anders als einige bisherige Veröffentlichungen zum Thema vorausschauendes Energiemanagement – den Anspruch, sowohl zu den im realen Fahrzeug vorhandenen Steuergeräten also auch zu den in der Automobilindustrie etablierten Entwicklungsprozessen kompatibel zu sein. Deshalb orientiert sich die simulationsgestützte Potenzialanalyse in dieser Arbeit an der funktional realisierbaren Vorhersagegüte und nicht an einer kaum erreichbaren Idealprädiktion etwa des vorausliegenden Geschwindigkeitsprofils. Außerdem wird

2 Grundlagen und Stand der Technik

durch die Implementierung der Funktionsarchitektur in einem Versuchsfahrzeug der tatsächliche Nachweis der Umsetzbarkeit erbracht. Die Arbeit hat damit drei übergeordnete Ziele:

1. Spezifikation einer Plug-and-Play-fähigen Funktionsarchitektur für vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen.
2. Modellbildung der Funktionsarchitektur mit dem Ziel der simulationsgestützten Potenzialbewertung.
3. Umsetzung der Funktionsarchitektur im Prototypenfahrzeug zur Bewertung des Funktionsnachweises unter realen Bedingungen.

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

3.1 Modulare Energiefunktionen

Die Funktionsorientierung ist im Sinne dieser Arbeit als Methode zur Reduktion von Komplexität zu verstehen¹: Ein komplexes Problem wird so lange in Teilprobleme zerlegt, bis die einzelnen Teilprobleme mittels einer überschaubaren Funktion lösbar sind. Beispielsweise existierte zu Beginn dieser Arbeit die Fragestellung: „Wie können Hybridfahrzeuge von einem Energiemanagement unter Nutzung einer Vorausschau profitieren?“ Weiter heruntergebrochen stellt sich die Frage zum Problem aus Abbildung 2.10: „Wie kann verhindert werden, dass theoretisch rekuperierbare Energie aufgrund eines vollen Speichers nicht zur Verbrauchssenkung genutzt werden kann?“ Eine Antwort auf die problembeschreibende Frage könnte lauten: „Durch vorausschauende Abschätzung der wiedergewinnbaren Energie anhand von Höheninformationen aus der Navigation und einer bedarfsgerechten Absenkung des Ladezustands“. Solch eine qualitative Lösung eines Teilproblems ist der erste Schritt hin zu einer Funktionsspezifikation. Die obige Antwort beinhaltet sogar schon Information zu benötigten Eingangs- und Ausgangssignalen der Funktion, weshalb sich derartige Beschreibungen relativ einfach in Softwarecode übersetzen lassen. Ein Eingang sind Höheninformationen aus digitalen Karten, eine Ausgangsgröße ist die Vorgabe eines maximal zulässigen Ladezustands. Die Lösung eines übergeordneten Problems mithilfe von vielen Teillösungen bewirkt außerdem einen modularen Charakter des resultierenden Systems aus Subfunktionen. Bei einer Vielzahl von parallel und weitestgehend unabhängig voneinander (modular) arbeitenden Funktionen ist allerdings sicherzustellen, dass keine Konflikte zwischen den Ausgangsgrößen der Funktionen entstehen.

3.1.1 Anforderungen an eine modulare Funktionsarchitektur

Die mit einer modularen Funktionsarchitektur verfolgten Ziele leiten sich aus den in Kapitel 2 erläuterten Nachteilen des Standes der Technik ab. Tabelle 3.1 fasst sie zu Zielgruppen und daraus abgeleiteten Anforderungen zusammen.

¹ Die *Funktion* ist in der Technik definiert als ein System zur Überführung von Eingangs- in Ausgangsgrößen. Diese können aus Stoffen, Energien oder Informationen bestehen [48].

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

Nr.	Übergeordnetes Ziel	Nr.	Anforderung
1	Erweiterung der konventionellen Betriebsstrategie um Wissen über das Fahrzeugumfeld.	1a	Nutzung geeigneter Sensorik zur Klassifikation des Fahrzeugumfelds.
		1b	Verarbeitung der vorausschauenden Informationen in eine für das Energiemanagement relevante Größe.
		1c	Geeignete Schnittstellen zum Ladezustandsmanagement und ggf. übrigen Energiefunktionen.
2	Senkung von Verbrauch, Verbesserung der Fahrleistung, Verbesserung der Qualität, Schaffung neuer Fahrzeugwerte.	2a	Die Architektur muss Mechanismen zur Priorisierung der Effizienz umfassen.
		2b	Die Architektur muss Mechanismen zur Priorisierung der Antriebsleistung umfassen.
		2c	Die Architektur muss in der Lage sein, bekannte Qualitätsmängel zu beseitigen.
		2d	Regelung der Energiesysteme des Fahrzeugs derart, dass der Fahrer einen Mehrwert erfährt.
3	Vermeidung einer Gewichts- oder Kostenmehrerung im Fahrzeug.	3a	Die Funktionen dürfen keine kostenintensiven Komponenten mit einem Zusatzgewicht erfordern.
		3b	Ausfall einzelner Systeme oder Funktionen darf nicht zu Liegenbleibern führen.
		3c	Die Funktionen müssen auf den gängigen Steuergeräten und Bussystemen lauffähig sein.
4	Kompatibilität mit den etablierten Entwicklungsprozessen.	4a	Die Subsysteme der Architektur müssen für alle Entwickler überschaubar sein.
		4b	Die Applikation der Funktionen muss für den Applikateur nachvollziehbar sein.
		4c	Es muss ausgeschlossen sein, dass die Funktionen unerwartetes Verhalten zeigen.
		4d	Die Funktionen müssen diagnosefähig sein.
5	Kompatibilität mit einer breiten Fahrzeugflotte unterschiedlichen Ausstattungsgrades.	5a	Die Funktionsarchitektur muss sich an die zur Verfügung stehenden Sensoren und Aktoren im Fahrzeug automatisch anpassen.
		5b	Die Funktionen müssen geeignete Parameter aufweisen, mit denen sie auf einzelne Fahrzeuge applizierbar sind.
		5c	Es müssen Funktionen enthalten sein, die bereits in Fahrzeugen mit minimalem Ausstattungsgrad Potenziale bieten.
		5d	Es müssen Funktionen enthalten sein, die den maximal möglichen Ausstattungsgrad nutzen.

Tabelle 3.1: Ziele und Anforderung an eine Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

3.1.2 Modularisierung des Energiemanagements

Um systematisch Verbesserungspotenziale im Energiemanagement durch Nutzung eines erweiterten Sensorangebots aufdecken zu können, muss der Begriff Energiemanagement zunächst zielorientiert gegliedert werden. Energiemanagement wird in dieser Arbeit definiert als ein Bündel von Fahrzeugfunktionen, das durch intelligente Regelung der Energiesysteme ein Maximum an Effizienz, Fahrdynamik, Qualität und Kundennutzen generiert. Diese Definition enthält bereits die vier wesentlichen Ziele des Energiemanagements: Effizienz, Fahrdynamik, Qualität und Mehrung der Fahrzeugwertigkeit.

Im nächsten Schritt lassen sich jedem dieser vier Ziele Methoden zuordnen, die der Zielerreichung dienen. So lässt sich etwa die Effizienz eines Fahrzeugs steigern, indem die Verlustleistung vermindert wird. Die Verlustleistung wiederum kann durch Einstellung eines effizienteren Betriebspunktes oder durch zeitweise und bedarfsgerechte Deaktivierung einer verlusterzeugenden Komponente erreicht werden. Abbildung 3.1 zeigt die vollständige Aufgliederung von Methoden zur Effizienzsteigerung. Grundsätzlich kann jede identifizierte Methode reaktiv oder prädiktiv gestaltet werden, das heißt, es kann entweder erst nach Eintritt von bestimmten Randbedingungen gehandelt werden oder schon zielgerichtet davor.

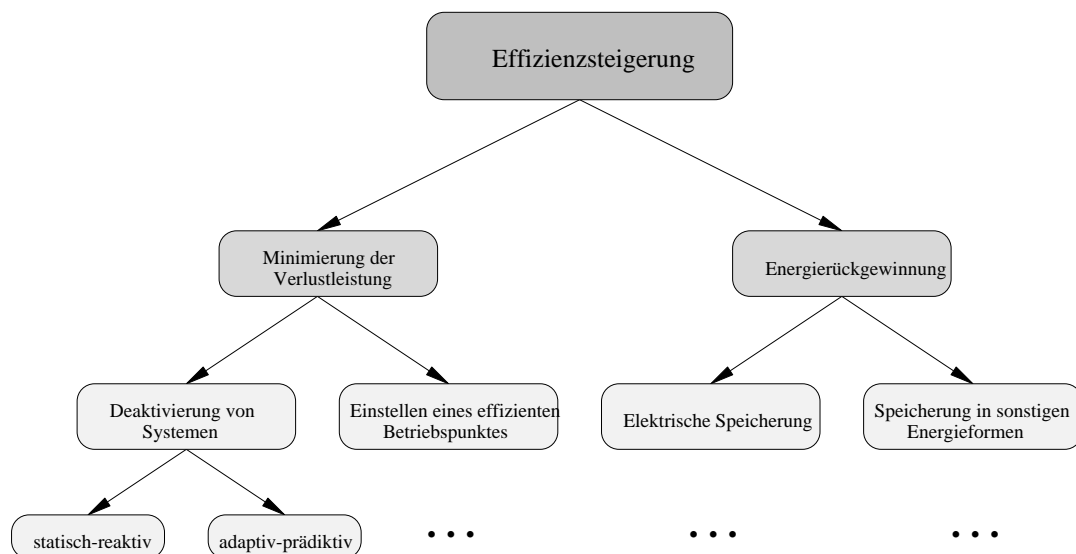


Abbildung 3.1: Methoden des Energiemanagements zur Steigerung der Effizienz

Das gleiche Vorgehen kann auf die übrigen drei Ziele des Energiemanagements angewendet werden. Abbildungen 3.2 und 3.3 zeigen die vollständige Zerlegung der Bereiche Dynamik, Qualität und Kundennutzen in Methoden, die der jeweiligen Zielerreichung dienen.

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

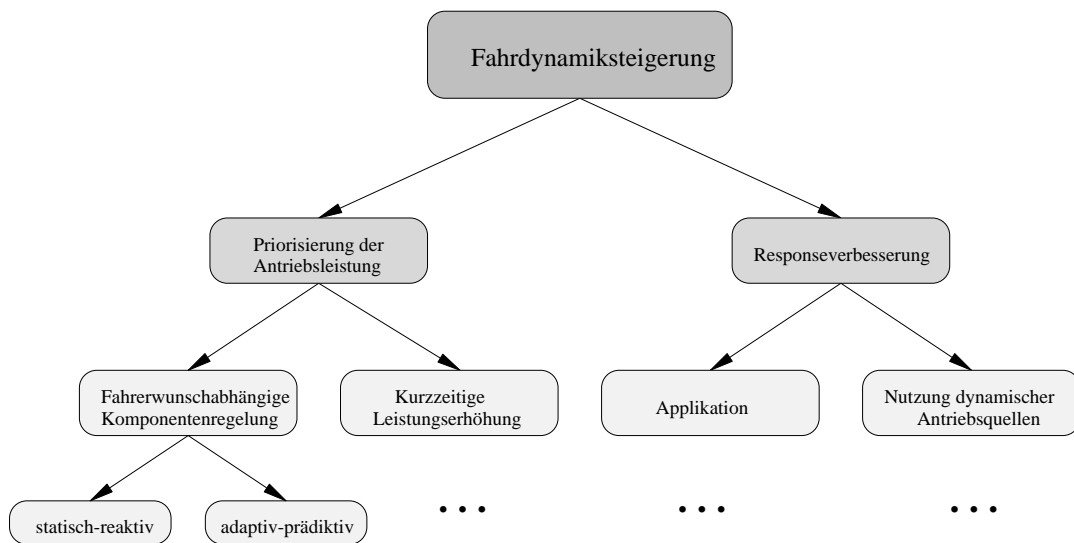


Abbildung 3.2: Methoden des Energiemanagements zur Steigerung der Fahrzeugdynamik

Die Längsdynamik lässt sich durch Energiefunktionen steigern, indem entweder die Antriebsleistung des Fahrzeugs zulasten von anderen Energiesenken priorisiert wird (Beispiele: Deaktivierung des Klimakompressors während Vollastbeschleunigungen, Boostfunktion im Hybridfahrzeug) oder das Ansprechverhalten des Fahrzeugs verbessert wird. Letzteres kann etwa durch die Applikation von Steuergeräten zur Regelung von Antriebsquellen (Beispiel dynamische Fahrpedalkennlinie²) oder durch die bewusste Nutzung von dynamisch reagierenden Antriebsquellen realisiert werden (Beispiel Hybridfahrzeug: schnellere Umsetzung des Fahrerwunschs über die E-Maschine als über den Verbrennungsmotor).

Qualität wird für die Zwecke dieser Arbeit im Zusammenhang mit Energiemanagement definiert als „Gewährleistung der uneingeschränkten Funktionsverfügbarkeit ohne Irritation der Fahrzeuginsassen durch akustische oder optische Anomalien“. Energiefunktionen zur Qualitätssicherung dienen also entweder der Sicherung der Verfügbarkeit von Funktionen durch Vermeidung von Energiemangel (wie etwa der Klimatisierung des Innenraums während des Motorstillstands) oder der Gewährleistung von mechanischer und elektrischer Stabilität im Antriebsstrang bzw. Bordnetz (Beispiel: Konditionierung des elektrischen Bordnetzes zur Vermeidung von Spannungseinbrüchen und dem damit einhergehenden Lichtflackern aufgrund von hohen transienten Verbraucherleistungen etwa von Lenkunterstützungssystemen). Auch die Funktionen zur Qualitätssicherung im Fahrzeug können jeweils entweder reagierend oder vorausschauend ausgeführt sein.

² Bei geringen Fahrpedalwinkeln wird schon ein überproportional großer Teil der zur Verfügung stehenden Antriebsleistung abgerufen, um dem Fahrer mehr Durchzugskraft zu suggerieren (siehe auch Abbildung 3.9)

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

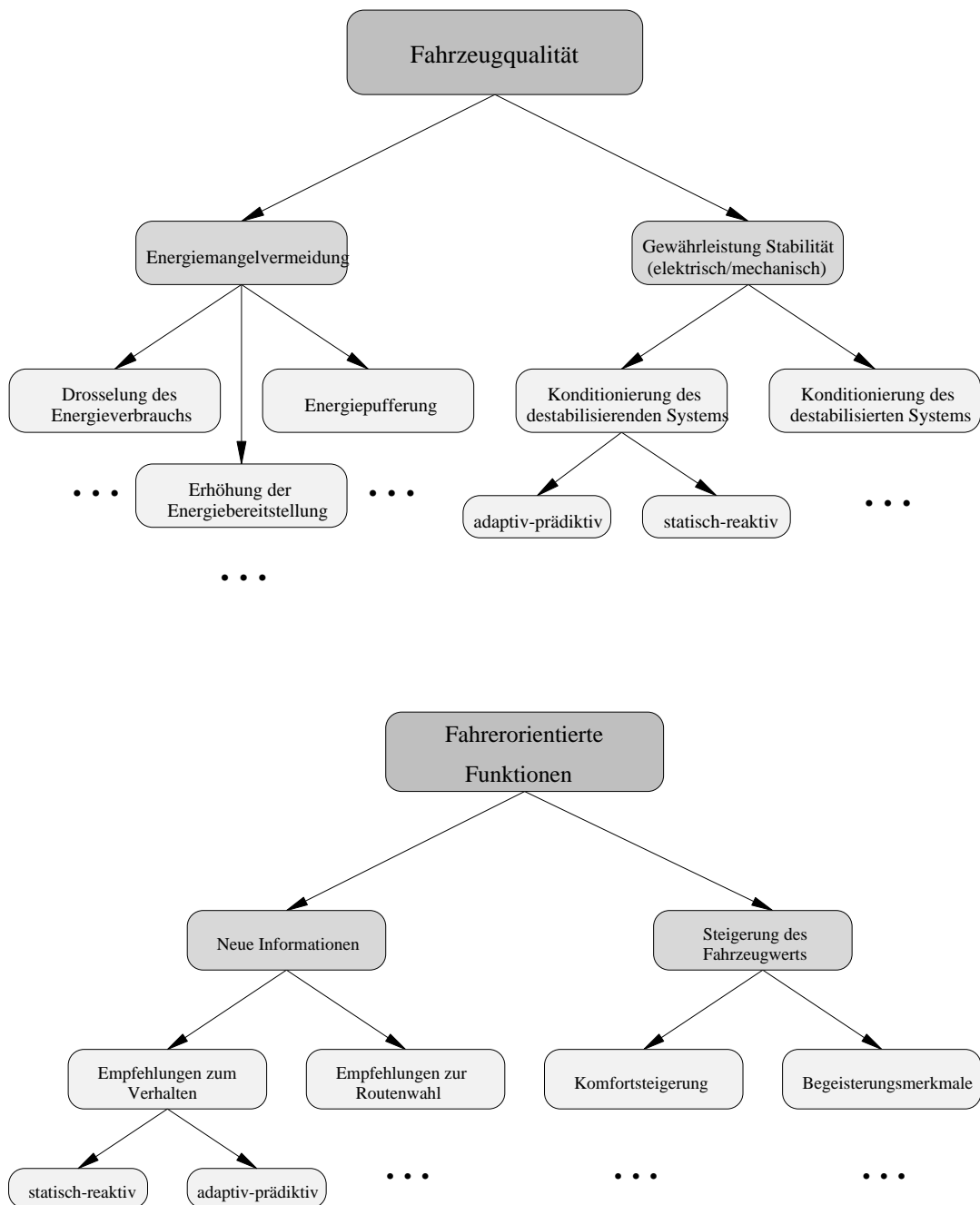


Abbildung 3.3: Methoden des Energiemanagements zur Gewährleistung von Qualität und Kundenwerten

Im Rahmen des Energiemanagements kann für den Fahrer durch entsprechende Funktionen auch ein direkter Mehrwert generiert werden, sei es durch das Anbieten neuer Informationen (beispielsweise Anzeige der verbrauchsärmsten Route zu einem im Navigationssystem eingegebenen Ziel) oder durch eine Steigerung des subjektiv emp-

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

fundenen Fahrzeugwertes (etwa durch Schaffung neuer Begeisterungsmerkmale wie der Erweiterung des elektrischen Fahrbetriebs im Hybridfahrzeug³).

Die unterste Ebene der gezeigten Gliederungen lässt sich generisch nicht weiter unterbrechen. Ihr können nun je nach untersuchter Antriebsstrang- und Bordnetztopologie Energiefunktionen zugeordnet werden, die zum jeweiligen Methodenast passen. Hierzu sollte zunächst mit einem konventionellen Fahrzeug begonnen werden, da hier schon eine Vielzahl an Energiefunktionen aus Serienfahrzeugen bekannt sind. Im Anschluss können dann etwa Mild- und Full-Hybridfahrzeuge, wie sie Gegenstand dieser Arbeit sind, untersucht werden. Abbildung 3.4 zeigt für drei unterschiedliche Fahrzeugkonzepte ein vollständig aufgespanntes Netz von Energiefunktionen, die den identifizierten Zielen des Energiemanagements dienen und ihren zugrundeliegenden Methoden zugeordnet wurden. Sind alle Felder mit bereits bekannten Energiefunktionen befüllt, kann für jede übriggebliebene Lücke systematisch untersucht werden, ob eine entsprechende Energiefunktion denkbar, möglich und sinnvoll ist. In der Darstellung sind auch die in dieser Arbeit behandelten Energiefunktionen enthalten.

³ Die Wichtigkeit der Bereitstellung von Begeisterungsmerkmalen für ein Produkt und das damit einhergehende Differenzierungspotenzial beschreibt Lindemann im Einzelnen [69].

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

Energiemanagement				Elektrifizierungsgrad				
				Konv.	Mild Hybrid	Full Hybrid		
Ziel	Methode	Methode 2	Umsetzung	Funktion	Funktion	Funktion		
Fahrndynamik	Priorisierung der Antriebsleistung	Fahrerwunsch-abhängige Verbraucherregelung	reaktiv-statisch	Generatorsp.absenkung bei VL	DC/DC-Sperren bei VL	DC/DC-Sperren bei VL		
			prädiktiv-adaptiv	meh. KK-Abregelung	meh./el. KK-Abregelung	el. KK-Abregelung		
		Kurzzeitige Leistungserhöhung	reaktiv-statisch	LV Verbr. Abregelung	LV Verbr. Abregelung	LV Verbr. Abreg.		
			prädiktiv-adaptiv	-	HV Verbr. Abwurf/Abregelung	HV Verbr. Abwurf/Abreg.		
		Responseverbess.	Applikation der Sensorik	reaktiv-statisch	Erk. von VL-Manövern + Maßn.	Erk. von VL-Manövern + Maßn.	Erk. von VL-Manövern + Maßn.	
				prädiktiv-adaptiv	-	Boost	Boost	
	Energierückgewinnung	Bremsenergie in elektrische Energie	reaktiv-statisch	-	Fahrstilabh. SOC-Regelung	Fahrstilabh. SOC-Regelung		
			prädiktiv-adaptiv	Erk. von Vollastmanövern	Erk. von Vollastmanövern	Erk. von Vollastmanövern		
		Bremsenergie in sonstige Energieformen	reaktiv-statisch	Variable FP-Kennlinie	Variable FP-Kennlinie	Variable FP-Kennlinie		
			prädiktiv-adaptiv	Fahrstilabh. FP-Kennlinie	Fahrstilabh. FP-Kennlinie	Fahrstilabh. FP-Kennlinie		
		Minimierung der Verlustleistung	Deaktivierung von verlust erzeugenden Komponenten	reaktiv-statisch	-	Trägheitskompens. durch EM	Trägheitskompens. durch EM	
				prädiktiv-adaptiv	LV-Rekuperation (Gen)	LV-Rekuperation (DC/DC)	LV-Rekuperation (DC/DC)	
Effizienz	Energierückgewinnung	Bremsenergie in elektrische Energie	reaktiv-statisch	-	HV Rekuperation	HV Rekuperation		
			prädiktiv-adaptiv	Erkennung Gefälle, ...	Erkennung Gefälle, ...	Erkennung Gefälle, ...		
		Bremsenergie in sonstige Energieformen	reaktiv-statisch	-	Erkennung Gefälle, ...	Erkennung Gefälle, ...		
			prädiktiv-adaptiv	Klimarekuperation mKK	Klimarekuperation mKK/eKK	Klimarekuperation eKK		
		Minimierung der Verlustleistung	Einstellung eines effizienten Betriebspunktes	reaktiv-statisch	Erkennung Gefälle, ...	Erkennung Gefälle, ...	Erkennung Gefälle, ...	
				prädiktiv-adaptiv	MSA	MSA + el. Kriechen + SMR	MSA + el. Fahren	
	Qualität	Energiengelevorm.	Verringerung Verbraucherleistung	reaktiv-statisch	Abkoppelung mKK	Abkoppelung mKK	-	
				prädiktiv-adaptiv	-	Rekuperation mit SMR	Reku. mit abgekoppeltem VM	
			Erhöhung Energiebereitstellung	reaktiv-statisch	Erk. Standphasen, 30er Zo.	Erk. Standphasen, 30er Zo.	Erk. Standphasen, 30er Zo.	
		Stabilität (eL/mech.)	Beeinflussung des destabilisierenden Systems	reaktiv-statisch	Eff. Schaltkennlinien (AT)	Eff. Schaltkennlinien	Eff. Schaltkennlinien	
				prädiktiv-adaptiv	-	-	Effizientes Hill-Holding	
			Konditionierung des destabilisierten Systems	reaktiv-statisch	Prädiktives Automatikgetr.	Prädiktive Gangwahl	Prädiktive Gangwahl	
Kundenfunktionen	Neue Infos	Empfehlungen zum Verhalten	reaktiv-statisch	Standverbaucher.mngt	Standverbaucher.mngt	Standverbaucher.mngt		
			prädiktiv-adaptiv	Koord. Heizverbraucher	Koord. Heizverbraucher	Koord. Heizverbraucher		
		Empfehlungen zur Routenwahl	reaktiv-statisch	Präd. Koord. Heizverbr.	Präd. Koord. Heizverbr.	Präd. Koord. Heizverbr.		
	Bessere Erfüllung Kundenwünsche	Komfortsteigerung	reaktiv-statisch	LL-Drehzahlh. für BN-Stab.	Anhebung SOC bei E-Mangel	Anhebung SOC bei E-Mangel		
			prädiktiv-adaptiv	Präd. LL-Drehzahlh.	Anhebung SOC vor E-Mangel	Anhebung SOC vor E-Mangel		
		Neue Begeisterungsmerkmale	reaktiv-statisch	LV-SC für elektr. Lenksysteme	LV-SC für elektr. Lenksysteme	LV-SC für elektr. Lenksysteme		
Kundenfunktionen	Bessere Erfüllung Kundenwünsche	Komfortsteigerung	reaktiv-statisch	Präd. Erhöhung SOC für Lenk.	Präd. Erhöhung SOC für Lenk.	Präd. Erhöhung SOC für Lenk.		
			prädiktiv-adaptiv	Beschr. Generatorndynamik	Beschr. DC/DC-Dynamik	Beschr. DC/DC-Dynamik		
		Neue Begeisterungsmerkmale	reaktiv-statisch	Beschr. mKK-Dynamik	Beschr. mKK/eKK-Dynamik	Beschr. eKK-Dynamik		
			prädiktiv-adaptiv	Degradation Verbr. bei Lenk.	Degradation Verbr. bei Lenk.	Degradation Verbr. bei Lenk.		
		Kundenfunktionen	Neue Infos	Empfehlungen zum Verhalten	reaktiv-statisch	Präd. Degrad. von Verbr.	Präd. Degrad. von Verbr.	Präd. Degrad. von Verbr.
					prädiktiv-adaptiv	Schaltpunktanzeige	Schaltpunktanzeige	Schaltpunktanzeige
	Empfehlungen zur Routenwahl			reaktiv-statisch	Prädiktive SPA, Gasempf.	Prädiktive SPA, Gasempf.	Prädiktive SPA, Gasempf.	
	Bessere Erfüllung Kundenwünsche		Komfortsteigerung	reaktiv-statisch	Effizienteste Route	Effizienteste Route	Effizienteste Route	
				prädiktiv-adaptiv	Effizientes Tanken	Effizientes Tanken	Effizientes Tanken	
			Neue Begeisterungsmerkmale	reaktiv-statisch	Verhind. MSA beim Parkieren	-	-	
	Kundenfunktionen	Neue Infos	Empfehlungen zum Verhalten	reaktiv-statisch	Klimatisierung Innenraum vor dem Einsteigen (Lüftung)	Klimatisierung Innenraum vor dem Einsteigen (Lüft + eKK)	Klimatisierung Innenraum vor dem Einsteigen (Lüft + eKK)	
				prädiktiv-adaptiv	Licht + Umluft an vor Tunnel	Licht + Umluft an vor Tunnel	Licht + Umluft an vor Tunnel	
Empfehlungen zur Routenwahl			reaktiv-statisch	-	el. Kriechen	el. Fahren		
Bessere Erfüllung Kundenwünsche		Komfortsteigerung	reaktiv-statisch	-	-	Sicherst. el. Fahrt am Wohnort		
			prädiktiv-adaptiv	-	Sicherstellung el. Parkieren	Sicherstellung el. Parkieren		
		Neue Begeisterungsmerkmale	reaktiv-statisch	-	-	Erw. el. Fahrt in Wohngebiet.		

Abbildung 3.4: Netz aus Energiefunktionen nach Zielen und Methoden des Energiemanagements sowie nach Elektrifizierungsgrad des betrachteten Fahrzeugtyps

3.2 Zugrundeliegende reaktive Reglerarchitektur

Die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Energiefunktionen zur vorausschauenden Regelung der Energieströme sind als Erweiterung eines nicht-prädiktiven (reaktiven) Basis-Energiemanagements zu verstehen. Die zugrundeliegenden Basisbetriebsstrategien haben sich im Vergleich zu Alternativen bereits als geeignete Methode erwiesen, um hohe Effizienz und robuste Fahrleistungen gleichzeitig zu gewährleisten und werden im folgenden Kapitel vorgestellt. Die Kenntnis dieser Basis ist entscheidend für das Verständnis der erweiterten Funktionsarchitektur sowie der Funktionen für adaptives Energiemanagement selbst.

3.2.1 Funktionsarchitektur

Die dieser Arbeit zugrundeliegende nicht-prädiktive Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge vermeidet aufgrund der in Abschnitt 2.3.2 genannten Gründe (Rechenaufwand, Prozesskompatibilität, Stabilität) die Online-Optimierung, auf KI-Methoden basierende Ansätze oder Optimalsteuerungen zur Regelung der Momente und Hybridzustände. Sie basiert auf einer Mischform von Zustandsautomat und kontinuierlicher Regelung, da sich im Laufe der Entwicklung gezeigt hat, dass auf diesem Weg ein nahezu identisches Kraftstoffeinsparpotenzial bei deutlich besserer Prozesskompatibilität und Nachvollziehbarkeit erzielbar ist [51]. Abbildung 3.5 zeigt vereinfacht die Funktionsweise der wesentlichen Funktionsmodule zur Bestimmung des Hybridzustands sowie des Momentenverhältnisses zwischen Elektro- und Verbrennungsmotor.

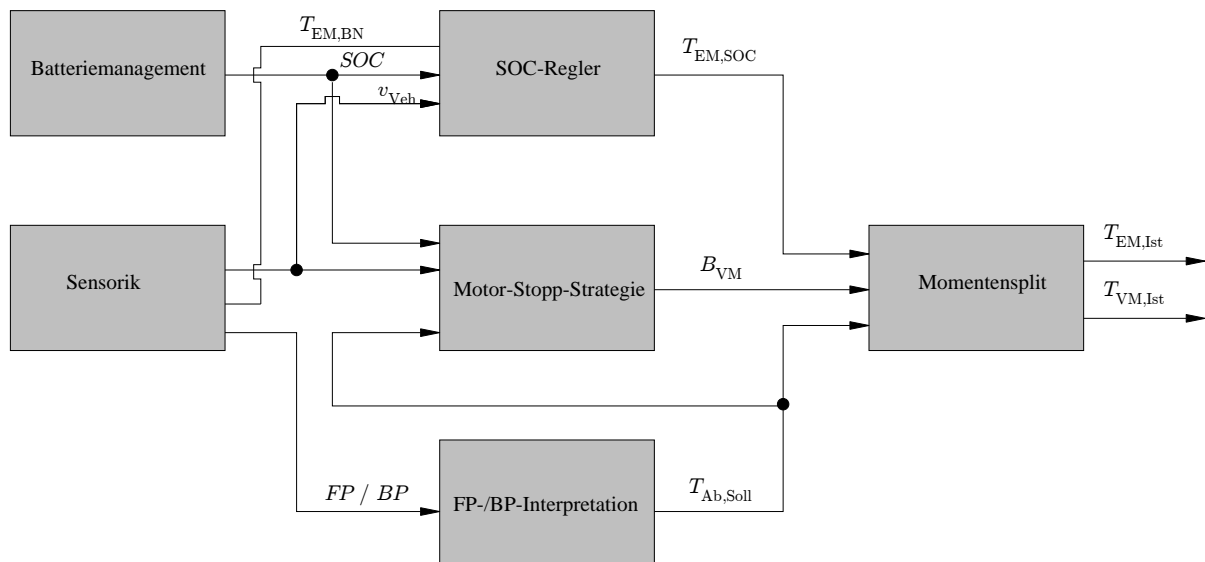


Abbildung 3.5: Funktionsarchitektur für konventionelle Hybridbetriebsstrategie

Aus der Fahrzeugsensorik stammen die grundlegenden Informationen über den Fahrzeugzustand wie aktuelle Geschwindigkeit, Fahrpedalwinkel und Bremsdruck. Das Batteriemanagement-Modul überwacht den Zustand des elektrischen Energiespeichers und kommuniziert den Ladezustand sowie Grenzen für die maximal mögliche Lade- und Entladeleistung.

a) Modul SOC-Regler

Aus den Größen Fahrzeuggeschwindigkeit v_{Veh} und Ladezustand SOC ermittelt das Modul SOC-Regler zunächst ohne Berücksichtigung des Bordnetzenergiebedarfs ein für das Erreichen eines gewünschten Ladezustands benötigtes Drehmoment $T_{\text{EM,SOC,roh}}$. Im Anschluss wird das für die generatorische Energieversorgung des Bordnetzes notwendige E-Maschinenmoment $T_{\text{EM,BN}}$ addiert, so dass gewährleistet wird, dass der Ladezustand auch die gewünschte Änderung erfährt. Die genaue Funktionsweise zeigt Abbildung 3.6: Das Diagramm zeigt über der Fahrzeuggeschwindigkeit jeweils eine Ober- und Untergrenze für den gewünschten Betriebsbereich des Energiespeichers. Die Obergrenze $SOC_{\text{max,v}}$ nimmt mit steigender Geschwindigkeit und der damit quadratisch steigenden kinetischen Energie des Fahrzeugs ab, um auch bei Abbremsungen aus hohen Geschwindigkeiten noch ausreichende Rekuperationsreserven bereitzustellen. Die untere Begrenzung $SOC_{\text{min,krit}}$ ist vorgesehen, um einerseits der Lebensdauer des elektrischen Energiespeichers nicht durch Tiefentladung zu schaden, andererseits um die Startfähigkeit des Fahrzeugs auch nach langen Standzeiten und damit verbundener Selbstentladung zu gewährleisten. Das Einführen einer mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit sinkenden SOC-Obergrenze ist die einfachste Form des vorausschauenden Energiemanagements, da davon ausgegangen wird, dass der Fahrer zu einem unbestimmten Zeitpunkt in der nahen Zukunft wieder auf 0 km/h abbremsen wird. Es wird also ein energetischer Vorhalt für eine in der Zukunft eintretende Fahrsituation geschaffen – allerdings ohne dafür Umfeldsensorik zu benötigen.

Innerhalb des übrig bleibenden Betriebsfensters zwischen Ober- und Untergrenze wird der Ladezustand normiert zu SOC_{rel} , definiert als:

$$SOC_{\text{rel}} = \frac{SOC - SOC_{\text{min,krit}}}{SOC_{\text{max,v}} - SOC_{\text{min,krit}}} \quad (3.1)$$

Die vom konventionellen SOC-Regler angeforderte Speicherleistung (oder auch das E-Maschinenmoment) ist eine Funktion des relativen Ladezustands:

$$P_{\text{Bat}} = f(SOC_{\text{rel}}) \quad (3.2)$$

Normiert man die Speicherleistung gemäß

$$P_{\text{Bat,norm}} = \begin{cases} \frac{P_{\text{Bat}}}{P_{\text{Bat,max,lad}}} & , P_{\text{Bat}} > 0 \\ \frac{P_{\text{Bat}}}{|P_{\text{Bat,max,entlad}}|} & , P_{\text{Bat}} \leq 0 \end{cases}$$

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

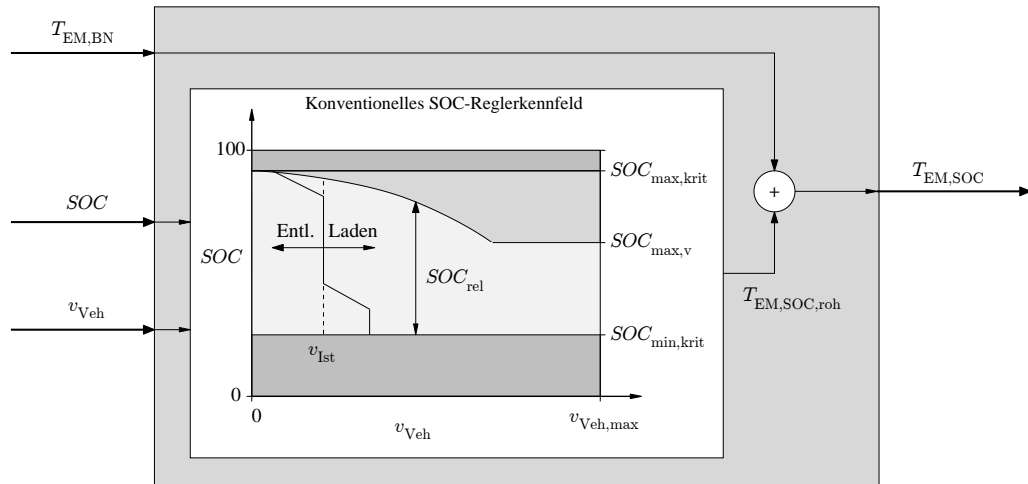


Abbildung 3.6: Modul SOC-Regler mit geschwindigkeitsabhängiger Regelung

so lässt sich die Funktion $P_{Bat,norm}(SOC_{rel})$ als Kennlinie darstellen. Diese Kennlinie ist in Abbildung 3.6 bereits angedeutet und wird mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit zunehmend gestaucht, da $SOC_{max,v}$ abnimmt. Abbildung 3.7 zeigt die Kennlinie separat: Zu sehen ist ein relativ breiter Bereich, in dem von Seiten des SOC-Reglers eine Nullstromregelung gefordert wird. In diesem Bereich steigt oder fällt der Ladezustand lediglich durch Rekuperation von Bremsenergie oder aufgrund der Boostfunktion bei Vollastbeschleunigungen. Sobald SOC_{rel} diesen Bereich verlässt, verhält er sich wie ein P-Regler und fordert mit ansteigender Abweichung vom Nullstromregelbereich eine proportional steigende Lade- bzw. Entladeleistung an. Dies gewährleistet eine zügige Entfernung von den zulässigen Ladezustandsgrenzen und sorgt für den in Kapitel 2.3 erwähnten Kompromiss zwischen der Verfügbarkeit der elektrischen Fahrfunktion, der Boostfunktion sowie der Fähigkeit zur Rekuperation.

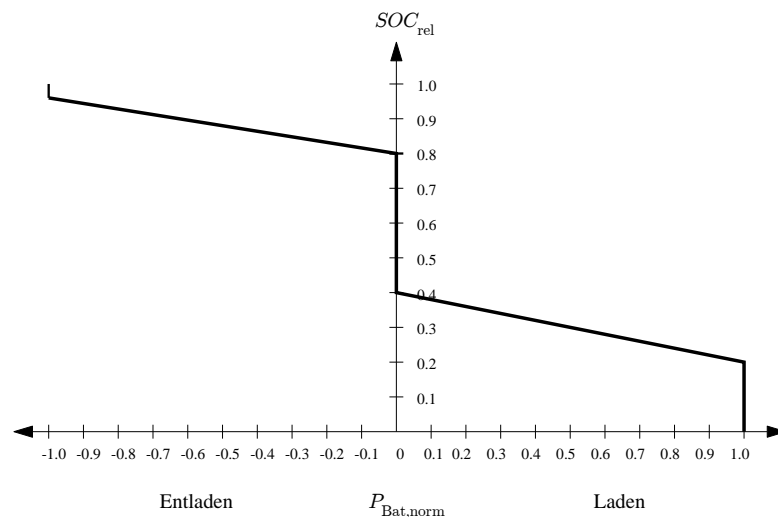


Abbildung 3.7: Statische SOC-Levelling Kennlinie

b) Modul Motor-Stopp-Strategie

Die in der Literatur hinreichend beschriebene Betriebsgrenze, bis zu der das rein elektrische Fahren der effizienteste Antriebsmodus ist, liegt bei den in dieser Arbeit betrachteten Hybridfahrzeugen bei etwa $P_{EF,max} = 15 \text{ kW}$ [8, 14, 80]. Bei geforderten Antriebsleistungen unterhalb dieser Grenze sollte der Verbrennungsmotor gestoppt werden, darüber als alleinige Antriebsquelle genutzt werden. Des Weiteren wird das rein elektrische Fahren aus Gründen der Batteriebensdauer sowie Anforderungen an die Reaktionsfreudigkeit des Fahrzeugs auf Geschwindigkeiten unter $v_{EF,max} = 50 \text{ km/h}$ beschränkt. Das Modul Motor-Stopp-Strategie berücksichtigt diese Schwellen und steuert somit in Abhängigkeit der geforderten Antriebsleistung und der Geschwindigkeit den Start und Stopp des Verbrennungsmotors (Abbildung 3.8).

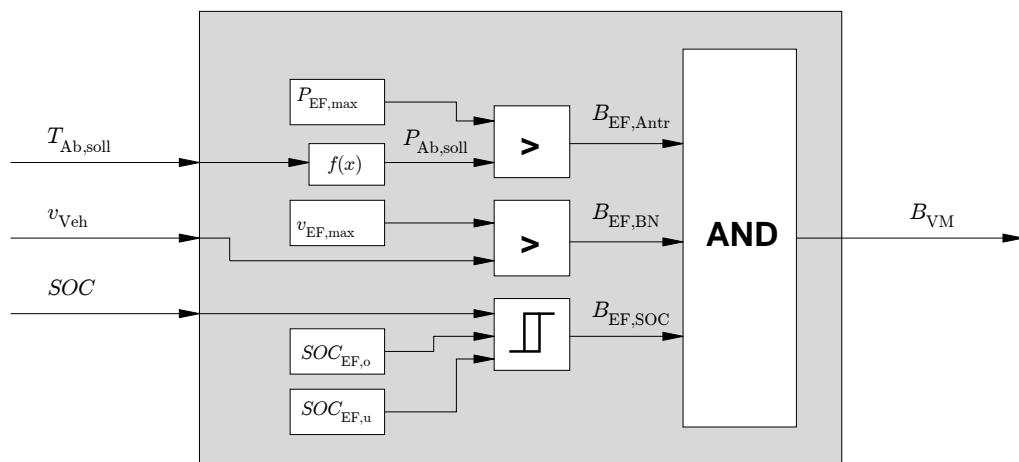


Abbildung 3.8: Modul Motor-Stopp-Strategie

Eine weitere wichtige Größe ist die untere zulässige SOC-Grenze für den rein elektrischen Fahrbetrieb. Eine Hysterese sorgt dafür, dass der Verbrennungsmotor beim Unterschreiten von $SOC_{EF,u}$ gestartet wird und die vom SOC-Regler angeforderte Ladeleistung zur Anhebung des Ladezustands bereitstellt. Beim Überschreiten von $SOC_{EF,o}$ erlaubt das Modul erneut den Wechsel in den elektrischen Fahrmodus. Ein Delta zwischen $SOC_{EF,u}$ und $SOC_{min,krit}$ sorgt für eine Sicherheitsreserve, damit beim Abstellen des Fahrzeugs nach einer elektrischen Fahrt trotz der Selbstentladung des Speichers $SOC_{min,krit}$ nicht unterschritten wird und das Fahrzeug startfähig bleibt.

c) Modul Fahrpedal- und Bremspedalinterpretation

Das Modul Fahrpedal- und Bremspedalinterpretation überführt die Eingangsgröße Fahrpedalwinkel oder Bremspedaldruck in ein Wunschmodent an den Rädern oder der Kurbelwelle. Der Zusammenhang muss bezüglich des Fahrpedals nicht linear sein, durch bewusste Anpassung der zugrundeliegenden Kennlinie wird versucht, ein für den Fahrer komfortables und souveränes Fahrgefühl zugleich zu erreichen. Beim Hybridfahrzeug übersteigt das bei 100 % Fahrpedalwinkel geforderte Abtriebsmoment

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

$T_{Ab,soll}$ das maximale Verbrennungsmotormoment $T_{VM,max}$ und entspricht dem maximalen Moment des gesamten Systems inklusive der E-Maschine $T_{Sys,max}$ (Abbildung 3.9).

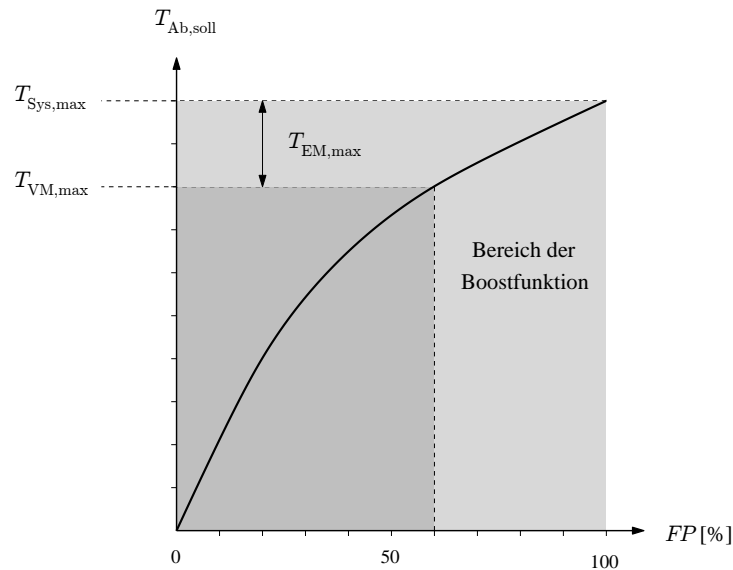


Abbildung 3.9: Fahrpedalinterpretation im Hybridfahrzeug

d) Modul Momentensplit

Das Modul Momentensplit kombiniert die Anforderungen der drei vorgeschalteten Blöcke zu einer Aufteilung der Momente auf E-Maschine und Verbrenner und arbeitet wie ein kontinuierlicher Regler. Nach Abbildung 3.10 ist das Fahrerwunschmoment die wesentliche Eingangsgröße, die es zu allen Zeitpunkten und in allen Hybridbetriebszuständen zu erfüllen gilt. Das Abtriebswunschmoment $T_{Ab,soll}$ teilt sich in den elektromotorischen und verbrennungsmotorischen Pfad auf. Vor Eingang in den Verbrennungsmotor wird das vom SOC-Regler geforderte Moment addiert und wird so zum Soll-Moment für den Verbrennungsmotor $T_{VM,soll}$. Das Ist-Moment des Verbrenners $T_{VM,ist}$, das trägheitsbedingt dem Sollmoment hinterherhinkt, wird mit dem Wunschmoment des Fahrers bilanziert. Das aus der Bilanz resultierende Moment $T_{EM,soll}$ stellt das Soll-Moment der E-Maschine dar.

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

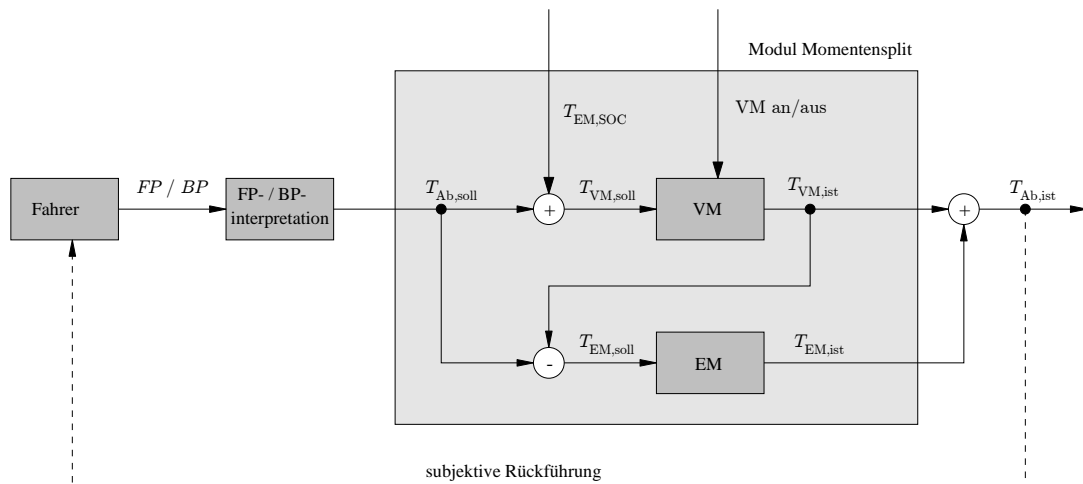


Abbildung 3.10: Kontinuierlicher Momentensplit zur Realisierung der Hybridfunktionen

Mit dieser Verknüpfung der Momentenwünsche in einer Reglerarchitektur sind alle Hybridzustände realisierbar, und die hohe Dynamik der E-Maschine wird für eine schnelle Umsetzung des Fahrerwunsches ausgenutzt:

- *Normale verbrennungsmotorische Fahrt*
Fährt das Fahrzeug aufgrund der Entscheidung des Moduls Motor-Stopp-Strategie verbrennungsmotorisch und mit einer Antriebsleistung, die der Verbrenner alleine zu leisten im Stande ist, so erbringt die E-Maschine das vom SOC-Regler gewünschte Moment. Es kommt zur Ladung bzw. Entladung der Batterie gemäß Bild 3.7.
- *Boosten*
Wünscht der Fahrer ein höheres Moment als $T_{VM,max}$, so wird dieses Moment als Sollgröße für den Verbrennungsmotor vorgegeben. Da er aber nur sein maximales Moment liefern kann, gleicht die E-Maschine die Differenz aus und unterstützt motorisch.
- *Elektrisches Fahren*
Ein stillstehender Verbrennungsmotor liefert kein Moment ($T_{VM,ist} = 0 \text{ Nm}$). Das vom Fahrer gewünschte Abtriebswunschemoment geht dann direkt an die E-Maschine weiter.
- *Rekuperation*
Bremst der Fahrer, so liefert der Verbrenner ein Moment $T_{VM,ist} \leq 0 \text{ Nm}$ und die E-Maschine regelt das negative Wunschemoment ein. Die E-Maschine überfordernde Bremswünsche müssen zusätzlich vom hydraulisch-mechanischen System umgesetzt werden.

3.2.2 Fahrsituationsabhängige Nachteile der Basisbetriebsstrategie

Der im vorherigen Abschnitt vorgestellte heuristische Ansatz für die Funktionsarchitektur eines Hybridfahrzeugs trifft in den meisten Fahrzuständen Entscheidungen, die bezüglich Effizienz und Fahrleistungen schon nahe an das Optimum heranreichen [51]. Dennoch sind in einigen Fahrsituationen, in denen sich der Kompromiss aus Effizienz und Fahrleistungen gemäß Abschnitt 2.3.1 bemerkbar macht, Verbesserungspotenziale denkbar, da Möglichkeiten der Hardware-Komponenten des Fahrzeugs aufgrund eines suboptimalen Ladezustands nicht voll ausgeschöpft werden können. Im Einzelnen handelt es sich bei diesen Fahrsituationen um die folgenden drei Cluster:

1. *Fahrsituationen mit eingeschränktem Kundenwert*

Das Begeisterungsmerkmal *elektrisches Fahren* wird heute als eines der wesentlichen Verkaufsargumente für Hybridfahrzeuge gehandelt. Parametrisiert man die Betriebsstrategie eines Hybridfahrzeugs jedoch strikt auf effizienzoptimalen Betrieb, so erfolgt bei jedem Über- oder Unterschreiten der 15 kW Antriebsleistungsgrenze ein Zustart bzw. Stopp des Verbrennungsmotors. Erlebbares elektrisches Fahren ist nur sehr eingeschränkt möglich, obwohl das System mit der verbauten elektrischen Leistung in der Lage wäre, gerade in verkehrsberuhigten Zonen deutlich höhere elektrische Fahranteile zu bieten. Hinzu kommen die Komforteinbußen aufgrund des häufigen Startens und Stoppens des Verbrennungsmotors. Das Erkennen von Wohngebieten mithilfe moderner Navigationsgeräte kann hier Abhilfe schaffen, indem die elektrischen Fahranteile in diesen Bereichen bewusst erweitert werden.

2. *Fahrsituationen mit eingeschränkten Fahrleistungen*

Das in Abschnitt 2.3.1 genannte Risiko eines für konstant hohe Fahrleistungen nicht ausreichend geladenen Energiespeichers macht sich in allen Situationen bemerkbar, in denen Vollastbeschleunigungen häufig auftreten und in denen für die Fahrsicherheit ein verlässliches Verhalten des Fahrzeugs notwendig ist. Zu diesen zählen Autobahnauffahrten, Ortsausfahrten, Bergauffahrten, Überhol-situationen, Aufhebungen von Geschwindigkeitsbegrenzungen und allgemein sportlicher Fahrstil.

3. *Fahrsituationen mit eingeschränkter Effizienz*

Die zwei wesentlichen Funktionen zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs im Vollhybridfahrzeug sind das elektrische Fahren sowie die Rückgewinnung von Energie zur anschließenden Entlastung des Verbrennungsmotors. Vor dem Eintreten von Fahrsituationen mit potenziell hohem elektrischem Fahranteil (30er Zonen, Staus o.ä.) kann das Anheben des Ladezustands gegenüber der Basisbetriebsstrategie eine Effizienzsteigerung bewirken, da die nicht adaptive Basisstrategie nur eingeschränkte energetische Vorhalte für derartige Fahrsituationen bereitstellen kann. Das Gleiche gilt für die Absenkung des Ladezustands vor Rekuperationsphasen mit hohen Energiemengen (beispielsweise vor Gefällen).

3.3 Funktionen zur Mehrung der Kundenwertigkeit

Die Funktion des rein elektrischen Fahrens ist ein vom Fahrer unmittelbar erlebbarer Unterschied zwischen einem Full-Hybrid- und einem konventionellen Fahrzeug. Verglichen mit der verbrennungsmotorischen Fahrt bietet das elektrische Fahren zudem spürbare Vorteile wie höhere Laufruhe und niedrigere Geräuschpegel oder auch ein vorübergehendes Ausbleiben von Schadstoffemissionen. Aus diesen Gründen wird das elektrische Fahren als ein kundenwertes Begeisterungsmerkmal eines Fahrzeugs angesehen, das es insbesondere in Fahrsituationen zu fördern gilt, in denen es für den Fahrer eine besondere Bedeutung hat. Solche Situationen sind etwa verkehrsberuhigte Zonen oder Wohngebiete, in denen die Anwohner von geringeren Geräusch- und Schadstoffemissionen profitieren und niedrige Geschwindigkeitslimits gelten.

Wie der vorige Abschnitt gezeigt hat, erfolgt der Zustart des Verbrennungsmotors bei einer konventionellen Betriebsstrategie, sobald die vom Fahrer gewünschte Antriebsleistung einen gewissen Schwellwert überschreitet. Dieser Schwellwert entspricht in der Regel der Grenze, ab der das verbrennungsmotorische Fahren gegenüber dem elektrischen der effizientere Betriebszustand ist. Hysteresen und andere Beschränkungen sorgen dafür, dass der Verbrennungsmotor nach dem Zustart eine gewisse Mindestdauer in Betrieb bleiben muss. Eine kurze Überschreitung der zulässigen elektrischen Antriebsleistung hat demnach eine signifikante Einschränkung des elektrischen Fahrpotenzials zur Folge.

Ist Wissen über das aktuelle Fahrzeugumfeld vorhanden, so kann der elektrische Fahrbetrieb situationsgerecht erweitert werden, um vermeidbare Verbrennungsmotorstarts zu unterdrücken. In Gebieten mit niedrigen zu erwartenden Motorleistungen, also in Bereichen, in denen Fahrer und Anwohner am meisten von der Deaktivierung des Verbrennungsmotors profitieren, ist ein Überschreiten des konventionellen Schwellwertes des elektrischen Fahrbetriebs zulässig. Hier kann davon ausgegangen werden, dass der Fahrer bei Beschleunigungen seine (niedrige) Wunschgeschwindigkeit schnell erreicht und die Leistungsüberschreitung daher nur sehr kurzzeitig vorliegt. Dem geringfügigen Nachteil des temporär „ineffizienten“ elektrischen Fahrens während der Beschleunigung stehen entscheidende Vorteile gegenüber: Die Nachlaufzeit des Verbrennungsmotors wird vermieden und der Fahrzeugwert für Fahrer und Umwelt gesteigert.

Abbildung 3.11 zeigt das um den adaptiven Anteil erweiterte Funktionsmodul zur Steuerung des Motorstarts und -stopps. Informationen über die Umwelt, im Beispiel eine 30er Zone, liefert das Navigationsgerät. Ein Schalter sorgt dafür, dass der Schwellwert für den Zustart des Verbrennungsmotors situationsabhängig eingestellt wird. Reduziert man die Entscheidung, ob verbrennungsmotorisch oder elektromotorisch gefahren wird, auf die drei Abhängigkeiten SOC, Geschwindigkeit und Antriebsleistung, so lässt sich der Betriebsbereich des elektrischen Fahrens dreidimensional darstellen (Abbildung 3.12).

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

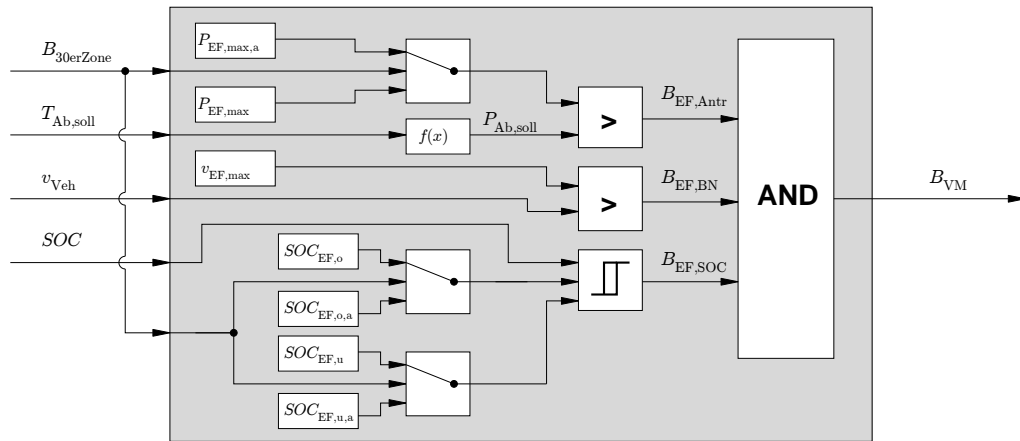


Abbildung 3.11: An Umgebungsinformationen gekoppeltes Motor-Stopp-Modul

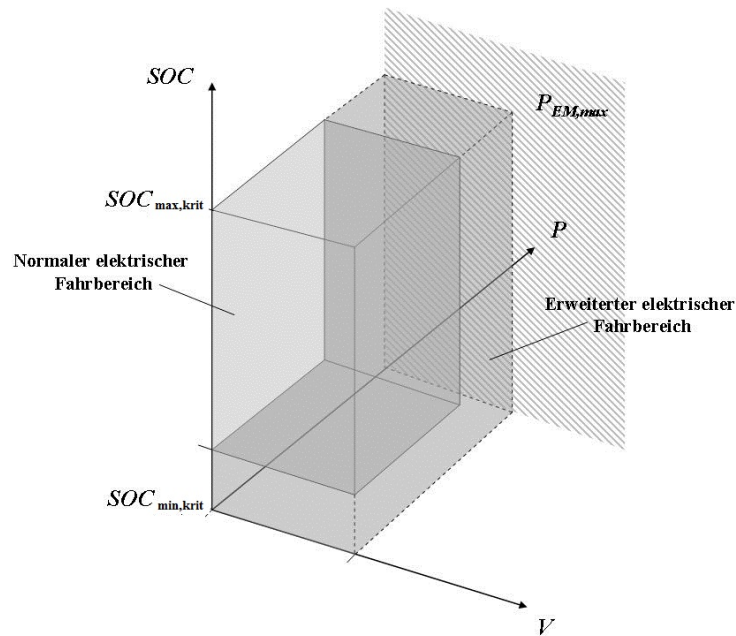


Abbildung 3.12: Erweiterung des elektrischen Fahrens in verkehrsberuhigten Zonen

3.4 Fahrleistungssteigernde Funktionen

Die im folgenden Abschnitt vorgestellten Funktionen dienen der situativen Steigerung der Fahrleistung durch Vermeidung von Leistungsengpässen, die bei einer konventionellen Strategie auftreten können. Durch bedarfsgerechtes Steigern der Fahrleistungen kann zu Zeiten, in denen ein hoher Leistungsbedarf unwahrscheinlich ist, der Effizienz umso höhere Priorität eingeräumt werden. In diesem Sinne sind situationsgerechte Ladestrategien zur Steigerung der Fahrleistung für die Gesamteffizienz des Systems förderlich.

3.4.1 Probabilistische Netze zur Fahrsituationsklassifikation

Für eine quantitative Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer bestimmten Fahrsituation ist eine Methode zur Sensordatenfusion notwendig. Da ein Autofahrer bereits *Expertenwissen* über die Randbedingungen unterschiedlicher Fahrsituationen besitzt, ist eine nahe liegende Methode, dieses Wissen in Form eines mathematischen Netzes zu repräsentieren. Zur Situationsklassifikation wurden in der Literatur häufig neuronale Netze angewendet, die mit geeigneten Trainingsverfahren trotz ihrer unbekannt inneren Struktur die gewünschten Ausgangsdaten liefern [106,107]. Das Expertenwissen eines Autofahrers kann allerdings auch direkt in einem Bayes-Netz repräsentiert werden, dessen innere Struktur bekannt ist [16,26,74].

a) Theoretische Grundlagen

Die wahrscheinlichkeitsbasierten Situations- und Manöveraussagen werden in dieser Arbeit mit probabilistischen Netzen nach Pearl [77, 88] gewonnen, die um eine unscharfe Fuzzy-Zuordnung erweitert werden⁴. Als Eingangsgrößen dienen bereits fusionierte, gefilterte und gegebenenfalls getrackte Informationen zur Eigenfahrzeugbewegung und Fahrumgebung. Aus diesen Daten werden über eine Merkmalsextraktion die situations- und manöverspezifischen Merkmale y_i gewonnen:

$$y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.3)$$

Im nächsten Schritt erfolgt die Zuordnung der Merkmale zu fest definierten Situations- und Manöverbegriffen mit einem bestimmten kontinuierlichen Grad der Zugehörigkeit. Hierfür kommen die aus der Fuzzy-Logik bekannten Zugehörigkeitsfunktionen zum Einsatz. Der Merkmalswert y_i wird auf einen Zugehörigkeitsgrad μ_{y_i} abgebildet:

$$\mu_{y_i} = \Pi(y_i) \quad (3.4)$$

Im übertragenen Sinn wird dabei dem Merkmalswert ein Evidenzmaß bezüglich einer zu erkennenden Situation zugeordnet. Aus den Merkmalszugehörigkeitsgraden werden mit Hilfe baumartig strukturierter Bayes'scher Netze (probabilistischer Netze) die Wahrscheinlichkeiten für eine Situation bzw. ein Manöver bestimmt. Die Merkmalszugehörigkeitsgrade fließen als virtuelle Evidenzen in das Netz ein:

$$\lambda(y_i) = \begin{pmatrix} \mu_{y_i} \\ 1 - \mu_{y_i} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

⁴ Der Begriff *probabilistisch* trifft nur bedingt zu, da es nicht Anspruch dieser Methode ist, dass sich die durch die Netze errechneten Wahrscheinlichkeitswerte mit den entsprechenden relativen Häufigkeiten im Fahrversuch decken. Des Weiteren wird auch die statistische Unabhängigkeit der nicht über Knoten verbundenen Signale nur angenommen, nicht aber nachgewiesen. Der Fuzzy-Charakter der Netze sollte deshalb an dieser Stelle betont werden.

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

In Bild 3.13 ist der Ausschnitt eines probabilistischen Netzes zur Erkennung von Fahr-situationen skizziert. Die Y-Knoten repräsentieren als Evidenzknoten die in das Netz einfließenden Merkmale. Diese Informationen werden von den Kindknoten an die Elternknoten über diagnostische λ -Botschaften verschickt.

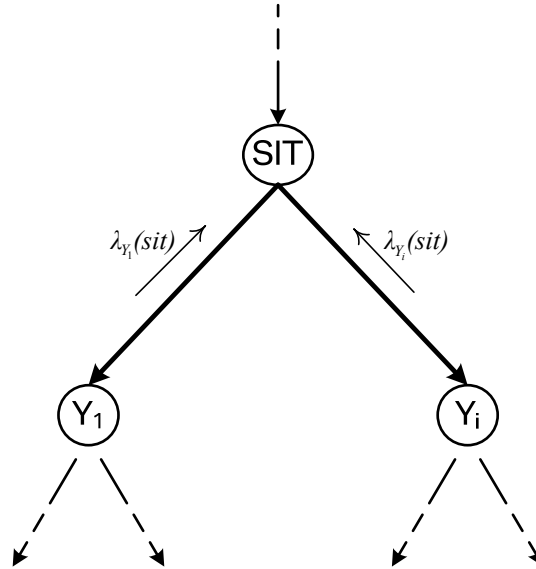


Abbildung 3.13: Ausschnitt eines probabilistischen Netzes

Die gesuchten Wahrscheinlichkeiten im Hypothesenknoten SIT ergeben sich aus den lokalen Botschaften im Netz:

$$BEL(sit) = \alpha \lambda(sit) \pi(sit) \quad (3.6)$$

Die Normierungskonstante α sorgt dafür, dass sich die Wahrscheinlichkeiten der Knotenzustände stets auf 1 summieren. π repräsentiert die kausalen Botschaften von den Elternknoten zu den Kindknoten. Da in dieser Arbeit Informationen nur von den Kindknoten zu den Elternknoten verschickt werden, kann π durch eine a-priori Knotenwahrscheinlichkeit von 0,5 ersetzt werden. λ setzt sich aus den Informationen der Kindknoten zusammen und berechnet sich zu:

$$\lambda(sit) = \prod_j \lambda_{y_j}(sit) \quad (3.7)$$

Die Botschaften der Kindknoten an die Elternknoten bestimmen sich aus den Evidenzen der Kindknoten λ_{y_i} und den bedingten Übergangswahrscheinlichkeiten, die in Gleichung 3.8 als Matrix $M_{y_i|sit}$ dargestellt werden:

$$\lambda_{y_i}(sit) = M_{y_i|sit} \bullet \lambda_{y_j}(sit) \quad (3.8)$$

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

Der Signalfluss im Bayes'schen Netz lässt sich gemäß Abbildung 3.14 zusammenfassen: Die rohen Signale x_i , wie sie auf dem Fahrzeugbus gesendet werden, erfahren durch Filterung und Extraktion zunächst eine Aufbereitung hin zu Merkmalen y_i . Die Merkmale werden daraufhin mithilfe von Merkmalszugehörigkeitsfunktionen $\Pi(y_i)$ in Zugehörigkeitsgrade μ_{y_i} überführt. Diese legen die virtuellen Evidenzen $\lambda(y_i)$ fest, die im Anschluss durch Multiplikation mit den die bedingten Übergangswahrscheinlichkeiten beinhaltenden Matrizen $M_{y_i|sit}$ in die nächsthöhere Ebene des Bayes-Netzes überführt werden.

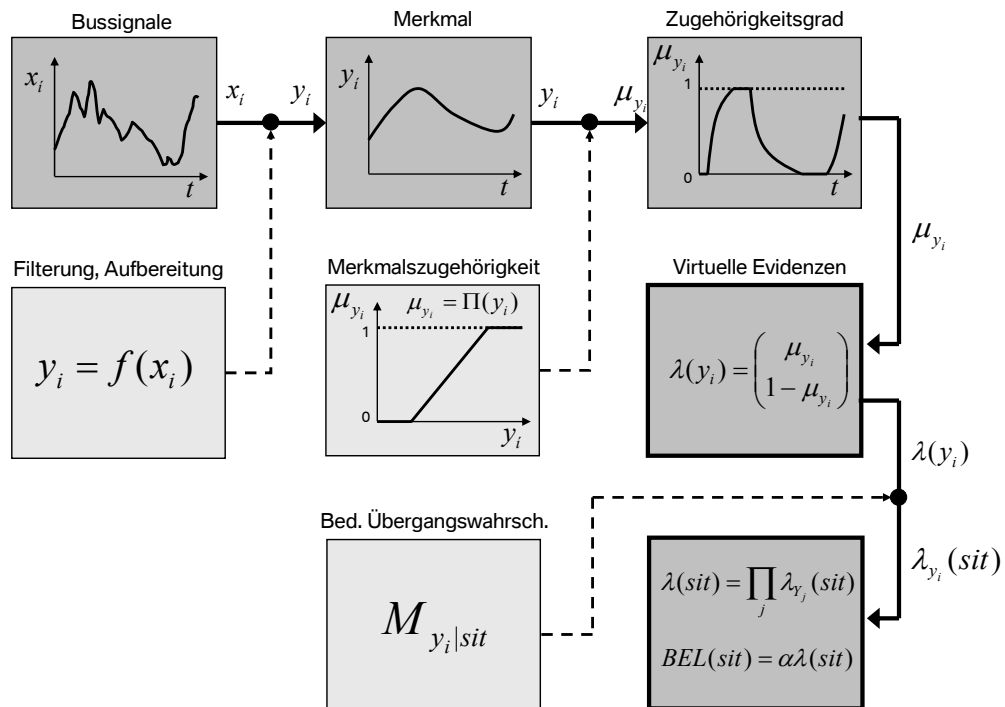


Abbildung 3.14: Signalfluss vom Bussignal zur Wahrscheinlichkeit im Hypothesenknoten

Für die Erkennung komplexer Situationen und Manöver wird das Netz kaskadiert aufgebaut. Situationen können in diesem Fall als Merkmale übergeordneter Situationen oder Manöver fungieren; es entsteht ein über mehrere Ebenen aufgespanntes Netzgefüge. Bild 3.15 zeigt ein aus zwei Teilnetzen kaskadiertes probabilistisches Netz zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines sportlichen Fahrstils sowie eines bevorstehenden Überholvorgangs. Die als Eingang dienenden, ursprünglichen Bussignale sind mit dem Anhang *roh* gekennzeichnet und ihre Aufbereitung bis zum Netzeingang angedeutet. Netzeingänge, die aus mehreren Bussignalen bestehen, müssen zunächst fusioniert werden und fließen daraufhin in das Netz ein.

b) Fahrstilerkennung

Der aktuelle Fahrstil wird aus gleitenden Mittelwerten der Signale Fahrpedal und Fahrpedalgradient, Bremsdruck, Querbeschleunigung und Lenkwinkelgradient ermit-

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

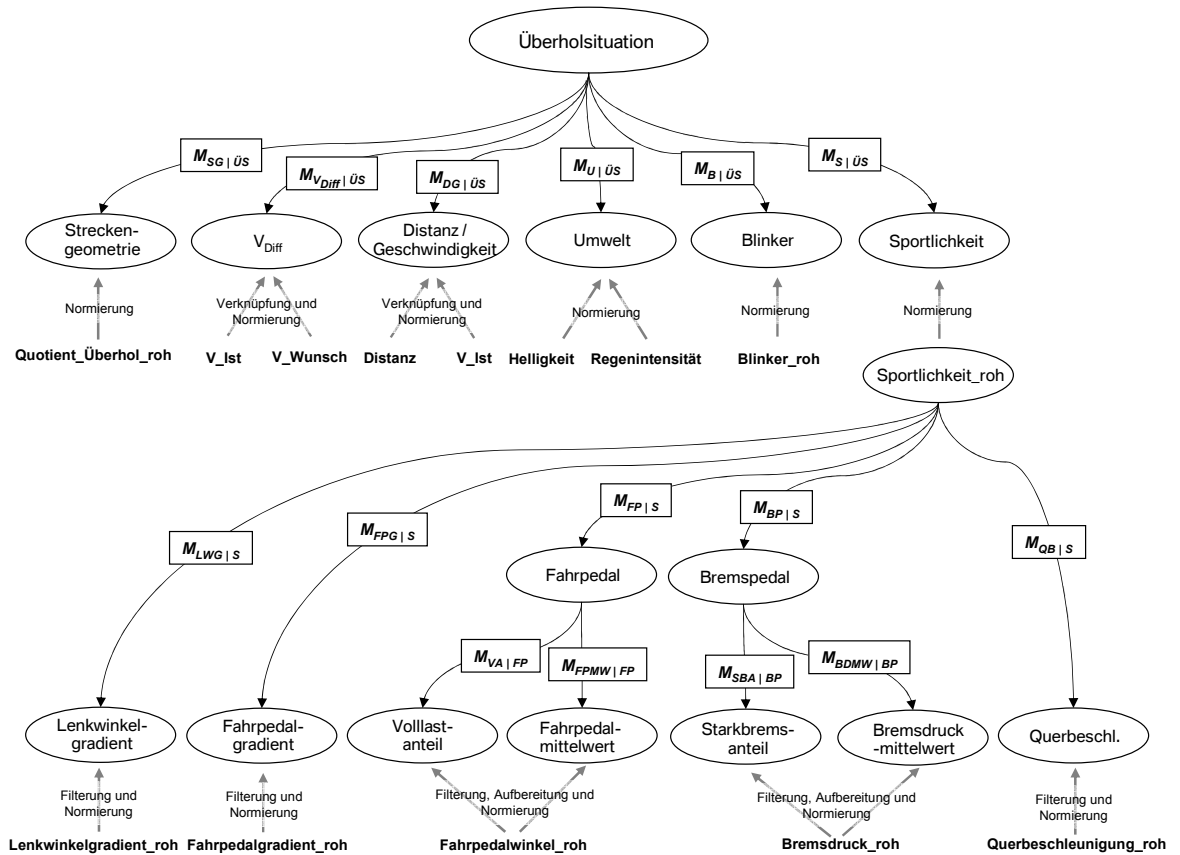


Abbildung 3.15: Kaskadierte Netzstruktur zur probabilistischen Erkennung von Fahrstil und Überholituationen

telt, wobei einige Signale vor dem Eingang in das Netz eine unterschiedliche Aufbereitung erfahren. In der Literatur werden immer wieder auch andere zur Charakterisierung des Fahrstils geeignete Signale genannt, im Falle eines Fahrzeugs mit Automatikgetriebe repräsentiert jedoch schon allein das Signal Fahrpedal Informationen zur Beschleunigung sowie der Motordrehzahl, da diese sich grob proportional verhalten [4,29,36,37,58]. Drei Eigenschaften des Netzes zur Ermittlung des kontinuierlichen Fahrstilwerts sind entscheidend:

- Die Eingangsdaten werden gefiltert. Bussignale fließen in die Berechnung des Fahrstils nur ein, wenn sie jeweils eine bestimmte Voraussetzung erfüllen: So wird etwa der gleitende Mittelwert des Fahrpedals nur aus Werten berechnet, die während Beschleunigungen auftreten.
- Geht ein als sportlich identifizierter Fahrer in Folgefahrt, werden die Parameter des Netzes so modifiziert, dass für einen gewissen Zeitraum der Fahrstil weiterhin als dynamisch angenommen wird, auch wenn der Fahrer aufgrund des Verfolgens eines anderen Fahrzeugs in seinen Handlungen eingeschränkt ist.
- Die Eingangssignale des Netzes werden zeitabhängig gewichtet. Signale altern gemäß einer Gewichtsfunktion in Abhängigkeit ihres Alters. Dies stellt sicher,

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

dass aktuell erfolgte Handlungen des Fahrers stärkeren Einfluss auf den ermittelten Fahrstilwert haben, als ältere.

Abbildung 3.16 zeigt die Merkmalszugehörigkeits- und zeitliche Gewichtsfunktion für den gefilterten gleitenden Mittelwert des Fahrpedals: Bis zu einem mittleren Fahrpedalwinkel während Beschleunigungsvorgängen von 30 % spricht das Signal demnach nicht für Sportlichkeit. Ab einem mittleren Wert von 65 % spricht es in voller Ausprägung für sportlichen Fahrstil. Die Fahrpedalsignale verlieren ihre Relevanz ab einem Alter von 80 s linear.

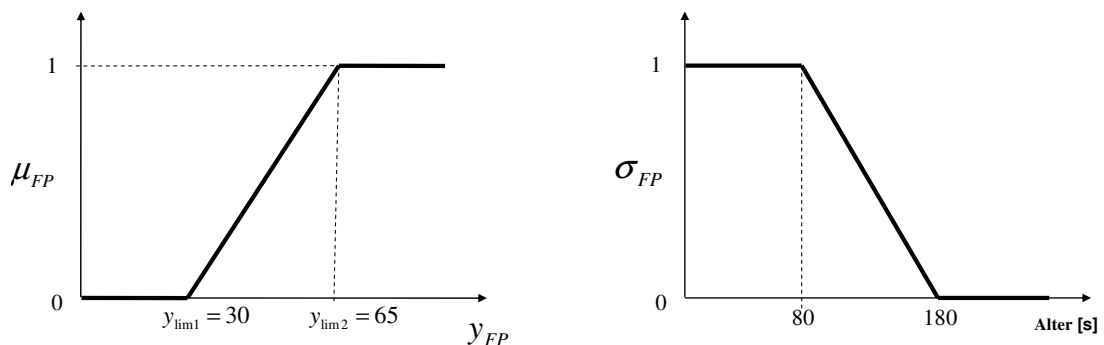


Abbildung 3.16: Merkmalszugehörigkeits- und Gewichtsfunktion für den gefilterten, gleitenden Mittelwert des Fahrpedalsignals während Beschleunigungsphasen

Um der Tatsache gerecht zu werden, dass einige Signale zwar *für* aber nicht *gegen* Sportlichkeit sprechen können, wird das erste Element der mit ihnen korrespondierenden λ_{y_i} -Vektoren auf einen Mindestwert von 0,5 beschränkt. So kann etwa eine niedrige mittlere Querbewegung nicht zwingend als Merkmal einer entspannten Fahrweise gewertet werden, wenn aufgrund der Streckengeometrie keine höheren Querbewegungen realisierbar sind. Eine hohe mittlere Querbewegung spricht hingegen in jedem Fall für eine dynamische Fahrweise.

c) Erkennung von Überholmanövern

Abbildung 3.17 zeigt das Prinzip der Überholmanöverprädiktion noch einmal in der Übersicht. Demnach soll ein Überholmanöver vereinfacht als wahrscheinlich gelten, wenn der Abstandsradar ein dicht vorausfahrendes Fahrzeug erkennt, die Streckengeometrie ausreichend gerade Anteile aufweist sowie ein Geschwindigkeitslimit erkannt wurde, das deutlich über der gefahrenen Geschwindigkeit liegt. Das Verfahren unterscheidet sich damit von bisher in der Literatur erwähnten [53, 62].

Die Netzstruktur zur Erkennung von Überholmanövern besteht aus sechs unabhängigen Eingangsgrößen (vgl. Abbildung 3.15). Zwei der Eingänge werden aus mehreren Signalen aufbereitet: v_{Diff} ist die Differenz aus Ist-Geschwindigkeit und Wunschgeschwindigkeit des Fahrers, wobei die Wunschgeschwindigkeit eine abgeschätzte Funk-

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

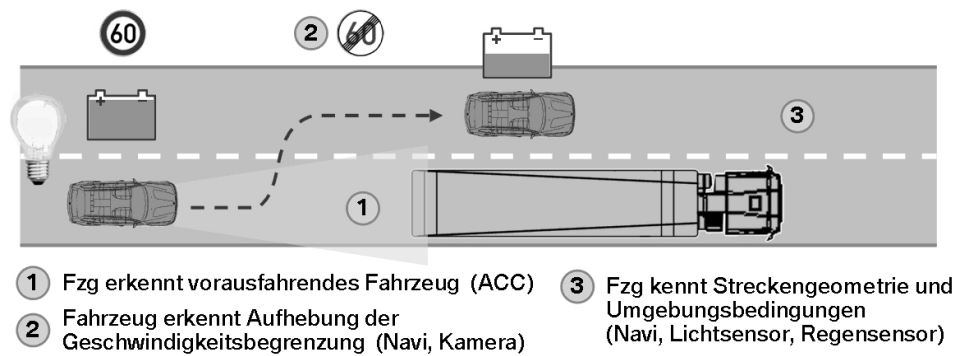


Abbildung 3.17: Prinzip der Erkennung von bevorstehenden Überholsituationen [105]

tion vom gesetzlichen Limit v_{Limit} (aus Kamera- und Navigationsdaten) sowie der Sportlichkeit S des Fahrers ist (aus Netz zur Fahrstilerkennung):

$$y_{v_{\text{Diff}}} = v_{\text{Diff}} = v_{\text{Wunsch}} - v_{\text{Ist}} = v_{\text{Limit}} + S \cdot 25 \text{ [km/h]} - v_{\text{Ist}} \quad (3.9)$$

Der entsprechende Zugehörigkeitsgrad $\mu_{v_{\text{Diff}}}$ erreicht bei einer Differenzgeschwindigkeit von 30 km/h sein Maximum von 1.

Die Variable zur Repräsentation der Umgebungsbedingungen ergibt sich aus den Signalen des Licht- und Regensensors y_{Nacht} bzw. y_{Regen} , die gemeinsam über eine zweidimensionale Zugehörigkeitsfunktion Π_{Umwelt} zu einem Vektor λ_{Umwelt} fusioniert werden:

$$\Pi_{\text{Umwelt}} = f(y_{\text{Nacht}}, y_{\text{Regen}}) \quad (3.10)$$

$$\mu_{\text{Umwelt}} = 1,2 - 0,7 \cdot y_{\text{Regen}}^2 - 0,3 \cdot y_{\text{Nacht}}^2 - y_{\text{Regen}}^{0,3} \cdot y_{\text{Nacht}}^2 \quad (3.11)$$

Abbildung 3.18 zeigt die graphische Darstellung von Funktion Π_{Umwelt} . Die Überholwahrscheinlichkeit wird durch die Witterungsbedingungen nur dann signifikant eingeschränkt, wenn starker Regen und Dunkelheit gleichzeitig auftreten. Regen oder Dunkelheit allein beeinträchtigen die Überholmöglichkeit nur geringfügig bzw. gar nicht.

Der Netzeingang zur Berücksichtigung der Streckengeometrie ist der Quotient aus n aufsummierten Streckenabschnitten $L_{i,\text{Ueberhol}}$, in denen Überholen möglich ist, und der gesamten Strecke in einem MPP mit m Segmenten:

$$y_{\text{Strecke}} = \frac{\sum_{i=1}^n L_{i,\text{Ueberhol}}}{\sum_{j=1}^m L_j} \quad (3.12)$$

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

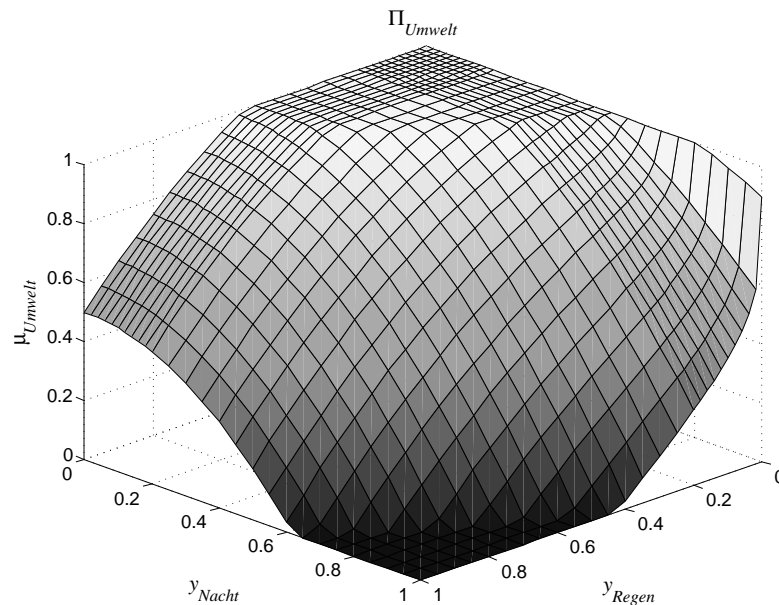


Abbildung 3.18: Modell des Einflusses von Helligkeit und Niederschlag auf die Überholwahrscheinlichkeit

Dieser Wert bewegt sich immer zwischen 0 und 1, erfährt aber dennoch eine anschließende Normierung hin zu einer Merkmalszugehörigkeit $\mu_{Strecke}$, da Werte um $y_{Strecke} = 0,6$ sich bereits als *voll überholtauglich* erwiesen haben.

Der normierte Abstand $\mu_{Distanz}$ zum Vorderfahrzeug erreicht sein Maximum bei 1, wenn gilt:

$$\left| \frac{v_{Ist} \text{ [km/h]}}{d \text{ [m]}} \right| \leq 5 \quad (3.13)$$

Das heißt, ab einem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug von weniger als einem Fünftel des Tachostandes wird dieser Abstand als voll förderlich für die Wahrscheinlichkeit eines bevorstehenden Überholvorgangs interpretiert. Eine weitere Annäherung an das Vorderfahrzeug hat keine Steigerung des Wertes $\mu_{Distanz}$ und damit der Überholwahrscheinlichkeit mehr zur Folge.

3.4.2 Fahrstilabhängige Ladezustandsregelung

Der fahrstilspezifischen Ladezustandsregelung liegt nach der Erfahrung die Prämisse zugrunde, dass ein sportlicher Fahrer im Mittel eine höhere Antriebsleistung abrufen und vor allem der Anteil der Vollastbetriebspunkte höher als bei anderen Fahrertypen ist. Um den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Zielkonflikt zwischen Fahrleistung und Effizienz zu mildern, hebt die adaptive Betriebsstrategie den Ladezustand im Mittel nur dann an, wenn das im vorigen Abschnitt beschriebene probabilistische Netz eine

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

sportliche Fahrweise detektiert. Dies hat zwar zeitweise Einbußen im Rekuperationspotenzial zur Folge, sorgt andererseits aber für eine höhere Boostverfügbarkeit und damit konstant hohe Fahrleistungen.

Die konventionelle Ladestrategie aus Bild 3.6 wird für die Dauer der dynamischen Fahrweise im gesamten Geschwindigkeitsbereich angepasst. Abbildung 3.19 zeigt das für den sportlichen Fahrer geltende Ladekennfeld. Zu sehen ist die Anhebung des Bereichs der Nullstromregelung im Vergleich zum Kennfeld aus Abbildung 3.6 und der zusätzliche Schalter im Funktionsmodul, der je nach Fahrstil zwischen dem konventionellen und dynamischen Ladekennfeld wählt.

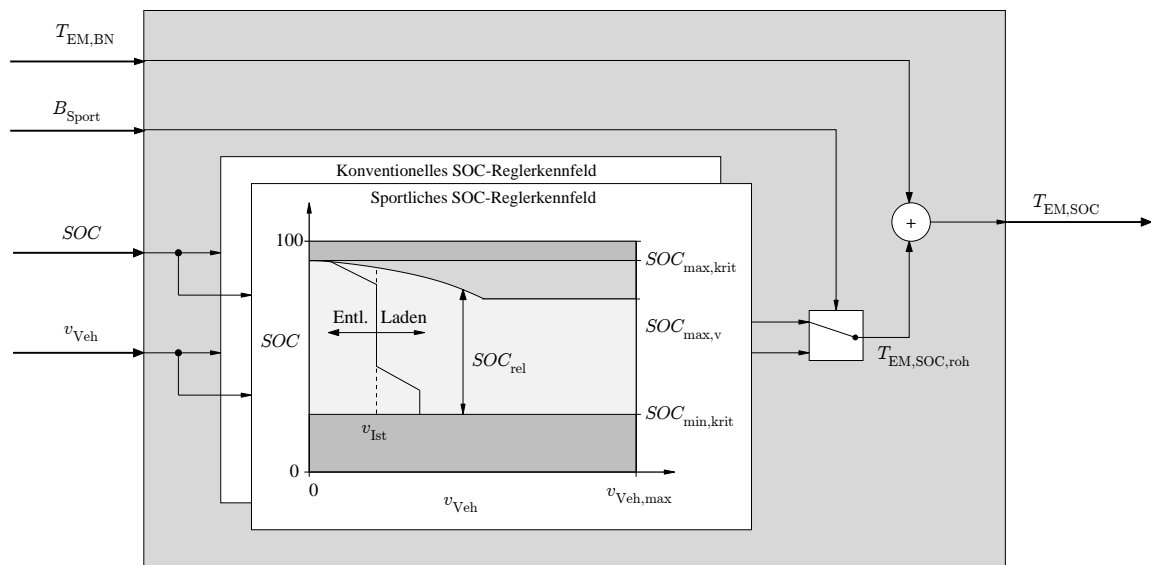


Abbildung 3.19: Erweitertes SOC-Reglermodul mit fahrstilabhängigen Ladekennlinien

3.4.3 Konditionierung des Fahrzeugs für Überholmanöver

Auch in Überholsituationen ist ein gewisser Mindestladezustand notwendig, um die Verfügbarkeit der Boost-Funktion während der Beschleunigungsphase sicherzustellen. Ein zu niedriger Ladezustand kann bei geringen Geschwindigkeiten durch vorherige Boost-Phasen, elektrischen Fahrbetrieb oder die Selbstentladung während vorausgegangenen längeren Standphasen hervorgerufen werden. Bei hohen Geschwindigkeiten ist der Ladezustand ohnehin aufgrund der geschwindigkeitsabhängigen Ladekennlinie niedrig. Diese Eigenschaften bringen das Risiko von nicht optimalen Fahrleistungen während sicherheitskritischen Überholsituationen mit sich. Das vorgestellte probabilistische Netz zur Überholsituationsprädiktion kann zu verlässlicheren Fahrleistungen beitragen, indem in Abhängigkeit des bevorstehenden Überholvorgangs ein Mindestladezustand zur Verfügung gestellt wird. Die für den elektrischen Boost benötigte Energie hängt auf der Ebene vor allem von der Startgeschwindigkeit des

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

Beschleunigungsvorgangs v_{Start} und der gewünschten Zielgeschwindigkeit bzw. vom Geschwindigkeitsdelta v_{Delta} ab. Qualitativ gilt: Je höher das zu erbringende Geschwindigkeitsdelta und die Startgeschwindigkeit des Überholvorgangs, umso größer die benötigte Energiemenge. Ergebnisse aus Simulationsläufen zeigen in Abbildung 3.20 beispielhaft die Abhängigkeit der benötigten Energiemenge von den zwei erwähnten Größen v_{Start} und v_{Delta} für ein fiktives Full-Hybridfahrzeug. Die Ergebnisse sind bewusst bereits in dieses Kapitel vorgezogen, um die Funktionsweise der Überholfunktion beschreiben zu können. Der Wert v_{Delta} wird anhand der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit sowie des Geschwindigkeitslimits geschätzt. Allerdings wird bei einem Überholvorgang eine deutliche Überschreitung des gesetzlichen Limits angenommen, da ein zügiges Passieren des zu überholenden Fahrzeugs aus Sicherheitsgründen meist Priorität gegenüber der Einhaltung des Geschwindigkeitslimits hat.

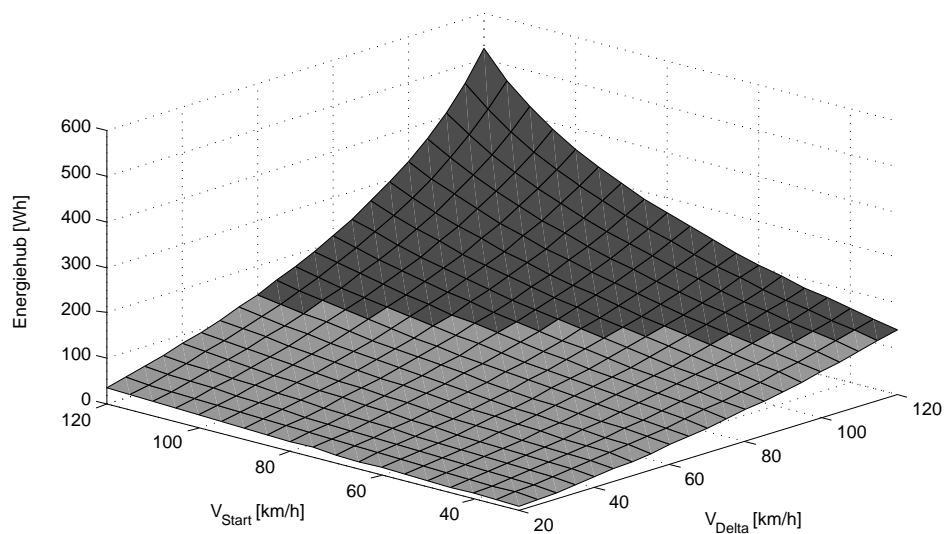


Abbildung 3.20: Benötigte elektrische Energie für unterschiedliche Boost-Vorgänge

Die adaptive Ladestrategie sorgt für ein Vorhalten der Energiemenge aus Abbildung 3.20, sobald die Überholwahrscheinlichkeit einen gewissen Schwellwert überschreitet. Hierfür wird die vom SOC-Regler-Modul geforderte Batterieleistung mit einem eigenen Wert überschrieben, wenn der Ladezustand unterhalb der für den Überholvorgang notwendigen Energiegrenze liegt. Fällt die Überholwahrscheinlichkeit wieder unter den Schwellwert, übernimmt der SOC-Regler erneut die Kontrolle über die Batterieleistung. Es kommt zu einer situationsadaptiven Regelung des Ladezustands.

3.4.4 Priorisierung der Antriebsleistung in übrigen Situationen

Sonstige Fahrsituationen, in denen hohe Fahrleistungen gewünscht sind (Autobahnauffahrten, Ortsausfahrten oder Bergauffahrten) können ausschließlich durch Nutzung der segmentbezogenen Informationen entlang des MPP erkannt und vorhergesehen werden. Voraussetzung ist lediglich eine hinreichend hohe Wahrscheinlichkeit für das

Befahren der prädierten Strecke, von der ausgegangen werden kann, wenn die Anzahl der Verzweigungen der Strecke bis zum Eintreten der Situation gering ist. Da nur das Navigationssystem als Sensor benötigt wird, ist kein probabilistisches Netz zur Sensordatenfusion notwendig. Die Anpassung der konventionellen Ladestrategie geschieht analog zur Überholfunktion: Das Kennfeld aus Abbildung 3.20 dient in seiner jeweils fahrzeugspezifischen Ausprägung auch hier als Grundlage für die Ermittlung der benötigten Energiemenge. Die Werte v_{Start} und v_{Delta} werden auch hier anhand der geltenden Geschwindigkeitslimits entlang des MPP ermittelt, es wird jedoch anders als beim Überholvorgang ein niedrigeres Überschreiten dieser Limits angenommen.

3.5 Effizienzsteigernde Funktionen

Neben der Steigerung von Fahrerlebniswert und Fahrleistungen dient die Erweiterung von konventionellen Betriebsstrategien um adaptive Anteile vor allem der Senkung des Kraftstoffverbrauchs. Um dies zu erreichen, muss immer dann von der Basisstrategie abgewichen werden, wenn diese für die aktuelle und kommende Fahrsituation unnötig hohe Energievorhalte für Fahrdynamik bereithält. Der Grundgedanke ist also der Einsatz von gespeicherter elektrischer Energie zur Entlastung des Verbrennungsmotors, wenn es das Wissen über das Fahrzeugumfeld zulässt. Wie die folgenden Abschnitte zeigen werden, kann dies vor Bergabfahrten oder langsamer Fahrt sinnvoll sein. In gewissen Situationen kann es jedoch auch effizienter sein, die elektrische Fahrfunktion bewusst einzuschränken, um mit der zur Verfügung stehenden elektrischen Energie sparsamer hauszuhalten.

3.5.1 Modellbasierte energetische Streckenbewertung

Zur vorausschauenden Erkennung von Energiemangel oder -überschuss ist eine Methode zur energetischen Evaluierung der vorausliegenden Strecke notwendig. In dieser Arbeit wird anhand von Informationen über das kommende Höhenprofil sowie anhand eines grob geschätzten Geschwindigkeitsprofils auf die zu erwartenden Batterieleistungen geschlossen. Die Integration der errechneten Leistungen in einem Batteriemodell ergibt im nächsten Schritt die Ladezustandstrajektorie in der nahen Zukunft, mithilfe derer ein Mangel oder Überschuss von elektrischer Energie im Voraus erkannt werden kann.

Die Errechnung der Batterieleistungen geschieht dabei modellbasiert, online im Fahrzeug. Hierfür wird die resultierende segmentbezogene Fahrwiderstandskraft $F_{\text{wid},i}$ aus Gleichung 2.1 für jedes Streckensegment i entlang des MPP errechnet. Bei gegebenen und konstanten Fahrzeugparametern ist die Widerstandskraft in einem Segment von den Größen Geschwindigkeit v_i , Beschleunigung a_i und Steigung s_i abhängig:

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

$$F_{\text{wid},i} = f(v_i, a_i, s_i) \quad (3.14)$$

$P_{\text{wid},i}$ ist die der Antriebsleistung entgegengesetzte Leistung der Fahrwiderstände in Segment i :

$$P_{\text{wid},i} = P_{\text{dyn},i} + P_{\text{steig},i} + P_{\text{luft},i} + P_{\text{roll},i} = (F_{\text{dyn},i} + F_{\text{steig},i} + F_{\text{luft},i} + F_{\text{roll},i}) v_i \quad (3.15)$$

Dynamischer Widerstand

Der dynamische Fahrwiderstand F_{dyn} ist abhängig von der Beschleunigung \dot{v} , der Fahrzeugmasse m , den Massenträgheitsmomenten um die Vorderräder $\theta_{r,v}$ und im Falle eines Standardantriebs den auf die Räder reduzierten Massenträgheitsmomenten des Antriebsstrangs $\theta_{r,\text{res}}$.

$$F_{\text{dyn}} = \dot{v} \left(m + \frac{\theta_{r,v}}{r_v^2} + \frac{\theta_{r,\text{res}}}{r_h^2} \right) \quad (3.16)$$

$\theta_{r,\text{res}}$ ergibt sich aus den Trägheiten der Räder samt Wellen $\theta_{r,h}$ des Antriebsstranges θ_h sowie der Antriebsmaschinen $\theta_{m,\text{res}}$, wobei die jeweiligen Übersetzungen des (Hinterachs-)Getriebes i_g bzw. i_h einfließen müssen.

$$\theta_{r,\text{res}} = \theta_{r,h} + i_h^2 \theta_h + i_h^2 i_g^2 \theta_{m,\text{res}} \quad (3.17)$$

Vereinfachend können die rotatorischen Massenträgheitsmomente einer translatorischen Masse angenähert werden, die je nach Getriebeübersetzung und Verhältnis zwischen Motorisierung und Fahrzeugklasse 5 - 10 % ($c \approx 0,05 \dots 0,10$) von der Gesamtmasse beträgt. Somit gilt:

$$F_{\text{dyn}} \approx \dot{v} m (1 + c) \quad (3.18)$$

Steigungswiderstand

Der Steigungswiderstand F_{steig} ist das Produkt aus dem Sinus des Steigungswinkels α und der Gewichtskraft F_g .

$$F_{\text{steig}} = \underbrace{mg}_{F_g} \sin(\alpha) \quad (3.19)$$

Luftwiderstand

Der Luftwiderstand ist stark geschwindigkeitsabhängig und ergibt sich zu:

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

$$F_{\text{luft}} = \frac{1}{2} c_w(v_{\text{rel}}) A \rho v_{\text{rel}}^2 \quad (3.20)$$

Hier ist $c_w(v_{\text{rel}})$ der geometrie- und geschwindigkeitsabhängige Luftwiderstandsbeiwert, A die Projektionsfläche des Fahrzeugs in Fahrtrichtung, ρ die Luftdichte und v_{rel} die relative Geschwindigkeit⁵ in Richtung der Fahrzeuglängsachse. Der Luftwiderstand steigt quadratisch mit der relativen Geschwindigkeit, die Luftwiderstandsleistung daher sogar kubisch.

Rollwiderstand

Der Rollwiderstand F_{roll} berechnet sich aus dem Kosinus des Steigungswinkels α , der Gewichtskraft F_g und dem leicht geschwindigkeitsabhängigen Rollwiderstandsbeiwert:

$$F_{\text{roll}} = \underbrace{mg}_{F_g} \cos(\alpha) c_R(|v|) \quad (3.21)$$

Errechnung des Energieprofils

Sobald diese Fahrwiderstandskräfte einzeln und damit auch $F_{\text{wid},i}$ bekannt sind, kann in jedem Segment auf eine Batterieleistung geschlossen werden. Verzögert das Fahrzeug und ist $F_{\text{wid},i}$ negativ, so kann etwa die theoretisch und tatsächlich rekuperierbare elektrische Leistung $P_{\text{Rek,roh},i}$ bzw. $P_{\text{Bat,Rek},i}$ errechnet werden. Es gilt für $F_{\text{wid},i} \leq 0$ und konstante Geschwindigkeit:

$$P_{\text{Rek,roh},i} = -F_{\text{wid},i} v_i \eta_{\text{Antr,rel}} \eta_{\text{EM,gen},i} \eta_{\text{Bat},i} \quad (3.22)$$

mit $\eta_{\text{EM,gen},i} = f(n_{\text{EM},i}, M_{\text{EM},i})$ und $\eta_{\text{Bat},i} = f(P_{\text{Bat},i}, T_{\text{Bat},i}, \dots)$

$P_{\text{Bat,Rek},i}$ wird begrenzt durch die maximale Batterieladeleistung sowie durch die maximale, an der Hinterachse des Fahrzeugs mechanisch übertragbare Bremsleistung $P_{\text{h,max}}$. Außerdem wird in allen zukünftigen Segmenten davon ausgegangen, dass die aktuelle Bordnetzleistung P_{BN} weiter bestehen wird. Da für die betrachteten Fahrzeugkonzepte gilt $P_{\text{EM,max}} < P_{\text{Bat,max}}$, schränkt der Bordnetzverbrauch die Ladeleistung aus Rekuperation ein und muss daher von der theoretisch rekuperierbaren Leistung abgezogen werden.

$$P_{\text{Bat,Rek},i} = \min\{P_{\text{Bat,max}}, P_{\text{h,max},i} \eta_{\text{Antr,rel}} \eta_{\text{EM,gen},i} \eta_{\text{Bat},i}, P_{\text{Rek,roh},i}\} - |P_{\text{BN},i}| \quad (3.23)$$

⁵ korrigiert um die Windgeschwindigkeit: $v_{\text{rel}} = v_{\text{Veh}} - v_{\text{Wind}}$

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

Fahrstabilitätstests haben für die maximal mögliche Verzögerung, die ohne das Risiko eines ausbrechenden Hecks rein von der Hinterachse erbracht werden kann, einen Wert von ca. 0,04 g oder $0,3942 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ergeben. $P_{h,\max}$ ergibt sich also zu:

$$P_{h,\max,i} = 0,3942 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] m v_i \quad (3.24)$$

Mittels vereinfachter Modelle der Hybridbetriebsstrategie, also der Reglerarchitektur aus Abbildung 3.5, können auch Phasen des rein elektrischen Fahrbetriebs bis in den Fahrzeugstillstand mit den entsprechenden Batterieleistungen im Voraus abgeschätzt werden. Die Batterieleistung ist dann abhängig von der notwendigen Antriebsleistung des Fahrzeugs, der Bordnetzlast und den Wirkungsgraden von E-Maschine, Leistungselektronik und Batterie:

$$P_{\text{Bat,eFahr},i} = - \frac{F_{\text{wid},i} v_i}{\eta_{\text{EM},i} \eta_{\text{Bat},i}} - \frac{P_{\text{BN},i}}{\eta_{\text{Bat},i}} \quad (3.25)$$

Um Rechenleistung zu sparen und wegen der variierenden Fahrzeuggeschwindigkeit, sollte die Berechnung obiger Gleichungen ereignis- bzw. weggesteuert aufgerufen werden. Andernfalls würde im Fahrzeugstillstand unnötigerweise immer wieder die gleiche Berechnung durchgeführt. Bei der für diese Arbeit gewählten Methode evaluieren die Modelle regelmäßig nach dem Zurücklegen einer definierten Strecke den vorausliegenden Streckenverlauf hinsichtlich des Ladezustandsverlaufs.

Liegt im Prädiktionshorizont keiner der Zustände *Rekuperation* oder *elektrisches Fahren* vor, so lässt sich die Batterieleistung in der nahen Zukunft gemäß dem Ladekennfeld aus Abbildungen 3.6 und 3.7 abschätzen.

Die Güte der modellbasierten Ladezustandsabschätzung hängt vor allem von der Güte der Eingangsinformationen ab, also von der Genauigkeit des Geschwindigkeits- und Höhenprofils. Da hierüber nur unscharfe Abschätzungen getroffen werden können, wurde nicht mit hohen Genauigkeiten gerechnet. Es geht in den folgenden Kapiteln aber gerade darum, zu untersuchen, ob auch mit dieser eingeschränkten Informationsgüte prädiktive Energiefunktionen realisierbar sind.

3.5.2 Höhenprofilabhängige Ladezustandsregelung

Abbildung 3.21 zeigt die Funktionsweise der modellbasierten Ermittlung von Ladezustandstrajektorien anhand eines vorausliegenden Gefälles. Zu sehen ist der aus der höhenprofilabhängigen Ladestrategie resultierende SOC-Verlauf. Schon weit vor Beginn eines Gefälles wird mithilfe der modellbasierten Ermittlung der Batterieleistungen in regelmäßigen Abständen eine Ladezustandstrajektorie ermittelt. Erreicht die virtuelle Trajektorie aufgrund der am Gefälle rekuperierbaren Energiemenge die Speicherobergrenze, so wird eine Aufforderung zum Entladen des elektrischen Energiespeichers

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

an das Modul SOC-Regler gesendet. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis der Energievorrat im Speicher zur Rückspeisung der Energie am Gefälle ausreicht oder eine zulässige Untergrenze für den SOC erreicht wird.

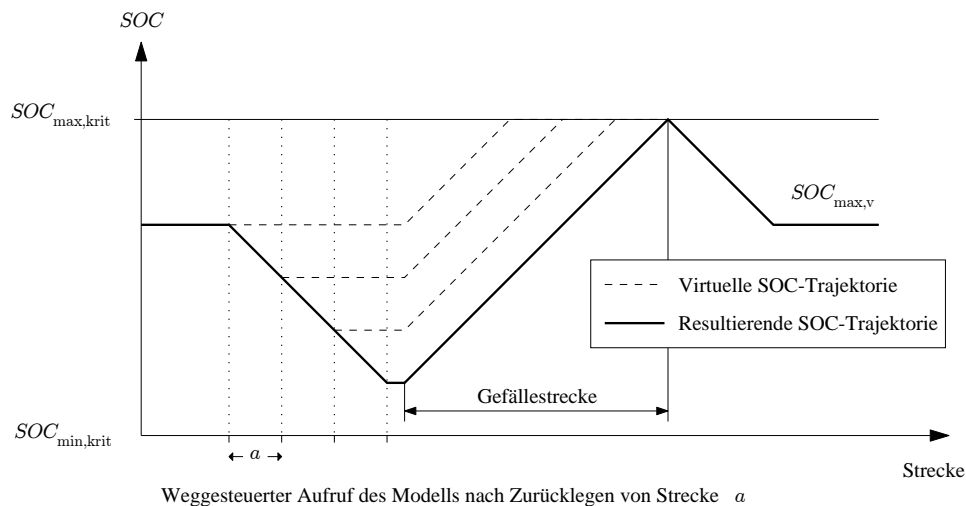


Abbildung 3.21: Qualitativer SOC-Verlauf mit Prädiktion vor Gefälle

Das Basis-Funktionsmodul zur Ladezustandsregelung aus Abbildung 3.6 muss zur Realisierung der prädiktiven Regelung nur geringfügig erweitert werden: Ein zusätzlicher Schalter sorgt für eine Ladung oder Entladung des Speichers in Abhängigkeit der vorausschauenden Informationen darüber, ob der Energiespeicher im Prädiktionshorizont eine Unter- bzw. Obergrenze erreicht.

3.5.3 Verkehrsflussabhängige Ladezustandsregelung

Wie bereits erwähnt, kann die modellbasierte Ladezustandsvorausschau auch zur Erkennung von elektrischen Fahranteilen verwendet werden. Unterschreitet die für die nahe Zukunft geschätzte Antriebsleistung des Fahrzeugs den für elektrisches Fahren zulässigen Wert, so wird angenommen, dass der elektrische Energiespeicher die Antriebsleistung liefern muss. Wie in Abbildung 3.22 dargestellt, erreicht dann gegebenenfalls der virtuelle SOC im Prädiktionshorizont seine zulässige Untergrenze und das SOC-Regler-Modul fordert eine prädiktive Anhebung des Ladezustands. Der hierdurch frühzeitig angehobene SOC ermöglicht ein Ausweiten des rein elektrischen Fahrbetriebs und steigert so die Effizienz des Fahrzeugs.

Eine frühzeitige Erkennung von niedrigen Antriebsleistungen kann aufgrund von Informationen des MPP oder eines Verkehrsinformationssystems erfolgen. Führt der MPP etwa in eine 30er Zone, so wird ein entsprechend niedriges Geschwindigkeitsprofil angenommen. Das Gleiche gilt für die Einfahrt in einen Stau, der von heutigen Telematikdiensten bereits im Voraus gemeldet wird.

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

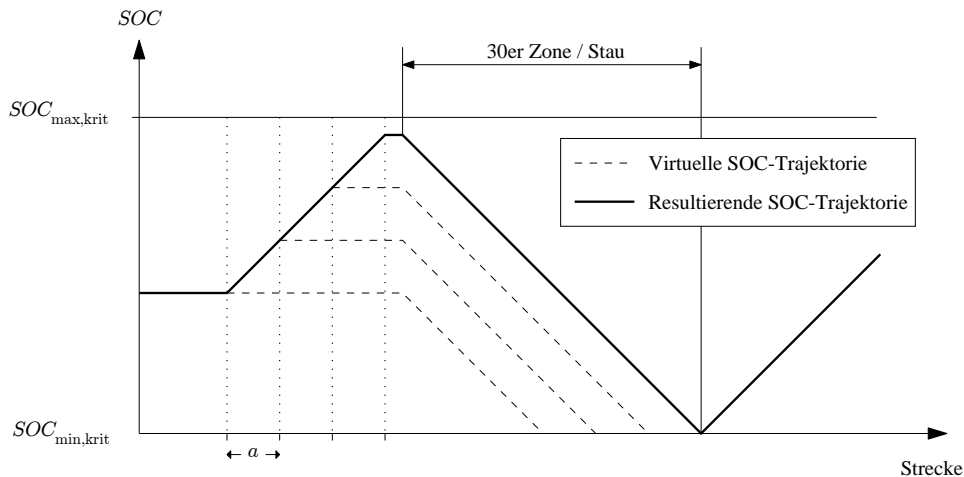


Abbildung 3.22: Qualitativer SOC-Verlauf mit Prädiktion vor Einfahrt in Bereich mit hohen E-Fahranteilen

3.5.4 Stauspezifische Betriebsstrategie

Die stauspezifische Anpassung der Betriebsstrategie nimmt eine Sonderstellung unter den effizienzsteigernden Funktionen ein. Sie beruht nicht auf dem Prinzip der Ausweitung des elektrischen Fahrbetriebsfensters, sondern auf dessen geschwindigkeits- und leistungsabhängiger Einschränkung. Das zugrundeliegende physikalische Prinzip ist die Tatsache, dass man durch das Abstellen des Verbrennungsmotors einen umso höheren Effizienzgewinn hat, je niedriger die aktuell geforderte Antriebsleistung ist.

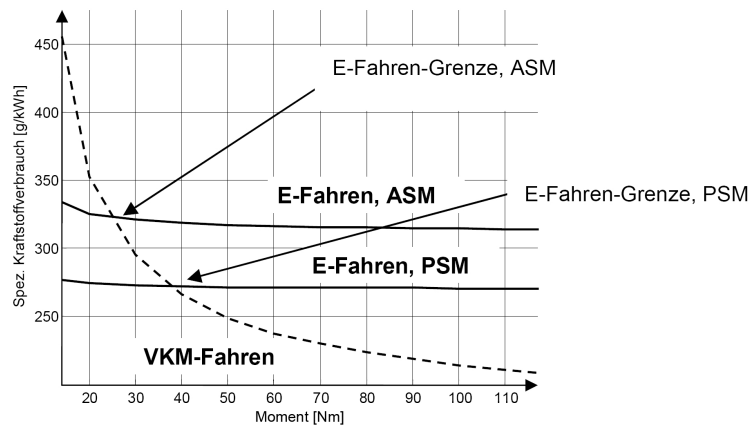


Abbildung 3.23: Spezifischer Kraftstoffverbrauch für verbrennungsmotorisches und elektrisches Fahren [14, 80]

Abbildung 3.23 zeigt den spezifischen Kraftstoffverbrauch des verbrennungsmotorischen und elektromotorischen Fahrens unter der Annahme, dass die Energie im elektrischen Speicher aus einer vorherigen Lastpunktanhebung des Verbrennungsmotors

stammt. Es ist zu sehen, dass das Delta im Verbrauch der beiden Betriebsmodi umso größer ist, je niedriger das geforderte Antriebsmoment liegt. Der Schnittpunkt der beiden Kurven ist die Grenze, ab der das verbrennungsmotorische Fahren effizienter ist als das elektrische.

Ist nun Wissen über die vorausliegende und aktuelle Fahrsituation vorhanden – etwa darüber, dass sich das Fahrzeug in einem Stau befindet –, kann mit der in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Methode abgeschätzt werden, ob der Energieinhalt des elektrischen Speichers für das Durchfahren der Fahrsituation unter Beibehaltung der konventionellen E-Fahrgrenzen ausreicht. Falls bei dieser Abschätzung festgestellt wird, dass das elektrische Fahren im Laufe des Staus aufgrund von Energiemangel eingeschränkt werden muss, so sollte diese Einschränkung schon prädiktiv vorgenommen werden. Dann stehen zulasten der elektrischen Fahranteile mit geringerem Verbrauchsvorteil *die* elektrischen Betriebspunkte mit der größten spezifischen Verbrauchseinsparung länger zur Verfügung. Abbildung 3.24 zeigt qualitativ die zugrundeliegende Einschränkung des elektrischen Fahrbereichs nach SOC und Geschwindigkeit.

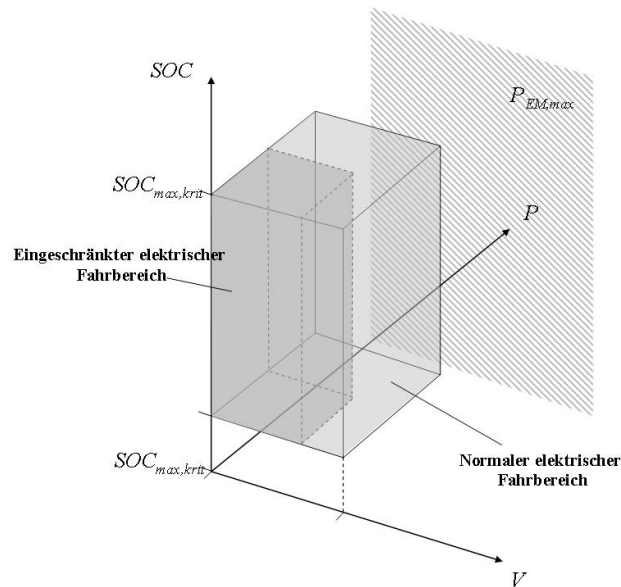


Abbildung 3.24: Einschränkung des elektrischen Fahrens bei starken Verkehrsstörungen

3.6 Modulare Vernetzung der Funktionen

Die funktionsorientierte Herangehensweise an das Thema adaptives Energiemanagement hat den oben beschriebenen Baukasten von Funktionen geliefert. Die Funktionen selbst können als autarke Systeme bzw. Module bezeichnet werden, die den Energiehaushalt des Fahrzeugs je nach Fahrsituation optimal anpassen, indem sie bedarfsgerecht von der Basisbetriebsstrategie abweichen. Neben der eigentlichen Energiefunktionsarchitektur muss jedoch noch die Vernetzung zu den Sensoren erfolgen, also zu

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

den Steuergeräten, mithilfe derer die Fahrsituationsklassifikation erst möglich wird.

a) Übergeordnetes Funktionsnetz

Sobald neben der Spezifikation der Einzelfunktionen auch die Funktionsvernetzung definiert ist, kann die Umsetzung des adaptiven Energiemanagementsystems erfolgen. Abbildung 3.25 zeigt den Funktionssatz in einer Übersicht und stellt den Zusammenhang zwischen verfügbarer Sensorik, möglichen Funktionen und angesteuerter Aktorik her. Es zeigt zum einen die Wichtigkeit des Navigationssystems für eine Vielzahl von Funktionen: So sind vier der sechs dargestellten Funktionen auf die Daten der digitalen Karte zwingend angewiesen. Zum anderen sind einige energetisch relevante Fahrsituationen auch mithilfe von Standardsensorik erkennbar oder bewertbar, etwa der Fahrstil.

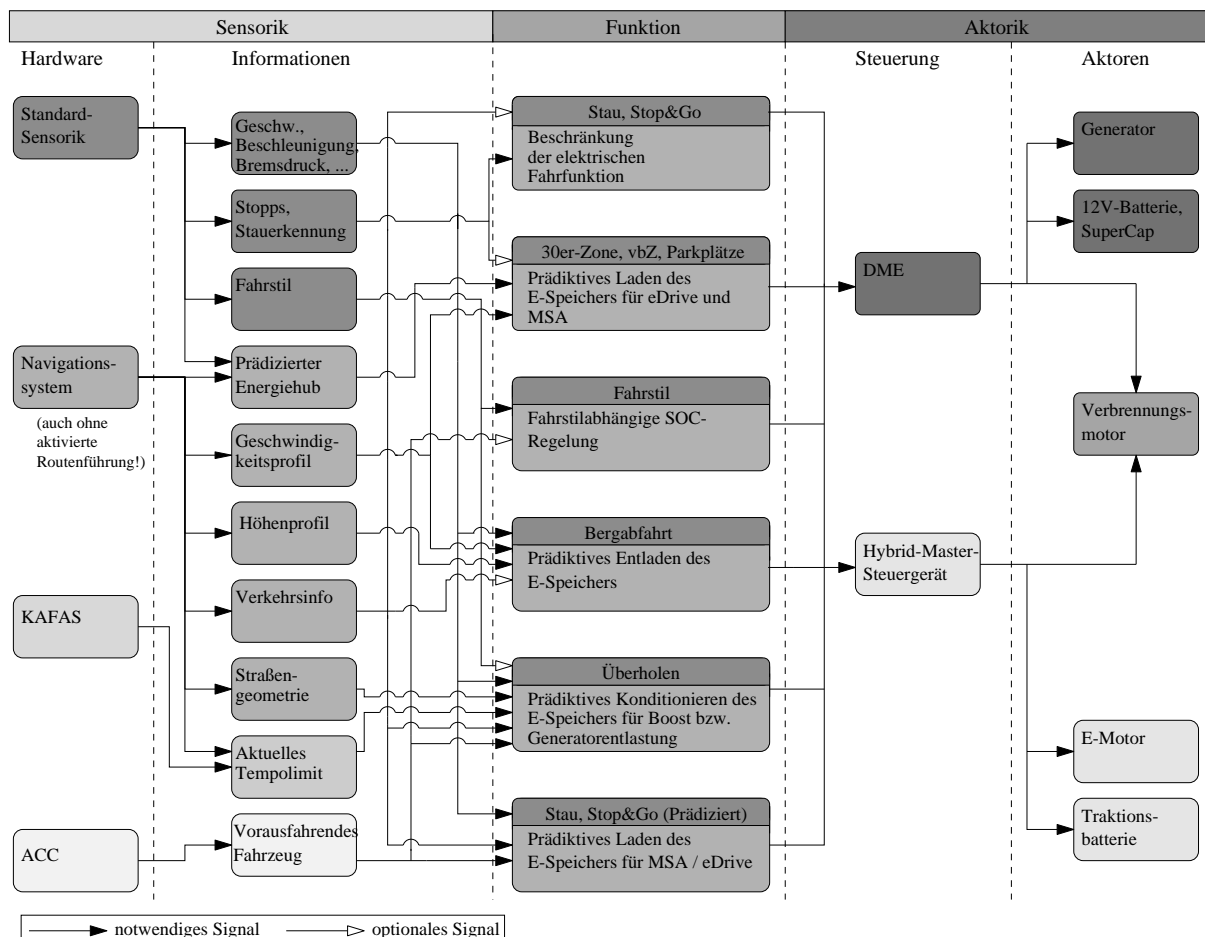


Abbildung 3.25: Adaptive Energiefunktionen, benötigte Sensorik und Aktorik

Die dem Überblick dienende Darstellung gibt noch keinen Aufschluss über den tatsächlichen Signalfluss oder die Partitionierung der einzelnen Berechnungsschritte in Funktionsmodule. Mit der Umsetzung der Architektur in einen lauffähigen Programmstand beschäftigt sich erst Kapitel 4.

b) Plug-and-Play-Fähigkeit

Anforderung 5a aus Tabelle 3.1, also die Forderung nach einem System, das sich automatisch an das im Fahrzeug zur Verfügung stehende Sensorangebot anpasst, kann mit der vorgestellten Funktionsarchitektur erfüllt werden. Abbildung 3.26 zeigt den zugrundeliegenden Gedanken: Sind Informationen gewisser Sensoren nicht verfügbar, darf nicht das gesamte adaptive Energiemanagementsystem ausfallen. Nur die zwingend auf die jeweiligen Sensordaten angewiesenen Funktionen müssen deaktiviert werden. Sind Informationen des Abstandsradars nicht zugänglich, kann etwa nicht mehr auf einen bevorstehenden Überholvorgang geschlossen werden; bei Ausfall von Kamera und Navigationssystem ist eine Vielzahl von Funktionen betroffen, es bleiben jedoch die Funktionen erhalten, die lediglich auf Standardsensorik angewiesen sind (hier: fahrstilabhängige Ladezustandsregelung und stauspezifische elektrische Fahrstrategie).

Für die Umsetzung der Plug-and-Play-Fähigkeit sind lediglich Softwaremodule notwendig, die die Eingangsgrößen der jeweiligen Energiefunktionen beobachten. Falls zwingend notwendige Signale nicht empfangen werden – weil ein Sensor nicht an Bord oder ausgefallen ist –, müssen diese Beobachtermodule die Signalwerte auf einen neutralen Wert setzen oder die gesamte Funktion deaktivieren: Wenn etwa kein Navigationssystem verbaut ist, werden die entsprechenden Signale wie Geschwindigkeits- oder Höhenprofil auf dem CAN-Bus nicht kommuniziert und deshalb von den Beobachtermodulen durch einen Wert ersetzt, der für das Energiemanagement keine Auswirkungen hat, beispielsweise auf eine konstante Geschwindigkeit von 100 km/h oder ein völlig ebenes Höhenprofil. Dies hat zur Folge, dass die an die Informationen der digitalen Karte gebundenen Funktionen nicht aktiviert werden; deren Berechnung kann aber fortgeführt werden. Ein und dasselbe Softwarepaket kann also in unterschiedlichsten Fahrzeugen eingesetzt werden; die Energiefunktionen werden automatisch in Abhängigkeit des Sensorangebots aktiv. Auf die Umsetzung der Plug-and-Play-Fähigkeit geht das folgende Kapitel ein.

3 Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement

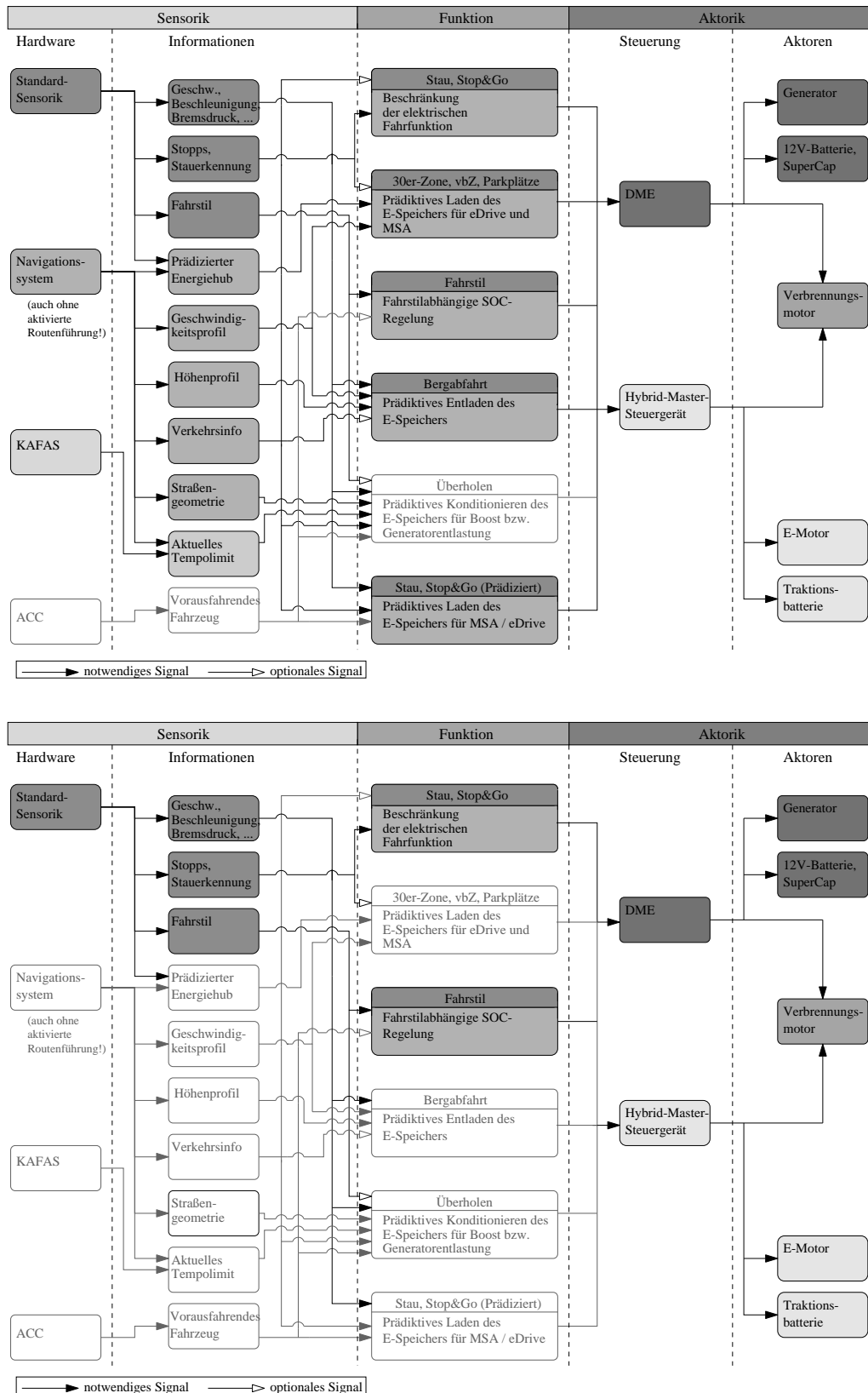


Abbildung 3.26: In Abhängigkeit des Sensorangebots verfügbare Funktionen

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

4.1 Modellbildung und Simulation

Simulation ist in der industriellen Entwicklung inzwischen zu einem wichtigen Bestandteil des Produktentstehungsprozesses geworden. Sie bietet den Vorteil, schon in einer frühen Entwicklungsphase Aussagen über Chancen und Risiken eines Produkts zu generieren [75]. Für den Fall einer energetischen Bewertung eines noch nicht in der Realität existierenden Fahrzeugs fällt der Modellzweck in die Kategorie *Prognose*. Das heißt, das Modell muss innerhalb einer zulässigen Toleranz so weit wie möglich in der Lage sein, das Verhalten eines realen Systems vorherzusagen. Gewünscht ist also für alle Modelle mindestens ein prädiktiv valides Verhalten [84].

4.1.1 Modellierung effizienzsteigernder Funktionen

a) Simulationsumgebung

Für die Modellierung der vorausschauenden Energiefunktionen zur Verbrauchssenkung wurde auf die Simulationssoftware *Dymola*¹ zurückgegriffen, die auf der multidisziplinären Modellierungssprache *Modelica*² basiert. Modelica-Modelle werden mathematisch durch Differenzialgleichungen sowie algebraische und diskrete Gleichungen beschrieben. Die Modellstruktur kann in den meisten Fällen objektorientiert auf einer grafischen Benutzeroberfläche festgelegt werden. Die frei verfügbare Bibliothek *Modelica Standard Library* beinhaltet viele gängige Komponenten aus unterschiedlichen naturwissenschaftlichen Disziplinen (z.B. rotatorische Trägheit, elektrischer Widerstand, Wärmespeicher, trigonometrische Funktionen, etc.). Zusätzlich können aus vorhandenen Komponenten oder durch Programmierung auf Quellcode-Ebene neue Blöcke modelliert werden, aus denen wiederum neue Bibliotheken erzeugt werden können. Für die Erzeugung von Fahrprofilen und zur Auswertung der Simulationsergebnisse wird die Software *Matlab* aus dem Hause *Math Works* genutzt.

¹ Kommerzielle Software der schwedischen Firma Dynasim www.dynasim.com

² Seit 1996 entwickelt von der Modelica Association www.modelica.org

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

b) Gesamtfahrzeugmodell

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden mit einem Dymola-Fahrzeugmodell durchgeführt, das in erster Linie der Simulation von Kraftstoffverbräuchen dient und diesbezüglich umfangreiche Validierungszyklen auf Rollenprüfständen erfahren hat. Mit den verwendeten Komponenten lassen sich über eine passende Bedatung unterschiedliche Hybridstufen darstellen.

Das Modell ist auf oberster Ebene aufgliedert in *iEM* (integriertes Energiemanagement), *DriveEnvironment*, *DriveLine* und *AuxiliaryUnit* (siehe Abbildung 4.1).

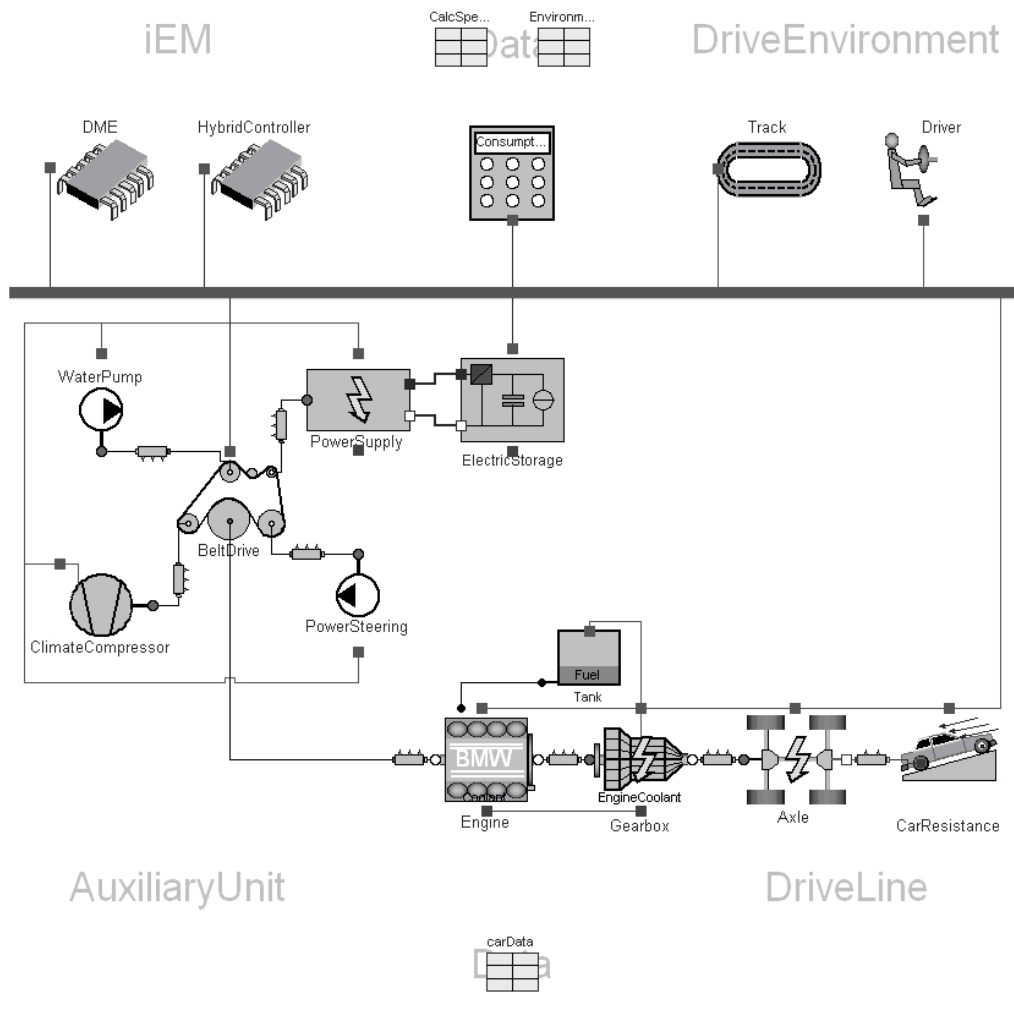


Abbildung 4.1: Oberste Ebene des Fahrzeugmodells

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

Diese Rubriken bestehen im Einzelnen aus:

iEM:

- DME: Die digitale Motorelektronik regelt abhängig von der Lastanforderung des Fahrers das Motormoment.
- HybridController: Dieser Controller enthält eine Logik zur Bestimmung des momentanen Hybridzustandes und regelt Leistungen und Momente der Hybridkomponenten.

DriveEnvironment:

- Track: Hier können unterschiedliche Fahrzyklen hinterlegt werden, so etwa Gesetzeszyklen wie der NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) oder der US-Zyklus FTP75 (Federal Test Procedure von 1975) mit ihren Geschwindigkeitsprofilen als Soll-Größe für die Fahrzeugbewegung. Genauso können eigene Zyklen mit Höhen- und Geschwindigkeitsprofilen erstellt werden.
- Driver: Das Fahrermodell besteht im Wesentlichen aus einem PID-Regler mit Anti-Windup Kompensation, der den Fehler zwischen Soll-Geschwindigkeit aus dem Fahrzyklus und der Ist-Geschwindigkeit ausregelt. Er verfügt über die Stellhebel Bremse und Gas.

DriveLine:

- CarResistance: Hier sind die unter 3.5.1 beschriebenen Fahrwiderstände modelliert. Sie wirken als translatorische Gegenkraft auf die bewegte Fahrzeugmasse.
- ElectricStorage: In diesem Block ist für den Fall eines Hybridfahrzeugmodells das Modell des Hochspannungsenergiespeichers untergebracht. Dies kann ein Batteriemodell, ein Doppelschichtkondensator oder eine duales Speichersystem sein.
- Axle: Das Achsenmodell enthält die Reifen mit dem zugehörigen Schlupfverhalten sowie die Bremsen. Der *Brakecontroller* sorgt für die Bremskraftverteilung auf die beiden Achsen.
- Gearbox: Das Getriebemodell enthält im Falle eines Hybridfahrzeugs auch die E-Maschinenmodelle. Hier können sowohl Handschalter als auch Automaten sowie verschiedene Hybridtopologien gewählt werden.
- Tank: Der Tank versorgt die Verbrennungskraftmaschine mit Kraftstoff, hat für das Gesamtmodell allerdings nur eine untergeordnete Bedeutung.
- Engine: Das Verbrennungsmotormodell beinhaltet den kennfeldbasierten Motor mit einem einfachen thermischen Modell sowie, falls vorhanden, den Starter.
- Data: Hier sind die Bedatungen für sämtliche Subsysteme des Modells hinterlegt. Sie legen neben der Modellstruktur das Verhalten des Fahrzeugs und seiner Komponenten sowie die Umwelteinflüsse fest.

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

AuxiliaryUnit:

- **BeltDrive:** Der Riemen verbindet mechanisch betriebene Nebenaggregate mit dem Verbrennungsmotor. Er entfällt jedoch bei den meisten Hybridstufen aufgrund der Elektrifizierung der Nebenaggregate.
- **ClimateCompressor:** Ein kennlinienbasiertes Modell des mechanischen Klimakompressors gibt die Verlustleistung des Aggregats bei deaktivierter Klimafunktion korrekt wieder.
- **WaterPump:** Es handelt sich um ein kennlinienbasiertes Modell der mechanischen Wasserpumpe.
- **PowerSteering:** Das Modell der mechanischen Lenkhilfepumpe hat ein temperaturabhängiges Verlustmoment als Ausgangsgröße.
- **PowerSupply:** Hier befindet sich das Modell der Niederspannungsbatterie zur Versorgung des elektrischen 12 V-Bordnetzes. Es ist über ein DC/DC-Wandler-Modell mit der Traktionsbatterie verbunden. Ist der SOC der 12 V-Batterie auf dem Sollwert, so wird das Bordnetz über den DC/DC Wandler aus der HV-Batterie bzw. der Elektromaschine gespeist.

Die hierarchische Gliederung des Modells macht eine Beherrschung des äußerst komplexen Systems *Gesamtfahrzeug* besonders einfach. Nahezu jedes Modell besteht aus einer Vielzahl weiterer Unterblöcke, die wiederum aus Subsystemen und mehreren Elementen bestehen. Ein großer Vorteil ist die konsequente Verwendung eines Bussystems zur Übertragung von Signalen. Hierdurch wird eine zu große Anzahl an Elementkopplungen vermieden. Durch *Send*-Blöcke können gezielt Signale auf den Bus gespeist und anschließend an beliebiger Stelle im Modell durch *Receive*-Blöcke abgefragt werden.

Da es sich nur bedingt um eine physikalische Nachbildung des Gesamtfahrzeugs handelt, und ein großer Teil der Subsysteme aus einer Mischform von Verhaltens- und Strukturmodellen besteht, können keine Prognosen über das Fahrzeugverhalten bei physikalischer Veränderung einzelner Komponenten getroffen werden. Allerdings bietet das bestehende Modell die Möglichkeit, die Parametrisierung unabhängig von der Modellstruktur vorzunehmen. Durch diese Trennung von Bedatung und Modell wird es möglich, mit ein und derselben Struktur verschiedenste Fahrzeugklassen und Motorisierungen zu simulieren. Das Gleiche gilt für die Modellierung von Unterkomponenten. So können ohne Veränderung der obersten Modellebene verschiedene Varianten von Energiefunktionen und Parametrisierungen simuliert werden, wobei immer die Kompatibilität der Schnittstellen Voraussetzung ist. Diese Variation der Subsysteme und Parameter lässt sich in Dymola automatisieren. Erst hierdurch war es zeitlich möglich, die Aussagen der folgenden Kapitel zu generieren.

c) Modellierung des statischen SOC-Reglers in Dymola

Die Simulation der vorausschauenden Ladezustandsregelung gemäß Kapitel 3 erfordert eine Neugestaltung des *StorageController*-Modells im Block *ElectricStorage*. Die vom SOC-Regler angeforderte Batterieleistung wird immer dann maßgebend, wenn keiner der Zustände *eDrive/MSA*, *Rekuperation* oder *Boost* vorliegt.

Die Hauptkomponenten des konventionellen SOC-Reglermodells (Abb. 4.2) sind *socScaling*, *loadLevelling* und *PowerController*, welche die Aufgaben der SOC-Normierung auf SOC_{rel} , der Ermittlung der daraus resultierenden Leistung und der Nullstromregelung im mittleren SOC-Bereich haben. Der Block *PowerController* wird durch *loadLevelling* aktiviert bzw. deaktiviert. Der Ausgang des SOC-Controllers bedient eine Leistungsanforderung an die E-Maschine. Der Block *thermalInfluence* dient der temperaturabhängigen SOC-Normierung: Bei kälteren Temperaturen nehmen $SOC_{min,krit}$ und $SOC_{max,krit}$ zur Verlängerung der Speicherlebensdauer größere Werte an.

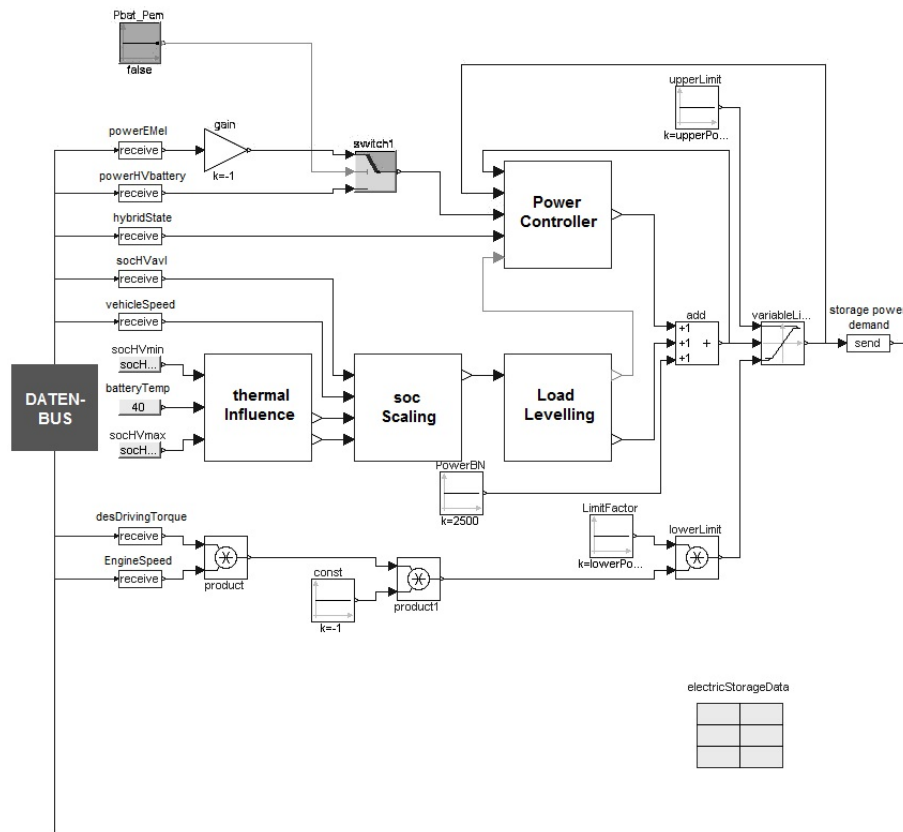


Abbildung 4.2: Statischer SOC-Regler

d) Modellierung des prädiktiven SOC-Reglers

Prinzip der rückwärtsrechnenden Simulation

Für die Realisierung einer modellbasierten Prädiktion des Energieprofils wird in dieser Arbeit die Methode der *rückwärtsrechnenden* Simulation angewendet, allerdings eingebettet in das *vorwärtsrechnende* Gesamtfahrzeugmodell. Rückwärts ist hier zu verstehen als Richtung der Berechnung von Momenten im Antriebsstrang. Ausgangspunkt ist eine fest vorgegebene Fahrzeugbewegung, aus der über Berechnung der Fahrwiderstände das notwendige korrespondierende Antriebsmoment rückwärts ermittelt wird. Es erfolgt dabei keine Rückkopplung der Fahrzeugbewegung über ein regelndes Fahrermodell (siehe Abbildung 4.3). Die Rückwärtssimulation dreht damit Ursache und Wirkung in der Fahrzeugdynamik um: Nicht ein Moment sorgt für eine Bewegung, sondern umgekehrt. Die Methode ist auf andere Energiedomänen wie die elektrische übertragbar. Ein Strom folgt hier dann nicht einer Spannung, sondern die Spannung wird aus der Stromstärke bzw. der Leistung errechnet.

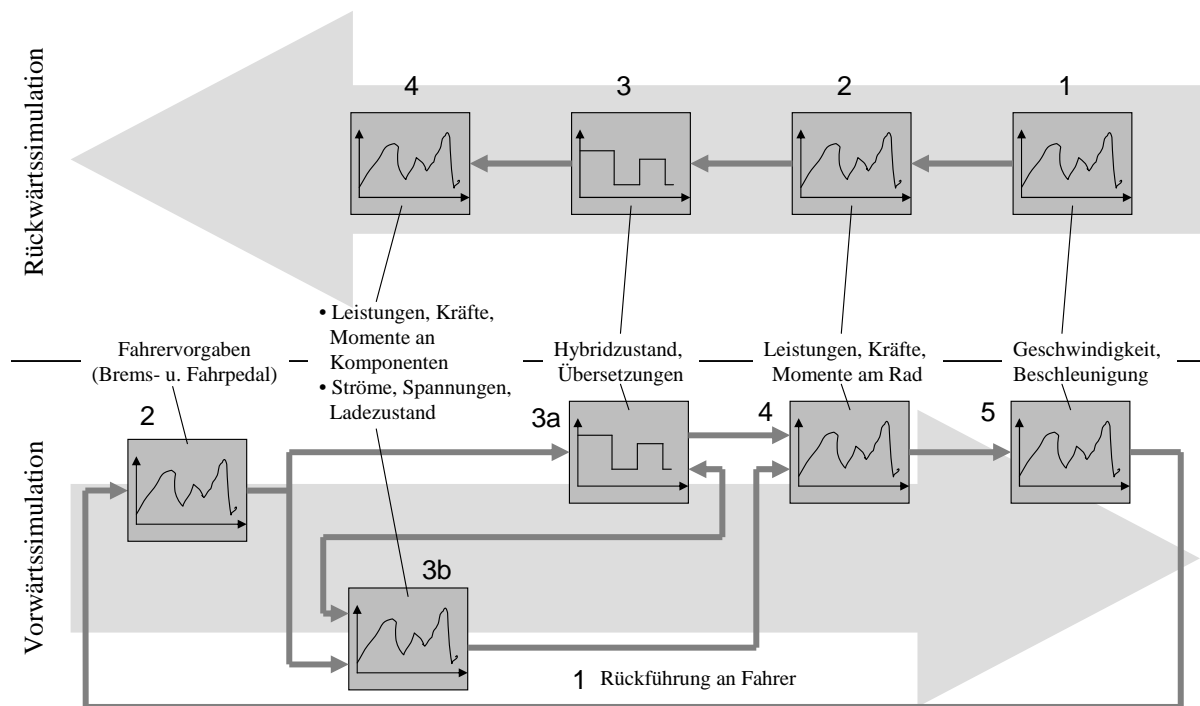


Abbildung 4.3: Rückwärts- und Vorwärtssimulation im Vergleich

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

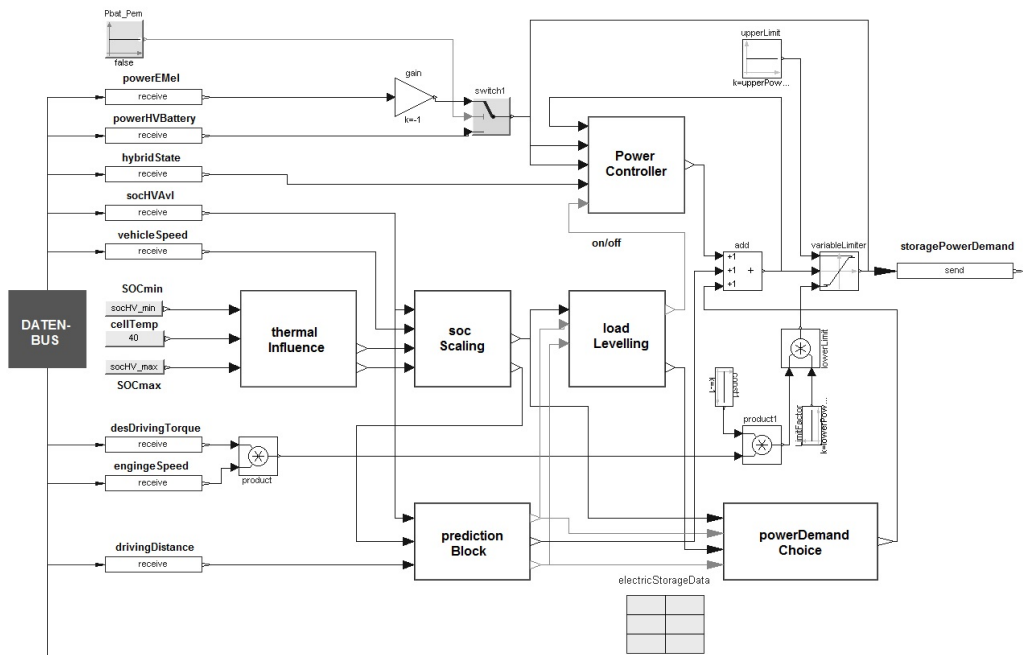


Abbildung 4.4: Prädiktiver SOC-Regler

Anders ist es bei der Vorwärtssimulation: Hier gibt ein definierter Fahrzyklus nur eine Soll-Geschwindigkeit vor, die über einen Regler (den Fahrer) und seine Stellgrößen erreicht werden muss. Es wird also zunächst eine Differenz zwischen Ist- und Soll-Geschwindigkeit ermittelt. Der Regler stellt daraufhin seine Stellglieder Gas bzw. Bremse so ein, dass ein gewisses Moment im Antriebsstrang anliegt. Dieses sorgt für eine Beschleunigung des Fahrzeugs und führt dadurch zu einer Geschwindigkeitsänderung. In der nächsten Iteration werden wiederum Soll- und Ist-Geschwindigkeit verglichen, und der Berechnungsvorgang startet erneut.

Hauptvorteil der Rückwärtssimulation ist aufgrund der geringeren Komplexität der geringere Rechenaufwand. Da dieser entscheidend für die Möglichkeit einer Implementierung in einem realen Fahrzeug ist, findet diese Methode im Folgenden Anwendung.

Umsetzung in Dymola

Die Modellierung der in Kapitel 3.5.1 vorgestellten Methode zur modellbasierten Ermittlung eines voraus liegenden Energieprofils erfordert zusätzliche Subsysteme im SOC-Regler-Modell. Abbildung 4.4 zeigt die hinzugekommenen Blöcke *predictionBlock* und *powerDemandChoice*. Im *predictionBlock* findet die Berechnung der in Abschnitt 3.5.1 erwähnten SOC-Trajektorien statt. Er besteht im Wesentlichen aus einem abstrahierten Fahrzeugmodell, in dem von Informationen über das voraus liegende Geschwindigkeits- und Höhenprofil ein Energieprofil über der Fahrstrecke ermittelt wird. Hierfür sind alle Fahrzeugdaten zur Ermittlung der Fahrwiderstände aus Abschnitt 3.5.1 hinterlegt.

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

Des Weiteren ist die ebenfalls unter 3.5.1 genannte vereinfachte Abbildung der Hybridbetriebsstrategie integriert, die in Abhängigkeit des Energie- und Leistungsprofils entscheidet, welcher Hybridzustand auf welchem Streckenabschnitt vorliegt und wie die Leistung zwischen Verbrennungs- und Elektromotor gesplittet wird. Hieraus kann auf eine zukünftige Veränderung im Ladezustand geschlossen werden.

Um die Rechenleistung für die Simulation des Modells in Grenzen zu halten und um dem ereignisgesteuerten Funktionsaufruf im realen Fahrzeug nahe zu sein, wird der *predictionBlock* jeweils erst nach Zurücklegen von 25 m Strecke aufgerufen. Dem liegt auch die Annahme zugrunde, dass sich die Streckeneigenschaften auf einer derartigen Streckenlänge nicht wesentlich ändern. Die Iterationen erfolgen immer mit dem aktuell gültigen Ist-SOC, der eine Eingangsgröße des Modell ist. Die Ausgangsgrößen des *predictionBlock* sind die logischen Größen zum Anzeigen eines innerhalb des Prädiktionshorizonts vollen oder leeren Energiespeichers. Sie dienen wiederum als Eingangsgrößen in den *powerDemandChoice*-Block, der entscheidet, welche Ladekennlinie aus Abbildung 4.5 die maßgebende ist. Wird innerhalb des Prädiktionshorizonts sowohl Energieüberschuss als auch -mangel vorhergesagt, wird der Energiespeicher prädiktiv geladen, da die vom Fahrer deutlich wahrnehmbare Verfügbarkeit der elektrischen Fahr- und Boostfunktion höher priorisiert wird als die nicht unmittelbar spürbare Verfügbarkeit der Rekuperationsfunktion.

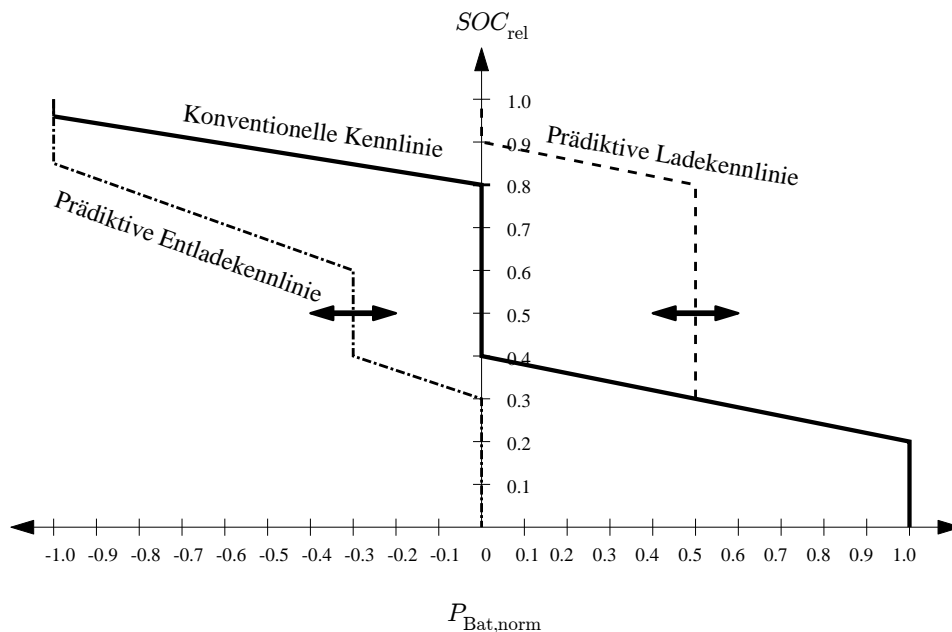


Abbildung 4.5: Qualitative Darstellung der konventionellen sowie der prädiktiven Lade- und Entladekennlinie

4.1.2 Modellierung fahrleistungssteigernder Funktionen

a) Simulationsumgebung und Fahrzeugmodell

Die Modellierung des fahrstil- und fahrsituationsabhängigen Energiemanagements zur Leistungssteigerung erfolgt in *Matlab/Simulink*. Dabei war eine der wesentlichen Anforderungen, die Rechenzeit des Modells gegenüber dem Dymola-Modell zu reduzieren. Die Nutzung einer separaten, schlankeren Simulationsumgebung hat den Vorteil einer deutlich höheren Rechengeschwindigkeit und Flexibilität. Auch ein weniger komplexes Modell erfüllt hier den Modellzweck, da es bei den Analysen lediglich um Aussagen zur Steigerung der Fahrleistung bzw. der Boostverfügbarkeit ging, nicht aber um Verbrauchsaussagen. Ein entsprechend schlankes Modell bietet auch den Vorteil, bei der Simulation eine Vielzahl von Parametern automatisiert variieren zu können, ohne die Gesamtrechenzeit zu stark ansteigen zu lassen. Abbildung 4.6 zeigt die Modellstruktur.

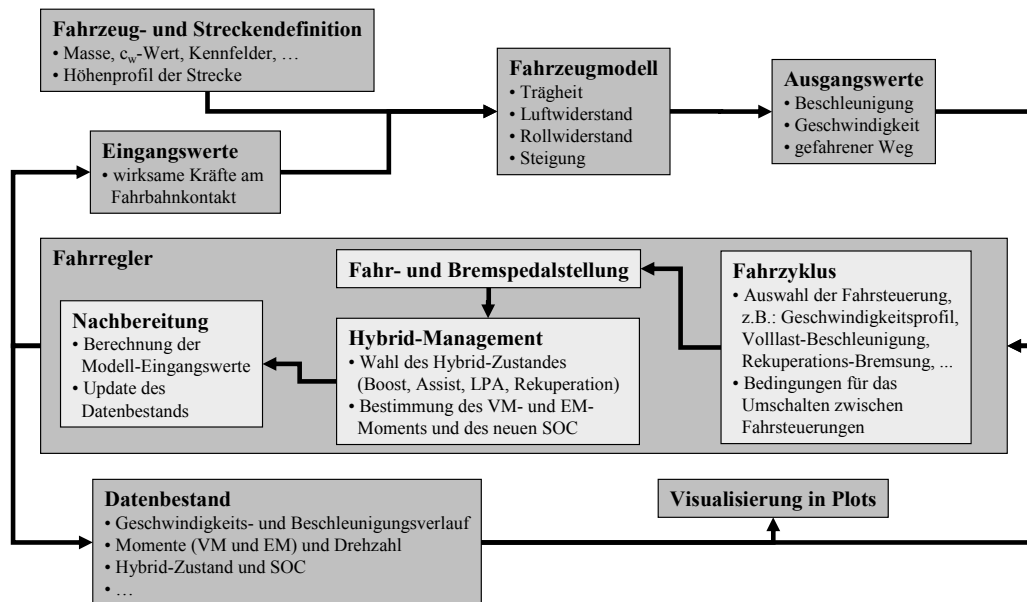


Abbildung 4.6: Struktur des Matlab Fahrzeugmodells zur Fahrleistungsbewertung

Statische sowie dynamische Fahrzeug- und Umweltparameter gehen als Eingangsparmeter in ein analytisches Fahrzeugmodell ein, das im Wesentlichen durch die Gleichungen aus Abschnitt 3.5.1 beschrieben wird und in oberster Ebene in Abbildung 4.7 dargestellt ist. Dessen Ausgangswerte sind Eingang in das Fahrreglermodell. Dieses textuell abgebildete Modell entscheidet je nach Fahrzyklus über die Antriebslast und beinhaltet zusätzlich die Logik zur Wahl des Hybridbetriebszustands. Außerdem verfügt es über die für den Simulationszweck weitestmöglich abstrahierten Modelle des elektrischen Energiespeichers sowie der Antriebsmaschinen, die ausschließlich aus Wirkungsgradkennlinien bestehen, im Falle des Speichers unterschieden nach

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

Lade- und Entladevorgang. Die Kennlinien des elektrochemischen Energiespeichers werden je nach gewählter Größe des Speichers mit einem Modell angenähert, das von einer Reihenschaltung einer idealen Spannungsquelle mit einem rein ohmschen Widerstand ausgeht. Letzterer repräsentiert gleichzeitig den Innenwiderstand des elektrischen Speichers sowie die Leitungswiderstände bis hin zur E-Maschine. Liegt extern eine Spannung oberhalb der Leerlaufspannung an, führt dies zum Laden, unterhalb zum Entladen. Für die Simulation wird der Zusammenhang zwischen externer elektrischer Leistung und Wirkungsgrad benötigt, für welchen im Modell folgende ohmsche Näherungsformel gilt:

$$\eta_{\text{lad}} = \frac{U_{\text{Bat,int}}(\sqrt{U_{\text{Bat,int}}^2 + 4R_{\text{Bat}}P_{\text{ext}}} - U_{\text{Bat,int}})}{2R_{\text{Bat}}P_{\text{ext}}} \quad (4.1)$$

$$\eta_{\text{entlad}} = \frac{2R_{\text{Bat}}P_{\text{ext}}}{U_{\text{Bat,int}}(U_{\text{Bat,int}} - \sqrt{U_{\text{Bat,int}}^2 - 4R_{\text{Bat}}P_{\text{ext}}})} \quad (4.2)$$

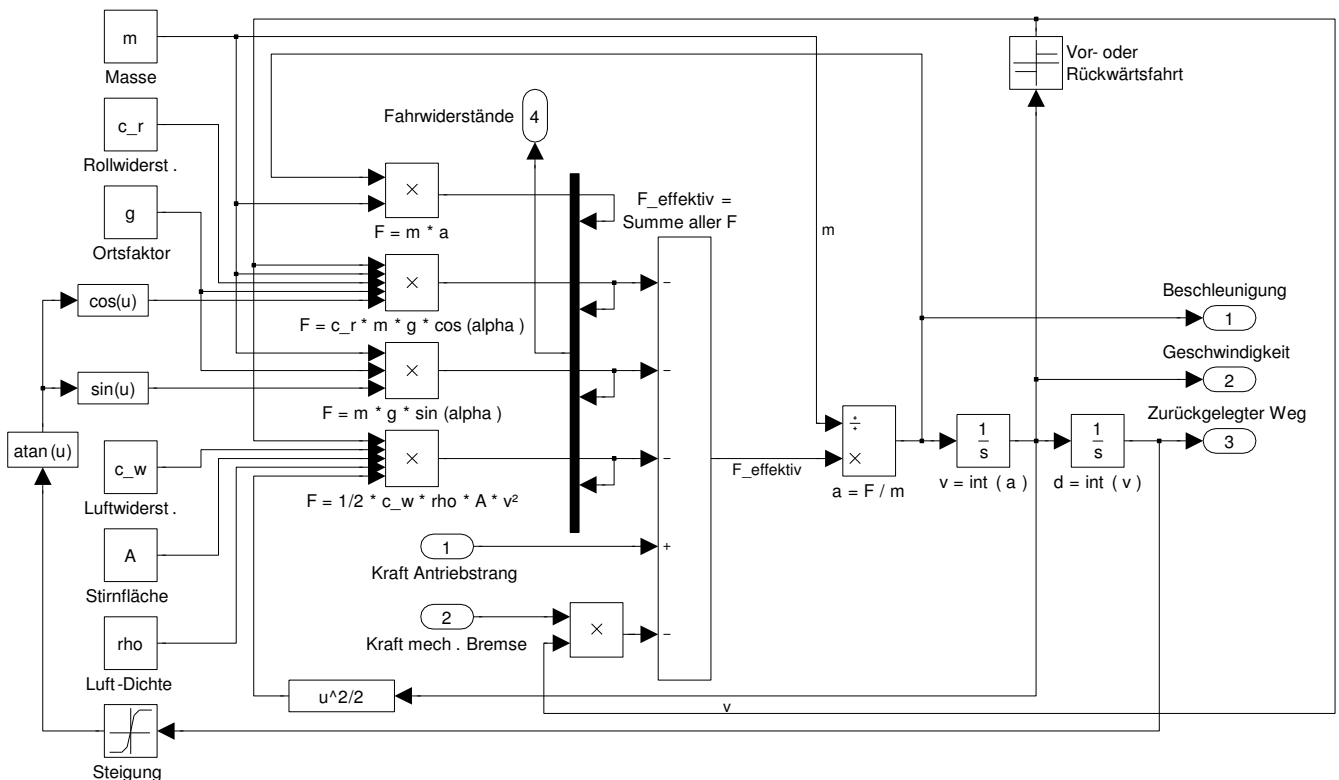


Abbildung 4.7: Simulink-Modell der Fahrzeugphysik

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

Die Gültigkeit dieses Modells wurde durch Vergleich mit dem deutlich komplexeren Modell innerhalb des unter Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Gesamtfahrzeugmodells nachgewiesen, das selbst wiederum umfangreichen Validierungszyklen mit realen Batteriesystemen unterzogen wurde. Für quasistationäre Betriebszustände liegt die Abweichung der Wirkungsgrade unter einem Prozent, so dass es für die Bestimmung des Ladezustands eines Energiespeichers bei dynamischer Fahrweise herangezogen werden kann. Die Ausgangsgrößen des Fahrreglermodells werden in einem Datenpool zwischengespeichert, der die Basis für das anschließende Post-Processing der Daten ist.

b) Modellierung von Überholsituationen

Das Modell ist mit unterschiedlichsten Fahrprofilen als Eingang kompatibel. Neben der Vorgabe einer Soll-Geschwindigkeit über der zurückgelegten Strecke, die mit einem PI-Regler erreicht wird, können auch komplexere Fahrsituationen nachgestellt werden. Die Zyklen können auch aus Phasen von vorgegebenen Beschleunigungen, Verzögerungen sowie bestimmten Motor- bzw. Bremsleistungen bestehen. Zur vereinfachten Abbildung von Überholmanövern wurde ein vorausfahrendes Fahrzeug definierter Länge mit konstanter Geschwindigkeit modelliert. Das Modell besteht lediglich aus einer Bewegungsgleichung zur Bestimmung des Orts sowie einer Längenangabe, um etwa auch Unterschiede zwischen dem Überholen eines LKW und eines PKW simulieren zu können.

Aktiviert man als Fahrzyklus eine Überholsituation, folgt der Fahrregler des überholenden Fahrzeugs der Logik, bis zum Zeitpunkt des erfolgreichen Überholens mit Volllast zu fahren. Ein Überholvorgang wird als abgeschlossen definiert, sobald sich das hintere Ende des überholenden Fahrzeugs mehr als ein Drittel des numerischen Geschwindigkeitswertes in Metern vor dem vorderen Ende des überholten Fahrzeug befindet. Ist die Volllastphase beendet, regelt der Fahrregler seine Wunschgeschwindigkeit mit seinem PI-Verhalten ein. Im Modell können Parameter wie Startgeschwindigkeit beider Fahrzeuge, anfänglicher Abstand zueinander sowie die Wunschgeschwindigkeit des Überholenden variiert werden. Um das Fahrleistungspotenzial einer prädiktiven Konditionierung des elektrischen Energiespeichers für Überholsituationen zu simulieren, kann auch der Ladezustand zu Beginn der Fahrsituation frei gewählt werden.

c) Modellierung der fahrstilabhängigen Ladestrategie

Die Ladestrategie aus Abschnitt 3.2 wurde im Modul Hybrid-Management im Quellcode nachgebildet. Die geschwindigkeitsabhängige Ladekennlinie wird mathematisch durch eine zwispaltige Matrix dargestellt, die die Speicherleistungen an den Eckpunkten der Kennlinie beinhaltet (+1 für maximale Lastpunktanhebung, -1 für maximalen Assist etc.). Je nach Ladezustand liefert eine Interpolation entlang der Spalten eine kontinuierliche, vom SOC-Regler gewünschte Speicherleistung.

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

Der aktuell vorliegende Hybridzustand wird je nach Geschwindigkeit, Ladezustand sowie Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgabe des Fahrreglers über logische Abfragen ermittelt und orientiert sich an der in Abbildung 4.8 dargestellten Logik. Abhängig von der vorliegenden Hybridfunktion wird unter Berücksichtigung der Bordnetzlast sowie der Übersetzungen in den Getrieben die Elektromaschinen- und Verbrennungsmotorleistung errechnet. Dabei werden die Verlustleistungen mithilfe von Kennfeldern der jeweiligen Komponenten angenähert.

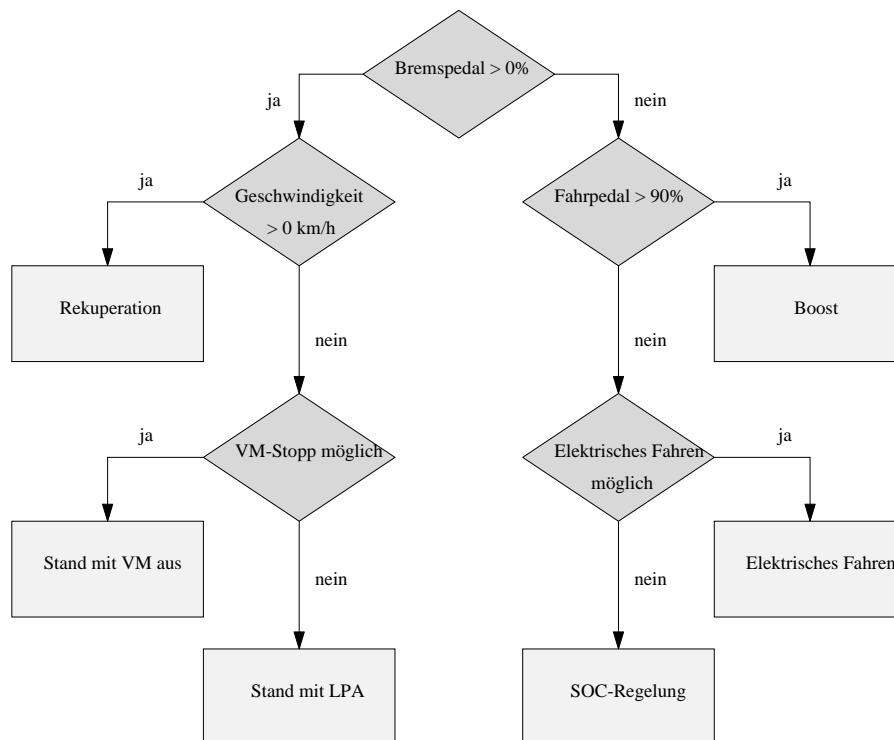


Abbildung 4.8: Logik zur Bestimmung des Hybridzustands

Da die Algorithmen zur Fahrstilklassifikation und Überholerkennung auf reale Busignale wie Querschleunigung, Lenkwinkelgradient, Abstand zum Vorderfahrzeug, etc. angewiesen sind, wurden sie nicht im Modell integriert. Stattdessen werden reale, aus Messungen stammende Geschwindigkeitsprofile von sportlicher Autobahnfahrt in das Modell eingespeist und anschließend mit unterschiedlichen Parametrierungen hinsichtlich ihrer Eignung zur Aufrechterhaltung der Boostfunktion bewertet (siehe Kapitel 5).

4.2 Rapid-Prototyping im Versuchsfahrzeug

Da in der Simulation mit einer starken Abstraktion der Realität gearbeitet wird, kann ein lauffähiges Modell noch nicht als Nachweis angesehen werden, dass sich eine Energiefunktion für den Einsatz im realen Fahrzeug eignet. Bei der Übertragung von im Simulationsmodell vorhandenen stabilen Funktionen in ein Fahrzeug können Faktoren wie eingeschränkte Datengüte, höhere Signallaufzeiten oder Wechselwirkungen zwischen Reglern innerhalb der Funktion und dem realen Verkehrsgeschehen das Potenzial schmälern oder ganz zunichte machen. Die folgenden Abschnitte beschreiben eine Methode zur Implementierung der modellierten prädiktiven Energiefunktionen in ein Versuchsfahrzeug, mit dem der reale Funktionsnachweis erbracht wurde.

4.2.1 Ziele

Mit dem Fahrzeugaufbau wurden folgende Ziele verfolgt:

- Erbringung des Funktionsnachweises:
Die oben erwähnten Risiken sollen durch Erprobungen ausgeschlossen werden.
- Bewertung der Prädiktionsgüte im realen Umfeld:
Durch Nutzung von real verfügbaren Sensoren und Daten der digitalen Karten kann die Frage beantwortet werden, ob ihre Qualität für die Inbetriebnahme eines vorausschauenden Energiesystems ausreichend ist.
- Generierung von Anforderungen an die Sensorik:
Fallen Schwächen im System auf, so kann eine anschließende Auswertung von Messergebnissen dazu beitragen, den verantwortlichen Sensor ausfindig zu machen und entsprechende Anforderungen an die Güte seiner bereitgestellten Informationen zu stellen.

Aus Gründen der Verfügbarkeit von Bauteilen sowie Budgetlimitierungen konnte im Rahmen dieser Arbeit kein reales Hybridfahrzeug aufgebaut werden. Stattdessen werden die E-Maschinen- und Verbrennungsmotorleistungen sowie der Speicherladezustand während der Fahrt simuliert. Deshalb verfolgt der Fahrzeugaufbau auch nicht das Ziel der Validierung von Simulationsergebnissen hinsichtlich Verbrauch oder Fahrdynamik. Real implementiert hingegen ist die gesamte Umfeldsensorik sowie die Situationsklassifikation.

Die Emulation des hybriden Antriebsstranges bietet allerdings auch Vorteile: Unter exakt gleichen Randbedingungen kann gleichzeitig die konventionelle sowie die adaptive und prädiktive Betriebsstrategie betrachtet werden, was eine direkte Vergleichbarkeit beider Systeme ermöglicht.

4.2.2 Entwicklungsumgebung

Noch während der Potenzialanalyse durch Simulationen begann parallel der Aufbau des Versuchsfahrzeugs, das auf einem BMW 530i des Modelljahres 2007 basiert (siehe Abbildung 4.9). Das Fahrzeug verfügt über Sonderausstattungen, die für die zu implementierenden Energiefunktionen relevant sind, so etwa die Aktive Geschwindigkeitsregelung (Adaptive Cruise Control, ACC), deren Radar Informationen über vorausfahrende Fahrzeuge liefert, sowie den Spurhalteassistenten, dessen Kamera in einer neueren Version auch zur Erkennung von Geschwindigkeitsbegrenzungen genutzt werden kann.



Abbildung 4.9: Prototyp Vorausschauendes Energiemanagement auf Basis BMW 530i

Natürlich beinhaltet der Versuchsträger eine Reihe von Modifikationen gegenüber einem entsprechenden Serienfahrzeug: So sind sämtliche Fahrzeugbusse auf einfache Weise zugänglich – sowohl für Mess-Laptops, als auch für einen im Kofferraum montierten Industrie-PC (Abbildung 4.9). Letzterer besitzt einen an der Armaturentafel montierten Bildschirm und ist vom Fahrzeuginnenraum aus vollwertig bedienbar (Abbildung 4.10). Ebenfalls im Kofferraum untergebracht sind ein Laptop, analoge Messtechnik zur Bestimmung der Spannungen und Ströme an Generator und Batterie sowie ein GPS-Modul zur Positionsbestimmung. Eine separate Batterie unterstützt das Fahrzeugbordnetz bei der unterbrechungsfreien Stromversorgung der zusätzlichen Komponenten.

Softwareseitig kommt zum Empfangen und Aufzeichnen von CAN-Signalen das Programm INCA der ETAS GmbH zur Anwendung, das zudem eine direkte Schnittstelle zu Matlab bietet. Die äußerst flexible Software-Navigationsumgebung ADAS-RP des Herstellers Navteq richtet sich an Entwickler und bietet die Möglichkeit zur weitgehenden Verarbeitung verschiedener Kartendaten in Zusammenhang mit der aktuellen Position. Außerdem errechnet sie den in Abschnitt 2.4 beschriebenen MPP und konnte im Rahmen der Arbeit dazu befähigt werden, die Informationen entlang des wahrscheinlichsten Pfades an andere Applikationen zu kommunizieren. Aufgrund der flexiblen Benutzeroberfläche der Software sowie der Möglichkeit der Erweiterung des

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur



Abbildung 4.10: Visualisierung der Prädiktion auf separatem Bildschirm

Funktionsinhalts über Plugins wurde ihre Anwendung gegenüber der Arbeit mit dem Serien-Navigationssteuergerät bevorzugt.

Abbildung 4.11 zeigt die verbauten Systeme und ihre Vernetzung in einer Übersicht. Die Navigationsentwicklerplattform ADAS-RP wird von einem Laptop ausgeführt (PC 1), der über CAN-Bus mit dem GPS-Modul kommuniziert. Die eigentlichen prädiktiven Energiefunktionen sowie die Schnittstellen-Software INCA sind aus Gründen der Rechenzeit auf dem Industrie-PC beheimatet (PC 2). Die beiden Rechner kommunizieren über eine Ethernetverbindung und ein eigens entworfenes Protokoll miteinander, das in den folgenden Abschnitten näher erläutert wird.

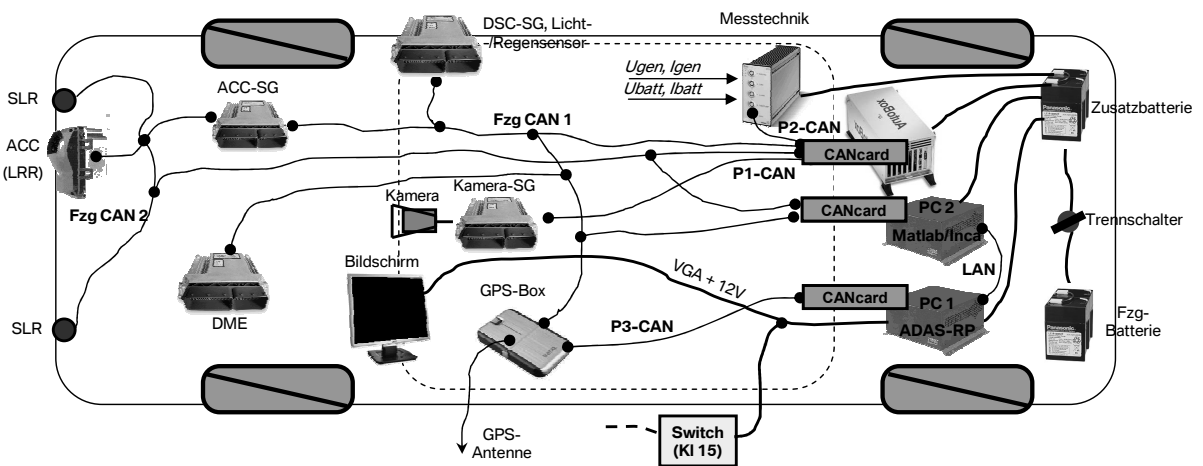


Abbildung 4.11: Systeme und deren Vernetzung im Prototyp

Das Rapid-Prototyping-System *Autobox* fungiert als Bus-Gateway, um das noch nicht in Serie erhältliche Kamerasystem zur Erkennung von Geschwindigkeitslimits mit den

notwendigen Signalen zu versorgen sowie alle übrigen Bus-Signale von Interesse zu bündeln und an die anderen Beteiligten zu verteilen (v.a. Industrie-PC). Die Matlab-basierten Funktionen auf PC 2 greifen über die CAN-Anbindung des Weiteren auf Daten des Abstandsradars, des DSC-Steuergerätes, der digitalen Motorelektronik sowie des Licht- und Regensensors zu. Ein Messtechnikmodul wandelt die gemessenen Ströme und Spannungen von Generator und Batterie in CAN-Signale und leitet diese zur weiteren Verbreitung an die Autobox weiter. Der im Innenraum zu Entwicklungszwecken montierte Bildschirm wird ebenso wie PC 2 über Klemme 15, also bei Aktivierung der Zündung, mit Strom versorgt.

4.2.3 Softwareimplementierung

Aufgrund der Notwendigkeit der Emulation eines hybriden Antriebsstranges im konventionellen Versuchsfahrzeug bietet sich die Wiederverwendung von Teilen des Hybridmodells aus Abschnitt 4.1.2 an. Dessen modularer Aufbau gestaltet die notwendigen Anpassungen verhältnismäßig einfach. Aufgrund dieses Vorteils wird die Modularität nicht nur im Versuchsträger beibehalten, sondern soll auch auf neue Gebiete wie etwa das Vorhandensein bestimmter Sensorik ausgebaut werden. Die Fahrzeugsoftware basiert wegen der Wiederverwendung von Modellen der Potenzialanalyse ebenfalls auf Matlab-Code und besteht aus mehreren einzelnen .m-Dateien, die über globale Variablen untereinander Informationen austauschen.

Die Notwendigkeit von Anpassungen ergibt sich primär durch einen im Vergleich zur Simulation unterschiedlichen Informationsfluss zwischen Hybridkomponenten, Fahrzeug und Umgebung. Durch die Emulation sind hybrider Antriebsstrang und Betriebsstrategie weitgehend identisch, während Fahrzeug und Umgebung sich real und als Modell erheblich voneinander unterscheiden: Das Simulationsmodell muss und kann im Gegensatz zur Software im Fahrzeug mit keinen vergleichbaren Eingangsdaten versorgt werden. Die Umgebung spielte in der Potenzialanalyse meist nur eine untergeordnete Rolle, da die Energiefunktionen direkt aus der Fahrzyklusdefinition heraus angesprochen wurden. Die Vorgabe einer Soll-Geschwindigkeit übernimmt nun der Fahrer und nicht mehr ein vordefinierter Fahrzyklus. Abbildung 4.12 zeigt eine Übersicht der im Modell sowie im Fahrzeug jeweils möglichen Informationsflüsse, wobei weiße Pfeile optionale Pfade darstellen. Jeder Pfeil ist mit einer dort typischerweise übertragenen Information versehen, die jeweils nur ein ausgewähltes Beispiel vieler Möglichkeiten darstellt.

Während der Simulationsphase war eine sehr einfache Bedatung der Umgebung ausreichend und ihre Wirkung auf das Fahrzeug-Kernmodell beschränkt. Im Versuchsfahrzeug hängt nun der effektive Einsatz der Energiefunktionen entscheidend davon ab, entsprechende Situationen im realen Fahrumfeld zu detektieren. Die Aufbereitung der Messsignale inklusive einer nachgeschalteten Datenfusion stellt daher eine zentrale Aufgabe in der Entwicklung der Versuchsträgersoftware dar.

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

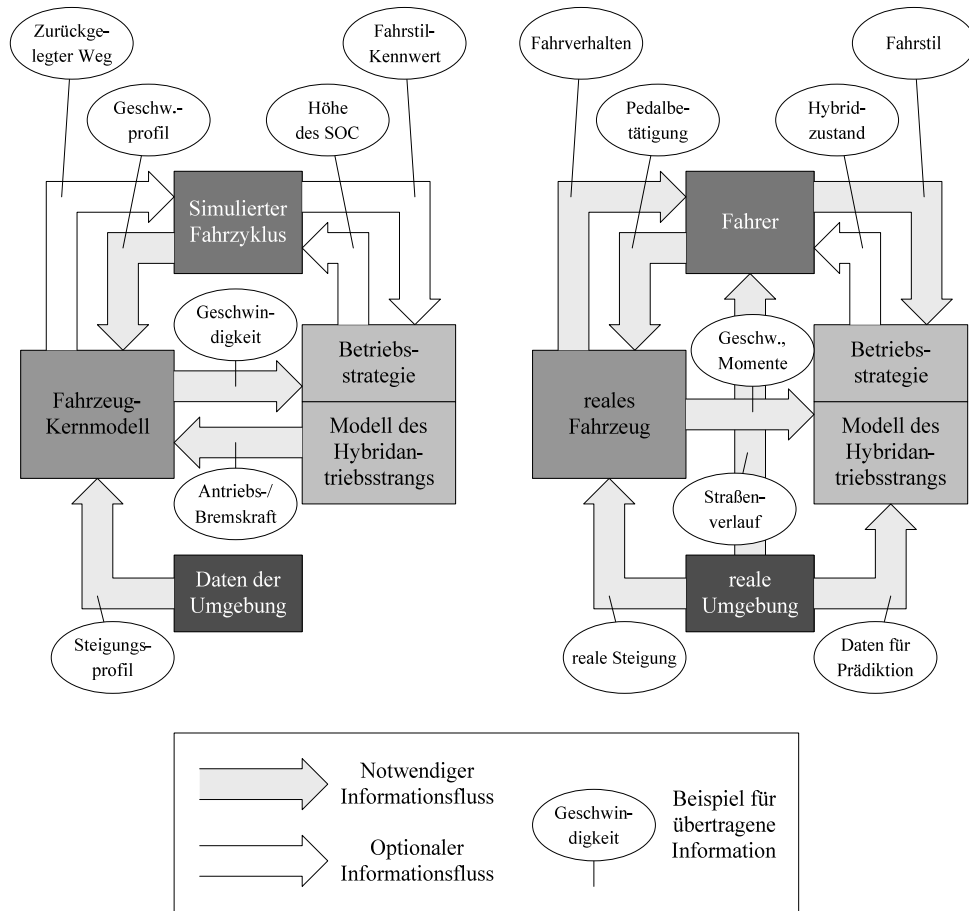


Abbildung 4.12: Informationsfluss in der Simulationsumgebung und der Versuchsträger-Software

Für das Verständnis der folgenden Erklärungen sollten zwei Abbildungen herangezogen werden: Abbildung 4.13 beschreibt den zeitlichen Ablauf der Software mit dem Aufruf der einzelnen Module, während Abbildung 4.15 am Ende dieses Abschnitts exakt die Implementierung der Einzelfunktionen und deren Partitionierung auf verschiedene Rechensysteme aufzeigt.

Eine Hauptschleife im Modul *Start* koordiniert nach Einlesen der Fahrzeugparameter aus einer separaten *.m*-Datei iterativ den Ablauf der Einzelfunktionen, deren Ausgabe je nach Charakter in unterschiedlich langen Intervallen aktualisiert wird. Die Schleife stellt somit einen reibungslosen Datenaustausch sicher. Gemäß der Funktionsarchitektur aus Kapitel 3 sind als konkrete Einzelfunktionen die Erkennung eines Staus (*Stauerkennung*), des persönlichen Fahrstils (*Fahrstilbewertung*) sowie die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines bevorstehenden Überholmanövers (*Überholprädiktion*) implementiert. Diese Module greifen einerseits auf CAN-Signale wie etwa die gefahrene Geschwindigkeit, die von der Kamera erkannte Geschwindigkeitsbegrenzung, den Fahrpedalwinkel oder den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zurück, andererseits auf Informationen aus dem Modul *Pfad-Auswertung*, das die von der Navigationsum-

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

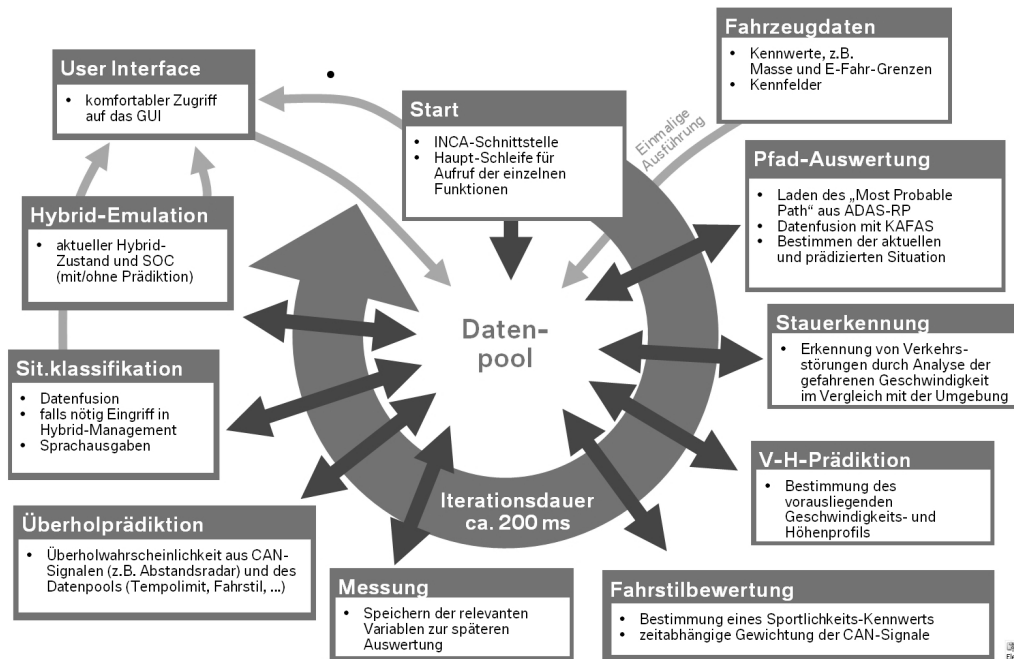


Abbildung 4.13: Hauptschleife zum iterativen Aufruf der Funktionsmodule

gebung gesendeten Informationen aufbereitet. Die energetische Bewertung der vorausliegenden Strecke anhand von Geschwindigkeits- und Höhenprofil erfolgt in der Funktion (*V-H-Prädiktion*), die ebenfalls in der Hauptschleife aufgerufen wird.

Die bisher erwähnten Einzelfunktionen dienen im Sinne der Nachrichtentechnik der Merkmalsextraktion (vgl. hierzu auch Abbildung 4.15). Die von ihnen gewonnenen Informationen fließen im Anschluss in das Modul *Situationsklassifikation* ein, das schließlich den gesamten Datenpool zu einer generalisierten Situationsschnittstelle unter Berücksichtigung der Meldungen der Einzelmodule fusioniert. Eine entsprechende Logik im Modul *Situationsklassifikation* verbindet außerdem die Nachrichten auf dieser Schnittstelle mit dem realen und emulierten Fahrzeugzustand und realisiert durch Eingriffe in die Betriebsstrategie letztendlich die adaptiven und prädiktiven Energiefunktionen. Das Modul *Hybrid-Emulation* entspricht weitestgehend dem Simulationsmodell der Betriebsstrategie und führt die gewünschten Adaptionen an der Ladestrategie aus. Ein eigenständiges Software-Modul sorgt außerdem für die Aufzeichnung der Daten aus Erprobungsfahrten für spätere Auswertungen (*Messung*).

Den Abschluss der Kette von der Informationsgewinnung über die Datenfusion, das Energiemanagement und die Hybrid-Emulation bildet die Kommunikation der Vorgänge an den Fahrer. Eine grafische Benutzeroberfläche, definiert in Funktion *GUI Info*, soll auf detaillierte, aber dennoch übersichtliche Weise Einblicke in die Arbeitsweise der Software vermitteln und die Validierung der Funktionen im Fahrversuch ermöglichen (Abbildung 4.14). In drei getrennten Bereichen werden hierbei der aktuelle Inhalt der generalisierten Situationsschnittstelle (links unten), der Zustand des emulierten Hybridsystems jeweils mit und ohne Adaptionen an der Ladestrategie (links

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

oben) und die vom Modul *V-H-Prädiktion* errechneten Trajektorien von Geschwindigkeit, Höhe und Ladezustand in der nahen Zukunft dargestellt (rechts). Um den Fahrer auch während der Fahrt ausreichend über den Status der Funktionen zu informieren, werden erkannte Fahrsituationen sowie die entsprechenden energetischen Maßnahmen parallel dazu per Sprachmitteilung gemeldet, so etwa mit den Worten: „Einfahrt in Zone 30 in weniger als 1 km, lade Energiespeicher zur Ausweitung des elektrischen Fahrbetriebs“.

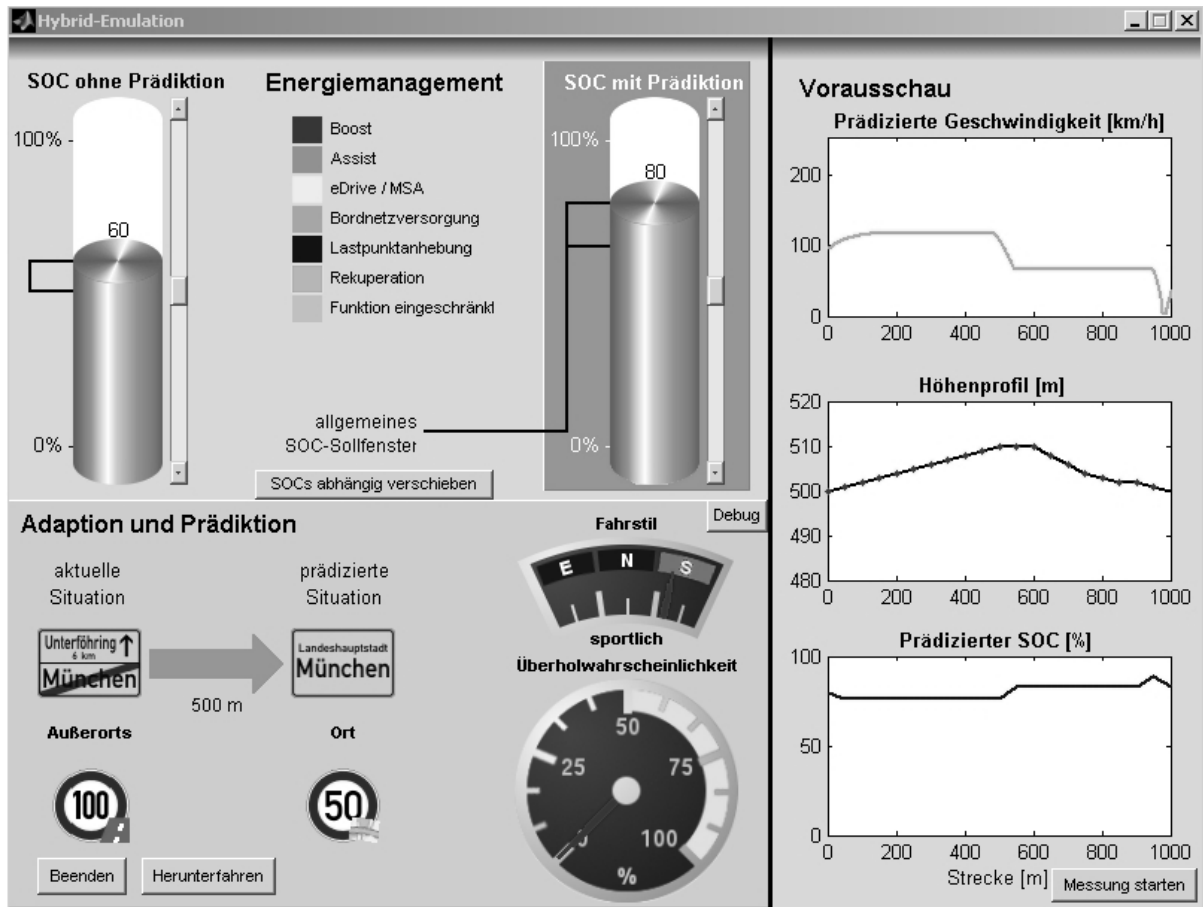


Abbildung 4.14: Bildschirmfoto der grafischen Benutzeroberfläche im Versuchsfahrzeug

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

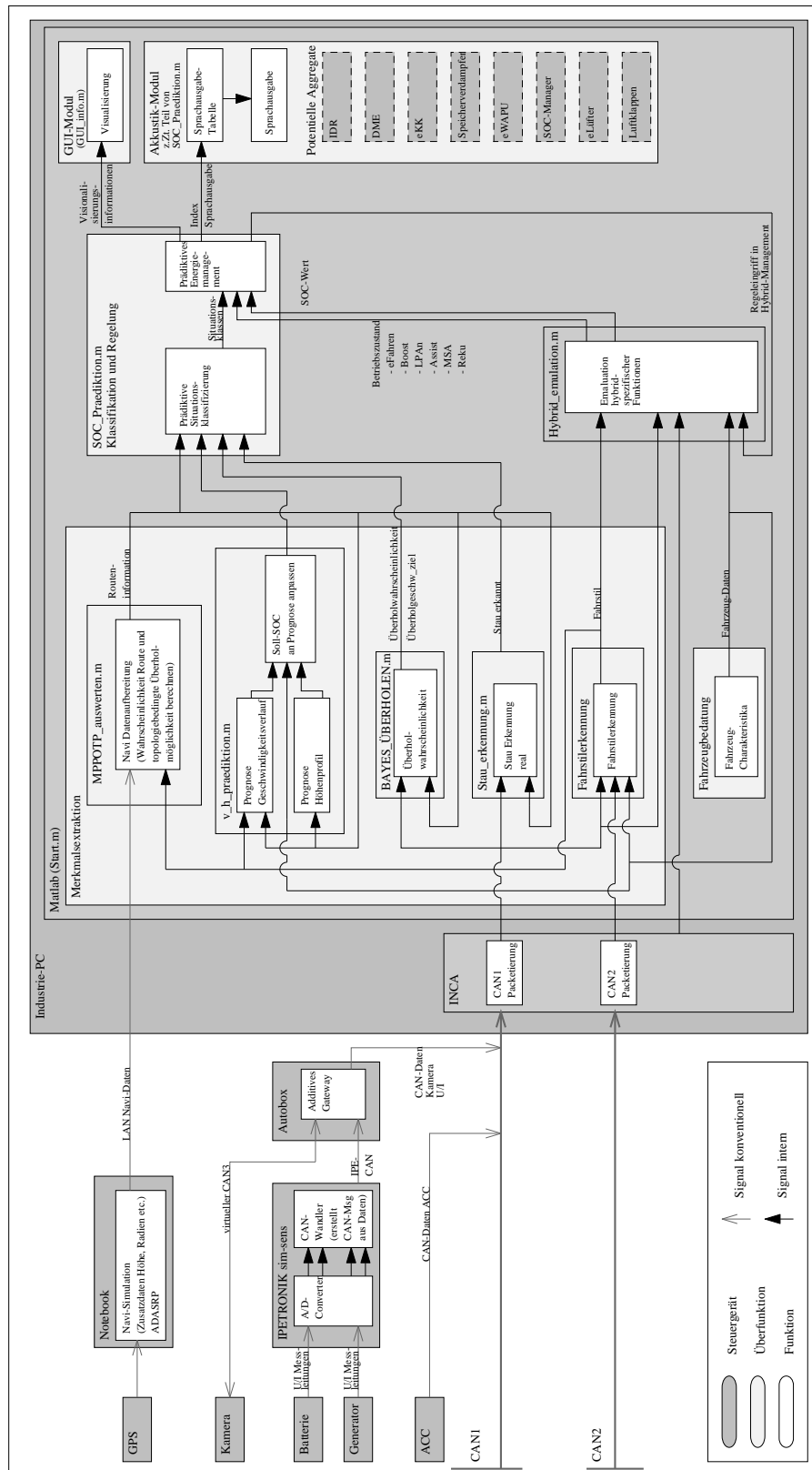


Abbildung 4.15: Softwarearchitektur und implementiertes Funktionsnetz im Prototypenfahrzeug

4.2.4 Implementierung der Plug-and-Play-Fähigkeit

Die in Kapitel 3 und insbesondere im Abschnitt 3.6 gestellte Forderung nach einer Plug-and-Play-fähigen Funktionsarchitektur, also der Fähigkeit der Software, sich automatisch an das zur Verfügung stehende Sensorangebot anzupassen, wird erreicht, indem in jeder Funktion aus dem übergeordneten Block *Merkmalsextraktion* aus Abbildung 4.15 einzeln das Vorhandensein der für den Betrieb notwendigen Signale überprüft wird. Hierzu besitzt jede Funktion einen eigenen Abschnitt, in dem entschieden wird, ob die notwendigen Eingangssignale auf dem Fahrzeugbus kommuniziert werden. Die Kommentare im Code-Abschnitt aus Abbildung 4.16 erläutern das Prinzip am Beispiel der Überholfunktion³: Ist eines der benötigten Signale für die Überholprädiktion nicht vorhanden (= Not a Number / NaN), so wird die Überholwahrscheinlichkeit ebenfalls auf NaN gesetzt und der *return*-Befehl sorgt für den Abbruch der Funktion. Ein Beobachtermodul in *GUI Info* sorgt nach einer Dauer von 10 s, in denen die Überholwahrscheinlichkeit den Wert NaN besitzt, dafür, dass das entsprechende Instrument auf dem Bildschirm grau dargestellt wird und eine akustische Meldung dem Fahrer das Nicht-Vorhandensein der entsprechenden Sensoren sowie den Ausfall der Überholprädiktion mitteilt. Analog verläuft der Prozess bei allen übrigen adaptiven Funktionen und sonstigen Sensoren.

```
global otp_aktuell;
global mpp_aktuell;
global distanz_aktuell;

% Plug-and-Play-Fähigkeit: Wenn kein MPP oder kein OTP verfügbar ist oder
% die Distanz veraltet (=NaN) ist, kann keine Überholwahrscheinlichkeit
% berechnet werden.
if isnan( distanz_aktuell ) || isempty( otp_aktuell ) || isempty( mpp_aktuell )
    % NaN ist der "nicht verfügbar"-Wert und führt beim Aufruf des
    % GUI-Zeigers zum Ausgrauen.
    ueberhol_wahrscheinlichkeit = NaN ;
    % Zurückspringen in "start.m" ohne Verarbeitung des restlichen .m-Files
    return
end % von if "PnP-Komponente fehlt"
```

Abbildung 4.16: Automatische Deaktivierung der Überholprädiktion bei mangelndem Sensorangebot

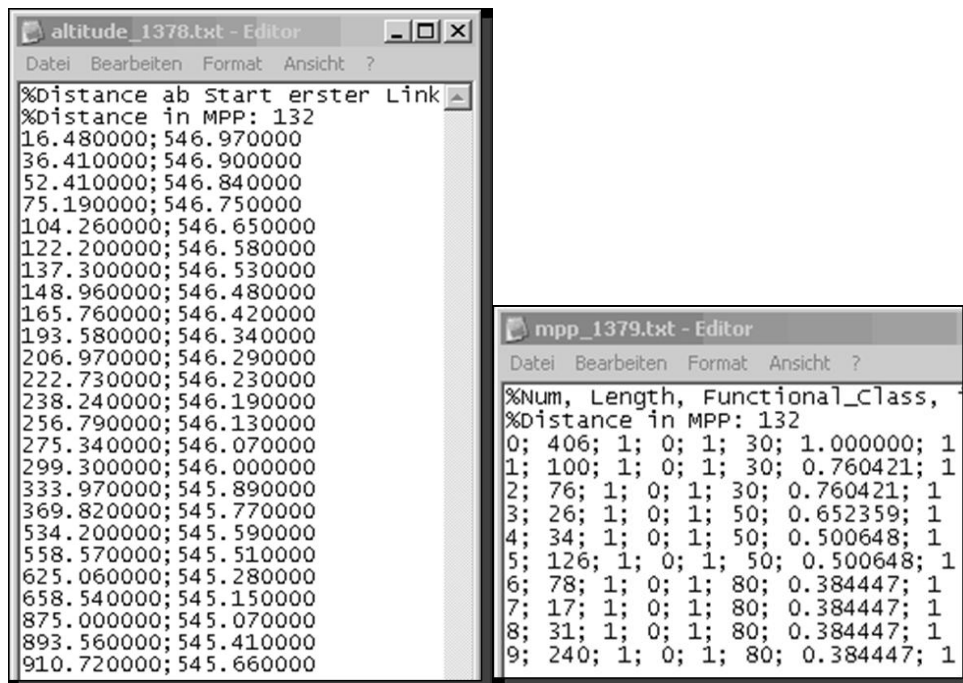
Die Plug-and-Play-Fähigkeit beruht also auf dem Prinzip, dass bei Nicht-Vorhandensein eines essenziellen Signals die darauf angewiesene Funktion nicht ausgeführt wird und damit auch kein Ausgangssignal ausgibt. Somit werden alle auf dieses Ausgangssignal angewiesenen Folgefunktionen ebenfalls automatisch deaktiviert, da auch sie mit entsprechenden Beobachtermodulen ausgestattet sind. Es erfolgt eine automatisch

³ Ausführliche Quellcode-Abschnitte können in der Arbeit nicht gezeigt werden, da sie der Geheimhaltung unterliegen.

verkettete Deaktivierung von Funktionen, die auf ein bestimmtes nicht vorhandenes Signal angewiesen sind. Diese Verkettung zieht sich bis zu den adaptiven Eingriffen im SOC-Management fort, wo etwa bei nicht verbautem Abstandsradar der elektrische Speicher in Überholsituationen nicht mehr geladen wird.

4.2.5 Herausforderungen in der Datenübertragung

Die vorgestellten Schnittstellen, über die Umfeldinformationen im Versuchsfahrzeug ausgetauscht werden, basieren auf der internen Speicherverwaltung von Matlab in Form von Matrizen und skalaren Variablen. Bei der Kommunikation der navigationsgestützten Informationen über die erwähnte Ethernetverbindung kommen .txt-Dateien zum Einsatz, die über eine TCP/IP-Verbindung der zwei Rechner gesendet werden und theoretisch nahezu unbegrenzten Informationsgehalt besitzen können. Abbildung 4.17 zeigt beispielhaft zwei Dateiinhalte zur Beschreibung des MPP sowie des korrespondierenden Höhenprofils. Die Tabelle zur Beschreibung enthält links eine Spalte mit der Entfernung eines jeden Messpunktes von der Fahrzeugposition und rechts den jeweils gemessenen Höhenwert. Die den MPP beschreibende Tabelle enthält von links nach rechts die folgenden Informationen: fortlaufende Index-Nummer, Segmentlänge in m, Straßenkategorie (von 0 = Hauptverkehrsader bis 4 = Nebenstraße), Unterscheidung zwischen Stadt (= 1) und Überlandverkehr (= 0), Bit zur Bestimmung der Datengüte (1 = genau, 0 = ungenau), geltendes Tempolimit in km/h, Wahrscheinlichkeit für das Befahren des Segments, Anzahl von Fahrspuren.



```
altitude_1378.txt - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
%Distance ab Start erster Link
%Distance in MPP: 132
16.480000; 546.970000
36.410000; 546.900000
52.410000; 546.840000
75.190000; 546.750000
104.260000; 546.650000
122.200000; 546.580000
137.300000; 546.530000
148.960000; 546.480000
165.760000; 546.420000
193.580000; 546.340000
206.970000; 546.290000
222.730000; 546.230000
238.240000; 546.190000
256.790000; 546.130000
275.340000; 546.070000
299.300000; 546.000000
333.970000; 545.890000
369.820000; 545.770000
534.200000; 545.590000
558.570000; 545.510000
625.060000; 545.280000
658.540000; 545.150000
875.000000; 545.070000
893.560000; 545.410000
910.720000; 545.660000

mpp_1379.txt - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
%Num, Length, Functional_Class,
%Distance in MPP: 132
0; 406; 1; 0; 1; 30; 1.000000; 1
1; 100; 1; 0; 1; 30; 0.760421; 1
2; 76; 1; 0; 1; 30; 0.760421; 1
3; 26; 1; 0; 1; 50; 0.652359; 1
4; 34; 1; 0; 1; 50; 0.500648; 1
5; 126; 1; 0; 1; 50; 0.500648; 1
6; 78; 1; 0; 1; 80; 0.384447; 1
7; 17; 1; 0; 1; 80; 0.384447; 1
8; 31; 1; 0; 1; 80; 0.384447; 1
9; 240; 1; 0; 1; 80; 0.384447; 1
```

Abbildung 4.17: Beispiel für Höhenprofil- und MPP-Botschaft im Versuchsfahrzeug

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

Signale wie die aktuelle Überholwahrscheinlichkeit oder der Fahrstil des Fahrers scheinen als einzelne skalare Werte noch problemlos in den Nachrichtenkatalog von Bussystemen integrierbar. Die Frage, ob und wie vorausschauende Streckeninformationen wie etwa ein Höhen- oder Geschwindigkeitsprofil über mehrere Kilometer in der Zukunft auf CAN-Bussen kommuniziert werden können, verdient jedoch besondere Aufmerksamkeit. Die eingangs der Arbeit beschriebenen Eigenschaften des CAN-Bus limitieren die maximal in einer Botschaft transportierbare Information stark. Das Senden von ganzen Trajektorien über der Strecke ist daher eine besondere Herausforderung und bedarf der Abstraktion der zu übertragenden Profile.

Naheliegende Datenkompressionsmethoden wie die Fourier- oder Wavelettransformation scheiden aufgrund der (auch aus Kostengründen) begrenzten Rechenkapazität heutiger eingebetteter Systeme im Automobilbereich aus. Eine Abstraktion der Geschwindigkeits- und Höhenprofile unter möglichst weitgehender Beibehaltung der energetischen Informationen erscheint daher unerlässlich.

Um den Zusammenhang zwischen Abstraktion und Verlust an energetischer Information beispielhaft aufzuzeigen, wurden die Höheninformationen aus der in dieser Arbeit verwendeten digitalen Karte entlang eines 1000 m langen Gefälles nahe Sudelfeld (Südbayern) in ein CAN-Bus-kompatibles Format komprimiert. Das ursprüngliche Höhenprofil besteht aus einem Vektor mit 87 Zeilen und den zwei Spalten: Entfernung des Höhenmesspunktes vom Fahrzeug und korrespondierender absoluter Höhe über dem Meeresspiegel in cm. Überträgt man diese Daten als Single Gleitkommazahlen (32 Bit), so werden $87 \cdot 2 \cdot 32 \text{ Bit} = 5568 \text{ Bit}$ benötigt. Bei einer größeren Auflösung von 10 cm sind es mit dem dann genügenden 16 Bit Integerformat immer noch für die CAN-Kommunikation inakzeptable 2784 Bit. Die in unregelmäßigen Abständen vom Fahrzeug gespeicherten Höhenmesspunkte erfordern die Übertragung ihrer Entfernung vom aktuellen Standpunkt. Eine Interpolation der Daten mit konstantem Punktabstand macht die Übertragung der Entfernungsinformation überflüssig. Weiterer Kommunikationsaufwand lässt sich einsparen, indem nicht die absolute Höhe, sondern nur das Delta von einem Messpunkt zum nächsten übertragen wird. Verringert man die Genauigkeit der Höheninformationen durch Codierung und anschließende Decodierung beim Empfänger über einen Faktor bzw. Divisor, so kann der zu übertragende Wertebereich und damit die benötigte Bit-Anzahl weiter eingeschränkt werden.

Abbildung 4.18 auf der folgenden Seite zeigt die Variation der Güte der energetischen Information bei unterschiedlicher Anwendung der eben beschriebenen Abstraktionsmethoden am Beispiel des erwähnten Gefälles. Hierfür zeigt die Abbildung die vom rückwärtsrechnenden Fahrzeugmodell errechneten SOC-Trajektorien in Abhängigkeit unterschiedlich stark abstrahierter Höheninformationen. Das ursprüngliche Höhenprofil zeigt steilere und flachere Abschnitte auf, die bei abnehmender Bit-Anzahl immer weniger exakt übertragen werden können. Bei steigender Fahrzeuggeschwindigkeit kann es auf den flacheren Abschnitten notwendig sein, zur Einhaltung einer konstanten Geschwindigkeit positive Antriebsleistung an die Räder abzugeben. Bei einem entsprechend hohen Ladezustand der Batterie würde die vorgestellte Betriebsstrategie diese Antriebsleistung zu großen Teilen elektromotorisch zur Verfügung stellen und

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

so den SOC herabregeln. Gerade dieser Effekt ist bei der Abstraktion unterhalb von 32 Bit nicht mehr vorhersehbar – es kommt zur Prädiktion eines deutlich nach oben abweichenden Ladezustands.

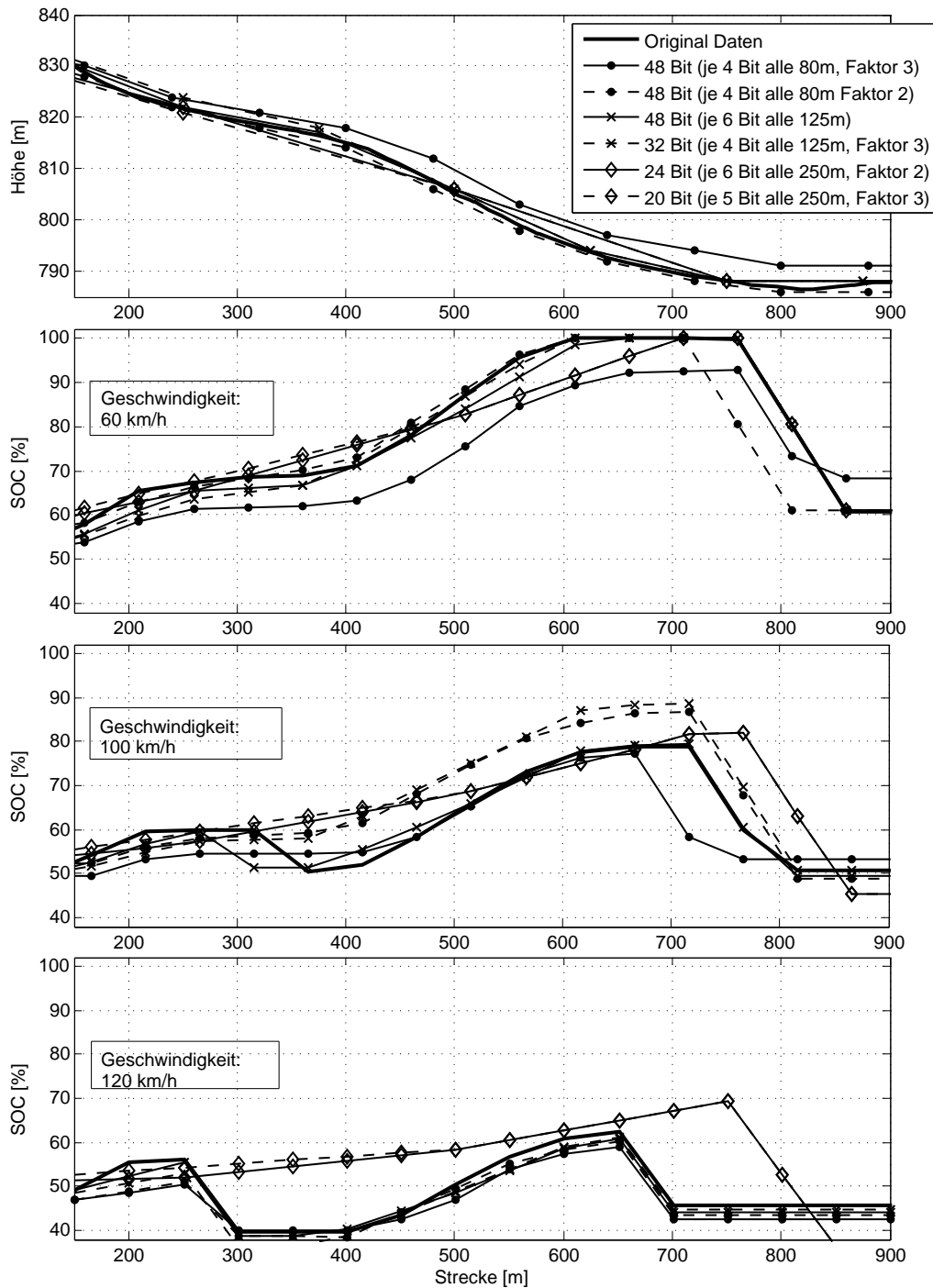


Abbildung 4.18: Güte der Energieprädiktion unter Variation der Datengüte

4 Umsetzung der Funktionsarchitektur

Tabelle 4.1 liefert eine Übersicht der betrachteten Parameter. Es sei angemerkt, dass durch die Abstraktion nicht nur die Exaktheit, sondern auch der darstellbare Wertebereich eingeschränkt wird. Überschreitet eine reale Steigung den maximalen Wert, so wird nur dieser Maximalwert übertragen, und es ergeben sich aufgrund der Differenzübertragung der Höhenwerte Fortpflanzungsfehler. Daher sollte der Wertebereich genügend groß gewählt werden.

Intervall	$\frac{\text{Bit}}{\text{Datum}}$	Faktor	max. Steigung	Steigungsstufen	$\frac{\text{Bit}}{1000\text{m}}$
80 m	4	2	17,5 %	2,5 %	48
80 m	4	3	26,3 %	3,75 %	48
125 m	4	3	16,8 %	1,6 %	32
125 m	6	-	24,8 %	0,8 %	48
250 m	5	3	18,0 %	1,2 %	20
250 m	6	2	24,8 %	0,8 %	24

Tabelle 4.1: Übersicht über Kompressionsparameter

5 Bewertung der Ergebnisse

5.1 Grundlegende Chancen und Risiken prädiktiver Energiefunktionen

Die grundlegenden Chancen eines vorausschauenden Energiemanagementsystems wurden bereits in Kapitel 3 erläutert. Zusammenfassend geht es um die Steigerung von Effizienz und Fahrleistungen durch Vermeidung von Energiemangel und -überschuss bei gleichzeitiger Maximierung der Wertigkeit des Fahrzeugs für den Fahrer. Dies kann durch eine situationsabhängige Konditionierung der Energiesysteme solange erfolgreich sein, als die Vorausschau ausreichend valide Informationen liefert. Irrt sie, so sorgen falsche Eingangsinformationen für unnötige Abweichungen von der Basisbetriebsstrategie, die einen Mehrverbrauch an Kraftstoff oder Fahrleistungseinbußen zur Folge haben können.

Um nicht kontraproduktiv zu sein, muss die Prädiktion daher eine gewisse Mindestgüte erreichen. Nur dann kompensieren die Vorteile bei korrekter Vorausschau die Nachteile bei falscher Einschätzung der nahen Zukunft. Die *Prädiktionsgüte* P wird für diese Arbeit definiert als

$$P = \frac{n_{\text{Treffer}}}{n_{\text{Situationsmeldung}}} \quad (5.1)$$

und beschreibt damit den Anteil der richtigen Detektionen an allen Fällen, in denen die Vorausschau eine bestimmte Fahrsituation meldet. Sie unterscheidet sich damit von den in der Literatur üblichen Begriffen *Detektionsrate* oder *Fehlalarmrate* [21, 56, 78, 94]. Die Detektionsrate ergibt sich aus:

$$R_{\text{det}} = \frac{n_{\text{Treffer}}}{n_{\text{Situationseintritt}}} \quad (5.2)$$

Sie beschreibt den Anteil der richtigen Detektionen an allen Fällen, in denen eine bestimmte Fahrsituation tatsächlich eintritt. Sie kann auf das vorausschauende Energiemanagement bezogen auch als *Prädiktionseffektivität* bezeichnet werden, da bei konstanter Prädiktionsgüte P mit ihr das Verbrauchsreduktionspotenzial einer Funktion proportional steigt. Die Fehlalarmrate ist schließlich definiert als:

5 Bewertung der Ergebnisse

$$R_{\text{fehl}} = \frac{n_{\text{Fehlalarm}}}{n_{\text{KeinSituationseintritt}}} \quad (5.3)$$

Wie erwähnt, ist das resultierende mittlere Einsparpotenzial des vorausschauenden Energiemanagements von der Prädiktionsgüte P , der eingesparten Kraftstoffmenge bei korrekter Prädiktion E_{Chance} sowie dem Mehrverbrauch bei falscher Prädiktion E_{Risiko} abhängig. Für die mindestens zu erreichende Prädiktionsgüte stellt sich folgender Zusammenhang ein:

$$E_{\text{Chance}} \cdot P_{\text{min}} = E_{\text{Risiko}} \cdot (1 - P_{\text{min}}) \quad (5.4)$$

Oder:

$$P_{\text{min}} = \frac{E_{\text{Risiko}}}{E_{\text{Risiko}} + E_{\text{Chance}}} \quad (5.5)$$

Obige Gleichungen machen den einfachen Zusammenhang ersichtlich, dass die notwendige Mindestprädiktionsgüte bei gleich großem Minderverbrauch (aufgrund korrekter Prädiktion) wie Mehrverbrauch (aufgrund falscher Prädiktion) 50 % beträgt. Ist die Kraftstoffeinsparung bei richtiger Abschätzung der nahen Zukunft jedoch größer als der zusätzliche Kraftstoffverbrauch bei falscher Vorausschau, so reicht theoretisch bereits eine Prädiktionsgüte von weniger als 50 % aus, um eine Kraftstoffersparnis zu erzielen – eine ermutigende Tatsache zur Umsetzung von vorausschauenden Energiesystemen. Die notwendige Mindestsensorgüte ergibt sich also aus der Balance zwischen energetischer Chance und Risiko.

Überschlagsrechnung optimale Rekuperation an Gefällen

Überschlägig gilt für E_{Chance} bei der höhenprofilabhängigen SOC-Regelung in Abhängigkeit der am Gefälle überschüssigen elektrischen Energie E_{ex} :

$$E_{\text{Chance}} = E_{\text{ex}} \eta_{\text{Bat,entlad}} \frac{\eta_{\text{EM,mot}}}{\eta_{\text{VM,rel}}} \quad (5.6)$$

Dies gilt, wenn die unter Zuhilfenahme der Prädiktion zusätzlich rekuperierbare Energie am Gefälle E_{ex} zuvor durch einen Assistvorgang abgebaut wird, der den Verbrennungsmotor entlastet. Für das energetische Risiko E_{Risiko} gilt als Funktion von E_{ex} :

$$E_{\text{Risiko}} = \frac{E_{\text{ex}}}{\eta_{\text{Bat,lad}} \eta_{\text{EM,gen}} \eta_{\text{VM,rel}}} - E_{\text{Chance}} \quad (5.7)$$

Mithilfe dieser zwei Gleichungen lässt sich E_{Chance} durch E_{Risiko} ausdrücken. Mit den näherungsweise gültigen Werten für die Wirkungsgrade $\eta_{\text{Bat,(ent)lad}} = 0,90$, $\eta_{\text{EM,mot}} = \eta_{\text{EM,gen}} = 0,85$ und $\eta_{\text{VM,rel}} = 0,42$ ergibt sich das Verhältnis zwischen Chance und Risiko zu:

5 Bewertung der Ergebnisse

$$E_{\text{Chance}} \approx 1,41 \cdot E_{\text{Risiko}} \quad (5.8)$$

Hieraus resultiert eine notwendige Mindestprädiktionsgüte, die kleiner als 50 % ist:

$$P_{\text{min,Hoeh}} = \frac{E_{\text{Risiko}}}{E_{\text{Risiko}} + 1,41 \cdot E_{\text{Risiko}}} \approx 41,5\% \quad (5.9)$$

Überschlagsrechnung prädiktive Erweiterung des elektrischen Fahrens

Für die überschlägige Bestimmung der Mindestprädiktionsgüte bei vorausschauender Ladung des Speichers für elektrischen Fahrbetrieb müssen weitere Prämissen herangezogen werden. Im Falle einer korrekten Prädiktion wird elektrische Energie, die über eine Lastpunktanhebung erzeugt wurde, im Anschluss während des elektrischen Fahrbetriebs verbraucht. Irrt die Prädiktion, so kann die Energie nur über eine Lastpunktabsenkung wieder abgebaut werden, der eigentliche Fahrzeugvortrieb erfolgt dann mit dem absoluten Wirkungsgrad des Verbrenners. Neben den Komponentenwirkungsgraden von Speicher, E-Maschine und dem relativen Verbrennungsmotorwirkungsgrad muss deshalb auch eine Abschätzung des absoluten Verbrennungsmotorwirkungsgrades $\eta_{\text{VM,abs}}$ erfolgen. Für den Fall der Fahrt durch eine 30er Zone wird eine mittlere Antriebsleistung von 3 kW bei 1500 U/min angenommen. Dieser Betriebspunkt bedeutet bei 6-Zylinder-Motoren üblicherweise einen absoluten Wirkungsgrad von etwa 15 % (siehe Abbildung 2.2).

Für die während des prädiktiven Ladens verbrauchte Kraftstoffenergie $E_{\text{KS,praed}}$ als Funktion von der prädiktiv gespeicherten elektrischen Energie $E_{\text{Bat,praed}}$ gilt:

$$E_{\text{KS,praed}} = \frac{E_{\text{Bat,praed}}}{\eta_{\text{Bat,lad}} \eta_{\text{EM,gen}} \eta_{\text{VM,rel}}} = 3,11 \cdot E_{\text{Bat,praed}} \quad (5.10)$$

Aus $E_{\text{Bat,praed}}$ lässt sich folgende mechanische Energie im elektrischen Fahrbetrieb für den Vortrieb des Fahrzeugs gewinnen:

$$E_{\text{mech}} = E_{\text{Bat,praed}} \eta_{\text{Bat,entlad}} \eta_{\text{EM,mot}} = 0,756 \cdot E_{\text{Bat,praed}} \quad (5.11)$$

Muss E_{mech} direkt vom Verbrennungsmotor im oben beschriebenen Betriebspunkt erbracht werden, weil nicht prädiktiv geladen wurde, so wird die Kraftstoffenergie $E_{\text{KS,konv}}$ verbraucht:

$$E_{\text{KS,konv}} = \frac{E_{\text{mech}}}{\eta_{\text{VM,abs}}} = 5,10 \cdot E_{\text{Bat,praed}} \quad (5.12)$$

E_{Chance} ergibt sich aus der Differenz der bei prädiktiver und konventioneller Ladestrategie ausgegebenen Kraftstoffenergie:

5 Bewertung der Ergebnisse

$$E_{\text{Chance}} = E_{\text{KS,konv}} - E_{\text{KS,praed}} = (5,10 - 3,11) \cdot E_{\text{Bat,praed}} \approx 2 \cdot E_{\text{Bat,praed}} \quad (5.13)$$

Erfolgt nach prädiktiver Aufladung des Speichers keine ausgedehnte elektrische Fahrphase, so muss die mit dem Kraftstoffaufwand $E_{\text{KS,praed}}$ zusätzlich gespeicherte Energie über eine elektromotorische Entlastung des Verbrennungsmotors wieder abgebaut werden. Der resultierende Mehrverbrauch an Kraftstoff ergibt sich aus der Differenz zwischen $E_{\text{KS,praed}}$ und der durch die anschließende Entlastung des Verbrennungsmotors eingesparten Energie, bei der wieder der relative Wirkungsgrad $\eta_{\text{VM,rel}}$ zum Tragen kommt:

$$E_{\text{Risiko}} = E_{\text{KS,praed}} - \frac{E_{\text{mech}}}{\eta_{\text{VM,rel}}} = 1,31 \cdot E_{\text{Bat,praed}} \quad (5.14)$$

Mit dem sich ergebenden Verhältnis von $E_{\text{Chance}} \approx 1,53 \cdot E_{\text{Risiko}}$ lässt sich mit Gleichung 5.5 wieder die notwendige Mindestprädiktionsgüte errechnen, die in einer ähnlichen Region wie die bei höhenprofilabhängiger SOC-Regelung liegt:

$$P_{\text{min,30er}} = \frac{E_{\text{Risiko}}}{E_{\text{Risiko}} + 1,53 \cdot E_{\text{Risiko}}} \approx 39,5\% \quad (5.15)$$

Beiden Funktionen ist also gemein, dass die energetische Chance etwa 50 % größer ist als das Risiko, weshalb ab einer Prädiktionsgüte von ca. 40 % aufwärts bereits eine Kraftstoffersparnis zu erwarten ist. Das Kraftstoffeinsparpotenzial variiert dabei in Abhängigkeit der tatsächlich erreichten Prädiktionsgüte sowie der Häufigkeit des Auftretens der zu erkennenden Fahrsituation. Unter der Annahme einer konstanten Energiemenge von 50 Wh, um die der Energiespeicher jeweils für ein Gefälle bzw. das elektrische Fahren vorkonditioniert wird, ist das überschlägige Kraftstoffeinsparpotenzial in Abbildung 5.1 dargestellt.

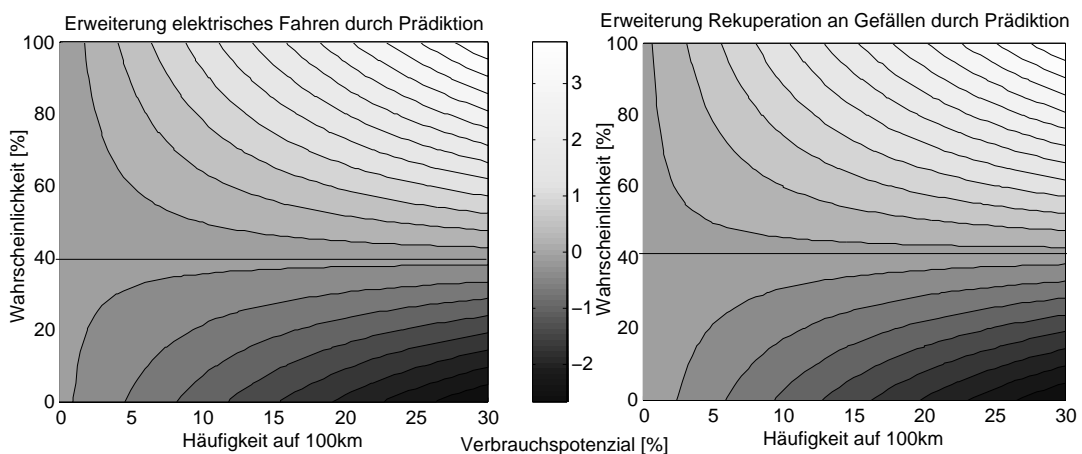


Abbildung 5.1: Überschlägiges Einsparpotenzial vorausschauender SOC-Regelungen in Abhängigkeit von Prädiktionsgüte und Häufigkeit

5.2 Simulationsergebnisse

Wichtig für die Einordnung der simulationsgestützten Potenzialberechnung in Kapitel 5.2 ist die Tatsache, dass es sich bei der Vergleichsbasis um Betriebsstrategien handelt, die bereits auf die jeweiligen Fahrzeuge mit verschiedenen Methoden optimiert wurden. Dabei sind die Potenziale der adaptiven und prädiktiven Energiefunktionen als weitere Verbrauchssenkung und Fahrleistungssteigerung gegenüber einer bereits vielfach verbesserten konventionellen Betriebsstrategie zu verstehen und ihre Größenordnung dementsprechend zu bewerten.

5.2.1 Versuchsplan und simulierte Fahrzeuge

Mithilfe der Simulationsmodelle sollen die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Energiefunktionen vor ihrem Einsatz im realen Fahrzeug einer ersten Potenzialanalyse unterzogen werden. Hierfür wurden sie, wo sinnvoll, in zwei unterschiedlichen, fiktiven Hybridfahrzeugen untersucht. Tabelle 5.1 zeigt die wesentlichen Daten dieser beiden Fahrzeuge, einem Oberklasse Mild-Hybridfahrzeug (1) sowie einem Mittelklasse Full-Hybridkonzept (2). Beide Fahrzeuge sind gemessen an ihrer Verbrennungsmotorenleistung vergleichsweise gering hybridisiert. Das Oberklassefahrzeug besitzt einen deutlich kleineren elektrischen Energiespeicher als das Full-Hybridfahrzeug.

	Masse [kg]	$c_w \times A$	$U_{\text{Bat,nenn}}$ [V]	$E_{\text{Bat,nenn}}$ [Wh]	$P_{\text{EM,max}}$ [kW]	$P_{\text{VM,max}}$ [kW]
1	2265	0,73	129	775	ca. 15	ca. 300
2	1945	0,58	346	2075	ca. 30	ca. 225

Tabelle 5.1: Daten der simulierten Fahrzeuge

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Fahrzeuge schöpfen einige Energiefunktionen nur in einem der beiden Konzepte ihr Potenzial aus. Funktionen zur Steigerung der Verfügbarkeit des elektrischen Fahrens werden im Folgenden daher sinnvollerweise nur mit dem Modell des Full-Hybridfahrzeugs untersucht. Zudem ist der elektrische Energiespeicher dieses Fahrzeugs auch bei der Simulation der steilen und längeren Gefälle in der Lage, die auftretenden Energien nahezu vollständig aufzunehmen, weshalb auf die Darstellung der Ergebnisse hier verzichtet wird. Es ergibt sich ein Versuchsplan gemäß Tabelle 5.2. Was sich hinter den in Spalte *Zyklus* aufgeführten Namen der Fahrprofile im Detail verbirgt, erläutern die folgenden Abschnitte.

Neben dem Nachweis von Verbrauchsreduktionspotenzialen sind weitere Ziele der Simulation die Bestimmung des Einflusses des Prädiktionshorizonts auf den Minderverbrauch sowie die quantitative Bestimmung der optimalen prädiktiven Lade- bzw. Entladeleistung. Hierfür wurden die beiden Parameter systematisch variiert.

5 Bewertung der Ergebnisse

Rubrik	Zyklus	Mild-Hybrid	Full-Hybrid	Modell
Gefälle	Voruntersuchungen	x	x	Matlab
	Synthetisch	x	x	Dymola
	Spitzingsee	x		Dymola
	BAB - A8	x		Dymola
Verkehrsfluss	Synthetisch		x	Dymola
	30er Zone		x	Dymola
	Stau prädiziert		x	Dymola
	Stau aktuell		x	Dymola
Überholen	Diverse Zyklen	x	x	Matlab
Fahrstil	Diverse Zyklen	x	x	Matlab

Tabelle 5.2: Versuchsplan für Simulationen

5.2.2 Höhenprofilabhängige Ladezustandsregelung

a) Voruntersuchungen

Unter der Zyklusbezeichnung *Voruntersuchungen* in Tabelle 5.2 sind allgemeine Simulationen zur Bestimmung der rekuperierbaren Energiemengen an Gefällen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu verstehen. Ziel der Analysen war es, das für die Rekuperation optimale Wertepaar aus Geschwindigkeit und Gefälle zu finden. Hierzu wurden konstante Gefällefahrten simuliert, bei denen die beiden Parameter in einem Wertebereich von $v \in \{25 \text{ km/h} \dots 200 \text{ km/h}\}$ bzw. $s \in \{0 \% \dots 20 \%\}$ variiert wurden. Zu erwarten ist für jedes Gefälle eine obere Grenzgeschwindigkeit, ab der die Fahrwiderstände der Hangabtriebskraft entsprechen und keine Rekuperation mehr möglich ist, sowie eine untere Grenzgeschwindigkeit, bei der die generatorisch erzeugbare Leistung unter die Bordnetzleistung fällt und deshalb keine Energie in den elektrischen Speicher gespeist werden kann. Zwischen diesen Extremen liegt ein Maximum hinsichtlich der in die Traktionsbatterie gespeisten Energiemenge je Höhenmeter. Abbildung 5.2 zeigt die Simulationsergebnisse für den Fall einer Bordnetzlast von 1000 W: Die Kurven stehen für die bei jeweils konstanter Geschwindigkeit erreichbare Rekuperationsenergie in Wh je 100 Höhenmeter. Das Maximum liegt im Geschwindigkeitsbereich um 50 km/h und etwa 8 % Gefälle, also genau in dem Bereich, in dem sich viele Gefällefahrten im Überlandverkehr abspielen. Nach dem Erreichen des Maximums gerät die Rekuperationsleistung aufgrund der Systemeigenschaften (Bremsystem, maximale E-Maschinenleistung) in ihre Sättigung. Der starke Abfall der rekuperierbaren Energie bei steileren Gefällen ist also dadurch zu erklären, dass bei konstanter Geschwindigkeit und steigendem Gefälle das Überwinden der Höhenmeter weniger Zeit in Anspruch nimmt und damit bei konstanter (maximaler) Rekuperationsleistung auch weniger Energie rückgewonnen wird. Mit steigender Bordnetzlast verschiebt sich die optimale Rekuperationsgeschwindigkeit nach oben und die rekuperierbare Energiemenge je 100 m nach unten.

5 Bewertung der Ergebnisse

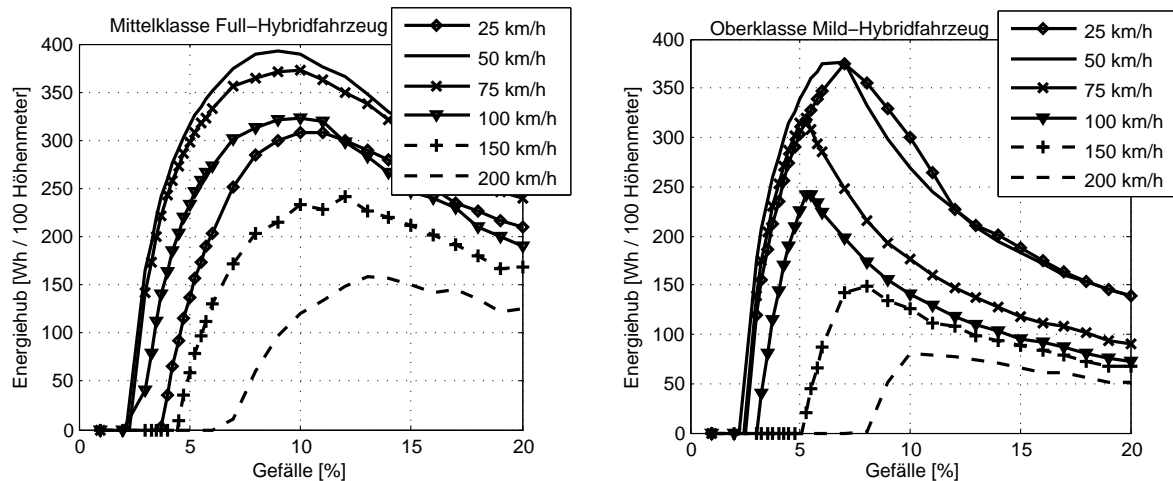


Abbildung 5.2: Theoretisch rekuperierbare Energie je 100 Höhenmeter bei Full- und Mild-Hybridfahrzeug in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Gefälle

b) Zyklendefinition

Die Simulation von synthetisch definierten Höhenprofilen dient zunächst der Funktionsvalidierung (Abbildung 5.3). Bei diesen Zyklen variieren Steigung und Gefälle jeweils zwischen 4 % und 6 %, ein ebener Auslauf von mindestens 5 km Länge sorgt für das abschließende Ausgleichen des SOC in verschiedenen Simulationsläufen, um Vergleichbarkeit herzustellen.

Um einen Potenzialnachweis auf realen Straßen zu erbringen, wurden zusätzlich Szenarien im deutschen Straßennetz simuliert: eine Fahrt von Merklingen über die Schwäbische Alb nach Weilheim an der Teck sowie eine typische Bergabfahrt im Alpenraum bei Spitzing. Es handelt sich um reale Höhenprofile gekoppelt mit fiktiven Geschwindigkeitsverläufen. Startbedingung für die Simulationen war ein SOC von 60 % sowie eine Bordnetzlast von 2000 W, die sowohl die Leistungsaufnahme des Nieder- als auch des Hochvoltbordnetzes samt elektrischem Klimakompressor beinhaltet. Dem Modell des *predictionBlock* wurde in der Simulation das gleiche Höhen- und Geschwindigkeitsprofil zugewiesen, welches auch dem Fahrzeugmodell vorgegeben war.

Tabelle 5.3 zeigt einen Überblick über die simulierten Zyklen. Zusätzlich wurde das gesamte hessische Autobahnnetz mit einer Gesamtlänge von 2205 km (Deutsche Gesamtautobahnlänge 2006: 12174 km [61]) und einer Geschwindigkeit von 100 km/h in beiden Fahrtrichtungen simuliert. Da diese Höhenprofile aber kein signifikantes Potenzial für die Prädiktion aufwiesen, sind sie in Tabelle 5.3 nicht aufgeführt.

Die nun näher beschriebenen Höhenprofile wurden mit dem prädiktiven Mild-Hybridmodell unter systematischer Variation der erwähnten Parameter wie Prädiktionshorizont oder Lade-/Entladeleistung simuliert.

5 Bewertung der Ergebnisse

Bezeichnung	Länge [km]	Dauer [s]	Geschw. [km/h]
Synthetisch 4 %	> 16	> 800	80 - 70 - 80
Synthetisch 5 %	> 16	> 800	80 - 70 - 80
Synthetisch 6 %	> 16	> 800	80 - 70 - 80
BAB A8	33,5	1450	54 - 100 - 54
Spitzingsee	27,2	1280	80 - 60 - 80

Tabelle 5.3: Übersicht Höhenprofilzyklen

c) Synthetisches Profil

Da die Ergebnisse der geometrischen Profile unterschiedlicher Steigungen qualitativ gleich ausfallen und sich lediglich quantitativ unterscheiden, wird hier nur auf das synthetische Gefälle mit 6 % Steigung eingegangen. Bild 5.3 zeigt die Verläufe des Ladezustands und des Verbrauchs der statischen und prädiktiven, modellbasierten Betriebsstrategie mit 7 km Prädiktionshorizont und lediglich 2 kW Entladeleistung im Vergleich.

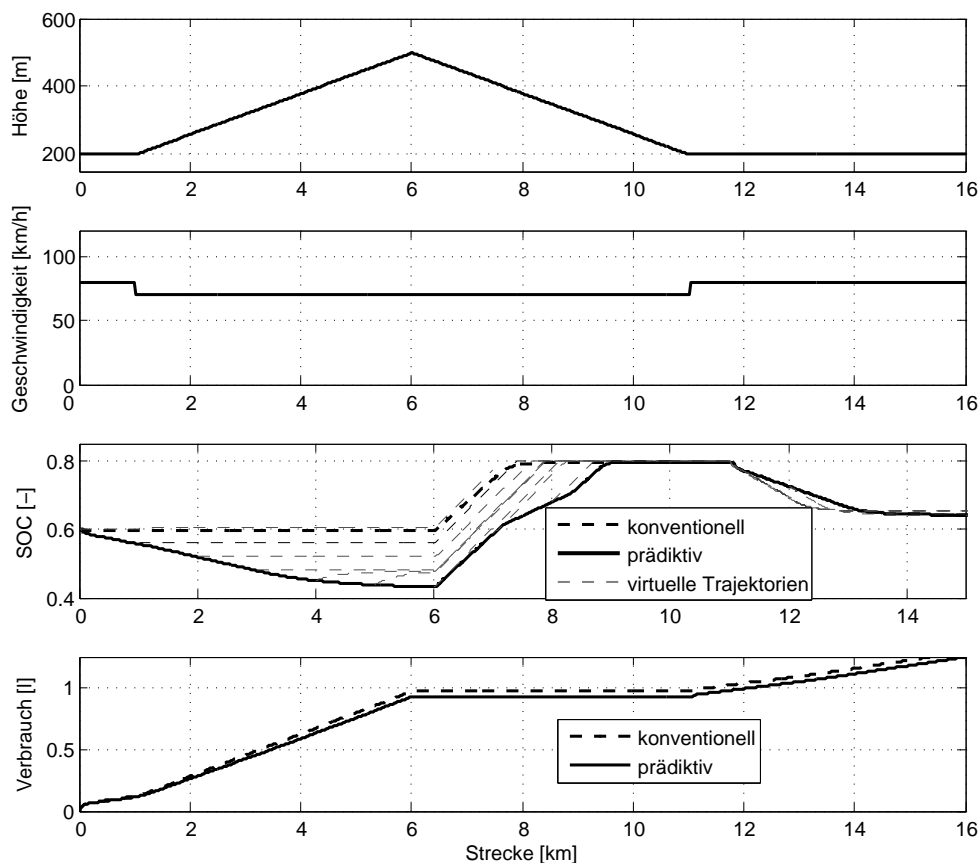


Abbildung 5.3: SOC-Verlauf und Verbrauch im synthetischen Gefällezyklus

Aufgrund des großen Vorausschauhorizonts wird von Anfang an prädiktiv entladen und der Verbrennungsmotor somit weniger belastet. Ab Streckenkilometer sechs rekuperieren beide Modelle bis zur völligen Ladung des Speichers. Durch die prädiktive

5 Bewertung der Ergebnisse

Speicherconditionierung kann die Batterie am Hang fast 2 km länger geladen werden. Die Begrenzung der Überlastung der E-Maschine auf eine Minute verursacht den Ladeleistungseinbruch ab dem siebten Kilometer. Die Rekuperationsleistung wird hier für die Dauer von einer Minute degradiert und erst im Anschluss wieder in den Überlastbereich angehoben. Auf den simulierten 15 km ergibt sich ein Minderverbrauch von 43,4 ml oder 3,5 %.

Abbildung 5.3 zeigt zudem die vom *predictionBlock* errechneten SOC-Trajektorien in regelmäßigen Abständen. Der Gradient des prädizierten Ladezustands über der Strecke entspricht unter diesen synthetischen Bedingungen gut dem tatsächlichen Gradienten, so dass von einer validen Prädiktion des vereinfachten Fahrzeugmodells ausgegangen werden kann.

Variiert man im gegebenen Zyklus Prädiktionshorizont und Entladeleistung, ergeben sich die in Abbildung 5.4 dargestellten Verbrauchseinsparungen: Ein kurzer Horizont sorgt in Verbindung mit geringer Entladeleistung für einen Einbruch der Ersparnis, da spät und nicht in ausreichendem Maße auf das kommende Gefälle reagiert wird. Bei Prädiktionshorizonten von über 4 km fällt die Ersparnis ab etwa 4 kW Entladeleistungen aufgrund steigender Batterieverluste wieder leicht ab.

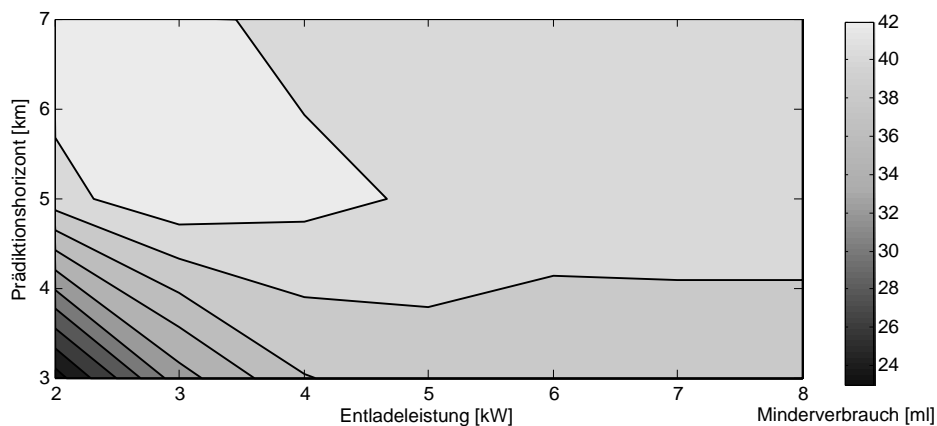


Abbildung 5.4: Minderverbrauch des Mild-Hybridfahrzeugs über Entladeleistung und Horizont

d) BAB A8

Das Mild-Hybridmodell wurde in den realitätsnahen Zyklen mit einem Horizont von 5 km simuliert. Abbildung 5.5 zeigt den Vergleich des konventionellen und des vorausschauenden Mild-Hybridfahrzeugs bezüglich SOC und Verbrauch bei Simulation des Autobahnzyklus. Es ergibt sich ein Minderverbrauch von 33,3 ml auf knapp 34 km, was auf dieser Strecke 1,5 % weniger Kraftstoffverbrauch entspricht.

5 Bewertung der Ergebnisse

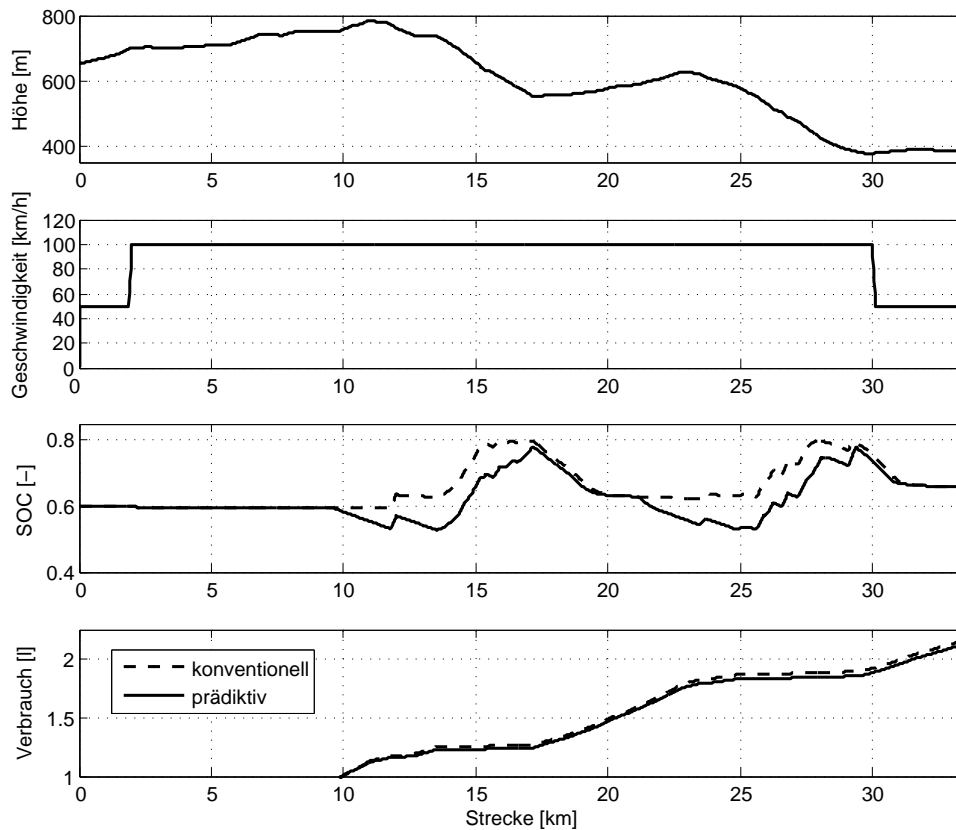


Abbildung 5.5: SOC-Verlauf und Verbrauch im Autobahnzyklus

e) Spitzingsee

Die Fahrt von Neuhaus in der Nähe des Spitzingsees nach Reischenhart im Inntal wurde ebenfalls mit einem Horizont von 5 km simuliert. Variiert wurden dabei die Entladeleistungen. Abbildung 5.6 zeigt das simulierte Höhenprofil mit den korrespondierenden Größen Geschwindigkeit, Ladezustand und Absolutverbrauch. Die konventionelle Ladestrategie sorgt für eine Einschränkung der Rekuperation ab etwa km 13. Das prädiktive Entladen beginnt ca. fünf Kilometer bevor das statische Modell die obere Speichergrenze erreicht. Im Anschluss erreicht der Ladezustand auch bei der prädiktiven Regelung seinen Maximalwert, so dass die elektromotorische Antriebsunterstützung vor dem Gefälle vollständig aus wiedergewinnbarer Energie gespeist wird. Sie bewirkt auf den nachgestellten 27,2 km einen Minderverbrauch von 42,8 ml oder 2,7 %.

f) Fazit

Die Simulationsergebnisse zeigen die deutliche Abhängigkeit der Höhenprofilprädiktion von den Parametern Prädiktionshorizont und Entladeleistung. Ein über mehrere Kilometer konstantes Gefälle birgt theoretisch die größte Verbrauchsreduktion, tritt in Realität aber kaum auf. Erreicht das Fahrzeug zwischen zwei kürzeren Gefällen einen ebenen Streckenabschnitt, so beginnt auch ohne Prädiktion umgehend die Entladung des Speichers auf seinen Soll-Wert, so dass wieder Vorhalt für weitere Reku-

5 Bewertung der Ergebnisse

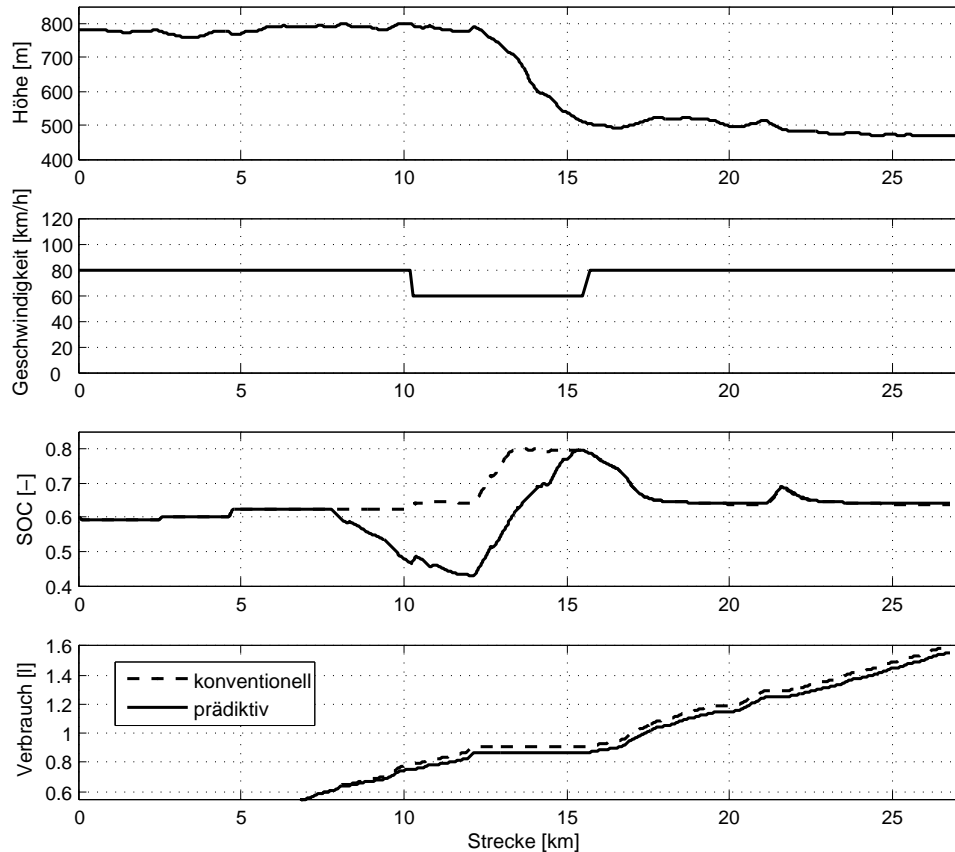


Abbildung 5.6: SOC-Verlauf und Verbrauch im Spitzingseezyklus

perationen geschaffen wird. Die zwei simulierten, realitätsnahen Szenarien verdeutlichen dennoch den Nutzen der Höhenprofilprädiktion auf ausgewählten Strecken und mit begrenztem Energiespeicher. Bei Verhältnissen zwischen Fahrzeugmasse, E-Maschinenleistung und Energieinhalt des Speichers wie im betrachteten Full-Hybridfahrzeug, zeigt sich kein Potenzial, da gängige Gefälle im deutschen Straßenverkehr den Energiespeicher nicht überfordern. Fahrzeuge mit dem hier simulierten Mild-Hybridantriebsstrang können je nach Einsatzgebiet allerdings bis zu knapp 3 % Treibstoffersparnis erreichen. Voraussetzung für diesen Wert ist das Auftreten von rund vier signifikanten und von der Sensorik im Voraus erkannten Gefällefahrten je 100 km Fahrtstrecke - eine Häufigkeit wie sie in gebirgigen Regionen nicht unüblich erscheint.

5.2.3 Verkehrsflussabhängige Betriebsstrategien

a) Zyklendefinition

In Abbildung 5.7 sind die Geschwindigkeitsprofile der vier herangezogenen Zyklen zu sehen. Zur Funktionsvalidierung wurde ähnlich wie bei der höhenprofilabhängigen Ladezustandsregelung ein synthetischer Zyklus definiert und simuliert (links oben). Dieser besteht aus einer Überlandfahrt mit anschließender Einfahrt in eine 30er Zone.

5 Bewertung der Ergebnisse

Ein Streckenabschnitt gegen Zyklusende mit einer Geschwindigkeit von 54 km/h dient dem SOC-Ausgleich, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Dem *predictionBlock* wurde in diesem Fall das exakte Geschwindigkeitsprofil zugewiesen.

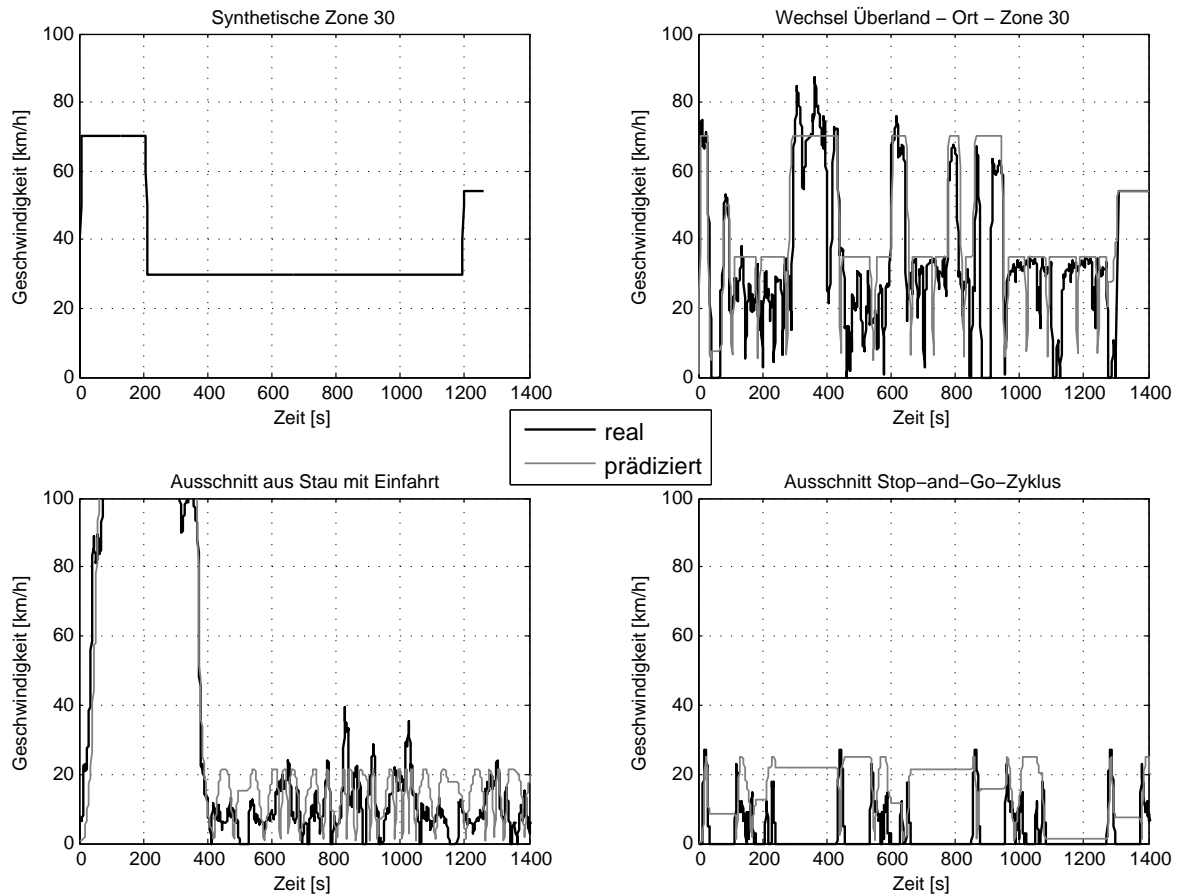


Abbildung 5.7: Prädizierte und reale Geschwindigkeitsprofile von synthetischem und realem 30er-Zonen-Zyklus sowie zwei Stauzyklen

Um den Nachweis der Effizienzsteigerung in realen Fahrzyklen zu erbringen, wurde eine Fahrt mit Übergängen von Landstraße zu Ortschaft und 30er-Zonen simuliert (rechts oben). Diese Messfahrt wurde im Süden Münchens aufgezeichnet und nachträglich geglättet, um die Einflüsse von Diskretisierung und Messrauschen zu verringern. Am Ende wurde wiederum ein Streckenabschnitt mit 54 km/h angefügt, um den SOC zu egalisieren. Zu sehen ist zum einen die reale Geschwindigkeit während der Messung und zum anderen das diskretisierte Profil, welches dem *predictionBlock* als Rechengrundlage diente und in etwa einer funktional in realen Steuergeräten umsetzbaren Prädiktionsgüte entspricht. Hier wurde die modellbasierte Ladezustandsprädiktion also bewusst mit unscharfen Daten versorgt, um zu untersuchen, ob auch bei dieser eingeschränkten Datengüte schon mit einem Verbrauchseinsparpotenzial zu rechnen ist.

Zwei weitere Simulationszyklen beziehen sich auf Stauszenarien, zum einen zur Simu-

5 Bewertung der Ergebnisse

lation der prädiktiven Batterieladung zur Ausweitung des elektrischen Fahrens, zum anderen zur Bewertung der stauspezifischen Betriebsstrategie. Abbildung 5.7 zeigt links unten einen Ausschnitt aus einem Autobahnstau mit zuvor erfolgreicher Stau-einfahrt. Die hellere Linie zeigt wieder das über der Zeit aufgetragene prädizierte Geschwindigkeitsprofil als Eingangsinformation des *predictionBlocks*. Dieses wurde ursprünglich als Geschwindigkeitsverlauf über der Strecke definiert und besteht im Stau aus einem Muster, welches sich alle 150 m wiederholt, regelmäßige Stillstandsphasen beinhaltet und bezüglich der Durchschnittsgeschwindigkeit einem typischen Autobahnstau entspricht. Ziel war es wiederum, mit einer funktional realisierbaren Datengüte der Prädiktion zu simulieren und nicht von einer Idealprädiktion auszugehen. Durch die Interpolation von der Strecke auf die Zeit ergibt sich der ungleichmäßig wirkende Eindruck des prädizierten Profils.

Um die Auswirkungen der stauspezifischen Betriebsstrategie in unterschiedlichen Szenarien bewerten zu können, wurde zusätzlich ein Stauprofil mit besonders vielen langen Standphasen herangezogen (Ausschnitt in Abbildung 5.7 rechts unten). Hierzu wurde das gemessene Geschwindigkeitssignal geglättet und zwölf mal aneinander gehängt. Zusätzlich wurde wieder eine 54 km/h Konstantfahrt zum Zwecke des SOC-Ausgleichs angehängt. Das Geschwindigkeitsprofil für die Prädiktion ähnelt dem des Autobahnstaus: Auch hier ergibt sich das unregelmäßige Profil aus der Interpolation von Strecke auf Zeit. Der prozentuale Zeitanteil an Standphasen ist bei diesem Zyklus mit 72,4 % hoch und erinnert an einen Stadtstau - etwa vor einer Ampelkreuzung. Dieses Szenario ist für die stauspezifische Strategie prädestiniert, da die MSA-Phasen aufgrund ihrer Dauer bei entsprechendem Bordnetzverbrauch durch einen Verbrennungsmotor-Zustart unterbrochen werden müssen. Es wird daher erwartet, dass die bewusste, prädiktive Einschränkung des elektrischen Fahrbereichs zugunsten der MSA-Funktion unter diesen Bedingungen ein Verbrauchseinsparpotenzial birgt.

Alle Geschwindigkeitsprofile wurden mit einem Start-SOC von 50 % und einer Bordnetzlast von 2000 W simuliert. Tabelle 5.4 zeigt im Überblick die maximalen Längen und Simulationsdauern der betrachteten Zyklen.

Bezeichnung	Länge [km]	Dauer [s]
Synthetisch 70 - 30	ca. 13	1260
30er Zonen	13,4	1400
Stau mit Einfahrt	23,3	4350
Stop-and-Go	6,4	5040

Tabelle 5.4: Übersicht Geschwindigkeitsprofile

b) Synthetischer Zyklus

Abbildung 5.8 zeigt zweifach den gleichen Geschwindigkeitsverlauf sowie die korrespondierenden Hybridzustände, allerdings unter Variation des Prädiktionshorizonts. Es fällt auf, dass das Modell mit 5 km Voraussicht und 8 kW prädiktiver Ladeleistung hier über 2,5 km weiter elektrisch fährt als das statische.

5 Bewertung der Ergebnisse

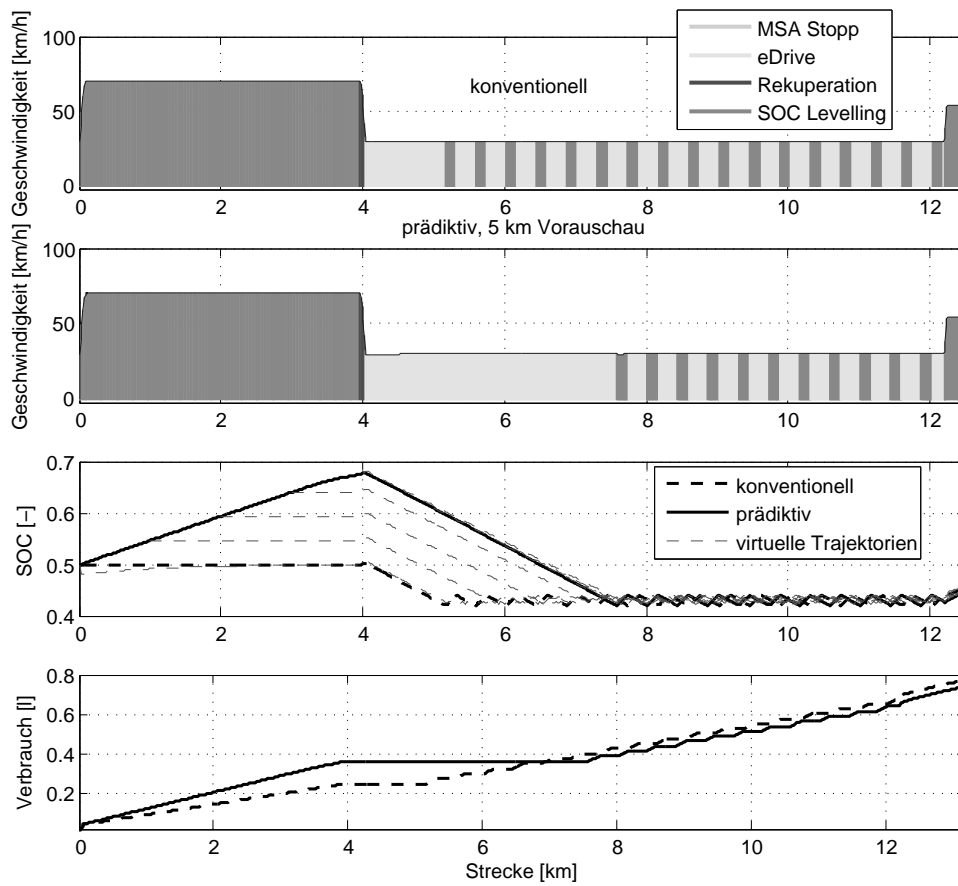


Abbildung 5.8: Hybridzustände, SOC und Verbrauch von konventioneller und prädiktiver Strategie im synthetischen Zyklus

Die sich mit der Ausdehnung der elektrischen Fahranteile ergebende Verbrauchersparnis von bis zu etwa 4 % zeigt Abbildung 5.9 (und Tabelle A.1 im Anhang). Die Ergebnisse mit 7 km Horizont sind nicht aufgeführt, da die im Zyklus zur Verfügung stehende Strecke vor dem elektrischen Fahrbetrieb kleiner als 7 km ist und sich die Ergebnisse somit nicht von denen mit 5 km Horizont unterscheiden.

Analog zum Vorgehen bei der Gefälledetektion zeigt auch Abbildung 5.8 die Funktionsweise der vorausschauenden Ladezustandsregelung. Der *predictionBlock* erzeugt die virtuellen Ladezustandstrajektorien, mithilfe derer entschieden wird, ob prädiktiv ge- oder entladen wird. Hinsichtlich des SOC-Gradienten bei elektrischer Fahrt zeigt sich eine gute Übereinstimmung der virtuellen Trajektorien mit dem tatsächlichen Verlauf. Dies spricht erneut für eine valide Modellierung des rückwärtsrechnenden *predictionBlock* im Vergleich zum vorwärtsrechnenden Gesamtfahrzeugmodell.

Zur Beantwortung der Frage nach der optimalen Ladeleistung zeigt Abbildung 5.9 die Kraftstoffeinsparung sowie die elektrischen Fahranteile über der prädiktiven Ladeleistung bei 5 km Vorausschau. Der beste Kompromiss stellt sich bei etwa 7-8 kW Ladeleistung und einer Verbrauchersparnis von 4,3 % auf den 13 km ein: Darüber

5 Bewertung der Ergebnisse

hinaus steigert sich die Verfügbarkeit des elektrischen Fahrens nur noch gering, während der Verbrauch aufgrund der dann höheren Speicher- und E-Maschinenverluste wieder zunimmt. Die Anomalie im Verbrauch bei 7 kW Leistung ist eine Folge eines unterschiedlichen Ladezustandes am Ende des Zyklus. SOC-bereinigt liegt der Wert auf dem Niveau von 8 kW Ladeleistung.

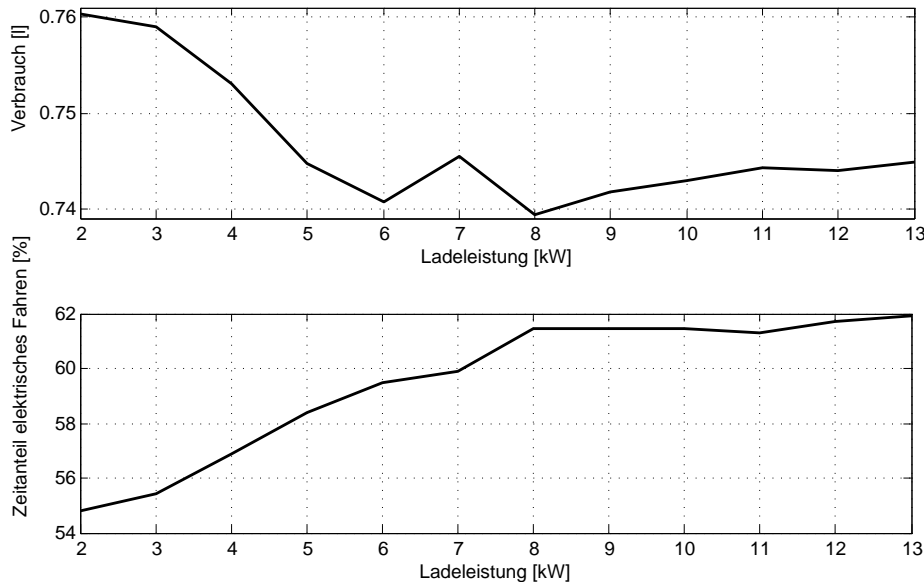


Abbildung 5.9: Verbrauch und Zeitanteil des elektrischen Fahrens im synthetischen Zyklus unter Variation der prädiktiven Ladeleistung

c) Reale 30er Zonen

Nach dem Nachweis einer validen Prädiktion unter synthetischen Bedingungen erfolgte die Simulation der realitätsnäheren Zyklen. Abbildung 5.10 zeigt die Hybridzustände des Full-Hybridfahrzeugs in Verbindung mit dem Geschwindigkeitsverlauf über der Strecke. Außerdem ist der zugehörige Ladezustand und Kraftstoffverbrauch für die herkömmliche und prädiktive Strategie mit 5 km Prädiktionshorizont sowie 7 kW Ladeleistung ersichtlich. Die Darstellung zeigt die Auswirkung des höheren Ladezustands auf die Verfügbarkeit des elektrischen Fahrens: Im Bereich zwischen Kilometer zehn und zwölf erfolgen bei prädiktiver Ladestrategie deutlich weniger Zustarts des Verbrennungsmotors. Die höheren elektrischen Fahranteile sorgen im betrachteten Zyklus für eine Kraftstoffersparnis von 17,5 ml oder 1,7 %.

Tabelle A.2 im Anhang zeigt die Simulationsergebnisse. Ein Horizont über 5 km erwies sich bei diesem Zyklus als unnötig. Abbildung 5.11 dokumentiert die Verfügbarkeit der elektrischen Fahrfunktion und den Kraftstoffverbrauch unter Variation der Ladeleistung. Das Optimum liegt hier erneut in der Region um 7 kW. Eine weitere Erhöhung bewirkt Einbußen beim Verbrauch, ohne die elektrischen Fahranteile weiter steigen zu lassen.

5 Bewertung der Ergebnisse

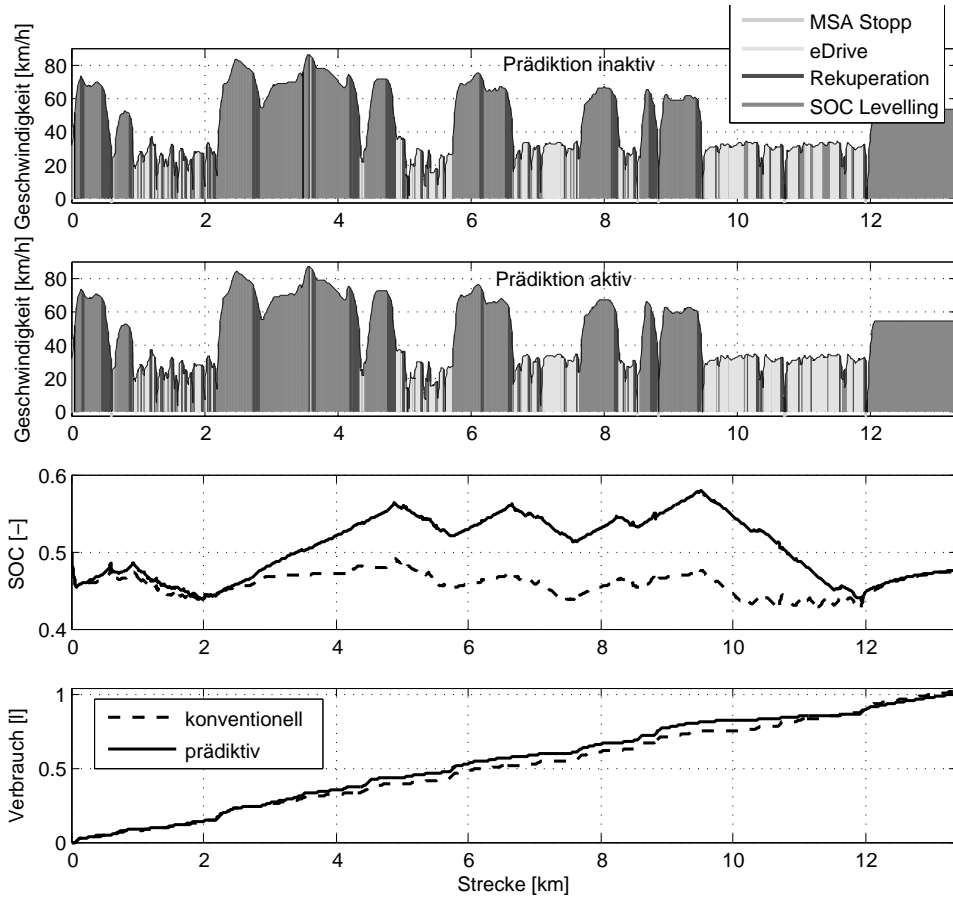


Abbildung 5.10: Hybridzustände, SOC und Verbrauch bei konventioneller und prädiktiver Strategie im realen Zyklus

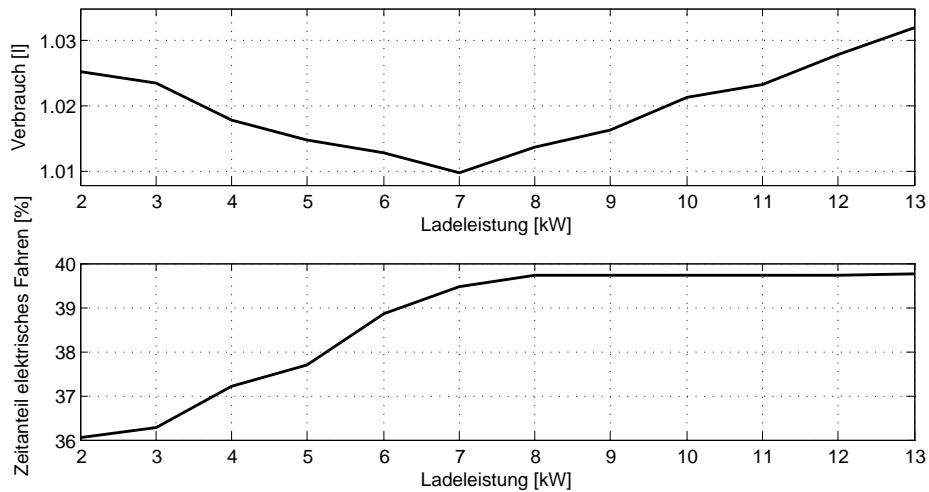


Abbildung 5.11: Verbrauch und Zeitanteil des elektrischen Fahrens im 30er-Zonen-Zyklus unter Variation der prädiktiven Ladeleistung

d) Stauprädiktion

Abbildung 5.12 zeigt das Geschwindigkeitsprofil des Zyklus mit den jeweiligen Hybridzuständen sowie die korrespondierenden SOC-Verläufe¹. Während des Staus ermöglicht die prädiktive Ladestrategie deutlich größere elektrische Fahranteile (Bereich zwischen km 10 und km 13). Aus dem Ladezustandsverlauf ist ersichtlich, dass das vorausschauende Fahrzeug beinahe 1,5 km länger von der elektrischen Fahrfunktion profitiert. Dies resultiert in einer Verbrauchersparnis von 55,1 ml Kraftstoff, oder 4,1 % auf den simulierten 15 km. Die Zusammenfassung der Ergebnisse aller Simulationsläufe zeigt Tabelle A.3 im Anhang.

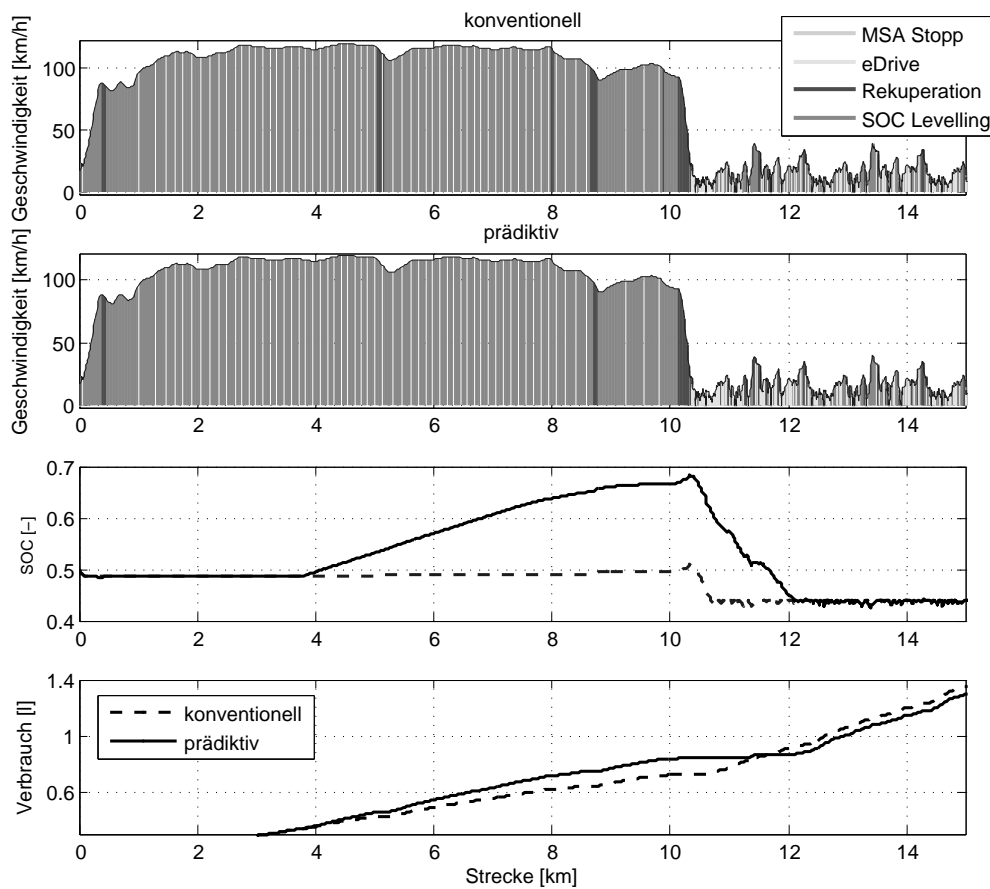


Abbildung 5.12: Hybridzustände, SOC und Verbrauch bei konventioneller und prädiktiver Strategie im Stauzyklus

Graphisch dargestellt ist das Optimum hinsichtlich Verbrauchersparnis schnell ersichtlich: Abbildung 5.13 zeigt den Minderverbrauch in Abhängigkeit von Ladeleistung und Prädiktionshorizont. Wie erwartet, steigt der Verbrauchsvorteil mit dem Prädiktionshorizont und der Ladeleistung, da bei Einfahrt in den Stau mehr Energie

¹ An einigen Stellen sind in den oberen beiden Diagrammen vertikale helle Linien zu sehen. Diese entsprechen nicht dem Zustand elektrisches Fahren, sondern sind auf die Erzeugung der Darstellung in Matlab zurückzuführen.

5 Bewertung der Ergebnisse

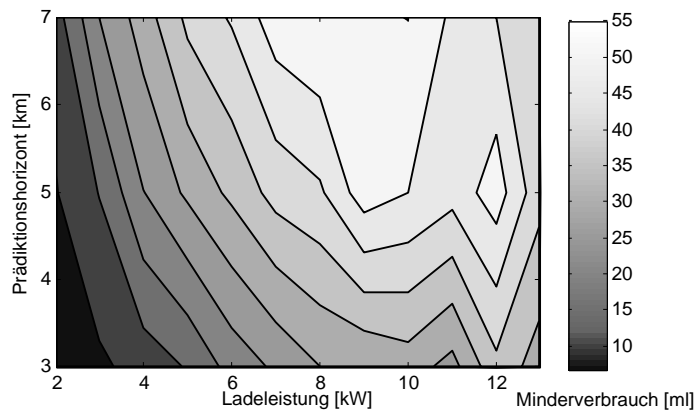


Abbildung 5.13: Minderverbrauch des Full-Hybridfahrzeugs über Ladeleistung und Horizont

für das elektrische Fahren zur Verfügung steht. Ab einer Ladeleistung von etwa 8-9 kW sinkt der Vorteil allerdings wieder, da die steigenden Verluste durch die höhere elektrische Fahrverfügbarkeit nicht mehr kompensiert werden.

e) Stauspezifische Betriebsstrategie

Zur Untersuchung der Einschränkung des elektrischen Fahrens im Stau wurden die Parameter des nicht-prädiktiven Modells derart angepasst, dass schon beim Überschreiten niedrigerer Geschwindigkeiten als den ursprünglich gesetzten 50 km/h der Zustand des elektrischen Fahrens verlassen wird. Die folgenden Ergebnisse zeigen, dass durch die Beschränkung des elektrischen Fahrens auf sehr niedrige Geschwindigkeiten Kraftstoff gespart werden kann. Die Geschwindigkeitsobergrenze wurde dabei zwischen 10 und 50 km/h variiert.

eDrive [km/h]	$\frac{\text{eDrive Dauer}}{\text{Zyklus Dauer}}$ [%]	Δ Verbrauch [ml]	Δ Verbrauch [%]
50	47,5	-	-
30	47,5	5	0,2
25	47,4	34	1,6
20	47,5	51	2,3
15	45,1	101	4,6
10	37,3	33	1,5

Tabelle 5.5: Simulationsergebnisse der stauspezifischen SOC-Regelung im Full-Hybridfahrzeug, Stauzyklus

Tabelle 5.5 führt die Ergebnisse dieser Variationen auf. Interessanterweise bleiben die elektrischen Fahranteile bis zu einer Begrenzung der elektrischen Fahrfunktion unter 20 km/h in etwa konstant. Die Einschränkung bei höheren Geschwindigkeiten sorgt dafür, dass bei niedrigeren Geschwindigkeiten, wenn der Verbrennungsmotor besonders ineffizient arbeitet, mehr Energie zum elektrischen Fahrbetrieb zur Verfügung

5 Bewertung der Ergebnisse

steht. Es kommt zu weniger Motorstarts, da die langsamen Fahrphasen durchgängiger im elektrischen Modus durchfahren werden können. Zu signifikanten Einbußen bei den Zeitanteilen des elektrischen Fahrens kommt es erst bei 15 km/h und weniger als Obergrenze, während der Kraftstoffverbrauch sein Minimum bei einer Obergrenze von 15 km/h erreicht. Abbildung 5.14 zeigt die zugehörigen Ladezustandsverläufe: Die längeren zusammenhängenden Phasen der Lastpunktanhebung bei Geschwindigkeiten über 15 km/h und der resultierende höhere Energieinhalt der Batterie für folgende elektrische Fahrphasen sind gut zu erkennen.

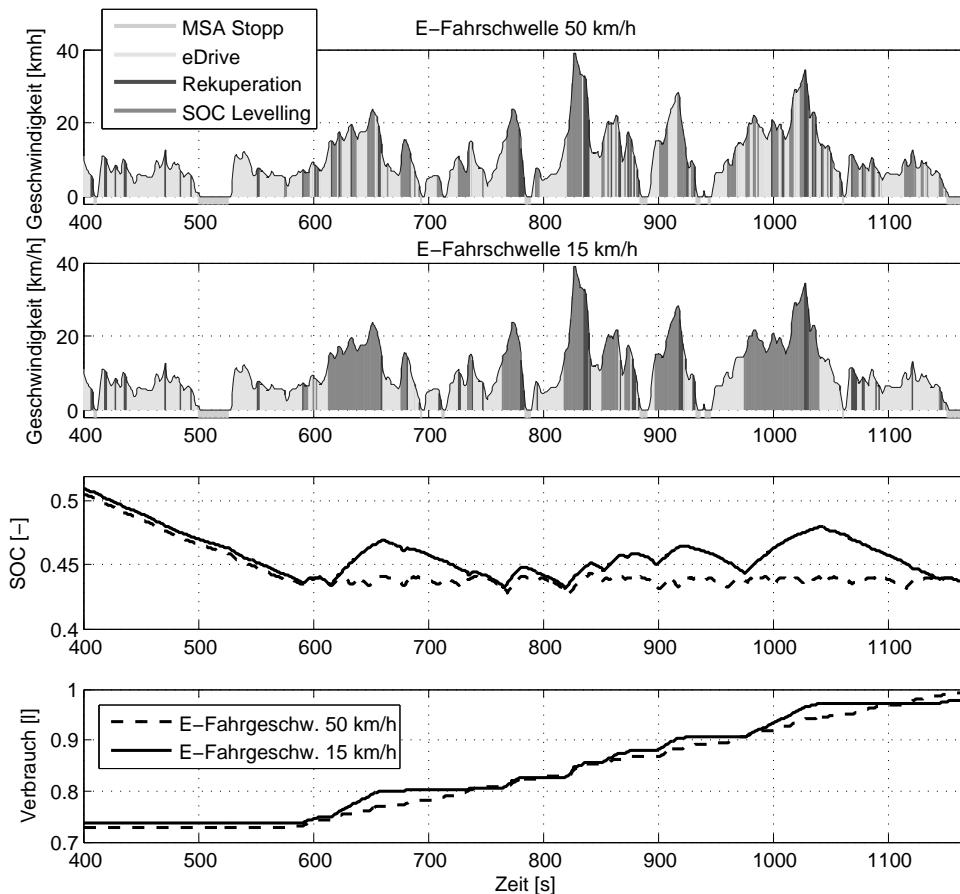


Abbildung 5.14: SOC und Verbrauch bei Einschränkung des elektrischen Fahrbereichs im Stauzyklus

eDrive [km/h]	$\frac{\text{eDriveDauer}}{\text{ZyklusDauer}}$ [%]	$\frac{\text{MSADauer}}{\text{ZyklusDauer}}$ [%]	Δ Verbrauch [ml]	Δ Verbrauch [%]
52	10,2	56,8	-	-
20	10,5	57,1	20	1,1
15	9,3	59,7	75	4,0
10	7,7	61,2	146	7,8

Tabelle 5.6: Simulationsergebnisse der stauspezifischen SOC-Regelung im Full-Hybridfahrzeug, Stop-and-Go-Zyklus

5 Bewertung der Ergebnisse

Im zweiten Stauzyklus mit einem noch höheren Standanteil und niedrigeren Spitzengeschwindigkeiten wurde die Obergrenze der Geschwindigkeit für elektrisches Fahren zwischen 10 und 20 km/h variiert. Die Ergebnisse der Simulationsläufe sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst. Wie die Ergebnisse und auch Bild 5.15 belegen, ist der Verbrauchsvorteil der adaptiven Strategie hier auf die dadurch verbesserte MSA-Verfügbarkeit zurückzuführen. Die kurzen Fahrphasen werden statt zum elektrischen Fahren zum Laden der Batterie genutzt, so dass der Verbrennungsmotor im Fahrzeugstillstand länger gestoppt bleiben kann. Mit dieser Anpassung wird auf den 6,4 km des Stop-and-Go-Zyklus eine Verbrauchssenkung um 146 ml oder 7,8 % realisiert.

Vergleicht man die Standphasen zwischen 240 s und 430 s, zwischen 660 s und 850 s sowie nach 1.080 s, so fällt auf, dass die nicht-adaptive Betriebsstrategie einen zweimaligen Start des Verbrennungsmotors durchführt, um den Bordnetzverbrauch von 2 kW zu decken. Bei 10 km/h elektrischer Höchstgeschwindigkeit sinkt der zeitliche elektrische Fahranteil zwar von 10,2 % auf 7,7 %, allerdings steigt der MSA-Anteil von 56,8 % auf 61,2 %.

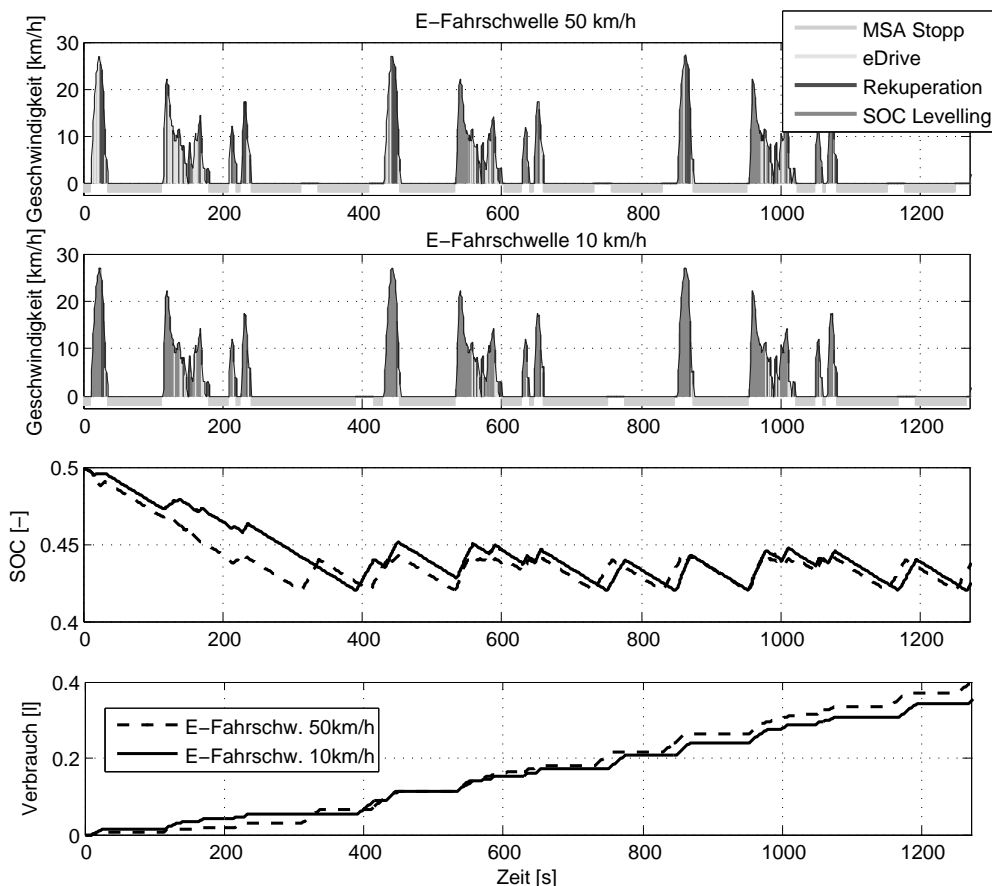


Abbildung 5.15: SOC und Verbrauch bei Einschränkung des elektrischen Fahrbereichs im Stop-and-Go-Zyklus

f) Fazit

Die Auswertung der Zyklen zeigt den großen Nutzen einer Prädiktion von ausgedehnten elektrischen Fahrphasen mit Potenzialen bis zu 7,8 % geringerem Verbrauch. Durch vorausschauendes Anheben des Speicherladezustands werden sowohl der Verbrauch reduziert als auch die elektrischen Fahranteile erhöht. Der Fahrer profitiert also zweifach. Die Einschränkung des elektrischen Fahrens auf niedrigere Geschwindigkeitsbereiche hat gezeigt, dass im Stau auch ohne Prädiktion erhebliche Verbrauchsminierungen gegenüber der Basisstrategie möglich sind, wobei die zeitlichen Anteile des elektrischen Fahrens sogar noch erweitert werden können.

5.2.4 Fahrleistungssteigernde Funktionen

a) Fahrstilabhängige SOC-Regelung

Vor der simulationsgestützten Analyse der Anhebung des mittleren Ladezustands für die Dauer von sportlicher Fahrweise sei angemerkt, dass eine derartige Anhebung nicht bei allen Fahrzeugkonzepten notwendig oder gar sinnvoll ist. Denn das Maß, in dem eine Anhebung des mittleren Ladezustands angestrebt werden sollte, ist stark vom Hybridisierungsgrad und der Gesamtsystemleistung abhängig. Man stelle sich unterschiedlich stark hybridisierte Fahrzeuge mit ebenfalls variierenden Systemantriebsleistungen vor: Beim Durchfahren ein und desselben Fahrzyklus, bestehend aus einer Vollastbeschleunigungsphase von Geschwindigkeit $v_0 = 80$ km/h auf $v_1 = 120$ km/h und anschließend konstanter Verzögerung von v_1 zurück auf v_0 mit 3 m/s^2 , stellen sich unterschiedliche Bilanzen zwischen verbrauchter elektrischer Energie beim Boostvorgang sowie rückgewonnener Energie während der Bremsphase ein (Abbildung 5.16). Mit steigender Gesamtantriebsleistung verkürzen sich die Vollastphasen t_{boost} . Fahrzeuge mit gleicher E-Maschinenleistung verbrauchen mit steigender Gesamtantriebsleistung demnach eine geringere elektrische Energiemenge E_{boost} . Bei gleicher Gesamtantriebsleistung und steigendem elektromotorischen Leistungsanteil nimmt diese Energie hingegen zu:

$$E_{\text{boost}} = \frac{P_{\text{Bat,max}} t_{\text{boost}}}{\eta_{\text{Bat}}} \quad (5.16)$$

Die verbrauchte elektrische Energie nimmt demnach mit steigendem Hybridisierungsgrad und damit auch steigender Batterieleistung $P_{\text{Bat,max}}$ zu. Im Gegensatz dazu wird ab einem gewissen Hybridisierungsgrad bereits das gesamte Energierückgewinnungspotenzial während der Verzögerungsphase ausgeschöpft: Leistungsfähigere E-Maschinen und -Speicher bewirken im gleichen Zyklus dann keinen weiteren Anstieg der wiedergewonnenen Energiemenge; der Unterschied zwischen der durch Boosten verbrauchten und im Anschluss zurückgewonnenen Energie wird immer größer. Gerade Fahrzeuge mit leistungsschwachen Verbrennungsmotoren und relativ dazu stärkerem elektromotorischen Antriebszweig verbrauchen deutlich mehr Energie beim Beschleu-

5 Bewertung der Ergebnisse

nigen, als sie im Anschluss rekuperieren. Interpretiert man einen synthetischen Zyklus wie eben beschrieben als typisches Szenario für dynamische Fahrweise (Volllastbeschleunigung mit anschließender konstanter Bremsphase), so lässt sich schlussfolgern, dass eine SOC-Anhebung für sportliche Fahrer umso sinnvoller ist, je höher der Hybridisierungsgrad ausfällt.

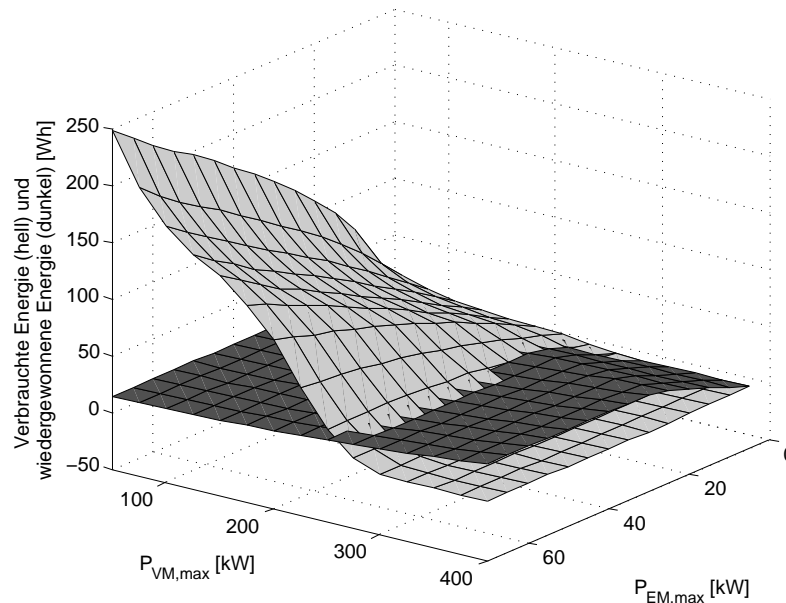


Abbildung 5.16: Durch die Boostfunktion verbrauchte und durch Rekuperation wiedergewonnene elektrische Energie bei Volllastbeschleunigung von 80 auf 120 km/h und anschließender konstanter Verzögerung unter Variation von E-Maschinen- und Verbrennungsmotorleistung

Analysen der in Kapitel 3 vorgestellten Fahrstilklassifikationsmethode ergaben für energetische Anwendungen eine ausreichend gute Übereinstimmung von subjektiv empfundenem Fahrstil und dem vom probabilistischen Netz berechneten Fahrstil. Während einer Referenzmessfahrt von etwa 3500 s Dauer im Münchener Raum konnte eine Übereinstimmung von gut 90 % nachgewiesen werden. Der Fahrer war dazu angehalten, seinen Fahrstil mit dem Hebel zur Intervallwischeinstellung in die Stufen *entspannt*, *normal* und *sportlich* einzuordnen. Es wurde dabei regelmäßig zwischen Autobahn-, Überland- und Stadtverkehr gewechselt. Der Vergleich zwischen kontinuierlichem Netzausgang, diskretisiertem Fahrstilwert des Netzes sowie der gemessenen subjektiven Fahrstilbewertung in Abbildung 5.17 gibt einen Eindruck der Wirksamkeit des Klassifikationsnetzes.

Für den Nachweis des Potenzials einer fahrstilabhängigen Anhebung des mittleren Ladezustands wurden real gefahrene Geschwindigkeitsprofile von dynamisch gefahrener Autobahnfahrt herangezogen, einen Ausschnitt zeigt Abbildung 5.18 (oben). Da der Geschwindigkeitsverlauf mit einem Fahrzeug gemessen wurde, dessen maximale Fahrleistungen leicht unterhalb der hier betrachteten Mild- und Full-Hybridfahrzeuge liegen, konnte er nicht als direkte Soll-Geschwindigkeitsvorgabe für den Fahrregler

5 Bewertung der Ergebnisse

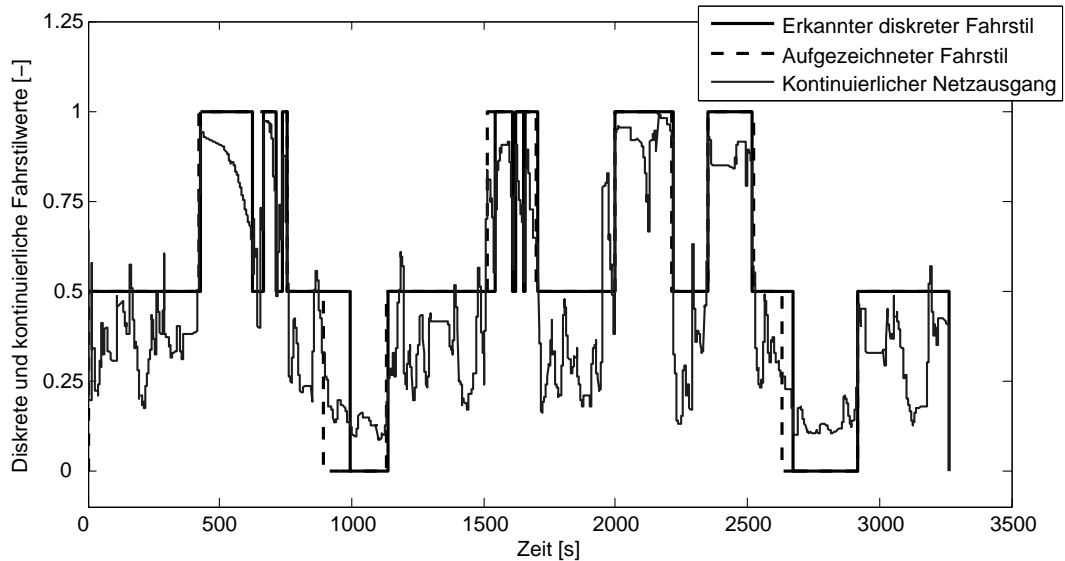


Abbildung 5.17: Güte des Algorithmus zur Fahrstilklassifikation im realen Verkehr unter Variation des Fahrstils

des Modells verwendet werden. Die leistungsfähigeren Fahrzeuge hätten sonst ohne Nutzung der vollen Boostleistung bereits dem Geschwindigkeitsprofil folgen können. Die Messungen wurden deshalb jeweils so angepasst, dass bei Beginn einer real erfolgten Vollastbeschleunigung ein digitaler Sprung in der Soll-Geschwindigkeitsvorgabe hin zum Wert nach Beendigung der Beschleunigung erfolgte. Dies führte zum gewünschten Reglerverhalten, nämlich der Vollastanforderung, wenn es auch sehr geringfügige Änderungen beim zurückgelegten Weg zwischen Realität und Modell bedeutet.

Die systematische Variation der Ladekennlinienparameter während zahlreichen Simulationsläufen lieferte eine Reglerparametrierung, die in den betrachteten Fahrzyklen zur signifikanten Steigerung der Boost-Verfügbarkeit beitrug. Die Verfügbarkeit der Boostfunktion, definiert als

$$Ver_{\text{boost}} := \frac{t_{\text{boost}}}{t_{\text{VL}}} \quad (5.17)$$

konnte im Mild-Hybridfahrzeug von 84 % auf 100 %, im Full-Hybridfahrzeug von 91 % auf 100 % gesteigert werden. t_{boost} entspricht der Zeit, zu der die maximale E-Maschinenleistung zum Antrieb des Fahrzeugs zur Verfügung steht. Abbildung 5.18 (unten) zeigt beispielhaft die Wirkung der fahrstilabhängigen SOC-Regelung am Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit. Die Anhebung des mittleren Ladezustands geht zwangsläufig mit einer Einschränkung der Rekuperationsverfügbarkeit einher. Statt zu 100 % bei konventioneller Applikation der Kennlinie lag sie in den simulierten Autobahnzyklen bei 98 %. Dies sorgt für einen gewissen Effizienznachteil, der allerdings für die Dauer der sportlichen Fahrweise bewusst in Kauf genommen wird.

5 Bewertung der Ergebnisse

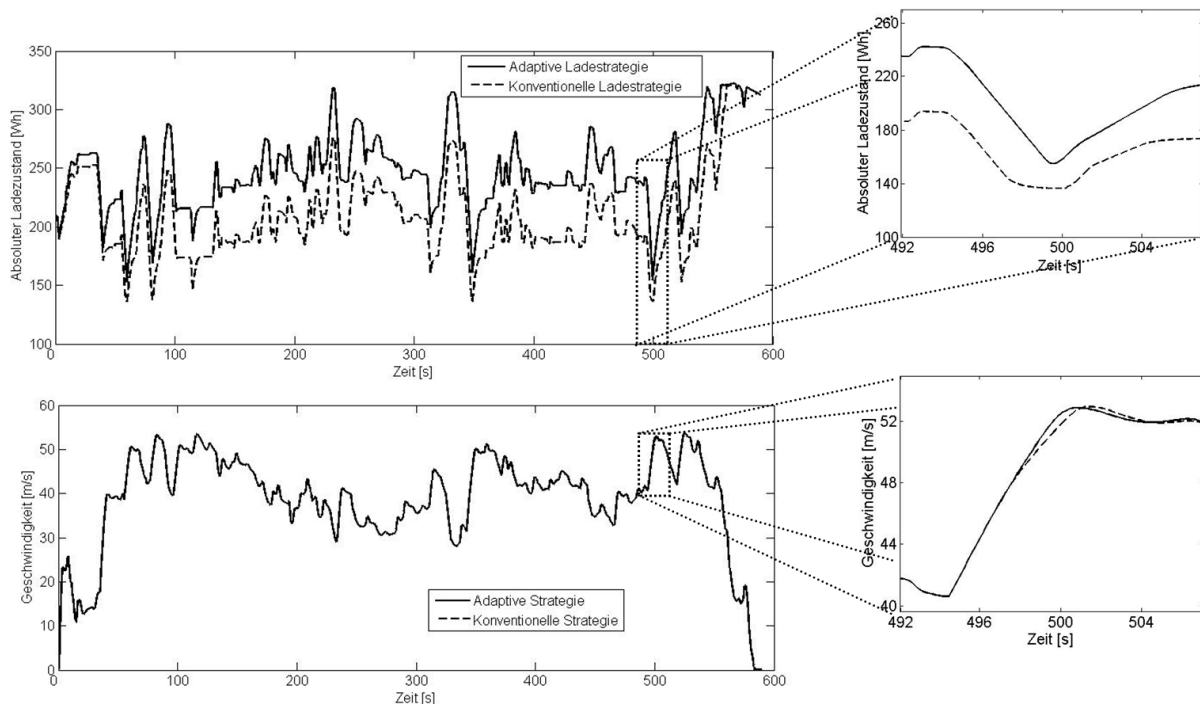


Abbildung 5.18: Vermeidung von Fahrleistungseinbrüchen durch fahrstilabhängige Ladestrategie

b) Konditionierung des Fahrzeugs für Überholmanöver

Zur Identifikation von Überholmanövern, in denen eine Konditionierung des Energiespeichers sinnvoll ist, wurden die bereits in Abschnitt 3.4.3 definierten Parameter v_{Start} und v_{Delta} variiert. Je nach Speicherladezustand steht für eine unterschiedliche Dauer die maximale elektromotorische Leistung als Antriebsunterstützung zur Verfügung. Das vorausfahrende Fahrzeug wird demnach unterschiedlich früh vollständig passiert. Für das hier betrachtete Full-Hybridfahrzeug ergeben sich bei einem Überholvorgang eines Fahrzeugs mit 85 km/h Geschwindigkeit die Beschleunigungskurven aus Abbildung 5.19. Mehr noch als die quantitative zeitliche Verkürzung des Manövers spricht die Form der Kurve mit ausreichend geladenem Speicher für den Mehrwert einer vollständigen Boostverfügbarkeit während des Überholvorgangs. Nur bei ausreichendem Energievorrat zeigt das Hybridfahrzeug eine ähnlich verlässliche und reproduzierbare Fahrleistung wie konventionell angetriebene Fahrzeuge. Die Bewertung des Klassifikationsalgorithmus zur Überholprädiktion erfolgt im nächsten Kapitel, in dem die Funktionen im realen Verkehr untersucht werden.

5 Bewertung der Ergebnisse

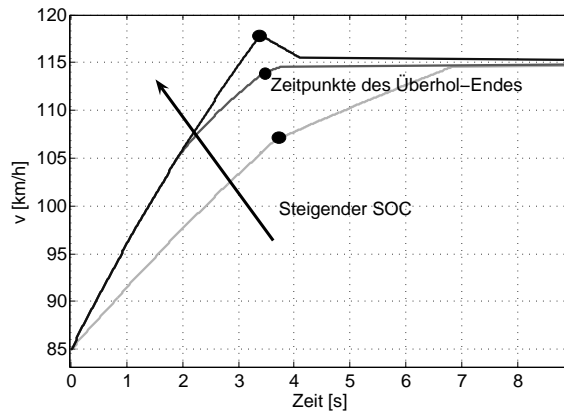


Abbildung 5.19: Verlauf von Überholmanövern in Abhängigkeit des Ladezustands

5.3 Ergebnisse aus Erprobungsfahrten

Erst die Ergänzung der simulierten Verbrauchs- und Fahrleistungspotenziale um Messergebnisse aus dem realen Verkehrsumfeld rundet die Bewertung der Funktionsarchitektur für adaptives Energiemanagement ab. Es ist zwar nicht Anspruch des Versuchsprogramms, statistisch repräsentative, quantitative Aussagen über die Potenziale im realen Fahrzeug zu generieren – der hierfür zu betreibende Aufwand hätte die der Arbeit zur Verfügung stehenden Mittel deutlich überzogen; der Umfang der Versuche sollte aber ausreichend groß sein, um mögliche Schwachstellen in den Funktionen aufdecken und die Arbeit mit einem Ausblick auf deren Beseitigung abschließen zu können.

5.3.1 Versuchsplan und Bewertungsmethode

Die durchgeführten Versuchsfahrten haben das Ziel, unter den gegebenen zeitlichen Rahmenbedingungen so gut wie möglich sicherzustellen, dass wesentliche Mängel der prädiktiven Energiefunktionen identifiziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden die möglichen Fehler gemäß Abbildung 5.20 eingeteilt in:

- *Interne Fehler*
Mit intern sind Fehler gemeint, deren Ursachen in den Funktionen selbst liegen. Es kann sich dabei entweder um Fehler in der Sensordateninterpretation (richtige Eingangsdaten werden falsch interpretiert) oder in den Aktionen des Energiemanagements handeln.
- *Externe Fehler*
Hiermit sind Fehler gemeint, die entweder auf eine eingeschränkte Güte der Eingangsdaten der Funktionen zurückzuführen sind oder auf Fahrsituationen, die mit dem Sensorangebot nicht erfassbar sind.

5 Bewertung der Ergebnisse

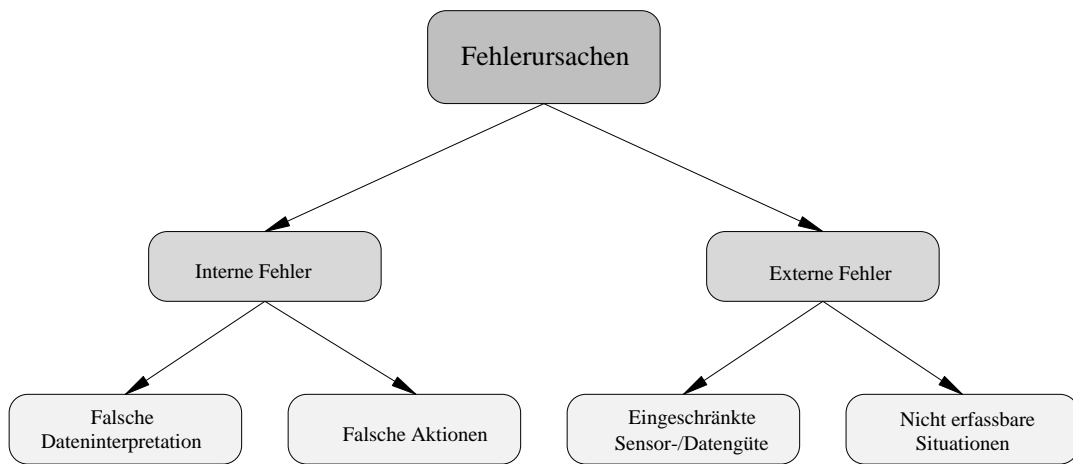


Abbildung 5.20: Fehlerklassen

Die Fehlerursachen sollen durch eine Sensitivitätsanalyse aufgedeckt werden, die allerdings nicht bei allen Funktionen sinnvoll ist. Sie ist vor allem bei den komplexer vernetzten Funktionen wie der Prädiktion von Gefällen, elektrischen Fahranteilen und vor allem Überholsituationen notwendig. Bei den übrigen Funktionen reicht es aufgrund der überschaubaren Anzahl von Sensivitäten, den Funktionsnachweis auf ausgewählten Versuchsstrecken zu erbringen. Die Funktion der Fahrstilklassifikation wurde bereits offline bewertet (siehe Abschnitt 5.2.4).

Funktion	Messstrecken	Variationsgrößen	FN	FN + SA
Gefälleprädiktion	38 Gefällefahrten im Alpenland südlich von München	Bordnetzlast, Fahrstil, Fahrer		x
Prädiktion el. Fahren	22 Einfahrten in 30er Zonen auf Rundkurs in München	Bordnetzlast, Fahrer		x
Überholprädiktion	ca. 650 km Fahrt in Umgebung München, 220 Folgefahrten, 49 Überholmanöver	Fahrstil, Fahrer		x
Stauerkennung	Mehrere Staufahrten (Stadt und BAB)		x	
BAB-Auffahrt, Ortsausfahrt, etc.	Diverse Einfahrten		x	
fahrsituationsabh. E-Fahren	Diverse Einfahrten		x	

Tabelle 5.7: Erprobungsplan für adaptive Energiefunktionen

5 Bewertung der Ergebnisse

Die durchgeführten Versuche fasst Tabelle 5.7 knapp zusammen. Im Detail werden das Vorgehen sowie die jeweiligen Versuchsfahrten in den folgenden Abschnitten erläutert.

Für die Erprobungsfahrten wurde im Versuchsfahrzeug ein Full-Hybridfahrzeug mit einer E-Maschinenleistung von 45 kW und einem relativ geringen nutzbaren Speicherinhalt von 150 Wh emuliert. Die Entscheidung für einen kleineren Speicherinhalt als in den Simulationsmodellen wurde getroffen, um den Messumfang einschränken zu können, weil kleinere Energiespeicher häufiger prädiktive Eingriffe im SOC-Management erfordern, die zur Funktionsevaluierung herangezogen werden können. Der gewählte nutzbare Energieinhalt könnte in Realität etwa durch die in Kapitel 2 beschriebenen Doppelschichtkondensatoren dargestellt werden.

5.3.2 Höhenprofilabhängige Ladezustandsregelung

a) Messstrecken und Bewertungskriterien

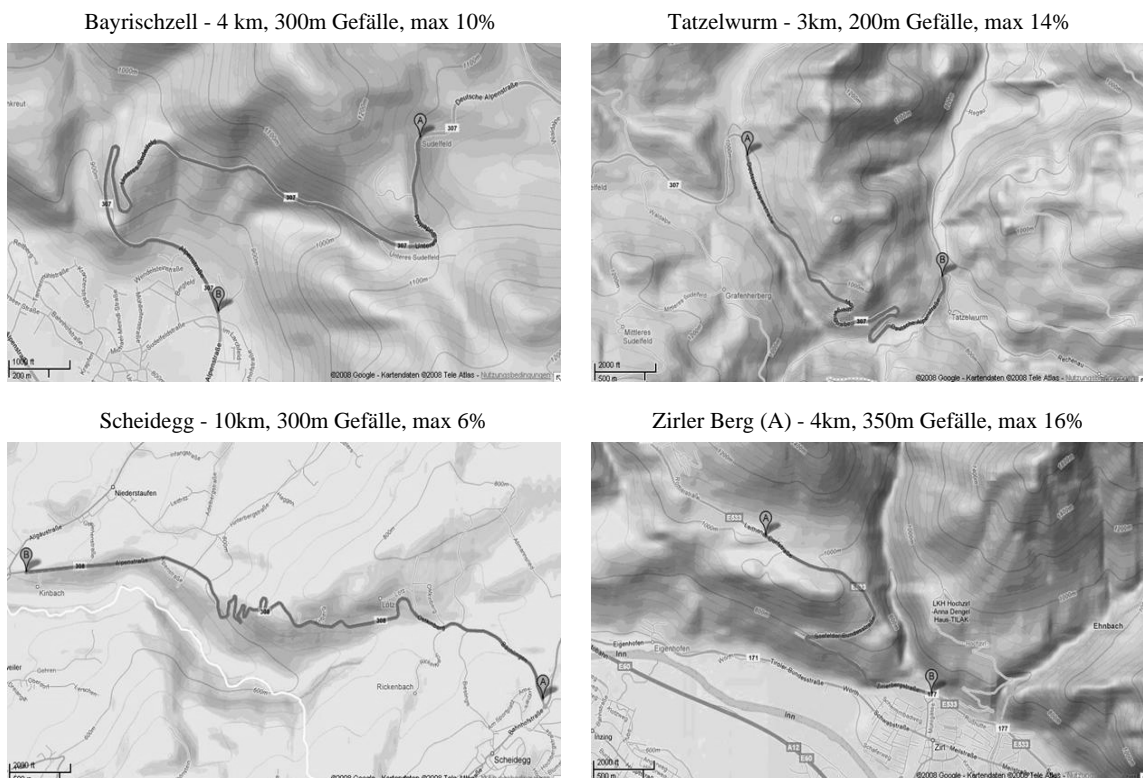


Abbildung 5.21: Zur Analyse der höhenprofilabhängigen SOC-Regelung befahrene Messstrecken [47]

5 Bewertung der Ergebnisse

Zur Bewertung der prädiktiven Absenkung des Ladezustands vor Gefällen wurden abschüssige Landstraßen im Alpenraum südlich von München ausgewählt. Die Verfügbarkeit der Höheninformationen war in der verwendeten digitalen Entwicklerkarte auf ausgewählten Landstraßen höherer Kategorien (Functional Class 0 und 1) gegeben. Es wurden bewusst Straßen mit unterschiedlichen Gefällen und Kurvengeometrien herangezogen, um die Effekte dieser Streckeneigenschaften auf die Prädiktionsgüte nachweisen zu können (Abbildung 5.21). Außerdem wurde der Fahrstil und die Bordnetzleistung variiert. Als Hauptkennzahl zur Bewertung der Prädiktionsgüte dient der Vergleich des prädizierten SOC-Gradienten über der Strecke mit dem sich tatsächlich einstellenden:

$$\text{grad}_{\text{SOC}} := \frac{\Delta \text{SOC} [\text{Wh}]}{\Delta s [100\text{m}]} \quad (5.18)$$

Δs ist die Strecke vom Beginn des Gefälles bis zum Anschlag des nicht prädiktiv geregelten SOC an die obere Ladezustandsgrenze, ΔSOC der korrespondierende SOC-Hub. Bei starken Abweichungen zwischen prädiziertem und tatsächlichem SOC kann es zu Fehlentscheidungen der prädiktiven Ladestrategie kommen, da sie von zu viel oder zu wenig zukünftig rekuperierbarer Energie ausgeht. Die Anteile an falschen und richtigen prädiktiven Entscheidungen werden neben der zusätzlich rekuperierbaren Energiemenge als weitere Kennzahlen der Funktionsgüte herangezogen.

b) Ergebnisse

Am Beispiel einer Bergabfahrt auf der Strecke *Bayrischzell* mit 1 kW Bordnetzlast und normaler Fahrweise zeigt Abbildung 5.23 die resultierenden Hybridzustände sowie SOC-Verläufe mit und ohne Prädiktion. Abbildung 5.22 zeigt zusätzlich die Streckengeometrie aus der Vogelperspektive mit Kilometermarken, die zur Erklärung der gefahrenen Geschwindigkeit herangezogen werden können.

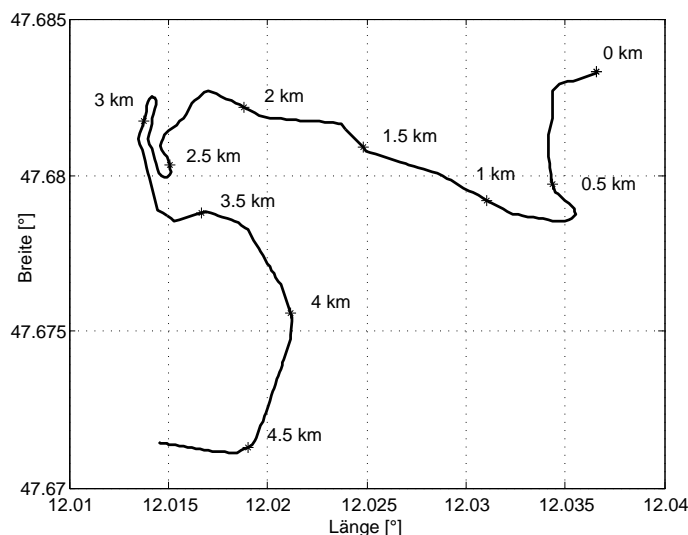


Abbildung 5.22: Koordinaten der Gefällestrecke in Bayrischzell

5 Bewertung der Ergebnisse

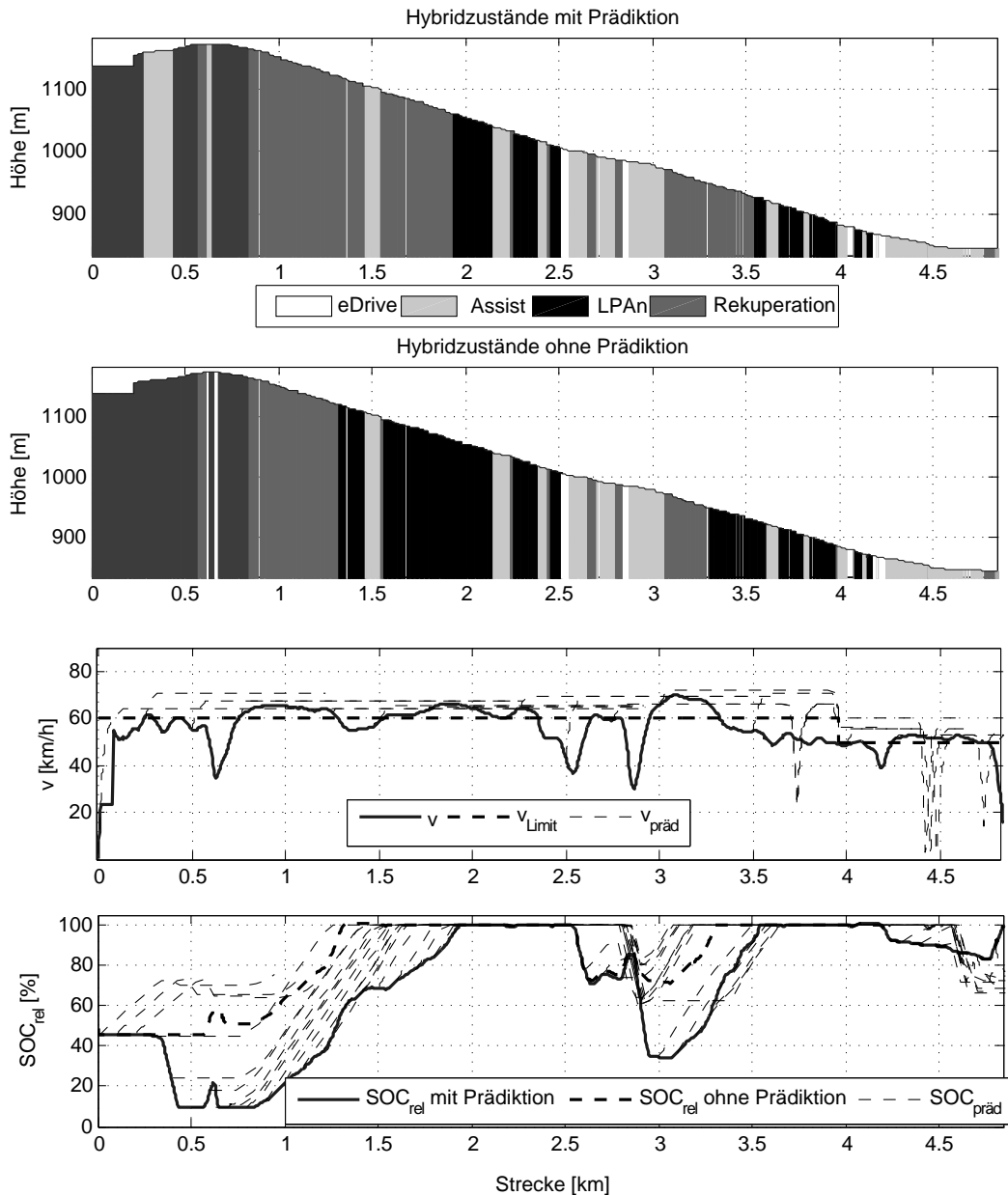


Abbildung 5.23: Hybridzustände, Geschwindigkeits- und Ladezustandsverläufe mit und ohne Prädiktion bei Messungen in Bayrischzell

Außerdem ist die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit im Vergleich zur angenommenen und erlaubten Geschwindigkeit aufgetragen. Die Verfügbarkeit der Rekuperationsfunktion ist durch die Prädiktion der wiedergewinnbaren Energie auf fast einem Kilometer länger gegeben; eingeschränkt ist sie dort, wo der Zustand auf *Lastpunktanhebung* springt (dunkelste Graustufe).

5 Bewertung der Ergebnisse

Einfluss der Geschwindigkeit und Kurvengeometrie

Die Gradienten der SOC-Prädiktionstrajektorien stimmen gut mit dem tatsächlichen Gradienten überein. Vereinzelt kann das Fahrzeug am Gefälle durch elektromotorische Antriebsunterstützung wieder Energie abbauen, da der Fahrer nach stärkeren Verzögerungen wieder beschleunigt. Diesen Sachverhalt spiegeln die vorhergesagten SOC-Trajektorien nicht wider, da die Prädiktion von einer konstanten, nicht von den Kurvenradien abhängigen Geschwindigkeit ausgeht. Dennoch ist die Entscheidung in der Messung aus Abbildung 5.23, den Speicher vor dem Gefälle zu entladen, korrekt und sorgt für ein größeres Rekuperationspotenzial. Im weiteren Verlauf der Bergabfahrt kommt es zu einer zweiten prädiktiven Entladung des elektrischen Energiespeichers, die ebenfalls korrekt ist. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass aufgrund von engen Kurven schwankende Geschwindigkeiten einen negativen Einfluss auf die Prädiktionsgüte haben. Die Gradienten stimmten auf geraden Streckenabschnitten besser überein als auf Serpentin.

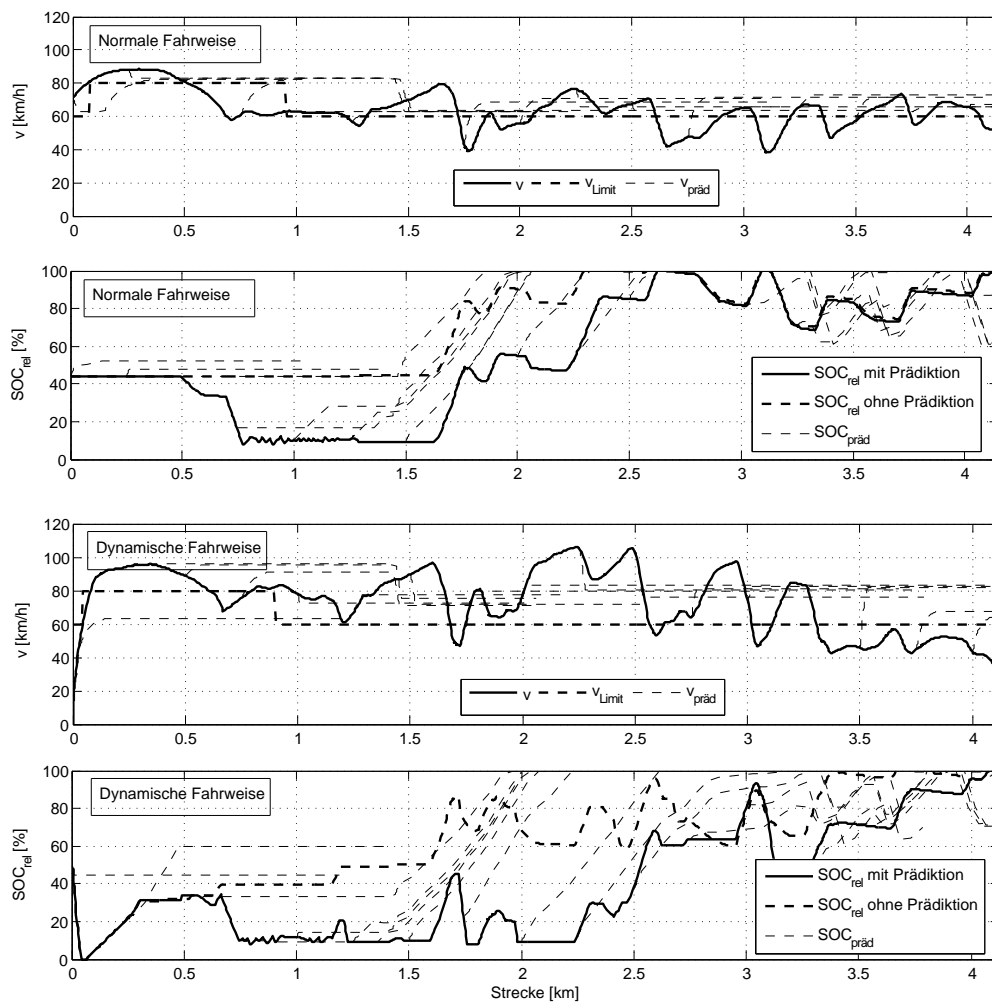


Abbildung 5.24: Einfluss eines dynamischen Fahrstils auf die Ladezustandsprädiktion am Gefälle in Tatzelwurm

5 Bewertung der Ergebnisse

Einfluss des Fahrstils

Beschleunigungsphasen am Gefälle können die Abweichung der SOC-Gradienten zwischen Prädiktion und Realität verstärken, da während dieser der Ladezustand schon am Gefälle wieder abgebaut wird. Entspannte Fahrer zeigen eine geringere Varianz im Geschwindigkeitsprofil an Gefällen, da sie eine niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit aufweisen und nach engen Kurven weniger stark oder gar nicht beschleunigen (Abbildung 5.24). Eine dynamischere Fahrweise mit höheren Spitzengeschwindigkeiten sorgt für häufigere Beschleunigungen und dadurch für eine stärkere Differenz zwischen den betrachteten Gradienten. Die Ladezustandsprädiktion unter Annahme einer konstanten Geschwindigkeit zeigt demnach bei entspannter und normaler Fahrweise eine bessere Qualität als bei sehr dynamischer Fahrweise. Abbildung 5.24 weist diese Sensivität nach: Zwischen vorhergesagtem und tatsächlichem Erreichen der Speicherobergrenze liegen bei entspannter Fahrweise nur ca. 300 m Fahrtstrecke, bei dynamischer Fahrweise hingegen 1300 m.

Einfluss der Bordnetzlast

Um den Einfluss der Bordnetzlast auf die Prädiktionsgüte zu bestimmen, wurde versucht, das bei niedriger Bordnetzlast gefahrene Geschwindigkeitsprofil möglichst gut zu reproduzieren. Abbildung 5.25 zeigt die Messergebnisse auf derselben Gefällestrecke und mit einem sehr ähnlichen Geschwindigkeitsverlauf aber unterschiedlichen Bordnetzlasten. Zu sehen sind die unter diesen Bedingungen sichtbar flacheren SOC-Gradienten, da mehr wiedergewonnene Energie im Bordnetz verbraucht wird und weniger im elektrischen Speicher zwischengespeichert werden muss.

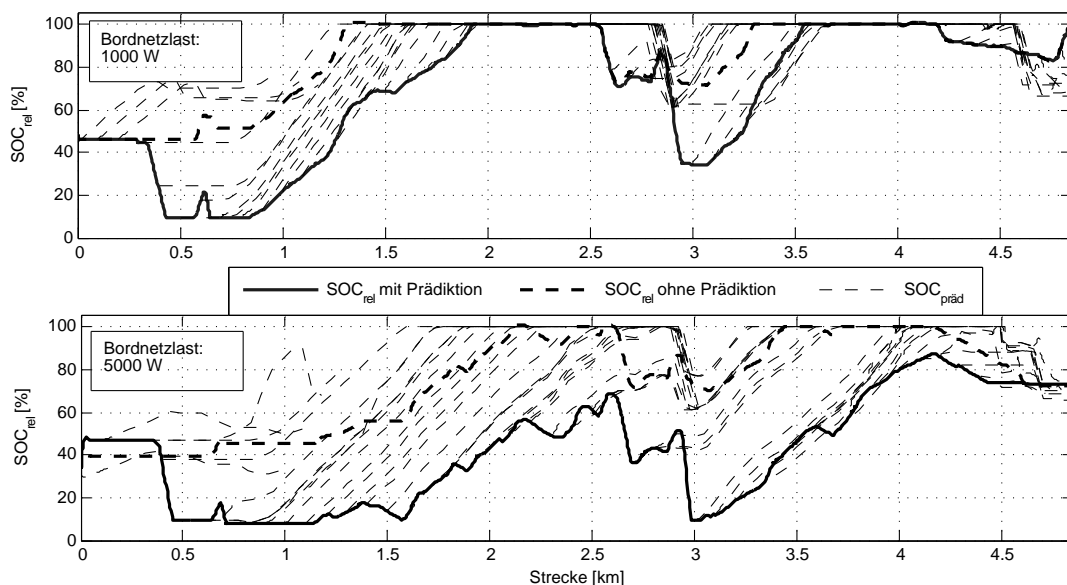


Abbildung 5.25: Einfluss einer stark erhöhten Bordnetzlast auf die Prädiktionsgüte am Beispiel Bayrischzell

Die modellbasierte Prädiktion sieht dieses geringere Rekuperationspotenzial korrekt voraus. Allerdings sorgen die von der Prädiktion nicht vorhergesagten Beschleunigungsphasen bei hoher Bordnetzlast für eine noch stärkere Entladung des elektrischen Speichers (siehe km 1,5) als bei niedrigerer Bordnetzlast. Hierdurch kommt es in der gezeigten Messung mit $P_{BN} = 5000 \text{ W}$ zu einem etwas tieferen Entladevorgang als nötig; der Speicher erreicht bei prädiktiver Regelung nicht mehr ganz seine SOC-Obergrenze.

c) Bewertung

Die höhenprofilabhängige SOC-Regelung zeigt ein zufriedenstellendes Verhalten: Die durchschnittliche absolute Abweichung der realen und prädizierten SOC-Gradienten lag bei $4,8 \frac{\text{Wh}}{100\text{m}}$, im Schnitt konnten beim emulierten Hybridkonzept 41 Wh mehr an elektrischer Energie rekuperiert werden. Bei keiner der 38 gefahrenen Messstrecken sorgte die Regelung für eine prädiktive Entladung, die einen Mehrverbrauch erzeugt hätte; nur vereinzelt waren erfolgte Entladungen unnötig, da der Energiespeicher auch ohne Prädiktion voll aufnahmefähig gewesen wäre (22 % der Fälle in denen prädiktiv entladen wurde, Tabelle 5.8). Die Lastpunktabsenkung zum Abbau von elektrischer Energie im Speicher wurde in diesen Fällen allerdings nur vor das Gefälle gezogen.

Erst bei äußerst sportlicher Fahrweise in Verbindung mit hohen Bordnetzlasten weichen die Gradienten der SOC-Prädiktion von der Realität stark nach oben ab: Als Lösung dieses ungewünschten Einflusses wird an dieser Stelle der Einbezug der Streckengeometrie in die Generierung der Geschwindigkeitstrajektorien nach [33] vorgeschlagen. Hierdurch können auch Beschleunigungsphasen nach engen Kurven vorhergesagt werden, während derer der Ladezustand des elektrischen Speichers durch einen Assist abgebaut werden kann.

	Anteil [%]	Entsch. korrekt [%]
Speicher prädiktiv entladen	72	78
Nicht prädiktiv eingegriffen	28	100

Tabelle 5.8: Bewertung der Prädiktionsentscheidungen an Gefällen

5.3.3 Verkehrsflussabhängige Ladezustandsregelung

a) Versuchsplan und Bewertungskriterien

Die Analyse der vorausschauenden Erweiterung des elektrischen Fahrens erfolgte auf einem Rundkurs im Münchener Norden, der aus einem Wechsel von städtischem Verkehr und 30er Zonen besteht (Abbildung 5.26).

5 Bewertung der Ergebnisse

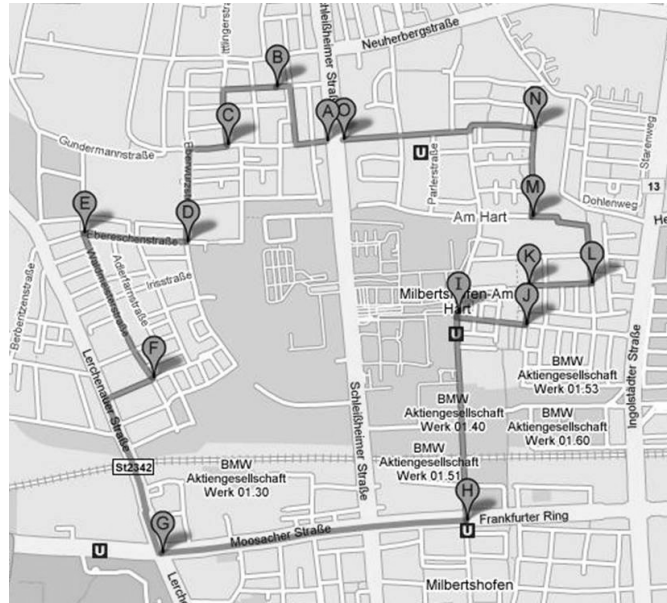


Abbildung 5.26: Rundkurs im Norden von München zur Erprobung der verkehrsflussabhängigen Ladezustandsregelung [47]

Um eine valide Prädiktion zu ermöglichen, wurden die befahrenen Straßen in der ADAS-RP-Software als bevorzugte Segmente definiert, wodurch der MPP stets in die tatsächlich gefahrene Richtung wies. Es wurde wieder versucht, die Parameter Fahrstil und Bordnetzlast zu variieren, wobei eine sportliche Fahrweise im Sinne des Energiemanagements in verkehrsberuhigten Zonen nicht realisierbar ist. Dennoch soll im Folgenden der Einfluss eines dynamischeren Geschwindigkeitsprofils erläutert werden.

Zur Bewertung der Prädiktionsgüte werden ähnliche Kennzahlen wie im vorherigen Abschnitt herangezogen: Abweichung der SOC-Gradienten, zusätzlich durch Prädiktion zur Verfügung stehende Energiemenge für elektrisches Fahren, vermiedene Motorstarts und die quantitative Erweiterung der zeitlichen E-Fahranteile.

b) Ergebnisse

Abbildung 5.27 zeigt den Funktionsnachweis der Prädiktion von elektrischen Fahranteilen. Durch den im Voraus angehobenen Ladezustand ist das vorausschauende Fahrzeug in der Lage, länger im elektrischen Fahrmodus zu bleiben. Obwohl das angenommene Geschwindigkeitsprofil deutliche Differenzen zum realen aufweist, stimmen die prädizierten SOC-Trajektorien in ihrem Gradienten gut mit der Realität überein.

5 Bewertung der Ergebnisse

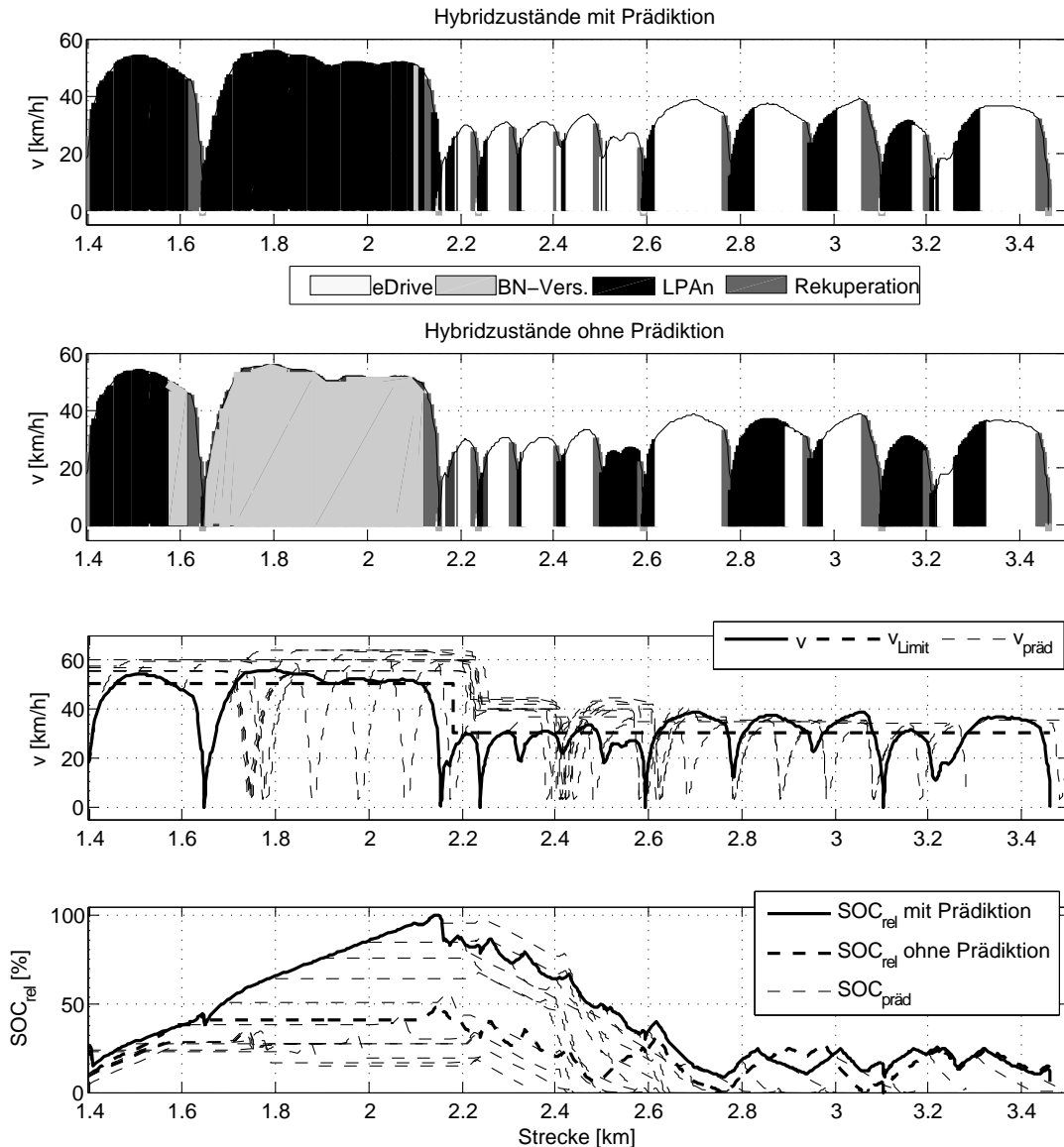


Abbildung 5.27: Ausschnitt aus Hybridzuständen sowie prädizierten Verläufen von Geschwindigkeit und Ladezustand im Rundkurs

Einfluss des Geschwindigkeitsprofils

In Abbildung 5.28 sind sowohl die Effekte des Geschwindigkeitsprofils als auch der Bordnetzlast dargestellt. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf die oberen beiden Diagramme: Zu sehen sind zwei aufeinander folgende Durchfahrten von 30er Zonen mit jeweils davor liegenden Abschnitten normalen städtischen Verkehrs, in denen die prädiktive Aufladung des Energiespeichers erfolgt. Die erste 30er Zone wird anders als von der Prädiktion angenommen mit einer nahezu konstanten Geschwindigkeit gefahren. Sowohl in der Realität als auch der Prädiktion kommt es nicht zu Verbrennungsmotorzustarts – die Ladestrategie kann den Speicher während des Durchfahrens der Zone nicht laden. Die angenommenen und tatsächlichen SOC-Gradienten

5 Bewertung der Ergebnisse

stimmen daher gut überein.

In der zweiten 30er Zone stimmt das angenommene Geschwindigkeitsprofil scheinbar besser mit dem tatsächlichen überein. Beschleunigt der Fahrer allerdings deutlich stärker als von der Vorausschau angenommen, kommt es zu häufigeren Motorstarts als vorhergesehen. Diese ermöglichen es der Ladestrategie, den Speicher wieder kurzzeitig zu laden (siehe Verlauf von SOC_{rel} ohne Prädiktion bei $P_{BN} = 1000\text{ W}$ von km 2,2 bis Messende im Vergleich zu Prädiktionstrajektorien), so dass es zu relativ deutlichen Abweichungen zwischen angenommenen und eintretenden SOC-Gradienten kommt. Im negativsten Fall wird der Energiespeicher dann unnötigerweise prädiktiv geladen. Historische Daten über das Beschleunigungsverhalten des Fahrers könnten herangezogen werden, um diesen externen Fehler im Algorithmus zu umgehen.

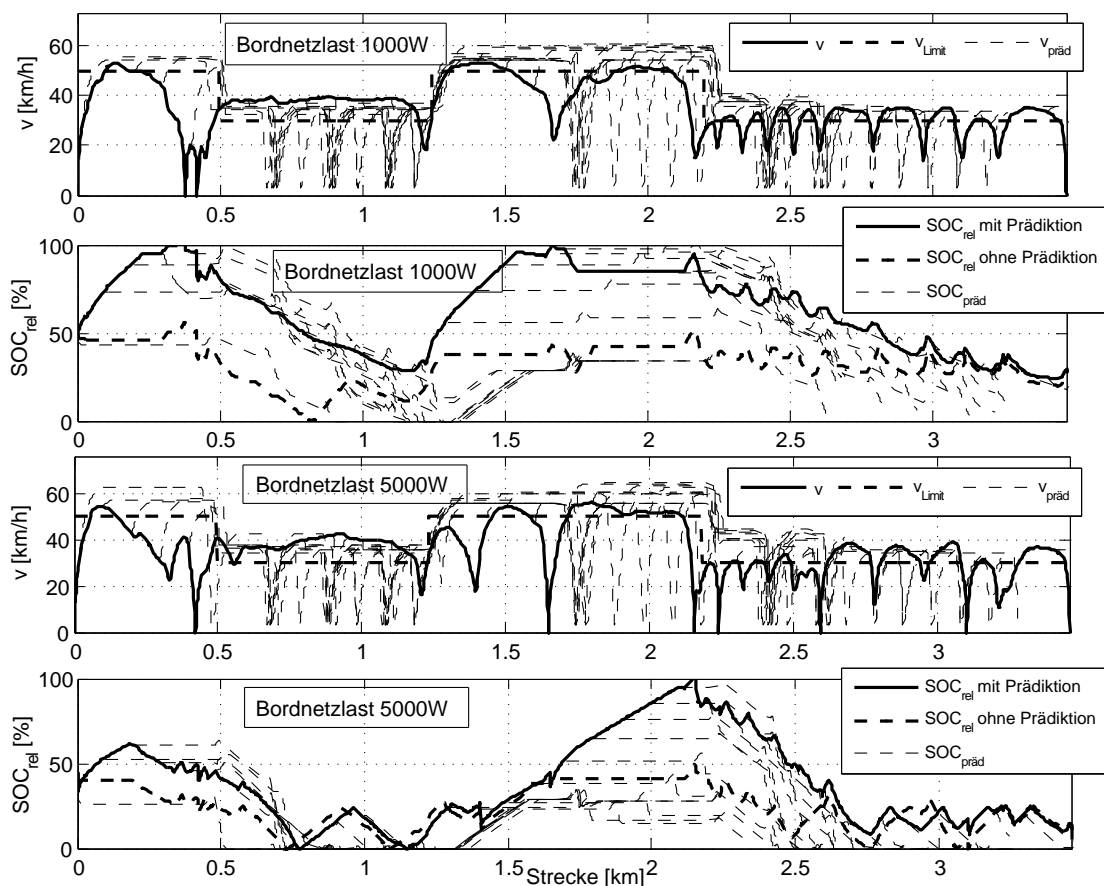


Abbildung 5.28: Einfluss der Bordnetzlast und des Geschwindigkeitsprofils auf die Prädiktionsgüte

Einfluss der Bordnetzlast

Die Bordnetzlast wurde von der modellbasierten Ladezustandsprädiktion korrekt berücksichtigt. Es konnte kein Einfluss der Last auf die Prädiktionsgüte nachgewiesen werden. Die unteren beiden Diagramme aus Abbildung 5.28 zeigen die Durchfahrt

5 Bewertung der Ergebnisse

derselben beiden 30er Zonen mit einer Bordnetzleistung von 5000 W. In beiden Fällen stimmen vorhergesagte und tatsächliche SOC-Gradienten ähnlich gut überein wie bei niedrigerer Bordnetzlast. Stärkere Abweichungen etwa bei km 2,4 sind nicht auf den Bordnetzverbrauch, sondern erneut auf die Tatsache zurückzuführen, dass in Realität auftretende Motorstarts nicht von der Prädiktion vorhergesehen werden.

c) Bewertung

Die prädiktive Ladezustandsregelung zur Erweiterung von elektrischen Fahranteilen erreicht ähnlich gute Ergebnisse wie die für optimale Rekuperation am Gefälle: Ist die Einfahrt in eine verkehrsberuhigte Zone, einen Stau o.ä. im Voraus bekannt (aufgrund aktivierter Routenführung, angelernten Routen, Verkehrsinformationen etc.), so sorgt das vorgestellte Reglerkonzept für eine zuverlässige Erweiterung der elektrischen Fahranteile. In den 22 für Messzwecke durchfahrenen 30er Zonen war eine Steigerung der zeitlichen E-Fahranteile um 12 % bei Vermeidung von durchschnittlich einem Motorstart die Folge. Die mittlere Abweichung der Ladezustandsgradienten lag bei $9,0 \frac{\text{Wh}}{100\text{m}}$. Ein Prädiktionshorizont von 1 km sorgte bei der emulierten Speichergröße für eine Reaktionsstrecke von knapp 800 m und eine zusätzliche Energiemenge für den elektrischen Fahrbetrieb von 66,3 Wh (Tabelle 5.9).

Zeigt der Fahrer aufgrund einer dynamischeren Fahrweise ein stärkeres Beschleunigungsverhalten als von der Prädiktion angenommen, kann es in der Vorausschau zu signifikant steiler abfallenden SOC-Gradienten kommen als in Wirklichkeit, da Motorstarts mit der Möglichkeit, den Speicher wieder aufzuladen, nicht vorhergesehen werden. Diese Abweichungen hatten im Rahmen des Versuchsprogramms jedoch keine negativen Auswirkungen auf den errechneten Verbrauch, sondern bewirkten auch in diesen Fällen eine Verringerung von Motorstarts und eine Erweiterung des elektrischen Fahrens.

Speicher vor Zone 30 geladen	100 %
Entscheidung korrekt	100 %
Mittlere Abweichung SOC-Gradient	$9 \frac{\text{Wh}}{100\text{m}}$
ØReaktionsstrecke	773 m
ØZusätzliche Energie bei Beginn Zone 30	66,3 Wh
ØDelta Zeitanteil el. Fahren	+ 12,3 %
ØVermiedene Motorstarts	1,1

Tabelle 5.9: Auswertung der Prädiktion von elektrischen Fahranteilen

5.3.4 Stauspezifische Betriebsstrategie

a) Versuchsplan und Bewertungskriterien

Für den Funktionsnachweis der stauspezifischen SOC-Regelung wurden 17 Staus in der weiteren Umgebung Münchens durchfahren, teils auf Autobahnen, teils im Stadtgebiet. Das Ziel der Untersuchungen war die Identifikation von Wechselwirkungen zwischen dem Geschwindigkeitsprofil des Staus und dem bewusst konstant gehaltenen Parametersatz der stauadaptiven Betriebsstrategie. Statt den konventionellen elektrischen Fahrgrenzen von 15 kW Antriebsleistung und 50 km/h Geschwindigkeitsobergrenze wurden 9 kW bzw. 20 km/h eingestellt. Die Detektion der Situation *Stau* erfolgte durch einen Klassifikationsalgorithmus, der nicht im Rahmen dieser Arbeit entstand [10]. Er basiert auf der Untersuchung gleitender Mittelwerte der Geschwindigkeit, allerdings bereinigt um Standphasen an Kreuzungen. Dabei gelten je nach Straßenklasse (BAB, Überland, Stadt) unterschiedliche Schwellwerte für die Stauklassifikation. Als Bewertungskriterien für den Funktionsnachweis werden die durchschnittliche Verringerung der Motorzustarts sowie die zeitlichen elektrischen Fahranteile herangezogen.

b) Ergebnisse

Die gewählten Parameter für die adaptive elektrische Fahrstrategie sorgten bei allen Messfahrten für eine deutliche Senkung der Anzahl von Verbrennungsmotorstarts. Der angestrebte Effekt, elektrische Fahrbereiche von Bereichen mit geringerem Verbrauchsvorteil in solche mit sehr niedriger Antriebsleistung und damit höherem Verbrauchsvorteil zu verschieben, kam immer zum Tragen. Dabei war es unerheblich, in welcher Art von Stau sich das Fahrzeug befand: Sowohl in solchen Verkehrsstörungen mit sehr hohen Standanteilen, als auch in eher konstant zähflüssigem Verkehr wurde der gewünschte Effekt erzielt. Auffällig war jedoch, dass der Zeitanteil des elektrischen Fahrens in städtischen Staus mit sehr niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten gegenüber der Basisstrategie gesteigert werden konnten, während er auf den Autobahnstaus überwiegend leicht eingeschränkt wurde.

Abbildung 5.29 zeigt den Funktionsnachweis anhand eines Autobahnstaus auf der A9 Richtung München. Nach Erkennung der Verkehrsstörung bei $t = 190$ s verzichtet die adaptive Strategie zugunsten des elektrischen Fahrens bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten unter 15 km/h immer wieder auf das Abstellen des Verbrennungsmotors bei höheren Antriebsleistungen, so etwa bei $t = 280$ s und $t = 530$ s. Das Resultat bestätigt die Simulationsergebnisse aus Abschnitt 5.2: Die Motorzustarts werden deutlich verringert, es ergibt sich ein konsistenteres Fahrzeugverhalten.

5 Bewertung der Ergebnisse

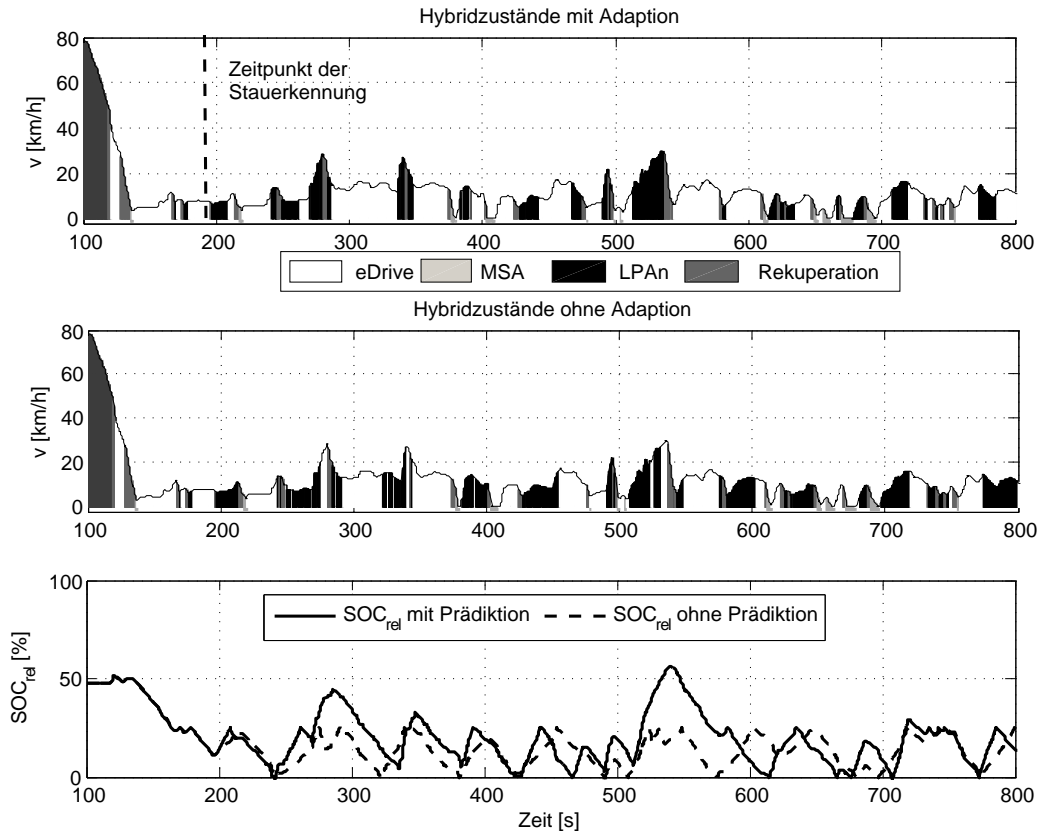


Abbildung 5.29: Funktionsnachweis der stauspezifischen Betriebsstrategie

c) Bewertung

Wie bereits angedeutet, war der Funktionsnachweis der stauadaptiven Strategie erfolgreich. Im Mittel über alle Messfahrten konnten 2,4 Motorstarts je gefahrenen Staukilometer bzw. 32,4 Motorstarts pro Stunde vermieden werden. Die zeitlichen elektrischen Fahranteile wurden trotz der Einschränkung des Betriebsfensters durchschnittlich um 0,7 % gesteigert, gerade in Stadtstaus auch deutlich um bis zu 9 % erhöht. Zusammen mit der von 89 % auf 94 % gesteigerten Verfügbarkeit der MSA-Funktion blieb der Verbrennungsmotor während zusätzlichen 2 % der Messzeiten gestoppt.

Die Einschränkung des elektrischen Fahrens macht allerdings nur dann Sinn, wenn der Energieinhalt des elektrischen Speichers mit den konventionellen Betriebsstrategieparametern nicht für das rein elektrische Durchfahren einer Verkehrssituation ausreicht. Andernfalls sorgt die Strategie für einen Mehrverbrauch, da unnötigerweise Energie im Speicher zurückgehalten wird, die für das elektrische Fahren genutzt werden könnte. Idealerweise sollten telematische Stauinformationen genutzt werden und die Funktion nur in Verkehrsszenarien aktiviert werden, für die der elektrische Energiespeicher nicht ausreicht. Außerdem sollte das Stauende vom Klassifikationsalgorithmus schnell erkannt werden, um zügig wieder auf konventionelle Betriebsstrategieparameter wechseln zu können. Als Abbruchkriterium für das Vorliegen einer Stausituation hat sich bei den Messfahrten die Überschreitung des momentan geltenden Geschwin-

digkeitslimits oder eines Schwellwertes für einen definierten Zeitraum bewährt. Hierdurch kann das Risiko eines Mehrverbrauchs durch die Funktion stark eingeschränkt werden.

5.3.5 Prädiktion von Überholsituationen

a) Versuchsplan und Bewertungskriterien

Die Bereitstellung eines Mindestladezustands für ein potenzielles Überholmanöver birgt das Risiko eines unnötigen Mehrverbrauchs an Kraftstoff, wenn eine Überholsituation in Wirklichkeit unwahrscheinlich ist. Die Versuchsfahrten zur Bewertung der Überholprädiktion mussten ausreichend umfangreich sein, um alle Sensivitäten aufzudecken, die zu Fehlern führen können. Ziel war der Vergleich zwischen subjektiv empfundener und vom Klassifikationsalgorithmus berechneter Überholwahrscheinlichkeit. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zu diesem Zweck von mehreren Fahrern unterschiedlichste Überlandstrecken im Raum München mit einer Gesamtlänge von 625 km befahren, wobei der Fahrstil zwischen entspannt und dynamisch variiert wurde. Dabei konnten 222 Folgefahrten aufgezeichnet werden, bei denen es in 49 Fällen zu Überholmanövern kam.

Um neben den Funktionssignalen auch subjektive Einschätzungen und Umfeldinformationen wie Tempolimits, Überholverbote etc. festhalten zu können, wurde ein Diktiergerät verwendet, mit dem der jeweilige Fahrer seine Auffassung der Verkehrssituation aufzeichnen konnte. Hierdurch war es möglich, Fehldetektionen des Algorithmus auf ihre Ursachen zurückzuführen und entsprechend Abbildung 5.20 einzuteilen.

b) Ergebnisse

Abbildung 5.30 zeigt den Zusammenhang der wichtigsten Signale für eine der 49 aufgezeichneten und ausgewerteten Überholsituationen: Kurz nach km 74 schert ein langsam fahrendes Fahrzeug vor dem Versuchsträger ein. Die Folge ist eine stark ansteigende Differenz v_{Diff} zwischen gewünschter und gefahrener Geschwindigkeit von bis zu 60 km/h. Aufgrund der sehr langsamen Folgefahrt bei ausreichend gerader Straßengeometrie² ergibt sich eine errechnete Wahrscheinlichkeit für ein Überholmanöver von knapp 80 %, was bei km 74,5 zu einer Anhebung des Ladezustands führt - ca. 1 km bevor das Überholmanöver tatsächlich stattfindet. In diesem Beispiel konnte durch das prädiktive Laden auf einer zusätzlichen Strecke von 50 m elektrisch geboostet werden.

Interne Fehleranalyse

Nach Abschnitt 3.4.1 geht der Fahrstil zweifach in das probabilistische Netz zur Überholerkennung ein: einerseits in die Berechnung der Wunschgeschwindigkeit des Fahrers nach Gleichung 3.9, andererseits auch direkt als Attribut für die Risiko- und Überholbereitschaft.

² Der Verlauf des Signals zur Repräsentation der Straßengeometrie ist in der Darstellung zugunsten der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Er lag zum Zeitpunkt des Überholmanövers bei ca. 0,6.

5 Bewertung der Ergebnisse

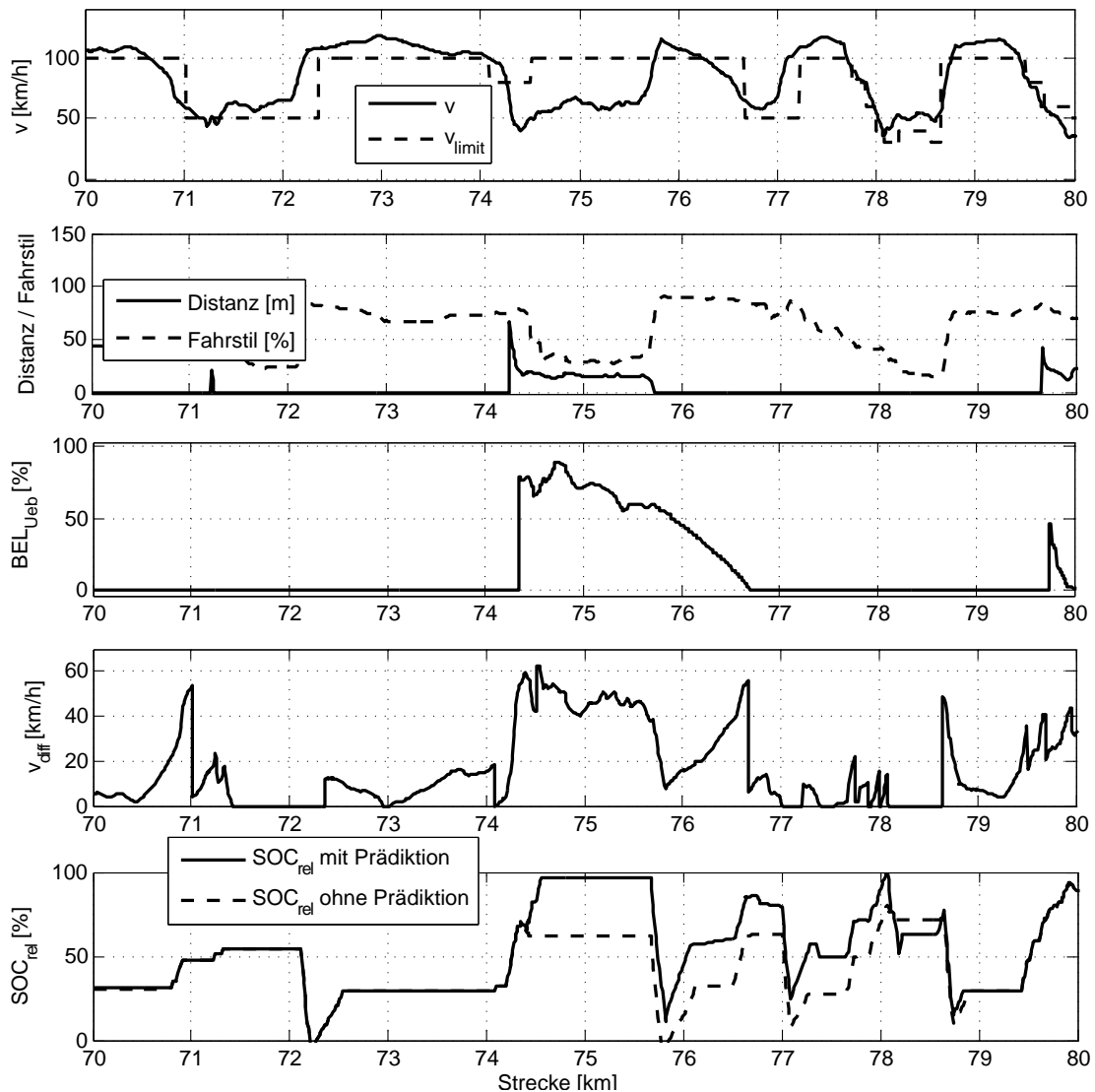


Abbildung 5.30: Funktionsnachweis der Überholprädiktion

Die Erprobungen zeigen, dass die Parameter zur Berücksichtigung dieser zwei Effekte eine etwas zu starke Gewichtung des Fahrstileinflusses bewirkten. So konnten in ein und derselben Verkehrssituation bei einem als entspannt klassifizierten Fahrer äußerst niedrige Überholwahrscheinlichkeiten unter 10 % auftreten, während bei sportlicher Fahrweise eine Wahrscheinlichkeit von über 70 % errechnet wurde. Diese großen Differenzen sorgten jedoch nur in fünf der 222 Folgefahrten für Fehlalarme bzw. Nicht-Detektionen. Dennoch sei hier angemerkt, dass weitere Verbesserungen zu erwarten wären, wenn die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers nicht aus dem Fahrstil allein ermittelt, sondern die Historie der Überschreitung von Geschwindigkeitslimits durch den Fahrer als Basis genommen würde.

5 Bewertung der Ergebnisse

Externe Fehleranalyse

Externe Fehler nach Abbildung 5.20 konnten auf vielfältige Ursachen zurückgeführt werden (vgl. dazu Tabelle 5.10): Die alleinige Nutzung der Grundfunktion des Radarsensors ermöglicht keine Erkennung von Gegen- oder Kolonnenverkehr. Hierdurch kam es in zwölf der 222 Fälle zu Fehlalarmen, da der Algorithmus von einer hohen Überholwahrscheinlichkeit ausging, der Fahrer die Situation jedoch subjektiv als nicht überholtauglich einschätzte.

Des Weiteren waren die Informationen der verwendeten digitalen Karte nicht immer ausreichend genau: Es kam in vier Fällen aufgrund von Fehleinschätzungen der Streckengeometrie zu Fehlalarmen sowie in zwei Fällen zu Nicht-Detektionen wegen fälschlicherweise angenommenem Stadtverkehr, in dem Überholen unwahrscheinlich gewesen wäre.

Ein nicht serienreifer Entwicklungsstand des Kamerasystems sorgte ebenfalls für Fehlklassifikationen: So führten nicht erkannte Tempolimits in acht Fällen zu Nicht-Detektionen, während die zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch nicht implementierte Erkennung von Überholverbotschildern sechs Fehlalarme bewirkte.

Hauptursache waren mit 16 Fehlerfällen jedoch sonstige Fahrsituationen, die aufgrund ihrer Komplexität bis auf absehbare Zeit nicht zweifelsfrei von Seriensensorik identifiziert werden können. So etwa unübersichtliche Verkehrssituationen mit Ampelkreuzungen, mehrspurigen Abzweigungen und in die Straße von rechts einfahrenden Verkehrsteilnehmern. In solchen Fällen schätzten die Fahrer ihren Überholwunsch oft als sehr niedrig ein, obwohl eine hohe Überholwahrscheinlichkeit errechnet wurde.

			Anzahl		
			Fehlalarm	Nicht-Detektion	Summe
Int. Fehler		v_{Wunsch}	1	2	3
		Fahrstil	1	1	2
Ext. Fehler	Radar	Gegenverk.	5	0	5
		Kolonne	7	0	7
	Digitale Karte	Geometrie	4	0	4*
		Stadt/Land	0	2	2*
	Kamera	v_{Limit}	1	8	9*
		Üb.-verbot	6	0	6*
Sonstige			10	6	16

Tabelle 5.10: Häufigkeit von Fehlern nach Ursachen (mit * gekennzeichnete Fehler werden mit serienreifer Sensorik vermieden)

5 Bewertung der Ergebnisse

Prädiktionszeit

Bei den 49 erfolgten Überholmanövern ergab sich eine durchschnittliche Prädiktionszeit von 32,1 s. In 44,1 % der Fälle lag diese Zeit zwischen 10 und 30 s, in 35,3 % der Fälle darüber und in 20,6 % darunter. Im mittleren Prädiktionszeitraum lässt sich in einem Hybridfahrzeug bei einer angenommenen Ladeleistung von gut 5000 W etwa ein Energievorrat von 50 Wh in der Batterie schaffen. Dieser ist beim betrachteten Hybridfahrzeug aus Abbildung 3.20 für die Abdeckung von großen Teilen wahrscheinlicher Überholmanöver ausreichend.

Entscheidungen der prädiktiven Ladestrategie

Neben einer korrekten Situationsklassifikation muss eine adaptive Ladestrategie auch valide Prädiktionen der zu erwartenden Energiemengen vornehmen. In Tabelle 5.11 sind die Ergebnisse der Erprobungsfahrten zusammengefasst. So kam es insgesamt nur in 26,5 % der Fälle zu falschen Entscheidungen der Strategie – eine positive Bilanz für einen Erstsatz von Parametern.

Richtigerweise geladen (Fahrleistung gesteigert)	64,7 %	Entscheidung richtig	73,5 %	100,0 %
Richtigerweise nicht geladen	8,8 %			
Fälschlicherweise geladen	11,8 %	Entscheidung falsch	26,5 %	
Fälschlicherweise nicht geladen	14,7 %			

Tabelle 5.11: Bewertung der Energieabschätzung bei erfolgtem Überholen

c) Bewertung

In Anbetracht des frühen Entwicklungsstadiums des Systems erreicht die Überholprädiktion bereits eine hohe Detektionsrate von $R_{\text{det}} = \frac{94}{94+24} = 80\%$ und eine niedrige Fehlalarmrate von $R_{\text{fehl}} = \frac{30}{30+73} = 29\%$ (siehe Tabelle 5.12). Erwähnenswert ist, dass ohne Veränderungen am Klassifikationsalgorithmus jedoch unter Annahme der bis zum Serieneinsatz der Sensorsysteme verbesserten Informationsgüte bereits eine Detektionsrate von 90 % und eine Fehlalarmrate von nur noch 19 % die Folge wäre³.

		Überholen laut Algorithmus...	
		wahrscheinlich	nicht wahrscheinlich
Überholen subjektiv	wahrscheinlich	94	24
	unwahrscheinlich	30	73

Tabelle 5.12: Vier-Felder-Tafel für Bewertung des Überholalgorithmus

³ Bei den oben beschriebenen externen Fehlerursachen entfielen dann die von den digitalen Karten und vom Kamerasystem verursachten Fälle; eine bessere Ausnutzung des Radarsensors bietet weitere Verbesserungspotenziale.

5.3.6 Übrige Funktionen zur Fahrleistungssteigerung

Außer in Überholsituationen kann die Boostverfügbarkeit auch während Autobahnauffahrten, Ortsausfahrten, Aufhebungen von Geschwindigkeitslimits oder ähnlichen Fahrsituationen prädiktiv sichergestellt werden. Da es sich bei der Überholprädiktion um eine stark vernetzte Funktion handelt, war eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse für die Bewertung notwendig und sinnvoll. Für den Funktionsnachweis der übrigen fahrleistungssteigernden Funktionen sei hier eine Beispielmessung einer Autobahnauffahrt gezeigt, in der die Boostverfügbarkeit deutlich gesteigert werden konnte (Abbildung 5.31). Die Prädiktion stützt sich im dargestellten Beispiel lediglich auf den ohne Routenführung errechneten MPP, weshalb es erst bei km 0,3 zur Erkennung der Fahrsituation und Anhebung des SOC kommt. Dennoch reicht die Zeitdauer bis zur Vollastbeschleunigung aus, um 69 Wh an zusätzlicher elektrischer Energie im Speicher zu puffern, die im Anschluss der Elektromaschine 3 s länger für den Fahrzeugantrieb zugeführt werden können.

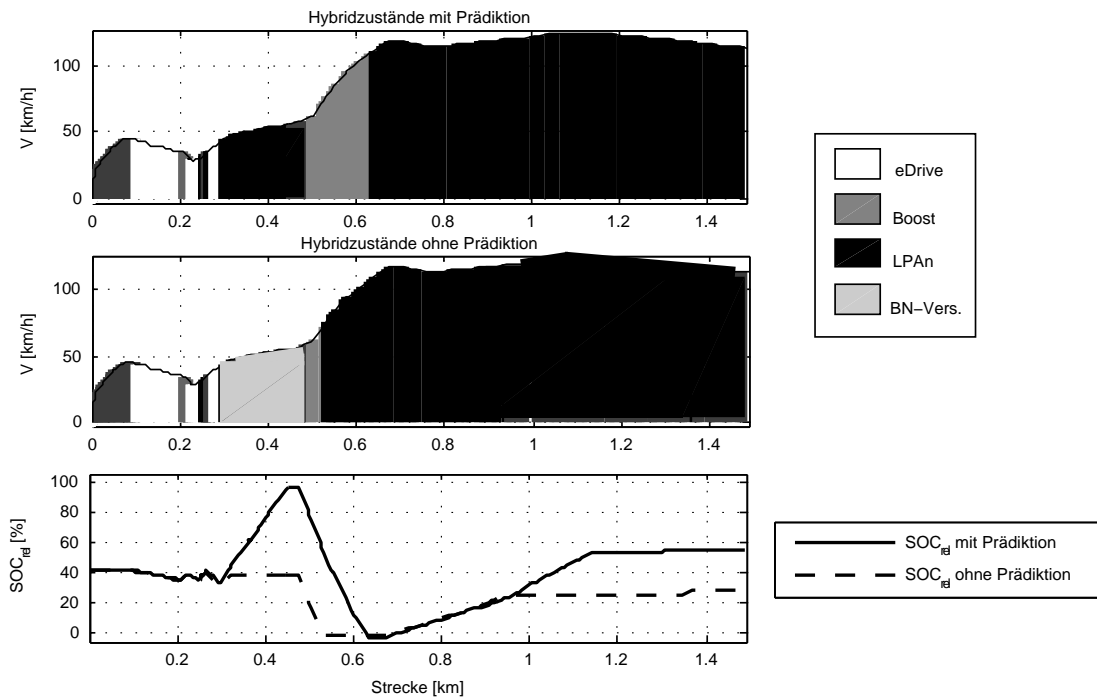


Abbildung 5.31: Funktionsnachweis der Prädiktion von Autobahnauffahrten

Die Funktionen zur Steigerung der Boostverfügbarkeit zeigen beim emulierten Hybridkonzept mit 150 Wh Energieinhalt den gewünschten Effekt. Bei einem Antriebskonzept mit einem Energiespeicher deutlich größeren Energieinhalts wären derartige adaptive Eingriffe im Ladezustandsmanagement seltener notwendig. Die Sensorgüte erlaubt es jedoch auch hier, inakzeptable Fahrleistungseinbrüche zu vermeiden.

5.3.7 Ortsabhängige Erweiterung der elektrischen Fahrgrenzen

Die Erweiterung der elektrischen Fahrgrenzen in 30er Zonen mit dem Ziel eines Komfortgewinns bewirkte bei dem für die Messfahrten gewählten emulierten Hybridkonzept als einzige erprobte Funktion nicht den angestrebten Effekt. Der Energieinhalt des elektrischen Speichers von nur 150 Wh war bei keiner der durchgeführten Erprobungen ausreichend, um 30er Zonen rein elektrisch durchfahren zu können. Eine Erweiterung der elektrischen Fahrgrenzen sorgte für ein umso schnelleres Entleeren des Speichers und dadurch zu Einbußen bei der Verfügbarkeit des elektrischen Fahrens. Abbildung 5.32 zeigt diesen Effekt: Bei konventioneller Strategie erfolgen beim Beschleunigen Motorzustarts, die das Laden des Speichers ermöglichen. Diese bleiben bei adaptiver Strategie aus, so dass elektrisch gespeicherte Energie verbraucht wird, die zu späteren Zeiten für den rein elektrischen Betrieb fehlt.

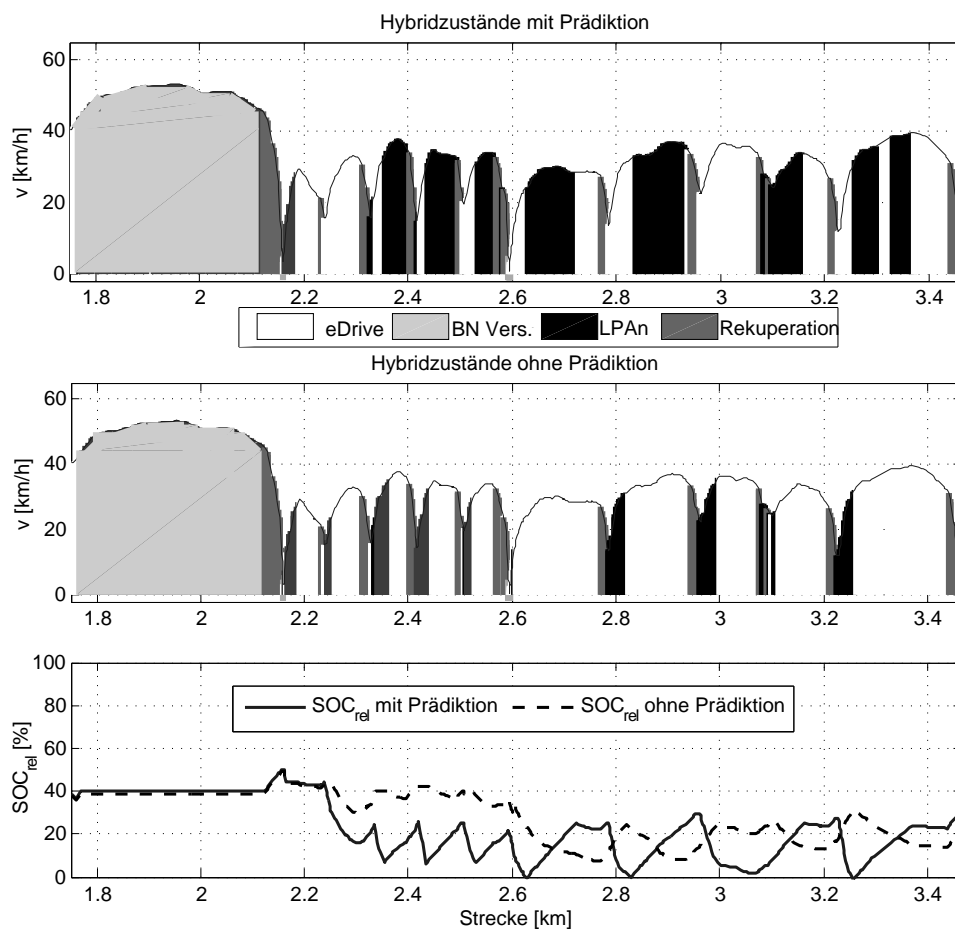


Abbildung 5.32: Fehlgeschlagener Funktionsnachweis der ortsabhängigen Erweiterung elektrischer Fahranteile

Daraus folgt: Eine ortsabhängige Erweiterung von E-Fahrgrenzen hat nur dann den gewünschten Effekt von zeitlich steigenden elektrischen Fahranteilen, wenn abgesehen werden kann, dass die gespeicherte elektrische Energiemenge auch bei erweiter-

ten Grenzen nicht zu einer vollständigen Entladung des Energiespeichers führt. Mithilfe der vorgestellten modellbasierten Ladezustandsprädiktion ist eine solche Abschätzung möglich, sie war zum Zeitpunkt der Messfahrten jedoch noch nicht Grundlage für die Entscheidung, in 30er Zonen die E-Fahrgrenzen auszuweiten.

5.4 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurden Ergebnisse der simulationsgestützten Potenzialanalyse sowie der Erprobungsfahrten mit dem aufgebauten Versuchsfahrzeug dargestellt. Sie sind der Beleg dafür, dass eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und prädiktives Energiemanagement bereits mit den heute verfügbaren Umfeldinformationen moderner Fahrerassistenzsysteme und Sensoren funktionsfähig ist. Damit erbringen die Ergebnisse den Nachweis, dass der Energiehaushalt eines Fahrzeugs auch mit einer unscharfen Vorausschau der nächsten Streckenkilometer gegenüber einer ausgereiften Basisbetriebsstrategie optimiert werden kann. Eine exakte Prädiktion der zu erwartenden Leistungs- und Geschwindigkeitsverläufe erwies sich als nicht notwendig, wenn auch Verbesserungen an der Prädiktionsgüte weitere Potenziale erschließen würden.

Die Verbrauchssimulation erbrachte den Potenzialnachweis anhand von ausgewählten, aus realen Messfahrten stammenden Fahrzyklen mit definierter Länge. Die ermittelten Kraftstoffeinsparungen bewegen sich je nach untersuchter Energiefunktion und Zyklus zwischen 1,5 % und 7,8 %. Die Frage nach der durchschnittlichen Kraftstoffeinsparung je 100 km lässt sich nicht pauschal beantworten, sondern muss in Relation zur Häufigkeit des Auftretens von energetisch relevanten Fahrsituationen gesetzt werden: Die Länge der simulierten Zyklen bewegt sich in einer Größenordnung um 20 km, mit einem durchschnittlichen Einsparpotenzial der drei Funktionen von etwa 3 %⁴. Nimmt man an, dass die drei untersuchten unabhängigen Energiefunktionen jeweils einmal pro 50 km erfolgreich zum Einsatz kommen, so kann überschlägig mit einer Kraftstoffeinsparung von knapp 4 % ($= 3 \cdot 3 \% \cdot \frac{20 \text{ [km]}}{50 \text{ [km]}}$) gegenüber der Basisbetriebsstrategie gerechnet werden – ein hoher Wert in Anbetracht der Tatsache, dass das Potenzial rein durch Software-Maßnahmen realisierbar ist.

Die Simulation der Fahrleistungspotenziale zeigte, dass ungewünschte Einbrüche der Fahrzeugdynamik aufgrund eines zu gering geladenen Energiespeichers durch die Nutzung von Umfeldinformationen gerade in entscheidenden Fahrsituationen wie Überholmanövern, Autobahnauffahrten etc. vermieden werden können. Die Potenziale sind abhängig vom betrachteten Fahrzeugkonzept und insbesondere dessen Hybridisierungsgrad. Je niedriger der Anteil des Verbrennungsmotors an der Gesamtantriebsleistung, umso wichtiger ist die Verfügbarkeit der Boost-Funktion für ein verlässliches Fahrverhalten. Die simulierten Fahrzeuge mit eher niedrigem Hybridisierungsgrad er-

⁴ Die höhenprofilabhängige SOC-Regelung (a) lag im Autobahnzyklus bei 1,5 %, im Spitzingzyklus bei 2,7 %. Die prädiktiven (b) und adaptiven (c) verkehrsflussabhängigen Regelungen für 30er Zonen und Staus lagen zwischen 2 % und 8 %.

5 Bewertung der Ergebnisse

reichten in den simulierten Fahrzyklen mit der adaptiven und prädiktiven Betriebsstrategie eine Steigerung der Boost-Verfügbarkeit um etwa 15 % auf 100 %. Überholmanöver können mit etwa einer Wagenlänge Vorsprung gegenüber dem nicht prädiktiv geregelten Fahrzeug abgeschlossen werden.

Die Erprobungsfahrten unter realen Verkehrsbedingungen erbrachten in den meisten Fällen einen erfolgreichen Funktionsnachweis. Mit den von Seriensensorik und Fahrerassistenzsystemen bereitgestellten Informationen über das Fahrzeugumfeld ist die Umsetzung einer prädiktiven Ladezustandsregelung und adaptiven E-Fahrstrategie bereits möglich. Die modellbasierte Ladezustandsprädiktion für Gefälle und elektrische Fahrbereiche sorgte in nahezu allen Erprobungsfahrten für den gewünschten Effekt einer korrekten bedarfsgerechten Anhebung bzw. Absenkung des virtuellen Ladezustands. Dies führt in realen Hybridfahrzeugen zur Verbrauchssenkung und Erweiterung des elektrischen Fahrens. Das bewusst stark abstrahierte Geschwindigkeitsprofil, mit dem die Ladezustandsprädiktion arbeitete, war für einen erfolgreichen Funktionsnachweis bereits ausreichend genau. Der Einbezug von Fahrgewohnheiten und Kurvengeometrien in die Generierung des Profils würde die Prädiktionsgüte allerdings weiter verbessern.

Die Erprobungen der Überholprädiktion haben gezeigt, dass deren Detektionsrate beim Einsatz von ausgereifter Seriensensorik bei etwa 90 % liegt. In etwa zwei Drittel der Fälle eines bevorstehenden Überholmanövers erfolgte schon mit dem Vorserienstand der Sensorsysteme richtigerweise eine prädiktive Ladung des virtuellen elektrischen Energiespeichers, die in einem realen Hybridfahrzeug mit gleichem Speicherkonzept zu Fahrleistungsvorteilen geführt hätte.

Ebenfalls konnte der Funktionsnachweis für die bedarfsgerechte Anhebung des Ladezustands vor Autobahnauffahrten, Ortsausfahrten u.ä. erbracht werden. Einzig die adaptive Erweiterung der elektrischen Fahranteile innerhalb von 30er Zonen war nicht erfolgreich. Der simulierte Speicherinhalt von 150 Wh reichte ohnehin schon nicht für das rein elektrische Durchfahren der Zonen aus, eine Erweiterung der Grenzen für den Motorstopp sorgte daher für den vorzeitigen Verbrauch von elektrischer Energie, die an späterer Stelle fehlte.

6 Zusammenfassung

Der begrenzte Energieinhalt von elektrischen Energiespeichern in Hybridfahrzeugen erfordert intelligente Ladestrategien, um Energiemangel und -überschuss zu vermeiden. Konventionelle Methoden zur Regelung des Energiehaushalts im Fahrzeug zeigen jedoch in gewissen Fahrsituationen Nachteile bezüglich der Verfügbarkeit von Hybridfunktionen wie dem elektrischen Boost, der Rekuperation oder der rein elektrischen Fahrt.

In dieser Arbeit wurde eine Methode entwickelt, mit der die Betriebsstrategie eines Hybridfahrzeugs unter Verwendung von vorausschauenden Umfeldinformationen aus Daten der digitalen Karte, von Kamera, Radar und übriger Sensorik hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Fahrleistungen optimiert werden kann. Es handelt sich dabei um ein modulares Gerüst aus Einzelfunktionen, die bedarfsgerecht jeweils vor oder während Fahrsituationen in eine Basisbetriebsstrategie eingreifen, um den elektrischen Energiespeicher noch effizienter auszunutzen. Die Funktionen arbeiten weitestgehend unabhängig voneinander und werden abhängig von den im Fahrzeugbordnetz verfügbaren Sensorinformationen automatisch aktiviert bzw. deaktiviert, um die Kompatibilität der Funktionsarchitektur zu einer breiten Fahrzeugflotte zu gewährleisten.

Hilfreich bei der Spezifikation des modularen Funktionsgerüsts war die Untergliederung des Energiemanagements anhand der vier übergeordneten Ziele *Verbrauchssenkung*, *Fahrleistungssteigerung*, *Qualität* und *Kundennutzen*. Letzterer wird in dieser Arbeit durch eine Funktion zur situationsgerechten Erweiterung des elektrischen Fahrens in Wohngebieten gesteigert.

Die Fahrleistung und die Qualität werden durch die Steigerung der Verfügbarkeit der Boostfunktion verbessert, indem entweder bei sportlicher Fahrweise oder vor Überholmanövern und ähnlichen Situationen der mittlere Ladezustand angehoben wird. Probabilistische Netze haben sich als geeignete Methode erwiesen, um die zur Klassifikation der relevanten Fahrsituationen verwendeten Sensordaten zu fusionieren.

Dem Ziel der Senkung des Kraftstoffverbrauchs dient die prädiktive, modellbasierte Erkennung von Energiemangel oder -überschuss. Anhand angenommener Geschwindigkeits- und Höhenprofile wird der Leistungsbedarf der nahen Zukunft errechnet, aus dem die zukünftigen Trajektorien des Ladezustands abgeleitet werden können. Sobald die Ladezustandsprädiktion auf dem kommenden Streckenverlauf das wahrscheinliche Entleeren oder Überladen des Energiespeichers meldet, wird so lange gegengesteuert, bis die Speichergrenzen nicht mehr verletzt werden. Dies sorgt für eine

6 Zusammenfassung

Steigerung des Rekuperations- und elektrischen Fahrpotenzials und damit für eine Verbrauchssenkung.

Eine weitere Funktion engt bei Staufahrt und gleichzeitig vorauszusehendem Energiemangel das Betriebsfenster des elektrischen Fahrens ein. Hierdurch werden weitere Verbrauchseinsparungen erreicht, da der Verbrennungsmotor dann länger an seinen ineffizientesten Betriebspunkten gestoppt werden kann.

Die vorgestellte Funktionsarchitektur wurde auf zwei verschiedene Arten umgesetzt: Die Modellbildung diente der simulationsgestützten Potenzialanalyse, während die Implementierung der Funktionen in einem Versuchsfahrzeug den Nachweis der Lauffähigkeit unter realen Umfeldbedingungen erbrachte. Die Simulationsergebnisse belegen, dass mit den in naher Zukunft im Kommunikationsbordnetz von Kraftfahrzeugen vorhandenen Sensordaten bereits signifikante Verbrauchsreduktionspotenziale erreichbar sind; eine Idealprädiktion der nahen Zukunft ist nicht notwendig. In einzelnen Zyklen waren gegenüber konventionellen Hybridfahrzeugen Verbrauchssenkungen von bis zu 8 % möglich; das durchschnittliche Potenzial je 100 km hängt jedoch in erster Linie von der Häufigkeit des Eintretens relevanter Fahrsituationen ab und kann daher nicht pauschal bewertet werden. Die systematischen Erprobungsfahrten mit dem Prototyp zeigten, dass eine ausreichend valide Prädiktion bereits mit stark abstrahierten Geschwindigkeitsverläufen, wie sie mit heute erhältlichen digitalen Karten abschätzbar sind, möglich ist. Verbesserungen können erzielt werden, indem die angenommene Geschwindigkeit an Kurvenradien, Kreuzungen oder an die Steigung gekoppelt wird.

Anhang

Ergebnistabellen Verbrauchssimulation

Horizont [km]	P_{entlad} [kW]	$\frac{e\text{DriveDauer}}{\text{ZyklusDauer}}$ [%]	Δ Verbrauch [ml]	Δ Verbrauch [%]
statisch	statisch	52,38	-	-
3	2	53,89	8,2	1,06
3	3	53,89	6,7	0,87
3	4	55,19	13,7	1,77
3	5	55,4	14,4	1,86
3	6	55,43	13,4	1,73
3	7	56,86	11,4	1,48
3	8	56,83	17,1	2,21
3	9	56,94	15,1	1,95
3	10	57,41	15,9	2,06
3	11	58,29	17,2	2,23
3	12	58,89	17,5	2,27
3	13	58,81	14,6	1,89
5	2	54,8	12,3	1,59
5	3	55,43	13,6	1,76
5	4	56,9	19,6	2,54
5	5	58,41	27,9	3,61
5	6	59,48	31,9	4,13
5	7	59,92	27,2	3,52
5	8	61,43	33,3	4,31
5	9	61,43	30,9	4
5	10	61,43	29,6	3,83
5	11	61,3	28,3	3,66
5	12	61,7	28,6	3,7
5	13	61,93	27,7	3,59

Tabelle A.1: Simulationsergebnisse der prädiktiven Ladezustandsanhebung für das Full-Hybridfahrzeug unter synthetischen Bedingungen

Horizont [km]	P_{lad} [kW]	$\frac{\text{eDriveDauer}}{\text{ZyklusDauer}}$ [%]	Δ Verbrauch [ml]	Δ Verbrauch [%]
statisch	statisch	35,77	-	-
3	2	36,05	2	0,19
3	3	36,27	3,8	0,37
3	4	36,84	6	0,58
3	5	37,05	10,3	1
3	6	37,63	9,6	0,93
3	7	38,05	10,2	0,99
3	8	38,48	10,3	1
3	9	38,56	8,8	0,86
3	10	9,06	7,3	0,71
3	11	39,41	5,4	0,53
3	12	39,56	4,9	0,48
3	13	39,84	1,2	0,12
5	2	36,05	2	0,19
5	3	36,27	3,8	0,37
5	4	37,20	9,4	0,92
5	5	37,70	12,5	1,22
5	6	38,84	14,5	1,41
5	7	39,46	17,5	1,7
5	8	39,74	13,6	1,32
5	9	39,74	10,9	1,06
5	10	39,74	6	0,58
5	11	39,74	4	0,39
5	12	39,74	-0,6	-0,06
5	13	39,77	-4,8	-0,47

Tabelle A.2: Simulationsergebnisse der prädiktiven Ladezustandsanhebung für das Full-Hybridfahrzeug im 30er-Zonen-Zyklus

Horizont [km]	P_{lad} [kW]	$\frac{\text{eDriveDauer}}{\text{ZyklusDauer}}$ [%]	Δ Verbrauch [ml]	Δ Verbrauch [%]
statisch	statisch	45,1	-	-
3	2	45,75	6,7	0,49
3	3	46,1	9,1	0,67
3	4	46,35	12,1	0,89
3	5	46,35	15,4	1,13
3	6	46,6	21,8	1,6
3	7	47,3	26	1,91
3	8	47,55	29,9	2,2
3	9	47,75	30,5	2,24
3	10	47,7	32,5	2,39
3	11	48,4	28,3	2,08
3	12	47,9	38,7	2,84
3	13	48,5	32,5	2,39
5	2	46,15	9,7	0,71
5	3	46,35	15,2	1,12
5	4	47,2	24,9	1,83
5	5	47,8	31	2,28
5	6	47,85	36,1	2,65
5	7	48,35	41,8	3,07
5	8	48,65	44,3	3,26
5	9	49,4	52,6	3,87
5	10	49,35	50	3,67
5	11	50,1	46,9	3,45
5	12	49,85	52,5	3,86
5	13	50,35	41,9	3,08
7	2	46,4	12,9	0,95
7	3	47,1	25	1,84
7	4	47,65	32,5	2,39
7	5	48,4	41,3	3,04
7	6	48,8	45,6	3,35
7	7	49,3	52,7	3,87
7	8	49,55	54,8	4,03
7	9	49,6	54,1	3,98
7	10	49,2	55,1	4,05
7	11	50,4	49,1	3,61
7	12	50,15	45	3,31
7	13	51,6	40,9	3,01

Tabelle A.3: Simulationsergebnisse der prädiktiven Ladezustandsanhebung für das Full-Hybridfahrzeug im Stauzyklus mit Einfahrt

Symbolverzeichnis

a) Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Querschnittsfläche	$[m^2]$
α	Normierungsfaktor / Steigung	$[-]$
B	Bit / digitale Zustandsbeschreibung	$[-]$
BEL	Belief / Wahrscheinlichkeitsvektor	$[-]$
C	Kapazität	$[\frac{As}{V}]$
c_R	Rollwiderstandsbeiwert	$[-]$
c_w	Luftwiderstandsbeiwert	$[-]$
CO_2	Kohlenstoffdioxid	$[-]$
d	Abstand zum Vorderfahrzeug	$[m]$
E	Energie	$[J]$
η	Wirkungsgrad	$[-]$
F	Kraft	$[N]$
g	Erdbeschleunigung	$[\frac{m}{s^2}]$
γ	Kostenfunktion	$[-]$
Γ	Gesamtkostenfunktion	$[-]$
$grad$	Gradient des Ladezustandsverlaufs	$[\frac{Wh}{100 m}]$
Hyb	Hybridisierungsgrad	$[-]$
I	Strom	$[A]$
i	Übersetzungsverhältnis	$[-]$
L	Länge	$[m]$
λ	Virtuelle Evidenz	$[-]$
M	Matrix mit bedingten Wahrscheinlichkeiten	$[-]$
μ	Zugehörigkeitsgrad	$[-]$
m	Masse	$[kg]$
n	Drehzahl	$[\frac{rad}{s}]$
P	Leistung / Prädiktionsgüte	$[W]/[-]$
π	Kausale Botschaften im Bayes-Netz	$[-]$
Q	Ladungsmenge	$[As]$
ρ	Dichte	$[\frac{kg}{m^3}]$

Symbol	Bedeutung	Einheit
r	Radius	[m]
s	Steigung / Weg	[m]
S	Sportlichkeit	[-]
SOC	State of Charge / Ladezustand	[-]
t	Zeit	[s]
T	Moment / Temperatur	[Nm]/[K]
τ	Zeit	[s]
θ	Trägheitsmoment	[kg · m ²]
U	Spannung	[V]
v	Geschwindigkeit	[$\frac{m}{s}$]
Ver	Verfügbarkeit	[-]
x	Eingangssignale in Bayes-Netz	[untersch.]
y	Attribut	[-]

b) Indizes

Index	Bedeutung
30er(Zone)	30er Zone
a	adaptiv
Ab	Abtrieb
abs	absolut
Antr	Antrieb
Bat(t)	Batterie
BN	Energiebordnetz
Chance	Chance im Sinne der Energieeinsparung
chem	chemisch / kraftstoffgebunden
Delta	Unterschied
det	Detektion
Diff	Differenz
Distanz	Entfernung zum Vorderfahrzeug
dyn	dynamisch
EF	Elektrisches Fahren
eFahr	Elektrisches Fahren
el	elektrisch
EM	Elektromaschine inkl. Leistungselektronik
Entl	Entlade-...
entlad	Entlade-...
ePfad	Elektrischer Antriebspfad
ex	exceed / Überschuss
ext	extern
fehl	Fehlalarm
g	Getriebe
gen	Generator
h	Hinterachse
int	intern
Ist	Ist-Zustand
konv	konventionell
krit	kritisch
KS	Kraftstoff
KSG	Kurbelwellen-Starter-Generator
lad	Lade-...
Limit	Geschwindigkeitsbeschränkung
luft	Luft(-widerstand)
max	maximal
mech	mechanisch
min	minimal

Index	Bedeutung
mot	motorisch
o	obere Grenze
praed	prädizierte Größe
r	rotatorisch
Rek	Rekuperation
rel	relativ
res	resultierend
Risiko	Risiko im Sinne eines Mehrverbrauchs
roh	Variable zur Weiterverarbeitung
roll	Roll(-widerstand)
SOC	State of Charge / Ladezustand
soll	Soll-Größe
Sport	sportlich
Start	Wert zu Beginn
steig	Steigung(-swiderstand)
Sys	System-...
u	untere Grenze
Ueb(-erhol)	Überhol-...
v	Geschwindigkeit
V	Verlust
Veh	Fahrzeug
Ver	Verfügbarkeit
VL	Volllast
VM	Verbrennungsmotor
wid	Widerstand
Wind	Wind

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
A/D	Analog/Digital
AC/DC	Gleichrichter
ACC	Active Cruise Control
ACEA	European Automobile Manufacturers Association
ADAS	Advanced Driver Assistance System
ADAS-RP	Advanced Driver Assistance System Research Platform
ADASIS	Advanced Driver Assistance System Interface Specification
AGM	Absorbent Glas Mat
ASM	Asynchronmaschine
BAB	Bundesautobahn
BP	Bremspedal
BMW	Bayerische Motoren Werke
CAN	Controller Area Network
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
d	Tag
D	Differenzial(-regler)
DC/DC	Gleichspannungssteller
DLC	Double Layer Capacitor
DME	Digitale Motorelektronik
E-...	Elektrisch(e/s/r)-...
ECVT	Electric Continuous Variable Transmission
eDrive	rein elektrisches Fahren
eFahren	rein elektrisches Fahren
eKK	elektrischer Klimakompressor
eLüfter	elektrischer Lüfter
EM	Elektrische Maschine
ESP	Elektronisches Stabilitäts Programm
eWAPU	elektrische Wasserpumpe
FN	Funktionsnachweis
FP	Fahrpedal
FTP	Federal Test Procedure

Abkürzung **Bedeutung**

GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HV	High voltage / Hoch Volt
I	Integral(-regler)
iDR	Intelligente DC/DC-Regelung
iEM	integriertes Energiemanagement
KAFAS	Kamerasteuerggerät
KI	künstliche Intelligenz
KK	Klimakompressor
KSG	Kubelwellen-Starter-Generator
LAN	Local Area Network
LKW	Lastkraftwagen
LL	Leerlauf
LPA(n)	Lastpunktanhebung
LPAb	Lastpunktabsenkung
LRR	Long Range Radar
LV	Low Voltage / Niederspannung
mKK	mechanischer Klimakompressor
MPP	Most Probable Path
MPR	Modellbasierte Prädiktive Regelung
MSA	Motor-Start-Stopp-Automatik
NaN	Not a Number / Kein Zahlenwert
Navi	Navigationsgerät
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
OEM	Original Equipment Manufacturer
P	Proportional(-regler)
Pb	Bleibatterie
PC	Personal Computer
PKW	Personenkraftwagen
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
RADAR	Radio Detection and Ranging
Reku	Rekuperation
SA	Sensitivitätsanalyse
SC	Supercap
SG	Steuergerät
SLR	Short Range Radar
SMR	Schleppmomentenreduzierung
SOC	State of Charge

Abkürzung **Bedeutung**

SPA	Schaltpunktanzeige
TCP/IP	IP-basiertes Netzwerkprotokoll (Ethernet-LAN)
TMC	Traffic Message Channel
TMCpro	Traffic Message Channel professional
txt	Dateiendung für Textdateien
üNN	über Normalnull / Meeresspiegel
US	Vereinigte Staaten von Amerika
V(K)M	Verbrennungsmotor
VL	Volllast

Abbildungsverzeichnis

2.1	Längsdynamische Fahrwiderstände	4
2.2	Wirkungsgradkennfeld eines 6-Zylinder Ottomotors	6
2.3	Willans-Linien eines 6-Zylinder Ottomotors	7
2.4	Wirkungsgradkennfeld einer PSM	8
2.5	Ragone Diagramm	9
2.6	Energiebordnetz	11
2.7	KSG-Energiebordnetz	12
2.8	Unterschiedliche Hybridfahrzeugtopologien	15
2.9	Ladezustandsabhängige Fahrleistung	17
2.10	Degradation der Rekuperation	18
2.11	Routenschätzung gemäß ADAS-Protokoll	22
2.12	Format einer standardisierten CAN-Botschaft	23
2.13	V-Modell zur Softwareentwicklung	24
3.1	Methoden der Effizienzsteigerung	29
3.2	Methode der Fahrdynamiksteigerung	30
3.3	Methoden Qualität und Kundenwert	31
3.4	Netz aus Energiefunktionen nach Zielen und Methoden	33
3.5	Konventionelle Funktionsarchitektur	34
3.6	Modul SOC-Regler mit geschwindigkeitsabhängiger Regelung	36
3.7	Statische SOC-Levelling Kennlinie	36
3.8	Modul Motor-Stopp-Strategie	37
3.9	Fahrpedalinterpretation im Hybridfahrzeug	38
3.10	Kontinuierlicher Momentensplit	39
3.11	An Umgebungsinformationen gekoppeltes Motor-Stopp-Modul	42
3.12	Erweiterung des elektrischen Fahrens in verkehrsberuhigten Zonen	42
3.13	Ausschnitt eines probabilistischen Netzes	44
3.14	Signalfluss vom Bussignal zur Wahrscheinlichkeit	45
3.15	Kaskadierte Netzstruktur	46
3.16	Merkmalszugehörigkeits- und Gewichtsfunktion	47
3.17	Erkennung von Überholsituationen	48
3.18	Helligkeit und Niederschlag	49
3.19	Erweitertes SOC-Reglermodul	50
3.20	Benötigte elektrische Energie für unterschiedliche Boost-Vorgänge	51
3.21	Qualitativer SOC-Verlauf mit Prädiktion vor Gefälle	56
3.22	SOC-Verlauf mit Prädiktion für hohe E-Fahranteile	57

Abbildungsverzeichnis

3.23	Spezifischer Kraftstoffverbrauch	57
3.24	Einschränkung des elektrischen Fahrens	58
3.25	Adaptive Energiefunktionen, benötigte Sensorik und Aktorik	59
3.26	In Abhängigkeit des Sensorangebots verfügbare Funktionen	61
4.1	Oberste Ebene des Fahrzeugmodells	63
4.2	Statischer SOC-Regler	66
4.3	Rückwärts- und Vorwärtssimulation im Vergleich	67
4.4	Prädiktiver SOC-Regler	68
4.5	Konventionelle sowie prädiktive Lade- und Entladekennlinie	69
4.6	Struktur des Matlab Fahrzeugmodells zur Fahrleistungsbewertung	70
4.7	Simulink-Modell der Fahrzeugphysik	71
4.8	Logik zur Bestimmung des Hybridzustands	73
4.9	Prototyp Vorausschauendes Energiemanagement	75
4.10	Visualisierung der Prädiktion auf separatem Bildschirm	76
4.11	Systeme und deren Vernetzung im Prototyp	76
4.12	Informationsfluss	78
4.13	Hauptschleife zum iterativen Aufruf der Funktionsmodule	79
4.14	Bildschirmfoto der grafischen Benutzeroberfläche	80
4.15	Funktionsnetz Prototyp	81
4.16	Automatische Deaktivierung der Überholprädiktion	82
4.17	Beispiel für Höhenprofil- und MPP-Botschaft im Versuchsfahrzeug	83
4.18	Güte der Energieprädiktion unter Variation der Datengüte	85
5.1	Überschlägiges Einsparpotenzial	90
5.2	Theoretisch rekuperierbare Energie	93
5.3	SOC-Verlauf und Verbrauch im synthetischen Gefällezyklus	94
5.4	Minderverbrauch des Mild-Hybridfahrzeugs	95
5.5	SOC-Verlauf und Verbrauch im Autobahnzyklus	96
5.6	SOC-Verlauf und Verbrauch im Spitzingseezyklus	97
5.7	Prädizierte und reale Geschwindigkeitsprofile	98
5.8	Hybridzustände, SOC und Verbrauch synthetischer Zyklus	100
5.9	Elektrisches Fahren im synthetischen Zyklus	101
5.10	Hybridzustände, SOC und Verbrauch, realer Zyklus	102
5.11	Verbrauch und Zeitanteil des elektrischen Fahrens im 30er-Zonen-Zyklus	102
5.12	Hybridzustände, SOC und Verbrauch, Stauzyklus	103
5.13	Minderverbrauch des Full-Hybridfahrzeugs	104
5.14	SOC und Verbrauch im Stauzyklus	105
5.15	Einschränkung des elektrischen Fahrbereichs, Stop-and-Go	106
5.16	Durch die Boostfunktion verbrauchte und durch Rekuperation wieder- gewonnene elektrische Energie	108
5.17	Güte des Algorithmus zur Fahrstilklassifikation	109
5.18	Vermeidung von Fahrleistungseinbrüchen	110
5.19	Verlauf von Überholmanövern in Abhängigkeit des Ladezustands	111
5.20	Fehlerklassen	112

Abbildungsverzeichnis

5.21	Messstrecken der höhenprofilabhängigen SOC-Regelung	113
5.22	Koordinaten der Gefällestrecke in Bayrischzell	114
5.23	Prädiktion bei Messungen in Bayrischzell	115
5.24	Einfluss eines dynamischen Fahrstils auf die Ladezustandsprädiktion .	116
5.25	Einfluss einer erhöhten Bordnetzlast auf die Prädiktionsgüte	117
5.26	Rundkurs im Norden von München	119
5.27	Hybridzustände auf Rundkurs	120
5.28	Einfluss der Bordnetzlast auf die Prädiktionsgüte	121
5.29	Funktionsnachweis der stauspezifischen Betriebsstrategie	124
5.30	Funktionsnachweis der Überholprädiktion	126
5.31	Funktionsnachweis der Prädiktion von Autobahnauffahrten	129
5.32	Ortsabhängige Erweiterung elektrisches Fahren	130

Tabellenverzeichnis

2.1	Klassifikation von Fahrerassistenzfunktionen	21
3.1	Anforderung an die Funktionsarchitektur	28
4.1	Übersicht über Kompressionsparameter	86
5.1	Daten der simulierten Fahrzeuge	91
5.2	Versuchsplan für Simulationen	92
5.3	Übersicht Höhenprofilzyklen	94
5.4	Übersicht Geschwindigkeitsprofile	99
5.5	Simulationsergebnisse der stauspezifischen SOC-Regelung	104
5.6	Simulationsergebnisse der stauspezifischen SOC-Regelung, Stop-and-Go-Zyklus	105
5.7	Erprobungsplan für adaptive Energiefunktionen	112
5.8	Bewertung der Prädiktionsentscheidungen an Gefällen	118
5.9	Auswertung der Prädiktion von elektrischen Fahranteilen	122
5.10	Häufigkeit von Fehlern nach Ursachen	127
5.11	Bewertung der Energieabschätzung bei erfolgtem Überholen	128
5.12	Vier-Felder-Tafel für Bewertung des Überholalgorithmus	128
A.1	Simulationsergebnisse der prädiktiven Ladezustandsanhebung für das Full-Hybridfahrzeug unter synthetischen Bedingungen	135
A.2	Simulationsergebnisse der prädiktiven Ladezustandsanhebung für das Full-Hybridfahrzeug im 30er-Zonen-Zyklus	136
A.3	Simulationsergebnisse der prädiktiven Ladezustandsanhebung für das Full-Hybridfahrzeug im Stauzyklus mit Einfahrt	137

Literaturverzeichnis

- [1] ANDERL, T.: *Kommunikation für Fahrtriebe - Entwicklungsmethoden am Beispiel eines Hybridantriebs*. Dissertation, Technische Universität München, VDI Verlag GmbH, 2006.
- [2] ANDREW, M.: *Lithium-Ion: Enabling a Spectrum of Alternate Fuel Vehicles*. In: CARB ZEV Symposium, 2006.
- [3] BACK, M.: *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen*. Dissertation, Universitätsverlag Karlsruhe, 2005.
- [4] BACK, M., M. SIMONS, F KIRSCHAUM und V. KREBS: *Representative kinematic sequences for the road traffic in France*. In: SAE Paper 890 875, 1989.
- [5] BACK, M., M. SIMONS, F KIRSCHAUM und V. KREBS: *Predictive Control Of Drivetrains*. 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002.
- [6] BACK, M. und S. TERWEN: *Prädiktive Regelung mit Dynamischer Programmierung für nichtlineare Systeme erster Ordnung*. In: Automatisierungstechnik 51, 2003.
- [7] BATHAEE, S.M.T., A.H. GASTAJ, S.R. EMAMI und M. MOHAMMADIAN: *A fuzzy-based supervisory robust control for parallel hybrid electric vehicles*. In: IEEE Conference Vehicle Power and Propulsion, 2005.
- [8] BÖCKL, M.: *Adaptives und prädiktives Energiemanagement zur Verbesserung der Effizienz von Hybridfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität Wien, 2008.
- [9] BELZ, J., N. HÖVER, M. MÜHLENBERG, B. NITSCHKE und T. SEUBERT: *Fahrerassistenz im Spannungsfeld zwischen Komfort- und Sicherheitsanforderungen*. In: VDI (Hrsg.): Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI-Bereiche 1864. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004.
- [10] BELZNER, H.: *Erkennung von Verkehrsstörungen unter Verwendung erweiterter fahzeuggenerierter Daten*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München, 2007.
- [11] BERGER, C.: *Einfluss der Nebenaggregate auf den Motorbetrieb*. Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren, Forschungsbericht 2005.
- [12] BIERMANN, J.-W.: *Hybridantriebe - Strukturvarianten, Betriebsstrategien sowie deren Vor- und Nachteile*. In: 5. Symposium Elektrische Straßenfahrzeuge, Technische Akademie Esslingen, 1998.

Literaturverzeichnis

- [13] BILLINGS, D., D. PAPP, J. SCHAEFFER und D. SZAFRON: *Poker as a Testbed for Machine Intelligence Research*. In: *Lecture Notes in Computer Science*, 1998.
- [14] BOECKL, M. und B. RIUS: *Auslegung des elektrischen Antriebs und Auswirkungen auf die Betriebsstrategie bei einem Parallelhybrid*. In: Voß, B. (Hrsg.): *Hybridfahrzeuge*, 2005.
- [15] BORTOLAZZI, J., S. STEINHAEUER und T. WEBER: *Entwicklung und Qualitätsmanagement von Steuergerätesoftware*. 2000.
- [16] BOUSLIMI, W., M. KASSAAGI, D. LOURDEAUX und P. FUCHS: *Augmented naive Bayesian network for driver behavior modeling*. In: *Proceedings 2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2005.
- [17] BRAESS, H.; SEIFFERT, U. (HRSG.): *Vieweg Handbuch der Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg und Sohn, Braunschweig, Wiesbaden, 2001.
- [18] BRAHMA, A., Y. GUEZENEC und G. RIZZONI: *Optimal energy management in series hybrid electric vehicles*. In: *Proceedings of the 2000 American Control Conference*, 2000.
- [19] BRANDSTÄTER, M., W. PRESTL und G. BAUER: *Functional Optimization of Adaptive Cruise Control Using Navigation Data*. In: *SAE 2004 World Congress & Exhibition*, 2004.
- [20] BRÖHL, A.-P. und W. DRÖSCHEL (HRSG.): *Das V-Modell*. Oldenburg, 1999.
- [21] BUSCH, F.: *Automatische Störungserkennung auf Schnellverkehrsstraßen - ein Vergleich*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1986.
- [22] CANADELLA, J., C. LE QUERE, M. RAUPACHA, C. FIELDE, E. BUITENHUIS, P. CIAISE, T. CONWAYG, N. GILLETTC, R. HOUGHTONH und G. MARLANDI: *Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks*. In: *PNAS*, vol. 104, no. 47, 2007.
- [23] CERMTO, E., A. CONSOLI, A. RACITI und A. TESTA: *Energy Flows Management in Hybrid Vehicles by Fuzzy Logic Controller*. In: *Proceedings IEEE 7th Mediterranean Electrotechnical Conference*, 1994.
- [24] CHO, B.: *Control of A Hybrid Electric Vehicle with Predictive Journey Estimation*. Dissertation, Cranfield University, 2008.
- [25] CHRIST, T.: *Rekuperation in elektrischen Energiebordnetzen von Kraftfahrzeugen*. Dissertation, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, TU Berlin, 2006.
- [26] COU, C., TH. FRAICHARD, P. BESSIERE und E. MAZER: *Multi-sensor data fusion using Bayesian programming: an automotive application*. In: *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, 2002.
- [27] DAIMLERCHRYSLERAG (AUTOR UNBEKANNT): *Ganzheitliche fahrzeugautonome und infrastrukturgestützte vorausschauende Energiemanagement-Strategien für hybride*

Literaturverzeichnis

- de Antriebsysteme*. In: Forschungsbericht DaimlerChrysler AG, 2002.
- [28] DEGUCHI, Y.: *Hev Charge/Discharge Control System Based on Navigation Information*. In: Convergence International Congress & Exposition On Transportation Electronics, Detroit, 2004.
- [29] DEML, B., J. FREYER und B. FÄRBER: *Ein Beitrag zur Prädiktion des Fahrstils*. In: Fahrer im 21. Jahrhundert. Human Machine Interface. VDI-Berichte 2015 (S. 47-60), 1989.
- [30] DENARO, R.: *Advanced Driver Assistance Systems: The Application of NAVTEQ Digital Maps for Enhanced Fuel Economy and Emissions Reduction*. 2007.
- [31] DIEGELMANN, C.: *Potenzial einer SOFC-APU bei einer Verbrauchsoptimierung von Kraftfahrzeugen*. Dissertation, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, 2007.
- [32] DORRER, C.: *Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Informationen*. Dissertation, Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart, 2003.
- [33] DUREKOVIC, S., J. LÖWENAU, A. WILDE und S. LÜER: *Adaptive Speed Recommendation in FeedMAP: Real Time Map Information with Map Deviation Detection for Advanced In-Vehicle Applications*. In: 10th International Conference on AATT Athens, Greece, 2008.
- [34] ENGELS, H.: *CAN-Bus - Feldbusse im Überblick, CAN-Bus-Protokolle, CAN-Bus-Meßtechnik, Anwendungen*. Franzis Verlag GmbH, 2000.
- [35] ENGSTLE, A., R. EGGLHUBER und H.-G. HERZOG: *Energy Management for Controlling Hybrid Systems*. In: Future Transportation Technology Conference, 2005.
- [36] ERICSSON, E.: *Variability in urban driving patterns*. In: Transportation Research Part D, 2000.
- [37] ERICSSON, E.: *Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors*. In: Transportation Research Part D, 2001.
- [38] EUROPEAN AUTOMOBILE MANUFACTURERS ASSOCIATION (ACEA) (2000).
- [39] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *EU-weite Grenze für Pkw-Emissionen*. Im Internet. URL: ed.europa.eu/deutschland/press/pr_releases/index_7519_de.htm (letzter Abruf: 25.08.2008).
- [40] FARRALL, S.D. und R.P. JONES: *Energy management in an automotive electric/heat engine hybrid powertrain using fuzzy decision making*. In: Proceedings of the 1993 IEEE International Symposium on Volume, 1993.
- [41] FISCHER, R.: *Elektrische Maschinen*. Hanser Fachbuchverlag, 2006.
- [42] FREYMAN, R.: *Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und aktiven Sicher-*

Literaturverzeichnis

- heitssystemen. In: Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Garching bei München, 2004.
- [43] GALLET, A., M. SPIGAI und M. HAMIDI: *Use of vehicle navigation in driver assistance systems*. In: Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2000.
- [44] GERL, B.: *Schnelle Stromdepots*. In: Pictures of the Future, Ausgabe: Herbst 2007.
- [45] GIELNIAK, M.J. und Z.J. SHEN: *Power management strategy based on game theory for fuel cell hybrid electric vehicles*. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, 2004.
- [46] GOLLOCH, R.: *Downsizing bei Verbrennungsmotoren*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [47] GOOGLE MAPS. Im Internet. URL: www.maps.google.com (letzter Abruf: 25.08.2008).
- [48] GÖPFERT, J.: *Modulare Produktentwicklung*. Deutscher Universitätsverlag, 1998.
- [49] GRAF, H.-M.: *Verfahren zum Steuern eines Antriebsstrangs eines Hybridfahrzeugs*. Europäisches Patentamt, 2002.
- [50] GROTE, C. und R. ESTER (HRSG.): *Batterien, Ladekonzepte und Stromversorgungsdesign*. WEKA Fachzeitschriften-Verlag GmbH, 2006.
- [51] GRUNDHERR, J. VON: *Möglichkeiten und Grenzen einer Online-Optimierung zur Steuerung eines hybriden Antriebsstranges*. In: Tagungsband Autoreg 2008.
- [52] HAJIMIRI, M. H. und F. R. SALMASI: *A Fuzzy Energy Management Strategy for Series Hybrid Electric Vehicle with Predictive Control and Durability Extension of the Battery*. In: Proceedings IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles, 2006.
- [53] HECKEL, J. und P. LEHNER: *Verfahren zur Erkennung eines bevorstehenden Überholvorgangs*. Patent DE 10 2005 007 800 A1, 2005.
- [54] HERZOG, HANS-GEORG: *Unterlagen zur Vorlesung Elektrische Energiespeicher*. Fachgebiet Energiewandlungstechnik, TU München, SS 2007.
- [55] HOCHKIRCHEN, T., M. EIFERT, M. RIENKS, C. RESS, A. ETEMAD und M. BOERGER: *Driving Route Situation Prediction For Vehicle Performance Optimization*. US Patent 20070010933, 2007.
- [56] HOOPS, M., K. KATES und H. KELLER: *Bewertung von Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf in Theorie, Praxis und Simulation*. In: Endbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Forschungsvorhaben FE 3.289, Technische Universität München, 1999.
- [57] HU, J.: *Bewertung von DC-DC-Topologien und Optimierung eines DC-DC-Leistungsmoduls für das 42-V-Kfz-Bordnetz*. Dissertation, RWTH-Aachen, 2003.
- [58] JEON, S.-I., S.-T. JO, Y.-I. PARK und J.-M. LEE: *Multi-mode driving control of a par-*

Literaturverzeichnis

- allel hybrid electric vehicle using driving pattern recognition*. In: Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2002.
- [59] KILLMANN, G.: *Neue Antriebskonzepte und Energieträger in Forschung und Praxis*. In: Tagungsband 1. ÖAMTC-Symposium Auto und Energie, 2006.
- [60] KLEIMAIER, A.: *Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München, 2003.
- [61] KNOLL, E. (HRSG.): *Der Elsner - Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen 2007*. Otto Elsner Verlagsgesellschaft, 2006.
- [62] KRETSCHMER, M., L. KÖNIG, J. NEUBECK und J. WIEDEMANN: *Erkennung und Prädiktion des Fahrverhaltens während eines Überholvorgangs*. IVK/FKFS Stuttgart, 2006.
- [63] KRÜGER, R.: *Systemanalytischer Vergleich alternativer Kraftstoff- und Antriebskonzepte in der Bundesrepublik Deutschland*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [64] KÖTZ, R.: *Doppelschichtkondensatoren - Technik, Kosten, Perspektiven*. In: Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, 2002.
- [65] LANGARI, R. und J.-S. WON: *Integrated drive cycle analysis for fuzzy logic based energy management in hybrid vehicles*. In: Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2003.
- [66] LANGE, S. und M. SCHIMANSKI: *Energiemanagement in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben*. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Braunschweig, 2006.
- [67] LÖFFLER, J.: *Optimierungsverfahren zur adaptiven Steuerung von Fahrzeugantrieben*. Dissertation, Institut A für Mechanik der Universität Stuttgart, 2000.
- [68] LIEBL, J. und M. HAFKEMEYER: *Intelligente Generatorregelung - ein Beitrag zur Effizienten Dynamik*. In: Tagungsband Elektroniksysteme im Automobil, Euroforum, 2006.
- [69] LINDEMANN, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Julius Springer Verlag, 2006.
- [70] MORENO, J., M.E. ORTUZAR und J.W. DIXON: *Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks*. In: IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006.
- [71] NAVTEQ WHITE PAPER: *Improved Energy Efficiency and Cruising Range through Predictive Slope Application*. Forschungsbericht, Navteq, 2007.
- [72] NÖCKER, G., K. MEZGER und B. KERNER: *Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme*. Forschungsbericht DaimlerChrysler AG, 2004.

Literaturverzeichnis

- [73] NEUGEBAUER, S.; HESS, U.; MITTERER A.; RIEGERT P.; SEIDER G.: *Das Wärmemanagement des neuen BMW-Reihensechszylindermotors*. In: MTZ - Motortechnische Zeitschrift, Ausgabe 2005-11, Seite 872ff, November 2005.
- [74] NIEDERMAYER, D.: *An Introduction to Bayesian Networks and their Contemporary Applications*. Im Internet. URL: www.niedermayer.ca/papers/bayesian/bayes.html (letzter Abruf: 17.05.2008).
- [75] OTTER, M.: *Unterlagen zur Vorlesung Simulation von elektromechanischen Systemen*. Lehrstuhl für Elektrische Antriebstechnik, TU München, WS 2006/07.
- [76] PACHERNEGG, S.: *A Closer Look at the Willans-Line*. In: Society of Automotive Engineers International Automotive Engineering Congress, 1969.
- [77] PEARL, J.: *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann, 1988.
- [78] QI, H., R.L. CHEU und D.-H. LEE: *Freeway Incident Detection Using Kinematic Data From Probe Vehicles*. In: Proceedings of the 9th World Congress on Intelligent Transportation Systems, ITS America, 2002.
- [79] REICHART, G. und E. HIPPE: *MoTiV - Fahrerassistenzsysteme*. In: Ankelin, N. (Hrsg.): *Mobilitätsforschung für das 21. Jahrhundert*. Köln: TÜV Energie und Umwelt GmbH, 2000.
- [80] RIUS, B. und R. KUBE: *Anforderungen an Elektroantriebe für Hybridfahrzeuge*. In: Tagungsband Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, 2006.
- [81] ROBERT BOSCH GMBH (HRSG.): *Autoelektrik/Autoelektronik - Systeme und Komponenten*. Friedr. Vieweg und Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2007.
- [82] ROSENMAYR, M., M. HAFKEMEYER, R. SCHMIDT, J. LIEBL und A. HEIM: *Optimiertes Batteriemangement mit dem intelligenten Batteriesensor*. In: Tagungsband 2. Internationaler Kongress Fahrzeugelektronik im Fokus, 2006.
- [83] RÖTZER, F.: *CO₂-Konzentration in der Atmosphäre nimmt schneller als erwartet zu*. Im Internet. URL: www.heise.de/bin/tp/issue/r4/dl-artikel2.cgi?artikelnr=26467&mode=html&zeilenlaenge=72 (letzter Abruf: 25.08.2008).
- [84] SCHILLER, F. und K. BENDER: *Vorlesung Modellbildung und Simulation - Teil 1: Grundlagen*. Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Institut für Informationstechnik im Maschinenwesen, Vorlesungsskript 2005.
- [85] SCHINDLER, V.: *Kraftstoffe für morgen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [86] SCHMIDT, M.: *Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs von Nebenaggregaten im Kraftfahrzeug*. In: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 537, 2003.
- [87] SCHNEIDER, J.: *Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern*

Literaturverzeichnis

- für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2008.
- [88] SCHNEIDER, J., A. WILDE und K. NAAB: *Probabilistic Approach for Modeling and Identifying Driving Situations*. In: Proceedings 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2008.
- [89] SCHOUTEN, N., M. SALMAN und N. KHEIR: *Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles*. In: IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002.
- [90] SCHRAUT, M.: *Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München, 2000.
- [91] SCIARRETTA, A. und L. GUZZELLA: *Control of hybrid electric vehicles*. In: IEEE Control Systems Magazine, Volume 27, Issue 2, 2007.
- [92] SEBILLE, D.: *Electrical Energy Management: 42v Perspective*. In: MIT 42V Meeting, 2003.
- [93] STIEGELER, M., D. NACHBAUR, S. ROHR und H. KABZA: *Strategien zum verbrauchsoptimierten Betrieb alternativer und konventioneller Fahrzeugantriebe unter Nutzung von Umgebungswissen*. In: Workshop Systemarchitekturen zur Gewährleistung sicherer und Ressourcen schonender Mobilität im Straßenverkehr, 2005.
- [94] THOMAS, K., H. DIA und N. COOTTMAN: *Simulation of Arterial Incident Detection Using Neural Networks*. In: Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Transport Systems, 2001.
- [95] TONOMURA, H. und M. SASAKI: *Potential of Super Power Capacitor as energy storage*. In: 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2006.
- [96] TÜV: *Hybridfahrzeuge - Kraft der zwei Motoren*. Im Internet. URL: www.tuv.com/de/hybridfahrzeuge.html (letzter Abruf: 25.08.2008).
- [97] VENHOVENS, P., H. RIEKER, M. SCHRAUT, K. NAAB, J. BERNASCH, J. LÖWENAU und F. REICH: *The Application of Advanced Vehicle Navigation in Bmw Driver Assistance Systems*. In: International Congress & Exposition, Detroit, 1999.
- [98] VOSS, B.: *Wirkungsgradverbesserungen von Fahrzeugantrieben durch eine bedarfsorientierte Auslegung der Nebenaggregate und ihrer Antriebe*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.
- [99] WAGNER, W. und W. SCOTT INNES: *Mehr Power für mehr Funktionen*. In: E u. E Select Automotive 2007.
- [100] WAIDHAS, M.: *Grundlegende Technologie von Doppelschichtkondensatoren, ZVEI-Workshop Frankfurt am Main*. Siemens AG, 2004.
- [101] WALLENTOWITZ, H., M. JOHANNABER und M. SCHÜSSLER: *Hybrid-Elektro-Antriebssysteme, eine Übersicht*. In: DGES-Tagung Hybridtechnologien im Auf-

Literaturverzeichnis

- schwung, Deutsche Gesellschaft für elektrische Straßenfahrzeuge, Ford Forschungszentrum Aachen, 2003.
- [102] WEISSBRICH, A.: *Elektrischer Antrieb zur Lenkunterstützung im Personenkraftwagen*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [103] WILDE, A.: *Adaptive energy management in hybrid electrical vehicles: Maintaining efficiency while improving driving performance*. In: Tagungsband Advanced Electrical Systems Conference, München, 2007.
- [104] WILDE, A. und H.-G. HERZOG: *Adaptives Energiemanagement in Hybridfahrzeugen: fahrstil- und fahrsituationsabhängige Ladestrategie zur Vermeidung von Leistungsengpässen*. In: Tagungsband 8. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentchnik, 2008.
- [105] WILDE, A., J. SCHNEIDER und H.-G. HERZOG: *Fahrstil- und fahrsituationsabhängige Ladestrategie bei Hybridfahrzeugen*. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe Nr.: 2008-05, 2008.
- [106] WON, J.-S.: *Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle*. Dissertation, Texas A&M University, 2004.
- [107] WON, JONG-SEON und R. LANGARI: *Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle*. In: Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.
- [108] ZENTRUM FÜR VERKEHR DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG (HRSG.): *Hybridfahrzeuge und Energiemanagement - Beiträge zum gleichnamigen 1.Braunschweiger Symposium*. VDI Verlag GmbH, 2002.